





ISBN: 978-9922-726-75-5

WELL TESTING
فحوصات الآبار النفطية والغازية

تأليف
د. علي حسين جواد

الجزء الثاني
بغداد - 2026

منشورات

مركز البحوث والدراسات والنشر

جامعة الكوت

٦٢٢ / ٣٣

ج ٩٢٣ جواد ، علي حسين .

فحوصات الابار النفطية والغازية / علي حسين جواد،

. - ط١. - بغداد: مطبعة جامعة الكوت، ٢٠٢٦ .

ج٢ (٦٧٦ ص) ؛ ٢٤ سم .

١ - البترول - ابار - ٢ - الغاز - أبار - أ - العنوان

رقم الايداع

١٥٦١ / ٢٠٢٦

المكتبة الوطنية/الفهرسة اثناء النشر

رقم الايداع في دار الكتب والوثائق ببغداد

١٥٦١ لسنة ٢٠٢٦م

ISBN: 978-9922-726-75-5

ملاحظة

مركز البحوث والدراسات والنشر في كلية الكوت الجامعة
غير مسؤول عن الافكار والرؤى التي يتضمنها الكتاب
والمسؤول عن ذلك الكاتب او الباحث فقط.

University of Kut

مطبعة جامعة الكوت

بِسْمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحْمَٰنِ ٱلرَّحِيمِ

" وَإِذَا سَأَلَكَ عِبَادِى عَنِّي فَإِنِّى قَرِيبٌ أُجِيبُ دَعْوَةَ ٱلدَّاعِ إِذَا دَعَانِ فَلْيَسْتَجِيبُواْ لِى وَلْيُؤْمِنُواْ بِى لَعَلَّهُمْ يَرْشُدُونَ"

صدق الله العظيم

شكر و تقدير

يسرني أن أتقدم بالشكر والامتنان إلى جامعة الكوت ، ممثلةً بالأستاذ الدكتور الفاضل طالب زيدان الموسوي رئيس مجلس إدارة الجامعة و الأستاذ الدكتور الفاضل فاخر جبر المحمداوي رئيس جامعة الكوت و الأستاذ الدكتور الفاضل صبيح التميمي مدير مركز البحوث والدراسات والنشر في الجامعة على دعمهم الكريم ومساهمتهم القيّمة في إعداد ونشر هذا الكتاب.

إن نشر هذا العمل الأكاديمي ما كان ليتم لولا البيئة الداعمة التي توفرها الجامعة والتي تشجع على الإبداع والبحث وتنمية المعرفة. كما أود أن أعبّر عن خالص امتناني لجميع الأساتذة والإخوة الموظفين الذين ساهموا بجهدهم و معرفتهم في تسهيل مهمة نشر هذا الكتاب.

أتمنى أن يكون هذا العمل المتواضع إضافة علمية مفيدة للمكتبة العربية، وأن يسهم في إثراء المعرفة في مجال فحوصات الآبار Well Testing.



د.علي حسين جواد دكتوراه في هندسة النفط/هندسة المكامن النفطية والغازية من جامعة كوبكن / روسيا الاتحادية - 2005. مدير قسم الدراسات المكمنية الجنوبية 2011 و مديرقسم الدراسات المكمنية الشمالية 2019 في دائرة المكامن و تطوير الحقول - مركز وزارة النفط العراقية. عضو في مجلس ادارة شركة نفط ميسان - 2013 . مدرس في جامعة الكوت - قسم الهندسة الكيمياوية وتكرير النفط.

اهداء

الى عائلتي الغالية...

أهديهم ثمرة هذا الجهد المتواضع.

تمهيد

لا شك أن فحوصات الآبار النفطية والغازية تُعد من الركائز الأساسية في الصناعة النفطية لما لها من دور حاسم في ضمان إنتاج مستدام و فعّال للابار . فهذه الفحوصات ليست مجرد اختبارات روتينية بل هي أداة رئيسية تُقدم معلومات دقيقة حول سلوك المكمن وخواصه، مما يسهم بشكل مباشر في اتخاذ قرارات استراتيجية مدروسة لتحسين الأداء التشغيلي وزيادة العائدات الاقتصادية وفي الوقت نفسه تقليل المخاطر البيئية والتشغيلية.

خلال العقد الماضي ، شهدت طرق تحليل فحوصات الآبار تطورًا كبيرًا، حيث ان التقدم في تقنيات القياس إلى جانب التطور الملحوظ في أدوات معالجة البيانات قد ساهم في جعل هذه الفحوصات أكثر دقة وملائمة للتطبيق العملي. ومع هذا التطور، ظهرت أساليب جديدة لتفسير البيانات بمساعدة برامج الحاسوب و الذكاء الاصطناعي ، مما مكن المهندسين من تحليل بيانات الفحوصات ذات الخصائص المعقدة في وقت قياسي و تقديم توصيف دقيق لخصائص المكمن والبئر.

يأتي هذا الكتاب كمرجع علمي وتطبيقي موجه إلى الطلاب و الاساتذة في المعاهد والكليات النفطية و الى المهندسين المختصين في تفسير فحوصات الآبار في مواقع العمل .

و الكتاب بجزئيه (الاول و الثاني) يغطي بالتفصيل فحوصات الآبار العمودية , سواء كانت نفطية أو غازية أو مخصصة لحقن المياه ، كما و يتطرق إلى شرح و تفصيل مجموعة واسعة من أنواع الفحوصات مثل:

فحوصات تصاعد الضغط (Build-up Test) ، فحوصات هبوط الضغط (Drawdown Test) ، فحوصات التداخل (Interference Test) ، فحوصات النبض (Pulse Test) ، فحوصات متعددة الجريان (Multi-Rate Test) ، فحوصات الغاز (Gas Deliverability Test) ، فحوصات الحقن (Injectivity Test) ، فحوصات الآبار المتشققة (Hydraulically Fractured Wells) ، الفحص الطبقي (DST - Drill Stem Test) وغيرها من الفحوصات.

كما و يقدم الكتاب طرقًا و تقنيات مختلفة في تحليل وتفسير فحوصات الآبار المائلة والأفقية ويخصص فصولًا لأنواع المكامن سواء كانت متجانسة أو معقدة. حيث تتنوع الطرق المستخدمة للتفسير من الطرق التقليدية و مشتقة الضغط (مشتقة بورديت) و طريقة تطابق المنحنيات النوعية (Type Curve Matching) و طريقة فك الالتفاف (Deconvolution) و اخيرا تفسير فحوصات الابار باستخدام الذكاء الاصطناعي.

يشتمل الكتاب أيضًا شرح تفصيلي لأنماط الجريان المختلفة (Flow Regimes) التي تظهر خلال الفحص والتي تلعب دورًا محوريًا في تفسير البيانات، كما يناقش الظواهر المرتبطة بالبئر

نفسه مثل معامل تخزين البئر (Wellbore Storage) وعامل القشرة (Skin Factor) وكيفية التعامل معها و معالجتها عند التفسير. و نظراً لحجم المعلومات الواسعة التي يحتويها الكتاب فقد تم تقسيمه إلى جزأين: الجزء الأول يضم 16 فصلاً والجزء الثاني احد عشر فصل.

وإيماناً من المؤلف بأن أفضل وسيلة لنقل المعلومة هي عبر العرض المرئي ، فقد حرص الكتاب على استخدام عدد كبير من الرسوم البيانية والتوضيحية التي تسهل فهم المسائل المعقدة مقارنةً بالعرض الرقمي أو الجدولي. كما أن تنوع الأمثلة والمسائل المحلولة المقدمة في كل فصل يُعد عنصرًا أساسيًا في تعزيز استيعاب القارئ ويوفر له خيارات متعددة في التفسير مدعومة بمناقشات فنية واقعية.

و على الرغم من كون البرامج الجاهزة اداة مهمة في تفسير فحوصات الآبار لما توفره من سهولة وسرعة في التنفيذ، إلا أن الأولوية تبقى لفهم فحوصات الابار تفصيليا , بدء" من تصميم الفحص ، تنفيذه وتفسيره. و لا يمكن القبول مباشرة" بمخرجات البرامج الجاهزة دون التحقق من صحتها ومدى ملاءمتها للواقع وهو أمر لا يتحقق إلا بوجود مفسر ذي خبرة نظرية تتعلق بإتقان الموديلات و المعادلات المستخدمة في التفسير وفرضياتها و خبرة تطبيقية قائمة على الفهم الفني العميق لأساليب التفسير ومدى ملاءمتها للظروف الجيولوجية والهندسية الخاصة بكل مكمن وبئر.

تم اختيار اللغة العربية للكتابة تيسيرًا على القارئ العربي في فهم واستيعاب فحوصات الابار و الاستعانة بقواميس نفطية وعلمية موثوقة لضمان دقة الترجمة و الحفاظ على المعنى الدقيق للمفاهيم والمصطلحات ذات العلاقة بفحوصات الابار. تم استخدام المصطلحات والمعادلات باللغة الإنجليزية و ذلك لتسهيل التواصل مع المصادر الاجنبية الخارجية عند الضرورة. اعداد الكتاب هذا يُعد المحاولة ألاولى في التأليف ، لذلك و برغم العناية و البحث فإن المؤلف يتوقع وجود بعض الأخطاء اللغوية أو بعض الاخطاء في ترجمة المصطلحات والرموز .

أخيرًا نتمنى أن يكون هذا العمل المتواضع إضافة مفيدة إلى المكتبة العربية التي ما زالت تفتقر إلى كتب باللغة العربية مختصة في مجال النفط والصناعة النفطية ..

الفهرس-Content

الفصل الاول: فحص الابار المتشققة هيدروليكيا	**1**
Well Test Analysis for Hydraulically Fractured Wells	
1-1 المقدمة	1
1-2 أهمية التشقق الصناعي	1
1-3 الظروف الجيولوجية المثالية للتشقق	2
1-4 تطور تقنية التشقق الهيدروليكي	3
1-5 تصميم التشقق الهيدروليكي للابار	3
1-6 أهمية فحص الآبار المتشققة	3
1-7 موديل الشقوق العمودية Vertical fractures	4
1-8 انظمة الشقوق العمودية Fractures Systems	6
1-8-1 الشق العمودي ذات التوصيلية اللامتناهية او اللامحدودة – Infinite conductivity vertical fracture	7
1-8-2 الشق العمودي بالتدفق المنتظم - Uniform flux fracture	7
1-8-3 الشق العمودي ذات التوصيلية المحدودة او المتناهية Finite conductivity vertical fractures	8
1-9 تفسير فحوصات الابار المتشققة	10
1-9-1 الطريقة التقليدية (العادية) Conventional method	10
1-9-2 طريقة تطابق المنحنيات النوعي Type curve matching	32
1-9-3 -تفسير فحوصات الابار المتشققة بطريقة التوليف المباشر لتياب-Tiab's Technique Direct Synthesis (TDS)	51
1-10 حالات خاصة	70
1-11 تفسير فحوصات الابار المتشققة افقيا من تطابق المنحنيات– Horizontal fractured oil wells	79
1-11-1 اطوار الجريان المصاحبة لفحص الابار المتشققة افقيا	80
1-11-2 تفسير الابار المتشققة افقيا بطريقة تطابق المنحنيات - رامي و كرينكارتن	81
الفصل الثاني: فحص المكامن المتشققة طبيعيا	**91**
Well Testing for Naturally Fractured Reservoirs	
2-1 المقدمة :	91

2-2 تكوين المكمن المتشقق 92
3-2 مؤشرات تمييز المكامن المتشققة طبيعيًا 93
4-2 الغرض من فحوصات الابار في المكامن المتشققة 95
5-2 أنظمة المكامن المتشققة طبيعيًا 95
6-2 درجة تعقيد المكامن المتشققة 96
7-2 معادلة سلوك الضغط للمكامن المتشققة 97
8-2 المعاملات الأساسية في النظام المزدوج Dual porosity 97
9-2 تفسير فحوصات المكامن المتشققة طبيعيًا 100
1-9-2 الطريقة التقليدية الاعتيادية (نصف لوغاريتمية) 101
2-9-2 تفسير فحوصات المكامن المتشققة بطريقة بورديت 107
1-2-9-2 المنحنيات النوعية لبورديت - المجموعة الاولى 110
2-2-9-2 المنحنيات النوعية لبورديت - المجموعة الثانية 116
3-9-2 تقنية التوليف المباشر – طريقة تياب (Tiab Direct Synthesis - TDS) 127
1-3-9-2- الفرضيات الأساسية 128
2-3-9-2- المعادلات الأساسية 128
3-3-9-2- العلامات التشخيصية على المنحنى 129
4-3-9-2- خطوات تفسير بيانات الفحص بطريقة تياب من دون تاثير تخزين البئر 130
5-3-9-2- تاثير عامل تخزين البئر على بيانات الفحص Wellbore storage effects 133
6-3-9-2- خطوات تفسير الفحص - طريقة تياب بوجود تاثير تخزين البئر 134
10-2 حساب بعض خواص الشق من تخطيط (مجسات) الابار well logs 151
11-2 حساب مسامية الشق ، عرض الشق و معدل نفاذية المكمن 153

الفصل الثالث:فحوصات حقن الابار Injection Well Testing 162
1-3 المقدمة 162
2-3 أهمية فحوصات الحقن Injection Test Importance 162
3-3 تطبيقات فحوصات الحقن 163
1-3-3 فحص قابلية الحقن (Injectivity Test) 164
1-1-3-3 الطريقة التقليدية في تفسير فحص قابلية حقن البئر 166
2-1-3-3 طريقة تطابق المنحنيات في تفسير فحص قابلية حقن البئر 172
2-3-3 : فحص انحدار الضغط (Falloff Test) 178

3-3-2-1 الطريقة التقليدية في تفسير فحص انحدار الحقن 179
3-3-2-2 تفسير الفحص بطريقة ميلر – دايز – هاتشينسون (MDH) 180
3-4 فحوصات الحقن في نظام الانسيابية لا يساوي الواحد 187
3-4-1 تاثير نسبة الانسيابية- M على سلوك الفحص 189
3-4-2 تفسير فحوصات الحقن عند نسبة الانسيابية لا تساوي الواحد 191
3-4-2-1 طريقة ميريل Merril et al 191
3-4-2-2 طريقة أكاروال و يا 1989) (Yeh and Agarwal 196
3-5 فحص الحقن التدريجي (Step-rate Injectivity Test) 199
3-6 تحديد ضغط التشقق التقريبي قبل الفحص 202
3-7 تحديد معدل الحقن قبل الفحص و بشكل تقريبي 203
3-8 العوامل المؤثرة في تفسير فحص الحقن التدريجي 204
3-9 استخدام بيانات فحص تدرج الحقن في حساب نفاذية الطبقة المكمنية و عامل القشرة 205

الفصل الرابع :الفحص الطبقي- Drill Stem Test DST **210**
4-1 المقدمة 210
4-2 أهمية الفحص الطبقي 210
4-3 الهدف من الفحص الطبقي 210
4-4 الفرق بين الفحص الطبقي والفحوصات الإنتاجية 211
4-5 معدات جهاز الفحص الطبقي 211
4-6 مراحل إجراء الفحص (DST Procedure) 211
4-7 اساسيات الفحص الطبقي 213
4-8 انواع الفحص الطبقي 215
4-9 مخطط الفحص الطبقي- DST Chart 216
4-10 تقييم تضرر الطبقة المكمنية من خلال مخططات الفحص DST chart 219
4-11 تحديد جودة الفحص من خلال مخططات الفحص DST Chart 220
4-12 تقييم نفاذية المكمن باستخدام مخطط الفحص DST Chart 223
4-13 المشاكل المصاحبة لعملية الفحص الطبقي 225
4-14 نموذج تقرير فحص DST لبئر غازي 229
4-15 التحقق من صحة وتطابق بيانات تقرير الفحص الطبقي 229

16-4 حساب معدل الجريان 231
17-4 طرق تحليل و تفسير الفحص الطبقي DST analysis methods 232
1-17-4 طريقة هورنر و ميللر 232
2-17-4 طريقة كوريا و رامي – Correa and Ramey's Method (1987) 237
18-4 اسباب فشل الفحص الطبقي و امكانية تلافيها 239

الفصل الخامس : فك الالتفاف – Deconvolution 241
1-5 المقدمة 241
2-5 التطور التاريخي لتفسير فحوصات الابار 241
3-5 مزايا فك الالتفاف Deconvolution 242
4-5 دالة الضغط لوحدة الجريان Unit rate pressure function- pu 246
5-5 الالتفاف (Convolution) 247
1-5-5 اهمية الالتفاف Convolution 247
2-5-5 الصيغة الرياضية العامة للالتفاف Convolution 247
3-5-5 تهيئة بيانات الإدخال 249
4-5-5 حساب الالتفاف 251
6-5 فك الالتفاف - Deconvolution 253
7-5 تصنيف طرق فك الالتفاف Classification of Deconvolution Methods 254
1-7-5 الطرق الطيفية Spectral Methods 254
1-1-7-5 ميزات الطرق الطيفية 256
2-1-7-5 العيوب 256
2-7-5 طرق المجال الزمني Deconvolution in Time Domain 256
1-2-7-5 طرق فك الالتفاف التقليدية 257
Classical Deconvolution
2-2-7-5 طرق فك الالتفاف الحديثة (غير المباشرة) 259
Modern Deconvolution(Indirect)
1-2-2-7-5 طريقة فون شروتر Von Schroeter 2004. 260
2-2-2-7-5 طريقة ليفتن (Levitan 2005) 277
8-5 إزالة التشوّيش في بيانات الفحص من جراء تأثير تخزين البئر 287
1-8-5 طريقة توحيد المعدل - Straight-line Approximation 289

Rate Normalization
5-8-2 فك الالتفاف بموازنة المادة - Material Balance Deconvolution 293
5-8-3 فك التفاف دالة البيتا β -Function Deconvolution 295

الفصل السادس: فحص الابار الافقية Horizontal Wells Testing 314
6-1 المقدمة 314
6-2 المميزات والخصائص الفنية للآبار الأفقية (Horizontal Wells) 314
6-3 أهداف فحوصات الآبار الأفقية 316
6-4 محددات استخدام الآبار الأفقية 316
6-5 معرقلات تفسير فحوصات الآبار الأفقية (Horizontal Well Testing) 316
6-6 تقييم وتحليل بيانات فحوصات الآبار الأفقية 317
6-7 الجريان المستقر للابار الافقية Steady-State Flow-SSF 318
6-7-1 طريقة جوشي 1991)(Josh Method) 318
6-7-2 طريقة جيجر و جماعته 1984)(Giger etal. Method) 320
6-7-3 طريقة بوريسوف 1984)(Borisov Method) 320
6-7-4 طريقة رينارد و ديبي 1990)(Renard and Dupay Method) 321
6-8 الجريان شبه المستقر في الابار الافقية Pseudo-Steady-State Flow 328
6-8-1 التوصيلية داخل جوف البئر - Wellbore Conductivity 329
6-8-2 دليل الانتاجية للابار الافقية عند الجريان شبه المستقر
- Pseudo-Steady-State Productivity 333
6-8-3 حساب معدل الجريان لطور الجريان شبه المستقر في الابار الافقية الغازية 342
6-9 الجريان اللامستقر USS في الابار الافقية – طريقة اوزكان Ozkan 345
6-9-1 الجريان الشعاعي في المستوى العمودي Radial flow in vertical plane 350
6-9-2 طور الجريان الخطي Linear flow regime 356
6-9-3 طور الجريان الشعاعي المتاخر Late Radial Flow LRF 359
6-10 تاثير تخزين البئر على سلوك فحص الابار الافقية 382

الفصل السابع :فحص الابار المائلة - Inclined well testing 387
7-1 المقدمة 387
7-2 أهمية فحص الآبار المائلة 387
7-3 تحليل فحوصات الآبار المائلة بطريقة سينكو (Cinco، 1975) 389

4-7 اطوار الجريان خلال فحص البئر المائل Flow Regimes 390
1-4-7 طور الجريان الشعاعي المبكر Early Radial Flow-ERF 391
2-4-7 طور الجريان الكروي Intermediate Spherical Flow- ISF 392
3-4-7 طور الجريان الشعاعي المتأخر Late Radial Flow-LRF 393
5-7 ملاحظات عن فحوصات الابار المائلة 406
6-7 تاثير زاوية الميلان و نسبة اختراق البئر على سلوك الضغط المقاس عبر الفحص 407

الفصل الثامن :فحص قابلية توصيل الغاز 412
Deliverability Testing of Gas Wells
1-8 المقدمة : 412
2-8 استخدامات فحوصات قابلية توصيل الغاز GDT 413
3-8 أنواع فحوصات قابلية توصيل الغاز 416
GDT Types of Gas Deliverability Testing
1-3-8 فحص الضغط العكسي Back pressure test 416
2-3-8 الفحص متساوي الفترات الزمنية - Isochronal test 428
3-3-8 الفحص متساوي الفترات الزمنية المُعدل - Modified Isochronol test 437

الفصل التاسع: تفسير فحوصات الابار بمساعدة الحاسوب 458
Computer aided analysis
1-9 المقدمة 458
2-9 خطوات سير العمل في تفسير فحص الابار 459
Well Test Interpretation Workflow
1-2-9 تجميع البيانات 461
2-2-9 مراجعة البيانات وضبط الجودة 464
3-2-9 فك بيانات الفحص (Deconvolve test data) 469
4-2-9 تمييز اطوار الجريان Identify Flow Regimes 470
5-2-9 اختيار و تمييز الموديل المكمني- 496
Select and Identification Reservoir Model
6-2-9 تحديد معاملات الموديل Estimate Model Parameters 497
7-2-9 المحاكاة و تطابق الضغط المقاس 498
8-2-9 تحديد فترات الثقة Calculate Confidence Intervals 509

9-2-9 التحقق من صحة النتائج Validate Results 511

الفصل العاشر: تفسير فحوصات الآبار باستخدام الذكاء الاصطناعي 526

10-1 المقدمة 526

10-2 مقارنة التفسير بالذكاء الاصطناعي مع طرق التفسير الاخرى 429

10-3 مفاهيم أساسية في الذكاء الاصطناعي لفحوصات الابار 530

10-3-1 - تعلم الآلة (Machine Learning - ML) 530

10-3-2 التعلّم العميق (Deep Learning) 534

10-3-3 نماذج تعلُّم الآلة الاخرى الخاضعة للإشراف 536

10-3-3-1: النماذج الخطية (Linear Models) 537

10-3-3-2 : النماذج غير الخطية (Non-Linear Models) 538

10-3-4 : مقارنة بين نماذج تعلم الآلة في تفسير فحوصات الآبار 548

10-4 : تصميم نموذج ذكي لتفسير فحوصات الآبار(Designing an AI Model) 550

10-4-1 : تعريف المشكلة (الهدف) (Problem Formulation) 550

10-4-2 : إعداد وتهيئة البيانات لما قبل التدريب(Data Pre-processing) 550

10-4-2-1 : مصادر البيانات Data Sources 550

10-4-2-2 : أخذ العينات (Sampling) 552

10-4-2-3 : تنظيف البيانات Data Cleaning 553

10-4-2-4 : دمج البيانات (Data Integration) 553

10-4-2-5 : تحويل البيانات (Data Transformation) 555

10-4-2-6 : هندسة السمات Feature Engineering 556

10-4-2-7 : تقليل الأبعاد Data or Dimensionality Reduction 559

10-4-3 : تحديد منهجية الموديل (AI Modeling Strategy) 560

10-4-3-1 : ترميز البيانات وتحديد الأهداف 560

10-4-3-2 : موازنة الفئات المكمنية (Reservoir Class Balancing) 561

10-4-3-3 : تقسيم البيانات(Data Splitting) 562

10-4-3-4 : اختيار خوارزمية التعلم الآلي المناسبة 562
10-4-4 : مرحلة تدريب الشبكات العصبية Training Phase 563
10-4-5 : مقارنة بين تدريب الشبكات العصبية و نماذج التعلم الآلي التقليدية الاخرى 564
10-4-6 مرحلة التحقق Validation Phase 569
10-4-7 : مرحلة الاختبار Testing Phase 571
10-4-8 : نشر النماذج الذكية في فحوصات الآبار:
من التقييم المختبري إلى التطبيق الميداني 579
10-4-9 منصّات مساعدة في بناء نماذج الذكاء الاصطناعي 581
10-5 التحديات والاعتبارات في تفسير فحوصات الآبار بتطبيق الذكاء الاصطناعي 596

الفصل الحادي عشر: تصميم فحص الابار Well Test Design 599
11-1 المقدمة : 599
11-2 سيناريوهات تصميم فحوصات الابار 601
11-3 اساسيات تصميم فحص الابار 602
11-3-1 تعريف الغرض من الفحص - Define Test Objectives 603
11-3-2 اختيار نوع الفحص المناسب 605
11-3-3 تجميع البيانات Data collection 605
11-3-4 تخمين الخصائص المكمنية Estimate Reservoir Properties 606
11-3-5 تخمين طول الفترة للوصول لاطوار الجريان المتوقعة 610
11-3-6 تخمين معدل الجريان Estimate Test Rate 617
11-3-7 تخمين استجابة الضغط- Estimate Test Pressure Response 620
11-3-8 مقاييس الضغط- pressure gauges 621
11-3-9 وضع خطة التنفيذ والسلامة. 623
11-3-10 توقع النتائج باستخدام برامج المحاكاة 623
الملحق- APPENDIX A - جدول المعالجات الرياضية لعمليات معالجة البيانات 651
الملحق- APPENDIX A - تحويل الوحدات 655
الملحق – APPENDIX B - تسمية الرموز الاغريقية 662

الفصل الاول

فحص الابار المتشققة هيدروليكيا Well Test Analysis for Hydraulically Fractured Wells

1-1 المقدمة:

تُعد عملية التشقق الهيدروليكي (Hydraulic Fracturing) للابار واحدة من أكثر تقنيات تحفيز و زيادة انتاج الآبار استخدامًا في صناعة النفط والغاز، خاصة في المكامن ذات النفاذية المنخفضة مثل مكامن النفط الصخري والغاز غير التقليدي. تهدف هذه العملية إلى زيادة إنتاجية البئر عبر خلق مسارات واسعة داخل المكمن تسهل تدفق الهيدروكربونات نحو البئر.

مع ذلك، فإن نجاح هذه العملية لا يُقاس فقط بزيادة الإنتاج، بل أيضًا عبر فهم سلوك المكمن بعد التشقق ، وهنا يأتي دور فحص الآبار المتشققة هيدروليكيًا (Well Testing of Fractured Wells) كأداة حيوية في تقييم فعالية عملية التشقق ، أبعاد الشق (الطول، القدرة على التوصيل) ، توزيع الضغط حول الشقوق و تأثيره على خصائص المكمن.

يتم استحداث الشقوق أو التصدعات صناعيا في المكامن باستخدام تقنيات متعددة، أبرزها التشقق الهيدروليكي(Hydraulic Fracturing) ، والذي يعتمد حقن الماء المخلوط بمواد ساندة مثل الرمل أو الحصى أو البوليمرات بضغط عالٍ يتجاوز ضغط تشقق(او تكسر) الطبقة (Fracture Pressure). حقن المواد الساندة هذه يساعد على إبقاء الشقوق مفتوحة وتمنع انغلاقها لضمان استمرارية تدفق الموائع باتجاه البئر و تحسين انتاجية البئر.

كما يُمكن تحفيز التشقق صناعيًا عبر عملية التشقق الحامضي (Acid Fracturing) ، إذ يتم حقن الحامض مثل حامض الهيدروكلوريك (HCl) بضغط عال داخل الطبقة المكمنية، يؤدي إلى تشقق و إذابة بعض الصخور وتحفيز إنتاجية البئر كما في الشكل A-1-1 .

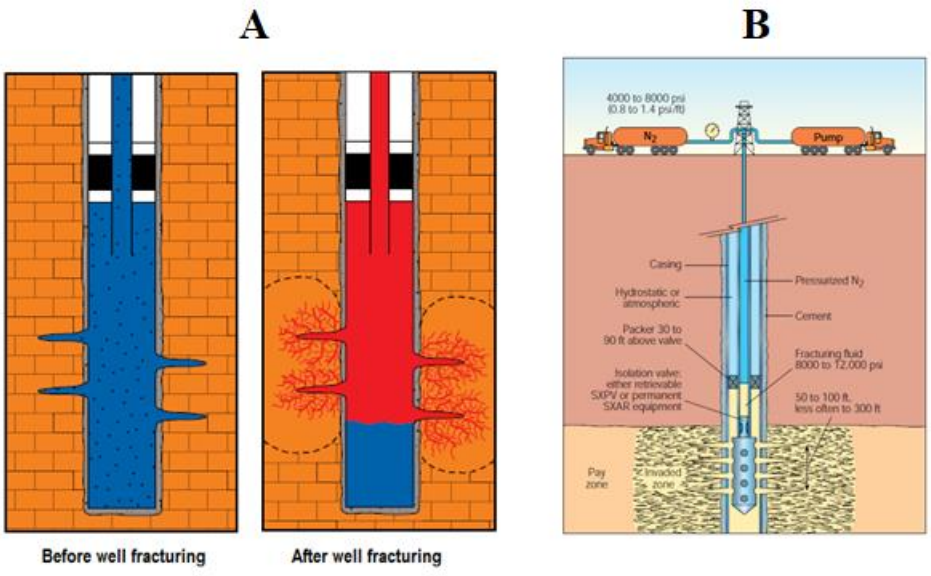
ومن الأساليب الحديثة في التشقق الصناعي ، تقنية تُعرف باسم الانثقاب الشديد(Extreme Overbalance Perforation – EOP) إذ يحقن غاز النيتروجين عبر فتحات التثقيب بضغط عالٍ يفوق ضغط التشقق الطبيعي للطبقة (ضغط بحدود 4000 psi). يتسبب ذلك بنمو شقوق داخل الطبقة و الذي يزيد من نصف قطر الفعال للبئر و تحسين الإنتاجية وتعزيز تدفق الموائع إلى داخل البئر الشكل B-1-1.

يُطلق على هذه العمليات مصطلح التشقق الصناعي او التكسير الصناعي لتمييزها عن التشقق الطبيعي (Natural Fracturing) ، الذي ينشأ طبيعيا بفعل الحركات الجيولوجية للقشرة الأرضية.

2-1 أهمية التشقق الصناعي:

يُعد التشقق الصناعي أحد أبرز تقنيات **تحفيز الآبار** (Well Stimulation) و تتمثل الفكرة الأساسية في خلق شقوق صناعية داخل التكوين المكمني، مما يؤدي إلى رفع النفاذية الموضعية بشكل ملحوظ يؤدي ذلك الى توسع نصف قطر التصريف الفعّال للبئر (Effective Drainage Radius) و حسب المعادلة ادناه:

$$r_{wa} = x_f/2 = r_w e^{-s} \quad \text{---------- 1}$$



الشكل 1-1 : A بئر عمودي قبل و بعد التشقق ' B

تتشكل الشقوق الصناعية عادةً بشكل عمودي على طول المستو ألاقل إجهادا (Minimum Principal Stress) للطبقة المكمنية ، بمعنى التي تَحكم اتجاه الشقوق هي ثلاثة إجهادات رئيسة :

1- الإجهاد الرأسي (σ_v Overburden Stress) :ناتج عن وزن العمود الصخري فوق المكمن.

2- الإجهاد الأفقي الأكبر (σ_H Maximum Horizontal Stres) : يتأثر بالقوى التكتونية وخواص الصخور.

3- الإجهاد الأفقي الأصغر (σ_h Minimum Horizontal Stres) : يُعتبر العامل الحاسم في تحديد اتجاه الشق الهيدروليكي.

إذا كان الإجهاد العمودي أكبر من الإجهادات الأفقية ($\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$) فإن الشق يكون عمودي. التكوينات العميقة و التي يزيد عمقها عن 3000 قدم، عادة ما يكون σ_v عالي ما يؤدي في معظم الاحوال إلى نشوء شقوق عمودية .

اما إذا كانت الإجهادات الأفقية أكبر من الإجهاد العمودي ($\sigma_v < \sigma_H < \sigma_h$)، كما في بعض المكامن الضحلة أو ذات الضغوط الجانبية العالية، فإن الشق على الاغلب يكون أفقي.

3-1 الظروف الجيولوجية المثالية للتشقق:

تُجرى عمليات التشقق الصناعي عادةً في الصخور ذات النفاذية المنخفضة مثل المكامن الكلسية (Limestone Reservoirs) إذ تكون النفاذية أقل من 1 ملي دارسي \ k<1 md) حيث تُعد هذه المكامن شديدة الصلادة و التماسك (Tight Reservoirs) و تُعتبر من أكثر المكامن المرشحة بكفاءة لهذه التقنية لعدة عوامل أبرزها:

- احتواؤها على كميات كبيرة من النفط أو الغاز .
- وجود ضغط مكمني متوسط إلى مرتفع.

- انتشار التكوين واتساعه أفقيا.
- توفر حواجز جيولوجية طبيعية تحدّ من التمدد الرأسي للشقوق، مما يساعد على توجيه الشق أفقيًا وزيادة كفاءته.

4-1 تطور تقنية التشقق الهيدروليكي:

بدأت تقنية التشقق الهيدروليكي بالظهور في خمسينيات القرن الماضي كحل هندسي لمعالجة الأضرار الميكانيكية (زيادة عامل القشرة) و التي تؤثر في كفاءة و انتاجية الطبقات المكمنية ذات النفاذية العالية. ومع تطور الفهم الهندسي والجيولوجي لسلوك التكوينات الصخرية، شهدت ستينيات القرن العشرين إدخال السوائل الهلامية (Gelled Water Fluids) ، التي أثبتت فعاليتها في تطبيق عمليات التكسير في آبار النفط والغاز، بغض النظر عن مستويات النفاذية.

وفي سبعينيات وثمانينيات القرن الماضي، توسع نطاق استخدام التشقق الهيدروليكي ليشمل المكامن منخفضة النفاذية (Low-Permeability Reservoirs) وصولًا إلى التكوينات شديدة الانغلاق ذات النفاذية في حدود المايكرو دارسي (Microdarcy Scale) ، مما عزز إمكانيات استغلال الموارد الهيدروكربونية غير التقليدية.

شهدت تسعينيات القرن العشرين تقدمًا نوعيًا في تصميم وتشغيل عمليات التشقق، وذلك عبر التكامل بين تحسين هندسة تصميم التكسير وتقنيات منع انسداد الشقوق، لا سيما باستخدام تعبئة الحصى .(Gravel Packing) ساهم هذا الدمج في تكوين شقوق أكثر اتساعًا و توصيليّة (Conductivity) عالية فعالة ، مما زاد من كفاءة الاتصال بين المكمن وتجويف البئر.

وبفضل هذه التحسينات، رَسخت تقنية التشقق الهيدروليكي مكانتها كأداة استراتيجية في تطوير الحقول النفطية والغازية، إذ تُستخدم اليوم في أكثر من مليون بئر في الولايات المتحدة، وأكثر من مليوني بئر على مستوى العالم، مما يعكس دورها الحيوي في استدامة الإنتاج وتحسين مردود الاستخلاص من المكامن الهيدروكربونية.

5-1 تصميم التشقق الهيدروليكي

تصميم عمليات التشقق الهيدروليكي للابار يأخذ في الاعتبار عدة عوامل، من بينها:

- طول أو ارتفاع الشق (Fracture Length/Height) .
- الشكل الهندسي للشق (Fracture Geometry) .
- اتجاه الشق (Fracture Orientation) .

تُعد هذه العوامل ضرورية في تحديد عدد الآبار والمسافات فيما بينها عند تنفيذ خطط تطوير الحقول النفطية .

6-1 أهمية فحص الآبار المتشققة:

فحص الآبار المتشققة يُعد أمرًا ضروريًا ، إذ يساهم في:

- تقييم كفاءة عملية التشقق وبالتالي التنبؤ بالقابلية الانتاجية للبئر.
- تحديد خصائص الصخور المكمنية.
- تقدير عرض وطول الشقوق المتكونة.

عادة ما يتم تنفيذ فحوصات الابار **قبل وبعد** عملية التشقق لتقييم الأداء وتحسين عمليات التكسير اللاحقة. كما تساعد مخرجات الفحص في تصميم عمليات التشقق المستقبلية سواء للبئر نفسه أو للآبار المجاورة، إذ يُمكن أن تدل نتائج الفحص إلى الحاجة لتنفيذ تشققات بأبعاد أكبر في الطبقات ذات النفاذية شديدة الانخفاض لتحقيق مردود اقتصادي اعلى.

7-1 موديل الشقوق العمودية Vertical fractures

ان موديل الشقوق في المكامن العميقة يكون من النوع العمودي و باتجاه مواز لحفرة البئر (الشكل1-2 و 1-3) اذ يغطي الشق العمودي سُمك الطبقة المكمنية بالكامل . يكون الشق متناظر على جانبي البئر و يُعبر عن ذلك بمستطيلين متناظرة كل مستطيل (الشق) له نفس الطول والسُمك والارتفاع والاتجاه .

ان الفرضيات اعلاه تُستخدم عند تفسير فحوصات الابار المتشققة العمودية و على الرغم من انها تحتاج للتحقق لكنها مقبولة رياضيا.

عادة ما يُوصف الشق و يُمثل بالخواص الاتية :

- عرض الشق - fracture width، w_f
- نصف طول الشق - fracture half length، x_f
- نفاذية الشق - fracture permeability، k_f
- قابلية التوصيل للشق - fracture conductivity-Fc، $Fc = w_f \times k_f$

و لنفس الغرض تستعمل عدد من المعاملات اللابعدية للشق الهيدروليكي العمودي منها:

معامل الانتشار اللابعدي للشق ويساوي :

$$\eta_{fD} = \frac{k_f \phi c_t}{k \phi_f c_{ft}} \quad \text{---------- 2}$$

الزمن اللابعدي للشق :

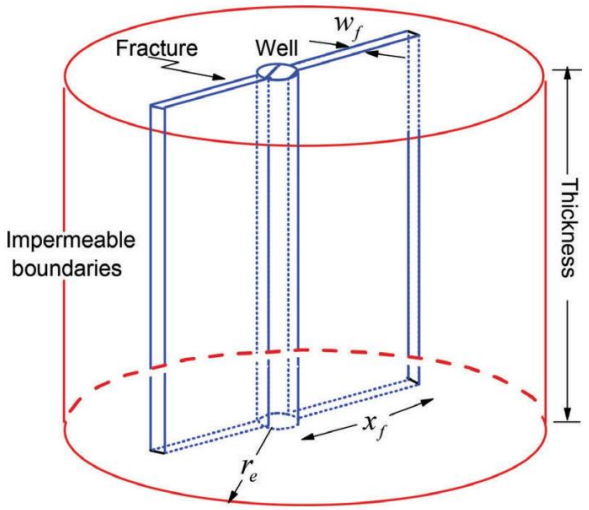
$$t_{Dx_f} = \left[\frac{0.0002637k}{\phi \mu c_t x_f^2}\right] t = t_D \left(\frac{r_w^2}{x_f^2}\right) \quad \text{---------- 3}$$

معامل التوصيل اللابعدي للشق (هو قابلية الشق للسماح للمائع بالمرور عبره) يساوي :

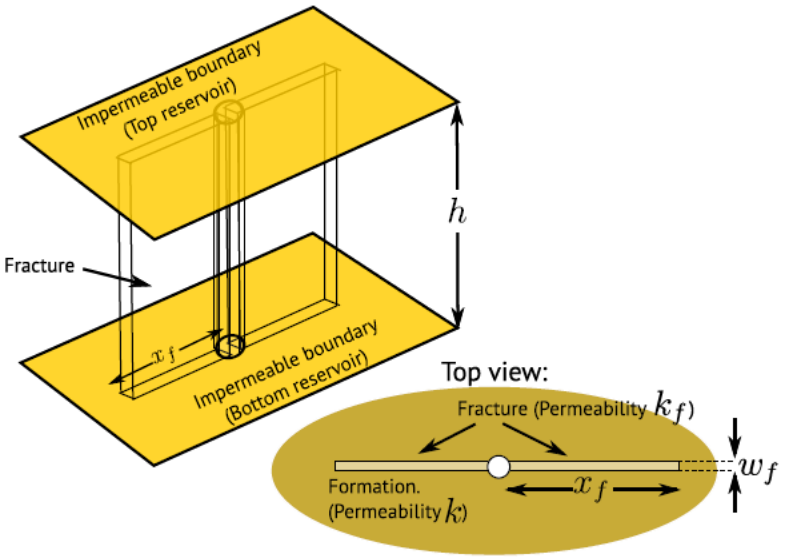
$$F_{CD} = \frac{k_f}{k}\frac{w_f}{x_f} = \frac{F_C}{kx_f} \quad \text{---------- 4}$$

معامل التخزين(هو قابلية الشق لتخزين المائع) اللابعدي للشق يساوي :-

$$C_{Df} = \frac{0.8937C}{\phi c_t h x_f^2} \quad \text{---------- 5}$$



الشكل 1-2 : موديل البئر المتشقق العمودي –منطقة تصريف البئر دائرية



الشكل 1-3 : موديل البئر المتشقق العمودي –منطقة تصريف البئر مستطيلة

الضغط اللابعدي في حالة و المكمن النفطي يساوي:

$$p_D = \frac{kh\Delta p}{141.2QB\mu} \quad \text{---------- 6}$$

الضغط اللابعدي في حالة المكمن الغازي يساوي:

$$p_D = \frac{kh\Delta m(p)}{1424QT} \quad \text{---------- 7}$$

نصف القطر اللابعدي للشق يساوي:

$$r_{eD} = \frac{r_e}{x_f} \text{ ---------- 8}$$

إذ ان :

x_f = fracture half-length, ft
w_f = fracture width, ft
k_f = fracture permeability, md
k = pre-frac formation permeability, md
t_{Dx_f} = dimensionless time based on the fracture half-length x_f
t = flowing time in drawdown, Δt or Δt_e in buildup, hours
T = Temperature, °R
F_C = fracture conductivity, md ft
F_{CD} = dimensionless fracture conductivity
η = hydraulic diffusivity
c_{ft} = total compressibility of the fracture, psi^{-1}

للمعادلات اعلاه يُمكن اختيار التعاريف الملائمة لكل من الضغط والوقت لحالتي فحص هبوط الضغط او تصاعد الضغط و كما في الجدول ادناه:

Test	*Pressure*	*Time*
Drawdown	$\Delta p = p_i - p_{wf}$	t
Buildup	$\Delta p = p_{ws} - p_{wf \text{ at } \Delta t=0}$	Δt or Δt_e

8-1 انظمة الشقوق العمودية Fractures Systems

لغرض تفسير فحوصات الابار المتشققة توصلوا كلا من سينكو و سامنكو Cinco and Samaniego (1981) و Gringarten et al. (1974) الى تحديد ثلاث انظمة للشقوق العمودية three types of fractures و بحسب قدرتها على نقل السوائل أو توصيلها من المكمن الى البئر على النحو الاتي:

1- Infinite conductivity fractures;

2- Uniform flux fractures

3- Finite conductivity fractures;

1-8-1 الشق العمودي ذات التوصيلية اللامتناهية (اللامحدودة) Infinite conductivity vertical fracture

موديل الشق العمودي بالقابلية التوصيلية اللامتناهية او اللامحدودة يفترض:

- ان الجريان الى داخل البئر ياتي عبر الشق فقط اي ان الشق يعمل كانبوب ذو قطر كبير و بنفاذية لا متناهية *infinite permeability* ليغذي البئر.
- فقدان الضغط من جراء جريان المائع عبر الشق مهمل .
- و توزيع الضغط على طول الشق منتظم .

بصورة عامة و حسابيا ، فان الشق يصنف بانه شق لا متناهي التوصيل *infinite conductivity fracture* عندما تكون قيمة قابلية توصيل الشق اللابعدي اكبر من $F_{CD} > 300$ ، عدد اخر من الباحثين يعتبرون $F_{CD} > 500$ هي الانسب ، و تُحسب F_{CD} من المعادلة رقم-4 .

بيانات فحص هذا النوع من الشق تُظهر ثلاث اطوار للجريان وهي:

1- الجريان الخطي في الشق Fracture linear flow period

2- الجريان الخطي في المكمن Formation linear flow period

3- الجريان شبه الشعاعي اللامتناهي .Infinite-acting pseudoradial flow period

عادة و في حالة الجريان الخطي للشق اللامتناهي التوصيل ، يُهمل تاثير عامل التضرر s بالقرب من فتحة البئر و يتلاشى تاثير نصف قطر البئر r_w و يحل محله تاثير طول الشق x_f .كما و يُغيب تاثير تخزين البئر wellbore storage ليس بسبب عدم وجوده بل العكس فهنالك تخزين اضافي من جراء تخزين الشق fracture storage و لكن تاثير انتاجية الشق العالية تطغى على تاثير تخزين البئر.

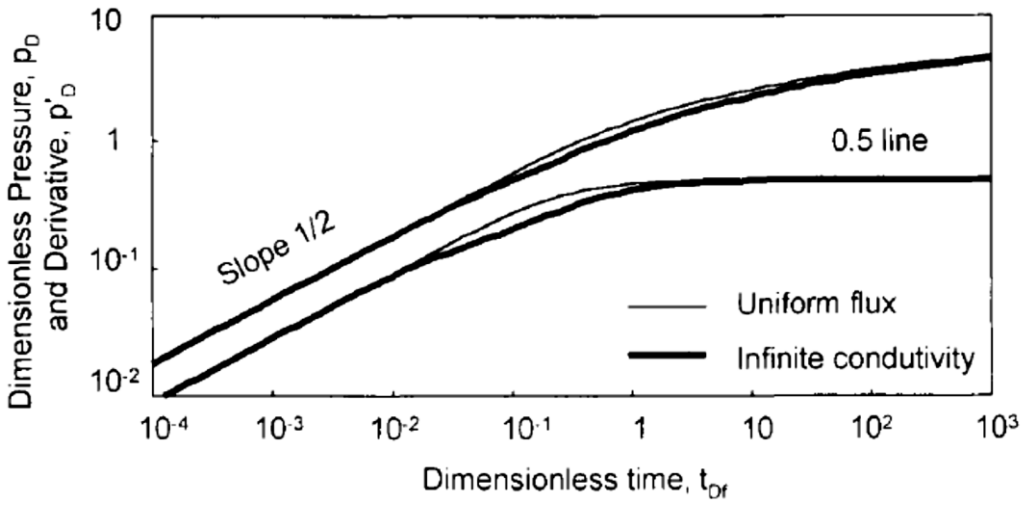
2-8-1 الشق العمودي بالتدفق المنتظم - Uniform flux fracture

الموديل هنا يفترض ان المائع المكمني يجري من المكمن الى داخل الشق بشكل منتظم لكل وحدة طول للشق إذ ان المائع الداخل للشق يساوي الخارج منه. و هذا الموديل مشابه للموديل اللا متناهي لكنه ياخذ بنظر الاعتبار وجود فرق بالضغط قليل على طول الشق سببه التضرر الحاصل من جراء وجود نطاق من النفاذية القليلة حول الشق. يصاحب هذا الفحص طورين من الجريان هما :

1- طور الجريان الخطي - Linear flow

2- طور الجريان شبه الشعاعي - Pseudoradial flow

الشكل1-4 اللوغاريتمي لعلاقة الضغط و مشتقة الضغط اللابعدي مع الوقت اللابعدي ، يُوضح الفرق المحدود مابين الموديل بالتوصيلية اللامتناهي و الموديل المنتظم عبر الشق العمودي. نلاحظ هنالك تشابه بين المنحنيين لطوري الجريان الخطي(بميل النصف) و الجريان الشعاعي(الخط الافقي) ، الاختلاف بينهم يكون في المنطقة الانتقالية ما بين نمط الجريان الخطي الى الشعاعي إذ تكون في الشقوق منتظمة الجريان Uniform flux اقصر و منحني الضغط اعلى قليلا و الزاوية بين الطورين أكثر وضوحا. يتميز الموديلان في اعلاه بكون الشقوق عالية التوصيلية High conductivity fractures.



الشكل 1-4 : مقارنة استجابة الضغط للبئر المتشقق العمودي لموديل التوصيلية اللامتناهية و الموديل المنتظم

3-8-1 الشق العمودي ذات التوصيلية المحدودة او المتناهية Finite conductivity vertical fractures

يتميز هذا الموديل بالشقوق الطويلة والتي تكونت من جراء تشقق هيدروليكي قوي و فعال Massive Hydraulic Fracture- MHF . و كلما زاد طول الشق كلما زادت كمية المواد الساندة للشق (مثل الحصى) و بالنتيجة ستقل نفاذية الشق و تكون اقل بالمقارنة مع نفاذية الشق اللامتناهي التوصيل . لذلك نتوقع عبر الفحص ان يحصل هبوط واضح بالضغط عبر جريان الموائع في داخل الشق و بالنتيجة فان الجريان من المكمن الى الشق سيكون غير منتظم. ان الشق يصنف متناهي التوصيل *finite conductivity fracture* عندما تكون قيمة قابلية توصيل الشق اللابعدي اقل من $F_{CD} < 300$.

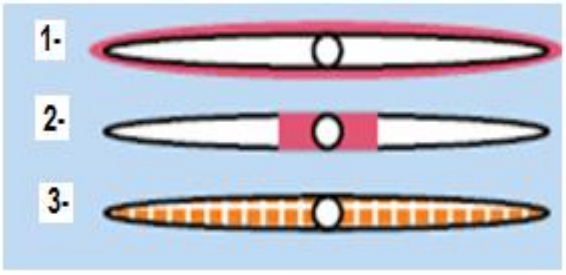
لماذا تقل كفاءة الشق مع طول مدة الانتاج ؟؟

بمرور الوقت فان كفاءة الشق في تسهيل عبور المائع عبره تقل و ذلك بسبب ما يلي (الشكل-1-5) :

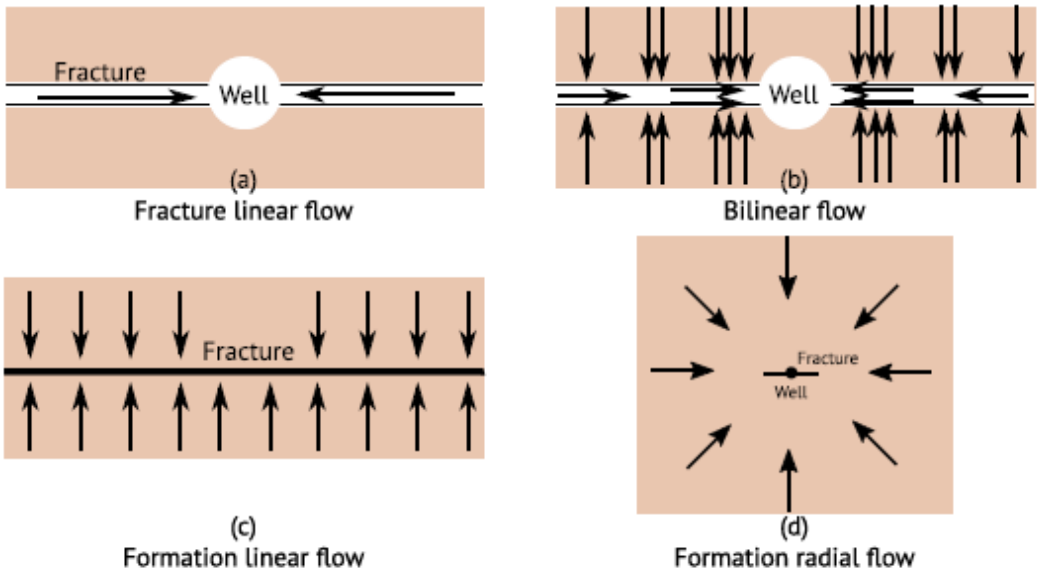
1- عامل القشرة الذي ينمو على سطح الشق- اللون الوردي حول الشق - Skin on fracture face في الشكل 1-5 رقم-1.

2- انسداد الشق ،المستطيل باللون الوردي - Choke skin في الشكل 1-5 رقم-2.

3- محدودية التوصيل للشق - Finite conductivity كما في الشكل 1-5 رقم-3.



الشكل 1-5 : انتشار تاثير معامل القشرة حول الشقوق Fractures



الشكل 1-6 : اطوار الجريان التي يُمكن تمييزها عبر فحص الابار المتشققة

يُظهر هذا النوع من الشق العمودي اربعة اطوار للجريان 4 flow regimes عبر الفحص (الشكل1-6) و هي:

1- الجريان الخطي عبر الشق -Linear flow within the fracture.

2- الجريان الخطي الثنائي-Bilinear flow.

3- الجريان الخطي عبر المكمن Linear flow in the formation.

4- جريان شبه شعاعي نتيجة للتاثير اللا متناهي عبر المكمن--Infinite acting pseudo radial flow.

يتم تشخيص اطوار الجريان هذه باستخدام رسومات بيانية لوغاريتمية log-log digenetic plots و ايضا هنالك رسومات بيانية خاصة لتفسير كل مدة جريان تعطي علاقات خط مستقيم تتضمن الرسومات العلاقات الاتية :

- a graph of Δp vs. $\sqrt{\text{time}}$ for linear flow;
- a graph of Δp vs. $\sqrt[4]{\text{time}}$ for bilinear flow;
- a graph of Δp vs. log(time) for infinite-acting pseudoradial flow.

9-1 تفسير فحوصات الابار المتشققة

تفسير فحوصات الابار المتشققة تتضمن الطرق الاتية:

1- الطريقة التقليدية.

2- طريقة تطابق المنحنيات النوعي.

3- طريقة تياب في التوليف المباشر TDS

1-9-1 الطريقة التقليدية (العادية)

الطريقة التقليدية تتضمن تفسير اطوار جريان متعددة والتي تظهر عبر فحوصات الابار المتشققة و كالاتي:

1- طور الجريان الخطي في الشق - Fracture linear flow

و يمثل المدة الاولى (المبكرة) للجريان عند فحص الابار المتشققة و يكون الجريان فقط عبر الشق باتجاه تجويف البئر كما في الشكل 1-6a و الشكل 1-7.

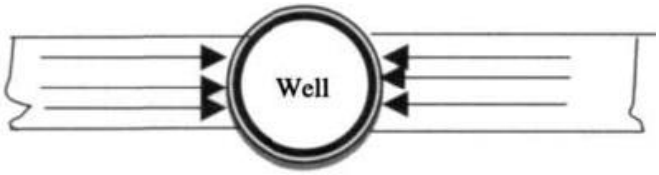


Figure 9–2. Fracture linear flow.[1]

الشكل 1-7 : طور الجريان الخطي عبر الشق

يُمكن رياضيا تمثيل سلوك الضغط لفحوصات هبوط الضغط للابار النفطية المتشققة عبر الجريان الخطي و لحالة الشق العمودي اللامتناهي التوصيل infinite conductivity fracture و كما في المعادلة ادناه :

$$\Delta p = \left[\frac{4.064QB}{hx_f}\sqrt{\frac{\mu}{k\phi c_t}}\right]t^{1/2} \quad \text{---------- 9}$$

و للابار الغازية :

$$\Delta m(p) = \left[\frac{40.925QT}{hx_f}\sqrt{\frac{1}{k\phi\mu c_t}}\right]t^{1/2} \quad \text{---------- 10}$$

يُمكن كتابة المعادلة رقم- 9 بالصيغة المختصرة الاتية:

$$\Delta p = m_{lf}\sqrt{t} \quad \text{---------- 11}$$

او بالصيغة:

$$P_{wf} = P_i - m_{lf}\sqrt{t} \quad \text{---------- 12}$$

إذ ان قيمة الميل m_{lf} slope of linear flow يساوي:

$$m_{lf} = \left[\frac{4.064QB}{hx_f}\sqrt{\frac{\mu}{k\phi c_t}}\right] \quad \text{---------- 13}$$

عند رسم علاقة فرق الضغط مع الجذر التربيعي للوقت نحصل على علاقة خط مستقيم بميل m_{lf} الشكل 1-9 .من الميل يُمكن تحديد مقدار نصف طول الشق x_f .

بنفس الطريقة للابار الغازية و عند رسم علاقة فرق الضغط مع الجذر التربيعي للوقت بمقياس عادي cartesian نحصل على علاقة خط مستقيم بميل m_{lf} .

باخذ لوغاريتم طرفي المعادلة رقم- 9 تصبح كما يأتي:

$$\log \Delta p = 1/2 \log t + \log\left[\frac{4.064QB}{hx_f}\sqrt{\frac{\mu}{k\phi c_t}}\right] \quad \text{---------- 14}$$

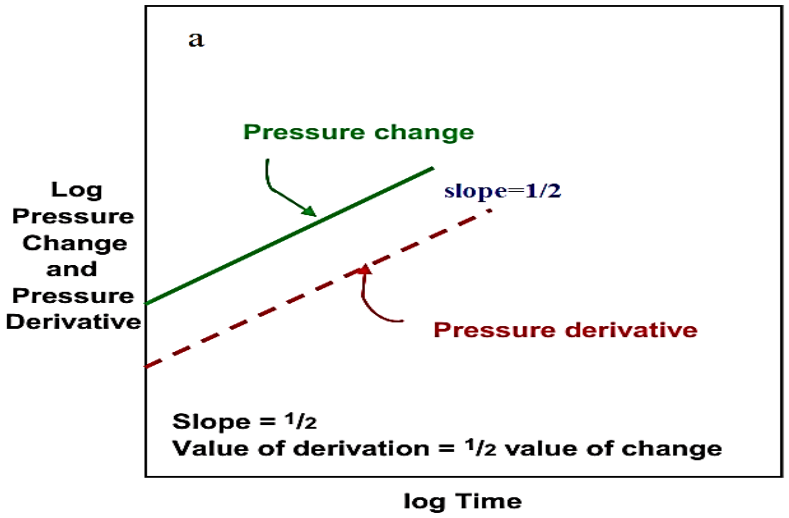
- اذن و حسب المعادلة رقم- 14 و في وقت مبكر من الفحص و باهمال تاثير معامل القشرة s فان رسم علاقة فرق الضغط و مشتقة الضغط مع الزمن ، ΔP &ΔP^{-} vs t الشكل1-8-a على احداثيات لوغاريتمية سنحصل على علاقة خطين مستقيمة متوازية بميل يساوي النصف 1/2 . يتقاطع مستقيم فرق الضغط ΔP مع الاحداثي الصادي عند القيمة:

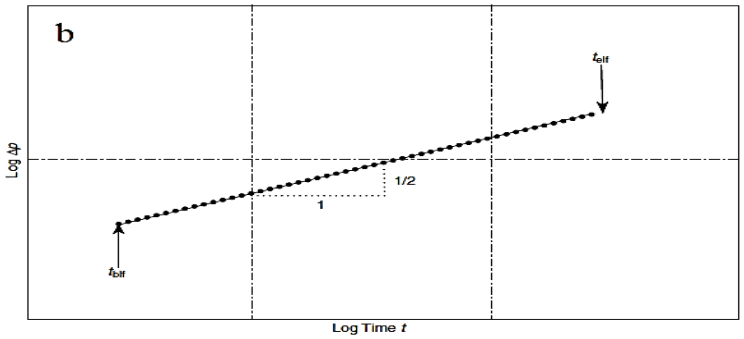
$$\left[\frac{4.064QB}{hx_f}\sqrt{\frac{\mu}{k\phi c_t}}\right]$$

يُمكن تحديد وقت بداية ونهاية الجريان الخطي هذا Time end linear flow -t_{elf} ،**t_{blf}**-- Time begining linear flow من تحديد بداية و نهاية الخط المستقيم في الشكل1-8-b ،

في حال وجود تاثير عامل القشرة حول الشق فان الخط المستقيم في الشكل الشكل1-9-b لا يمر بنقطة الاصل وانما سيقطع الاحداثي الصادي بقيمة معينة تُمثل مقدارفقدان الضغط من جراء معامل القشرة.

يستفاد من الرسم البياني اللوغاريتمي في تشخيص فترة الجريان الخطي في نظام الابار المتشققة وكذلك في تحديد نصف طول الشق x_f من الميل و تقاطع الاحداثي الصادي وكما يأتي:





الشكل 1-8 : a- شكل طور الجريان الخطي عبر الشق بميل النصف مرسوم على احداثيات لوغاريتمية b- بداية ونهاية الجريان الخطي

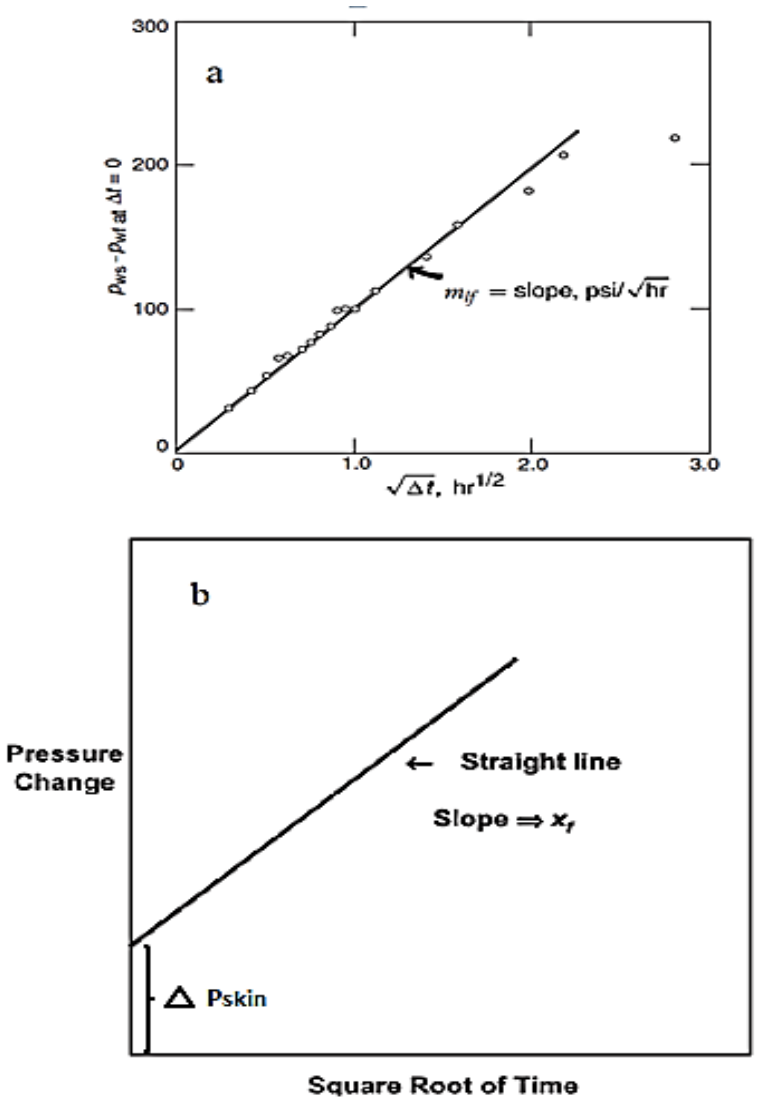
للنفط :

$$x_f = \left[\frac{4.064QB}{m_{lf}h}\right]\sqrt{\frac{\mu}{k\phi c_t}} \quad \text{---------- 15}$$

و للغاز :

$$x_f = \left[\frac{40.925QT}{m_{lf}h}\right]\sqrt{\frac{1}{k\phi\mu c_t}} \quad \text{---------- 16}$$

Q = flow rate, STB/day or Mscf/day
T = temperature, °R
m_{vf} = slope, psi/$\sqrt{\text{hr}}$ or psi^2/cp$\sqrt{\text{hr}}$
k = permeability, md
c_t = total compressibility, psi^{-1}



الشكل 1-9 : a- شكل طور الجريان الخطي عبر الشق مرسوم على احداثيات خاصة من دون تاثير معامل القشرة s ، الشكل-b بوجود تاثير معامل القشرة s

لاحظ في حال عدم تحديد مدة الجريان الخطي بشكل مضبوط و عند عدم توفر نفاذية المكمن فان احتساب نصف طول الشق يكون غير صحيح ويحتاج الى تصحيح ، لذا يُفضل اجراء فحص البئر قبل تنفيذ عملية التشقق الهيدروليكي لغرض حساب نفاذية المكمن k بالطرق التقليدية.

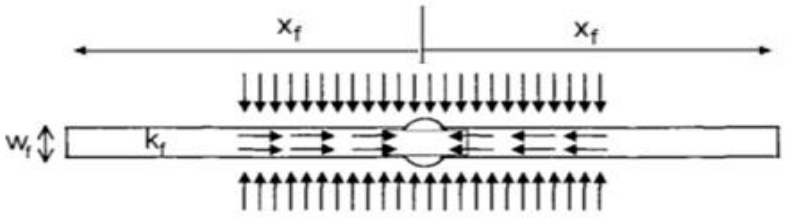
2- الجريان الخطي الثنائي - Bilinear flow

الجريان الخطي الثنائي عادة ما يسبق الجريان الخطي للمكمن. يظهر الجريان الخطي الثنائي (الشكل-1-10) فقط في الشقوق قليلة التوصيلية low conductivity fracture او الشق من النوع finite conductivity وذلك لكون هبوط الضغط عبر الشق واضح و متميز. لا يظهر

الجريان الخطي الثنائي في الشق عالي التوصيلية لكون هبوط الضغط داخل الشق قليل ومهمل. سُمي بالجريان الخطي الثنائي لتزامن نوعين من الجريان في ان واحد الاول جريان خطي عمودي من المكمن باتجاه الشق (بسبب الانضغاطية) ،الثاني الجريان الخطي داخل الشق (الشكل1-10) . تحديد مدة طور الجريان الخطي الثنائي يُعد أمر مهم للغاية لسببين:

1- إذ من غير الممكن تحديد طول وحيد unique للشق من بيانات مدة الجريان الخطي الثنائي .

2- يُستفاد من تفسير بيانات ضغط الجريان الخطي الثنائي في تحديد التوصيلية الفعلية للشقوق $Fc=w_f \times k_f$.



الشكل 1-10 : طور الجريان الخطي الثنائي

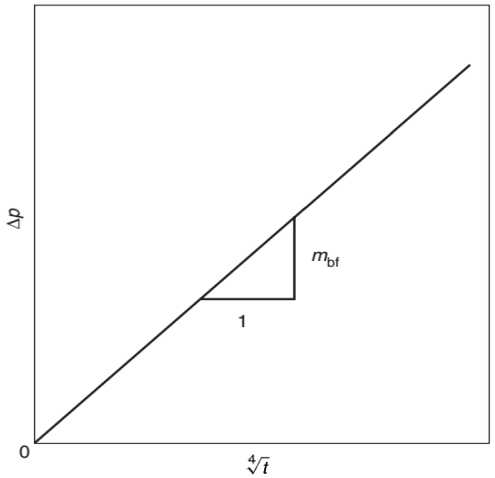
معادلة وصف سلوك الضغط عبر مدة الجريان الخطي الثنائي تكون كما يأتي:

$$\Delta p = \left[\frac{44.1QB\mu}{h\sqrt{F_C}(\phi\mu c_t k)^{1/4}}\right] t^{1/4} \text{ ---------- } 17$$

و يُمكن اختصار المعادلة رقم- 17 بالصيغة الاتية :

$$\Delta p = m_{bf} t^{1/4} \text{ ---------- } 18$$

إذ ان الميل m_{bf} - slope of bilinear flow يمثل ميل خط الجريان الثنائي.



الشكل 1-11 : طور الجريان الخطي الثنائي على احداثيات خاصة

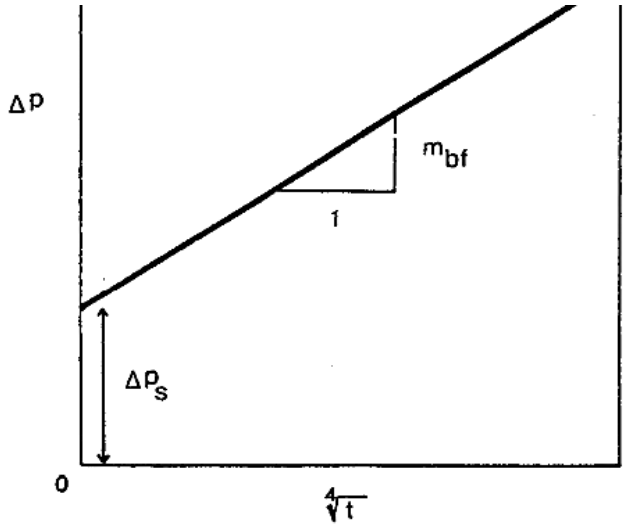
و بحسب المعادلة رقم-17 فانه عند الرسم البياني **الخاص** الذي يجمع علاقة فرق الضغط مع الجذر الرابع للزمن ΔP vs $t^{1/4}$ بمقياس عادي (الشكل1-11) ، سنحصل على علاقة خط مستقيم يمر من نقطة الاصل و بميل m_{bf} يساوي :

$$m_{bf} = \left[\frac{44.1QB\mu}{h\sqrt{F_C}(\phi\mu c_t k)^{1/4}}\right] \text{ ---------- } 19$$

احيانا لا يمر الخط المستقيم بنقطة الاصل وذلك بسبب فرق ضغط اضافي من جراء عامل القشرة ΔP_s كما في الشكل 1-12 و الذي ينتج عن معرقلات للجريان بالقرب من فتحة البئر منها - التثقيب الجزئي partial perforation ، الجريان المضطرب turbulent flow ، كميات المواد الساندة لفتحة الشق اكثر من اللازم او بسبب تاثير تخزين البئر الشكل1-13 .

عند اخذ لوغاريتم طرفي المعادلة رقم-17 فتصبح:

$$\log(\Delta p) = \log(m_{bf}) + \frac{1}{4}\log(t) \text{ ---------- } 20$$

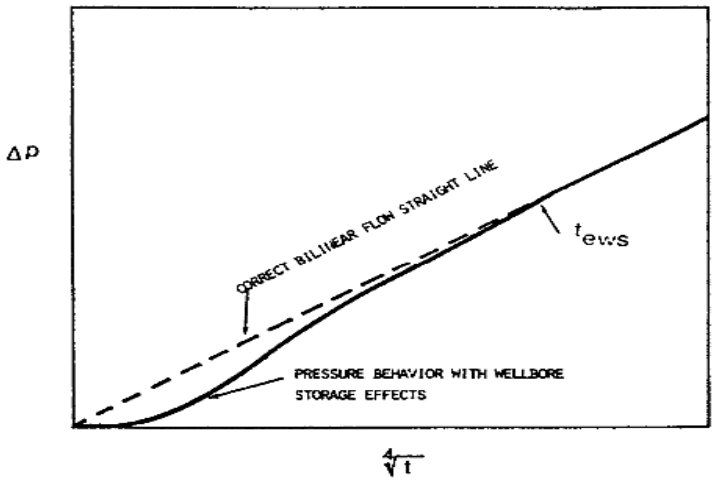


الشكل 1-12 : طور الجريان الخطي الثنائي مرسوم على احداثيات خاصة مع بيان تاثير فرق الضغط بسبب معامل القشرة

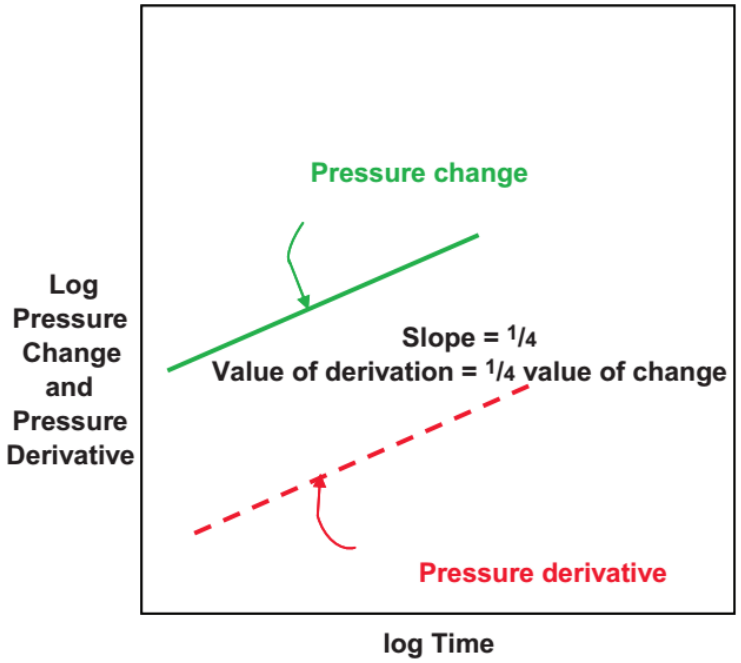
نلاحظ وحسب المعادلة اعلاه فانه عند رسم علاقة فرق الضغط مع الزمن ΔP vs t على رسم بياني لوغاريتمي نحصل على علاقة خط مستقيم الميل له يساوي الربع 1/4 (الشكل1-14).

سؤال كيف نميز الجريان الخطي الثنائي في المكامن المتشققة من بيانات فحص الابار؟؟

يُستفاد من تفسير مدة الجريان الخطي الثنائي في ايجاد توصيلية الشق F_C بمعلومية النفاذية و كما يأتي:



الشكل 1-13 : طور الجريان الخطي الثنائي مع بيان تاثير تخزين البئر



الشكل 1-14 : شكل طور الجريان الخطي الثنائي مرسوم على احداثيات لوغاريتمية بميل الربع

$$\text{For oil} \quad F_C = (k_f w_f) = \left[\frac{44.1QB\mu}{m_{bf}h(\phi\mu c_t k)^{1/4}}\right]^2 \text{ ---------- } 21$$

وبمثل تفسير الابار النفطية المتشققة فان ميل الخط المستقيم عبر مدة الجريان الخطي الثنائي للابار المتشققة الغازية يساوي:

$$m_{bf} = \frac{444.6QT}{h\sqrt{F_C}(\phi\mu c_t k)^{1/4}} \quad \text{---------- 22}$$

ثم نجد توصيلية الشق F_C بمعلومية النفاذية و كما يأتي:

$$\text{For gas} \quad F_C = (k_f w_f) = \left[\frac{444.6QT}{m_{bf}h(\phi\mu c_t k)^{1/4}}\right]^2 \quad \text{---------- 23}$$

ان طول مدة الجريان الخطي الثنائي تعتمد على توصيلية الشق اللابعدي F_{CD} وعلى معامل تخزين البئر اللابعدي C_D. توصل سينكو Cinco et al الى امكانية تحديد معامل توصيل الشق اللابعدي F_{CD} من قراءة فرق الضغط عند نهاية الجريان الخطي الثنائي bilinear flow ends - ΔP_{ebf} من الرسم البياني العادي لعلاقة ΔP vs $t^{1/4}$ والتي تساوي :

بالنسبة للنفط :

$$F_{CD} \approx \frac{194.9QB\mu}{kh\Delta P_{ebf}} \quad \text{---------- 24}$$

بالنسبة للغاز :

$$F_{CD} = \frac{1965.1QT}{kh\Delta m(p)_{ebf}} \quad \text{---------- 25}$$

Q = flow rate, STB/day or Mscf/day
T = temperature, °R

كما في حالة الجريان الخطي في الفقرة السابقة ايضا و لحساب F_{CD} نحتاج الى تحديد نفاذية المكمن قبل اجراء عملية التشقق الهيدروليكي. ان مدة انتهاء الجريان الخطي الثنائي t_{Debf}-end bilinear flow تعتمد على توصيلية الشق و يُمكن حسابها بشكل تقريبي لتاكيد الحل من المعادلات الاتية :

$$t_{Debf} \approx \frac{0.1}{F_{CD}^2} \; ; \; F_{CD} > 3 \quad \text{----------26}$$

$$t_{Debf} \approx 0.0205\left[F_{CD} - 1.5\right]^{-1.53}; \; 1.6 \leq F_{CD} \leq 3 \quad \text{---------- 27}$$

$$t_{Debf} \approx \left[\frac{4.55}{\sqrt{F_{CD}}} - 2.5\right]^{-4} \; ; \; F_{CD} \leq 1.6 \quad \text{---------- 28}$$

كما اشرنا فان تفسير مدة فحص الجريان الخطي الثنائي لا يستفاد منه في تحديد نصف طول الشق x_f لكن بحسب سينكو و جماعته **Cinco et al.** يُمكن ذلك فقط اذا كانت قيمة $F_{CD} > 1.6$ و بحسب الشكل 1-15 هذا يعني الوصول الى نهايات الشق و يتحول الخط المستقيم الى منحني

تقعره نحو الاعلى في نهاية الجريان الخطي الثنائي مما يُمَكن في حساب نصف طول الشق x_f كالاتي:

$$x_f = \frac{F_C}{F_{CD}k} \quad \text{---------- 29}$$

يُحسب المعامل F_C من المعادلتين رقم-21 للنفط او رقم-23 للغاز و F_{CD} من المعادلتين رقم-24 و 25 للنفط والغاز على التوالي.

اذا كان معامل توصيل الشق اللابعدي اقل $F_{CD} < 1.6$ ، فيعني ايضا الوصول الى نهاية مدة الجريان الخطي الثنائي و لكن يتحول الخط المستقيم الى منحني تقعره نحو الاسفل ذلك يعني ان نظام الجريان اصبح ثنائي الاتجاه فلا يُمكن احتساب قيمة وحيدة لطول الشق.

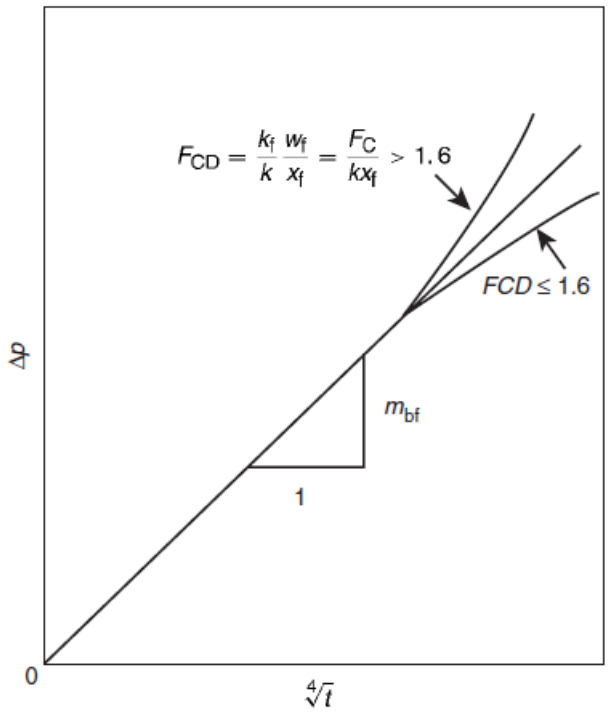
ممكن تلخيص خطوات تفسير مدة طور الجريان الخطي الثنائي بما يلي:

1- رسم مخطط لعلاقة فرق الضغط مع الوقت Δp vs. (time) على مقياس لوغاريتمي.

2- تحديد فيما إذا كانت أي من البيانات تقع على خط مستقيم بميل الربع 1/4 .

3- إذا كانت النقاط البيانية تقع على الخط المستقيم بميل 1/4، أعد رسم البيانات للعلاقة Δp vs. $(time)^{1/4}$ على مقياس عادي وحدد الخط المستقيم الثنائي.

4- حساب ميل الخط المستقيم الثنائي m_{bf} من الخطوة 3.



الشكل 1-15 : تحليل طور الجريان الخطي الثنائي

5- حساب توصيلية الشق $F_C = k_f w_f$ كالاتي:

$$\text{For oil} \quad F_C = (k_f w_f) = \left[\frac{44.1QB\mu}{m_{bf}h(\phi\mu c_t k)^{1/4}}\right]^2$$

$$\text{For gas} \quad F_C = (k_f w_f) = \left[\frac{444.6QT}{m_{bf}h(\phi\mu c_t k)^{1/4}}\right]^2$$

6- اقرأ قيمة فرق الضغط عند نهاية الخط ، Δp_{ebf} أو $\Delta m(p)_{ebf}$.

7- حساب توصيلية الشق اللابعدية بشكل تقريبي من:

$$\text{For oil} \quad F_{CD} = \frac{194.9QB\mu}{kh\Delta p_{ebf}}$$

$$\text{For gas} \quad F_{CD} = \frac{1965.1QT}{kh\Delta m(p)_{ebf}}$$

8- حساب طول الشق بالاستفادة من تعريف لـ F_{CD} وقيمة F_C في الخطوة 5 و 7 و كما يأتي:

$$x_f = \frac{F_C}{F_{CD}k}$$

مثال-1

أُجرِ فحص تصاعد الضغط لبئر غازي متشقق ينتج من طبقة مكمنية صلدة ، المعلومات المتوفرة كالاتي:

$Q = 7350$ Mscf/day, $\quad t_p = 2640$ hours $\quad p_{wf \text{ at } \Delta t=0} = 1320$ psia,

$h = 118$ ft, $\phi = 0.10$ $\quad k = 0.025$ md, $\mu = 0.0252$ $\quad c_t = 0.129 \times 10^{-3}$ psi^{-1}

$r_w = 0.28$ ft $\quad T = 690°$R,

و قد رسمت بيانات الفحص في رسم بياني عادي لعلاقة $\Delta m(p)$ vs $(\Delta t)^{1/4}$ الشكل1-16 .

- من تفسير الفحص العادي احسب معاملات الشق ؟؟

الحل :

- واضح من الشكل1-16 بان البيانات تاخذ الشكل منحني تقعره نحو الاعلى اي ان $F_{CD} > 1.6$ اذن بالامكان حساب نصف طول الشق من الجريان الخطي الثنائي .

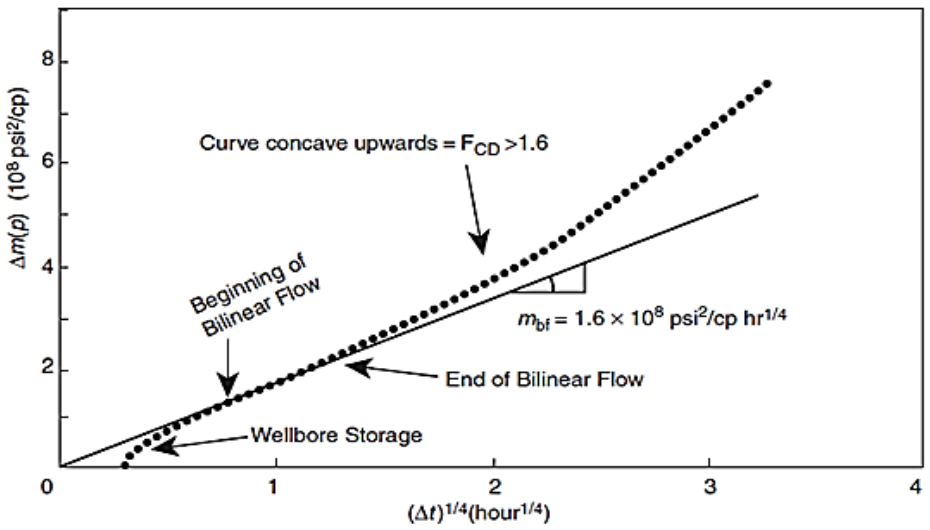
- نحدد ميل الخط المستقيم m_{bf} المار بنقطة الاصل و نحدد وقت بداية ونهاية الجريان الثنائي و فرق الضغط المكافيء عند نهاية الجريان الثنائي و تساوي:

$m_{bf} = 1.6 \times 10^8$ psi^2/cphr$^{1/4}$

$t_{sbf} \approx 0.35$ hours (start of bilinear flow) @ t$^{1/4}$ =0.8 hr$^{1/4}$

$t_{ebf} \approx 2.5$ hours (end of bilinear flow) @ t$^{1/4}$ =1.3 hr$^{1/4}$

$\Delta m(p)_{ebf} \approx 2.05 \times 10^8$ psi^2/cp



الشكل 1-16 : طور الجريان الخطي الثنائي بيانات المثال رقم-1

- نبدأ التفسير عبر ايجاد ما يلي:

- حساب توصيلية الشق F_C و حسب المعادلة الاتية :

$$F_C = \left[\frac{444.6QT}{m_{bf}h(\phi\mu c_t k)^{1/4}}\right]^2$$

$$= \left[\frac{444.6(7350)(690)}{(1.62\times10^8)(118)[(0.1)(0.0252)(0.129\times10^{-3})(0.025)]^{1/4}}\right]^2$$

$$= 154 \text{ md ft}$$

- حساب توصيلية الشق اللابعدي F_{CD} و حسب المعادلة الاتية :

$$F_{CD} = \frac{1965.1QT}{kh\Delta m(p)_{ebf}}$$

$$= \frac{1965.1(7350)(690)}{(0.025)(118)(2.02\times10^8)} = 16.7$$

- اذن نصف طول الشق x_f يساوي :

$$x_f = \frac{F_C}{F_{CD}k}$$

$$= \frac{154}{(16.7)(0.025)} = 368 \text{ ft}$$

- لا نستطيع ايجاد عرض الشق W_f ما لم نحسب نفاذية الشق .

$F_C = k_f w_f$

3- الجريان الخطي في المكمن- *Formation linear flow*

يظهر الجريان الخطي من المكمن باتجاه الشق بشكل واضح عندما تبدأ نهايات الشق بالتاثير على سلوك الضغط في باطن البئر، اذ يلي الجريان الخطي الثنائي بمدة انتقالية (الشكل c6-1). يبرز هذا الطور بوضوح عندما تكون توصيلية الشق اللابعدي $F_{CD} > 300$.

المعادلة رقم-30 تصف الجريان الخطي في المكمن النفطي المتشقق و كما يأتي:

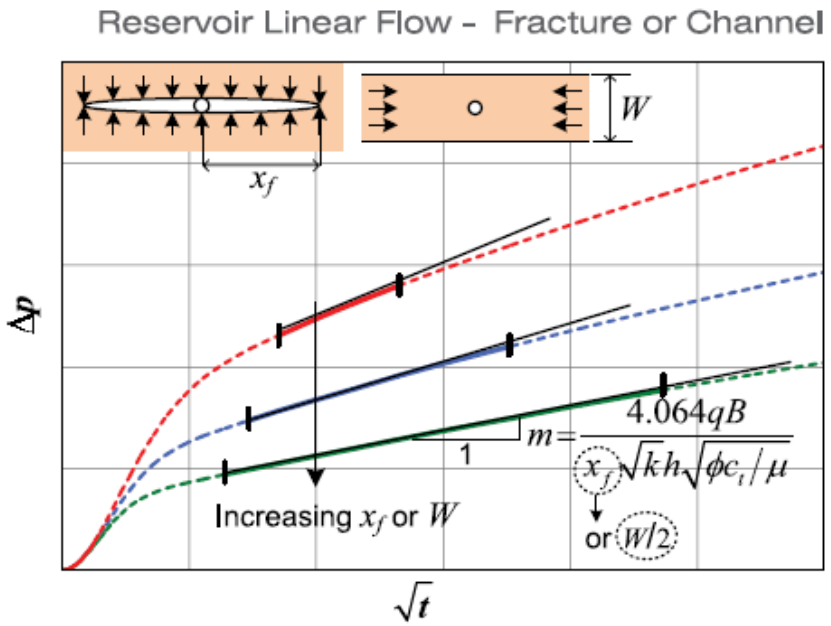
$$\text{For oil fractured wells} \quad \Delta p = \left[\frac{4.064QB}{hx_f}\sqrt{\frac{\mu}{k\phi c_t}}\right]t^{1/2} \quad \text{---------- 30}$$

او بصيغة ابسط :

$$\Delta p = m_{vf}\sqrt{t} \quad \text{---------- 31}$$

عند رسم علاقة الجذر التربيعي للوقت مع فرق الضغط Δp vs $\sqrt{t}$ على رسم بياني بمقياس عادي نحصل على علاقة خط مستقيم بميل m_{vf} كما في الشكل1-17 و يساوي:

$$m_{vf} = \left[\frac{4.064QB}{hx_f}\sqrt{\frac{\mu}{k\phi c_t}}\right] \quad \text{---------- 32}$$



الشكل 1-17 : طور الجريان الخطي لبيانات المثال رقم-1

و للجريان الخطي في المكمن الغازي ، فان فرق الضغط المكافىء للغاز يساوي:

$$\text{For gas fractured wells} \quad \Delta m(p) = \left[\frac{40.925QT}{hx_f}\sqrt{\frac{1}{k\phi\mu c_t}}\right]t^{1/2} \quad \text{---------- 33}$$

او بصيغة ابسط :

$$\Delta m(p) = m_{vf}\sqrt{t} \quad \text{---------- 34}$$

ان الميل m_{vf} يساوي:

$$m_{vf} = \left[\frac{40.925QT}{hx_f}\sqrt{\frac{1}{k\phi\mu c_t}}\right] \quad \text{---------- 35}$$

عند رسم بيانات الفحص باحداثيات عادية cartesian لعلاقة فرق الضغط المكافىء للغاز مع الجذر التربيعي للوقت $\Delta m(p)$ vs $\sqrt{t}$ ، نحصل على علاقة خط مستقيم بميل m_{vf} . من الميل يُمكن حساب نصف طول الشق x_f كما يأتي:

للمكمن المتشقق النفطي:

$$\text{Oil fractured well} \quad x_f = \left[\frac{4.064QB}{m_{vf}h}\right]\sqrt{\frac{\mu}{k\phi c_t}} \quad \text{---------- 36}$$

للمكمن المتشقق الغازي:

$$\text{Gas fractured well} \quad x_f = \left[\frac{40.925QT}{m_{vf}h}\right]\sqrt{\frac{1}{k\phi\mu c_t}} \quad \text{---------- 37}$$

إذ ان :

Q = flow rate, STB/day or Mscf/day
T = temperature, °R
m_{vf} = slope, psi/$\sqrt{\text{hr}}$ or psi^2/cp$\sqrt{\text{hr}}$
k = permeability, md
c_t = total compressibility, psi^{-1}

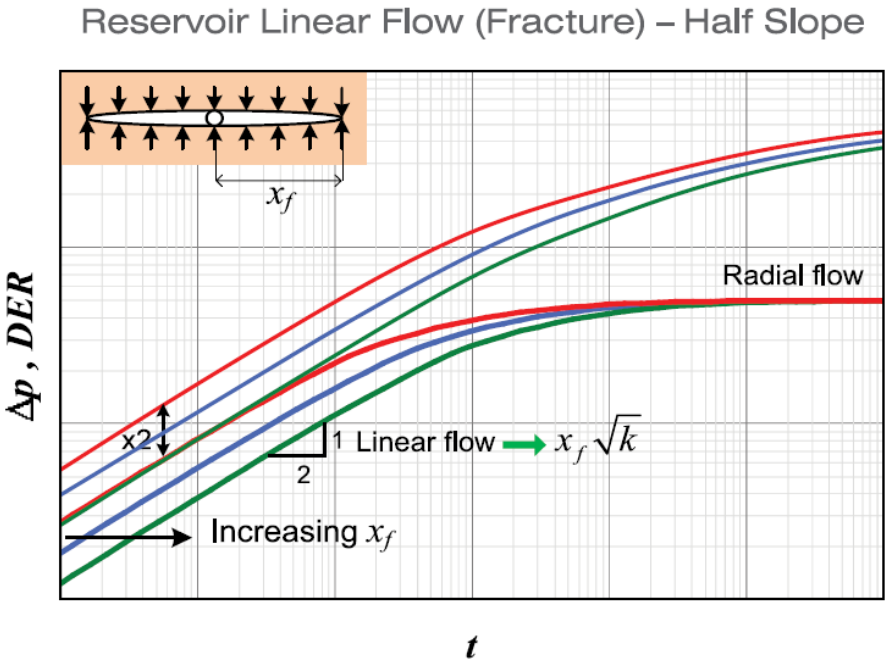
الشكل1-18 يُوضح علاقة فرق الضغط مع الزمن ΔP vs t و مشتقة الضغط (الرمزDER) مع الزمن $\Delta P'$ vs t على رسم بياني لوغاريتمي لطورالجريان الخطي المكمني ، العلاقة تكون على شكل خط مستقيم الميل له يساوي النصف . لاحظ ان كلا من فرق الضغط و مشتقة الضغط مفصولان بالعامل 2 إذ ان القيمة $\Delta P'$=0.05 تقابلها ΔP=0.1. بزيادة طول الشق x_f فان المنحنيات سوف تزحف نحو اليمين إذ ستكون مدة الوصول الى نمط الجريان شبه الشعاعي ((الخط الافقي) اطول.

ان بداية الجريان الخطي في المكمن Begining linear flow - blf يُمكن حسابها حسب المعادلة ادناه و تعتمد على التوصيلية اللابعدية F_{CD} و كما يأتي:

$$t_{Dblf} \approx \frac{100}{(F_{CD})^2} \quad \text{---------- 38}$$

و نهاية هذه المدة End of linear flow - elf تكون عندما :

$$t_{D\,elf} \approx 0.016 \quad \text{---------- 39}$$



الشكل 1-18 : تمييز طور الجريان الخطي المكمني من الرسم التشخيصي اللوغاريتمي

ان تحديد بداية ونهاية الخط المستقيم من على الرسم بياني يستفاد منها في حساب توصيلية الشق اللابعدي و كما يأتي:

$$F_{CD} \approx 0.0125\sqrt{\frac{t_{elf}}{t_{blf}}} \text{ ---------- } 40$$

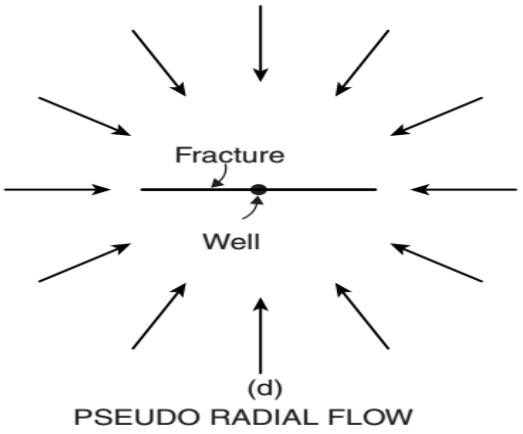
إذ ان الوقت بالساعات.

4-الجريان شبه الشعاعي اللامتناهي - Infinite acting pseudoradial flow

و هو مشابه للجريان الشعاعي في المكمن المتجانس(الشكل 1-19) ما عدا ان عامل القشرة يكون سالبا بسبب تاثير الشق الذي يزيد كفاءة انتاج البئر. عند تفسير هذه المدة نستخدم الطريقة التقليدية نصف اللوغاريتمية - semi-log او اللوغاريتمية log-log . ففي حالة فحص هبوط الضغط نستخدم المعادلتين ادناه لوصف سلوك الضغط اللابعدي في باطن البئر لحالتي الشق اللامتناهي التوصيل *Infinite conductivity vertical fractures* و الشق منتظم التدفق *Uniform flux fractures* على التوالي :

$$P_D = \frac{1}{2}\left[\ln\left(t_{Dxf}\right) + 2.80907\right] \text{ ---------- } 41$$

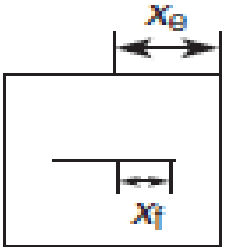
$$P_D = \frac{1}{2}\left[\ln\left(t_{Dxf}\right) + 2.2\right] \text{ ---------- } 42$$



الشكل 1-19 : طور الجريان شبه الشعاعي

لاحظ ان المعادلتين اعلاه تطبقان عندما لا تظهر تاثيرات حدود المكمن.

اما اذا كان حدود المكمن ظاهر و مؤثر bounded فتطبق المعادلتان اعلاه فقط عندما تكون نسبة اختراق الشق $(x_e/x_f) > 5$. ان نسبة اختراق الشق هي النسبة ما بين نصف طول منطقة التصريف xe- reservoir half dimensions المغلقة المربعة الى نصف طول الشق x_f و كما موضح في المخطط ادناه(الشكل1-20) . لاحظ في مصادر اخرى تُعرف نسبة اختراق الشق (x_f/x_e) او $((2x_f/x_e)$.



الشكل 1-20 : اختراق الشق لمنطقة تصريف مربعة

- لوصف سلوك الجريان شبه الشعاعي بدلالة ضغط الجريان في باطن البئر نستخدم المعادلة الاتية:

$$p_{wf} = p_i - \frac{162.6 Q_o B_o \mu}{kh} \times \left[\log(t) + \log\left(\frac{k}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) - 3.23 + 0.87s \right] \text{ ---------- } 43$$

- و بصيغة ابسط بدلالة فرق الضغط تكون كما يأتي:

$$p_i - p_{wf} = \Delta p = a + m \log(t) \text{ ---------- } 44$$

- عند رسم بيانات الفحص على رسم نصف لوغاريتمي semi-log فالنقاط ستشكل خط مستقيم عند منطقة الجريان شبه الشعاعي و بميل للخط المستقيم m و يساوي :

$$m = \frac{162.6 Q_o B_o \mu_o}{kh}$$

- نحسسب الانتقالية kh للطبقة المكمنية :

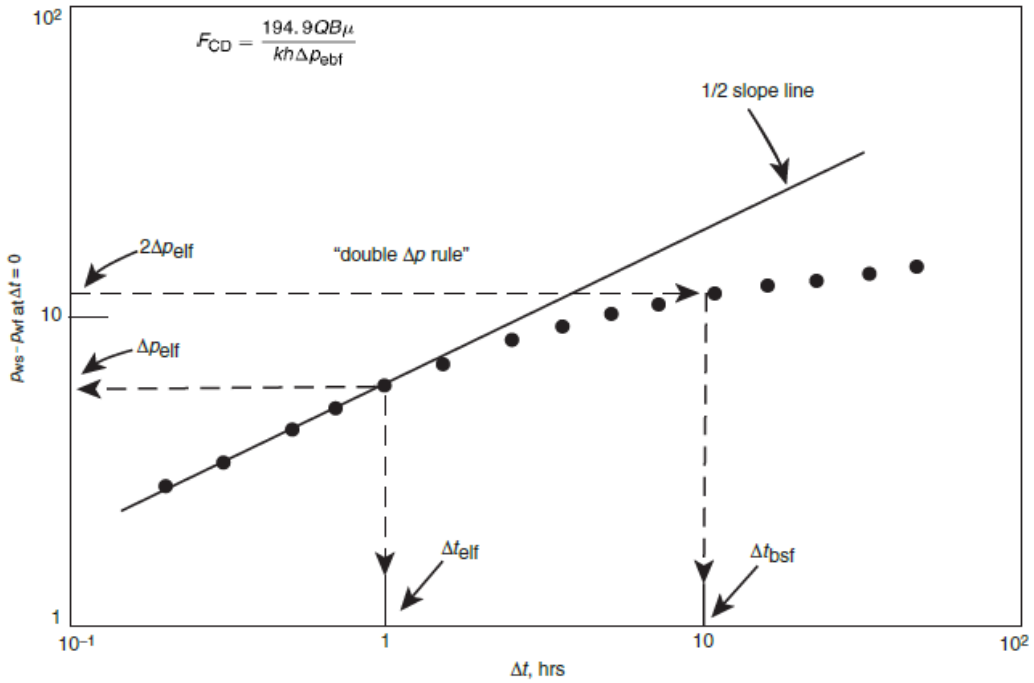
$$kh = \frac{162.6 Q_o B_o \mu_o}{|m|}$$

- و عامل القشرة s :

$$s = 1.151 \left[\frac{p_i - p_{1\,hr}}{|m|} - \log\left(\frac{k}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) + 3.23 \right] \text{---------- 45}$$

- ممكن حساب الميل كما يأتي :

$$m = \frac{\Delta p \text{ at } \log(10) - \Delta p_{1\,hr}}{\log(10) - \log(1)} \text{---------- 46}$$



الشكل 1-21 : استخدام الرسم اللوغاريتمي لتحديد بداية طور الجريان شبه الشعاعي

لاحظ ان $\Delta P_{at\ log(10)}$ و $\Delta P_{at\ log(1)}$ تُحدد من الخط المستقيم فقط او امتداده في الرسم نصف اللوغاريتمي.

رامي و وتنبرغ Wattenbarger and Ramey (1968) اوجدوا علاقة مابين تغيرالضغط عند نهاية الجريان الخطي End linear flow- Δp_{elf} و بداية تاثير الجريان شبه الشعاعي Pseudoradial flow Beginning of the infinite acting، Δp_{bsf} – (الشكل1-21) وكما يأتي :

$$\Delta p_{bsf} \geq 2\,\Delta p_{elf} \text{ ---------- } 47$$

القاعدة اعلاه سميت قاعدة مضاعفة تغير الضغط (Double Δp rule) إذ يُمكن ان نجد قيمة تغير الضغط Δp_{elf} عند نهاية ميل خط النصف من الشكل اللوغاريتمي رقم-1-21 اعلاه و ان مضاعفة هذه القيمة $2\,\Delta p_{elf}$ تُمثل فرق الضغط عند بداية طور الجريان شبه الشعاعي . بالمقابل فان تطبيق القاعدة على الزمن سيساوي:

one log cycle (10 Δt rule)

اي ان وقت بداية الجريان شبه الشعاعي pseudo-radial flow يكون كما يأتي:

بالنسبة لفحص هبوط الضغط pressure drawdown test

$$\text{For drawdown} \quad t_{bsf} \geq 10 t_{elf} \text{ ---------- } 48$$

و كذلك لفحص تصاعد الضغط pressure buildiup test

$$\text{For buildup} \quad \Delta t_{bsf} \geq 10 \Delta t_{elf} \text{ ---------- } 49$$

هنالك تقريب اخر يستخدم لتحديد بداية فترة الجريان شبه الشعاعي للشق ذات توصيلية غير متناهية infinite conductivity و كالاتي:

$$t_{Dbs} \approx 5\exp[-0.5(F_{CD})^{-0.6}] \quad \text{for} \quad F_{CD} > 0.1 \text{ ---------- } 50$$

الجدول1-1 في ادناه يبين كيفية تشخيص اطوار الجريان المصاحبة لفحوصات الابار و من ضمنها فحوصات الابار المتشققة باستخدام الرسومات التشخيصية اللوغاريتمية و الرسومات الخاصة.

Flow regime

Flow regime	Slope log-log straight line (n)	Specialized analysis with the pressure versus	Dimensionless equations
Radial	0	lg t	P=A*lgt+B
Linear	0.5	$t^{0.5}$	P=A*$t^{0.5}$+B
Bilinear	0.25	$t^{0.25}$	P=A* $t^{0.25}$+B
Spherical	-0.5	$t^{-0.5}$	P=A*$t^{-0.5}$+B
PSS	1	t^{1}	P=A*t+B
Pure wellbore storage effect	1	t^{1}	P=A*t+B

الجدول 1-1 : تشخيص اطوار الجريان المصاحبة لفحوصات الابار

من الممكن تلخيص خطوات تفسير بيانات فترة طور الجريان شبه الشعاعي من خلال تفسير الفحص في المثال الاتي.

مثال-2

بئر متشقق هايدروليكيا تم اجراء فحص هبوط الضغط له وأُدرجت بيانات الفحص في الجدول1-2 ادناه :

المعلومات المتوفرة الاخرى :

$h = 82$ ft, $\phi = 0.12$ $c_t = 21 \times 10^{-6}$ psi^{-1}, $\mu = 0.65$ cp

$B_o = 1.26$ bbl/STB, $r_w = 0.28$ ft $Q = 419$ STB/day, $p_i = 3770$ psi

- احسب نفاذية المكمن k ، نصف قطر الشق x_f و عامل القشرة s ؟؟

الحل :

t (hr)	p_{wf} (psi)	Δp (psi)	$\sqrt{t}$ (hr$^{1/2}$)
0.0833	3759.0	11.0	0.289
0.1670	3755.0	15.0	0.409
0.2500	3752.0	18.0	0.500
0.5000	3744.5	25.5	0.707
0.7500	3741.0	29.0	0.866
1.0000	3738.0	32.0	1.000
2.0000	3727.0	43.0	1.414
3.0000	3719.0	51.0	1.732
4.0000	3713.0	57.0	2.000
5.0000	3708.0	62.0	2.236
6.0000	3704.0	66.0	2.449
7.0000	3700.0	70.0	2.646
8.0000	3695.0	75.0	2.828
9.0000	3692.0	78.0	3.000
10.0000	3690.0	80.0	3.162
12.0000	3684.0	86.0	3.464
24.0000	3662.0	108.0	4.899
48.0000	3635.0	135.0	6.928
96.0000	3608.0	162.0	9.798
240.0000	3570.0	200.0	14.142

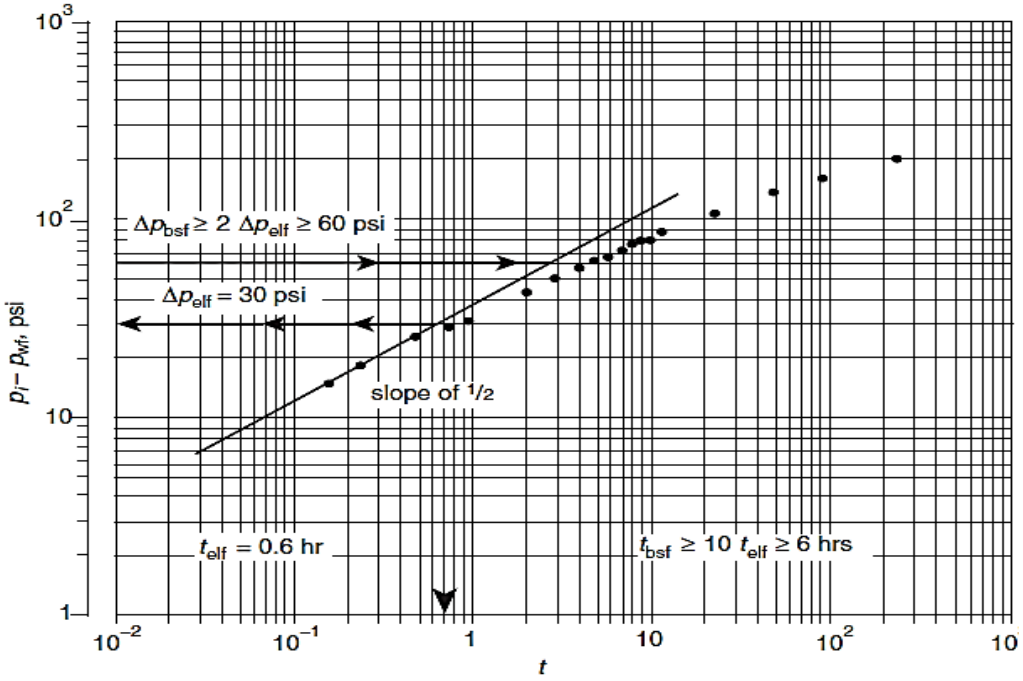
الجدول 1-2 : بيانات الفحص للمثال رقم-2

1- نرسم الاشكال الاتية:

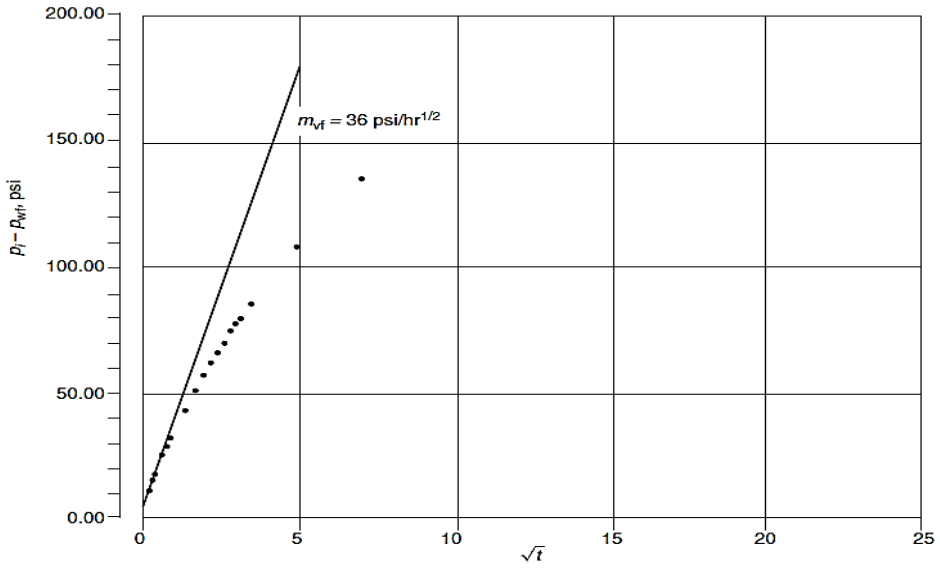
* رسم بياني لوغاريتمي لعلاقة ΔP vs t ، الشكل1-22

* رسم بياني عادي لعلاقة ΔP vs $t^{1/2}$ ، الشكل1-23

* رسم بياني نصف لوغاريتمي لعلاقة ΔP vs t ، الشكل1-24



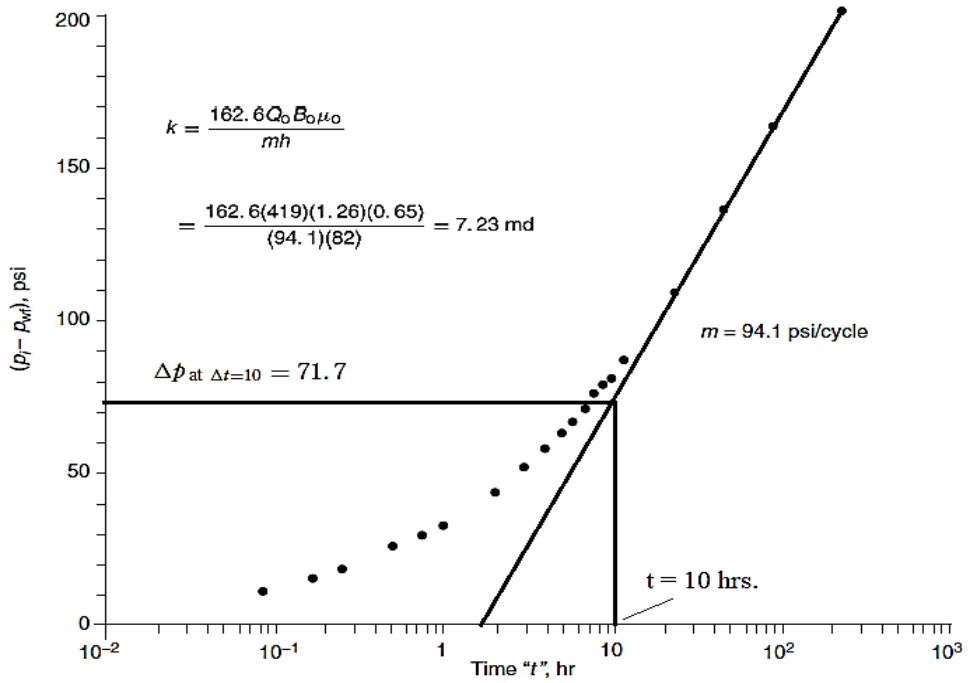
الشكل 1-22 : رسم لوغاريتمي لبيانات هبوط الضغط –المثال رقم-2



الشكل 1-23 : رسم طور الجريان الخطي لبيانات هبوط الضغط –المثال رقم-2

2- من الرسم البياني اللوغاريتمي ، نمرر افضل خط مستقيم يمر بالنقاط الاولية و نحسب الميل له نلاحظ ان الميل للخط المستقيم يساوي النصف و لا يساوي الواحد اي ان الجريان خطي و لايوجد تاثير لتخزين البئر . يستغرق الجريان الخطي هذا بحدود .0.6 hrs ، اي ان وقت نهاية الجريان الخطي و تغير الضغط المقابل له يساوي على التوالي:

$t_{elf} = 0.6$ hours
$\Delta p_{elf} = 30$ psi



الشكل 1-24 : رسم نصف لوغاريتمي لبيانات هبوط الضغط –المثال رقم-2

عليه وبحسب قاعدة مضاعفة الزمن one log cycle فان بداية الدخول الى الجريان شبه الشعاعي سيكون عندما :

$$t_{bsf} \geq 10 t_{elf} \geq 6 \text{ hours}$$

$$\Delta p_{bsf} \geq 2 \Delta p_{elf} \geq 60 \text{ psi}$$

3- من الرسم البياني النصف لوغاريتمي التقليدي لعلاقة ΔP vs t الشكل1-24 ، نرسم خط مستقيم ليمثل منطقة طور الجريان شبه الشعاعي و نجد له الميل $m = 94.1$ psi/cycle ومن الميل نحسب نفاذية الطبقة المكمنية :

$$k = \frac{162.6 Q_o B_o \mu_o}{mh} = \frac{162.6(419)(1.26)(0.65)}{(94.1)(82)}$$

$$k = 7.23 \text{ md}$$

4- لما كان الجريان خطيا فمن الرسم البياني العادي لعلاقة ΔP vs $t^{1/2}$ (الشكل1-23) نرسم احسن خط مستقيم يمر بنقاط الضغط الاولية والتي تكون ضمن المدة اقل من 0.3 hrs . فيكون ميل الخط المستقيم $m_{vf} = 36$ psi/hr$^{1/2}$

- حساب نصف طول الشق و كما يأتي:

$$x_f = \left[\frac{4.064 QB}{m_{vf} h}\right] \sqrt{\frac{\mu}{k \phi c_t}}$$

$$= \left[\frac{4.064(419)(1.26)}{(36)(82)}\right]\sqrt{\frac{0.65}{(7.23)(0.12)(21\times10^{-6})}}$$

$$x_f = 137.3 \text{ ft}$$

5- حساب ΔP_{1hr} من الشكل1-24 مباشرة بعد ان نمد الخط المستقيم ليتقاطع مع t =1 hr (لاحظ ان امتداد الخط المستقيم سيتقاطع مع الوقت الساعة واحدة سيعطي فرق بالضغط سالب) او ممكن حسابها من اي نقطة تقع على الخط المستقيم و نحدد مثلا $\Delta P_{at\ log(10)}$=71.7 psi عندما 10= t hr و كما يأتي :

$m=(\Delta p_{\ at\ \Delta t=10} - \Delta p_{\ at\ \Delta t=1})/ (log10 – log1)$

$94.1 = (71.7 - \Delta p_{\ at\ \Delta t=1})/ (1-0)$

$$\Delta p_{1\text{ hr}} = \Delta p_{\text{at }\Delta t=10} - m = 71.7 - 94.1 = -22.4 \text{ psi}$$

- حساب عامل القشرة الكلي:

$$s = 1.151\left[\frac{\Delta p_{1\text{ hr}}}{|m|} - \log\left(\frac{k}{\phi\mu c_t r_w^2}\right) + 3.23\right]$$

$$= 1.151\left[\frac{-22.4}{94.1} - \log\left(\frac{7.23}{0.12(0.65)(21\times10^{-6})(0.28)^2}\right) + 3.23\right]$$

$$s = -5.5$$

6- حساب نصف قطر البئر الظاهري او الفعال $r_{wa} = r_w e^{-s}$ كالاتي:

$$r_{wa} = r_w e^{-s} = 0.28e^{5.5} = 68.5 \text{ ft}$$

هنا ازداد نصف القطر الظاهري للبئر بشكل ملحوظ اي كأن البئر ينتج بنصف قطر مقداره 68.5 ft وليس 0.28 ft لكون هنالك تنشيط وتحفيز للبئر stimulated بسبب التشقق الهيدروليكي .

عامل القشرة:

لاحظ، ان عامل القشرة الكلي للابار النفطية والغازية اعلاه هو محصلة للعديد من عوامل القشرة و التي تشتمل على:

$$s = s_d + s_f + s_t + s_p + s_{sw} + s_r \quad \text{---------- 51}$$

إذ ان

s_d = skin due to formation and fracture damage
s_f = skin due to the fracture, large negative value $s_f \ll 0$
s_t = skin due to turbulence flow
s_p = skin due to perforations
s_w = skin due to slanted well
s_r = skin due to restricted flow

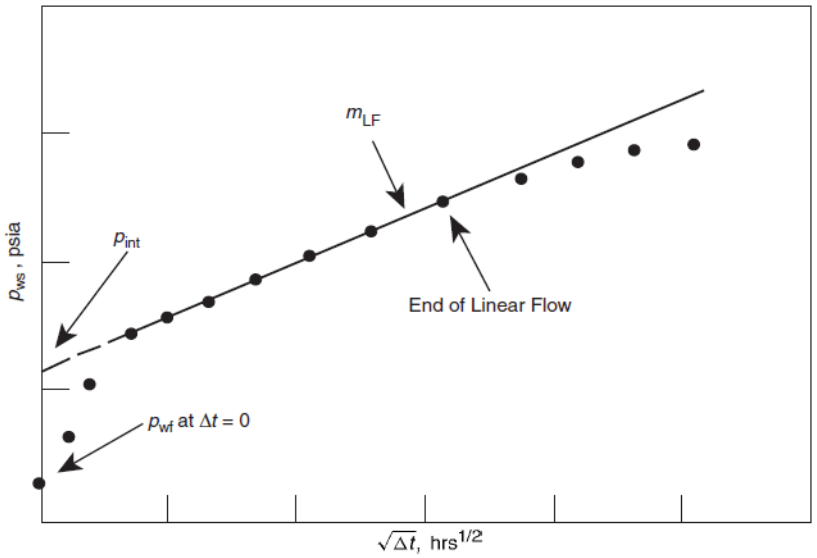
بالنسبة للابار النفطية فلا تعمل بعض عوامل القشرة مثل s_r ، s_{lw} ، s_p ، s_t فتبقى فقط:

$$s = s_d + s_f \quad \text{---------- 52}$$

بالترتيب لحساب تاثير عامل القشرة للشق فقط و هو على الاغلب سالب و يساوي:

$$s_f = s - s_d \quad \text{---------- 53}$$

هنا نحتاج لحساب عامل القشرة من جراء تضرر الشق و المكمن - s_d ، لذا فقد اقترح كلا من Smith and Cobb حساب المعامل اعلاه من الرسم البياني للجذر التربيعي للوقت مع الضغط و كما في الشكل1-25 ادناه .



الشكل 1-25 : تاثير عامل القشرة على على رسم طور الجريان الخطي- الجذر التربيعي للوقت

في الحالة المثالية و من دون وجود اي تضرر فان تقاطع intercept الخط المستقيم مع الاحداثي الصادي P_{int} عند $\Delta t=0$ يكون مساوي لاول قيمة لضغط الجريان من بيانات الفحص اي عندما $\Delta t=0$ و يرمُز لها $P_{wf\ @\ \Delta t=0}$ الشكل1-25 . في حالة وجود التضرر فان P_{int} يكون اعلى من قيمة $P_{wf\ @\ \Delta t=0}$.

لحساب فقدان (هبوط) الضغط من جراء عامل القشرة $(\Delta P_s)_d$ نستخدم المعادلة الاتية :

$$(\Delta p_s)_d = p_{int} - p_{wf\ at\ \Delta t=0} = \left[\frac{141.2QB\mu}{kh}\right] s_d \quad \text{---------- 54}$$

بالترتيب ينتج ان :

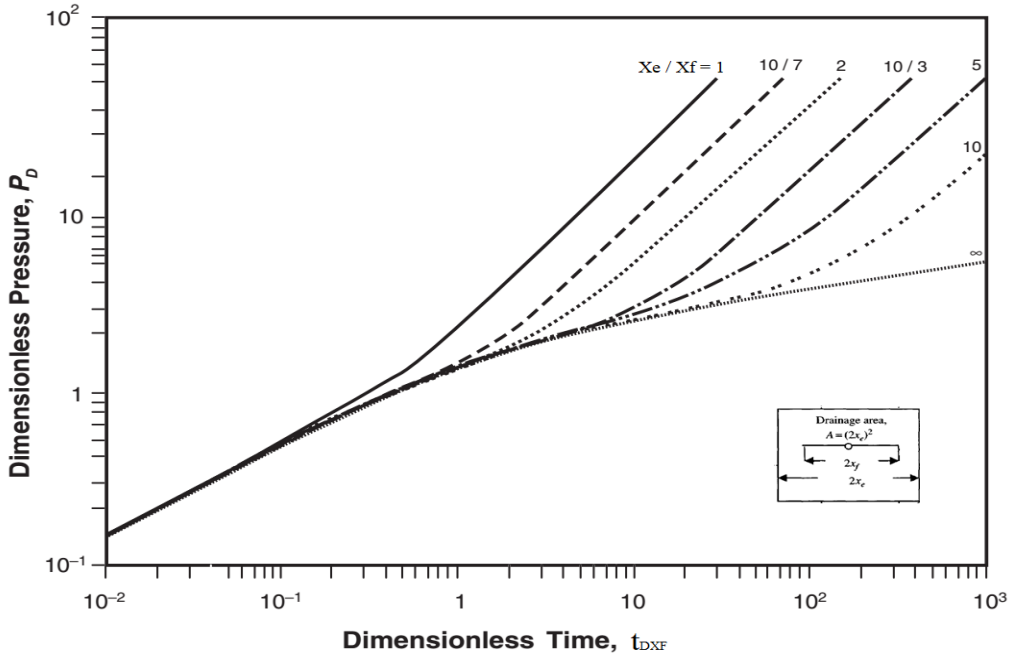
$$s_d = \frac{p_{int} - p_{wf\ at\ \Delta t=0}}{\left[\frac{141.2QB\mu}{kh}\right]} \quad \text{---------- 55}$$

إذ ان $(\Delta P_s)_d$ pressure loss due to skin damage تُمثل الضغط المفقود من جراء التضرر و ان كلا من P_{int} و $P_{wf\,@\,\Delta t=0}$ تُحدد من الرسم. العامل s يُحسب من المعادلة رقم-45.

1-9-2 تفسير فحص الابار المتشققة هيدروليكيا بطريقة تطابق المنحنيات النوعي

ان حدود المكمن في التفسير التقليدي لفحص الابار المتشققة يؤثر على الخط نصف لوغاريتمي فاذا كان نصف طول الشق اعلى من ثلث نصف قطر منطقة التصريف ذلك يتسبب في انحراف و تشويه الخط مما يؤدي الى تضليل في النتائج . نسبيا فالشق ذات الاطوال القصيرة سيُظهر طور جريان شعاعي و بزيادة طول الشق فالجريان يتحول الى خطي.

ظاهرة تاثر الضغط بطول الشق وانعكاسه على ميل منحني تصاعد الضغط تم ادخاله في تفسير فحوصات الابار المتشققة باستخدام تطابق المنحنيات النوعي Type curves matching . إذ أُدخل تاثير نصف طول الشق ضمنا في نسبة اختراق الشق لمنطقة التصريف x_e/x_f . فالشقوق القليلة الاختراق فان منحني الضغط يقترب من حالة الجريان الشعاعي المكافىء Pseudoradial flow لحين تصل قيمة $x_f/x_e \approx 0$ or $x_e/x_f \approx \infty$ فالجريان يصبح شعاعي بالكامل اما الشقوق عالية الاختراق $x_e/x_f \approx 1$ فان منحني الضغط يعكس و يوضح حالة الجريان الخطي المكمني من ميل النصف.



الشكل 1-26 : تطابق المنحنيات النوعي للابار المتشققة عموديا ، تقع في مركز منطقة تصريف مربعة الشكل، توصيلية الشق من النوع اللامتناهي و يهمل تاثير تخزين البئر(Gringarten -1974)

1- طريقة كرينكارتن - تطابق المنحنيات

على غرار الابار غير المتشققة ادخل كرينكارتن Gringarten et al. (1974) تاثير طول الشق

في تفسير بيانات فحص تصاعد ضغط buildup test الابار المتشققة باستخدام تطابق المنحنيات لحالتي الابار المتشققة هايدروليكيا ذات التوصيلية غير المحدودة infinite conductivity الشكل1-26 و الشقوق العمودية متجانسة التدفق uniform flux vertical fracture الشكل1-27 . تفترض الطريقة ان الابار تنتج بمعدل ثابت لمائع قليل الانضغاط من منطقة تصريف مربعة الشكل و تهمل تاثير تخزين البئر.

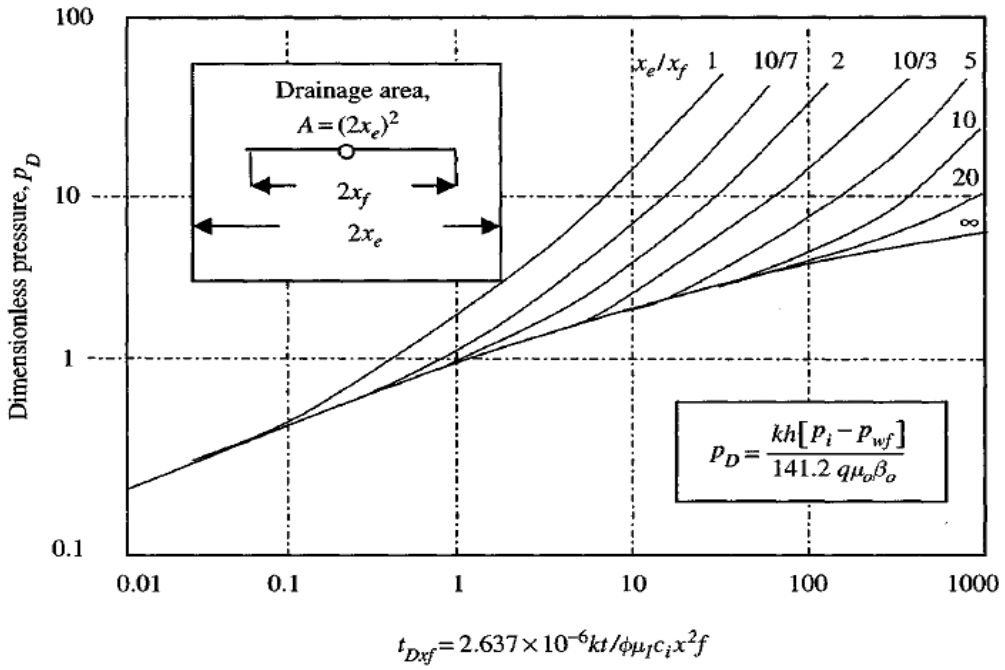
مساحة منطقة التصريف تساوي :

$$A=(2x_e)^2 \text{ --------- } 56$$

طول منطقة التصريف يساوي:

$$x_e = (A)^{0.5}/2 \text{ -------- } 57$$

ان منحنيات تطابق كرينكارتن Gringarten et al تربط الضغط اللابعدي P_D مع الزمن اللابعدي للاساس نصف طول الشق اللابعدي t_{Dxf} في رسم بياني لوغاريتمي و لقيم مختلفة لنسبة اختراق الشق x_e / x_f الشكل1-26 .



الشكل 1-27 : تطابق المنحنيات النوعي للابار المتشققة عموديا التي تقع في مركز منطقة تصريف مربعة الشكل و توصيلية الشق من النوع المنتظم و يهمل تاثير تخزين البئر(Gringarten – 1974)

إذ ان :

$$p_D = \frac{kh\Delta p}{141.2QB\mu} \quad \text{(drawdown test)}$$

$$t_{Dxf} = \frac{0.000264kt}{\phi\mu c_t x_f^2}$$

$$t_{Dxf} = \frac{t_D r_w^2}{x_f^2} \quad \text{---------} \ 58$$

يُمكن تحديد نهاية مدة الجريان الخطي the linear flow period end باعتماد الدالة t_{Dxf} لقيم $x_e / x_f > 1$ و كما يأتي:

$t_{Dxf} \cong 0.016$ (infinite-conductivity fracture)

$t_{Dxf} \cong 0.16$ (uniform-flux fracture)

و بداية الجريان شبه الشعاعي pseudo-radial flow period start باعتماد الدالة t_{Dxf} لقيم $x_e / x_f > 5$ و كما يأتي:

$t_{Dxf} \cong 3$ (for infinite-conductivity fracture)

$t_{Dxf} \cong 2$ (uniform-flux fracture)

منحنيات التطابق النظرية تُبين ان المدة الاولية من الفحص تدخل ضمن تاثير منطقة الجريان الخطي إذ ان سلوك الضغط في الرسم البياني اللوغاريتمي يتميز بخط مستقيم يميل بمقدار النصف 1/2 . يُمكن حصر مدة الجريان شبه الشعاعي ما بين $1 < t_{Dxf} < 3$ و ما بعدها في المدد المتاخرة تصل جميع المنحنيات الى حالة الجريان شبه المستقر Pseudo steady state. اذن فالطريقة تجمع اطوار جريان متعددة في رسم بياني واحد غير الطرق التقليدية التي تُستخدم لطور معين .

خطوات تفسير الفحص:

1- رسم بيانات الفحص (فحص هبوط او تصاعد الضغط) في رسم بياني لوغاريتمي شفاف لعلاقة فرق الضغط مع الوقت ΔP vs t بمقياس رسم مماثل الى منحنيات التطابق النظرية الرئيسة .

2- عمل تطابق لبيانات الفحص مع احد المنحنيات النظرية الرئيسة .

3- ومن التطابق نحدد نقطة التطابق MP-Match Point لا على التعيين مع احداثياتها كالاتي:

$$\left[\frac{p_D}{\Delta p}\right]_{MP} , \left(\frac{\Delta t}{t_{Dx_f}}\right)_{MP}$$

4- نستخدم الاحداثيات اعلاه لحساب النفاذية كما يلي :

$$k = \frac{141.2QB\mu}{h}\left[\frac{p_D}{\Delta p}\right]_{MP} \quad \text{---------- } 59$$

5- حساب نصف طول الشق و يساوي:

$$x_f = \sqrt{\frac{0.0002637k}{\phi\mu C_t}\left(\frac{\Delta t}{t_{Dx_f}}\right)_{MP}} \quad \text{---------- 60}$$

- كرينكارتن وجماعته وجدوا انه في حال $x_e/x_f > 1$ فان نصف القطر الظاهري للبئر المتشقق يساوي :

$$r_{wa} \approx \frac{x_f}{2} = r_w e^{-s} \quad \text{---------- 61}$$

- بالامكان حساب عامل القشرة بشكل تقريبي و كالاتي:

$$s = \ln\left(\frac{2r_w}{x_f}\right) \quad \text{---------- 62}$$

في المكامن الغازية الصلدة tight gas reservoir ذات النفاذية القليلة تكون طول مدة الفحص ليست كافية للوصول الى طور الجريان شبه الشعاعي و ستقع نقاط الفحص على ميل النصف (الجريان الخطي) فقط ، عندها فلا يُمكن حساب النفاذية لا بالطريقة الاعتيادية النصف اللوغاريتمية semi-log ولا بطريقة تطابق المنحنيات اللوغاريتمية.

لذلك ولهذه الحالة فقط ، توصل ايرلوغر Earlougher (1977) الى طريقة تقريبية في حساب الحد الاعلى للنفاذية و الحد الادنى لنصف طول الشق عبر استخدام نهايات ميل النصف لتحديد نهاية تغير الضغط ΔP_{last} و يقابله نهاية الوقت t_{last} و منها يُمكن تخمين الحد الاعلى للنفاذية و كما يأتي:

$$k \le \frac{30.358QB\mu}{h(\Delta p)_{last}} \quad \text{---------- 63}$$

والحد الادنى لنصف طول الشق كما يلي:

$$x_f \ge \sqrt{\frac{0.01648k(t)_{last}}{\phi\mu c_t}} \quad \text{---------- 64}$$

المعادلتان اعلاه تكونان فعالة عندما تكون النسبة $x_e/x_f >> 1$ والشق ذا توصيلية غير محدودة Infinite conductivity fracture. اما في حالة كون الشق ذا تدفق منتظم Uniform flux fracture ستصبح المعادلتان كالاتي :

$$k \le \frac{107.31QB\mu}{h(\Delta p)_{last}} \quad \text{---------- 65}$$

$$x_f \ge \sqrt{\frac{0.001648.k(t)_{last}}{\phi\mu c_t}} \quad \text{---------- 66}$$

مثال-3 تطابق منحنيات بطريقة كرينكارتن لفحص هبوط الضغط

تم اجراء فحص هبوط الضغط لبئر نفطي متشقق هيدروليكيا ، بيانات الفحص أُدرجت في الجدول 3-1.

استخدم الطريقة العادية وطريقة كرينكارتن Gringarten et al لحساب النفاذية ، طول الشق و عامل القشرة ؟؟ اوجد بداية ونهاية الجريان الشعاعي بالطريقة العادية ؟؟ حدد مناطق الجريان الخطي والشعاعي بالطريقتين؟؟

البيانات المتوفرة الاخرى كما يأتي:

$Q=200$ stb/d (constant)، $h=12$ ft، $c_t=1210^{-6}$ psi^{-1} ، $B_o=1.288$ bbl/stb ، $\mu=0.5$ cp، $\phi=0.1$.

Time, t (hr)	Time $\sqrt{t}$ $(hr)^{0.5}$	Pressure, p_{wf} (psig)	$(p_i - p_{wf})$ (psig)	$(p_i - p_{wf})$ (psia)
0.0000	0	4000	0	15
0.1500	0.39	3982	18	33
0.2000	0.45	3978	22	37
0.3000	0.55	3975	25	40
0.4000	0.63	3969	31	46
0.5000	0.71	3965	35	50
0.6000	0.77	3960	40	55
0.8000	0.89	3957	43	58
1.0000	1.00	3950	50	65
1.5000	1.22	3932	68	83
2.0000	1.41	3922	78	93
3.0000	1.73	3907	93	108
4.0000	2.00	3896	104	119
5.0000	2.24	3886	114	129
6.0000	2.45	3879	121	136
8.0000	2.83	3866	134	149
10.0000	3.16	3856	144	159
15.0000	3.87	3837	163	178
20.0000	4.47	3823	177	192
30.0000	5.48	3803	197	112
40.0000	6.32	3789	211	226
50.0000	7.07	3778	222	237
60.0000	7.75	3768	232	247
80.0000	8.94	3755	245	260
100.0000	10.0	3744	256	271

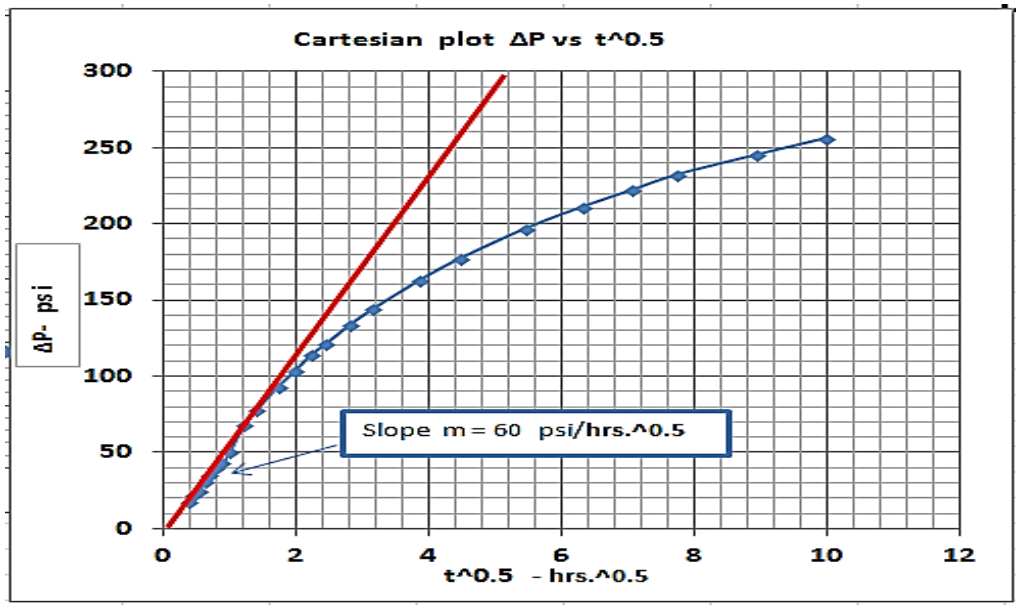
الجدول 1-3 : بيانات الفحص للمثال رقم-3

خطوات التفسير :

- رسم علاقة ΔP vs t على ورق لوغاريتمي log-log (الشكل1-28).
- نلاحظ من الرسم انه لا يوجد تاثير لتخزين البئر كما و هنالك امكانية لرسم خط مستقيم يمر بالنقاط الاولية وبميل تقريبا $m_{vf}=1/2$.



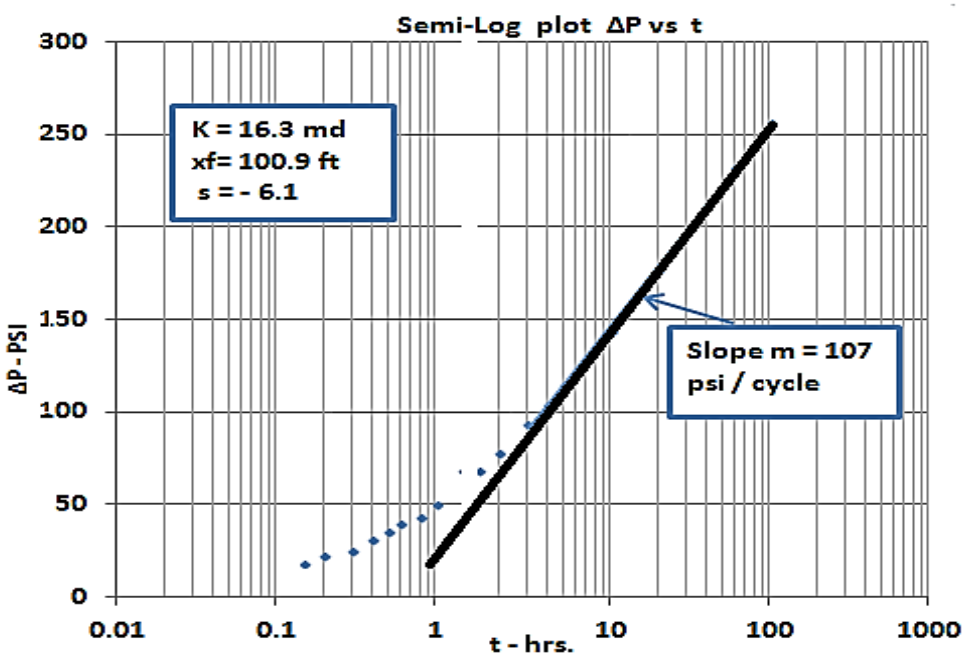
الشكل 1-28 : رسم لوغاريتمي لبيانات هبوط الضغط-المثال رقم-3



الشكل 1-29 : رسم الجذر التربيعي للوقت - بيانات هبوط الضغط للمثال رقم-3

- بناء" على الخطوة اعلاه ، نرسم رسما بيانيا خاصا لعلاقة ΔP vs $t^{1/2}$ بمقياس عادي cartesian (الشكل 1-29) ، و نمرر خطا مستقيما يعكس الجريان الخطي ، نحسب الميل له والذي يساوي m_{vf}=60 psi/$hr^{1/2}$.

- نجد قيمة تغير الضغط في نهاية الجريان الخطي و التي بحدود ΔP_{el}=40 psi اذ تُمثل النقطة الاخيرة لمرحلة الجريان الخطي على الرسم البياني الخاص ΔP vs $t^{1/2}$ و عندها يبدا سلوك الضغط بالانحراف عن الخط المستقيم اذ تُمثل بشكل تقريبي بداية الدخول الى منطقة الجريان شبه الشعاعي. اذن و بحسب قاعدة الضعف double rule فان فرق الضغط في بداية الجريان شبه الشعاعي يساوي ضعف الضغط في نهاية الجريان الخطي $\Delta p_{bsf} \geq 2\ \Delta p_{elf}$ beginning of the infinite acting pseudoradial flow اي ان ΔP_{bsf} =2×40=80 psi ، سنتاكد من ان ΔP_{bsi} =2× ΔP_{el} وذلك عبر الخطوة اللاحقة.



الشكل 1-30 : رسم نصف لوغاريتمي لبيانات هبوط الضغط -المثال رقم-3

- **التفسير بالطريقة الاعتيادية التقليدية** ، نرسم رسم بياني نصف- لوغاريتمي لعلاقة فرق الضغط مع الزمن و نجد قيمة ميل الخط المستقيم المار بنقاط الفحص، نستفاد من ΔP_{bsi} =2×40=80 psi و امكانية اعتبارها بداية الخط المستقيم لمنطقة الجريان الشعاعي (الشكل1-30). نجد ميل الخط المستقيم و الذي يساوي m= 107 psi/cycle ثم نجد نفاذية المكمن k و تساوي :

$$k = \frac{162.6q\mu_o\mu_o}{mh} = \frac{162.6 \times 200 \times 0.50 \times 1.288}{107(12)} = 16.31\ \text{mD}$$

- حساب نصف طول الشق x_f :

$$x_f^2 = \left(\frac{4.064q\beta_o}{hm_{vf}}\right)^2 \frac{\mu_o}{\phi c_t k}$$

$$= \left(\frac{4.064 \times 200 \times 1.288}{12 \times 60}\right)^2 \frac{0.50}{0.10 \times 20 \times 10^{-6} \times 16.33} = 29423.56$$

$$x_f = 171 \text{ ft}$$

- حساب عامل القشرة s بعد ان نجد فرق الضغط لساعة واحدة ΔP_{1hr} من الرسم البياني مباشرة على ان يقع على الخط المستقيم او امتداده و الذي يساوي ΔP_{1hr}=35 psi :

$$\Delta p_{1\,hr} = 35 \text{ psi},$$
$$p_i - p_{1\,hr} = \Delta p_{1\,hr}$$

$$s = 1.151\left[\frac{p_i - p_{1\,hr}}{m} - \log\left(\frac{k}{\phi\mu c_t r_w^2}\right) + 3.23\right]$$

$$= 1.151\left[\frac{35}{107.0} - \log\left(\frac{16.31}{0.1(0.5)(20 \times 10^{-6})(0.29)^2}\right) + 3.23\right]$$

$$s = -4.8$$

<u>- التفسير بطريقة تطابق المنحنيات</u>

1- رسم على ورق شفاف لوغاريتمي بيانات الفحص لعلاقة ΔP vs t وبمقياس بمثل مقياس رسم منحنيات التطابق النظرية الشكل 1-30 .

2- نتاكد من ان النقاط الاولية للفحص تقع على خط الميل النصف لتعكس و جود طور الجريان الخطي في الشق.

3- نطابق البيانات الحقيقية مع المنحنيات النظرية و نُزحف الرسم بياني الشفاف لحين ان نحصل على تطابق مع احدى المنحنيات النظرية.

4- من الشكل 1-31 ممكن ان نحدد خط مستقيم يمر بالبيانات الاولية وبميل النصف ، هذا مؤشر على وجود جريان خطي عبر الشق.

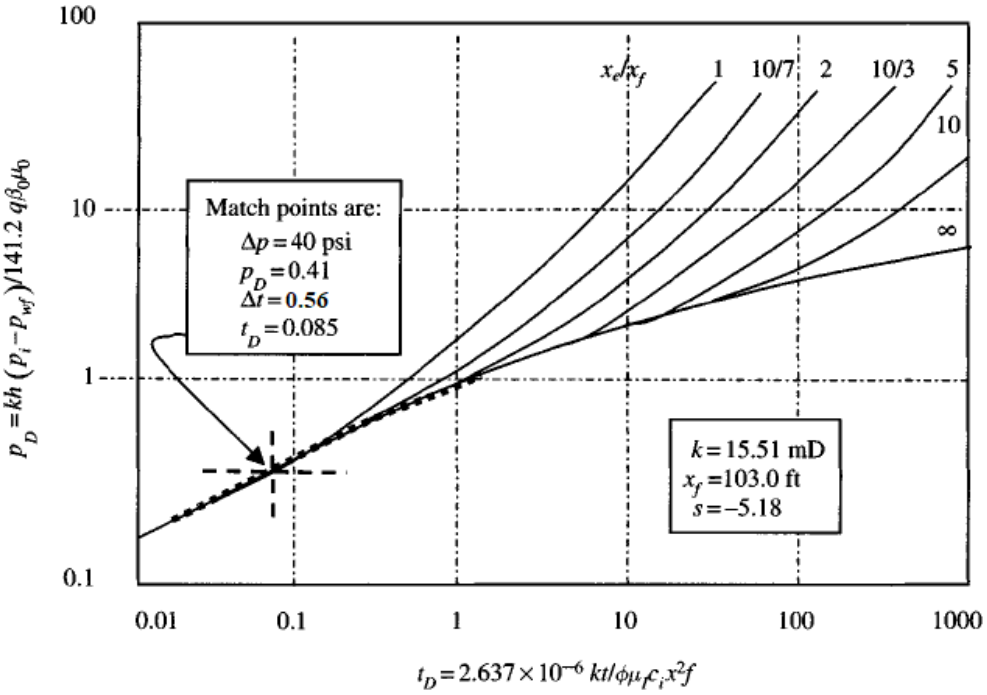
5- نختار اي نقطة تطابق من على الخط المستقيم و لتكن احداثياتها

t_D=0.085 ، t = 0.56 hr ، P_D=0.41 ،ΔP=40 psi

6- حساب النفاذية k كما في المعادلة ادناه :

$$k = 141.2\frac{q\beta_o\mu_o}{h}\left[\frac{p_D}{\Delta p}\right]_M$$

$$k = \frac{141.2(200)(1.288)(0.5)}{12} \times \frac{0.41}{40} = 15.51 \text{ mD}$$



الشكل 1-31 : تطابق المنحنيات النوعي لبيانات هبوط الضغط -المثال رقم-3

7- حساب نصف طول الشق او المسافة التي يمتد بها الشق من مركز البئر باتجاه المكمن و كما يأتي:

$$x_f^2 = \sqrt{\frac{0.000264k}{\phi\mu c_t} \times \left(\frac{t}{t_D}\right)_M}$$

$$x_f^2 = \sqrt{\frac{0.000264(15.51)}{0.1(0.5)(20 \times 10^{-6})}} \times \frac{0.56}{0.085}$$
$$= 26959 \text{ ft}^2$$

اذن x_f يساوي:

$$x_f = 164.1 \text{ ft.}$$

-لاحظ هنا أنه ليس بالامكان ايجاد قيمة x_e لان التطابق لم يمتد لمدة كافية ليصل لاي قيمة من منحنيات النسبة x_e/x_f.

- حساب عامل القشرة من المعادلة الاتية :

$$s = -\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)$$

$$r_{wa} = x_f/2$$
$$= 164/2 = 82 \text{ ft}$$

$$s = -\ln(82/0.29) = -5.65$$

تم اخذ قيمة $r_{wa}=r_e$ والتي تُمثل اقصى حد لتاثير الشق. ان النتائج بكلتا الطريقتين مقبولة.

تفسير تصاعد الضغط بطريقة تطابق المنحنيات (كرينكارتن)

خطوات التفسير تتضمن ما يأتي:

1- رسم علاقة $(P_{ws}-P_{wf})$ vs Δt على ورق لوغاريتمي log-log شفاف قياس 3×5 cycles .

2- نطابق البيانات الحقيقية مع منحنيات التطابق النظرية و نحدد نقطة تطابق مع احداثياتها لكلا المنحنيين و من ثم حساب النفاذية و نصف طول الشق كما في ادناه ، ان احداثيات نقطة تطابق:

Δt_M ،$(t_{DLx})_M$ ، $(P_{ws}-P_{wf})_M$ ،P_{DM}

3- حساب النفاذية :

$$k = 141.2\frac{q\mu\beta}{h}\frac{(p_D)_M}{(p_{ws}-p_{wf})_M} \quad \text{---------- 67}$$

4- حساب نصف طول الشق:

$$x_f = \sqrt{\frac{0.000264k}{\phi\mu c_t}\frac{(t)_M}{(t_{DLx})_M}} \quad \text{---------- 68}$$

5- في حال ظهور خط ميل النصف للجريان الخطي في الرسم البياني اللوغاريتمي نعيد رسم البيانات الحقيقية على رسم بمقياس عادي لعلاقة P_{ws} vs $t^{1/2}$ ، نحدد احسن خط مستقيم يمر عبر بيانات الفحص و نجد ميله m_L . من الميل نحسب قيمة :

$$x_f\sqrt{k} = \frac{4.064q\beta}{hm_L}\sqrt{\frac{\mu}{\phi c_t}} \quad \text{---------- 69}$$

6- في حال ظهور منطقة الجريان الشعاعي في تطابق المنحنيات قبل انحراف البيانات عن x_e/x_f = infinity نرسم علاقة P_{ws} vs $\log\Delta t$ or $\log(tp+\Delta t/\Delta t)$ على احداثيات نصف لوغاريتمية و نحسب الميل m و من ثم نجد النفاذية :

$$k = \frac{162.6q\mu_o\mu_o}{mh} :$$

7- اذا كان المكمن من النوع المحدود bounded ممكن حساب x_e من التطابق x_e/x_f لنقارنها مع x_e المحسوبة من المعادلة الاتية :

$$x_e = 0.029\sqrt{\frac{kt_p}{\phi\mu c_t}} \quad \text{---------- 70}$$

مثال-4 تطابق منحنيات بطريقة كرينكارتن لفحص تصاعد الضغط

بيانات فحص تصاعد الضغط لبئر نفطي متشقق هيدروليكيا مدرجة في الجدول4-1

حاول تفسير الفحص بالطريقتين العادية و تطابق المنحنيات على اعتبار الشق من النوع اللامتناهي fractured infinite conductivity و احسب :النفاذية k ، نصف طول الشق x_f و عامل القشرة s ؟؟

Time, Δt (hr)	$\frac{(t_p+\Delta t)}{\Delta t}$	Time$^{0.5}$ (hr$^{0.5}$)	Pressure, p_{ws} (psig)	$(p_{ws} - p_{ws(\Delta t=0)})$ (psig)	$\frac{p_{ws}-p_{ws(\Delta t=0)}}{\Delta t}$ (psig/hr)	Time, $\sqrt{\Delta t}$ (hr$^{0.5}$)
0.00	–	–	3420	0	–	–
0.08	93,638.46	0.289	3431	11	1.20E + 02	0.283
0.17	46,707.59	0.409	3435	15	1.10E + 02	0.412
0.25	31,201.00	0.500	3438	18	8.33E + 01	0.500
0.50	15,601.00	0.707	3445	25	7.75E + 01	0.707
0.75	10,401.00	0.866	3449	29	7.00E + 01	0.866
1.00	7801.00	1.000	3452	32	6.67E + 01	1.000
2.00	3901.00	1.414	3463	43	5.38E + 01	1.414
3.00	2601.00	1.732	3471	51	5.00E + 01	1.732
4.00	1951.00	2.000	3477	57	4.53E + 01	2.000
5.00	1561.00	2.236	3482	62	3.90E + 01	2.236
6.00	1301.00	2.449	3486	66	3.10E + 01	2.450
7.00	1115.29	2.646	3490	70	2.60E + 01	2.646
8.00	976.00	2.828	3495	75	2.28E + 01	2.828
9.00	867.67	3.000	3498	78	2.02E + 01	3.000
10.00	781.00	3.162	3500	80	1.68E + 01	3.162
12.00	651.00	3.464	3506	86	1.44E + 01	3.464
24.00	326.00	4.899	3528	108	1.09E + 01	4.900
36.00	217.67	6.000	3544	124	8.85E + 00	6.000
48.00	163.50	6.928	3555	135	6.57E + 00	6.928
60.00	131.00	7.746	3563	143	5.28E + 00	7.746
72.00	109.33	8.485	3570	150	4.44E + 00	8.485
96.00	82.25	9.798	3582	162	3.87E + 00	9.798
120.00	66.00	10.954	3590	170	3.06E + 00	10.955
144.00	55.17	12.000	3600	180	2.56E + 00	12.000
192.00	41.63	13.856	3610	190	0.00E + 00	13.856
240.00	33.50	15.492	3620	200	0.00E + 00	15.492

الجدول 4-1 : بيانات الفحص للمثال رقم-4

المعلومات الاخرى المتوفرة في ادناه :

well depth=9500 ft ، Q=419 stb/d ، h=82 ft ، rw=0.28 ft ، ø = 0.12 ، μ=0.65 cp Bo=1.26 bbl/stb ، ct=21×10^{-6} psi^{-1} ، cumulative production at shut-in time Np=136175 stb.

الحل:

1- حساب المدة الزمنية لجريان البئر قبل الغلق و تساوي :

$$t_p = \frac{24N_p}{q} = \frac{24 \times 136{,}175}{419} = 7800 \text{ hours}$$

2- واضح ان مدة الانتاج 7800 hrs. اطول بكثير من مدة الغلق 240 hrs.

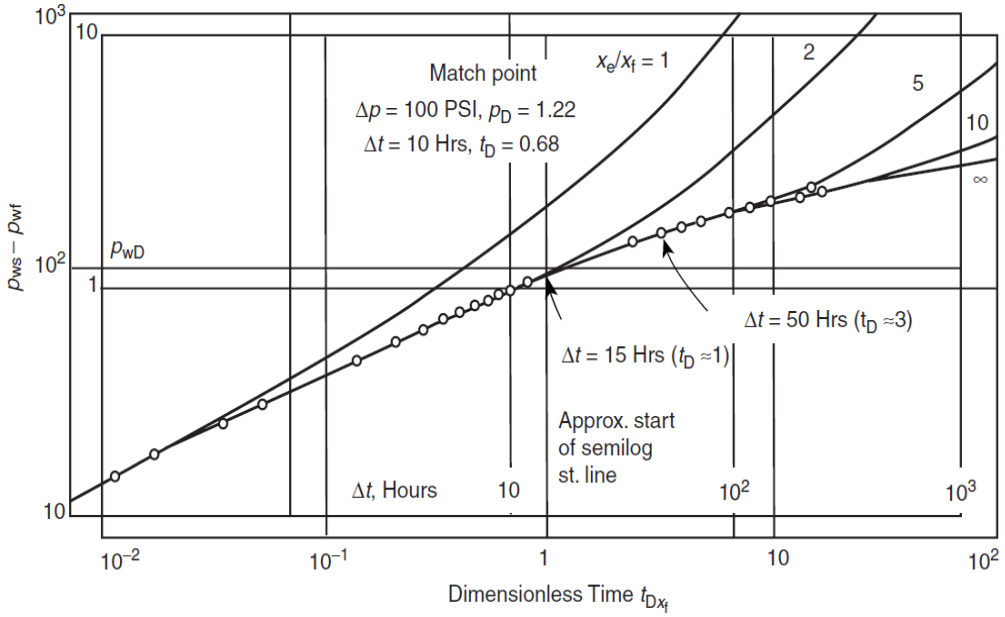
3- نجري الحسابات المطلوبة لتهيئة البيانات بالطريقتين التقليدية و التطابق و حسب الجدول4-1 .

4- لغرض اجراء التطابق بطريقة كرينكارتن نرسم بيانات فرق الضغط المغلق مع زمن الغلق على رسم بياني لوغاريتمي له مقياس الرسم نفسه لمنحنيات كرينكارتن .

5- اجراء التطابق و نحدد احداثيات نقطة التقاطع كما في الشكل 1-32 و هي :

$(\Delta p)_{MP} = 100 \text{ psi} \quad (p_D)_{MP} = 1.22$

$(\Delta t)_{MP} = 10 \text{ hours} \quad (t_D)_{MP} = 0.68$



الشكل 1-32 : تطابق المنحنيات النوعي لبيانات تصاعد الضغط -المثال رقم-4

6- حساب النفاذية :

$$k = \frac{141.2QB\mu}{h}\left[\frac{p_D}{\Delta p}\right]_{MP}$$

$$= \frac{(141.2)(419)(1.26)(0.65)}{(82)} \left[\frac{1.22}{100}\right]$$
$$= 7.21 \text{ md}$$

7- حساب نصف طول الشق :

$$x_f = \sqrt{\frac{0.0002637k}{\phi\mu C_t} \left(\frac{\Delta t}{t_{Dxf}}\right)_{MP}}$$
$$= \sqrt{\frac{0.0002637(7.21)}{(0.12)(0.65)(21 \times 10^{-6})} \left(\frac{10}{0.68}\right)} = 131 \text{ ft}$$

8- حساب نصف قطر البئر الظاهري بتاثير الشق r_{wa} والذي يساوي :

$$r_{wa} = x_f/2 = 130.72/2 = 65.36 \text{ ft.}$$

9- اذن عامل القشرة يساوي:

$$s = -\ln\left(\frac{r_{wa}}{r_w}\right) = -\ln\left(\frac{65.36}{0.28}\right) = -5.45$$

10- وحسب كرينكارتن نحسب الزمن التقريبي لبداية خط النصف لوغاريتمي و يساوي :

$$t_{Dx_f} = \left[\frac{0.0002637k}{\phi\mu c_t x_f^2}\right] t \geq 3$$

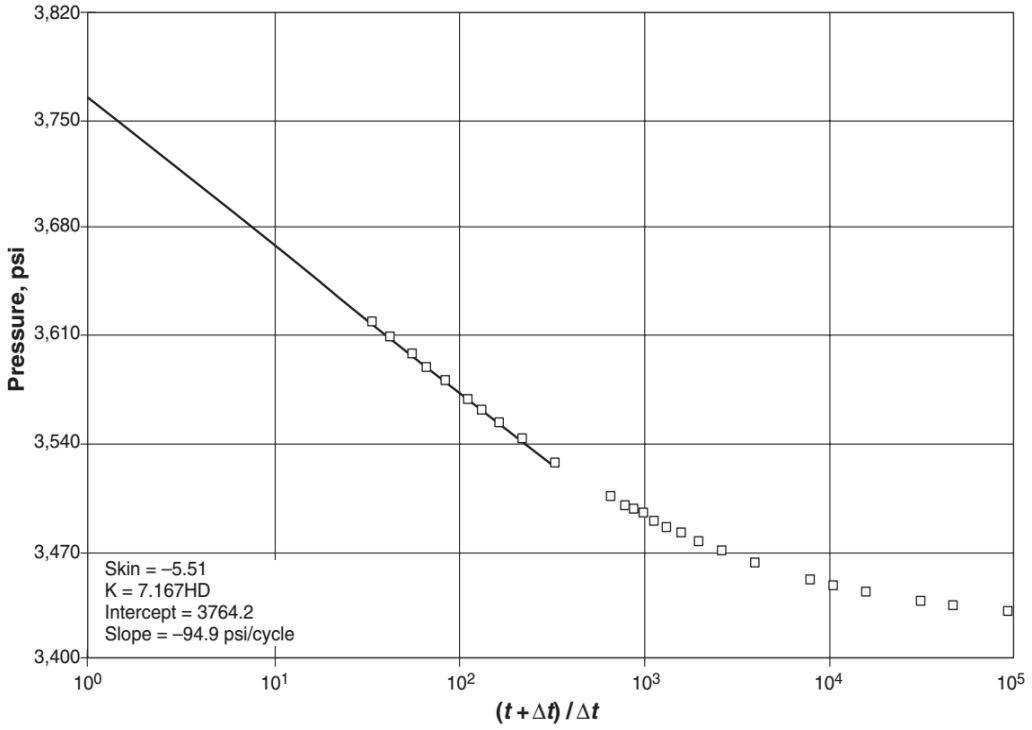
و بالتعويض

$$t \geq \frac{(3)(0.12)(0.68)(21 \times 10^{-6})(131)^2}{(0.0002637)(7.21)} \geq 50 \text{ hours}$$

11- اذن النقاط التي تلي $t > 50$ hrs يُمكن استخدامها ايضا في تفسير الفحص بطريقة هورنر لحساب نفاذية المكمن و عامل القشرة و كما في الشكل النصف لوغاريتمي رقم 1-33 في ادناه .

12- من منحني هورنر نجد ما يلي:

$$m = 95 \text{ psi/cycle}$$
$$p^* = 3764 \text{ psi} \quad p_{1 \text{ hr}} = 3395 \text{ psi}$$
$$k = 7.16 \text{ md} \quad s = -5.5$$



الشكل 1-33 : رسم نصف لوغاريتمي لبيانات تصاعد الضغط -المثال رقم-4

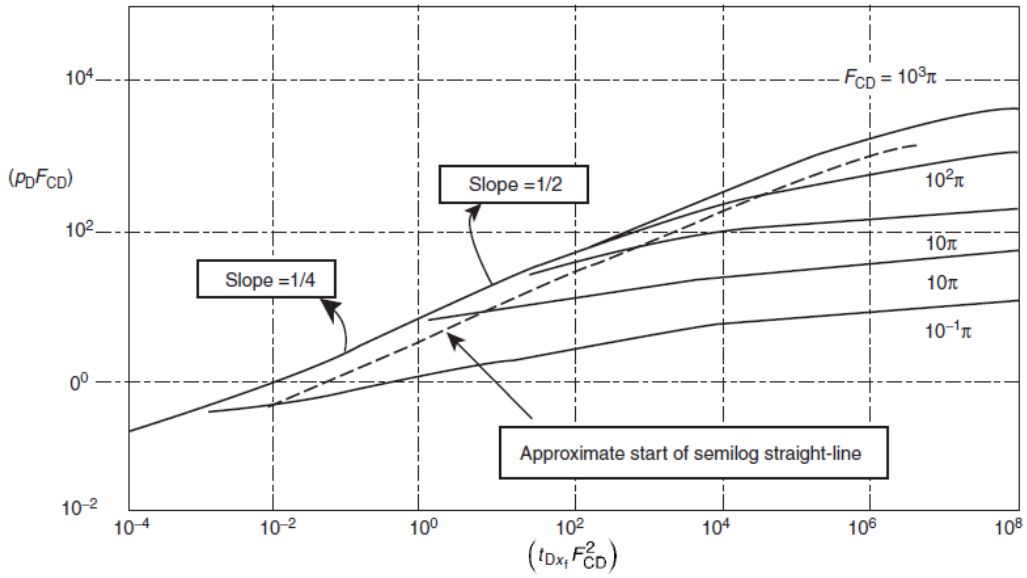
2- طريقة سينكو و ساميكو في تطابق المنحنيات Cinco and Samaniego (1981)

اوجد سينكو و سامانيكو Cinco and Samaniego (1981) طريقة تطابق المنحنيات للشق العمودي متناهي التوصيل finite conductivity vertical fracture الطريقة مبنية على اساس وجود الجريان الخطي الثنائي Bi-linear و الطريقة تتعامل مع رسم بياني لوغاريتمي لعلاقة $(p_D F_{CD})$ vs. $(t_{Dxf}\ F^2_{CD})$ لقيم مختلفة لتوصيلية الشق اللابعدية F_{CD} تتراوح من 0.1π الى 1000π.

السمة الرئيسة لهذه الطريقة هي في ان كلا من سلوك الجريان الخطي الثنائي ذات ميل الربع m=1/4 و الجريان الخطي ذات ميل النصف m=1/2 مُثلت في منحني واحد و لجميع قيم F_{CD} مع وجود مدة انتقالية ما بين كلا نوعي او طوري الجريان .الخط المتقطع في الرسم بياني يُبين بداية فترة الجريان شبه الشعاعي لكل قيم F_{CD} .

1- طريقة التفسير تتضمن رسم البيانات الحقيقية لعلاقة ΔP vs t على ورق شفاف لوغاريتمي بمقياس رسم مشابه الى مقياس منحنيات التطابق النظرية الشكل1-36 و نجري التطابق ونحدد نقطة التطابق باحداثياتها بدلالة F_{CD} و كما يأتي :

$$(\Delta p)_{MP},\ (p_D F_{CD})_{MP};\ (t)_{MP},\ (t_{Dxf} F^2_{CD})_{MP};$$



الشكل 1-36 : تطابق المنحنيات للابار المتشققة عموديا.

2- كذلك نحدد نهاية مدة الجريان الخطي الثنائي $(t_{ebf})_{MP}$ end of bilinear flow، بداية الجريان الخطي للمكمن $(t_{blf})_{MP}$ Begining of linear flow و بداية الخط نصف لوغاريتمي $(t_{bssl})_{MP}$ Begining of semi-log straight line

3- من التطابق و للمكمن النفطي نجد قيمة F_{CD} كما يأتي:

$$\text{For oil} \quad F_{CD} = \left[\frac{141.2QB\mu}{hk}\right]\frac{(p_D F_{CD})_{MP}}{(\Delta p)_{MP}} \quad \text{---------- 71 A}$$

و للغاز (رسم علاقة $\Delta m(P)$ vs t) و من التطابق نجد قيمة F_{CD} :

$$\text{For gas} \quad F_{CD} = \left[\frac{1424QT}{hk}\right]\frac{(p_D F_{CD})_{MP}}{(\Delta m(p))_{MP}} \quad \text{---------- 71 B}$$

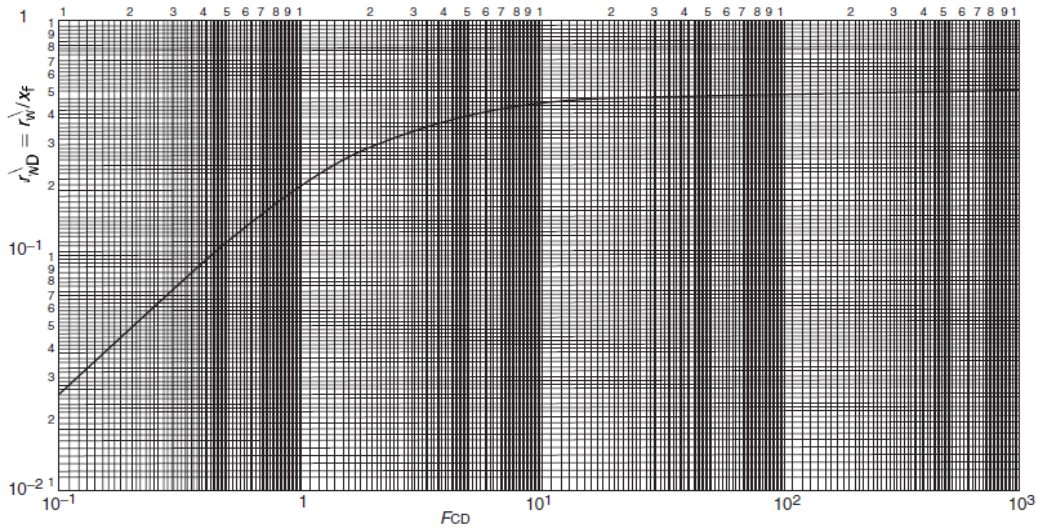
4- ثم نجد نصف طول الشق و كالاتي:

$$x_f = \left[\frac{0.0002637k}{\phi\mu c_t}\right]\frac{(t)_{MP}(F_{CD})_M^2}{(t_{Dx_f}F_{CD}^2)_{MP}} \quad \text{---------- 72}$$

5- لحساب عامل القشرة Cinco and Samaniego اوجدوا رسما بيانيا لعلاقة نصف قطر البئر اللابعدي r'_{wD} مع التوصيلية اللابعدية للشق F_{CD} الشكل1-37 ، إذ نجد قيمة r'_{wD} من معرفة F_{CD} .

و ان r'_{wD} يمثل النسبة ما بين نصف قطر البئر الظاهري او الفعال الى نصف طول الشق كالاتي:

$r'_{wD} = r'_w/x_f$ -------- 73A



الشكل 1-37 : علاقة نصف قطر البئر الفعال مع التوصيلية اللابعدية للشقوق العمودية

- نعوض نصف قطر الظاهري للبئر r'_w من المعادلة-73A بما يساويه في الصيغة ادناه :

$$r'_w = r_w e^{-s_f} \quad \text{---------- 73 B}$$

و بالترتيب نجد عامل القشرة للشق s_f يساوي :

$$s_f = \ln\left[\left(\frac{x_f}{r_w}\right) r'_{wD}\right] \quad \text{---------- 74 A}$$

من الشكل1-37 و لحالة ان $F_{CD} > 100$ فان نصف القطر اللابعدي يثبت تقريباعند $r'_{wD}=0.5$ اي لا يتاثر بتوصيلية البئر . نعوض القيمة $r'_{wD}=0.5$ في المعادلة-74A اعلاه فتصبح كالاتي:

$$s_f = -\ln\left(\frac{x_f}{2r_w}\right) \quad \text{---------- 74 B}$$

لاحظ : اضافة الى ما ذكر في الفقرة اعلاه من حساب خواص المكمن او الشق في طريقة تطابق المنحنيات النوعي لكن لا ننسى ايضا استخدام الرسومات البيانية الخاصة لتاكيد تثبيت نوع او طبيعة الجريان في الابار المتشققة و ذلك للحصول على نتائج افضل .

مثال-5

بيانات فحص تصاعد الضغط لبئر غازي متشقق في مكمن صلد رسمت كما في ادناه:-

- رسم بياني عادي ما بين $\Delta m(p)$ vs $\Delta t^{1/4}$ الشكل1-38 .
- رسم بياني لوغاريتمي شفاف ما بين $\Delta m(p)$ vs Δt الشكل1-39 .
- البيانات الاخرى المتوفرة:

$Q = 7350$ Mscf/day, $t_p = 2640$ hours $p_{wf \text{ at } \Delta t=0} = 1320$ psia, $r_w = 0.28$ ft

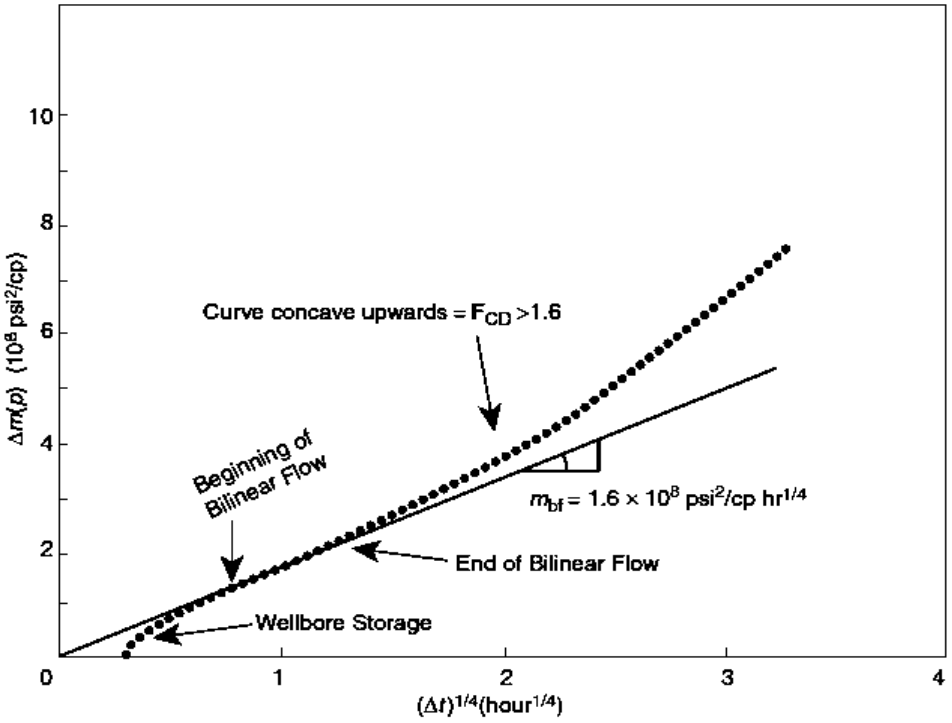
$T = 690°R$, $\mu = 0.0252$ $c_t = 0.129 \times 10^{-3}$ psi^{-1}

$h = 118$ ft, $\phi = 0.10$ $k = 0.025$ md,

ـ احسب النفاذية ، نصف طول الشق و عامل القشرة بالطريقتين الاعتيادية و طريقة تطابق المنحنيات؟؟

الحل:

1- للرسم البياني الاول العادي- الشكل1-38: نلاحظ و عبر المدة المبكرة تُظهر البيانات علاقة خط مستقيم ، دلالة على الجريان الخطي الثنائي Bilinear flow .



الشكل 1-38 : رسم الجذر التربيعي للوقت لطور الجريان الخطي الثنائي -المثال رقم-5

نجري عملية تفسير للبيانات و نحدد المعاملات الاتية :

$m_{bf} = 1.6 \times 10^8$ psi^2/cphr$^{1/4}$

$t_{sbf} \approx 0.35$ hrs (start of bilinear flow) $t_{ebf} \approx 2.5$ hrs (end of bilinear flow)

2- حساب معامل توصيل الشق F_C :

$$F_C = \left[\frac{444.6QT}{m_{bf} h (\phi \mu c_t k)^{1/4}} \right]^2$$

$$F_C = \left[\frac{444.6(7350)(690)}{(1.62\times10^8)(118)[(0.1)(0.0252)(0.129\times10^{-3})(0.025)]^{1/4}}\right]^2$$

$$F_C = 154 \text{ md ft}$$

$$\Delta m(p)_{ebf} \approx 2.05 \times 10^8 \text{ psi}^2/\text{cp}$$

3- حساب معامل توصيل الشق اللابعدي F_{CD} :

$$F_{CD} = \frac{1965.1QT}{kh\Delta m(p)_{ebf}}$$

$$F_{CD} = \frac{1965.1(7350)(690)}{(0.025)(118)(2.02\times10^8)} = 16.7$$

4- حساب نصف طول الشق x_f :

$$x_f = \frac{F_C}{F_{CD}k} = \frac{154}{(16.7)(0.025)} = 368 \text{ ft}$$

5- من الشكل 1-37 و بمعلومية F_{CD} نجد النسبة $r_w^{\backslash}/x_f$ و تساوي $r_w^{\backslash}/x_f = 0.46$

6- منها نجد قيم نصف قطر البئر الفعال (الظاهري):

$$r_w^{\backslash} = (0.46)(368) = 169 \text{ ft}$$

7- حساب عامل القشرة الظاهري:

$$s = \ln\left(\frac{r_w}{r_w^{\backslash}}\right) = \ln\left(\frac{0.28}{169}\right) = -6.4$$

- التفسير بطريقة تطابق المنحنيات لسينكو و سامنكو:

1- من الشكل 1-39 و بعد تطابق البيانات مع احد المنحنيات النظرية نحدد نقاط تطابق من المنحنيات واحداثياتها و كما يأتي:

$$\Delta m(p)_{MP} = 10^9 \text{ psi}^2/\text{cp} \quad (p_D F_{CD})_{MP} = 6.5$$

$$(\Delta t)_{mp} = 1 \text{ hour} \quad [t_{Dr_f}(F_{CD})^2]_{MP} = 3.69\times10^{-2}$$

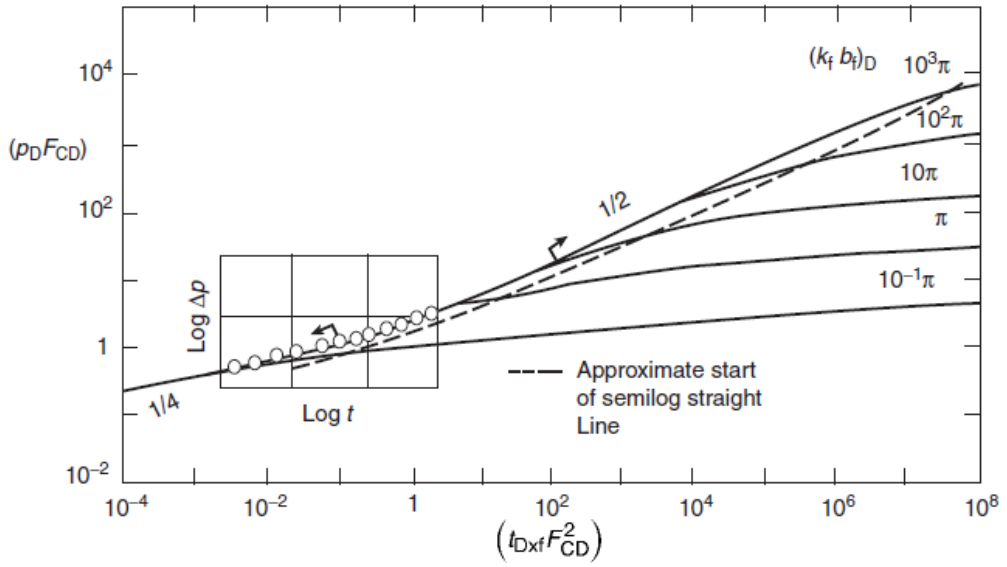
، end of bilinear flow - t_{ebf} ،start of bilinear flow - t_{sbf}

$$t_{sbf} \simeq 0.35 \text{ hour} \qquad t_{ebf} = 2.5 \text{ hour}$$

2- حساب معامل توصيل الشق اللابعدي F_{CD}:

$$F_{CD} = \left[\frac{1424QT}{hk}\right]\frac{(p_D F_{CD})_{MP}}{(\Delta m(p))_{MP}}$$

$$F_{CD} = \left[\frac{1424(7350)(690)}{(118)(0.025)}\right]\frac{6.5}{(10^9)} = 15.9$$



الشكل 1-39 : تطابق بيانات تصاعد الضغط لطور الجريان الخطي الثنائي -المثال رقم-5

3- حساب نصف طول الشق x_f :

$$x_f = \left[\frac{0.0002637k}{\phi\mu c_t}\right] \frac{(t)_{MP}(F_{CD})_M^2}{(t_{Dx_f} F_{CD}^2)_{MP}}$$

$$x_f = \left[\frac{0.0002637(0.025)}{(0.1)(0.0252)(0.129\times10^{-3})} \frac{(1)(15.9)^2}{3.69\times10^{-2}}\right]^{1/2}$$

$$x_f = 373 \text{ ft}$$

4- حساب معامل توصيل الشق:

$$F_C = F_{CD} x_f k = (15.9)(373)(0.025) = 148 \text{ md ft}$$

5- من الشكل1-37 نجد النسبة

$$r_w'/x_f = 0.46$$

$$r_w' = (373)(0.46) = 172 \text{ ft}$$

Test results	*Type curve analysis*	*Bilinear flow analysis*
F_C	148.0	154.0
x_f	373.0	368.0
F_{CD}	15.9	16.7
r_w'	172.0	169.0

الجدول 1-5 : مقارنة نتائج فحص المثال رقم-5

الجدول رقم1-5 للمقارنة ما بين نتائج الطريقتين .

3-9-1 تفسير فحوصات الابار المتشققة بطريقة التوليف المباشر لتياب Tiab's direct synthesis (TDS) technique

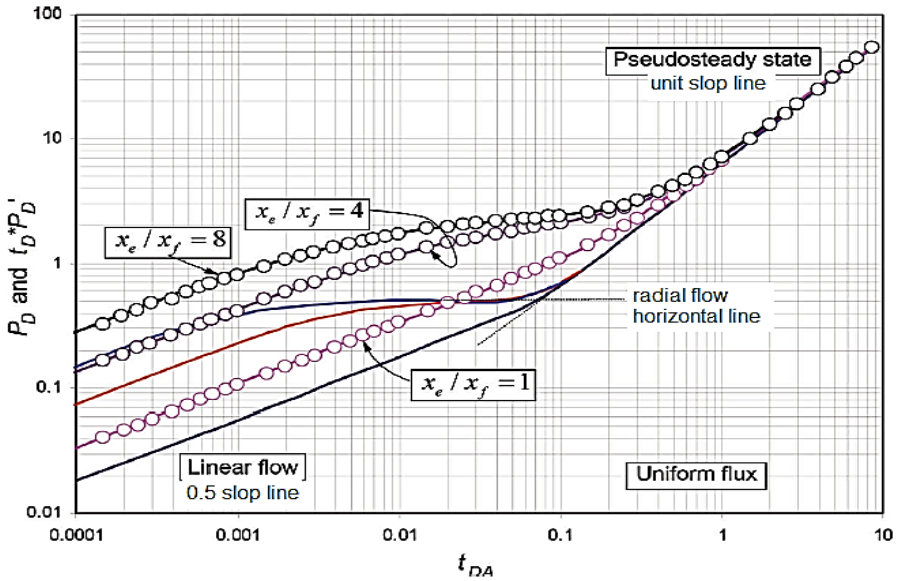
لحساب خواص الطبقة المكمنية تشترط طريقة تياب دخول مرحلة الفحص الى مدة الجريان الشعاعي والا فان تفسير الفحص بهذه الطريقة سيكون محدودا و لا يكون فريدا unique. الطريقة تصلح للابار المتشققة عموديا في مكمن مغلق closed reservoir مربع او مستطيل و تفترض ان الطبقة المكمنية متجانسة homogeneous متماثلة isotropic ، البئر يخترق كل الطبقة ، و الشق يمتد بالطول نفسه في كلا الاتجاهين.

عندها يُمكن من رسم علاقة بيانات الضغط و مشتقة الضغط مع الوقت باحداثيات لوغاريتمية ، من المنحنيات نحدد قيم لمعاملات معرفة سابقا نستخدمها في حساب خواص المكمن و الشق لحالتي فحص تصاعد الضغط pressure buildup و هبوط الضغط pressure drawdown .

بحسب طريقة تياب فان اطوار الجريان في فحص الابار المتشققة العمودية تكون تبعا لنظام الشق و كما يأتي:

1- **نظام الشق منتظم التدفق Uniform flux fracture** :

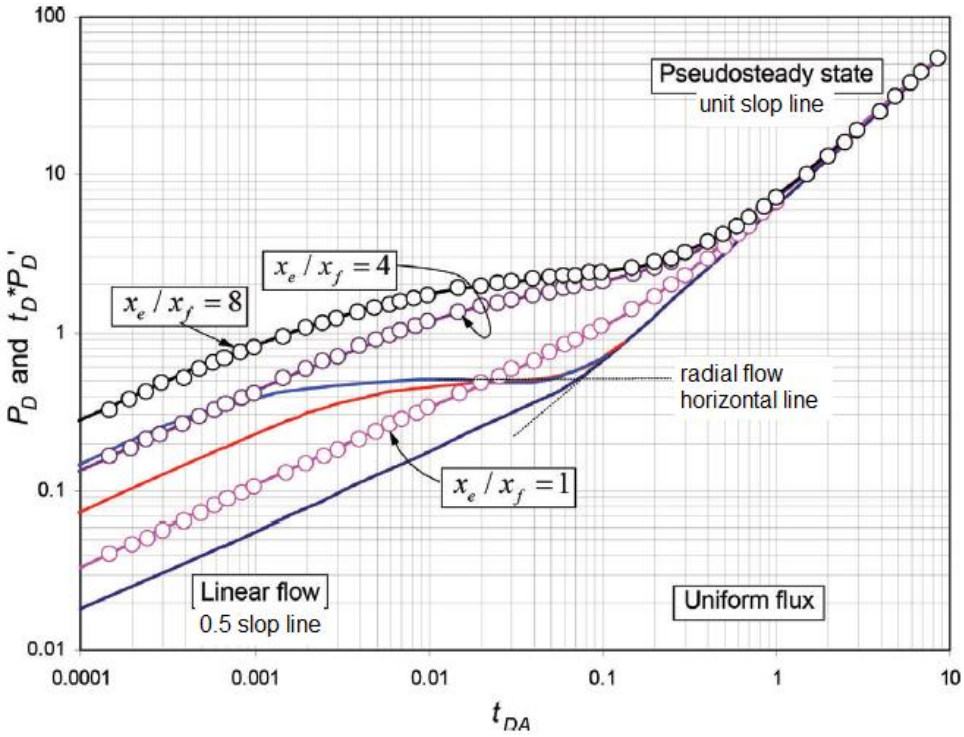
الشكل1-40 يمثل رسم بياني لوغاريتمي لسلوك الضغط و مشتقة الضغط اللابعدي (الاحداثي الصادي) مع الوقت اللابعدي - الاحداثي السيني لحالة الشق ذي التدفق المنتظم uniform flux fracture و لثلاث قيم مختلفة من نسبة اختراق الشق لمنطقة تصريف البئر x_f/x_e لمكمن محدود مربع الشكل square bounded reservoir . المنحنيات هذه تُعد الاساس النظري لطريقة التوليف المباشر لتياب TDS و التي تعكس ثلاث اطوار جريانية (الشكل1-40) وهي:



الشكل 1-40 : منحنيات نظام الشق منتظم التدفق داخل مكمن مربع

* **طور الجريان الخطي linear flow** الذي يظهر في المدة المبكرة من الفحص إذ يُميز عبر الخط المستقيم ذو ميل النصف و يُستخدم لحساب معدل نصف طول الشق average half fracture length.

** **طور الجريان الشعاعي radial flow regime infinite-action** والذي يُميز من الخط المستقيم الافقي و عادة ما يكون واضح و مميز عندما يكون المعامل $x_e/x_f > 8$. يُستخدم لحساب نفاذية الطبقة و معامل القشرة .



الشكل 1-40 : منحنيات نظام الشق منتظم التدفق داخل مكمن مربع

***طور الجريان شبه المستقر Pseudosteady-state period-PSS والذي يُميز من الرسم البياني اللوغاريتمي بخط المستقيم بميل الواحد (زاوية 45^o) في الفترة المتاخرة و يظهر عندما تكون مدة الفحص طويلة . من الخط المستقيم يُمكن حساب مساحة منطقة التصريف و معامل الشكل الهندسي C_A.

خطوات تفسير فحوصات الابار المتشققة للتدفق المنتظم بطريقة تياب:

1- رسم علاقة الضغط و مشتقة الضغط مع الوقت $(t * \Delta P')$ and ΔP vs t على رسم بياني لوغاريتمي (الشكل1-40) ، نحصل على علاقة خط مستقيم بميل النصف اذا كان طور الجريان السائد هو الخطي.

بفرض ان $(t * \Delta P')_{L1}$ تُمثل قيمة دالة مشتقة الضغط $(t * \Delta P')$ عند الوقت t=1 hr و تقع على خط ميل النصف او امتداده ، فيُمكن حساب نصف طول الشق x_f كما يأتي:

$$x_f = \frac{2.032qB}{h(t^*\Delta P')_{L1}}\sqrt{\frac{\mu}{\phi c_t k}} \quad \text{---------- 75}$$

ان العلاقة ما بين فرق الضغط عند الوقت ساعة واحدة $(\Delta P)_{L1}$ و مشتقة الضغط عند الوقت ساعة واحدة $(t^*\Delta P')_{L1}$ تكون حسب ما يلي:

$$(t^*\Delta P')_{L1} = 0.5\,(\Delta P)_{L1} \quad \text{---------- 76}$$

المعادلة اعلاه توضح انه عند الوقت ساعة واحدة فان قيمة منحني الضغط العادي هي ضعفها عند مشتقة الضغط . لذا تصبح لدينا معادلتين لحساب نصف طول الشق المعادلة رقم-75 و المعادلة رقم- 77 الاتية:

$$x_f = \frac{2.032qB}{0.5\,h\,(\Delta P)_{L1}}\sqrt{\frac{\mu}{\phi c_t k}} \quad \text{---------- 77}$$

عموما ، فان منحني مشتقة الضغط اكثر تاثرا بالظروف المحيطة بباطن البئر من منحني الضغط لذلك يُفضل حساب نصف طول الشق من معادلة فرق الضغط رقم-77 .

خلاصة الفقرة اعلاه انه يُمكن حساب نصف طول الشق من طور الجريان الخطي.

2- بعد طور الجريان الخطي يظهر طور الجريان الشعاعي ، في هذه المرحلة بيانات الفحص تشكل خط مستقيم افقي (الشكل1-40) يظهر هذا الطور واضحا عندما تكون قيمة النسبة x_e/x_f > 8 ، عندها يتُمثل سلوك الضغط اللابعدي بالمعادلة الاتية:

$$(t_{DA}{}^*P_D') = 0.5 \quad \text{---------- 78}$$

بالتعويض عن المعاملات اللابعدية بما يساويها عندها يُمكن حساب كلا من النفاذية المكمن و معامل القشرة على التوالي :

$$k = \frac{70.6q\mu B}{h(t*\Delta P')_r} \quad \text{---------- 79}$$

$$s = 0.5\left(\frac{\Delta P_r}{(t*\Delta P')_r} - \ln\left[\frac{k\,t_r}{\phi\mu c_t r_w^2}\right] + 7.43\right) \quad \text{---------- 80}$$

إذ ان $(t*\Delta P')_r$ و $(\Delta P)_r$ تُمثل قيمة مشتقة الضغط و فرق الضغط المقابلة للخط الافقي .

3- في حالة كون مدة الانتاج طويلة عبر الفحص بحيث يصل تاثيره الى حدود المكمن ، فان مشتقة الضغط ستشكل خطا مستقيما بميل الواحد ليمثل طور الجريان شبه المستقر pseudo steady state-PSS ويبدأ هذا الطور عادة عندما تكون $t_{DA} \approx 0.2$ الشكل1-40. معادلة الخط المستقيم لهذا الطور تكون كالاتي :

$$t^*\Delta P' = \left(\frac{qB}{4.27\phi c_t\,\mathbf{A}}\cdot\right)t \quad \text{---------- 81}$$

يستفاد من المعادلة اعلاه في حساب مساحة منطقة التصريف drainage area A- إذ من الرسم اللوغاريتمي نجد قيمة $(t*\Delta P')_{p1}$ و الذي يمثل مشتقة الضغط $(t*\Delta P')$ عند الوقت ساعة واحدة و التي تُحدد على الخط المستقيم او امتداده للجريان شبه المستقر . مساحة منطقة تصريف البئر تساوي:.

$$A = \left(\frac{qB}{4.27\phi c_t \ (t*\Delta P')_{p1}} \right) \quad \text{---------- 82}$$

4- كما ويُمكن حساب معامل الشكل الهندسي C_A كالاتي:

$$C_A = 2.2458 \left(\frac{x_e}{x_f} \right)^2 \exp \left[\frac{0.000527 k t_{ps}}{\phi \mu \, c_t A} \left(1 - \frac{(\Delta P)_{ps}}{(t^* \Delta P')_{ps}} \right) \right] \quad \text{---------- 83}$$

إذ ان $(t*\Delta P')_{ps}$ و $(\Delta P)_{ps}$ تُمثلان مشتقة الضغط و فرق الضغط عند اي وقت t_{ps} من على الخط المستقيم المائل للجريان شبه المستقر.

5- الوقت اللابعدي لنقطة تقاطع خط الجريان الخطي (ميل النصف) مع خط الجريان الشعاعي الافقي t_{DALri} يساوي:

$$t_{DALri} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{x_f}{x_e} \right)^2 \quad \text{---------- 84}$$

لذا من تحديد وقت تقاطع خط الجريان الخطي مع الخط الافقي للجريان الشعاعي و نرمز له t_{Lri} The point of intersection of the linear flow line and the radial flow line و بفرض ان منطقة التصريف مربعة الشكل و مساحتها تساوي $A=4x_e^2$ فيُمكن حساب :

$$\frac{x_f^2}{k} = \frac{t_{Lri}}{1207 \, \phi \mu c_t} \quad \text{---------- 85}$$

يستفاد من المعادلة اعلاه في تجييك قيم كلا من النفاذية ونصف طول الشق المحسوبة سابقا .

6- من نقطة تقاطع خط الميل نصف مع خط الجريان شبه المستقر PSS ذو الميل الواحد عند الوقت t_{Lpssi} - The linear flow line and the pseudosteady-state line intercept ، يُمكن حساب النفاذية من معرفة x_f او استخدام نقطة التقاطع لغرض التاكد والتحقق من قيمة x_f و حسب المعادلة الاتية:

$$kx_f^2 = \frac{7544 \ \phi \mu c_t A^2}{t_{Lpssi}} \quad \text{---------- 86}$$

7- من نقطة تقاطع خط الجريان الشعاعي الافقي مع خط الجريان شبه المستقرPSS(ميل الواحد) يُمكن حساب مساحة منطقة تصريف البئر كما يأتي:

$$A = \frac{k t_{RPi}}{301.77 \phi \mu c,} \quad \text{---------- 87}$$

8- بجمع اوقات تقاطع خط الجريان شبه المستقر PSS مع خط الجريان الشعاعي ممكن ان نتوصل الى العلاقات الاتية :

$$\frac{t_{Lri}}{t_{rppsi}} = \frac{t_{rppsi}}{t_{Lpssi}} = \sqrt{\frac{t_{Lri}}{t_{Lpssi}}} = (x_e/x_f)^2 \quad \text{---------- 88}$$

تُستخدم المعادلة اعلاه لغرض التاكد والتحقق من نسبة اختراق الشق x_e/x_f او في حساب طول نصف الشق وكذلك تُستخدم لتصميم فحص الابار المتشققة عموديا (بالاخص تحديد المدة الزمنية المناسبة للفحص) .

2- نظام التوصيل اللامحدود للشق Infinite conductivity fracture

يُوضح الشكل 1-41 علاقة الضغط اللابعدي (الدوائر البيضاء) و مشتقة الضغط اللابعدي (الخطوط الملونة) مع الزمن اللابعدي للشق العمودي اللامحدود التوصيلية في مكمن مربع . يُمكن تحديد اربعة خطوط مستقيمة كلا خط يعكس طور جريان محدد و كما يأتي:

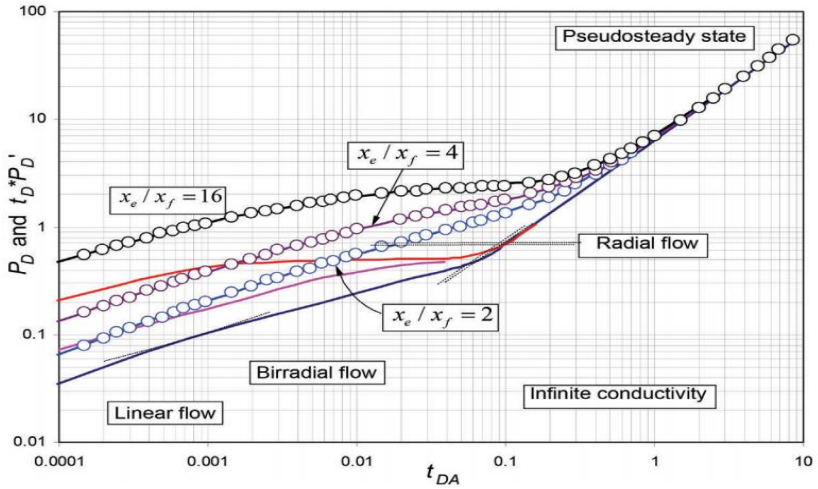
1- طور الجريان الخطي بميل النصف - Half-slope linear flow line

2- طور الجريان الشعاعي الثنائي (او يسمى في مصادر اخرى طور الجريان البيضوي) ، بميل 0.36-slope - Biradial flow line

3- طور الجريان الشعاعي بخط الافقي – Infinity acting radial flow line -Horizontal line)

4- طور الجريان شبه المستقر بميل الواحد Pseudosteady state flow line- unit slope

سنناقش فقط الجريان الشعاعي الثنائي biradial flow لحالة الشق العمودي بالتوصيلية اللامحدودة اما انماط الجريان الاخرى فطريقة التفسير مشابهة لما ذكرت في الشق العمودي المنتظم التدفق.



الشكل 1-41 : سلوك مشتقة الضغط لنظام الشق اللامتناهي التوصيلية في مكمن مربع الشكل.

طورالجريان الشعاعي الثنائيBiradial flow

يكاد يختفي الجريان الخطي عندما تكون نسبة $\mathbf{x_e/x_f > 8}$ و يبرز الجريان الشعاعي الثنائي و يختفي الجريان الشعاعي الثنائي عندما تكون نسبة $x_e/x_f < 8$.

المعادلة التي تُمثل سلوك طورالجريان الشعاعي الثنائيbiradial flow بدلالة مشتقة الضغط هي:

$$\log(t^*\Delta P') = 0.36 \log t + \log\left(0.7699 C_{BR}\left(\frac{x_e}{x_f}\right)^{0.72}\right) \quad \text{---------- 88}$$

1- لذلك و حسب المعادلة اعلاه فان خط الجريان الشعاعي الثنائي ممكن ان يُميز من الرسم التشخيصي اللوغاريتمي إذ يقارب ميلانه من 0.36.

بعد تحديد خط الجريان الشعاعي الثنائي الذي له ميل يقارب 0.36 ، و عندما لا يُمكن تمييز طور الجريان الخطي (غير واضح) فيُمكن حساب نصف طول الشق x_f كما يأتي:

$$x_f = 0.694 x_e \left[\frac{C_{BR}}{(t^*\Delta P')_{BR1}}\right]^{1.388} \quad \text{---------- 89}$$

ان $(t^*\Delta P')_{BR1}$ يمثل قيمة مشتقة الضغط عند الوقت ساعة واحدة و يحدد من الرسم بياني اللوغاريتمي من على خط الميل 0.36 او امتداده و ان المعامل C_{BR} يساوي:

$$C_{BR} = 7.268 \frac{q\mu B}{kh}\left(\frac{k}{\phi\mu c_t A}\right)^{9/25} \quad \text{---------- 90}$$

نحتاج الى النفاذية k و تُحسب من خط الجريان الشعاعي و المساحة A وتحسب من خط الجريان شبه المستقر.

2- من وقت تقاطع خطي الجريان الخطي و الجريان الشعاعي الثنائي t_{LBRi} ممكن تحديد x_f:

$$\frac{x_f^2}{k} = \frac{t_{LBRi}}{39\ \phi\mu c_t} \quad \text{---------- 91}$$

3- اذا كان الجريان الشعاعي (الخط الافقي) واضح في الرسم البياني فيُمكن حساب نفاذية الطبقة المكمنية من المعادلة :

$$k = \frac{70.6 q\mu B}{h(t * \Delta P')_r} \quad \text{---------- 92}$$

4- ثم حساب نصف طول الشق من المعادلة رقم-93 في حال تمييز خط الجريان الخطي_ linear flow line بشكل واضح :

$$x_f = \frac{2.032 qB}{h(t^*\Delta P')_{L1}}\sqrt{\frac{\mu}{\phi c_t k}} \quad \text{--------- 93}$$

5- او يُمكن حساب نصف طول الشق من المعادلة رقم-94 في حالة ان يسود خط الجريان الشعاعي الثنائي biradial flow line بشكل واضح مقارنة بالجريان الخطي و كما يأتي:

$$x_f = 0.694 x_e \left[\frac{C_{BR}}{(t^*\Delta P')_{BR1}}\right]^{1.388} \quad \text{--------- 94}$$

6- في كل الاحوال عندما تكون نسبة اختراق الشق xe/xf < 8 فان مدة طور الجريان الشعاعي radial flow تكون جدا محدودة او غير موجودة و في هذه الحالة فان النفاذية تُحسب من وقت تقاطع خطي الجريان الشعاعي الثنائي و الجريان الخطي- t_{LBRi} و من مشتقة الضغط للجريان الخطي عند ساعة واحدة $(t^*\Delta P')_{L1}$ كما يأتي :

$$k = \left(\frac{12.67 q\mu B}{h(t^*\Delta P')_{L1}}\right)\frac{1}{\sqrt{t_{LBRi}}} \quad \text{--------- 95}$$

7- في حال ان نسبة اختراق الشق xe/xf > 8 فان الجريان الخطي linear flow يكون غير سائد و الخط المستقيم العائد لهذا الطور يكون غير واضح . في هذه الحالة من المناسب استخدام وقت التقاطع ما بين خطي الجريان الشعاعي و الشعاعي الثنائي لغرض التحقق من قيم نصف طول الشق و النفاذية وكما يأتي:

$$\frac{x_f^2}{k} = \frac{t_{BRri}}{4587\ \phi\mu c_t} \quad \text{---------96}$$

من المعادلة اعلاه يُمكن حساب نصف طول الشق بمعرفة قيمة النفاذية من خط الجريان الشعاعي.

8- ممكن الاستفادة من وقت تقاطع خطي الجريان شبه المستقر مع الجريان شبه الشعاعي لحساب النفاذية و كما يأتي:

$$k = \frac{142.3\ \phi\mu c_t A}{t_{BRpssi}}\left(\frac{x_e}{x_f}\right)^{1.125} \quad \text{--------- 97}$$

9- استخدام وقت التقاطع ما بين خطي الجريان الشعاعي و الشعاعي الثنائي t_{BRri} و وقت التقاطع ما بين خطي الجريان الشعاعي الثنائي و خط الجريان شبه المستقر t_{BRpssi} في العلاقة الاتية:

$$t_{BRri} = 8\left(\frac{x_f}{x_e}\right)^{2.125} t_{BRpssi} \quad \text{--------- 98}$$

إذ ان وقت التقاطع ما بين خطي الجريان الشعاعي و الشعاعي الثنائي t_{BRri} يساوي بدلالة وقت التقاطع ما بين خطي الجريان الشعاعي الثنائي و خط الجريان الخطي t_{LBRi} كما يأتي:

$$t_{BRri} = 117.6 t_{LBRi} \quad \text{--------- 99}$$

المعادلتان اعلاه تُستخدمان للتحقق من قيم بعض معاملات الشق او المكمن او تستخدم لغرض تصميم فحص البئر المتشقق.

مثال-6 تطبيق طريقة تياب:

بيانات فحص هبوط الضغط لبئر متشقق لا محدود توصيلية Infinite conductivity fracture أُدرجت في الجدول 1-6 ورسمت في الشكل1-42 ، المعلومات المتوفرة الاخرى كالاتي:

$Q = 2000$ STB/D, $\phi = 0.24$, $\mu = 0.3$ cp, $c_t = 14.8 \times 10^{-6}$ psia^{-1}, $B = 1.5$ bbl/STB, $h = 50$ ft, $r_w = 0.4$ ft, $P_i = 5200$ psia

احسب نصف طول الشق x_f ، النفاذية k و تحقق من من قيمة نصف طول الشق ؟؟

t, hr	*P*, psia	*t**DP', psia	*t*, hr	*P*, psia	*t**DP', psia
0.017378	5174.322	12.605	1.44544	5019.68	68.901
0.025119	5169.16	15.287	2.089296	4992.606	76.039
0.036308	5163.033	18.027	3.019952	4962.879	83.251
0.052481	5155.836	21.039	4.365158	4930.874	88.885
0.075858	5147.48	24.541	6.309573	4897.025	93.405
0.109648	5137.868	28.044	9.120109	4861.749	98.014
0.131826	5132.556	29.705	13.18257	4825.404	100.147
0.190546	5120.828	33.792	15.84893	4806.922	99.820
0.275423	5107.467	38.787	22.90868	4769.489	100.962
0.398107	5092.232	44.292	33.11311	4731.58	103.280
0.57544	5074.815	50.627	47.86301	4693.335	109.456
0.831764	5054.879	58.306	69.1831	4654.853	109.456
1.202264	5032.142	65.746	100	4616.205	109.456

الجدول 1-6 : بيانات الفحص للمثال رقم-6

الحل:

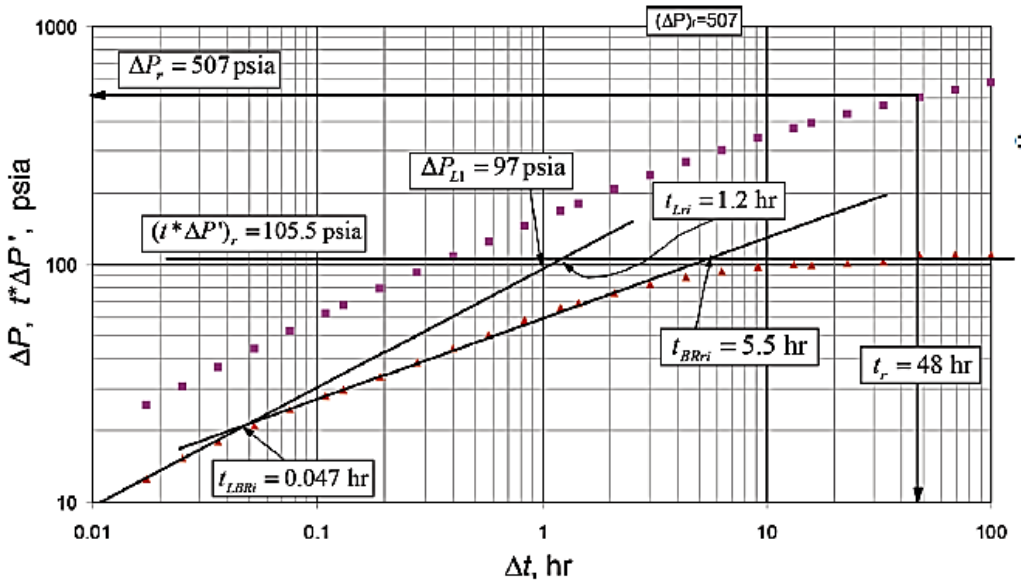
1- الشكل1-42 يمثل رسم بياني لوغاريتمي لعلاقة مشتقة الضغط الزمن $t*\Delta P'$ والضغط ΔP على الاحداثي الصادي مع الوقت Δt على الاحداثي السيني.مشتقة الضغط تعكس وجود ثلاثة خطوط وهي:

2- خط الجريان الخطي linear flow بميل النصف .

3- خط الجريان الشعاعي الثنائي biradial flow بميل 0.36 والذي يعكس وجود شق من النوع لامحدود التوصيل.

4- و خط الجريان الشعاعي radial flow اللامحدود- الخط الافقي.

5- لا يوجد خط الجريان شبه المستقر PSS مما يشير الى كون مدة الفحص ليست بالكافية للوصول الى هذه المرحلة.



الشكل 1-42 : رسم لوغاريتمي لتفسير بيانات فحص هبوط الضغط -المثال رقم-6

6- من الشكل 1-42 يُمكن ان نحدد المعاملات التي تدخل في حساب نصف طول الشق والنفاذية و كما يأتي:

$$t_r = 48 \text{ hr}, \quad (t^*\Delta P')_r = 105.5 \text{ psia}, \quad \Delta P_r = 507 \text{ psia},$$

$$t_{LRi} = 1.2 \text{ hr},$$

$$t_{LBRi} = 0.047 \text{ hr},$$

$$t_{rBRi} = 4.5 \text{ hr}$$

7- حساب نفاذية المكمن و تساوي:

$$k = \frac{70.6q\mu B}{h(t^*\Delta P')_r} = \frac{70.6(2000)(0.3)(1.5)}{50(105.5)} = 12 \text{ md}$$

8- حساب نصف طول الشق يساوي:

$$x_f = \frac{2.032qB}{h(t^*\Delta P')_{L1}}\sqrt{\frac{\mu}{\phi\, c_t k}} = \frac{2.032(2000)(1.5)}{50(97)}\sqrt{\frac{0.3}{0.24(14.8\times 10^{-6})(12)}} = 105.4 \text{ ft}$$

9- نُعيد حساب نصف طول الشق كما يأتي:

$$x_f = \sqrt{\frac{t_{Lri}k}{1207\ \phi\mu c_t}} = \sqrt{\frac{(1.2)(12)}{1207(0.24)(0.3)(14.8\times 10^{-6})}} = 105.81 \text{ ft}$$

$$x_f = \sqrt{\frac{t_{BRLi}k}{39\ \phi\mu c_t}} = \sqrt{\frac{(0.047)(12)}{39(0.24)(0.3)(14.8\times10^{-6})}} = 116.5\ \text{ft}$$

$$x_f = \sqrt{\frac{t_{BRri}k}{4587\ \phi\mu c_t}} = \sqrt{\frac{(5.5)(12)}{4587(0.24)(0.3)(14.8\times10^{-6})}} = 116.2\ \text{ft}$$

لاحظ النتائج متقاربة ،لكن في حال اختلافها من الممكن بداية تثبيت معلومات الجريان الشعاعي الخط الافقي و تزحيف الجريان الخطي ، تزحيفه يمينا سيزيد x_f و يسارا سيقلل x_f.

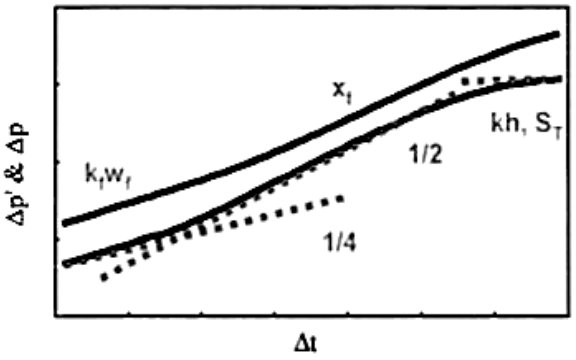
3- نظام الشق العمودي محدود التوصيلية Finite conductivity fracture

عَدّ سينكو و جماعته انه في حال كون توصيلية الشق اللابعدي اقل من dimensionless fracture conductivity F_{CD}<300 فيُمكن اعتبار الشق متناهي او محدود التوصيل . يحصل ذلك عندما تكون الشقوق طويلة long fractures و قليلة السعة low capacity .

تياب استخدم طريقته TDS- ***Tiab's Direct Synthesis*** في تفسير فحوصات الابار – للشقوق العمودية محدودة التوصيل عبر رسم علاقة لوغاريتمية لهبوط الضغط و مشتقة الضغط مع الوقت من دون اللجوء الى استخدام طريقة تطابق المنحنيات .

Finite conductivity fracture

1 Bi-linear, $k_f w_f$
2 Linear, x_f
3 Radial, kh and S_{LKF}

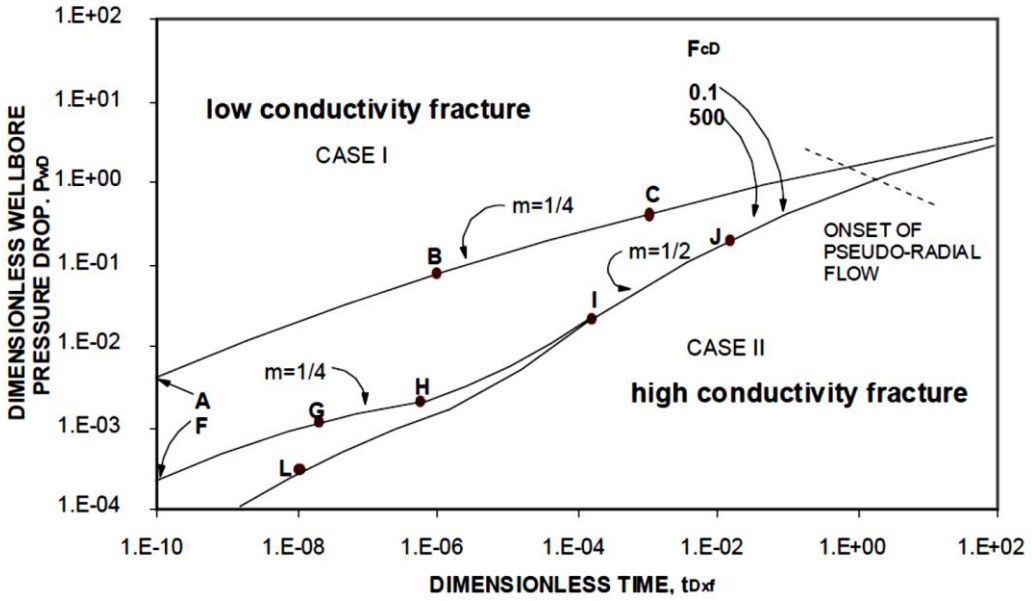


الشكل 1-43 : اطوار الجريان المصاحبة لنظام الشقوق محدودة التوصيلية

الرسم البياني اللوغاريتمي لعلاقة الضغط و مشتقة الضغط مع الزمن في الابار المتشققة داخل النظام المغلق closed system محدود التوصيلية قد تكشف عن وجود عدة خطوط مستقيمة تعكس اطوار جريان مختلفة باستبعاد عامل تخزين البئر كما في الشكل 1-43 وهي :

- نمط الجريان الخطي الثنائي بميل الربع 1/4.
- نمط الجريان الخطي بميل النصف 1/2.
- نمط الجريان الشعاعي اللامحدود الامتداد ، خط افقي.
- نمط الجريان شبه المستقر بميل الواحد.

ان نقاط التقاء هذه الخطوط و ميلانها يكون وحيد و متميز وقد استخدمها تياب و جماعته في تفسير فحوصات الضغط للابار المتشققة لايجاد خواص الشق او البئر او المكمن .



الشكل 1-44 : سلوك مثالي للضغط اللابعدي مع الوقت اللابعدي في الابار المتشققة

الشكل1-44 يُوضح سلوك الضغط اللابعدي مع الوقت اللابعدي للشق محدود التوصيلية Finite conductivity و لحالتي توصيلية الشق القليلة:

Low conductivity fracture $F_{CD}=(K_f w_f)_D=0.1$

وتوصيلية عالية

High conductivity fracture $F_{CD}=(K_f w_f)_D=500$

إذ يُظهر اطوار جريان مختلفة .

- النقاط A،F، L تُمثل نهاية طور الجريان الخطي عبر الشق بميل النصف ، الطور لا يظهر و غير واضح لكون مدة الفحص قصيرة.
- الخط BC و الخط GH تُمثل طور الجريان الخطي الثنائي بميل الربع، هذا الطور لا يبدو واضحا في حالة التوصيلية العالية للشق .
- الخط IJ يُمثل طور الجريان الخطي للمكمن بميل النصف يظهر عندما $F_{CD} \geq 300$.
- اخيرا الدخول الى طور الجريان شبه الشعاعي Pseudo- radial flow regime .

وقد سبق ان تطرقنا الى تفسير اطوار الجريان اعلاه بالتفصيل في الفقرة السابقة ما عدا نمط الجريان الخطي الثنائي .

تفسير نمط الجريان الخطي الثنائي:

يشتمل نمط الجريان الخطي الثنائي كُلا من الجريان الخطي من المكمن باتجاه الشق و الجريان الخطي من الشق الى باطن البئر. يحدث هذا النوع من الجريان عندما يكون اغلب المائع الداخل الى البئر قادم من المكمن و حيثما لا يؤثر طرف او نهاية الشق على سلوك جريان البئر.

- ان سلوك الضغط اللابعدي لهذا النوع من الجريان يكون بحسب المعادلة في ادناه:

$$P_D = \frac{2.45}{F_{CD}^{1/2}} \sqrt[4]{t_{Dxf}} \quad \text{--------- 100}$$

إذ ان المعاملات اللابعدية تساوي:

$$F_{CD} = k_{fD} w_{fD} = \left(\frac{k_f}{k}\right)\left(\frac{w_f}{x_f}\right) \quad \text{--------- 101}$$

$$t_{Dx_f} = \frac{0.0002637kt}{\varphi\mu c_t x_f^2}$$

$$P_{WD} = \frac{kh}{141.2q\mu B}\Delta P_w \quad \text{--------- 102}$$

s = skin factor
t = time، hour
w_f = fracture width، ft
x_f= half-fracture length، ft
Ø= porosity، fraction
cp،μ= viscosity

لفحص هبوط الضغط فان ΔP تساوي :

$$\Delta P = P_i - P_{Wf}$$

و لفحص تصاعد الضغط فان ΔP تساوي :

$$\Delta P = P_{WS} - P_{Wf} \ (\Delta t=0)$$

- بالتعويض عن توصيلية الشق اللابعدي و الضغط و الوقت اللابعدي بما يساويها في المعادلة رقم-100 ينتج :

$$\Delta P = m_{BL} \sqrt[4]{t} \quad \text{--------- 103}$$

- إذ ان m_{BL} ميل الخط المستقيم للجريان الخطي الثنائي عندما يرسم باحداثيات عادية للعلاقة الخاصة ما بين ΔP vs $\sqrt[4]{t}$ و يساوي :

$$m_{BL} = \frac{44.13}{(\phi\mu c_t k)^{0.25}} \frac{q\mu B}{h_f \sqrt{k_f w_f}} \quad \text{--------- 104}$$

اخذ لوغاريتم طرفي المعادلة 103 اعلاه ينتج:

$$\log \Delta P_w = 0.25 \cdot \log t + \log m_{BL} \quad \text{--------} 105$$

- الصيغة اعلاه توضح ان رسم علاقة ΔP مع الزمن t على رسم بياني لوغاريتمي نحصل على خط مستقيم بميل الربع إذا ما كان الجريان الخطي الثنائي هو السائد للشق محدود التوصيلية و يحصل ذلك عند معامل التوصيل اللابعدي القليل اي ان $F_{CD} < 300$

- لتكن $(\Delta P)_{BL1}$ هو فرق الضغط عند الوقت ساعة واحدة يُحدد من على الخط المستقيم لطور الجريان الخطي الثنائي في الرسم البياني اللوغاريتمي ، سنحصل بالنتيجة على توصيلية الشق و كما يأتي:

$$k_f w_f = 1947.46 \frac{1}{\sqrt{\phi \mu c_t k}} \left(\frac{q \mu B}{h(\Delta P)_{BL1}} \right)^2 \quad \text{--------} 106$$

- و من الخطوات السابقة نفسها لكن بدلالة مشتقة الضغط نحصل على نتيجة دلالة توصيلية الشق عبر طور الجريان الخطي الثنائي و كما يأتي:

سلوك مشتقة الضغط لطور الجريان الخطي الثنائي تكون بحسب الصيغة الاتية:

$$t \cdot \Delta p'_W = 0.25 m_{BL} \cdot t^{0.25} \quad \text{---------} 107$$

اخذ لوغاريتم طرفي المعادلة اعلاه ينتج:

$$\log(t \cdot \Delta P'_W) = 0.25 \cdot \log t + \log(0.25 m_{BL}) \quad \text{--------} 108$$

- الصيغة اعلاه توضح ان رسم علاقة $t*\Delta P'$ مع الوقت على احداثيات لوغاريتمية ينتج خط مستقيم بميل الربع إذما كان الجريان الخطي الثنائي هو السائد .

- لتكن $(t*\Delta P')_{BL1}$ هو مشتقة الضغط عند الوقت ساعة واحدة و يحدد من على الخط المستقيم لطور الجريان الخطي الثنائي في الرسم بياني اللوغاريتمي عندها تصبح المعادلة رقم-108 (إذ ان t=1 hr) كما يأتي:

$$(t \cdot \Delta p'_W)_{BL1} = 0.25 m_{BL} \quad \text{--------} 109$$

- بمقارنة مشتقة الضغط مع فرق الضغط عند الوقت ساعة واحدة ينتج:

$$(t \cdot \Delta p'_W)_{BL1} = 0.25 (\Delta p_W)_{BL1} \quad \text{--------} 110$$

- اذن ممكن حساب التوصيلية بدلالة عرض الشق $k_f w_f$ من خط مشتقة الضغط (على غرار خط فرق الضغط) بتغيير $(\Delta P)_{BL1}$ قي المعادلة رقم -106 بـ $4(t*\Delta P')_{BL1}$ ينتج :

$$k_f w_f = \frac{121.74}{\sqrt{\varphi \mu c_t k}} \left(\frac{q \mu B}{h(t \cdot \Delta p'_W)_{BL1}} \right)^2 \quad \text{--------} 111$$

s = skin factor
t = time، hour

w_f = fracture width، ft
x_f= half-fracture length، ft
Ø= porosity، fraction
µ= viscosity، cp

المعادلة رقم-110 مهمة في كونها تربط دالة الضغط بمشتقة الضغط عند نقطة وحيدة و تُستخدم لغرض التحقق من معاملات الشق . بصورة عامة فان الظروف حول البئر تؤثر على منحني مشتقة الضغط اكثر من مما لمنحني الضغط عند طور الجريان الخطي الثنائي بالتالي سيكون من الصعب تحديد خط ميلان الربع .

❖ علاقة الترابط ما بين الجريان الخطي والجريان الخطي الثنائي:

يُمكن ادراج اهم علاقات الترابط ما بين نوعي الجريان اعلاه عند الشقوق العمودية محدودة التوصيل كما في ادناه وبالامكان مراجعة المصدر تياب (الشق المحدود) لغرض التفصيل:

- اذا كان خط الجريان الخطي ظاهرا بعد خط الجريان الخطي الثنائي في حال كون معامل التوصيلية للشق اعلى من 300 فبالامكان استخدام المعادلات لحالة الشقوق اللامحدودة التوصيل والشقوق المنتظمة التدفق لحساب نصف طول الشق x_f.

فقد استفاد تياب من تقاطع خط الجريان الخطي مع خط الجريان الخطي الثنائي Bilinea flow regime line intercept with linear flow regime line -BLLi عبر مساواة فرق الضغط عند نقطة التقاطع لكلا الطورين و كما يأتي:

$$(\Delta P_W)_{BLLi} = m_L\sqrt{t_{BLLi}} \quad \text{-------- 112 A}$$

$$(\Delta P_W)_{BLLi} = m_{BL}(t_{BLLi})^{0.25} \quad \text{-------- 112 B}$$

بقسمة المعادلتين على بعضهما و تعويض عن m_L ، m_{BL} بما يساويهما و بالترتيب ينتج :

$$t_{BLLi} = 13{,}910\varphi\mu c_t\left(\frac{x_f^2\sqrt{k}}{k_f w_f}\right)^2 \quad \text{-------- 113}$$

-منها يُمكن حساب النفاذية :

$$k = \left(\frac{k_f w_f}{x_f^2}\right)^2 \frac{t_{BLLi}}{13{,}910\varphi\mu c_t} \quad \text{-------- 114}$$

تُستخدم المعادلتان اعلاه لغرض التحقق من المعاملات x_f ، k_f، w_f المحسوبة عند تواجد ثلاثة اطوار الجريان .

- اما اذا كان طور الجريان الشعاعي غير ملحوظ من على الرسم بياني اللوغاريتمي ولايوجد فحص سابق قبل عملية التشقق لذا يُمكن استخدام المعادلة اعلاه في حساب نفاذية المكمن k.

بامكان تحوير المعادلة رقم-113 وكتابتها بصيغة معامل التوصيل اللابعدي وكما يأتي:

$$t_{BLLi} = 13{,}910\frac{\varphi\mu c_t}{k}\left(\frac{x_f^2}{\mathrm{Fcd}}\right)^2 \text{ -------- } 115$$

تُستخدم المعادلة-115 اعلاه لحساب الوقت لغرض تصميم الفحص و لغرض اجراء التحقق من بعض معاملات الشق .

- و بالطريقة نفسها يُمكن التوصل الى زمن تقاطع خطي الجريان الخطي والجريان الخطي الثنائي من منحني مشتقة الضغط و كما يأتي:

$$(t\cdot\Delta p'_W)_{BLLi} = 0.5m_L\cdot(t'_{BLLi})^{0.5} \text{ -------- } 116$$

$$(t\cdot\Delta p'_W)_{BLLi} = 0.25m_{BL}\cdot(t'_{BLLi})^{0.25} \text{ -------- } 117$$

و نحصل على علاقة t_{BLLi} مع $\bar{t}_{BLLi}$ و كما يأتي:

$$t_{BLLi} = 16t'_{BLLi} \text{ -------- } 118$$

و ايضا يُمكن ان نتوصل الى علاقة الضغط و مشتقة الضغط الاتية:

$$(\Delta p_W)_{BLLi} = 4\cdot(t\cdot\Delta p'_W)_{BLLi} \text{ -------- } 119$$

التي يستفاد منها في رسم خط مشتقة الضغط للجريان الخطي الثنائي بدلالة قيمة الضغط عند نقطة التقاطع . يحدث ذلك عندما تكون بيانات مشتقة الضغط مشوشه و غير واضحة لهذا الطور من الجريان.

❖ علاقة الترابط ما بين الجريان الشعاعي والجريان الخطي الثنائي:

مشتقة الضغط لجزء الجريان الشعاعي اللامتناهي يكون خط مستقيم افقي و طور الجريان هذا يُمثل بالصيغة الاتية :

$$(t\cdot\Delta p'_W)_R = \frac{70.6q\mu B}{kh} \text{ -------- } 120$$

الرمز Radial-R اشارة الى الشعاعي. نجد قيمة $(t^*\Delta P')_R$ من الرسم بياني اللوغاريتمي عبر تقاطع امتداد خط الجريان الشعاعي الافقي مع الاحداثي الصادي و منه نستطيع حساب نفاذية الطبقة المكمنية كالاتي:

$$k = \frac{70.6q\mu B}{h(t\cdot\Delta p'_W)_R} \text{ -------- } 121$$

- كذلك يُمكن حساب عامل القشرة على جدار الشق حسب المعادلة ادناه :

$$s = 0.5\left[\frac{(\Delta p_w)_R}{(t\cdot\Delta p'_w)_R} - \ln\left(\frac{kt_R}{\varphi\mu c_t r_w^2}\right) + 7.43\right] \text{-------- } 122$$

إذ ان $(\Delta P)_R$ تُمثل قيمة الضغط من على منحني الضغط عند الجريان الشعاعي .

- ممكن ان نحصل على العلاقات ادناه و ذلك من تقاطع خطي الجريان الشعاعي مع الجريان الخطي الثنائي :

$$0.25 m_{BL} t^{0.25} = \frac{70.6 q\mu B}{kh} \text{ -------- } 123$$

$$t_{RBLi}^{0.25} = \frac{70.6 q\mu B}{kh}\frac{4}{m_{BL}} \text{ -------- } 124$$

وبتعويض عن m_{BL} في المعادلة اعلاه بما يساويها ينتج :

$$t_{RBLi} = 1677\frac{\varphi\mu c_t}{k^3}\left(k_f w_f\right)^2 \text{ ------- } 125$$

تستخدم المعادلة اعلاه لاغراض التحقق من معاملات الشق . إذ ان t_{RBLi} Bilinear flow line intercept with radial flow line يمثل وقت تقاطع خط الجريان الخطي الثنائي مع خط الجريان الشعاعي.

لا نتطرق لعلاقة الجريان الشعاعي مع الجريان الخطي في الشقوق المتناهية التوصيل إذ هي نفسها في حالة الشقوق اللامتناهية التوصيل .

لاحظ ان تفاصيل الشرح المذكور في اعلاه هو لمنطقة تصريف مربعة الشكل، فيُمكن مراجعة المصدر Tiab(1994) في طريقة تفسير فحص الابار المتشققة في منطقة تصريف مستطية الشكل Rectangular system.

مثال-7 الحالة المثالية عند توفر اطوار الجريان الثلاثة في نظام الشق محدود التوصيلية Ideal case (All 3 flow regimes are observed- finite conductivity fracture):

الجدول 1-7 ادناه يتضمن البيانات المتوفرة للصخور والموائع للبئر المتشقق للامثلة الاربعة اللاحقة.

والجدول 1-8 ادناه يتضمن بيانات فحص تصاعد الضغط لبئر نفطي بعد اجراء التشقق الهيدروليكي.

المطلوب : تفسير بيانات الفحص بطريقة TDS ؟؟

الحل-

1- نرسم على ورق لوغاريتمي علاقة الضغط ΔP و مشتقة الضغط $(t^*\Delta\acute{P})$ مع الوقت t كما في الشكل1-45.

Parameter	Example 1	Example 2	Example 3	Example 4
Flow rate, q, STB/D	101	1736	1343.54	411.98
Formation volume factor, B, RB/STB	1.507	1.62	1.782	1.258
Viscosity, μ, cP	0.45	0.27	0.208	0.53
System compressibility, c_t, x10^{-6} psi^{-1}	17.7	26.7	30.36	101
Wellbore radius, r_w, ft	0.28	0.23	0.23	0.689
Net thickness, h, ft	42	152	150	21
Porosity, ϕ	0.08	0.08	0.09	0.2
Producing time, hrs	2000	2000	2500	3000

الجدول 1-7 : بيانات الصخور والمائع للامثلة الاربعة اللاحقة

Δt, hrs	Δp, psi	t*Δp', psi	Δt, hrs	Δp, psi	t*Δp', psi
0.001	65		15.000	390	117.0
0.230	102	26.3	20.000	423	112.0
0.390	115	30.0	25.000	446	120.0
0.600	130	35.8	30.000	471	141.0
1.000	145	40.8	35.000	493	136.5
1.800	183	57.2	40.000	510	132.0
2.400	195	67.0	45.000	526	135.0
3.800	260	83.3	50.000	540	150.0
4.100	265	69.2	55.000	556	137.5
4.960	280	96.9	60.000	565	144.0
6.200	308	102.3	65.000	580	121.1
8.500	320	103.3	71.000	583	
10.000	345	149.0			

الجدول 1-8 : بيانات الفحص للمثال رقم-7

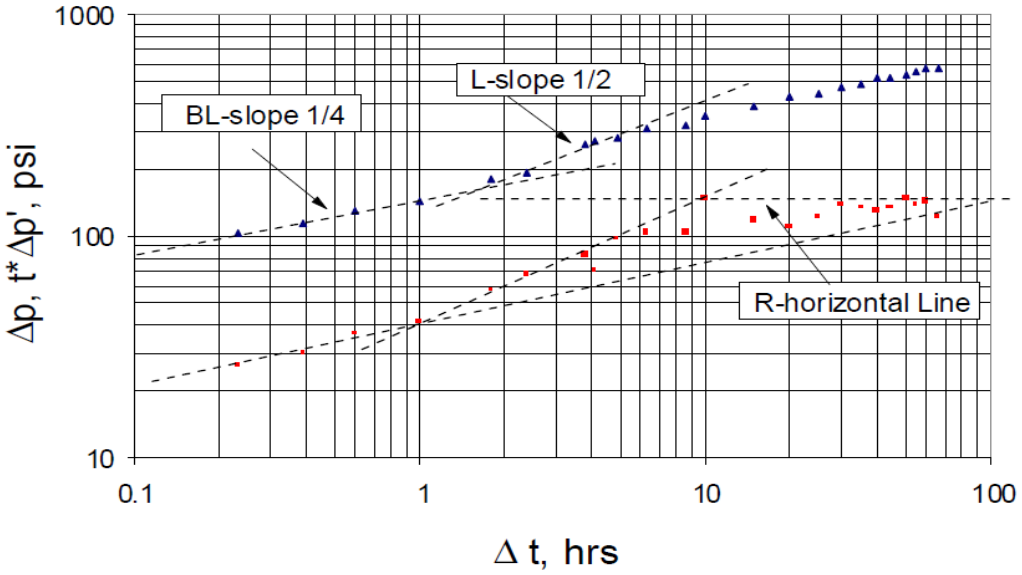
2- تمييز الخطوط المستقيمة لاطوار الجريان الشعاعي (الافقي) و الجريان الخطي الثنائي (ميل الربع) و الجريان الخطي في المكمن (ميل النصف)

3- لايوجد تاثير لمعامل تخزين البئر - خط الميل الواحد .

4- من منحني مشتقة الضغط نحدد $(t*\Delta\acute{P})_R$=150 psi تُمثل اي نقطة على الخط الافقي ، ثم نحسب النفاذية و كما يأتي:

$$k = \frac{70.6q\mu B_o}{h(t\cdot\Delta p'_W)_R} = \frac{(70.6)(101)(0.45)(1.507)}{(42)(150)}$$

$$= 0.76\ mD$$



الشكل 1-45 : رسم لوغاريتمي لتفسير بيانات فحص تصاعد الضغط -المثال رقم-7

5- من خط طور الجريان الخطي الثنائي (ميل الربع) نجد الاحداثيات الاتية عند الوقت ساعة واحدة :

$$(\Delta p_w)_{BL1} = 160 \ psi$$

$$(t \cdot \Delta p'_w)_{BL1} = 40 \ psi$$

6- حساب معامل التوصيل للشق من المعادلتين رقم- 106 و 111 في ادناه:

$$k_f w_f = 1947.46 \frac{1}{\sqrt{(0.08)(0.45)(17.7 \times 10^{-6})(0.76)}} * \left(\frac{(101)(0.45)(1.507)}{(42)(160)} \right)^2 = 290.7 \ mD - ft$$

$$k_f w_f = 121.74 \frac{1}{\sqrt{(0.08)(0.45)(17.7 \times 10^{-6})(0.76)}} * \left(\frac{(101)(0.45)(1.507)}{(42)(40)} \right)^2$$

$$= 290.77 \ mD - ft$$

7- نحدد وقت التقاطع ما بين خطي الجريان الشعاعي و الجريان الخطي الثنائي من المعادلة رقم- 125 :

$$t_{RBLi} = 1677 \cdot \frac{(0.08)(0.45)(17.7x10^{-6})}{(0.76)^3} (290.77)^2$$

$$= 205 \, hrs$$

هذا الوقت يقع ضمن مدى تقاطع خطي الجريان الشعاعي و الخطي الثنائي في الشكل1-45 مما يؤكد صحة حساب كلا من النفاذية و معامل توصيل الشق.

8- ليكن الوقت t_R=30 hrs هو الوقت المختار للجريان الشعاعي على الاحداثي السيني للشكل 1-45 و منه نسجل قيم الضغط $(\Delta P)_R$ و مشتقة الضغط المقابلة $(t*\Delta \acute{P})_R$ لهذا الوقت و تساوي:

$$(\Delta P_W)_R = 471 \text{ psi}$$
$$(t \cdot \Delta p'_W)_R = 150 \ psi$$

9- حساب معامل القشرة من المعادلة رقم-122 كما يأتي:

$$s = \frac{1}{2}\left[\frac{471}{150} - \ln\left(\frac{(0.76)(30)}{(0.08)(0.45)(17.7\text{x}10^{-6})(0.28^2)}\right) + 7.43\right]$$
$$= -4.684$$

10- حساب نصف طول الشق من المعادلة رقم- 93 عند الوقت ساعة واحدة فان الضغط $(\Delta P)_{L1}$=120 psi و كما يأتي:

$$x_f = 4.064\left(\frac{(101)(1.507)}{(42)(120)}\right)\sqrt{\frac{0.45}{(0.08)(17.7\text{x}10^{-6})(0.76)}}$$
$$= 79 \text{ ft}$$

11- نحدد وقت تقاطع خطي الجريان الخطي والجريان الخطي الثنائي من المعادلة رقم–115.

$$t_{BLLi} = 13{,}910(0.08)(0.45)(17.7\text{x}10^{-6}) * \left(\frac{(65.66)^2\sqrt{0.76}}{(290.77)}\right)^2$$
$$= 1.48 \text{ hrs}$$

قيمة t_{BLLi} المحسوبة هي مقاربة الى قيمتها المحددة من على الرسم $t_{BLLi\text{-observed}}$ = 1.6 hrs مما يؤكد ان قيمة نصف طول الشق المحسوبة صحيحة.

12- لاحظ هنالك بعض التشويش و عدم الانتظام في بيانات خط الجريان الخطي لمشتقة الضغط ، لذلك يُمكن الاستفادة من المعادلة رقم-127 لحساب نصف طول الشق وكما يأتي:

$$x_f = \frac{1.92173}{\frac{e^{-4.684}}{0.28} - \frac{3.31739\text{x}0.76}{290.77}} = 79\text{ft}$$

النتائج متقاربة في حساب نصف طول الشق.

13- توصيلية الشق اللابعدي يساوي:

$$F_{CD} = \frac{w_f k_f}{x_f k} = \frac{290.77}{0.76\text{x}79} = 4.8$$

لكون قيمة F_{CD} اعلى نوعا ما من المعدل F_{CD}=1.6 يُمكن ان نستنتج بان الشق معبا بالمادة الساندة للشق بكميات اعلى مما يجب ان يكون .

10-1 حالات خاصة :

ان ما ذكر من تفسير فحوصات الضغط للابار المتشققة العمودية للشق المتناهي التوصيل يفترض و جود ثلاث انماط للجريان واضحة وهي الخطي في المكمن و الخطي الثنائي والشعاعي علما ان نمط الجريان الخطي في الشق لم يذكر هنا وذلك لصعوبة رؤيته او ملاحظته بسبب الظروف حول باطن البئر مثل معامل تخزين البئر او ان نفاذية الشق تكون محدودة بتاثير المواد الساندة للشق .سناخذ امثلة و نحلها لحالات لا يُمكن تمييز على الاقل واحد من انماط الجريان .

1- عندما يكون الجريان الخطي في المكمن غير واضح (شق قليل التوصيلية) Formation Linear flow line is not observed (Low conductivity fracture)

- في حالة كون توصيلية الشق قليلة مثلا اقل من $F_{CD}<5$ فان الخط المستقيم المصاحب للجريان الخطي في المكمن يكون من المحتمل غير واضح بسبب تاثير تخزين البئر السائد و ان الجريان ينتقل من طور الجريان الخطي الثنائي الى طور الجريان الشعاعي عبر مرحلة انتقالية. في هكذا ظروف فان النفاذية تحسب من الخط الافقي للجريان الشعاعي اما حساب نصف طول الشق فقد اوجد تياب العلاقات في ادناه:

$$x_f = \frac{1.92173}{\frac{1}{r'_w} - \frac{3.31739k}{w_f k_f}} \quad \text{------- 126}$$

صيغة المعادلة اعلاه تربط نصف طول الشق بنفاذية المكمن ، توصيلية الشق ، عامل القشرة بعد تكون الشق. إذ ان r'_w يمثل نصف القطر الفعال للبئر و يساوي :

$$r'_w = r_w e^{-s}$$

او يُمكن استخدام المعادلة الاتية :

$$x_f = \frac{1.92173}{\frac{e^s}{r_w} - \frac{3.31739k}{w_f k_f}} \quad \text{------- 127}$$

ان توصيلية الشق ممكن ان تحسب من الجريان الخطي الثنائي و ان كلا من نفاذية الطبقة المكمنية و عامل القشرة تحسب من احداثيات خط الجريان الشعاعي من الرسم البياني اللوغاريتمي لمشتقة الضغط ، علما ان المعادلة اعلاه تكون كثيرة التاثر بعامل القشرة لكون العلاقة اسية .

لاحظ في حال القيم العالية لعامل تخزين البئر High C_D ، فإن تأثير تخزين حفرة البئر Well Bore Storage-WBS سيخفي خط ميل النصف للجريان الخطي . ولا يتم تحديد قيمة وحيدة unique لـ x_f من تحليل البيانات الزمنية المبكرة .

مثال-8 لايوجد جريان خطي

الجدول 1-9 يتضمن بيانات فحص تصاعد الضغط بعد اجراء عملية التشقق للطبقة المكمنية،

البيانات الاخرى أُدرجت في الجدول 1-7 .

المطلوب اجراء تفسير للفحص بطريقة TDS ؟؟

Δt, hrs	Δp, psi	t*Δp', psi	Δt, hrs	Δp, psi	t*Δp', psi
0.00	0.00	0.00	9.87	277.43	84.22
0.10	73.94	46.14	11.85	293.93	91.25
0.20	92.29	30.21	13.82	307.86	94.25
0.35	107.65	32.20	15.79	320.80	91.60
0.49	119.17	36.65	17.77	330.76	93.46
0.74	134.52	38.92	19.74	341.57	102.16
0.99	145.47	40.10	22.70	355.50	105.10
1.23	154.43	43.65	32.58	398.73	122.05
1.48	162.82	45.07	37.51	415.65	132.40
1.97	174.76	46.44	42.45	433.57	147.38
2.47	186.14	52.09	47.38	449.92	149.26
2.96	195.67	55.68	57.25	474.66	151.15
3.95	213.02	61.26	67.13	501.11	152.32
4.94	226.38	61.99	72.09	513.20	156.62
5.92	237.76	73.04	86.87	538.65	157.81
			91.80	550.03	164.59

الجدول 1-9 : بيانات الفحص للمثال رقم-8

الحل:

1- رسم على ورق لوغاريتمي علاقة الضغط ΔP و مشتقة الضغط (t*ΔṔ) مع الزمن t الشكل1-46 .

2- يتم تمييز الخطوط المستقيمة لاطوار الجريان الشعاعي (الافقي) و الخطي الثنائي (ميل الربع)

3- لايوجد تاثير لمعامل تخزين البئر - خط الميل الواحد .

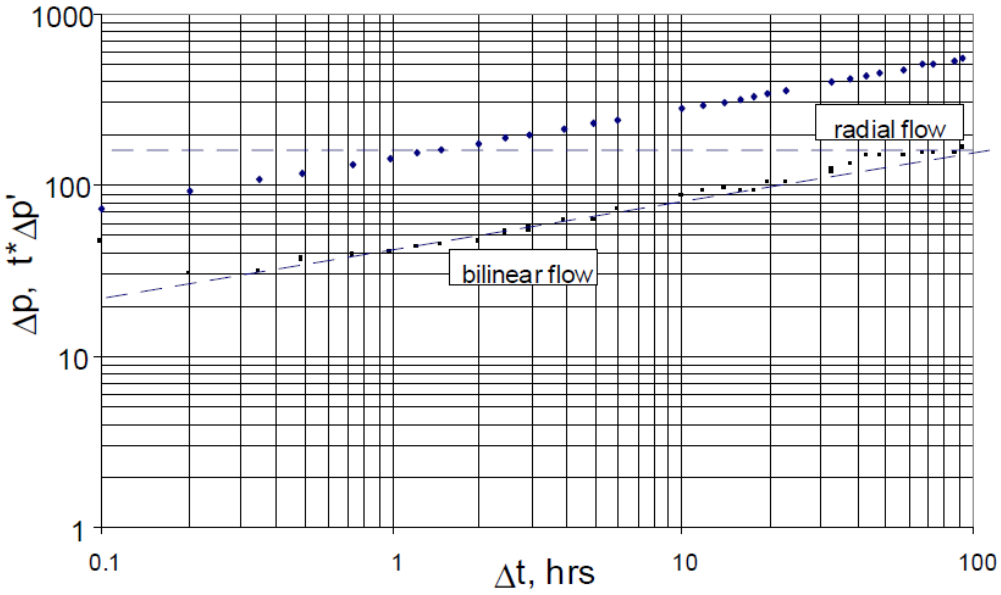
4- من منحني مشتقة الضغط نحدد $(t*\Delta\acute{P})_R$=160 psi ثم نحسب النفاذية و كما يأتي:

$$k = \frac{70.6q\mu B}{h(t\cdot\Delta p'_w)_R} = \frac{(70.6)(1736)(0.27)(1.62)}{(152)(160)} = 2.2\ mD$$

5- من خط طور الجريان الخطي الثنائي نجد الاحداثيات الاتية عند الوقت ساعة واحدة :

$$(\Delta p_w)_{BL1} = 160\ psi$$

$$(t\cdot\Delta p'_w)_{BL1} = 40\ psi$$



الشكل 1-46 : رسم لوغاريتمي لتفسيربيانات فحص تصاعد الضغط -المثال رقم-8

حساب معامل التوصيل للشق من المعادلتين رقم- 123 و 128 في ادناه:

$$k_f w_f = 1947.46 \frac{1}{\sqrt{(0.08)(0.27)(26.7x10^{-6})(2.2)}} * \left(\frac{(1736)(0.27)(1.62)}{(152)(160)} \right)^2$$

$$k_f w_f = 1684.5 mD - ft$$

$$k_f w_f = 121.74 \frac{1}{\sqrt{(0.08)(0.27)(26.7x10^{-6})(2.2)}} * \left(\frac{(1736)(0.27)(1.62)}{(152)(40)} \right)^2$$

$$k_f w_f = 1685.7\ mD - ft$$

نتائج المعادلتين اعلاه متقاربة .

6- حساب زمن تقاطع خطي الجريان الشعاعي و الخطي الثنائي من المعادلة رقم- 125:

$$t_{RBLi} = 1677 \cdot \frac{(0.08)(0.27)(26.7x10^{-6})}{(2.2)^3} (1685)^2$$

$$t_{RBLi} = 257.9\ hrs$$

هذا الوقت يقع ضمن مدى تقاطع خطي الجريان الشعاعي و الخطي الثنائي في الشكل1-46 و هذا يدعم صحة حساب كلا من النفاذية و معامل توصيل الشق.

7- لتكن t_R=90 hrs هو الوقت المختار للجريان اللامتناهي الشعاعي من على منحني الضغط و مشتقة الضغط لذا فان قيم $(t*\Delta\acute{P})_R$ و $(\Delta P)_R$ من الرسم والمقابلة لهذا الوقت تساوي:

$$(\Delta P_w)_R = 550\,psi$$
$$(t\cdot\Delta p'_w)_R = 160\,psi$$

- حساب عامل القشرة من المعادلة رقم- 122 كما يأتي:

$$s=\frac{1}{2}\left[\frac{550}{160}-\ln\left(\frac{(2.2)(90)}{(0.08)(0.27)(26.7x10^{-6})(0.23^2)}\right)+7.43\right]$$
$$s=-5.86$$

8- نصف طول الشق يُحسب من المعادلة رقم- 127 عند الوقت ساعة واحدة فان الضغط $(\Delta P)_{L1}$=21 psi و كما يأتي:

$$x_f=\frac{1.92173}{\frac{e^{-5.86}}{0.23}-\frac{3.31739(2.2)}{1685}}=238.3$$

9- كما و يُمكن حساب عامل القشرة بعد التشقق من المعادلة رقم-130 بعد ايجاد قيم u :

$$u=\ln\left(\frac{k_f w_f}{k\cdot x_f}\right)=\ln C_{fD}$$

$$u=\ln\left(\frac{1685}{(238.3)(2.2)}\right)=1.1675$$

اذن عامل القشرة يساوي:

$$s=\ln\frac{0.23}{238.3}+\frac{1.65-0.32(1.1675)+0.11(1.1675)^2}{1+0.18(1.1675)+0.064(1.1675)^2+0.005(1.1675)^3}$$
$$s=-5.84$$

لاحظ ان الفرق قليل ما بين القيمتين عامل القشرة مما يدعم طريقة تياب -TDS

- معامل التوصيل الشق اللابعدي يساوي:

$$F_{CD}=\frac{w_f k_f}{x_f k}=\frac{1685}{(238.3)(2.2)}=3.21$$

2- عندما يكون خط الجريان الخطي الثنائي غير واضح Bilinear flow line is not observed

عندما تكون توصيلية الشق مثلا $F_{CD} > 50$ فان الخط المستقيم المصاحب للجريان الثنائي الخطي يكون مفقود بسبب تاثير تخزين البئر السائد لذا فان توصيلية الشق $F_C=k_f w_f$ تُحسب

من تحوير المعادلة رقم -127 كما يأتي:

$$w_f k_f = \frac{3.31739k}{\frac{e^s}{r_w} - \frac{1.92173}{x_f}} \quad \text{-------- 128}$$

إذ ان نصف طول الشق ممكن ان يُحسب من الجريان الخطي في المكمن و ان كلا من نفاذية الطبقة المكمنية و عامل القشرة تُحسب من تحليلات خط الجريان الشعاعي من الرسم البياني اللوغاريتمي لمشتقة الضغط.

مثال-9 :

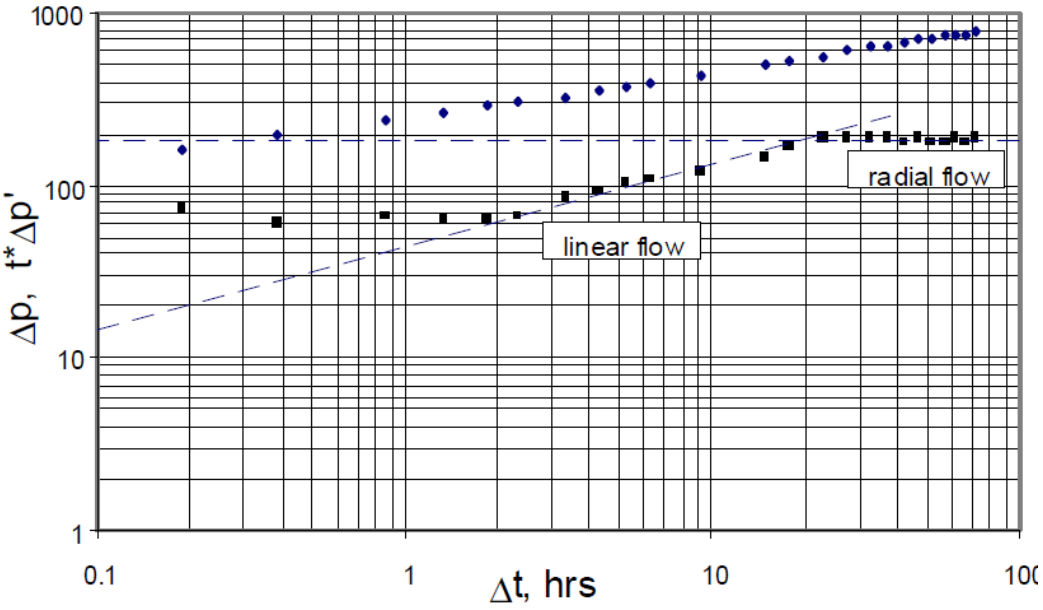
فحص قصير - خط الجريان الخطي الثنائي غير ملحوظ bilinear flow is not observed

الجدول 1-10 ادناه يتضمن بيانات فحص تصاعد الضغط لبئر نفطي بعد اجراء التشقق الهيدروليكي، البيانات الاخرى ذكرت في الجدول 1-7 :

المطلوب: اجراء تفسير للفحص بطريقة TDS ؟؟

Δt, hrs	Δp, psi	t*Δp', psi	Δt, hrs	Δp, psi	t*Δp', psi
0.00			22.72	562.12	183.31
0.09	111.34	78.91	27.57	599.37	188.18
0.19	158.98	71.51	32.43	628.38	185.68
0.38	194.39	60.92	37.28	654.97	186.78
0.86	239.75	64.89	42.14	677.02	178.18
1.35	267.20	63.27	47.00	696.07	183.06
1.84	285.68	61.60	51.85	714.84	181.54
2.32	299.76	65.91	56.71	730.06	180.24
3.29	325.50	84.17	61.56	745.70	183.89
4.26	349.39	95.15	66.42	759.06	178.94
5.24	369.01	101.60	71.27	771.86	187.90
6.21	387.21	110.91	76.13	784.66	174.90
9.12	431.29	119.22	80.99	794.19	148.28
12.03	463.29	124.47	85.84	802.44	165.89
14.95	491.60	148.05	90.70	812.96	132.39
17.86	521.02	169.51	92.95	815.51	75.01

الجدول 1-10 : بيانات الفحص للمثال رقم-9



الشكل 1-47 : رسم لوغاريتمي لتفسيربيانات فحص تصاعد الضغط -المثال رقم-9

الحل:

1- نرسم على ورق لوغاريتمي علاقة الضغط ΔP و مشتقة الضغط $(t*\Delta\acute{P})$ مع الزمن t الشكل1-47.

2- يتم تمييز الخطوط المستقيمة لاطوار الجريان الشعاعي (الافقي) و الخطي المكمني (ميل النصف)

3- لايوجد تاثير لمعامل تخزين البئر - خط الميل الواحد .

4- من منحني مشتقة الضغط نحدد $(t*\Delta\acute{P})_R$=195 psi ثم نحسب النفاذية و كما يأتي:

$$k = \frac{70.6q\mu B_o}{h(t\cdot\Delta p'_w)_R} = \frac{(70.6)(1343.54)(0.208)(1.782)}{(150)(195)}$$

$$= 1.2\ mD$$

5- من خط طور الجريان الخطي المكمني نجد الاحداثيات الاتية عند الوقت ساعة واحدة :

$$(\Delta p_w)_{BL1} = 150\ psi$$
$$(t\cdot\Delta p'_w)_{BL1} = 44\ psi$$

نحسب نصف طول الشق من المعادلتين رقم- 123 و 128 في ادناه:

$$x_f = 4.064\left(\frac{1343.54(1.782)}{(150)(150)}\right)\sqrt{\frac{0.208}{(0.09)(30.36x10^{-6})(0.23^2)}}$$

$$x_f = 108.9\ ft$$

6- لتكن t_R=27. 6 hrs هو الوقت المختار للجريان اللامتناهي الشعاعي من على منحني الضغط و مشتقة الضغط لذا فان قيم $(t*\Delta\acute{P})_R$ و $(\Delta P)_R$ من الرسم والمقابلة لهذا الوقت تساوي:

$$(\Delta P_w)_R = 599.37\ psi$$
$$(t \cdot \Delta p'_w)_R = 195\ psi$$

- حساب عامل القشرة من المعادلة رقم-122 كما يأتي:

$$s = \frac{1}{2}\left[\frac{599.37}{195} - \ln\left(\frac{(1.2)(27.57)}{(0.09)(0.208)(30.36x10^{-6})(0.23^2)}\right) + 7.43\right]$$
$$s = -5.16$$

7- حساب معامل التوصيل للشق من المعادلة رقم-128 :

$$w_f k_f = \frac{3.31739(1.2)}{\frac{e^{-5.16}}{0.23} - \frac{1.92173}{108.9}} = 543.7\ mD - ft$$

8- حساب معامل التوصيل الشق اللابعدي يساوي:

$$FCD = \frac{w_f k_f}{x_f k} = \frac{543.7}{1.2x108.9} = 4.16$$

3- عندما يكون خط الجريان الشعاعي غير واضح (مدة فحص قليلة بعد اجراء عملية التشقق الهيدروليكي) Short post-frac tests-Radial flow line is not observed

عندما تكون مدة فحوصات الابار(هبوط او تصاعد الضغط) قصيرة لاسيما في المكامن ذات النفاذية القليلة فان الخط الافقي لمشتقة الضغط والذي يمثل طور الجريان الشعاعي غير المتناهي لا يُمكن تمييزه (على فرض انه لا يوجد فحص للبئر قبل اجراء عملية التشقق الهيدروليكي)، في هذه الحالة لا يُمكن استخدام بيانات الخط الجريان الشعاعي في حساب نفاذية المكمن او عامل القشرة . لكن لتوفر خطي الجريان الخطي و الجريان الخطي الثنائي بشكل واضح في منحنيات الضغط و مشتقة الضغط فيُمكن من احتساب النفاذية من المعادلة رقم- 122 و احتساب معامل القشرة بعد التشقق كما يأتي:

$$s = \ln\left[r_w\left(\frac{1.92173}{x_f} - \frac{3.31739k}{w_f k_f}\right)\right] \quad \text{-------- 129}$$

او من العلاقة الاتية :

$$s = \ln\frac{r_w}{x_f} + \frac{1.65 - 0.32u + 0.11u^2}{1 + 0.18u + 0.064u^2 + 0.005u^3} \quad \text{-------- 130}$$

إذ ان

$$u = \ln\left(\frac{k_f w_f}{k \cdot x_f}\right) = \ln F_{CD} \quad \text{--------} 131$$

لاحظ ان نصف طول الشق و توصيلية الشق يُحسب من تحليلات خطي الجريان الخطي والجريان الخطي الثنائي لمنحنيات الضغط و مشتقة الضغط .

مثال-10

فحص قصير - خط الجريان الشعاعي غير الملحوظ

نفاذية المكمن قبل اجراء عملية التشقق الهيدروليكي كانت تساوي k=12.4 md وذلك من جراء فحص بئر نفطي ثم بعد عملية التشقق الهيدروليكي تم اجراء فحص تصاعد الضغط الجدول 1-11 ادناه يتضمن بيانات الفحص، البيانات الاخرى في الجدول رقم 1-7 كما يأتي:

Δt, hrs	Δp, psi	t*Δp', psi	Δt, hrs	Δp, psi	t*Δp', psi
0.00	0.00	0.00	2.78	86.34	23.92
0.02	27.45	116.51	3.78	93.59	24.99
0.02	42.39	137.62	4.78	99.56	25.50
0.08	48.50	6.80	5.78	104.26	26.88
0.28	56.18	27.63	7.78	113.36	32.64
0.33	61.87	33.93	9.78	121.04	33.03
0.78	63.72	14.37	11.78	126.87	31.84
1.08	72.11	23.12	13.78	131.85	35.79
1.78	76.38	13.69	17.78	142.66	39.16
2.78	86.34	23.92	19.78	146.07	45.76

الجدول 1-11 : بيانات الفحص للمثال رقم-10

المطلوب اجراء تفسير لبيانات الفحص بطريقة TDS ؟؟

الحل:

1- رسم على ورق لوغاريتمي علاقة الضغط ΔP و مشتقة الضغط (t×ΔṔ) مع الزمن t الشكل1-48 .

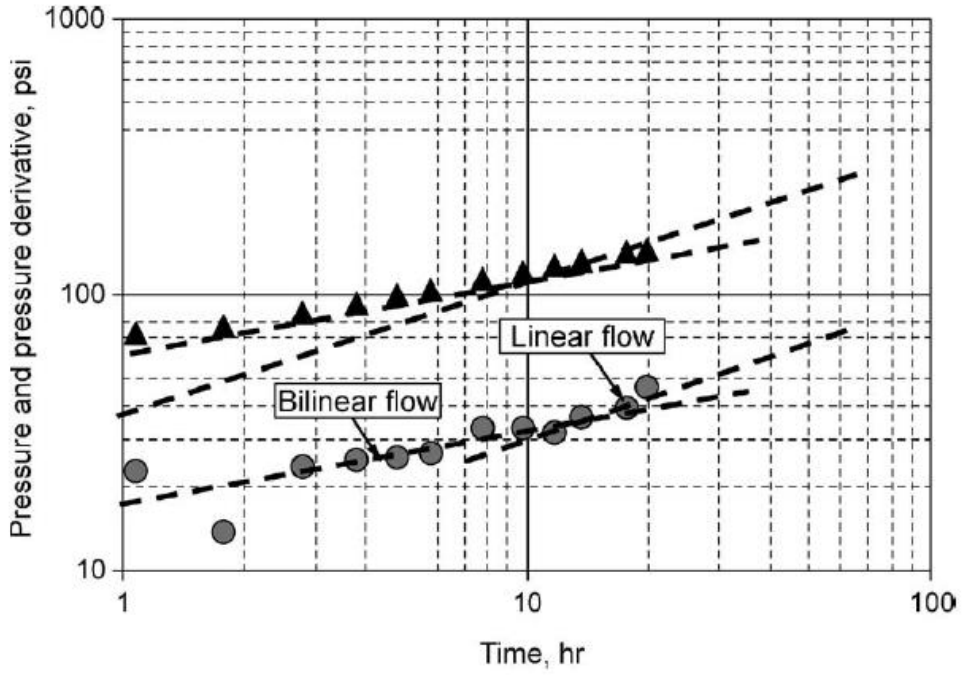
2- يتم تمييز الخطوط المستقيمة لاطوار الجريان الخطي الثنائي (ميل الربع) و الخطي المكمني (ميل النصف)

3- لايوجد تاثير لمعامل تخزين البئر - خط الميل الواحد .

4- من خط طور الجريان الخطي الثنائي نجد الاحداثيات الاتية عند الوقت ساعة واحدة :

$$(\Delta p_w)_{BL1} = 72\,psi$$

$$(t \cdot \Delta p'_w)_{BL1} = 18\,psi$$



الشكل 1-48 : رسم لوغاريتمي لتفسيربيانات فحص تصاعد الضغط -المثال رقم-10

5- حساب معامل التوصيل للشق من المعادلتين رقم- 123 و 128 في ادناه:

$$k_f w_f = 1947.46 \frac{1}{\sqrt{(0.2)(0.53)(101x10^{-6})(12.4)}} * \left(\frac{(411.98)(0.53)(1.258)}{(21)(72)} \right)^2$$
$$= 5578.35\ mD-ft$$

$$k_f w_f = 121.74 \frac{1}{\sqrt{(0.2)(0.53)(101x10^{-6})(12.4)}} * \left(\frac{(411.98)(0.53)(1.258)}{(21)(18)} \right)^2$$
$$= 5579.44\ mD-ft$$

6- من الشكل1-48 و من على خط الجريان الخطي عند الوقت ساعة واحدة فان $(\Delta P)_{L1}=37.2$.

نحسب نصف طول الشق من المعادلة رقم-93 يساوي :

$$x_f = 4.064 \left(\frac{411.98(1.258)}{(21)(37.2)} \right) \sqrt{\frac{0.53}{(0.2)(101x10^{-6})(12.4)}}$$
$$x_f = 124.02\ ft$$

7- حساب معامل القشرة من المعادلة الاتية:

$$s = \ln\left[r_w\left(\frac{1.92173}{x_f} - \frac{3.31739k}{w_f k_f}\right)\right]$$

$$s = \ln\left[0.689\left(\frac{1.92173}{124.02} - \frac{3.31739(12.4)}{5578.9}\right)\right]$$

$$= -5.18$$

8- حساب معامل التوصيل الشق اللابعدي يساوي:

$$F_{CD} = \frac{w_f k_f}{x_f k} = \frac{5578.9}{124.02 \times 12.4}$$

$$= 3.62$$

11-1 فحوصات الابار المتشققة افقيا

تمثل فحوصات الآبار (Well Testing) أحد الأعمدة الأساسية في تشخيص أداء المكامن الهيدروكربونية، إذ تتيح فهماً دقيقاً للتفاعلات الديناميكية بين البئر والمكمن، لا سيما في الحالات التي تتضمن تعقيدًا هندسيًا مثل وجود شقوق هيدروليكية أفقية (Horizontal Hydraulic Fractures). ومع التوسع المتزايد في تطوير المكامن غير التقليدية Unconventional Reservoirs ، التي تتميز بانخفاض شديد في النفاذية، مثل الصخور الطينية (Shale) والرمال المحكمة المتماسكة Tight Sands(إذ تشكّل الشقوق الأفقية الوسيط الأساسي لتدفق الموائع إلى البئر) فبرزت الحاجة إلى أدوات تفسيرية دقيقة تُمكّن من فهم تأثير الشقوق الأفقية على أنماط التدفق واستجابة الضغط عبر الفحوصات.

من ثمّ ، فإن تفسير استجابة البئر بطريقة دقيقة يساهم في:

- تحسين استراتيجيات الإنتاج والتطوير
- تقييم كفاءة عملية التكسير الهيدروليكي
- تقليل عدم اليقين في نمذجة الأداء المستقبلي للبئر والمكمن

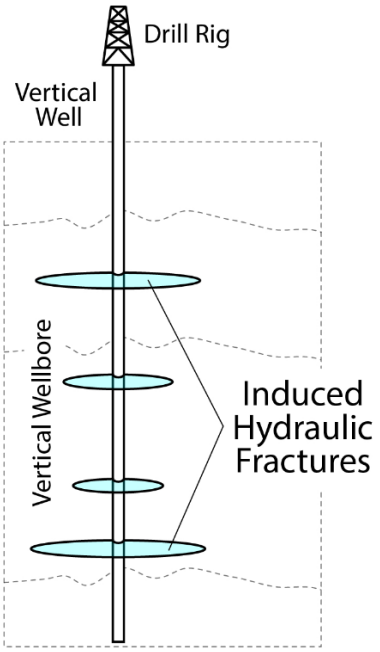
وبالتالي، فإن الدمج بين بيانات فحوصات الآبار وتقنيات تفسير الشقوق الأفقية يشكّل أداة متقدمة لاتخاذ قرارات تشغيلية وهندسية مستندة إلى بيانات واقعية وتحليل نوعي.

في هذا الإطار، يُعد تطابق منحنيات الضغط ومشتق الضغط (Pressure and Derivative Matching)أحد أكثر الأساليب فعالية في تفسير بيانات فحوصات الآبار المتشققة أفقيًا، إذ يُمكن عبره تمييز اطوار الجريان المختلفة (مثل الجريان الخطي، الشعاعي، أو الثنائي)، و ثم تحديد المعاملات المكمنية المهمة، بما في ذلك:

- نصف طول الشق الفعّال(Effective Half-Length) .
- توصيلية الشق(Fracture Conductivity) .
- النفاذية المكمنية(Reservoir Permeability) .

- الضغط الابتدائي(Initial Reservoir Pressure) .

اخيرا فاحتمالية الشق ان يكون افقيا (الشكل1-49) في عملية التشقق الهيدروليكي للابار العمودية وارد جدا عند الاعماق اقل من 1500 ft في حين يحدث الشق العمودي في اعماق اكبر من 3000 ft. والسبب في ذلك ان ضغط العمود الصخري عند هذا العمق يعطي اقل الاجهادات و الشق يحدث عادة بشكل عمودي على اقل الاجهادات.



الشكل 1-49 : نظام الشقوق الافقية في الابار العمودية

1-11-1 اطوار الجريان المصاحبة لفحص الابار المتشققة افقيا :

- **طور الجريان الخطي من المكمن الى الشق** : بوجود الشق الافقي وعبر مدة قصيرة من الفحص يظهر الجريان الخطي العمودي من المكمن الى الشق الافقي و يكون سلوك الضغط عبر هذه المدة كما في المعادلة ادناه:

$$p_D = 2h_D\sqrt{\frac{t_{Drf}}{\pi}} \text{ ------- 135}$$

عبر مدة الجريان الخطي للشق الافقي و بالتعويض عن t_{Dxf}،p_D بما يساويهما ينتج :

$$p_{wf} = p_i + m_{Hf}\sqrt{t} \text{ ------- 136}$$

حسب المعادلة اعلاه و برسم علاقة ضغط جريان في قاع البئر P_{wf} مع الجذر التربيعي للزمن $\sqrt{t}$ نحصل على خط مستقيم عند الوقت المبكر من الفحص بميل m_{Hf} و يتقاطع مع الاحداثي الصادي عند الضغط الاصلي او الابتدائي للمكمن Pi ، الميل يساوي:

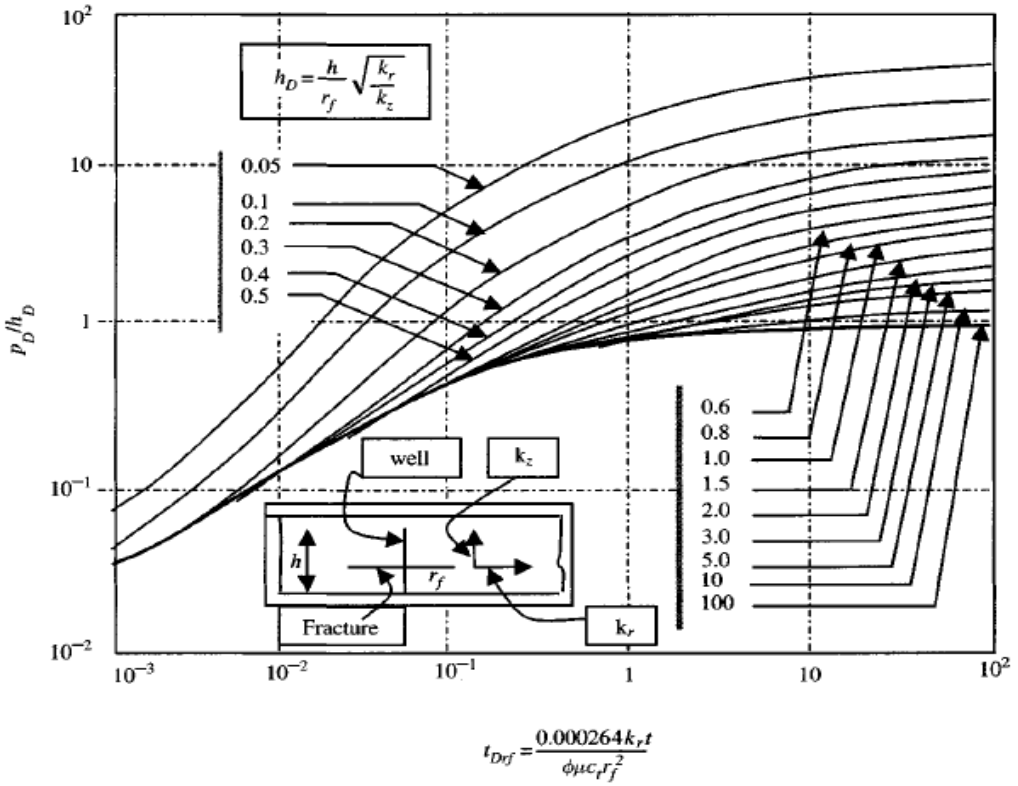
$$m_{Hf} = -\frac{2.587q\beta}{r_f^2}\sqrt{\frac{\mu}{k_z\phi c_t}} \text{ ------- 137}$$

- **طور الجريان الشعاعي**: عند جريان البئر لمدة طويلة عبر فحص هبوط الضغط او غلق البئر لمدة طويلة عبر فحص تصاعد الضغط فان بيانات الفحص تشكل علاقة خط مستقيم عند رسمها على احداثيات نصف لوغاريتمية لتعكس طور الجريان الشعاعي . يُوصف سلوك الضغط اللابعدي لهذه المدة كما في المعادلة ادناه:

$$p_D = 0.5\left(\ln t_{Drf} + 1.80907 + \frac{h_D^2}{6}\right) \text{ ------- 138}$$

2-11-1 تفسير الابار المتشققة افقيا بطريقة تطابق المنحنيات - رامي و كرينكارتن- 1974

في عام 1974، قدّم كل من Gringarten و Ramey نموذجًا لتحليل فحوصات الابار المتشققة و التي تحتوي على شق أفقي مفرد يقع في مركز الطبقة المنتجة وضمن نظام شق ذو امتداد لانهائي (الشكل 1-50) ، يعتمد تطابق المنحنيات .



الشكل 1-50 : منحنيات التطابق النوعي لنظام الشقوق الافقية في الابار العمودية

في هذا النموذج، تُستخدم منحنيات تطابق نظرية مرسومة على مقياس لوغاريتمي تمثل العلاقة

بين: الضغط اللابعدي نسبة الى السُمك اللابعدي P_D/h_D (الاحداثي الصادي) مع الزمن اللابعدي t_{Drf} (الاحداثي السيني) و لقيم مختلفة للسُمك اللابعدي h_D .

- تتراوح قيم h_D من $\mathbf{0.05 \leq h_D \leq 100}$.
- الشق يُعتبر عمودي عندما تكون قيم $\mathbf{h_D<1}$.
- و يُعتبر الشق افقي عندما تكون قيم $\mathbf{h_D>3}$.
- يُعَرف الضغط اللابعدي الى السُمك اللابعدي في هذه الطريقة كما يأتي :

$$\frac{p_D}{h_D} = \frac{(k_r k_z)^{0.5} r_f \, \Delta p}{141.2 q \mu \beta} \quad \text{------- 132}$$

والزمن اللابعدي :

$$t_{Drf} = \frac{0.000264 \; k_r t}{\phi \mu c_t r_f^2} \quad \text{------- 133}$$

و ان h_D تُمثل سُمك المكمن اللابعدي و تعرف كما يأتي:

$$h_D = \frac{h}{r_f}\sqrt{\frac{k_r}{k_z}} \quad \text{------- 134}$$

إذ ان :

k_r = radial formation permeability, mD
r_f = horizontal fracture radius, ft
k_z = vertical formation permeability, mD

- تفترض الطريقة ان لا وجود لتاثير تخزين البئر او لتخزين الشق .
- طريقة تطابق المنحنيات كما موضح في الشكل 1-50، تُطبّق لتفسير فحوصات هبوط الضغط و تصاعد الضغط (Pressure Drawdown & Buildup Tests) .

2- خطوات تفسير الفحص بطريقة تطابق المنحنيات:

البيانات المتوفرة يجب ان تكون كافية لتغطي فترات الفحص و لنحصل على تطابق ملائم مع احد المنحنيات النظرية الرئيسة.

1- رسم بيانات الفحص على ورق شفاف لوغاريتمي لعلاقة فرق الضغط ΔP مع الزمن t بمقياس رسم مشابه لمنحنيات التطابق النوعي النظري الشكل1-50 .

2- نُطابق البيانات الحقيقية مع منحنيات كرينكارتن و رامي Gringarten & Ramey نجد احسن منحني للتطابق و منه نحدد نقطة للتطابق لا على التعيين مع احداثياتها وهي:

$$(p_D/h_D)_M \quad (\Delta p)_M \quad (t_D)_M \quad (t)_M \quad (h_D)_M$$

3- من احداثيات الضغط نجد الحد :

$$\sqrt{k_r k_z} r_f = 141.2 q \beta \mu \frac{(p_D/h_D)_M}{(\Delta p)_M} \quad \text{------- 139}$$

4- و من احداثيات الزمن نجد الحد :

$$\frac{k_r}{r_f^2} = \frac{\phi \mu c_t}{0.000264} \frac{(t_D)_M}{(t)_M} \quad \text{------- 140}$$

5- حساب النفاذية العمودية و كما يأتي:

$$k_z = \frac{k_r}{r_f^2} \left[\frac{h}{(h_D)_M} \right]^2 \text{------- 141}$$

6- حساب نصف قطر الشق الافقي:

$$r_f = \left(\frac{-2.587 q \beta}{m_{Hf}} \sqrt{\frac{\mu}{k_z \phi c_t}} \right)^{0.5} \text{------ 142}$$

7- حساب النفاذية الافقية او الشعاعية من ما يلي:

$$k_r = \left(r_f^2 \right) \frac{\phi \mu c_t}{0.000264} \frac{(t_D)_M}{(t)_M} \quad \text{------ 143}$$

مثال-11

بيانات فحص هبوط الضغط أُدرجت في الجدول 1-12 ادناه ، المعلومات المتوفرة الاخرى كما يأتي :

$Q = 275\,\text{stb/day};\ \mu_o = 0.23\,\text{cP};\ \beta_o = 1.760\,\text{rb/stb};\ h = 12\,\text{ft};\ \phi = 0.30;\ c_t = 30.0 \times 10^{-6}\,\text{psi}^{-1}$

احسب : نصف قطر الشق- r_f ، النفاذية العمودية- k_z و النفاذية الشعاعية – k_r ؟؟

الحل :

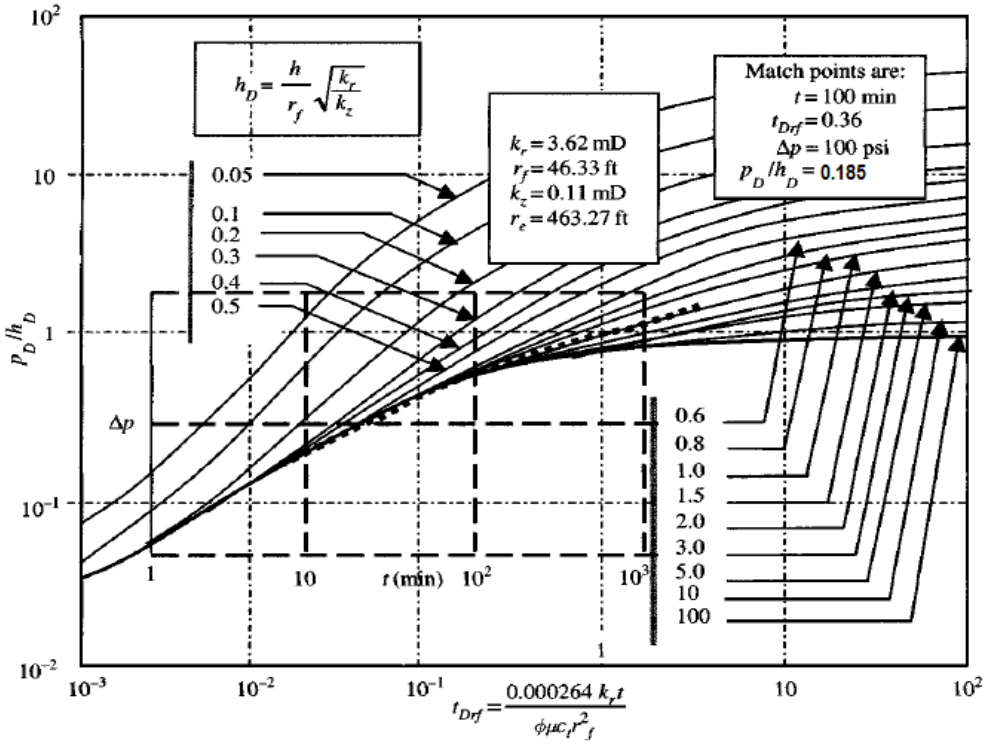
1- باستخدام بيانات الفحص ، نرسم علاقة ΔP vs t على رسم بياني لوغاريتمي شفاف بمقياس رسم مشابه لمقياس الرسم لمنحيات التطابق .

2- بيانات الفحص الاولية تشكل علاقة خط مستقيم بميل النصف ليعكس وجود بئر متشقق (او مكمن متشقق)

3- نعمل على تطابق البيانات المقاسة مع منحنيات كرينكارتن و رامي Gringarten & Ramey الشكل1-51.

Time, t (min)	Pressure, p_{wf} (psig)	$(p_i - p_{wf})$ (psig)	$\frac{(p_i - p_{wf})}{t}$ (psig/min)	Time (hr)	$\sqrt{t}$ (hr$^{0.5}$)
0.0000	4000	0	0.00	–	–
1.0000	3963	37	37.00	0.0167	0.129
5.0000	3918	82	16.40	0.0833	0.289
10.0000	3886	114	11.40	0.1670	0.409
15.0000	3860	140	9.33	0.250	0.500
20.0000	3839	161	8.05	0.333	0.577
25.0000	3819	181	7.24	0.417	0.646
30.0000	3805	195	6.50	0.500	0.707
35.0000	3789	211	6.03	0.583	0.764
40.0000	3778	222	5.55	0.667	0.817
45.0000	3765	235	5.22	0.750	0.866
50.0000	3759	241	4.82	0.833	0.913
60.0000	3740	260	4.33	1.000	1.000
75.0000	3704	295	3.93	1.750	1.118
120.0000	3645	355	2.96	2.000	1.414
150.0000	3610	390	2.60	2.500	1.581
240.0000	3540	460	1.92	4.00	2.000
285.0000	3520	480	1.68	4.75	2.179
480.0000	3440	560	1.17	8.00	2.828
720.0000	3370	630	0.88	12.00	3.464

الجدول 1-12 : بيانات الفحص للمثال رقم-11



الشكل 1-51 : تطابق بيانات الفحص للمثال رقم- 11

- من التطابق نحدد نقطة للتطابق احداثياتها:

Dimensionless pressure from type curve, $p_D/h_D = 0.185$;
Pressure change from test data, $\Delta p = 100$ psig;
Time match point (dimensionless time), $t_D = 0.36$;
Time match point from test data, $\Delta t = 100$.

5- نجد المعامل:

$$\sqrt{k_r k_z} r_f = 141.2 q \beta \mu \frac{(p_D/h_D)_M}{(\Delta p)_M}$$

$$= 141.2(275)(1.76)(0.23) \times \left(\frac{0.185}{100}\right) = 29.08 \text{ mD ft}$$

6- نجد النسبة:

$$\frac{k_r}{r_f^2} = \frac{\phi \mu c_t}{0.000264} \frac{(t_D)_M}{(t)_M}$$

$$= \frac{0.30(0.23)(30 \times 10^{-6})}{0.000264} \left(\frac{0.36}{100/60}\right)_M = 0.001693$$

باخذ الجذر التربيعي للحد اعلاه فينتج :

$$\frac{\sqrt{k_r}}{r_f} = \sqrt{.001693} = 0.0412$$

7- من الشكل1-51 ومن تطابق المنحنيات فان:

$$h_D = \frac{h}{r_f} \sqrt{\frac{k_r}{k_z}} = 1.5$$

بالترتيب

$$\frac{1}{r_f} \sqrt{\frac{k_r}{k_z}} = \frac{h_D}{h} = \frac{1.5}{12} = 0.125 \text{ ft}^{-1}$$

8- حساب النفاذية الشعاعية k_r وكما يأتي:

$$\sqrt{k_r k_z} r_f \left(\frac{1}{r_f} \sqrt{\frac{k_r}{k_z}}\right) = k_r = (29.08)(0.125) = 3.65 \text{ mD}$$

9- حساب قيمة نصف قطر الشق r_f وكما يأتي:

$$\frac{\sqrt{k_r}}{r_f} = 0.0412$$

$$r_f = \frac{\sqrt{k_r}}{0.0412} = \frac{\sqrt{3.65}}{0.0412}$$
$$= 46.37\,\text{ft}$$

10- حساب النفاذية العمودية k_z

$$\sqrt{k_z} = \frac{(\sqrt{k_r k_z} r_f)}{(\sqrt{k_r} r_f)} = \frac{29.08}{\sqrt{3.65}(46.7)} = 0.3273$$

$$k_z = \sqrt{0.3273} = 0.11\,\text{mD}$$

ملخص نتائج تفسير الفحص للمثال رقم-11 أُدرجت في ادناه:

$(k_r k_z)^{0.5} r_f = 29.08\,\text{mD ft}$, $k_r^{0.5}/r_f = 0.04\,\text{mD}^{0.5}/\text{ft}$;
$1/r_f(k_r/k_z)^{0.5} = 0.13\,\text{ft}^{-1}$;
Effective horizontal permeability, $k_r = 3.65\,\text{mD}$;
Fracture radius, $r_f = 46.33\,\text{ft}$;
Effective vertical permeability, $k_z = 0.11\,\text{mD}$;
Lower limit of drainage radius, $r_e = 463.27\,\text{ft}$;
Lower limit of drainage area, $A = 15.48\,\text{acres}$.

Nomenclature - المصطلحات و الرموز

A	area, ft^2
B	oil volume factor, bbl/STB
b	fraction of penetration/completion
c	compressibility, 1/psia
C	wellbore storage coefficient, bbl/psia
C_A	reservoir shape factor
C_{fD}	dimensionless fracture conductivity
c_t	total or system compressibility, 1/psia
F_{cor}	correction factor
h	formation thickness, ft
k	permeability, md
kh	reservoir flow capacity, md-ft
h_f	fracture height, ft

k_f	fracture permeability, md
$k_f w_f$	fracture conductivity, md-ft
m	slope of P versus log t plot, psia/hr/cycle
m_{bir}	slope of P versus $t^{0.36}$ plot during elliptical/biradial flow, psia$^{0.36}$/hr
m_{lf}	slope of P versus $t^{0.5}$ plot during linear flow, psia$^{0.5}$/hr
m_{vf}	slope of P versus $t^{0.5}$ plot during linear flow, psia$^{0.5}$/hr
m_{bf}	slope of P versus $t^{0.25}$ plot during bilinear flow, psia$^{0.25}$/hr
P	pressure, psia
$P_D{}'$	dimensionless pressure derivative
P_D	dimensionless pressure
P_i	initial reservoir pressure, psia
P_{wf}	well flowing pressure, psia
P_{ws}	well shut-in or static pressure, psia
P^*	false pressure, psia
ΔP_s	pressure drop due to skin conditions, psia
q	liquid flow rate, bbl/D
q_{fD}	dimensionless flow rate
r_D	dimensionless radius
r	radius, ft
r_e	drainage radius, ft
r_w	well radius, ft
r_{wa}	apparent wellbore radius, ft
s	skin factor
t	time, hr
t_p	production (Horner) time before shutting-in a well, hr
t_D	dimensionless time based on well radius
t_{DA}	dimensionless time based on reservoir area
t_{Dxf}	dimensionless time based on half-fracture length
t_{pDA}	dimensionless Horner time based on area
X	distance along the x direction
x_e	half-reservoir side, ft (square system)
x_f	half-fracture length, ft
$t^*\Delta P'$	pressure derivative, psia
w_f	fracture width, ft

Greek

Δ	change, drop
Δt	shut-in time, hr
η	diffusivity constant, $\varphi\mu c_t/k$

φ	porosity, fraction
ρ	fluid density, lbm/ft^3
μ	viscosity, cp

Suffices

1*h*	read at a time of 1 hr
D	dimensionless
DA	dimensionless with respect to area
Dxf	dimensionless with respect to area
BL	bilinear flow
*BL*1	bilinear flow at 1 hr
BLLi	intercept of bilinear and linear lines in pressure curve
BLLi	intercept of bilinear and linear lines in pressure derivative curve
BLBRi	intercept of bilinear and biradial lines in pressure curve
BLri	intercept of bilinear and radial lines in pressure curve
blf	beginning of linear flow
brf	beginning of radial flow
bsl	beginning of semilog line
BRLi	intercept of biradial and linear lines
BRri	intercept of biradial and radial lines
BRSSi	intercept of biradial and steady-state lines
BRpssi	intercept of biradial and pseudosteady-state lines
CB	formation linear flow regime
ebf	end of bilinear flow
el	end of linear flow
f	fracture
i	intersection or initial conditions
Lri	intercept of linear and radial lines
p	production
pss	pseudosteady state
r	radial flow
Lri	intercept of linear and radial lines
rSSi	intersection between the radial line and the −1-slope line
s	skin
w	well, water
wa	apparent wellbore
wf	well flowing
ws	well shut-in

References – المصادر

1. Amanat U. Chaudhry ، "Oil Well Testing Handbook " ، Advanced TWPSOM Petroleum Systems، Inc. Houston، Texas ، Gulf Professional Publishing ، Copyright © 2004، Elsevier Inc.
2. Cinco-Ley H، Samaniego F. "Transient pressure analysis for fractured wells".Society of Petroleum Engineers. 1981.DOI: 10.2118/7490-PA.
3. Cinco LH، Samaniego VF،Dominguez AN. "Transient pressure behavior for a well with a finite-conductivity vertical fracture" . SPE Journal. 1978;18(4):253-264.DOI: 10.2118/6014-PA.
4. Dominique Bourdet، " Well Test Analysis: The Use Of Advanced Interpretation Models" ، 9 2002 Elsevier r Science B.V.
5. Freddy Humberto Escobar Macualo،" Novel، Integrated and Revolutionary Well Test Interpretation and Analysis" ، IntechOpen @ 2018.
6. Gringarten، A. C، and Ramey، H.، Jr.، "Unsteady-State Pressure Distribution Created by a Well with a Single Horizontal Fracture،" Soc. Pet. Eng. J. (Aug. 1974) 413^26; Trans. AIME، 257.
   Medhat M. Kamal "Transient Well Testing " Monograph SPE © Copyright 2009 Society of Petroleum Engineers.
7. Per Arne Slotte، and Carl Fredrik Berg ، "Lecture notes in well-testing" ، These present lecture notes are © Per Arne Slotte، 2020.
8. Roland N. Horne " Modern Well Test Analysis ، A computer-Aided Approach" Copyright@1990، by Petroway،Inc.
9. Schlumberger، " Introduction to Well Testing" © Schlumberger 1988.
10. SMITH، J. and COBB، W. (1979). "Pressure buildup tests in bounded reservoirs". J. Pet. Technol.، Aug.
11. Tarek Ahmed ، Paul D. McKinney ، "Advanced Reservoir Engineering" ، Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier r ، 2005.
12. Tiab D، Azzougen A، Escobar FH، Berumen_Campos S. "Analysis of pressure derivative data of finite conductivity fractures by the Direct Synthesis technique". Society of Petroleum Engineers. 1999. DOI: 10.2118/52201-MS.
13. Tiab D. "Analysis of pressure derivative without type curve matching: vertically fractured wells in closed systems". Journal of Petroleum Science and Engineering. 1994;11:37-333. DOI: 10.2118/26138-MS.

14. Tiab D. "Advances in Pressure Transient Analysis—TDS technique". Lecture Notes Manual. Norman، Oklahoma، USA: The University of Oklahoma; 2003. 577 p.
15. Tiab D. "Analysis of pressure derivative data of hydraulically fractured wells by the Tiab's direct synthesis technique". Journal of Petroleum Science and Engineering. 2005;49:1-21. DOI: 10.1016/j.petrol.2005.07.001.
16. Wattenbarger، Robert A. and Ramey، H.J.، JR. (1968). "Gas well testing with turbulence damage and wellbore storage". J. Pet. Technol.، 877–887.

الفصل الثاني

فحص المكامن المتشققة طبيعيا Well Testing for Naturally Fractured(Fissures) Reservoirs

1-2 المقدمة :

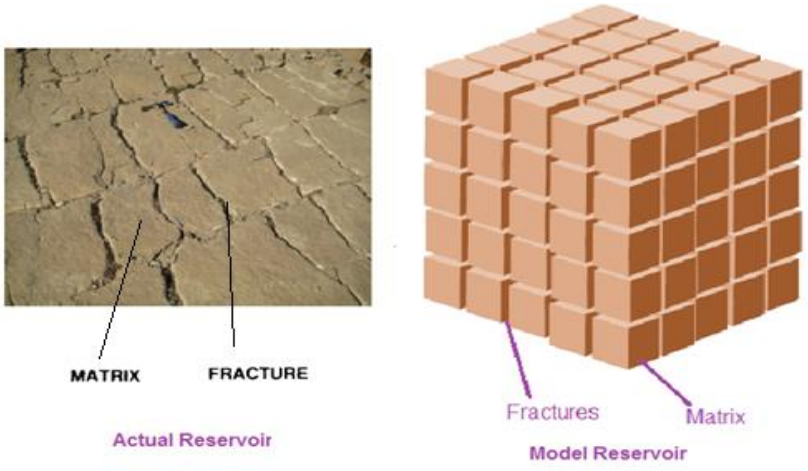
تُعد المكامن المتشققة طبيعياً (Naturally Fractured Reservoirs) من أكثر أنواع المكامن تعقيداً في دراسة سلوك جريان الموائع وتحليل فحوصات الآبار .وتتميز هذه المكامن بوجود شبكة طبيعية من الشقوق والفتحات الدقيقة (Fissures) داخل الصخور، والتي تؤثر بشكل كبير على خصائص التدفق وتوزيع الضغط حول البئر.

الشقوق الطبيعية هذه ناتجة عن القوى الجيولوجية عبر الزمن، مثل:

- حركة الصفائح التكتونية
- انكماش الطبقات
- ضغوط الانغماس والتعرية

برغم من ان هذه الشقوق تشكل قنوات عالية التوصيل تسهل تدفق النفط و الغاز، لكنها تخلق أيضًا توزيعات غير متجانسة للضغط وتفعّل آليات تدفق معقدة.

المكامن سُميت بالمتشققة او المتكسرة Fractured reservoirs تمييزا لها عن المكامن المتجانسة غير المتشققة Unfractured reservoirs و سميت المكامن المتشققة طبيعيا Naturally fractures تمييزا لها عن المكامن المتشققة صناعيا Hydraulic fractures يطلق على الشقوق الطبيعية احيانا Fissures لغرض تمييزها عن الصناعية او الشقوق الهيدروليكية و تُعتبر من المكامن التي تتغير خواصها البتروفيزيائية بامتداد المكمن مما يجعل تفسير سلوك الجريان وتحليل بيانات الفحص أكثر تعقيدًا.



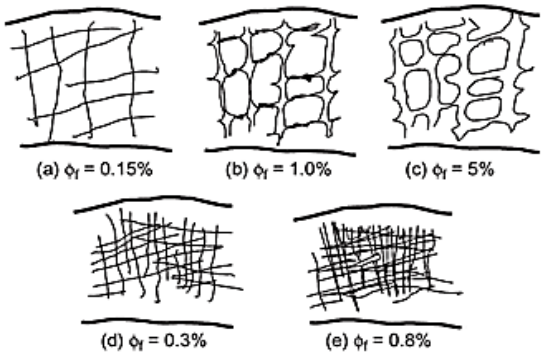
الشكل2-1 : موديل الشقوق الطبيعية على شكل مكعبات و المكمن الحقيقي المتشقق

الخاصية	النسيج الصخري (Matrix)	الشقوق (Fractures)
النفاذية (k)	منخفضة (k_m)	مرتفعة (k_f)
المسامية (ϕ)	عالية (ϕ_m)	منخفضة جدًا قلما تزيد عن 1.5% او2% لكن في العادة اقل من 1% >ϕ_f (وقد تصل في حالات قليلة الى 5% (الجدول2-1)

2-2 تركيب المكمن المتشقق

يتكون المكمن المتشقق من كتل من النسيج الصخري (Matrix) مفصولة عن بعضها بواسطة شبكة بشبكة و بنظام معين من الشقوق (Fractures) ، كما هو موضح في الشكل 2-1 . من وجهة نظر مكمنية ، فإن كلًا من النسيج الصخري والشقوق يمتلك خصائص بتروفيزيائية مختلفة كما مذكور في الجدول اعلاه.

Field	Porosity Range (%)
Beaver Gas Field	0.05–5
Austin chalk	0.2
General statement	1
South African Karst Zone	1–2
CT scan examples	1.53–2.57
Monterey	0.01–1.1



الجدول2-1: مديات قيم مسامية الشق لبعض انواع المكامن المتشققة في العالم

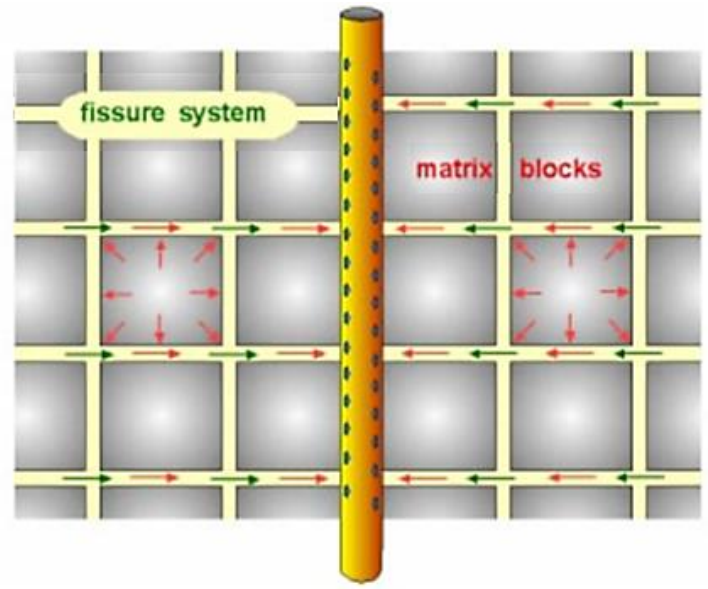
النسيج الصخري(Matrix) يعمل كمخزن للموائع، وهو المصدر الأساسي الذي يمد الشقوق بالموائع ، بينما تمتاز الشقوق (Fractures) بخاصية جريانية ديناميكية تعمل كواسطة لنقل الموائع بكفاءة عالية نحو البئر (الشكل2-2) .

ان سعة الخزن للشقوق تساوي حاصل ضرب مسامية الشق في سُمك الشق في الانضغاطية:

Fracture storage-$S_f = \phi_f h_f c_f$ or $= \phi_f c_f$

و هي اقل بكثير عن سعة الخزن للنسيج الصخري التي تساوي:

Matrix storage-$S_m = \phi_m h_m c_m$ or $= \phi_m c_m$



الشكل2-2 : النسيج الصخري مصدر تغذية الشق بالموائع و الجريان الى البئر يتم عبر الشقوق

3-2 دلائل المكامن المتشققة طبيعيًا Indicators of Natural Fractures

يُمكن الكشف عن المكامن المتشققة طبيعيًا و التمييز بينها وغيرها من المكامن عبر مجموعة من المؤشرات والدلائل الفنية والجيولوجية من أبرزها:

1- أثناء الحفر:

- يُلاحظ ازدياد مفاجئ في معدل اختراق الطبقة عند مرور الحفارة في طبقة متشققة.
- حدوث فقدان في دورة سائل الحفر (Mud Loss) نتيجة تسربه عبر الشقوق.

2- اللباب الصخري:(Cores)

يُعد اللباب الصخري أداة واقعية وفعّالة للكشف عن الشقوق والتكسرات داخل المكمن. إذ تكون التكسرات الطبيعية ظاهرة على سطح اللباب . يُستخدم اللباب الصخري في تحديد بعض خواص الشقوق.

3- مجسات الآبار:(Well Logs)

تُمثّل مجسات الآبار في مراحل الاستكشاف أو التقييم أداة قوية للكشف عن الشقوق.

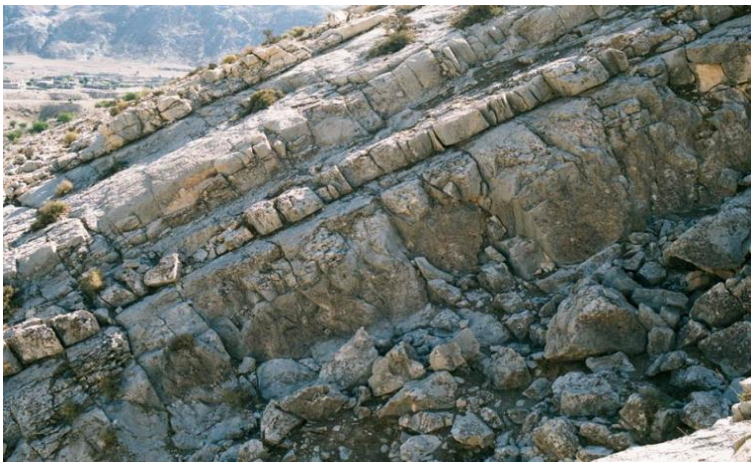
من أهم المجسات المستخدمة لذلك:

- مجسات المقاومة الكهربائية (Resistivity Logs)
- المجسات الصوتية (Sonic Logs)

- مجسات التصوير الدقيق (FMI – Fracture Micro Imager)
تُساعد هذه المجسات في توصيف الشقوق وتحديد توزيعها الهندسي حول البئر.

4- البيانات الزلزالية والجيولوجيا التركيبية:

توفر المعلومات الزلزالية و بروز الطبقات الى السطح (Outcrops) مؤشرات على وجود الشقوق كما في الشكل 2-3 . تُستخدم الموديلات التركيبية لتحديد مناطق التصدع والشقوق المحتملة.



الشكل2-3 : مؤشرات الاستدلال على وجود الشقوق تظهر الطبقات على سطح الارض Outcrops

5- أنظمة التصوير داخل البئر:

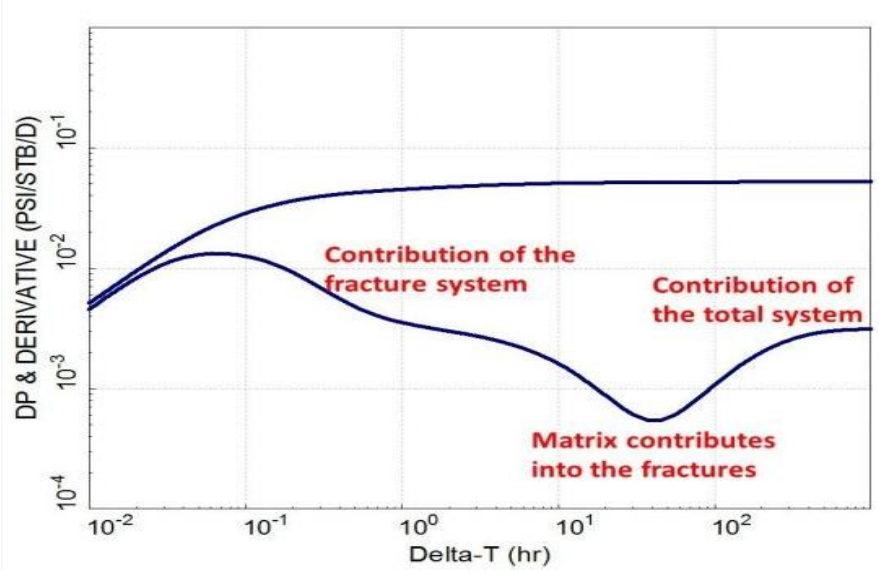
- أنظمة الرؤية المباشرة مثل الكاميرات الفوتوغرافية والتلفزيونية داخل البئر.
- أنظمة الرؤية غير المباشرة مثل جهاز *Borehole Televiewer* الذي يُنتج صورًا دقيقة باستخدام تقنية إرسال واستقبال الإشارات. و جهاز الماسح الضوئي للتكوين Formation MicroScanner (FMS) و الذي يُعد من الأجهزة المتقدمة في مجال تصوير الشقوق والقنوات المذابة في الصخور.

7- مؤشر الإنتاجية:(Productivity Index)

مؤشر الإنتاجية العالي جدًا (مثل 500 stb/day/psi أو أكثر) في الابار يُعد دلالة قوية على وجود شقوق طبيعية في المكمن. في بعض الابار مثل بعض آلابار النفطية في إيران، بلغ مؤشر الإنتاجية 10000 stb/day/psi ، إذ ان حوالي 95 % من الجريان يُعزى إلى وجود الشقوق.

8- فحوصات الآبار:(Well Testing)

تُستخدم عند غياب اللباب الصخري أو ضعف مؤشرات المجسات. يُكشف عن الشقوق عبر تحليل منحني بيانات الضغط و مشتقة الضغط مع الوقت إذ يتقعر منحني مشتقة الضغط بوجود المكامن المتشققة (الشكل2-4) مع ظهور خطين افقية قبل و بعد التقعر .



الشكل2-4 : مؤشرات الاستدلال على وجود الشقوق الطبيعية من رسم بيانات الفحص

4-2 أهمية فحص المكامن المتشققة طبيعياً:

1. فهم آلية التدفق :هل هو من النظام المزدوج (Dual-Porosity) أم نظام متعدد الجبهات(طبقات بنفاذية مختلفة).
2. تحديد خصائص المكمن التي تشمل :
   - نفاذية النسيج الصخري Matrix و الشقوق.
   - معامل الاتصال بين النسيج الصخري والشقوق.
   - حجم وانتشار الشقوق.
3. تحسين تصميم عمليات الإنتاج و تنشيط (تحفيز) الابار.
4. التخطيط لتطوير الحقل بناءً على سلوك المكمن.

5-2 أنظمة المكامن المتشققة طبيعيًا

بصورة عامة، تُصنّف المكامن المتشققة طبيعيًا إلى نظامين رئيسيين من حيث السلوك الجيولوجي والهيدروديناميكي:

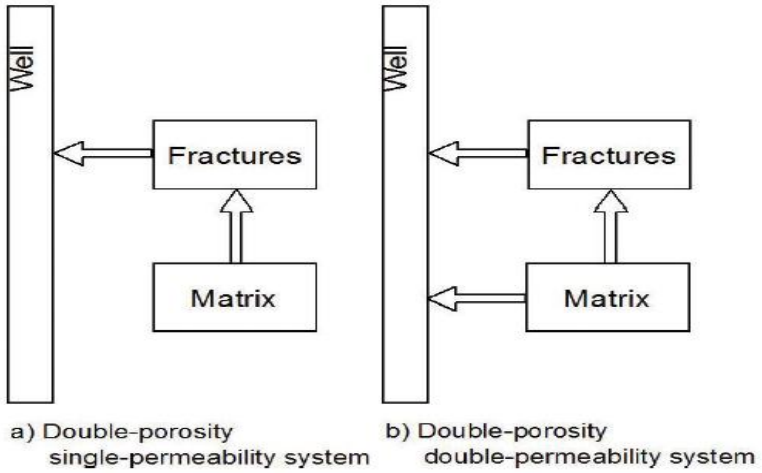
1- نظام المسامية الثنائي:(Double or Dual Porosity System)

أي ما يُعرف بـDouble Porosity & Single Permeability:.

- يتميز بوجود نظامي مسامية: الأول مسامية كتل النسيج الصخري(Matrix) والثاني مسامية شبكة الشقوق(Fractures) .أما النفاذية، فهي محصورة فقط في الشقوق . اي يوجد لكل من النسيج الصخري والشقوق قيمة مستقلة للمسامية.

- في هذا النظام ، الجريان من المكمن نحو البئر يتم عبر الشقوق فقط، لأن نفاذية النسيج الصخري تكون ضئيلة جدًا ومهملة مقارنةً بنفاذية الشقوق (كما في الشكل 2-5-a).

- النسيج الصخري يُعد بمثابة خزان يزود الشقوق بالموائع (نفط أو غاز).



الشكل2-5 : a - مخطط يُوضح نظام المسامية الثنائي b- و نظام النفاذية الثنائي في المكامن المتشققة طبيعيا

2- نظام النفاذية الثنائي (Double or Dual Permeability System) :

يتميز بوجود كلا من المسامية والنفاذية في النسيج الصخري و الشقوق.

في هذا النوع ، يتدفق المائع من المكمن إلى البئر عبر كلا النظامين (الشقوق والنسيج الصخري) ويكون النسيج الصخري مصدرًا لتزويد كلا من الشقوق والبئر بالموائع و الشكل (2-5-b) يُوضح هذا التفاعل بين النظامين. مثال اخر لنظام المكامن ذات النفاذية المزدوجة يحدث في المكامن متعددة الطبقات ذات التباين المنخفض في النفاذية بين الطبقات.

2-6 درجة تعقيد المكامن المتشققة:

تُعد المكامن المتشققة طبيعيًا معقدة من حيث التوصيف المكمني، نظرًا لتنوع وتداخل الخواص الصخرية زمانيًا ومكانيًا. بمرور الوقت فان التغيرات الفيزيائية والكيميائية للصخور المكمنية قد تؤدي إلى تضرر الشقوق، مثل:

ترسُب المعادن المذابة في الماء داخل الشقوق، مما يسبب انخفاض النفاذية أو حتى انسداد الشق.

الشقوق الطبيعية تكون أكثر عرضة للانغلاق بسبب غياب مواد داعمة لفتحة الشق كالتي في التشقق الهيدروليكي ، لذلك من الندر أن نجد شقوقًا طبيعية ذات توصيلية لا نهائية (Infinite Conductivity). ان طول و عرض الشق و كثافة الشقوق اي عدد الشقوق لكل وحدة طول تعتبر من العوامل المؤثرة في توصيلية المكمن المتشقق.

من وجهة نظر مكمنية فيُمكن اعتبار المكمن "متشققًا طبيعيًا" إذا توفرت الشروط الاتية:

1- مسامية النسيج الصخري أعلى بكثير من مسامية الشقوق.

2- نفاذية النسيج الصخري منخفضة لكنها غير معدومة، وتكون أقل بكثير من نفاذية الشقوق مثلاً، إذا كانت:

$k_m < 0.01$ md او ان $k_m << k_f$ فالمكمن في هذه الحالة ايضا يسلك سلوك المكمن المتشقق Fractured reservoirو هنا البئر يتقاطع فعليًا مع الشقوق ويستقبل الجريان منها.

3-أما إذا كانت نفاذية النسيج الصخري مساوية أو أكبر من نفاذية الشقوق، فإن المكمن يُعتبر غير متشقق ويُصنّف كمكمن متجانس (Homogeneous and Unfractured Reservoir) .

7-2 معادلة سلوك الضغط للمكامن المتشققة :

يتم تمثيل سلوك الضغط عبر فحوصات الآبار في هذه المكامن بالاعتماد على معادلة الضغط اللا بعدي(Dimensionless Pressure) الاتية:

$$P_{Df} = \frac{1}{2}\left(lnt_{Dw} + 0.80908 + \quad Ei\left(-\frac{\lambda t_{Dw}}{\omega(1-\omega)}\right) - Ei\left(-\frac{\lambda t_{Dw}}{(1-\omega)}\right)\right) + S \quad \text{---------- 1}$$

وصف وارن وروت Warren & Root (1963) بان سلوك انتقال المائع من النسيج الصخري إلى الشقوق تخضع لظروف الجريان شبه المستقر (Pseudosteady State - PSS) وتعتبر الشقوق في هذه الحالة بمثابة قنوات تصريف نحو البئر . في حين اعتبر الكاظمي Kazemi 1969 ان طور الجريان يكون من النوع العابر Transient or Unsteady state flow conditions.

لقد عرفا وارن وروت بعض المعاملات التي تمييز الشقوق الطبيعية فيما بينها و هي :

8-2 المعاملات الأساسية في النظام المزدوج Dual porosity :

1- معامل نسبة تخزين الشق اوميكا ω (Storativity Ratio) :

معامل ستاتيكي يمثل نسبة سعة الشقوق لتخزين الموائع إلى سعة تخزين النظام الكلي (شقوق + النسيج الصخري) و يساوي :

$$\omega = \frac{(\phi h c_t)_f}{(\phi h c_t)_{f+m}} = \frac{(\phi h c_t)_f}{(\phi h c_t)_f + (\phi h c_t)_m} \quad \text{---------- 2}$$

ω = storativity ratio
h = thickness
c_t = total compressibility, psi^{-1}
ϕ = porosity

ملاحظة: يُعد تحديد انضغاطية الشقوق لازمة لحساب ω و يتم ذلك في المختبر ويُعد من التحديات.

ندرج ادناه الدلالة المكمنية لقيمة ω :

الدلالة	القيمة
كل المائع مُخَزن في الشقوق.	$\omega = 1$
لا يوجد مائع مُخَزن في الشقوق.	$\omega = 0$
تخزين متساوٍ في الشقوق والنسيج الصخري.	$\omega = 0.5$

2- معامل الجريان المسامي(البيني) لمدا λ (Interporosity Flow Coefficient) :

معامل ديناميكي يمثل قابلية انتقال المائع من النسيج الصخري إلى الشقوق، رياضيا يساوي:

$$\lambda = \alpha \left(\frac{k_m}{k_f}\right) r_w^2 \quad \text{---------- 3}$$

λ = interporosity flow coefficient
k = permeability
r_w = wellbore radius

المعامل α يُمثل عامل الشكل لكتلة النسيج الصخري Shape Factor إذ يعتمد الشكل الهندسي لكتلة النسيج الصخري Block Geometry و يساوي :

$$\alpha = \frac{A}{Vx} \quad \text{---------- 4}$$

A = surface area of the matrix block, ft^2
V = volume of the matrix block
x = characteristic length of the matrix block, ft

الاشكال الهندسية المتوقعة لنظام الشقوقFractures - النسيج الصخري Matrix تُقسم بحسب عدد اتجاهات مستويات الشقوق n كما يأتي (الشكل2-6) :

- كتلة النسيج الصخري مكعبة الشكل n=3 مفصولة عن بعضها البعض بالشقوق ، قيمة معامل الجريان المسامي λ تساوي:

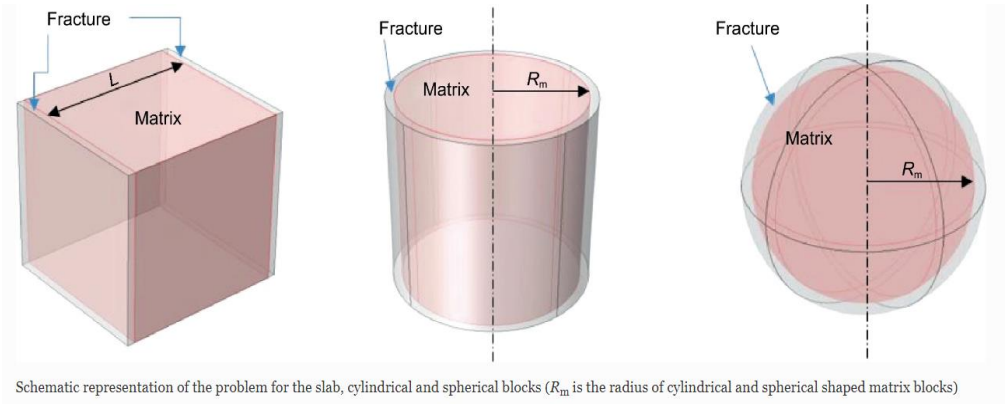
$$\lambda = \frac{60}{l_m^2}\left(\frac{k_m}{k_f}\right) r_w^2 \quad \text{---------- 5}$$

إذ ان l_m طول ضلع المكعب Matrix length.

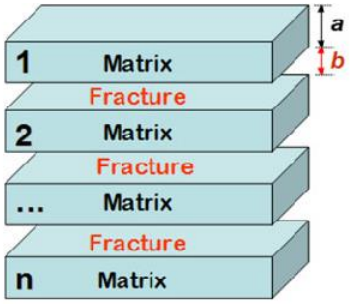
- كتلة النسيج الصخري كروية الشكل n=3 مفصولة عن بعضها البعض بالشقوق و $\alpha=15/r^2_m$ تصبح قيمة λ:

$$\lambda = \frac{15}{r_m^2}\left(\frac{k_m}{k_f}\right) r_w^2 \quad \text{---------- 6}$$

إذ ان r_m نصف قطر كتلة النسيج الصخري الكروي Matrix spherical radius.



Schematic representation of the problem for the slab, cylindrical and spherical blocks (R_m is the radius of cylindrical and spherical shaped matrix blocks)



الشكل2-6 : مخطط يُوضح الشكل الهندسي لكتل النسيج الصخري matrix (المكعبة،الاسطوانية ، الكروية و الطبقات slabs) في المكامن المتشققة طبيعيا

- كتلة النسيج الصخري على شكل اسطواني عمودي n=2 مفصولة عن بعضها البعض بالشقوق و $\alpha=8/r_m^2$ ، فان معامل الجريان λ يساوي:

$$\lambda = \frac{8}{r_m^2}\left(\frac{k_m}{k_f}\right) r_w^2 \quad \text{---------- 7}$$

إذ ان r_m تصف قطر الاسطوانة Matrix cylinderical radius

- كتلة النسيج الصخري على شكل طبقات slabs افقية مستطيلة ،n=1 مفصولة عن بعضها البعض بالشقوق و $\alpha=12/h_f^2$ ، فان معامل الجريان عبر الوسط المسامي λ يساوي:

$$\lambda = \frac{12}{h_f^2}\left(\frac{k_m}{k_f}\right) r_w^2 \quad \text{---------- 8}$$

و ان h_f سُمك الشق.

إذ ان k_m: نفاذية النسيج الصخري، ϕ_m مسامية النسيج الصخري، μ لزوجة المائع، ct الانضغاطية الكلية ، l_m / r_m أبعاد الشكل الهندسي للكتلة.

ادناه الدلالة المكمنية لقيمة λ :

التفسير	قيمةλ
المكمن متجانس، لا يُعتبر معقدًا أو متشققًا.	$\lambda \rightarrow 1$
المكمن متشقق ومعقد، انتقال المائع بطيء بين النسيج والشقوق.	$10^{-9} < \lambda < 10^{-3}$

حدد سنكو و ساميكو Cinco & Samaniego (1981) اطوار الجريان عبر النظام المسامي المتشقق الطبيعي الثنائي و كما يأتي:

- عند وجود عامل قشرة عالي بين النسيج الصخري والشقوق ، فالجريان يكون مقيدًا (Restricted) و يعبر عنه بالجريان شبه مستقر(Pseudo Steady State-PSS) .
- أما في حالة عامل قشرة منخفض أو صفر، فالجريان يكون غير مقيد(Unrestricted) و يعبر عنه بالجريان غير مستقر(Transient or UnSteady State- USS) .

9-2 تفسير فحوصات المكامن المتشققة طبيعيًا

فحص الآبار في المكامن المتشققة طبيعياً يُعد أداة حيوية لفهم سلوك المكمن المعقد، ويتطلب هذا النوع من التحليل استخدام أدوات تحليلية متقدمة وفهم دقيق لأنماط الجريان الخاصة لهذه المكامن. بشكل عام، هناك عدة طرق تُستخدم في تفسير فحوصات الآبار في المكامن المتشققة طبيعيًا من أبرز هذه الطرق:

1-الطريقة التقليدية نصف لوغاريتمية (Semi-log Plot)

2- طريقة تطابق المنحنيات النوعية (Type Curve Matching)

تُعد هاتان الطريقتان من أوائل التقنيات المستخدمة في تفسير بيانات فحوصات الآبار، لكنّهما تتطلبان توافر معايير معينة لضمان دقة النتائج، مثل:

- ضرورة تمييز أطوار الجريان (Flow Regimes) بوضوح عبر الرسم البياني للضغط ومشتقة الضغط.

- عدم وضوح بعض أطوار الجريان يؤدي إلى تشويش في تطابق المنحنيات، ما ينتج عنه عدة حلول محتملة و ليس حلا وحيدا.

- في هذه الحالات، يجب اللجوء إلى طريقة التجربة والخطأ (Trial and Error) لإعادة التحقق من التفسير.

- كما أن الطريقة النصف لوغاريتمية لا يُمكن تطبيقها في حال غياب بعض أطوار الجريان.

3- طريقة تياب:(Tiab's Direct Synthesis Technique - TDS Technique)

طريقة تياب هي تقنية تحليلية (Analytical Solutions) مباشرة تم تطويرها من قبل Djebbar Tiab لتحليل بيانات فحص الآبار من دون الحاجة إلى اعتماد المنحنى النوعي (Type Curve Matching) و التي بمثابة الأسلوب التقليدي في التفسير. تقنية تياب متقدمة تعتمد العلاقات التجريبية (Empirical Correlations) و الحلول التحليلية .

ما معنى "العلاقات التجريبية"؟

تعني تحديد علاقات رياضية عامة في حساب الضغط من جراء استعمال كميات ضخمة من بيانات فحوصات الآبار و تحليلها وربطها بحسب ظروف محددة ثم يتم اعتماد نتائجها في بناء هذه العلاقات.

ما "الحل التحليلي"؟

هو حل معادلة الانتشار ادناه (Diffusivity Equation) تحليليًا وليس عدديًا و ذلك لايجاد سلوك الضغط خلال الفحص بعد فرض ظروف مختلفة للبئر، حدود المكمن ونوع المائع لتبسيط الحل.

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\,\frac{\partial \Delta p_f}{\partial r}\right)=\frac{\phi_{fb}\,c_{ft}\,\mu}{k_{fb}}\,\frac{\partial \Delta p_f}{\partial t}+q^*\,\frac{\mu}{k_{fb}},$$

الفرضيات الأساسية لهذه الطرق الثلاث:

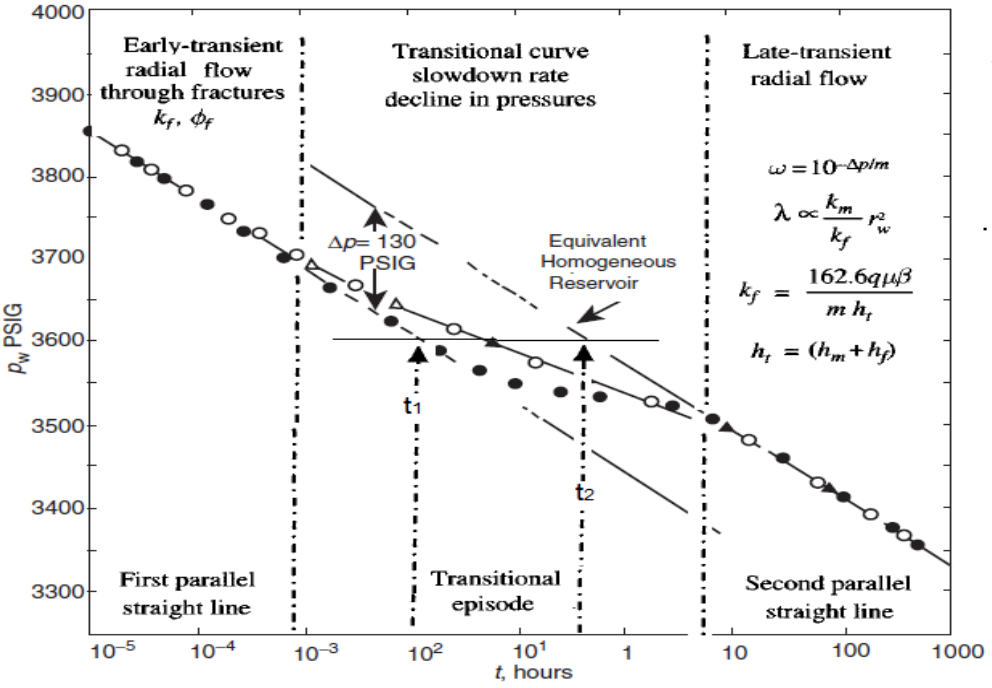
نظام مسامي مزدوج (Dual Porosity) اي وجود كلا مسامية كتل النسيج الصخري (Matrix)، مسامية شبكة الشقوق (Fractures) ، نفاذية الشق فعالة و عالية مقارنة بنفاذية النسيج الصخري المحدودة و المهملة. المكمن من النوع غير المحدود (Infinite Acting) ينتج مائع واحد و المائع قليل الانضغاطية.

2-9-1 الطريقة التقليدية الاعتيادية (الطريقة نصف لوغاريتمية)

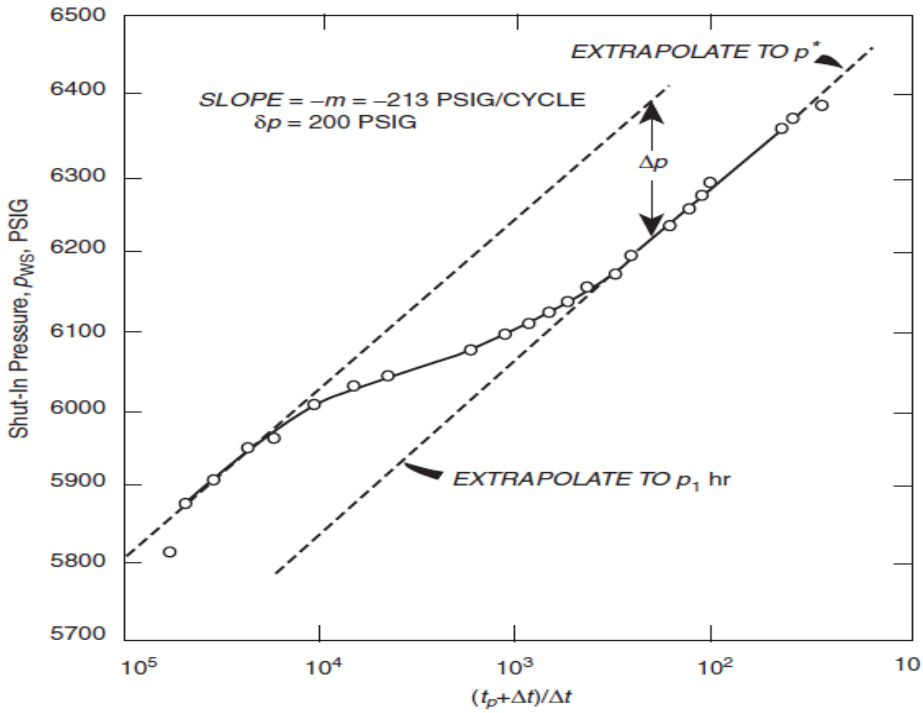
طريقة مهمة في تمييز نظام الشق الطبيعي من النوع المسامي المزدوج Dual porosity . بحسب Warren and Root فان رسم بيانات الضغط مع الوقت لفحص هبوط الضغط Drawdown test data (الشكل2-7) على احداثيات نصف لوغاريتمية semilog ، ينتج خطين متوازية يعكسان نظامي الانتقالية Transmissivity :الاول انتقالية الموائع عبر الشقوق و تتمثل بالخط المائل الاول ، إذ النفاذية عالية و الشقوق ترتبط بفتحة البئر مباشرة". الثاني الانتقالية الكلية (للشقوق + النسيج الصخري) و تتمثل بالخط الثاني الموازي للخط الاول . بين الخطين الاول و الثاني هنالك منطقة انتقالية . نفس الشرح ينطبق على الشكل2-8 لفحص تصاعد الضغط Buildup test.

1- سلوك الضغط في المكامن المتشققة طبيعيًا وفقًا للشكل 2-7:

عند فتح البئر للجريان و في بداية الفحص فالانتاج يكون حصرا من جراء تمدد المائع المحصور في الشقوق ، نلاحظ هنالك هبوط حادًا بالضغط و تاخذ بيانات الفحص شكل خط مستقيم مائل



الشكل2-7 : سلوك منحني فحص هبوط الضغط Drawdown test في المكامن المتشققة طبيعيا



الشكل2-8 : سلوك منحني فحص تصاعد الضغط Build-up test في المكامن المتشققة طبيعيا

بفرض اهمال تأثير تخزين البئر (Wellbore Storage - WBS). و لكون كمية الموائع المخزونة في الشقوق محدودة و تُستنزف بسرعة يبدا هبوط الضغط بالتباطؤ و تبدأ فترة انتقال المائع من النسيج الصخري إلى الشقوق و هذه المدة تكون محصورة ما بين الخطين المتوازية في ما يُعرف بـالفترة الانتقالية Transitional period. باستمرار تدفق المائع من النسيج الصخري، يبدأ الضغط ما بين الشقوق والنسيج الصخري بالاستقرار و التقارب من بعضهما البعض. يُعبر عن هذه المدة بجريان النظام ككل و يتميز بظهور الخط المستقيم الثاني، والذي يكون موازيًا للخط الأول.

بصورة عامة من الممكن تمييز **ثلاث فترات رئيسة** كما يأتي:

- **الفترة المبكرة للجريان الشعاعي:(Early Radial Flow)**

يظهر فيها الخط المستقيم المائل الأول هنا تهيمن الشقوق (مسامية و نفاذية الشقوق) على الجريان ، مما يعكس في هذه المرحلة توصيلية عالية (High Conductivity).

- **الفترة الانتقالية:(Transitional Flow)**

تقع بين الخطين المستقيمين.تُعبّر عن انتقال المائع من النسيج الصخري إلى الشقوق. يتباطأ فيها هبوط الضغط تدريجيًا نتيجة لتناقص فرق الضغط بين النظامين.

- **الفترة المتأخرة للجريان الشعاعي:(Late Radial Flow)**

يظهر فيها الخط المستقيم المائل الثاني و الموازي للأول .يسود فيها تأثير كل من الشقوق والنسيج الصخري معًا. تعكس توصلية منخفضة (Low Conductivity) ناتجة عن مساهمة النسيج الصخري بشكل أكبر في الجريان(كمصدر للمائع).

3- خطوات التفسير:

1-حساب معدل نفاذية الشق:

- بعد رسم بيانات الفحص لعلاقة الضغط مع الوقت على احداثيات نصف لوغاريتمية ، نُحدد الخط المستقيم الاول المار عبر بيانات الفحص و نحسب الميل m له . منه يُمكن تحديد سعة نفاذية الشق- k_fh وكما يأتي:

$$(k_f h) = \frac{162.6QB\mu}{m} \quad \text{---------- 9}$$

في حالة وجود الخطين فان ميل احدهما m سيستخدم لحساب سعة الشق k_fh او حساب نفاذية الشق k_f بمعرفة سُمك الطبقة. لاحظ في حال عدم تساوي ميل الخطين (غير متوازية بدرجة محدودة) فان ميل الخط الاول يستخدم لحساب سعة الشق k_fh Fracture capacity و ميل الخط الثاني يستخدم لحساب السعة الكلية (للشق + النسيج الصخري) bulk capacity $(kh)_b$ او $(kh)_{f+m}$.

2-حساب الضغط الزائف P^*

- ايضا يُمكن حساب الضغط الزائف P^* من تقاطع الخط المستقيم الثاني مع الاحداثي الصادي عند قيمة وقت هورنر الواحد في فحص تصاعد الضغط. إذ يُمكن ان يكون الضغط الزائف مساوي للضغط المكمني الاصلي في حال ان البئر استكشافي او تقييمي و الا يُمكن استخدامه في

حساب معدل الضغط المكني بطرق سبق التطرق اليها في الفصول السابقة . في فحص هبوط الضغط فان الضغط الزائف يساوي:

$$p^* = p_{1\,\mathrm{hr}} + m\log(t_p + 1)$$

3- حساب معامل القشرة s

يُمكن حساب معامل القشرة بعد تحديد الضغط عند الساعة الواحدة P_{1hr} من الخط الثاني او امتداده الشكل2-8 و كما يأتي:

$$s = 1.1513\left[\frac{(\Delta P)_{1hr}}{m} - \log\left(\frac{k}{(\phi c_t)_{f+m}\mu w_w^2}\right) + 3.23\right] \text{ ---------- } 10$$

ΔP_{1hr}= Pi- P_{1hr} for drawdown test.

ΔP_{1hr}= $P_{1hr} - P_{ws(\Delta t=0)}$ for builup test.

4-حساب نسبة تخزين الشق- ω Fracture Storage Capacity Ratio

حسب وارن و روت Warren and Root فانه بالامكان تحديد معامل نسبة التخزين ω بعد قياس المسافة العمودية ΔP ما بين الخطين المتوازية الشكل2-8 و من ثم يُحسب ω كما يأتي:

$$\omega = \exp\left(-2.303\frac{\Delta P}{m}\right) \text{ ---------- } 11$$

او

$$\omega = 10^{(-\Delta p/m)} \text{ ---------- } 12$$

5-حساب معامل الجريان (البيني) المسامي λ- Interporosity flow coefficient

بحسب Bourdet and Gringarten (1980) يُمكن تحديد معامل الجريان البيني λ بالاستفادة من الشكل2-7 ايضا . فبوجود الخطين المتوازية نرسم خط افقي من وسط المنطقة الانتقالية يقطع كلا الخطين عند t_1 و t_2 على التوالي. نحسب معامل نسبة التخزين ω كما يأتي:

$$\omega = t_1/t_2 \text{ ---------- } 13$$

و من ثم نطبق احدى المعادلات ادناه لايجاد المعامل λ :

في حالة فحص هبوط الضغط فان معامل الجريان البيني عبر الوسط المسامي λ تساوي:

$$\lambda = \left[\frac{\omega}{1-\omega}\right]\left[\frac{(\phi hc_t)_m \mu r_w^2}{1.781 k_f t_1}\right] = \left[\frac{1}{1-\omega}\right]\left[\frac{(\phi hc_t)_m \mu r_w^2}{1.781 k_f t_2}\right] \text{ ---------- } 14$$

و في حالة فحص تصاعد الضغط فان معامل الجريان البيني عبر الوسط المسامي λ تساوي:

$$\lambda = \left[\frac{\omega}{1-\omega}\right]\left[\frac{(\phi h c_t)_m \mu r_w^2}{1.781 k_f t_p}\right]\left(\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}\right)_1 = \left[\frac{1}{1-\omega}\right]\left[\frac{(\phi h c_t)_m \mu r_w^2}{1.781 k_f t_p}\right]\left(\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}\right)_2 \quad \text{---- 15}$$

k_f = permeability of the fracture, md
t_p = producing time before shut-in, hours
r_w = wellbore radius, ft
μ = viscosity, cp

إذ ان كلا من الرمز 1 و 2 يشير الى رمز نقطة تقاطع الخط الافقي مع الخط الاول و الثاني على التوالي، العلاقة اعلاه تشير الى اعتماد حساب المعامل λ على المعامل ω.

- فحص تصاعد الضغط بطريقة Miller-Dyes–Hutchinson-MDH : بحسب **تياب** Tiab (2006) فبالامكان استخدام نقطة الانقلاب و هي نقطة تغير المنحني من تحدب الى التقعر في المنطقة الانتقالية لتحديد وقت الانقلاب Inflection time- t_{inf} ثم حساب λ في المعادلة ادناه:

$$\lambda = \frac{3792(\phi c_t)_{f+m}\mu r_w^2}{k\, t_{inf}}\left[\omega \ln\left(\frac{1}{\omega}\right)\right] \quad \text{---------- 16}$$

- بطريقة هورنر: حساب t_{inf} يتم بعد تحديد *(HT)inf* من الرسم لبيانات فحص تصاعد الضغط بطريقة هورنر و كما يأتي:

$$t_{inf} = \frac{t_p}{(H_T)_{inf} - 1} \quad \text{---------- 17}$$

إذ ان $(HT)_{inf}$-corresponding inflection Horner time ، او نستخدم الوقت المكافىء $\Delta t_e = t_p\Delta t/(t_p+\Delta t)$ والذي يسمى احيانا بوقت هورنر الفعال Effective Horner time.

مثال-1 :

بيانات فحص تصاعد الضغط Build-up لمكمن متشقق مزدوج المسامية Dual porosity أُدرجت في الجدول2-**2** ، المعلومات المتوفرة الاخرى ، أُدرجت ادناه:

$p_i = 6789.5$ psi, $p_{wf\ at\ \Delta t=0} = 6352$ psi, $Q_o = 2554$ STB/day, $B_o = 2.3$ bbl/STB,

$\mu_o = 1$ cp, $t_p = 8611$ hours $r_w = 0.375$ ft, $c_t = 8.17 \times 10^{-6}$ psi^{-1}, $\phi_m = 0.21$

$k_m = 0.1$ md, $h_m = 17$ ft

احسب نفاذية الشق معامل نسبة التخزين ω و معامل الجريان عبر الوسط المسامي λ ؟؟

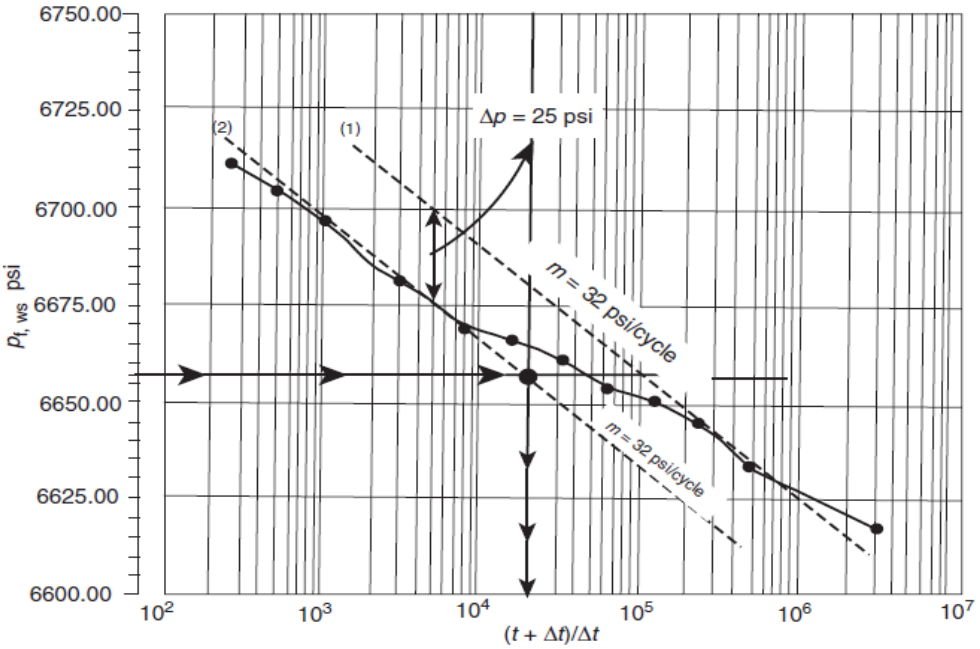
الحل:

نتبع الخطوات الاتية:

- رسم علاقة وقت (هورنر) $(t_p+\Delta t)/\Delta t$ مع ضغط الغلق P_{ws} على ورق نصف لوغاريتمي ، الشكل2-9 .

Δt (hr)	p_{ws} (psi)	$\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}$
0.003	6617	31 000 000
0.017	6632	516 668
0.033	6644	358 334
0.067	6650	129 168
0.133	6654	64 544
0.267	6661	32 293
0.533	6666	16 147
1.067	6669	8 074
2.133	6678	4 038
4.267	6685	2 019
8.533	6697	1 010
17.067	6704	506
34.133	6712	253

الجدول2-2: بيانات الفحص للمثال رقم-1



الشكل2-9 : منحني هورنر لفحصرتصاعد الضغط للمثال رقم-1

- من الرسم اعلاه نحدد وجود خطين متوازية و من احداها نجد الميل و يساوي m=32 psi/cycle

- من الميل m نجد سعة الجريان(الانتقالية) للشق k_fh :

$$(k_fh) = \frac{162.6Q_oB_o\mu_o}{m} = \frac{162.6(2556)(2.3)(1.0)}{32}$$
$$= 29\,848.3 \text{ md ft}$$

- اذن نفاذية الشق k_f تساوي:

$$k_f = \frac{29848.3}{17} = 1756 \text{ md}$$

- **حساب** المسافة العمودية بين الخطين المتوازية و يساوي $\Delta P=25$ psi .

- **حساب** نسبة تخزين الشق ω :

$$\omega = 10^{-(\Delta p/m)} = 10^{-(25/32)} = 0.165$$

- **رسم** خط افقي من منتصف المنطقة الانتقالية ليقطع الخطين المستقيمان و نقرأ زمن تقاطع الخط المستقيم الثاني ليعطي:

$$\left(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}\right)_2 = 20000$$

- حساب λ كما يأتي:

$$\lambda = \left[\frac{1}{1-\omega}\right]\left[\frac{(\phi h c_t)_m \mu r_w^2}{1.781 k_f t_p}\right]\left(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}\right)_2$$

$$= \left[\frac{1}{1-0.165}\right] \times \left[\frac{(0.21)(17)(8.17 \times 10^{-6})(1)(0.375)^2}{1.781(1756)(8611)}\right](20000)$$

$$= 3.64 \times 10^{-9}$$

2-9-2 تفسير فحوصات المكامن المتشققة بتطابق المنحنيات- طريقة بورديت

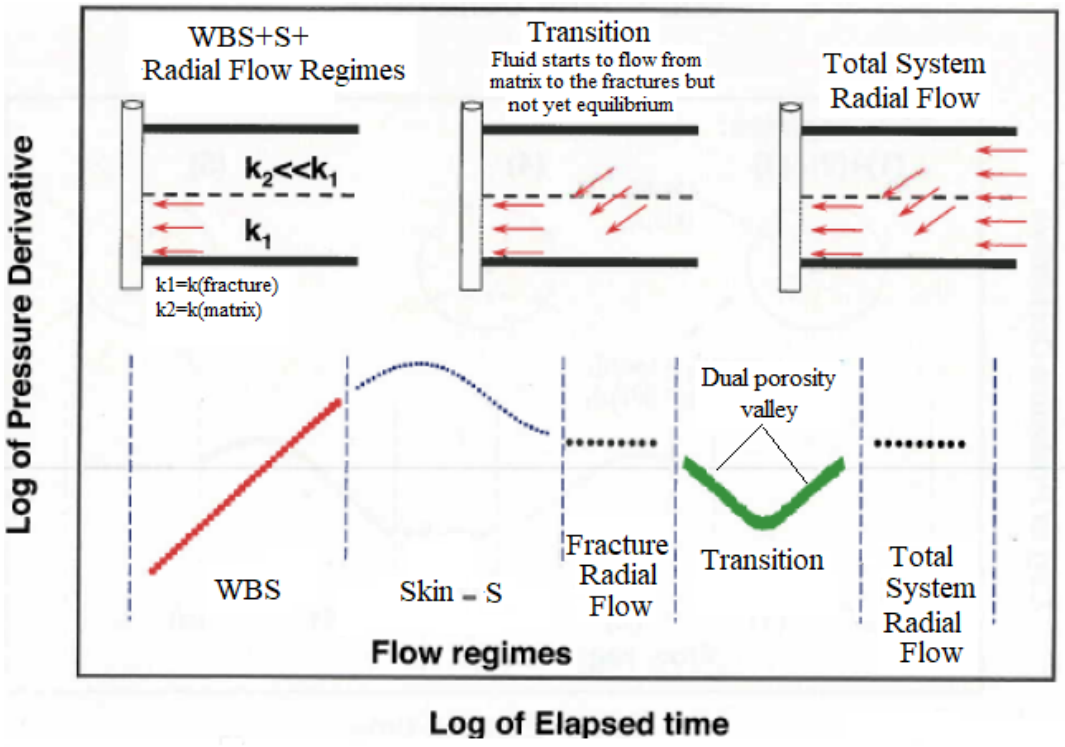
Bourdet et al. (1984) – Type Curve Matching

*** منحنى مشتقة الضغط المثالي في فحص المكامن المتشققة :**

أوضح كرينكارتن **Gringarten (1987)** أن الخطين المستقيمين المتوازيين الظاهرين في الرسم البياني نصف اللوغاريتمي قد لا يظهران دائمًا بوضوح، ويعتمد ذلك على ظروف البئر و مدة إجراء الفحص. ولهذا السبب، اعتُبر أن هذا النوع من الرسوم لا يكفي وحده لتشخيص سلوك المكامن المتشققة ذات المسامية المزدوجة (Dual Porosity Systems) .

في المقابل، عند تمثيل مشتقة الضغط لبيانات الفحص على مخطط لوغاريتمي (log-log)، فإن وجود نظام متشقق مزدوج المسامية يؤدي إلى ظهور منحنى مميز على شكل **حرف U أو V** كما في (الشكل 2-10). في هذا السياق، تُعد **مشتقة الضغط** المرسومة على هذا النوع من المخططات أداة تشخيصية فعالة لتحديد خواص المكامن المتشققة بشرط توفر بيانات فحص ذات جودةعالية.

في الشكل (2-10)، والذي يمثل مخططًا تشخيصيًا (Diagnostic Plot) لتمييز المكمن مزدوج المسامية عبر فحص تصاعد الضغط لبئر عمودي ، نلاحظ أن أدنى قيمة لمشتقة الضغط تحدث عبر المرحلة الانتقالية، وهي المرحلة التي يبدأ فيها انتقال المائع من النسيج الصخري (Matrix) إلى الشقوق (Fractures). وتكون هذه المنطقة محصورة بين خطين أفقيين.



الشكل2-10 : منحني مثالي لمشتقة الضغط في المكامن المتشققة طبيعيا

من الشكل (2-10) يُمكن تمييز فترات الجريان الاتية **:**

*** الفترات المميزة في منحنى مشتقة الضغط (الشكل 2-10) :**

1- الفترة المبكرة – تأثير تخزين البئر:(Wellbore Storage) :

تظهر هذه المرحلة كخط مستقيم بميل الواحد slope=1 ، نتيجة لتأثير التخزين في البئر عبر اللحظات الأولى من الفحص.

2- مرحلة عامل القشرة (Skin Effect) :

يُلاحظ فيها انحراف المنحني عن خط الميل الواحد نتيجة مقاومة إضافية للجريان ناتجة عن منطقة التضرر حول البئر.

3- فترة الجريان الشعاعي المبكر في الشقوق:
تُميز بخط أفقي أول، ويمثل جريان المائع داخل شبكة الشقوق الطبيعية في المرحلة المبكرة.

4- المرحلة الانتقالية:(Transitional Zone) :

تظهر على شكل تقعر (حرف V) ، وتمثل انتقال المائع من النسيج الصخري (matrix) إلى الشقوق (fractures) ، يتبع أدنى نقطة في المنحني خط مائل بزاوية 45^{o} يعكس الجريان شبه مستقر (pseudosteady-state) بين النظامين، ويكون الميل فيه واحد slope=1.

5- الجريان الشعاعي المتأخر:(Late-Time Radial Flow) :

يعكس سلوك النظام ككل (شقوق + نسيج صخري) ويظهر كخط أفقي ثانٍ، مما يشير إلى استقرار الضغط وتوازن الجريان داخل المكمن.

*** طريقة بورديت**

طوّر بورديت وزملاؤه (Bourdet et al)،(1984 طريقة تطابق المنحنيات النوعية (Type Curve Matching) التي كانت مخصصة لتفسير فحوصات الآبار في المكامن المتجانسة (Homogeneous Reservoirs). لكي تناسب المكامن المتشققة طبيعيًا.

الفكرة الأساسية:

أُضيفت مجموعتان من منحنيات التطابق لتفسير نماذج الجريان المختلفة في المكامن المتشققة طبيعيًا (dual porosity systems)، وذلك بالاعتماد على نوع انتقال المائع من النسيج الصخري (Matrix) إلى الشقوق(Fractures) .

المجموعة الأولى – الجريان شبه المستقر (Pseudosteady State،PSS)

المجموعة الثانية – الجريان اللامستقر (Unsteady State،USS)

المنحنيات رُسمت على احداثيات لوغاريتمية ، الاحداثي السيني يمثل t_D/C_D و الصادي يمثل كلا من مشتقة الضغط اللابعدي $p^-_D(t_D/C_D)$ و فرق الضغط اللابعدي p_D لمجوعة من الدوال المتغيرة و كما هو موضح في الشكلين 2-11 و 2-18 .

الضغط اللابعدي يساوي:

$$p_D = \left[\frac{k_f h}{141.2QB\mu}\right]\Delta p \quad \text{---------- 18}$$

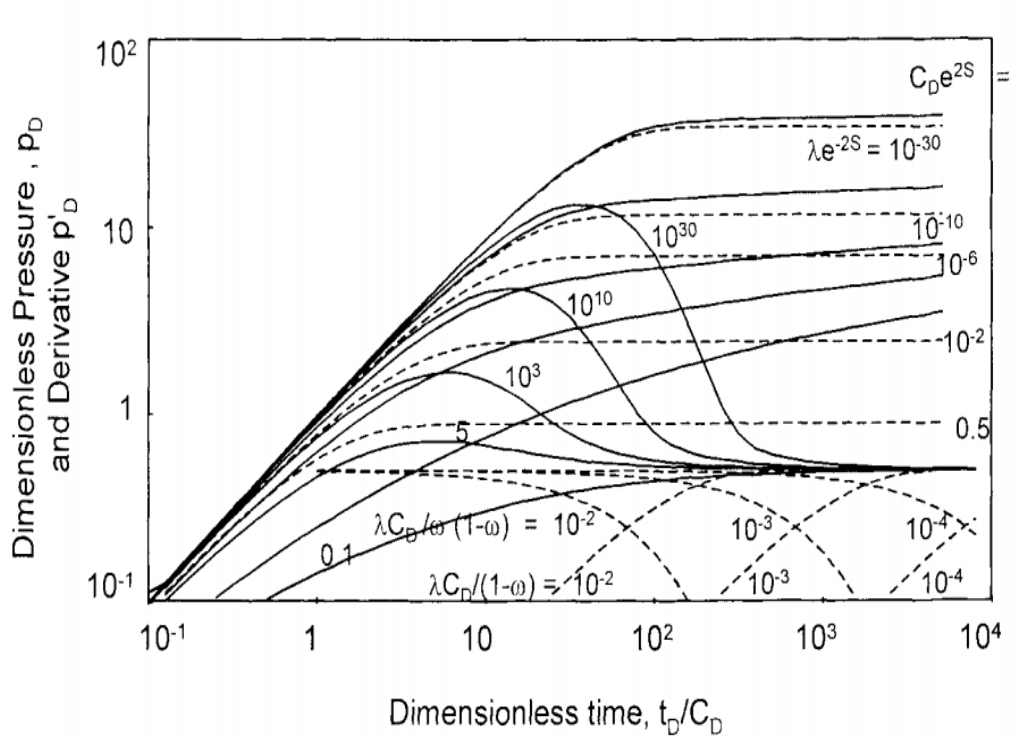
و الزمن اللابعدي يساوي:

$$t_D = \frac{0.0002637k_f t}{[(\phi\mu c_t)_f + (\phi\mu c_t)_m]\mu r_w^2} = \frac{0.0002637k_f t}{(\phi\mu c_t)_{f+m}\mu r_w^2} \quad \text{---------- 19}$$

إذ ان :

k = permeability, md
t = time, hours
μ = viscosity, cp
r_w = wellbore radius, ft

f = fissure
m = matrix
f + m = total system
D = dimensionless



الشكل2-11 -A: منحنيات التطابق لبوردیت لحالة الجريان شبه المستقرPSS او الجريان المقيد Restricted flow في المكامن المتشققة Bourdet et al. (1984)

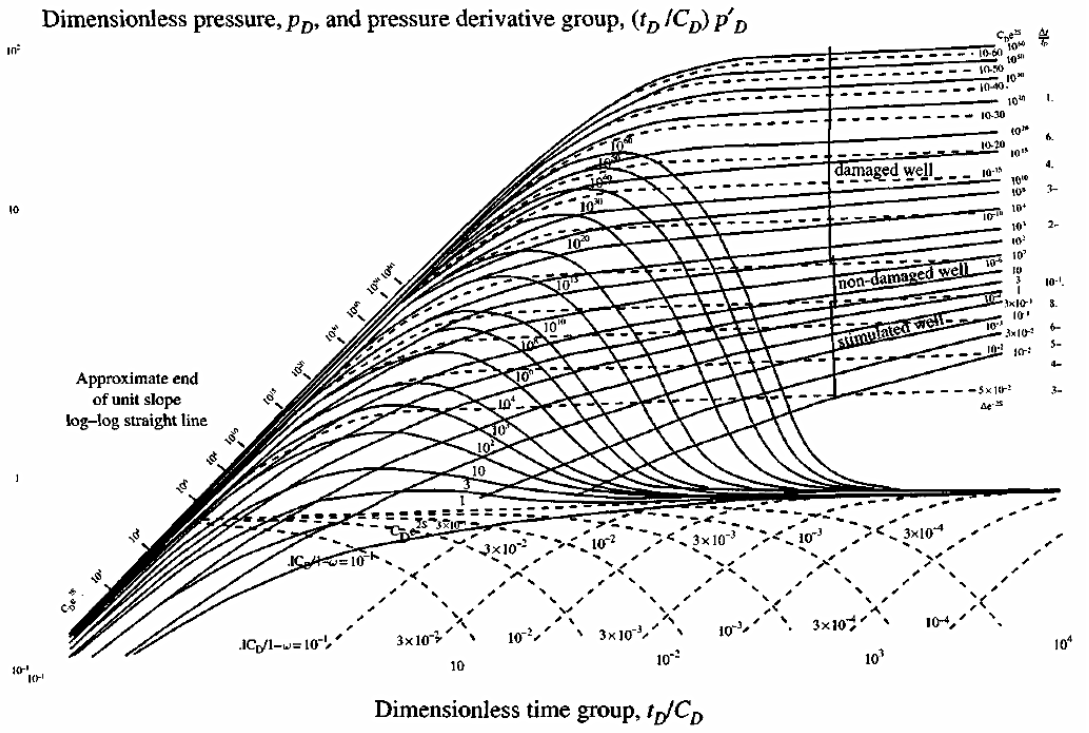
1-2-9-2 المنحنيات النوعية لبوردیت - المجموعة الاولى :الجريان المقيد Restricted interporosity flow او يطلق عليه الجريان شبه المستقر Pseudo steady-state interporosity flow-PSS من النسيج الصخري الى الشق (الشكل2-11A،-B):

تفاصيل منحنيات المجموعة الاولى:

1- منحنيات الضغط اللابعدي P_D مع الوقت : يُوضح الشكل2-11 أربعة أنواع من المنحنيات المركبة التي تمثل سلوك الضغط في المكامن المتشققة طبيعيًا وفقًا لتقنية تطابق المنحنيات. هذه المنحنيات تساعد في فهم مختلف مراحل الجريان عبر الفحص، ويُمكن تقسيمها كما يأتي:

a- منحنيات الجريان الشعاعي عبر الشقوق(fractures) فقط : تُعرض كخطوط غامقة (Bold lines)، تبرز في الزمن المبكر من الفحص و يُعبر عنها بالرمز $(C_De^{2s})_f$ إذ ان الرمز f اشارة الى الشق و يساوي :

$$\left(C_De^{2s}\right)_f = \frac{0.8936C}{\left(\phi Vc_t\right)_f hr_w^2} \quad \text{---------- 20}$$



الشكل2-11 -B: منحنيات التطابق لبوردیت لحالة الجريان شبه المستقرPSS او الجريان المقيد Restricted flow في المكامن المتشققة بتفاصيل اكثر Bourdet et al. (1984)

عند توافق بيانات الفحص مع هذا النوع من المنحنيات، يُرمز للتطابق بـ: $((C_De^{2s})_f)_M$.

b. منحنيات الدالة الانتقالية – Transitional Flow Curves:

تظهر كخطوط متقطعة (Dashed lines) عبر المرحلة الانتقالية بين النسيج الصخري والشقوق، إذ يبدأ المائع بالتحرك من النسيج إلى الشقوق. و تُمثل بالرمز λe^{-2s} و يُعبّر عن تطابق البيانات في هذه المرحلة بـ: $[\lambda e^{-2s}]_M$.

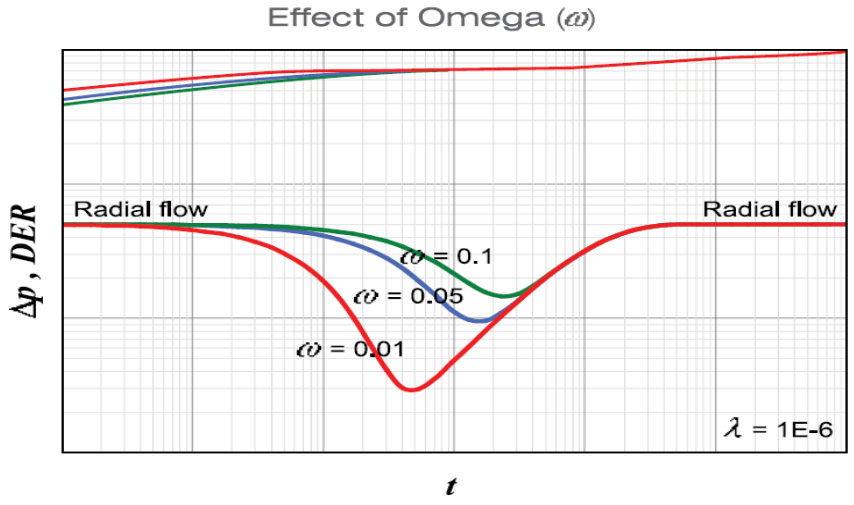
c- منحنيات الجريان الكلي:(Composite Flow (Fractures + Matrix

تظهر في المدة المتأخرة من الفحص و تمثل الجريان المشترك من كل من الشقوق والنسيج الصخري. و تُمثل بالرمز $(C_De^{2s})_{f+m}$ ، عند تطابق بيانات الفحص مع هذه المرحلة يُعبر عنه بـ: $((C_De^{2s})_{f+m})_M$ ان:

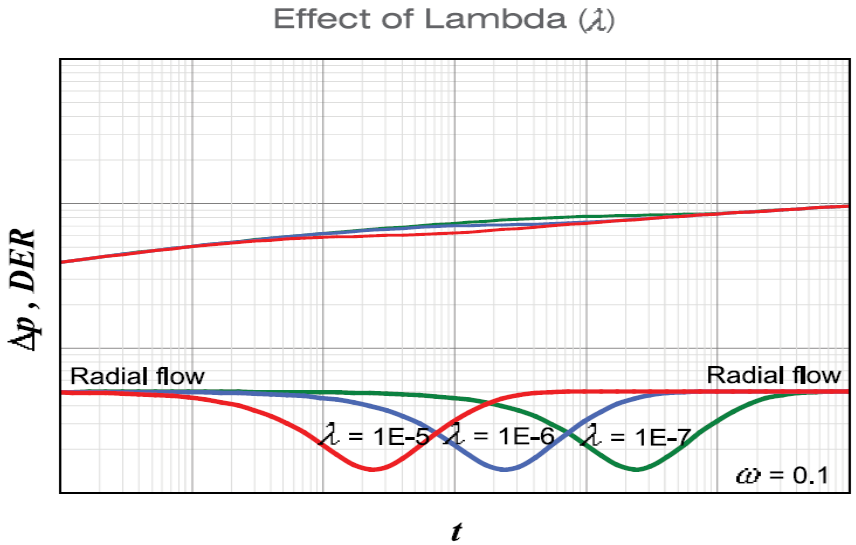
$$\left(C_De^{2s}\right)_{f+m} = \frac{0.8936C\,e^{2s}}{\left(\phi Vc_t\right)_{f+m}\,hr_w^2} \quad \text{---------- 21}$$

2- منحنيات مشتقة الضغط اللابعدي مع الوقت : في المكامن المتشققة طبيعيًا (Dual Porosity Systems)، تلعب كل من نسبة الخزن (ω) ومعامل الجريان بين الشق والنسيج الصخري (λ) دورًا رئيسيًا في تحديد شكل المنطقة الانتقالية على منحنيات مشتقة الضغط مع الزمن.

تأثير نسبة الخزن(ω) : يؤثر المعامل ω بشكل مباشر على شكل الفترة الانتقالية و مدتها . كلما قلت قيمة ω زاد تقعر منحني مشتقة الضغط و طالت المدة الانتقالية. والعكس صحيح، إذ تقل المدة الانتقالية و يقل التقعر عند زيادة ω راجع الشكل 2-12.



الشكل2-12 : تاثير العامل اوميغا ω على منحني مشتقة الضغط في المكامن المتشققة



الشكل2-13 : تاثير العامل لمدا λ على منحني مشتقة الضغط في المكامن المتشققة

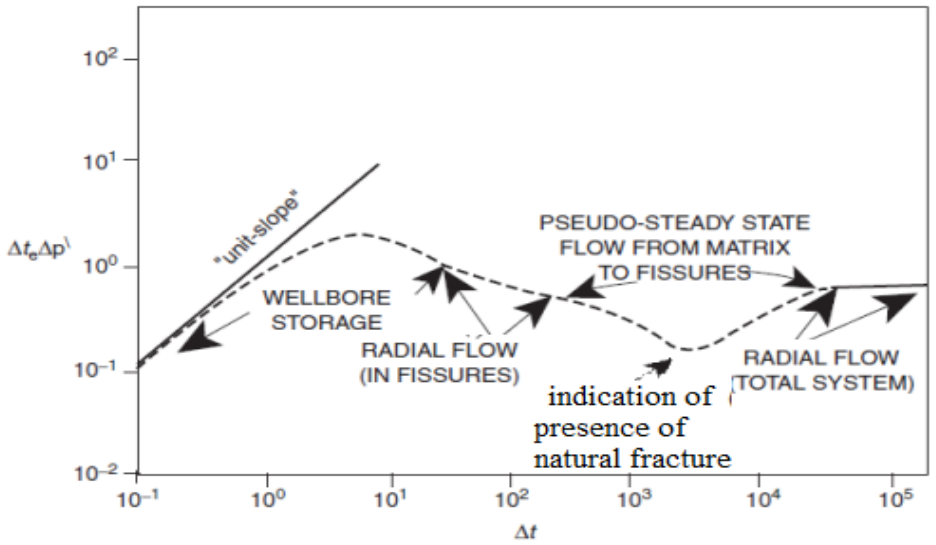
تاثير معامل الجريان(λ) :

المعامل λ يتحكم بوقت بدء المرحلة الانتقالية. عندما تقل قيمة λ تزحف المرحلة الانتقالية نحو اليمين على منحنى مشتقة الضغط و يظهر تأخير في ظهور الجريان الشعاعي الثاني. عند زيادة λ، تزحف المرحلة الانتقالية نحو اليسار راجع الشكل 2-13.

وفقًا لمنحنيات الضغط ومشتقه الضغط اللابعدية لبورديت (الشكل 2-11)، يُمكن ملاحظة أربع منحنيات تطابق رئيسة:

- الخط الأفقي الأول في الشقوق: يمثل الجريان الشعاعي (Radial Flow) عبر الشقوق. يطابق منحني التطابق $(C_De^{2s})_f)_M$. راجع ايضا الشكل 2-14.
- بداية المرحلة الانتقالية (قبل التقعر):تُمثل بظهور منحني التطابق:$[\lambda(_{CD})/\omega(1-\omega)]_M$
- نهاية المرحلة الانتقالية (بعد التقعر):يظهر منحني التطابق الاتي:$[\lambda(_{CD})/(1-\omega)]_M$.
- االخط الأفقي الثاني: يعكس الجريان الشعاعي المتأخر للنظام الكلي (الشق + النسيج) و تصل مشتقة الضغط إلى قيمة ثابتة = 0.5 (راجع ايضا الشكل 2-14).

ملاحظة : ما يميز طور الجريان شبه المستقر ان طول المدة الانتقالية تستغرق اطول من دورة لوغاريتمية واحدة ، ميل تغير الضغط يزداد و هنالك استقرار بالزيادة و وجود خطين افقية. السمة المميزة الإضافية هي ان مركز التقعر يكون في منتصف الوقت (متناصف).



الشكل2-14 : توضيح مراحل انتقال سلوك مشتقة الضغط **عبر** فحص المكامن المتشققة

2-تحديد نمط الجريان الانتقالي

بحسب Gringarten (1987)، فإن شكل النقطة الدنيا لمشتقة الضغط (شكل التقعر) يُعطي مؤشراً على طبيعة الجريان بين النسيج الصخري والشقوق:

فاذا كان تقعر حاد على شكل "V" فيدل على جريان مقيد (Restricted Interporosity Flow) - الشكل 2-14.

و اذا كان التقعر واسع على شكل "U" فيدل على جريان غير مقيد (Unrestricted Interporosity Flow). الشكل 2-19 - المثالA

مثال- لتفسير فحص الجريان شبه المستقر PSS او الجريان المقيد Restricted Interporosity Flow:

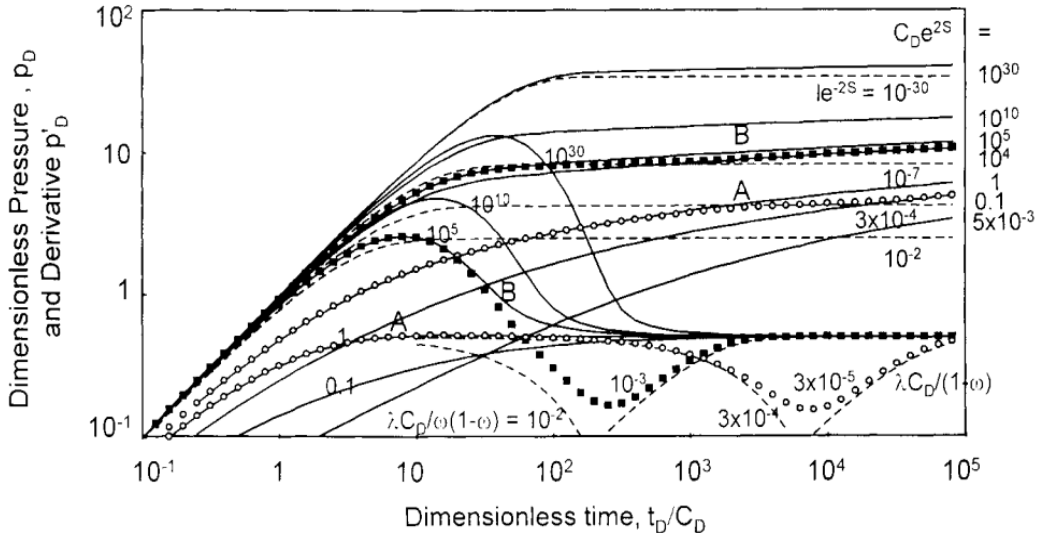
الشكل2-15 يُوضح تفسير بيانات الفحص للمثالين A،B بطريقة تطابق المنحنيات لبورديت.

المثال A:، نقاط الفحص على شكل دوائر فارغة .

- تتطابق بيانات الفحص مع منحنيات الضغط اللابعدية p_D عند المنحني $(C_De^{2s})_f = 1$ ، الذي يمثل الجريان الشعاعي المبكر في الشقوق.

- بعد ذلك، تُرصد المرحلة الانتقالية عبر التطابق مع المنحني $\lambda e^{-2}s = 3\times10^{-4}$ ، الذي يعكس انتقال المائع من النسيج الصخري إلى الشقوق.

- في المرحلة المتأخرة، يتم التطابق مع المنحني $(C_De^{2s})_{f+m} = 0.1$ ، والذي يمثل الجريان للنظام ككل (الشق + النسيج الصخري).



الشكل2-15 : منحنيات التطابق للجريان شبه المستقر في المكامن المتشققة مع بيانات المثالين A و B من بورديت Bourdet(2002)

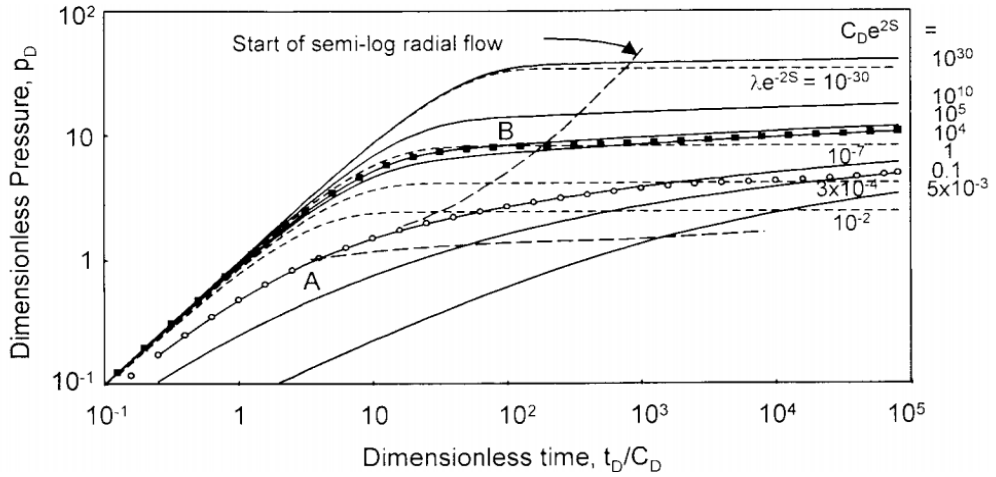
بالنسبة لمنحنى مشتقة الضغط للمثال A :

-يُلاحظ ظهور خط أفقي أول في المرحلة المبكرة يعكس الجريان الشعاعي عبر الشقوق.

- ثم يتبع ذلك تقعر مميز يعبر عن المنطقة الانتقالية ، منحني التطابق عند المدة الانتقالية المبكرة :
$[\lambda(_{CD})/\omega(1-\omega)]_M=3\times10^{-4}$

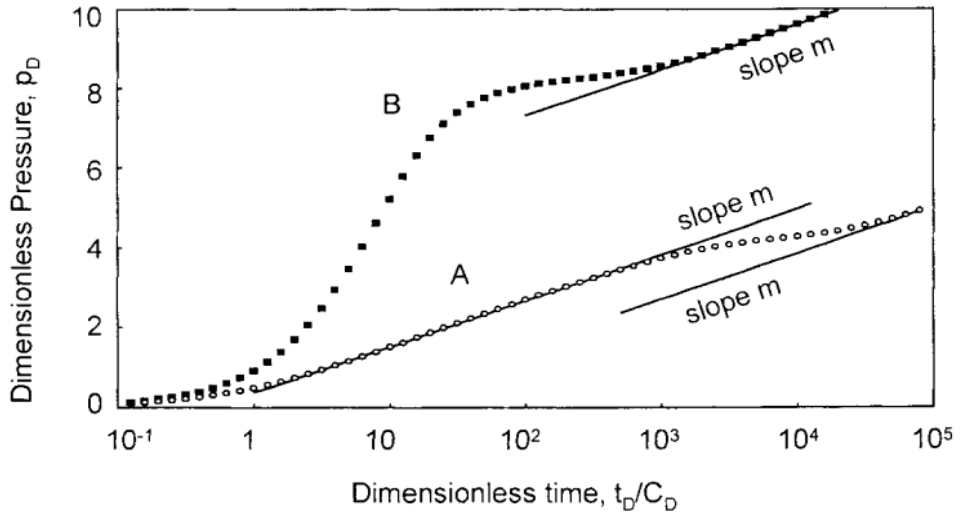
- منحني التطابق عند المدة الانتقالية المتاخرة : $[\lambda(_{CD})/(1-\omega)]_M=3\times10^{-5}$

- وفي النهاية، يظهر خط أفقي ثانٍ يمثل الجريان الشعاعي للنظام ثنائي المسامية ككل، عند قيمة مشتقة الضغط اللابعدي الثابتة و تساوي 0.5.



الشكل2-16 : تحديد بداية الخط نصف لوغاريتمي من منحنيات تطابق الضغط للجريان شبه المستقر في المكامن المتشققة مع بيانات المثالين A و B

الشكل 2-16 يعرض بوضوح منحنيات الضغط اللابعدي للمثالين A و B، على رسم لوغاريتمي . يستفاد منه في تحديد بداية الخط المستقيم للجريان الشعاعي و استعماله في الرسم نصف اللوغاريتمي التقليدي. الرسم نصف لوغاريتمي في الشكل 2-17 ، يُظهر بيانات الضغط للمثال A على شكل خطين متوازيين، بميل m مما يؤكد تشخيص طوري الجريان الشعاعي: المبكر في الشقوق والمتأخر لنظام المكمن ككل.



الشكل2-17 : رسم نصف لوغاريتمي semi-log لبيانات المثالين A و B

ينطبق نفس التفسير على المثال B (بياناته موضحة على شكل دوائر غامقة)، إذ يُظهر تطابقاً مع منحنيات الضغط وفق الترتيب الاتي:

- في البداية: مع المنحني $(C_De^{2s})_f = 10^5$.
- ثم مع المنحني الانتقالي $\lambda e^{-2s} = 3\times10^{-7}$.

- وأخيرًا مع المنحني الكلي للنظام $(C_De^{2s})_{f+m}=10^4$.

يُظهر المثال B ايضا تأثير تخزين البئر (Wellbore Storage) وعامل القشرة (Skin Factor)على سلوك مشتقة الضغط ، إذ يؤدي هذا التأثير إلى:

إخفاء الخط الأفقي الأول الذي يمثل الجريان الشعاعي في الشقوق و يحصل انتقال مباشر لمنحني مشتقة الضغط إلى المنطقة الانتقالية، ثم إلى المدة المتأخرة و التي يستقر عندها مشتقة الضغط اللابعدي بقيمة 0.5، أي يظهر فقط خط أفقي واحد.

أما بالنسبة لقيم التطابق التقريبية لمنحنيات بورديت فتدرج ادناه:

$[\lambda(_{CD})/\omega(1-\omega)]_M=10^{-2}$ و قيمة التطابق $[\lambda(_{CD})/(1-\omega)]_M=10^{-3}$.

في الشكل نصف اللوغاريتمي (2-17) ، يظهر المثال B خط مائل واحد فقط ، مما يعكس فقط المدة المتأخرة من الفحص ، وذلك بسبب **التأثير** العالي لتخزين البئر.

في المقابل ، تُظهر بيانات المثال A خطين مائلين متوازيين بوضوح، مما يشير إلى غياب أو محدودية تأثير تخزين البئر في المراحل المبكرة من الفحص.

2-2-9-2 المنحنيات النوعية لبورديت - المجموعة الثانية: الجريان غير المقيد (Unrestricted Interporosity Flow)أو ما يُعرف أيضًا بـ الجريان الانتقالي او اللامستقر من النسيج الصخري إلى الشقوقTransient(USS) interporosity flow

في هذه الحالة، اعتمد بورديت وزملاؤه (Bourdet et al ،1984) ، ،الطريقة نفسها في بناء منحنيات الجريان شبه المستقر (PSS) المُستخدمة في المجموعة الأولى، لكن بافتراض أن الجريان غير مقيد من النسيج الصخري (Matrix) إلى الشقوق(Fractures) . يُميز هذا النمط من الجريان أن كتل النسيج الصخري تستجيب فوريًا لأي تغيّر في الضغط في الشقوق، حيث تمد و تغذي الشقوق بالمائع المكمني . هذا يتسبب في اختفاء طور الجريان الشعاعي داخل الشقوق أي لا يظهر الخط الأفقي الأول (الشكل 2-18) .ان الشكل A18-2،-B يُوضح منحنيات التطابق النوعي لبورديت، والتي تربط بين: الضغط اللابعدي P_D و مشتقة الضغط اللابعدي P_D^- مع مجموعة الوقت اللابعدي t_D/C_D .

*بالنسبة منحنيات الضغط : فتتالف من ثلاث مجموعات لدوال مركبة وهي على التوالي :

$(C_De^{2s})_f$ ، $\beta\backslash$، and $(C_De^{2s})_{f+m}$.

وان $\beta\backslash$ ، مجموعة لابعدية تعكس الطور الانتقالي Dimensionless group interporosity وتُحسب كما يأتي:

$$\beta\backslash = \delta\left[\frac{(C_De^{2s})_{f+m}}{\lambda e^{-2s}}\right] \text{---------- 22}$$

إذ ان δ يمثل عامل الشكل لكلا من الشكل الكروي spherical او الشكل الطبقي (شكل الواح slabs) و يساوي :

$\delta = 1.0508$ for spherical blocks
$\delta = 1.8914$ for slab matrix blocks

*منحنيات مشتقة الضغط:

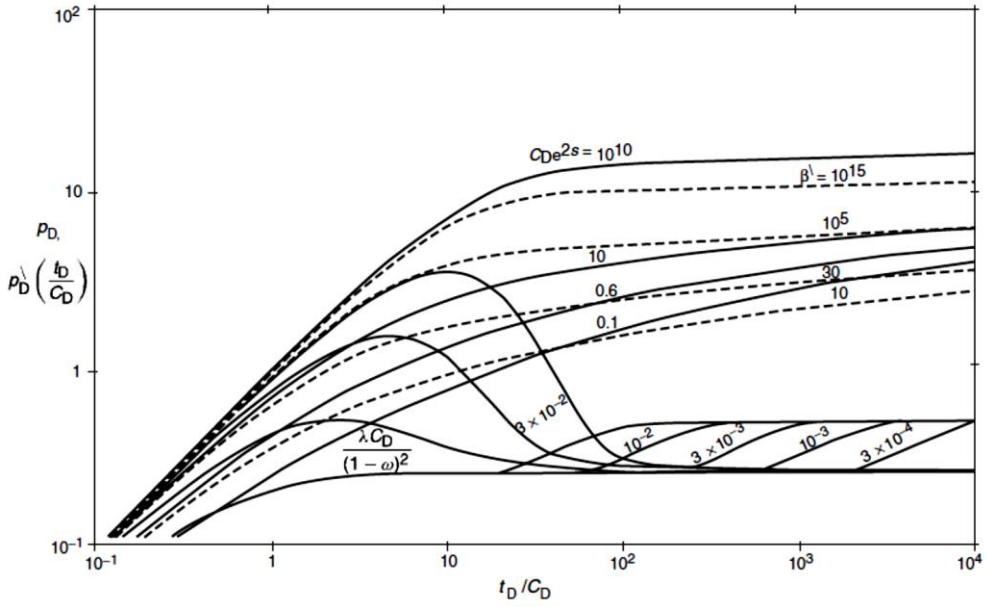
لا يظهر طور الجريان عبر الشقوق $(C_De^{2s})_f$ بشكل فعلي ضمن منحنيات المشتقة. لذا تُظهر المشتقة فقط **طورين رئيسيين** كما في الشكل (2-18):

- الطور الانتقالي (تقعر المشتقة):يُمثل المدة التي يتدفق فيها المائع من النسيج الصخري إلى الشقوق. يكون معدل تغير الضغط في الشقوق أسرع من النسيج الصخري.

تتطابق المنحنيات مع: $(C_D)_{f+m}/(1-\omega)^2$.

- طور الجريان الشعاعي الكلي:(Matrix + Fracture) : يظهر على شكل خط أفقي بقيمة مشتقة ضغط لابُعدي تساوي $P_D^{-}(t_D/C_D)=0.5$.

ملاحظة : ما يميز طور الجريان الانتقالي اللامستقر وجود خط افقي واحد يعلو المنطقة الانتقالية. السمة المميزة الإضافية ميل الوقت الأوسط يتضاعف.



الشكل2-18-A : منحنيات التطابق لبورديت الجريان غير المقيد Unrestricted flow في المكامن المتشققة (Bourdet-1984)

خطوات تفسير فحص الآبار بطريقة تطابق المنحنيات لبورديت

Well Test Interpretation Using Bourdet Type Curve Matching

يتم تفسير بيانات فحص الآبار في المكامن المتشققة طبيعيًا (Naturally Fractured Reservoirs) وفق تسلسل الخطوات الاتية:

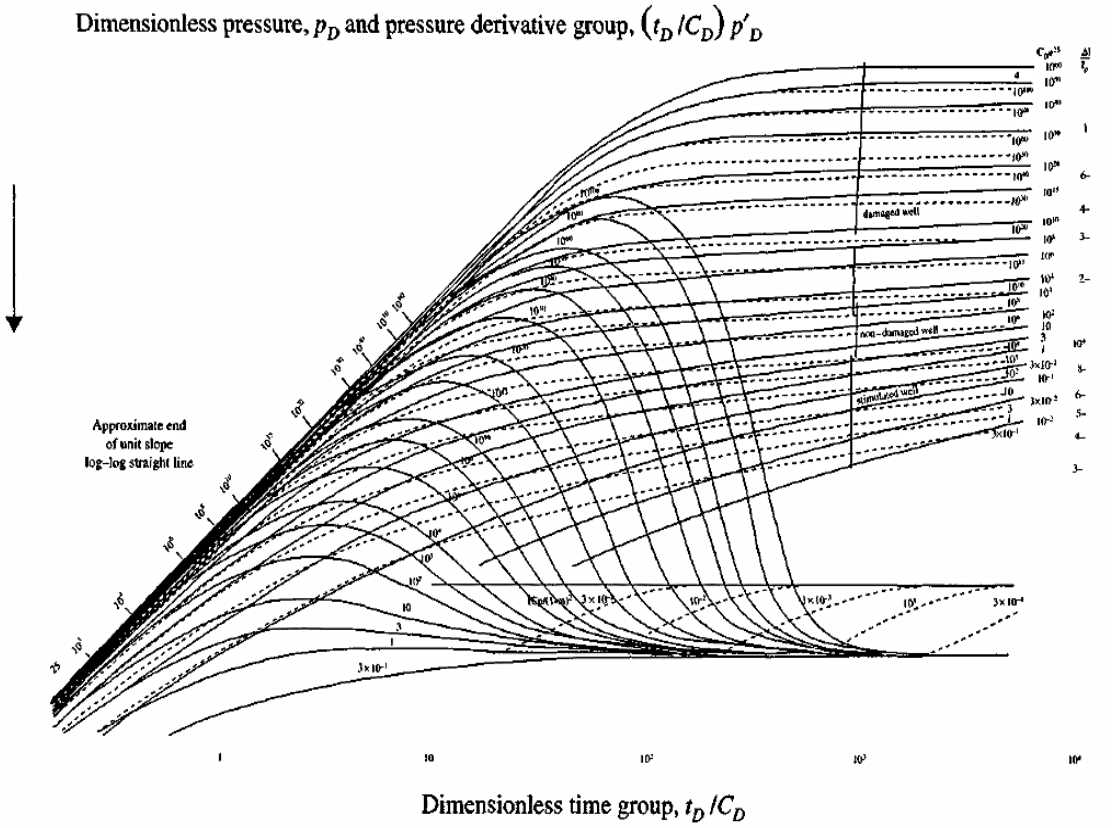
1- تحضير البيانات:

يتم إجراء بعض الحسابات الأولية على بيانات الفحص لتحديد فرق الضغط و دالة مشتقة الضغط مع الوقت :

لفحص هبوط الضغط

$$\Delta p = p_{\mathrm{i}} - p_{\mathrm{wf}}$$

$$t\Delta p' = -t\left(\frac{\mathrm{d}(\Delta p)}{\mathrm{d}(t)}\right) \text{ ---------- } 23$$

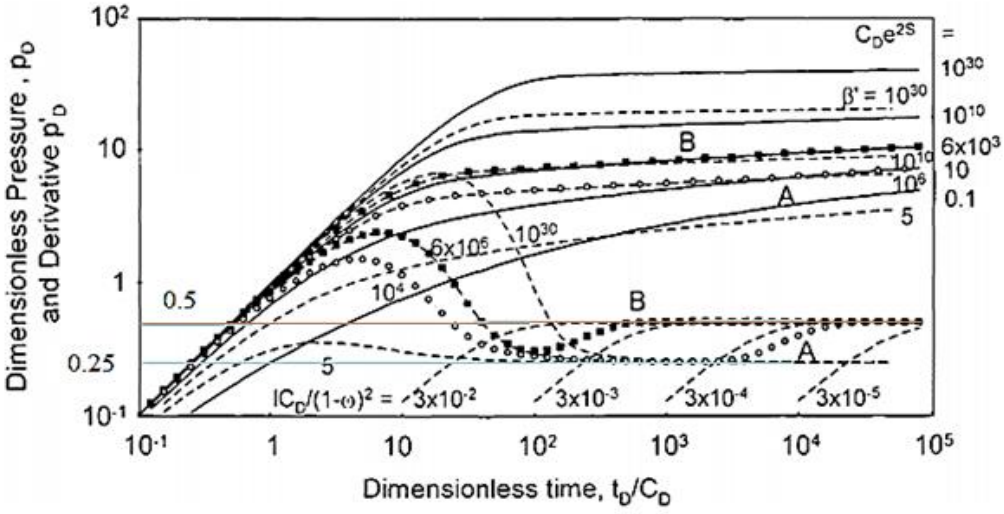


الشكل2-B-18 : منحنيات التطابق لبوردیت الجريان غير المقيد Unrestricted flow في المكامن المتشققة بتفاصيل اكثر (Bourdet-1984)

- لفحص تصاعد الضغط :

$$\Delta p = p_{\mathrm{ws}} - p_{\mathrm{wf\ at\ }\Delta t=0}$$

$$\Delta t_{\mathrm{e}}\Delta p' = \Delta t\left(\frac{t_{\mathrm{p}} + \Delta t}{\Delta t}\right)\left[\frac{\mathrm{d}(\Delta p)}{\mathrm{d}(\Delta t)}\right] \text{ ---------- } 24$$



الشكل2-19 : منحنيات التطابق لبورديت للجريان غير المقيد Unrestricted flow مع بيانات المثالين A و B

مشتقة الضغط تُحسب باحدى الطريقتين:

-الفروقات المركزية - Central differences

Central differences:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_i = \frac{p_{i+1} - p_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad \text{---------- 25}$$

-او بطريقة المعدل لثلاث نقاط - Three-point weighted average

Three-point weighted average:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_i = \frac{(\Delta p_1/\Delta x_1)\Delta x_2 + (\Delta p_2/\Delta x_2)\Delta x_1}{\Delta x_1 + \Delta x_2} \quad \text{---------- 26}$$

- الوقت المكافىء لهورنر يساوي equivalent time Δt_e:

$$\Delta t_e = \frac{t_p \Delta t}{t_p + \Delta t} = \frac{\Delta t}{1 + (\Delta t/t_p)} \quad \text{---------- 27}$$

2- رسم البيانات الحقيقية:

يتم رسم بيانات الضغط ومشتقته على ورقة شفافة بمقياس لوغاريتمي .(Log-Log Paper)

يجب أن يكون مقياس هذا الرسم مطابقًا لمقياس منحنيات التطابق النظرية الخاصة ببورديت (مثل الشكلين 2-11 و 2-18) .

3- تطابق المنحنيات:

يتم وضع الرسم الشفاف فوق منحنيات بورديت المرجعية و يتم تحريك الرسم في الاتجاهين الأفقي والعمودي للعثور على أفضل تطابق. يجب التأكد من أن المحاور اللوغاريتمية متوازية

أثناء التطابق.

4- قراءة القيم من التطابق:

- من التطابق، يتم تحديد القيم الاتية: $[\lambda(C_D)_{f+m}/(1-\omega)^2]_M$

- نختار نقطة تطابق ونحدد:

الإحداثيات البعدية تشمل الزمن الحقيقي والضغط الحقيقي.

الإحداثيات اللابعدية للضغط و الوقت :

$$(\Delta p, p_D)_{MP} \quad \text{and} \quad (t \text{ or } \Delta t_e, t_D/C_D)_{MP}$$

نقرأ أيضًا القيم الاتية:

$(C_D e^{2s})_f$ عند بداية المدة الانتقالية و $(C_D e^{2s})_{f+m}$ عند نهايتها.

5- حساب المعاملات المكمنية والبئرية:

بناءً على القيم المقروءة، تُحسب المعاملات الاتية:

معامل نسبة التخزين(Storage Capacity Ratio) ω :

$$\omega = \frac{[(C_D e^{2s})_{f+m}]_M}{[(C_D e^{2s})_f]_M} \quad \text{---------- 28}$$

- سعة الشق $k_f h$:

$$k_f h = 141.2 Q B \mu \left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{MP} \text{ md ft} \quad \text{---------- 29}$$

- معامل تخزين البئر C :

$$C = \left[\frac{0.000295 k_f h}{\mu}\right] \frac{(\Delta t)_{MP}}{(C_D/C_D)_{MP}} \quad \text{---------- 30}$$

- معامل تخزين البئر اللابعدي للنظام ككل $(C_D)_{f+m}$:

$$(C_D)_{f+m} = \frac{0.8926 C}{\phi c_t h r_w^2} \quad \text{---------- 31}$$

- عامل القشرة s :

$$s = 0.5 \ln\left[\frac{[(C_D e^{2s})_{f+m}]_M}{(C_D)_{f+m}}\right] \quad \text{---------- 32}$$

- المعامل λ Interporosity flow coefficient :

$$\lambda = \left[\frac{\lambda (C_D)_{f+m}}{(1-\omega)^2}\right]_M \frac{(1-\omega)^2}{(C_D)_{f+m}} \quad \text{---------- 33}$$

مثال لتفسير فحص الجريان غير المقيد :

تم تحليل بيانات المثالين A و B باستخدام منحنيات التطابق النوعي لبوردیت (Bourdet Type Curves)، كما هو موضح في الشكل2-19 .

-منحنيات الضغط (الشكل 2-19)

بالنسبة للمثال A البيانات على شكل دوائر فارغة:

تم التطابق مع منحني الضغط حيث ان: $\beta^{\backslash}=10^{6}$ و $(C_De^{2s})_{f+m}=10$

بالنسبة للمثال B البيانات على شكل دوائر غامقة:

تم التطابق مع منحني الضغط حيث ان: $\beta^{\backslash}=10^{10}$ و $(C_De^{2s})_{f+m}=6\times10^{3}$.

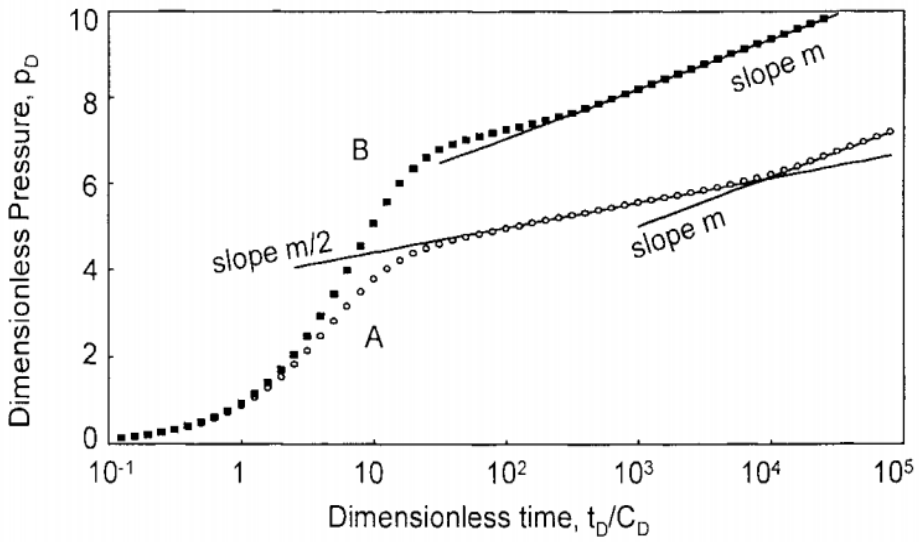
- منحنيات مشتقة الضغط (الشكل 2-19)

للمثال A : تظهر ذروتان مميزتان:

الذروة الأولى عبر المدة الانتقالية عند $P_D' = 0.25$ الخط الأزرق السفلي، تقابل الخط المستقيم بميل m/2 في الشكل 2-20.

الذروة الثانية تُعبّر عن سلوك الجريان الشعاعي الكلي للنظام (fracture + matrix) ، وتظهر على شكل خط أفقي عند $P_D' = 0.5$ الخط البني العلوي.

للمثال B : تظهر منطقة انتقالية قصيرة على شكل تقعر بسيط ، تليها استجابة مستقرة على خط أفقي عند $P_D' = 0.5$.



الشكل2-20 : رسم نصف لوغاريتمي semi-log لبيانات المثالين A و B

- العلاقة نصف اللوغاريتمية (شكل 2-20) :

المثال B يُظهر فقط مرحلة الجريان الشعاعي الكلي (fracture + matrix) بخط مستقيم ذي

ميل m. يُعزى غياب الجريان الشعاعي للشق إلى تأثير تخزين البئر، الذي يحجب هذه المرحلة المبكرة من الفحص.

في المثالA : يظهر خطان مستقيمان:

الخط الأول (المدة الانتقالية) بميل m/2.

الخط الثاني (الجريان الشعاعي الكلي المتأخر) بميل m.

أيضًا هنا، لا يظهر الجريان الشعاعي للشق بسبب تأثير تخزين البئر.

مثال2 :

بيانات فحص تصاعد الضغط لمكمن متشقق مزدوج المسامية Dual porosity أُدرجت في الجدول2-3 ، كما أُدرجت ادناه المعلومات المتوفرة الاخرى:

$$Q = 960 \text{ STB/day}, \quad B_o = 1.28 \text{ bbl/STB}, \quad c_t = 1 \times 10^{-5} \text{ psi}^{-1},$$
$$\phi = 0.007, \quad \mu = 1 \text{ cp}, \quad r_w = 0.29 \text{ ft}, \quad h = 36 \text{ ft}$$

حسب التاريخ الانتاجي للبئر المفحوص فان البئر فُتح للانتاج بمعدل 2952 STB/day لمدة 1.33 hours ، ثم اغلق لمدة 0.31 hours ، فُتح مرة اخرى بنفس معدل الانتاج اعلاه و لمدة 5.05 hours ، ثم اغلق لمدة 0.39 hours ، فُتح بمعدل انتاج 960 STB/day لمدة 31.13 hours بعدها أُغلق لغرض فحص تصاعد الضغط .اعمل تفسير للفحص لحساب معاملات البئر و المكمن المتشقق على فرض ان الجريان خلال المدة الانتقالية من النوع غير المستقر unsteady state interporosity flow ؟؟

احسب معامل نسبة التخزين ω و معامل الجريان λ ؟؟

الحل:

نتبع الخطوات الاتية:

1- نحسب طول مدة الانتاج t_p وكما يأتي:

$$t_p = \frac{N_P}{Q_{last}}$$

$$\text{Total oil produced} = N_P$$

$$N_P = \frac{2952}{4}[1.33 + 5.05] + \frac{960}{24}31.13 \simeq 2030 \text{ STB}$$

$$t_p = \frac{(24)(2030)}{960} = 50.75 \text{ hours}$$

Δt (hr)	Δp_{ws} (psi)	$\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}$	$\Delta t_e = \frac{t_p \Delta t}{t_p + \Delta t}$	*Slope* (psi/hr)	$\Delta p \backslash \Delta t_e$ (psi)
0.00000E+00	0.000			3180.10	
3.48888E−03	11.095	14 547.22	0.003	1727.63	8.56
9.04446E−03	20.693	5 612.17	0.009	847.26	11.65
1.46000E−02	25.400	3 477.03	0.015	486.90	9.74
2.01555E−02	28.105	2 518.92	0.020	337.14	8.31
2.57111E−02	29.978	1 974.86	0.026	257.22	7.64
3.12666E−02	31.407	1 624.14	0.031	196.56	7.10
3.68222E−02	32.499	1 379.24	0.037	159.66	6.56
4.23777E−02	33.386	1 198.56	0.042	127.80	6.10
4.79333E−02	34.096	1 059.76	0.048	107.28	5.64
5.90444E−02	35.288	860.52	0.059	83.25	5.63
7.01555E−02	36.213	724.39	0.070	69.48	5.36
8.12666E−02	36.985	625.49	0.081	65.97	5.51
9.23777E−02	37.718	550.38	0.092	55.07	5.60
0.10349	38.330	491.39	0.103	48.83	5.39
0.12571	39.415	404.71	0.125	43.65	5.83
0.14793	40.385	344.07	0.147	37.16	5.99
0.17016	41.211	299.25	0.170	34.38	6.11
0.19238	41.975	264.80	0.192	29.93	6.21
0.21460	42.640	237.49	0.214	28.85	6.33
0.23682	43.281	215.30	0.236	30.96	7.12
0.25904	43.969	196.92	0.258	25.78	7.39
0.28127	44.542	181.43	0.280	24.44	7.10
0.30349	45.085	168.22	0.302	25.79	7.67
0.32571	45.658	156.81	0.324	20.63	7.61
0.38127	46.804	134.11	0.378	18.58	7.53
0.43682	47.836	117.18	0.433	17.19	7.88
0.49238	48.791	104.07	0.488	16.36	8.34
0.54793	49.700	93.62	0.542	15.14	8.72
0.60349	50.541	85.09	0.596	12.50	8.44
0.66460	51.305	77.36	0.656	12.68	8.48
0.71460	51.939	72.02	0.705	11.70	8.83
0.77015	52.589	66.90	0.759	11.14	8.93
0.82571	53.208	62.46	0.812	10.58	9.11
0.88127	53.796	58.59	0.866	10.87	9.62
0.93682	54.400	55.17	0.919	8.53	9.26
0.99238	54.874	52.14	0.974	10.32	9.54
1.04790	55.447	49.43	1.027	7.70	9.64
1.10350	55.875	46.99	1.080	8.73	9.26
1.21460	56.845	42.78	1.186	7.57	10.14
1.32570	57.686	39.28	1.291	5.91	9.17
1.43680	58.343	36.32	1.398	6.40	9.10
1.54790	59.054	33.79	1.501	6.05	9.93
1.65900	59.726	31.59	1.606	5.57	9.95
1.77020	60.345	29.67	1.709	5.44	10.08
1.88130	60.949	27.98	1.813	4.74	9.93
1.99240	61.476	26.47	1.915	4.67	9.75
2.10350	61.995	25.13	2.022	4.34	9.87
2.21460	62.477	23.92	2.123	3.99	9.62
2.43680	63.363	21.83	2.328	3.68	9.79
2.69240	64.303	19.85	2.550	3.06[a]	9.55[b]
2.91460	64.983	18.41	2.758	3.16	9.59
3.13680	65.686	17.18	2.951	2.44	9.34
3.35900	66.229	16.11	3.152	19.72	39.68

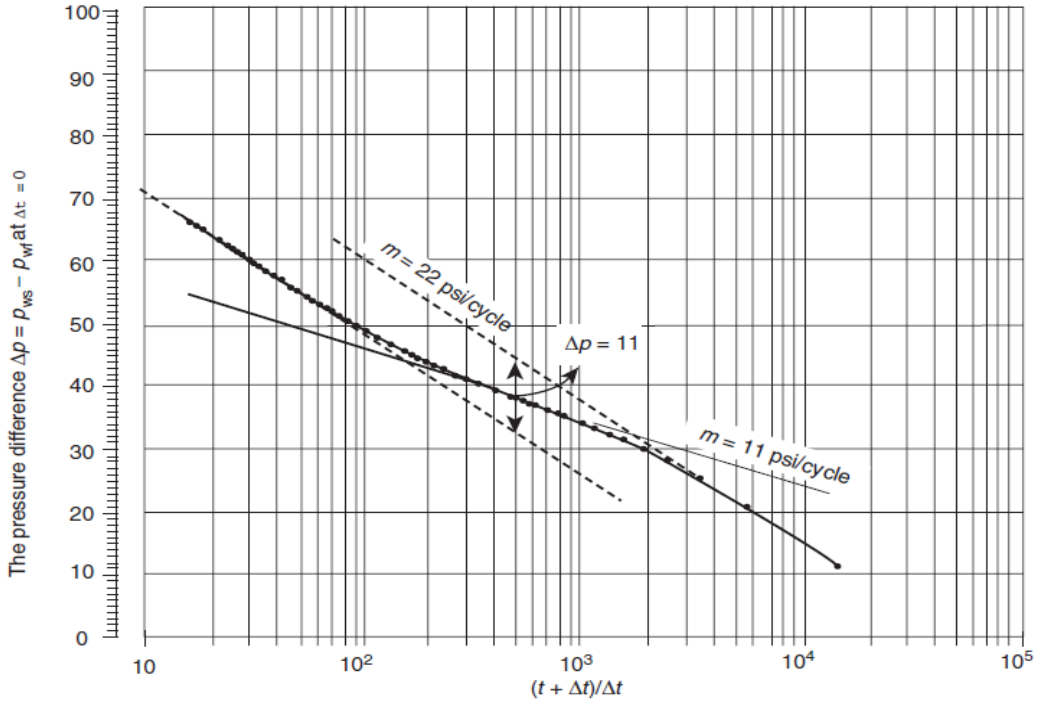
[a] $(64.983 - 64.303)/(2.9146 - 2.69240) = 3.08$.

[b] $[(3.68 + 3.06)/2] \times 19.85/50.75 \times 2.69240^2 = 9.55$.

Adapted from Bourdet et al. (1984).

الجدول2-3: بيانات الفحص للمثال رقم-2

2- حتى نؤكد ان المكمن من النوع المتشقق مزدوج المسامية ، نستخدم الطريقة التقليدية نصف لوغاريتمية (طريقة هورنر) نرسم علاقة زمن هورنر - $(t_p+\Delta t)/\Delta t$ مع فرق ضغط الغلق كما في الشكل2-21.



الشكل2-21 : رسم هورنر لبيانات الفحص - المثال رقم-2 (Sabet-1991)

3- بناء" على الرسم فهنالك خطين متوازية هذا يؤكد نوعية المكمن من النوع المتشقق.

4- نرسم علاقة الوقت المكافىء $\Delta t_e=t_p/\text{Horner time}$ مع مشتقة ضغط الغلق $\Delta t_e\ \Delta P'$ على رسم لوغاريتمي الشكل2-22 .

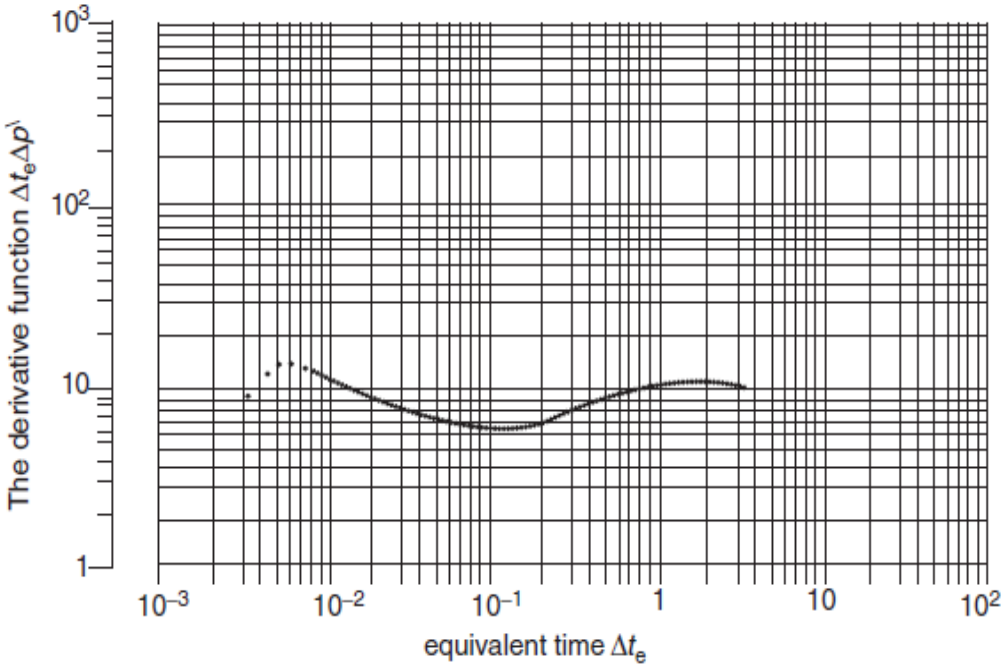
5- و نرسم علاقة الزمن Δt مع فرق ضغط الغلق على رسم لوغاريتمي الشكل2-23 .

نلاحظ وجود تاثير لتخزين البئر على بيانات الفحص في بداية الفحص عبر خط الميل الواحد (زاوية 45^o) لكن بشكل محدود.

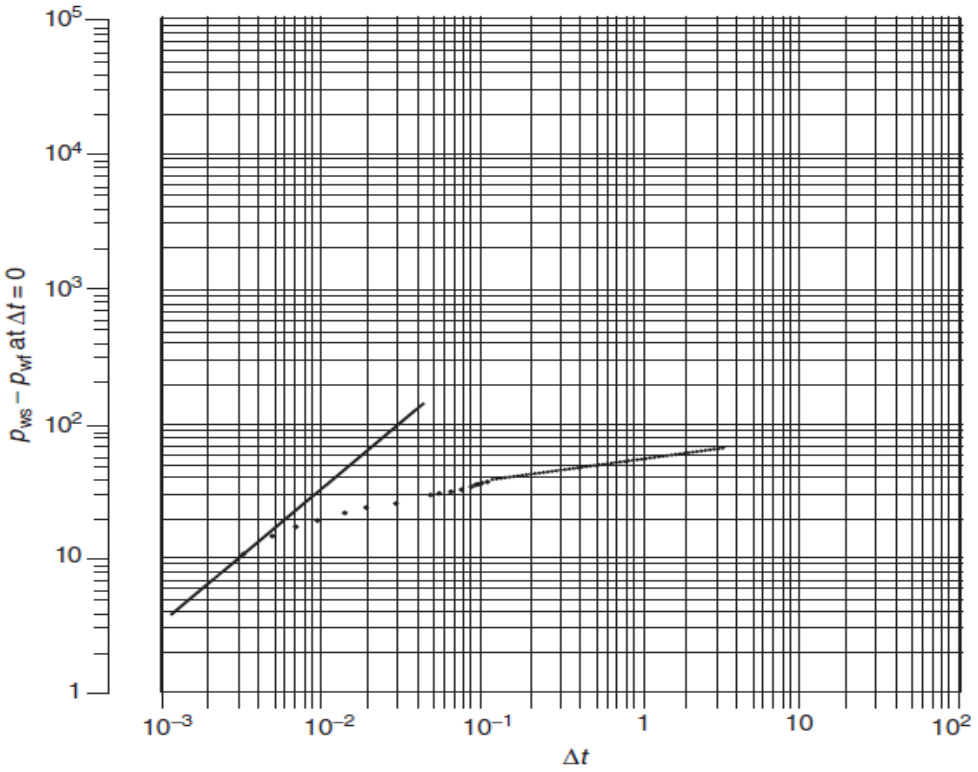
6- نجري التطابق من الخطوة رقم-4 اعلاه مع منحنيات التطابق لبورديت كما في الشكل2-24 و من التطابق سنحدد المعاملات الاتية:

$$\left[\frac{p_D}{\Delta p}\right]_{MP} = 0.053 \qquad \left[\frac{t_D/C_D}{\Delta t}\right]_{MP} = 270$$

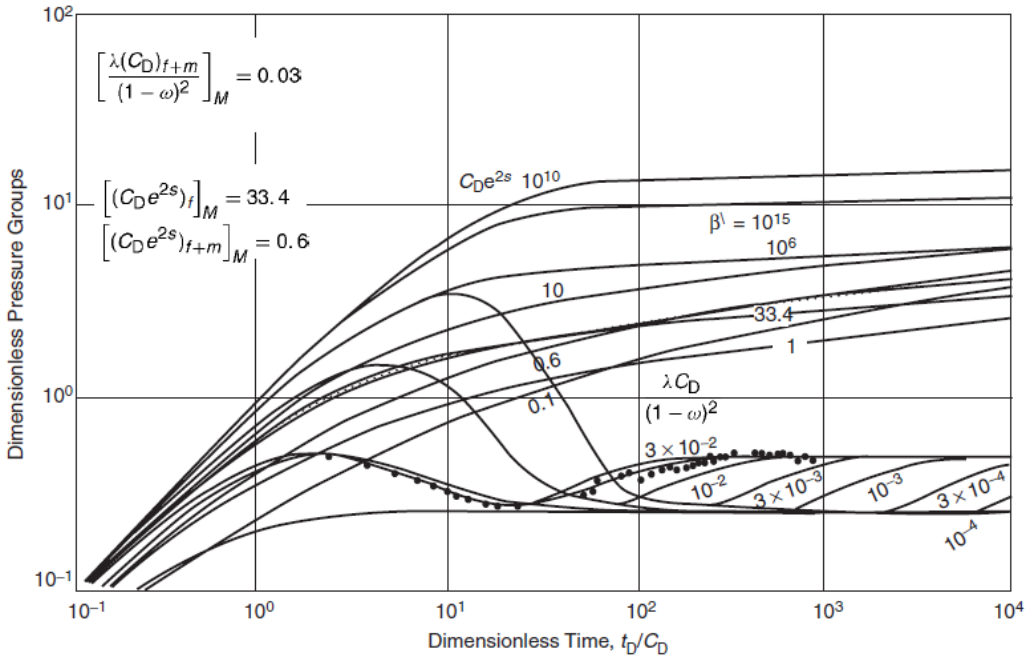
$$\left[\frac{\lambda(C_D)_{f+m}}{(1-\omega)^2}\right]_M = 0.03 \qquad [(C_D e^{2s})_f]_M = 33.4 \quad [(C_D e^{2s})_{f+m}]_M = 0.6$$



الشكل2-22 : رسم لوغاريتمي لمشتقة الضغط مع الوقت المكافىء Δt_e
لبيانات الفحص - المثال رقم-2



الشكل2-23 : رسم لوغاريتمي لفرق الضغط مع الوقت لبيانات الفحص- المثال رقم-2



الشكل2-24 : تطابق المنحنيات لتفسير بيانات الفحص - المثال رقم-2 (Bourdet-1984)

7- حساب معاملات البئر و المكمن المتشقق و كما يأتي:

$$\omega = \frac{[(C_D e^{2s})_{f+m}]_M}{[(C_D e^{2s})_f]_M} = \frac{0.6}{33.4} = 0.018$$

8- من الشكل2-21 ، نجد ان المسافة العمودية ما بين الخطين المتوازي تساوي $\Delta P = 11$ psi اذن قيمة **ω**:

$$\omega = 10^{-(\Delta p/m)} = 10^{-(11/22)} = 0.316$$

الكاظمي Kazemi (1969) قد وضع شرطا لاستخدام المعادلة اعلاه في حساب ω و هو على ان يكون : $\Delta P > 100$ psi والا فان قيمة ω المحسوبة تكون مخطوءة . و لما كانت $\Delta P = 11$ psi فان قيمة $\omega = 0.316$ غير صحيحة .

- نجد سعة الجريان للشق $k_f h$:

$$k_f h = 141.2 Q B \mu \left(\frac{p_D}{\Delta p}\right)_{MP} = 141.2(960)(1)(1.28)(0.053)$$
$$= 9196 \text{ md ft}$$

اذن نفاذية الشق تساوي:

$$k_f = 255 \text{ md}$$

9- نجد معامل تخزين البئر C :

$$C = \left[\frac{0.000295 k_t h}{\mu}\right] \frac{(\Delta t)_{MP}}{(t_D/C_D)_{MP}} = \frac{(0.000295)(9196)}{(1.0)(270)}$$
$$= 0.01 \text{ bbl/psi}$$

10- نجد معامل تخزين البئر اللابعدي للمكمن ككل $(C_D)_{f+m}$:

$$(C_D)_{f+m} = \frac{0.8926C}{\phi c_t h r_w^2} = \frac{(0.8936)(0.01)}{(0.07)(1\times10^{-5})(36)90.29)^2}$$
$$= 4216$$

12- نجد عامل القشرة s :

$$s = 0.5 \ln\left[\frac{[(C_D e^{2s})_{f+m}]_M}{(C_D)_{f+m}}\right] = 0.5 \ln\left[\frac{0.6}{4216}\right]$$
$$= -4.4$$

12- نجد المعامل λ:

$$\lambda = \left[\frac{\lambda (C_D)_{f+m}}{(1-\omega)^2}\right]_M \frac{(1-\omega)^2}{(C_D)_{f+m}} = (0.03)\left[\frac{(1-0.018)^2}{4216}\right]$$
$$= 6.86 \times 10^{-6}$$

- لاحظ ان عامل القشرة لحالة الشق تكون دائما سالبة و معامل تخزين البئر قليل ايضا وذلك للتاثير الغالب للشقوق.

3-9-2 تقنية التوليف المباشر – طريقة تياب(Tiab Direct Synthesis - TDS)

رغم فعالية طريقة تطابق المنحنيات في تفسير فحوصات الآبار ضمن المكامن المتشققة طبيعيًا، خصوصًا بعد إدخال دالة مشتقة الضغط التي حسّنت القدرة على تمييز تأثير الشقوق، إلا أن هذه الطريقة ما تزال تعتمد على المحاولة والخطأ في تحديد دقة منحني التطابق، ولا توفر دائمًا حلاً فريدًا. كما أن إيجاد منحنيات تطابق نظرية تغطي كل الحالات يبقى تحديًا، مما دفع بعض الباحثين إلى استخدامها فقط لحساب معامل التدفق البيني(λ) .

لهذا السبب طُورت تقنية التوليف المباشر (TDS) من قبل Djebbar Tiab (1995) كطريقة تحليلية تعتمد تفسير بيانات الضغط ومشتقة الضغط المرسومة على إحداثيات لوغاريتمية (log-log).

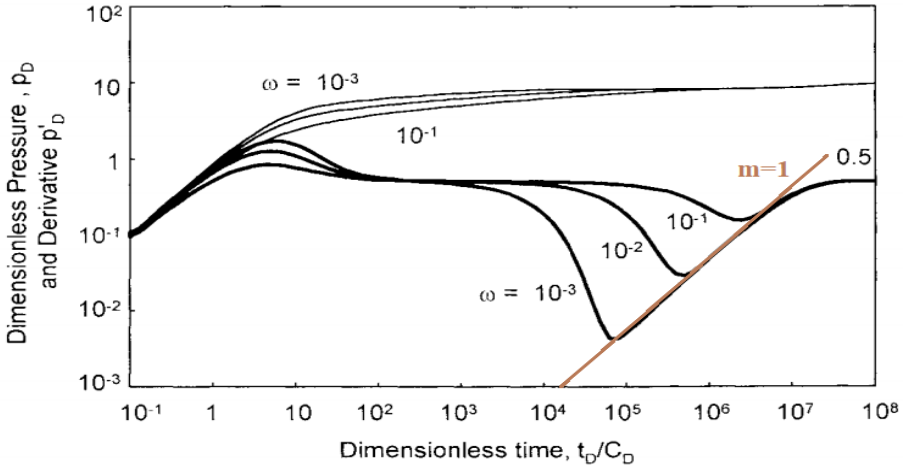
الفكرة الأساسية: تعتمد تحديد أنماط الجريان المميزة (Flow Regimes) عبر رسم الضغط والمشتقة اللوغاريتمية للضغط مقابل الزمن على مخطط لوغاريتمي. لكل نمط او طور جريان معادلة رياضية يُمكن استخدامها مباشرة لحساب خصائص المكمن أو الشق.

تتميز التقنية بما يلي:

- سهلة التطبيق خاصة إذا كانت لديك بيانات دقيقة للمشتقة.

- دقيقة جداً لأنها تعتمد على خصائص رياضية محددة لكل مرحلة جريان.
- مناسبة للآبار المتشققة لكونها توضح بدقة أطوار الجريان الناتجة عن وجود الشق.

هذه التقنية تفترض أن التدفق من النسيج الصخري إلى الشقوق يحدث ضمن طور الجريان شبه المستقر (PSS) (الجريان مقيد Restricted Interporosity Flow)، إذ يظهر كخط مستقيم بميل يساوي 1 (الشكل 2-25).



الشكل2-25 : طور الجريان شبه المستقر PSS في المنطقة الانتقالية- الخط المستقيم بميل الواحد

2-9-3-1- الفرضيات الأساسية:

- المكمن ذو نظام مزدوج المسامية (شقوق + نسيج صخري).
- نفاذية الشقوق عالية وفعالة مقارنة بالنسيج الصخري.
- الجريان الى البئر يكون فقط عبر الشقوق.
- المكمن لا نهائي وينتج مائع واحد قليل الانضغاطية.

2-9-3-2- المعادلات الأساسية:

تُستخدم معادلات الضغط اللابعدي ومشتقة الضغط اللابعدي لنمذجة هذا السلوك. كما يأتي:

$$P_D = \frac{1}{2}\left[\ln t_D + 0.80908 + Ei\left(-\frac{\lambda t_D}{\omega(1-\omega)}\right) - Ei\left(-\frac{\lambda t_D}{1-\omega}\right)\right] + s \quad \text{---------- 34}$$

$$t_D{}^* P_D{}' = \frac{1}{2}\left[1 - \exp\left(-\frac{\lambda t_D}{1-\omega}\right) + \exp\left(-\frac{\lambda t_D}{\omega(1-\omega)}\right)\right] \text{---------- 35}$$

إذ ان الزمن اللابعدي و الضغط اللابعدي و مشتقة الضغط اللابعدي بدلالة الوحدات العادية يساوي :

$$t_D = \frac{0.0002637 k_{fb} t}{\mu (\phi c_t)_{m+f} r_w^2} \quad \text{---------- 36}$$

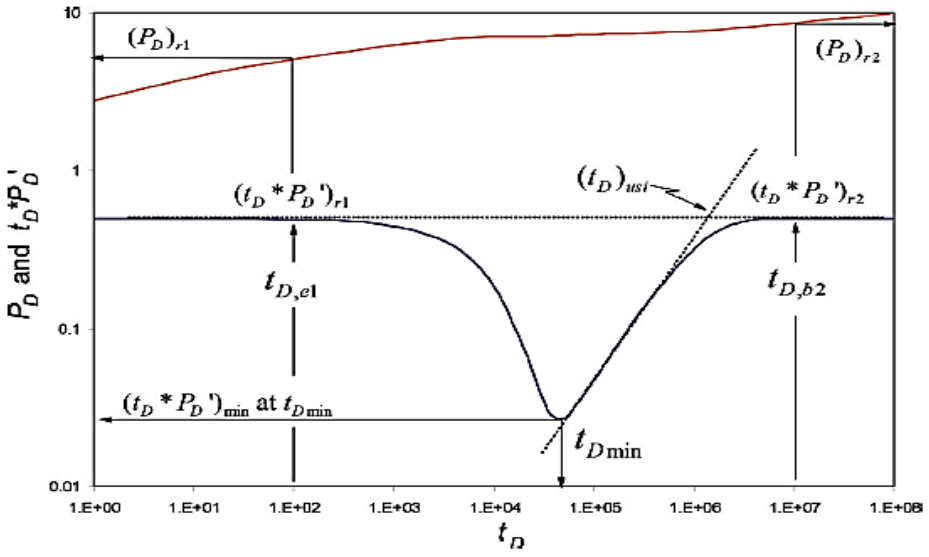
$$P_D = \frac{k_{fb} h (P_i - P)}{141.2 q \mu B} \quad \text{---------- 37}$$

$$t_D * P_D{}' = \frac{k_{fb} h (t^* \Delta P')}{141.2 q \mu B} \quad \text{---------- 38}$$

2-9-3-3- العلامات التشخيصية على المنحنى (الشكل 2-26) :

ان اهم العلامات و الخطوط المميزه في منحني بيانات الفحص اللوغاريتمي(الشكل 2-26) بطريقة تياب ، تشتمل على ما يلي:

- لا يوجد خط الميل الواحد في المدة المبكرة من الفحص بمعنى ان تخزين البئر wellbore storage مهمل.لاحظ احيانا يظهر خط الميل الواحد لتخزين البئر لكن غير مؤثر او تاثيره محدود على بيانات الفحص و هذا ما سنتعرف عليه في الفقرة اللاحقة.
- الخط الافقي الاول يرمز له r_1 والذي يمثل الجريان الشعاعي عبر الشقوق عند المدة المبكرة من الفحص.
- الخط الافقي الثاني يرمز له r_2 والذي يمثل الجريان الشعاعي عبر النظام ككل (الشقوق fractures+ النسيج الصخري matrix) .
- اوطا تقعر للمنحني والذي يمثل الجريان الانتقالي من النسيج الصخري الى الشقوق .



الشكل2-26 : طريقة تياب في تفسير بيانات فحص المكمن المتشقق طبيعيا - تمييز النقاط و الخطوط بفرض عدم وجود تاثير تخزين البئر و عامل القشرة و طور الجريان في المنطقة الانتقالية من النوع شبه المستقر PSS ، $\omega=0.01$، $\lambda=10^{-6}$

2-9-3-4- خطوات تفسير بيانات الفحص بطريقة تياب من دون تاثير تخزين البئر :

1- قم بإنشاء رسم بياني لوغاريتمي لـعلاقة Δp و $t * \Delta p'$ مقابل الوقت t وحدد النقاط والخطوط المميزة المختلفة (الشكل2-26).

إذ ان فرق الضغط لفحص هبوط الضغط Drawdown test يساوي:

$\Delta p = p_i - p_{wf}$

و فرق الضغط لفحص تصاعد الضغط Buildup test يساوي:

$\Delta p = p_{ws} - p_{wf\ (\Delta t=0)})$

2- حدِّد إما خط الجريان الشعاعي الأفقي المبكر أو خط الجريان الشعاعي اللانهائي في الوقت المتأخر من الفحص. سجل اي من المعلومات $(t*\Delta p')_{r1}$ او $(t*\Delta p')_{r2}$ من الرسم اللوغاريتمي الشكل2-26 . احسب نفاذية الشق الإجمالية من المعادلة ادناه:

$$k_{fb} = \frac{70.6q\mu B}{h(t^*\Delta P')_{r1}} = \frac{70.6q\mu B}{h(t^*\Delta P')_{r2}} \quad \text{---------- 39}$$

ان k_{fb}- Bulk fracture permeability تُمثل نفاذية الشقوق ككل و نحصل عليها سواء" من الخط الافقي الاول او الثاني .

3- حساب معامل تخزين البئر C باستخدام خط الميل الواحد في المدة المبكرة من الفحص وكما يأتي:

$$C = \left(\frac{qB_o}{24}\right)\frac{t}{\Delta p} \quad \text{---------- 40}$$

or

$$C = \left(\frac{qB_o}{24}\right)\frac{t}{\Delta p' * t} \quad \text{---------- 41}$$

إذ ان t و ΔP و $t * \Delta P'$ احداثيات اي نقطة تطابق مختارة تقع على خط الميل الواحد او امتداده.

(ملاحظة : ان مؤشرات تخزين البئر موجودة لكن غير مؤثرة على بيانات الفحص في المنطقة المبكرة و الانتقالية من الفحص).

4- يُمكن حساب C من الوقت t_i والذي يمثل وقت التقاطع ما بين خط الميل الواحد و خط الجريان الشعاعي الافقي وكما يأتي:

$$C = \frac{k_f h t_i}{1695\mu} \quad \text{---------- 42}$$

لاحظ:يُمكن استخدام المعادلة رقم-42 لحساب اما نفاذية الشق او لحساب معامل تخزين البئرC.

5- حساب نسبة التخزين (ω):

- Engler & Tiab (1996) اوجدوا علاقة تجريبية Correlations تربط بين أدنى قيمة لمشتقة الضغط $(t^*\Delta P')_{min}$ و مشتقة الضغط للجريان الشعاعي $(t^*\Delta P')_r$ من الرسم اللوغاريتمي وكما يأتي :

$$\omega = 0.15866\left\{\frac{(t^*\Delta P')_{min}}{(t^*\Delta P')_r}\right\} + 0.54653\left\{\frac{(t^*\Delta P')_{min}}{(t^*\Delta P')_r}\right\}^2 \quad \text{---------- 43}$$

المعادلة اعلاه تعمل فقط في حدود $\mathbf{0 \le \omega \le 0.1}$ و بنسبة خطا اقل من 1.5%. و يتم تحديد كلا من $(t^*\Delta P')_{min}$ و $(t^*\Delta P')_r$ من الرسم اللوغاريتمي .

- حساب قيمة ω باستخدام اقل وقت t_{min} (قيمة الوقت عند اوطا قيمة لمشتقة الضغط في المنطقة الانتقالية) و وقت نهاية الخط الافقي الاول t_{e1} كما يأتي:

$$\omega = \exp\left[-\frac{1}{0.9232}\left(\frac{t_{min}}{50t_{e1}} - 0.4386\right)\right] \quad \text{---------- 44}$$

نسبة الخطا باستخدام المعادلة اعلاه اقل من 5%.

- حساب قيمة ω باستخدام اقل وقت t_{min} و وقت بداية الخط الافقي الثاني t_{b2} كما يأتي:

$$\omega = 0.19211\left\{\frac{5t_{min}}{t_{b2}}\right\} + 0.80678\left\{\frac{5t_{min}}{t_{b2}}\right\}^2 \quad \text{---------- 45}$$

المعادلة اعلاه تصلح لقيم $\mathbf{\omega \le 0.1}$ و بنسبة خطا اقل من 2% .

6- حساب معامل التدفق البيني (λ):

- من علاقات الربط التجريبية لانغلر و تياب Engler & Tiab (1996) ما بين اوميغا و الاوقات المميزه من الرسم و كما يأتي:

$$\lambda = \frac{\omega(1-\omega)}{50\beta t_{e1}} = \frac{\omega ln(1/\omega)}{\beta t_{min}} = \frac{1}{\beta\, t_{usi}} = \frac{5(1-\omega)}{\beta t_{b2}} \quad \text{---------- 46}$$

وان β تساوي:

$$\beta = \frac{0.0002637 k_{fb}}{(\phi c_t)_{f+m}\mu r_w^2} \quad \text{---------- 47}$$

إذ ان وقت نهاية الخط الافقي الاول- t_{e1} – end of the first horizontal straight line.

وقت بداية الخط الافقي الثاني- t_{b2} start of the second horizontal straight line.

الوقت المقابل لقيمة مشتقة الضغط الدنيا - t_{min} time of minimum derivative pressure ، تقاطع الخط ذو ميل 1 (الجريان من النوع شبه المستقر خلال الفترة الانتقالية) مع الخط الأفقي الثاني.

intersection of the transition period unit slope line with the -acting- t_{usi} infinite radial flow pressure

- من المعادلة رقم-46 ، نحسب **قيمة λ** بدلالة اوطا وقت مقابل اوطا قيمة لمشتقة الضغط و كما يأتي:

$$\lambda = \left[\frac{42.5h(\phi c_t)_{f+m} r_w^2}{qB}\right] \frac{(t^*\Delta P')_{\min}}{t_{\min}} \quad \text{---------- 48}$$

المعادلة اعلاه تصلح لحساب λ عندما $\omega<0.05$ اما اذا كانت قيم **ω** اعلى فتكون قيم λ المحسوبة غير مضبوطة و نتائجها اعلى من القيم الحقيقية.

- او حساب λ من العلاقة التجريبية الاتية :

$$\lambda = \frac{3792(\phi\, c_t)_{f+m}\mu r_w^2}{k_{fb}\Delta t_{\min}} \left[\omega \ln\left(\frac{1}{\omega}\right)\right] \quad \text{---------- 49}$$

- او من نقطة تقاطع الخط ذو ميل 1 (الجريان من النوع شبه المستقر عبر المدة الانتقالية) مع الخط الأفقي الثاني و منها نحدد الزمن اللا بعدي للتقاطع - unit slope intersection **t_{Dusi}** والذي يُستخدم لحساب حساب قيمة λ كما يأتي:

$$\lambda = 1/t_{Dusi} \quad \text{---------- 50}$$

ان الوقت اللابعدي يساوي:

$$t_D = \frac{0.0002637 k_{fb}}{(\phi c_t)_{f+m}\mu r_w^2} t_{usi} \quad \text{---------- 51}$$

- بالتعويض عن الزمن اللابعدي بما يساويه في المعادلة رقم-50 نحصل على قيمة λ بدلالة زمن التقاطع العادي t_{usi} كالتالي:

$$\lambda = \left(\frac{(\phi c_t)_{f+m}\mu r_w^2}{0.0002637 k_{fb}}\right) \frac{1}{t_{usi}} \quad \text{---------- 52}$$

7- حساب عامل القشرة (Skin):

- حساب عامل القشرة السالب من قيم الوقت و مشتقة الضغط في مدة الجريان الشعاعي الثانية r_2 و لاي نقطة على الخط الافقي الثاني :

$$s = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\Delta P}{t^*\Delta P'}\right)_{r2} - \ln\left(\frac{k_{fb}\, t_{r2}}{(\phi c_t)_{f+m}\mu r_w^2}\right) + 7.43\right] \quad \text{---------- 53}$$

- حساب عامل القشرة من معلومات مدة الجريان الشعاعي للشقوق r_1 (الخط الافقي الاول) وكما يأتي:

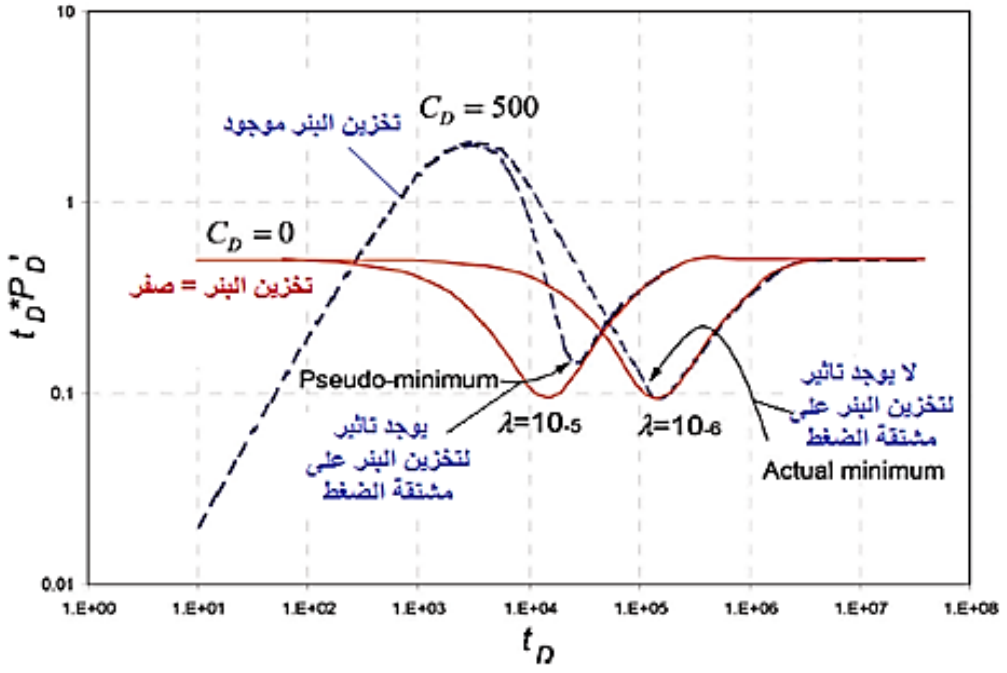
$$s = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\Delta P}{t^*\Delta P'}\right)_{r1} - \ln\left(\frac{k_{fb}\, t_{r1}}{(\phi c_t)_{f+m}\mu r_w^2}\right) + 7.43\right] \text{ ---------- } 54$$

2-9-3-5- تاثير عامل تخزين البئر على بيانات الفحص Wellbore storage effects

الخطوات السابقة في تفسير فحص الابار في المكامن المتشققة بطريقة تياب تفترض اختفاء تاثير تخزين البئر على بيانات الفحص. ان تأثير تخزين البئر يتم تحديده عبر سلوك بيانات الفحص عبر المدة المبكرة. إذ يظهر خط ميل بمقدار 1 (unit slope) في بداية منحني المشتقة، مما يدل على سيطرة سلوك التخزين عبر هذه المرحلة.

يُبين الشكل (2-27) السلوك العام لمنحنيي الضغط ومشتقة الضغط اللابعدية مع الزمن اللابعدي في الآبار العمودية المخترقة للمكامن المتشققة طبيعيًا، مع مقارنة بين حالتين:

- **وجود تأثير تخزين البئر** - المنحني الاسود المتقطع.
- **غياب تأثير تخزين البئر (C = 0)** المنحني الأحمر.



الشكل2-27 : تاثير تخزين البئر على القيمة الدنيا للوقت في منحني مشتقة الضغط $\omega = 0.05$

التأثير الرئيسي لتخزين البئر يظهر بوضوح في إخفاء أو تغطية مدة الجريان الشعاعي المبكر (Early time radial flow)، و بالتالي صعوبة في تحديد هذا السلوك بشكل مباشر في بيانات الفحص و ينتقل مباشرة الى المنطقة الانتقالية.

فعند وجود تخزين البئر، تُثار الشكوك حول ما إذا كانت القيمة الدنيا لمشتقة الضغط تمثل سلوكًا حقيقيًا (Actual Minimum) أو أنها مجرد قيمة زائفة (Pseudo-Minimum) كما في الشكل2-27 .للتاكد من ذلك نجري الاختبار الاتي لمعرفة فيما لو ان القيمة الدنيا حقيقية غير متاثرة بتخزين البئر اوالعكس:

فاذا كانت النسبة $t_{min}/t_x>10$ فالقيمة الدنيا لمشتقة الضغط حقيقية و غير زائفة لكل قيم ω و λ ، لهذا سنستخدم طريقة التفسير في الفقرة السابقة والا فالقيمة الدنيا غير حقيقية و زائفة مما يتطلب تصحيحها.

ان t_{min} تُمثل قيمة للوقت عند اوطا قيمة لمشتقة الضغط في المنطقة الانتقالية و ان t_x تُمثل قيمة للوقت عندما يكون تاثير تخزين البئر عند الذروة peak. بوجود تخزين البئر، فإن خط الجريان الشعاعي في الوقت المتأخر من الفحص يصبح ضروري لحساب عامل القشرة ونفاذية الشقوق الكلية كما تم مناقشته سابقًا.

2-9-3-6- خطوات تفسير الفحص بتاثير تخزين البئر- طريقة تياب:

1- الخطوات 2-4 من الحالة الاولى في الفقرة السابقة يُمكن تطبيقها لهذه الحالة.

2- نتاكد من القيمة الدنيا لمشتقة الضغط عبر حساب النسبة t_{min}/t_x فيما اذا كانت اعلى من 10 فنجري الحسابات بنفس خطوات الحالة الاولى في الفقرة السابقة.

في حال كون النسبة t_{min}/t_x كانت اقل من 10 فمعناه ان هنالك تاثير لتخزين البئر على القيمة الدنيا لمشتقة الضغط ، عليه في هذه الحالة فان القيمة الدنيا لمشتقة الضغط زائفة و ليست حقيقية فبعد حساب المعاملات الضرورية المتاثرة بتخزين البئر وجب تصحيحها و حسب الخطوات اللاحقة.

3- حساب المعامل λ :

يكون باستخدام النسبة ما بين اعلى وقت لتحدب (الذروة) منحني مشتقة الضغط بتاثير تخزين البئر الى اوطا وقت لقيمة لمشتقة الضغط في المنطقة الانتقالية المعادلة رقم-55. او استخدام النسبة ما بين قيمة مشتقة الضغط عند اعلى تحدب لتاثير تخزين البئر الى اوطا قيمة لمشتقة الضغط في المنطقة الانتقالية المعادلة رقم-58 و كما في تسلسل الحسابات ادناه:

$$\frac{t_x}{t_{min,o}} \text{ or } \frac{(\Delta p' * t)_x}{(\Delta p' * t)_r}$$

ثم حساب الطرف الايسر من المعادلة التجريبية ادناه من توفر المعلومات (t_{min} t_x ،) و قيمة C_D و يساوي:

$$[\lambda log(1/\lambda)]_{min} = \frac{1}{C_D}\left[5.565\frac{t_x}{t_{min,}}\right]^{10} \text{ ---------- 55}$$

ان قيمة C_D تساوي:

$$C_D = \frac{0.894C}{\phi c_t h r_w^2} \quad \text{---------- 56}$$

- من المعادلة رقم-55 فان قيمة λ تُحسب كما في الصيغة الاتية :

$$\lambda = \left(\frac{[\lambda log(1/\lambda)]_{\min}}{1.924}\right)^{1.0845} \quad \text{---------- 57}$$

- ممكن حساب λ من مشتقة الضغط بعد تحديد نسبة اوطا قيمة مشتقة الضغط الى قيمة مشتقة الضغط عند اعلى تحدب لتاثير تخزين البئر و كالاتي:

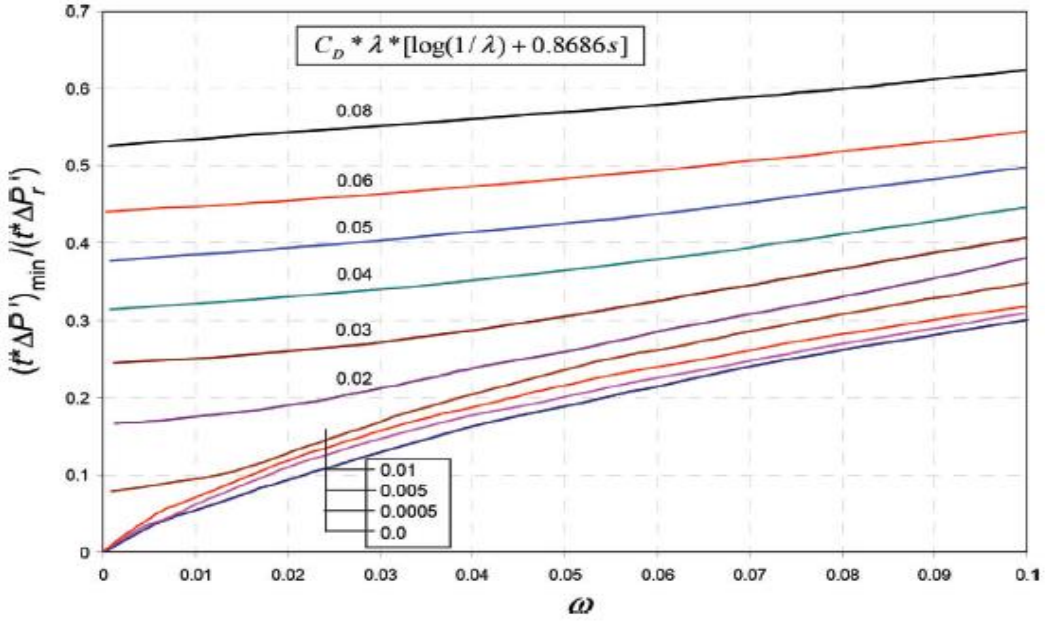
$$\lambda = \frac{1}{10C_D}\frac{(t^*\Delta P')_{\min}}{(t^*\Delta P')_x} \quad \text{---------- 58}$$

العلاقة التجريبية اعلاه تشترط ان $C_D\lambda > 0.001$ ، و قيمة C_D تحسب من المعادلة رقم-56 .

4- حساب معامل نسبة تخزين الشق ω المصححة لتاثير تخزين البئر:

اثبت تياب (Tiab(2007 ان عامل تخزين البئر يؤثر على حساب ω اكثر مقارنة بـحساب λ.

يجب أن يكون ثابت تخزين حفرة البئر وعامل القشرة ومعامل التدفق البيني معروفًا مسبقًا لتكوين المجموعة عديمة الأبعاد الموضحة في الشكل2-28. .



الشكل2-28 : حساب عامل خزن الشق اللابعدي باستخدام
نسبة مشتقة الضغط الدنيا الى قيمتها في في الجريان الشعاعي

توفر هذه المجموعة إلى جانب نسبة مشتقة ضغط الأدنى إلى مشتقة ضغط الجريان الشعاعي و كالاتي:

$$s\ ,\ C_D\ ,\ \lambda\ ,\ \frac{(\Delta p'*t)_{min}}{(\Delta p'*t)_r}$$

ثم من الشكل 2-28 نجد القيمة ω المصححة لتاثير تخزين البئر.

5- اخيرا فان تياب و جماعته Tiab et al.(2007) توصلو الى أن الحد الأدنى لمشتقة الضغط في المنطقة الانتقالية لا يتأثر بتخزين الآبار و لاي قيمة ω ، شريطة استيفاء الشروط الواردة في الجدول 2-4 . ثم اقترحوا صيغة أفضل لتصحيح الحد الأدنى لمشتقة الضغط و كما يأتي:

$$(t^*\Delta P')_{min} = (t^*\Delta P')_r + \frac{(t^*\Delta P')_{minO} - (t^*\Delta P')_r[1+2D_1D_2]}{1+D_2\left[\ln\left(\frac{C}{(\phi c_t)_{f+m}hr_w^2}\right)+2s-0.8801\right]} \quad \text{---------- 60}$$

إذ ان $(t^*\Delta P')_{min}$ تُمثل اوطا قيمة لمشتقة الضغط المصححة و ان $(t^*\Delta P')_{minO}$ و t_{minO} تُمثل احداثيات اوطا نقطة لمشتقة الضغط و اوطا وقت قبل التصحيح لتاثير تخزين البئر على التوالي .

λ	C_D
10^{-4}	$C_D > 10$
10^{-5}	$C_D > 100$
10^{-6}	$C_D > 10^3$
10^{-7}	$C_D > 10^4$
10^{-8}	$C_D > 10^5$

الجدول2-4: الظروف التي تجعل الحد الأدنى لقيمة مشتقة الضغط لا يتأثر بتخزين الآبار

ان قيم D_1، D_2 على التوالي تساوي:

$$D_1 = \left[\ln\left(\frac{qBt_{minO}}{(t^*\Delta P')_r(\phi c_t)_{f+m}hr_w^2}\right)+2s-4.17\right] \quad \text{---------- 61}$$

$$D_2 = \frac{48.02C}{qB}\left(\frac{(t^*\Delta P')_r}{t_{minO}}\right) \quad \text{---------- 62}$$

ان الرمز o اشارة الى بيانات الفحص الحقيقية -observed.

6- من القيمة المصححة $(t^*\Delta P')_{min}$ في المعادلة اعلاه يُمكن حساب قيمة ω الصحيحة و كما يأتي:

$$\omega = \left(2.9114 + 4.5104\frac{(t^*\Delta P')_r}{(t^*\Delta P')_{\min}} - 6.5452e^{0.7912\frac{(t^*\Delta P')_r}{(t^*\Delta P')_{\min}}}\right)^{-1} \quad \text{---------- 63}$$

- او ممكن ان نحسب ω من علاقة Tiab et al. [43] ادناه على شرط ان تكون قيمة $\omega < 0.5$:

$$\omega = \left(2.9114 + \frac{3.5688}{\lambda t_{D\min}} + \frac{6.5452}{\lambda t_{D\min}}\right)^{-1} \quad \text{---------- 64}$$

وان t_{Dmin} يساوي:

$$t_{D\min} = \frac{0.0002637kt_{\min}}{(\phi c_t)_{f+m}\mu r_w^2} \quad \text{---------- 65}$$

مثال-3 اعادة حل المثال 2 بطريقة TDS

بيانات فحص تصاعد الضغط لبئر نفطي في مكمن معقد رُسمت في الشكل اللوغاريتمي رقم 2-29 .

البيانات المتوفرة الاخرى أُدرجت ادناه :

$$Q = 960\ \text{STB/day}, \quad B_o = 1.28\ \text{bbl/STB}, \quad c_t = 1 \times 10^{-5}\ \text{psi}^{-1},$$
$$\phi = 0.007, \quad \mu = 1\ \text{cp}, \quad r_w = 0.29\ \text{ft}, \quad h = 36\ \text{ft}$$

المطلوب: اجراء تفسير لبيانات الفحص بطريقة TDS ؟؟؟

الحل:

طريقة تياب TDS

2- من الرسم في الشكل2-29 نحدد الخطوط المستقيمة و نبدا بقراءة النقاط ذات العلاقة بطريقة تياب في تفسير الفحص و كما يأتي :

$$t_X = 0.00348\ \text{h}, \Delta P_X = 11.095\ \text{psia}, t_{r2} = 1.8335\ \text{h} \quad \Delta P_{r2} = 61.5\ \text{psia},$$
$$(t^*\Delta P')_{r2} = 10.13\ \text{psia}, \quad t_{min,o} = 0.07\ \text{h}, (t^*\Delta P')_{minO} = 5.32\ \text{psia}$$

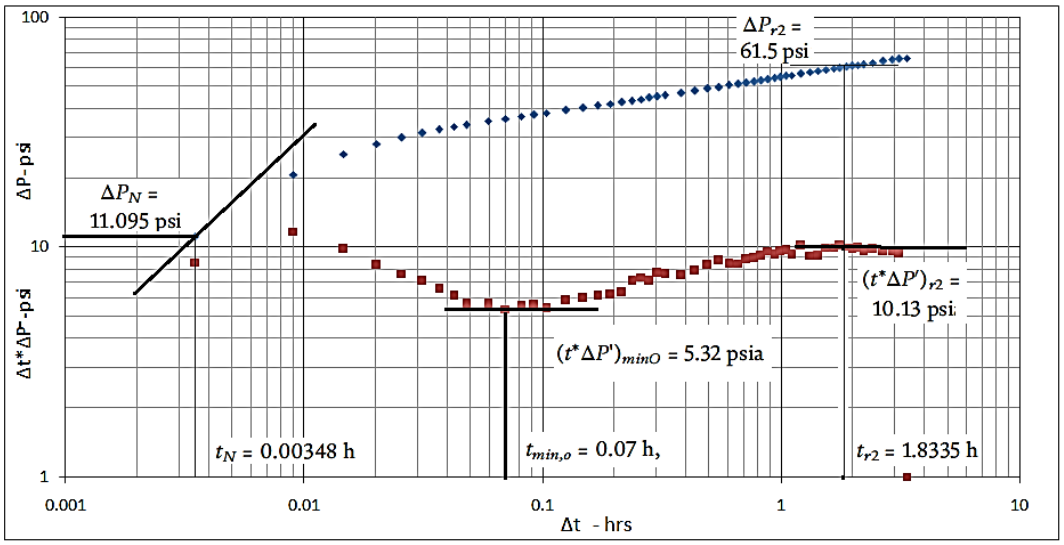
2- نحسب نفاذية الشق الكلية و تساوي:

$$k_{fb} = \frac{70.6q\mu B}{h(t^*\Delta P')_{r2}} = \frac{70.6 \times 960 \times 1.01 \times 1.28}{10.13 \times 36}$$
$$= 238\ \text{md}$$

3- عامل تخزين البئر يساوي:

$$C = \frac{qB}{24}\left(\frac{t}{\Delta P}\right)_x = \left(\frac{960(1.28)}{24}\right)\frac{0.00348}{11.095}$$

$$= 0.0161 \text{ bbl/psia}$$



الشكل2-29 : تفسير بيانات فحص تصاعد الضغط للمثال رقم-3 (طريقة تياب)

4- عامل تخزين البئر اللابعدي يساوي:

$$C_D = \frac{0.894C}{(\phi c_t)_{f+m} h r_w^2} = \frac{0.894(0.0161)}{0.7 \times 10^{-6}(36)(0.29^2)}$$

$$= 6792$$

5- عامل القشرة باستخدام احداثيات اي نقطة عبر مدة الجريان الشعاعي الثانية يساوي:

$$s = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\Delta P}{t^*\Delta P'}\right)_{r2} - \ln\left(\frac{k_{fb}\, t_{r2}}{(\phi c_t)_{f+m}\mu r_w^2}\right) + 7.43\right]$$

$$s = \frac{1}{2}\left[\frac{61.5}{10.13} - \ln\left(\frac{(238)(1.8335)}{0.7 \times 10^{-6}(1.01)(0.29^2)}\right) + 7.43\right]$$

$$= -4.6$$

6- حساب معامل الجريان البيني λ باستخدام احداثيات اوطا نقطة عند منحني مشتقة الضغط يساوي:

$$\lambda = \left[\frac{42.5h(\phi c_t)_{f+m} r_w{}^2}{qB}\right]\frac{(t^*\Delta P')_{\min}}{t_{\min}}$$

$$= \left[\frac{42.5(37)0.7\times10^{-6}(0.29^2)}{960(1.28)}\right]\frac{5.32}{0.07}$$

$$= 5.57\times10^{-6}$$

- لما كانت قيمتي λ و C_D تساوي:

$$C_D = 6792, \quad \lambda = 5.57\times10^{-6}$$

و بالرجوع الى الجدول2-4 والذي يمثل ادنى الظروف والتي عندها يؤثر تخزين البئر على اوطا قيمة لمشتقة الضغط و حسب السطر الثالث من الجدول فان قيمة مشتقة الضغط تحتاج الى تصحيح قبل حساب قيمة تخزين الشق ω.

لذا نجد المعامل D_1 :

$$D_1 = \left[\ln\left(\frac{960(1.28)(0.07)}{(10.13)}\right)+2(-4.6)-4.17\right]$$

$$= 1.8334$$

و المعامل D_2 :

$$D_2 = \frac{48.02(0.0161)}{960(1.28)}\left(\frac{10.13}{0.07}\right)$$

$$= 0.09105$$

نجري التصحيح لاوطا قيمة لمشتقة الضغط وتساوي:

$$(t^*\Delta P')\min = 10.13 + \frac{5.32-(10.13)[1+2(1.8334)(0.09105)]}{1+0.09105[\ln\left(\frac{0.0161}{0.7\times10^{-6}(36)(0.29^2)}\right)+2(-4.6)-0.8801]}$$

$$= 0.9849$$

- نستخدم القيمة المصححة لاوطا قيمة لمشتقة الضغط اعلاه في ايجاد قيمة تخزين الشق ω وتساوي:

$$\omega = \left(2.9114+4.5104\frac{10.13}{0.9849}-6.5452e^{0.7912\frac{10.13}{0.9849}}\right)^{-1} = 0.024$$

- او من المعادلة الاتية :

$$\omega = 0.15866\left(\frac{(\Delta P'wf*t)_{min}}{(\Delta P'wf*t)_r}\right)+0.54653\left(\frac{(\Delta P'wf*t)_{min}}{(\Delta P'wf*t)_r}\right)^2$$

$$\omega = 0.15866\left\{\frac{0.9849}{10.13}\right\}+0.54653\left\{\frac{0.9849}{10.13}\right\}^2 = 0.0206$$

- لاحظ عند حساب ω من المعادلة اعلاه دون استخدام التصحيح لاوطا قيمة لمشتقة الضغط فان ω=0.234.

t, h	P_{wf}, psia	$t^*\Delta P'$, psia	t, h	P_{wf}, psia	$t^*\Delta P'$, psia	t, h	P_{wf}, psia	$t^*\Delta P'$, psia
0.0933	4373.4	84.473	1.0930	4060.3	87.234	12.43	3824.2	137.651
0.1766	4299.1	133.483	1.26	4043.1	84.384	14.43	3804.1	136.857
0.2600	4246.1	146.776	1.427	4032.2	76.719	20.43	3758.7	138.810
0.3433	4203.6	151.595	2.427	4002.8	75.401	26.43	3720.3	135.210
0.4266	4173.8	157.618	3.427	3971.3	90.502	32.43	3695.1	134.790
0.5100	4139.7	150.295	4.427	3948.3	87.168	38.43	3674.6	134.116
0.5933	4118.5	141.355	5.427	3931.6	95.595	44.43	3652.4	156.278
0.6766	4103.5	111.676	6.427	3917.1	108.303	50.43	3636.9	183.611
0.7600	4086.4	99.694	7.427	3898.4	122.336	53.43	3625.2	196.734
0.9266	4075.4	95.720	9.427	3865.3	142.426			

الجدول2-5: بيانات فحص هبوط الضغط - المثال رقم-4

مثال-4

بيانات فحص هبوط الضغط لبئر نفطي في مكمن معقد أُدرجت في الجدول2-5 و رسمت في الشكل اللوغاريتمي رقم2-30 **البيانات المتوفرة الاخرى أُدرجت ادناه :**

q = 3000 BPD, ϕ = 0.10, μ = 1.0 cp
$c_t = 3.0 \times 10^{-5}$ psia^{-1}, B = 1.25 bbl/stb, h = 100 ft
r_w = 0.40 ft, $P_i(t=0)$ = 4473 psia

احسب نفاذية الشق ، عامل تخزين البئر ، عامل القشرة ، معامل تخزين الشق و معامل الجريان البيني؟؟

الحل:

1- من الرسم البياني اللوغاريتمي في الشكل2-30 نحدد الخطوط المستقيمة و نسجل احداثيات النقاط ذات العلاقة ثم نطبق طريقة تياب في تفسير الفحص، و كما يأتي:

ΔP_N = 99.6 psia, $(t^*\Delta P')_N$ = 116.4 psia, t_N = 0.093 h
t_{b2} = 14.4 h, t_{r2} = 20.43 h, ΔP_{r2} = 714.3 psia
$(t^*\Delta P')_{r2}$= 138.5 psia, t_x = 0.43, $t_{min,o}$ = 2.427 h
$t_{min,o}/t_x$ = 5 < 10, t_i = 0.14 h, $(t^*\Delta P')_{min}$ = 72.087 psia

لاحظ ان الرمز N اشارة الى اي نقطة لا على التعيين تقع على الخط المستقيم لتخزين البئر بميل الواحد او امتداده N-an arbitrary point during early period .

2- حساب نفاذية الشق و تساوي:

$$k_{fb} = \frac{70.6q\mu B}{h(t^*\Delta P')_{r2}} = \frac{70.6(3000)(1.0)(1.25)}{100(138.5)}$$

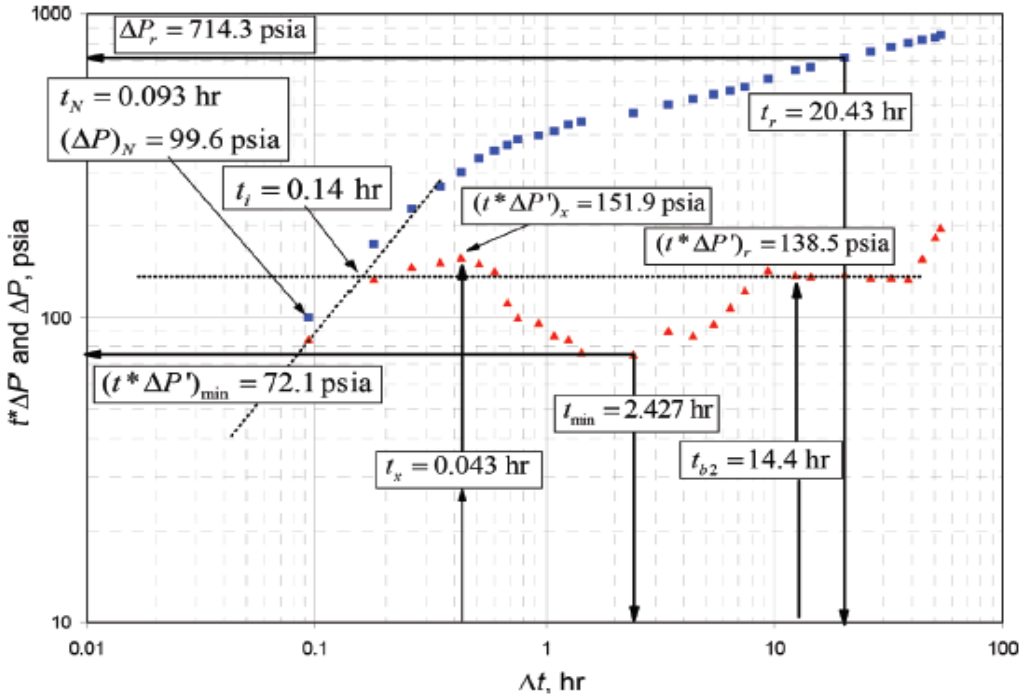
$$= 19.1 \text{ md}$$

3- حساب معامل تخزين البئر اعتمادا على احداثيات الضغط العادي Δp لاي نقطة تقع على خط الميل الواحد و يساوي:

$$C = \left(\frac{qB}{24}\right)\frac{t_N}{\Delta P_N} = \left(\frac{3000(1.25)}{24}\right)\frac{0.093}{99.6} = 0.146 \text{ bbl/psia}$$

4- حساب معامل تخزين البئر من احداثيات مشتقة الضغط لاي نقطة تقع على خط الميل الواحد و يساوي:

$$C = \left(\frac{qB}{24}\right)\frac{t_N}{(t^*\Delta P')_N} = \left(\frac{3000(1.25)}{24}\right)\frac{0.093}{116.4} = 0.129 \text{ bbl/psia}$$



الشكل2-30 : تفسير بيانات فحص هبوط الضغط للمثال رقم-4 (طريقة تياب)

5- حساب معامل تخزين البئر اعتمادا على احداثيات نقطة التقاطع ما بين خطي الميل الواحد والخط الافقي و يساوي:

$$C = \frac{k_{fb}ht_i}{1695\mu} = \frac{19.1(100)(0.14)}{1695\mu} = 0.158 \text{ bbl/psia}$$

6- حساب عامل القشرة و يساوي**:**

$$s = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\Delta P}{t^*\Delta P'}\right)_{r2} - \ln\left(\frac{k_{fb}\,t_{r2}}{(\phi c_t)_{f+m}\mu r_w^2}\right) + 7.43\right]$$

$$s = \frac{1}{2}\left[\frac{714.3}{138.5} - \ln\frac{19.1(20.43)}{3\times10^{-6}(0.1)(1)(0.4^2)} + 7.43\right]$$

$$= -5.13$$

7- حساب معامل تخزين البئر اللابعدي و يساوي:

$$C_D = \frac{0.8935C}{\phi hc_t r_w^2} = \frac{0.8935(0.143)}{0.1(100)(3\times10^{-6})(0.4^2)} = 26618$$

نعوض معامل تخزين البئر اللابعدي في المعادلة ادناه:

$$[\lambda \log(1/\lambda)]_{\min} = \frac{1}{C_D}\left[5.565\frac{t_x}{t_{min,o}}\right]^{10} = \frac{1}{26618}\left[5.565\frac{0.43}{2.427}\right]^{10} = 0.00003$$

8- من الخطوة السابقة ، نجد ان قيمة λ تساوي :

$$\lambda = \left(\frac{[\lambda log(1/\lambda)]_{\min}}{1.924}\right)^{1.0845}$$

$\lambda = 6.12 \times 10^{-6}$

9- ممكن ان نجد المعامل λ من المعادلة الاتية:

$$\lambda = \frac{1}{10C_D}\frac{(t^*\Delta P')_{\min}}{(t^*\Delta P')_x} = \frac{1}{10(26618)}\frac{72.087}{151.94} = 1.78\times10^{-6}$$

10- تحديد قيمة ω من الشكل2-28 بعد حساب الحد الاتي:

$$C_D\lambda\left[\log\left(\frac{1}{\lambda}\right) + 0.8686s\right] = 26618(1.78\times10^{-6})\left[\log\left(\frac{1}{1.78\times10^{-6}}\right) + 0.8686(-5.13)\right]$$

$$= 0.061$$

و من الشكل2-28 نجد ان قيمة ω المصححة تساوي ω=0.07 .

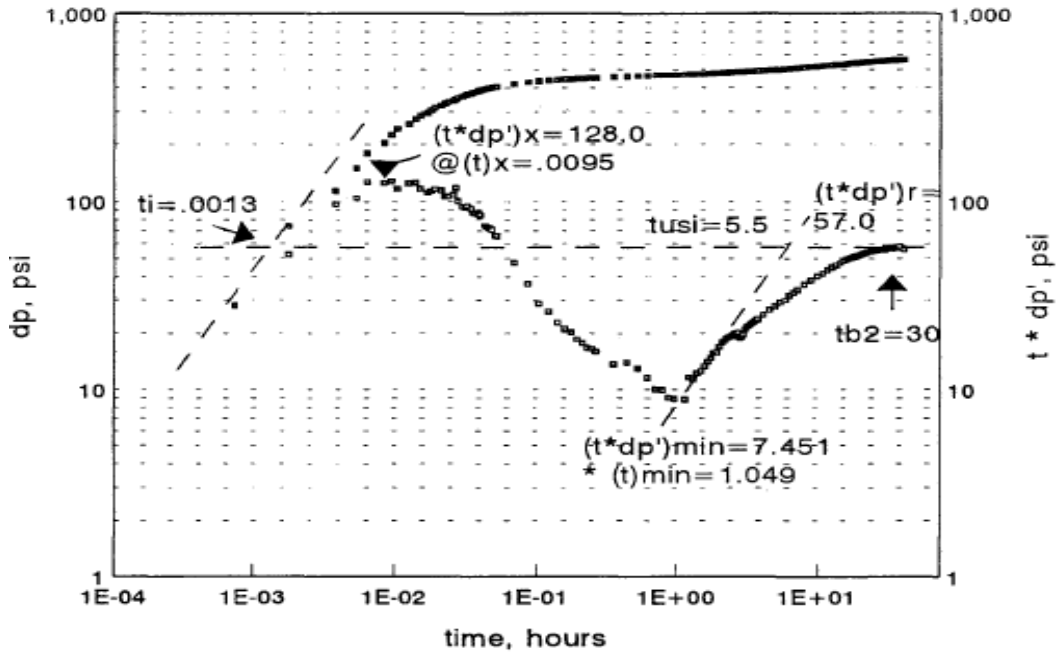
مثال-5

بيانات فحص تصاعد الضغط لبئر نفطي في مكمن معقد رُسمت في الشكل اللوغاريتمي رقم2-31
البيانات المتوفرة الاخرى أُدرجت ادناه :

q	= 880 stbd	ϕ	= 0.08
μ	= 1.3 cp.	c_t	= 5.0 x 10^{-6} psi^{-1}
B_o	= 1.3 rb/stb	h	= 20 ft.
r_w	= 0.29 ft.	$p@t=0$	= 7248 psi

المطلوب:

احسب نفاذية الشق ، عامل تخزين البئر ، عامل القشرة ، معامل تخزين الشق و معامل الجريان البيني؟؟



الشكل2-31 : تفسير بيانات فحص تصاعد الضغط Build-up للمثال رقم-5 (طريقة تياب)

الحل:

1- رسم بيانات الفحص على رسم بياني لوغاريتمي لعلاقة مشتقة الضغط والضغط العادي مع الزمن و نحدد الخطوط المستقيمة ذات العلاقة قدر الامكان (الشكل2-31) ، ثم نطبق طريقة تياب إذ نحدد بعض النقاط المميزة مع احداثياتها لغرض الحسابات اللاحقة وكما يأتي:

$(t^*\Delta P')_x$ = 128 psi

$(t^*\Delta P')_{r2}$= 57 psi t_{r2} = 30 h $(\Delta P)_{r2}$ = 560 psi

$(t^*\Delta P')_{min}$ = 7.45 psi t_{min} = 1.094 h

$t_i = 0.0013$ h tusi = 5.5

$(\Delta P) = 70$ psi $t = 0.00195$ h

2- حساب نفاذية الشق من المعادلة رقم- 39 و تساوي k_f= 92.1 md . لاحظ ان الخط الشعاعي المبكر غير واضح ربما لتاثير عامل تخزين البئر او اسباب اخرى.

3- نحدد خط الميل الواحد الذي يمثل تاثير تخزين البئر و نحدد نقطة لا على التعيين تقع على الخط او امتداده مع قراءة احداثياتها (Δt_N ،ΔP_N) ومنها نحسب معامل تخزين البئر C حسب المعادلات 52، 53، 54 فالقيمة بالتتابع C=0.0011 bbl/psi، 0.0019 ، 0.0016 . اختلاف القيم يعود الى ضعف في تحديد خط ميل الواحد المبكر.

يُمكن ايضا ان نحدد نقطة التقاطع ما بين خط الميل الواحد و الخط الافقي و نقرا احداثياتها (Δt_i ،ΔP_i) ومنها نحسب او نتحقق من معامل تخزين البئر و يساوي C=0.001 bbl/psi.

4- من الخط الافقي للجريان الشعاعي المتاخر نقرا $(\Delta P'*t)_{r2}$ و ΔP ثم نحسب عامل القشرة حسب المعادلة ادناه و يساوي :

$$s = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\Delta P}{t^*\Delta P'}\right)_{r2} - \ln\left(\frac{k_{fb}\, t_{r2}}{(\phi c_t)_{f+m}\mu r_w^2}\right) + 7.43\right] = -3.5$$

5- ان النسبة الزمنية t_{min}/t_x اعلى بكثير من عشرة

$t_{min}/t_x = 110 > 10$

لذا فلا نحتاج لاجراء تصحيح لاوطا قيمة لمشتقة الضغط $(\Delta P'*t)_{min}$ إذ لا يوجد تاثير لتخزين البئر على اوطا قيمة لمشتقة الضغط .

- نحسب قيمة ω حسب المعادلة رقم- 43 والتي تساوي ω=0.037 و لصعوبة تحديد وقت نهاية الخط الافقي الاول t_{e1} فيُمكن استخدام بداية الخط الافقي الثاني المعادلة رقم- 45 فان قيمة ω=0.058 . الاختلاف يعود بسبب اختيار بداية الخط الافقي الثاني و اذا اردنا ان نتحقق من قيمة الوقت t_{b2} نستخدم قيمة ω=0.037 في المعادلة الاتية:

$$\frac{50\, t_{e1}}{\omega(1-\omega)} = \frac{t_{b2}}{5(1-\omega)} = \frac{t_{min}}{\omega \ln(1/\omega)}$$

ينتج ان قيمة الوقت t_{b2} بالضبط سيكون بحدود .t_{r2}=41 hrs و يُعتبر مقبول حسب الرسم.

- حساب قيمة λ طبقا للمعادلة رقم- 48 والتي تساوي $\lambda = 2.2\times10^{-7}$ وتساوي $\lambda = 3.3\times10^{-7}$ حسب المعادلة رقم- 52.

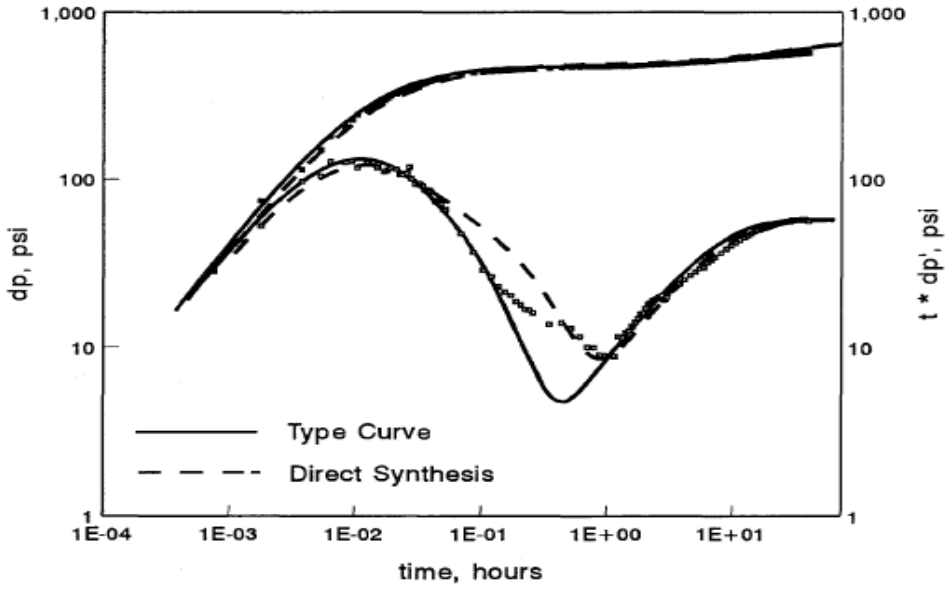
الجدول2-6 يُوضح مقارنة نتائج تفسير الفحص بطريقة TDS وطريقة تطابق المنحنيات Bourdet et al. ، والشكل2-32 يُوضح مقارنة لمنحنيات الضغط ومشتقة الضغط بالطريقتين مع البيانات الحقيقية.

Parameter	Type curve	Direct synthesis
k_2 (mD)	91.5	92.1
Skin	−3.6	−3.5
C (bbl/psi)	0.001	0.0011
$C_{D\omega}$	1,328	1,443
ω	0.015	0.037
λ	2.9×10^{-7}	2.75×10^{-7}

الجدول2-6: مقارنة نتائج تفسير فحص تصاعد الضغط Build-up بطرق مختلفة- المثال رقم-5

ملاحظة:

بطريقة TDS فان ω تُحسب من قراءة احداثيات نقطة عند اوطا قيمة لمشتقة الضغط والتي لم تتاثر بتخزين البئر(مصححة لتخزين البئر) . في تطابق المنحنيات يتم حجب الحد الأدنى من قيمة مشتقة الضغط لصالح تاثير تخزين الآبار عبر المدة المبكرة من الفحص. ان كلا الموديلين يفشلان في تحقيق موائمة المدة الانتقالية المبكرة و يحتمل ذلك لحدوث اثار اخرى غير تخزين البئر مثلا الاختراق الجزئي للطبقة او بسبب تاثير تخزين الشق.



الشكل2-32 : مقارنة تفسير الفحص للطريقتين ; طريقة تطابق المنحنيات النوعي و طريقة تياب TDS

مثال-6

اجرِ فحص تصاعد الضغط لبئر في حقل نفطي في ايران و المكمن من النوع المتشقق طبيعيا ، قِيست النفاذية من اللباب الصخري cores فتراوحت ما بين 4-6 md. فتح البئر للجريان بمعدل q=2300 stb/d لمدة 72 hrs ثم اغلق لفحص تصاعد الضغط.

بيانات الفحص أُدرجت في الجدول2-7:

و البيانات الاخرى المتوفرة أُدرجت ادناه:

h = 280 ft	t_p = 72 hrs
r_w = 0.281 ft	Bo = 1.35 bbl/STB
q = 2300 STB/day	μ = 0.68 cp
P_{wf} (Δt=0) = 2881 psi_a	φ = 0.15
$C_t = 1.5*10^{-5}$ psi^{-1}	

اعمل تفسير للفحص بالطريقتين – التقليدية (هورنر) و الطريقة التوليف المباشرة لتياب TDS ؟؟

الحل:

الطريقة التقليدية نصف لوغاريتمية:

1- نرسم بيانات الفحص على ورق نصف لوغاريتمي الشكل2-33 .

يُظهر الشكل2-33 ان نقاط الفحص المبكرة تتأثر بتخزين البئر، ومع ذلك يُمكن ملاحظة الخط المستقيم الأول بوضوح. كما و يُظهر الشكل ايضا خطين متوازيين يعكسان سلوك المسامية المزدوجة للمكمن المتشقق طبيعيا. لذا يُمكن استخدام التفسير نصف اللوغاريتم التقليدي لتحديد معاملات المكمن.

ميل الخط المستقيم (اي منهما) يساوي m= 224.9 psi/cycle .

المسافة العمودية ما بين الخطين المتوازية تساوي Δp=130 psi

- من منتصف المنطقة الانتقالية نرسم خط افقي سيقطع الخطين المستقيمة المتوازية في

$$(\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t})_1 = 17 \text{ ,}$$

$$(\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t})_2 = 4.3$$

2- حساب النفاذية للشق :

$$K_f = \frac{162.6 Q_o B_o \mu_o}{m\,h} = \frac{162.6*2300*1.35*0.68}{224.94*280}$$

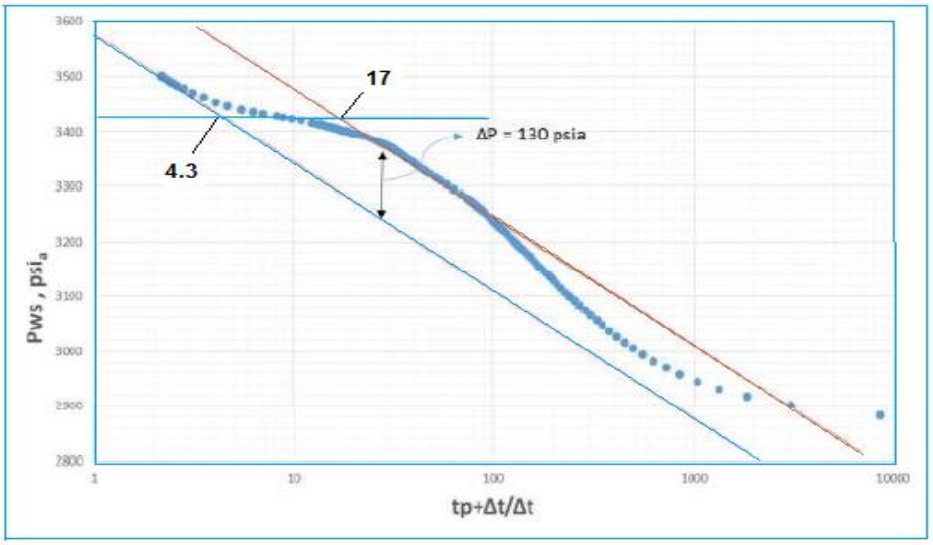
$$K_f = 5.45\,md$$

3- تخزين الشق النسبي ω يساوي:

$$\omega = 10^{-\frac{\Delta P}{m}} = 10^{-\frac{130}{224.94}} = 0.264$$

Δt, hr	Pws, psi,	Δt, hr	Pws, psi,	Δt, hr	Pws, psi,	Δt, hr	Pws, psi,	Δt, hr	Pws, psi,	Δt, hr	Pws, psi,
0.0083	2881.36	0.6958	3232.181	3.5083	3393.13	49.6083	3489.319	53.7333	3493.64	57.85831	3497.62
0.0236	2901.811	0.7111	3235.39	3.6917	3395.58	49.7	3489.42	53.825	3493.73	58.0417	3497.82
0.0389	2916.59	0.7264	3238.541	3.875	3397.719	49.7917	3489.53	53.9167	3493.82	58.1333	3497.92
0.0542	2930.591	0.7417	3241.54	4.0583	3399.63	49.8833	3489.64	54.0083	3493.9	58.22501	3498.01
0.0694	2943.96	0.7569	3244.51	4.2417	3401.311	49.975	3489.73	54.1	3494	58.3167	3498.09
0.0847	2957.04	0.7722	3247.36	4.425	3402.97	50.0667	3489.83	54.1917	3494.09	58.40829	3498.18
0.1	2969.7	0.7875	3250.16	4.6083	3404.551	50.15829	3489.92	54.28329	3494.18	58.5	3498.26
0.1153	2981.93	0.8028	3252.86	4.7917	3406.05	50.25	3490.02	54.375	3494.28	58.59171	3498.35
0.1306	2993.64	0.8181	3255.5	4.975	3407.46	50.34171	3490.1	54.46671	3494.38	58.6833	3498.46
0.1458	3004.94	0.8333	3258.031	5.1583	3408.77	50.4333	3490.2	54.5583	3494.48	58.77499	3498.55
0.1611	3015.88	0.8486	3260.509	5.3417	3410.051	50.525	3490.3	54.65	3494.55	58.8667	3498.611
0.1764	3026.45	0.8639	3262.871	5.525	3411.27	50.6167	3490.39	54.7417	3494.66	58.9583	3498.68
0.1917	3036.69	0.8792	3265.21	5.7083	3412.42	50.7083	3490.5	54.8333	3494.729	59.05	3498.74
0.2069	3046.611	0.8944	3267.4	5.8917	3413.56	50.8	3490.61	54.925	3494.829	59.14169	3498.83
0.2222	3056.219	0.9097	3269.49	6.3417	3415.769	50.8917	3490.7	55.0167	3494.909	59.23331	3498.93
0.2375	3065.5	0.925	3271.529	7.2583	3420.139	50.9833	3490.8	55.1083	3494.99	59.325	3499.03
0.2528	3074.41	0.9403	3273.47	8.175	3423.5	51.075	3490.9	55.2	3495.06	59.4167	3499.13
0.2681	3083.03	0.9556	3275.35	9.0917	3426.319	51.1667	3490.99	55.2917	3495.13	59.5083	3499.22
0.2833	3091.33	0.9708	3277.17	10.0083	3428.771	51.2583	3491.07	55.3833	3495.24	59.60001	3499.32
0.2986	3099.31	0.9861	3278.931	11.8417	3432.46	51.35	3491.18	55.475	3495.35	59.6917	3499.4
0.3139	3106.99	1.0014	3280.63	13.675	3436.14	51.4417	3491.27	55.5667	3495.46	59.78329	3499.471
0.3292	3114.41	1.0583	3285.92	16.0083	3439.83	51.53329	3491.35	55.65829	3495.55	59.875	3499.579
0.3444	3121.581	1.15	3294.58	19.675	3446.42	51.625	3491.44	55.75	3495.65	59.96671	3499.669
0.3597	3128.46	1.2417	3302.33	23.3417	3453.72	51.71671	3491.53	55.84171	3495.74	60.14999	3499.859
0.375	3135.1	1.3333	3309.449	28.5083	3462.21	51.8083	3491.64	55.9333	3495.82	60.2417	3499.92
0.3903	3141.47	1.425	3316.091	34.0083	3470.219	51.9	3491.72	56.02499	3495.92	60.3333	3499.98
0.4056	3147.66	1.5167	3322.179	39.5083	3477.331	51.9917	3491.81	56.1167	3496.01	60.425	3500.049
0.4208	3153.619	1.6083	3327.91	45.0083	3483.611	52.0833	3491.93	56.2083	3496.09	60.51669	3500.149
0.4361	3159.34	1.7	3333.5	48.05	3487.63	52.175	3492.04	56.3	3496.18	60.60831	3500.25
0.4514	3164.89	1.7917	3338.809	48.1417	3487.72	52.2667	3492.12	56.39169	3496.241	60.7	3500.339
0.4667	3170.231	1.8833	3343.921	48.2333	3487.81	52.3583	3492.22	56.48331	3496.32	60.7917	3500.44
0.4819	3175.35	1.975	3349.42	48.325	3487.91	52.45	3492.32	56.575	3496.39	60.8833	3500.519
0.4972	3180.36	2.0667	3354.88	48.4167	3488.02	52.5417	3492.42	56.6667	3496.49	60.97501	3500.611
0.5125	3185.159	2.1583	3359.47	48.5083	3488.14	52.6333	3492.52	56.7583	3496.6	61.0667	3500.701
0.5278	3189.819	2.25	3363.501	48.6	3488.251	52.725	3492.59	56.85001	3496.69	61.15829	3500.77
0.5431	3194.3	2.3417	3367.15	48.6917	3488.34	52.8167	3492.66	56.9417	3496.78	61.25	3500.87
0.5583	3198.67	2.4333	3370.341	48.78329	3488.43	52.90829	3492.75	57.03329	3496.87	61.34171	3500.96
0.5736	3202.86	2.525	3373.25	48.875	3488.52	53	3492.85	57.125	3496.96	61.4333	3501.04
0.5889	3206.909	2.6167	3375.851	48.96671	3488.61	53.09171	3492.96	57.21671	3497.04	61.52499	3501.12
0.6042	3210.85	2.7083	3378.29	49.0583	3488.731	53.1833	3493.08	57.3083	3497.13	61.6167	3501.179
0.6194	3214.66	2.8	3380.48	49.15	3488.839	53.275	3493.18	57.39999	3497.22	61.7083	3501.24
0.6347	3218.36	2.8917	3382.509	49.2417	3488.929	53.3667	3493.26	57.4917	3497.32	61.8	3501.31
0.65	3221.94	2.9833	3384.409	49.3333	3489.029	53.4583	3493.36	57.5833	3497.4	61.89169	3501.39
0.6653	3225.449	3.1417	3387.269	49.425	3489.121	53.55	3493.45	57.675	3497.471	61.98331	3501.479
0.6806	3228.84	3.325	3390.44	49.5167	3489.219	53.6417	3493.56	57.76669	3497.55	62.1667	3501.659

الجدول2-7: بيانات فحص تصاعد الضغط Build-up للمثال رقم-6



الشكل2-33 : بيانات فحص تصاعد الضغط بطريقة هورنر - المثال رقم-6

4- نحسب معامل الجريان البيني λ و يساوي :

$$\lambda_1 = \left(\frac{\omega}{1-\omega}\right)\left(\frac{(\phi\, h\, C_t)_m\, \mu\, r_w^{\,2}}{1.781\, k_f t_p}\right)\left(\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}\right)_1$$

$$= \left(\frac{0.264}{1-0.264}\right) * \left(\frac{0.15*280*1.5*10^{-5}*0.68*(0.281)^2}{1.781*5.45*72}\right)*17$$

$$\lambda_1 = 2.955*10^{-7}$$

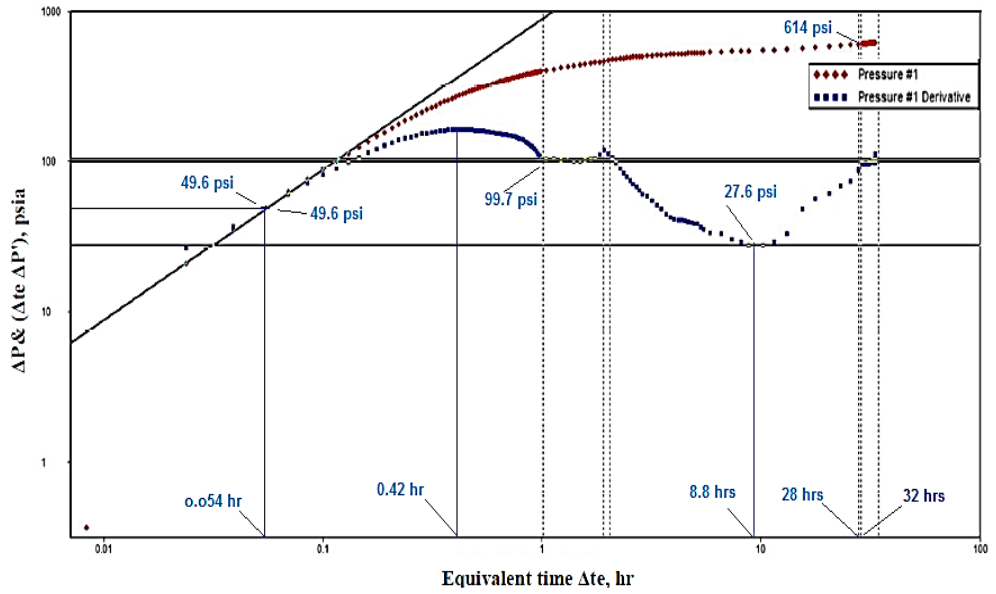
$$\lambda_2 = \left(\frac{1}{1-\omega}\right)\left(\frac{(\phi\, h\, C_t)_m\, \mu\, r_w^{\,2}}{1.781\, k_f t_p}\right)\left(\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}\right)_2$$

$$= \left(\frac{1}{1-0.264}\right) * \left(\frac{0.15*280*1.5*10^{-5}*0.68*(0.281)^2}{1.781*5.45*72}\right)*4.3$$

$$\lambda_2 = 2.828*10^{-7}$$

الحل بطريقة تياب -TDS

1- رسم بيانات الفحص على ورق لوغاريتمي الاحداثي الصادي يمثل فرق الضغط و مشتقة الضغط مضروب بالوقت المكافىء Δt_e و الاحداثي السيني يمثل الوقت المكافىء $\Delta t_e=((t_p+\Delta t)/ t_p)\Delta t$ (الشكل2-34) ، واضح من الشكل و جود تاثير تخزين البئر في المدة المبكرة من الفحص والتي شكلت البيانات خطا مستقيما بميل الواحد .



الشكل2-34 : تفسير بيانات الفحص بطريقة (TDS)- المثال رقم-6

ثم مدة التدفق الشعاعي المبكرة محددة بشكل جيد عبر الخط الافقي الاول ، ومع ذلك فإن مدة التدفق الشعاعي المتأخرة محدودة جدا و لا تستمر لمدة طويلة و بينهما المنطقة الانتقالية. البيانات تُظهر سلوكًا فريدًا يشير إلى وجود مكمن متشقق طبيعي.

2- من الرسم نحدد الخطوط المستقيم و بحسب طريقة تياب ثم نؤشر بعض النقاط المميزة المطلوبة للحل باحداثياتها و هي:

$(t^*\Delta P'_w)_{r2} = 99.7$ psia $\quad t_{r2} = 32$ hr $\quad \Delta P_{r2} = 614$ psia

$(t^*\Delta P'_w)_{min} = 27.56$ psia $\quad t_{min} = 8.8$ hr

$(t^*\Delta P'_w)_{US} = 49.6$ psia $\quad t_{us} = 0.054$ hr $\quad \Delta P_{us} = 49.6$ psia

$t_{b2} = 28$ hr $\quad t_x = 0.42$ hr

ان الرمز ΔP_{us} pressure on unit slope يشير الى قيمة الضغط عند اي نقطة تقع على احداثي ميل الواحد ضمن تاثير منطقة تخزين البئر و كذلك t_{us} time on unit slope يشير الى قيمة الوقت.

3- نحدد فيما لو ان تخزين البئر يؤثر على اوطا قيمة للضغط او لا. يحصل ذلك عبر اختبار النسبة $t_{min}/t_x>10$ إذ ان t_{min} تُمثل قيمة للوقت عند اوطا قيمة لمشتقة الضغط في المنطقة الانتقالية ، و ان t_x تُمثل قيمة للوقت عند الذروة(القمة) peak لتاثير تخزين البئر .

$t_{min}/t_x = 8.8/0.42 = 20.95$ (>10)

اذن اوطا قيمة للضغط هي حقيقية و غير متاثرة بتخزين البئر.

4- حساب نفاذية الشق تساوي:

$$K_f = \frac{70.6q\mu Bo}{h(Pr'*t)_r} = \frac{70.6*2300*0.68*1.35}{280*99.7}$$
$$= 5.339 \text{ md}$$

5- حساب معامل تخزين البئر يساوي:

$$C = \left(\frac{qB_o}{24}\right)\frac{t}{\Delta p}$$
$$= \frac{2300*0.68}{24} * \frac{0.054}{49.6} = 0.14085 \text{ bbl/psi}$$

6- عامل القشرة يُحسب عند الخط الافقي الثاني اي مدة الجريان الشعاعي للنظام المسامي ككل ، عندها نجد قيمة الضغط و مشتقة الضغط :

$$S = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\Delta P_{wf}}{\Delta P'_{wf} * t}\right)_r - \ln\left(\frac{k_f t_r}{S_T \mu r_w^2}\right) + 7.43\right]$$
$$= \frac{1}{2}\left[\frac{614}{99.7} - \ln\left(\frac{5.339*32}{2.25*10^{-6}*0.68*0.281^2}\right) + 7.43\right]$$
$$S = -3.74$$

لاحظ ان S_T هنا يمثل التخزين الكلي ويساوي:

S_T=total or bulk storage= $\emptyset \times c_t = 0.15 \times 1.5 \times 10^{-6} = 2.25 \times 10^{-6}$

7- معامل نسبة تخزين الشق ω يساوي:

$$\omega = 0.15866\left(\frac{(\Delta P'wf * t)_{min}}{(\Delta P'wf * t)_r}\right) + 0.54653\left(\frac{(\Delta P'wf * t)_{min}}{(\Delta P'wf * t)_r}\right)^2$$
$$= 0.15866\left(\frac{27.56}{99.7}\right) + 0.54653\left(\frac{27.56}{99.7}\right)^2$$
$$\omega = 0.0856$$

8- نحسب معامل الجريان البيني λ و يساوي :

$$\lambda = \frac{S_T \mu r_w^2}{0.0002637 k_f} \frac{\omega \ln 1/\omega}{t_{min}}$$
$$= \frac{2.25*10^{-6}*0.68*0.281^2}{0.0002637*5.339} \frac{0.0856*\ln 1/0.0856}{8.8}$$
$$\lambda = 2.051 * 10^{-6}$$

9- للتحقق من القيمة λ اعلاه نستخدم المعادلة رقم-48 بدلالة اوطا قيمة لدالة مشتقة الضغط و الوقت المقابل لها و كما يأتي:

$$\lambda = \frac{42.5hS_T r_w^2}{qB_o}\left(\frac{\Delta P' * t}{t}\right)_{min}$$

$$= \frac{42.5*280*2.25*10^{-6}*0.281^2}{2300*1.35}\ \frac{27.56}{8.8}$$

$$= 2.132 * 10^{-6}$$

10- نتائج كلا الطريقتين أُدرجت في الجدول2-8 ادناه مع نتائج طريقة تطابق المنحنيات والتي جرت باستخدام البرامج الجاهزة . لغرض المقارنة فان النفاذية متقاربة لكل الطرق لكن الطريقة التقليدية تبتعد عند حساب كلا من ω و λ ، نتائجها ليس بدقة طريقة تياب و تطابق المنحنيات إذ اعطيتا نتائج متقاربة مما يعزز الثقة بنتائجهما .

Parameter	Conventional semi-log	Direct synthesis	Software matching
K_f (md)	5.45	5.339	5.375
ω	0.264	0.0856	0.0865
λ	$2.955*10^{-7}$-$2.828*10^{-7}$	$2.051*10^{-6}$-$2.132*10^{-6}$	$2.012*10^{-6}$
S		- 3.74	-3.71
C (bbl/psi)		0.14085	0.1453

الجدول2-8: مقارنة نتائج تفسير فحص تصاعد الضغط Build-up - المثال رقم-6

10-2 حساب بعض خواص الشق من تخطيط (مجسات) الابار-well logs :

- إذا كان النفط موجودا في كل من النسيج الصخري والشقوق، فإن إجمالي حجم النفط في المكمن يساوي:

$$N_{ot}(STB) = N_{om} + N_{of} \quad \text{---------- } 66$$

إذ أن N_{om} و N_{of} هما أحجام النفط النسيج الصخري والشقوق على التوالي و تساوي بالبراميل:

$$N_{om} = \frac{7{,}758Ah\phi_m(1 - S_{wm})}{B_o} \quad \text{---------- } 67$$

$$N_{of} = \frac{7{,}758Ah\phi_f(1 - S_{wf})}{B_o} \quad \text{---------- } 68$$

إذ ان

A = surface area of the reservoir, acres
h = average reservoir thickness, ft
ϕ_f = fracture porosity, fraction
ϕ_m = matrix porosity, fraction
S_{wf} = water saturation in fractures, fraction. In fractures, capillary pressure is practically negligible, which means S_{wf} will be very small ($\approx 0.25\ S_{wm}$)
S_{wm} = water saturation in matrix, fraction
B_o = oil formation volume factor, bb1/STB

Field	Width Range (mm)	Average	Spacing/Frequency
Spraberry	0.33 max.	0.051	Few inches to a few feet
Selected dam sites	0.051–0.10		4–14 ft
La Paz-Mara field	6.53 max.		
Small joints	0.01–0.10		
Extension fractures	0.1–1.0	0.2	
Major extension fractures	0.2–2		
Monterey		0.01	3–36 ft

الجدول2-9: مديات عرض الشق لبعض الحقول في العالم

حجم النفط الموجود في الشقوق يعتمد على مسامية الشق ، عرض الشق و المسافة ما بين الشقوق المتجاورة (spacing) ، الجدول2-9 يُوضح مديات عرض الشقوق لبعض الحقول.
مسامية الشق Φ_f تساوي النسبة ما بين الحجم المسامي V_{pf} للشقوق الى الحجم الكلي V_{bf} اي ان :

$$\phi_f = \frac{V_{Pf}}{V_{bt}} \quad \text{---------- 69}$$

المسامية الكلية تساوي :

$$\phi_t = \phi_f + \phi_m = \frac{V_{pf}}{V_{bt}} + \frac{V_{pm}}{V_{bm}} = \frac{V_{pf}}{V_{bt}} + \frac{V_{pm}}{(1-\phi_f)V_{bt}} \quad \text{---------- 70}$$

يُمكن تحديد مسامية الشق من تخطيط (مجسات) الابار (well logs) إذ ان المجس الصوتي Sonic log يقرأ مسامية النسيج الصخري matrix و لا يقرا المسامية الثانوية (caving and fractures) ، عكس مجس النيوترون Neutron log فانه يقرا المسامية الكلية للنسيج الصخري و الشقوق معا فالفرق بينهما يمثل مسامية الشقوق و كما يأتي:

$$\phi_f = \phi_{Neu} - \phi_{Son} \quad \text{---------- 71}$$

Φ_{sonic} - sonic log only measures the matrix porosity.

Φ_{Neu} – neutron porosity is the combination of both the matrix and fracture porosity.

- مؤشر كثافة الشقوق Fracture Intensity Index-FII بالقرب من فالق fault يساوي:

$$FII = \frac{1/R_{xo} - 1/R_t}{1/R_{mf} - 1/R_w} \quad \text{---------- 72}$$

إذ ان R_{xo}،R_{mf}،R_t،R_w تُمثل على التوالي مقاومة المنطقة المغمورة براشح الطين و مقاومة راشح الطين و مقاومة الطبقة المكمنية و مقاومة الماء.

منه يُمكن حساب عرض w_f و نفاذية الشق k_f بوجود المسامية الكلية Φ_t و مؤشر كثافة الشقوق FII و التشبع المائي المتبقي Swi و كما يأتي:

$$w_f = \frac{0.064}{\phi_t}[(1 - S_{wi})\,FII]^{1.315} \quad \text{---------- 73}$$

$$k_f = 1.5 \times 10^7 \phi_t [(1 - S_{wi})\,FII]^{2.63} \quad \text{---------- 74}$$

Porosity، FII، and irreducible water saturation are in fractions.
Fracture width and fracture permeability in cm and mD،respectively.

11-2 حساب مسامية الشق ، عرض الشق و معدل نفاذية المكمن:

- **مسامية الشق - φ_f :** بمجرد ان تحدد قيمة ω فيُمكن تقدير مسامية الشق φ_f إذا كانت مسامية و انضغاطية النسيج الصخري φ_m c_{tm} معلومة، و الانضغاطية الكلية للشق c_{tf} معلومة فان مسامية الشق تساوي:

$$\phi_f = \left(\frac{\omega}{1-\omega}\right)\frac{c_{tm}}{c_{tf}}\phi_m \quad \text{----------75}$$

لاحظ ان انضغاطية النسيج الصخري تختلف عن الانضغاطية الكلية للشق فلا يُمكن ان تتساويان $c_{tf} \neq c_{tm}$. ان انضغاطية الشق في حقلي كركوك (العراق) و الاسمري(ايران) تتراوح $4x10^{-4}$ to $4x10^{-5}$ psi^{-1}. وان قيم هذه الانضغاطية تزيد عن انضغاطية النسيج الصخري بـ 10-100 مرة .

❖ الانضغاطية الكلية للشق c_{tf} ممكن حسابها من المعادلة الاتية:

$$c_{tf} = \frac{1-(k_f/k_{fi})^{1/3}}{\Delta P} \approx \frac{1-(k_f/k_{fi})}{3\Delta P} \quad \text{---------- 76}$$

❖ بتعويض المعادلة اعلاه في معادلة مسامية الشق رقم-75 ينتج:

$$\phi_f = \phi_m c_{tm}\left(\frac{\omega}{1-\omega}\right)\frac{\Delta P}{\left(1-(k/k_i)^{2/3}\right)} \quad \text{---------- 77}$$

k_{fi} Fracture permeability at the initial reservoir pressure *pi*
k_f Fracture permeability at the current average reservoir pressure.
Φ_m matrix porosity
C_{tm} total matrix compressibility
C_{tf} total fracture compressibility

❖ **معدل النفاذية k :** ان المعدل الهندسي لنفاذية المكمن المتشقق طبيعيا Naturally fractured reservoir يساوي:

$$k = \sqrt{k_{max} k_{min}} \quad \text{---------- 78}$$

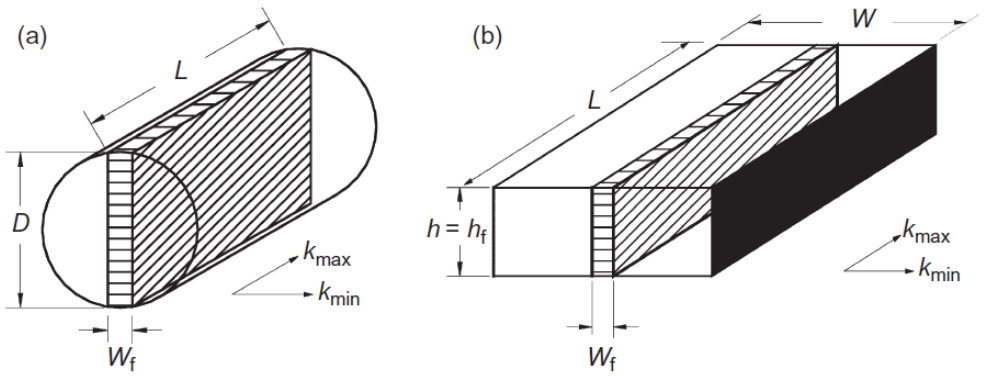
إذ ان النفاذية العليا k_{max} تُمثل نفاذية الشق و تساوي k_f و النفاذية الدنيا k_{min} تُمثل النفاذية العمودية على اتجاه الشق و التي تعكس نفاذية النسيج الصخري *km* و كما موضحة في الشكل2-35 لنظامي المكمن الاسطواني و المستطيل.

❖ تصبح معدل نفاذية المكمن:

$$k = \sqrt{k_f k_m} \quad \text{---------- 79}$$

❖ من الممكن استخدام المعادلة اعلاه في تحديد نفاذية الشق كما يأتي:

$$k_f = \frac{k^2}{k_m} \quad \text{---------- 80}$$



الشكل2-35 : مخطط يُوضح اتجاه النفاذية القصوى و الدنيا لنظامي المكمن الاسطواني و المستطيل

إذ يجب ان تتوفر قيمة *km* من القياسات المختبرية للباب الصخري cores و نفاذية المكمن *k* من فحوصات الابار. يُمكن استخدام العلاقة اعلاه مع المعادلة رقم-76 في ايجاد الانضغاطية الكلية للشق c_{tf} كما يأتي:

$$c_{tf} = \frac{1-(k/k_i)^{2/3}}{\Delta P} \quad \text{---------- 81}$$

إذ ان :

$$\Delta P = P_i - \overline{P} \quad \text{---------- 82}$$

او تُمثل فرق الضغط بين فترتي فحصين على ان تكون نوعا ما مدة طويلة و تساوي:

$$\Delta P = \overline{P_1} - \overline{P_2} \quad \text{---------- 83}$$

- لاحظ ان معدل نفاذية المكمن المتشقق المحسوبة من فحص الابار هي القيمة نفسها من ما يلي:

$$k \approx k_m + \phi_f k_f \quad \text{---------- 84}$$

- **عرض الشق w_f :** عرض فتحة الشق Fracture width or aperture w_f يُمكن حسابه من ما يلي:

$$w_f = \sqrt{\frac{k_f}{33\omega\phi_t}} \quad \text{---------- 85}$$

W_f fracture width microns، k_f fracture permeability mD، porosity fraction، and ω storage capacity fraction.

مثال-7

أسفرت فحوصات الآبار القليلة الأولى المحفورة في مكمن متشقق طبيعيا عن متوسط نفاذية للمكمن بحدود 85 مللي دارسي. و ان نتائج فحص تداخل الابار Interference test اعطت متوسط نفاذية المكمن مقارب ، مما يعني أن الشقوق موزعة بشكل منظم. يُمكن فقط تحديد المسامية والنفاذية والانضغاط للنسيج الصخري من اللباب الصخري. يظهر في الاشكال رقم2-36- و رقم2-37 سلوك الضغط ومشتقة الضغط لفحص تصاعد الضغط Pressure build-up الأخير الذي تم إجراؤه في البئر. مقدار انخفاض الضغط من ضغط المكمن الأولي إلى متوسط ضغط المكمن الحالي هو 974.5 psia. ادناه خواص المكمن والسوائل والبئر:

$h = 1{,}150$ ft,	$r_w = 0.292$ ft,	$\mu = 0.47$ cP,
$B_o = 1.74$ RB/STB,	$q = 17{,}000$ STB/D,	$k_m = 0.15$ mD,
$c_{tm} = 4.15 \times 10^{-5}$ psi^{-1},	$\phi_m = 14\%$	

باستخدام الطريقة التقليدية –تحليل خط Semilog وتقنية TDS، احسب ما يلي:

1- أ. نفاذية التكوين ب. نسبة سعة التخزين ω ج. معامل جريان السوائل λ.

2. تحديد خصائص الشق الاتية: (أ) النفاذية، (ب) المسامية، (ج) العرض،و (د) أبعاد كتلة النسيج الصخري.

الحل:

الطريقة التقليدية

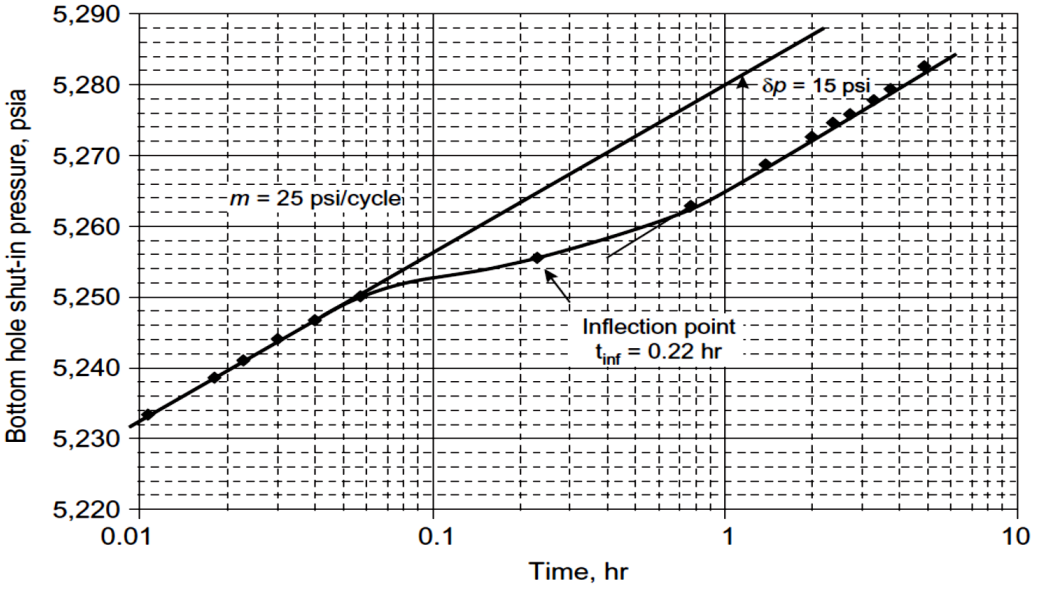
1- نلاحظ من الشكل2-36 وجود خطين متوازية دليل على ان الطبقة او المكمن تحت الفحص من النوع المتشقق طبيعيا. نحدد فرق الضغط ما بين الخطين ، ميل احدى الخطين و الوقت عند نقطة الانقلاب في المنطقة الانتقالية و كالاتي:

Δt_{inf} 50.22 hr، m=525 psi/log cycle،ΔP=515 psi

2- نحسب معدل نفاذية المكمن يساوي:

$$k = \frac{162.6 q \mu B_o}{mh} = \frac{162.6 \times 17{,}000 \times 0.47 \times 1.74}{25 \times 1{,}150} = 78.6 \text{ mD}$$

3- نحسب معامل التخزين للمائع ω storage coefficient يساوي:



الشكل2-36 : تفسير بيانات الفحص بالطربقة التقليدية نصف لوغاريتمية - المثال رقم-7

$$\omega = \exp\left(-2.303 \frac{\partial P}{m}\right) = \exp\left(-2.303 \frac{15}{25}\right) = 0.25$$

هذا يعني ان تخزين الشق يمثل 25% من الحجم الكلي لمسامات المكمن .

4- حساب سعة خزن المكمن (ضرب المسامية في الانضغاطية) يساوي:

$$(\phi c_t)_{f+m} = (\phi c_t)_m \left(1 + \frac{\omega}{1-\omega}\right)$$

$$= (0.14 \times 0.0000415) \times \left(1 + \frac{0.25}{1-0.25}\right) = 7.75 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$$

5- اذن المعامل λ يساوي:

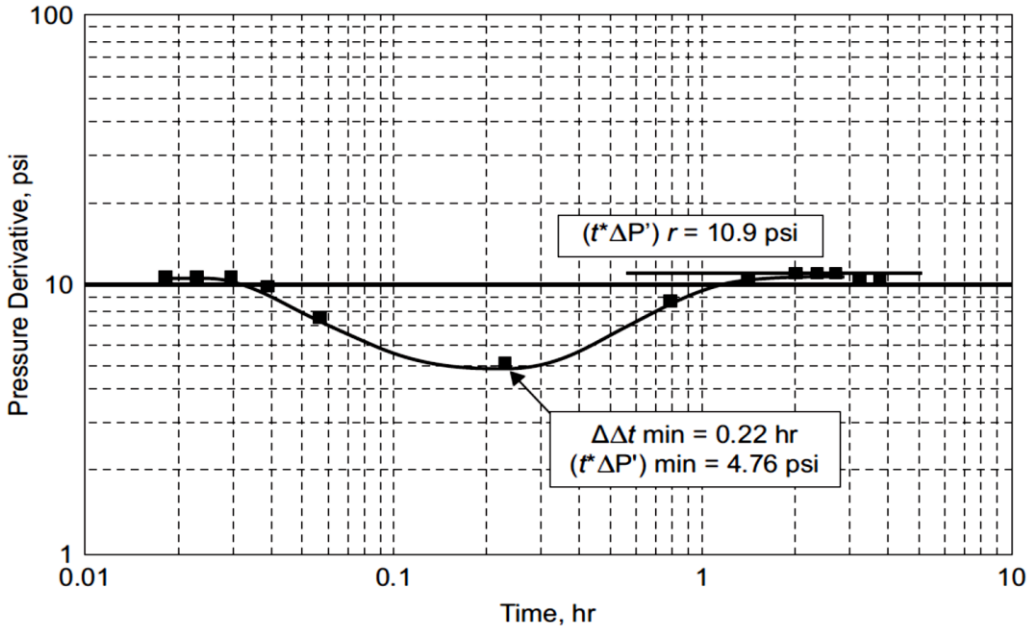
$$\lambda = \frac{3{,}792 (\phi c_t)_{f+m} \mu r_w^2}{k_f \Delta t_{inf}} \left(\omega \ln\left(\frac{1}{\omega}\right)\right)$$

$$\lambda = \frac{3,792 \times 7.545 \times 10^{-6} \times 0.47 \times 0.292^2}{78.6 \times 0.22}\left(0.25 \ln\left(\frac{1}{0.25}\right)\right) = 2.3 \times 10^{-5}$$

طريقة تياب

❖ نلاحظ من الشكل2-37 وجود تقعر بمنحني مشتقة الضغط دليل على ان الطبقة او المكمن تحت الفحص من النوع المتشقق طبيعيا. نحدد من الرسم المعلومات الاتية:

$\Delta t_{min} = 0.22$ hr $\quad (t \times \Delta P')_R = 10.9$ psia $\quad (t \times \Delta P')_{min} = 4.76$ psia



الشكل2-37 : تفسير بيانات مشتقة الضغط بطريقة تياب (TDS)- المثال رقم-7

❖ حساب النفاذية الكلية للمكمن:

$$k = \frac{70.6 q \mu B_o}{h(t \times \Delta p')_R} = \frac{70.6 \times 17,000 \times 0.47 \times 1.74}{1,150 \times 10.9} = 78.3 \text{ mD}$$

❖ حساب قيمة المعامل λ:

$$\lambda = \left(\frac{42.5 h(\phi c_t)_{m+f} r_w^2}{q B_o}\right)\frac{(t \times \Delta p')_{min}}{\Delta t_{min}}$$

$$= \left(\frac{42.5 \times 1,150 \times 1.4 \times 10^{-6} \times 0.292^2}{17,000 \times 1.74}\right)\frac{4.76}{0.22} = 2.30 \times 10^{-5}$$

❖ حساب معدل نفاذية الشق fracture permeability عند الظروف الحالية:

$$k_f = \frac{k^2}{k_m} = \frac{78.6^2}{0.15} = 41{,}186 \text{ mD}$$

- حساب نفاذية الشق عند ظروف المكمن الابتدائية اي عند الضغط الاصلي للمكمن Pi initial reservoir pressure:

$$k_{fi} = \frac{k^2}{k_m} = \frac{85^2}{0.15} = 48{,}166 \text{ mD}$$

لماذا الاختلاف في قيمتي النفاذية؟؟

❖ حساب انضغاطية الشق fracture compressibility :

$$c_{tf} = \frac{1 - (k_f/k_{fi})^{2/3}}{\Delta P} = \frac{1 - (41{,}216/48{,}166)^{2/3}}{974.5} = 1.01 \times 10^{-4} \text{ psi}^{-1}$$

❖ حساب الانضغاطية الكلية (الشق fracture+ النسيج الصخري matrix) :

$$c_{tmf} = c_{tf} + (1-\omega)c_{tm} = 1.01 \times 10^{-4} \times 0.23 + (1 - 0.23) \times 4.15 \times 10^{-5}$$
$$= 5.52 \times 10^{-5} \text{ psi}^{-1}$$

❖ نجد نسبة الانضغاطية compressibility ratio :

$$\frac{c_{tf}}{c_{tm}} = \frac{1.01 \times 10^{-4}}{4.15 \times 10^{-5}} = 2.45$$

هذا يعني ان انضغاطية الشق fracture اعلى من انضغاطية النسيج الصخري matrix بـاكثر من الضعف اي 2.45 مرة.

❖ حساب مسامية الشق fracture porosity :

$$\phi_f = \left(\frac{\omega}{1-\omega}\right)\frac{c_{tm}}{c_{tf}}\phi_m = \left(\frac{0.25}{1-0.25}\right)\frac{0.14}{24.4} = 0.017 = 1.7\%$$

❖ حساب المسامية الكلية للمكمنtotal porosity:

$$\phi_t = \phi_m + \phi_f = 0.14 + 0.017 = 0.157$$

❖ حساب عرض الشق fracture width:

$$w_f = \sqrt{\frac{k_f}{33\omega\phi_t}} = \sqrt{\frac{41{,}186}{33 \times 0.25 \times 0.157}} = 178 \text{ microns} = 0.178 \text{ mm}$$

❖ بفرض ان موديل المكمن المتشقق شكل كتل مكعبة حسب وارن - روت Warren and Root sugar cube model فان طول ضلع المكعب يساوي :

$$X_m = r_w\sqrt{\frac{60k_m}{\lambda k_f}} = 0.298\sqrt{\frac{60 \times 0.15}{2.3 \times 10^{-5} \times 41{,}186}} = 2.9 \text{ ft}$$

Nomenclature – المصطلحات و الرموز

B	oil volume factor, bbl/STB
b	fraction of penetration/completion
c	compressibility, 1/psia
C	wellbore storage coefficient, bbl/psia
$D1$	minimum point correction parameter
$D2$	minimum point correction parameter
c_t	total or system compressibility, 1/psia
h	formation thickness, ft
k_{ef}	bulk fractured network permeability, md
m	slope of P-vs-log t plot, psia/h/cycle
P	pressure, psia
$P_D{}'$	dimensionless pressure derivative
P_D	dimensionless pressure
P_i	initial reservoir pressure, psia
P_{wf}	well flowing pressure, psia
P_{ws}	well shut-in or static pressure, psia
P_{1hr}	intercept of the semilog plot, psia
P^*	false pressure, psia
q	liquid flow rate, BPD
r_D	dimensionless radius
r	radius, ft
r_w	well radius, ft
s	skin factor
t	time, h
t_p	production (Horner) time before shutting-in a well, h
t_D	dimensionless time based on well radius
t^*DP'	pressure derivative, psia
V	volume, ft^3

Greek

α	shape factor
Δ	change, drop
Δt	shut-in time, h
∂P	parallel difference between the two radial flow regime slopes, psia
ϕ	porosity, fraction
λ	interporosity flow coefficient
μ	viscosity, cp
ρ	fluid density, lbm/ft^3
ω	dimensionless storativity coefficient

Suffices

1	intercept between first semilog radial flow and the transition line
1*hr*	time of 1 h
2, *I*	intercept between second semilog radial flow and the transition line
*b*2	start of second radial flow regime
D	dimensionless
*e*1	end of first radial flow regime
F	inflection
f	fracture network
i	intersection or initial conditions
N	an arbitrary point during early pseudosteady-state period
m	matrix
max	maximum point
min	minimum point
minO	observed minimum point
r	radial flow
r_1	radial flow before transition period
r_2	radial flow after transition period
s	skin
usi	intersect of the pressure derivative lines of the unit-slope line during the transition and second radial flow regime
w	well
wf	well flowing
ws	well shut-in

References – المصادر

1- Amanat U. Chaudhry ، "Oil Well Testing Handbook " ، Advanced TWPSOM Petroleum Systems، Inc. Houston، Texas ، Gulf Professional Publishing ، Copyright © 2004، Elsevier Inc.

2- BOURDET، D.، ALAGOA، A.، AYOUB، J.A.، and PIRARD، Y.M. (1984). "New type curves aid analysis of fissured zone well tests". World Oil، Apr.، 111–124.

3- Bourdet، D. and Gringarten، A.C. (1980). "Determination of fissure volume and block size in fractured reservoirs by type-curve analysis،" SPE Paper 9293، Presented at the 1980 Annual Technical Conference and Exhibition،Dallas، Sept. 21–24.

4- Cinco-Ley H، Samaniego F. "Transient pressure analysis for fractured wells،" Society of Petroleum Engineers، 1981.DOI: 10.2118/7490-PA.

5- Dominique Bourdet، " Well Test Analusis: The Use Of Advanced Interpretation Models"، 9 2002 Elsevier Science B.V.

6- Engler T، Tiab D. "Analysis of pressure and pressure derivative without type curve matching، 4 Naturally fractured reservoirs،"Journal of Petroleum Science and Engineering، 1996;15:127-138.
7- Freddy Humberto Escobar Macualo،" Novel، Integrated and Revolutionary Well Test Interpretation and Analysis"، IntechOpen @ 2018.
8- Gringarten، A. (1987). "Type curve analysis،" J. Pet. Technol.،Jan.، 11–13
9- KAZEMI، H. (1969)، "Pressure transient analysis of naturally fractured reservoirs with uniform fracture distribution".، SPE J.، Dec.، 451–462
10- Kittiphong Jongkittinarukorn، Freddy Escobar، "Practical interpretation of Pressure tests of hydraulically fractured vertical wells with finite – conductivity in naturally fractured oil and gas formations،" Journal of Petroleum Exploration and Production Technology -2021،11:3277-.
11- Medhat M. Kamal "Transient Well Testing "، Monograph SPE © Copyright 2009 Society of Petroleum Engineers.
12- Peyman Rostami · Mohammad Sharifi · Morteza Dejam، "Shape factor for regular and irregular matrix blocks in fractured porous media" ، Petroleum Science (2020) 17:136–152.
13- Roland N. Horne "Modern Well Test Analysis ، A computer-Aided Approach" Copyright@1990، by Petroway،Inc.
14- Sabet M. A.، " Well Test Analysis" ، Gulf Publishing Company ، Houstan،1991.
15- Tarek Ahmed ، Paul D. McKinney ، "Advanced Reservoir Engineering" ، Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier ، 2005
16- Thomas Engler * ، Djebbar Tiab، "Analysis of pressure and pressure derivative without type curve matching، 4. Naturally fractured reservoirs،" Journal of Petroleum Science and Engineering 15 (1996) 127- 138
17- Thomas W. Engler ،and Djebbar Tiab ، "Interpretation of Pressure Tests in Naturally Fractured Reservoirs Without Type Curve Matching ،"SPE ، Copyright 1996 ،Society of Petrolemn Engineers.
18- Tiab D.، D.P. Restrepo، and A. Igbokoyi، "Fracture Porosity of Naturally Fractured Reservoirs،" SPE 104056، Copyright 2006، Society of Petroleum Engineers
19- Tiab D، Igbokoyi AO، Restrepo DP."Fracture porosity from pressure transient data". International Petroleum Technology Conference. 2007. DOI: 10.2523/IPTC-11164-MS.
20- Tiab Djebbar Erle C. Donaldson ، "Petrophysics Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties" ،Fourth Edition ، #2016 Elsevier Inc.
21- WARREN، J.E. and ROOT، P.J. (1963). "The behavior of naturally fractured reservoirs". SPE J.، Sept.، pp. 245–255.

الفصل الثالث

فحوصات حقن الابار Injection Well Testing

1-3 المقدمة:

تُعد فحوصات حقن الآبار (Injection Well Testing) من الأساليب التحليلية الأساسية لتقييم أداء الطبقة المكمنية و أداء الآبار التي تُحقن فيها الموائع (مثل حقن الماء أو الغاز أو البوليمرات أو في تصريف المياه المصاحبة للنفط المنتج (Produced Water Disposal)).

2-3 أهمية فحوصات الحقن Important of Injection Testing

تكمن أهمية فحوصات الحقن في تحقيق الأهداف الاتية:

1- تحديد خصائص المكمن والتي تشمل:

- نفاذية الطبقة المكمنية (k) لتقييم مدى سهولة مرور الموائع عبر الطبقة.
- عامل القشرة (s): لتقدير تأثير المنطقة القريبة من البئر على الجريان.
- معدل الضغط المكمني المتوسط ($\bar{P}$): والذي يُعد مؤشراً على طاقة المكمن.
- تقييم درجة تعقيد المكمن : عبر تحليل سلوك الضغط خلال مدة الحقن.

2- تقييم قابلية المكمن للحقن (Injectivity) من خلال حساب مؤشر الحقن (Injectivity Index) الذي يعكس مدى كفاءة المكمن في استقبال موائع الحقن.

3- مراقبة الضغوط وتحديد ضغط التشقق (Fracture Pressure) و لتحديد الحد الأعلى لضغط الحقن الآمن لتجنب حدوث تشققات غير مرغوب فيها ، خاصة عند زيادة معدلات الحقن.

4- دعم عمليات الاستخلاص الثانوي والثالثي:(Secondary & Tertiary Recovery) .

5- تحديد مسافة تقدم جبهة المائع المحقون خصوصاً في حالة الحقن اللا امتزاجي (Immiscible) بين الماء والنفط.

6- تحديد ضغط أو قابلية الامتزاج (Miscibility Pressure) في حالة الحقن الامتزاجي للغاز في الطبقة النفطية.

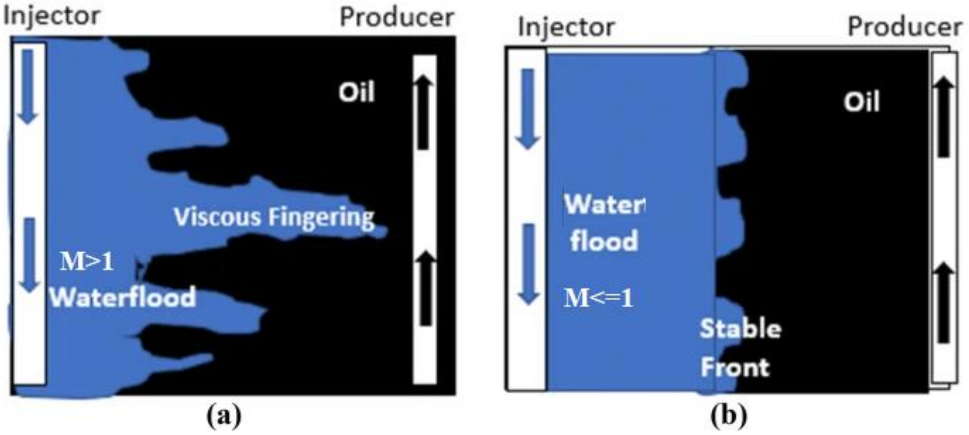
تُصنّف فحوصات الحقن ضمن فحوصات انتقال الضغط (Transient Pressure Tests) ، ويُمكن تفسيرها باستخدام الأساليب نفسها في تحليل فحوصات الآبار الإنتاجية، بشرط تحقق شرطين أساسيين:

1- أن تكون نسبة الانسيابية (Mobility Ratio) مساوية للواحد M=1 .

وتُعرف نسبة الانسيابية (Mobility Ratio-M) بانها النسبة ما بين انسيابية المائع المحقون مثلا الماء k_w/μ_w الى انسيابية المائع المكمني مثلا النفط k_o/μ_o اي ان نسبة الانسيابية M تساوي:

$$M = \frac{(k/\mu)_w}{(k/\mu)_o} \quad \text{--------- 1}$$

إذ ان k_o ، k_w، تُمثل نفاذية النفط و الماء و ان μ_o،μ_w تُمثل لزوجة النفط و الماء على التوالي.



الشكل3-1 : a- جبهة حقن الماء -غير المستقرة **b-** جبهة حقن الماء -المستقرة

2- أن تكون المنطقة القريبة من البئر مشبعة بالكامل بمائع الحقن (مثل الماء).

يتحقق الشرط هذا في العديد من المكامن التي يجري فيها حقن الماء لتحسين الإنتاج، أما إذا اختلفت نسبة الانسيابية عن الواحد أي M≠1 ، فإن طرق التفسير الاعتيادية لا تكون دقيقة، ويجب اللجوء إلى نماذج تحليلية أكثر تعقيدًا سيتم مناقشتها لاحقًا.

أثر نسبة الانسيابية M على كفاءة الإزاحة:

تُعتبر M مؤشر لكفاءة الازاحة :

- فاذا كانت M=<1 فان كفاءة ازاحة النفط بالماء ستكون عالية و تُشبه جبهة الحقن على انها جبهة حادة و مستقرة كالمكبس Piston like و تكون المنطقة الانتقالية ما بين منطقتي الماء والنفط محدودة جدا و ضيقة الشكل3-1-b.

- اذا كانت M >1 فان كفاءة الازاحة تكون واطئة ، إذ يتغلغل المائع المُزيح (الماء) و ينساب عبر المائع المُزاح (النفط) مكونا ظاهرة التصبع او القنوات fingering or channeling الشكل3-1-a و يترتب على ذلك ظهور منطقة انتقالية، transition zone ملحوظة ما بين منطقتي المائع المُزيح و المُزاح .

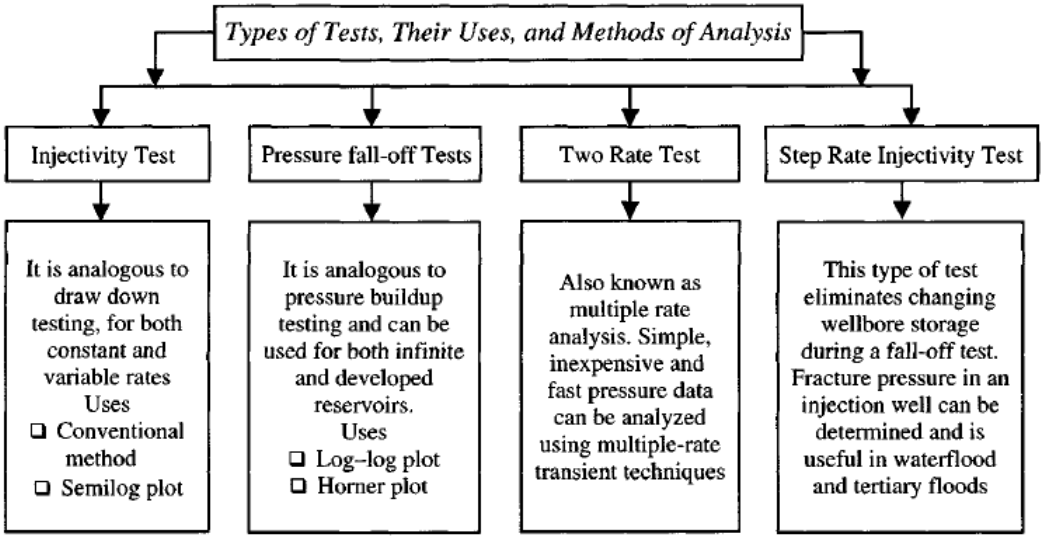
3-3 تطبيقات فحوصات الحقن: تتضمن تطبيقات فحوصات الحقن الانواع الاتية :

1- فحص قابلية الحقن Injectivity test .

2- فحص انحدار الضغط Pressure falloff testing.

3- فحص مُعدلي الحقن Two rate test.

4- فحص قابلية الحقن المتدرج Step rate injectivity test.



الشكل3-2 : انواع فحوصات الحقن و استخدامها و اسلوب التفسير

الشكل3-2 يُلخص اهم استخدامات الفحوصات الاربعة مع طرق التفسير المناسبة.

ان تفسير فحص قابلية الحقن Injectivity test هو مشابه الى فحص هبوط الضغط للبئر الانتاجي Pressure Drawdown test و تفسير فحص انحدار الضغط Falloff testing مشابه الى فحص تصاعد الضغط Pressure Buidup test للبئر الانتاجي بشرط ان نسبة الانسيابية Mobility ratio-M تكون مساوية الى الواحد M=1 .

1-3-3 فحص قابلية الحقن (Injectivity Test)

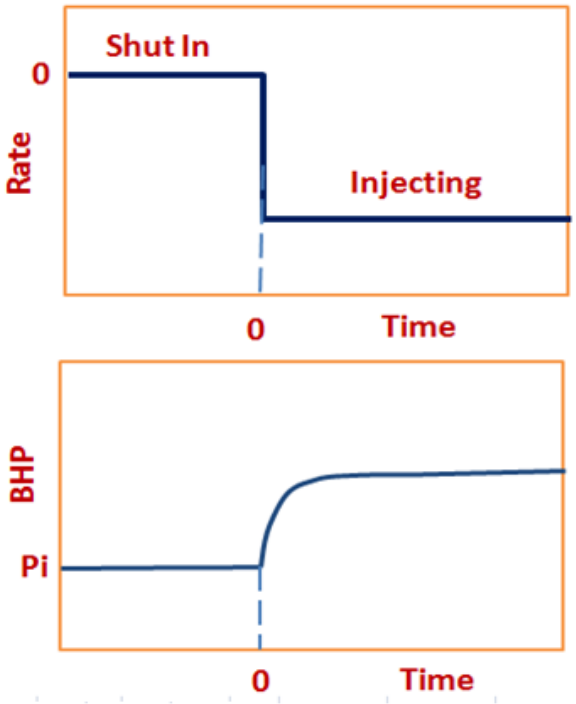
فحص قابلية الحقن هو اختبار يُجرى على الآبار المحقونة (Injection Wells) لقياس مدى سهولة انسيابية المائع (ماء، غاز، بوليمر...) من البئر إلى الطبقة المكمنية و لتقييم أداء البئر وتحديد المعوقات التي قد تؤثر على كفاءة الحقن.

بالرغم من أهمية فحوصات حقن الآبار، إلا أن المعلومات المتوفرة عنها أقل من تلك المتوفرة عن آبار الإنتاج. في الواقع، عدد آبار الحقن في خطط تطوير الحقول النفطية غالبًا ما يكون مقاربًا لعدد آبار الإنتاج، ما يزيد من أهمية هذه الفحوصات. نجاح مشاريع حقن الماء يعتمد على التنبؤ الجيد باستجابة المكمن، وهو ما يُمكن الحصول عليه عبر فحص قابلية الحقن. ان سلوك الضغط في فحص قابلية الحقن مشابه لفحص هبوط الضغط للبئر المنتج عندما M=1 على ان ياخذ معدل الحقن اشارة سالبة لكون الحقن هو عملية ضخ الموائع في الطبقة المكمنية و هو عكس الانتاج و لكن للسهولة سنتعامل معها على اساس موجب $+q_{inj}$.

1- خطوات فحص قابلية الحقن (الشكل 3-3) :

- إغلاق بئر الحقن لمدة كافية حتى يستقر الضغط عند الضغط الابتدائي للمكمن (Pi) .
- بدء عملية الحقن لفترة زمنية محددة و بمعدل حقن q_{inj} ثابت .

- قياس الضغط الباطني للبئر P_w عبر فترة الحقن مقابل الزمن t .



الشكل3-3 : مخطط فحص قابلية الحقن

2- الفرضيات المستخدمة في طرق تفسير فحص قابلية الحقن Injectivity و فحص انحدار الضغط Falloff تشتمل على مايلي:

- نسبة الانسيابية تساوي الواحد M=1، يُمكن ان نتحقق من ان الفرضية صحيحة عندما يكون نصف قطر منطقة البحث Radius of investigation-r_{inv} عبر مدة الفحص اقل من نصف قطر منطقة الماء المحقون عبر عمر الحقن water boundry- r_{wb} ، اي ان $r_{inv} < r_{wb}$. إذ ان نصف قطر منطقة البحث r_{inv} يساوي :

$$r_{inv} = 0.0359\sqrt{\frac{kt}{\phi\mu c_t}} \quad \text{--------- 6}$$

وان نصف قطر منطقة الماء المحقون water boundry- r_{wb} يساوي :

$$r_{wb} = \sqrt{\frac{5.615W_{inj}}{\pi h\phi(\Delta S_w)}} \quad \text{--------- 7}$$

ft ، r_{wb} = radius to a water bank

bbl، W_{inj} = cumulative water injection

fraction، Ø = porosity

cp،μ_w = water viscosity

ft،h = formation thickness

psi^{-1}،c_t = total compressibility

md،k = permeability

hours،t = time

- الضغط المكمني الاصلي ثابت في كل المكمن.
- المكمن متجانس Homogeneous ، متماثل Isotropic و من النوع اللامتناهي Infinite.
- الضغط عند الحدود الخارجية للمكمن تبقى ثابتة مع الوقت.
- عند واجهة المائع Fluid front المحقون فان الضغط في المنطقة المُكتَسحة Invaded zone و المنطقة اللا مُكتَسحة Uninvaded zone متساويان.
- عند واجهة المائع Fluid front المحقون فان سرعة الموائع في المنطقة المُكتَسحة Invaded zone و المنطقة اللا مُكتَسحة uninvaded zone متساويتان.

1-1-3-3 الطريقة التقليدية في تفسير فحص قابلية حقن البئر (Injectivity Test Analysis)

1- المعادلة الخطية لسلوك الضغط أثناء الحقن:

عند حقن الماء بمعدل ثابت فيُمكن وصف سلوك الضغط في باطن(قاع) البئر مع الوقت من خلال العلاقة الاتية:

$$p_{wf} = p_{1\,hr} + m\log(t) \quad \text{------- 2 a}$$

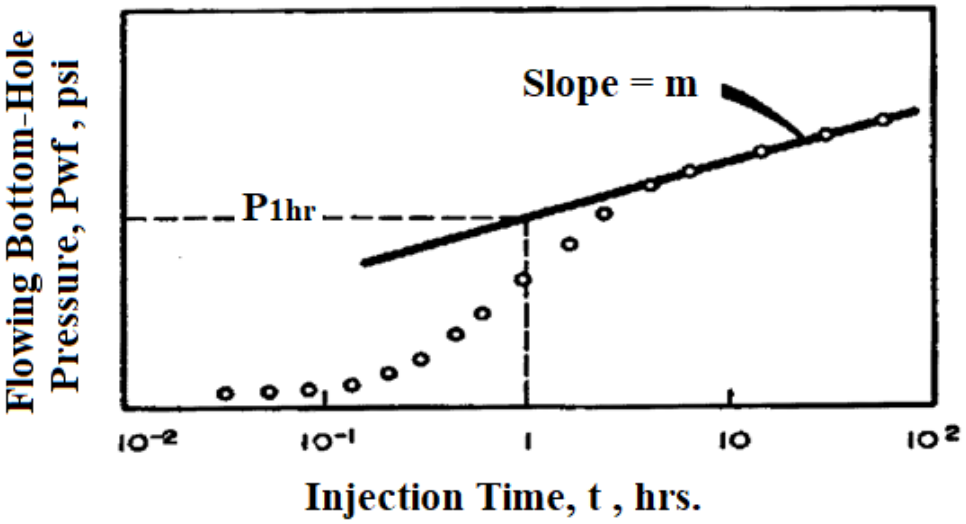
2- الرسم نصف اللوغاريتمي:

عند رسم بيانات ضغط الحقن في باطن البئر مع لوغاريتم وقت الحقن على ورق نصف لوغاريتمي (شكل 3-4)، نحصل على علاقة خط مستقيم يتقاطع مع المحور الصادي عند قيمة الضغط عند ساعة واحدة $P_{1hr.}$ و ميل الخط m يُحسب كما يلي:

$$m = \frac{162.6 q_{inj} B \mu}{kh} \quad \text{--------- 2 b}$$

إذ ان

q_{inj} = absolute value of injection rate, STB/day
m = slope, psi/cycle
k = permeability, md
h = thickness, ft



الشكل3-4 : رسم نصف لوغاريتمي semi-log لبيانات فحص قابلية الحقن

3- و حساب عامل القشرة كما يلي:

$$s = 1.1513\left[\frac{p_{1\text{ hr}} - p_i}{m} - \log\left(\frac{k}{\phi\mu c_t r_w^2}\right) + 3.2275\right] \text{ --------- } 3$$

4- تأثير تخزين البئر(Wellbore Storage Effect) :

كما أشار ايرلغر **Earlougher (1977)**، فإن لتخزين البئر تأثير كبير في بداية فحص الحقن، إذ يؤدي إلى تذبذب البيانات وصعوبة تمييز الخط المستقيم. لحل هذه المشكلة يقترح رسم الفرق بين الضغط الابتدائي وضغط الحقن بدلا من ضغط الحقن مقابل الزمن اي $(P_w\text{-}P_i)$ vs t .

الرسم في الشكل 3-5 يُوضح طول المدة الزمنية لتأثير تخزين البئر ثم تلاشيها ويُمكن حساب طول فترة انتهائها عبر:

$$t > \frac{(200\,000 + 12\,000s)C}{kh/\mu} \text{ --------- } 4$$

إذ ان :

t = time that marks the end of wellbore storage effects, hours
k = permeability, md
s = skin factor
C = wellbore storage coefficient, bbl/psi
μ = viscosity, cp

5- تأثير اختلاف خواص الموائع (Injection vs Reservoir Fluids)

a- في حال:1 = M :تفسير فحص الحقن يُعامل تمامًا مثل فحص هبوط الضغط، ما عدا الاختلاف في ان اشارة معدل الحقن الثابت q_i تكون سالبة إذ يُعتبر اتجاه الحقن معاكس لمعدل الإنتاج الموجب.

b- في حال:1 ≠ M و يحدث ذلك بسبب: اختلاف اللزوجة، الانضغاطية، والكثافة و اختلاف خواص التبلل(Wettability) يؤدي ذلك الى تكّون منطقة انتقالية بين مائع الحقن والمائع المكمني.

ان اختلاف الكثافة بين الموائع يتسبب في تغير توزيع الموائع داخل المكمن:

فإذا كان مائع الحقن أخف (مثل الغاز)، قد يتجمع في أعلى الطبقة المكمنية و إذا كان أثقل (مثل الماء)، يميل للانحدار أسفل الطبقة و يترتب على ذلك اختلاف في حساب السُمك الصافي h للطبقة في فحص قابلية الحقن مقارنة بحساب السُمك الصافي في تفسير فحص هبوط الضغط Sabet (1991) .

اختلاف اللزوجة والانضغاطية و خواص التبلل لمائع الحقن عن المائع المكمني سيتسبب ايضا في ظهور منطقة الانتقالية Transition region مابين المائعين، مساحة و امتداد تلك المنطقة تعتمد على شدة اختلاف الخواص اعلاه .

ان قابلية نفاذية الصخرة لكل مائع تتناسب مع تشبع المائع Fluid saturation و هذا يعني ان النفاذية النسبية لكل مائع (المعادلة رقم-5 ادناه) ستؤدي دورا مهما في تفسير الفحص و تصبح احتمالية ان تنحرف قيمة نسبة الانسيابية عن شرط الواحد M≠1 واردة .

$$M = \frac{k_{rw}(S_{or}) / \mu_w}{k_{ro}(S_{wc}) / \mu_o} \quad \text{--------- 5}$$

مثال-1 : تطبيق خطوات تفسير فحص قابلية حقن البئر بالطريقة التقليدية

مكمن نفطي ينتج تحت تاثير دفع حقن الماء بمعدل حقن ثابت مقداره q_{inj}=100 stb/day و لمدة سنتين و لغرض مراقبة سلوك الحقن فقد أُجر فحص قابلية الحقن لاحدى الابار سبقها غلق لجميع الابار في الحقل عدة اسابيع لغرض استقرار الضغط عند Pi . أُدرجت بيانات الفحص في الجدول3-1 ، المعلومات المتوفرة الاخرى كما ياتي :

$q_{inj} = 100$ STB/day $p_i = 194$ psig $h = 16$ ft, $r_w = 0.25$ ft,
$\phi = 0.15$, $c_t = 6.67 \times 10^{-6}$ psi^{-1} $B = 1.0$ bbl/STB, $\mu = 1.0$ cp
$\Delta S_w = 0.4$, depth = 1002 ft, $\rho_{wb} = 62.4$ lb/ft^3, total test time = 7 hours

المطلوب :

- حساب النفاذية و عامل القشرة و عامل تخزين البئر ؟؟

Time, t (hr)	Pressure response, p_{wf} (psig)	Injection rate q_w (stb/day)	Pressure drop, $\Delta p = (p_{wf} - p_i)$ (psig)	Radius of drainage, r_d (ft)
0.050	249.0	−100	55.0	21.2
0.175	284.0	−100	90.0	39.7
0.250	324.0	−100	130.0	47.4
0.350	360.0	−100	166.0	56.1
0.375	368.0	−100	174.0	58.1
0.400	372.0	−100	178.0	60.0
0.420	374.0	−100	180.0	61.5
0.500	384.0	−100	190.0	67.1
0.570	424.0	−100	230.0	71.6
0.700	454.0	−100	260.0	79.3
0.820	594.0	−100	400.0	85.9
1.000	709.0	−100	515.0	94.8
1.200	774.0	−100	580.0	103.9
1.250	784.0	−100	590.0	106.0
1.500	789.0	−100	595.0	116.1
1.750	792.0	−100	598.0	125.4
2.000	793.0	−100	599.0	134.1
3.000	798.0	−100	604.0	164.2
4.000	799.0	−100	605.0	189.7
5.000	800.0	−100	606.0	212.0
6.000	803.0	−100	609.0	232.3
7.000	804.0	−100	610.0	250.9

[a] Drainage radius = 744.6 ft; time required to reach the boundaries of a tested reservoir = 61.7 ft.

الجدول3-1 : بيانات فحص قابلية الحقن للمثال رقم-1

الحل:

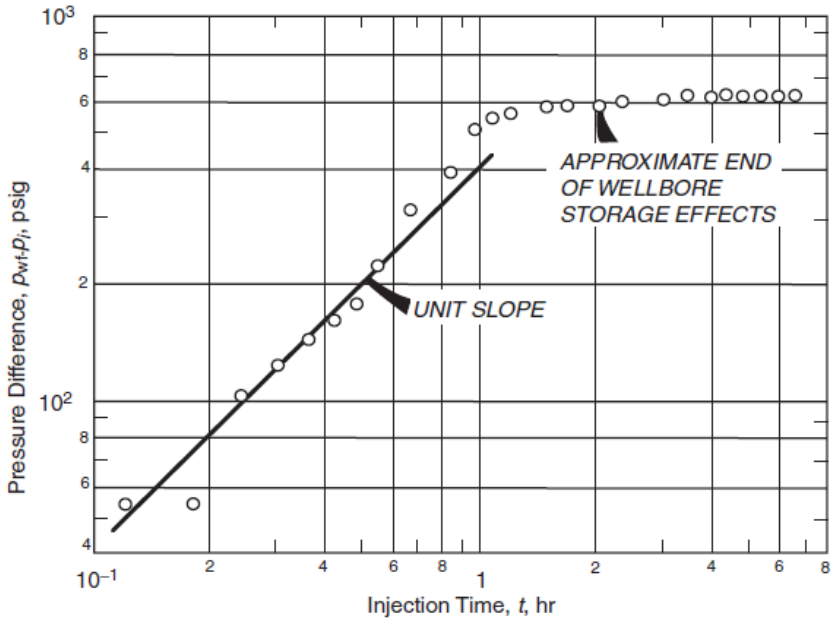
1- نحدد مدة انتهاء تاثير تخزين البئر و الذي يمثل بداية خط النصف اللوغاريتمي عبر رسم علاقة لوغاريتمية مابين فرق الضغط و الوقت $\log(P_{wf} - P_i)$ vs $\log t$ كما في الشكل 3-5.

2- من الرسم نلاحظ ان تاثير تخزين البئر يظهر بشكل خط مستقيم يميل بزاوية 45^o و بميل يساوي واحد. يُمكن ان نحدد وقت نهاية خط ميل الواحد هذا او انحرافه عن الاستقامة و من الرسم يظهر ان الوقت بحدود .0.55 hrs .

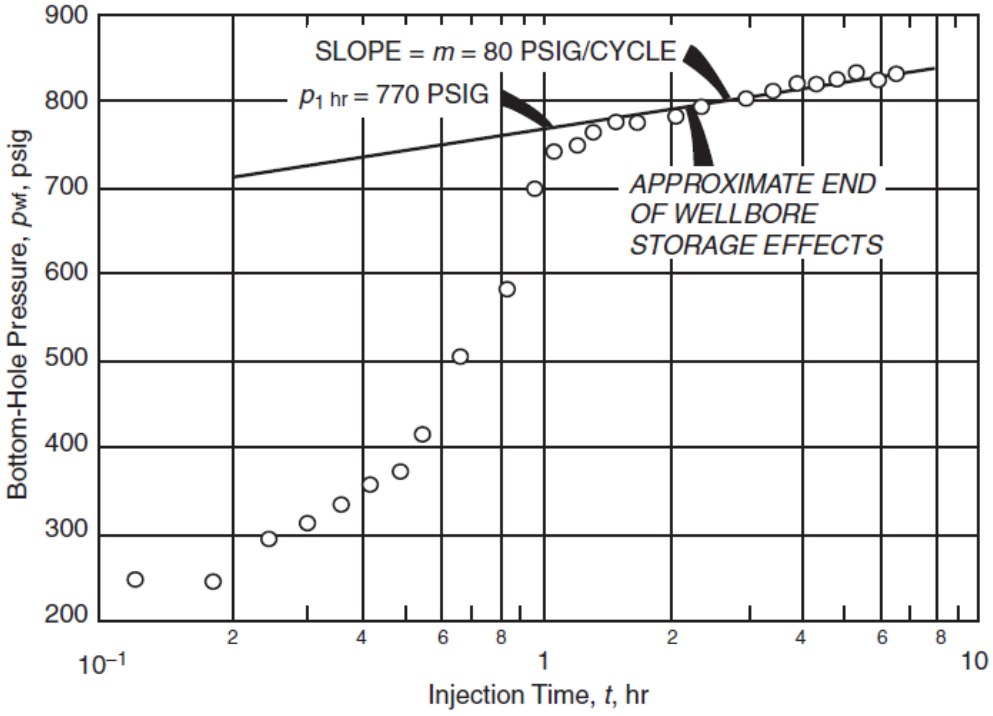
3- نتحرك دورة واحدة او دورة و نصف 1.5 cycle بعد الوقت المقاس من الخطوة السابقة و نقرا ما يقابلها من الوقت على الاحداثي السيني ليمثل وقت بداية خط النصف لوغاريتمي. من الرسم فهو بحدود .2 hrs من بداية الفحص الشكل 3-6 .

4- حساب عامل تخزين البئر C عبر تحديد نقطة على خط الميل الواحد و قراءة احداثياتها t ،ΔP :

$$\Delta p = 408 \text{ psig} \qquad t = 1 \text{ hour}$$



الشكل3-5 : رسم لوغاريتمي log-log لبيانات فحص قابلية الحقن – المثال رقم-1



الشكل3-6 : رسم نصف لوغاريتمي لبيانات فحص قابلية الحقن – المثال رقم-1

نطبق المعادلة الاتية:

$$C = \frac{q_{inj} B t}{24 \Delta p} \quad \text{---------} \ 8$$

$$C = \frac{(100)(1.0)(1)}{(24)(408)} = 0.0102 \text{ bbl/psi}$$

5- رسم علاقة الضغط عند قاع البئر مع وقت الحقن P_{wf} vs t على احداثيات نصف لوغاريتمية، نحصل على علاقة خط مستقيم كما في الشكل3-6 ، يتقاطع عند P_{1hr}=770 psi و الميل له m =80 psi/cycle.

5- حساب النفاذية و تساوي:

$$k = \frac{162.6 q_{inj} B \mu}{mh}$$
$$= \frac{(162.6)(100)(1.0)(1.0)}{(80)(16)}$$
$$= 12.7 \text{ md}$$

6- حساب عامل القشرة و يساوي:

$$s = 1.1513 \left[\frac{p_{1\,hr} - p_i}{m} - \log \left(\frac{k}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) + 3.2275 \right]$$

$$s = 1.1513 \left[\frac{p_{1\,hr} - p_i}{m} - \log \left(\frac{k}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) + 3.2275 \right]$$
$$= 1.1513 \left[\frac{770 - 194}{80} - \log \left(\frac{12.7}{(0.15)(1.0)(6.67 \times 10^{-6})(0.25)^2} \right) + 3.2275 \right]$$
$$= 2.4$$

7- حساب فرق الضغط بسبب عامل القشرة و يساوي :

$$\Delta p_s = \frac{141.2\, qB\mu}{kh}\, s \text{ --------- 9}$$

$$\Delta p_s = \frac{(141.2)(100)(1.0)(1.0)(2.4)}{(12.7)(16)}$$
$$= 167 \text{ psi.}$$

8- نفترض ان معدل الضغط المكمني يساوي الضغط المكمني الاصلي $P_i=P^{\backslash}$=194 psi وان الضغط في نهاية مدة الفحص P_{wf} =835 psi ، اذن فمؤشر الحقن Injectivity Index II يساوي :

$II=q_{inj}/|\Delta P|=100/|194-835|=0.156$ stb/day/psi

9- كفاءة الجريان Flow Effeciency FE تساوي :

$FE = (|\Delta P| - \Delta P_s) / |\Delta P| = (641 - 167) / 641 = 0.74$

10- حساب نصف القطر المتحقق radius of investigation بعد سبع ساعات حقن 7 hrs. و كما يأتي:

$$r_{inv} = 0.0359\sqrt{\frac{kt}{\phi\mu c_t}}$$

$$= 0.0359\sqrt{\frac{(12.7)(7)}{(0.15)(1.0)(6.67\times10^{-6})}}$$

$$r_{inv} \simeq 338 \text{ ft}$$

11- و لان الحقن في الحقل ابتدأ قبل بدء الفحص بحدود سنتين وعليه فان حجم الماء المحقون عبر تلك المدة تساوي:

$$W_{inj} \cong (2)(365)(100)(1.0) = 73\,000 \text{ bbl}$$

اذن جبهة او حافة الماء المحقون في المكمن تكون على مسافة من البئر تساوي:

$$r_{wb} = \sqrt{\frac{5.615W_{inj}}{\pi h\phi(\Delta S_w)}}$$

$$= \sqrt{\frac{(5.615)(73\,000)}{\pi(16)(0.15)(0.4)}}$$

$$r_{wb} \cong 369 \text{ ft}$$

و لما كانت r_{inv} =338 ft < r_{wb}=369 ft فقد تحقق شرط الفحص وان استخدام فرضية M=1 صحيحة.

2-1-3-3 طريقة تطابق المنحنيات في تفسير فحص قابلية حقن البئر

طريقة تطابق المنحنيات النوعية التي طوّرها بورديت وآخرون (Bourdet et al. 1984) ، والتي تم استخدامها سابقًا في تفسير فحوصات الآبار المنتجة ايضا يُمكن استخدام الأسلوب نفسه في تفسير فحوصات آبار الحقن.

الشكل3-7 يمثل مجموعة منحنيات لتطابق الضغط والاشتقاق لتفسير فحوصات الحقن،

المرسومة على مقياس لوغاريتمي. الاحداثي الصادي يمثل الضغط و مشتقة الضغط اللابعدي، P_D P'_D ، و الاحداثي السيني يمثل الوقت t_D/C_D . منحنيات التطابق النوعية تعكس قيم مختلفة للدالة C_De^{2s}.

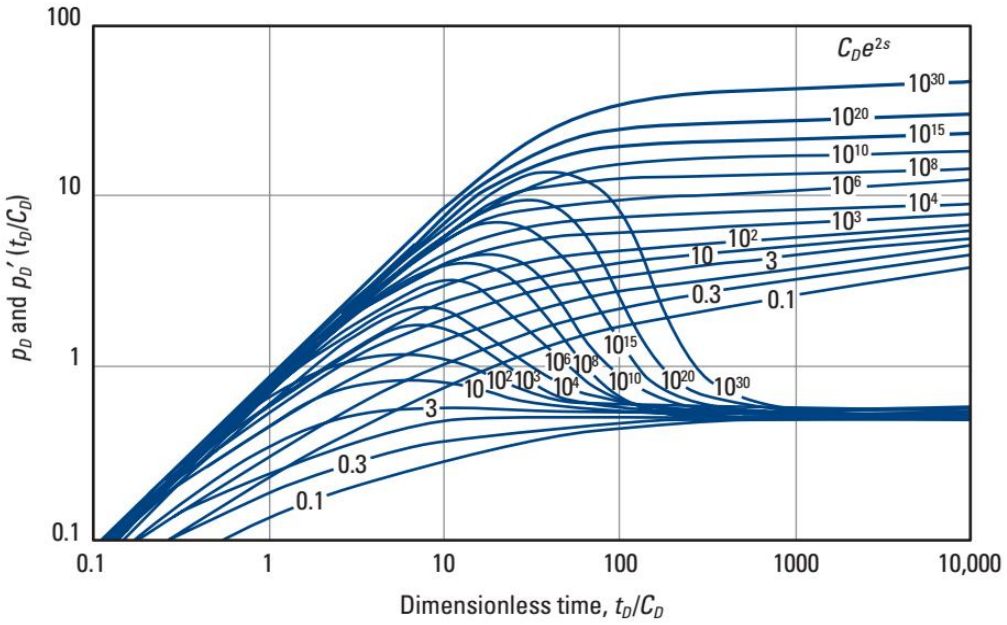
لتطبيق خطوات تفسير الفحص نحل المثال رقم-2 ادناه.

مثال-2 تفسير الفحص بطريقة تطابق المنحنيات النوعي و الطريقة التقليدية

مكمن نفطي ينتج تحت تاثير دفع حقن الماء اجري فحص قابلية الحقن لاحدى الابار بعد غلق جميع الابار في الحقل لعدة اسابيع لاستقرار الضغط عند Pi ،أُدرجت معلومات الفحص مع الحسابات المصاحبة لتفسير الفحص في الجدول3-2 ، المعلومات المتوفرة الاخرى :

$q = -100$ STB/D $p_i = 449$ psia $B = 1.0$ RB/STB $r_w = 0.25$ ft

$\rho_{wb} = 62.4$ lbm/ft^3 $h = 16$ ft $\phi = 0.15$ $\mu = 1.0$ cp $c_t = 7.7\ 10^{-6}$ psi^{-1}



الشكل3-7 : منحنيات التطابق النوعي لبوردیت Bourdet et al.(1984)

Time (hours)	Pressure (psia)	Time (hours)	Pressure (psia)
0.0100	546.30	0.4120	976.40
0.0159	587.30	0.6560	997.80
0.0253	642.30	1.040	1,016.5
0.0403	711.00	1.660	1,034.2
0.0642	785.60	2.640	1,051.2
0.1020	855.20	4.210	1,068.0
0.1630	910.20	6.700	1,084.5
0.2590	949.10		

الجدول3-2 : بيانات فحص قابلية الحقن للمثال رقم-2

المطلوب :

ـ حساب النفاذية و عامل القشرة ؟؟

Time (hours)	Pressure (psia)	Pressure Change (psi)	Pressure Derivative
0.0100	546.3	97.4	88.41
0.0159	587.3	138.4	103.4
0.0253	642.3	193.4	132.9
0.0403	711.0	262.1	153.9
0.0642	785.6	336.7	155.3
0.1020	855.2	406.3	133.93
0.1630	910.2	461.3	100.6
0.2590	949.1	500.2	71.4
0.4120	976.4	527.5	52.4
0.6560	997.8	548.9	43.3
1.040	1,016.5	567.6	39.2
1.660	1,034.2	585.3	37.2
2.640	1,051.2	602.3	36.3
4.210	1,068.0	619.1	35.8
6.700	1,084.5	635.6	35.5

الجدول3-3 : بيانات فحص قابلية الحقن للمثال رقم-2

الحل:

اولا- طريقة بورديت Bourdet et al(1984) - الشكل3-7

تتضمن الطريقة الخطوات الاتية:

1- تهيئة البيانات:

يتم إعداد جدول للبيانات كما في الجدول3-3 ، حيث يتضمن **فرق** الضغط (P_w-P_i) و مشتقة الضغط مع الوقت t إذ ان مشتقة الضغط تساوي :

$$-\frac{dp_{wf}}{d(\ln t)} = -t\left[\frac{dp_{wf}}{d(t)}\right] = t\Delta p' \text{---------} 10$$

و فرق الضغط يساوي:

$\Delta P=Pw-Pi$

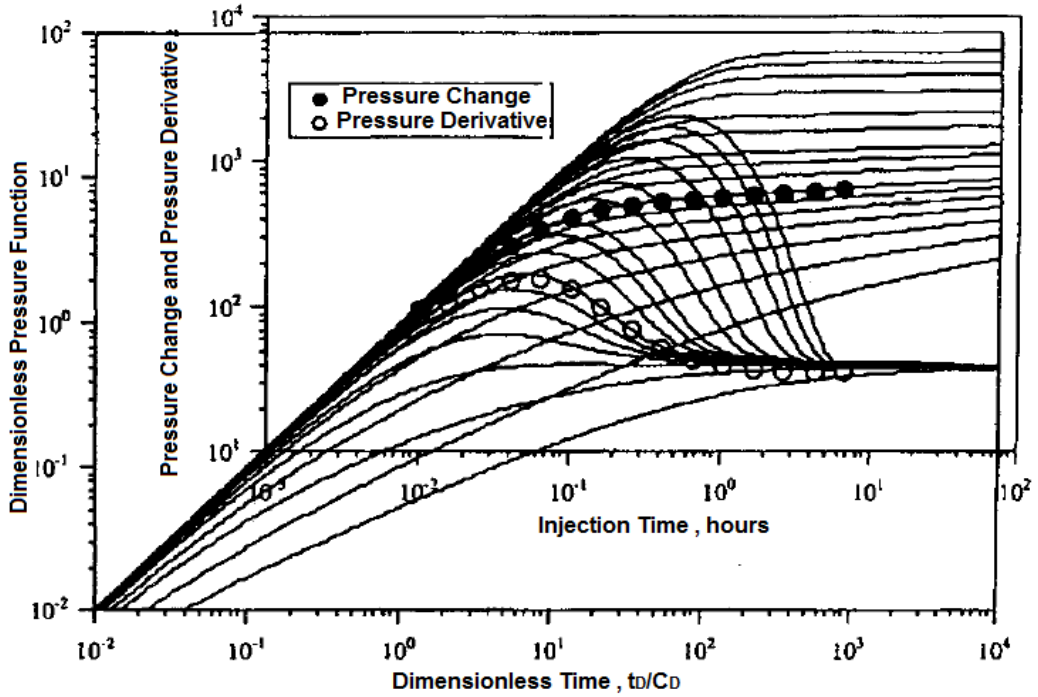
2- رسم البيانات الحقلية:

نرسم علاقة فرق الضغط و مشتقة الضغط مع وقت الحقن على ورق شفاف باحداثيات لوغاريتمية . يجب أن يكون الرسم بنفس المقياس المستخدم في منحنيات بورديت النظرية في الشكل3-7.

3- تنفيذ التطابق:

تُطبق ورقة البيانات الشفافة فوق المنحنيات النظرية (الشكل 3-8)، وتحرك أفقياً وعموديًا حتى يحدث أفضل تطابق . يُحدد المنحني النظري الذي حصل عنده التطابق، ثم نقرأ القيم اللابعدية (الشكل 3-9) اذ ان:

$$C_D e^{2s} = 1 \times 10^5$$



الشكل3-8 : تطابق بيانات فحص قابلية الحقن – المثال رقم-2

4- أنماط الجريان:

- من شكل رسم البيانات و في بداية الفحص يظهر تأثير تخزين البئر عبر خط الميل الواحد m=1 (زاوية 45°).

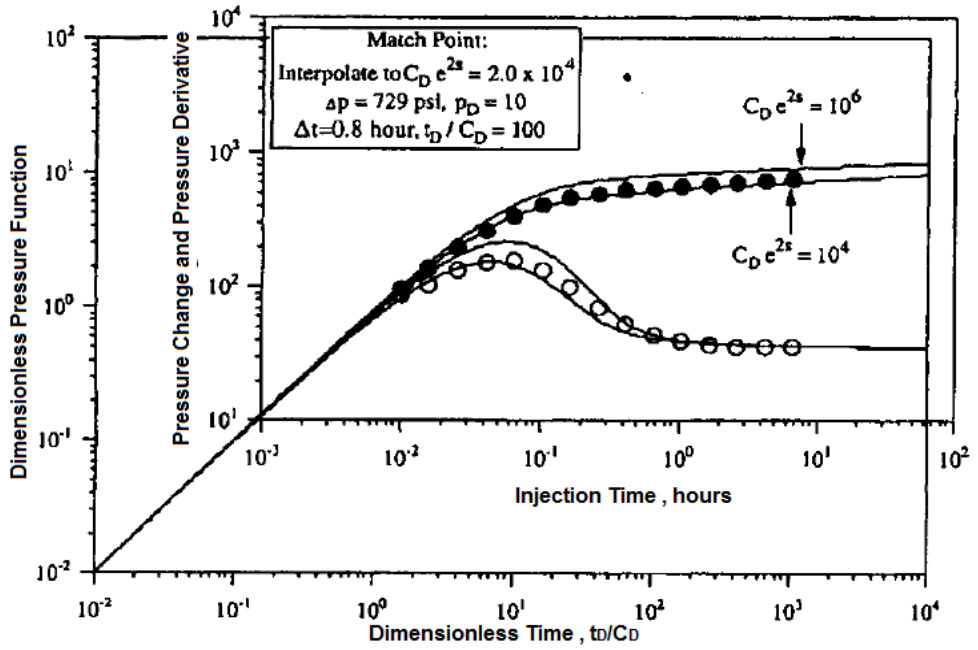
- بعد هذا الطور، يبدأ تاثير نمط الجريان الشعاعي اللامتناهي عند الوقت t=0.8 hr ، إذ يصبح خط مشتقة الضغط أفقيًا.

- استمرار هذا السلوك حتى نهاية الفحص يشير إلى أن جبهة الضغط لم تصل إلى حدود المكمن، أي أن التأثير ما يزال في الجريان الشعاعي.

5- حساب معامل تخزين البئر:

- نحدد نقطة على خط الميل الواحد و لتكن احداثياتها :

$$\Delta t = 0.8 \text{ hour and } t_D/C_D = 100.$$



الشكل3-9 : تطابق بيانات فحص المثال رقم-2

- من الاحداثيات اعلاه نحسب قيمة معامل تخزين البئر اللابعدي :

$$C_D = \frac{0.0002637k}{\phi r_w^2 c_t \mu}\left(\frac{\Delta t}{t_D/C_D}\right)_{MP} \quad \text{--------- 11}$$

$$= \frac{(0.0002637)(12.2)}{(0.15)(0.25)^2(7.7 \times 10^{-6})(1.0)}\left(\frac{1}{125.6}\right)$$

$C_D = 355.$

6- حساب عامل القشرة : من معرفة $C_D=355$ و منحني التطابق $C_D e^{2s} = 2\times10^4$ اذن s تساوي:

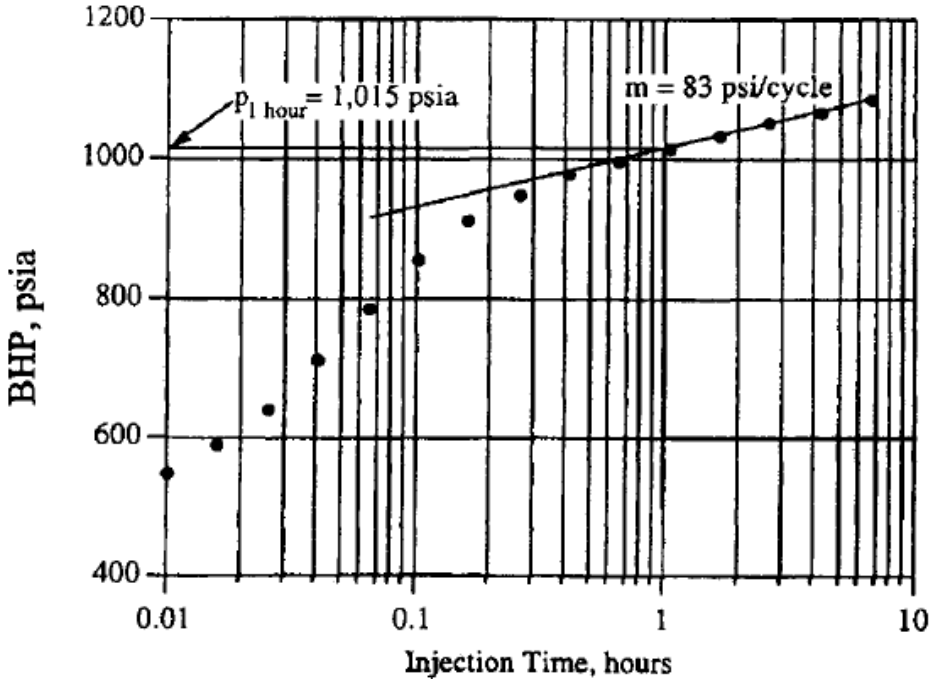
$$s = 0.5 \ln\left(\frac{C_D e^{2s}}{C_D}\right) \quad \text{--------- 12}$$

$$s = 0.5 \ln\left(\frac{2.0 \times 10^4}{355}\right)$$

$$= 2.0$$

ثانيا- التفسير التقليدي لفحص قابلية الحقن باستخدام الرسم نصف اللوغاريتمي:

1- رسم العلاقة بين ضغط الحقن عند قاع البئر P_{wf} مع الزمن t على ورق نصف لوغاريتمي كما في الشكل 3-10. من هذا الرسم، يبدأ خط الجريان الشعاعي عند الوقت t=0.53 hrs و يستمر لنهاية الفحص.



الشكل3-10 : تفسير بيانات فحص بالطريقة التقليدية (نصف لوغاريتمية) للمثال رقم-2

2- من الخط المستقيم نحدد قيمة التقاطع عندما يكون Δt=1 hr و يساوي $P_{1hr.}$=1015 psi و ميل الخط المستقيم و يساوي m=83 psi/cycle ، يُحسب الميل عبر:

$$m = \frac{p_{ws2} - p_{ws1}}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{1,084.5 - 1,034.2}{\log(6.70) - \log(1.66)}$$
$$= 83.0 \text{ psi/cycle.}$$

3- حساب النفاذية k من العلاقة الاتية:

$$k = -\frac{162.6qB\mu}{mh} = -\frac{(162.6)(-100)(1.0)(1.0)}{(83.0)(16)}$$
$$= 12.2 \text{ md}$$

4- حساب عامل القشرة s :

يُحسب عامل القشرة باستخدام الميل والتقاطع $P_{1hr.}$:

$$s = 1.151\left[\left(\frac{p_{1hr} - p_i}{m}\right) - \log\left(\frac{k}{\phi\mu c_t r_w^2}\right) + 3.23\right]$$

$$= 1.151\left\{\left(\frac{1,015 - 449}{83.0}\right) - \log\left[\frac{12.2}{(0.15)(1.0)(7.7 \times 10^{-6})(0.25)^2}\right] + 3.23\right\}$$

$$s = 2.1$$

لاحظ ان عامل القشرة المحسوب بكلا الطريقتين متقاربة.

5- حساب نصف قطر منطقة البحث (المتحقق):نحسبه مرتين:

عند بداية الجريان الشعاعي t=0.53 hrs و عند نهاية الفحص t=6.7 hrs.و كما يأتي:

$$r_{i,\text{start}} = \left(\frac{kt}{948\phi\mu c_t}\right)^{1/2} = \left[\frac{(12.2)(0.53)}{(948)(0.15)(1.0)(7.7\times10^{-6})}\right]^{1/2}$$
$$= 77 \text{ ft.}$$

$$r_{i,\text{end}} = \left(\frac{kt}{948\phi\mu c_t}\right)^{1/2} = \left[\frac{(12.2)(6.7)}{(948)(0.15)(1.0)(7.7\times10^{-6})}\right]^{1/2}$$
$$= 273 \text{ ft.}$$

6- التحقق من فرضية M=1:

الان نتاكد من ان نسبة الانسيابية M=1 تتحقق في هذه المسالة . نحسب حجم الماء المحقون لغاية حافة الجبهة عند نصف القطر r_{wb} و بفرض ان عملية حقن المكمن بالماء كان مستمرا لمدة سنتين 2 years قبل فحص الحقن و ان التغير بالتشبع المائي في منطقة جبهة الماء عبر هذه المدة بلغت $\Delta Sw=0.4$. اذن حجم الماء المحقون في الطبقة المكمنية يساوي:

$$W_i = (100 \text{ STB/D})(1.0 \text{ RB/STB})(2 \text{ years})(365 \text{ D/yr})$$
$$= 73{,}000 \text{ RB}$$

7- حجم الماء بدلالة التغير بالتشبع و خواص المكمن يساوي:

$$W_i = \frac{\pi r_{wb}^2 h\phi\Delta S_w}{5.615} \text{ --------- 13}$$

بترتيب المعادلة اعلاه فان المسافة الى حافة جبهة الماء r_{wb} تساوي:

$$r_{wb} = \sqrt{\frac{5.615W_i}{\pi h\phi\Delta s_w}} = \left[\frac{(5.615)(73{,}000)}{\pi(16)(0.15)(0.4)}\right]^{1/2}$$

$$r_{wb} = 369 \text{ ft.}$$

8- لكون $\mathbf{r_i=273\ ft < r_{wb}=369\ ft}$ فان استخدام فرضية M=1 صحيحة.

لاحظ هنا ان جميع الابار المجاورة عبر الفحص قد توقفت لانجاح عملية الفحص لكون اي بئر مجاور فعال سيتسبب في تشتت البيانات و يجعل من نتائج التفسير نصف اللوغاريتمي غير دقيقة.

2-3-3 : فحص انحدار الضغط (Pressure Falloff Test):

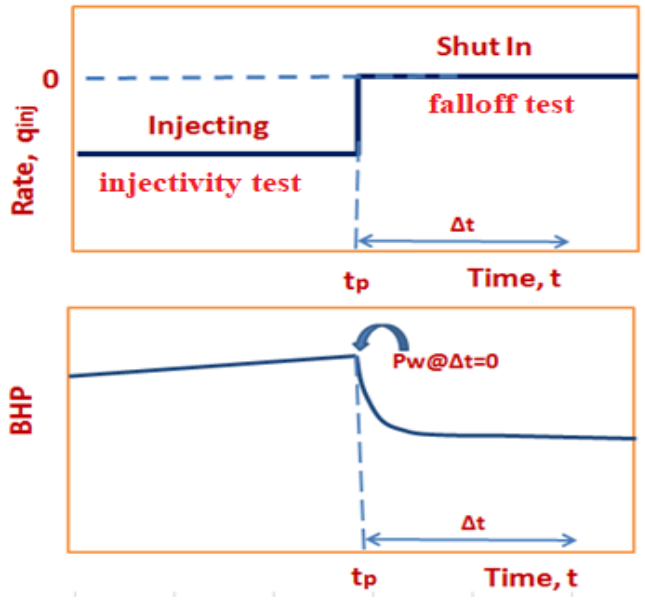
فحص انحدار الضغط (Pressure Falloff Test) هو نوع من فحوصات الآبار يُستخدم بعد إيقاف الحقن مباشرة، إذ يتم تسجيل انخفاض الضغط في قاع البئر مع الوقت.

كما ان فحص قابلية الحقن Injectivity test مشابه لفحص هبوط الضغط في الابار الانتاجية

فان انحدار الضغط Falloff Test هو مشابه لفحص تصاعد (بناء) الضغط للبئر الانتاجي بشرط ان المنطقة المجاورة لبئر الحقن مملوءة بالمائع المحقون و نسبة الانسيابية مساوية الى الواحد M=1

ماذا نعني ان المنطقة مملوءة بالمائع المحقون ؟؟ اي ان مدة الحقن كافية بحيث تغمر كليا جزء الطبقة المكمنية في المنطقة المجاورة لبئر الحقن .

المخطط في الشكل3-11 يُوضح طريقة الفحص . فبعد انتهاء مدة فحص قابلية الحقن t_p و بمعدل حقن ثابت مقداره q_{inj} ، يُغلق البئر لبدء فحص انحدار الضغط . في اللحظة قبل الغلق يقاس الضغط مباشرة في قاع البئر او عند راس البئر $P_{w(@\ \Delta t=0)}$ ثم يستمر قياس الضغط مع وقت الغلق Δt . لتفسير بيانات الفحص نستخدم طريقة هورنر.



الشكل3-11 : مخطط فحص انحدار الضغط

3-2-3-1 تفسير الفحص باستخدام طريقة هورنر:

الهدف من الفحص هو تحليل استجابة المكمن بعد مدة من الحقن، وتحديد خصائص المكمن مثل النفاذية، وضغط المكمن، ومدى التضرر في المنطقة المجاورة للبئر.

- يُمكن تمثيل سلوك انحدار الضغط خلال الفحص بحسب معادلة هورنر ادناه :

$$p_{ws} = p^* + m\left[\log\left(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}\right)\right] \text{ --------- } 14$$

- فعند رسم علاقة ضغط الغلق P_{ws} مع وقت الغلق (وقت هورنر-$((t_p+\Delta t)/\Delta t$) على ورق نصف لوغاريتمي نحصل على خط مستقيم الميل له m يساوي :

$$m = \left|\frac{162.6 q_{inj} B\mu}{kh}\right|$$

- و يتقاطع مع الاحداثي الصادي عند قيمة P* في الوقت $(t_p+\Delta t)/\Delta t=1$.إذ ان P* يمثل الضغط الزائف و يكون مساوي الى الضغط المكمني الاصلي P_i فقط اذا كان المكمن مكتشف حديثا .

- نحدد نهاية تاثير مدة تخزين البئر و بداية طور الجريان الشعاعي (الخط نصف اللوغاريتمي) من الرسم اللوغاريتمي log-log لضغط الغلق مع الوقت.

- ثم حساب نفاذية المكمن و عامل القشرة كما في ادناه :

$$k = \frac{162.6 q_{\text{inj}} B \mu}{|m| h}$$

$$s = 1.513 \left[\frac{p_{\text{wf at } \Delta t=0} - p_{1\text{ hr}}}{|m|} - \log\left(\frac{k}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) + 3.2275 \right]$$

ملاحظة:

إيرلوجر(1977) Earlougher اوضح انه في حالة كون معدل الحقن قبل غلق البئر غير ثابت (متغير) فان وقت الحقن المكافىء t_p في هذه الحالة يساوي:

$$t_p = \frac{24 W_{\text{inj}}}{q_{\text{inj}}}$$

2-2-3-3 تفسير الفحص بطريقة ميلر – دايز – هاتشينسون:(MDH)

- معادلة MDH

بالامكان استخدام طريقة ميللر،دايس ، هتشينسون MDH (Miller–Dyes–Hutchinson) في تفسير بيانات الفحص والتي يعبر عنها بحسب المعادلة :

$$p_{ws} = p^* + m \log t \quad \text{--------- 15}$$

- العلاقة اعلاه علاقة خط مستقيم ، فعند رسم علاقة الضغط P_{ws} مع الوقت Δt على احداثيات نصف لوغاريتمية نحصل على علاقة خط مستقيم ميله موجب و يساوي m كما في المعادلة رقم-2b .

- ممكن حساب الضغط الزائف P* من المعادلة الاتية :

$$p* = p_{1\text{ hr}} - |m| \log(t_p + 1) \quad \text{--------- 16}$$

ملاحظة:

إيرلوجر 1977 **اشار** الى ان استخدام طريقة MDH اكثر عمليا مما لهورنر على ان يكون وقت الحقن t_p اعلى من ضعفي وقت الغلق .

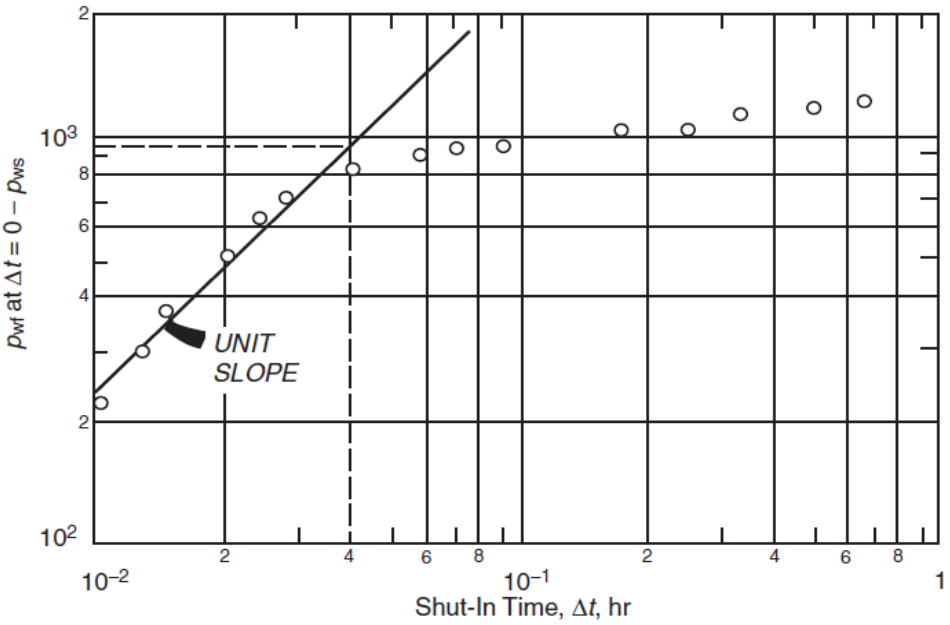
مثال-3 تفسير فحص انحدار الضغط بالطريقة التقليدية:

بيانات فحص انحدار الضغط Pressure falloff test رُسمت في الاشكال رقم3-12، 3-13، 3-14 .

البيانات الاخرى المتوفرة كالاتي:

$$B_w = 1.0 \text{ bbl/STB}, \quad c_w = 3.0 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1} \quad \mu_w = 1.0 \text{ cp} \quad \rho_w = 67.46 \text{ lb/ft}^3$$
$$\phi = 0.25, \quad h = 28 \text{ ft}, \quad c_t = 1.0 \times 10^{-5} \text{ psi}^{-1}, \quad r_w = 0.4 \text{ ft}, \quad \text{depth} = 4819 \text{ ft},$$
$$q_{inj} = 807 \text{ STB/day}, \quad \text{hydrostatic fluid gradient} = 0.4685 \text{ psi/ft}$$

الضغوط المقاسة كانت عند راس البئر P_{ts} و ليس في باطن البئر، الضغط المقاس عند نهاية الحقن مباشرة" و بداية غلق البئر يساوي $P_{tf(\Delta t=0)} = 1310$ psi .



الشكل3-12 : رسم لوغاريتمي لتفسير بيانات فحص انحدار الضغط – المثال رقم3-Earlougher، (1977)

المطلوب :حساب- معامل تخزين البئر ، النفاذية ، عامل القشرة ، معدل الضغط ؟؟

الحل:

1- من الرسم اللوغاريتمي الشكل3-12 نحدد بداية الخط نصف لوغاريتمي ، إذ يبدء بعد 0.07- hrs بعد الغلق.

2- حساب عامل تخزين البئر C عبر اخذ اي نقطة على خط الميل الواحد (الشكل اللوغاريتمي رقم3-12) و تحديد احداثياتها ΔP، t كما يلي :

$$\Delta p = 238 \text{ psi at } \Delta t = 0.01 \text{ hours}$$

نطبق المعادلة ادناه لحساب عامل تخزين البئر C :

$$C = \frac{q_{inj} Bt}{24 \Delta p} \quad \text{--------} \quad 17$$

$$= \frac{(807)(1.0)(0.01)}{(24)(238)} = 0.0014 \text{ bbl/psi}$$

3- بحسب طريقة هورنر ، نرسم الشكل3-13 لعلاقة ضغط الغلق عند راس البئر wellhead shut-in pressures- Pts مع لوغاريتم وقت هورنر $(t_p + \Delta t)/\Delta t$ log و Pts vs نستخدم طريقة MDH (الشكل3-14) لعلاقة الضغط عند راس البئر مع وقت الغلق P_{ts} vs log Δt.

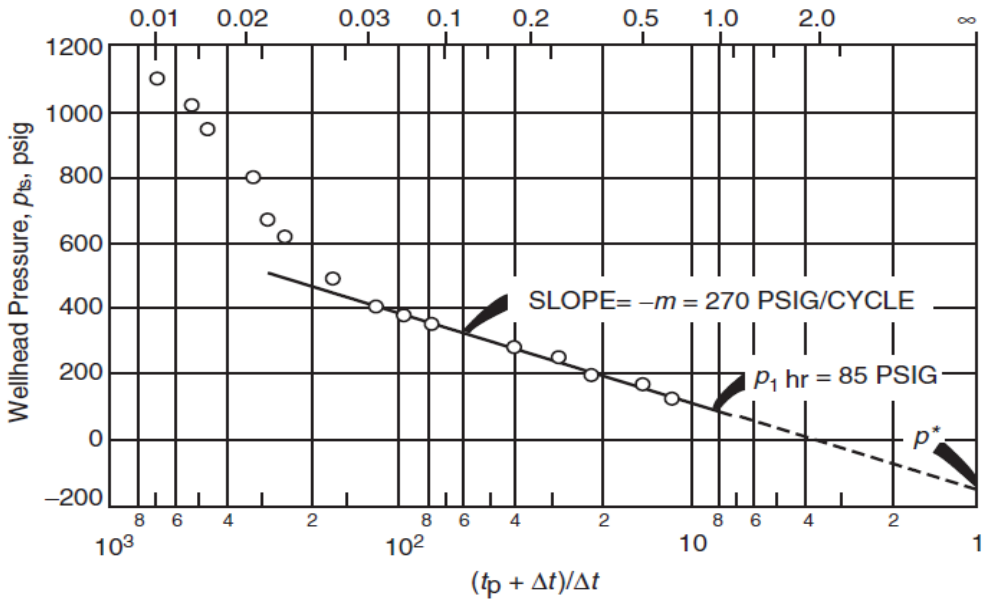
4- لكلا الرسمين نحصل على علاقة خط مستقيم الميل له m=270 psi/cycle و تقاطعه مع الاحداثي الصادي P_{1hr}.=85 psi .

5- حساب قيمة النفاذية :

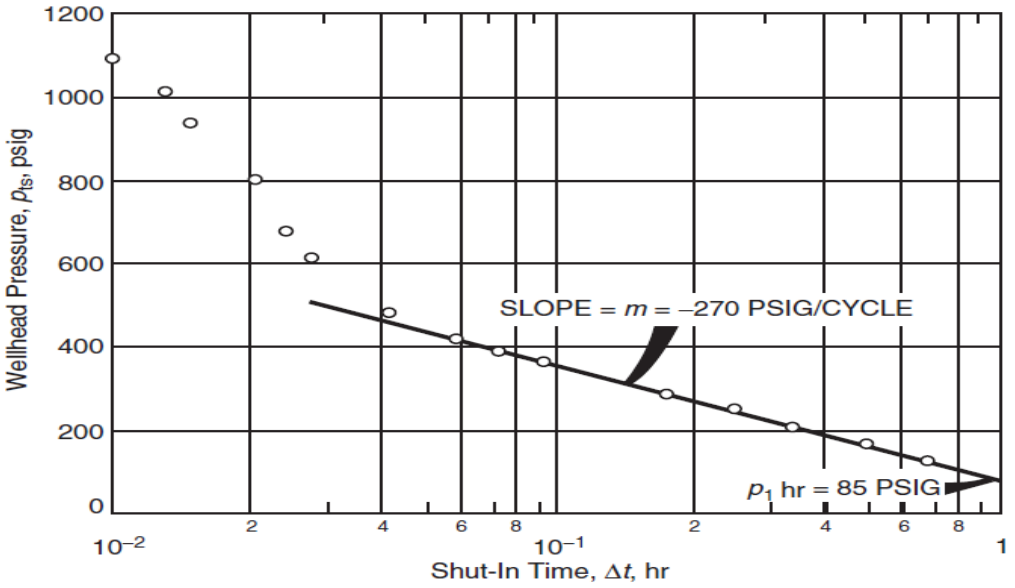
$$k = \frac{162.6 q_{inj} B \mu}{|m| h}$$

$$= \frac{(162.6)(807)(1.0)(1.0)}{(270)(28)}$$

$$= 17.4 \text{ md}$$



الشكل3-13 : طريقة (هورنر) لتفسير بيانات فحص للمثال رقم-3



الشكل3-14 : طريقة (MDH) لتفسير بيانات فحص المثال رقم-3

7- حساب عامل القشرة :

$$s = 1.513\left[\frac{p_{\text{wf at }\Delta t=0} - p_{1\text{ hr}}}{|m|} - \log\left(\frac{k}{\phi\mu c_t r_w^2}\right) + 3.2275\right]$$

$$= 1.513\left[\frac{1310-85}{270} - \log\left(\frac{17.4}{(0.25)(1.0)(1.0\times10^{-5})(0.4)^2}\right) + 3.2275\right]$$

$$= 0.15$$

8- نجد قيمة الضغط الزائف P* عند راس البئر (عند السطح) عبر مد الخط المستقيم في الشكل3-13 ليتقاطع مع وقت هورنر عند $\Delta t=1$ /($t_p+\Delta t$) والذي يساوي :

$$p_{ts}^* = -151 \text{ psig}$$

او من المعادلة رقم- 16:

$$p^* = p_{1\text{ hr}} - |m|\log(t_p + 1)$$

$$p_{ts}^* = 85 - (270)\log(6.82 + 1) = -156 \text{ psig}$$

9- حساب الضغط الزائف عند باطن البئر. نستخدم تدرج عمود السائل في البئر Hydrostatic gradient = 0.4685 psi/ft و العمق 4819 ft و كما يأتي :

$$p^* = (4819)(0.4685) - 151 = 2107 \text{ psig}$$

- و لان مدة الحقن قصيرة مقارنة مع مدة الغلق فمن الممكن فرض ان معدل الضغط المكمني مساوي الى الضغط الزائف اي ان :

$$\bar{p} = p^* = 2107 \text{ psig}$$

ملاحظات : بيانات الضغط المقاسة في المسألة اعلاه هي بيانات مقاسة عند السطح وليس في باطن البئر و برغم من ان فرق الضغط المقاس عند السطح (عند راس البئر) و فرق الضغط المقاس في باطن البئر متشابه مع الوقت الا انه احيانا نواجه مشكلة في ان الضغط السطحي سيتلاشى و يؤول الى الصفر بعد مدة قليلة من الغلق .هذا يستوجب استخدام مقاييس الضغط في باطن البئر بدلا من على السطح و لا يعني في ان نجري كل فحوصات انحدار الضغط باستخدام الضغوط في باطن البئر، فالمكامن المتماسكة Sufficient tight و ضغط الحقن العالي سيحدث استجابة واضحة من على مقاييس الضغط في السطح . ان القياسات السطحية ستوفر في كلف الصرف و ايضا تجنب المشاكل الخطرة المصاحبة لاستخدام مقاييس الضغط في باطن البئر، علما ان الخبرة هنا تؤدي دورا مهما في اتخاذ قرار ايا من الطريقتين في القياس ستُستخدم .

مثال-4

بيانات فحص انحدار الضغط *Fall-Off Test Data* أُدرجت في الجدول4-3 ، قبل الفحص اغلقت جميع الابار عدة اسابيع و لحين استقرار الضغط المكمني.

البيانات المتوفرة أُدرجت ادناه :

$\text{depth} = 4819\,\text{ft}$; $r_w = 0.354\,\text{ft}$; $h = 49\,\text{ft}$; $q = 1426\,\text{stb/d}$; $c_t = 6.5 \times 10^{-6}\,\text{psi}^{-1}$; $\phi = 16\%$; $\mu = 1.0\,\text{cP}$; $p_w = 62.5\,\text{lb}_\text{m}/\text{cuft}$; $\beta = 1.027\,\text{rb/stb}$ and tubing size = 2 in; injected area = 20 acres; cumulative volume injected before test = 2380 mbbls; injection pressure at $p_{w(\Delta t=0)} = 525\,\text{psi}$; hole size = 8.50 in; $c_o = 3.0 \times 10^{-6}\,\text{psi}^{-1}$; $c_w = 3.0 \times 10^{-6}\,\text{psi}^{-1}$; $c_g = 1.00 \times 10^{-4}\,\text{psi}^{-1}$; $c_f = 4.0 \times 10^{-6}\,\text{psi}^{-1}$; $s_o = 0.20$, $s_g = 0$ and $s_w = 0.80$.

المطلوب:اجراء تفسير للفحص؟؟

الحل:

- تحديد طول مدة الحقن t_p من معرفة معدل الحقن و حجم الماء المحقون قبل الغلق ويساوي :

$$t_p = \frac{24 V_p}{q_w}$$

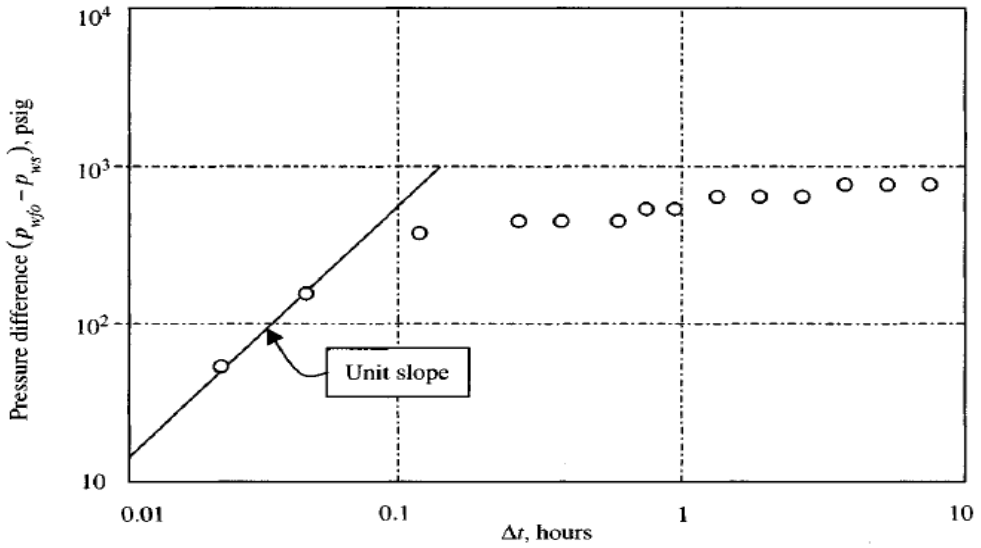
$$t_p = 24 \times 2380 \times 1000/1426 = 40{,}056.10 \text{ hours}$$

1- حسب الرسم اللوغاريتمي الشكل3-15 فهنالك تاثير واضح لتخزين البئر لوقت قليل للمدة 0.01-0.07 hrs. ثم يظهر بوضوح الخط نصف لوغاريتمي بعد 1.2 hrs و المكافىء لوقت هورنر 33381 .

2- نستخدم طريقة هورنر و نرسم البيانات لعلاقة ضغط الغلق عند راس البئر مع لوغاريتم وقت هورنر ، P_{ts} vs $(t_p + \Delta t)/\Delta t$ كما في الشكل3-16 .

Time, Δt (hr)	$(t_p + \Delta t)/\Delta t$	Tubing pressure, p_{tf} (psig)	Pressure difference, $(p_{tfo} - p_{tf}) = 525 - p_{tf}$ (psig)
0.00	–	525	0
0.07	572,231.00	300	225
1.00	40,057.10	268	257
1.50	26,705.07	251	274
2.00	20,029.05	245	280
3.00	13,353.03	202	323
4.00	10,015.02	184	341
5.00	8012.22	173	352
6.00	6677.02	159	366
7.00	5723.30	153	372
8.00	5008.01	145	380
9.00	4451.68	139	386

الجدول3-4 : بيانات فحص انحدار الضغط للمثال رقم-4

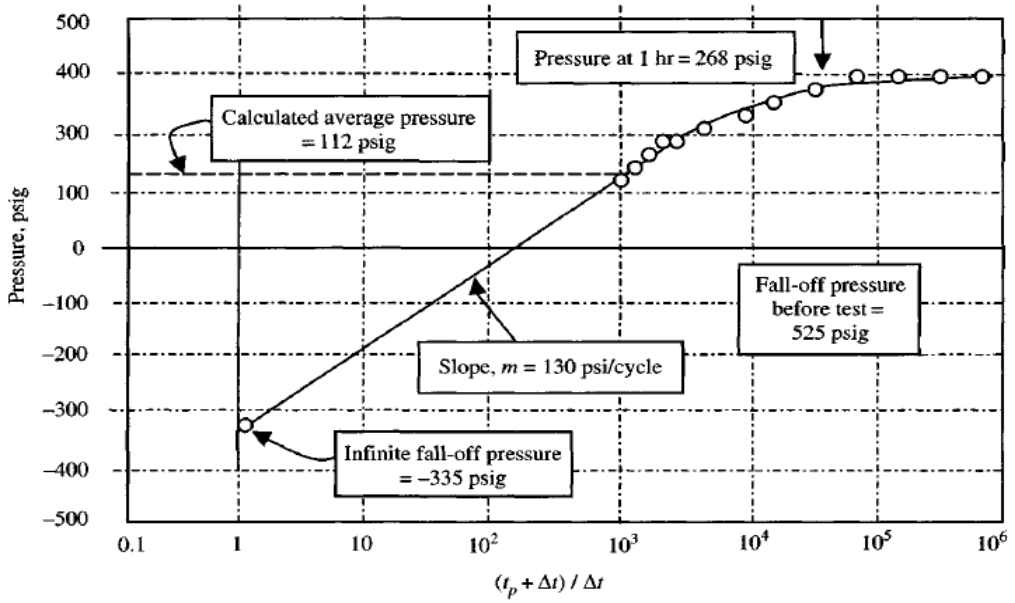


الشكل3-15 : رسم لوغاريتمي لتفسير بيانات فحص المثال رقم-4

3- حساب ميل الخط المستقيم و يساوي m=130 psi/cycle و $P_{1hr.}$=268 psi .

4- نحدد قيمة الضغط الزائف P* عند راس البئر (عند السطح) عبر مد الخط المستقيم في الشكل3-16 ليتقاطع مع وقت هورنر عند Δt=1 /(t_p+ Δt) والذي يساوي :

$$p_{ts}^* = -335 \text{ psig}$$



الشكل3-16 : طريقة (هورنر) لتفسير بيانات فحص المثال رقم-4

5- حساب النفاذية :

$$k_w = \frac{162.6(1426)(1.0)(0.6)}{130(49)} = 21.84\,\text{mD}$$

6- حساب عامل القشرة و فرق الضغط بتاثير عامل القشرة كما يأتي:

$$s = 1.513\left[\frac{p_{\text{wf at }\Delta t=0} - p_{1\text{ hr}}}{|m|} - \log\left(\frac{k}{\phi\mu c_t r_w^2}\right) + 3.2275\right]$$

$$= 1.151\left[\frac{525-268}{130} - \log\left(\frac{21.84}{0.16(0.9)(7.0\times10^{-6})(0.354)^2}\right) + 3.2275\right]$$

$$= 1.151[1.977 - 8.238 + 3.2275] = -3.49$$

$$\Delta p_{skin} = 0.869ms = 0.869(130)(-3.49) = -395\,\text{psi}$$

7- حساب مؤشر الحقن الحقيقي والمثالي ثم كفاءة الجريان على التوالي :

$$I_{actual} = \frac{q_i}{p_w - \bar{p}} = \frac{1426}{525-115} = 3.48\,\text{b/day/psi}$$

$$I_{ideal} = \frac{q_i}{(p_w - \bar{p}) - \Delta p_{skin}} = \frac{1426}{(525-115)-394} = 1.77\,\text{b/day/psi}$$

$$FE = \frac{I_{actual}}{I_{ideal}} = \frac{3.48}{1.77} = 1.96$$

8- ممكن ان نجد الانضغاطية الكلية للمنطقة المكتسحة invaded zone كما يأتي:

$$c_t = c = s_o c_o + s_w c_w + c_f$$
$$= 0.20(3.0 \times 10^{-6}) + 0.80(3.0 \times 10^{-6}) + 4.0 \times 10^{-4} = 7.0 \times 10^{-6}\ \text{psi}^{-1}$$

4-3 فحوصات الحقن في نظام الانسيابية لا يساوي الواحد Injection testing in non-unit-mobility ratio systems-M≠1

عندما لا تتحقق فرضية نسبة الانسيابية تساوي الواحد اي M≠1 فان موضوع فحص الحقن سيصبح من تطبيقات الموديل المكمني المركب Composite model ويصبح تشابه فحص الحقن مع الفحص الانتاجي غير مكتمل كما كان في فرضية نسبة الانسيابية تساوي الواحدM=1.

*ما هو الموديل المكمني المركب Composite Model؟

هو موديل للحقن يفترض وجود منطقتين (أو أكثر) داخل الطبقة المكمنية، لكل منطقة خصائص مختلفة.

* أشكال الموديل المركب:

a- ثنائي المناطق(الجبهات)–2 Regions (الأكثر شيوعًا):

ممكن ان يتشكل الموديل المركب من منطقتين 2 regions متجاورة من دون منطقة انتقالية الشكل3-17-b لتشمل جبهتي المائع المُزيح والمائع المُزاح . ان عدم وجود منطقة انتقالية في هذه الحالة تعني انه عند الانتقال من منطقة الى اخرى لا يكون تدريجي وانما يكون مفاجئا بسبب التغير الحاد بالخواص لكلا المنطقتين مما يقلل من تعقيد حسابات تفسير الفحص.

يُفترض ان كل منطقة متجانسة و تسلك سلوك المكمن اللامتناهي Unsteady State-USSو لكل منهما خواصها مثل تخزين مكمني خاص بها Storativity-S=Øc$_t$ و انسيابية k/μ =Mobility و لكليهما سُمك واحد ثابت.

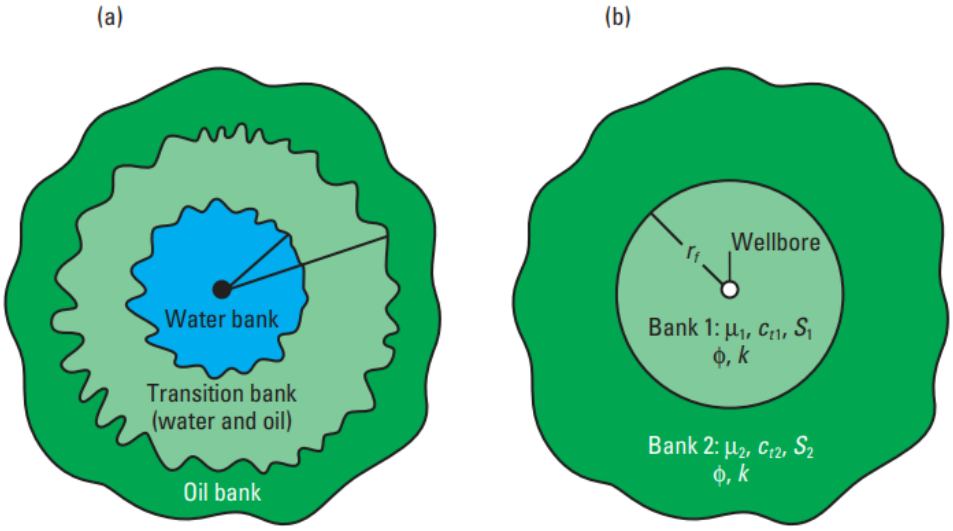
b- ثلاثي المناطق(الجبهات) –3Regions:

يتشكل نظام الحقن للموديل المركب هنا من ثلاث مناطق 3 regions متجاورة الشكل3-1-a و هو أكثر واقعية ولكن أقل استخدامًا مقارنة مع الموديل المركب الثنائي بسبب صعوبة و تعقيد التفسير. المناطق الثلاثة تشمل جبهتي المائع المُزيح والمائع المُزاح و بينهما المنطقة الانتقالية (او تسمى المنطقة الوسطية الشكل3-18).

* أين يُستخدم الموديل المركب؟

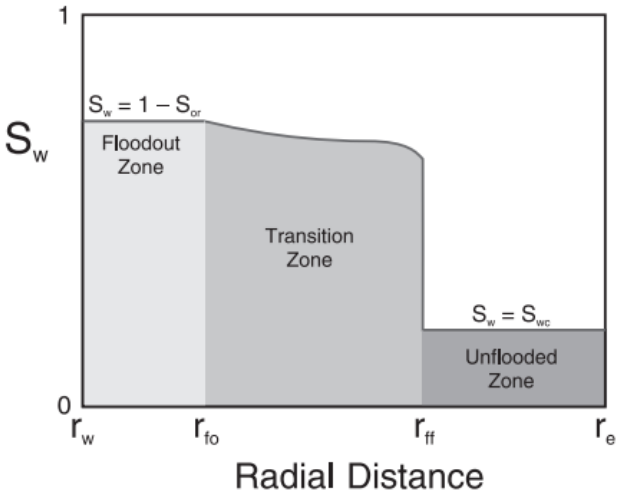
- في الاستخلاص الثانوي للنفط Secondary recovery بحقن الماء،

- في مشاريع استخلاص النفط المدعم Enhanced oil recovery projects كما في حقن بخار الماء Steam injection، حقن غاز ثاني اوكسيد الكاربون CO2 injection ، الاحتراق الموضعي In-situ combustion في قاع البئر و غيرها.



الشكل3-17 : الموديل المركب composite system لحقن الماء

a-موديل ثلاثي الجبهات، b- موديل بجبهتين

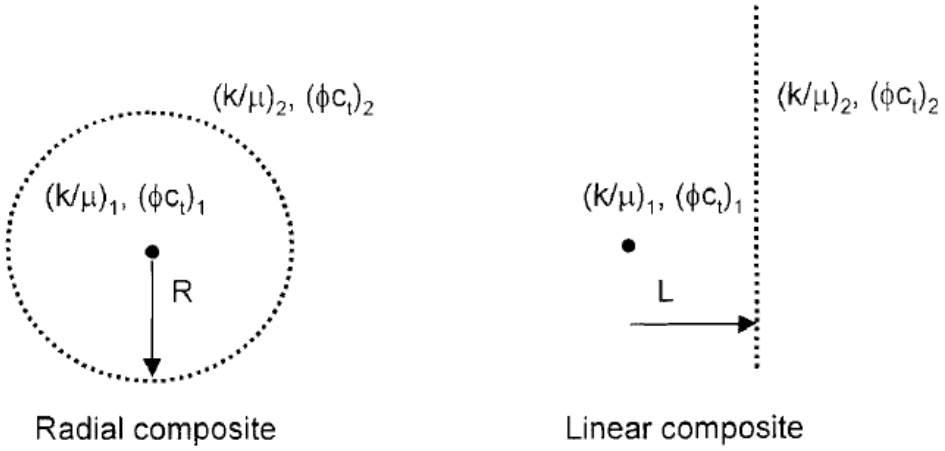


الشكل3-18 : مقطع لتشبع المائع في الموديل متعدد الجبهات

* الشكل الهندسي لواجهة المناطق:

ان الشكل الهندسي لواجهة الاتصال ما بين المنطقتين او الجبهتين مهم عند اجراء تفسير الفحص و يكون بنظامين:

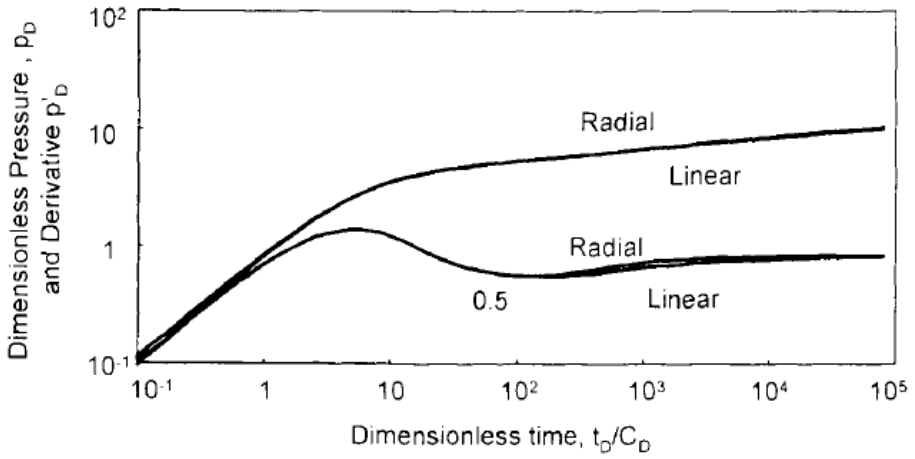
a- نظام خطي Linear System (الشكل3-19) : و يفترض وجود مستو عمودي فاصل ما بين المنطقتين و البئر يقع في احداهما . هذا الموديل يُمكن تمثيله في وجود فالق خطي linear fault ما بين الجهتين و كلا الجبهتين بخواص مختلفة.



الشكل3-19 : موديلات المكامن المركبة - الخطية و الشعاعية

b- نظام شعاعي Radial System (الشكل3-19): و هو النظام الشائع و المتداول إذ يفترض ان البئر يقع في مركز مكمن دائري و المسافة الى الواجهة ما بين الجبهتين يمثل نصف قطر المنطقة الاولى و نصف قطر المنطقة الثانية يمتد من مركز البئر الى حدود المكمن.

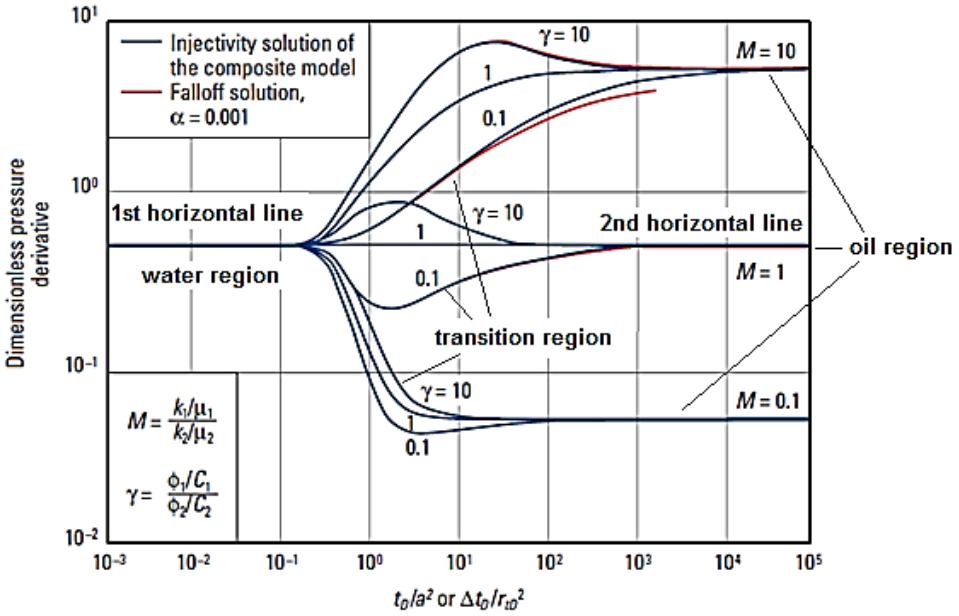
يُوضح الشكل3-20 استجابة منحني الضغط و مشتقة الضغط مع الوقت لكلا الموديلين الخطي و الشعاعي. فالفرق محدود بين النظامين.



الشكل3-20 : استجابة الضغط و مشتقة الضغط مع الوقت لكلا الموديلين الخطي و الشعاعي

3-4-1 تاثير نسبة الانسيابية- M على سلوك الفحص:

الشكل3-21 يُوضح تاثير قيم نسب الانسيابية M على شكل منحنيات مشتقة الضغط اللابعدي مع الزمن اللابعدي لفحوصات قابلية الحقن injectivity test (المنحنيات باللون الازرق) و انحدار الضغط fall-off test (المنحنيات باللون الاحمر) في الموديل المكمني المركب ، على فرض اهمال تاثير تخزين البئر. من الممكن تمييز الاتي:



الشكل3-21 : استجابة الضغط و مشتقة الضغط مع الوقت لكلا الموديلين الخطي و الشعاعي

1- **جبهة الماء** : في البداية، تكون استجابة الضغط مطابقة لسلوك جريان المائع الواحد وتحكمها خصائص الصخور والموائع في منطقة جبهة الماء إذ تظهر كخط أفقي في منحني مشتقة الضغط .

2- **المنطقة الانتقالية:**

- تُمثل الاستجابة الثانية و المنطقة معقدة ، تشبع مائع الحقن متغير و يتوزع داخل المنطقة الانتقالية حيث تتاثر بنسبة الانسيابية $M=(k/\mu)_1 / (k/\mu)_2$ و التي تتراوح قيمها حسب الشكل 21-3 ما بين $M=0.1،1،10$.

- تؤثر الانسيابية النسبية على شكل و اتجاه منحنيات مشتقة الضغط . يُظهر منحنى مشتقة الضغط تحدبا عندما $M>1$ و انحدارا (تقعرا) عندما $M<1$ و خطا افقيا عندما $M=1$.

- طول المدة الانتقالية تتاثر بشدة لنسبة تخزين جبهتي الماء و النفط $\gamma= (Øc_t)_1/ (Øc_t)_2$ (الشكل3-21). و لقيم مختلفة لنسبة تخزين $\gamma=10،1،0.1$ فان طول المدة الانتقالية ستزداد عندما تقل γ بثبوت M . كما و تزداد طول المدة الانتقالية ايضا بزيادة M عند ثبوت γ.

3- **جبهة النفط** : تُمثل الاستجابة الثالثة و ممكن ملاحظتها عندما تخترق اشارة الضغط جبهة النفط عندها ستكون خواص الصخور و المائع في جبهة النفط هي الحاكمة على سلوك موجة او اشارة الضغط المسجلة . عبر المدة هذه سيظهر خط افقي ثاني لمشتقة الضغط اللابعدي يعكس طور الجريان الشعاعي. ان استقرار منطقة جريان الشعاعي الثانية يعتمد على انسيابية جبهة النفط k_o/μ_o فكلما زادت تحقق استقرار اسرع .

2-4-3 تفسير فحوصات الحقن عند نسبة الانسيابية لا تساوي الواحد

هنالك طريقتان لتفسير فحص انحدار الضغط في حال $M \neq 1$ و كالاتي:

1-2-4-3 طريقة ميريل Merril et al :

تعتمد طريقة ميريل (1974) Merril et al. نموذج مكمني مركب ثنائي (Two-Zone Composite Reservoir Model)، يُقسم المكمن إلى منطقتين متجاورتين كما في الشكل3-22:

المنطقة الاولى :تُمثل منطقة جبهة الماء بنصف قطر مقداره r_{f1} و بانسيابية تُمثل انسيابية الماء و تساوي:

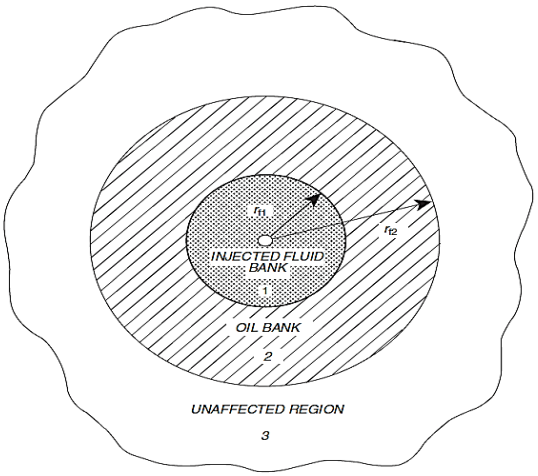
$$\lambda_1 = (k/\mu)_1 \text{ -------- } 18$$

النفاذية الفعالة للماء $k_1 = k_W$ تُحسب عند معدل التشبع المائي لجبهة الحقن ، $\mu_1 = \mu_w$ و تمثل لزوجة الماء.

المنطقة الثانية :تُمثل منطقة جبهة النفط بنصف قطر من بئر الحقن مقداره r_{f2} و بانسيابية تُمثل انسيابية النفط.

$$\lambda_2 = (k/\mu)_2 \text{ -------- } 19$$

النفاذية الفعالة للنفط $k_2 = k_o$ تُحسب عند التشبع المائي الاصلي Irreducable water saturation-S_{wi} ، $\mu_2 = \mu_o$ و تمثل لزوجة النفط.



الشكل3-22 : نظام جبهتي الماء و النفط بطريقة ميريل Merril et al

1- أهمية الطريقة:

- تُعد طريقة عملية وفعالة خاصة في حالات حقن الماء طويل الأمد.
- تُستخدم كثيرًا في تحليل فحوصات المكامن التي شهدت تقدم واضح لجبهة الماء عبر الإنتاج أو الحقن.

2- محددات استخدام طريقة ميريل:

- يُمكن تطبيق الطريقة عمليا و بكفاءة عندما النسبة $r_{f2}/r_{f1}>50$.
- و يُمكن تطبيقها ايضا عندما $r_{f2}/r_{f1}>10$ الشكل3-22 .
- اذا قلت النسبة عن العشرة فلا تعمل طريقة ميريل ولا يُمكن استخدامها في تفسير الفحص .
- شرط التشبع الكامل يفترض أن:

منطقة جبهة الماء مملوءة بالماء + النفط المتبقي S_{or} (Residual oil saturation)

منطقة جبهة النفط مملوءة بالنفط + الماء الأصلي S_{wi}

- لا يشترط معرفة نسبة الانسيابية M
- يجب معرفة نسبة التخزين جبهة الماء الى النفط $\gamma= (Øc_t)_1/ (Øc_t)_2$
- زمن الإغلاق يجب أن يكون قصيرًا بما يكفي لكي يحقق ان نصف قطر بحث Radius of investigation r_{inv} لا يتجاوز نصف القطر الخارجي لجبهة النفط اي ان $r_{inv} < r_{f2}$.

3- النتائج الممكن استخراجها:

- حساب نصف قطر جبهة الماء r_{f1}
- حساب نصف قطر جبهة النفط r_{f2}
- حساب النفاذية الفعالة في كلا المنطقتين

4- خطوات تفسير فحص انحدار الضغط بطريقة ميريل Merril et al :

- رسم علاقة فرق الضغط مع وقت الغلق ΔP vs Δt بمقياس لوغاريتمي log-log و ذلك لتحديد نهاية تاثير تخزين البئر.
- رسم علاقة هورنر او ميلر MDH بمقياس نصف لوغاريتمي Semilog (الشكل3-23). و يُمكن فرز خطين مستقيمة يعكسان خواص كلا الجبهتين. نحسب ميل الخطين m_1 و m_2 و وقت تقاطعهما Δt_{xf} إذ ان :

m_1 - يمثل ميل خط المستقيم الاول الذي يصف سلوك الضغط في المنطقة الاولى- جبهة الماء.

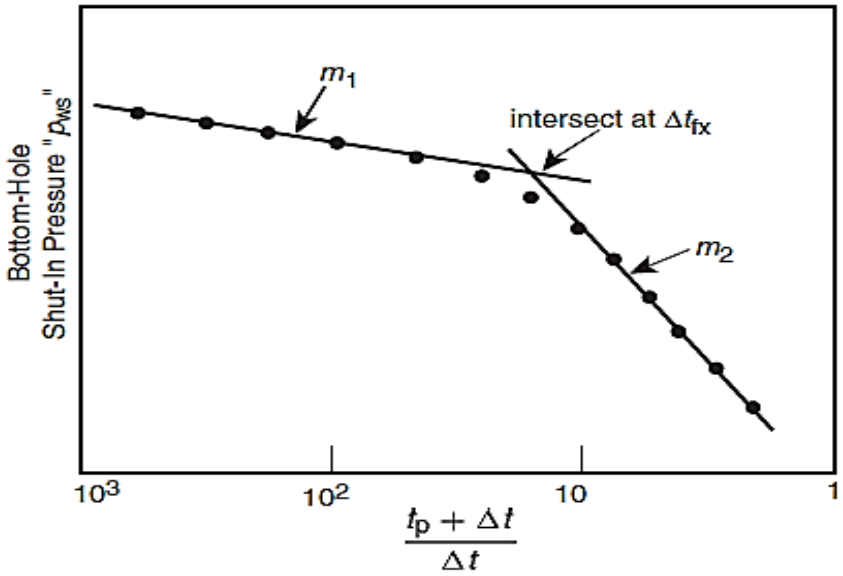
m_2 - يمثل ميل خط المستقيم الثاني الذي يصف سلوك الضغط في المنطقة الثانية- جبهة النفط.

Δt_{xf} - يمثل وقت تقاطع الخطين .

- حساب النفاذية الفعالة لمنطقة حقن الماء و عامل القشرة بعد تحديد m_1،P_{1hr} و كما يأتي:

$$k_1 = \frac{162.6 q_{inj} B \mu}{|m_1| h}$$

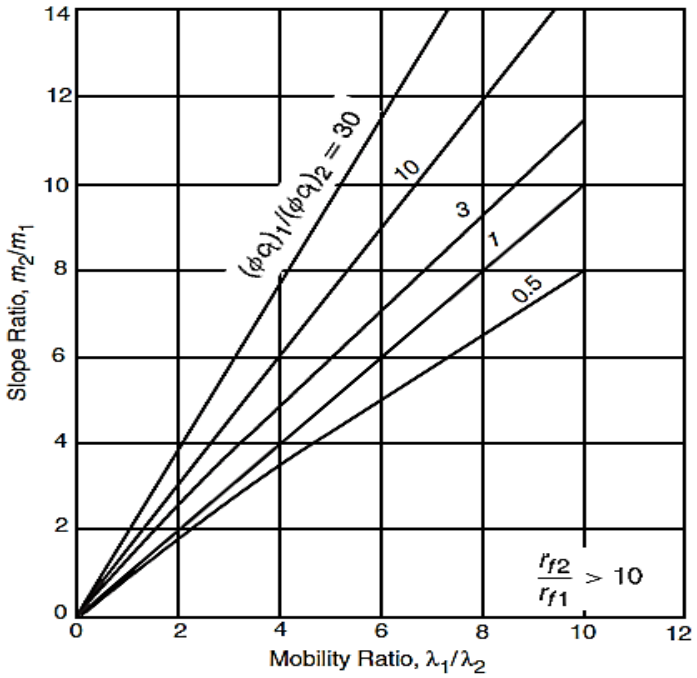
$$s = 1.513 \left[\frac{p_{wf \text{ at } \Delta t=0} - p_{1 \text{ hr}}}{|m_1|} - \log \left(\frac{k_1}{\phi \mu_1 (c_t)_1 r_w^2} \right) + 3.2275 \right]$$



الشكل3-23 : رسم هورنر في تفسير فحص انحدار الضغط بطريقة ميريل Merril et al

- حساب النسب الاتية:

$$\frac{m_2}{m_1} \quad \text{and} \quad \frac{(\phi c_t)_1}{(\phi c_t)_2}$$



الشكل3-24 : العلاقة ما بين نسبة الانسيابية ، نسبة ميل الخطين و نسبة التخزين(1974)Merrill

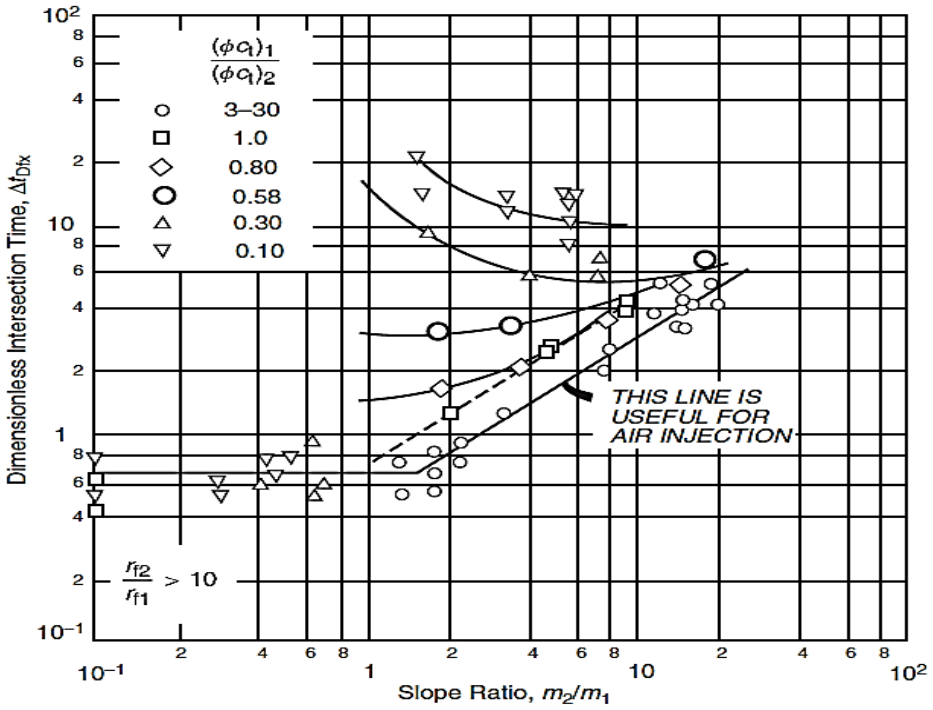
- من الخطوة السابقة و باستخدام الشكل3-24 ، نحدد نسبة الانسيابية M ما بين جبهة الماء (المنطقة الاولى) الى جبهة النفط (المنطقة الثانية) و التي تُعرف بالرمز:

$M=\lambda_1/\lambda_2$

إذ ان الانسيابية لجبهة النفط تساوي :

$$\lambda_2 = \frac{k_2}{\mu_2} = \frac{162.6QB}{m_2 h}$$

- حساب النفاذية الفعالة للمنطقة الثانية عبر المعادلة الاتية:



الشكل3-25 : ايجاد وقت التقاطع اللابعدي Δt_{Dxf}

$$k_2 = \left(\frac{\mu_2}{\mu_1}\right)\frac{k_1}{\lambda_1/\lambda_2} \text{ -------- } 20$$

- نجد وقت التقاطع اللابعدي Δt_{Dxf} من الشكل3-25 بتوفر معلومات النسبة

$$\frac{m_2}{m_1} \quad \text{and} \quad \frac{(\phi c_t)_1}{(\phi c_t)_2}$$

- حساب المسافة من بئر الحقن الى واجهة الحقن r_{f1} و كما يأتي:

$$r_{f1} = \sqrt{\left[\frac{0.0002637(k/\mu)_1}{(\phi c_t)_1}\right]\left(\frac{\Delta t_{fx}}{\Delta t_{Dfx}}\right)} \text{ ------- } 21$$

مثال-5

بيانات فحص انحدار الضغط لنظام مركب ثنائي الجبهة ، رسمت بطريقة MDH في الشكل3-26 أُهمل تاثير تخزين البئر . و من تمثيل الفحص باستخدام برنامج المحاكاة simulation اعطت النتائج ادناه:

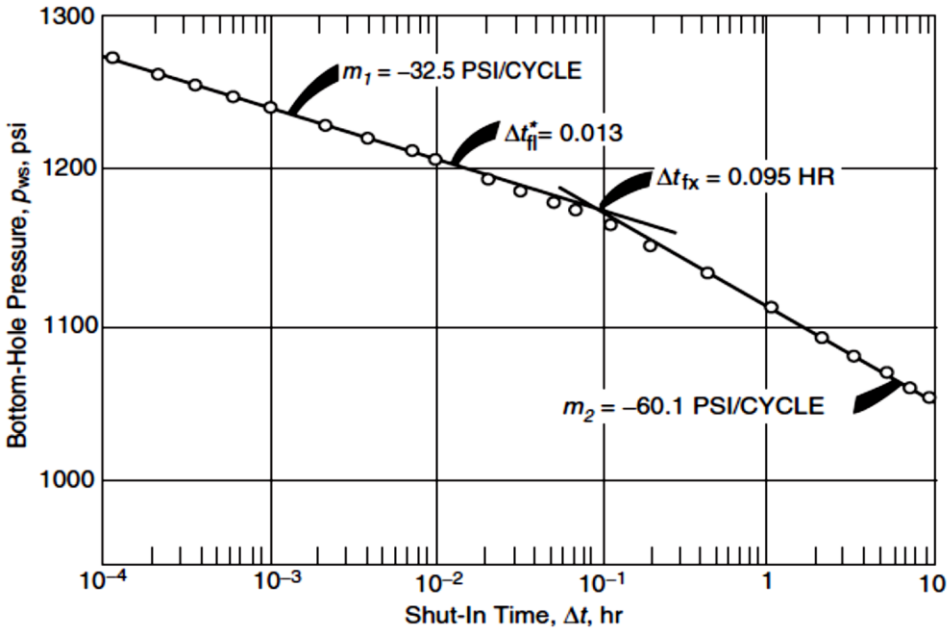
$$r_w = 0.25\ \text{ft}, \quad h = 20\ \text{ft}, \quad r_{f1} = 30\ \text{ft} \quad r_{f2} = r_e = 3600\ \text{ft},$$
$$(k/\mu)_2 = \eta_2 = 50\ \text{md/cp}, \ (k/\mu)_1 = \eta_1 = 100\ \text{md/cp}$$
$$(\phi c_t)_1 = 8.95 \times 10^{-7}\ \text{psi}^{-1} \quad (\phi c_t)_2 = 1.54 \times 10^{-6}\ \text{psi}^{-1},$$
$$q_{inj} = 400\ \text{STB/day} \quad B_w = 1.0\ \text{bbl/STB}$$

المطلوب:استخدام طريقة ميلر في تفسير الفحص لحساب λ_2 ، λ_1، r_{f1} و قارن النتائج مع نتائج موديل المحاكاة ؟؟

الحل:

1- من الشكل3-26 ، نحدد m_1، m_2 و Δt_{xf} و تساوي:

$$m_1 = 32.5\ \text{psi/cycle} \quad m_2 = 60.1\ \text{psi/cycle} \quad \Delta t_{fx} = 0.095\ \text{hour}$$



الشكل3-26 : بيانات فحص انحدار الضغط للمثال رقم-5

2- نحسب الانسيابية للمنطقة الاولى (جبهة الماء) $\lambda_1=(k/\mu)_1$

$$\left(\frac{k}{\mu}\right)_1 = \frac{162.6 q_{inj} B}{|m_1| h} = \frac{162.6(400)(1.0)}{(32.5)(20)}$$
$$= 100\ \text{md/cp}$$

3- حساب النسب الاتية : $\gamma= (Øc_t)_1/ (Øc_t)_2$ و m_2/m_1

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{-60.1}{-32.5} = 1.85$$

$$\frac{(\phi c_t)_1}{(\phi c_t)_2} = \frac{8.95 \times 10^{-7}}{1.54 \times 10^{-6}} = 0.581$$

4- من المعلومات في الخطوة السابقة و من الشكل3-24 نجد النسبة λ_1/ λ_2 و تساوي :

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 2.0$$

5- حساب الانسيابية لجبهة النفط $\lambda_2=(k/\mu)_2$:

$$\left(\frac{k}{\mu}\right)_2 = \frac{(k/\mu)_1}{(\lambda_1/\lambda_2)} = \frac{100}{2.0} = 50 \text{ md/cp}$$

6- من الشكل3-25 - نجد وقت التقاطع اللابعدي و يساوي $\Delta t_{Dxf}=3.05$.

7- اذن نصف قطر جبهة الماء تساوي:

$$r_{f1} = \sqrt{\frac{(0.0002637)(100)(0.095)}{(8.95 \times 10^{-7})(3.05)}} = 30 \text{ ft}$$

لاحظ :

- ان النسبة:

$r_{f2}/r_{f1}=3600/30=120>50$

و هي ملائمة لتطبيق طريقة ميريل Merril et al .

- هنالك تطابق ما بين انسيابية منطقة الماء المحسوبة بالطريقتين (ميريل Merril et al و الموديل الرياضي باستخدام الحاسوب) و كذلك انسيابية منطقة النفط.

3-4-2-2 طريقة أكاروال و يا Yeh and Agarwal (1989)

قدّم الباحثان Yeh و Agarwal طريقة جديدة ومختلفة لتحليل بيانات فحوصات الآبار، سواء لفحص قابلية الحقن (Injectivity Test) أو فحص انحدار الضغط (Falloff Test) اعتمدت طريقتهم على نتائج برامج المحاكاة لدراسة عدد كبير من السيناريوهات التي تمثل سلوك الضغط الانتقالي (Pressure Transient) في الآبار المحقونة ضمن مكامن تحتوي على جبهات متعددة (Multi-banked reservoirs).

1-الهدف:

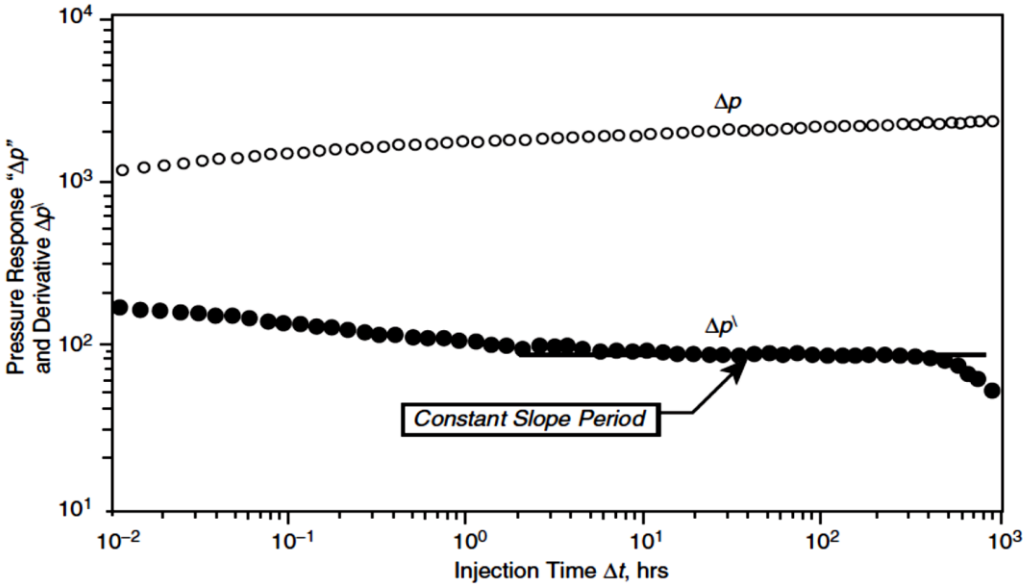
تطوير أسلوب دقيق لتفسير فحوصات الحقن بغرض حساب:

- الانسيابية (Mobility) ، أنصاف أقطار جبهات الموائع و توزيع الضغط داخل المكمن.

شملت الدراسة تحليل تأثير عدة عوامل على استجابة الضغط مثل:

- النفاذية النسبية(kr) ، لزوجة المائع(μ) ، التشبع الأولي بالماء(Swi) ، الانضغاطية(ct)
- عامل القشرة(s) ، تأثير تخزين البئر(C) .

توصلوا الى طريقة في تفسير فحوصات ابار الحقن بحسب نوع الفحص و كالاتي:



الشكل3-27 : استجابة ضغط الحقن و مشتقة الضغط لبيانات الفحص

2- سلوك الضغط عبر فحص قابلية الحقن Injectivity test

- عند رسم علاقة فرق ضغط الحقن ΔP_{wf} و مشتقة الضغط $\Delta \acute{P}_{wf}$ مقابل وقت الحقن t في رسم لوغاريتمي .
- يظهر خط افقي بميل ثابت لمشتقة الضغط $(\Delta \acute{P}_{wf})_{const}$ كما في الشكل3-27 .

إذ ان :

$$\Delta p_{wf} = p_{wf} - p_i$$

$$\Delta p'_{wf} = \frac{d(\Delta p_{wf})}{d(\ln t)}$$

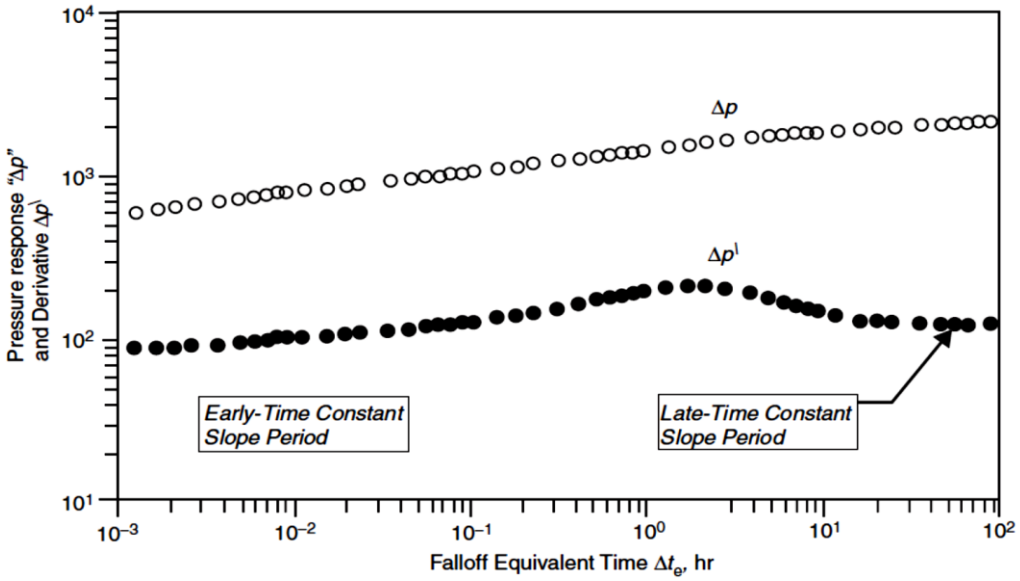
p_{wf} = bottom-hole pressure at time t during injection, psi
t = injection time, hours
$\ln t$ = natural logarithm of t

- من الخطوة السابقة يُمكن تقدير انسيابية الماء λ_1 في جبهة الحقن كما يأتي:

$$\lambda_1 = \left(\frac{k}{\mu}\right)_1 = \frac{70.62 q_{inj} B}{h(\Delta p'_{wf})_{const}}$$

- كما يُمكن عبر الخط المستقيم الأول (في التفسير النصف لوغاريتمي) تقدير عامل القشرة الميكانيكي.

عادة ما يكون عامل القشرة المحسوب من طريقة التفسير العادية النصف لوغاريتمية semilog أكثر من قيمته الحقيقية بسبب التباين في خواص كلا من مائع الحقن و المائع المكمني.



الشكل3-28 : استجابة ضغط الحقن و مشتقة الضغط لبيانات الفحص

3- سلوك الضغط عبر فحص انحدار الضغط Falloff test-

*عند رسم فرق الضغط بعد الإغلاق (ΔP_{ws}) ومشتقة الضغط ($\Delta \acute{P}_{ws}$) مقابل الوقت المكافئ (Δte) على مقياس لوغاريتمي (كما في الشكل 3-28)، تظهر فترتان مميزتان على منحنى مشتقة الضغط:

الفترة الأولى بخط ميل ثابت و بقيمة $(\Delta \acute{P}_{ws})_1$ تمثل الجريان في المنطقة المغمورة بالماء (Flooded zone)

الفترة الثانية بخط بميل ثابت و بقيمة $(\Delta \acute{P}_{ws})_2$ تمثل الجريان في المنطقة غير المغمورة بالماء (Unflooded zone) أي جبهة النفط.

بين هاتين الفترتين، يظهر تحدب في منحنى المشتقة يشير إلى الفترة الانتقالية.

إذ ان :

$$\Delta p_{ws} = p_{wf \text{ at } \Delta t=0} - p_{ws}$$

$$\Delta p'_{ws} = \frac{d(\Delta p_{ws})}{d(\ln \Delta te)} \quad \text{------- 22}$$

$$\Delta t_e = \frac{t_p \Delta t}{t_p + \Delta t} \quad \text{------- 23}$$

Δt = shut-in time, hours
t_p = injection time, hours

** باستخدام الفترتين الاولى و الثانية يُمكن:

حساب **انسيابية الماء λ1** في جبهة الحقن و حساب **انسيابية النفط λ2** في جبهة النفط كما يأتي:

$$\lambda_1 = \frac{70.62 q_{inj} B}{h(\Delta p'_{ws})_1} \quad \text{------- 24}$$

$$\lambda_2 = \frac{70.62 q_{inj} B}{h(\Delta p'_{ws})_2} \quad \text{-------25}$$

B المعامل الحجمي لمائع الحقن.

*** كما يُمكن عبر الخط المستقيم الأول (في التفسير النصف لوغاريتمي) تقدير عامل القشرة الميكانيكي بدقة.

ملاحظة: تتميز طريقة Yeh و Agarwal بأنها لا تعتمد على بيانات النفاذية النسبية لحساب الانسيابية، ما يتيح تجنب إجراء اختبارات النفاذية النسبية في المختبر على عينات اللباب الصخري.

5-3 فحص الحقن المتدرج (Step-rate Injectivity Test)

يُعد فحص الحقن المتدرج من الفحوصات السهلة، السريعة، وقليلة التكلفة، ويُستخدم بشكل أساسي لتحديد ضغط التشقق (Fracture Pressure) والضغط الآمن للحقن في الطبقات المكمنية ، ويُعد ضروريًا قبل بدء عمليات الحقن المستمرة (مثل حقن الماء أو ثاني أكسيد الكربون). معرفة ضغط التشقق يُعد أمرًا ضروريًا عند تنفيذ عمليات حقن الماء في الطبقة المكمنية خاصةً في عمليات دعم الضغط المكمني لغرض ضمان استمرار إنتاج النفط. إذ يجب التأكد من أن ضغط الحقن لا يتجاوز هذا الحد، لتجنّب إحداث شقوق غير مرغوب بها في المكمن. ان الآبار التي سبق استخدامها في عمليات حقن الماء تُعد مناسبة جدًا لإجراء مثل هذه الفحوصات، إذ يُمكن الاستفادة من سجلها التشغيلي لتقليل التكاليف وتجنب أخطاء تجاوز ضغط التشقق أثناء التجربة أو التشغيل الفعلي.

ملاحظات بخصوص تنفيذ الفحص:

- يجب أن يكون المكمن مشبعًا بالمائع المُراد حقنه لتجنب تأثير تغير التشبع.
- يتم استخدام مائع غير نشط كيميائيًا (عادة ماء مالح) لضمان دقة الفحص و تجنب المشاكل الجانبية من جراء تفاعله مع صخور او موائع المكمن.

- في حال لوحظ كسر او تشقق الطبقة في وقت مبكر، يجب إعادة تقييم خصائص الطبقة والمكمن.

خطوات إجراء فحص الحقن المتدرج

1- إغلاق البئر لمدة زمنية كافية حتى يستقر الضغط في قاع البئر.

2- البدء بحقن الماء بمعدل حقن q_1 ويستمر الحقن لمدة:

30 دقيقة إذا كانت نفاذية الطبقة المكمنية أعلى من 10 ملي دارسي

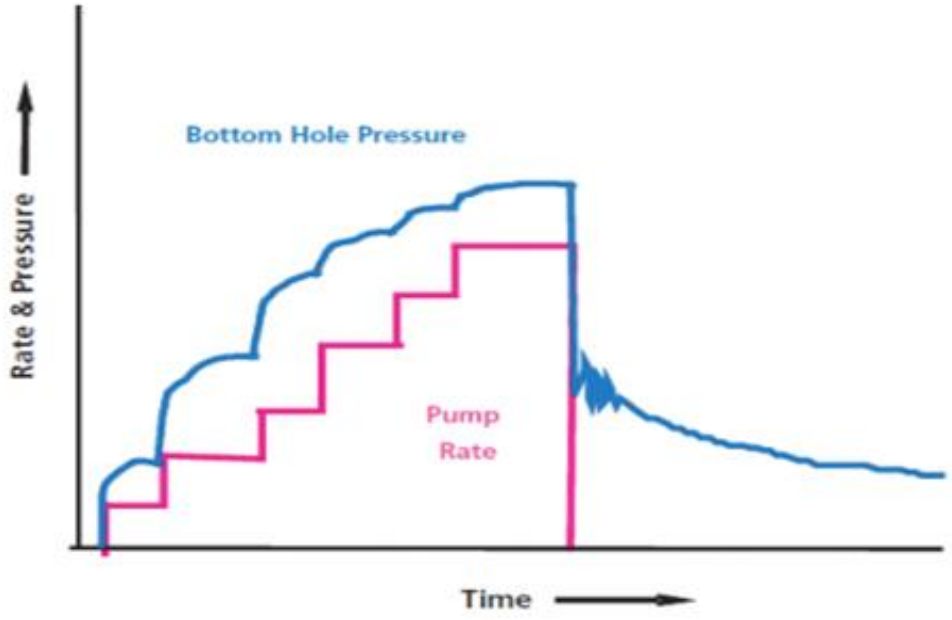
او 60 دقيقة إذا كانت النفاذية أقل من 5 ملي دارسي.

3- ثم تسجيل الضغط P_1 في نهاية مدة الحقن الاولى .يفضَّل قياس الضغط في قاع البئر (Bottomhole Pressure) ولكن يُمكن قياسه عند السطح إذا كان تأثير احتكاك المائع مع جدار البئر ضئيلاً.

4- نُعيد العملية لعدة مرات و بمعدلات حقن متزايدة متدرجة ، q_2 ،q_3 ،q_4،... مع الحفاظ على مدة الحقن نفسها في كل مرة (30 دقيقة أو 60 دقيقة حسب النفاذية) .

5- و تسجيل ضغوط الحقن النهائية P_2 ،P_3 ،P_4،.. في نهاية مدة كل معدل حقن .

6- يجب ان لا يقل عدد معدلات الحقن خلال الفحص عن أربعة معدلات حقن مختلفة ، لكن و للحصول على نتائج ادق فيُفضّل الحقن من 6 إلى 8 معدلات مختلفة.



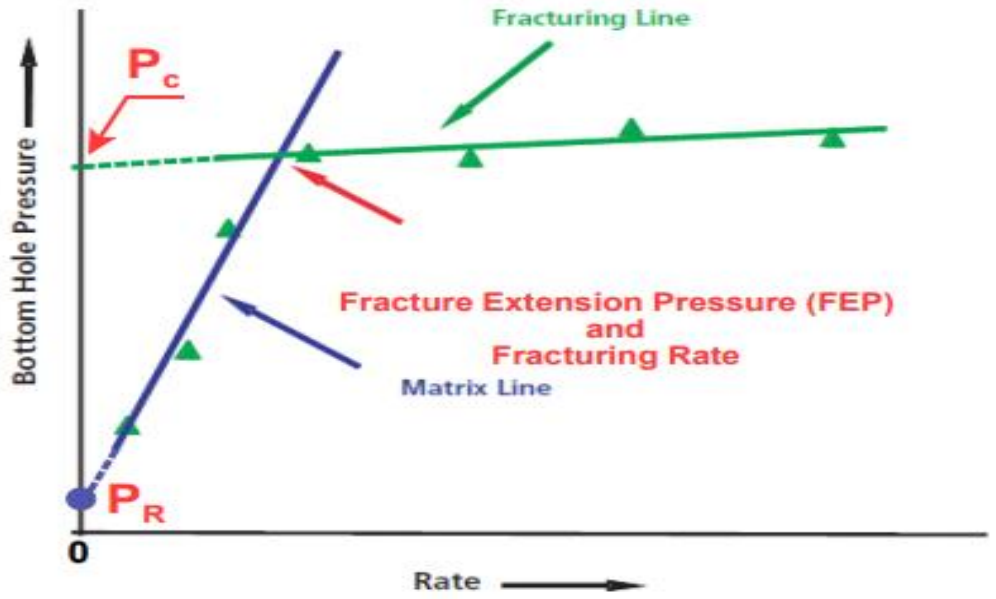
الشكل3-29 : مخطط لفحص الحقن المتدرج

7- تفسير بيانات الفحص:

- رسم ضغط الحقن و معدل الحقن مقابل الوقت على مخطط بـإحداثيات خطية (Cartesian plot) كما في الشكل3-29.

- رسم ضغط الحقن مع معدل الحقن على مخطط بـإحداثيات خطية (Cartesian plot) كما في الشكل3-30.

- يُوضح الشكل3-29 انه مع زيادة معدلات الحقن يزداد ضغط الحقن مع الوقت ثم عند نقطة معينة يحدث هبوط مفاجئ في معدل و ضغط الحقن ليعطي دلالة على حدوث تكسرات في صخور الطبقة (الشكل3-29) و تسرب المائع عبرها.



الشكل3-30 : مخطط لفحص الحقن المتدرج

- نقرأ الضغط عند هذه النقطة ليمثل ضغط تشقق صخور المكمن Fracture Pressure .

- يُوضح الشكل3-30 انه في بداية الفحص تكون العلاقة خطية بميل ثابت لتمثل جريان مائع الحقن خلال النسيج الصخري قبل حدوث التشقق والخط يُعرف هنا بخط النسيج الصخري (Matrix Line) .

- عند نقطة معينة، يبدأ الميل بالانحدار مُشكّلاً خط اخر يسمى خط الشق (Fracture Line) ليعطي دلالة على حدوث تكسرات في صخور الطبقة . من نقطة تقاطع الخطين يُمكن قراءة ضغط تشقق صخور المكمن Fracture Pressure و معدل الحقن لاحداث التشقق. وهذان هما الهدفان الأساسيان من إجراء الفحص.

6-3 تحديد ضغط التشقق التقريبي قبل الفحص

- قبل بدء عملية الحقن ، من الممكن تخمين ضغط التشقق و بشكل تقريبي في قاع البئر- P_{wf} بتطبيق معادلة ايتون Eaton's formula(1968) كما يأتي:

$$P_{(frac)} = NOB \left(\frac{u}{1-u}\right) + P_{(PV)} \quad \text{-------- 26}$$

إذ ان :

P (frac) : **Fracture Pressure Gradient** Psi/ft

NOB : **Net Overburden Pressure Gradient** Psi/ft

: **(Overburden Grad.- Pore Pressure Grad.)**

Overburden Grad. 1.0 Psi/ft

Pore Pressure Gradient = Current Reservoir Pressure / Depth

P (PV) : **Current Reservoir Pressure**

u : **Poisson's Ratio "u" = 0.27 Limestone**
= 0.33 Sandstone

Net Overburden Pressure Gradient	0.858	Psi/ft
(Overburden Grad.- Pore Pressure Grad.)		
Poisson's Ratio "u" =	0.28	
Pore Pressure Gradient	0.142	Psi/ft
Current Reservoir Pressure	479	Psi
Depth	3378	ft

الجدول3-5 :بيانات المثال رقم-6

مثال رقم-6 : تطبيق معادلة ايتون

حسب المعلومات المتوفرة في الجدول 3-5 ادناه ، احسب ضغط تشقق الطبقة المكمنية باستخدام معادلة ايتون؟؟

بتطبيق المعادلة رقم-26 نحصل على النتائج الاتية :

Fracture Pressure Gradient	0.475	Psi/ft
Fracture Pressure	1,606	Psi

7-3 تحديد معدل الحقن قبل الفحص و بشكل تقريبي

1- عند توفر تقدير أولي لضغط التشقق(Estimated Fracture Pressure) ، يُمكن حساب أقصى معدل حقن تقريبي باستخدام إحدى المعادلتين (27) أو (28)، إذ يمثّل هذا المعدل أعلى معدل يُمكن أن يؤدي إلى تشقق الطبقة المكمنية.

- ، تُستخدم معادلة (27) لتحديد أقصى معدل حقن تقريبي في حال الحقن في المستودع المائي (Aquifer):

$$qi_w = 9.3 \times 10^{-4} . \frac{k.h.\Delta P}{\mu_w} \quad \text{------- 27}$$

- تُستخدم معادلة (28) لتحديد أقصى معدل حقن في حال الحقن في المنطقة النفطية (Oil Zone) :

$$qi_w = 2.3 \times 10^{-4} . \frac{k.h.\Delta P}{\mu_w} \quad \text{------- 28}$$

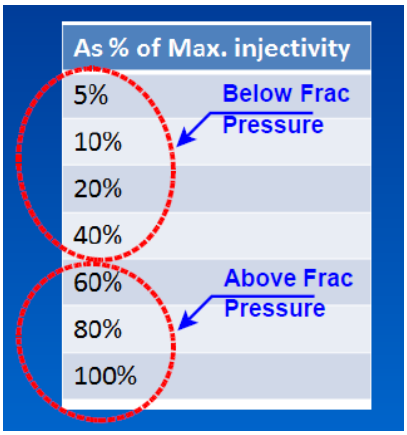
إذ ان ΔP يمثل صافي ضغط الحقن المسلط على الطبقة المكمنية .

و يساوي $\Delta P = P_{wf} - P_r$ إذ ان P_r يمثل الضغط المكمني قبل بدء الحقن ، P_{wf}ضغط الحقن في قاع البئر.

2- استخدام أقصى معدل حقن لتخطيط خطوات الفحص:

بعد تحديد أقصى معدل حقن و تشخيص ضغط التشقق fracture pressure التقريبي، يتم تخطيط خطوات فحص الحقن المتدرج بناءً على ما يلي:

- البدء بمعدلات حقن منخفضة تشكل نسبًا مئوية من أقصى معدل الحقن المحسوب.
- أول أربع مراحل من الفحص يتم اختيارها بحيث يكون الضغط أقل من ضغط التشقق.
- المراحل الثلاث الأخيرة يتم تصميمها بحيث تتجاوز الضغط التشققي المحسوب لتحديد نقطة التشقق بوضوح.



الجدول3-6 : اختيار معدلات الحقن لفحص الحقن المتدرج

3- توصية بخصوص ترتيب معدلات الحقن:

يُفضل اتباع تدرج منتظم ومدروس في معدلات الحقن، مثل ما هو موضح في الجدول3-6، إذ يتم توزيع معدلات الحقن بشكل يضمن تغطية نطاق الضغط ما قبل التشقق بدقة وتحديد نقطة التحول إلى التشقق.

3-8 العوامل التي تؤثر على تفسير فحص الحقن المتدرج

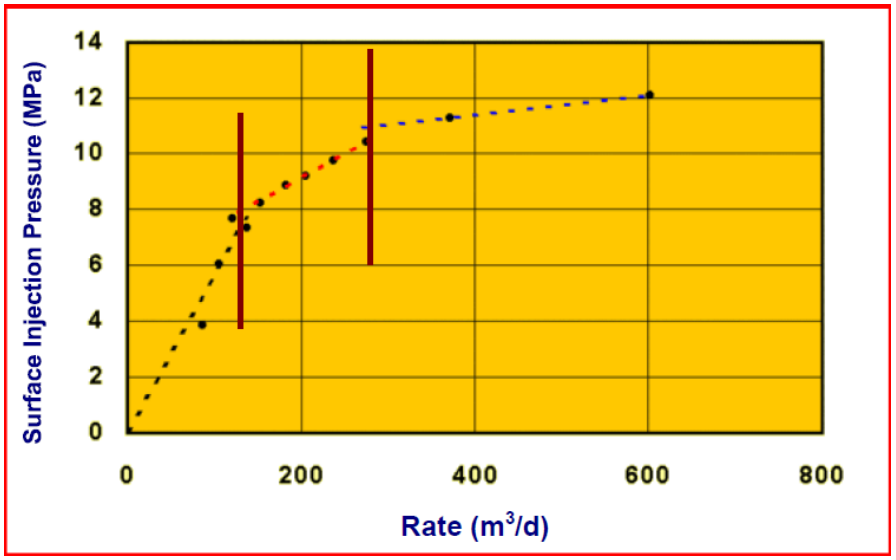
يتأثر تفسير نتائج فحص الحقن المتدرج بعدد من العوامل التي قد تؤثر سلبًا على دقة النتائج أو تؤدي إلى انحرافها، ومن أبرز هذه العوامل:

1- درجة حرارة الماء المحقون: ارتفاع درجة حرارة الماء قد يؤدي إلى ترسيب الأملاح داخل الطبقة المكمنية، مما يسبب تضرر (Damage) في المسامية والنفاذية وبالتالي يؤثر على استجابة الضغط.

2- نوعية الماء المستخدم في الحقن: يجب أن تكون مكونات الماء المحقون مشابهة لماء المكمن، خصوصا نسب الأملاح المذابة و ذلك لتقليل احتمالية حدوث ترسبات كيميائية أو تفاعلات ضارة.

3- وجود تضرر سابق في الطبقة المكمنية: إذا كانت الطبقة قد تعرضت لتضرر قبل إجراء الفحص، فيجب معالجة هذا التضرر مسبقًا لضمان نتائج دقيقة وموثوقة.

4- وجود شقوق مسبقة في الطبقة المكمنية أو الطبقات المجاورة: هذه الشقوق قد تؤدي إلى استجابة غير نمطية في الضغط أثناء الفحص، مما يصعب تفسير منحنيات الحقن.



الشكل3-31 : توجود اكثر من خطين في رسم بيانات الفحص

أسباب ظهور أكثر من خط مستقيم في الرسم البياني للفحص (الشكل 3-31)

عند تحليل البيانات المرسومة لعلاقة الضغط مقابل معدل الحقن، قد يُلاحظ وجود أكثر من خط مستقيم، ويُعزى ذلك عادةً إلى:

- عدم انتظام فترات الحقن: إذا لم تكن المدد الزمنية المخصصة لكل معدل حقن متساوية، فإن ذلك قد يؤدي إلى تغيرات في التوازن داخل الطبقة تؤثر على القراءات.
- وجود العديد من الشقوق المفتوحة بعد الحقن: يُمكن أن يؤدي فتح أكثر من شق عبر الفحص إلى ظهور أكثر من تغير مفاجئ في المنحنى، مما ينعكس على تشكل عدة خطوط مستقيمة في الرسم البياني.

9-3 استخدام بيانات فحص تدرج الحقن في حساب نفاذية الطبقة المكمنية و عامل القشرة

يُمكن استخدام بيانات فحص تدرج الحقن (Step-Rate Injectivity Test) في حساب نفاذية الطبقة المكمنية وعامل القشرة (Skin Factor)، وذلك عبر طريقة التفسير متعدد الجريان (Multiple-rate Transient Method)، (مراجعة الفصل 12 الفقرة الثانية/الجزء الاول) وهي تعتمد على تحليل استجابة الضغط لمعدلات حقن متعددة في فترات زمنية محددة.

$$\frac{p_i - p_{wf}}{q_N} = m' \sum_{j=1}^{N} \left[\frac{(q_j - q_{j-1})}{q_N} \times \log(t - t_{j-1}) \right] + b' \quad \text{------- 29}$$

- عند رسم علاقة :

$$(p_i - p_{wf})/q_N \ \text{ versus } \ \sum_{j=1}^{N} [((q_i - q_{j-1})/q_N) \log (t - t_{j-1})] \quad \text{------- 30}$$

على رسم بياني عادي سنحصل على علاقة خط مستقيم ميله m' والذي يساوي:

$$m' = \frac{162.6\beta\mu}{k\,h}$$

و منه نحسب قيمة نفاذية الطبقة و تساوي :

$$k = \frac{162.6\beta\mu}{m'h}$$

و ان b' يمثل تقاطع الخط المستقيم مع الاحداثي الصادي ، و من كلا الميل m' والتقاطع b' يُمكن حساب عامل القشرة و الذي يساوي:

$$s = 1.1513 \left[\frac{b'}{m'} - \log\left(\frac{k}{\phi\mu c_t r_w^2} \right) + 3.23 \right] \quad \text{------- 31}$$

مثال-7 تفسير فحص الحقن المتدرج

أُدرجت بيانات فحص الحقن المتدرج في الجدول3-7 ادناه:

البيانات الاخرى المتوفرة كما يأتي:

$h = 270\,\text{ft};\ c_t = 1.5 \times 10^{-5}\,\text{psi}^{-1},\ r_w = 0.25\,\text{ft};\ \phi = 0.186\,\text{fraction};$
$\mu_w = 0.45\,\text{cP};\ \beta_w = 1.0\,\text{rb/stb};$ well depth $= 7260\,\text{ft}$ and
injected fluid pressure gradient $= 0.433\,\text{psi/ft}.$

المطلوب: تحديد ضغط التشقق و النفاذية و عامل القشرة ؟؟

Time, t (hr)	Injection rate, q (stb/d)	Tubing pressure p_{tf} (psig)	$(p_i - p_{tf})/q$ psi/stb/d	$\sum[(q_i - q_{i-1})/q_n \times \log(t - t_{i-1})]$
0.00	0	642.0	–	–
0.50	−100	720.0	0.7800	−0.3000
1.00	−100	730.0	0.8800	0.0000
1.50	−250	856.0	0.8560	−0.1102
2.00	−250	874.0	0.9280	0.1204
2.25	−750	1143.0	0.6680	−0.3350
2.50	−750	1182.0	0.7200	−0.1124
3.00	−750	1216.0	0.7653	0.1238
4.00	−1150	1450.0	0.7026	0.2454

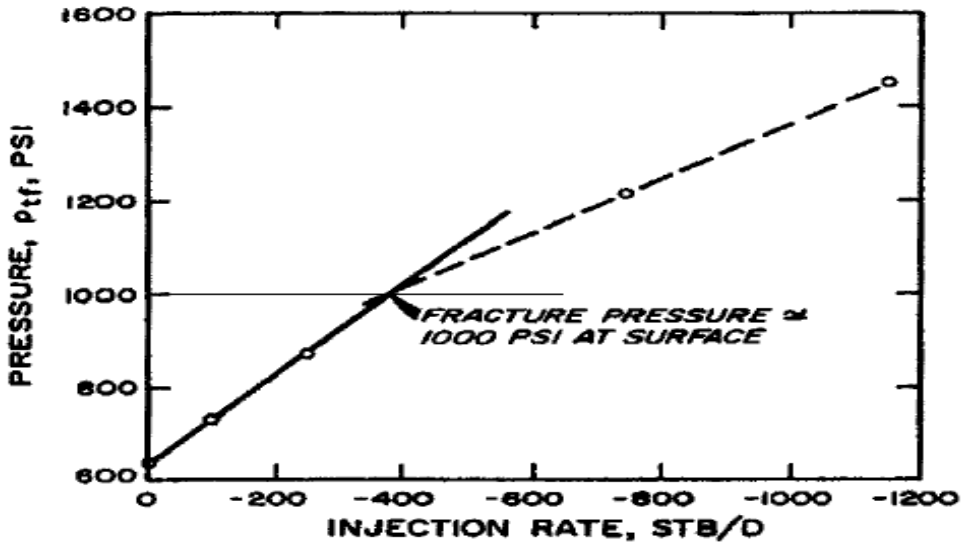
الجدول3-7 : بيانات فحص الحقن المتدرج للمثال رقم-7

الحل:

- من تدرج ضغط مائع الحقن 0.433 psi/ft فيبدو ان ماء الحقن هو الماء النقي Fresh water.

(ان كثافة الماء النقي $62.4\ lb/ft^3$ و قيمة التدرج تُحسب $(62.4/144inch^2 = 0.433\ psi/ft$)

- رسم علاقة ضغط الحقن عند السطح مع معدلات الحقن كما في الشكل3-32.



الشكل3-32 : بيانات فحص الحقن المتدرج للمثال رقم-7

- نُمرر احسن خطين مستقيمة عبر النقاط و نحدد نقطة تقاطعهما و احداثيات نقطة التقاطع هي q=400 stb/d، p=1000 psi . اذن التشقق يحدث عند الضغط السطحي P_{fr}=1000 psi و عند اقصى معدل حقن q=400 stb/d.

- حساب ضغط التشقق في باطن البئر و يساوي : ضغط عمود ماء الحقن + ضغط الحقن عند السطح و يساوي :

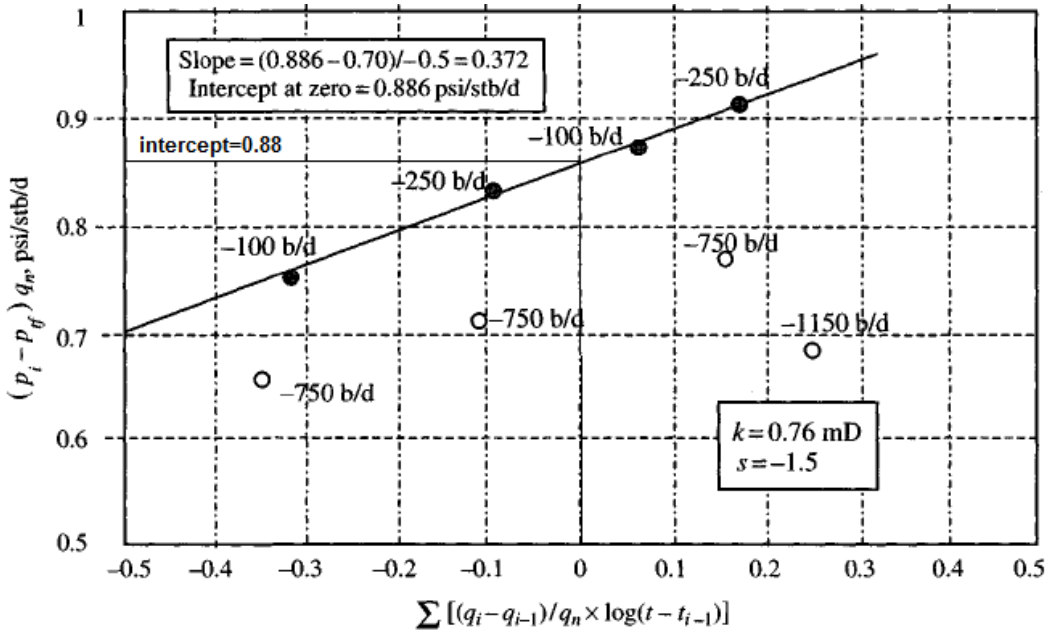
$$[(0.433)(7260) + 1000] = \mathbf{4143.6}\ \text{psi}$$

تدرج ضغط التشقق يساوي :

$$\mathbf{4143.6}\ \text{psi}\ /7260\ \text{ft} = 0.57\ \text{psi/ft}$$

- لاجل حساب النفاذية وعامل القشرة قبل حدوث التشقق ، نهيء البيانات بحسب الجدول3-7 العمودين رقم 4، 5 .
- رسم البيانات كما في الشكل3-33 ، و نرسم احسن خط مستقيم يمر بالنقاط الاربعة لمعدلات الحقن و قبل حدوث التشقق .
- ميل الخط المستقيم و تقاطعه مع الاحداثي الصادي يساوي على التوالي:

$$\text{Slope, } m' = 0.357[\text{psi/stb/day}]\text{cycle}$$
$$\text{Intercept, } b' = 0.885[\text{psi/(stb/day)}]$$



الشكل3-33 : تفسير بيانات فحص الحقن المتدرج للمثال رقم-7

- اذن نفاذية الطبقة تساوي:

$$k = \frac{162.6\mu\beta}{m'h} = \frac{162.6(1.0)(0.45)}{(0.357)(270)} = 0.76\,\text{mD}$$

- عامل القشرة يساوي :

$$s = 1.1513\left[\frac{b'}{m'} - \log\left(\frac{k}{\phi\mu c_t r_w^2}\right) + 3.23\right]$$

$$= 1.1513\left[\frac{0.885}{0.357} - \log\left(\frac{0.76}{(0.186)(0.45)(1.5\times 10^{-5})(0.25)^2}\right) + 3.23\right]$$

$$= -1.5$$

- لاحظ ان معدلات الحقن q=750، 1150 stb/d ، لا تقع على الخط المستقيم إذ سُجلت بعد حدوث الشق.

References – المصادر

1. Amanat U. Chaudhry ، "Oil Well Testing Handbook " ، Advanced TWPSOM Petroleum Systems، Inc. Houston، Texas ، Gulf Professional Publishing ، Copyright © 2004، Elsevier Inc.
2. Dominique Bourdet، " Well Test Analusis: The Use Of Advanced Interpretation Models"، 9 2002 Elsevier Science B.V.
3. Earlougher، R.C. Jr. 1977." Advances in Well Test Analysis، " Vol. 5. Richardson، Texas: Monograph Series، SPE.
4. Eaton، B.A. (1968)، "Fracture Gradient Prediction and Its Application in Oil Field Operations". Journal of Petroleum Technology، 10-32.
5. Felsenthal، M.، "Step-Rate Tests Determine Safe Injection Pressures in Floods،" Oil Gas J. (Oct. 28، 1974).
6. George Stewart، " Well Test Design and Analysis،" Copyright© 2011 by PennWell Corporation، Tulsa، Oklahoma.
7. Lee، J.W.، Rollins، J.B.، and Spivey، J.P. 2003. "Pressure Transient Testing،" Vol. 9. Richardson، Texas: Textbook Series، SPE. 978-1-55563-099-7.
8. M. A. Sabet، " Well Test Analysis" ، Gulf Publishing Company ، Houstan،1991.
9. McLEOD، N. and COULTER، A. (1969). "The simulation treatment of pressure record". J. Pet. Technol.، Aug، 951–960.
10. Merril، L. S.، Jr.، Kazemi، H.، and Gogarty، W. B.، "Pressure Falloff Analysis in Reservoirs With Fluid Banks،" J. Pet. Technol (July 1974) ، 809-818; Trans. AIME 257.
11. Schlumberger، "Well Test Interpretation" © Schlumberger 2002.
12. Tarek Ahmed ، Paul D. McKinney ، "Advanced Reservoir Engineering" ، Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier r ، 2005.
13. Yeh، N. and Agarwal، R. (1989). "Pressure transient analysis of injection wells". SPE Paper 19775، Presented at the SPE Annual Conference، San Antonio، TX، Oct.8–11.

الفصل الرابع

الفحص الطبقي- Drill Stem Test - DST

4-1 المقدمة :

فحص جذع الحفر(Drill Stem Test - DST) ، و يُطلق عليه حقليًا "الفحص الطبقي"، يُجرى على الطبقة المنتجة أثناء أو بعد حفر البئر مباشرة، قبل تثبيت البطانة (Casing) أو قبل الإنتاج الفعلي. يُعد من الطرق الحيوية والفعالة اقتصاديًا لإكمال الآبار مؤقتًا لغرض تقييم الطبقات المكمنية.

4-2 أهمية الفحص الطبقي:

تكمن اهمية الفحص الطبقي في ما يلي:

1. اكتشاف نوع المائع في الطبقة (نفط، غاز، ماء).
2. تحديد ضغط الطبقة المنتجة (Reservoir Pressure) .
3. تحديد معدل جريان البئر الأولي (Initial Flow Rate) .
4. جمع عينات من السوائل لتحليلها مختبريًا.
5. تحديد وجود أو عدم وجود ضرر (Skin Effect) حول جدار البئر.
6. تقدير النفاذية والخصائص الأخرى للمكمن.
7. كما و تُعد نتائج الفحص الطبقي من العوامل الحاسمة في اتخاذ القرار الفني، إذ يُمكن على أساسها:

- ان نقرر الاستمرار أو التوقف عن حفر آبار جديدة.
- تعديل برنامج الحفر أو الإكمال.
- وفي حال كانت النتائج مشجعة، يُمكن التوصية بحفر آبار تقييمية إضافية وإجراء دراسات مكمنية اولية لاحقًا.

يُنفذ الفحص الطبقي تقريبا في كل من: الآبار الاستكشافية (Exploration Wells)،الآبار التقييمية (Appraisal Wells) و ايضا حتى في الآبار التطويرية أو الإنتاجية (Development/ Production Wells) في حال لوحظ سلوك إنتاجي غير نمطي مقارنةً بآبار المكمن الأخرى.

4-3 الهدف من الفحص الطبقي: يهدف الفحص الى تحديد ما ياتي:

- نصف قطر منطقة البحث (Radius of Investigation - r_i) وهومهم لأنه يساعد في تحديد فيما إذا كان الفحص قد تجاوز تضرر حفرة البئر أم لا.
- طبيعة الموائع المكمنية عبر تحليل العينات المأخوذة من باطن البئر.
- حدود المكمن -Reservoir boundry
- خواص المكمن مثل: النفاذية (Permeability - k) ، عامل القشرة (Skin factor - s) ،
- درجة حرارة المكمن - Reservoir temperature

- الضغط المكمني.(Reservoir Pressure)
- دليل الانتاجية – Productivity index

نظرًا لان الاغلاق يكون من قاع البئر و ليس من السطح ، فإن تأثير تخزين حفرة البئر Wellbore Storage-WBS سيكون محدود و لا يدوم طويلاً عبر مدة تصاعد(بناء) الضغط.

4-4 الفرق بين الفحص الطبقي والفحوصات الإنتاجية:

ادناه جدول يُبين نقاط الاختلاف ما بين الفحص الطبقي والفحوصات الإنتاجية :

العنصر	الفحص الطبقي(DST)	الفحص الإنتاجي
نوع الإكمال	مؤقت	دائم
التثقيب	مؤقت باستخدام أدوات الفحص	دائم عبر تثقيب البطانة
مكان التشغيل	من قاع البئر باستخدام صمامات فتح وغلق	من رأس البئر (Wellhead) على السطح
مدة الفحص	قصيرة نسبيًا	أطول
الهدف	تقييم المكمن مؤقتًا	تقييم الأداء الإنتاجي الفعلي

الجدول 4-1: مقارنة ما بين الفحص الطبقي والفحوصات الإنتاجية

5-4 معدات جهاز الفحص الطبقي:

أُدرجت في الشكل 4-1 اهم اجزاء و معدات جهاز الفحص الطبقي مع وظيفة كل جزء منها.

6-4 مراحل إجراء الفحص(DST Procedure)

و تشمل :

1- **التجهيز:**

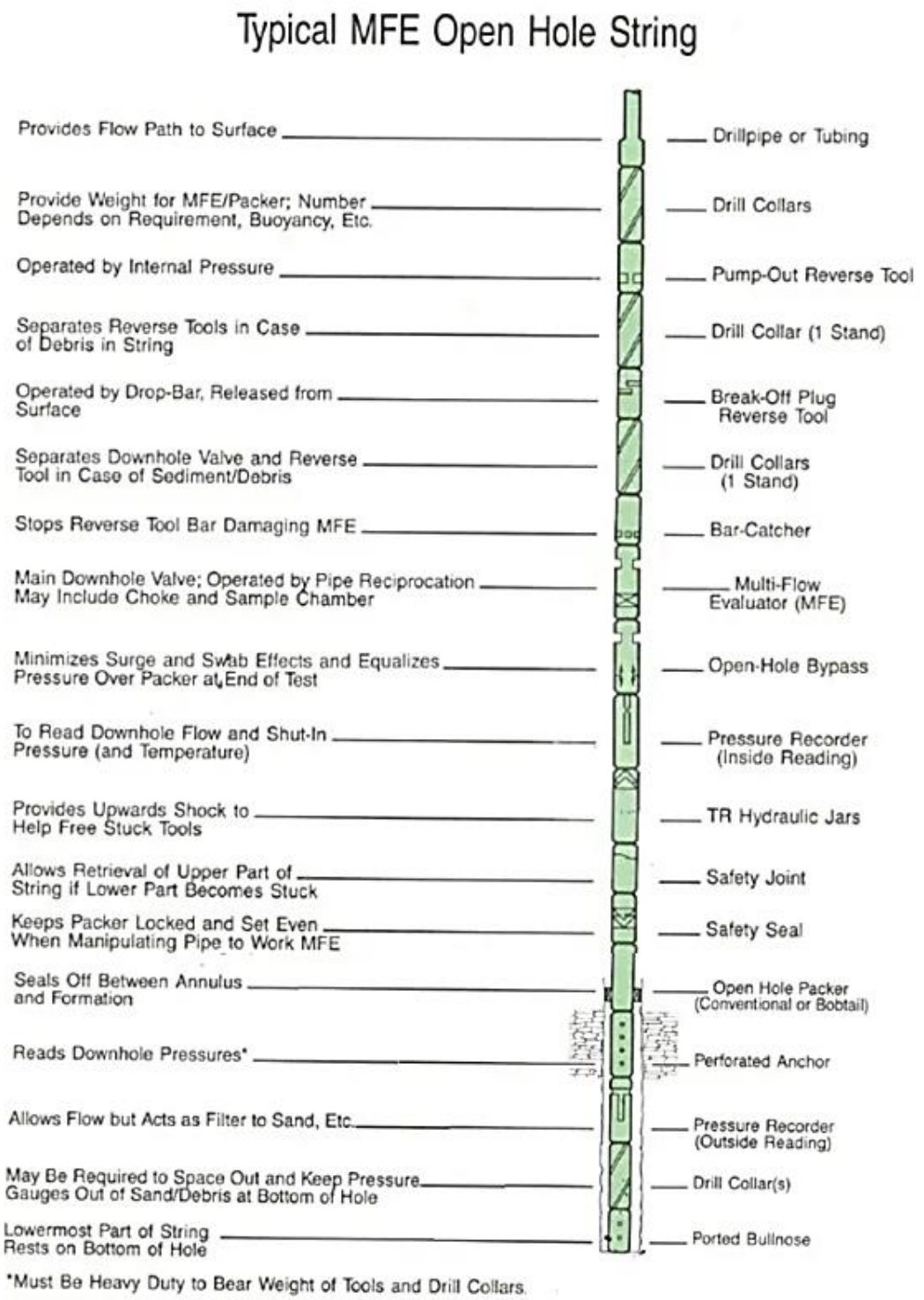
- انزال أدوات و معدات الفحص DST داخل البئر باستخدام الحبل السلكي أو سلسلة الحفر.
- تثبيت العازل Packers عند عمق الطبقة المستهدفة لغرض عزل الفراغ الحلقي عن الطبقة .

2- فتح الصمام والسماح بجريان البئر لفترة زمنية (Flow Period) :

يُفتح الصمام السفلي الرئيسي وتبدأ الموائع بالتدفق من الطبقة نحو الأنبوب و تُسجل بيانات الجريان.كما و تُسجل بيانات الضغط على ورقة او مخطط الفحص الطبقي DST Chart .

3- إغلاق الصمام و قياس الضغط المغلق (Shut-in Period) في فحص تصاعد الضغط.

يساعد ذلك في تقدير ضغط الطبقة الحقيقي و كشف الانسدادات في حال وجود اثر لذلك .



الشكل4-1 : مخطط يُوضح اهم معدات واجزاء الفحص الطبقي و عملها

4- إعادة العملية (إن لزم الأمر) :

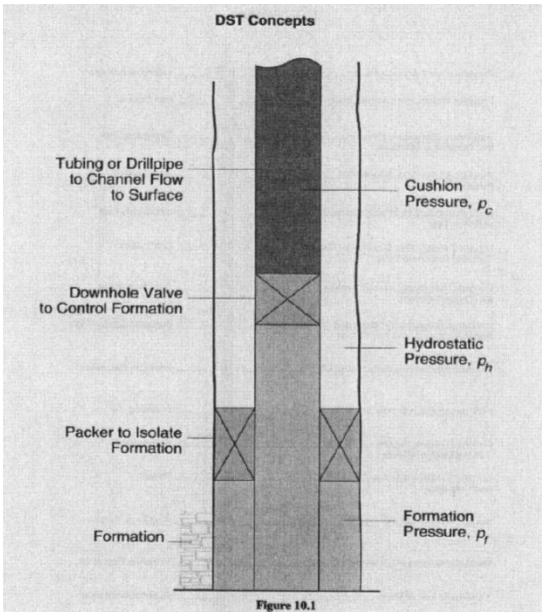
للحصول على بيانات مقنعة و دقيقة يُمكن تكرار الفتح والإغلاق و تسجيل البيانات لعدة مرات.

5- استرجاع المعدات و نماذج العينات:

تُرفع المعدات و نماذج العينات إلى السطح و تُحلل العينات المأخوذة مختبريا.

4-7 اساسيات الفحص الطبقي :

تعتمد آلية الفحص الطبقي (DST) على التحكم بثلاث ضغوط رئيسة كما موضح في الشكل 4-2 و هي:



الشكل4-2 : توضيح للضغوط الثلاثة عبر الفحص الطبقي ; ضغط التكوين p_f ،

1- ضغط التكوين:(Formation Pressure - p_f) : ويمثل الضغط الطبيعي للطبقة المكمنية.

2- الضغط الهيدروستاتيكي (Hydrostatic Pressure - p_h) : وهو الضغط الناتج عن عمود طين الحفر ويُستخدم لموازنة ضغط التكوين أثناء الحفر.

يُعد الضغط الهيدروستاتيكي أثناء الحفر، عامل الأمان الأساسي لضبط ضغط التكوين: يجب ألا يتجاوز p_h كثيرًا عن p_f كي لا يؤدي إلى تَكسر الطبقة (Fracturing) ولا يجب أن يكون أقل منه لتجنب انهيار البئر أو حدوث انفجار(Blowout) .

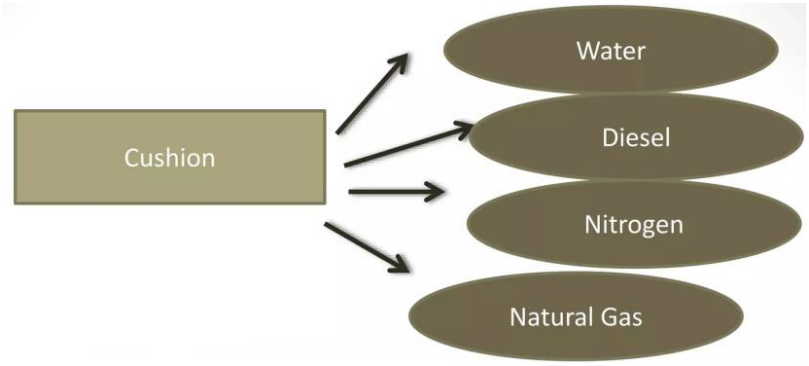
و يستمر دور الضغط الهيدروستاتيكي p_h حتى أثناء الفحص عبر السيطرة و تنظيم الضغط في الفراغ الحلقي (Annulus) بين البطانة (Casing) وأنابيب الحفر أو الإنتاج.

3- ضغط الوسادة (Cushion Pressure - pc) :

وهو ضغط عمود الماء (أو السوائل البديلة) الموجود داخل أنابيب الحفر قبل بدء الفحص.إذ

يُستخدم عمود ماء (Water Cushion) في جزء من أنابيب الحفر أو الإنتاج بدلاً من طين الحفر قبل بدء الفحص.

تعمل الوسادة المائية على تقليل الفرق بين الضغط الساكن وضغط التكوين. و تسهيل او تحفيز بدء الجريان من الطبقة ذات النفاذية المنخفضة ، ففي الطبقات ضعيفة النفاذية ، قد لا يحدث جريان في وجود طين الحفر داخل المعدات . لذلك يتم استبدال سائل الحفر بـالماء أو الديزل أو حتى النيتروجين (الشكل 4-3) .



الشكل4-3 : الموائع التي يُمكن استخدامها في الوسادة عبر الفحص الطبقي

يُعرف الضغط الناتج عن هذا العمود المائي بـ ضغط الوسادة (pc)، ويتم عزله عن ضغط التكوين pf بواسطة صمام الفحص (Downhole Valve) المثبت أسفل معدات الفحص.

دور العازل:(Packer)

يُركب العازل (Packer) بين البطانة وأنابيب الحفر فوق الطبقة المراد فحصها مباشرة، ليعزل:

الضغط الهيدروستاتيكي في الفراغ الحلقي(p_h) عن ضغط الطبقة الفعلي(p_f) وبذلك يتم التحكم الكامل في الضغوط المؤثرة خلال تنفيذ الفحص الطبقي.

4-8 انواع الفحص الطبقي:

و هي ثلاثة انواع (الشكل 4-4) و كالاتي:

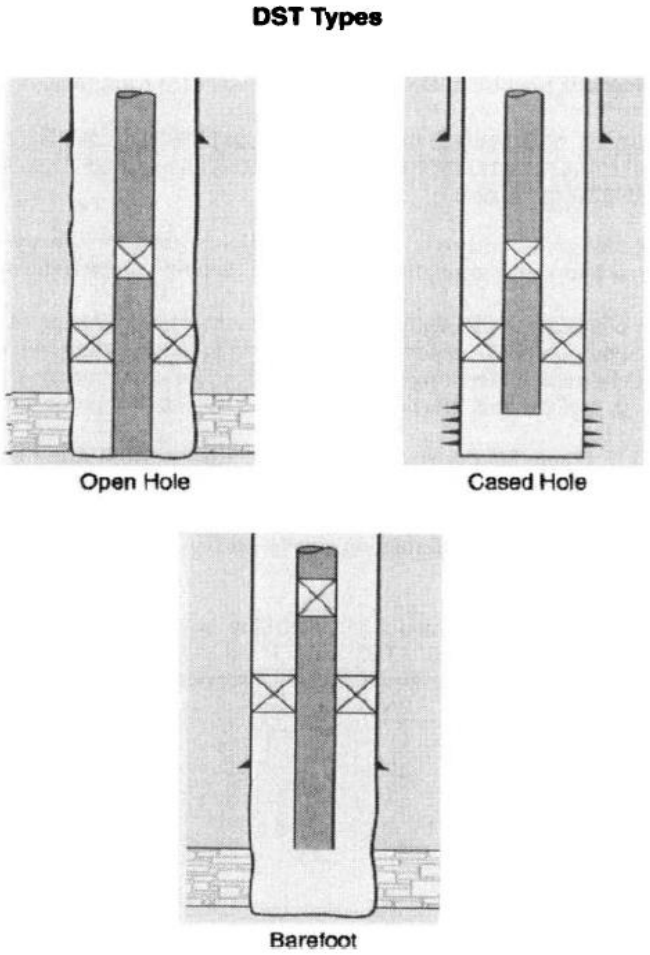
1- فحص الطبقات المفتوحة (Open Hole DST)

يُجرى فحص الطبقات المفتوحة قبل إنزال البطانة (Casing) ، أي مباشرةً بعد الانتهاء من حفر الطبقة أو حتى أثناء الحفر، خاصةً عندما يكون سُمك الطبقة كبيرًا، مما يستدعي تنفيذ الفحص الطبقي على مراحل تبدأ من الأعلى وتنتهي في الأسفل. يُمكن أيضًا استخدام معدات فحص مزودة بعازلين (Dual packers) لتمكين فحص فترتين مفتوحتين ومعزولتين في نفس الوقت، ما يسمح بتحليل دقيق لخصائص أكثر من طبقة ضمن التجويف المفتوح.

هذا النوع من الفحوصات يُعد من أهم الإجراءات في الآبار الاستكشافية، إذ يُمكن عبره:

- تحديد وجود النفط أو الغاز.

- اتخاذ قرار مبكر بالاستمرار او بإلغاء إكمال البئر (Well Completion) في حال عدم وجود مؤشرات إنتاجية، مما يضمن توفير واضح في الكلف خصوصًا في كلف إنزال البطانة والإكمال.



الشكل4-4 : انواع الفحص الطبقي

2- فحص الطبقات المبطنة (Cased Hole DST)

يُنفذ فحص الطبقات المبطنة بعد إنزال البطانة وتثبيتها، ويتم عادةً على مراحل تبدأ من الأسفل إلى الأعلى، إذ تُقسم الطبقة إلى عدة نطاقات (Intervals) لفحص كل جزء على حدة.

- تثقيب البطانة في النطاق المراد فحصه باستخدام بندقية تثقيب خاصة(Perforation Gun) و ذلك للسماح بمرور الموائع من الطبقة إلى داخل البئر عبر الثقوب.
- تُستخدم طريقة فحص الطبقات المبطنة بشكل محدود، وتُعد خيارًا بديلًا عندما لا يُمكن إجراء فحص الطبقة المفتوحة في الحالات الاتية:

- عدم وجود منطقة مناسبة لتثبيت العازل(Packer) .

- وجود طبقات غير متماسكة أو ذات لدونة عالية (مثل الطبقات الطينية)، مما يؤدي إلى انهيار جدار البئر أو استعصاء العازل (Stuck Packer) أثناء الفحص.

يختلف هذا النوع من الفحص عن سابقه :

- في كونه أكثر كلفةً ، إذ يجري الفحص بعد انزال و تسميت و تثقيب البطانة casing .

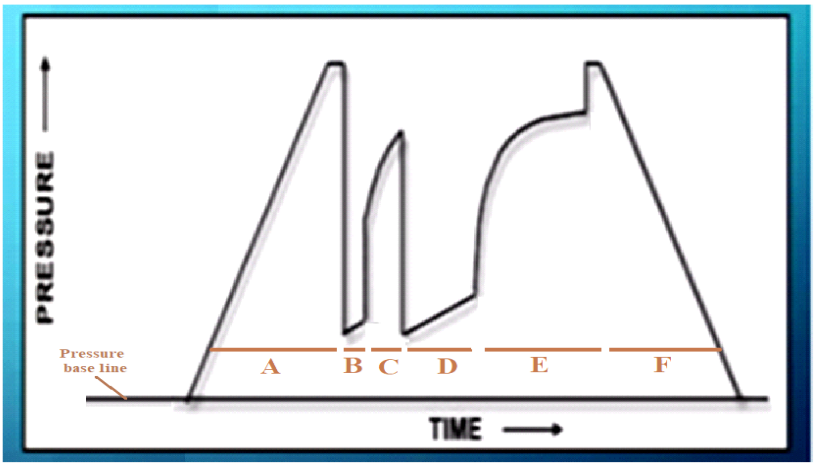
- دخول المائع المكمني يحصل عبر فتحات التثقيب perforations فقط ، بينما يحدث من كامل جدار البئر المفتوح في الفحص المفتوح اي هنالك فرق واضح في المساحة المعرضة للجريان لكلتا الطريقتين .

- الفحص هذا يختلف ايضا في نوع العازل packer كونه يلتصق بجدار حديدي مع انبوب الانتاج او الحفر من جهة و مع انبوب البطانة من الجهة الاخرى و في الفحص الطبقي المفتوح يلتصق العازل مع انبوب الانتاج او الحفر من جهة و مع صخور الطبقة المكمنية من الجهة الاخرى.

3- الفحص بلا تبطين (المكشوف) (Barefoot Test)

سُمي بهذا الاسم لأن الطبقة المراد فحصها تكون مفتوحة بالكامل (غير مبطنة)، كما أن معدات الفحص تُركب فوق الطبقة، ويُثبت العازل (Packer) عند نقطة التقاء البطانة مع انبوب الحفر من الاعلى.

يُستخدم هذا النوع من الفحص عادةً مع الطبقات المتماسكة (Consolidated)، والتي لا تُنتج رمالاً مع الموائع عند الجريان، مما يُقلل من احتمالية تضرر المعدات أو انسداد البئر.

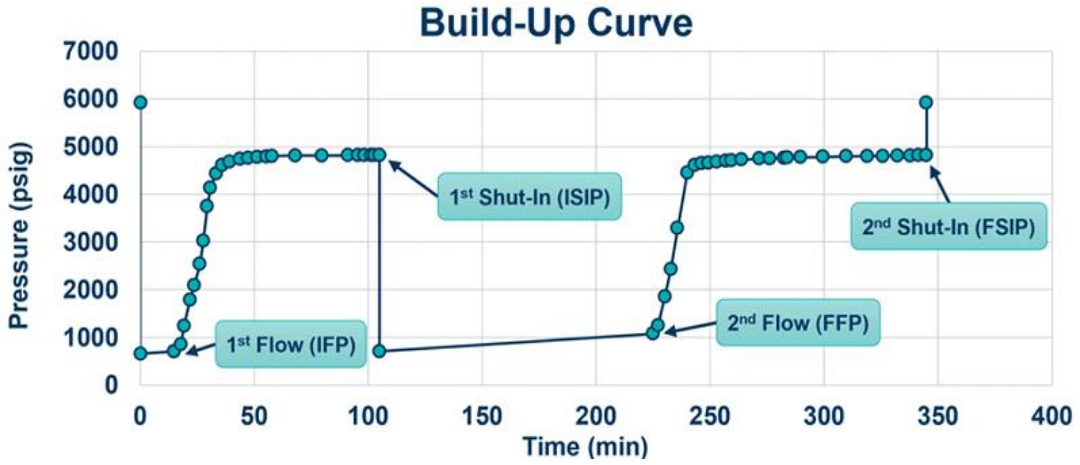


الشكل4-5 : مخطط الفحص الطبقي- DST chart

4-9 مخطط الفحص الطبقي - DST Chart

الطريقة الأبسط لوصف عملية فحص جذع الحفر هي في تقديم مخطط ضغط DST نموذجي للفحص المفتوح (انظر الشكل4-5) و وصف كل جزء منه. يُعد مخطط الفحص الطبقي (DST

Chart) أحد العناصر المميزة و الرئيسة لفحوصات الـDST، إذ يُظهر تسلسل مراحل الفحص مقابل الزمن على شكل رسم بياني للضغط مع الزمن كما في الشكل 4-5. لاحظ و قبل البدء بتفسير بيانات الفحص من مخطط الفحص الطبقي فمن الضروري بدءا مراجعة سلوك الضغط انيا لملاحظة أي إخفاقات أو مشاكل تشغيلية قد حدثت عبر تنفيذ الفحص. التقييم الاني هذا يتطلب معرفة مسبقة و جيدة من قبل المشغل بتسلسل مراحل المخطط.



الشكل4-6 : مخطط الفحص الطبقي- DST chart يُوضح نهايات فترتي الفتح والغلق

ندرج ادناه مكونات مخطط (ورقة) تسجيل الضغط لفحص مثالي (الشكل4-5 و الشكل 4-6) :

قبل تنزيل معدات الفحص في البئر يجب تهيئة البئر وملؤه بطين الحفر . يقوم المفسر بإدخال ورقة الفحص في المسجل ويرسم خط الأساس الذي يشير إلى (0 psig) و المتمثل بالخط الاسود في الشكل4-5 ثم يبدأ بتشغيل عداد الوقت.

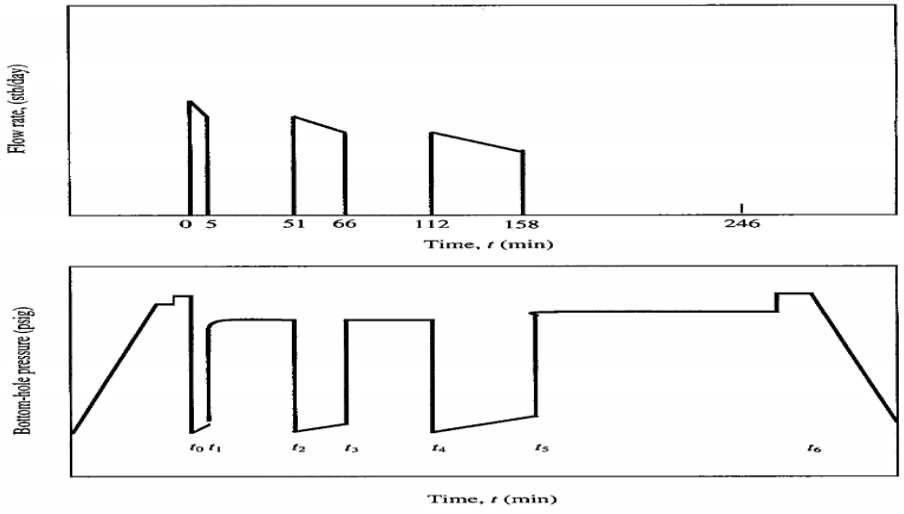
1- **فترة إنزال المعدات (Run-In-Hole- period A) الشكل4-5**

تُنزل معدات الفحص في البئر ويفتح الصمام الهيدروليكي الجانبي hydraulic by-pass valve (مركب ضمن معدات الفحص) للسماح لسائل الحفر في البئر بالمرور تلافيا للضغط المفاجيء من جراء انزال المعدات ، فيرتفع الضغط الهيدروستاتيكي (p_h) بسبب زيادة عمود طين الحفر. عند الوصول إلى العمق المطلوب يُثبت العازل (Packer) وذلك لعزل الفراغ الحلقي عن الطبقة المراد فحصها . نلاحظ في الشكل4-5 هنالك ثبوت بالضغط لفترة قصيرة وذلك من جراء ربط جذع الحفر بالمعدات السطحية عند راس البئر.الى هنا يُسجل الضغط الهيدروستاتيكي المستقر initial hydrostatic pressure .

2- **فترة الجريان الأولى (Initial Flow Period-IFP ، period B)**

يُفتح صمام الفحص الرئيسي Main valve لأول مرة ويبدأ تدفق الموائع من المكمن الى داخل معدات الفحص . يهبط الضغط عند فتح البئر للجريان ، حيث يقترب ضغط الجريان من الضغط الجوي في بداية هذه الفترة- B لولا وجود ضغط الوسادة . الهدف من هذه المرحلة هو في إزالة تأثير تنامي الضغط Pressure increase من جراء تثبيت العازل و لتنظيف البئر . الوقت خلال هذه المرحلة يستمر من 3 إلى 10 دقائق.

3- فترة الاغلاق الأولى (Initial Build-Up Period-ISIP) ، (period C ،
يُغلق صمام الفحص Main valve ويتوقف الجريان، ما يسمح بتصاعد الضغط تدريجيًا.
الغرض من ذلك لتحديد الضغط المكمني الأصلي Pi خاصة في الآبار الاستكشافية وهنا يُقرأ Pi في نهاية الفترة C . الوقت المستغرق خلال هذه المرحلة من 30 إلى 60 دقيقة.
4- فترة الجريان الثانية(النهائية) (Final Flow Period-FFP) ، (period D ،
يُعاد فتح البئر للجريان مرة ثانية بمعدل ثابت لغرض قياس ضغط الجريان وتجميع نموذج كافٍ من الموائع. هنالك هبوط للضغط واضح عند بدء فتح البئر و لا يلبث ان يتصاعد الضغط ببطأ بسبب استمرارية الجريان و يعتمد على خواص الطبقة و المائع. الوقت المستغرق خلال هذه المرحلة من **1 إلى 3 ساعات** في البئر المفتوح open hole، و **8 إلى 10 ساعات** في البئر المبطن casing hole .
5- فترة الاغلاق الثانية (النهائية)(Final Shut-In Period-FSIP) ، (period E ،:
يُغلق البئر للمرة الأخيرة وتُسجل بيانات تصاعد الضغط. الوقت المستغرق خلال هذه المرحلة حوالي ضعف وقت الجريان الأخير.
6- **فترة إنهاء الفحص(End of Test- period F)**
عند انتهاء الفحص يتم تحرير العازل (Packer Release) من خلال تدوير جذع الحفر او باستخدام مُعدة الرجة الهايدروليكية hydraulic jar فيتصاعد الضغط الى الضغط الهيدروستاتيكي و اخيرا تُرفع معدات الفحص الى السطح حيث قراءة مسجل الضغط عندها يسجل 0 psig عند السطح.



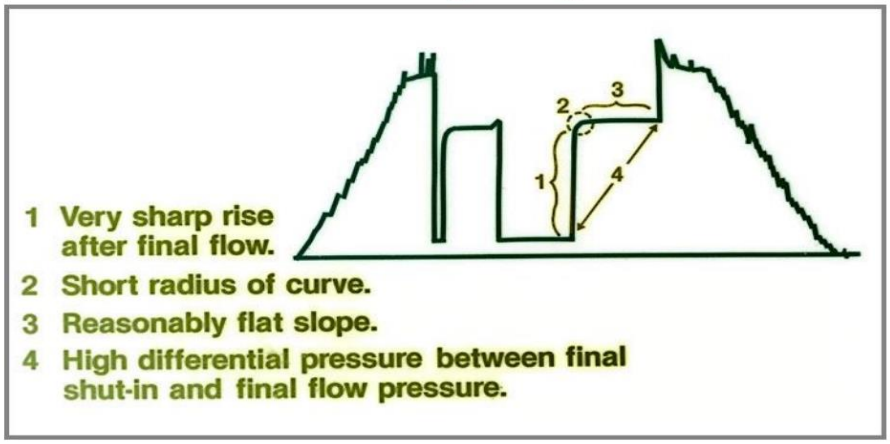
الشكل4-7 : الفحص الطبقي- DST chart بثلاث دورات

ممكن ان يتضمن الفحص الطبقي ثلاث دورات بدلا من دورتين (الدورة الواحدة تشتمل على فترة فتح و فترة غلق لمعدات الفحص) و ذلك لاجل التاكد من معلومة معينة مثلا التاكد من قيمة الضغط الاصلي للمكمن و كما موضح في الشكل 4-7 .

ملاحظات:
- ممكن ان تكون احداثيات مخطط الفحص الطبقي (DST Chart) معكوسة من اليمين الى اليسار.

- يزداد الضغط مع الوقت في بداية الفحص بشكل ملحوظ بسبب تراكم عمود السائل المنتج داخل أنبوب الحفر لغاية السطح إذ ان مسجل الضغط يقع في اسفل البئر .

- مُقيّم التدفق المتعدد Multi-Flow Evaluator (MFE) في الشكل4-7: أداة متطورة في فحوصات الآبار، يُعنى بتقييم التدفق المتعدد ، تفتح وتغلق بفتحات مختلفة في البئر تسمح للموائع بالتدفق من الطبقة المنتجة إلى الأنابيب أو إلى السطح. يُساعد الـ MFE في تقييم الطبقات التي لها خصائص تدفق مختلفة عن طريق التحكم في مسارات التدفق المتاحة للموائع (غاز، نفط، ماء).



الشكل4-8 : النقاط الاساسية في تقييم تضرر الطبقة المكمنية من شكل مخطط الفحص الطبقي- DST chart

4-10 تقييم تضرر الطبقة المكمنية مباشرة عبر مخططات الفحص DST chart

يُعد تقييم تضرر الطبقة المكمنية (Formation Damage) من الأمور المهمة عند تفسير مخطط الفحص الطبقي . يتم هذا التقييم عبر ملاحظة سلوك منحني الضغط عند الانتقال من فترة الجريان النهائي إلى فترة الغلق النهائي (Final Build-up) و كما موضح في الفقرتين في ادناه (لاحظ الشكل4-8) :

1- مؤشرات رئيسة تعكس وجود ضرر في الطبقة:

- الانتقال الحاد في منحني الضغط (Sharp pressure transition): اذ يظهر تغير مفاجئ في الضغط عند غلق البئر، مما يدل على وجود مقاومة لتدفق الموائع قرب البئر.

- صُغر نصف قطر الانحناء (Low curvature radius)عند الانتقال من الجريان النهائي إلى الغلق النهائي.

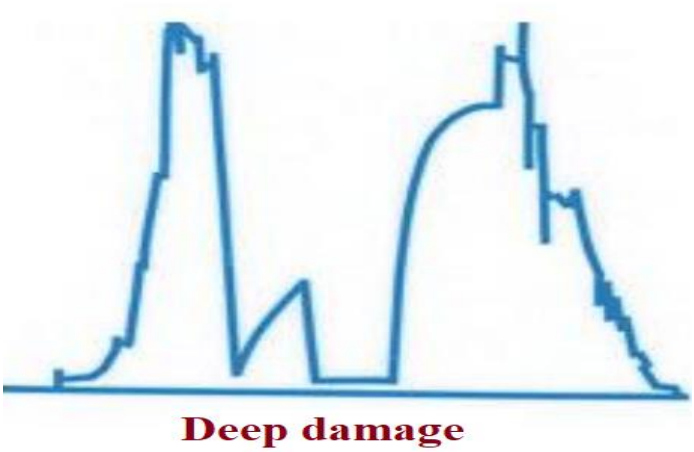
- ميل خط الغلق قليل وأقرب إلى المستوي(الافقي) (Flat slope) و الذي يعكس بطء تعافي الضغط عبر الغلق، وهو من سمات الطبقات المتضررة.

- هنالك فرق ضغط كبير بين الضغط الجرياني النهائي و ضغط الغلق النهائي .فرق الضغط العالي يدل على وجود ممانعة إضافية في المنطقة قرب البئر(Skinned zone) .

2- حالة الضرر الشديد والعميق - الشكل4-9:

- ضغط الجريان منخفض.
- نصف قطر الانحناء قليل.
- الانتقال في الضغط عند الغلق حاد جدًا.
- هنالك دفعات جريان (Blows) ضعيفة عند الفتح و كمية الموائع المتجمعة عند السطح قليلة.

هذه المؤشرات تدل على وجود تضرر عميق حول البئر، مما يتطلب البحث عن السبب (مثل انسداد من ترسب مواد ، او تلوث بطين الحفر...) ومن ثم معالجته لتحسين الإنتاجية.



الشكل4-9 : طبقة مكمنية شديدة التضرر بحسب شكل مخطط الفحص الطبقي- DST chart

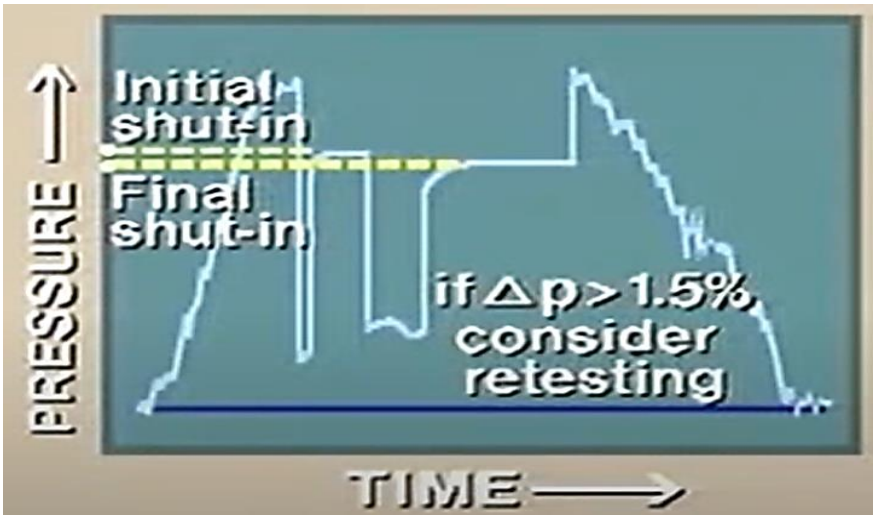
ان وجود فرق في الضغط المستقر (Stabilized Pressure) بين فترتي الغلق الأولي والنهائي و كما موضح في الشكل (4-10) يعكس كون المكمن من النوع المحدود Finite او المغلق Closed reservoir فاذا كان الفرق اعلى من 1.5% قد يكون هناك ما يبرر لإعادة الفحص.

يُبين الشكل (4-11) وجود فرق في الضغط المستقر بين الغلق الأولي والنهائي و فرق في شدة انحناء منحني تصاعد الضغط و هذا يشير إلى اما : لتأثير حدود المكمن (Boundary effect) أو وجود تغير في خصائص الطبقة المكمنية مثل انخفاض النفاذية أو تغير بالانتقالية kh/μ او وجود حواجز.

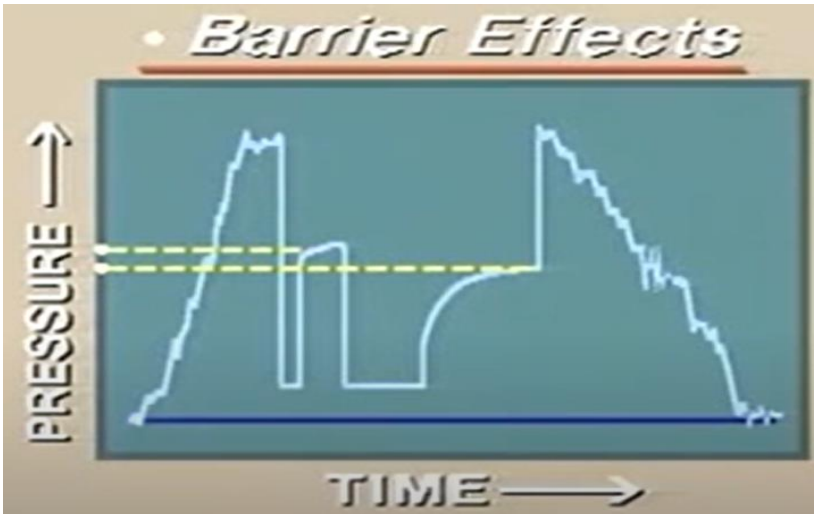
11-4 تحديد جودة الفحص من خلال مخططات الفحص DST Chart

المعاينة الانية لمخطط الضغط الخاص بالفحص الطبقي (DST Chart) يُمكن أن يُعطي مؤشرات واضحة على تحقق الفحص من عدمه . إذ يُعد هذا المخطط أداة مهمة لبيان المشاكل التي قد تكون حدثت أثناء الفحص، مثل:

انسداد المعدات، فشل في تنصيب العازل، حدوث تسرب، أو ان الجريان غير مستقر.



الشكل4-10 : فرق بالضغط المستقر stabilized pressure ما بين فحص الغلق الاولي و النهائي



الشكل4-11 : تاثير حدود المكمن في نهاية الفحص على مخطط الفحص الطبقي- DST chart

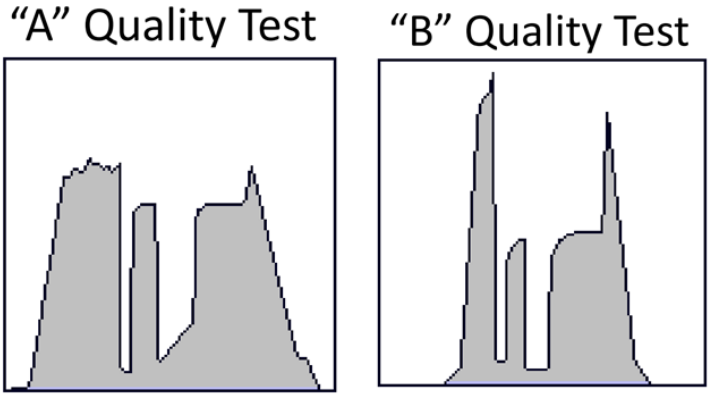
ان مراجعة سريعة (Quick Look) و انية لمخطط الضغط من قبل المهندس المختص أو المشغل في موقع الحقل و ما يقدمه من ملاحظات على المخطط يُعد بمثابة شهادة أولية على درجة جودة الفحص . الجدول4-2 يُوضح ملخص للمخططات في الشكل (4-12) مع شرح أبرز سماتها (يُمكن مراجعة الشكل 4-6 أيضًا) .

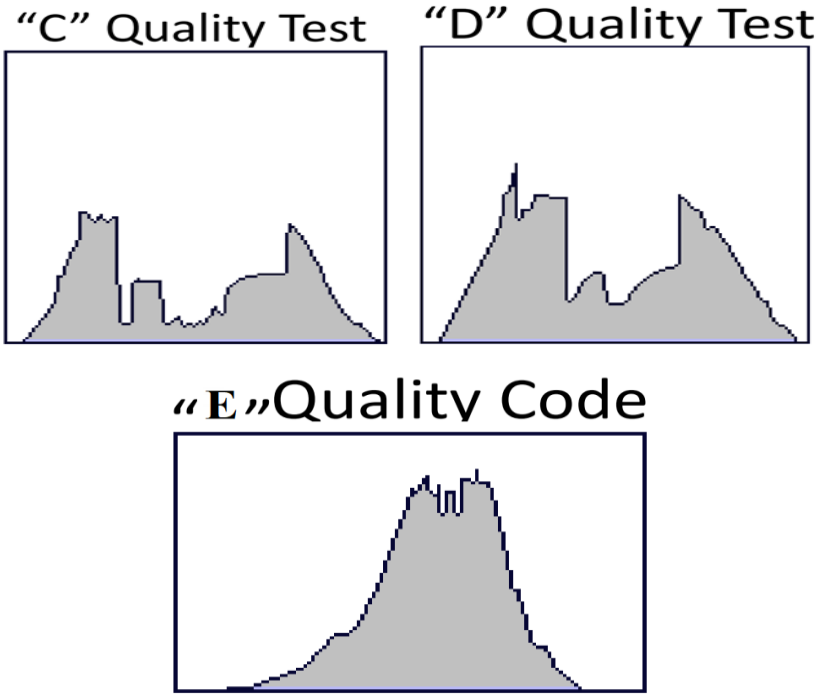
خلاصة: ان مراجعة أشكال منحنيات الضغط انيا و قبل اجراء عملية تفسير لبيانات الفحص تساعد بسرعة في اتخاذ قرار مبدئي بشأن:

- جودة الفحص.
- الحاجة لإعادة الفحص أو ضبطه.
- موثوقية البيانات التي سيتم تحليلها لاحقًا.

الشكل	التوصيف	الملاحظات
A	فحص مثالي عالي الجودة	- الضغط مستقر في جميع مراحل الفحص. - لا توجد انسدادات أو تسرب. - العازل (Packer) يعمل بشكل جيد. - الجريان إلى السطح واضح. - مدة الجريان كافية لقراءة الضغط.
B	فحص مقبول لكن منخفض الجودة	- الضغط غير مستقر. - كميات الموائع المنتجة لا تتوافق مع الضغط المقاس. - مؤشرات على وجود انسدادات جزئية. - الجريان يصل إلى السطح، ولكن يحتاج لإعادة ضبط.
C	تسجيل غير مثالي - تسرب بسيط	- فترة الجريان غير كافية. - تسرب خفيف عند العازل. - قراءة واحدة جيدة لفترة الغلق فقط. - وجود بعض الانسدادات. - الجريان يصل للسطح، لكن يُنصح بإعادة ضبط الفحص.
D	مشاكل في التسجيلات والمعدات	- تسجيلات العمق مفقودة أو غير موثوقة. - فرق بين قراءات الضغط > 30 psi. - وجود مسجل ضغط واحد فقط. - بعض الانسدادات. - الجريان إلى السطح موجود لكن بضبط غير دقيق.
E	فحص فاشل	- لم يتم الحصول على بيانات ذات فائدة. - مشاكل كبيرة في الجريان أو العازل. - لا يمكن الاعتماد على نتائج الفحص.

الجدول 4-2: خواص بعض مخططات الفحص الطبقي





الشكل4-12 : تحديد جودة الفحص عبر اشكال مخططات الفحص الطبقي- DST chart

12-4 تقييم نفاذية المكمن باستخدام مخطط الفحص DST Chart مباشرة

إذا تم تنفيذ الفحص الطبقي بنجاح، يُمكن إجراء تقييم أولي نوعي لنفاذية المكمن باستخدام مخطط الضغط (DST Chart) . هذا التقييم يعتمد على سلوك الضغط عبر فترات تصاعد الضغط (Build-Up)ومعدلات الجريان الناتجة، بالإضافة إلى ملاحظات أخرى.

الفكرة الأساسية :كلما كانت الاستجابة السريعة للضغط واستقراره أثناء الغلق (Build-Up) أفضل، وكانت معدلات الجريان أعلى، دلّ ذلك على نفاذية أعلى للمكمن.

المخططات في الشكل4-13 تُعطي تقييم لجودة النفاذية فمثلا الدرجات الاتية تعكس:

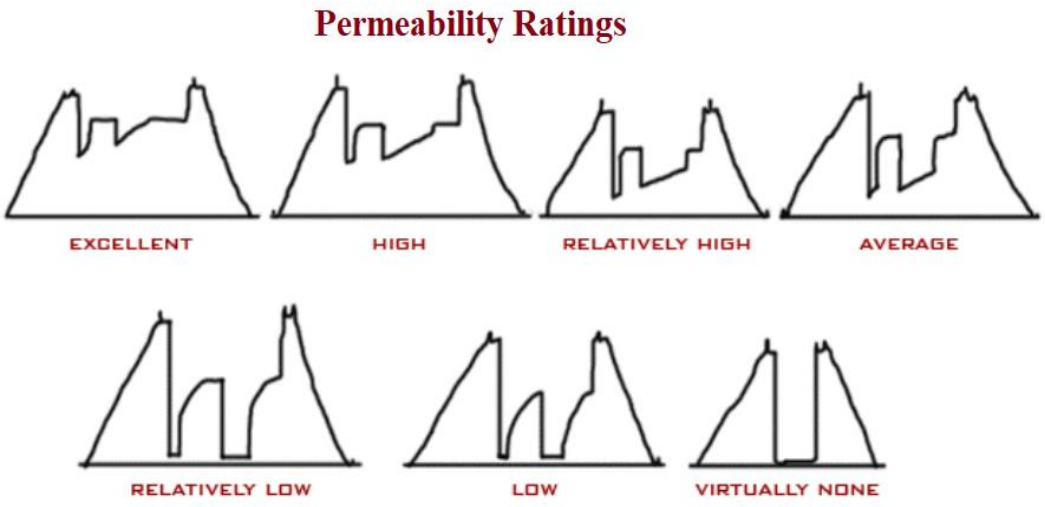
EX – 60، HI -50، RH – 40، AV –،30 RL – 20، LO – 10، VN – 00

لذا من الممكن تقييم البيانات الحقيقية لفحص DST عبر المقارنة مع المخططات في الشكل 4-13.

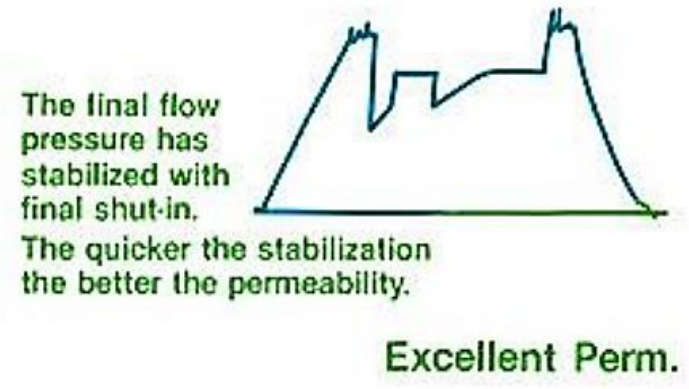
أمثلة على التقييم:

1- نفاذية ممتازة - EX درجة 60 - كما في الشكل 4-14:

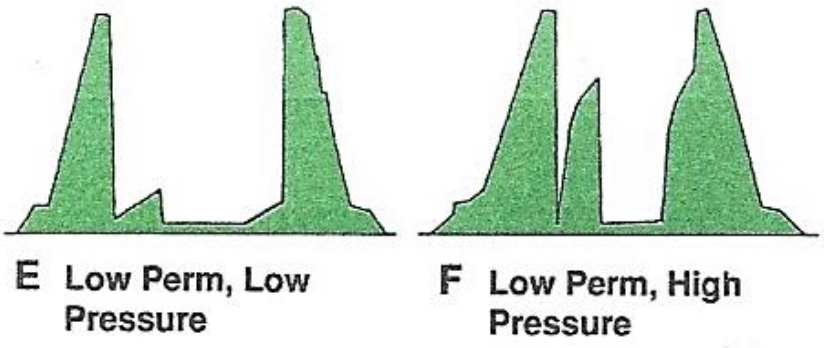
- الضغط المغلق عبر فترتي الغلق (الأولية والنهائية) يتصاعد بسرعة ويستقر بثبات.
- ضغط الجريان النهائي قريب جدًا من ضغط الغلق النهائي يدل على فعالية التوصيل.
- دفعات الموائع (Blows) عند فتح البئر قوية.
- كميات الموائع المتجمعة (Recoveries) كبيرة جدًا – معدل جريان مرتفع.



الشكل4-13 : تقييم نفاذية المكمن عبر مخططات الفحص الطبقي- DST chart



الشكل4-14 : تقييم للنفاذية من الدرجة الممتازة عبر مخطط الفحص الطبقي- DST chart



الشكل4-15 : تقييم نفاذية واطئة عبر مخطط الفحص الطبقي- DST chart

2- نفاذية واطئة - LO درجة 10 – (الشكل 4-15):

في حال كون الضغط المكمني الواطئ:

- ضغط الجريان منخفض جدًا.
- زيادة الضغط عبر الجريان طفيفة(Indicates flow restriction)
- دفعات الموائع ضعيفة عند الفتح.
- كميات الموائع المتجمعة قليلة جدًا.

في حال كون الضغط المكمني العالي:

- رغم ارتفاع الضغط، إلا أن تدفق الموائع ضعيف يدل على مقاومة عالية داخل المكمن بسبب ضعف النفاذية.

الخلاصة: يُمكن لمهندس الفحص عبر مراجعة منحنيات الضغط في مراحل الفتح والغلق، أن يُكوّن تصورًا اوليا حول جودة الطبقة المنتجة ونفاذيتها، مما يساعد في اتخاذ قرارات أسرع حول اكمال و معالجة البئر او تركه أو حفر طبقات إضافية.

13-4 المشاكل المصاحبة لعملية الفحص الطبقي

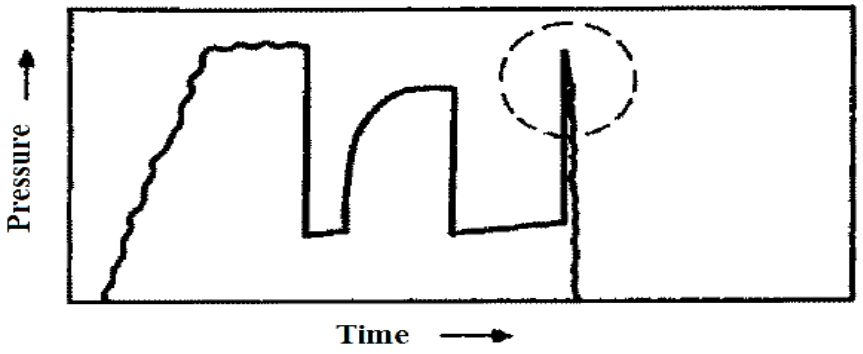
عبر تنفيذ الفحص الطبقي، قد تظهر مجموعة من الأعطال والمشاكل سواء أثناء إنزال معدات الفحص أو بعد تثبيتها في البئر. يُمكن التعرف على هذه الأعطال عبر تحليل شكل منحنيات الضغط في **DST Chart**، كما هو موضح في الأشكال (4-16 إلى 4-22). فيما يلي أبرز هذه المشاكل:

1- توقف ساعة تسجيل الوقت-Clock stopped الشكل4-16 .

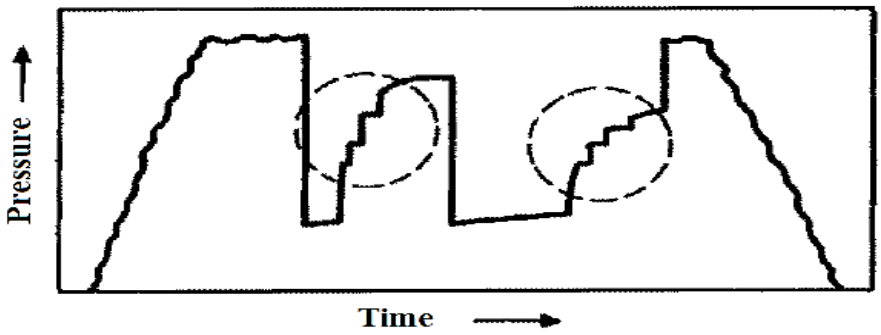
تعني توقف التسجيل الزمني للبيانات، مما يجعل المخطط غير قابل للتحليل.

2- عطل بمقياس الضغط أو جهاز التسجيل -Gauge/Recorder Failure الشكل 4-17:

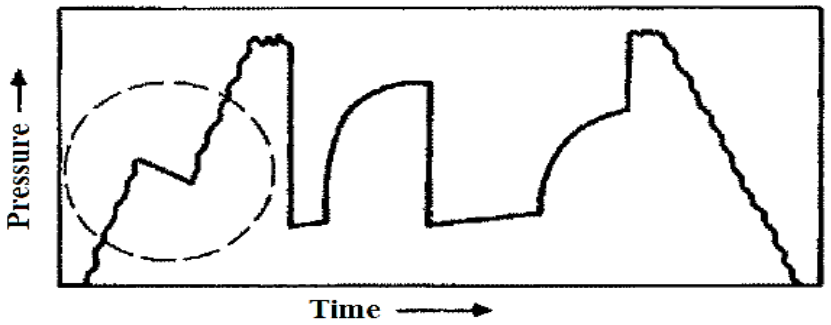
يظهر على شكل تدرج سلمي غير طبيعي في منحني تصاعد الضغط. يدل على فقدان مصداقية القراءة ولا يُمكن اعتماد نتائج الفحص.



الشكل4-16 : توقف ساعة تسجيل الوقت



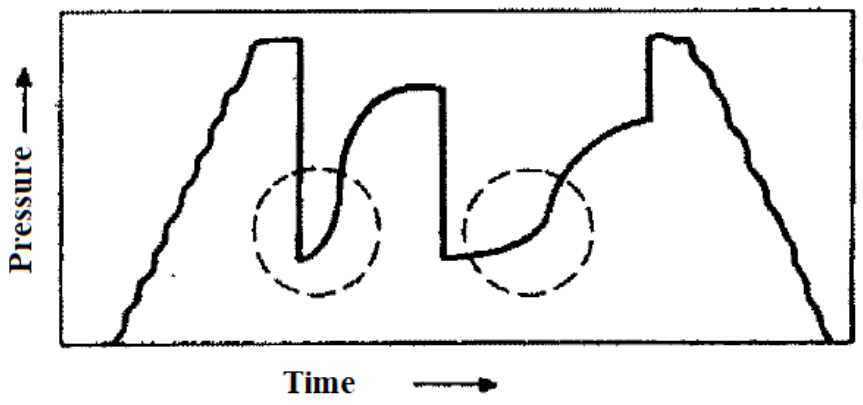
الشكل4-17 : عطل بمقياس الضغط Gauges او بجهاز التسجيل Recorder



الشكل4-18 : نضوح في انبوب الحفر

3- نضوح في أنبوب الحفر أو فقدان طين الحفر - الشكل 4-18:

- يتضح ذلك من الهبوط المفاجئ في الضغط الهيدروستاتيكي.
- يُؤكد ذلك عبر مقارنة كميات الطين المستخدمة بكميات الموائع المنتجة (عدم التوازن في الحجوم).



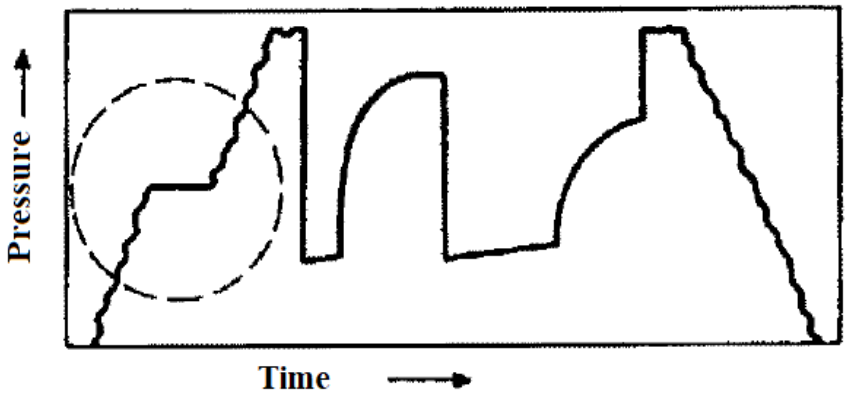
الشكل4-19 : نضوح الموائع عبر السدادة Packer

4- نضوح الموائع عبر العازل (Packer Leak) -الشكل 4-19:

يظهر شكل المنحني على هيئة حرف S عند نهاية الجريان وبداية تصاعد الضغط. سببه إما كسر في العازل أو ان الثبيت غير محكم.

5- تأخير عند إنزال المعدات Delay in Tool Descent - الشكل 4-20

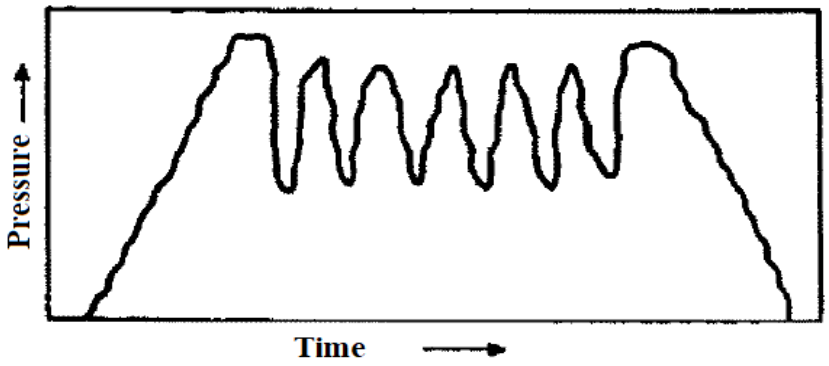
- تأخر ملحوظ أثناء إنزال معدات الفحص دون فقدان في طين الحفر.
- قد يدل على ضيق أو تعرّجات في البئر أو مقاومة غير متوقعة.



الشكل4-20 : اعاقة و تاخير عند تنزيل معدات الفحص

6- انسداد الصمام أو الأجزاء المثقبة Valve/Anchor Blockage الشكل 4-21

- يتمثل ذلك من خلال منحنيات نبضية تعكس إلى انسداد مؤقت ثم تحرر للضغط و بشكل متكرر.
- قد يكون ناتج عن انسداد الصمام الداخلي أو الأنبوب المثقب Peforated anchor .

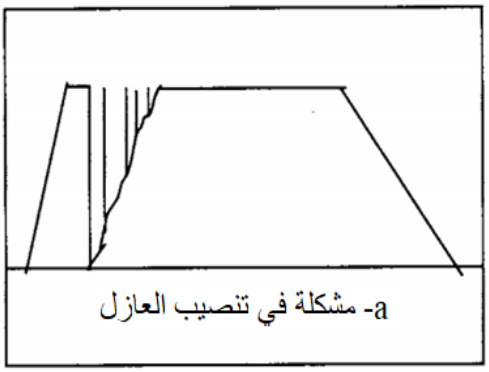


الشكل4-21 : انسداد الصمام Valve

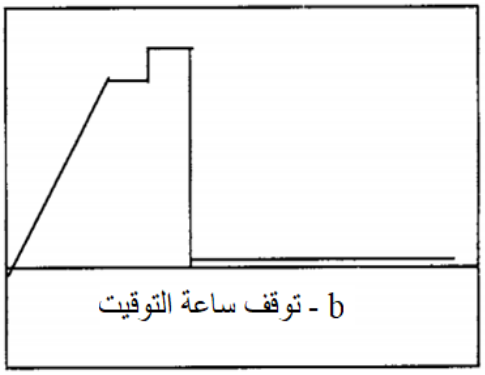
7- مظاهر إضافية للمشاكل تظهرفي DST Chart :

الشكل 4-22 يقدم نماذج لمشاكل متنوعة يسمح بتشخيصها ميدانيًا بشكل فوري ، مثل:

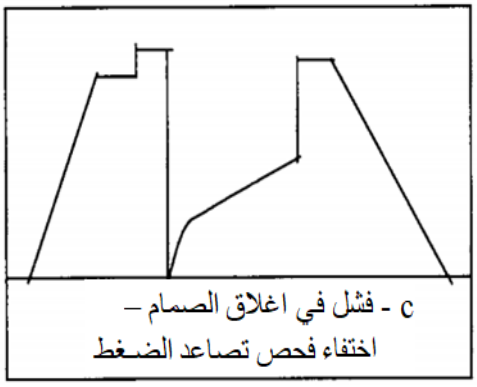
تداخل جريان طبقتين عبر الفحص ، عطل مقياس الضغط و غيرها..



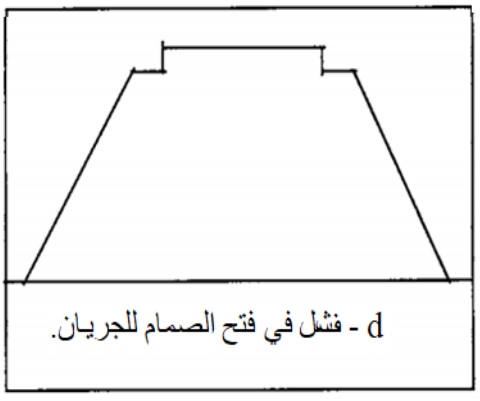
a- مشكلة في تنصيب العازل



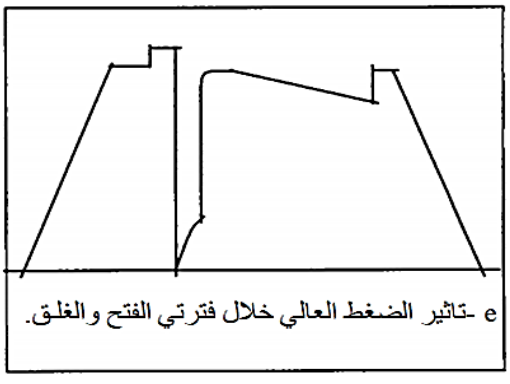
b - توقف ساعة التوقيت



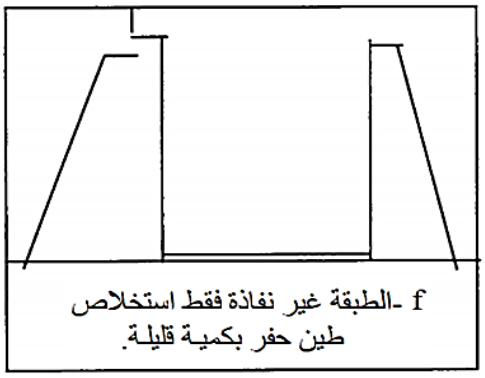
c - فشل في اغلاق الصمام –
اختفاء فحص تصاعد الضغط



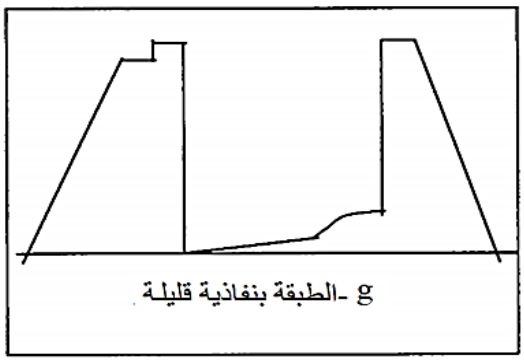
d - فشل في فتح الصمام للجريان.



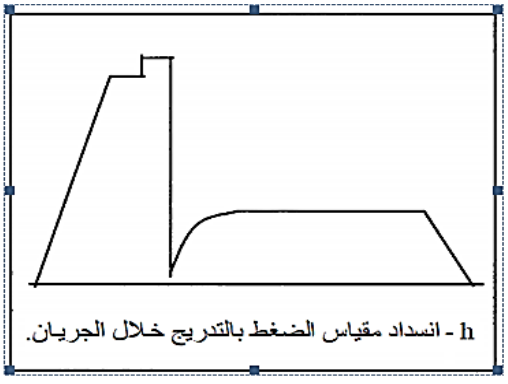
e -تاثير الضغط العالي خلال فترتي الفتح والغلق.



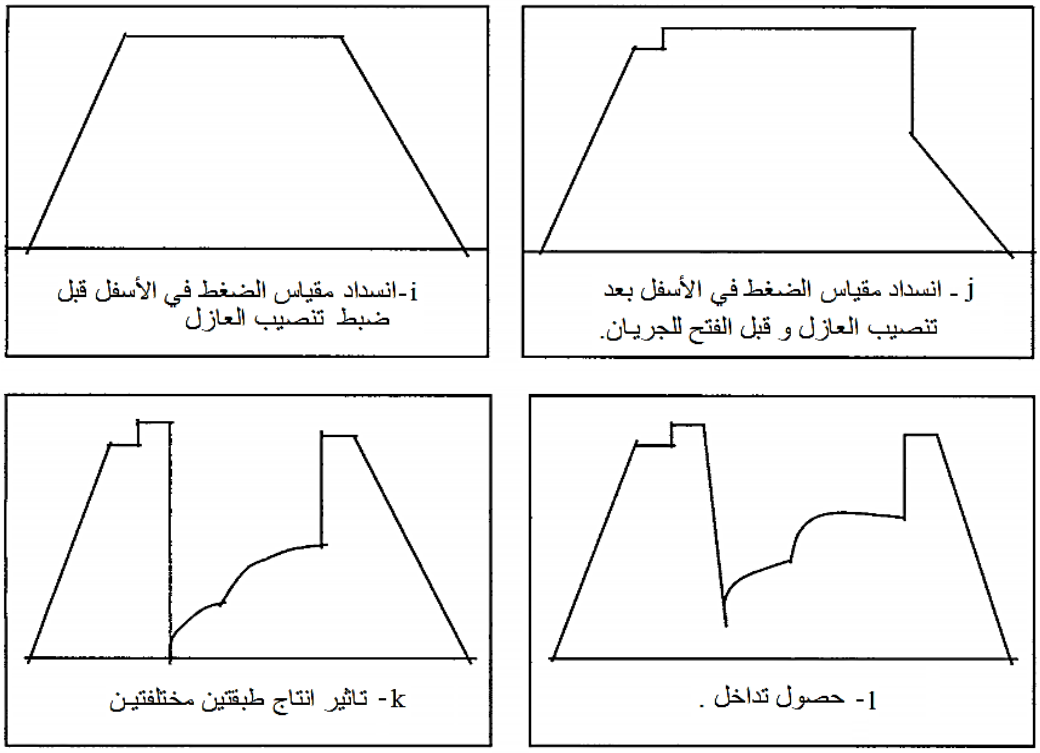
f -الطبقة غير نفاذة فقط استخلاص
طين حفر بكمية قليلة.



g -الطبقة بنفاذية قليلة



h - انسداد مقياس الضغط بالتدريج خلال الجريان.



الشكل4-22 : تحديد بعض المشاكل و العطلات التي ترافق الفحص عبر مخططات الفحص الطبقي- DST chart

14-4 نموذج تقرير فحص DST لبئر غازي – الشكل 4-23

يتضمن المعلومات الاتية:

- معلومات عامة للبئر :الموقع الجغرافي، العمق و غيرها .
- معلومات عن طين الحفر.
- معلومات عن معدات الفحص.
- نتائج الفحص :بيانات الضغط مع الزمن.
- تفسير بيانات الفحص :استخدام تحليل هورنر Horner Plot لاستنتاج الضغط المكمني والنفاذية.

15-4 التحقق من صحة وتطابق بيانات تقرير الفحص الطبقي (DST Report Validation)

للتحقق من دقة وصحة بيانات تقرير الفحص الطبقي، يتم اتباع الخطوات الاتية:

1- التحقق من الضغط الهيدروستاتيكي لطين الحفر(ph)

يجب مقارنة الضغط الهيدروستاتيكي المسجل في التقرير عبر فترتي الفحص (الأولي والنهائي) مع الضغط المحسوب نظريًا.يتم حساب الضغط باستخدام العلاقة الاتية:

BURLINGTON NORTHERN 25-1 6/25 005N 021E 25 **DST No: 001**

MONTANA GOLDEN VALLEY
Ground: 3833
KB:
Interval: 1604.0 to 1648.0 ft
Operator: EMPIRE
Formations: IFRNR
FFRNR

Recorder No: J355
Recorder Depth: 1640.0 ft Outside
SubSea:
Capacity: 1600 psi

API No: 25-037-21002-00
Latitude: 46.153640
Longitude: 109.045600
Total Depth: 1648.0 ft
Test Co.: JOHNSTON
Type: CBH
Date: 701012
Quality Code: C
Recorder Type:
Recorder Temp: F
Temp Depth: 1640.0 ft
Bottom Hole Temp: 108.0 F

Horner

	Times (min)	Pressure (psi)	Extrap (L) (psi)	Slope (L) (psi/cycle)
		48.0		
Preflow:	6.0	80.0		
Inital SI:	29.0	935.0	973.31	472.8116
		85.0		
2nd Flow:	32.0	174.0		
Final SI:	64.0	944.0	975.07	154.1368

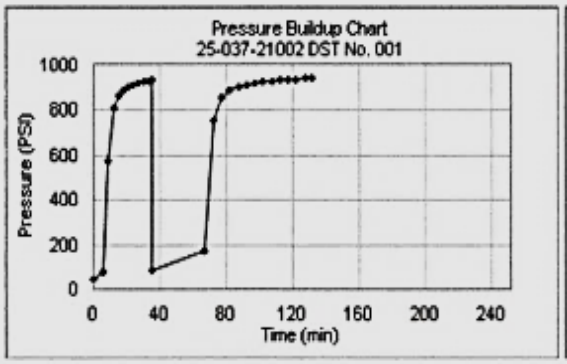
Perm: AV
Damage: NO
HF: W
Gas Flow
MAX: mcf/d
FIRST: mcf/d
LAST: mcf/d

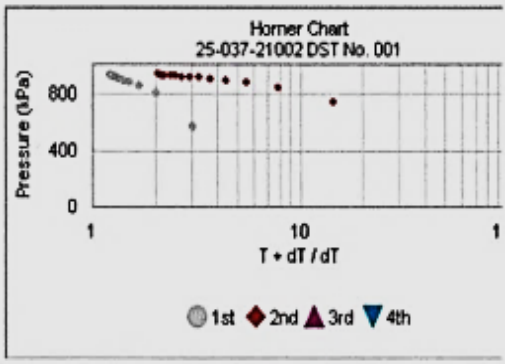
Inital Hydrostatic: 876.00
Final Hydrostatic: 932.00
Assigned P-Max: 975.07
Pressure/Depth: 0.608 psi/ft

Recovery Description: 300.00ft Muddy water.
Blow Description: Strong blow 12 inches blow in water on pre-flow increasing off bottom of bucket. Moderate blow 4.75 inches blow in water increasing to 8.5 inches at 1505 decreasing to 3 inches at 1524 on final flow.

Comments:
Drill Pipe Type:
Length: ft
Weight: lb/ft
Outer Diameter: in
Internal Diameter: in
Drill collar Type:
Length: 509.00 ft
Outer Diameter: in
Internal Diameter: 2.50 in

Cushion Type:
Liquid Cushion:
Gas Cushion:
Inhibitor:
Mud Type: GEL CHEM
Mud Weight: 9.70 lb/gal
Salinity: 6700 ppm
Chloride Content:





الشكل4-23 : نموذج من تقرير الفحص الطبقي- DST chart

تدرج الضغط لعمود سائل(طين) الحفر يساوي:

$$\text{Mud gradient} = \frac{0.433}{8.33} \times \text{mud weight in lb/gal} \quad (\text{ft/psi}) \text{ --------- 1}$$

ضغط الطين الهيدروستاتيكي يساوي:

$$\text{Hydrostatic pressure} = \text{Well depth in feet} \times \text{mud gradient} \quad (\text{psi}) \text{ ---------2}$$

2- التحقق من كثافة الطين(Mud Weight)

تتم مراجعة **كثافة الطين** المسجلة في التقرير ومقارنتها بالحسابات العملية:

حساب كثافة الطين:

$$\text{Mud weight} = \text{Hydrostatic pressure} \times \text{well depth} \times \frac{8.33}{0.433} \quad (\text{lb/gal}) \text{ --------- 3}$$

اي تباين كبير بين القيمتين المسجلة والمحسوبة قد يشير إلى خطأ في البيانات أو تغير في خواص الطين أثناء الفحص.

3- التحقق من الضغط المكمني(pi)

يتم التأكد من أن قيمة الضغط المكمني pi مأخوذة بشكل صحيح من تحليل فتره الغلق النهائي.

يُفضل استخدام طريقة هورنر Horner Plot لتحليل فترة الغلق الثانية (Final Build-Up) .

طريقة التحقق:

- نرسم خط Middle Time Region (MTR) على منحني هورنر
- يتم تحديد pi من نقطة التقاطع بين امتداد هذا الخط ومحور الضغط عند قيمة هورنر = 1، أي عندما $(tp + \Delta t)/\Delta t = 1$.

راجع المثال رقم 1 لمزيد من التوضيح العملي

16-4 حساب معدل الجريان q_i- Average Flow Rate Estimation:

يُحسب معدل الجريان عبر الفحص الطبقي لمدة الجريان الاولى او الثانية حسب المعادلة الاتية:

$$q_i = \frac{FPF}{\text{Flow time (1440 min/day)}} \quad (\text{stb/day}) \text{ --------- 4}$$

إذ ان:

q_i initial flow rate

FPF, fluid produced from formation

$$FPF = CDR \times FOM \quad (\text{ft}) \text{ --------- 5}$$

CDR, capacity of the drill collar

$$CDR = C_S \frac{\rho}{144} \quad \text{(bbl/ft)} \text{ --------- 6}$$

$$C_S = 25.65 \times \frac{A_{wb}\ (\text{ft}^2)}{\rho\ (\text{lb}_\text{m}/\text{ft}^3)} = \text{wellbore storage coefficient} \text{ --------- 7}$$

$$A_{wb} = \pi r_p^2\ (\text{ft}^2) \text{ --------- 8}$$

$$\rho = \text{fluid density } (\text{lb}_\text{m}/\text{ft}^3) = \frac{141.5}{131.5 + API^\circ} \text{ --------- 9}$$

r_p = ID drill collar (ft)
API = fluid gravity

FOM, feet of mud

$$FOM = \frac{(\text{initial shut-in pressure at the end of first flow period})}{MGR} \text{ --------- 10}$$

MGR, mud gradient

$$MGR = (\text{mud density, lb/gal})\left(\frac{0.433}{8.33}\right) \quad \text{(psi/ft)} \text{ --------- 11}$$

17-4 طرق تحليل و تفسير الفحص الطبقي - DST analysis methods

1-17-4 طريقة هورنر و ميللر MDH :

سبق ان تم التطرق لها تفصيلا في الفصل السابع/الجزء الاول ، للتوضيح ناخذ المثال الاتي:

مثال1

تم اجراء الفحص الطبقي لبئر نفطي ، المعلومات من تقرير الفحص أُدرجت في الجدول4-3.بيانات الفحص و الحسابات المصاحبة أُدرجت في الجدول4-4 .

- تحقق من صحة و تطابق بيانات تقرير الفحص الطبقي؟

- احسب ما يلي:

النفاذية -k، معامل القشرة -s ، فرق الضغط جراء معامل القشرة Δp_s الضغط الابتدائي p_i ، كفاءة الجريان FE، نسبة الضرر DR ، نصف قطر البئر الظاهري r_a ، نصف قطر منطقة البحث r_i ؟؟

Test type = open hole
Hole size = 7.88 in.
Pipe length = 240 ft
Diameter of collar = 45 in.
Reservoir pressure @ gauge depth = 2560 psi
Pressure at the end of first flow = 371 psi
Final shut-in pressure = 1005 psi
Pressure at the end of second flow period = 643 psi
Final shut-in pressure = 1969 psi
API° = 36.87 API
$c_t = 8.0 \times 10^{-6}\ \text{psi}^{-1}$
Initial shut-in pressure = 2660 psi
$\beta_o = 1.215$ rb/stb
$V_u = 0.0197$ bbl/ft and $\rho = 52.78\ \text{lb/ft}^3$
Total well depth = 6550 ft
Mud density = 7.5 lb/gal
Collar length = 240 ft
Gauge depth = 6549 ft
First flow period = 6 min
First shut-in period = 30 min
Second flow period = 60 min
Second shut-in period = 120 min
$\phi = 16\%$
$\mu_o = 1.0$ cP
$h = 17$ ft
$r_w = 0.33$ ft
$t_{p1} = 6$ min, $t_{p2} = 120$ min

الجدول4-3 : البيانات المتوفرة للمثال رقم-1

الحل :

✧ حساب تدرج الضغط لطين الحفر:

$$\text{Mud gradient} = \frac{7.5 \times 0.433}{8.33} = 0.390\ \text{ft/psi}$$

✧ حساب ضغط عمود طين الحفر(الضغط الهيدروستاتيكي):

$$\text{Hydrostatic pressure} = 6549 \times 0.390 = 2554\ \text{psi}$$

ان الضغط الابتدائي المسجل بالتقرير عند مستوى عمق مقياس الضغط يساوي 2560 psi و هو قريب من الضغط الذي تم تحديده من علاقة هورنر لمدة الغلق الاولية والذي يساوي pi=p*=2554 psi

✧ كثافة طين الحفر تساوي:

$$\text{Mud weight} = \frac{(8.33)(2554)(6540)}{0.433} = 7.52\ \text{lb/gal}$$

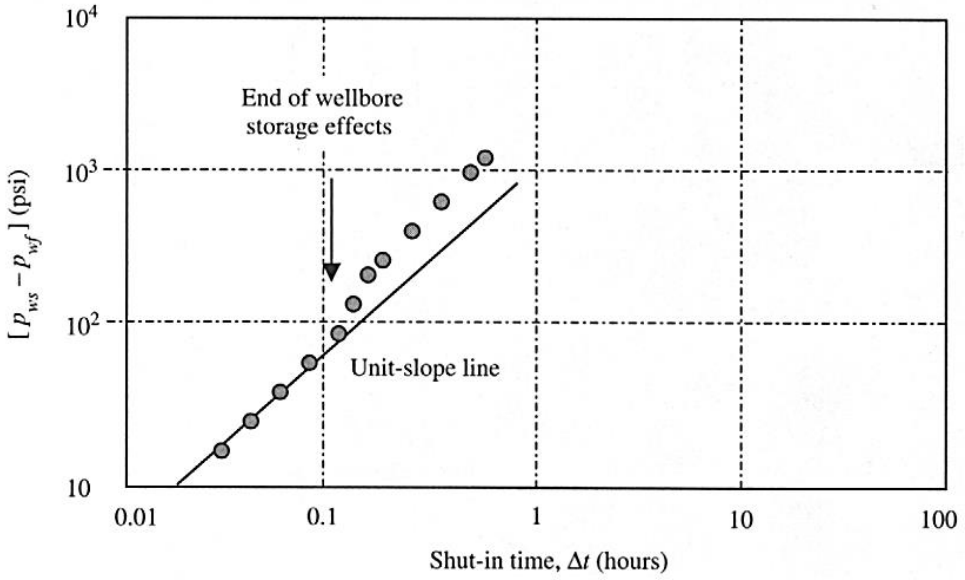
هنالك تقارب مع كثافة الطين في التقرير (7.5 lb/gal) و عليه قيمة كثافة الطين في التقرير صحيحة.

(1) Time, Δt (min)	Time, Δt (hr)	Dimensionless time $\frac{(t_p+\Delta t)}{\Delta t}$	Pressure, p_{ws} (psig)
1st B.UP			
0	0.000	–	371
3	0.050	3.00	665
6	0.100	2.00	672
9	0.150	1.67	692
12	0.200	1.50	737
15	0.250	1.40	786
18	0.300	1.33	832
21	0.350	1.29	874
24	0.400	1.25	919
27	0.450	1.22	962
30	0.500	1.20	1005
2nd B.UP			
3	0.050	41.00	665
6	0.100	21.00	672
9	0.150	14.33	692
12	0.200	11.00	737
15	0.250	9.00	786
18	0.300	7.67	832
21	0.350	6.71	874
24	0.400	6.00	919
27	0.450	5.44	962
30	0.500	5.00	1005
33	0.550	4.64	1046
36	0.600	4.33	1085
39	0.650	4.08	1128
42	0.700	3.86	1170
45	0.750	3.67	1208
48	0.800	3.50	1248
51	0.850	3.35	1289
54	0.900	3.22	1318
57	0.950	3.11	1361
60	1.000	3.00	1395
63	1.050	2.90	1430
66	1.100	2.82	1467
69	1.150	2.74	1499
72	1.200	2.67	1536
75	1.250	2.60	1570
78	1.300	2.54	1602
81	1.350	2.48	1628
84	1.400	2.43	1655
87	1.450	2.38	1683

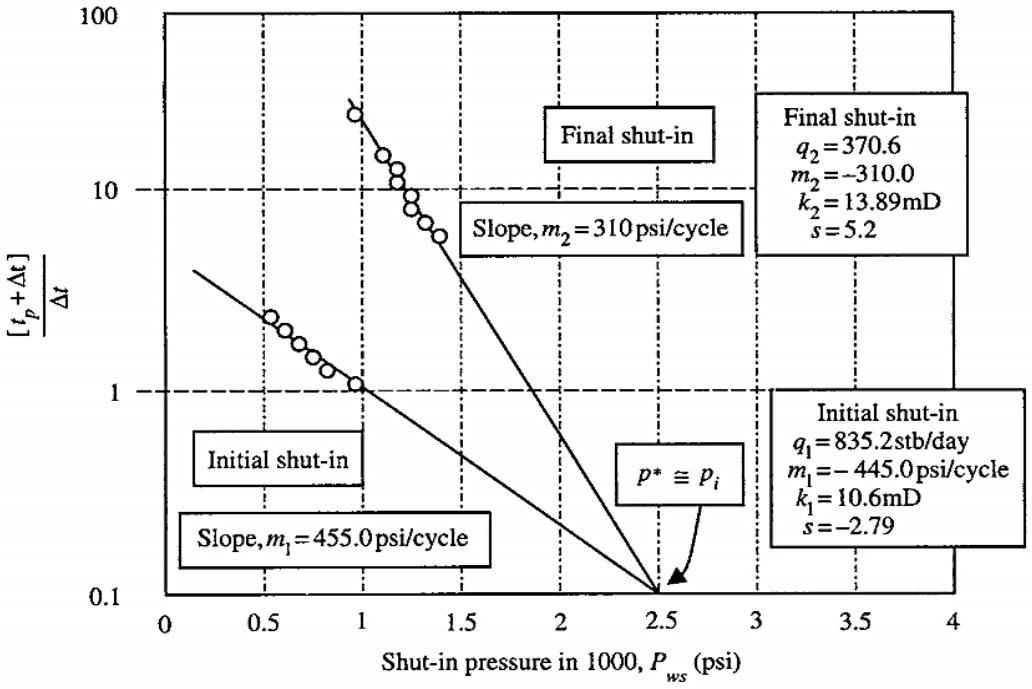
(1) Time, Δt (min)	Time, Δt (hr)	Dimensionless time $\frac{(t_p+\Delta t)}{\Delta t}$	Pressure, p_{ws} (psig)
90	1.500	2.33	1713
93	1.550	2.29	1737
96	1.600	2.25	1767
99	1.650	2.21	1794
102	1.700	2.18	1819
105	1.750	2.14	1845
108	1.800	2.11	1869
111	1.850	2.08	1894
114	1.900	2.05	1917
117	1.950	2.03	1948
120	2.000	2.00	1969

الجدول4-4 : بيانات الفحص للمثال رقم-1

✧ رسم علاقة فرق الضغط مع وقت الغلق لفترة تصاعد الضغط الثانية على احداثيات لوغاريتمية p_{ws}-p_{wf} vs Δt و ذلك لتمييز حدود منطقة تاثير تخزين البئر (خط مستقيم بميل واحد او بزاوية 45 درجة) و لتحديد بداية منطقة الفحص الوسطى Middle Time Region - MTR التي عندها نختبر خواص المكمن الشكل 4-24 . بداية منطقة MTR هي عند .Δt=0.2 hrs.



الشكل4-24 : تفسير بيانات الفحص الطبقي- DST للمثال رقم- 1



الشكل4-25 : مخطط هورنر لتفسير بيانات الفحص الطبقي للمثال رقم- 1

✧ رسم علاقة هورنر لفترتي تصاعد الضغط الاولى و النهائية على احداثيات نصف لوغاريتمية الشكل4-25 ونجد الميل لكلا الفترتين و يساوي على التوالي m_1=445 psi/cycle، m_2=310 psi/cycle و من فترة الغلق النهائية نجد $p_{1\,hr}$=1395 psi و p*=2550 psi .

✧ حساب النفاذية لكلا الفترتين و تساوي :

$$k=\frac{162.6q_o\mu_o\beta_o}{m_2h}=\frac{162.6(835.2)(1.0)(1.215)}{(445.0)(17)}=21.81\,\text{mD}\quad\text{(from initial slope)}$$

$$k=\frac{162.6q_o\mu_o\beta_o}{m_2h}=\frac{162.6(370.6)(1.0)(1.215)}{(310.0)(17)}=13.89\,\text{mD}\quad\text{(from final slope)}$$

✧ حساب معامل القشرة للمدة الثانية و تساوي :

$$s=1.151\left[\frac{p_{1hr}-p_{wf(\Delta t=0)}}{m}-\log\left(\frac{k}{\phi\mu_o c_t r_w^2}\right)+\log\left(\frac{t_p+1}{t_p}\right)+3.23\right]$$

$$=1.151\left[\frac{1395-371}{445}-\log\left(\frac{10.6}{0.16\times1\times8.00\times10^{-6}\times(0.33)^2}\right)+\log\left(\frac{3}{2}\right)+3.23\right]$$

$$=1.151[1.6900-7.8884+0.1761+3.23]=-2.79$$

✧ فرق الضغط من جراء عامل القشرة يساوي:

$$(\Delta p)_{skin}=0.869\,ms=0.869(445)(-2.79)=-1079\,\text{psi}$$

✧ حساب كفاءة الجريان FE إذ ان :

$$p_i\cong p^*=2550\,\text{psi}$$

$$\text{Flow efficiency}=FE=\frac{p_i-p_{wf}-(\Delta p)_{skin}}{\bar{p}-p_{wf}}$$

$$=\frac{2550-371-(-1079)}{2550-371}=1.50$$

✧ حساب نسبة الضرر و تساوي :

$$\text{Damage ratio}=DR=\frac{1}{FE}=\frac{1}{1.5}=0.67$$

✧ نصف قطر البئر الظاهري سيزداد لكون عامل القشرة سالب و يساوي:

$$r_{wa}=r_w\,e^{-s}=0.33\,e^{-(-2.79)}=5.37\,\text{ft}$$

✧ نصف قطر منطقة البحث – radius of investigation ri يساوي:

$$r_i = \sqrt{\frac{k\Delta t_{max}}{948\phi\mu_o c_t}} = \sqrt{\frac{10.6 \times 120/60}{948 \times 0.16 \times 1 \times 8.0 \times 10^{-6}}}$$

$$= 132\,\text{ft}$$

2-17-4 طريقة كوريا و رامي – Correa and Ramey's Method (1987)

تعتمد هذه الطريقة على تحليل بيانات تصاعد الضغط (Build-Up) بعد مدة إنتاج معروفة، وتهدف إلى حساب النفاذية (k) وعامل التضرر أو القشرة.(Skin Factor - S)

مبدأ الطريقة - إذا كان:

متوسط الجريان q_{avg} أثناء الإنتاج معروف ومدة الغلق أطول من مدة الإنتاج اي ان: $\Delta t > t_p$. فإنه يُمكن رسم:

الضغط خلال مدة الغلق p_{ws} مقابل الوقت اللابُعدي [tp/ [tp + Δt] على ورقة رسم بياني عادية(Cartesian plot) .

الرسم سيُظهر خط مستقيم بميل m_c من الميل هذا يُمكن استخراج النفاذية (k) و عامل التضرر (S) على التوالي كما يأتي:

$$k = \frac{70.6 q_{avg}\mu\beta}{m_c h} \quad \text{--------- 12}$$

$$s = \frac{p_i - p_{wfo}}{2m_c}\frac{q_{avg}}{q(t_p)} - \frac{1}{2}\ln\left(\frac{kt_p}{\phi\mu c_t r_w^2}\right) + 3.72 \quad \text{--------- 13}$$

عند مد الخط المستقيم إلى قيمة 0 = [[tp/ [tp + Δt]] سنحصل على قيمة الضغط الأولي (الابتدائي ، الاصلي) p_i . او يُمكن حسابها من استخدام اي نقطة على الخط المستقيم و حسب المعادلة الاتية :

$$p_i = p_{ws} + m_c\left(\frac{t_p}{t_p + \Delta t}\right) \quad \text{--------- 14}$$

ان معدل الجريان q_{avg} يساوي :

$$q_{avg} = \frac{q_t}{t_p} \quad \text{--------- 15}$$

و مدة الجريان t_p يساوي:

$$t_p = \frac{q_t}{q_1} \quad \text{--------- 16}$$

إذ ان :

q_l ، q_{avg} ، q_t تمثل معدل الجريان قبل الإغلاق، ومتوسط معدل الجريان أثناء الفحص، وإجمالي حجم السائل المنتج المتجمع على التوالي.

مثال 2

معلومات الفحص الطبقي أُدرجت ادناه :

Flow rate before shut-in = 175 stb/day, average flow rate during initial flow = 395 stb/day; t_p (initial flow) = 21 min; $\mu_o = 0.85$ cP; $\beta_o = 1.021$ rb/stb; $h = 35$ ft; total fluid recovered = 32.5 stb; $r_w = 0.29$ ft; $c_t = 4.75 \times 10^{-5}$ psi^{-1}; and $\phi = 0.12$ fraction.

بيانات فترة ضغط الغلق الاولى أدرجت في الجدول4-5.

احسب النفاذية و معامل القشرة بطريقة Correa and Ramey's Method ؟؟

الحل :

- رتب البيانات بحسب متطلبات الطريقة كما في الجدول4-5 و رسم البيانات بمقياس عادي كما في الشكل4-26 .
- لاحسن خط مستقيم يمر عبر نقاط الغلق المتاخرة نجد الميل و تقاطعه مع الاحداثي الصادي لايجاد الضغط المكمني الاصلي pi إذ ان الميل m_c=488 psi/cycle و p_i=2220 psi
- حساب النفاذية و معامل القشرة على التوالي و كما يأتي:

$$k = \frac{70.6 q_{avg} \mu \beta}{m_c h} = \frac{70.6 \times 395 \times 0.85 \times 1.021}{488 \times 35} = 1.415 \text{ mD}$$

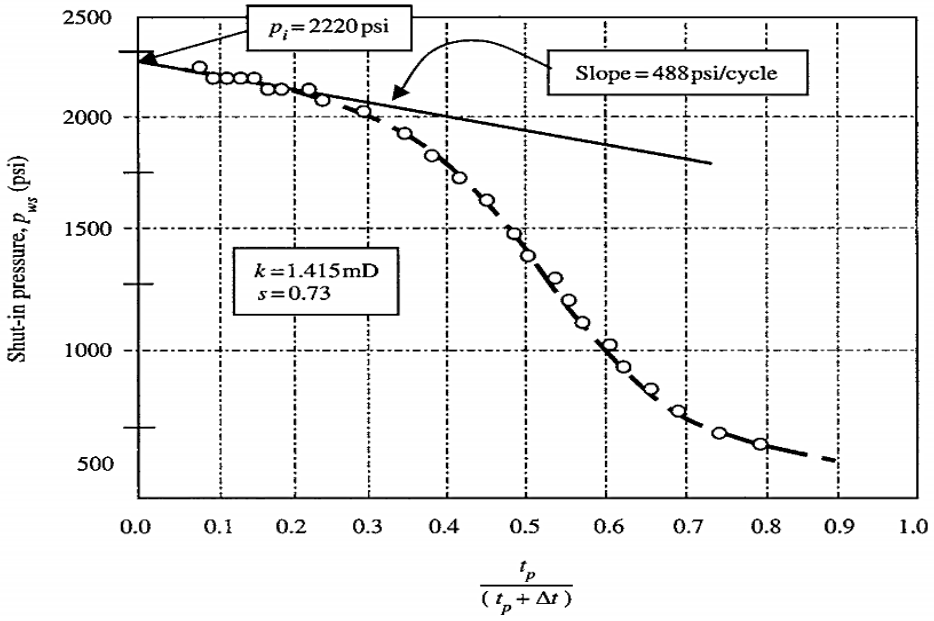
$$s = \frac{p_i - p_{wfo}}{2m_c} \frac{q_{avg}}{q(t_p)} - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{k t_p}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) + 3.72$$

$$= \frac{2220 - 0}{2 \times 488} \times \frac{395}{175} - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1.415 \times 21/60}{0.12 \times 0.85 \times 4.75 \times 10^{-6} \times 0.29^2} \right) + 3.72$$

$$= 2.2887 \times 2.2571 - 0.5(16.3132) + 3.72 = 0.73$$

Time (min)	p_{ws} (psig)	$\frac{t_p}{[t_p + \Delta t]}$	Time (min)	p_{ws} (psig)	$\frac{t_p}{[t_p + \Delta t]}$
0	543	1.0000	72	975	0.6250
3	565	0.9756	75	987	0.6154
6	572	0.9756	78	1004	0.6061
9	562	0.9302	81	1020	0.5970
12	569	0.9091	84	1045	0.5882
15	575	0.8889	87	1077	0.5797
18	580	0.8696	90	1109	0.5714
21	584	0.8511	93	1120	0.5634
24	588	0..8333	96	1210	0.5556
27	590	0.8163	99	1250	0.5480
30	610	0.8000	102	1254	0.5405
33	635	0.7843	105	1296	0.5333
36	668	0.7692	108	1345	0.5263
39	675	0.7547	111	1360	0.5195
42	690	0.7407	114	1375	0.5128
45	735	0.7273	117	1675	0.4512
48	745	0.7143	121	1717	0.4275
51	760	0.7018	125	1760	0.4080
54	785	0.6897	128	1885	0.3507
57	808	0.6778	131	2010	0.3010
60	847	0.6667	133	2012	0.2505
63	865	0.6557	137	2125	0.2000
66	920	0.6452	141	2158	0.1404
69	942	0.6349	145	2190	0.0800

الجدول4-5 : بيانات الفحص مع الحسابات المطلوبة للمثال رقم-2



الشكل4-26 : طريقة كوريا و رامي في تفسير بيانات الفحص الطبقي- DST - للمثال رقم-2

18-4 اسباب فشل الفحص الطبقي و امكانية تلافيها:

يُعد فشل الفحص الطبقي من الحالات المكلفة جدًا، سواء من حيث الوقت أو الموارد، وقد يؤدي أحيانًا إلى خسارة البئر بالكامل. لذلك، من الضروري معرفة الأسباب الشائعة للفشل ومحاولة تلافيها عبر إجراءات احترازية مدروسة.

فيما يلي أبرز الأسباب الشائعة لفشل الفحص، خاصة في الآبار المفتوحة ، مع طرق تلافيها:

1- توسّع تجويف البئر(Enlarged Borehole)

المشكلة :يتسبب هذا في صعوبة أو فشل في تثبيت العازل المطاطي (Packer) بمكانه الصحيح، مما يمنع عزل الطبقة المستهدفة بشكل فعال.

طريقة التلافي: إنزال مجس القطر البئر Caliper Log قبل الفحص للتأكد من شكل وحجم التجويف. اختيار العمق الأنسب لتثبيت العازل، وتجنب المناطق المتآكلة أو المتوسعة.

2- عصيان أو انحشار معدات الفحص(Tool Stuck)

المشكلة :قد تُحتجز معدات الفحص في البئر نتيجة لضعف مواصفات طين الحفر. وجود فتات الحفر (Cuttings) المتجمع غير المزال. انهدام جدران البئر المفتوح.

طريقة التلافي: التأكد من مطابقة مواصفات طين الحفر مع طبيعة الطبقة الصخرية. تدوير الطين وتنظيف البئر جيدًا قبل إنزال المعدات. المحافظة على اللزوجة و الكثافة المناسبتين لسائل الحفر.

3- عدم ملائمة قطر العازل المطاطي (Rubber Packer Size Mismatch)

المشكلة :استخدام عازل بقطر غير مناسب يؤدي إلى عدم التثبيت أو التسرب.

طريقة التلافي : يجب أن يكون قطر العازل أقل بـ 1 انج تقريبًا من القطر الداخلي للبئر عند منطقة التثبيت.الرجوع إلى بيانات Caliper Log لاختيار الحجم المناسب بدقة.

References – المصادر

1. Medhat M. Kamal "Transient Well Testing " Monograph SPE © Copyright 2009 Society of Petroleum Engineers.
2. Robert C . Earlougher‹Jr. "Advanced in Well Test Analysis" ‹ SPE Monograph @2010.
3. Amanat U. Chaudhry ‹ "Oil Well Testing Handbook ‹" Advanced TWPSOM Petroleum Systems‹ Inc. Houston‹ Texas ‹ Gulf Professional Publishing ‹ Copyright © 2004‹ Elsevier Inc.
4. Ramey‹ H. J.‹ Agarwal‹ R. G.‹ and Martin‹ L‹ "Analysis of Slug Test or DST Flow Period Data‹" /. Can. Pet. Tech. (July-Sept. 1975) 37-42
5. Correa‹ A. C‹ and Ramey‹ H. J.‹ Jr.‹ "A Method for Pressure Buildup Analysis of Drillstem Tests‹" SPE paper 16802 presented at the 1987‹ Annual Technical Conference and Exhibition‹ Dallas‹ Sept. 27-30.
6. Amanat‹ U. C‹ "Pressure Transient Test Analysis: User's Handbook‹" Vol. 8‹ Advanced TWPSOM Petroleum Systems Inc.‹ Houston‹ TX‹1995.

الفصل الخامس

فك الالتفاف - Deconvolution

5-1 المقدمة :

تُعد تقنية فك الالتفاف Deconvolution أحد الأدوات الرياضية المتقدمة في تحليل بيانات فحص الآبار، إذ تهدف إلى استخلاص استجابة المكمن الأساسية من ضغط مقابل الزمن لمعدل إنتاج معين. تستنبط ذلك من بيانات ضغط متغيرة لمعدلات إنتاج غير منتظمة و متغيرة و على طول التاريخ الانتاجي للبئر . تعالج الطريقة هذه تحديًا رئيسيًا في تفسير الفحوصات، وهو فصل تأثيرات تغيرات معدلات الجريان على طول سلوك المكمن الحقيقي .

تعتمد التقنية هذه على حل معكوس لمعادلة تكامل الالتفاف (Convolution Integral) ، باستخدام خوارزميات عددية مثل خوارزمية التنظيم Regularization لتجنب عدم الاستقرار العددي. رغم تعقيدها، فإن نتائجها من الثقة إذ تدعم اتخاذ قرارات أكثر دقة في إدارة المكامن .

تكمن أهمية فك الالتفافDeconvolution في قدرتها على توسيع نطاق الرؤية لبيانات فحص المكمن مقارنة بطريقة تحليل فترات الغلق المحدودة ، إذ تعتمد على اشراك كل البيانات المتاحة ضمن التاريخ الانتاجي للبئر، مما يسمح بتشخيص حدود المكمن البعيدة ، وتكوينات المكمن ، وحتى تشخيص التشققات الطبيعية إن وُجدت. رغم أن العملية تتطلب حسابات عددية معقدة غالباً ما تُنفذ باستعمال الحاسوب فان هذه التقنية تتيح ما يأتي:

* استخدام جميع البيانات المتوفرة (بيانات الضغط و الجريان) عبر التاريخ الانتاجي للبئر دفعة واحدة.

* كشف خواص المكمن وحدوده بشكل واضح و صريح.

* تحسين دقة التفسير عبر إزالة تذبذب البيانات الناتجة من تأثيرات تغير معدلات الجريان. إذ تعتمد فكرة فك الالتفاف إعادة بناء استجابة الضغط كما لو أن البئر قد أُنتج بمعدل جريان ثابت طيلة مدة الإنتاج ،ذلك سيُنتج منحنى ضغط مكافئ مثالي يسمى دالة الضغط لوحدة الجريان $p_u(t)$ او دالة الاستجابة. ثم تحليل هذه الدالة ومشتقتها لتمييز اطوار الجريان و تحديد خواص المكمن .

* تقليل الحاجة إلى فحوصات مطولة و توفير في التكاليف عبر استخلاص معلومات مفيدة أكثر من البيانات المتوفرة .

تطبيقات فك الالتفافDeconvolution الرئيسة تشمل تحليل فحوصات تصاعد وهبوط الضغط (Buildup/Drawdown) ذات المعدلات المتغيرة و تفسير الآبار ذات التاريخ المعقد.

5-2 التطور التاريخي لتفسير فحوصات الابار

أوضح كرينكارتن Gringarten 2006 عبر الجدول (5-1) مراحل تطور طرق تفسير فحوصات الابار منذ خمسينيات القرن الماضي:

- في البداية تم الاعتماد في التفسير على تمثيل البيانات بشكل خطوط مستقيمة تُرسم على احداثيات عادية او نصف لوغاريتمي . من الخطوط المستقيمة تُحدد بعض المعاملات و التي تُستخدم لاحقا في حسابات خواص المكمن او في تحديد ظروف البئر.

Date	Interpretation Method	Tools	Emphasis
50's	Straight lines	Laplace Transform	Homogeneous Reservoir Behavior
Late 60's Early 70's	Pressure Type Curve Analysis	Green's Functions	Near Wellbore Effects
Late 70's	Type Curves with Independent Variables	Integrated Methodology Stehfest Algorithm	Double Porosity Behavior
Early 80's	Derivatives	Computerised Analysis	Heterogeneous Reservoir Behavior and Boundaries
90's		Computer Aided Analysis Downhole Rate Measurements Integration with Interpretation Models from other Data	Multilayered Reservoir
Early 00's		Deconvolution	Enhanced Radius of Investigation Boundaries

الجدول5-1 :تاريخ طرق تفسير فحوصات الابار (كرينكارتن[1])

- ثم تطور اسلوب التفسير لاحقًا باستخدام تطابق المنحنيات Type curves matching ، ثم تقنية مشتقة الضغط Pressure derivative والتي تعتبر نقلة نوعية في مجال التفسير . و بتطور معدات القياس في الحصول على بيانات فحص تحاكي ظروف البئر والمكمن و بمساعدة الحاسوب امكن تفسير المكامن المعقدة و المتعددة الطبقات .

- وأخيرًا، ظهرت تقنية فك الالتفاف كأداة فعالة لتحسين نوعية البيانات وتوسيع المعلومات المستخلصة من الفحوصات.

في الجدول 5-2 ، يظهر تقييم كرينكارتن Gringarten 2006 لطرق تفسير فحوصات الابار إذ حصلت طريقة فك الالتفاف على أعلى الدرجات كطريقة فعالة في التفسير مقارنة بالطرق الأخرى.

5-3 مزايا فك الالتفاف Deconvolution

*يعمل كمرشح في تقليل تشويش البيانات و تحويل سجل الإنتاج المعقد والمشحون بالضوضاء إلى هبوط مثالي جاهز للتفسير.

* إزالة تأثيرات تخزين البئر للوصول إلى منطقة الجريان الشعاعي اللامتناهي في وقت مبكر.

*تُستخدم في تفسير بيانات التاريخ الانتاجي و الفحص كاملاً وليس فترات الغلق حصرا.

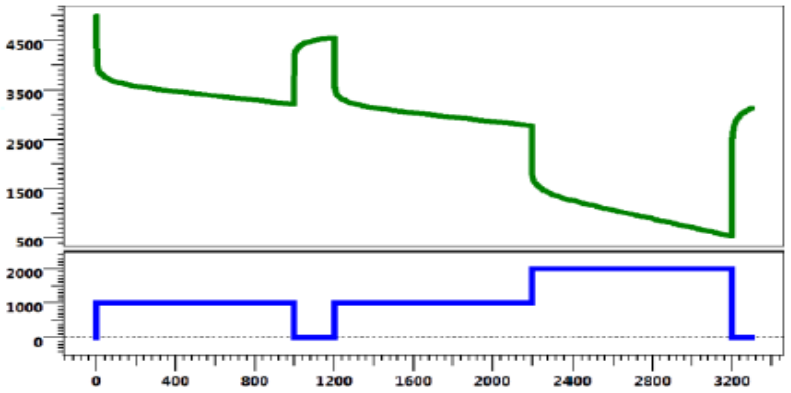
*تكشف تأثيرات حدود المكمن بدقة عالية.

	ANALYSIS METHOD	IDENTIFICATION	VERIFICATION
50's	Straight lines	Poor	None
70's	Pressure Type Curves	Fair (limited)	Fair to Good
80's	Pressure Derivative	Very Good	Very Good
00's	Deconvolution	Much better	Same as derivative
Next	?	>>>	>>>

الجدول5-2 :تقييم طرق تفسير فحوصات الابار المختلفة (كرينكارتين-2006)

مثال-1 (Olivier Houzé 2011) توضيح الفرق بين التحليل التقليدي وفك الالتفاف (Deconvolution)

يعرض المثال التطبيقي هذا مقارنة عملية بين طريقتين شائعتين في تفسير فحوصات الآبار: التحليل التقليدي باستخدام مشتقة الضغط وتقنية فك الالتفاف (Deconvolution) و المثال يُوضح كيف أن تطبيق فك الالتفاف يضمن تفسيرات أكثر دقة وشمولًا لبيانات فحص الآبار، خاصة في المكامن ذات التاريخ الإنتاجي الطويل والمتغير.

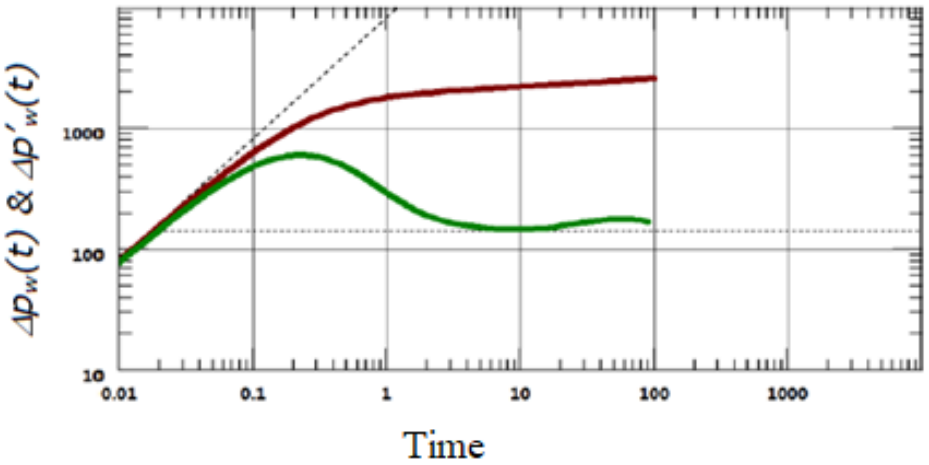


الشكل5-1 :التاريخ الانتاجي للبئر يتضمن معدلات الانتاج (اللون الازرق) و الضغط (اللون الاخضر)

الشكل (5-1) يعرض سجل التاريخ الإنتاجي للبئر على مدى 3200 ساعة، ويتضمن ثلاث فترات إنتاج بمعدلات متغيرة، يتخللها فترتا غلق(Buildup) ، الفترة الأخيرة استغرقت حوالي 100 ساعة.

في التحليل باستخدام مشتقة الضغط الموضح في الشكل اللوغاريتمي رقم (5-2) يربط علاقة الضغط و مشتقة الضغط مع الوقت ، يُركّز التفسير على مدة الغلق الأخيرة فقط. ونظرًا لكون الجريان قبل الغلق متغير ، يتم استخدام مبدأ التراكب الزمني (Superposition in time) لحساب الضغط المكافئ، ومن ثم اشتقاقه مع الزمن للحصول على منحنى مشتقة الضغط. هذا التحليل يعكس بوضوح خواص المكمن و ظروف البئر مثل:

- تخزين البئر(Wellbore Storage) في ميل الواحد.
- منطقة التضرر(Skin) في التحدب و الانحناء.
- الجريان الشعاعي غير المستقر(Unsteady-State Radial Flow) في الخط الافقي.

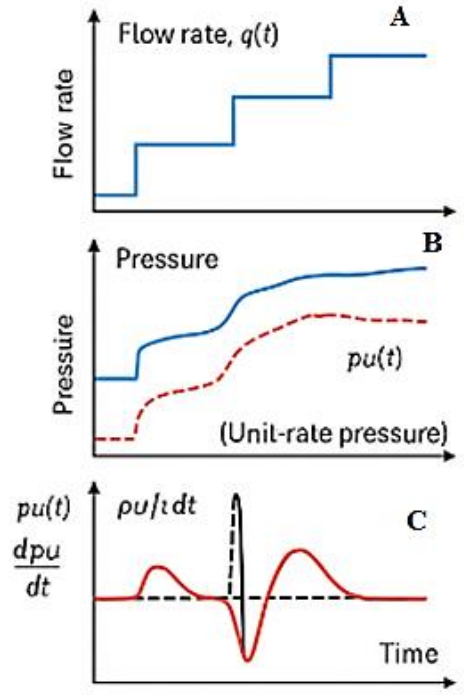


الشكل5-2 :تحليل فحص تصاعد الضغط Build-up باستخدام مشتقة الضغط

مع ذلك، فإن التفسير هذا لا يُظهر حدود المكمن بشكل واضح، نظرًا لقصر مدة الغلق مقارنة بزمن الانتشار اللازم لوصول اشارة الضغط الى حدود المكمن. إذ أن تأثير الضغط ينتشر عبر هذه المدة لمسافة محدودة ، و بنصف قطر تحقق مقداره r_1 يتناسب مع مدة الغلق البالغة 100 ساعة، و كما تبدو من الرسم فان المدة غير كافية للوصول إلى حدود المكمن أو تأكيدها.

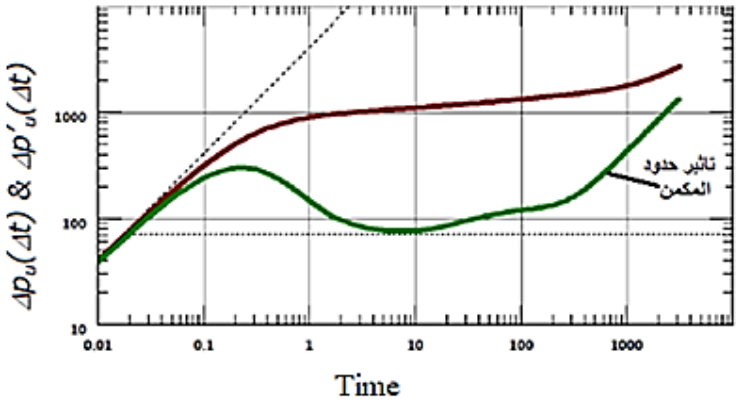
نتائج فك الالتفاف Deconvolution:

الشكل A-3-5 و يمثل مدخلات فك الالتفاف و تشمل معدلات الجريان المقاسة و الضغط المقاس في الشكل B-3-5 و يتضمن الشكل ايضا دالة الضغط لوحدة جريان واحدة $p_u(t)$ و التي تمثل مخرجات فك الالتفاف مع الوقت عبر التاريخ الإنتاجي الكامل و هي الهدف في فك الالتفاف . ثم نحسب مشتقه دالة الضغط لوحدة الجريان لها $p'_u(t)$ و رسمها على مخطط لوغاريتمي ، كما في الشكل C-3-5 .



الشكل5-3 : A – معدلات الجريان ، **B** – الضغط و دالة الضغط لوحدة الانتاج،
C – مشتقة دالة الضغط لوحدة الانتاج - المثال رقم-1

الشكل (5-4) يُظهر تحليل فك الالتفاف قدرة أكبر على تفسير البيانات لايجاد خواص المكمن. فبدلاً من الاعتماد على مدة الغلق فقط (100 ساعة) ، يقوم فك الالتفاف بتحويل بيانات الضغط المقاسة عبر كامل السجل الإنتاجي إلى ما يعادل استجابة ضغط لجريان ثابت امتد على مدى 3200 ساعة. هذه المعالجة تُمكّن من استغلال جميع مراحل الإنتاج في تفسير متكامل واحد.



الشكل5-4 : تحليل فحص تصاعد الضغط Build-up باستخدام طريقة فك الالتفاف Deconvolution

بفضل ذلك، ينتشر الضغط لمسافة ابعد بكثير داخل المكمن و بنصف قطر تحقق r_2 ، وهو أكبر بكثير من r_1 ، مما يسمح بكشف حدود المكمن بشكل أوضح، وتقدير أدق لخصائصه.

قبل النظر الى الصيغة الرياضية للتجزئة Deconvolution لابد ان نتعرف على بعض الدوال ذات العلاقة بحل فك الالتفاف وهي دالة الضغط لوحدة الجريان و الالتفاف Convolution كما يأتي:

4-5 دالة الضغط لوحدة الجريان- p_u Unit rate pressure function

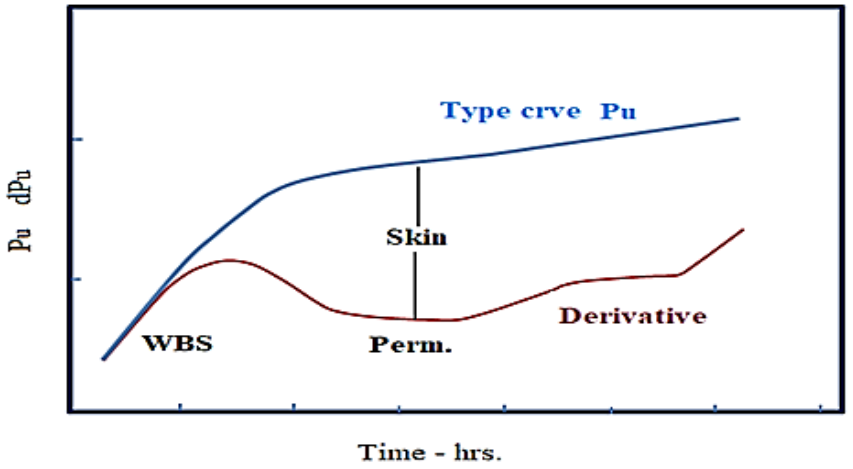
هي استجابة لتغير ضغط البئر نتيجة لجريان البئر بمعدل ثابت قدره وحدة واحدة مثلاً q= 1stb/day.

فيزيائيا :هي أداة حيوية في تحليل فحص الآبار دورها يكمن في فصل تأثير معدل الجريان عن استجابة الضغط الأساسية إذ تقوم بتحويل بيانات الضغط المتغيرة إلى منحني نمطي (Type curve) بسيط.

مكمنيا : p_u تصف كيف يتصرف المكمن (الموديل) عندما ينتج البئر بمعدل ثابت مثلا q=1stb/day. إذ تعكس كل التأثيرات المكمنية الممكنة مثل: طبيعة نمط الجريان (شعاعي، شبه شعاعي، خطي...) ، وجود أو غياب الحدود Boundry ، وجود منطقة قشرة (Skin) ، تأثير تخزين البئر ، نوع المكمن (ثنائي المسامية، شقوق، مكمن طبقي...) و تاثير خواص المكمن.

بعد ذلك، نقوم بالتحويلات الحسابية اللازمة مثل استخدام التكامل الزمني (Convolution / Deconvolution) او استخدام التراكب الزمني (Time Superposition) لتطبيقها على الحالات الواقعية ذات المعدلات المتغيرة.

في فك الالتفاف Deconvolution نستخدم $q(t)$ و$\Delta p(t)$ كمدخلات لإيجاد $p_u(t)$.



الشكل5-5 : دالة الضغط لوحدة الانتاج P_u و مشتقتها P^-_u على احداثيات لوغاريتمية مع الوقت

عند رسم قيم P_u و المشتقة P^-_u مع الوقت على احداثيات لوغاريتمية كما في الشكل 5-5 فتُعتبر هذه المنحنيات اساسية في تمييز اطوار الجريان و تاثير تخزين البئر و في تحديد خواص المكمن و حدود المكمن.

5-5 دالة الالتفاف (Convolution)

تُعرف أيضًا بمبدأ دوهامل (Duhamel's Principle) أو تكامل دوهامل (Duhamel's Integral)، وهي بمثابة تقنية متعددة التطبيقات في المجالات الهندسية والإحصائية. يُعد مبدأ الالتفاف (Convolution) أحد الأسس الرياضية الجوهرية في تحليل سلوك فحوصات الآبار (Well Testing)، لا سيما عندما يكون معدل الجريان غير ثابت مع الزمن. فعليًا، لا تخضع معظم الفحوصات الحقلية إلى ظروف مثالية ذات معدل إنتاج أو حقن ثابت، مما يجعل تطبيق هذا المبدأ ضروريًا لفهم استجابة الضغط المكمنية تحت ظروف الجريان المتغيرة.

من الناحية المكمنية، تعتمد دالة الالتفاف مبدأ التراكب (Superposition Principle) في تحليل استجابة الأنظمة الديناميكية. إذ يُمكن تفسير الضغط المقاس عند قاع البئر على أنه ناتج تراكمي لاستجابات المكمن السابقة لكل تغيير في معدل الجريان .هذا يعني أن كل تغيير صغير في معدل سحب المائع يترك بصمة على تطور الضغط ، وتكون الاستجابة الكلية هي مجموع هذه البصمات المتراكبة، و هو ما يُمثّله رياضيًا مفهوم الالتفاف (Convolution) .

1-5-5 اهمية الالتفاف Convolution :

في سياق فحوصات الآبار، تكمن اهمية تطبيق دالة الالتفاف Convolution بما يلي:

- معالجة الجريان غير الثابت لحساب الضغط من تاريخ إنتاج طويل ومعقّد.
- أداة تحقق لتاكيد نتائج فك الالتفاف Deconvolution، فبعد إجراءDeconvolution يُمكن إعادة تطبيق Convolution مع المعدلات الأصلية للتحقق من دقة الاستجابة المحسوبة.
- النمذجة العددية (Forward Modeling) ، إذ يُمكن توليد منحنيات الضغط المتوقعة من نموذج مكمن مفترض لمقارنة نتائجه مع البيانات الحقلية.

بصورة عامة فان حلول الالتفاف Convolution هذه لا تتم يدويا وانما باستخدام الحاسوب بسبب حجم البيانات و تعقيد المعادلات .

تتميز حسابات دالة الالتفاف بعدة خصائص مهمة و هي:

-الاستقرار العددي.

-وجود حل وحيد للمعادلة.

-المرونة في التطبيق على أنظمة مختلفة.

2-5-5 الصيغة الرياضية العامة للالتفاف Convolution

الصيغة الرياضية العامة لتكامل دوهامل او دالة الالتفاف تتمثل في مايلي:

$$\psi(t) = (f * \kappa)(t) = \int_0^t d\tau f(\tau)\kappa(t-\tau)$$

$$= (\kappa * f)(t) = \int_0^t d\tau \kappa(\tau) f(t-\tau), \quad 0 \le t < \infty, \quad \text{---------- } 1$$

إذ ان :

$\psi(t)$ ، $f(t)$ ، و $K(t)$ تمثل على التوالي بيانات الاخراج و الادخال و استجابة النظام مع الوقت.

يُمكن كتابة الالتفاف بدلالة بيانات الفحص لتحديد فرق الضغط و حسب الصيغة ادناه(الشكل5-6) :

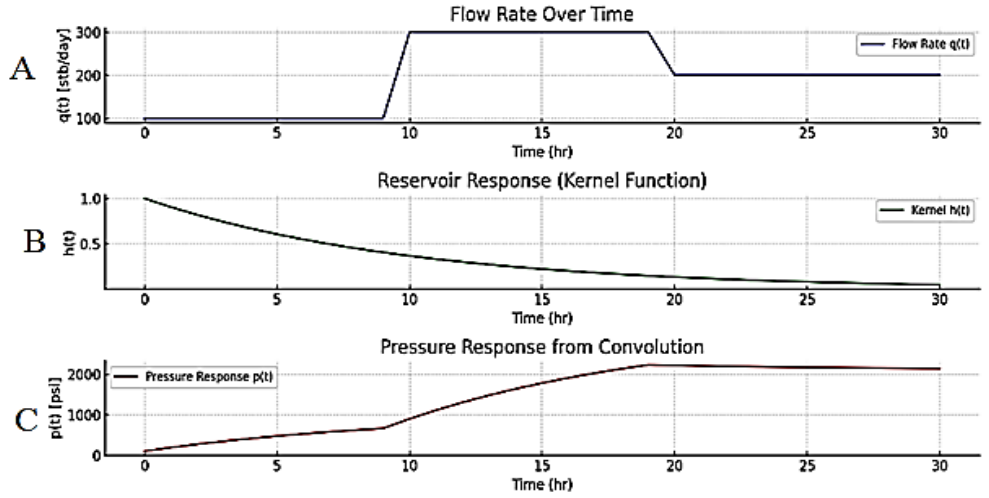
$$\Delta P(t) = q(t) * \frac{dp_u(t)}{dt} = \int_0^t q(\tau) \cdot \frac{dp_u}{d\tau}(t-\tau)\, d\tau \quad \text{---------- 2}$$

او يُمكن كتابتها بصيغة تحديد الضغط الاتية:

$$p(t) = p_i - \int_0^t q(\tau) \frac{dp_u(t-\tau)}{dt} d\tau$$

و بحسب خاصية التبادل الرياضية ، يُمكن كتابتها كما يلي:

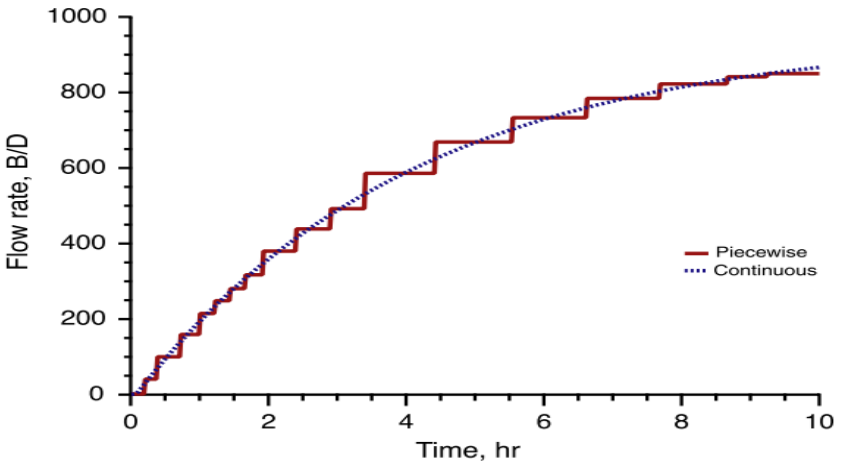
$$p(t) = p_i - \int_{\tau=0}^{t} q'(\tau) \Delta p_u(t-\tau)\, d\tau \quad \text{---------- 3}$$



الشكل5-6 : A – معدلات الجريان مع الوقت ، B – دالة النواة او دالة الضغط لوحدة الانتاج مع الوقت، C – الضغط مع الوقت . الاشكال A و B تمثل مدخلات الالتفاف Convolution و الشكل C يمثل المخرجات

ان الرموز التي وردت في الاشكال في اعلاه تعني:

q(t) : دالة مستمرة تمثل معدلات الجريان المقاسة عبر التاريخ الإنتاجي للبئر ممكن ان تقاس عند السطح او في باطن البئر (الشكل5-6 - A) و قد تكون مستمرَّة Continuous أو مستمرَّة بشكل متقطع Piecewise continuous كما في الشكل5-7 و تعتمد الوقت و هي بمثابة المدخلات الى الالتفاف .



الشكل5-7 : تقسيم التاريخ الانتاجي على شكل تدرجي stepwise (متعدد الفترات)

p(t) : دالة مستمرة تمثل المخرجات او نتائج الالتفاف و هي بمثابة اشارة تعكس استجابة Response انية لتغير الجريان (الشكل5-6 الرسم الاسفل).

p_u : دالة الضغط لوحدة الانتاج بمثابة استجابة الموديل المكمني(رياضيا) إذ تمثل حل لمعادلة انتشار الضغط في ظروف معينة ، مثلا كان يكون المكمن متجانس او مكمن معقد ثنائي المسامية .. و تتضمن بما في ذلك تاثيرات تخزين البئر و عامل القشرة. تُعتبر p_u جوهر عملية الالتفاف Convolution ومرآة لخصائص المكمن البتروفيزيائية. تسمى رياضيا ايضا بدالة النواة Kernel function K(t) اي ان $K(t)= p_u$ (الشكل5-6 الرسم الاوسط) و هي بمثابة مدخلات الالتفاف (اختيار للنظام المكمني).

dp_u/dt : مشتقة الدالة p_u و تُمثل استجابة الضغط لنبضة تدفق لحظية (Unit Impulse Response).في حين p_u تُمثل استجابة الضغط لوحدة تدفق مستمرة ثابتة (Constant Unit Rate Production).

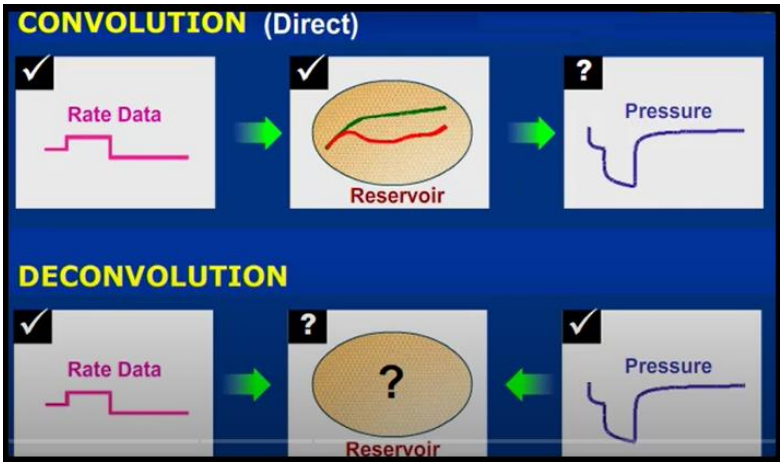
الرمز * : يرمز لعملية الالتفاف Convolution

رمز التكامل ∫ : يعني حساب تراكم استجابات الموديل المكمني من جراء تأثير كل التاريخ الانتاجي للبئر.

المخطط الاعلى في الشكل 5-8 يُوضح عملية الالتفاف كنظام ادخال و اخراج.

3-5-5 تهيئة بيانات الإدخال:

قبل تنفيذ حسابات الالتفاف ، يتم بناء أو توفير دالة الاستجابة المكمنية $p_u(t)$ عبر نموذج مكمني نظري (تحليلي أو عددي)، على فرض أن معدل الجريان المستخدم في توليد هذه الاستجابة هو ثابت ومساوٍ لـ q=1 STB/day. ، هذا التبسيط يُنتج ما يُعرف بـ استجابة وحدة جريان واحدة، وهي بمثابة استجابة طبيعية للمكمن غير متأثرة بتغيرات الجريان، ويُمكن لاحقًا استخدامها لتوليد الضغط الحقيقي تحت معدلات جريان حقيقية مختلفة.



الشكل5-8 : مخطط يُوضح مدخلات و مخرجات الالتفاف Convolution و فك الالتفاف Deconvolution .

موسكات Muskat 1937 اعتمد مبدأ دوهامل (Duhamel's principle) اعلاه للوسط المسامي والمستخدم على نطاق واسع في هندسة المكامن لاستخلاص حلول للمعادلات التفاضلية الجزئية Partial differential equations عند ظروف محددة مع الوقت، وقدم علاقة اعتبر فيها ان البيانات الداخلة تمثل بيانات معدل الانتاج و المخرجات تمثل الضغط واعتبر دالة النواة Kernel function-K(t) تمثل موديل المكمن/البئر الشكل5-8(الرسم العلوي) و عبر عنها بدلالة سلوك الجريان من المكمن الى البئر(موديل المكمن/ البئر) بحسب الصيغة الاتية:

$$\kappa(t) = p_u(t) = \frac{141.2\mu}{kh}\frac{1}{2t}\exp\left(-\frac{1}{4}\frac{r_w^2}{0.0002637\eta t}\right) \text{ ---------- } 4$$

إذ ان :

$$\eta = \frac{k}{\phi\mu c_t}$$

حل التكامل في المعادلة رقم-1 او 2 يتم عادة اما باستخدام طرق الحل التحليلية classical analytical methods مثل طريقة شبه المنحرف (Trapezoidal Rule) او طريقة سيمبسون (Simpson's Rule) و قد تتطلب استخدام معالجات معقدة مثل تحويل اللابلاس (Laplace Transform) او تحويل فورير Fourier Transform.

باختصار، مبدأ الالتفاف يمثل حجر الزاوية في تحويل فهمنا لسلوك المكمن من مجرد مراقبة الضغط إلى تحليل ديناميكي يعكس تفاعل المكمن مع تغيّر الجريان، مع تبنّي تبسيط مفيد وهو استخدام معدل مرجعي ثابت q=1 stb/day في بناء استجابة النظام.

الفرضيات المستخدمة:

يشترط مبدأ الالتفاف:

1- معادلة الجريان تكون خطية (Linear) ; من الناحية العملية يُمكن تحقق هذا الشرط في حال

كون الجريان أحادي الطور اي جريان النفط أو الماء و بشرط أن لا تتغير خواص الصخور مع الضغط. بالنسبة لآبار الغاز يتم استيفاء الشرط أيضًا إذا كان إجمالي هبوط الضط أثناء الفحص صغيرًا.

2- ان تُشكل بيانات الادخال دالة مستمرة (غير متقطعة) مع الوقت لتنتج مخرجات مستمرة ايضا مع الوقت.

3- لا يوجد تداخل No interference من ابار مجاورة .

4- كما و يشترط ان تخزين البئر و عامل القشرة ثابت عبر الفحص .

5- الضغط الابتدائي pi متجانس في المكمن. اي لا يكون الانتاج من طبقتين و قيم الضغوط pi مختلفة.

4-5-5 حساب الالتفاف:

في تحليل ضغط الآبار p(t)، تُستخدم طرق الالتفاف Convolution الرياضية لربط تاريخ معدل الإنتاج المتغير q(t) مع استجابة الضغط $p_u(t)$ **المعادلة رقم- 2** . تعتمد هذه الطرق على مبدأ أن انخفاض الضغط في المكمن هو نتاج تأثير تراكمي لمعدلات الإنتاج السابقة. توجد عدة طرق رئيسة لحساب هذا التأثير منها:

1. الالتفاف المنفصل (Discrete Convolution)
2. التقريب الخطي المتقطع (Piecewise Linear Approximation-PLA)
3. النموذج الثابت المتقطع (Piecewise Constant Model-PWC)

نستعرض في ادناه الأسس الرياضية، التطبيقات العملية، ومقارنة بين الطرق و بشكل مختصر:

(1)الالتفاف المنفصل (Discrete Convolution)

يعالج البيانات كقيم منفصلة دون توصيلها (النقاط النجمية في الشكل رقم 5-9) ، مما يجعل الحل سهل التطبيق عدديًا و سريعا عند التعامل مع البيانات المتباعدة. لكنه اقل دقة في حال التغيرات السريعة في معدلات الإنتاج.الصيغة الرياضية في حساب الضغط:

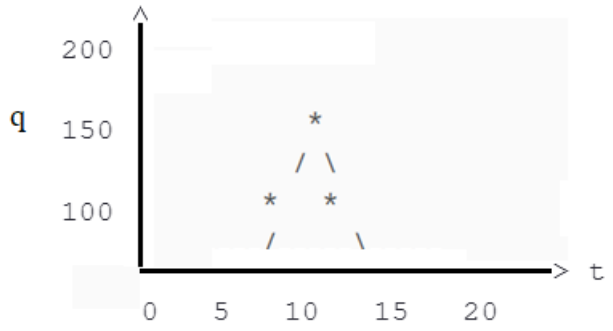
$$p(t_n) \approx p_i - \sum_{i=0}^{n} q(t_i) \cdot p'_u(t_n - t_i) \cdot \Delta t_i \quad \text{---------- 5}$$

إذا بدأ الجريان من $q_0=0$ فالصيغة تصبح:

$$\Delta P(t_n) = \sum_{i=1}^{n} q_i \cdot p_u(t_n - t_{i-1}) - \sum_{i=1}^{n} q_i \cdot p_u(t_n - t_i) \quad \text{---------- 6}$$

هذه الصيغة تأخذ بعين الاعتبار الفرق في معدل الجريان بين الفترات الزمنية ، وتُعتبر الأكثر دقة من التراكب الزمني time superposition. إذ ان :

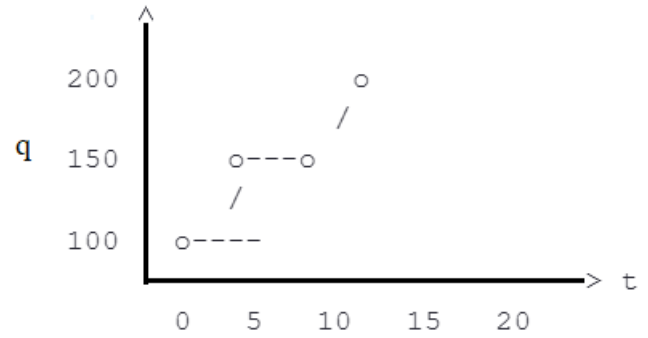
- p_i: الضغط الابتدائي.
- $p'_u(t)$: مشتق دالة استجابة الوحدة (Unit Impulse Response).



الشكل5-9 : مخطط يُوضح بيانات الجريان كقيم منفصلة

2- التقريب الخطي المتقطع (Piecewise Linear Approximation)

يُقرب منحنى الإنتاج بخطوط مستقيمة بين النقاط (الشكل رقم5-10) ، مما يحسن الدقة عند التغيرات التدريجية في معدلات الجريان . يعالج التغيرات التدريجية بشكل أفضل و أدق من الطريقة المنفصلة لكن أعقد حسابيًا (يتطلب تكاملات عددية).



الشكل5-10 : مخطط يُوضح بيانات الجريان كقيم تقريب خطي متقطع

الصيغة الرياضية:

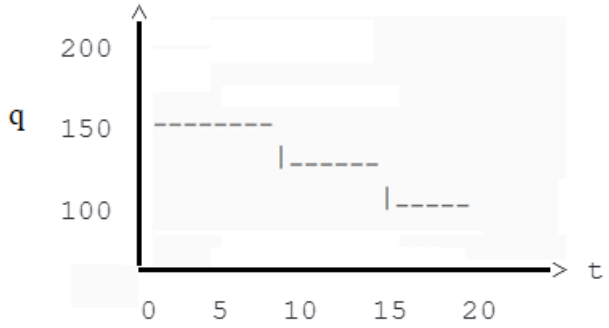
$$\Delta P(t_n) \approx \sum_{i=1}^{n} \int_{t_{i-1}}^{t_i} q(t) \cdot \frac{dp_u}{dt}(t_n - t)\, dt \quad \text{---------- 7}$$

او تكتب بالصيغة الاتية:

$$\Delta P(t_n) = \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{q_{i-1} + q_i}{2} \cdot (p_u(t_n - t_{i-1}) - p_u(t_n - t_i)) \right] \quad \text{---------- 8}$$

3- النموذج الثابت المتقطع (Piecewise Constant Model)

من حيث المبدأ يفترض أن معدل الجريان ثابت عبر الفترات الزمنية - ترتيب سُلمي (الشكل رقم 5-11) ، وهو تطبيق لمبدأ التراكب Superposition مناسب للتغيرات المفاجئة في معدلات الجريان.



الشكل5-11 : مخطط يُوضح بيانات الجريان على شكل ترتيب سلمي

الصيغة الرياضية:

$$\Delta P(t_n) = \sum_{i=1}^{n} q_i \cdot p_u(t_n - t_{i-1}) \quad \text{---------- 9}$$

او بفتح المجموع فتكتب بالصيغة الاتية:

$$\Delta P(t_n) = q_1 \cdot p_u(t_n - t_0) + q_2 \cdot p_u(t_n - t_1) + \cdots + q_n \cdot p_u(t_n - t_{n-1}) \quad \text{---------- 10}$$

الجدول5-3 يُوضح تطبيق الالتفاف Convolution و مقارنته بفك الالتفاف Deconvolution

الجانب	(Convolution)	(Deconvolution)
الغرض او الهدف	نحسب الضغط p(t) الناتج عن معدل جريان معروف	نستخرج pu(t) التي تعكس استجابة المكمن
كيف نحصل على pu(t)	يتم إعطاؤها كمدخل في المعادلة	يتم استنتاجها (هي المجهول) عبر حل عكسي
طبيعة العملية	عملية مباشرة (forward modeling)	عملية عكسية (inverse problem)
الحسابات	بسيطة نوعًا ما (تكامل عددي)	أكثر تعقيدًا وتتطلب خوارزميات متقدمة

الجدول5-3 مقارنة الالتفاف Convolution مع فك الالتفاف Deconvolution

6-5 فك الالتفاف - Deconvolution

فك الالتفاف (Deconvolution) هو بمثابة أداة تحليلية متقدمة في تفسير فحوصات الآبار،

وخصوصًا في حالات الجريان غير الثابت (متغير مع الزمن). ففي الوقت الذي يستخدم الالتفاف لحساب الضغط من توفر معدل الجريان و الدالة p_u ، فك الالتفاف يعكس العملية لاستخراج استجابة الضغط المكمنية $p_u(t)$ او ايجاد مشتقة دالة الضغط لوحدة الانتاج p_u من الضغط و معدل الجريان كما لو أن البئر قد أنتجت بمعدل ثابت، غالبًا q=1 STB/day .

تُعد هذه العملية مفيدة لتبسيط وتحسين تفسير الفحص، وفصل تأثيرات تغيرات الجريان عن الخصائص الحقيقية للمكمن.

المحددات و الفرضيات عند تطبيق فك الالتفاف، تكمن فيما يلي:

- تناسق بيانات الضغط ومعدل الانتاج المقاسة مع نموذج دوهامل Duhamel's model الخطي.
- يتطلب وجود بئر واحد فقط اي عدم وجود تداخل من ابار مجاورة و الا من غير الممكن تطبيق فك الالتفاف.
- نظام الجريان يتطلب جريان مائع واحد ، في حال المكمن نفطي فيجب ان يكون الضغط الجرياني اعلى من ضغط الاشباع للنفط.
- خواص الصخور ثابتة لا تعتمد على تغير الضغط.
- الضغط المكمني الاصلي (الابتدائي) pi متجانس للمكمن ككل ، إذ لا يُمكن تطبيقها للبئر الذي ينتج من طبقات متعددة لها ضغوط ابتدائية مختلفة.

7-5 تصنيف طرق فك الالتفاف Classification of Deconvolution Methods

تُصنف طرق فك الالتفاف بحسب تقنية الحل الرياضي , إلى مجموعتين :

1-7-5 :الطرق الطيفية Spectral Methods

و هي طرق سريعة تعتمد على تحويل البيانات من المقياس الزمني إلى المقياس الترددي (Frequency Domain) الطيفي لتسهيل عملية فك الالتفاف. المصطلح Spectral يشير إلى المجال الترددي (Frequency Domain) ويُقصد بها دراسة الإشارة من حيث الترددات وليس الزمن .

تعمل الطرق الطيفية عبر تحويل بيانات $q(t)$ و $\Delta p(t)$ إلى المجال الترددي باستخدام تحويلات اللابلاس Laplace transforms او تحويلات الفوريير Fourier Transform ثم قسمة التحويلات لكلتا الدوال(الضغط على الجريان). بعدها تستخدم معكوس اللابلاس Inverse Laplace transform او معكوس الفوريير Inverse Fourier transform لاعادة تحويل النتيجة الى المجال الزمني.

أُستخدمت تحويلات اللابلاس Laplace transforms لحل فك الالتفاف في المصادر : Kuchuk and Ayestaran (1985)، Bourgeois ، Ilk (2005) ; AL Ajmi (2008) (1992) في حين يستخدم تشينج وآخرون Cheng (2003) تحويل فوريير Fourier transforms لحل فك الالتفاف بدلا من تحويل اللابلاس.

1-طرق فك الالتفاف في مجال اللابلاسLaplace Domain :

الفكرة الاساسية للطرق الطيفية تقوم على مبدأ الالتفاف Convolution لتحليل تحويل اللابلاس و الذي ينص على ان حاصل ضرب الالتفاف Convolution product مساوي لضرب التحويلات Product of the transforms اي ان :

Convolution product = Product of the transforms

- المعادلة الاصلية لضرب الالتفاف Convolution product في المجال الزمني تساوي الاتي:

$$\Delta p(t) = (q * p_u)(t) \text{ ---------- 11}$$

- في المجال الترددي ، نُطبق تحويل لابلاس على كل دالة و ضرب تحويلات اللابلاس Laplace transform كالاتي :

$$\mathcal{L}\{\Delta p(t)\} = \mathcal{L}\{q(t)\} \cdot \mathcal{L}\{p_u(t)\} \text{ ---------- 12}$$

إذ ان:

- $\mathcal{L}\{\Delta p(t)\}$: تحويل لابلاس لتغير الضغط المقاس.
- $\mathcal{L}\{q(t)\}$: تحويل لابلاس لمعدل الجريان.
- $\mathcal{L}\{p_u(t)\}$: تحويل لابلاس لاستجابة الوحدة (المجهولة).

- عند الحل فيجب ايجاد تحويل اللابلاس لدالة الاستجابة $\mathcal{L}\{p_u(t)\}$، إذ نقوم بقسمة التحويلات:

$$\mathcal{L}\{p_u(t)\} = \frac{\mathcal{L}\{\Delta p(t)\}}{\mathcal{L}\{q(t)\}} \text{ ---------- 13}$$

حساب $\mathcal{L}\{\Delta p(t)\}$ و$\mathcal{L}\{q(t)\}$ من البيانات الحقيقية للضغط و الجريان، ثم نُقسم النتيجة للحصول $\mathcal{L}\{p_u(t)\}$.

- حساب $p_u(t)$ باستخدام معكوس تحويل لابلاس Inverse Laplace transform:

$$p_u(t) = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{\mathcal{L}\{\Delta p(t)\}}{\mathcal{L}\{q(t)\}}\right\} \text{ ---------- 14}$$

نستخدم لذلك خوارزميات عكسية مثل Gaver-Stehfest أو Talbot لإيجاد $p_u(t)$.

$\mathcal{L}^{-1}$ يمثل عامل تحويل اللابلاس العكسيInverse Laplace transform operator .

2- استخدام تحويلات الفوريير Fourier Transform :

نتبع نفس الخطوات السابقة في تحويلات اللابلاس ، فيكون التعبير في المجال الزمني لدالة الالتفاف Convolution كما يأتي:

$$\Delta p(t) = (q * p_u)(t) \quad \text{(الالتواء الزمني)}$$

في المجال الترددي - تحويلات الفوريير Fourier Transform:

$$\mathcal{F}\{\Delta p(t)\} = \mathcal{F}\{q(t)\} \cdot \mathcal{F}\{p_u(t)\}$$ (ضرب مباشر في التردد) ---------- 15

لذا يُمكن ايجاد $p_u(t)$ بحل فك الالتفاف عبر كتابة :

$$\mathcal{F}\{p_u(t)\} = \frac{\mathcal{F}\{\Delta p(t)\}}{\mathcal{F}\{q(t)\}} \quad \Rightarrow \quad p_u(t) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\frac{\mathcal{F}\{\Delta p(t)\}}{\mathcal{F}\{q(t)\}}\right\}$$ ---------- 16

$\mathcal{F}$: تحويل الفوريه (Fourier Transform)

$\mathcal{F}^{-1}$: تحويل الفوريه العكسي

5-7-1-1 ميزات الطرق الطيفية:

- سريعة جدًا بسبب استخدام Fast Fourier Transform
- مناسبة للبيانات ذات السلوك الدوري أو المنتظم

5-7-1-2 عيوب الطرق الطيفية:

- حساسة جدًا لاضطرابnoise البيانات (حتى تشويش صغير يؤثر على النتائج كثيرًا).
- تحتاج إلى بيانات متصلة وموزعة بشكل منتظم فقد تظهر مشكلات في التفسير عند البيانات غير ثابتة أو غير خطية.
- قد تُعطي نتائج غير مستقرة إذا كان $F\{q(t)\}$ قريب من الصفر.
- لا تتعامل جيدًا مع البيانات المحدودة أو غير الكاملة.

5-7-2 طرق المجال الزمني Deconvolution in Time Domain

تُعد هذه الفئة من أكثر الطرق استخدامًا، إذ تتم معالجة معادلة فك الالتفاف مباشرة في المجال الزمني، باستخدام نماذج رياضية تقوم بفصل البيانات إلى فترات زمنية (عُقَد) (الشكل5-11) ، وتفترض سلوكًا خطيًا ضمن كل مدة. يتم بناء نظام من المعادلات خطي يُحل فيما بعد باستخدام أساليب عددية مثل طريقة المربعات الصغرى (Least Squares) يرافقها استعمال تقنية التنعيم (Smoothing) لضمان استقرار الحل. تُعد هذه الطرق مناسبة للبيانات ذات التباين الزمني العالي والضوضاء المحدودة.

ان فرضية التبسيط في أن يكون سلوك النظام خطيًا داخل كل مدة زمنية، سيُنتج نظامًا خطيًا من المعادلات يُعبّر عنه بالصيغة التالية:

$A \cdot x = b$ --------- 17

إذ ان :

A: مصفوفة التكامل لمشتقة دالة الضغط لوحدة الجريان،

x: متجه يمثل معدل الجريان،

b: متجه الضغط المقاس.

يُحل النظام العددي اعلاه باستخدام طرق ستُذكر في الفقرة اللاحقة، مع تطبيق قيود تنعيم (Smoothing Constraints) على الحل من أجل تقليل التذبذبات غير الفيزيائية في النتائج وتحسين الاستقرار العددي.

ممكن ان نقسم طرق المجال الزمني الى:

1- طرق فك الالتفاف المباشرة (الكلاسيك)

الطرق الخطية الكلاسيكية يُمكن إيجادها في المصادر: *Jargon and Van Poolen (1965)* و *Thompson and Reynolds (1986)* ، تستخدم أسلوب المربعات الصغرى الكلية المقيدة (Constrained Total Least Squares).

2- طرق فك الالتفاف غيرالمباشرة (الحديثة)

الطرق الأحدث، والتي تُطبق المربعات الصغرى الكلية غير الخطية (Nonlinear Total Least Squares)، فيُمكن الرجوع في ذلك إلى المصادر:

Kuchuk (1990)؛ *Baygun(1997)*، *Von Schroeter (2004)*، *Levitan (2005)*، *Kuchuk (2005)*

1-2-7-5 طرق فك الالتفاف التقليدية Classical Deconvolution Methods

ان حل فك الالتفاف Deconvolution للجريان المتعدد Multi-rate في الموديل المكمني للبئر احادي Single-well reservoir system يمثل المشتقة لدالة الضغط لوحدة الجريان $p^{-}_u=dp_u/dt$ و هي دالة للزمن و تُستخلص من تكامل دوهامل Duhaml'sintegral-convolution كما ذكرنا و كالاتي:

Dumhamel's equation — Unit Rate Function

$$\Delta p(t) = p_i - p_{wf}(t) = \int_0^t q(t-\tau)\frac{dPu(t)}{dt}d(\tau) \quad \text{----------} \quad 18$$

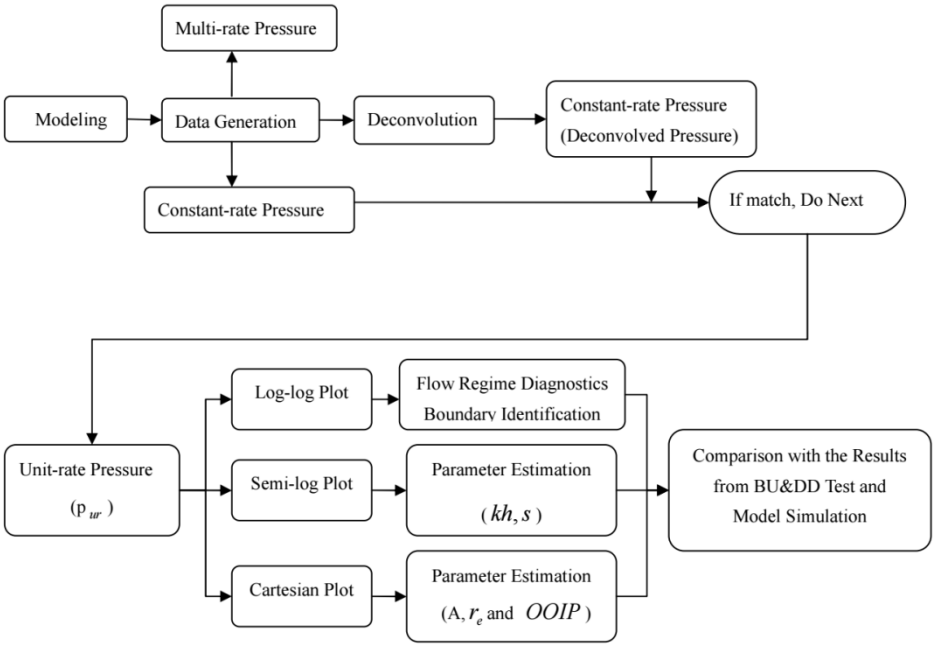
إذ ان pi يمثل الضغط المكمني الاصلي و $p(t)$ و $q(t)$ يمثلان الضغط و معدل الجريان المقاس مع الوقت (معلوم) و ان $p^{-}u=dp_u/dt$ تمثل فك الالتفاف Deconvolution المطلوب ايجادها عبر عكس تكامل الالتفاف Convolution في المعادلة اعلاه ثم حلها رياضيا و ايجاد دالة الضغط لوحدة الانتاج Unit rate pressure function-p_{ur} or p_u و كما ذكرنا سابقا فايجاد p_u و رسمها مع المشتقة اعلاه ، سيُمكننا من تحديد اطوار الجريان خواص الطبقة المكمنية و حدود المكمن .

الشكل5-12 يُوضح خطوات سير العمل workflow لتفسير الفحص متعدد الجريان بطريقة فك الالتفاف Deconvolution و لحين ايجاد خواص المكمن.

لايجاد دالة الضغط لوحدة الانتاج p_u ;

- فيُمكن كتابة دالة الالتفاف Convolution على النحو الاتي:

$$\Delta p(t) = p_i - p_{wf}(t) = \int_0^t q(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad \text{----------} \quad 19$$



الشكل5-12 : سير العمل workflow لفك الالتفاف بناءا على تحليل انتقال الضغط pressure transient

ان h(t) تُعبر عن مشتقة الضغط لوحدة الانتاج و تمثل الموديل المكمني و يُمكن كتابتها كالاتي:

$$h(t) = dp_u(t)/dt \quad \text{---------- 20}$$

يُمكن حل تكامل دالة الالتفاف convolution (المعادلة-19) بمجموع الفترات التكرارية على النحو الاتي:

$$\Delta p(n) = \sum_{k=0}^{N-1} q(k)h(n-k) \quad \text{---------- 21}$$

ان q_n تمثل معدلات الجريان للفترات المتعاقبة للتسلسل n :

$n = 1,2,\ldots,N$

و ان Δp_n تمثل فروقات الضغط (استجابة الضغط) للفترات المتعاقبة للتسلسل n و N يمثل عدد الفترات الزمنية (العقد nodes) الكلي.

اذن الهدف هو ايجاد الدالة h(t) و ليس Δp فيُمكن عكس المعادلة رقم-21 للتعبير عن الخوارزمية التكرارية الخطية h على النحو الاتي:

للمدة الجريانية الاولى :

$$h(1) = \Delta p(1)/q(1) \quad (n=1) \quad \text{---------- 22}$$

للفترات االمتعاقبة n الاخرى :

$$h(n)=\frac{\Delta p(n)-q(n)h(1)-q(n-1)h(2)-q(n-2)h(3)-\ldots-q(2)h(n-1)}{q(1)}\ (n=2,3,\ldots,N)\ \text{-----}23$$

و باجراء التكامل التراكمي بطريقة شبه المنحرف trapezoidal ، يُمكن ايجاد دالة الضغط لوحدة الجريان P_u وهي الهدف في عملية فك الالتفاف Deconvolution و على النحو الاتي :

$$p_u(1)=h(1)\quad (n=1)\ \text{--------}24$$

$$p_u(n)=\frac{h(n)+h(n-1)}{2}+\frac{h(n-1)+h(n-2)}{2}+\ldots+\frac{h(2)+h(1)}{2}+h(1)\quad (n=2,3,\ldots,N)\ \text{-----}25$$

برغم من ان الطريقة المباشرة لفك الالتفاف Deconvolution تتميز بالحل و التفسير السهل و المباشر للبيانات متعددة الجريان لكن تصاحبها بعض المشاكل اهمها ان خوارزمية فك الالتفاف أعلاه لا يُمكن أن تعطي حلاً مستقراً stable بسبب تراكم الأخطاء (الفروقات ما بين المقاس و المحسوب) في الفترات المتأخرة للحسابات.

***بعض محددات – constraints طريقة فك الالتفاف المباشرة:**

ندرج ادناه بعض مشاكل و محددات – constraints طريقة فك الالتفاف المباشرة:

- يجب توفر كل بيانات الضغط مستمرة من دون قطع عبر التاريخ الانتاجي للبئر .
- جودة البيانات ، إذ ان اي خطا في بيانات الضغط سيستمر و ينتشر عبر الحسابات .
- بحسب الفقرة اعلاه ، فيُفضل استخدام طريقة فك الالتفاف المباشرة في تحليل فحص تصاعد الضغط Build-up لأن بيانات هبوط الضغط Drawdown غالبًا ما تكون كثيرة التذبذب بسبب تعدد معدلات الجريان.
- و اذا استخدمنا بيانات تصاعد الضغط Build-up و في حال عدم توفر الضغط المكمني الاصلي p_i فسنواجه مشاكل اخرى إذ لا يكون الحل وحيدا Non-unique solution و انما يعطي الحل النهائي حلول متعددة .

ان حلول فك الالتفاف Deconvolution تتحسس بالتغيرات الصغيرة في بيانات الضغط و معدل الجريان المقاسة والتي يُمكن أن تؤدي إلى تغييرات و عدم استقرارية Unstable في النتائج . للاسباب اعلاه أُهملت طريقة فك الالتفاف لسنوات لحين تم تداركها عبر بناء العديد من الخوارزميات المستقرة و ناتي على ذكرها في ادناه.

2-2-7-5 طرق فك الالتفاف غير المباشرة (الحديثة) Indirect Deconvolution Methods

تقدم طريقتي فون شروتر Von Schroeter[18] (2004) و ليفتن Levitan[19](2005)، لحل فك الالتفاف Deconvolution اسلوبا جديدا لحل مشكلة تفسير بيانات فحوصات الابار المتعددة الجريان Multirate بوجود الضوضاء . إذ اوجدا خوارزميتين رياضية مهمتين و التي جعلت من فك الالتفاف أداة فعالة و قابلة للتطبيق في تفسير فحوصات الآبار وتحليل بيانات الإنتاج.

1-2-2-7-5 طريقة فون شروتر و جماعته Von Schroeter et.al. 2004

طريقة فون شروتر (2004) .Von Schroeter et al هي إحدى الطرق الرائدة في حل مشكلة Deconvolution لبيانات ضغط الآبار، وتُعتبر تطويرًا مهمًا في هذا المجال بسبب اعتمادها على تحويل المشكلة إلى مساحة لوغاريتمية لتحسين استقرار الحل وتجنب المشكلات العددية التي تعاني منها الطرق التقليدية.

تهدف الطريقة إلى استخراج استجابة الضغط لوحدة الإنتاج $p_u(t)$ (Unit Pressure Response) من بيانات الضغط و الجريان المتغيرة، حتى مع وجود ضجيج (Noise) أو فترات زمنية ناقصة.

اعتمدت الطريقة ثلاث أفكار جديدة:

1- يتم حل المعادلة رقم 1 ليس لاستجابة معدل الوحدة الثابت $p_u(t)$ ، ولكن للدالة z (أو الاستجابة) التي تُمثل اللوغاريتم الطبيعي للمشتقة $p'_u(t)$ (المشتقة هنا نسبة للوغاريتم الوقت و ليس الوقت) و كما في ما يلي:

$$z(\tau) = \ln\left[\frac{dp_u(t)}{d\ln(t)}\right] = \ln\left[\frac{dp_u(\tau)}{d\tau}\right] \text{------- 26}$$

$z(\tau)$ يمثل الموديل او المنحني المطلوب ايجاده بطريقة فك الالتفاف و ان تاو $\tau=\ln t$ فيصبح تكامل دوهامل من علاقة خطية في $K(t)$ الى علاقة غير خطية (أُسية) Nonlinear convolution equation في $z(\iota)$ كما يأتي:

$$p_m(t) = p_i - \int_{-\infty}^{\ln t} q_m(t - e^{\tau})\, e^{z(\tau)} d\tau. \text{--------- 27}$$

2- يُدخل التنظيم Regularization في الحل ، هذا الحد يشجع في أن تكون z ناعمة smoothing (قليلة التذبذب أو الانحناء)، مما يحسن استقرار الحل. ففي فك الالتفاف (Deconvolution) مثلا هنالك عكس تأثير نظام المكمن (مثل التحويل العكسي للضغط إلى معدل جريان أو العكس) و بيانات الفحص غالبًا ما تحتوي على ضجيج (Noise) ، وهذا العكس يكون غير مستقر بطبيعته. فاذا لم نضف تنظيمًا، فقد نحصل على حلول "متذبذبة" وغير فيزيائية ، مثلاً ضغط سالب أو معدل جريان متذبذب.

3- لحل التكامل ، يستخدم فون شروتر خوارزمية الانحدار اللاخطي– لكل المربعات الصغرى بدلالة متغيرين هما الضغط و معدلات الجريان ;

Non linear regression analysis by Total Least Square(TLS) (p ،q) وهذا الاستخدام يُعتبر القوة في طريقة فون شروتر. ان صيغة الحل هذه تعمل على تقليل الأخطاء (الفروقات) ما بين بيانات الجريان والضغط المقاسة و المحسوبة الى ادنى Minimum حد ممكن عبر وضع محددات تراقب معالجة البيانات عند الحل.

اولا- ملخص خطوات الحل الرياضي لطريقة فون شروتر :

حل فك الالتفاف بطريقة فون شروتر يتطلب المساعدة باستخدام برامجيات خاصة مثل البرنامج

الجاهز Ecrin إذ يستخدم خوارزميات معقدة تتعامل مع كم هائل من البيانات تسلك سلوك انظمة لا خطية . لغرض التوضيح نذكر ادناه ملخص عام لخطوات الحل علما ان كل خطوة تندرج تحتها العديد من المعالجات الرياضية والاحصائية (للتفاصيل مراجعة المصدر فون شروتر 2004) ، لنفترض أن لدينا:بيانات الفحص عادة ما تتضمن الضغوط المقاسة $\Delta p_{measured}(t)$ و بيانات معدلات الجريان المقاسة $q_{measured}(t)$ و كباقي الفحوصات نحتاج الى بيانات عامة عن المكمن و البئر و بيانات اخرى داعمة للحل ان توفرت منها مثلا معلومات :

زلزالية وجيولوجية Seismic and geology، تحليل اللباب الصخري Core analysis، ملف إلانتاج Production profile، بيانات الخواص الفيزيائية للموائع PVT و بيانات الاكمال Completion data .

المطلوب للحل هو إيجاد المشتق اللوغاريتمي $z(\tau)$ كما في المعادلة رقم- 27 .

الحل:

<u>الخطوة الاولى : صياغة دالة الهدف (Objective Function)</u>

دالة الهدف عادة ما توضع كدليل في تحديد المجاهيل المطلوب ايجادها و تتضمن الخوارزميات الداخلة في الحل . يُمكن كتابة الصيغة العامة لدالة الهدف بطريقة فون شروتر كالاتي:

$$E(p_o, \mathbf{z}, \mathbf{q}_c) = \left\{ \| p_o \mathbf{e} - \mathbf{p}_m - \mathbf{C}(\mathbf{z})\mathbf{q}_c \|_2^2 + \nu \| \mathbf{q}_c - \mathbf{q}_m \|_2^2 + \lambda \| \mathbf{D}\mathbf{z} - \mathbf{k} \|_2^2 \right\} \text{---- 28}$$

إذ ان : $E(p_o)$ ،z ،q_c تمثل دالة الهدف (Objective Function) المراد حلها بطريقة التصغير (minimization) باستخدام خوارزمية TLS . المعاملات في داخل القوس p_o ،z ،q_c هي مجهولة unknowns المطلوب ايجادها.

p_o : الضغط الابتدائي او الاصلي للمكمن Original reservoir pressure و يقاس في بداية فحص البئر و احيانا يكون مجهول يدخل ضمن اهداف حل فك الالتفاف .

z : متجه vector دالة الاستجابة في الزمن (Log-derivative or log-response function)وهو المتغير الأساسي المجهول الذي يتم البحث عنه.

q_c : معدل الجريان المحسوب .

دالة الهدف E تتضمن ثلاثة حدود (الطرف الايمن في المعادلة رقم-28):

1- حد مطابقة البيانات Data Mismatch Term

$$\| p_o \mathbf{e} - \mathbf{p}_m - \mathbf{C}(\mathbf{z})\mathbf{q}_c \|_2^2$$

إذ ان :

e : متجه vector بطول مناسب، لتكرار p_o على شكل متجه.

p_m : متجه الضغط المقاس (Measured pressures) عند اوقات مختلفة.

q_c :متجه الجريان الناتج (المحسوب) من الحل (Estimated flow history) ، ويُستخدم لحساب الضغط النظري.

$C(z)$:مصفوفة Matrix تمثل تأثير دالة الاستجابة (Unit impulse response) وتحسب من المتغير z، وتُطبَّق على q_c لحساب الضغط النظري.

الغرض من الحد هو في مطابقة الضغط النظري المحسوب مع الضغط المقاس اي يقيس مدى توافق النموذج مع البيانات الحقيقية للضغط. هذا المصطلح يُعاقب (كمحددات) الفرق بين الضغط المحسوب من $C(z)q_c$ (من طريقة convolution) و الضغط المقاس p_m. طريقة الحل تعمل في تصغير هذا الفرق (الخطأ في تمثيل الضغط) الى ادنى حد ممكن و مقبول.

2- حد تنظيم الجريان -Flow Regularization Term

$$\nu \left\| \mathbf{q}_c - \mathbf{q}_m \right\|_2^2$$

يعمل على مطابقة الجريان المحسوب مع الجريان المقاس، باستخدام معامل الوزن ν بحيث يضمن أن المتجه q_c لا ينحرف بشدة عن القياسات أو التوقعات الأولية. إذا كانت قيمة ν كبيرة، يُجبر الحل على الاقتراب من q_m ، مما يقلل من تأثير الضوضاء في البيانات.

إذ ان :

q_m : متجه Vector معدلات الجريان المقاسة (Measured flow rates) .

ν : الوزن النسبي للخطأ (Relative error weight) بين جزئي الضغط والجريان، يُحسب من النسبة بين تاثير الضغط و تاثير الجريان و يساوي:

$$\nu = \frac{N_q}{N_p} \frac{\| \Delta \mathbf{p_m} \|_2^2}{\| \mathbf{q_m} \|_2^2}$$

N_q: عدد نقاط الجريان.

N_p : عدد نقاط الضغط.

Δp_m : التغير في الضغط المُقاس (قد تكون تفاضلًا أو انحدارًا بالضغط)

$\Delta p_m = p_o - p_m$

الغرض من ν هو في:

- تعديل التوازن العددي بين جزئي دالة الهدف: فقد تكون بيانات الضغط والجريان بمديات عددية مختلفة جدًا. و من دون ν ، قد "يُهيمن" أحد الجزئين على الحل ويتجاهل الآخر.

- تحقيق الوزن النسبي العادل عبر تسوية مساهمة كل جزء في دالة الهدف، بحيث تكون

المقارنة عادلة عند الحل (Minimized by iteration) .

3- حد تنظيم الانحناء:(Curvature Regularization Term)

$$\lambda \|\mathbf{Dz} - \mathbf{k}\|_2^2\Big\}$$

يتحكم حد تنظيم الانحناء في سلاسة الحل عن طريق معاقبة (معالجة) التغيرات الحادة في متجه دالة الاستجابة (log-impulse response) z و فرض نعومة Smoothing أو شكل معين (قليلة التذبذب أو الانحناء) على الدالة z ، مما يحسن استقرار الحل.

إذ ان الرموز تمثل:

D : مصفوفة تفاضل تمثل المشتقة الثانية (second difference matrix) ، وتستخدم لتقييم نعومة z .

k : متجه Vector هدف للتنعيم، غالبًا ما يكون صفرا (أي نرغب أن يكون تقريبا $Dz\approx 0$ لتحقيق النعومة).

السلاسة او تنعيم البيانات (Smoothing) يمثل تنظيمًا قائمًا على المشتقة الثانية، المصفوفة D هي مصفوفة التفاضل من الدرجة الثانية.(Second-Order Difference Matrix) فالحد :

$$\|\mathbf{Dz} - \mathbf{k}\|_2^2\Big\}$$

يكافىء

$$\left\| \frac{d^2 z}{dt^2} \right\|^2 \quad \text{or} \quad \|D \cdot z\|^2$$

λ : معامل التنظيم (Regularization parameter) يضبط تأثير شرط النعومة و يساوي: .

$$\lambda = \frac{1}{N_p} \frac{\| \Delta \mathbf{p_m} \|_2^2}{\| \mathbf{D} \|_F^2} \quad \text{--------} \ 29$$

$\| D \|_F$: يمثل معيار فروبينيوس للمصفوفة D. هو جذر مجموع مربعات جميع عناصر المصفوفة و يشبه إلى حد ما "المقدار العام" أو "قوة" المصفوفة.

يُحسب كالاتي:

$$\|D\|_F = \sqrt{\sum_{i,j} |D_{ij}|^2} \quad \text{--------} 30$$

الغرض من المعيار اعلاه هو فيما إذا كانت D تحتوي على قيم كبيرة أو صغيرة جدًا، فإن أثر التنظيم λ سيكون غير متوازن أو غير مضبوط. لذلك: نُقسم λ على معيار فروبينيوس حتى يصبح تأثير التنظيم مستقلاً عن حجم D **اي:**

$$\lambda_{\text{effective}} = \frac{\lambda}{\|D\|_F^2} \quad \text{-------- 31}$$

اذن فهو يمنع أن تكون المصفوفة D قوية جدًا (مثلاً فيها قيم مشتقات عالية) فتُهيمن على الحل . بالنتيجة يعمل على تحسين الاستقرار العددي فتصبح المسألة أكثر استقرارًا و تصبح حساسية λ قابلة للتفسير والتحكم.

ما الفرق بين ν و λ ؟

ν يتحكم في الوزن بين الضغط والجريان ، بينما λ يتحكم في تنعيم الحل(z) .

خلاصة دالة الهدف:

اذن الغرض من دالة الهدف هو حل فك الالتفاف بطريقة فون شروتر لإيجاد z دالة الاستجابة و حساب الجريان q_c و تحديد p_o بحيث :

- يتم تطابق الضغط المحسوب مع الضغط المقاس (الحد الأول).
- يكون الجريان الناتج مقاربًا للمقاس (الحد الثاني).
- تكون دالة الاستجابة ناعمة وغير متذبذبة بشدة (الحد الثالث).

الخطوة الثانية –الحل العددي لايجاد z- Optimization:

هو في ان تُحل مصفوفات دالة الهدف في طريقة فون شروتر لايجاد الاستجابة – z و دالة الجريان – (rate function) يتم ذلك باستخدام الحل التكراري Iteration غير مباشر:

1: تحويل المتغيرات إلى مقياس زمني لوغاريتمي:

لتجنب التعقيدات العددية الناتجة عن استخدام الزمن الطبيعي، يتم تحويل الزمن إلى مقياس لوغاريتمي:

$$z(\sigma) = \ln\left[\frac{dp_u(t)}{d\ln(t)}\right] = \ln\left[t\,\frac{dp_u(t)}{d(t)}\right] = \ln[tg(t)] = \ln\left[\frac{dp_u(\sigma)}{d\sigma}\right] \quad \text{-------- 32}$$

$$z(\sigma) = \ln\{tg(t)\}, \quad \sigma = \ln t, \quad t \in [0, T] \text{ .} \quad \text{-------- 33}$$

إذ:

$g(t)$: مشتقة الاستجابة الزمنية التي تُستخدم لحساب $p_u(t)$

$z(\sigma)$: دالة جديدة تُستخدم في الحسابات العددية.

2: إعادة كتابة معادلة فك الالتفاف- Deconvolution

نبدأ من مبدأ دوهامل في التداخل الزمني (Duhamel's Principle):

$$\Delta p(t) = \int_0^t g(t-\tau) \cdot \frac{dq}{d\tau} d\tau \quad \text{-------- 34}$$

و باستخدام التحويل اللوغاريتمي ، نحصل على:

$$\Delta p(t) = \int_{-\infty}^{\ln T} e^{z(\sigma)} q(t - e^{\sigma}) d\sigma \quad \text{-------- 35}$$

هذه المعادلة هي اساس طريقة فون شروتر.

3: تقريب z(σ) كدالة خطية قطعة بقطعة (Piecewise Linear Function)

إذ نقسم المجال الزمني اللوغاريتمي إلى عدد من العقد الزمنية:

$$\sigma_0 < \sigma_1 < \sigma_2 < \cdots < \sigma_n = \ln T \quad \text{-------- 36}$$

ثم نفترض أن بالامكان تقريب الدالة z(σ) خطيا بين كل عقدتين اي يكن كتابتها بالصيغة التالية :

$$z(\sigma) = \alpha_k + \beta_k \sigma, \quad \text{إذا كان } \sigma_{k-1} \le \sigma \le \sigma_k \quad \text{-------- 37}$$

إذ ان :

α_k : الثابت لكل مدة(فترة) ، β_k : الميل لكل مدة

المعاملان اعلاه نحسبهما من خلال ما ياتي::

$$\beta_k = \frac{z_k - z_{k-1}}{\sigma_k - \sigma_{k-1}}, \quad \alpha_k = z_k - \beta_k \sigma_k \quad \text{-------- 38}$$

4: صياغة المشكلة كمسألة انحدار غير خطي Nonlinear regression:

نريد الآن حساب القيم z_k بحيث تتطابق القيم المحسوبة لـ $\Delta p(ti)$ مع القيم المقاسة.

نستخدم العلاقة:

$$p(t) = p_0 - \sum_{j=1}^{N} y_j G_j(z,t) \quad \text{-------- 39}$$

إذ ان :

p_o : الضغط الابتدائي. y_j : معدلات الجريان. $Gj(z, t)$: دالة الاستجابة الزمنية، وتُحسب باستخدام:

$$G_j(z,t) = \sum_{k=1}^{n} \theta_j(t - e^{\sigma}) e^{\alpha_k + \sigma\beta_k} d\sigma \quad \text{-------- 40}$$

$\theta_j(t-e^{\sigma})$: هي دالة تمثل التوزيع الزمني للجريان أو تأثير التأخير الزمني من جراء معدلات الجريان المتغيرة. و تُستخدم لتعديل العلاقة بين الضغط والجريان بناءً على التاريخ الانتاجي.

$t-e^{\sigma}$: تمثل الفرق الزمني بين الزمن الحالي t والزمن المكافئ للقيمة اللوغاريتمية e^{σ} .

5: دمج خوارزمية Variable Projection Algorithm- VARPRO

خوارزمية VARPRO تُستخدم لفصل المتغيرات الخطية عن غير الخطية في المسألة.

إذ ان (Projection) تعني اسقاط المتغيرات الخطية خارج عملية التكرار ، وبالتالي تقليل عدد المتغيرات التي تحتاج إلى تحديث عددي.بعض المتغيرات تظهر خطيًا في المعادلة وبعضها

الآخر يظهر بشكل غير خطي .VARPRO تحسب المتغيرات الخطية بشكل مباشر عند كل تكرار ، بينما يتم تحديث المتغيرات غير الخطية باستخدام خوارزميات غير خطية مثل Levenberg-Marquardt.
المتغيرات غير الخطية مثل مواقع العقد الزمنية σ_k ، أو أي معاملات تؤثر على شكل الدالة $z(\sigma)$.
المتغيرات الخطية مثل قيم z_k عند العقد الزمنية أو معاملات تنظيمية تُحسَّن بالتكرار.
في هذه المرحلة نختار قيمة أولية للمتغيرات غير الخطية (مثلاً مواقع العقد الزمنية). ثم نحسب القيم المقابلة للمتغيرات الخطية (z_k) و التي تقلّل الخطأ.
- نستخدم خوارزمية تكرارية (Iteration) غير خطية مثل (Levenberg-Marquardt) لتحديث المتغيرات غير الخطية.
نكرر حتى يتقارب الحل.

6: بناء المصفوفة F(z) والمتجه v(z)

في تطبيق VARPRO ، نبني:
أولاً: المصفوفة F(z) و التي تتمثل بالصيغة في ادناه:

$$F_{ij}(z) = \begin{cases} -1 & i = 1 \dots m,\ j = 0 \\ G_j(z, t_i) & i = 1 \dots m,\ j = 1 \dots N \\ \sqrt{\nu} & i = m + j,\ j = 1 \dots N \\ 0 & \text{خلاف ذلك} \end{cases} \quad \text{-------- 41}$$

ثانيًا: المتجه v(z) و الذي يتمثل بالصيغة في ادناه :

$$v_i(z) = \begin{cases} -p_i & 1 \le i \le m \\ \sqrt{\nu}\, q_{i-m} & m < i \le m + N \\ -\sqrt{\lambda}\, (Dz)_{i-m-N} & i > m + N \end{cases} \quad \text{-------- 42}$$

إذ ان :
المصفوفة Matrix F(z):هي مصفوفة تحتوي على معاملات وزن تعتمد على الزمن و الجريان والتاريخ الزمني و تمثل العلاقة بين المتغيرات غير الخطية مثل مواقع العقد الزمنية أو شكل z(σ))واستجابة الضغط .تتغير عند كل تكرار لأنها تعتمد على القيم الحالية للمتغيرات غير الخطية .
المتجه Vector v(z): هو متجه يحتوي على البيانات المقاسة (مثل ضغوط الجريان أو الإغلاق) . قد يتضمن أيضًا قيودًا إضافية مثل تنظيم(Regularization) .
D : مصفوفة تنظيم (Regularization Matrix)
ν و λ : معاملات تنظيم للتحكم في استقرار الحل.
N : عدد نقاط بيانات الجريان.
m : عدد نقاط بيانات الضغط.

7: ايجاد z

ايجاد z بحل النظام الاتي باستخدام VARPRO:

$$\min_z \|F(z)a - v(z)\|^2$$

إذ ان :
a : المتجه vector الذي يحتوي على المتغيرات الخطية.
z : المتجه الذي يحتوي على المتغيرات غير الخطية.
نستخدم خوارزميات مثل Levenberg-Marquardt لتحديث z، بينما يتم حساب a داخليًا باستخدام الانحدار الخطي.

- لكل تحديث و تكرار في الخطوة 7 يتم فحص فيزيائية النتائج و ذلك لتجنب قيم dp_u/dt قيم غير واقعية ، عبر التأكد أن:

$$e^{z(t)} > 0 \quad \forall t \quad \text{-------- 43}$$

8: إيجاد $p_u(t)$

إيجاد $p_u(t)$ باستخدام التكامل:

$$p_u(t) = \int_0^t z(\sigma)\, d\sigma \quad \text{-------- 44}$$

عبر تحويل الزمن اللوغاريتمي إلى الزمن الطبيعي (اي استعادة الزمن الطبيعي t من σ) :

$$\sigma = \ln t \quad \Rightarrow \quad t = e^{\sigma} \quad \text{-------- 45}$$

لدينا قيم z(σ) في مقياس الزمن اللوغاريتمي فنحسب الزمن الطبيعي t لكل قيمة σ باستخدام:

$t = e^{\sigma}$ --------- 46

حساب $p_u(t)$ باستخدام التكامل العددي:

نستخدم مثلاً طريقة شبه المنحرف (Trapezoidal Rule) في حساب التكامل (اذ لم يذكر فون شروتر الطريقة) أو أي طريقة تكامل عددي أخرى لحساب:

$$p_u(t) = \int_0^t z(\sigma)\, d\sigma \quad \text{-------- 47}$$

ان صيغة تكامل شبه المنحرف تساوي:

$$\int_a^b z(\sigma)\, d\sigma \approx \frac{\Delta\sigma}{2}\left[z(\sigma_0) + 2\sum_{i=1}^{n-1} z(\sigma_i) + z(\sigma_n)\right] \quad \text{-------- 48}$$

إذ ان :

$$\Delta\sigma = \sigma_{i+1} - \sigma_i \quad \text{-------- 49}$$

$\sigma_0, \sigma_1, \ldots, \sigma_n$: النقاط الزمنية اللوغاريتمية.

في عمل فون شروتر لم يُذكر بشكل صريح كيفية حساب $p_u(t)$ ، لذا Çınar M. and Onur M. -2008 تبنا معادلة لبناء الاستجابة $p_u(t)$ في طريقة فون شروتر عن طريق جعل $q_m(t - e^t) = 1$ stb/day واستبدال $(p_o - p_m(t))$ بـ $p_u(t)$ في المعادلة رقم-27 فتصبح الصيغة الجديدة للتكامل كالاتي:

$$p_u(t) = \int_{-\infty}^{\ln t} e^{z(\tau)} d\tau. \quad \text{-------- 50}$$

بافتراض التمثيل الخطي القطعي piecewise linear لدالة z و وجود ميل الواحد لتخزين البئر wellbore storage عند/قبل العقدة الأولى (مدة تخزين البئر) ، يُمكننا حل التكامل و استنتاج الشكل المنفصل الاتي للمعادلة 50 اعلاه :

$$p_u(t_i) = e^{z_1} + \sum_{j=2}^{i} \frac{(e^{z_j} - e^{z_{j-1}})}{(z_j - z_{j-1})} \ln\left(\frac{t_j}{t_{j-1}}\right); \quad for \quad i = 1, 2, \ldots, L, \quad \text{-------- 51}$$

إذا تم استيفاء افتراض ميل الواحد لتخزين البئر عند/قبل العقدة الأولى، فيُمكن إظهار أن:

$$e^{z_1} = \frac{dp_u(t_1)}{d\ln t} = p_u(t_1) \quad \text{-------- 52}$$

على الرغم من عدم توافق هذه الفرضية مع فون شروتر بمعنى ان z هنا غير مستمر في العقدة الأولى بسبب افتراض خط ميل الواحد قبل/عند عقدة الشبكة الأولى(المدة الاولى). لذا تعاني حسابات e^z في العقد الأخرى في الأوقات المبكرة جدًا من التأثيرات اعلاه و تستمر تقريبًا لمدة دورة لوغاريتمية -One cycle .

z_j: قيمة $z(\sigma)$ عند العقد الزمنية t_j.

t_j : الزمن الطبيعي المقابل للعقد الزمنية اللوغاريتمية.

L : عدد العقد

التعريف الرياضي للعقدة (Node)

العقدة (Node) هي نقطة زمنية محددة(t_1 ، (t_2 .... يُعرَّف عندها قيمة $p_u(t)$ عدديًا.

العقدة الأولى :(t_1) تمثل أول زمن مهم في تحليل البيانات، إذ ان t_1 عادةً ما يكون أصغر زمن في البيانات المقاسة . تُستخدم $p_u(t_1)$ كنقطة بداية لحساب الاستجابة اللاحقة.

يكون تأثير التخزين (سعة البئر لتخزين السوائل) مُهيمنًا في الأزمنة المبكرة جدًا($t\to0$) على سلوك الضغط. العقدة الأولى (t_1) تمثل الزمن الذي يبدأ عنده فصل تأثير التخزين عن استجابة المكمن الحقيقية. قيمة$p_u(t_1)$ تعكس مقدار الضغط الناتج من وحدة إنتاج واحدة عند هذه اللحظة، بما في ذلك تأثير التخزين.

تُعتبر العقدة الأولى مهمة في ضبط الحل العددي ، فالعقدة الأولى تُستخدم كـ شرط حدي (Boundary Condition) لبدء التكرارات في الخوارزمية. إذا كانت t_1 صغيرة جدًا، ستُظهر$p_u(t_1)$ تأثير التخزين بوضوح. فيزيائيا ، و إذا كانت$p_u(t_1)$ مرتفعة، يشير ذلك إلى سعة تخزين كبيرة للبئر . ان اختيار t_1 كقيمة جداً كبيرة يؤدي إلى إهمال تأثير التخزين، مما يُعطي نتائج ليست بدقيقة.

ان طريقة فون شروتر تأخذ في الحسبان تأثير تخزين البئر عند بدايات الفحص، وتعتبره من العوامل الأساسية المؤثرة في سلوك الجريان عبر المراحل المبكرة. لتقييم تاثير تخزين البئر (Wellbore Storage) فلابد من تحديد طول مجال المدة الزمنية لهذا التأثير باستخدام العلاقة الاتية:

$$t_{wbs} \approx \frac{200,000 \cdot \mu \cdot C}{kh} \quad \text{-------- 53}$$

الخطوة الثالثة- تحليل أنماط الجريان Flow regimes:

يُعتبر تحليل أنماط الجريان من الامور المهمة والتي على اساسها يتحدد نظام المكمن و ذلك عبر رسم المشتق اللوغاريتمي p_u' مع الوقت على مخطط لوغاريتمي لتحديد سلوكيات الخط المستقيم الناتج. الجدول ادناه يُوضح سلوكيات بعض المكامن سواء اكانت متجانسة بجريان شعاعي لا متناهي او مكمن متشقق او مكمن مغلق محدود :

الميل	النمط	التفسير	القيمة النموذجية
0	تدفق شعاعي (Radial Flow)	مكمن متجانس	$k = \frac{162.6q\mu B}{h \cdot \mathrm{m}}$
1/2	تدفق خطي (Linear Flow)	وجود تشققات	$x_f = \sqrt{\frac{0.00105kt}{\phi\mu c_t}}$
1.0	استنزاف (PSS Flow)	حدود مغلقة	$V_p = \frac{qB}{c_t(dp_u/dt)}$

- حساب النفاذية للمكمن المتجانس :

يتم رسم p_u مع الوقت على **مخطط نصف لوغاريتمي** لتحديد الميل m ثم حساب k :

$$k = \frac{162.6 \cdot \mu \cdot B}{h \cdot m} \quad \text{-------- 54}$$

- حساب معامل القشرة s:

$$S = 1.151 \left[\frac{p_u(t = 1\mathrm{hr}) - p_i}{m} - \log\left(\frac{k}{\phi\mu c_t r_w^2} \right) + 3.23 \right] \quad \text{-------- 55}$$

حيث:

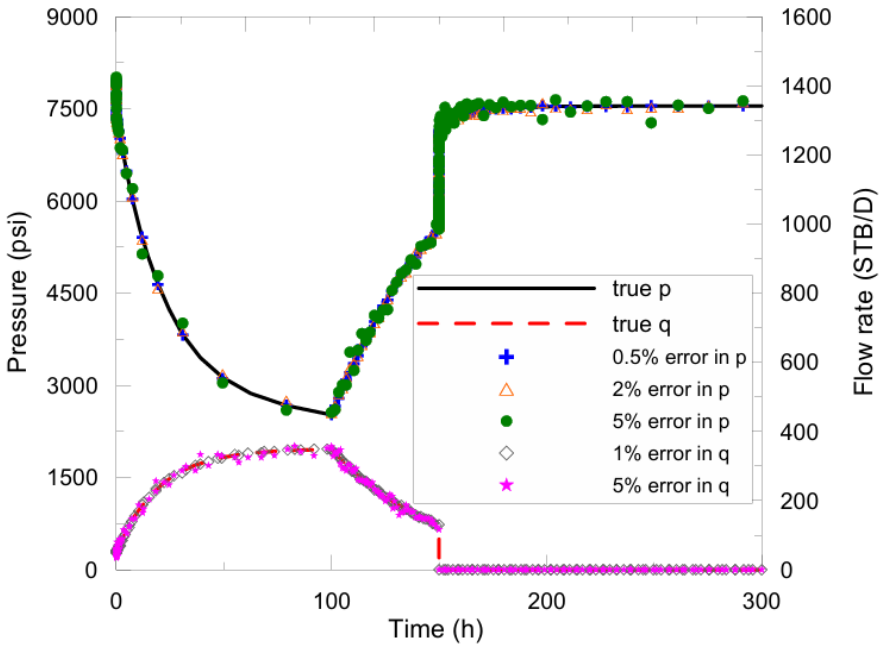
- $p_u(t = 1\mathrm{hr})$: قيمة p_u عند ساعة واحدة (من منحنى $p_u(t)$).
- p_i: الضغط الابتدائي للمكمن (psi).
- m: ميل الخط المستقيم في منطقة التدفق الشعاعي.
- ϕ: مسامية المكمن (كسر عشري).
- μ: لزوجة السائل (cp).
- c_t: الضاغطية الكلية (psi^{-1}).

ثانيا- دقة واستقرار فك الالتفاف -Deconvolution :

تُمكن طريقة فون شروتر من الحصول على فك التفاف مستقر حتى في حال وجود أخطاء نسبية (ما بين المقاس و المحسوب) تصل الى حد 10% في معدل الجريان و الى 1% في الضغط .

وقد اكد تلك الحدود ايضا سينار و زملائه Cinar et al. 2006 إذ توصلوا الى أن الدقة في مطابقة بيانات الضغط تتحسن بشكل كبير كلما انخفضت نسبة الخطأ إلى 0.5%، في حين أن الطريقة تتحمل أخطاء الجريان حتى 10% دون تأثير كبير على النتائج.

الشكل رقم-5-13 يُوضح تطابق نتائج الموديل المحسوبة باستخدام TLS مع بيانات الجريان المقاسة (المنحني باللون الاحمر المتقطع) و بيانات الضغط المقاسة (المنحني باللون الاسود) باستخدام محددات متعددة للخطأ Errors constraints ; تراوحت بين 1-5% لمطابقة الجريان والضغط . نلاحظ ان تطابق الضغط لنسبة خطا 5% و 2% غير جيدة بالاخص في الاوقات الاخيرة و عندما تكون نسبة الخطأ 0.5% يكون التطابق جيد و تام ، هذا ما يتماشى و صحة محددات فون شروتر للخطا في الضغط الى حد يصل 1%. و ان تطابق الجريان لفون شروتر كان مستوفي و تحتمل نسب الخطأ تصل الى حد 10% .



الشكل5-13: تطابق مقبول لنتائج الموديل (المحسوبة باستخدام TLS) مع بيانات الجريان المقاسة (المنحني باللون الاحمر المتقطع) و بيانات الضغط (المنحني باللون الاسود) باستخدام نسب او محددات constraints للخطأ الى حد 5% ،2006" "Cinar et. al

ثالثا- المزايا الرئيسة للطريقة

1- الاستقرار العددي عبر استخدام التحويل اللوغاريتمي للزمن ومعدل الإنتاج فسيقلل من حساسية الحل للضوضاء ويحسن استقراره.

2- كفاءة في التعامل مع البيانات الناقصة فيُمكنها معالجة فترات زمنية مفقودة في بيانات الضغط أو الإنتاج بفعالية.

3- نتائج ذات دقة عالية إذ تُنتج استجابة ضغط سلسة (Smooth) حتى مع بيانات إنتاج متغيرة بشدة.

4- سرعة في الحساب مقارنةً بطرق أخرى مثل طريقة Levitan (2005) و عادةً ما تكون أقل تكلفة حسابية بسبب طبيعتها الخطية بعد التحويل.

رابعا- مرونة التطبيق:

1- يُمكن استخدام طريقة فون شروتر لتحليل فحص تصاعد الضغط (Build-up) أو أي جزء من بيانات الفحص.

2- تمكّن من تمثيل كافة فترات فحوصات التصاعد المتعددة عبر التاريخ الانتاجي للبئر في منحني واحد لمشتقة الضغط.

3- - طريقة فك الالتفاف Deconvolution لفون شروتر ، يمنح المستخدم خيارًا للتعامل و ايجاد ليس فقط في ايجاد استجابة z على أنها مجهولة في Deconvolution ، ولكن أيضًا التعامل مع تاريخ معدل الجريان و/أو الضغط المكمني الأولي initial على أنه غير معروف.

4- الإنتاج المتغير:الطريقة مثالية في تحليل الآبار ذات ذات معدلات الإنتاج غير المنتظمة أو المتقطعة.

5- تحديد خصائص المكمن في استخراج النفاذية (Permeability) وعامل تخزين المكمن (Storativity) من بيانات ضغط قصيرة المدى.

6- الدمج مع البيانات التاريخية عبر تحليل بيانات ضغط قديمة مع حديثة لتحسين نمذجة المكمن.

7- التنبؤ بأداء البئر باستخدام استجابة الوحدة $p_u(t)$ للتنبؤ بالضغط المستقبلي تحت سيناريوهات إنتاج مختلفة.

خامسا- العيوب والتحديات

- الطريقة حساسة لتوقيت البيانات فلا بد من تزامن دقيق بين الضغط والجريان.

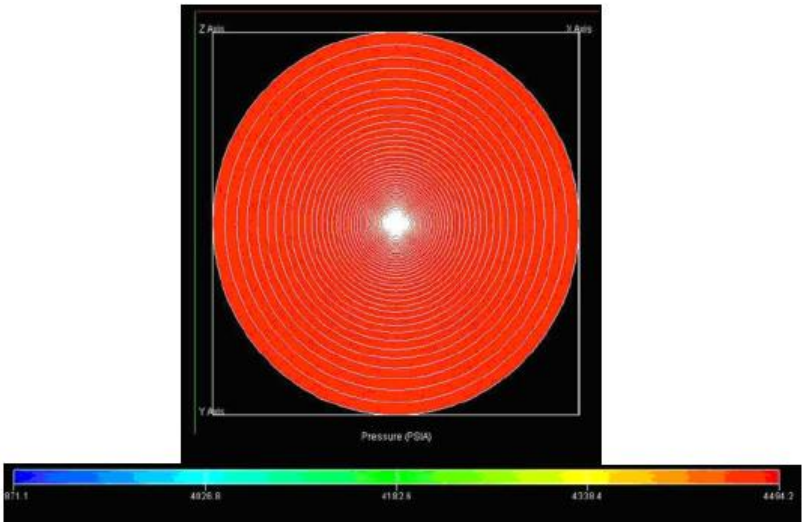
- تتطلب ضبط دقيق لـمعامل النعومة λ لتجنب الإفراط في التنعيم أو التشويش.

- عيب يُمكن الإشارة إليه حول طريقة Von Schroeter et al. هي افتراضهم فيما يتعلق بسلوك z قبل العقدة الأولى (المدة الاولى). يفترضون أن خط ميل الواحد لتخزين البئر Wellbore storage ساري المفعول لسلوك الاستجابة deconvolved z قبل/او في عقدة

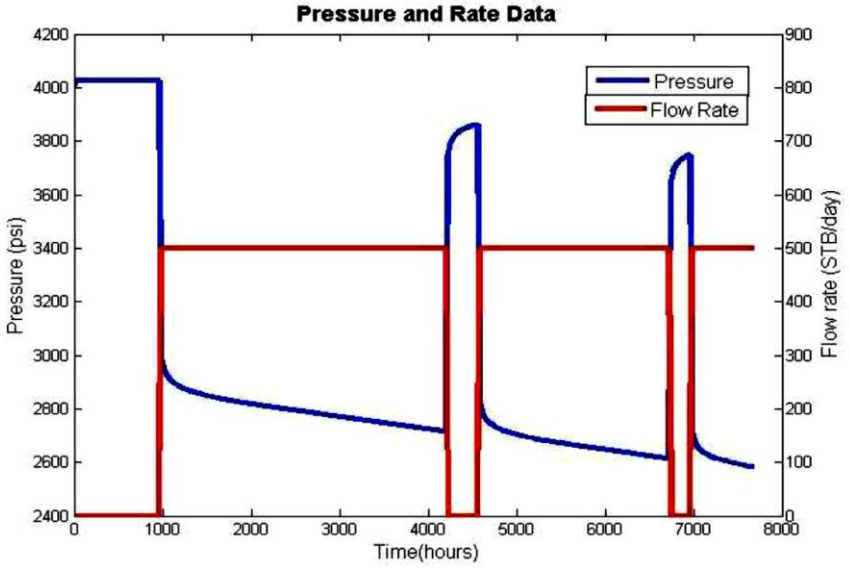
الشبكة الأولى. لكن في الواقع احيانا يتم فيها انتهاك هذا الافتراض إذ تكون الاستجابة deconvolved في الأوقات المبكرة مخطئة و لا تتوافق مع خط الميل الواحد.

ليفتن Levitan)) ، (2005 في طريقته إزال هذا القيد .

- صعوبة التطبيق في المكامن متعددة الطبقات حيث تحتاج إلى تعديلات لإدراج تأثيرات الطبقات المتعددة أو التغيرات الجيولوجية الحادة.



الشكل5-14 : الموديل المكمني باستخدام برنامج المحاكاة simulation للمثال رقم-2



الشكل5-15 :التاريخ الانتاجي للبئر في المثال رقم-2 يتضمن ثلاث فترات لهبوط الضغطو فترتين لتصاعد الضغط

مثال 2: تفسير فحص بئر باستخدام فك الالتفاف والمحاكاة والطريقة التقليدية Fei Wang (2010)

يمثل الشكل (5-14) نموذجًا مكمنيًا لبئر عمودي يخترق الطبقة المكمنية بالكامل، إذ جرى إعداد النموذج باستخدام برنامج للمحاكاة المكمنية. يتميز المكمن بكونه متجانسًا ومحدودًا بحدود مغلقة (Closed Boundary)يتضمن الجدول (5-4) المعطيات الأساسية الخاصة بالنموذج.

تُعرض بيانات الإنتاج والضغط في الشكل (5-15)، والتي تمثل تاريخ البئر الإنتاجي على مدى أكثر من 6000 ساعة. تشمل البيانات ثلاث فترات إنتاج (هبوط الضغط Drawdown) بمعدل جريان ثابت قدره 500 stb/day (باللون الأحمر)، زائدا فترتين لتصاعد الضغط (Build-up) موضحة باللون الأزرق.

أهداف التفسير والتحليل المطلوب:

- تطبيق تقنية فك الالتفاف (Deconvolution) لتفسير كامل بيانات تاريخ البئر.
- مقارنة النتائج مع نموذج المحاكاة المكمنية (Simulation)
- إجراء تحليل تقليدي لحالة هبوط الضغط عند جريان ثابت (Conventional Drawdown Analysis) باستخدام أطول مدة إنتاجية (المدة الأولى: 3240 ساعة) .

خطوات الحل والتحليل:

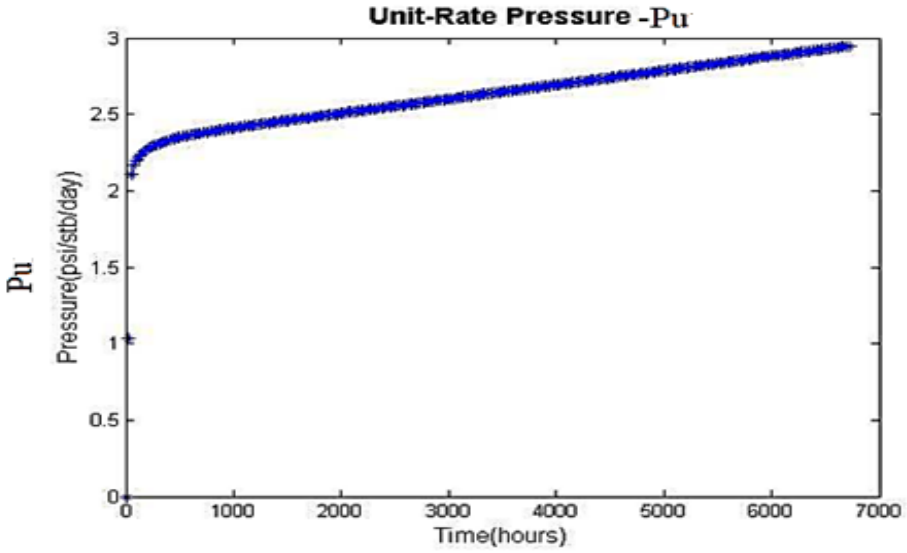
نظرًا لتعقيد الحسابات في طريقة فك الالتفاف، تم تنفيذ التفسير بطريقتي فك الالتفاف Deconvolution، والمحاكاة المكمنية باستخدام برمجيات متخصصة باستخدام كامل بيانات التاريخ الإنتاجي. كما أُجري تفسير باستخدام مشتقة الضغط لفترة هبوط الضغط الأولى (3240 ساعة).

Initial reservoir pressure, p_i	= 4500 psia
Porosity, ϕ	= 0.3
Permeability, k	= 50 mD
Thickness, h	= 20 ft
Oil formation volume factor, B_o	= 1.22rb/STB
Viscosity, μ	= 0.9 cp
Total compressibility, c_t	=1.02e-5 1/psia
Well radius, r_w	= 0.3 ft
Reservoir radius, R	= 4000 ft

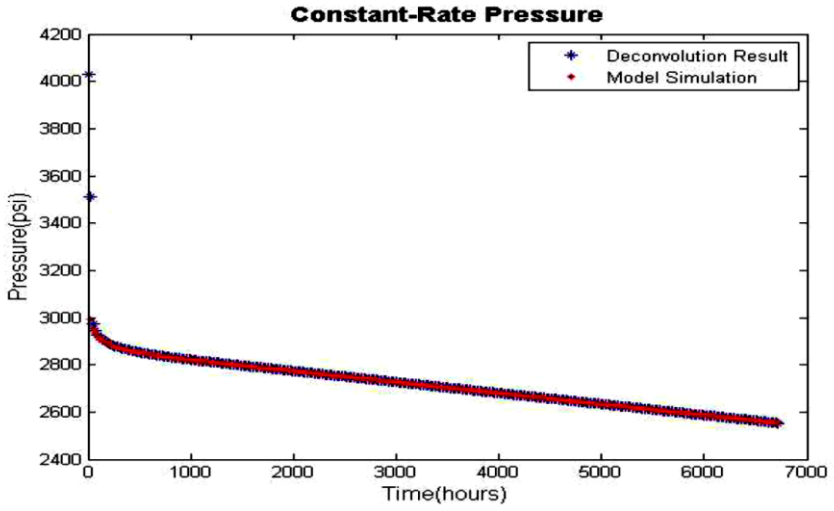
الجدول5-4:بيانات المثال رقم-2

تحليل نتائج فك الالتفاف والمقارنة:

- الشكل5-16 يعرض دالة الضغط لوحدة الإنتاج $p_u(t)$ أو ما يُعرف بدالة الاستجابة المكمنية على إحداثيات خطية (Cartesian) . هذه الدالة تُمكن من حساب استجابة الضغط في الفترات المختلفة.



الشكل5-16 : نتائج فك الالتفاف Deconvolution - المثال رقم-2

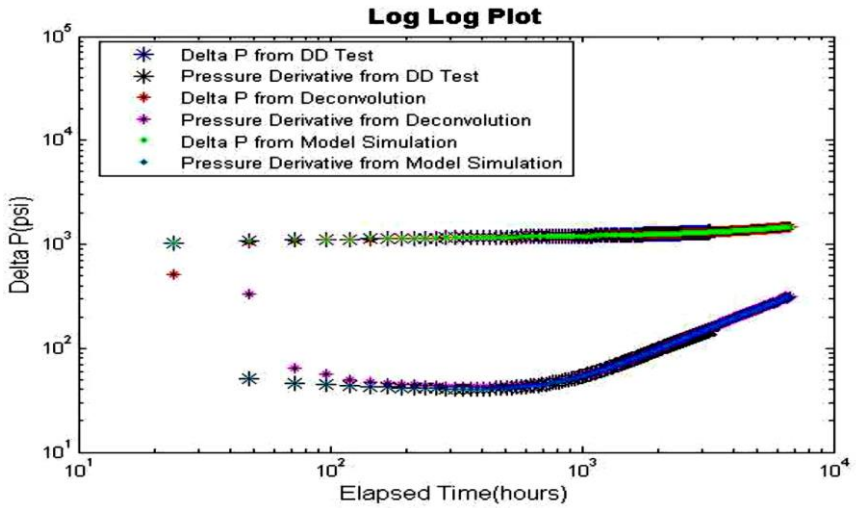


الشكل5-17 : مقارنة استجابة الضغط من فك الالتفاف و الموديل المكمني

- الشكل5-17 يُظهر مقارنة بين الضغط المحسوب من فك الالتفاف و نتائج موديل المحاكاة . نلاحظ تطابق جيد يؤكد دقة نتائج فك الالتفاف.

الشكل (5-18) يعرض استجابة الضغط ومشتقته مع الزمن باستخدام إحداثيات لوغاريتمية . ويُظهر مقارنة نتائج ثلاث طرق:

نتائج فك الالتفاف (Deconvolution) ، نتائج المحاكاة المكمنية (Simulation) و التحليل التقليدي لهبوط الضغط (Drawdown) .



الشكل5-18 : رسم لعلاقة الضغط و مشتقة الضغط مع الوقت باحداثيات لوغاريتمية بطريقة فك الالتفاف Deconvolution و مقارنتها مع نتائج طريقة المحاكاة Simulation و طريقة هبوط الضغط (DD)

أظهرت النتائج توافقًا جيدًا بين الطرق الثلاث، مما يدعم مصداقية دالة الضغط المستخرجة من فك الالتفاف. نلاحظ هنالك امتداد لمدة التفسير في فك الالتفاف سمح بالتقاط سلوك المكمن في الفترات المتأخرة، هذا يساعد في تشخيص حدود المكمن بدقة.

من الرسم نلاحظ ايضا :

- غياب تأثير خزن البئر.(Wellbore Storage)
- ظهور منطقتين لطورين مميزين الشكل (5-18) :

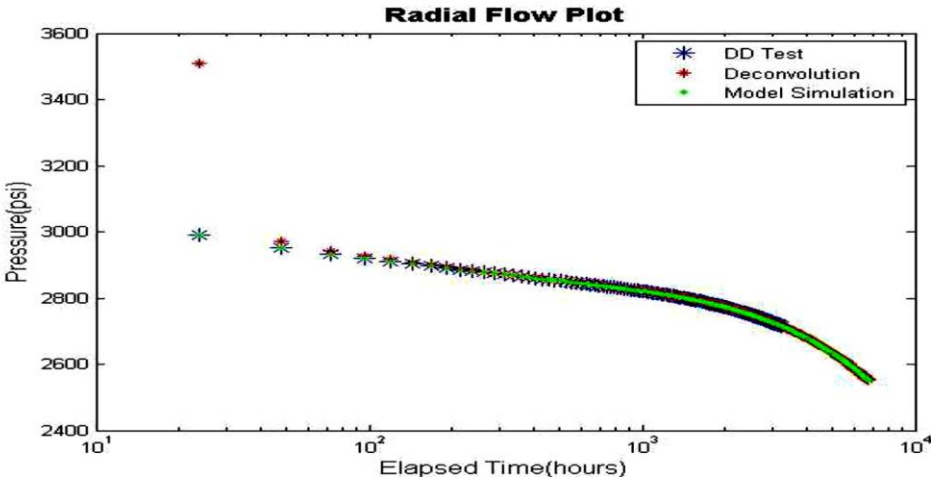
- طور جريان شعاعي غير مستقر(Unsteady-State Radial Flow - USS) -الخط الافقي.

- جريان شبه مستقر(Pseudo-Steady State - PSS) -الخط المائل في المدة المتاخرة من الفحص.

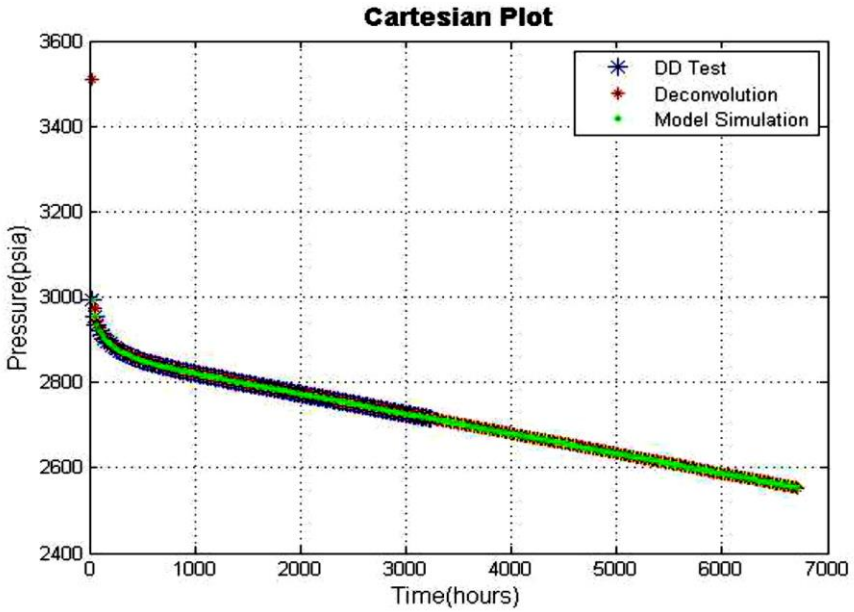
تُستخدم هذه المراحل لتقدير الخصائص المكمنية مثل النفاذية ومعامل القشرة ، حجم المكمن و غيرها.

التحليل نصف لوغاريتمي و التحليل الكارتيزي:

- **الشكل (5-19) : يُوضح** منحنى نصف لوغاريتمي للضغط مقابل الزمن للحالات الثلاث، ويُستخدم لتحليل مدة الجريان الشعاعي بافتراض علاقة الخط المستقيم وفق طريقة MDH لتحديد النفاذية من الميل.
- **الشكل (5-20) :** إعادة رسم البيانات بإحداثيات عادية Cartesian لتحديد بداية الجريان شبه المستقر PSS واستخدام ميل الخط المستقيم في حساب نصف قطر التصريف وحجم المخزون النفطي .



الشكل5-19 : رسم لعلاقة الضغط مع الوقت باحداثيات نصف لوغاريتمية بطريقة فك الالتفاف و مقارنتها مع نتائج طريقة المحاكاة و الطريقة التقليدية



الشكل5-20 : رسم لعلاقة الضغط مع الوقت باحداثيات عادية cartesian بطريقة فك الالتفاف و مقارنتها مع نتائج طريقة المحاكاة و الطريقة التقليدية

النتائج الكمية:

تم تلخيص نتائج التحليل في **الجدول (5-5)** ، إذ تم مقارنة القيم المستخرجة باستخدام:

الطريقة التقليدية لـ (Drawdown-DD)، فك الالتفاف (Deconvolution) و المحاكاة المكمنية.(Simulation) .كما تم احتساب نسبة الخطأ في نتائج فك الالتفاف مقارنةً بالمحاكاة المكمنية و كانت النتائج جيدة .

	DD Test	Deconvolution	Calculation	Relative Error
k(md)	47.6338	46.2274	47.6338	3.0136%
S	5.5288	5.1049	5.5288	7.6671%
A(acre)	1144.0005	1146.3837	1147.8431	1.2714%
R (ft)	3982.7415	3986.8877	3989.4248	0.6359%
OOIP (STB)	4.3650e7	4.3741e7	4.3797e7	0.1279%

الجدول5-5 : مقارنة نتائج تفسير الفحص بالطرق الثلاث -التفسير Draw Down-DD، فك الالتفاف Deconvolution و نتائج المحاكاة المكمنية Simulation -المثال رقم-2

5-7-2-2-2 - طريقة ليفتن (Levitan 2005) في فك الالتفاف Deconvolution

طريقة ليفتن (2005) Levitan هي إحدى الطرق العددية المتقدمة لحل مشكلة Deconvolution في تحليل بيانات ضغط الآبار(Well Test Analysis) ذات الجريان المتعدد Multirate، تهدف الطريقة إلى استخلاص استجابة الضغط لوحدة الإنتاج (Unit Pressure Response)من بيانات الضغط و الجريان المتغيرة مع الزمن، حتى في وجود ضجيج (Noise) أو بيانات غير كاملة.

اولا- التطبيقات العملية

1- مثالية في تحليل الآبار ذات معدلات الإنتاج المتغيرة غير المنتظمة أو المتقطعة (Intermittent Flow) .

2- تحديد خصائص المكمن مثل استخراج النفاذية (Permeability) وعامل تخزين المكمن (Storativity) من بيانات ضغط قصيرة المدى.

3- الدمج مع البيانات التاريخية:تحليل بيانات ضغط قديمة مع حديثة لتحسين نمذجة المكمن.

4- التنبؤ بأدائية البئر باستخدام استجابة الوحدة $p_u(t)$ تحت سيناريوهات إنتاج مختلفة.

ثانيا- خوارزمية ليفتن (Levitan)، (2005)

تعتمد طريقة ليفتن (Levitan) ، (2005 على نفس المفاهيم التي اقترحها فون شروتر وآخرون. ومع ذلك، تختلف في ناحيتين.

أولاً، يستخدم ليفتن معادلة فك الالتفاف التي تزيل قيد فرضية فون شروتر Von Schroeter ، 2004 بأن خط ميل الواحد لتخزين البئر Wellbore Storage - WBS صالح قبل العقدة الأولى 1st node اي قبل t_1 عبر الوقت المبكر من الفحص. فتصبح معادلة فك الالتفاف في طريقة ليفتن بالصيغة الاتية:

$$p_m(t) = p_i - q_m(t)p_u(t_1) - \int_{\tau_1}^{\ln t} q_m(t-e^{\tau})\, e^{2(\tau)}\, d\tau \quad \text{----- 56}$$

الازالة هذه قد تسمح حتى بأن تكون قيمة الضغط سالبة.

المصطلحات في اعلاه تعني ما ياتي:

$p_u(t_1)$ تمثل دالة الضغط لوحدة الانتاج (Unit Pressure Response)عند المدة (العقدة الاولى 1st node) الاولى و متضمنة تاثير تخزبن البئر.

$p_m(t)$: الضغط المقاس (Measured Pressure) عند الزمن t .

p_i : ضغط المكمن الابتدائي(Initial Reservoir Pressure) .

$q_m(t)$: معدل الإنتاج المقاس (Measured Rate) عند الزمن t .

τ (تاو) متغير تكامل (تحويل لوغاريتمي للزمن $\tau=\ln$).

$e^{2\tau}$ عامل تصحيح ناتج عن التحويل اللوغاريتمي.

ثانيًا، يستخدم ليفتن دالة هدف Objective Function للمربعات الصغرى الموزونة غير خطية (Unconstrained Nonlinear Weighted Least Squares) غير مقيدة . تتضمن ثلاث حدود أساسية :

$$E(p_i, p_u(t_1), \mathbf{z}, \mathbf{y}) = \frac{1}{2}\left\| \frac{p_i\, \mathbf{e} - \mathbf{p_m} - p_u(t_1)\tilde{\mathbf{y}} - \mathcal{C}(z)\mathbf{y}}{\varsigma_p} \right\|_2^2 + \frac{1}{2}\left\| \frac{\mathbf{y} - \mathbf{q_m}}{\varsigma_q} \right\|_2^2 + \frac{1}{2}\left\| \frac{\mathbf{D}\mathbf{z}}{\varsigma_c} \right\|_2^2 \quad \text{---- 57}$$

كل حد في دالة الهدف يعكس جزئية من الحل كما يأتي:

الحد الأول: يمثل حل عدم تطابق الضغط المحسوب مع الضغط المقاس بعد تصحيح الضغط الابتدائي وتأثير الجريان الابتدائي.

الحد الثاني : يعكس حل عدم تطابق معدل الجريان y من الموديل والمقاس q_m (القيود الواقعية على الجريان).

الحد الثالث: يمثل الانحناء curvature لتنعيم/تنظيم الحل و منع التذبذب في المشتقة z (Regularization via second derivative) .

ان الرموز تعني:

$E(p_i، p_u(t_1)، y)، z$: دالة الهدف (Objective Function) المراد حلها بطريقة التصغير (minimization) باستخدام طريقة TLS. المعاملات في داخل القوس $p_i، p_u(t_1)$ ، z ، y هي مجهولة Unknowns المطلوب ايجادها. ان حساب pi اختياري و ليس ملزم فاذا كان معروف مسبقا فلا يحتاج الى تضمينه في دالة الهدف.

هنا ليفتن اضاف مجهولا مستقلا رابعا في دالة الهدف و هو $p_u(t_1)$. إذ يتعامل مع $p_u(t_1)$ (العقدة الاولى قي الفترة المبكرة من الفحص لتتضمن تاثير تخزين البئر) كمتغير داخلي يُحسب تلقائيًا ضمن خوارزمية التحسين ، مما يجعل طريقته أكثر مرونة لكنها أكثر تعقيدًا عددياً. في حين فون شروتر لا يعتبر $p_u(t_1)$ مجهولا وانما يعتمد تحديده مباشرة من البيانات فيقلل عدد المتغيرات في النموذج. يستخدم ليفتن دالة موضوعية مرجحة غير مقيدة وغير خطية للمربعات الصغرى تتضمن مجموع ثلاثة مصطلحات عدم تطابق للضغط ومعدل الجريان .المصطلحات و الرموز تعني:

$\tilde{y}$: مجموع مركبات الجريان أو التكامل العددي لـ y، وهو scalar يعبر عن التأثير الكلي للجريان.

y : متجه الجريان التقديري (Estimated flow rate vector)، ويُعتبر متغيرًا مجهولًا لتحسين الدقة عند وجود ضوضاء.

C(z): مصفوفة الالتفاف (Convolution matrix) التي تمثل العلاقة بين z و y . تُحدد كيف يؤثر $z(\tau)$ على الضغط خلال الجريان.

D : مصفوفة الفرق المركزي من المرتبة الثانية (Second-order difference matrix)، وتستخدم لحساب تقوس أو نعومة z .

e : متجه واحدات (Vector of ones) بطول مساوي لـطول المتجه p_m، و ضربه بـ pi لإنشاء متجه الضغط الابتدائي.

ς_p : معامل الوزن للضغط (Weight for pressure misfit) و يمثل عدم اليقين أو الضوضاء في قياسات الضغط.

ς_q : معامل الوزن للجريان (Weight for flow rate misfit) و يمثل عدم اليقين في معدلات الجريان.

ς_c: معامل التنعيم (Weight for smoothness regularization) يحدد مدى "نعومة" أو انتظام z .

ثالثا- حل دالة الهدف:

استخدم ليفتن طريقة المربعات الصغرى الموزونة غير الخطية (Nonlinear Unconstrained Optimization) لحل دالة هدف و ذلك لايجاد دالة الاستجابة $p_u(t)$ من الدالة $z(\sigma)$ (المعادلة رقم- 56) وباقي المتغيرات المرتبطة بالضغط والجريان و التقعر.

ليفتن اعتبر الدالة $p_u(t_1)$ مجهولة unknown و يتم تحديدها مع المتغيرات الثلاثة اعلاه من خلال خوارزمية التصغير Minimum . لا نتطرق الى تفاصيل خطوات الحل فخطوات الحل مقاربة الى حل فون شروتر الا فيما ذكرنا من الاختلاف فيما بينهما و للتفصيل ممكن مراجعة المصدر Levitan،2005 .

لتجنب الغموض في طريقة Levitan عند حساب $p_u(t)$ ، اقترح Çınar M. and Onur M. 2006 طريقة واضحة ومحددة لحساب $pu(t)$ من قيم zj ، بشرط أن تكون zj تمثل دالة خطية قطعة بقطعة (Piecewise Linear Function) .

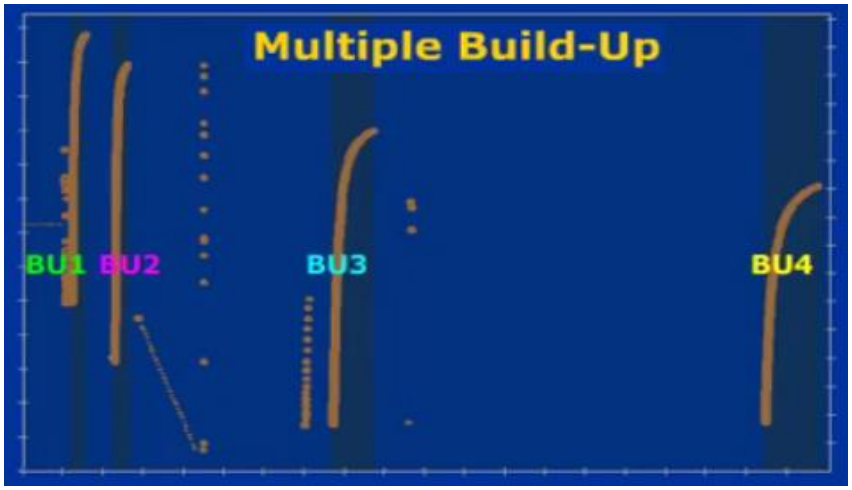
المعادلة المقترحة : بافتراض التمثيل الخطي القطعي piecewise linear لدالة z، يُمكننا استنتاج الشكل المتقطع الاتي لحساب الدالة $p_u(t)$ (الحل النهائي)من المعادلة. 56:

$$p_u(t_i) = p_u(t_1) + \sum_{j=2}^{i} \frac{(e^{zj} - e^{zj-1})}{(z_j - z_{j-1})} \ln\left(\frac{t_j}{t_{j-1}}\right); \quad for \quad i = 1, 2, \ldots, L. \text{ -------- } 58$$

رابعا - تطبيق طريقة ليفتن Levitan في فحوصات الآبار:

على الرغم من أن خوارزميات فك الالتفاف يُمكن استخدامها نظريًا في كل من فترات الجريان لهبوط الضغط (Drawdown) وفترات الإغلاق لتصاعد الضغط (Buildup) ، إلا أن التجربة العملية أظهرت أن هذه الطريقة تحقق موثوقية أفضل عند استخدام فترات إغلاق لتصاعد الضغط المتتالية (Buildup Periods) الشكل5-21. إذ عادةً ما تكون فحوصات هبوط الضغط أكثر عرضة للتذبذ وتحتوي على ضوضاء أكبر . بالإضافة إلى ذلك، قد تتضمن معدلات الجريان تقلبات صغيرة عبر مدة الجريان لا يُمكن قياسها بدقة كافية.

برغم من ان سلوك منحنيات تصاعد الضغط بطريقة ليفتن أظهرت تطابق في الوقت المتأخر من الفحص الا انها قد تُظهر عدم تطابق في الوقت المبكر بسبب تغييرات تخزين فتحة البئر (Wellbore Storage) أو معامل القشرة (Skin Factor) .



الشكل5-21 :عبر التاريخ الانتاجي للبئر فهنالك عدة فحوصات متتالية لتصاعد الضغط build-up

خامسا- معالجة كل مدة فحص لتصاعد الضغط بشكل منفصل:

ليفتن Levitan تعامل مع كل فحص لتصاعد الضغط بشكل مستقل، بحيث يحصل لكل فحص على منحني واحد لمشتقة الضغط محسوبة بطريقة فك الالتفاف . الهدف الأساسي كان تحديد التناقضات في البيانات الحقيقية، فلو كانت المنحنيات متطابقة (الأوقات المتأخرة)، فإن معدلات الجريان مستقرة ومتوافقة. أما إذا لم تكن متطابقة، فإن هناك مشكلة في البيانات أو في النظام.

سادسا- التعامل مع البيانات المشوهة:

قبل اجراء فك الالتفاف يتم تشخيص البيانات المشوهة و الناتجة بسبب الظواهر غير الخطية Nonlinear phenomena (مثل وجود طورين بسبب ظاهرة انفصال الموائع Phase segregation) ثم بعد ذلك الاجراء يكون اما بتجاهلها او إزالتها .

سابعا- أهمية استخدام جميع بيانات تاريخ الجريان:

أشاروا ليفتن وآخرون (2006) إلى أهمية استخدام جميع بيانات تاريخ الجريان من دون قطع (Flow History) في عملية التفسير بفك الالتفاف. هذا لأن معادلة فك الالتفاف تعتمد على استجابة الضغط التي تكون متجانسة ومتوافقة مع معدلات الجريان منذ بداية الجريان. أي قطع في البيانات يؤدي إلى مشكلات في التفسير.

ثامنا- مزايا وعيوب قياس معدلات الجريان:

من الضروري مزامنة بيانات الجريان مع بيانات الضغط بعناية أكبر عند إجراء التفسير بطريقة فك الالتفاف Deconvolution إذ أن التباين الطفيف في التزامن يُمكن أن يشوه شكل استجابة الضغط عبر مدة الفحص بأكملها.

قياس الجريان في باطن البئر: حالياً، بعض فحوصات الآبار تستخدم تقنيات حديثة لقياس معدلات الجريان مباشرة في باطن البئر، مما يتيح مزامنة دقيقة بين بيانات الضغط والجريان .

قياس الجريان على السطح:ان معظم القياسات تتم على السطح، وهناك عدة عيوب رئيسة من جراء تلك القياسات منها:

- اختلاف الجريان بين مستوى (عمق) مقياس الضغط ورأس البئر .

- هناك حجم كبير لحفرة البئر بين مقياس الضغط في قاع البئر ورأس البئر، مما يؤثر على دقة القياس.

- عدم توافق الزمني بين الضغط المقاس عند قاع البئر والجريان المقاس عند السطح.

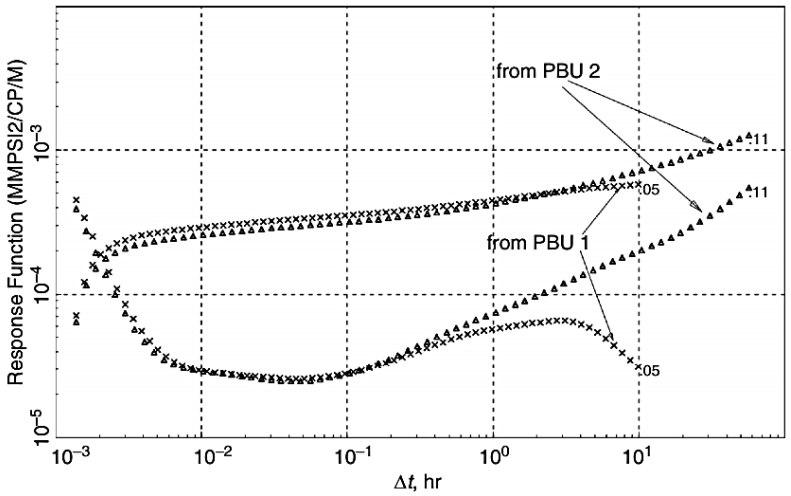
تاسعا- حساسية فك الالتفاف لقيمة الضغط المكمني الابتدائي - P i :

أظهر ليفتن Levitan أن منحنيات فك الالتفاف حساسة للغاية لقيمة الضغط المكمني الابتدائي . (Pi)حتى ان تغييرات طفيفة في Pi مثل 6 psi يُمكن أن تؤدي إلى اختلافات كبيرة في منحنيات مشتقة الضغط.

مثال توضيحي لتأثير *Pi* على نتائج فك الالتفاف لفحصي تصاعد الضغط PBU2، PBU1.

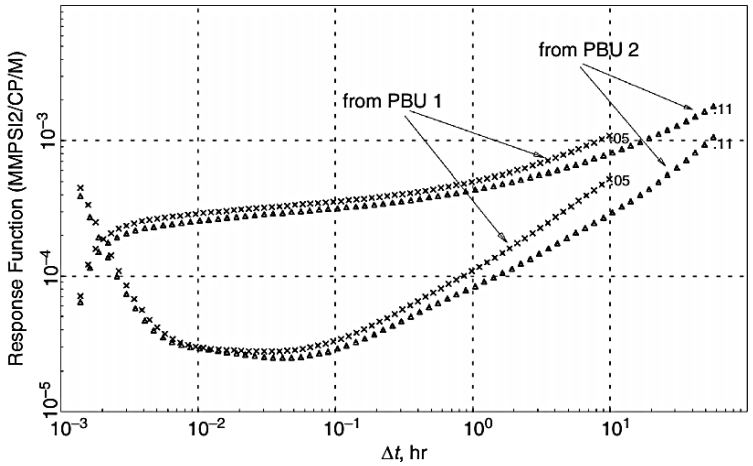
فلو كانت القيمة الحقيقية pi=6314 psi .

- فعند فرض *Pi*=6310 psi ، لا يظهر تطابق بين المنحنيين و ان المنحىPBU1 يبدو تناقصي في المدة المتاخرة من الفحص (الشكل 5-22).

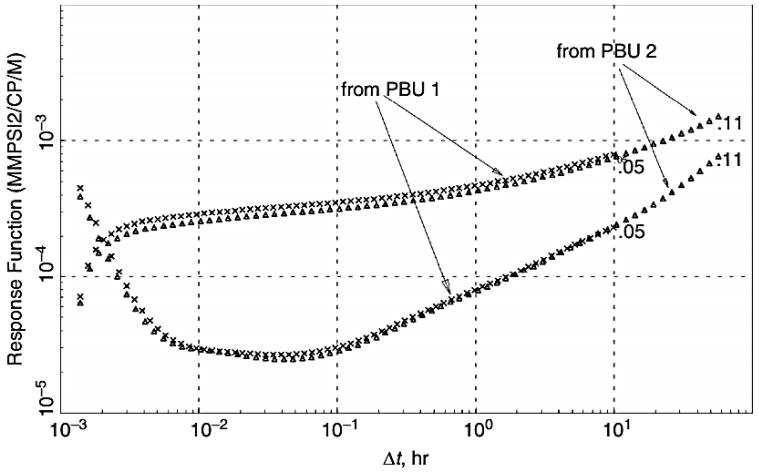


الشكل5-22 : استجابة الضغط من فك الالتفاف Deconvolution لفترتي تصاعد الضغط build-up ، بفرض ان الضغط الابتدائي للمكمن pi=6310 psi

- عند فرض Pi=6320 psi ايضا لا يظهر تطابق بين المنحنيين و ان المنحى PBU1 يبدو يتزايد في المدة المتاخرة من الفحص (الشكل 5-23).
- عند فرض Pi=6314 psi فالمنحنيان متطابقان مما يُظهر السلوك الحقيقي للبيانات (الشكل 5-24).



الشكل5-23 : استجابة الضغط من فك الالتفاف Deconvolution لفترتي تصاعد الضغط build-up ، بفرض ان الضغط الابتدائي للمكمن pi=6320 psi



الشكل5-24 : استجابة الضغط من فك الالتفاف Deconvolution لفترتي تصاعد الضغط build-up ، بفرض ان الضغط الابتدائي للمكمن pi=6314 psi

للحد من تأثير عدم الدقة في *Pi*، يُوصى باستخدام نتائج فحص تصاعد الضغط Build-up و الذي تم تنفيذه مبكراً خلال عمر البئر ، إذ يكون الضغط في ذلك الوقت قريبًا من القيمة الحقيقية للضغط المكمني الابتدائي.

ممكن مراجعة المصدر "2006، Onur and Cinar لغرض معرفة تفاصيل المقارنة في مزايا و قيود خوارزمية كلا من فون شروتر و ليفتن .

عاشرا -مزايا طريقة ليفتن

1- مرونة عالية مع البيانات غير منتظمة زمنياً.

2- تعامل دقيق مع التشويش (noise) باستخدام التنعيم Smoothing والتنظيم Regularization.

3- مناسبة لتحليل الفحوصات المعقدة مثل ، فحوص الحقن طويلة الأمد و البيانات المشوشة .

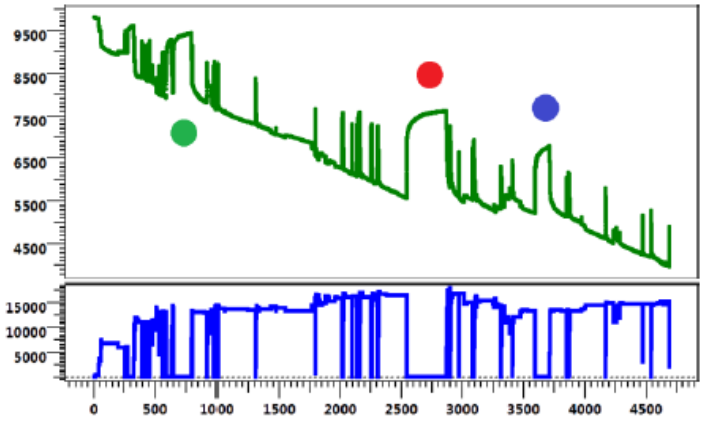
احد عشر -العيوب والتحديات في طريقة ليفتن

1- الحساسية للأوزان (ςp ،ςq ،ςc) : ان اختيار قيم التقييس (Scaling Factors) قد يحتاج ضبطًا يدويًا أو تحسينًا متكررًا.

2- التكلفة الحسابية:الحل يتطلب تكرارات (Iterations) خاصة عند استخدام نماذج غير خطية.

3- اعتماد النتائج على الافتراضات الأولية لقيم pi أو $p_u(t)$ قد تؤثر على دقة الحل النهائي.

4- صعوبة التطبيق في الحقول ذات التاريخ المعقد:مثل الآبار ذات معدلات الإنتاج المتغيرة بشدة أو المكامن متعددة الطبقات.

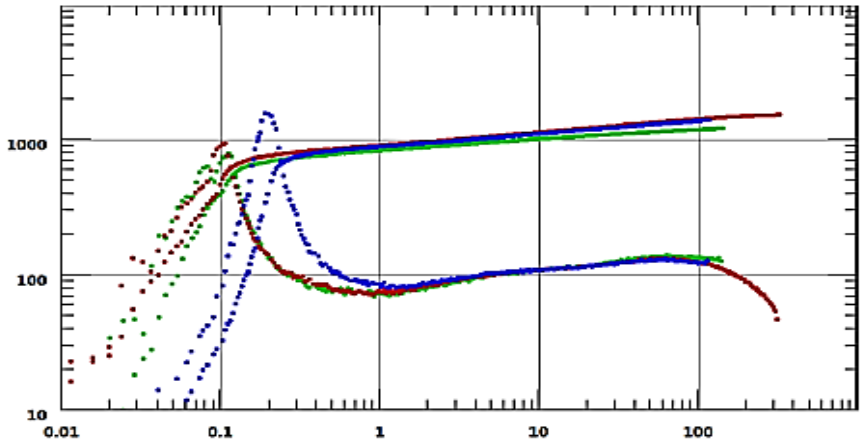


الشكل5-25 : بيانات الضغط و الانتاج المقاسة للمثال رقم-3

مثال-3 Olivier[2](2011)

الشكل5-25 يُوضح التاريخ الانتاجي لاحد الابار النفطية تضمنت بيانات الضغط و الانتاج المقاسة لمدة زمنية اكثر من t=4500 hrs. نلاحظ هنالك فترات فتح البئر للجريان و فترات اخرى لغلق البئر لاجل تصاعد الضغط Build-up . تم اختيار اطول ثلاث فترات غلق لتصاعد الضغط build-up تمثلت بالدوائر ذات اللون الاخضر، الاحمر والازرق و ذلك لاجراء التفسير بالطريقة التقليدية و بطريقة فك الالتفاف Deconvolution. ان اعلى مدة غلق كانت عند تصاعد الضغط باللون الاحمر والتي استغرقت بحدود 300 hrs.

الشكل5-26 يُوضح رسم بيانات مشتقة الضغط و فرق الضغط للفحوصات الثلاثة على مرتسم بياني لوغاريتمي باستخدام الطريقة التقليدية العادية. بحسب الشكل ، فهنالك توافق ما بين الفحصين الاحمر و الاخضر و انحراف الفحص الازرق عنهما في الوقت المبكرمن الفحص ثم يتطابق معهما في الوقت المتاخر. يبدو ان الانحراف سببه تاثير عاملي القشرة s و تخزين البئر WBS.

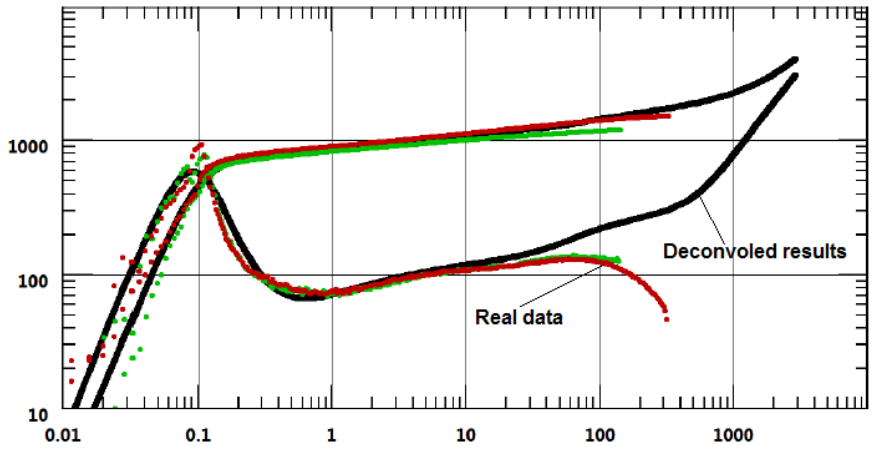


الشكل5-26 : رسم بيانات مشتقة الضغط و فرق الضغط للفحوصات الثلاثة على مرتسم بياني لوغاريتمي باستخدام الطريقة التقليدية ، المثال رقم-3

تطبيق طريقة فون شروتر Von Schroeter et al. method :

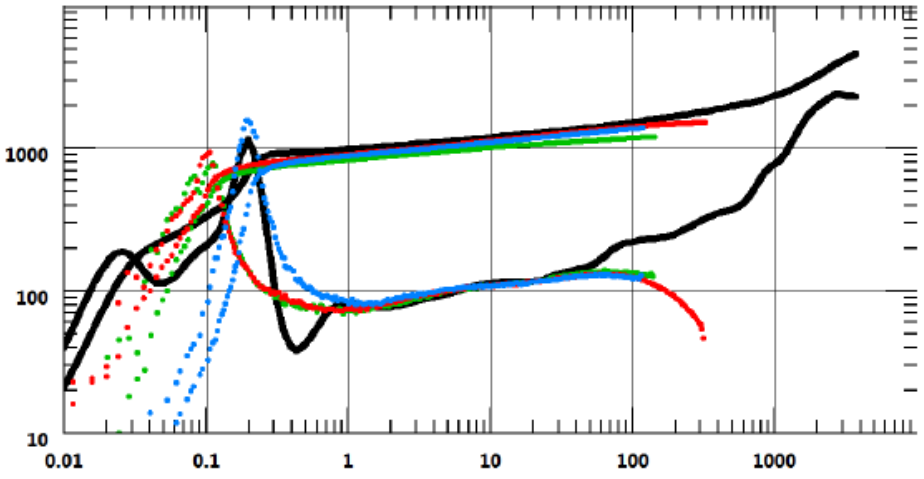
تم اختيار بيانات فحصي تصاعد الضغط المنحنيين باللون الاحمر والاخضر (الشكل5-26) لاجراء التفسير بطريقتي فون شروتر و الطريقة التقليدية. نتائج التفسير موضحة في الشكل5-27 . بناءأ على البيانات الحقيقية (المُنحني الاحمر و الاخضر) وباستعمال الطريقة التقليدية ، فان نهاية منحني مشتقة الضغط يتجه نحو الاسفل في اشارة لوجود دعم للضغط المكمني من جراء مثلا قوة دفع المستودع المائي Aquifer. لكن هذا لا يتوافق مع المعلومات الحقلية المتوفرة و التاريخ الانتاجي للبئر والتي تعتبر المكمن من النوع المغلق و الضغط في هبوط مستمر كما في الشكل5-25.

اظهرت نتائج التفسير فك الالتفاف Deconvolution بطريقة فون شروتر - المنحني الاسود ان المدة المتاخرة من الفحص اعطت علاقة خط مستقيم بميل الواحد اشارة الى ان الموديل المكمني من النوع المغلق المحدود Bounded reservoir و هو مقبول و واقعي. كما و تمتد نتائج طريقة فك الالتفاف لمدة ثلاث الاف ساعة تاريخ انتاجي في حين ان مدة فحص تصاعد الضغط الحقيقية (التقليدية) لم تتجاوز ثلاثمائة ساعة.



الشكل5-27 : طريقة فك الالتفاف لفحصي تصاعد الضغط Build-up -المثال رقم-3

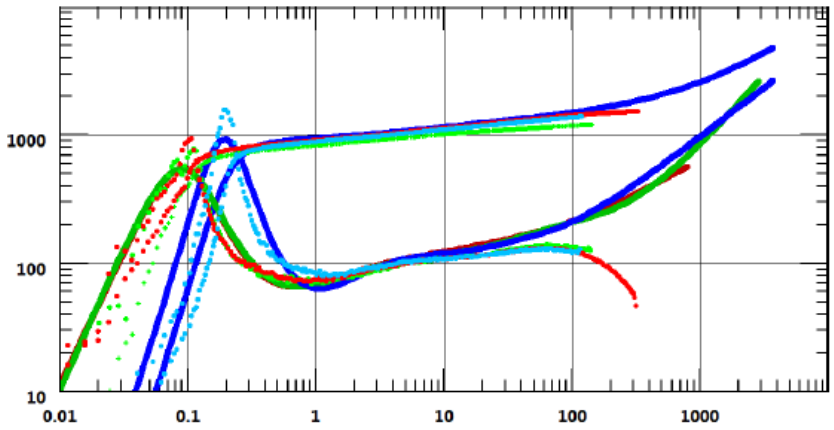
الان لو اخذنا بنظر الاعتبار تفسير الفحوصات الثلاثة سوية بطريقة فك الالتفاف لفون شروتر الشكل 5-28 ، سنحصل على منحني مشتقة ضغط (المنحني الاسود و الاخران للطريقة التقليدية) متذبذب و الشكل غير نظامي والسبب في ذلك يعود لعدم التطابق ما بين المنحنيات الثلاثة في بداية التاريخ الانتاجي. هذا الخطا والانحراف يستمر(ينمو) و يتكرر بالظهور مع تقدم حسابات مشتقة فك الالتفاف (مراجعة الشكل5-30) و هذا ما يؤخذ على طريقة فون شروتر . لاحظ لثلاث فحوصات لتصاعد الضغط قد مُثلت بمنحني واحد لمشتقة الضغط حسب طريقة فون شروتر. إنصافًا لطريقة فون شروتر ، فإنها قد تعطي إجابة أكثر استقرارًا إذا قمنا بزيادة تنعيم الخوارزمية smoothing of the algorithm . لكن هذه الزيادة يجب ان تُنفذ بحذر على ان يجري التاكد من حسن اختيارها بمقارنة نتائج الضغط مع الضغط المقاس لتاريخ البئر الانتاجي عبر اعادة تطبيق طريقة الالتفاف Convolution .



الشكل5-28 : طريقة فون شروتر في تفسير بيانات فحوصات تصاعد الضغط الثلاثة -المثال رقم-3

طريقة ليفتن

لبيانات المثال السابق نفسها و لكن التحليل يجري بطريقة ليفتن إذ نستنبط لكل مدة فحص لتصاعد الضغط هنالك منحني واحد لمشتقة الضغط بطريقة فك الالتفاف Deconvolution. تفترض الطريقة ادخال قيمة واحدة مشتركة للضغط الاصلي للمكمن Pi و للثلاث منحنيات. نجري عدة محاولات لتحقيق التطابق و في كل محاولة نفترض قيمة جديدة للضغط الاصلي(الابتدائي) للمكمن و لحين حصول التطابق لمنحنيات مشتقة الضغط الغامقة الثلاثة - الازرق ، الاخضر و الاحمر في الشكل5-29 (المنحنيات المنقطة تمثل حسابات الطريقة التقليدية). النتائج مقبولة لكن هنالك مشكلة في بداية الفحص بتاثير ظاهرة تخزين البئر. هذا التاثير لتخزين البئر قد جعل الباحثين يركزون في ايجاد حلول لتقليل او ازالة هذا التاثير كما و سيُبحث في الفقرة التالية.

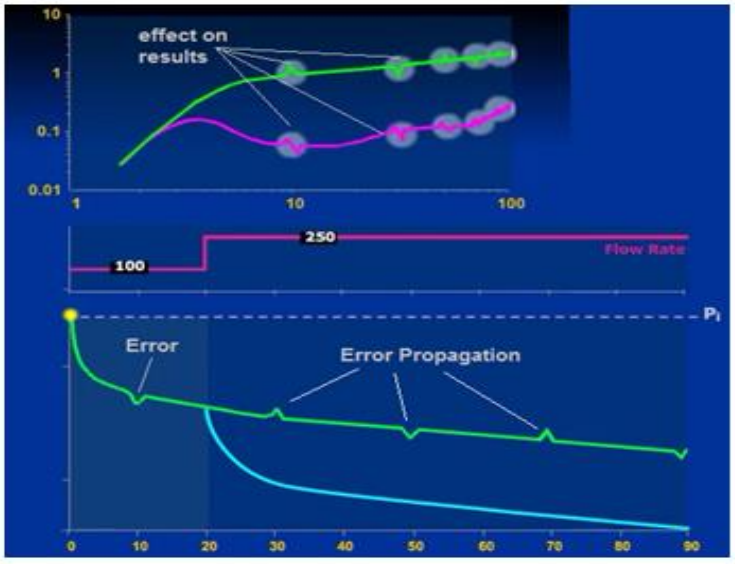


الشكل5-29 : طريقة ليفتن في تفسير بيانات فحوصات تصاعد الضغط الثلاثة -المثال رقم-3

8-5 إزالة التشوّيش في بيانات الفحص من جراء تأثير تخزين البئر WBS باستخدام طرق صريحة(المباشرة) في فك الالتفاف Explicit Deconvolution

ان أحد التحديات في حل النماذج الرياضية لتحديد سلوك الضغط عند جريان البئر بمعدل جريان ثابت او متغير أو عند غلق البئر ، هي وجود مدة زمنية قصيرة تسمى مدة تخزين البئر Wellbore Storage WBS. عند هذه الفترة مثلا يستمر تدفق المائع (after flow) من المكمن إلى قاع البئر من امام منطقة التثقيب برغم من غلق البئر من السطح في فحص تصاعد الضغط build-up او ان الجريان في بداية فحص هبوط الضغط لا يعكس جريان الطبقة المكمنية و انما من جراء الموائع المضغوطة في البئر. الحالة هذه تتسبب في تشوه و تشويش لبيانات الضغط المقاسة بحيث تُغطي على جزء من منطقة الجريان الشعاعي في الوقت المبكر من الفحص و احيانا تُغطيها تماما بحيث ننتقل مباشرة" الى فترة حدود المكمن في المنطقة المتاخرة من الفحص (الشكل رقم) . كما و ذكرنا في فقرة محددات فك الالتفاف فان اي تشوه بالبيانات المقاسة سيتسبب في خطأ ينمو و يتكرر بصورة متواصلة خلال تفسير فك الالتفاف الشكل5-30.

لذا و لغرض تجنب تاثير تخزين البئر على بيانات فحوصات الابار النفطية و الغازية و تحسين الثقة في مخرجات التفسير خصوصا في تحديد النفاذية و معامل القشرة من دون أي وقت أو تكلفة إضافية ، فقد وُجدت عدة تقنيات جديدة تتميز في انها تستغرق وقت أقصر في تسجيل البيانات إذ لا تحتاج الى بيانات الجريان (الطريقة الثالثة) و انما يتم حساب الجريان بناءا على علاقات تجريبية Empirically correlations. الطرق الجديدة هذه تعتبر إضافة جيدة للطرق السابقة في التفسير.



الشكل5-30 : الرسم في الاعلى يُوضح تشوه البيانات المقاسة (Errors) و استمرار تاثيرها على تفسير الفحص مع مرور الوقت.

عبر هذه الفقرة سنستعرض مجموعة مختلفة لتقنيات فك الالتفاف Deconvolution و تسمى بطرق فك الالتفاف الصريحة او المباشرة Explicit methods ، Bahabanian (2006) ،

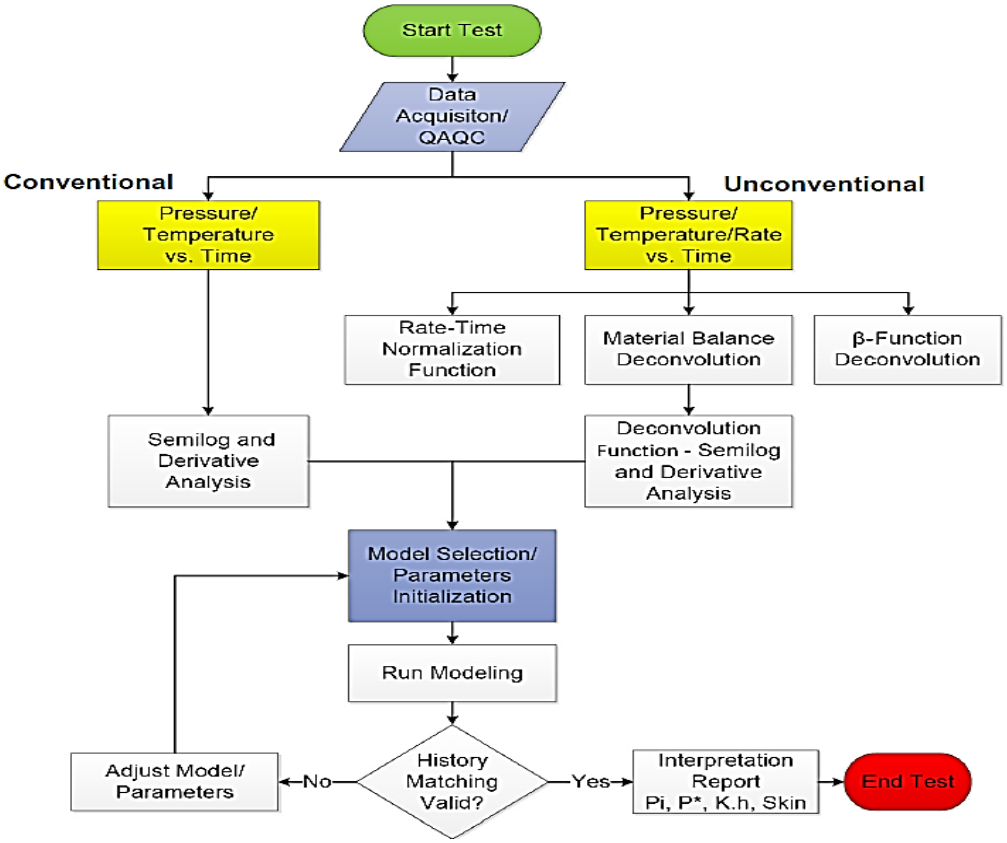
Razminia (2013) والتي تعمل من أجل ازالة او تقليل تشوه البيانات الناتج عن تأثيرات تخزين حفرة البئرWBS و تشمل ثلاث تقنيات و هي:

1 - طريقة توحيد المعدل Rate Normalization ;

2- طريقة فك الالتفاف بموازنة المادة - Material Balance Deconvolution

3- طريقة فك التفاف بيتا المعدّلة Modified β Deconvolution

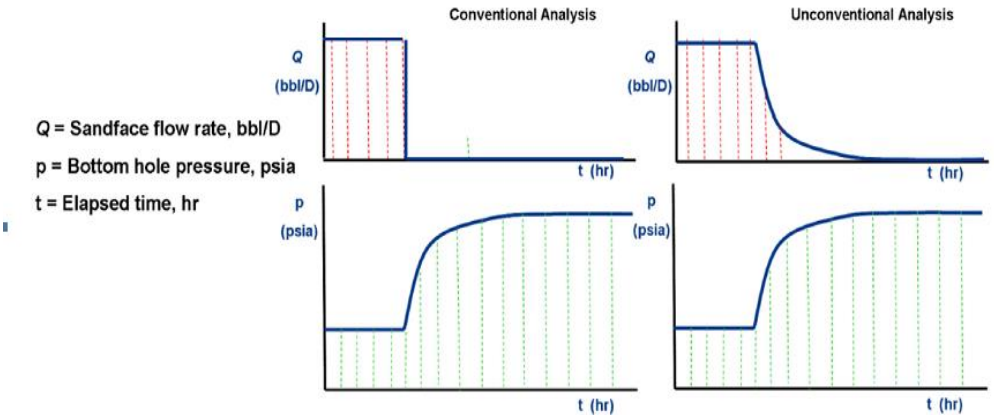
الشكل5-31 يُوضح عرض عام لسير العمل باسلوبين لتحليل فحص الابار التقليدي Conventional و غير التقليدي Unconventional . لاحظ ان مفهوم الطريقة التقليدية Conventional هنا يعني ان لا تاخذ بنظر الاعتبار استمرار الجريان اللاحق afterflow بعد غلق البئر من السطح اي يهمل تاثير تخزين البئر Wellbore Storage-WBS ، بمعنى توقف الجريان عند قاع و سطح البئرفي وقت واحد. في حين في التحليل غير التقليدي Unconventional الذي هو موضوع البحث ياخذ بنظر الاعتبار الجريان في قاع البئر بعد غلق البئر او اثناء الجريان و التي تمثل ظاهرة تخزين حفرة البئر WBS كما في الشكل5-32 و بعد ذلك يُعالجه.



الشكل5-31 : سير العمل workflow لتحليل فحص الابار التقليدي Conventional و التحليل غير التقليدي Unconventional

1-8-5 طريقة توحيد المعدل Straightline Approximation Deconvolution-Rate Normalization

طريقة توحيد (تطبيع) المعدل Rate Normalization- او Rate Normalization Pressure-RNP or RN او الطريقة المباشرة و تسمى احيانا Rate Time Normalization Deconvolution ، هي تقنية عملية وسهلة تستخدم مبدأ تعديل الضغط بناءً على المعدل لتحويل بيانات الإنتاج المتغيرة والتي يُهيمن عليها الجريان اللاحق After flow (في فترة تخزين البئر) إلى شكل يشبه بيانات الفحوصات الثابتة.



الشكل5-32 :مخطط يُوضح سلوك الجريان في قاع البئر امام الطبقة المنتجة عبر فحص تصاعد الضغط التقليديConventional و غير التقليدي Unconventional

تستند مباشرة إلى الحل العددي الذي قدمه عودة وجونز (1974) (Odeh and Jones) لحالة المعدلين Two flow rate ، وتُعد خيارًا جيدًا للتطبيقات الأولية أو عندما تكون البيانات محدودة. ومع ذلك، فهي أقل دقة من طرق فك التفاف الحديثة مثل توازن المادة MB أو دالة البيتا Beta Function، حيث تُعطي تقدير خاطئ لعامل القشرة skin factor عن طريق إدخال ازاحة على الخط المستقيم شبه اللوغاريتمي semi-log (من الواضح أنه يجب معرفة سير و سلوك معدل الوجه الرملي sandface rate). لكنها تظل مفيدة جدًا في التطبيقات العملية السريعة. تشترط الطريقة قياس معدلات الجريان خلال فتح او عند غلق البئر (هبوط الضغط او في تصاعد الضغط) لفترة الجريان اللاحق وهذا القياس ممكن باستخدام معدات قياس حديثة حيث نضمن تحقق تطابق تام و مزامنة ما بين معدل الانتاج و الضغط (في نفس الوقت يعد القياس هذا مشكلة و هو من المآخذ على الطريقة) .

لاحظ هنالك العديد من اساليب طريقة توحيد المعدل RN و الشائع منها في الجريان اللاحق After flow هو في توحيد الضغط نسبة الى معدل الجريان اي $\Delta p/q$. ممكن مراجعة المصادر وينستوك(1965) Winestock ،كجك Kuchuk (1987) ، عودة و جونس Odeh and Jones (1965) اذ تضمنت مناقشات مفصلة بشأن أساليب توحيد المعدل Rate normalization.

الهدف من RNP هو إزالة او تصحيح بيانات الضغط المقاسة من جراء تغير معدلات الجريان.

تحليل منحنى توحيد المعدل Rate normalization يعتمد الخط المستقيم نصف لوغاريتمي الظاهر من رسم علاقة لمعاملات تقترحها الطريقة ثم يُحّدد الموديل المكمني المناسب لاجل التفسير.

الفكرة الاساسية:

اساس خوارزمية توحيد المعدل RN هو مماثل للحل العددي لحالة معدلي الجريان Two flow rate و التي عبّر عنها عودة وجونز (Odeh and Jones1974)، على النحو الاتي:

$$\frac{p_i - p_{wf}}{q_n} = m'^* \sum_{j=1}^{n} \left[\frac{1}{q_n} * \left. \frac{dq}{dt} \right|_{qj} * \Delta t * Log\left(t_n - t_{j-1}\right) \right] + m'^* s \,, \quad \text{----- 59}$$

- فعند رسم العلاقة الاتية على احداثيات عادية:

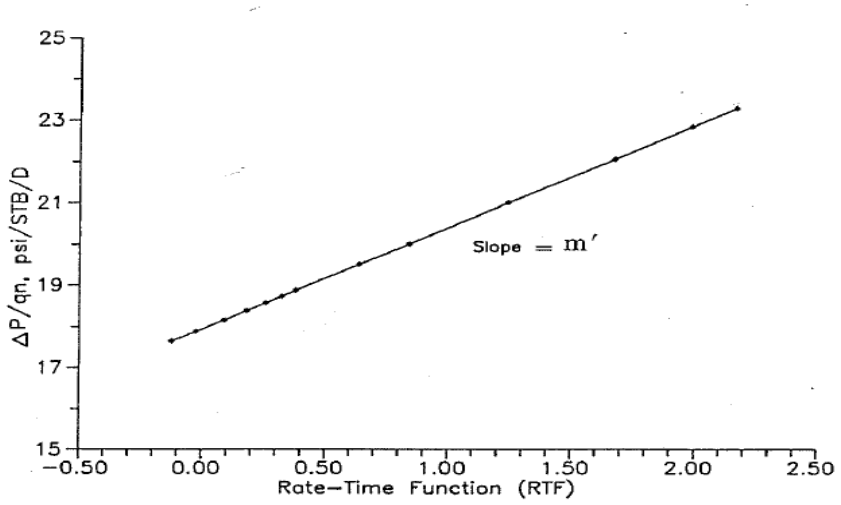
$$\frac{p_i - p_{wf}}{q_n} \quad \text{vs} \quad \text{Rate-Time Function, RTF}$$

سنحصل على علاقة خط مستقيم (الشكل5-33) بميل يساوي:

$$m' = \frac{162.6 * B_o * \mu}{k * h} \quad \text{----- 61}$$

إذ ان دالة معدل الجريان- الوقت RTF تساوي:

$$\textbf{Rate-TimeFunction-RTF} = \sum_{j=1}^{n} \left[\frac{1}{q_n} * \left. \frac{dq}{dt} \right|_{qj} * \Delta t * Log\left(t_n - t_{j-1}\right) \right] \quad \text{---------- 60}$$



الشكل5-33 :تفسير للفحص متعدد الجريان- طريقة توحيد المعدل Rate normalization

و n تمثل تسلسل فترة الجريان عند Δp معينة و ان $q_n=q_m/q_r$ ، q_m معدل الجريان المقاس ، q_r معدل الجريان الثابت المرجعي Flow rate reference constant.

حيث:

P_i: ضغط المكمن الابتدائي.

P_{wf}: ضغط البئر عند القاع.

q_n: معدل الجريان عند الوقت tn

m∗ ميل خط مستقيم في رسم (P vs. log(t)) لحالة المعدل الثابت.

s : معامل القشرة (Skin factor) .

$dq/dt/_{qj}$: معدل تغير المعدل عند الفاصل الزمني j .

Δt : الفاصل الزمني بين النقاط.

t_n-t_j-1 : الفرق الزمني من بداية الفترة j حتى الوقت الحالي n.

باسلوب مماثل فقد استخدم سابيت Sabet[36](1991) تكامل الالتفاف Convolution integral في تعريف المعادلة رقم-59 و كالاتي:

$$\frac{p_i - p_{wf}}{q_n} = \frac{m'}{q_n}\int_{t_0}^{t_n} \frac{dq}{d\tau} * Log(t_n - \tau) * d\tau + m'*s \quad \text{--------- 62}$$

اعتبر مشتقة الجريان dq/dt=q' تساوي:

$$q_i' = \frac{q_i - q_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad \text{---------- 63}$$

بالتعويض مشتقة الجريان في المعادلة رقم-62 ينتج:

$$\frac{P_i - P_{wf}}{q_n} = \frac{m'}{q_n} \int_{t_0}^{t_n} q' \log (t_n - \tau)\, d\tau + m' \bar{s} \quad \text{---------- 64}$$

و حل التكامل بحسب الفترات الزمنية لكل معدل جريان q_i يساوي:

$$\int_{t_0}^{t_n} q'(\tau) \log(t-t)\, d\tau = q_1' \int_{t_0}^{t_1} \log(t_n - \tau)\, d\tau + q_2' \int_{t_1}^{t_2} \log(t_n - \tau)\, d\tau + q_3' \int_{t_2}^{t_3} \log(t_n - \tau)\, d\tau + q_i' \int_{t_{i-1}}^{t_i} \log (t_n - \tau)\, d\tau + \ldots\ldots + q_n' \int_{t_{n-1}}^{t_n} \log (t_n - \tau)\, d\tau \quad \text{---------- 65}$$

حل التكامل لكل فترة زمنية $t_{i-1} - t_i$ يساوي:

$$\int_{t_{i-1}}^{t_i} \log (t_n - \tau)\, d\tau = (t_n - \tau)\{0.4343 - \log (t_n - \tau)\} \Big|_{t_{i-1}}^{t_i}$$

$$= (t_n - t_i)[0.4343 - \log (t_n - t_i)]$$
$$- (t_n - t_{i-1})[0.4343 - \log (t_n - t_{i-1})]$$

$$= (t_n - t_{i-1}) \log (t_n - t_{i-1}) - (t_n - t_i) \log$$
$$(t_n - t_i) - 0.4343 (t_i - t_{i-1}) \quad \text{---------- 66}$$

تفاصيل حلول فحوصات هبوط الضغط و تصاعد الضغط ، ممكن الرجوع الى المصادر و الأدبيات لسابيت Sabet[36] (1991) . الحل النهائي لفحص تصاعد الضغط buildup test بطريقة توحيد المعدل يتم بتعديل هذا الضغط ليأخذ في الاعتبار تأثير التغيرات السابقة في المعدل، عبر حساب مساهمة كل تغيير في المعدل باستخدام مبدأ التراكب و كما موضح في المعادلة في ادناه.

$$\frac{\Delta p}{1-q_D} = \frac{m_1}{1-q_D}\left[Log\left(\frac{t_p}{t_p+\Delta t}\right) - \Pi\right] + m_1 * s\,, \text{ ---------- } 67$$

إذ ان Π تساوي:

$$\Pi = \frac{1}{q_1}\left\{\left[\sum_{i=2}^{i=n-1} \frac{q_i - q_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}\left\{(t_n - t_{i-1}) * Log(t_n - t_{i-1}) - (t_n - t_i) * Log(t_n - t_i)\right\}\right] + \ldots\right.$$
$$\left. \ldots + (q_n - q_{n-1}) * Log(t_n - t_{n-1}) + 0.4343 * (q_1 - q_n)\right\} \text{ ---------- } 68$$

و معدل الجريان اللابعدي يساوي:

$$q_D = \frac{q_n}{q_1} \quad \text{--------- } 69$$

فرق الضغط في فحص تصاعد الضغط يساوي:

$$\Delta p = p_{ws} - p_{wf@\Delta t_n = 0} \quad \text{---------- } 70$$

عند رسم العلاقة التالية على احداثيات عادية:

$$\frac{\Delta p}{1-q_D} \quad \text{vs} \quad \frac{1}{1-q_D}\left[Log\left(\frac{t_p}{t_p+\Delta t}\right) - \Pi\right]$$

- نحصل على علاقة خط مستقيم بميل m_1 يتقاطع مع الاحداثي الصادي عند b .

الميل m_1 يساوي:

$$m_1 = \frac{162.6 q_1 B \mu}{kh} \quad \text{---------} \quad 71$$

- عامل القشرة s يساوي:

$$s = 1.151\left[\frac{b}{m_1} - \log \frac{k}{\phi \mu C_t r_w^2} + 3.23\right] \quad \text{---------} \quad 72$$

دقة نتائج طريقة توحيد المعدل RNP ترتبط بتوفر بيانات الجريان عند غلق البئر after flow (ممكن الاستعانة ببيانات مجس الانتاج production log)، و لصعوبة الحصول على هذه القراءات فلا ينبغي الاعتماد عليها كأفضل منهجية ويُمكن اعتبار نتائجها كدليل Guide عند المقارنة مع الطرق الاخرى .

2-8-5 فك الالتفاف بموازنة المادة Material Balance Deconvolution -MB

طريقة فك التفاف بموازنة المادة(MB Deconvolution) التي اقترحها جونستون Johnston (1992)، هي أداة قوية لعزل تأثير سعة تخزين البئر من بيانات الضغط، وذلك عبر تحويل الزمن إلى زمن موازن يعكس فقط سلوك المكمن. تعتمد الطريقة مبدأ بسيط وقوي و هو توازن المادة في حسابات الجريان و بضمنها فترة التخزين ، بمعنى أي انخفاض في الضغط داخل جوف البئر يجب أن يقابله تغير في كمية المائع المخزَّن . الطريقة لا تحتاج موديل رياضي كما في طريقة البيتا β مما يجعلها موثوقة ومستقلة عن النماذج الرياضية المعقدة.

الهدف من الطريقة:

استخراج معدل الجريان الحقيقي عند الوجه الرملي (Sandface Flow Rate) من بيانات الضغط و الجريان المسجلة في البئر، بدون الحاجة إلى نموذج رياضي مسبق. تعتمد الطريقة مبدأ موازنة المادة في حساب الجريان (Material Balance Principle) (دون قياسه) .

الفكرة الأساسية:

تعتمد الطريقة على معادلة موازنة المادة في جوف البئر اي ان:

التغير في كمية المائع داخل البئر=الجريان من/إلى المكمن

بمعنى ان انخفاض الضغط يقابله تمدد المائع و تمدد المائع يقابله (يؤدي الى) جريان ظاهري ومن هنا يتم استنتاج معدل الجريان بدلالة: مشتقة الضغط و معاملات الانضغاط والحجم.

خلال فترة الجريان اللاحق(Afterflow) (فترة تخزين البئر) بعد إغلاق البئر، لا يوجد تدفق خارجي اي على السطح ($q_{surface}=0$) ، لكن الضغط يستمر في التغير بسبب إطلاق السوائل المخزنة في تجويف البئر.هذا يعني أن التغير في الضغط يرتبط مباشرةً بمعدل تدفق السوائل من سعة البئر وهو ما يمكن حسابه باستخدام قانون موازنة المادة. هذه الطريقة نجحت ، و يُمكن اعتبارها دقيقة بما فيه الكفاية لكي تُستخدم كطريقة قياسية و عملية في التطبيقات الحقلية.

رياضيا و لتصحيح التشوه الناتج عن تخزين حفرة البئر wellbore storage-WBS ، تقترح الطريقة استخدام دالة الوقت لموازنة المادة بدلا من الوقت العادي المستخدم في طريقة توحيد المعدل RN . ان وقت موازنة المادة تعتبر دالة شاملة تضم كل من متغير الوقت لموازنة المادة t_{mb} و دالة الضغط لوحدة الجريان او ما تسمى دالة الضغط الموحد لمعدل الانتاج Rate-normalized pressure drop function .

دالة الضغط الموحد لمعدل الانتاج في فحص تصاعد الضغط تكتب بالصيغة الاتية:

$$\frac{\Delta p}{q} = \frac{\Delta p_{ws}}{q} = \frac{p_{ws} - p_{wf}(\Delta t = 0)}{q} \quad \text{---------- 74}$$

وقت موازنة المادة t_{mb} يُعرف:

$$t_{mb} = \frac{N_p}{q} \quad \text{---------- 73}$$

Np يمثل الانتاج المتجمع بالبراميل و q اخر معدل جريان بالبرميل/يوم.

دالة معدل التخزين في حفرة البئرwellbore storage rate function في حال فحص تصاعد الضغط $q_{wbs\ BU}$ تُحسب على النحو الاتي:

$$q_{wbs,BU} = \frac{1}{m_{wbs}} \frac{d}{d\Delta t}[\Delta p_{ws}] \quad \text{---------- 75}$$

إذ ان الميل m_{wbs} يمثل ميل فترة تاثير تخزين البئر عند بداية الفحص و يساوي:

$$m_{wbs} = \frac{qB_{wb}}{24C} \quad \text{---------- 76}$$

عامل تخزين البئر C يساوي :

$$C = c_{wb} V_{wb} \quad \text{---------- 77}$$

و ان c_{wb} يمثل انضغاطية المائع في البئر، وB_{wb} هو عامل حجم تكوين السائل في البئر، وV_{wb} هو حجم البئر بالبراميل.

لاحظ يستفاد من الجريان المقاس بداية" في تحديد الميل في المعادلة-76.

يُحسب الإنتاج المتجمع (المتراكم) لتخزين البئر Wellbore storage cumulative production في فحص تصاعد الضغط $N_{p,\ wbs\ BU}$ كما يأتي:

$$N_{p,wbs,BU} = \int_0^{\Delta t} (1 - q_{wbs,BU})\, d\Delta t = \Delta t - \frac{1}{m_{wbs}} \Delta p_{ws} \quad \text{---------- 78}$$

باستخدام المعادلتين رقم 75 و 78 و بادخال فترة تاثير تخزين البئر في فحص تصاعد الضغط $\Delta t_{mb\ BU}$ فيُمكن تعريف دالة وقت موازنة المادة Material balance time function على النحو الاتي:

$$\Delta t_{mb,BU} = \frac{N_{p,wbs,BU}}{1-q_{wbs,BU}} = \frac{\Delta t - \frac{1}{m_{wbs}}\Delta p_{ws}}{1-\frac{1}{m_{wbs}}\frac{d}{d\Delta t}[\Delta p_{ws}]} \quad \text{--------- 79}$$

هذه المعادلة تحوّل البيانات الزمنية الملوثة(المتاثرة) بتأثير سعة تخزين البئر إلى زمن موازن يعكس سلوك المكمن فقط.

دالة الضغط الموحد لمعدل الانتاج Rate-normalized pressure function و التي تعتمد تصحيح الضغط لتاثير تخزين البئر في فحص تصاعد الضغط $\Delta p_{s\,BU}$ تُكتب على النحو الاتي:

$$\Delta p_{s,BU} = \frac{\Delta p_{ws}}{1-q_{wbs,BU}} = \frac{1}{1-\frac{1}{m_{wbs}}\frac{d}{d\Delta t}[\Delta p_{ws}]}\Delta p_{ws} \quad \text{--------- 80}$$

تعمل الطريقة كما يلي:

- حساب زمن موازنة المادة Δt_{mb} لكل نقطة زمنية من البيانات.
- رسم الضغط $\Delta p_{s\,BU}$، مقابل Δt_{mb} بدلاً من الزمن الحقيقي وهذا المنحنى يكون أقرب للسلوك النظري للمكمن.
- نستخدم هذا المنحنى المعدل لايجاد النفاذية أو معامل القشرة كما لو أن تخزين البئر غير موجودة.

النتيجة:

ضغط مكافئ لجريان ثابت ، مشتقة ضغط خالية منWellbore Storage و تأثير تخزين البئر يُفصل فيزيائيًا وليس عدديًا و هذا هو جوهر قوة الطريقة.

اقتصرت طريقة فك الالتفاف هنا بموازنة المادة MB على بيانات فحص تصاعد الضغط فقط و يُمكن مراجعة المصدر لفحص هبوط الضغط.

3-8-5 فك الالتفاف دالة البيتا Modified β -Function Deconvolution

في الأساس و في فحص الضغط العابر pressure transient ، يتم تقييد تقنيات توحيد المعدل RNP (وتفكيك توازن المواد MB) عند عدم وجود قياس لمعدل الجريان. اوجد فان إيفردينجن وهيرست (1953)Van Everdigen and Hurst علاقة تجريبية Empirical correlation باستخدام دالة أُسية يمكن من خلالها حساب معدل الجريان في قاع البئر امام المنطقة المثقبة (الوجه الرملي sandface) دون قياسها خلال فترة تشويه تخزين حفرة البئر wellbore storage (فترة الجريان اللاحق) .

يُكتب النموذج الرياضي للجريان الأسي لفان إيفردينجن/هيرست بلا أبعاد على النحو التالي:

$$q_D(t_D) = 1 - e^{-\beta t_D} \quad \text{--------- 81a}$$

او كتابتها بالصيغة البعدية:

$$q_{sf}(t) = q_{max} \cdot \left(1 - e^{-\beta \cdot \frac{kt}{\phi \mu c_t r_w^2}}\right) \quad \text{..... 81b}$$

و بمجرد حساب β، يمكن استخراج معدل الجريان الحقيقي عند الوجه الرملي، مما يسمح بنتائج افضل في تحليل بيانات الفحص و تحديد خصائص المكمن.

ان الرموز الواردة في المعادلات تعني ما يلي :

q_D : معدل الجريان اللا بُعدي (Dimensionless Flow Rate)

t_D : الزمن اللابُعدي(Dimensionless Time) ،

β : معامل التفاف دالة البيتا — (β-Parameter) يُحسب من البيانات ويُعبّر عن مدى "سرعة" أو "بطء" انتهاء تأثير سعة تخزين البئر.هذه الدالة تصف كيف ينخفض تأثير سعة البئر تدريجيًّا مع الزمن، ويعود الجريان إلى قيمته الحقيقية عند الوجه الرملي. تُستخدم دالة البيتا في "إلغاء" تأثير سعة البئر، و لنحصل على "الضغط النظري" الذي سيكون كما و لم يكن هناك سعة تخزين البئر.

كلما كانت β-beta كبيرة كان التغير في الجريان سريع.

كلما كانت β-beta صغيرة كان التغير في الجريان بطيء.

يتم تقدير و ضبط قيمة β بحيث يكون الضغط النظري المستنتج من هذا النموذج متطابقًا مع الضغط المقاس.

qsf(t) الجريان عند او امام الوجه الرملي sand face rate

q_{max}: اقصى معدل جريان او المعدل المرجعي (عادة هو معدل الجريان قبل الإغلاق في فحص تصاعد الضغط)،

k, ϕ, μ, c_t, r_w: خصائص الخزان والبئر،

t: الزمن الفعلي (بالساعة أو اليوم).

أظهر فان إيفردينكن وهيرست ايضا ، أن العلاقة بين " معدل الجريان والوقت" أثناء الجريان اللاحق في فحص تصاعد الضغط او هبوط الضغط هي دالة لتغير الضغط نسبة للوقت $d(\Delta p_w)/dt$ على ان يبقى معامل تخزين حفرة البئر ثابت نسبيًا. و بناءً على توازن المواد في حفرة البئر، يتم حساب معدل تدفق الوجه الرملي sandface باستعمال العلاقة اللابعدية wellbore storage model الاتية:

$$q_D = 1 - C_D \frac{dp_{wD}}{dt_D} \quad \left[\text{or } q_D = 1 - \frac{\frac{d}{dt}[\Delta p_w]}{m_{wbs}} \text{ in field units} \right] \quad \text{---------- 81c}$$

بهبانين (Bahabanian et al. (2006 و استنادًا إلى العلاقة التجريبية التي اقترحها فان إيفردينغن وهيرست (Van Everdingen & Hurst،1953) في المعادلات c،81a ، وضع الأساس لـطريقته في تفكيك بيتا β -Function Deconvolution و توصل الى الصيغة التالية في تصحيح بيانات الضغط المشوه في منطقة تخزين البئر:

$$p_{sD}(t_D) = p_{wD}(t_D) + \frac{1}{\beta}\frac{dp_{wD}(t_D)}{dt_D} \quad \text{---------- 81 d}$$

الرموز تمثل:

$p_{wD}(t_D)$:الضغط اللابُعدي المقاس عند قاع البئر.

dp_{wD}/dt_D : معدل تغيّر الضغط (مشتقة الزمن).

البيتا β : معامل يصف سرعة تغيّر الجريان.

$p_{sD}(t_D)$: الضغط اللابُعدي المصحّح (Smoothed / Stabilized Pressure)

هنا تعامل بهبانين مع β كمتغير مع الوقت ($\beta(t)$ أو $\beta(t_D)$)، وليس ثابتًا و بمجرد الحصول على الدالة $\beta(t_D)$ ، يستخدم المعادلة 81c كآلية لتقدير دالة الضغط غير المشوه ولتكون بمثابة الصيغة النهائية لتصحيح تشويش بيانات الضغط من تاثير تخزين البئر بطريقة فك التفاف بيتا "beta" deconvolution formula . كما اعتبر ان المعادلة اعلاه قابلة للتطبيق في فترة تخزين حفرة البئر و ايضا في الأوقات اللاحقة التي تكون بيانات الضغط المعطاة صحيحة و غير متاثرة بتخزين البئر.

ان صيغة المعادلة 81d هي بمثابة "beta" deconvolution formula و تقول ببساطة:
نأخذ الضغط المقاس و نضيف إليه جزءًا من مشتقته الزمنية موزونًا بمعامل $1/\beta$ ، هذا الإجراء:
يُضعف التغيرات الحادة في الضغط و يُقلّل تأثير التشويش العددي و يُخفي سلوك تخزين جوف البئر في المشتقة و يُبرز منطقة طور الجريان الشعاعي بشكل أوضح.

<u>الخطوات العملية</u>

- رسم منحني بيانات الضغط المقاسة مقابل الزمن (Log-Log).
- نحدد فترة Afterflow حساب معامل تخزين البئر- C
- نستخدم برنامج تحليل لضبط β بحيث يتطابق الضغط النظري المحسوب مع المقاس.
- ثم نعيد رسم الضغوط المصححة و مشتقتها مع الوقت لوغاريتميا log-log (او الرسم semi- log) ومن الرسم نحدد خواص المكمن.

ان البيتا β دالة معقدة تعتمد الوقت اللابعدي t_D . بهبانين اوجد تعريف اقل تعقيدا و تفصيلا في تحديد الدالة β و كما يأتي:

$$\beta_f = \frac{1}{t}\frac{(\Delta p_w - \Delta p_{wd})}{\Delta p_{wid}} \quad \text{(pressure drawdown) ---------- 82}$$

$$\beta_f = \frac{1}{\Delta t}\frac{(\Delta p_w - \Delta p_{wd})}{\Delta p_{wid}} \quad \text{(pressure buildup) ---------- 83}$$

إذ يُمكن تعريف الدوال الاتية : Δp_w، Δp_{wd}، Δp_{wi}، Δp_{wid} كما يأتي:

$$\Delta p_w = p_i - p_{wf} \quad \text{(pressure drawdown) ---------- 84}$$

$$\Delta p_w = p_{ws} - p_{wf}(\Delta t = 0) \quad \text{(pressure buildup)} \quad \text{---------- 85}$$

$$\Delta p_{wd} = t\frac{d\Delta p_w}{dt} \quad \text{(pressure drawdown)} \quad \text{---------- 86}$$

$$\Delta p_{wd} = \Delta t\frac{d\Delta p_w}{d\Delta t} \quad \text{(pressure buildup)} \quad \text{---------- 87}$$

$$\Delta p_{wi} = \frac{1}{t}\int_0^t \Delta p_w d\tau \quad \text{(pressure drawdown)} \quad \text{---------- 88}$$

$$\Delta p_{wi} = \frac{1}{\Delta t}\int_0^{\Delta t} \Delta p_w d\tau \quad \text{(pressure buildup)} \quad \text{---------- 89}$$

$$\Delta p_{wid} = t\frac{d\Delta p_{wi}}{dt} \quad \text{(pressure drawdown)} \quad \text{---------- 90}$$

$$\Delta p_{wid} = \Delta t\frac{d\Delta p_{wi}}{d\Delta t} \quad \text{(pressure buildup)} \quad \text{---------- 91}$$

و باعتماد الدالة الاسية β_f يتم تصحيح الضغط لتاثير تخزين البئر Δp_s و كما يأتي:

$$\Delta p_s = \Delta p_w + \frac{1}{\beta_f}\frac{d\Delta p_w}{dt} \quad \text{(pressure drawdown)} \quad \text{---------- 92}$$

$$\Delta p_s = \Delta p_w + \frac{1}{\beta_f}\frac{d\Delta p_w}{d\Delta t} \quad \text{(pressure buildup)} \quad \text{---------- 93}$$

ان الرمز السفلي (Subscripts) ; s- for wellbore storage applicaions i-integral ، d-deritive

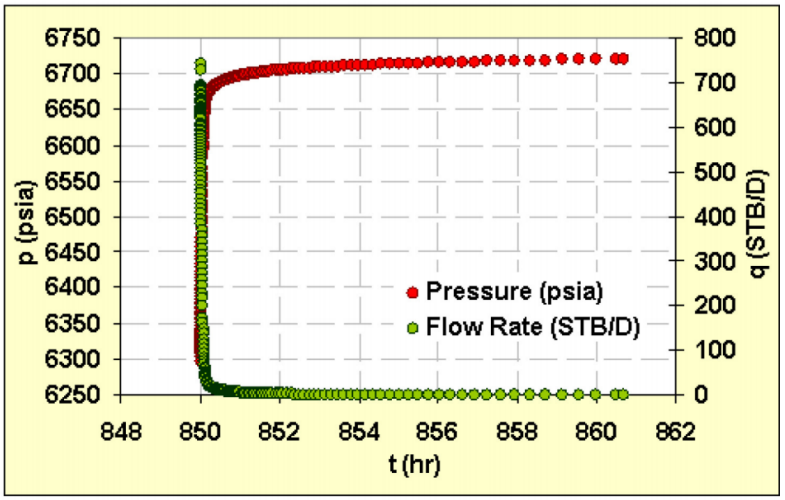
و بالتعويض عن تعريف الدالة بيتا β_f في المعادلتين رقم-92 و 93 بما يساويها من المعادلتين رقم-82 و 83 نحصل على المعادلة النهائية لتصحيح الضغط لتاثير تخزين البئر و لكلا نوعي الفحوصات ; هبوط الضغط و تصاعد الضغط و في اوقات متغيرة:

$$\Delta p_s = \Delta p_w + \frac{1}{\frac{1}{t}\frac{(\Delta p_w - \Delta p_{wd})}{\Delta p_{wid}}}\frac{d\Delta p_w}{dt} \quad \text{---------- 94}$$

او تساوي:

$$\Delta p_s = \Delta p_w + \frac{\Delta p_{wd}}{(\Delta p_w - \Delta p_{wd})}\Delta p_{wid} \quad \text{---------- 95}$$

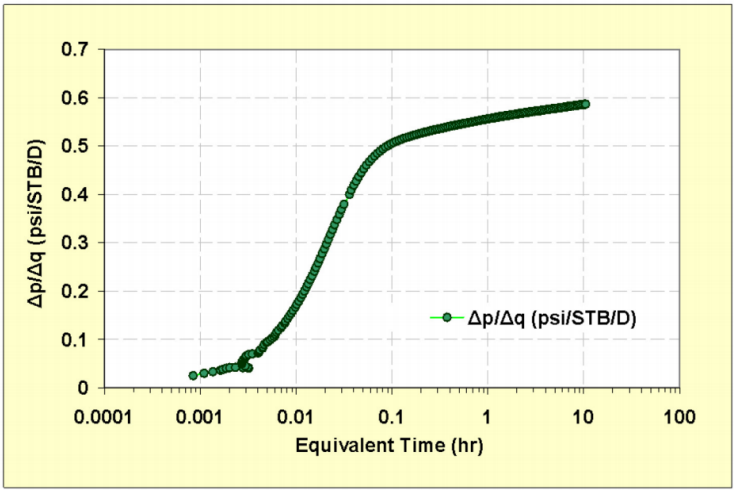
للاطلاع على تفاصيل اشتقاق المعادلات الاساسية للطرق الثلاثة ممكن مراجعة Bahabanian et al. (2006) و Razminia K. (2014) .



الشكل5-34 :بيانات الضغط و الانتاج عبر التاريخ الانتاجي للبئر-المثال رقم-4

مثال-4 :- عُمر Omar (2016)

تم تصميم فحص متعدد الجريان Multirate (يتضمن ايضا فحص مجس الانتاج Production log) ليشمل ثلاثة تغييرات في معدل الجريان و فحص واحد لتصاعد الضغط build-up لمدة 10 ساعات الشكل5-34 . الفحص يهدف الى تقليل تأثير ما بعد الجريان afterflow (تخزين البئر) عبر مدة فحص تصاعد الضغط Build-up الأخيرة .



الشكل5-35 : الطريقة التحليلية التقليدية conventional نصف لوغاريتمية - المثال رقم-4

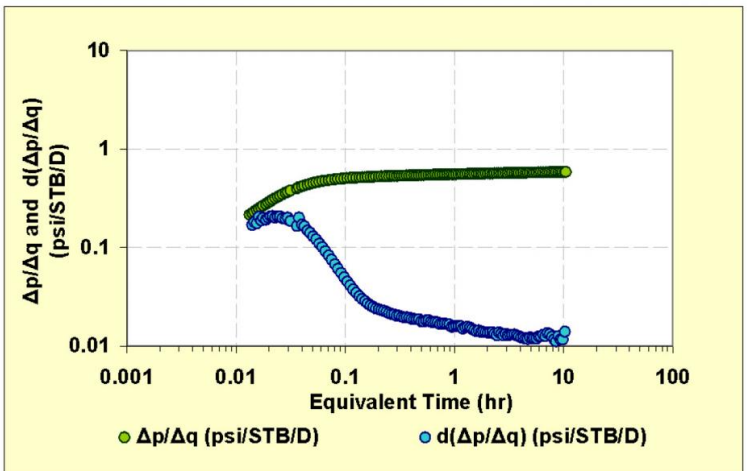
الحل:

- باستخدام الطرق التحليلية التقليدية Conventional اي من دون حسابات تصحيح تاثير تخزين البئر و رسم العلاقة نصف لوغاريتمية و الرسم اللوغاريتمي لعلاقة دالة الضغط لوحدة الانتاج $\Delta p/\Delta q$ و المشتقة مع الوقت كما في الاشكال 5-35 و 5-36 على التوالي.

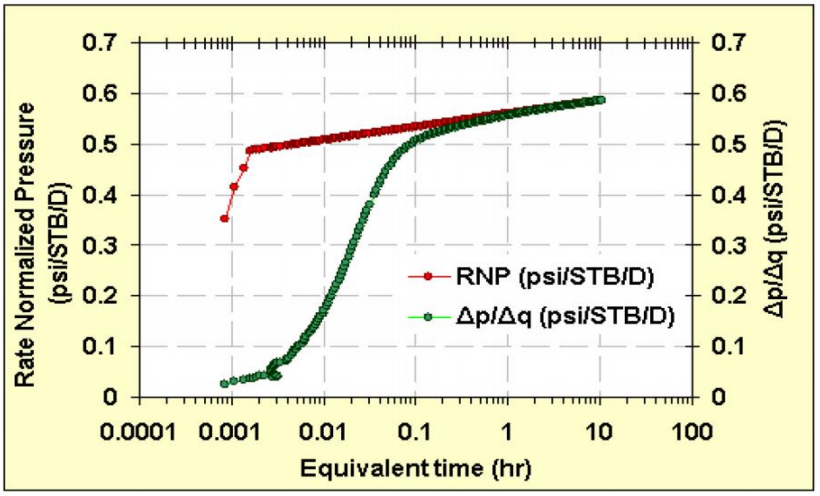
- نمط الجريان الشعاعي المتجانس اللانهائي يظهر في المدة ما بين 4 إلى 10 ساعات عبر الفحص.
- نتائج التحليل اعطت قيم للمعاملات الاتية:

p_i = 7,002 psia r_{inv} = 563 ft s = 30.6 (dimensionless)

k*h = 3295md*ft C_s = 7.4E-3 bbl/psi



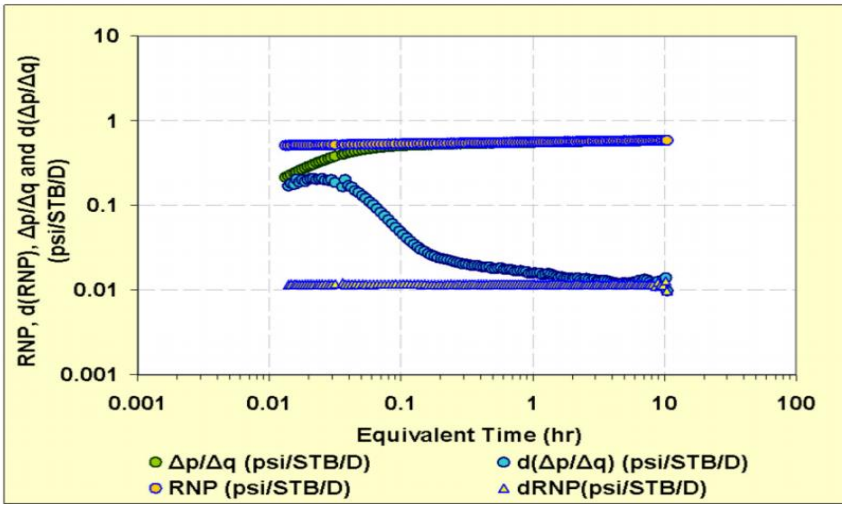
الشكل5-36 : الطريقة التحليلية باستخدام الرسم التشخيصي اللوغاريتمي- المثال رقم-4



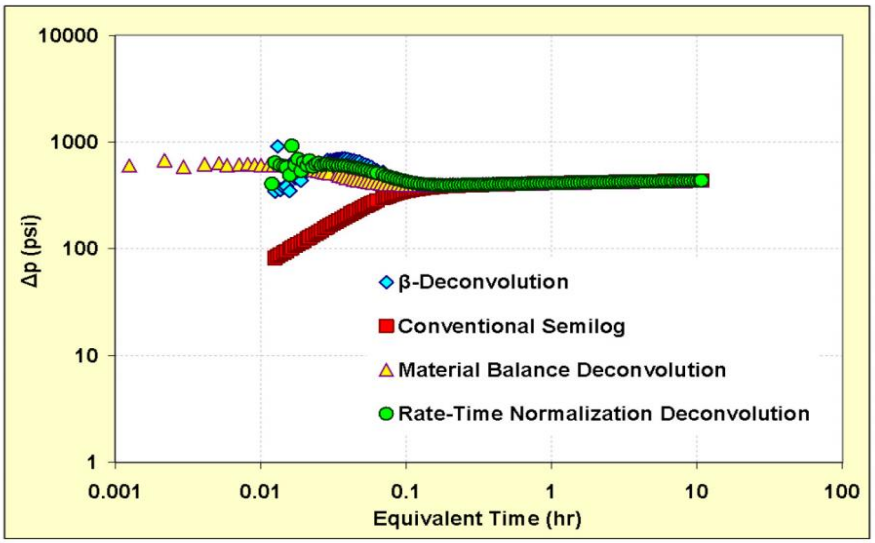
الشكل5-37 :المخطط نصف لوغاريتمي لمقارنة الطريقة التقليدية و الطريقة غير التقليدية- المثال رقم-4

الشكل5-37 يُوضح المنحني نصف اللوغاريتمي لمقارنة الطريقة التقليدية Conventional (المنحني باللون الاخضر) و الطريقة غير التقليدية باستخدام توحيد المعدل RNP (المنحني باللون الاحمر). لاحظ ان دمج قياسات معدل الجريان بعد غلق البئر after flow يتيح تحسين أداء التفسير في تقليل التشوه الناتج عن تأثير تخزين حفرة البئر WBS في الوقت المبكر الى أدنى حد و ينتهي تاثير WBS كما في المخطط اللوغاريتمي- الشكل5-38 . بحسب الطريقة التقليدية تكون بداية ظهور طور الجريان الشعاعي عند الوقت .2-10 hrs في حين اظهرت

الطرق الحديثة تحسنا و وقت مبكرا في تحديد الخط الافقي للجريان الشعاعي . اي بمعنى ان تاثير تخزين البئر كان يغطي على منطقة الجريان الشعاعي و تم ازالته او تقليصه الى ادنى حد.



الشكل5-38 : المخطط اللوغاريتمي لمقارنة الطريقة التقليدية و الطريقة غير التقليدية للمثال رقم-4



الشكل5-39 : المخطط اللوغاريتمي لمقارنة الطريقة التقليدية و طرق فك الالتفاف الثلاثة - المثال رقم-4

الشكل5-39 يجمع تحليل الطريقة التقليدية Conventional (المنحني باللون الاحمر) بالإضافة إلى التحليل بالطرق غير التقليدية Unconventional لتشمل فك الالتفاف بتقنية موازنة المادة MB ، دالة البيتا β و RN . الغرض من المخطط هو من أجل مقارنة جميع الطرق مع التحليل

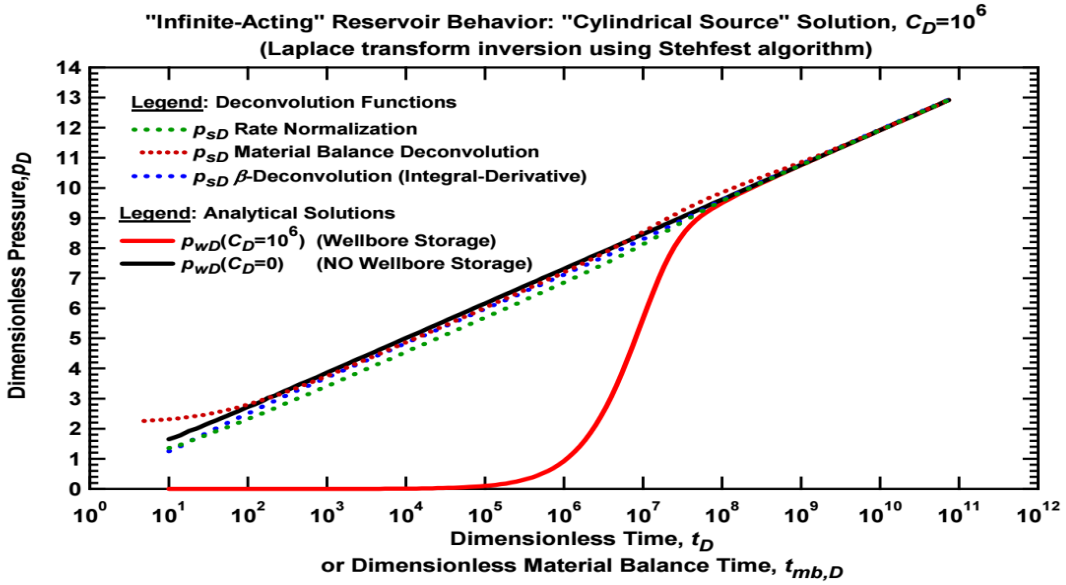
التقليدي للفحص. تكاد تكون النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام هذه الطرق مختلفة بعض الشيء.

على الرغم من أن تقنية موازنة المادة (النقاط باللون البني) لا تتطلب استخدام معدات قياس الجريان Flowmeters لتنفيذها، إلا أنها حققت أفضل النتائج. اما قياس معدلات الجريان عند قاع البئر في طريقة RN فانها مقيدة بأدائية و دقة مقاييس الجريان Flowmeters المستخدمة (النقاط الدائرية باللون الاخضر).

مثال-5 - توضيحي باستخدام بيانات اصطناعية - بهبهانين Bahabanian et al. (2006):

مثال توضيحي لطرق فك الالتفاف الصريحة (المباشرة) Explicit، باستخدام بيانات غير حقلية وانما بيانات مركبة (اصطناعية) Synthetic data .

بئر ينتج بمعدل جريان ثابت في مكمن غير محدود بوجود تأثير تخزين حفرة البئر. معامل تخزين حفرة البئر اللابعدية تساوي $(C_D)=10^6$. الشكل5-40 النصف لوغاريتمي يُظهر منحنيات فرق الضغط اللابعدي و التي تم تحديدها من الموديل التقليدي مع تخزين البئر بالمنحني الأحمر الغامق و من الطريقة التحليلية دون تاثير تخزين البئر بالخط ألاسود الغامق و الذي يمثل الحل التام Exact اضافة الى استخدام حلول الطرق الثلاث الصريحة Explicit (خطوط منقطة– اخضر ،احمر و ازرق كما في دليل الرموز legend الشكل5-40) لتقليل تاثير تخزين البئر.



الشكل5-40 : طرق فك الالتفاف المختلفة الصريحة explicit- باستخدام بيانات غير حقلية Synthetic data المثال رقم-5

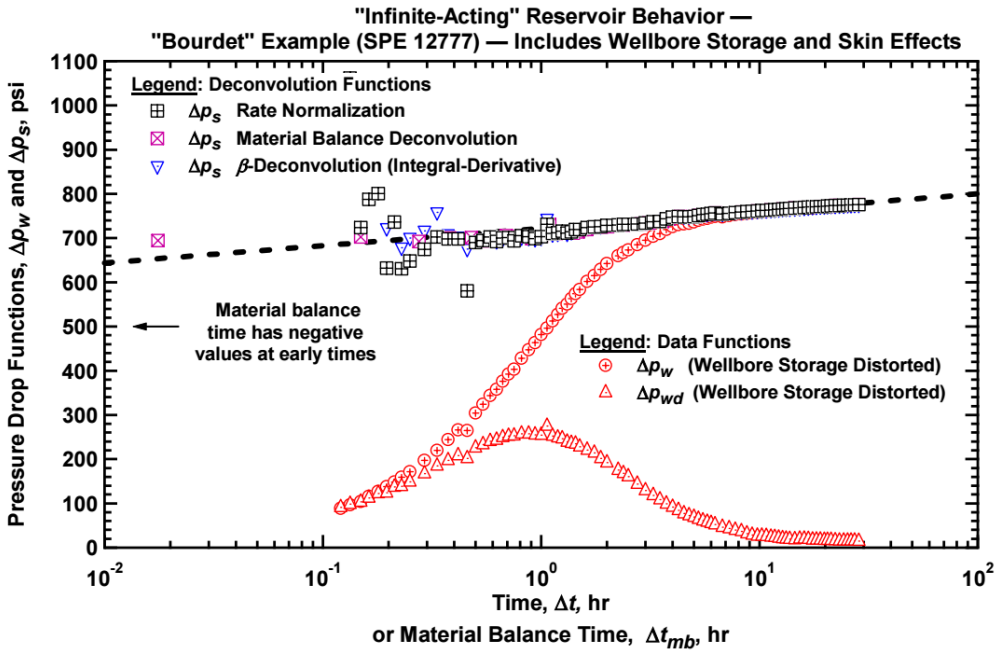
ادناه ملخصً لأداء التقنيات الثلاثة للمثال-5

توحيد المعدل Rate Normalization-RN **:** هنا تؤدي طريقة توحيد المعدلRN المُمثلة نتائجها بالنقاط الخضر في الشكل5-40 إلى نتائج مقبولة ، إذ تتطابق مع الخط الأسود الذي يمثل

سلوك الضغط من دون اي تشويه (تاثير تخزين البئر صفر) في الفترة الوسطى والمتاخرة من الفحص و لكن عند بداية الفحص هنالك انحراف في اتجاه المنحني نحو الاسفل . لذا فالمتوقع عند اجراء التفسير ، تكون النفاذية المحسوبة من الميل بهذه الطريقة مقبولة تمامًا و لكن تقدير قيمة عامل القشرة (في منطقة الانحراف) ستكون غير مؤكدة .

فك الالتفاف بموازنة المادة Material balance Deconvolution : تعمل تقنية فك التفاف موازنة المادة (النقاط الحمراء) بشكل جيد للغاية برغم انحرافها في بعض نقاط الفحص الاولى. هذا الأداء لهذه الطريقة ممتاز ، إذ برغم بساطتها تُعتبر أكثر عملية عند تحليل البيانات المشوهة بسبب WBS.

فك التفاف البيتا β-beta-Deconvolution: تقنية بيتا - Deconvolution أيضًا تعمل بشكل جيد جدًا – (النقاط الزرقاء) و هي الارجح مقارنة مع باقي الطرق .

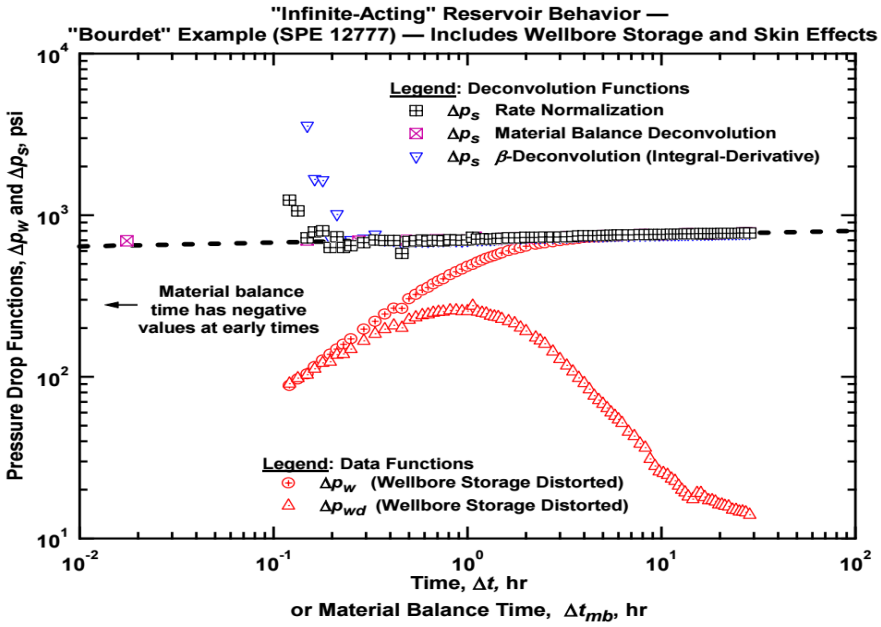


الشكل5-41 : رسم نصف لوغاريتمي لطرق فك الالتفاف المختلفة و الطريقة التقليدية باستخدام بيانات حقلية Field data - المثال رقم-6

مثال-6 توضيحي باستخدام بيانات حقلية - بهبهانين Bahabanian et al. (2006)

في هذا المثال، عرض تحليلي لبيانات فحص تصاعد الضغط لبئر نفطي باستخدام طرق فك الالتفاف الصريحة، RN، MB، β-Deconvolution .

تم عرض نتائج فك الالتفاف Deconvolution (التصحيح لظاهرة تخزين البئر) في الشكل5-41 بمقياس نصف لوغاريتمي semilog و الشكل5-42 بمقياس لوغاريتمي log-log .



الشكل5-42 : رسم لوغاريتمي لطرق فك الالتفاف المختلفة و الطريقة التقليدية باستخدام بيانات حقلية field data - المثال رقم-6

في الشكلين 5-41 و 5-42 ، نلاحظ أن مواصفات و سلوك مخرجات الطرق الثلاثة قد تأثرت في الوقت المبكر جدا من الفحص بمعنى ان لن يكون هناك مناعة كليه لمثل هذه الآثار .

لكن و بصورة عامة فأن المثال-6 يشير إلى :

- نجاح الأساليب الثلاثة في اختزال تاثير تخزين البئر .

- درجة الموثوقية لأي طريقة ستعتمد على جودة البيانات المقاسة . فبينما ان هذه الطرق مدعومة نظريا Theoretically supported تكون معرضة للأخطاء والانحراف بسبب جودة البيانات ، لذا فيجب في الحصول على بيانات بجودة عالية.

الجانب الأكثر إيجابية في هذا المثال هو الحصول على ما يقارب من 1.5 دورة لوغاريتمية من النتائج غير المتاثرة بتخزين البئر (أي أن البيانات في المدى من $0.1<\Delta t<4$ hrs.)و التي يُمكن تحليلها باستخدام طرق التفسير التقليدية يُمكن تحليلها بشكل فعال لايجاد خواص المكمن باستخدام طرق التفسير نصف اللوغاريتمية "التقليدية" أو اللوغاريتمية-اللوغاريتمية).

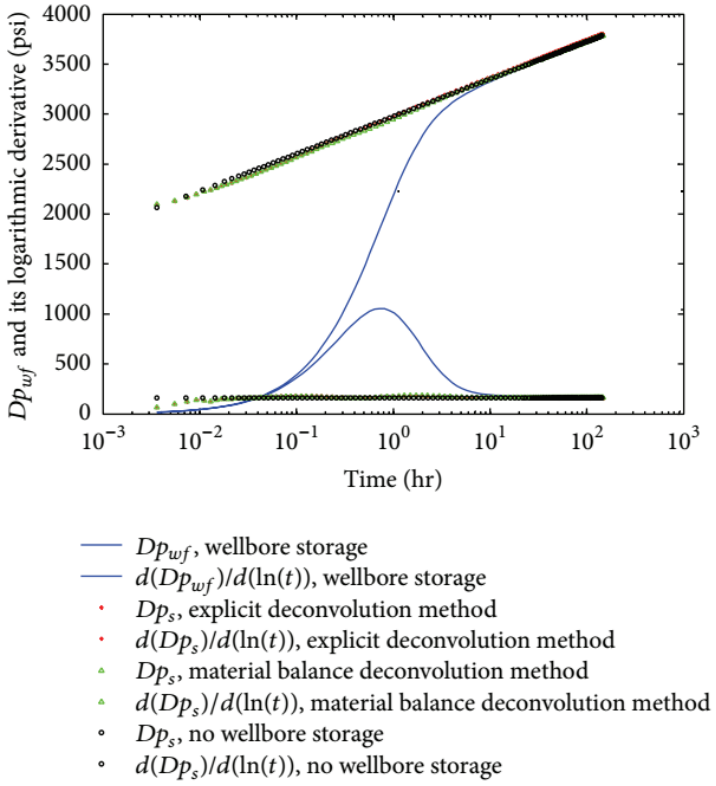
اضافة الى ان تفسير فحوصات الآبار بتقنيات فك الالتفاف -الطرق الثلاثة تستغرق وقت أقصر ، فانها تعمل ايضا على تحسين الموثوقية في مخرجات التفسير مثل االنفاذية و معامل القشرة دون أي وقت أو تكلفة إضافية. لذا، فالطرق هذه تعتبر إضافة جيدة لطرق التفسير الاخرى.

مثال-7 مثال توضيحي باستخدام بيانات حقلية - Razminia K. (2014)

الحالة الأولى هي فحص باستخدام بيانات ضغط اصطناعية لبئر نفط عمودي. المكمن متجانس لا

نهائي الامتداد infinite acting مع تخزين حفرة البئر بشكل مستمر. معامل تخزين حفرة البئر هو Cs = 0.015 bbl/psi. .

استخدام صيغة البيتا في تفكيك الالتفاف deconvolution الصريحة وطريقة تفكيك توازن المادة MB .يتم عرض النتائج في الشكلين 5-43 و 5-44 للمخططات شبه اللوغاريتمية واللوغاريتمية في حالة فحص هبوط الضغط والشكلين 5-45 و 5-46 للمخططات شبه اللوغاريتمية واللوغاريتمية في حالة فحص تصاعد الضغط.



الشكل5-43 : فك الالتفاف Deconvolution لفحص هبوط الضغط في مكمن متجانس

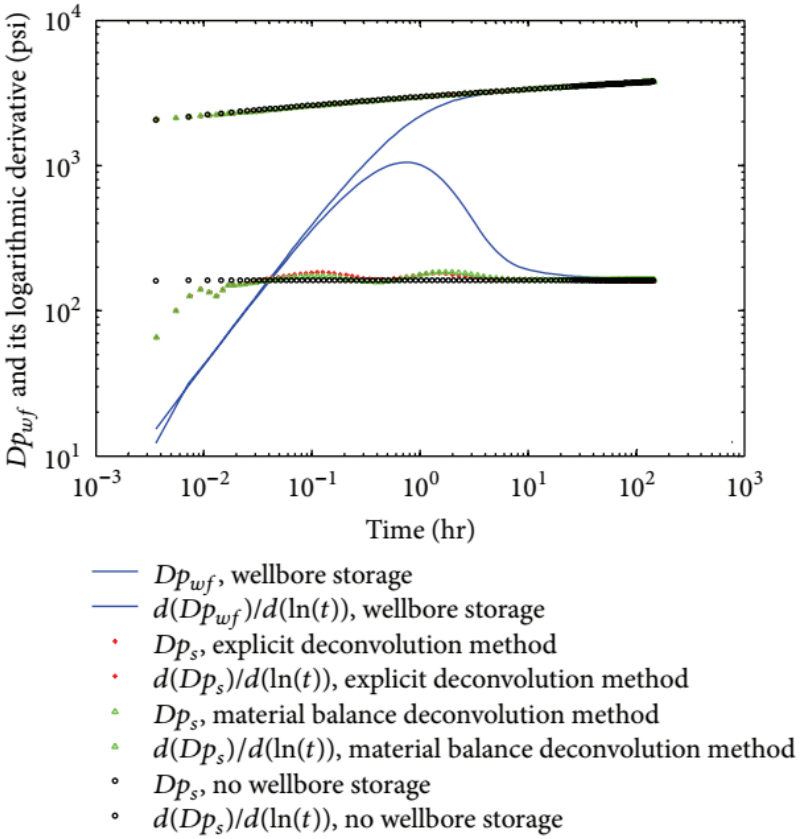
رسم شبه (نصف) لوغاريتمي -المثال رقم-7

بالإضافة إلى الضغوط المفككة deconvolved pressures و مشتقاتها اللوغاريتمية يتم أيضًا رسم استجابات الضغط و مشتقاتها مع و بدون تخزين WBS على الأشكال نفسها لغرض المقارنة.

من خلال عملية فك الالتفاف، تم إزالة تأثيرات تخزين حفرة البئر بحيث يمكن تحديد الجريان الشعاعي في اوقات الفحص المبكرة. تتطابق الضغوط المفككة ومشتقاتها اللوغاريتمية تقريبًا مع الحلول التحليلية التي تهمل تاثير تخزين حفرة البئر، مما يسمح من تقدير معاملات المكمن بدقة.

الحالة الثانية هي فحص هبوط الضغط لبئر نفطي في مكمن مزدوج المسامية dual porosity . يُفترض أن نسبة التخزين (storativity ratio -ω) ومعامل التدفق بين المسامات (inter-

(porosity flow coefficient- λ) يساويان 0.1 10^{-6}،على التوالي، معامل تخزين حفرة البئر الثابت هو Cs = 0.15 bbl/psi.



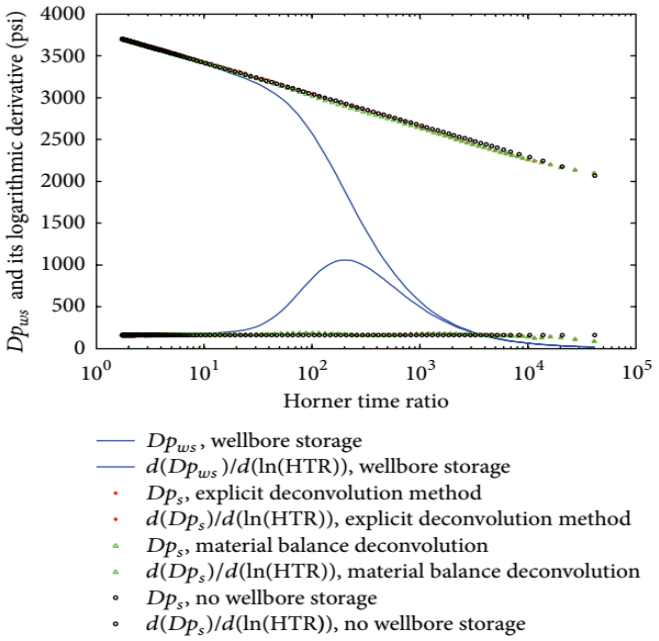
الشكل5-44 : فك الالتفاف Deconvolution لفحص هبوط الضغط في مكمن متجانس

رسم لوغاريتمي -المثال رقم-7

من الملاحظ انه ليس بالامكان تحديد سلوك المسامية المزدوجة المميز للمكمن من بيانات الفحص المتاثرة بحفرة البئر لأن هذا السلوك قد تم إخفاؤه بالكامل عن طريق تخزين حفرة البئر و كما هو موضح في الشكلين 5-47 و 5-48.

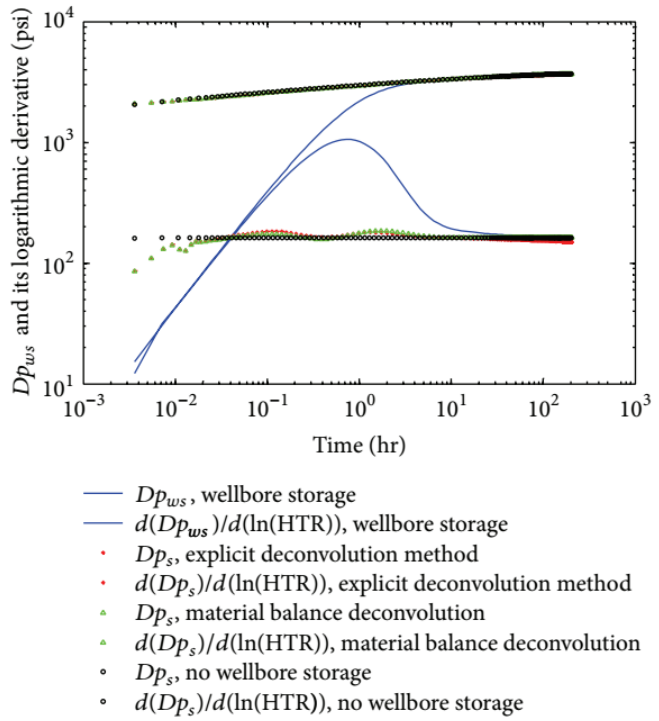
قمنا بتفكيك deconvolved معدل الضغط ، غير المتاثر بتخزين البئر وعُرضت النتائج في الشكلين 5 و6. تتوافق نتائج التفكيك بشكل معقول مع الحل التحليلي. وبعد التفكيك، يمكن التعرف بسهولة على سلوك المسامية المزدوجة من الوادي (و هذا ما يميز و الدال على المكمن المزدوج او الثنائي المسامية) في المشتق اللوغاريتمي للضغط.

من الملاحظ في الاشكال 5-47 و 5-48 و في حال لم تتم إزالة تأثيرات تخزين حفرة البئر في الأوقات المبكرة، فمن الممكن بسهولة تحديد نظام المكمن بشكل غير صحيح على أنه مكمن لا نهائي متجانس (اذ يغطي WBS جزء كبير من بيانات الفحص الدالة على كون المكمن ثنائي المسامية). بعد التصحيح الان بالامكان تحديد خواص المكمن بموثوقية عالية.



الشكل5-45 : فك الالتفاف Deconvolution لفحص تصاعد الضغط في مكمن متجانس

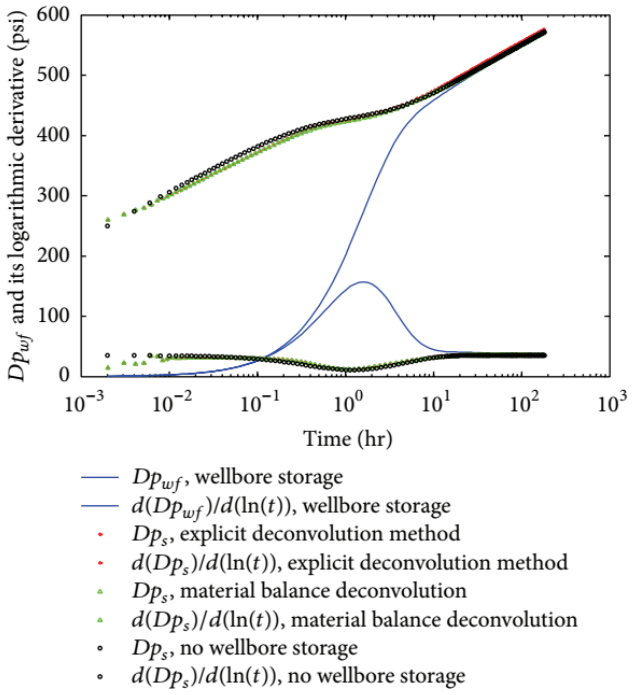
رسم شبه (نصف) لوغاريتمي -المثال رقم-7



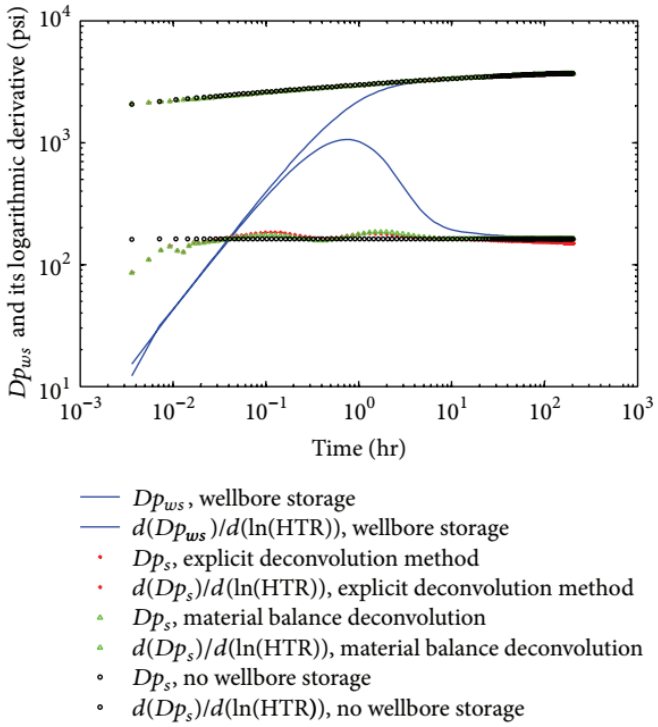
IGURE 4: Deconvolution for a buildup test in a homogeneous

الشكل5-46 : فك الالتفاف Deconvolution لفحص تصاعد الضغط في مكمن متجانس

رسم لوغاريتمي -المثال رقم-7



الشكل5-47 : فك الالتفاف Deconvolution لفحص هبوط الضغط في مكمن مزدوج المسامية Dual porosity رسم شبه (نصف) لوغاريتمي -المثال رقم-7



الشكل5-48 : فك الالتفاف Deconvolution لفحص هبوط الضغط في مكمن مزدوج المسامية Dual porosity رسم لوغاريتمي -المثال رقم-7

Rate Normalization: Deconvolution:	Governing relation(s):	$\frac{\Delta p_{wf}}{q_{wbs,DD}}$ *vs.* t (pressure drawdown case) $\frac{\Delta p_{ws}}{1-q_{wbs,BU}}$ *vs.* Δt (pressure buildup case)
	Conclusion(s):	• Strength: Rate normalization is a reasonably approximate correction. • Weakness: Pressure drop function is in error by a "shift" (*i.e.*, a constant value).
Material Balance Deconvolution:	Governing relation(s):	$\frac{\Delta p_{wf}}{q_{wbs,DD}}$ *vs.* $\frac{N_{p,wbs,DD}}{q_{wbs,DD}}$ (pressure drawdown case) $\frac{\Delta p_{ws}}{1-q_{wbs,BU}}$ *vs.* $\frac{N_{p,wbs,BU}}{1-q_{wbs,BU}}$ (pressure buildup case)
	Conclusion(s):	• Strength: Very good correction, essentially best approximate method for practice. • Weakness: Slight "bump" in correction near end of wellbore storage trend (steep rate change).
β-Deconvolution:	Governing relation(s): (integral-derivative formulation for $\beta(t)$ approximation)	$\Delta p_s \approx \Delta p_w + \frac{\Delta p_{wd}}{(\Delta p_w - \Delta p_{wd})}\Delta p_{wid}$ (general — pressure drawdown or buildup case) where: $\Delta p_{wd} = t\frac{d\Delta p_w}{dt}$ $\Delta p_{wd} = \Delta t\frac{d\Delta p_w}{d\Delta t}$ (pressure buildup) $\Delta p_{wid} = t\frac{d\Delta p_{wi}}{dt}$ where $\Delta p_{wi} = \frac{1}{t}\int_0^t \Delta p_w d\tau$ (pressure drawdown) $\Delta p_{wid} = \Delta t\frac{d\Delta p_{wi}}{d\Delta t}$ where $\Delta p_{wi} = \frac{1}{\Delta t}\int_0^{\Delta t} \Delta p_w d\tau$
	Conclusion(s):	• Strength: The "integral-derivative" formulation (Eq. 5.7a) appears to be most accurate. • Weakness: Erratic at very early times, also needs an exhaustive validation.

الجدول5-6 : ملخص لطرق فك الالتفاف المباشرة Explicit الثلاثة و المقارنة بينها

الجدول5-6 يلخص الطرق الصريحة الثلاث لتصحيح البيانات لتاثير تخزين البئر و المقارنة بينها.

خلاصة

بصورة عامة فك الالتفاف Deconvolution أقوى أداة فيزيائيَّة في تفسير فحوصات الابار يُستخدم عندما يكون:

- الجريان متغير.
- البيانات غير منتظمة.
- تأثير تخزين البئر Wellbore Storage قوي.
- تريد حدود المكمن بدقة.
- تاريخ انتاجي طويل (البيانات طويلة المدى).
- البيانات غير منتظمة (مثل تداخل فترات الجريان والإغلاق او إعادة فتح قبل استقرار الضغط او تسجيل البيانات متباعد او اسباب تشغيلية و غيرها).

لكن سرعة انجاز تفسير الفحص بطيئة , يتحسس الضوضاء في البيانات لكن اقل درجة من طريقة تطابق المنحنيات النوعي Type Curves Matching و يحتاج الى خبرة عالية من قبل المحلل.مثال على التفسير بطريقة فك الالتفاف Deconvolution هو: فون شروتر Von Schroeter , ليفتن Levitan (2005) و البيتا β-Function .

الرموز و المصطلحات Nomencluture

Dimensionless Variables:

C_D = dimensionless wellbore storage coefficient

t_D = dimensionless time

p_D = dimensionless pressure

q_D = dimensionless rate

Field Variables

B_o = oil formation volume factor, RB/STB

c = fluid compressibility, 1/psi

C_2 = arbitrary constant, hr^{-1}

h = net pay thickness, ft

k = formation permeability, md

m_{wbs} = slope of wellbore storage dominated regime, psi/hr

N_p = cumulative oil production, vol

pi = *initial pressure, psia*

p_{wf} = *wellbore pressure, psia*

p_{ws} = *static wellbore pressure, psia*

$P_{wf(\Delta t=0)}$ = *wellbore pressure at the time of shut-in, psia*

p = reservoir pressure, psi

$p_{wf(\Delta t=0)}$ = wellbore pressure at the time of shut-in, psia

q = volumetric production rate, STB/D

RNP = *Rate Normalized Pressure, psi/STB/D*

r = radial distance, ft

s = skin factor

u = Laplace variable

t = producting time, hr

Δt = shut-in time, hr

Greek

γ = Euler's constant, $\gamma \approx 0.557216$ ...

β = "*beta-deconvolution*" variable, hr^{-1}

μ = viscosity, cp

ρ = fluid density, lb/cuft

Subscripts

a = after production period

d = "well-testing" derivative

D = dimensionless quantity

f = to pressure in the formation

i = initial reservoir conditions

i = "well-testing" pressure integral function

n = index number

w = conditions at wellbore radius

Supercripts

$'$ = derivative of a function

References - المصادر

1- Alain C. Gringarten، Imperial C."From Straight Lines to Deconvolution: The Evolution of the State of the Art in Well Test Analysis " ، SPE 102079 .

2- 2006.

3- Al-Ajmi، N.، Ahmadi، M.، Ozkan، E.، and Kazemi، H.: "Numerical Inversion of

4- Laplace Transforms in the Solution of Transient Flow Problems with Discontinuities،" paper SPE 116255 (September، 2008).

5- Anraku، T.، and Horne، R.N: "Discrimination Between Reservoir Models in Well-Test Analysis"، SPE Formation Evaluation، June 1995، 114-121.

6- Baygun B.، Kuchuk F.J.، Arikan O.: "Deconvolution under Normalized Autocorrelation Constraints،" SPEJ 246، September 1997.

7- Cheng Yueming. "Fast-Fourier-Transform-Based Deconvolution for Interpretation of Pressure-Transient-Test Data Dominated by Wellbore Storage"، paper SPE 84471 presented at the 2003 SPE Annual Technical Conference Denver، Colorado، Oct 5-8.

8- Cinar M. et. al.، "A Comparative Study of Recent Robust Deconvolution Algorithms for Well-Test and Production-Data Analysis" paper SPE 102575، presented SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in San Antonio، Texas، U.S.A.، 24–27 September 2006.

9- Fei Wang ، "Processing and Analysis of Transient Pressure from Permanent Down-hole Gauges" Degree of Doctor of Philosophy ، Heriot-Watt University ،2010.

10- Ilk، D.: "Deconvolution of Variable-Rate Reservoir Performance Data Using B-Splines،" Master of Science Thesis، Texas A&M University، December 2005.

11-Jargon J.R. and van Pollen، H.K.: “Unit Response Function From Varying Rate Data،” JPT (August 1965) 965; Trans.، AIME ، 234.
12-Thompson L.G.، Reynolds A.C.: "Analysis of Variable-Rate Well Test Pressure Data Using Duhamel’s Principle،" SPEFE، 453، October 1986.
13-Johnston، J.L.: "Variable Rate Analysis of Transient Well Test Data Using Semi-Analytical Methods" M.S. Thesis، Texas A&M University، College Station، TX (1992).
14-Kuchuk، F. (2009). "Interpretation of simultaneously measured transient flow-rate and pressure data: convolution and Deconvolution". In M. Kamal (Ed.)، Monograph series: Vol.23. Transient well testing (1st ed.) (pp. 477–527). Dallas: Society of Petroleum Engineers(chapter 16).
15-Kuchuk، F.J.: "Gladfelter Deconvolution،" paper SPE 16377 presented at the 1987 SPE California Regional Meeting held in Ventura، California، 8–10 April.
16-Kuchuk، F.، Carter، R.، & Ayestaran، L. (1990). "Deconvolution of wellbore pressure and flow rate". SPE Formation Evaluation، 5(1)، 53–59.
17-Kuchuk F.J. et al.: “Decline Curves from Deconvolution of Pressure and Flow-Rate Measurements for Production Optimization and Prediction،” paper SPE 96002 presented at SPE Annual Technical Conference and Exhibition، 9-12 October 2005، Dallas، Texas.
18-Levitan، M.M.: "Practical Application of Pressure/Rate Deconvolution to Analysis of Real Well Tests،" SPEREE (April 2005) 113.
19-Muskat، M. (1937). "The flow of homogeneous fluids through porous media". Ann Arbor، Michigan: J. W. Edwards، Inc.
20-Odeh، A.S. and Jones، L.G.: "Pressure Drawdown Analysis، Variable-Rate Case،" Trans.، AIME (1965) 234، 960-64.
21-Odeh، A.S.، and Jones،L.G.، "Two-rate Flow Test، Variable-rate Case-Application to Gas-lift and Pumping Wells،" ، Pet. Tech. (Jan. 1974) 93-99; Trans. AIME، 257.
22-Oliver Bahbanian "، Explicit Deconvolution of Wellbore Storage Distorted Well Test Data " MASTER OF SCIENCE، Texas A&M University ،December 2006 .
23-Oliver Bahbanian. ، D. Ilk، N. Hosseinpour – Zonoozi ، and T. A. Blasingame، " Explicit Deconvolution of Wellbore Storage Distorted Well Test Data" SPE 103216، Exhibition held in San Antonio، Texas، U.S.A.، 24–27 September 2006
24-Olivier Houze ،Didier Viturat، Ole S. Fjaera “ Dynamic Data Analysis” v4.12.01،Kappa -2011.

25-Olugbenga Adebanjo، Sunday Tarekakpo، Jude Harrison "Laplace Transform Deconvolution and its Application to the Solution of the Hyperbolic Diffusivity Equation Under Wellbore Boundary Conditions" International Journal of

Research in Engineering، Science and Management Volume-3، Issue-1، January-2020.

26- Omar Rosario، Mauro Martinez ، Carlos Baumann، Mario Ardila، "Applied Buildup Well Test Interpretation: Field Testing of Conventional and Deconvolution Methods" SPE-179008-MS ، presented at the SPE International Conference held in Lafayette، Louisiana، USA، 24–26 February 2016.

27- Onur M.et. al. "An Investigation of Recent Deconvolution Methods for Well-Test Data Analysis" SPE 102575، SPE Annual Technical Conference and Exhibition، San Antonio، Texas، 24–27 September-2006.

28- Onur، M. and Reynolds، A.: "Nonlinear Regression: The Information Content of Pressure and Pressure-Derivative Data"، SPE Journal، Sept. 2002، 243-249.

29- Razminia K.، Hashemi A. Razminia A. ، and Baleanu D. "Explicit Deconvolution of Well Test Data Dominated by Wellbore Storage" ، Hindawi Publishing Corporation، Published 3 April 2014.

30- Sabet M.A.، "Well Test Analysis" Printed in USA by Gulf Publishing Company، Houston،Texas، 1991.

31- Van Everdingen F.، "The skin effect and its influence on the productive capacity of a well،" Journal of Petroleum Technology،vol. 5، no. 6، pp. 171–176، 1953.

32- Hurst، W.: "Establishment of the Skin Effect and Its Impediment to Fluid Flow into a Well Bore،" Pet. Eng. (Oct. 1953) B6–B16.

33- Von Schroeter، T.، Hollaender، F.، and Gringarten، A.C.: "Deconvolution of Well Test Data as a Nonlinear Total Least Squares Problem،" SPEJ (December 2004) 375-390.

34- Winestock، A.G.، and Colpitts، G.P.: "Advances in Estimating Gas Well Deliverability،" J. Cdn. Pet. Tech. (July-Sept. 1965) 111–19.

الفصل السادس

فحص الابار الافقية Horizontal Wells Testing

1-6 المقدمة

في ظل التطور المستمر في تقنيات الحفر وزيادة الحاجة إلى استغلال المكامن النفطية والغازية بكفاءة أعلى، أصبحت عملية حفر الآبار الأفقية (Horizontal Wells) واحدة من أهم الأساليب المستخدمة في صناعة النفط والغاز. تهدف هذه التقنية إلى زيادة مساحة الاتصال بين البئر وطبقة المكمن، مما يساهم في تحسين معدلات الإنتاج وزيادة الاستخلاص الفعّال للموارد الهيدروكاربونية.

ومع هذا التطور في تصميم الآبار، اصبح من الضروري تعديل أساليب الفحص واختبار الآبار لتتناسب مع السلوك الانتاجي للآبار الأفقية، والتي تختلف بشكل كبير عن سلوك الآبار العمودية التقليدية. إذ أن تدفق السوائل من المكمن الى البئر ألافقي يختلف من حيث الديناميكا والنمط الزمني، مما يستدعي استخدام نماذج رياضية وتحليلية متخصصة لتحديد خواص المكمن وتقدير المعدلات الإنتاجية بدقة.

تُعد فحوصات الآبار الأفقية (Horizontal Wells Testing) أداة تحليلية مهمة تساعد المهندسين على تقييم أداء المكمن ، وتحديد خصائصه مثل النفاذية والضغط و الكشف عن الحواجز أو في تقدير التغيرات الجيولوجية، إضافة إلى الكشف عن تأثيرات انتاج الآبار المجاورة أو مناطق التماسك داخل المكمن و بالتالي تلعب هذه الفحوصات دورًا محوريًا في دعم قرارات التطوير والاستثمار في الحقول النفطية.

2-6 المميزات والخصائص الفنية للآبار الأفقية (Horizontal Wells)

تتميز الآبار الأفقية (Horizontal Wells) عن الآبار العمودية (Vertical Wells) بعدة ميزات فنية تجعلها خيارًا استراتيجيًا في تطوير وإنتاج الحقول النفطية والغازية. فيما يلي أبرز هذه الخصائص:

1- زيادة في مساحة التصريف و في تحسين الإنتاجية:

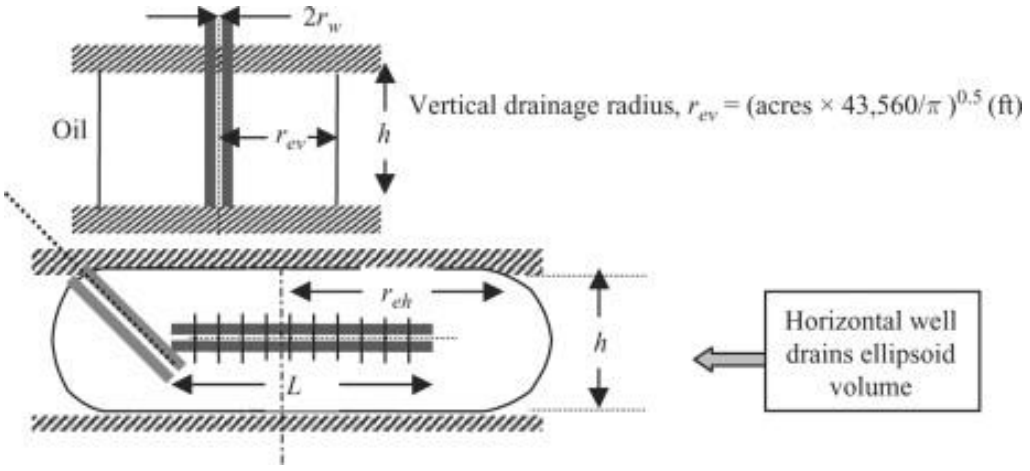
بفضل الطول الأفقي الكبير للبئر داخل الطبقة المكمنية سيؤدي إلى ازدياد ملحوظ في مساحة تماس الموائع المكمنية مع جدار البئر فتزداد مساحة منطقة التصريف بشكل واضح و كبير مقارنة مع تلك في الابار العمودية ، مما يُحسّن معدلات الإنتاج بشكل ملحوظ (الشكل 6-1).

2- أداء أفضل في الطبقات ذات السُمك الصغير:

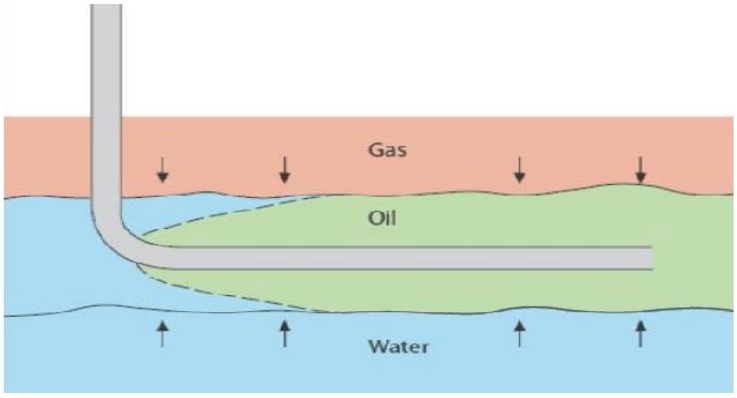
في المكامن ذات السُمك المحدود، فان الآبار الأفقية و بسبب طول المحور المنتج الذي يمتد عبر الطبقة ستوفر إمكانية في استغلال أكبر كمية من الهيدروكربونات مقارنةً بالبئر العمودي.

3- الحد من مشاكل تقمع الغاز والماء(Gas and Water Coning)

الآبار الأفقية يُمكن أن تقلل من ظاهرة تقمع الغاز والماء، إذ يتيح امتداد البئر الأفقي داخل الطبقة المنتجة توزيعًا أكثر توازنًا لتدفق النفوط، وبالتالي في تأخير صعود الموائع غير المرغوب فيها من المياه أو الغاز حول البئر (انظر الشكل 6-2) .



الشكل 6-1 : مقارنة مساحة منطقة تصريف البئر الافقي مع البئر العمودي



الشكل 6-2 : البئر الافقي يقلل من مشكلة تقمع الماء و الغاز

4- التقليل من تأثير الجريان المضطرب (Turbulent Flow) في المكامن الغازية عالية النفاذية

إذ قد تصل سرعة الغاز إلى مستويات تسبب تدفقًا مضطربًا حول جدار البئر العمودي، مما يزيد من خسائر الضغط ويقلل من كفاءة الانتاج. باستخدام البئر الأفقي، تنخفض سرعة الغاز في المناطق القريبة من جدار البئر، مما يساعد على تقليل تأثيرات الجريان المضطرب وتحسين الاستنزاف.

5- زيادة مساحة التماس مع الطبقة المكمنية والشقوق:

يوفر الطول الأفقي للبئر زيادة كبيرة في مساحة التماس بين البئر والطبقة المكمنية، خاصة عند وجود شقوق طبيعية أو صناعية. هذه المساحة الكبيرة تسهم في تحسين قدرة البئر على استخلاص الموائع والانتاج بكفاءة أعلى.

6- دور النفاذية العمودية (k_v) والأفقية (k_h) في تدفق الموائع:

يتطلب تصميم الآبار الأفقية وجود نفاذية عمودية فعالة(k_v) ، إذ تلعب كل من k_v وطول البئر الأفقي دورًا حاسمًا في تعزيز إنتاجية البئر الافقي.

في الجزء العمودي من تدفق الموائع (من الأعلى والأسفل نحو البئر الافقي)، تكون النفاذية العمودية هي العامل المؤثر بشكل رئيسي.

أما في الجزء الجانبي من التدفق (في اتجاه الأفقي)، فإن النفاذية الأفقية (k_h) هي العامل الرئيسي. و بالتالي، فإن كلا النوعين من النفاذية يشاركان بشكل مباشر في تحسين أدائية البئر الأفقي.

3-6 أهداف فحوصات الآبار الأفقية

عبر تحليل فحوصات الآبار الأفقية، يُمكن تحديد عدد من المعلمات الأساسية التي تساعد في تقييم أداء المكمن وتصميم استراتيجيات التطوير، ومنها:

- معامل تخزين البئر(Wellbore Storage Coefficient) .
- النفاذية العموديةVertical Permeability)، (k_v) .
- النفاذية الأفقيةHorizontal Permeability)، (k_h) .
- نطاق التغيرات في النفاذية(Minimum and Maximum Permeability Zones) .
- معامل الضرر أو "القشرة(Skin Factor) " .
- توزيع الضغط داخل المكمن .
- وجود الحواجز أو الحدود(Boundaries) .
- تأثير الطول الأفقي للبئر على الأداء .

4-6 محددات استخدام الآبار الأفقية

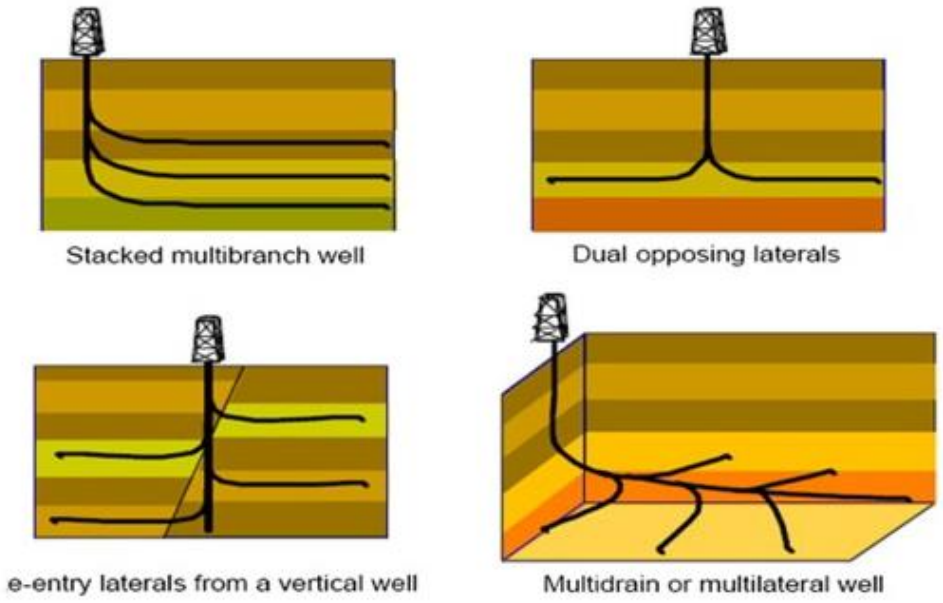
1- ارتفاع تكاليف الحفر : تتفوق تكاليف حفر الآبار الأفقية على تكاليف الحفر العمودي بنسبة تتراوح بين 1.4 إلى 3 مرات، وخاصةً في حالة كون البئر هو أول بئر أفقي يتم حفره في الحقل. ومع اكتساب الخبرة وفهم طبيعة التكوينات، تقل هذه التكاليف تدريجيًا.

2- إنتاج من طبقة واحدة فقط : عادةً ما يتم تصميم البئر الأفقي لإنتاج الموائع من طبقة مكمنية واحدة. إلا أن هذه المشكلة تمت معالجتها باستخدام تقنيات متقدمة مثل الآبار الأفقية متعددة الأذرع (Multibranch Horizontal Wells) التي تسمح بإنتاج الموائع من عدة طبقات عبر بئر واحد (انظر الشكل 6-3) .

5-6 معرقلات تفسير فحوصات الآبار الأفقية(Horizontal Well Testing)

يُعتبر تفسير فحوصات الآبار الأفقية أكثر تعقيدًا من تفسير فحوصات الآبار العمودية ، وذلك بسبب:

1- بعض الافتراضات غير واقعية في النماذج الرياضية: معظم النماذج المستخدمة في تحليل فحوصات الآبار الأفقية تفترض أن البئر أفقي تمامًا و موقعه في مركز الطبقة المكمنية. في الواقع، غالبًا ما تحدث انحرافات أثناء عملية الحفر تؤثر على وضعية البئر ، مما تؤثر على قراءات الضغط المسجلة عبر الفحص.



الشكل 6-3 : تطور حفر الابار الافقية من ذراع واحد الى متعددة الاذرع

2- صعوبة تحديد طول البئر الفعلي المنتج: لا يساهم كامل طول البئر الأفقي في الإنتاج، وقد يكون هناك أجزاء منه غير فعّالة بسبب عدم اتصالها جيدًا بالمكمن أو بسبب وجود تغيرات جيولوجية محلية.

3- العوامل المؤثرة على استجابة الضغط: إذ يتأثر سلوك الضغط في الآبار الأفقية بكل من:

طول البئر الأفقي ، سُمك الطبقة المكمنية ، نسبة النفاذية العمودية إلى الأفقية (k_v/k_h)

6-6 تقييم وتحليل بيانات فحوصات الآبار الأفقية:

عند تحليل بيانات فحوصات الآبار الأفقية، يلزم اتباع منهجية تحليلية دقيقة تأخذ بعين الاعتبار الجوانب الاتية:

1- تمييز أنماط الجريان (Flow Regimes Identification)

تختلف أنماط الجريان في الآبار الأفقية جوهرياً عن تلك في الآبار العمودية . فبينما يعتمد تفسير الآبار العمودية بشكل أساسي على مرحلة الجريان غير المستقر - (Unsteady State Flow USS)عبر المدة المتوسطة للفحص(Intermediate Flow Region - IRF) ، فإن الآبار الأفقية تظهر عادةً أربعة أنماط جريان مميزة أو أكثر. تتحدد هذه الأنماط عبر التفاعل المعقد بين خصائص البئر (مثل طول المقطع الأفقي) ومواصفات المكمن (مثل التباين الرأسي في النفاذية).

2- يتطلب تحليل الآبار الأفقية استخدام نماذج رياضية متخصصة تعتمد على أنظمة معادلات تفاضلية جزئية -Partial differentiation . و لكل نمط جريان هنالك معادلات تحليلية خاصة تعكس السلوك الديناميكي للسوائل في المكمن. غالباً ما يستلزم تطبيق طرق عددية تكرارية (Iterative Numerical Methods) تتضمن محاكاة متعددة المراحل للحصول على بعض المعاملات المكمنية مثل النفاذية العمودية والأفقية.

3- تقييم موثوقية النتائج (Results Reliability Assessment) :

في كثير من الحالات ،تتميز نتائج تحليل الآبار الأفقية بعدم الوحدانية (Non-uniqueness) و هذا يتطلب:

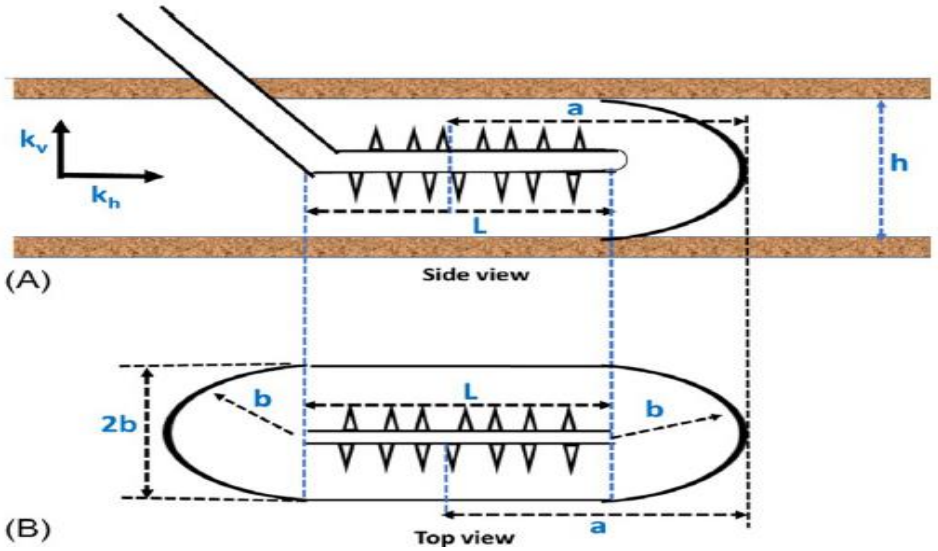
* تحليل الحساسية (Sensitivity Analysis) لتقييم تأثير تغير المعاملات على النتائج.

* التحقق عبر المحاكاة الرقمية (Numerical Simulation) باستخدام المعطيات المستخلصة و تطبيق تقنيات المطابقة التاريخية (History Matching) للتأكد من نسق النتائج مع البيانات الفعلية.

ملاحظة : يُعتبر التكامل بين التفسير التحليلي والمحاكاة الرقمية أمراً بالغ الأهمية لضمان دقة النتائج في الآبار الأفقية ، خاصة في المكامن غير المتجانسة (Heterogeneous Formations).

7-6 الجريان المستقر للابار الافقية Steady-State Flow-SSF

ممكن التنبؤ بانتاجية الابار الافقية عبر الجريان المستقر Steady State Flow-SSF باستخدام العديد من الحلول المتوفرة في مصادر متعددة وكما يأتي:



الشكل 22-4 : الشكل الهندسي لمنطقة تصريف البئر الافقي

1-7-6 طريقة جوشي *Josh Method(1991)*:

تم تطوير هذه الطريقة بواسطة S.D. Joshi عام 1991 كنموذج رياضي يُستخدم لحساب معدل إنتاج البئر الأفقي في ظل ظروف جريان مستقر (Steady-State Flow).

في هذه الطريقة، يتم افتراض أن منطقة تصريف البئر الأفقي تأخذ شكل " بيضوي " (Elliptical Drainage Area) حول المحور الأفقي للبئر(الشكل6-4) و يكون محوره موازي للطبقة المنتجة . التدفق نحو البئر الأفقي هو مزيج بين تدفق شعاعي بالقرب من البئر

(المقطع العمودي يقطع محور البئر الافقي) وتدفق خطي على طول المحور الأفقي. في حين ان الشكل الهندسي لمنطقة تصريف البئر العمودي اسطواني عمودي و محوره عمودي يقطع الطبقة المنتجة.

المعادلة رقم-4 تمثل معادلة جوشي Joshi (1991) في تحديد معدل انتاج البئر الافقي . ان مساحة الشكل البيضوي يساوي:

$$A = \frac{\pi ab}{43,560} \quad \text{---------- 1}$$

إذ ان a تساوي نصف طول المحور الرئيسي لمنطقة التصريف البيضوية الشكل6-4 و تساوي:

$a =$ half the major axis of drainage ellipse

$$a = \frac{L}{2} + b \quad \text{---------- 2}$$

و b تمثل نصف قطر الجزء نصف الدائري للشكل البيضوي الشكل6-4 .

A = drainage area، acres

L = Length of the horizontal well، ft

ft،b = half minor axis of an ellipse

نصف قطر منطقة تصريف البئر الافقي r_{eh} يساوي:

$$r_{eh} = \sqrt{\frac{43,560\,A}{\pi}} \quad \text{---------- 3}$$

ft،reh = drainage radius of the horizontal well

لحالة المكمن المتجانس(المتماثل) Isotropic reservoir ، إذ النفاذية العمودية تساوي الافقية $k_v=k_h$ ، فان معدل جريان البئر الافقي حسب جوشي يساوي:

$$q_h = \frac{0.007078 k_h h(\bar{p}_R - p_{wf})/(\mu_o \beta_o)}{\ln\left[\frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2}\right] + (h/L)\ln[h/(2r_w)]} \quad \text{---------- 4}$$

و ان a تساوي :

$$a = (L/2)\left[0.5 + \sqrt{0.25 + (2r_{eh}/L)^4}\right]^{0.5} \quad \text{---------- 5}$$

لحالة المكمن غير المتجانس An-isotropic reservoir **إذ ان** يعني $k_v \neq k_h$ ، فان معدل جريان البئر الافقي يساوي:

$$q_h = \frac{0.007078 k_h h(\bar{p}_R - p_{wf})/(\mu_o \beta_o)}{\ln\left[\frac{a+\sqrt{a^2-(L/2)^2}}{L/2}\right] + \left(\frac{\beta^2 h}{L}\right)\ln[h/(2r_w)]} \quad \text{---------- 6}$$

المعامل بيتا β يساوي:

$$\beta = \sqrt{\frac{k_h}{k_v}} \quad \text{---------- 7}$$

2-7-6 طريقة جيجر و جماعته Giger etal. Method(1984)

تم تطوير هذه الطريقة في جامعة "لاوسان" بسويسرا، كجزء من الدراسات النظرية والتجريبية حول أداء الآبار الأفقية. تهدف هذه الطريقة إلى حساب نسبة التحسن في الإنتاجية (Productivity Index Ratio) بين البئر الأفقي والعمودي، مع الأخذ في الاعتبار:

خصائص المكمن ، موقع البئر داخل الطبقة ، طول البئر الأفقي(L_h) ، سماكة المكمن(h) ، النفاذية الأفقية والعمودية k_h و k_v

حسب طريقة جيجر Giger للمكمن المتجانس ($k_v=k_h$) ، فان معدل جريان البئر الافقي يساوي:

$$q_h = \frac{0.007078 k_h L(\bar{p}_R - p_{wf})/(\mu_o \beta_o)}{(L/h)\ln\left[\frac{1+\sqrt{1-[L/(2r_{eh})]^2}}{L/(2r_{eh})}\right] + \ln[h/(2\pi r_w)]} \quad \text{---------- 8}$$

- و لحالة المكمن غير المتجانس ، $k_v \neq k_h$ فان معدل جريان البئر الافقي يساوي:

$$q_h = \frac{0.00708 k_h (\bar{p}_R - p_{wf})}{\mu_o B_o\left[\left(\frac{1}{h}\right)\ln\left[\frac{1+\sqrt{1-[L/(2r_{eh})]^2}}{L/(2r_{eh})}\right] + \left(\frac{\beta^2}{L}\right)\ln\left(\frac{h}{2r_w}\right)\right]} \quad \text{---------- 9}$$

توصل جيجر ايضا الى ربط معامل انتاجية البئر الافقي بانتاجية البئر العمودي وكما يأتي:

$$J_h/J_v = \frac{\ln(r_{ev}/r_w)}{\ln\left[\frac{1+\sqrt{1-(L/(2r_{eh})^2}}{L/(2r_{eh})}\right] + (h/L)\ln[h/(2\pi r_w)]} \quad \text{---------- 10}$$

إذ ان

$J_h = q/\Delta P$ --------- 11

3-7-6 طريقة بوريسوف Borisov Method(1984)

طور بوريسوف (Borisov) واحدة من أول النماذج الرياضية لحساب إنتاجية الآبار الأفقية

في المكامن المتجانسة، مع التركيز على الجريان المستقر (Steady-State) إذ يفترض ان شكل منطقة التصريف أسطواني (دائري في المستوى الأفقي).

حسب طريقة بوريسوف فان معدل جريان البئر الافقي لحالة المكمن المتجانس Isotropic reservoir يساوي:

$$q_h = \frac{0.007078 k_h h(\bar{p}_R - p_{wf})/(\mu_o \beta_o)}{[\ln(4r_e/L) + (h/L)\ln(h/(2\pi r_w))]} \quad \text{---------- 12}$$

h = thickness, ft
k_h = horizontal permeability, md
k_v = vertical permeability, md
L = length of the horizontal well, ft
r_{eh} = drainage radius of the horizontal well, ft
r_w = wellbore radius, ft
J_h = productivity index, STB/day/psi

طريقة بوريسوف توفر حلاً تحليليًا بسيطًا لتقدير إنتاجية الآبار الأفقية في المكامن المتجانسة، لكنها أقل دقة من النماذج الاخرى (مثل جيجر أو جوشي) في الحالات المعقدة. تُستخدم كمرجع أكاديمي أو خط أساس للمقارنات.

4-7-6 طريقة رينارد و ديبى (1990) *Renard and Dupay Method*

طور رينارد وديبي نموذجًا متقدمًا لحساب إنتاجية الآبار الأفقية، مع تحسينات مهمة على نماذج جيجر- 1984 و بوريسوف – 1964، تتميز هذه الطريقة بـ:

- مراعاة تأثير الضرر (Skin Effect) حول البئر الأفقي.
- تحسين دقة الحسابات في المكامن غير المتجانسة.
- إدخال مفهوم نصف القطر المكافئ (Equivalent Radius) للبئر الأفقي.

لحالة المكمن المتجانس(المتماثل) Isotropic reservoir ($k_v=k_h$) فان معدل جريان البئر الافقي بحسب طريقة رينارد و ديبي يساوي:

$$q_h = \frac{0.00708 h k_h \ (\bar{p}_R - p_{wf})}{\mu_o B_o \left[\cosh^{-1}\left(\frac{2a}{L}\right) + \left(\frac{h}{L}\right)\ln\left(\frac{h}{2\pi r_w}\right)\right]} \quad \text{---------- 13}$$

- **لحالة المكمن غير متجانس** Anisotropic reservoir ، فان معدل جريان البئر الافقي يساوي:

$$q_h = \frac{0.00708 h k_h \ (\bar{p}_R - p_{wf})}{\mu_o B_o \left[\cosh^{-1}\left(\frac{2a}{L}\right) + \left(\frac{\beta h}{L}\right) \ln\left(\frac{h}{2\pi r'_w}\right)\right]} \quad \text{---------- 14}$$

- نصف القطر r_w' يساوي:

$$r'_w = \frac{(1+\beta)\, r_w}{2\beta} \quad \text{---------- 15}$$

بصورة عامة عند المقارنة بين الطرق الاربعة المذكورة في الفقرات اعلاه فانها تُظهر فروقات بسيطة و السبب يعود الى اختلاف الحد الاخير (h/L lnπ) في المقام في معادلات الجريان (جوشي 1991). لاحظ في حال ان الطول الافقي اكبر بكثير من سُمك الطبقة فان هذا الحد الاخير سيهمل من المعادلة رقم- 12.

جوشي ادخل مصطلح نصف القطر الفعال(او الظاهري) للبئر الافقي $\mathbf{r'_w}$ لغرض تبيان فعالية البئر الافقي بالمقارنة مع البئر العمودي . نصف القطر الفعال $\mathbf{r'_w}$ يمثل نصف القطر المطلوب للبئر العمودي لكي ينتج نفط بمعدل مماثل لمعدل انتاج البئر الافقي. يتم تحديده عبر فرض مساواة مؤشر الانتاجية لكلا من البئر الافقي J_h و البئر العمودي J_v اي ان $J_v = J_h$ و قد توصل الى ان نصف القطر الفعال للبئر الافقي يساوي:

$$r'_w = \frac{r_{eh}\,(L/2)}{a\left[1+\sqrt{1-(L/2a)^2}\right]\left[h/(2r_w)\right]^{h/L}} \quad \text{---------- 22}$$

و ان a تساوي:

$$a = \left(\frac{L}{2}\right)\left[0.5+\sqrt{0.25+(2r_{eh}/L)^4}\right]^{0.5} \quad \text{---------- 23}$$

نصف قطر منطقة تصريف البئر الافقي r_{eh} يساوي:

$$r_{eh} = \sqrt{\frac{43\,560A}{\pi}}$$

في حالة كون المكمن غير متجانس anisotropic reservoir فان $\mathbf{r'_w}$ يساوي :

$$r'_w = \frac{r_{eh}(L/2)}{a\left[1+\sqrt{1-(L/(2a))^2}\right]\left[\beta h/(2r_w)\right]^{\beta h/L}} \quad \text{---------- 24}$$

❖ ان نصف قطر البئر الفعال بدلالة عامل القشرة يساوي:

$$r'_w = r_w \exp(-s) \quad \text{---------- 16}$$

❖ اذن ممكن حساب معامل القشرة من المعادلة رقم- 16 و كما يأتي:

$$s = -\ln\left(\frac{r'_w}{r_w}\right) \quad \text{---------- 17}$$

لاحظ ان قيمة s ممكن ان تكون سالبة او موجبة.

s < 0، s > 0 and for stimulated well،For damaged well

إذ ان

A = drainage area of the horizontal well, acres

a = half the major axis of drainage ellipse

L = horizontal well length, ft
h = reservoir height, ft
r_w = wellbore radius, ft

μ_o = oil viscosity, cP
β_o = oil formation volume factor, rb/stb

q_h = horizontal well flow rate, stb/day
$J_h = q_h/\Delta p$ = productivity index for horizontal oil well, stb/(day/psi)
$J_v = q_v/\Delta p$ = productivity index for unstimulated vertical index, stb/ (day/psi)

r_{ev} = drainage radius of vertical well, ft $= \sqrt{(\text{acres} \times 43{,}560)/\pi}$ ---------- 18

r_{eh} = drainage radius of horizontal well, ft $= \sqrt{(2 \times \text{acres} \times 43{,}560)/\pi}$ ---------- 19

<u>مثال-1</u>

بئر نفطي افقي بطول .L=1250 ft تتوفر المعلومات الاتية:

$h = 170\,\text{ft};\ r_w = 0.39\,\text{ft};\ \phi = 4.9\%;\ \beta_o = 1.275\ \text{rb/stb};\ \mu_o = 0.75\,\text{cP}$

vertical well drains 80 acres $k_v = k_h = 85\,\text{mD}$

المطلوب :حساب دليل الانتاجية *Productivity index* للبئر الافقي بطرق مختلفة؟؟

<u>الحل:</u>

بما ان مساحة منطقة تصريف البئر drainage area العمودي تساوي A=80 acres ، نفترض ان المساحة التي يصرفها البئر الافقي ضعف مساحة البئر العمودي و لتكن A=160 acre

- نصف قطر منطقة تصريف البئر العمودي يساوي:

$$\text{Area of a circle} = \pi r_{ev}^2 = 80\ \text{acres} \times 43{,}560\,\text{ft}^2/\text{acre} \Rightarrow r_{ev} = 1053\,\text{ft}$$

- دليل الانتاجية productivity index للبئر العمودي يساوي:

$$J_v = \frac{0.007078 k_h h}{\mu_o \beta_o \ln(r_{ev}/r_w)}$$

$$= \frac{0.007078(85)(170)}{0.75(1.275)\ln(1053/0.39)}$$

$$J_v = 13.54 \text{ stb/(day/psi)}$$

- نصف قطر منطقة تصريف البئر الافقي يساوي:

$$\text{Area of a circle} = \pi r_{eh}^2 = 160 \times 43{,}560 \text{ ft}^2/\text{acre} \Rightarrow r_{eh} = 1489 \text{ ft}$$

- طريقة جوشي *Joshi Method*:

$$a = (L/2)\left[0.5 + \sqrt{0.25 + (2r_{eh}/L)^4}\right]^{0.5}$$

$$= (1250/2)\left[0.5 + 0.25 + (2r_{eh}/L)^4\right]^{0.5} \cong 1556$$

دليل الانتاجية للبئر الافقي J_h يساوي:

$$J_h = q_h/(\bar{p}_R - p_{wf}) = \frac{0.007078 k_h h\ /(\mu_o \beta_o)}{\ln\left[\dfrac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2}\right] + (h/L)\ln[h/(2r_w)]}$$

$$= \frac{0.007078 \times 85 \times 170/(0.75 \times 1.275)}{\ln\left[\dfrac{1556 + \sqrt{1556^2 - (1250/2)^2}}{1250/2}\right] + (170/1250)\ln[170/(2 \times 0.39)]}$$

$$= \frac{106.96}{1.5658 + 0.7323} = 46.54 \text{ stb/(day/psi)}$$

- طريقة جيجر و جماعته *Giger etal. Method*

$$J_h = q_h/(\bar{p}_R - p_{wf}) = \frac{0.007078 k_h L/(\mu_o \beta_o)}{(L/h)\ln\left[\dfrac{1 + \sqrt{1 - [L/(2r_{eh})]^2}}{L/(2r_{eh})}\right] + \ln[h/(2\pi r_w)]}$$

$$= \frac{0.007078 \times 85 \times 1250/(0.75 \times 1.275)}{(1250/170)\ln\left[\dfrac{1 + \sqrt{1 - [1250/(2 \times 1489)]^2}}{1250/(2 \times 1489)}\right] + \ln[170/(2 \times (22/7) \times 0.39)]}$$

$$= \frac{786.44}{7.3529 \ln\left[\frac{2.9076}{0.4197}\right] + \ln(69.3473)} = \frac{786.44}{7.3529 \times 1.5141 + 4.2391}$$

$$= 51.16 \text{ stb/(day/psi)}$$

- طريقة بوريسوف *Borisov Method*

$$J_h = q_h/(\bar{p}_R - p_{wf}) = \frac{0.007078 k_h h/(\mu_o \beta_o)}{\ln(4r_e/L) + (h/L)\ln(h/(2\pi r_w))}$$

$$= \frac{0.007078 \times 85 \times 170/(0.75 \times 1.275)}{\ln(4 \times 1489/1250) + (170/1250)\ln(170/(2 \times (22/7) \times 0.39))}$$

$$= \frac{106.95}{1.5613 + 0.1360 \times 4.2391}$$

$$= 49.89 \text{ stb/(day/psi)}$$

لغرض المقارنة فقد أُدرجت نتائج الطرق الثلاثة في الجدول 6-1 ادناه:

Methods	Productivity index, J_h (stb/day/psi)	J_h/J_v ratio	Areal productivity index, J_h/acre (stb/(day/psi/acre))
Joshi	46.54	3.44	0.582
Giger	51.16	3.78	0.640
Borosov	49.89	3.68	0.624

جدول 6-1 :مقارنة J_h/J_v بطرق مختلفة للمثال رقم-1

لاحظ ان نتائج الحسابات اعلاه تختلف بعض الشيء بسبب الاساس النظري لكل طريقة . في المثال يفترض ان معامل القشرة s مساوي الى الصفر.

مثال-2

بئر أفقي طوله 2000 قدم ينتج من مكمن بمساحة تصريف تقدر A=160 acres ، المكمن يتميز بعدم التجانس-anisotropic و تتوفر له الخواص الاتية:

$$k_h = 10 \text{ mD};\ h = 45 \text{ ft};\ \mu_o = 0.45 \text{ cP};\ \beta_o = 1.225 \text{ rb/stb};\ r_w = 0.39 \text{ ft}.$$

المطلوب : حساب دليل الانتاجية J_h بالطرق : جوشي و رينارد ؟؟و لنسب النفاية العمودية الى الافقية الاتية:

$$k_v/k_h = 0.1,\ 0.5 \text{ and } 1.0$$

الحل

- نهيء بعض المعاملات التي تدخل في معادلات حساب دليل الانتاجية J_h و هي:
- قيمة العامل بيتا β ولكل النسب اعلاه:

$$\beta = \sqrt{\frac{k_h}{k_v}} = \sqrt{\frac{1}{0.1}} = 3.162, \qquad \beta = \sqrt{\frac{k_h}{k_v}} = \sqrt{\frac{1}{0.5}} = 1.414, \ \beta = \sqrt{\frac{k_h}{k_v}} = \sqrt{\frac{1}{1}} = 1$$

- نصف قطر البئر الظاهري r_w' ولكل النسب اعلاه:

$$r'_w = \frac{1+\beta}{2\beta} r_w = \frac{1+3.162}{2(3.162)}(0.39) = 0.2567,$$

$$r'_w = \frac{1+\beta}{2\beta} r_w = \frac{1+1.414}{2(1.414)}(0.39) = 0.3329,$$

$$r'_w = \frac{1+\beta}{2\beta} r_w = \frac{1+1}{2(1)}(0.39) = 0.39$$

- نحسب النسب الاتية:

$$\frac{\beta h}{2r_w} = \frac{3.162(45)}{2 \times 0.39} = 182.42, \qquad \frac{\beta h}{2r_w} = \frac{1.414(45)}{2 \times 0.39} = 81.58, \ \frac{\beta h}{2r_w} = \frac{1.0(45)}{2 \times 0.39} = 57.69$$

$$\frac{\beta h}{L} = \frac{3.162(45)}{2000} = 0.0711, \ \frac{\beta h}{L} = \frac{1.414(45)}{2000} = 0.0318, \ \frac{\beta h}{L} = \frac{1(45)}{2000} = 0.0225$$

$$\frac{2a}{L} = \frac{2(1665)}{2000} = 1.665,$$

$$\frac{h}{2\pi r_w} = \frac{45}{2 \times (22/7) \times 0.39} = 18.3566$$

❖ الان يُمكن حساب دليل الانتاجية J_h لكل النسب وكما يأتي:

طريقة رينارد و ديبوي Renard and Dupuy method

- للنسبة $k_v/k_h=0.1$

$$J_h = \frac{0.007078 \times 10 \times 45}{0.45(1.225)} \left[\frac{1}{\cosh^{-1}(1.665) + (0.0711)\ln[27.89]} \right]$$

$$= 5.778 \left[\frac{1}{1.0974 + 0.0711(3.3283)} \right] = 4.33 \text{ stb/(day/psi)}$$

- للنسبة $k_v/k_h=0.5$

$$J_h = \frac{0.007078 \times 10 \times 45}{0.45(1.225)} \left[\frac{1}{\cosh^{-1}(1.665) + (0.0318)\ln[21.51]} \right]$$

$$= 5.778\left[\frac{1}{1.0974 + 0.0318(3.0685)}\right] = 4.84\,\text{stb/(day/psi)}$$

- للنسبة $k_v/k_h=1.0$ (المكمن متجانس $k_v=k_h$)

$$J_h = \frac{0.007078 \times 10 \times 45}{0.45(1.225)}\left[\frac{1}{\cosh^{-1}(1.665) + (0.0225)\ln[18.3566]}\right]$$

$$= 5.778\left[\frac{1}{1.0974 + 0.0225(2.9100)}\right] = 4.97\,\text{stb/(day/psi)}$$

Joshi method طريقة جوشي

- للنسبة $k_v/k_h=0.1$

$$J_h = \frac{q_h}{\Delta p} = \frac{0.007078 \times 10 \times 45}{0.45(1.225)\ln\left[\frac{1665 + \sqrt{1665^2 - (2000/2)^2}}{2000/2}\right] + (0.0711)\ln[182.42]}$$

$$= \frac{5.778}{1.0974 + 0.3702} = 3.94\,\text{stb/(day/psi)}$$

- للنسبة $k_v/k_h=0.5$

$$J_h = \frac{q_h}{\Delta p} = \frac{0.007078 \times 10 \times 45}{0.45(1.225)\ln\left[\frac{1665 + \sqrt{1665^2 - (2000/2)^2}}{2000/2}\right] + (0.0318)\ln[81.58]} = 4.67$$

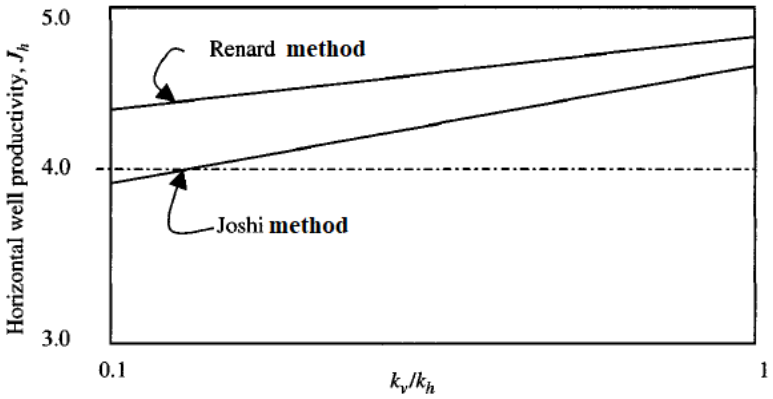
- للنسبة $k_v/k_h=1.0$

$$J_h = \frac{q_h}{\Delta p} = \frac{0.007078 \times 10 \times 45}{0.45(1.225)\ln\left[\frac{1665 + \sqrt{1665^2 - (2000/2)^2}}{2000/2}\right] + (0.0225)\ln[57.69]} = 4.86$$

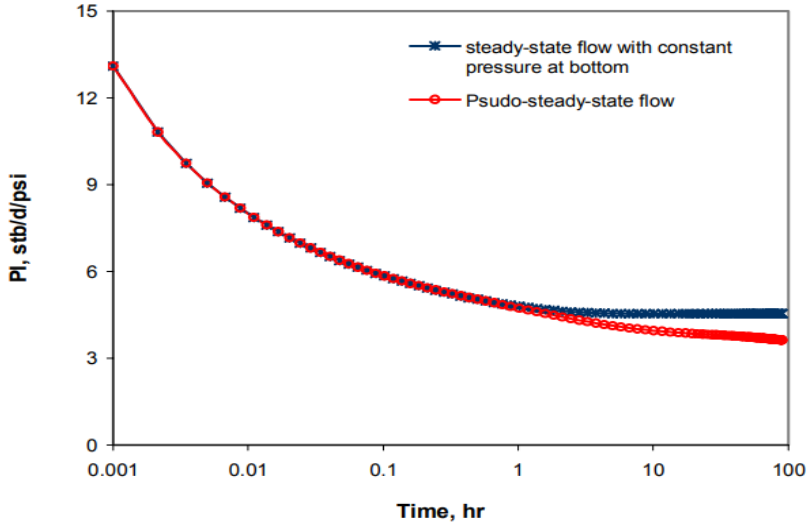
ملخص النتائج أُدرجت في الجدول6-2 وفي الشكل6-5 :

	Productivity Index J_h		
Method	$k_v/k_h = 0.1$	$k_v/k_h = 0.5$	$k_v/k_h = 1.0$
Renard and Dupuy	4.43	4.86	4.97
Joshi	3.94	4.67	4.86

جدول 2-6 :نتائج حسابات المثال رقم-2



الشكل 6-5 : مقارنة دليل انتاجية البئر الافقي بطريقتي رينارد Renard و جوشي Joshi



الشكل 6-6 : مقارنة دليل انتاجية البئر الافقي مع الوقت لطوري الجريان المستقر SSF و شبه المستقر PSS

نلاحظ من الجدول 6-2 و الشكل 6-5 انه بزيادة النسبة k_v/k_h يزداد دليل الانتاجية و يبلغ اقصى قيمة له عندما تتساوى $k_v=k_h$.

- ان دليل انتاجية البئر الافقي J_h يثبت مع الوقت لحالة الجريان المستقر الشكل6-6، لكون ضغط الجريان يستقر في قاع البئر بفعل وجود دعم للضغط المكمني. في حين يقل دليل الانتاجية لطور الجريان شبه المستقر الشكل6-6 و ينحرف نوعا ما عن حالة الاستقرار. و لكون حالة طور الجريان المستقر محدودة في المكامن لذا فان دليل الانتاجية في حالة طور الجريان شبه المستقر هو الاكثر اعتمادا في فحوصات الابار.

6-8 الجريان شبه المستقر في الابار الافقية Pseudo-Steady-State Flow

تبدأ حالة الجريان شبه المستقرPseudo-Steady-State Flow عندما يتحرك المائع المكمني الموجود عند حدود المكمن باتجاه البئر المُنتج ، بمعنى أن اشارة الضغط عبر الفحص قد وصلت

حدود المكمن . عند هذا الطور فان الضغط عند عند حدود المكمن و معدل الضغط المكمني يتناقص مع الوقت كلما تم سحب المزيد والمزيد من موائع المكمن .وقت الوصول الى حالة الجريان شبه المستقرPseudo-Steady-State Flow يُحسب كما يأتي :

$$t_{pss} = \frac{\phi \mu c_t A}{0.000264k}[t_{DA}]_{Table} \quad \text{---------- 25}$$

إذ ان الوقت اللابعدي بدلالة المساحة t_{DA} يساوي:

$$t_{DA} = \frac{t_D}{(r_w^2/A)} \quad \text{---------- 26}$$

نحصل على t_{DA} من الجدول6-4 و ان الوقت اللابعدي يساوي:

$$t_D = \frac{0.000264\,kt}{\phi \mu c_t r_w^2} \quad \text{---------- 27}$$

عندما تكون منطقة التصريف دائرية فان وقت الدخول الى طور الجريان شبه المستقر بالساعات يساوي:

$$t_{pss} = \frac{379\phi \mu c_t A}{k} \quad \text{---------- 28}$$

و بدلالة نصف قطر منطقة التصريف الدائرية فان الوقت بالساعات يساوي:

$$t_{pss} = \frac{1200\ \phi \mu c_t\ r_e^2}{k} \quad \text{---------- 29}$$

مساحة منطقة التصريف A (مساحة شكل بيضوي- قطع ناقص) تساوي $A=\pi\ ab$ و ان a يمثل نصف طول المحور الرئيسي للشكل البيضوي و b يمثل نصف طول المحور الاصغر.

t_D = dimensionless time based on wellbore radius rw

t_{DA} = dimensionless time based on well drainage area A

A = well drainage area، i.e.، πr 2e ، ft2

t = time، hours

k = permeability، md

cp،μ = viscosity

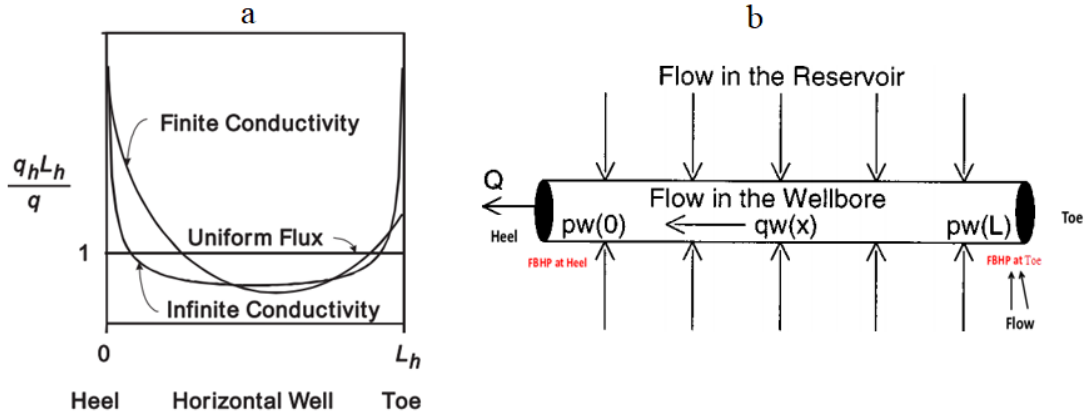
Ø= porosity fraction

ft،Rw= well radius

1-8-6 التوصيلية داخل جوف البئر - Wellbore Conductivity

قبل الذهاب الى فقرة حساب دليل انتاجية الابار الافقية للجريان شبه المستقر- Pseudo-Steady-State Productivity فلابد ان نطلع على سلوك تدفق الموائع من المكمن الى البئر الافقي و شكل توزيع الجريان داخل جوف البئرو هذا يعتمد على كلا من ظروف البئر و المكمن . يُمكن تقسيم حالات التدفق الى البئر الافقي لما يلي:

- **حالة التدفق المنتظم Uniform-flux** حسب الشكل 6-7-a و الشكل 6-8 -b: فان المائع يدخل على طول البئر لوحدة المساحة بمعدل منتظم Uniform-flux، اي ان نفس كمية المائع لوحدة الطول تدخل للبئر الافقي . هذا النوع من التدفق يحدث عادة في حالة ظروف تجانس عالية في المكمن او وجود ضرر شديد High skin damage بالقرب من البئر و على طول المقطع الأفقي ، إذ يتسبب عامل التضرر هذا skin damage في التوزيع المنتظم للجريان على طول البئر الأفقي. تُستخدم لتبسيط النمذجة الرياضية عند دراسة أداء البئر في المراحل المبكرة من الإنتاج، إذ يكون توزيع الضغط متجانسًا نسبيًا.

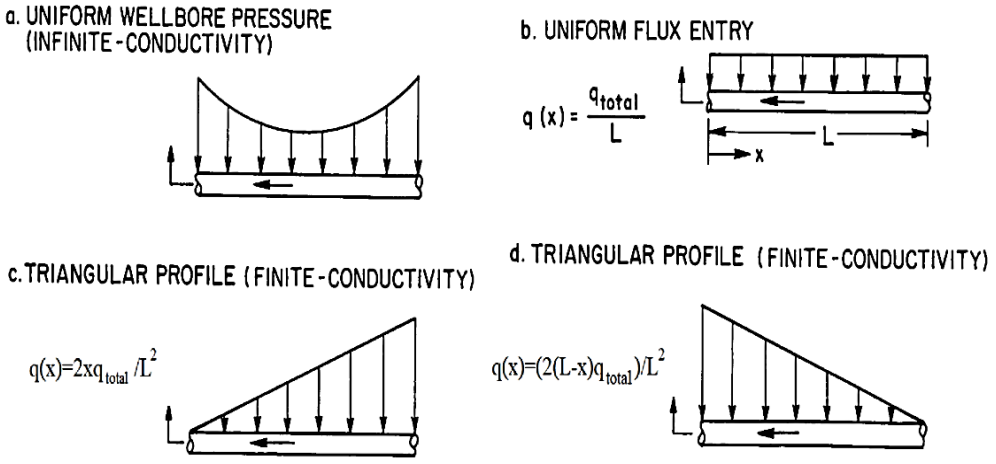


الشكل 6-7 : الشكل-a انواع التدفق المنتظم الى البئر الافقي
و **الشكل-b** الجريان من المكمن الى باطن البئر و الجريان عبر البئر

- **حالة التوصيلية اللا متناهية An Infinite- conductivity (الشكل6-7-a** و الشكل 6-8 –a**):** الحالة تكمن في وجود نفاذية لا متناهية ، بحيث تجعل توزيع الضغط على طول البئر الأفقي متجانس Uniform pressure الشكل 6-8 -a . تتميز حالة التوصيل اللانهائي Infinite بتوزيع التدفق على شكل حرف U و بشكل متناظرً حول نقطة منتصف الطول الأفقي. بشكل عام هنالك هبوط بالضغط او فرق ضغط يحدث داخل البئر بسبب احتكاك Friction المائع في باطن (جوف) البئر مع جدار البئر زائدا التسارع Acceleration بالمائع عبر الجريان و على طول البئر (من بداية البئر الى نهايته From the toe to heel ، الشكل 6-7-b و لكن هذا الانخفاض بالضغط يكون قليل و يهمل مقارنة بفرق الضغط الجرياني من المكمن الى البئر Ozkan et al. 1995،(1999). تُستخدم هذه الحالة عادةً لتحليل الآبار الأفقية المحفورة في مكامن ذات نفاذية عالية، أو آبار تعرضت لتكسير هيدروليكي بكفاءة عالية جدًا.

- **حالة التوصيلية المحدودة Finite conductivity condition الشكل 6-7-a و الشكل 6-8 c،-d.**

هنا يُؤخذ في الاعتبار فقدان الضغط داخل البئر بسبب الاحتكاك أو مقاومة الجريان، مما يعني أن التوصيلية الهيدروليكية للبئر محدودة. عندما تنخفض التوصيلية وتصبح محدودة Finite، يكون توزيع التدفق أكثر انحرافًا باتجاه طرف او كعب heel البئر الأفقي . لاحظ ان شكل دخول المائع الى جوف البئر الافقي مختلف (الشكل 6-8-c،d) و يعتمد على تغير خواص المكمن و على عامل الاحتكاك داخل جوف البئر ، يزيد عند المدخل و يقل عند النهاية او بالعكس.



الشكل6-8 يُوضح مخططات توزيع تدفق الموائع الى البئر الافقي في ظروف ; التدفق المنتظم uniform-flux condition ، تدفق التوصيلية اللانهائية infinite-conductivity condition وتدفق التوصيلية المحدودة Finite conductivity condition .

عادة تفترض النماذج التقليدية للآبار الأفقية إما تدفقًا منتظما متجانساUniform أو تدفق التوصيل اللانهائي Infinite. افتراض التدفق المنتظم هو في الأساس وسيلة رياضية مريحة ، إذ أن التطبيق المباشر الوحيد له يكون في حالة الضرر الكبير damage على طول البئر الأفقي. لكن عمليا فإن سلوك الآبار الأفقية يُقارب بشكل أكبر لسلوك التوصيل اللانهائي أو المحدود. الجدول رقم 6-3 ادناه يُوضح مقارنة سريعة للحالات الثلاث.

ان تحديد توزيع التدفق على طول الآبار الأفقية ذات التوصيلية اللانهائية او المحدودة يتم عبر الحسابات الهيدروليكية ما بين الجريان من المكمن الى باطن البئر و الجريان عبر البئر (على طول البئر الافقي) الشكل رقم-6-8.

جدول مقارنة بين الحالات الثلاث:

العنصر	FINITE-CONDUCTIVITY	INFINITE-CONDUCTIVITY	UNIFORM-FLUX
نوع التدفق	غير متماثل، تركيز نحو الكعب	متماثل U شكل	موحد على طول البئر
توزيع الضغط	غير متجانس	متجانس	غير متجانس
سبب التوزيع	مقاومة داخلية (Friction + Acceleration)	نفاذية لا نهائية داخل البئر	ضرر عالي منتشر
مدى التطبيق العملي	الأكثر شيوعًا في الواقع	نموذج شائع	محدود (نموذج رياضي)
الاستخدام	تحليل دقيق وتطبيقات حقلية	تحليل أولي	نماذج رياضية نظرية

الجدول رقم 6-3 - مقارنة لحالات التوصيلية الثلاث.

رياضيا اوجد (Yildiz and Ozkan 1998) المعامل α الذي يشير إلى نسبة مساهمة فرق ضغط عبر البئر (نتيجة لاحتكاك friction المائع و التسارع acceleration) من الانخفاض الكلي بالضغط (انتقال المائع من المكمن الى جوف البئر) و كما يأتي:

$$\alpha \le \begin{cases} 1\% & if \quad \dfrac{(N_{\mathrm{Re}} f)^{0.65}}{C_{hD}} r_{wD}^{1.5} \le 6\times10^{-6} \\ 10\% & if \quad \dfrac{(N_{\mathrm{Re}} f)^{0.65}}{C_{hD}} r_{wD}^{1.5} \le 2\times10^{-5} \end{cases},$$

إذ ان المعاملات الداخلة في العلاقات اعلاه تمثل: نصف القطر اللابعدي r_{wD} ، معامل الاحتكاك f ، رقم رينولد N_{Re} ، التوصيلية اللابعدية C_{hD} و يُمكن تعريفها على التوالي و كما يأتي:

$$r_{wD} = \frac{r_w}{h}, \quad \text{---------- 30}$$

$$C_{hD} = 7.395\times10^{13} \frac{r_w^4}{k h L_h} \quad \text{---------- 31}$$

$$N_{\mathrm{Re}} = 6.157\times10^{-2} \frac{\rho q B}{\mu r_w} \quad \text{---------- 32}$$

معامل الاحتكاك Fanning friction factor-f ، يعتمد على رقم رينولد و يساوي (Jain 1976):

$$f = \begin{cases} \dfrac{16}{N_{\mathrm{Re}}} & N_{\mathrm{Re}} < 2{,}300 \\ \dfrac{0.25}{\left\{1.14 - 2\log\left[\dfrac{\varepsilon}{d} + \dfrac{21.25}{(N_{\mathrm{Re}})^{0.9}}\right]\right\}^2} & 4{,}000 < N_{\mathrm{Re}} < 10^8 \end{cases}$$

نسبة عامل الخشونة Relative surface roughness ε/d للبئر يتراوح $10^{-8} \le \varepsilon/d \le 10^{-1}$

مثال-3

بيانات البئر الافقي أُدرجت ادناه :

L_h, ft 3,720 r_w, ft 0.25 h, ft 110 q, STB/D 1,200

B, bbl/STB 1.6 μ, cp 0.6 ρ, lbm/ft^3 52 k, md 820 ε/d 0.002

حدد فيما إذا كانت فرضية البئر الأفقي لامتناهي التوصيلية مناسبًة ؟؟

الحل:

$$r_{wD} = \frac{0.25}{110} = 0.0023$$

$$C_{hD} = 7.395\times10^{13}\frac{0.25^4}{820\times110\times3720} = 861$$

$$N_{\mathrm{Re}} = 6.157\times10^{-2}\frac{52\times1200\times1.6}{0.6\times0.25} = 40{,}981$$

$$f = \frac{0.25}{\left\{1.14-2\log\left[0.02+\frac{21.25}{(40{,}981)^{0.9}}\right]\right\}^2} = 0.0068$$

$$\frac{(N_{\mathrm{Re}}f)^{0.65}}{C_{hD}}r_{wD}^{1.5} = \frac{(40{,}981\times0.0068)^{0.65}}{861}0.0023^{1.5} \approx 5\times10^{-6}.$$

و حسب الحالة، فأن $\alpha \leq 1\%$ ؛ أي أن مساهمة فرق ضغط عبر البئر في إجمالي انخفاض الضغط ستكون أقل من 1%. لذلك فإن افتراض التوصيلية اللانهائية مناسب لهذا البئر الأفقي.

6-8-2 دليل الانتاجية للابار الافقية عند الجريان شبه المستقر- Pseudo-Steady-State Productivity

عادة ما يُحسب دليل (مؤشر) الانتاجية Productivity Index-J عند حالة الجريان شبه المستقر PSSF او الجريان المستقر SSF ،لكون كلا الطورين اكثر استقرارا من طور الجريان اللامستقر USS الشكل6-6 . سبق ان تطرقنا لحساب دليل انتاجية الابار الافقية J_h لحالة لجريان المستقر SSF، و قبل ان نتطرق لحساب دليل انتاجية الابار الافقية J_h عند الجريان شبه المستقر PSSF نذكر ان تشبيه البئر الافقي بالشق العمودي في المكامن المتشققة هو الاساس النظري في حساب دليل انتاجية J_h الابار الافقية . عند الجريان شبه المستقر PSS نستخدم احدى الطريقتين في حساب J_h :

1- طريقة كوجك - Kuchuk etal.(1988) Method

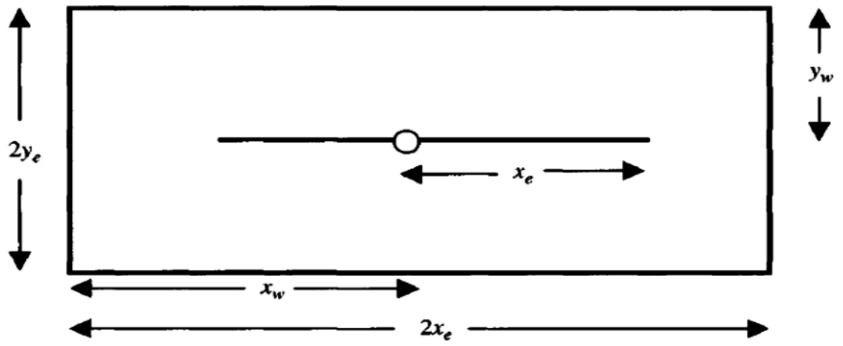
تفترض ان ضغط الجريان عند قاع البئر واحد على طول البئر الافقي و يحسب دليل الانتاجية J_h على اساس معدل الضغط للدخول المتجانس uniform flux للمائع و يفترض ايضا ان البئر محدود من الاعلى و الاسفل. يجعل الشكل الهندسي لمنطقة تصريف البئر الافقي في المقطع الافقي على شكل مستطيل .، يأخذ بنظر الاعتبار عبر الحسابات تاثير عامل تخزين البئر C و معامل القشرة s. توصل **كوجك** الى الصيغة الاتية في حساب دليل الانتاجية J_h:

$$J_h = \frac{q_o}{\bar{p}_R - p_{wf}} = \frac{k_h h/(70.6\beta_o\mu_o)}{F + (h/0.5L)\sqrt{k_h/k_v}s_x} \quad \text{---------- 33}$$

ان F دالة لا بعدية و تعتمد على المعاملات الاتية:

$$y_w/2y_e,\ \ x_w/2x_e\,,\ L/4x_e\,,\ (y_e/x_e)\sqrt{k_x/k_y}$$

المعاملات اعلاه موضحة في الشكل 6-9.



الشكل 6-9 : موديل البئر الافقي

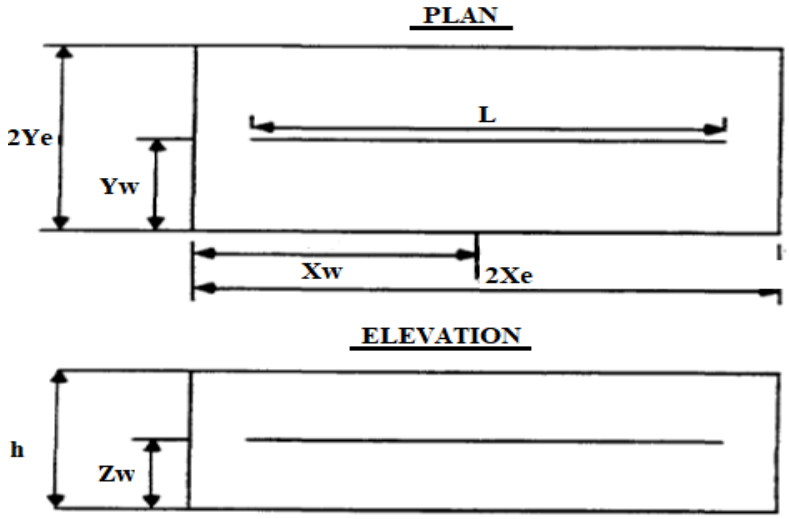
ان معامل القشرة s_x يساوي:

$$s_x = -\ln\left[\left(\frac{\pi r_w}{h}\right)\left(1+\sqrt{\frac{k_v}{k_h}}\right)\sin\left(\frac{\pi z_w}{h}\right)\right] - \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}\left(\frac{2h}{L}\right)\left[\frac{1}{3}-(z_w/h)+(z_w/h)^2\right] \quad \text{---- 34}$$

و تُحسب الدالة اللا بعدية F من الجدول 6-4 في ادناه.

2- طريقة ميتالك و جماعته *Mutalik etal.(1988) Method*

تفترض هذه الطريقة ان البئر الافقي يقع في مكمن محدود و بتوصلية لا نهائية Bounded reservoir as an infinite-conductivity well ، الموديل الذي استخدمه موضح في الشكل6-10 ادناه ، إذ ان طول المكمن $2x_e$ و عرضه $2y_e$ ، موقع مركز البئر عند x_w و y_w إذ هنا $x_w=x_e$ ، و $y_w=y_e$.



الشكل 6-10 : ابعاد موديل البئر الافقي في المستويين الافقي والعمودي

← $y_w/2y_e = 0.50$ and $x_w/2x_e = 0.50$ →					
← $L/4x_e$ →					
$y_e/x_e\sqrt{k_x/k_y}$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.25	3.80	2.11	1.09	0.48	0.26
0.50	3.25	1.87	1.12	0.69	0.52
1.00	3.62	2.30	1.60	1.21	1.05
2.00	4.66	3.34	2.65	2.25	2.09
4.00	6.75	5.44	4.74	4.35	4.19
← $y_w/2y_e = 0.25$ and $x_w/2x_e = 0.50$ →					
0.25	4.33	2.48	1.36	0.70	0.46
0.50	3.89	2.42	1.58	1.10	0.92
1.00	4.47	3.13	2.41	2.00	1.83
2.00	6.23	4.91	4.22	3.83	3.67
4.00	9.90	8.58	7.88	7.49	7.33
← $y_w/2y_e = 0.25$ and $x_w/2x_e = 0.25$ →					
0.25	9.08	7.48	6.43	5.65	5.05
0.50	6.97	5.56	4.71	4.12	3.71
1.00	6.91	5.54	4.76	4.24	3.90
2.00	8.38	7.02	6.26	5.76	5.44
4.00	11.97	10.61	9.85	9.36	9.04
← $y_w/2y_e = 0.50$ and $x_w/2x_e = 0.25$ →					
0.25	8.44	6.94	5.98	5.26	4.70
0.50	6.21	4.83	4.02	3.47	3.08
1.00	5.86	4.50	3.73	3.23	2.90
2.00	6.73	5.38	4.62	4.12	3.81
4.00	8.82	7.46	6.71	6.21	5.89

جدول 6-4 : تحديد قيم الدالة اللابعدية F لغرض تحديد معامل انتاجية البئر الافقي

تفترض الطريقة ما يلي:

المكمن متجانس في منطقة تصريف مستطيلة (طولها 2Xe و عرضها 2Ye)، في المقطع العمودي فالبئر موازي لكل من الحدود العليا و السفلى للطبقة المكمنية ، طوله L، النفاذية العمودية والافقية مختلفة و موقع البئر الافقي على مسافة z_w من اسفل الطبقة و يقع في مركز منطقة التصريف.

توصلت الطريقة الى المعادلة الاتية لحساب دليل الانتاجية لطور الجريان PSSF:

$$J_h = \frac{q_o}{\bar{p}_R - p_{wf}} = \frac{kh}{141.2\beta_o\mu_o}\left(\frac{1}{\ln(r'_e/r_w) - A' + s_f + s_m + s_{CA,h} - C' + Dq_o}\right) \quad \text{---------- 35}$$

إذ ان :

c′=shape factor conversion constant=1.386

D = non-darcy flow factor

r'_e = $\sqrt{A/\pi}$, ft
r_w = wellbore radius, ft

A' = drainage area constant = $\frac{1}{2}[\ln(2.2458\pi) - \ln(C_A)]$

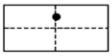
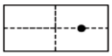
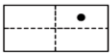
C_A = shape factor, dimensionless; the values are listed in the Table
s_m = mechanical skin factor, dimensionless

s_f = $-\ln\left[\frac{L}{4r_w}\right]$ = negative skin factor of an infinite-conductivity, fully penetrating fracture of length, L

$s_{cA\,h}$ = shape-related skin factor or pseudo-skin factor that can be ، determined from Table 6-4 or 6-5

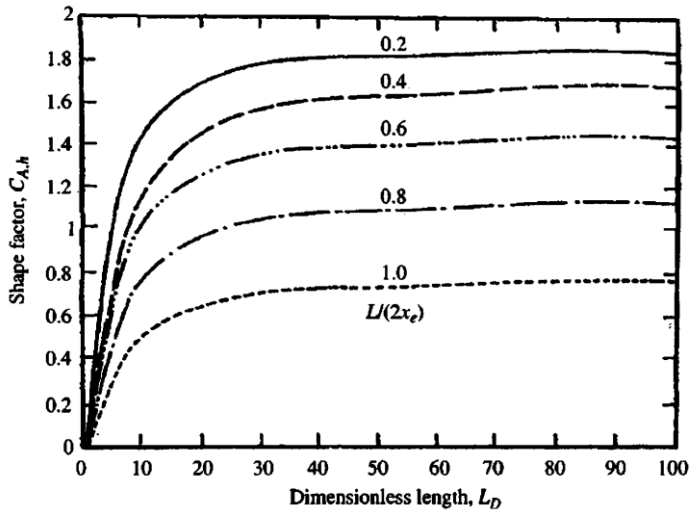
C — shape factor conversion constant = (1/2) In 16 = 1.386

ان r'_e يمثل نصف القطر المكافىء، C_A معامل الشكل الهندسي يُحدد من الجدول6-5 او من الشكل 6-11 لمختلف الاطوال اللابعدية L_D، s_m معامل القشرة العادي (نتيجة للاكمال او الحفر)، s_{CA} معامل القشرة الذي يعكس معامل الشكل الهندسي لمنطقة تصريف البئر.

Reservoir Shape, Well Location	Shape Factor C_A	Shape Factor Skin s_{CA}	Dimensionless Time to End of IARF* $t_{e\,IARF\,AD}$	Dimensionless Time to Start of PSSF† $t_{b\,PSSF\,AD}$
		Circle		
	31.62	0	0.10	0.06
		Square		
	30.8828	0.0115	0.09	0.05
	12.9851	0.445	0.03	0.25
	4.5132	0.973	0.01	0.25
		2 × 1 Rectangle		
	21.8369	0.185	0.025	0.15
	10.8374	0.535	0.025	0.15
	4.5141	0.973	0.06	0.5
	2.0769	1.361	0.02	0.5

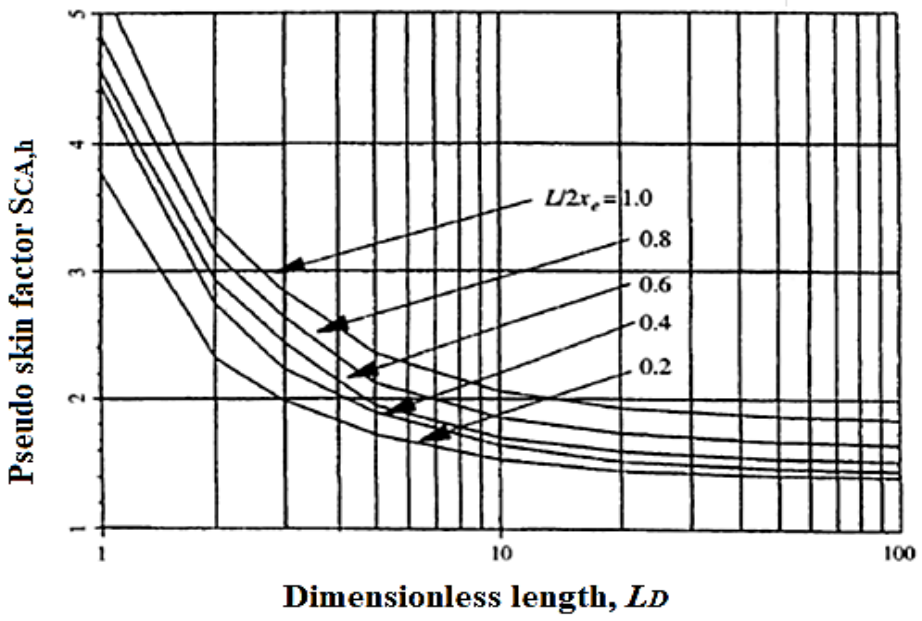
*Dimensionless pressure from logarithmic straight-line equation within 1% of exact solution.
†Dimensionless pressure from pseudosteady-state equation within 1% of exact solution.

جدول 6-5 : تحديد معامل الشكل الهندسي C_A و معامل القشرة للشكل S_{CA}



الشكل 6-11 : علاقة عامل الشكل الهندسي C_A مع الطول اللابعدي للبئر الافقي في منطقة تصريف مربعة الشكل

معامل القشرة الميكانيكي s_m للبئر الافقي يعتمد على معدل الجريان لوحدة الطول q_h/L و لكون q_h/L واطىء في البئر الافقي لذا نتوقع ان فقدان بالانتاجية بسبب ضرر الحفر او الاكمال اقل مما عليه للبئر العمودي.



الشكل 6-12 : علاقة عامل القشرة المكافىء للشكل $s_{CA,h}$ مع الطول اللابعدي للبئر الافقي عندما تكون النسبة ما بين طول منطقة تصريف البئر المربعة الى عرضها تساوي $x_e/y_e=1$

معامل الشكل للبئر الافقي يعتمد على نسب الاختراق للبئر الافقي $L/2x_e$ و شكل منطقة تصريف البئر الافقي 2xe/2ye و على الطول اللابعدي للبئر الافقي L_D كما في الشكل6-11 .كما و يُمكن التعبير عن معامل الشكل للبئر الافقي عن طريق معامل القشرة للشكل s_{CAh} Shape-related skin factor. اوجد ميتاليك و جماعته الاشكال6-12 ، 6-13 و 6-14 لتحديد عوامل القشرة المكافئة للشكل $s_{CA,h}$ Shape-related skin factor، لنسب اختراق للبئر الافقي مختلفة (L/2xe) . لكل شكل من الاشكال الثلاثة له نسبة محددة من طول الى عرض منطقة التصريف والتي تساوي على التوالي x_e/y_e =1 في منطقة تصريف مربعة والنسب x_e/y_e =5، 2 لمنطقة تصريف مستطيلة الشكل. كما و لخص الاشكال الثلاثة في الجدول6-5 إذ يُمكن استخدام اي منهما.

ممكن ان نلخص خطوات الحل بطريقة ميتالك كالاتي:

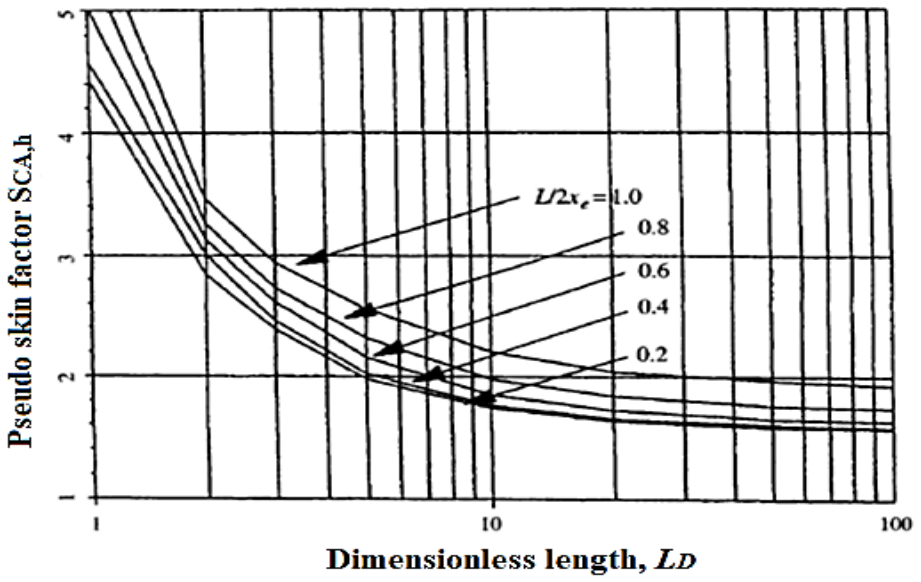
- حساب ثابت منطقة التصريف A^-

$$A' = 1/2[\ln(2.2458\pi) - \ln(C_A)]$$

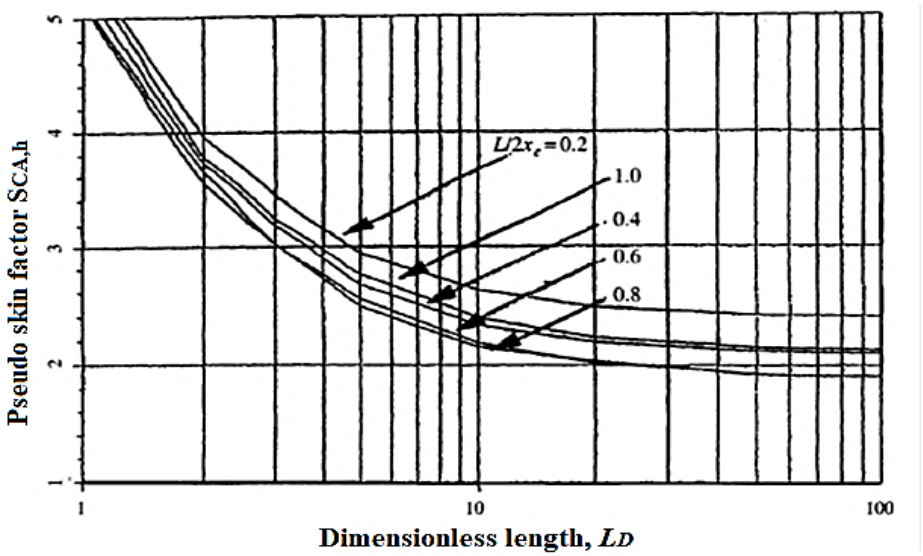
- حساب عامل القشرة السلبي s_f :

$$s_f = -\ln\left[\frac{L}{4r_w}\right]$$

- حساب عامل القشرة $s_{CA,h}$ من الجدول6-5 او من الاشكال 6-11، 6-12 ، 6-13.
- من معرفة المعاملات A^- ، s_f و $s_{CA,h}$، يُمكن حساب قيمة معامل الانتاجية من المعادلة رقم-35 .



الشكل 6-13 : علاقة عامل القشرة المكافىء للشكل $s_{CA,h}$ مع الطول اللابعدي للبئر الافقي عندما تكون النسبة ما بين طول منطقة تصريف البئر المستطيلة الى عرضها تساوي x_e/y_e=2



الشكل 6-14 : علاقة عامل القشرة المكافىء للشكل $s_{CA,h}$ مع الطول اللابعدي للبئر الافقي عندما تكون النسبة ما بين طول منطقة تصريف البئر المستطيلة الى عرضها تساوي $x_e/y_e=5$

مثال-4

بئر افقي بطول L=2000 ft في مكمن نفطي ، المكمن متجانس و نسبة kv/kh=0.5 يتضمن المعلومات المتوفرة ادناه:

$h = 100\,\text{ft};\ r_w = 0.39\,\text{ft};\ \phi = 4.9\%;\ \beta_o = 1.215\,\text{rb/stb};\ \mu_o = 0.45\,\text{cP};\ s_m = 0;$

$D = 0;\ z_w = 30\,\text{ft};\ k_h = k_x = k_v = 1.0\,\text{mD};\ \text{and}\ k_v/k_h = 0.5.$

Assuming square drainage area = 160 acres,

احسب إنتاجية البئر في حالة الجريان شبه المستقر PSS باستخدام الطريقتين في الفقرتين المذكورتين اعلاه ؟؟

الحل:

- طريقة ميتالك و جماعته *Mutalik etal. Method*

- حساب المعاملات الاتية:

$$r'_w = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{160 \times 43{,}560}{\pi}} = 1489\,\text{ft}$$

$$s_f = -\ln\left[\frac{L}{4r_w}\right] = -\ln\left[\frac{2000}{4 \times 0.39}\right] = -7.1562$$

$$L_D = \frac{L}{2h}\sqrt{\frac{k_v}{k_h}} = \frac{2000}{2 \times 100}\sqrt{1.0} = 10$$

Shape-Related Skin Factors, $s_{CA,h}$, for Horizontal Wells for Various Well Penetrations and Different Rectangular Drainage Area

	$L/2x_e$				
t_D	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
$x_e/y_e = 1$					
1	3.772	4.439	4.557	4.819	5.250
2	2.231	2.732	2.927	3.141	3.354
3	1.983	2.240	2.437	2.626	2.832
5	1.724	1.891	1.948	2.125	2.356
10	1.536	1.644	1.703	1.851	2.061
20	1.452	1.526	1.598	1.733	1.930
50	1.420	1.471	1.546	1.672	1.863
100	1.412	1.458	1.533	1.656	1.845
$x_e/y_e = 2$					
1	4.425	4.578	5.025	5.420	5.860
2	2.840	3.010	3.130	3.260	3.460
3	2.380	2.459	2.610	2.730	2.940
5	1.982	2.020	2.150	2.310	2.545
10	1.740	1.763	1.850	1.983	2.198
20	1.635	1.651	1.720	1.839	2.040
50	1.584	1.596	1.650	1.762	1.959
100	1.572	1.582	1.632	1.740	1.935
$x_e/y_e = 5$					
1	5.500	5.270	5.110	5.140	5.440
2	3.960	3.720	3.540	3.650	3.780
3	3.440	3.190	3.020	3.020	3.250
5	2.942	2.667	2.554	2.493	2.758
10	2.629	2.343	2.289	2.155	2.399
20	2.491	2.196	2.022	2.044	2.236
50	2.420	2.120	1.934	1.925	2.150
100	2.408	2.100	1.909	1.903	2.136

الجدول 6-6 : تحديد معامل القشرة للشكل الهندسي S_{CA}

لمنطقة تصريف البئر المربعة فان الاضلاع متساوية اي ان $2x_e=2y_e$ ، اذن قيمة طول الضلع بالاتجاه x يساوي $2x_e$ إذ ان :

$$2x_e = \sqrt{160 \times 43{,}560} = 2640\,\text{ft}, \qquad \frac{L}{2x_e} = \frac{2000}{2640} = 0.757$$

باستخدام قيمة الطول اللابعدي $L_D=10$ و $L/2x_e=0.757$ في الشكل6-11 نجد قيمة $s_{CA,h}= 1.82$.

نحدد المعاملات الاتية على اعتبار ان شكل منطقة التصريف مربعة:

$$A' = 0.5[\ln(C_A)_{Table} - \ln(2.2458\pi)]$$

$$= 0.5[\ln(30.88)_{Table} - \ln(2.2458 \times 22/7]$$

$$A' = 0.738$$

$$s_f = -7.1562, \qquad s_m = 0, \qquad D = 0, \qquad C_1 = 1.386$$

اذن J_h يساوي:

$$J_h = \frac{q_o}{\bar{p}_R - p_{wf}}$$

$$= \frac{kh}{141.2\beta_o\mu_o}\left(\frac{1}{\ln(r'_e/r_w) - A' + s_f + s_m + s_{CA,h} - C' + Dq_o}\right)$$

$$= \frac{1 \times 100}{141.2 \times 0.45 \times 1.215}\left(\frac{1}{\ln(1489/0.39) - 0.738 + (-7.1562) + 0 + 1.82 - 1.386 + 0}\right)$$

$$J_h = \frac{1.2946}{8.2475 - 0.738 - 7.1562 + 1.82 - 1.386}$$

$$J_h = 1.644\,\text{stb/(day/psi)}$$

- طريقة كوجك - *Kuchuk etal.(1988) Method*

- لحساب قيمة المعامل F نحسب اولا المعاملات الاتية:

$$\frac{L}{4x_e} = \frac{2000}{4 \times 1320} = 0.3788, \qquad \frac{x_w}{2x_e} = \frac{1320}{2640} = 0.5$$

$$\frac{y_w}{2y_e} = \frac{1320}{2640} = 0.5, \qquad \frac{y_e}{x_e}\sqrt{\frac{k_x}{k_y}} = 1 \times \sqrt{1} = 1.0$$

- من الجدول 6-4 نجد ان قيمة F=1.05 .
- حساب قيم المعاملات الاتية:

$$\frac{k_v}{k_y} = \frac{k_v}{k_h} = 0.1, \qquad \frac{k_y}{k_x} = 1,$$

$$\frac{k_h}{k_v} = \frac{1}{0.1} = 10, \qquad \frac{z_w}{h} = \frac{30}{100} = 0.3,$$

$$\frac{h}{0.5L} = \frac{100}{0.5(2000)} = 0.10$$

- اذن قيمة s_x تساوي:

$$s_x = -\ln\left[\left(\frac{\pi r_w}{h}\right)\left(1+\sqrt{\frac{k_v}{k_h}}\right)\sin\left(\frac{\pi z_w}{h}\right)\right] - \sqrt{\frac{k_h}{k_v}}\left(\frac{2h}{L}\right)\left[\frac{1}{3} - \left(\frac{z_w}{h}\right) + \left(\frac{z_w}{h}\right)^2\right]$$

$$= -\ln\left[\left(\frac{\pi \times 0.39}{100}\right)\left(1+\sqrt{0.1}\right)\sin\left(\frac{180 \times 0.3}{100}\right)\right] - \sqrt{10}(0.10)[0.333 - 0.3 + 0.3^2]$$

$$= -\ln[0(0.0123)(1+\sqrt{0.1})\sin(0.54)] - 0.0389$$

$$s_x = -\ln[0.0123 \times 1.8090] - 0.0389 = 3.767$$

❖ حساب قيمة J_h و تساوي:

$$J_h = \frac{k_h h/(70.6\beta_o\mu_o)}{F + (h/0.5L)\sqrt{k_h/k_v}s_x}$$

$$= \frac{1 \times 100/(70.6 \times 0.45 \times 1.215)}{1.05 + (100/(0.5 \times 2000))\sqrt{2} \times 3.767} = 1.638$$

3-8-6 حساب معدل الجريان لطور الجريان شبه المستقر في الابار الافقية الغازية

لحساب معدلات جريان الغاز في الابار الافقية فقد ادخل جوشي 1991 نصف قطر البئر الفعال r_w^- في معادلات حساب معدلات جريان الغاز في الابار العمودية لحسابها في الابار الافقية عند طور الجريان شبه المستقر ، و يُحسب كما يأتي:

$$r_w^{\setminus} = \frac{r_{eh}\,(L/2)}{a\left[1+\sqrt{1-(L/2a)^2}\right]\left[h/(2r_w)\right]^{h/L}} \quad \text{---------- 36}$$

L = length of the horizontal well, ft
h = thickness, ft
r_w = wellbore radius, ft
r_{eh} = horizontal well drainage radius, ft
a = half the major axis of the drainage ellipse, ft
A = drainage area of the horizontal well, acres

$$a = \left(\frac{L}{2}\right)\left[0.5 + \sqrt{0.25 + (2r_{eh}/L)^4}\right]^{0.5}$$

$$r_{eh} = \sqrt{\frac{43\,560A}{\pi}}$$

نعوض في معادلة جريان الغاز لحالتي مربع الضغط (عندما يكون الضغط اقل من 2000 psi) والضغط المكافىء (عندما يتراوح الضغط 2000-3000 psi) على التوالي و كما يأتي :

$$Q_g = \frac{kh\left(\bar{p}_r^2 - p_{wf}^2\right)}{1422T\left(\mu_g Z\right)_{avg}\left[\ln\left(r_{eh}/r_w\right) - 0.75 + s\right]} \quad \text{---------- 37}$$

$$Q_g = \frac{kh\left[m(\bar{p}_r) - m(p_{wf})\right]}{1422T\left[\ln\left(r_{eh}/r_w\right) - 0.75 + s\right]} \quad \text{---------- 38}$$

و عند الجريان الاضطراب Turbulent flow فيدخل عامل الاضطراب D في المعادلات اعلاه فتصبح :

$$Q_g = \frac{kh[m(\bar{p}_r) - m(p_{wf})]}{1422\,T\left[\ln\left(\frac{r_{eh}}{r_w}\right) - 0.75 + s + DQ_g\right]} \quad \text{---------- 39}$$

$$Q_g = \frac{kh\left(\bar{p}_r^2 - p_{wf}^2\right)}{1422T\left(\mu_g Z\right)_{avg}\left[\ln\left(r_{eh}/r_w\right) - 0.75 + s + DQ\right]} \quad \text{---------- 40}$$

إذ ان عامل الاضطراب D يساوي :

$$D = \frac{Fkh}{1422T} \quad \text{----------41}$$

و ان معامل اللادارسي F يساوي :

$$F = 3.161\left(10^{-12}\right)\left[\frac{\beta T \gamma_g}{\mu_g h^2 r_w}\right] \quad \text{---------- 42}$$

$$\beta = 1.88(10^{-10})k^{-1.47}\phi^{-0.53} \quad \text{---------- 43}$$

ϕ is the porosity.

F = non-Darcy flow coefficient
k = permeability, md
T = temperature, °R
γ_g = gas gravity
r_w = wellbore radius, ft
h = thickness, ft
β = turbulence parameter

مثال-5

بئر غازي افقي طوله يبلغ L=2000 ft ، مساحة منطقة التصريف A=120 acres ، المعلومات الاخرى المتوفرة كما في ادناه :-

$\bar{p}_r = 2000$ psi $\qquad \bar{\psi}_r = 340 \times 10^6$ psi^2/cp

$p_{wf} = 1200$ psi $\quad \psi_{wf} = 128 \times 10^6$ psi^2/cp

$(\mu_g z)_{avg} = 0.011826 \quad r_w = 0.3$ ft $\quad s = 0.5$

$h = 20$ ft $\quad T = 180°F \quad k = 1.5$ md

- احسب معدل جريان البئر الغازي بفرض ان طور الجريان من نوع شبه المستقر ولحالتي مربع الضغط والضغط المكافئ؟؟؟

الحل: -

- حساب نصف قطر منطقة التصريف وتساوي: -

$$r_{eh} = \sqrt{\frac{(43\,560)(120)}{\pi}} = 1290 \text{ ft}$$

- حساب نصف المحور الرئيسي لشكل التصريف البيضوي ويساوي:-

$$a = \left[\frac{2000}{2}\right]\left[0.5 + \sqrt{0.25 + \left[\frac{(2)(1290)}{2000}\right]^4}\right]^{0.5} = 1495.8$$

- حساب نصف قطر البئر الفعال $r_w^{\backprime}$ ويساوي:

$$r_w^{\backprime} = \frac{r_{eh}(L/2)}{a\left[1 + \sqrt{1 - (L/2a)^2}\right][h/(2r_w)]^{h/L}}$$

- للسهولة نجزء الحسابات و نحسب ما في المعادلة كالاتي:

$$(h/2r_w)^{h/L} = \left[\frac{20}{(2)(0.3)}\right]^{20/2000} = 1.0357$$

$$1 + \sqrt{1 - \left(\frac{L}{2a}\right)^2} = 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2000}{2(1495.8)}\right)^2} = 1.7437$$

اذن $r_w^{\backprime}$ يساوي :

$$r_w^{\backprime} = \frac{1290\,(2000/2)}{1495.8\,(1.7437)\,(1.0357)} = 477.54 \text{ ft}$$

❖ حساب معدل انتاج البئر بطريقة مربع الضغط علما ان الطريقة هي الاكثر ملائمة لكون حدود الضغط اقل من 2000 psia نستخدم المعادلة رقم-37 كما يأتي:

$$Q_g = \frac{(1.5)\,(20)\,(2000^2 - 1200^2)}{(1422)\,(640)\,(0.011826)\left[\ln\left(\frac{1290}{477.54}\right) - 0.75 + 0.5\right]}$$

$$= 9594 \text{ Mscf/day}$$

❖ وباستخدام طريقة الضغط المكافئ حسب المعادلة رقم- 38 ينتج: -

$$Q_g = \frac{(1.5)\,(20)\,(340 - 128)\,(10^6)}{(1422)\,(640)\left[\ln\left(\frac{1290}{477.54}\right) - 0.75 + 0.5\right]}$$

$$= 9396 \text{ Mscf/day}$$

لاحظ ان الفرق بين الطريقتين بحدود 2%.

9-6 الجريان اللامستقر USS في الابار الافقية – طريقة اوزكان Ozkan

قدم Turgay Ozkan نموذج تحليلي متقدم لوصف استجابة الضغط في الآبار الأفقية عبر فترات الجريان غير المستقر. ويُعد هذا العمل من المساهمات الأساسية في فهم وتحليل سلوك الآبار الأفقية، خاصة في المكامن غير المتجانسة أو ذات الأبعاد الثلاثية. نموذج أوزكان يستند إلى حلول تحليلية باستخدام تحويل لابلاس (Laplace Transform)، ثم العودة للمجال الزمني عبر تقنيات عددية ، وهو يعبر عن الضغط كدالة في الزمن، أبعاد المكمن، وموقع البئر داخل الطبقة.

في تحليله لنموذج المكمن ذو شكل مستطيل ثلاثي الأبعاد (3D Reservoir،Rectangular) بيّن أوزكان أن الآبار الأفقية تمر بعدة أطوار تدفق عند الجريان غير المستقر (USS)، تختلف باختلاف الزمن ونسبة الطول الأفقي للبئر إلى أبعاد المكمن، الشكل 6-17 .

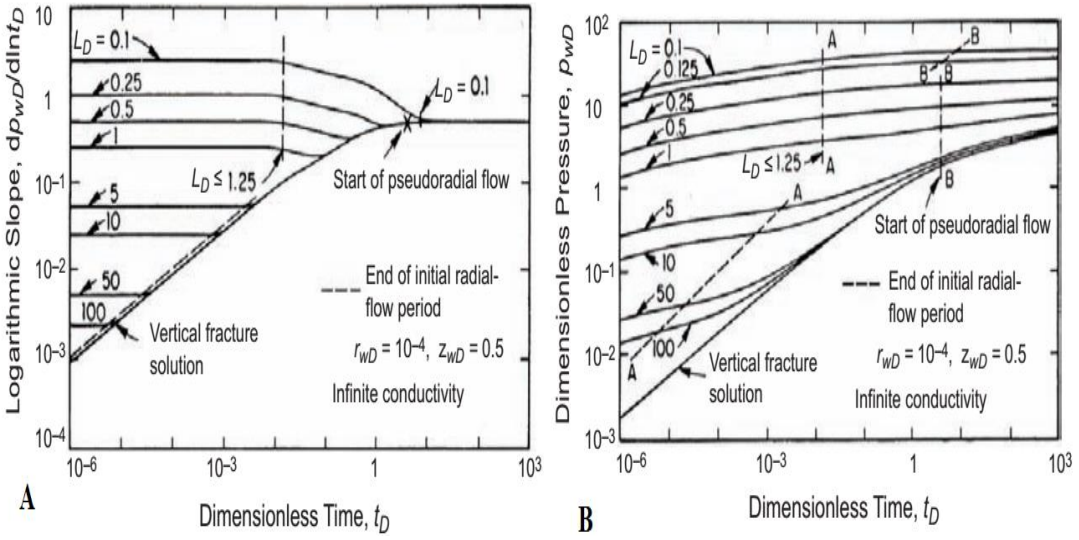
يُعد طول البئر و سُمك الطبقة المكمنية ونسبة النفاذية العمودية / الأفقية من أهم العوامل التي تؤثر على استجابة الضغط للبئر الافقي عبر طور الجريان اللامستقر USS والذي يمثل الطور الاهم في فحص الابار . يُوضح اوزكان Ozkan (1990) في الاشكال 6-15 و 6-16 التاثيرات اعلاه على استجابة الضغط و مشتقة الضغط و يمثل تلك التاثيرات عبر عامل الطول اللابعدي L_D الذي يساوي:

$$L_D = \frac{L_h}{2h}\sqrt{\frac{k_z}{k}} \text{ .---------- 44}$$

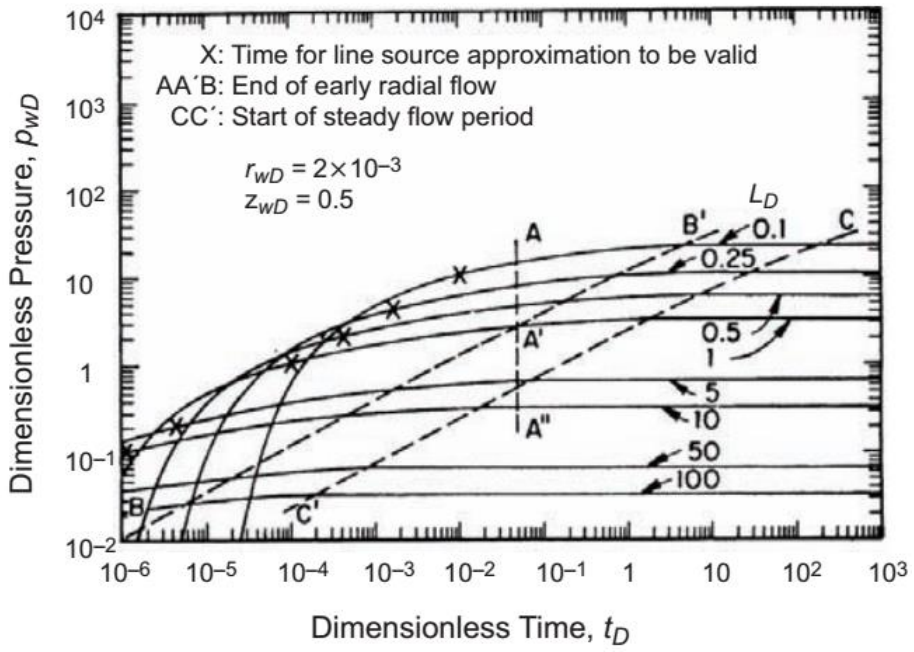
k horizontal ، kz vertical permeability ، h layer thickness ft،L_h horizontal length ft permeability.

نلاحظ هنالك تحديد لاطوار الجريان PSS و USS في الشكل6-15 B,A رُسمت على احداثيات لوغاريتمية لمشتقة الضغط اللابعدي و الضغط اللابعدي . و لطور الجريان المستقر SSFرسمت في الشكل 6-16 حيث يُوضح استجابات الضغط اللابعدي للآبار الأفقية الخاضعة

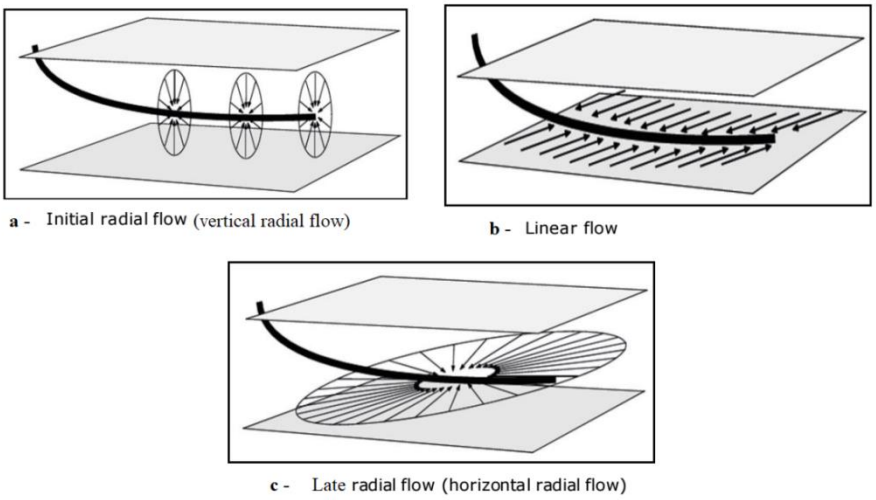
لطاقة دفع المياه من الاسفل Aquifer، اي افتراض أن الحدود السفلية عند ضغط مكمني ثابت. في هذه الظروف ، عادةً ما تكون الفترة الواضحة و القابلة للاكتشاف عبر الفحص هي فترة طور الجريان الشعاعي المبكرERF , يتبعها فترة انتقالية ثم الى طور الجريان المستقر SSF.



الشكل6-15: استجابة الضغط في البئر الافقي قبل بدء تاثير الحدود الجانبية البعيدة عن البئر(اوزكان1989)



الشكل 6-16 : استجابة الضغط في البئر الافقي بوجود طاقة دفع الماء من الاسفل(اوزكان1989)



الشكل 6-17 : اطوار الجريان الثلاثة الرئيسة عبر فحص الابار الافقية

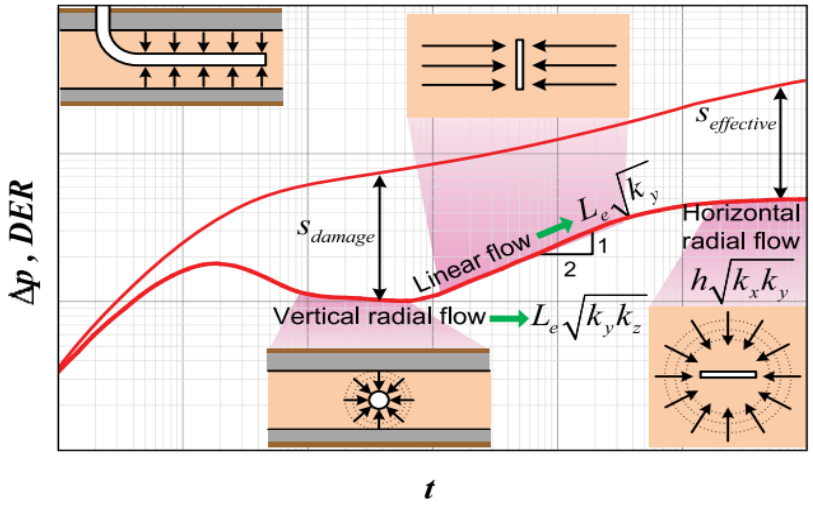
ان العوامل الثلاثة اعلاه – (طول البئر و سُمك الطبقة المكمنية ونسبة النفاذية العمودية / النفاذية الأفقية) تتحكم بوجود و طول مدة تاثير ثلاثة اطوار محتملة للجريان عبر فترة الطور USS وهي (الاشكال 6-17c،b، a) :

1- طور الجريان الشعاعي المبكر في المستوى العمودي Early Radial Flow- ERF .

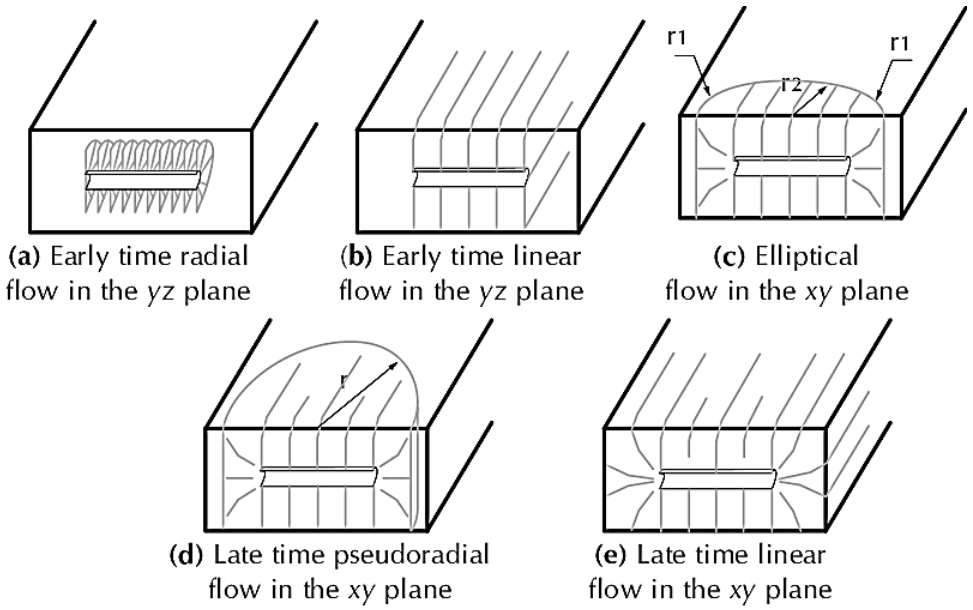
2- طور الجريان الخطي المبكر في المستوى الافقي Early Linear Flow ELF.

3- طور الجريان شبه الشعاعي المتاخر في المستوى الافقي. Late Pseudo Radial Flow LPRF or LRF

الشكل 6-18 يُوضح اطوار الجريان الثلاثة على الرسم اللوغاريتمي التشخيصي لعلاقة الضغط و مشتقة الضغط مع الوقت.

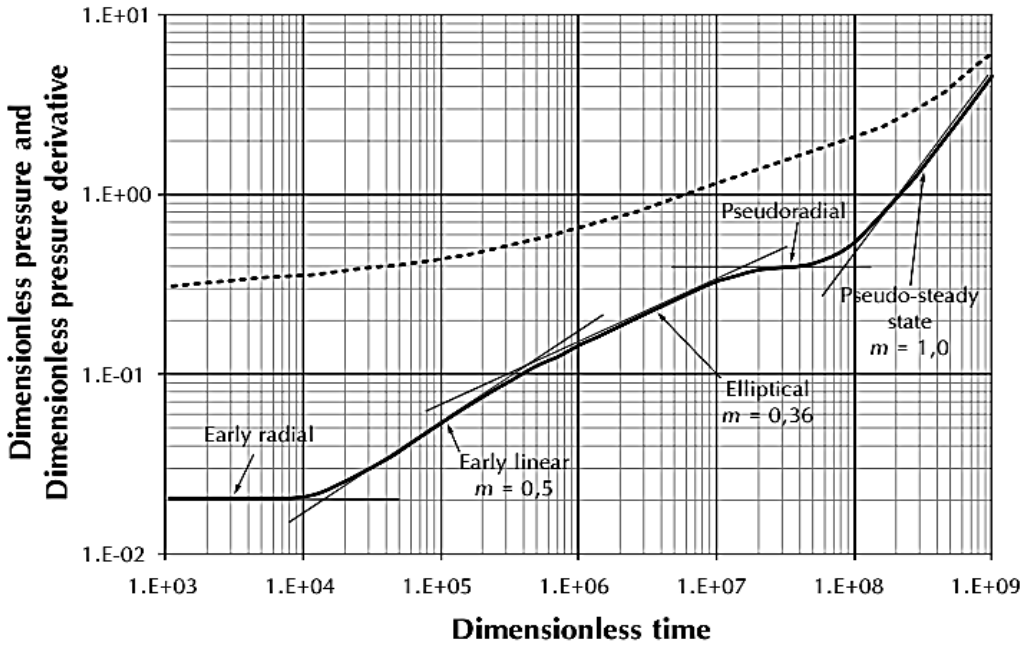


الشكل6-18: اطوار الجريان الثلاثة على الرسم اللوغاريتمي التشخيصي



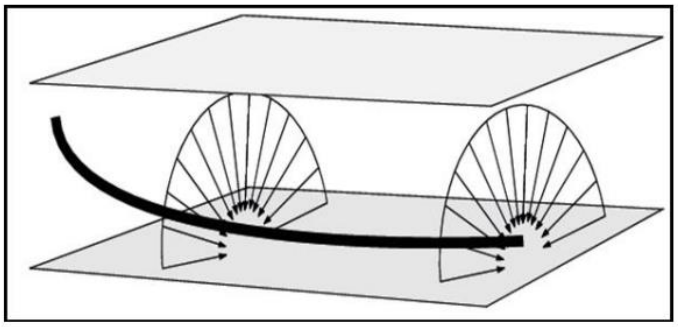
الشكل 6-19 : اطوار الجريان الخمسة عبر فحص الابار الافقية

يذهب بعض الباحثين تفصيلا في عدد اطوار الجريان عبر فحص البئر الافقي فيقسمها الى خمسة اطوار الشكل6-19 ، إذ يُدخل طور الجريان البيضوي الشكل c و يقسم الجريان الخطي الى طورين ; طور جريان خطي في المستوي العمودي yz الشكل b و عنده يصل تاثير اشارة تغير الضغط الى حدود الطبقة العلوي والسفلي و طور جريان خطي في المستوي الافقي xy إذ يُدخل تاثير الجريان عند طرفي البئر الافقي الشكل e.



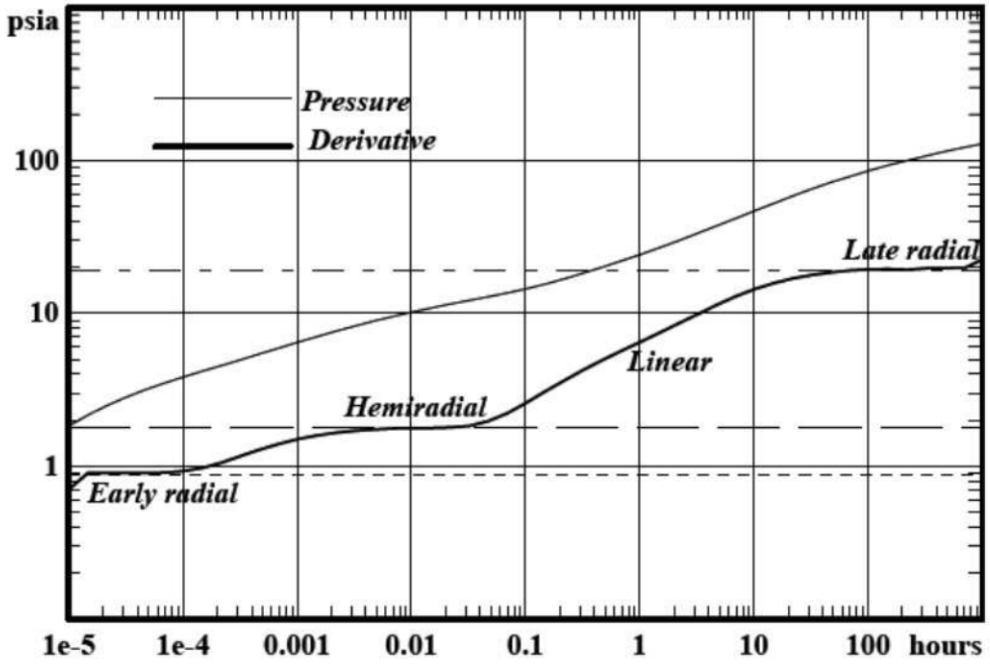
شكل 6-20 : اطوار الجريان الخمسة على الرسم اللوغاريتمي التشخيصي

الشكل6-20 يُوضح اطوار الجريان الخمسة على الرسم اللوغاريتمي التشخيصي لعلاقة الضغط و مشتقة الضغط اللابعدي مع الوقت اللابعدي.



شكل 6-21 : طور الجريان نصف شعاعي خلال فحص البئر الافقي

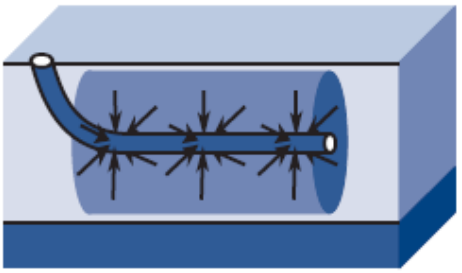
احيانا ولتلافي مشاكل التقمع الغازي gas coning او التقمع المائي water coning فيُفضل تزحيف موقع البئر الى اسفل او اعلى الطبقة النفطية اي بالقرب من حدودها الدنيا او العليا. ينتج عن ذلك ظهور طور جريان رابع يسمى بطور الجريان نصف شعاعي و يظهر بعد طور الجريان الشعاعي المبكر كما في الشكل6-21 . يُوضح الشكل 6-22 اربعة اطوار للجريان على الرسم اللوغاريتمي التشخيصي لعلاقة الضغط و مشتقة الضغط مع الوقت و سنتطرق لاطوار الجريان الاربعة تفصيلا عبر الفقرات الاتية:



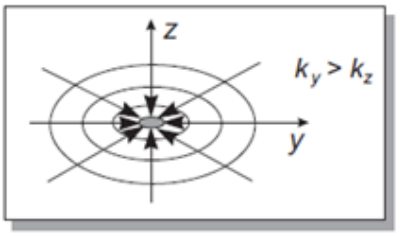
الشكل 6-22 : اطوار الجريان في بئر افقي على الرسم اللوغاريتمي التشخيصي

1-9-6 طور الجريان الشعاعي في المستوى العمودي- Radial flow in vertical plane
او يسمى طور الجريان الشعاعي المبكر -Early Radial Flow ERF

يحدث الجريان الشعاعي في المدة المبكرة من الفحص و مباشرة بعد فتح البئر للجريان على ان يقع البئر في منتصف الطبقة. هنا مثله مثل الجرياني الشعاعي في البئر العمودي لكن السُمك h في البئر العمودي يقابله الطول L في البئر الافقي . الجريان الشعاعي يحدث عند المستوي العمودي القاطع لمحور البئر الافقي و لا يوجد جريان عند طرفي البئر الشكل6-23. لما كان هنا البئر الافقي يسحب الموائع في المستوى العمودي فالضغط المقاس يتاثر بمعامل عدم التجانس (k_v/k_h) اي يتاثر بكلا من النفاذية الافقية k_h و النفاذية العمودية k_v . معدل نفاذية الطبقة في المستوي العمودي تساوي $(k_z k_y)^{0.5}$.و في حال وجود تاثير تخزين البئر فان الطور الجريان الشعاعي العمودي هذا قد يختفي ، لذا يُمكن تحقيق التحكم الكامل بتخزين البئر باستخدام معدات قياس معدل الانتاج متزامنة مع قياسات الضغط او الاغلاق يكون من قاع البئر او كليهما.



Radial Flow
to Horizontal Well



plane for a horizontal well.

الشكل 6-23 : طور الجريان الشعاعي المبكر ERF عبر فحص البئر الافقي في المستويين الجانبي و العمودي

#معادلات هبوط الضغط- drawdown equation

❖ بفرض ان مدة تاثير تخزين البئر محدودة و غير مؤثرة ، فان علاقة تغير الضغط مع لوغاريتم الوقت لهذا الطور تعطي علاقة خطية كما في ادناه:

$$\Delta p_{wf} = \frac{162.6qB\mu}{\sqrt{k_y k_z}L_h}\left(\log t + \log\frac{\sqrt{k_y k_z}}{\phi c_t \mu r_{w,eq}^2} - 3.23 + 0.87\frac{\sqrt{k_y k_z}L_h}{kh}s\right)$$

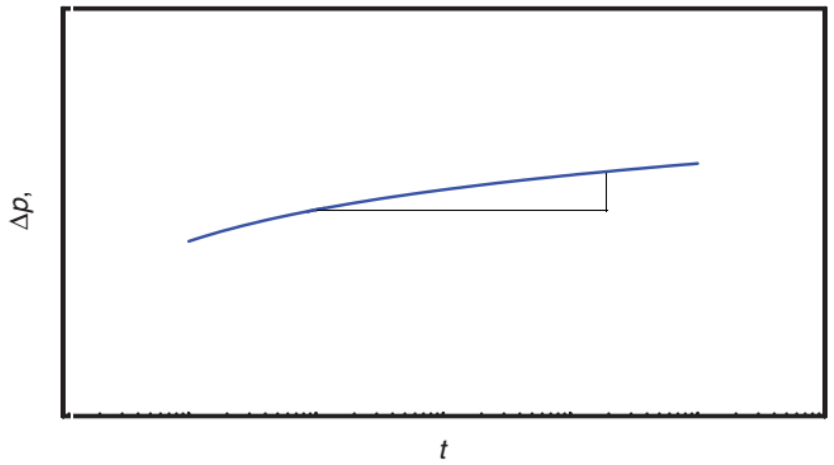
$$p_i - p_{wf} = \frac{162.6\ qB\ \mu}{L\sqrt{k_v k_h}}\left(\log t + \log\frac{\sqrt{k_v k_h}}{\phi\mu c_t r_w^2} - 3.23 + 0.87\ S\right) \text{ ---------- } 45$$

p_w = well pressure at time t, psi
p_i = initial pressure, psi

q = flow rate, STB/day
μ = viscosity, cp
B = formation volume factor, RB/STB
L = well length, ft
r_w = wellbore radius, ft
s = skin due to alteration of permeability around the wellbore,

- عند رسم علاقة تغير الضغط مع الوقت على ورق نصف لوغاريتمي الشكل6-24 نحصل على علاقة خط مستقيم بميل m يساوي:

$$m = \frac{162.6\, qB\, \mu}{L\sqrt{k_v k_h}} \quad \text{---------- 46}$$



الشكل 6-24 : رسم بيانات فحص هبوط الضغط على احداثيات نصف لوغاريتمية ،
تعطي علاقة خطية عبر طور الجريان الشعاعي المبكرERF

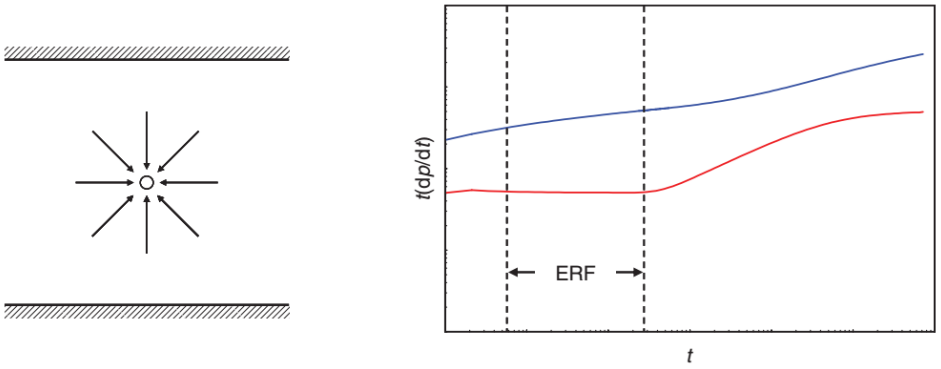
إذ بالامكان حساب معدل قيمة النفاذية في المستوى العمودي للبئر الافقي عبر $k_{avg}=(k_v\, k_h)^{0.5}$ و تساوي:

$$\sqrt{k_v k_h} = \frac{162.6\, qB\, \mu}{m\, L} \quad \text{---------- 47}$$

واذا كانت $(k_v/\, k_h)^{0.5}$ معلومة فبالامكان حساب طول البئر الفعلي L المساهم في الانتاج او ممكن ان نجد قيمة النفاذية العمودية من المعادلة رقم-47 من معرفة قيمة النفاذية الافقية من نتائج سابقة لتفسير فحص البئر العمودي .

- ان استخدام الرسم اللوغاريتمي التشخيصي Diagnostic plot في تفسير الفحص مفيد و ذلك لتاكيد وجود تاثير الطور الشعاعي المبكر ، إذ تُظهر بيانات الفحص المبكرة علاقة خط مستقيم

افقي بميل الصفر m=0 عند الطور الشعاعي المبكر Early Radial Flow- ERF الشكل6-25 ، الشكل لا يُظهر اي تاثير لتخزين البئر WBS .



الشكل 6-25 : علاقة هبوط الضغط مع الوقت عبر طور الجريان الشعاعي المبكر ERF
تُكون خط افقي في الرسم التشخيصي اللوغاريتمي

- عامل القشرة S عبر طور الجريان الشعاعي العمودي هذا يطلق عليه عامل القشرة الميكانيكي mechanical skin factor و هو ناتج من جراء تضرر الطبقة بجوار البئر نتيجة لفعاليات الانتاج او استصلاح البئر او الحفر . ان النفاذية الافقية والعمودية مؤثرة بشدة على الشكل الهندسي للجريان حول البئر الافقي.

- يُمكن حساب عامل القشرة S من تحديد الضغط عند ساعة واحدة P_{1hr} من الرسم كما يأتي:

$$S = 1.15\left(\frac{p_i - p_{1h}}{|m|} - \log\frac{\sqrt{k_v k_h}}{\phi\mu c_t r_w^2} + 3.23\right) \quad \text{---------- 48}$$

ان عامل القشرة الكلي للبئر الافقي S اعلاه ، يساوي مجموع معامل القشرة الميكانيكي S_p (من جراء عمليات الاكمال و الانتاج) و عامل القشرة من جراء معامل اللاتجانس للنفاذية S_a- anisotropy السالب .

اذن :

$$S = S_p + S_a \quad \text{---------- 49}$$

و ان S_a يساوي:

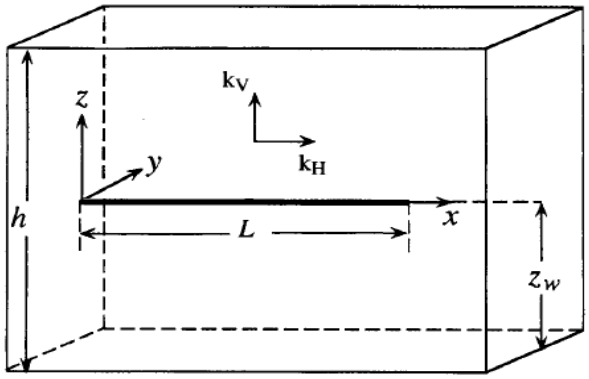
$$S_a = \ln\left[\left(\frac{k_h}{k_v}\right)^{1/4}\frac{2}{1+\sqrt{k_v k_h}}\right] \quad \text{---------- 50}$$

- بداية مدة تاثير طور الجريان الشعاعي اللابعدي t_{DL} تحدد كما في الصيغة الاتية:

$$t_{DL} = 1.28\left(\frac{h - z_w}{L}\right)^2 \quad \text{---------- 51}$$

إذ ان z_w تمثل المسافة من اسفل الطبقة الى مستوى البئر الافقي الشكل6-26 و الوقت اللابعدي t_{DL} يساوي:

$$t_{DL} = \frac{0.000264\, k_h t}{\phi \mu c_t L^2} \quad \text{---------- 52}$$



الشكل 6-26 : موديل البئر الافقي المفترض

بالساعات فان بداية مدة تاثير طور الجريان الشعاعي يساوي:

$$t = 1.28 \left(\frac{h - z_w}{L}\right)^2 \frac{\phi \mu c_t L^2}{0.000264\, k_h} \quad \text{---------- 53}$$

- وان نهاية مدة تاثير طور الجريان الشعاعي يحدد عندما:

$$t_{DL} = 0.015$$

اي ان نهاية مدة تاثير طور الجريان الشعاعي بالساعات تساوي:

$$t = \frac{0.015 \phi \mu c_t L^2}{0.000264\, k_h} \quad \text{---------- 54}$$

اوبحسب كوود **Goode(1987)** فان نهاية المدة تكون:

$$t = \frac{190.0 d_z^{2.095} r_w^{-0.095} \phi \mu_o c_t}{k_v} \quad \text{---------- 55}$$

وبحسب عودة و بابو Odeh and Babu(1989) فان طول المدة duration التي يستغرقها الجريان الشعاعي في البئر الافقي تؤخذ على اساس اقل قيمة للمعادلتين ادناه :

$$t_{end} = \frac{1800\, d_z^2\, \phi \mu c_t}{k_z} \quad \text{---------- 56}$$

$$t_{end} = \frac{125\ L^2\ \phi\mu c_t}{k_y} \quad \text{---------- 57}$$

t_{end}= time at the end of early-time radial flow hr.

dz = distance from the upper reservoir boundary to the center of the horizontal well، ft

kv =kz= permeability in vertical direction، mD

L — effective length of horizontal well، ft

ky — permeability in y-direction، mD

Ø= porosity frac.

μ= viscosity cp

c_t=total compressibility psi^{-1}

ان المعادلة رقم-56 اعلاه تعطي مقدار الوقت الذي عنده يبدأ تاثير الحدود العليا او السفلى للطبقة على قراءات الضغط عبر الفحص.المعادلة رقم-57 تعطي مقدار الوقت الذي عنده يبدأ المائع بالعبور الى نهايتي البئر الافقي.

ان طريقة اوزكان Ozkan تختلف نوعا ما إذ تستخدم الشكل6-15 لتحديد المدة الزمنية لطوري الجريان الشعاعي المبكر و المتاخر. الشكل6-15 يُوضح علاقة لوغاريتمية ما بين الضغط P_{wD} و الوقت اللابعدي t_D لقيم مختلفة من الطول اللابعدي L_D . الطريقة تفترض ظروف التوصيلية اللامتناهية infinite conductivity ، البئر يقع في منتصف الطبقة المكمنية اي عند z_{wD}=0.5 و k_x=k_y و ان r_{wD}=10^{-4} .حسب الشكل فالمنحني الاسفل يمثل الحل للشق العمودي في بئر عمودي و عمليا يماثل الحل للبئر الافقي عندما $L_D \geq 10$. المنطقة ما بين الخطين المتقطعة dashed lines-AA-BB تمثل منطقة انتقالية ما بين الجريان الشعاعي المبكر و الجريان الشعاعي المتاخر .الشكل لا يتضمن طور الجريان الخطي linear flow عند المدة الوسطية . من الشكل6-15 و الخط المتقطع (dashed line-AA) الراسي او المائل نجد قيمة الوقت اللابعدي t_D بمعرفة الطول اللابعدي L_D الذي يساوي:

$$L_D = \frac{L}{2h}\sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$$

ان اعداد المنحنيات في الشكل6-15 تمت على اعتبار القيم الاتية: z_{wD}=0.5 و r_{wD}=10^{-4} .

ان نصف القطر اللابعدي r_{wD} يساوي:

$$r_{wD} = \frac{2r_w}{L}\sqrt{\frac{k_h}{k_y}} \quad \text{---------- 58}$$

كما و ان k_x=k_y =k_h ، بالتعويض في المعادلة اعلاه ينتج:

$$r_{wD} = \frac{2r_w}{L} \quad \text{---------- 59}$$

- اذن حسب اوزكان فان طول المدة duration التي يستغرقها الجريان الشعاعي يساوي:

$$t = \frac{t_D \phi \mu_o c_t L_w^2}{0.001055 k_h} \quad \text{---------- 60}$$

L_D = dimensionless length
h = reservoir thickness، ft
r_{WD} = dimensionless radius
t_D — dimensionless time

معادلات تصاعد الضغط Build-up equations

باستخدام مبدأ التجميع او التراكب superposition ممكن ان نصل الى المعادلة رقم-61 ادناه في احتساب سلوك تصاعد الضغط للبئر الافقي عبر طور الجريان الشعاعي العمودي:

$$P_{ws} = P_i - \frac{162.6 q \mu B}{\sqrt{k_h k_v}\, L} \log \frac{t+\Delta t}{\Delta t} \quad \text{---------- 61}$$

- عند رسم علاقة ضغط الغلق مع وقت هورنر على ورق نصف لوغاريتمي نحصل على علاقة خط مستقيم بميل m يساوي:

$$m = \frac{162.6 q \mu B}{\sqrt{k_h k_v}\, L} \quad \text{---------- 62}$$

و منه يُمكن حساب معدل نفاذية الطبقة:

$$\sqrt{k_h k_v} = \frac{162.6 q \mu B}{m\, L} \quad \text{---------- 63}$$

- معامل القشرة يساوي:

$$S = 1.15 \left(\frac{P_{ws(\Delta t)} - P_{ws(\Delta t=0)}}{|m|} - \log \frac{\sqrt{k_v k_h}}{\phi \mu c_t r_w^2} \Delta t + 3.23 \right) \quad \text{---------- 64}$$

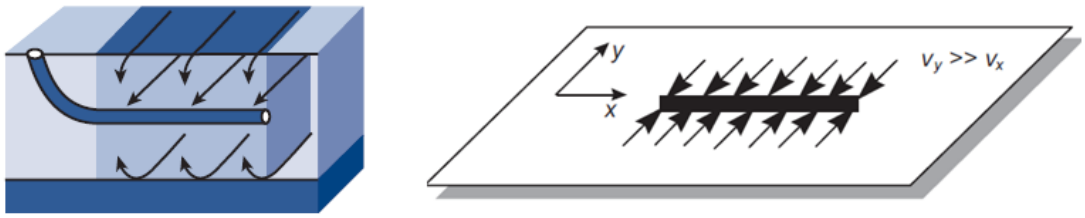
او ممكن كتابته عند استخدام الضغط عند الوقت $\Delta t = 1$ hr. :

$$S = 1.15 \left(\frac{P_{ws1h} - P_{ws(\Delta t=0)}}{|m|} - \log \frac{\sqrt{k_v k_h}}{\phi \mu c_t r_w^2} + 3.23 \right) \quad \text{---------- 65}$$

إذ ان $P_{ws(\Delta t=0)}$ هو قيمة الضغط لحظة غلق البئر اي عند وقت الغلق $\Delta t=0$ ، و ان $P_{ws(\Delta t)}$ هو ضغط الغلق عند اي وقت Δt .

2-9-6 طور الجريان الخطي Linear flow regime او يسمى طور الجريان الخطي الوسطي - Intermediate Linear Flow ILF

نظرًا لأن طول البئر الأفقي L بشكل عام اطول مقارنة بسُمك التكوين h، فبمجرد وصول تاثير الضغط إلى الحدود العلوية والسفلية للطبقة يظهر تاثير طور الجريان الخطي linear flow من المكمن باتجاه البئر في المستوي الافقي. الشكل6-27 .



a- Linear Flow to Horizontal Well

b- Linear Flow regime for a long horizontal well.

الشكل6-27 : طور الجريان الخطي المبكر ELF عبر فحص البئر الافقي في المستوي العمودي و المستوي الافقي

#معادلات هبوط الضغط Drawdown equations

عبر طور الجريان الخطي فان الضغط يتغير مع الجذر التربيعي لوقت الفحص كما يأتي:

$$\Delta p_{wf} = \frac{8.128\, q B \mu}{L_h h \sqrt{\phi c_t \mu k_y}} \sqrt{t} + \frac{141.2 q B \mu}{L_h \sqrt{k_y k_z}} (s_z + s) \quad \text{---------- 66}$$

- حسب المعادلة رقم-66 اعلاه فان الحد الاول مشابه لحالة بئر عمودي يخترق بالكامل شق عموديfully penetrating vertical fractur . في حالة البئر الأفقي فالشكل الهندسي للجريان الخطي linear flow يتالف من خطوط و متجهات جريان متوازية تمامًا تتقارب عند البئر و الذي يقع عند المستوي z_w من سُمك المكمن (الشكل 6-28). ان s يمثل عامل القشرة الميكانيكي و s_z يمثل عامل القشرة من جراء الاختراق الجزئي للبئر بالمستوي العمودي و يساوي حسب عودة 1990 :

$$s_z = -\ln\left(\frac{r_w}{h}\right) + \frac{1}{4}\ln\left(\frac{k_y}{k_z}\right) - \ln\left(\sin\frac{\pi z_w}{h}\right) - 1.838. \quad \text{---------- 67}$$

- ان هذا الطور مهم في تحديد النفاذية الافقية إذ عند رسم علاقة تغير الضغط مع الجذر التربيعي للوقت على ورق عادي نحصل على علاقة خط مستقيم بميل m_{linear} يساوي :

$$m_{linear} = \left(\frac{8.128 q B \mu}{Lh} \sqrt{\frac{1}{\phi \mu c_t k_H}}\right) \quad \text{---------- 68}$$

❖ منه يُمكن تحديد النفاذية الافقية k_H من معرفة L او يُمكن تحديد طول البئر الافقي L الفعال المساهم في الانتاج على فرض ان المستوى الأفقي متجانس isotropic - $k_x=k_y=k_H$.

$$L^2 k_H = \left(\frac{8.128 q_o \beta_o}{h\ m_{linear}}\right)^2 \frac{\mu_o}{\phi c_t} \quad \text{---------- 69}$$

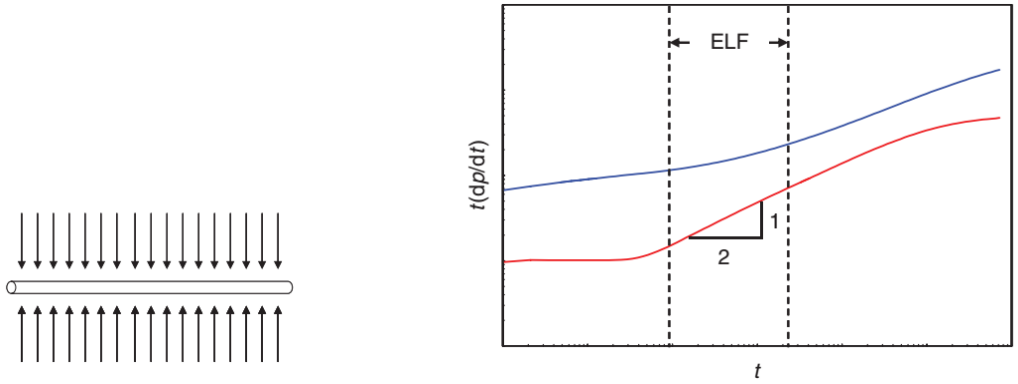
عبر هذا الطور فان النفاذية الافقية بالاتجاه y هي المؤثرة على سلوك الجريان الشكل6-27- b .

- ان تاثير الجريان الخطي هذا لا يظهر عبر الفحص في حال كون النسب h/L و $(k_v/k_h)^{0.5}$ عالية لان الجريان سينتشر بعيدا عن نهايات البئر الافقي (باتجاه- y- direction) قبل ان تظهر تاثيرات الحدود العليا او السفلى للطبقة في z- direction.

- استخدام الرسم اللوغاريتمي التشخيصي Diagnostic plot في تفسير الفحص سيساعد في تاكيد وجود تاثير الطور الخطي المبكر ، إذ تُظهر بيانات الفحص المبكرة علاقة خط مستقيم بميل النصف m=1/2 عند الطور الخطي المبكر Early Radial Flow- ERF الشكل6-28 ، لاحظ ان الشكل لا يُظهر اي تاثير لتخزين البئر WBS .

و بحسب كوود Goode (1987) فان نهاية فترة الجريان الخطي تكون:

$$t_{e2} = \frac{20.8 \phi \mu_o c_t L^2}{k_v} \quad \text{---------- 70}$$



الشكل 6-28 : طور الجريان الخطي المبكر ELF عبر فحص البئر الافقي في الرسم التشخيصي اللوغاريتمي

اذا كان الوقت المحسوب في المعادلة رقم-70 اعلاه اقل من وقت الجريان الشعاعي العمودي فمتوقع ان لا يظهر تاثير طور الجريان الخطي.

بحسب عودة Odeh and Babu's(1990) فان طول مدة تاثير طور الجريان الخطي تُحسب على اساس بداية و نهاية تاثير الطور كما يأتي :

$$t_{end} = \frac{160\phi c_t \mu L_h^2}{k_x} \geq t \geq t_{start} = \max \begin{cases} \dfrac{1{,}800\, z_w^2 \phi c_t \mu}{k_z} \\ \dfrac{1{,}800\,(h - z_w)^2\, \phi c_t \mu}{k_z} \end{cases}$$

اذا كانت $t_{start} > t_{end}$ فلا يظهر(يختفي) الطور الخطي عبر الفحص.

$$t = \frac{20.8\phi\mu_o c_t L^2}{k_v} \quad \text{---------- 71}$$

اذا كان الوقت المحسوب في المعادلة رقم-71 اعلاه اقل من وقت تاثير الجريان الشعاعي العمودي في هذه الحالة لا يظهر طور الجريان الخطي عبر الفحص ايضا و يعني ان طول البئر الافقي ليس بالكفاية لكي يُقارن مع سُمك المكمن.

و لكي يظهر الطور الخطي عبر الفحص نحتاج لان يكون طول البئر الافقي:

$$L > \left[3.33\ D_z \sqrt{\frac{k_y}{k_z}}\right]$$

و ان $k_z = k_v$

معادلات تصاعد الضغط Build-up equations

المعادلة رقم-72 في ادناه لاحتساب سلوك تصاعد الضغط للبئر الافقي عبر طورالجريان الخطي اعتمدت ايضا مبدأ التجميع او التراكب superposition principle و كما يأتي:

$$P_{ws} = P_i - \frac{8.13 q\mu B}{Lh\sqrt{\phi\mu c_t k_h}} \left[\sqrt{t+\Delta t} - \sqrt{\Delta t}\right] \quad \text{---------- 72}$$

❖ عند رسم علاقة ضغط الغلق مع الجذر التربيعي للوقت

$$P_{w\Delta t} \text{ vs } (\sqrt{t+\Delta t} - \sqrt{\Delta t})$$

على ورق عادي نحصل على علاقة خط مستقيم بميل m_{linear} ويساوي :

$$m_{linear} = \frac{8.13 q\mu B}{Lh\sqrt{\phi\mu c_t k_h}} \quad \text{---------- 73}$$

❖ منه يُمكن حساب :

$$\sqrt{\phi\mu c_t k_h} = \frac{8.13 q\mu B}{|m| Lh} \quad \text{---------- 74}$$

❖ معامل القشرة يُحسب كما يأتي:

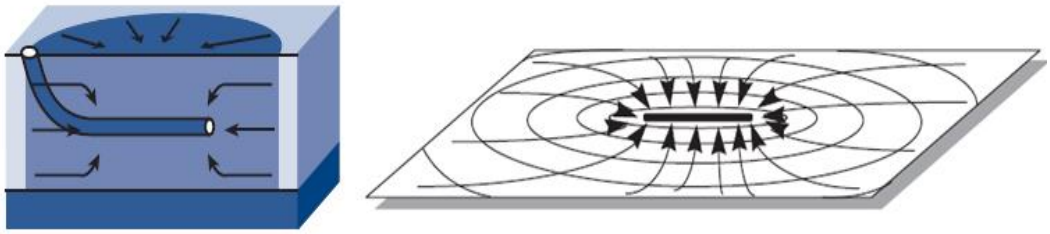
$$S=\left[\frac{\sqrt{k_h k_v}}{17.37}\right]\left[\frac{P_{ws(\Delta t)}-P_{ws(\Delta t=0)}}{8.13 q\mu B}-\frac{\sqrt{\Delta t}-\sqrt{t+\Delta t}+\sqrt{t}}{\sqrt{\phi\mu c_t k_h}}\right]-$$

$$\ln\frac{h}{r_w}-0.25\ln\frac{k_h}{k_v}+\ln\sin\frac{180^\circ z_w}{h}+1.838 \qquad \text{---------- 75}$$

ان $P_{ws(\Delta t)}$ تمثل ضغط الغلق عند وقت الغلق Δt على ان تقع على الخط المستقيم و ان $P_{ws(\Delta t=0)}$ تمثل الضغط عند لحظة غلق البئر(لحظة توقف الجريان) اي عند الوقت $\Delta t=0$.

3-9-6 طور الجريان الشعاعي المتاخر Late Radial Flow LRF

او ما يسمى احيانا بطور الجريان شبه الشعاعي المتاخر Late PseudoRadial Flow-LPRF ، فعندما تكون طول مدة الفحص كافية long enough بحيث تنتقل اشارة الضغط بعيدا في المكمن سيظهر الجريان الشعاعي مرة اخرى ليس في المستوي العمودي على البئر الافقي و لكن في المستوي الافقي الموازي لطول البئر الشكل6-29. بالامكان عبر هذا الطور من تحديد معدل نفاذية الطبقة في المستوي الافقي horizontal plane وتساوي $k_h=(k_x k_y)^{0.5}$ ، كما و يُمكن تحديد معامل القشرة الكلي Total skin factor والذي يساوي مجموع معامل القشرة الميكانيكي S و معامل القشرة الهندسي S_g ، إذ يؤثر S_g بحسب شكل انحناء خطوط الجريان (يختلف بحسب الشق او البئر العمودي او البئر المائل او البئر الافقي).



الشكل 6-29 : مخطط يُوضح طور الجريان شبه الشعاعي المتاخر LPRF عبر فحص البئر الافقي في المستويين العمودي و الافقي

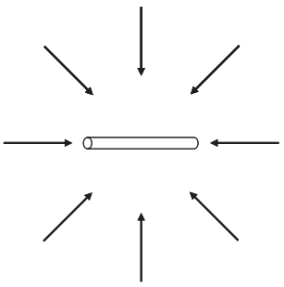
معادلات هبوط الضغط – Drawdown equations

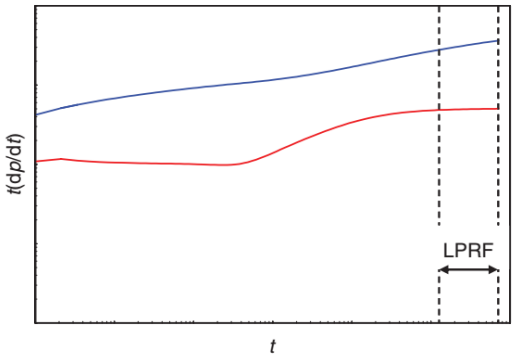
❖ المعادلة العامة التي تصف سلوك جريان طور شبه الشعاعي المتاخر عبر فحص البئر الافقي تكون كالاتي:

$$p_i-p_{wf}=\frac{162.6\, qB\,\mu}{k_h h}\left(\log t+\log\frac{k_h}{\phi\mu c_t r_w^2}-3.23+0.87\,S'\right) \qquad \text{---------- 76}$$

❖ عند رسم علاقة تغير الضغط مع الوقت على ورق نصف لوغاريتمي نحصل على علاقة خط مستقيم بميل m' منه يُمكن حساب النفاذية الافقية للطبقة المكمنية:

$$k_h = \frac{162.6\, qB\, \mu}{m' h} \quad \text{---------- 77}$$





الشكل 6-30 : طور الجريان شبه الشعاعي المتاخر LPRF عبر فحص البئر الافقي - الرسم التشخيصي اللوغاريتمي

- ان استخدام الرسم اللوغاريتمي التشخيصي Diagnostic plot في تفسير الفحص مهم و مفيد و ذلك لتاكيد وجود تاثير الطور الشعاعي المتاخر ، إذ تُظهر بيانات الفحص المتاخرة علاقة خط مستقيم افقي بميل الصفر m=0 عند الطور(شبه) الشعاعي المتاخر Late Pseudo Radial Flow- LPRF الشكل6-30 ، هنا تاثير تخزين البئر WBS مهمل.

- من تحديد الضغط عند ساعة واحدة P_{1hr} من الرسم فيُمكن حساب معامل القشرة S' عند مدة الجريان شبه الشعاعي كما يأتي:

$$S' = 1.15\left(\frac{p_i - p_{1h}}{m'} - \log\frac{k_h}{\phi\mu c_t r_w^2} + 3.23\right) \quad \text{---------- 78}$$

معامل القشرة S' اعلاه يعتمد على معامل قشرة البئر S المحسوب عند الجريان الشعاعي في المستوي العمودي و معامل القشرة الهندسي Geometrical skin-S_g و يساوي:

$$S' = S_g + \frac{h}{L}\sqrt{\frac{k_h}{k_v}}\, S \quad \text{---------- 79}$$

هنا عامل القشرة للبئر الافقي S، يمثل مجموع تاثيرات التضرر الميكانيكي damage بالطبقة (من جراء عمليات الاكمال و الانتاج) و من جراء عامل اللاتجانس anisotropy- (اختلاف النفاذية بجوار حفرة البئر).

ان معامل القشرة الهندسي S_g يقيس التحسن بانتاج البئر الافقي بسبب الشكل الهندسي لمنطقة تصريف البئر مقارنة بالشكل الهندسي لمنطقة تصريف البئر العمودي. يُعد معامل القشرة الهندسي معاملا مهمًا للآبار الأفقية المحفورة في تكوينات سميكة أو في التكوينات التي تظهر

تباينًا كبيرًا بين النفاذية k_h وk_v ، يكون سالب و يُحسب كما يأتي::

$$S_g = \ln\frac{4r_w}{L} + \frac{h}{L}\sqrt{\frac{k_h}{k_v}}\ \ln\left(\frac{h}{2\pi\, r_w \sin\frac{\pi z_w}{h}}(k_h/k_v)^{1/4}\right) \quad \text{---------- 81}$$

المعادلة رقم-81 اعلاه لا تاخذ بنظر الاعتبار تاثير نهايات البئر الافقي لذا فان القيمة الحقيقية S_g اقل من القيمة الحسابية وتعتمد بشكل اساسي على عامل اللاتجانس $(k_v/k_h)^{0.5}$. المعامل S_g يكون سالب بمعنى ان البئر الافقي يُحسن الانتاجية قرب حفرة البئر ما دام $L(k_v/k_h)^{0.5}$ اكبر من hk_h للبئر العمودي.

الجدول6-7 ادناه يُوضح الربح من جراء استخدام البئر الافقي من منظور الشكل الهندسي عندما تتغير النفاذية العمودية باخذ البيانات الاتية .

Length of the horizontal well $L = 500$ m Net pay $h = 50$ m
Well radius $r_w = 0.1$ m Centered well $z_w = 25$ m.

k_v/k_h	1	0.1	0.01	0.0014	0.0001
S_g	–6.9	–6.3	–4.5	0	20.4

جدول 6-7 : الربح من جراء استخدام البئر الافقي

ممكن حساب معامل القشرة الظاهري Apparent skin s_a من مدحت Medhat(2009) و الذي يكافيء $S^{\backslash}$ في المعادلة رقم-79 عند الجريان الشعاعي المتاخر LRF . s_a يساوي مجموع معامل القشرة المكافيء pseudoskin factor-s_p (رياضيا يمثل الفرق بين الضغوط اللابعدية للآبار الأفقية و العمودية عبر الطور LRF) زائدا عامل التضرر حول البئر الأفقي s و يساوي :

$$s_a = s_p + \sqrt{\frac{k}{k_z}}s. \quad \text{---------- 82}$$

ممكن حساب معامل القشرة المكافيء s_p من احدى العلاقات التجريبية الاتية:

❖ **<u>علاقة بيسون *Besson Correlation(1990)*</u>**

في الآبار العمودية، يُستخدم معامل القشرة (Skin Factor) لتقدير درجة الضرر أو التحسين بالقرب من جدار البئر. لكن في الآبار الأفقية ، قد يكون توزيع التلف أو التحسين غير متجانس، لذا تُستخدم علاقات مثل بيسون لحساب معامل مكافئ يعكس التأثير الكلي.

تُقدم علاقة بيسون تقديرًا لمعامل القشرة المكافئ (s_p) بناءً على: نسبة الطول الأفقي للبئر إلى نصف قطر البئر(L / r_w) ، سُمك الطبقة(h) و نوع التدفق المتوقع (Uniform Flux أو Infinite Conductivity).

العلاقة الرياضية:

$$s_p \approx \ln\left(\frac{4r_w}{L_h}\right)+\frac{\sqrt{k/k_z}h}{L_h}\ln\left[\frac{2\sqrt{k/k_z}h}{2\pi r_w\left(1+\sqrt{k/k_z}\right)\cos\pi\dfrac{2z_w-h}{2h}}\right]$$

$$-\left(\frac{\sqrt{k/k_z}h}{L_h}\right)^2\left[\frac{1}{6}+2\left(\frac{2z_w-h}{2h}\right)^2\right] \quad \text{------ 83}$$

شرط تطبيق علاقة بيسون في ان يكون:

$$\frac{\sqrt{k_z/k}L_h}{h} \geq 0.4 \quad \text{---------- 84}$$

علاقة اوزكان-راجافان Ozkan-Raghavan(1991) Correlation

قدم أوزكان و راجافان (1991) علاقة ارتباطًا آخرى لعامل القشرة المكافىء للبئر الأفقي كما يأتي:

$$s_p = s_{pf} + F \quad \text{---------- 85}$$

s_{pf} عامل القشرة المكافىء لبئر متشقق متساوي الطول يساوي:

$$s_{pf} = \frac{1}{2}\ln\left(\frac{r_{wD}^2}{L_D^2}\frac{k_z}{\sqrt{k_x k_y}}\right)+1+\sqrt{\frac{k_x}{k}}\,\sigma\left(x_D,-\sqrt{\frac{k}{k_x}},+\sqrt{\frac{k}{k_x}}\right), \quad \text{---------- 86}$$

إذ ان σ تساوي :

$$\sigma(x_D,a,b)=\frac{1}{2}\left[(x_D-b)\ln|x_D-b|-(x_D-a)\ln|x_D-a|\right] \quad \text{---------- 87}$$

ان x_D يعتمد على ظروف الجريان و يساوي :

$$x_D=\begin{cases}0 & \text{uniform flux}\\ 0.732 & \text{infinite conductivity (long wells)}\end{cases} \quad \text{---------- 88}$$

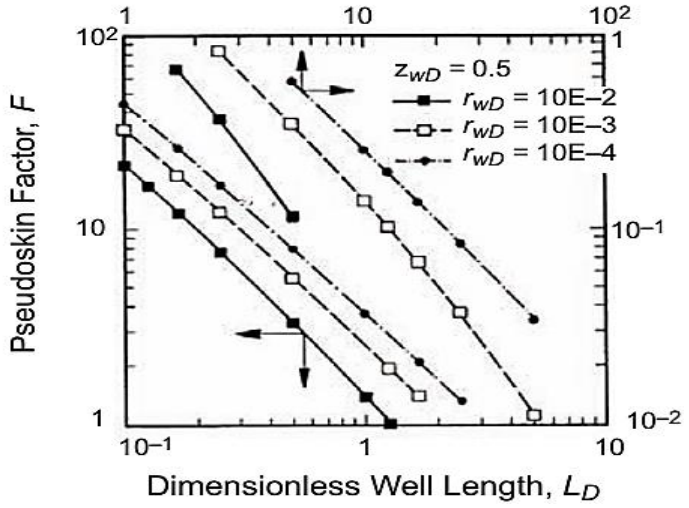
شرط تطبيق طريقة أوزكان و راجافان ان تكون قيمة L_D اعلى او تساوي :

$$L_D \geq \frac{3.6}{\pi\left|\sqrt{k/k_x}-x_D\right|} \quad \text{----------89}$$

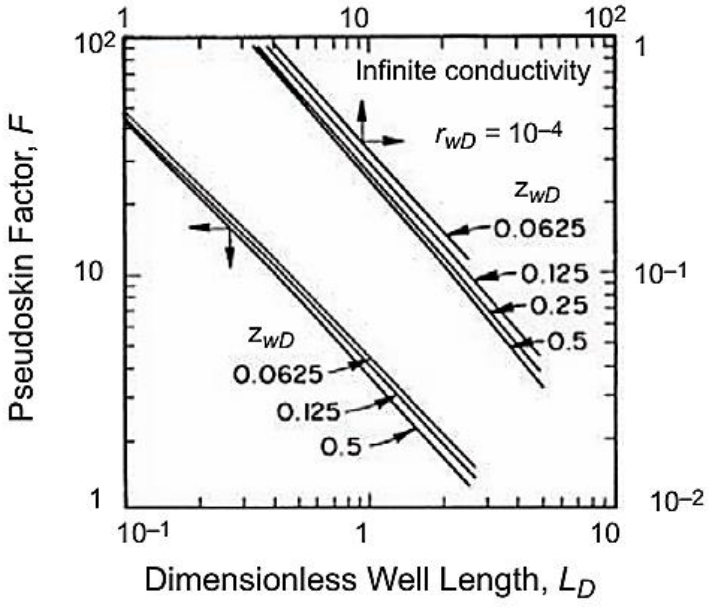
المعامل F يساوي:

$$F \approx -\frac{\sqrt{k_x/k}}{2L_D} \ln\left\{4\sin\left[\pi\left(z_{wD}+\frac{r_{wD}}{2}\right)\right]\sin\left(\pi\frac{r_{wD}}{2}\right)\right\} \quad \text{----------} \quad 90$$

او ممكن استخدام الاشكال رقم 6-31 و رقم6-32 في ايجاد قيمة F لمختلف قيم z_{wD}،r_{wD} .



شكل 6-31 : ايجاد قيمة F لمختلف قيم z_{wD} r_{wD}=0.5، (اوزكان 1989)



شكل 6-32 : ايجاد قيمة F لمختلف قيم z_{Wd} $r_{wD}=10^{-4}$، (اوزكان 1989)

إذ ان :

$$L_D = \frac{L_h}{2h}\sqrt{\frac{k_z}{k}}.$$

$$r_{wD} = r_{w,eq}/h \quad \text{---------- 91}$$

$$r_{w,eq} = \frac{r_w}{2}\left[\left(\frac{k_y}{k_z}\right)^{0.25} + \left(\frac{k_z}{k_y}\right)^{0.25}\right] \quad \text{---------- 92}$$

$$z_D = z/h$$

L_h, ft	1,200
z_w, ft	35
h, ft	70
r_w, ft	0.3
ϕ, fraction	0.17
c_t, psi^{-1}	8×10^{-6}
μ, cp	0.6
k_x, md	100
k_y, md	50
k_z, md	10

الجدول6-8 : بيانات المثال رقم-6.

مثال-6 مدحت Medhat(2009)

احسب عامل القشرة المكافىء للبئر الأفقي و بحسب البيانات الموضحة في الجدول6-8 .

الحل:

علاقة بيسون Besson Correlation

❖ نجد :

$$k = \sqrt{k_x k_y} = \sqrt{100\times 50} = 70.7 \text{ md}$$

$$\frac{\sqrt{k_z/k}L_h}{h} = \frac{\sqrt{10/70.7}\times 1{,}200}{70} = 6.4 > 0.4.$$

بتوفر الشرط اعلاه لذا يُمكن استخدام علاقة بيسون.

$$s_p = \ln\left(\frac{4\times 0.3}{1{,}200}\right) + \frac{\sqrt{70.7/10}}{1{,}200}$$

$$\times \ln\left[\frac{2\times\sqrt{70.7/10}\times 70}{2\times\pi\times 0.3\times\left(1+\sqrt{70.7/10}\right)\cos\pi\dfrac{2\times 35-70}{2\times 70}}\right]$$

$$s_p = \ln\left(\frac{4\times 0.3}{1{,}200}\right) + \frac{\sqrt{70.7/10}}{1{,}200}$$

$$\times \ln\left[\frac{2\times\sqrt{70.7/10}\times 70}{2\times\pi\times 0.3\times\left(1+\sqrt{70.7/10}\right)\cos\pi\dfrac{2\times 35-70}{2\times 70}}\right]$$

$$-\left(\frac{\sqrt{70.7/10}\times 70}{1{,}200}\right)^2\left[\frac{1}{6}+2\left(\frac{2\times 35-70}{2\times 70}\right)^2\right]$$

$$= -6.9$$

علاقة اوزكان-راجافان Ozkan-Raghavan Correlation

نجد المتغيرات اللابعدية والتي تشتمل على:

$$r_{w,eq} = \frac{0.3}{2}\left[(50/10)^{0.25} + (10/50)^{0.25}\right] = 0.325,$$

$$r_{wD} = 0.325/70 = 0.00464,$$

$$k = \sqrt[3]{k_x k_y k_z} = \sqrt[3]{100\times 50\times 10} = 36.8 \text{ md},$$

$$L_D = \frac{1{,}200}{2\times 70}\sqrt{\frac{10}{36.8}} = 4.47,$$

$$z_{wD} = 35/70 = 0.5.$$

بفرض ان توصيلية البئر من النوع اللامتناهي an infinite-conductivity horizontal well ، اذن x_D=0.732 . لدينا –

$$\frac{3.6}{\pi\left|\sqrt{k/k_x} - x_D\right|} = \frac{3.6}{\pi\times\left|\sqrt{36.8/100} - 0.732\right|} = 9.14$$

لاحظ ان شرط طريقة اوزكان لم يتحقق لان :

$$L_D = 4.47, \quad < \frac{3.6}{\pi\left|\sqrt{k/k_x} - x_D\right|} = 9.14$$

لكن لا يزال بإمكاننا توقع أن تعطي علاقة أوزكان-راجافان تقديرًا لعامل القشرة المكافىء للبئر الأفقي.

من المعادلتين 86 و 87 ، نحصل على عامل القشرة المكافىء للشق العمودي كما يأتي:

$$s_{pf} = \frac{1}{2}\ln\left(\frac{0.00464^2}{4.47^2}\frac{10}{\sqrt{100\times 50}}\right) + 1 + \sqrt{\frac{100}{36.8}}\left\{\frac{1}{2}\left[\left(0.732 - \sqrt{\frac{36.8}{100}}\right)\ln\left|0.732 - \sqrt{\frac{36.8}{100}}\right|\right.\right.$$

$$\left.\left. - \left(0.732 + \sqrt{\frac{36.8}{100}}\right)\ln\left|0.732 + \sqrt{\frac{36.8}{100}}\right|\right]\right\} \quad = -7.4.$$

من المعادلة رقم-90 ، نحسب عامل القشرة المكافىء للبئر الأفقي نسبة للشق العمودي و بنفس الطول كما يأتي:

$$F \approx -\frac{1}{2\times 4.47}\sqrt{\frac{100}{36.8}} \times \ln\left\{4\times\sin\left[180\times\left(0.5 + \frac{0.00464}{2}\right)\right]\times\sin\left(180\times\frac{0.00464}{2}\right)\right\}$$

$$= 0.6.$$

ثم، من المعادلة رقم-85 ، نحسب عامل القشرة المكافىء للبئر الأفقي كما يأتي:

$$s_p = s_{pf} + F = -7.4 + 0.6 = -6.8.$$

معادلات تصاعد الضغط Build-up equations

ادناه معادلة احتساب سلوك تصاعد الضغط للبئر الافقي عبر طورالجريان شبه الشعاعي عندما تكون النفاذية متجانسة في المستوى الافقي اي ان : $k_x = k_y = k_h$

$$P_{ws(\Delta t)} = p_i - \frac{162.6q\mu B}{hk_h}\log\frac{t+\Delta t}{\Delta t} \quad \text{---------- 93}$$

و في حال عدم تجانس النفاذية في المستوى الافقي اي ان $k_x \neq k_y$ فيُمكن كتابة المعادلة رقم-93 بالصيغة الاتية:

$$P_{ws(\Delta t)} = p_i - \frac{162.6q\mu B}{h\sqrt{k_x k_y}}\log\frac{t+\Delta t}{\Delta t} \quad \text{---------- 94}$$

- عند رسم علاقة ضغط الغلق مع وقت هورنر:

$$P_{ws(\Delta t)} \text{ vs } \left[\frac{t+\Delta t}{\Delta t}\right]$$

على ورق نصف لوغاريتمي نحصل على علاقة خط مستقيم بميل m' منه يُمكن حساب معدل النفاذية عند المستوي الافقي و تساوي:

$$\sqrt{k_x k_y} = \frac{162.6 q \mu B}{|m'| h} \quad \text{---------- 95}$$

معامل القشرة S' يساوي:

$$S' = \left[1.15 \sqrt{\frac{k_z}{k_y}} \frac{L}{h}\right]\left[\frac{P_{ws(\Delta t)} - P_{ws(\Delta t=0)}}{|m'|} + \log (t+\Delta t) - \log t\right.$$

$$\left. -\log \frac{k_y \Delta t}{\phi \mu c_t L^2} + 1.76\right] - \ln \frac{h}{r_w} - 0.25 \ln \frac{k_x}{k_z} + \ln \sin \frac{180^\circ z_o}{h} + 1.838 \quad \text{------- 96}$$

لاحظ ان $k_z = k_v$.

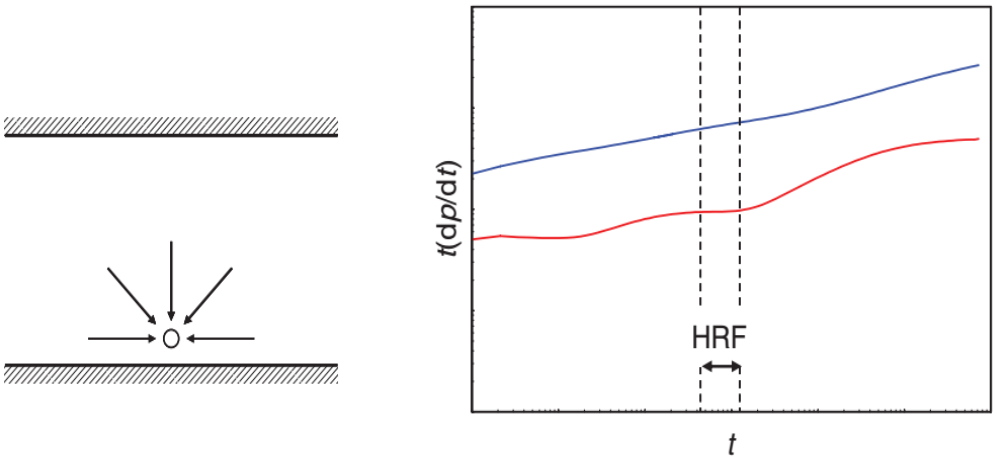
4-9-6 طور الجريان نصف شعاعي-Horizontal Well‹Hemi-Radial Flow HRF .

يُمكن كتابة سلوك الضغط لبئر أفقي يقع بالقرب من الحدود السفلى او العليا للطبقة المكمنية النفطية الشكل6-33 على النحو الاتي:

$$p_i - p_{wf} = \frac{325.3 q B \mu}{\sqrt{k_y k_z} L_h}\left[\log\left(\frac{\sqrt{k_y k_z}\, t}{\phi \mu c_t r_w^{\,2}}\right) - 3.23\right] + \frac{141.2 q B \mu}{\sqrt{k_y k_z} L_h}\left(s + s_{HRF}\right) \quad \text{---------- 97}$$

إذ ان معامل القشرة لشكل الجريان الهندسي s_{HRF} سالب و يساوي:

$$s_{HRF} = -\ln \frac{2 d_z}{r_w} \quad \text{---------- 98}$$



شكل 6-33 : طور الجريان نصف شعاعي للبئر الافقي على الرسم التشخيصي اللوغاريتمي

و ان dz تمثل المسافة الأقرب إلى حدود الطبقة في المقطع العمودي. يحدثالطور نصف شعاعي HRF فقط عندما يكون dz أقل من 10% من سُمك التكوين h. ممكن تشخيص وجود HRF من الرسم التشخيصي اللوغاريتمي وذلك عبر الخط الافقي الذي يظهر بعد طور الجريان الشعاعي المبكر ERF .

عند رسم علاقة Δp vs t على احداثيات نصف لوغاريتمية و في حال وجود تاثير الطور نصف شعاعي HRF فان البيانات تعطي علاقة خط مستقيم بميل m و يساوي:

$$m = \frac{325.3qB\mu}{\sqrt{k_y k_z}\,L_h} \quad \text{---------- 99}$$

من الميل m يُمكن ان نحدد معدل النفاذية في المستوي العمودي y-z :

$$\sqrt{k_y k_z} = \frac{325.3qB\mu}{m\,L_h} \quad \text{---------- 100}$$

Time, hrs.	$\Delta p=(p_i-p_{wt})$, psi
.24	33.96
.48	36.41
.96	38.85
1.44	40.26
2.40	41.96
12.50	46.23
16.80	46.91
24.00	47.65

جدول 6-9 :بيانات فحص البئر الافقي للمثال رقم-7

مثال-7

تم إجراء فحص هبوط الضغط لبئر نفطي أفقي. المعلومات المتوفرة ادناه:

q= **800 STB/day drainage area: long=4000 ft, wide=2000 ft , h=200 ft , L=1000 ft**

oil viscosity=1 cp , Bo=1.25 , rw=0.25 " , porosity=0.2 , c_t=0.0000015 1/psi

بيانات الفحص: فرق الضغط $\Delta p = P_i - P_{wt}$ مقابل الوقت t أُدرجت في الجدول6-9 أدناه.

لمطلوب:

حساب النفاذية الافقية $k_h=k_x$ و العمودية $k_v=k_z$ و معامل القشرة s؟؟

الحل:

- رسم البيانات على رسم بياني نصف لوغاريتمي كما في الشكل6-34 ، ثم نمرر احسن خط مستقيم عبر بيانات الفحص و نجد له الميل m=8 psi/cycle.

❖ حساب معدل النفاذية عند المقطع العمودي :

$$\sqrt{k_x k_z} = \frac{162.6 \times 800 \times 1.25 \times 1}{1000 \times 8} = 20.3$$

$$k_x k_z = (20.3)^2 = 412$$

❖ لحساب معامل القشرة ناخذ نقطة لا على التعيين تقع على الخط المستقيم و نحدد احاثياتها فرق الضغط: $\Delta p = 42$ psi يقابله $t = 2.4$ hrs.

اذن معامل القشرة يساوي:

$$s_A = 1.15\left[\frac{42}{8} - \log\frac{2.4 \times 20.3}{0.2 \times .25^2 \times 15 \times 10^{-6}} + 3.23\right]$$
$$= 0.07$$

و ان **s=0**

<u>مثال-8</u> : تم إجراء فحص هبوط الضغط على بئر أفقي ، يقع في مركز منطقة تصريف على شكل صندوق box بطول و عرض و سُمك 4000 ft،4000 .100 ، المعلومات المتوفرة عن البئر أُدرجت في ادناه:

q= **800 STB/day , L=2500 ft oil viscosity=1 cp ,**

Bo=1.25 , rw=0.25 ft , porosity=0.2 , c_t=0.0000015 1/psi

بيانات الفحص: فرق الضغط $\Delta p = P_i - P_{wt}$ مقابل الوقت t أُدرجت في الجدول6-10 أدناه.

Time hrs.	Δp psi
1.2	4.11
2.4	4.54
12.0	6.33
24.0	7.65
48.0	9.49
60.0	10.26

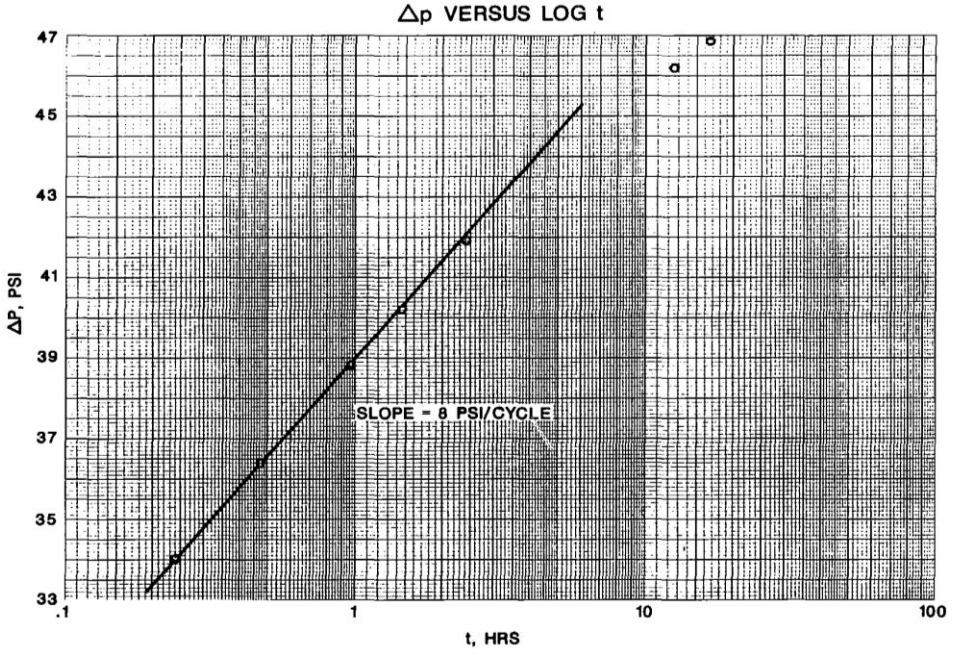
جدول 6-10 :بيانات فحص البئر الافقي للمثال رقم-8

المطلوب:اجراء تفسير للفحص؟؟

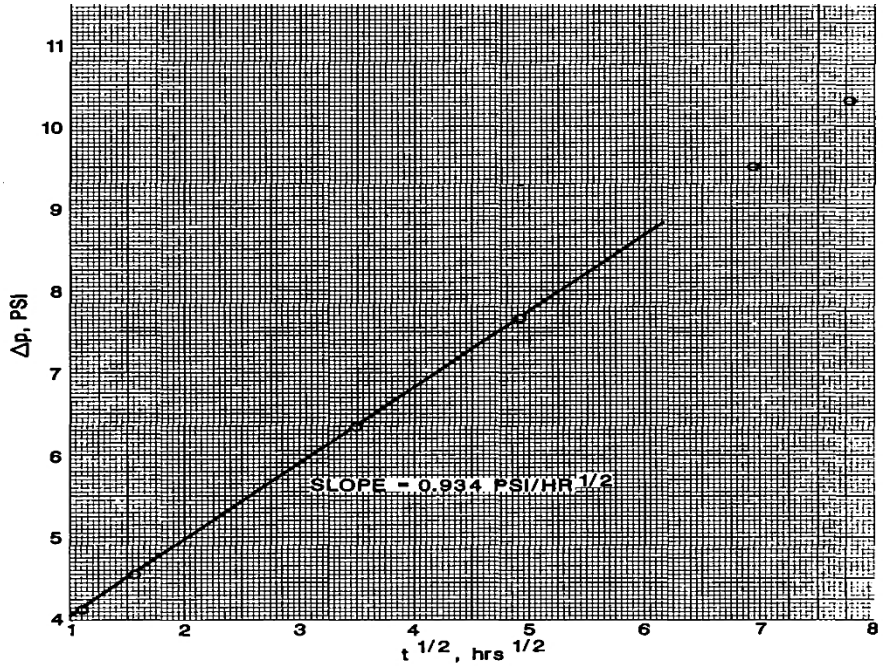
الحل:

❖ تشير البيانات المبكرة من الفحص إلى أن مدة الجريان هذه قد تكون شعاعية مبكرة early radial أو خطية مبكرة early linear.

- عند رسم علاقة Δp مع t على رسم باحداثيات نصف لوغاريتمي الشكل 6-34 فان نقاط الفحص تنحرف عن الخطً المستقيمً مما يشير إلى أن الجريان ليس شعاعيًا.
- و عند رسم علاقة Δp مقابل $t^{1/2}$ على رسم بياني عادي ordinary coordinate فان نقاط الفحص تعطي علاقة خطًا مستقيمًا مما يشير إلى وجود تاثير طور الجريان الخطي عبر المدة المبكرة من الفحص الشكل6-35 .



الشكل 6-34 : رسم بيانات فحص البئر الافقي على ورق نصف لوغاريتمي للمثال رقم-8



الشكل 6-35 : رسم بيانات فحص البئر الافقي على ورق عادي للمثال رقم-8

❖ - نمرر افضل خط مستقيم عبر بيانات الفحص و نجد الميل له m=0.934 psi/cycle.

- من الميل نجد:

$$\sqrt{\phi\mu c_t k_x} = \frac{8.13 \times 800 \times 1.25 \times 1}{.934 \times 2500 \times 100} = 0.0348$$

- اذن النفاذية الافقية تساوي:

$$k_h = k_x = \frac{(.0348)^2}{\phi\mu c_t} = 404 \text{ md.}$$

للتقريب k_h=400 md.

- لحساب معامل القشرة ناخذ نقطة على الخط المستقيم و نقرا احداثياتها على الاحداثي السيني و لتكن $t^{1/2}$ =3 $hr^{1/2}$ و نقرأ ما يقابلها من فرق الضغط على الاحداثي الصادي الذي يساوي

Δp =5.9 psi.

- اذن معامل القشرة s_A بتاثير عدم التماثل anisotropy يساوي:

$$s_A = \left[\frac{5.9 \times 2500 \times 100}{8.13 \times 800 \times 1.25 \times 1} - \frac{3}{.0348}\right] \frac{\sqrt{400 \times 20}}{17.37 \times 100}$$

$$- \ln 400 - 0.25\ln\frac{400}{20} + \ln \sin\frac{180° \times 50}{100} + 1.838$$

$$s_A = 0$$

مثال-9 :تم إجراء فحص هبوط الضغط على بئر أفقي المعلومات المتوفرة في ادناه:

$$h = 150', \; L = 900', \; q = 800 \text{ STB/day}, \; r_w = 0.25',$$

$$\mu = 1, \; B_o = 1.25, \; \phi = 0.2, \; c_t = 15 \times 10^{-6} \frac{1}{\text{psi}},$$

بيانات الفحص أُدرجت ادناه:

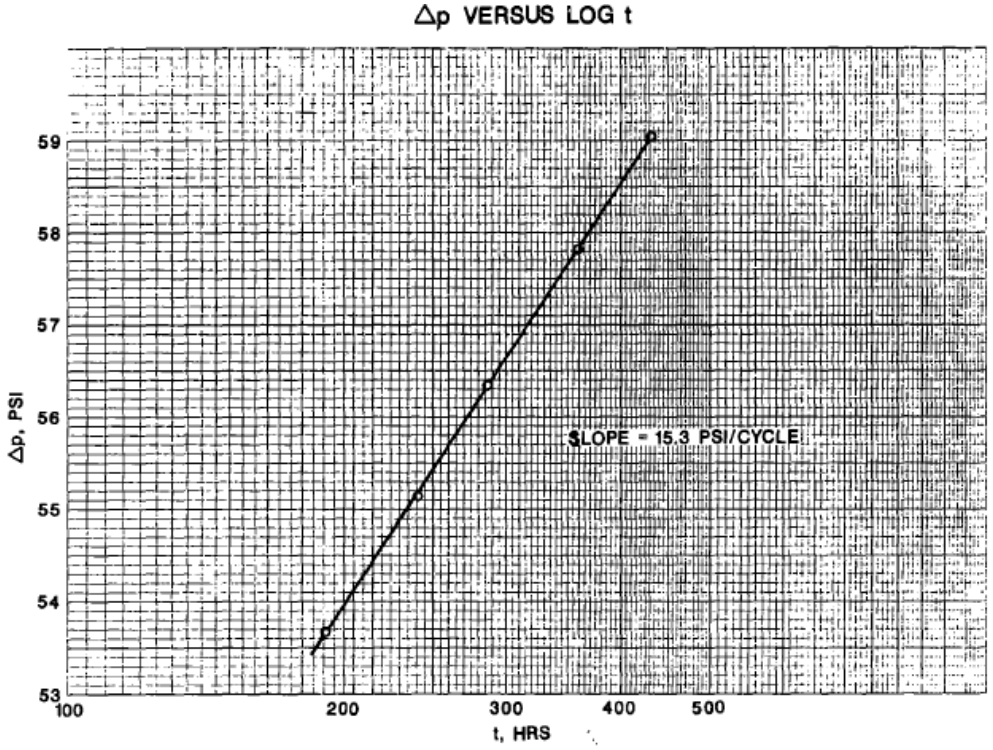
Time, hrs.	Δp, psi
192	53.69
240	55.13
288	56.32
360	57.81
432	59.05

المطلوب:

اجراء تفسير للفحص؟؟

الحل:

- لاحظ ان البيانات تمثل فترة متأخرة من الفحص ، لذلك عند رسم علاقة Δp مقابل $t^{1/2}$ على رسم بياني عادي ordinary coordinate لا تعطي علاقة خطًا مستقيمًا ، لكن رسم علاقة نصف لوغاريتمية ما بين Δp مع t ستعطي علاقة خطًا مستقيمًا مما يدل على أن الجريان شعاعيًا متاخر late radial flow الشكل6-36 .



الشكل 6-36 : رسم بيانات فحص البئر الافقي على ورق نصف لوغاريتمي للمثال رقم-9

- نمرر احسن خط مستقيم عبر نقاط الفحص و نجد له الميل m=15.3 psi/cycle.
- من الميل نجد معدل نفاذية المكمن بالمقطع الافقي :

$$\sqrt{k_x k_y} = \frac{162.6 \times 800 \times 1.25 \times 1}{15.3 \times 150} = 70.8 \text{ md.}$$

- لحساب معامل القشرة نحتاج الى قيم النفاذية بالاتجاهات الثلاثة وقيم الادخال لها كالاتي:

k_x=100 md. ، ky=50 md. ، kz=10 md. . ناخذ نقطة على الاحداثي السيني و لتكن t =360 hr و نقرأ ما يقابلها من فرق الضغط الذي يساوي .Δp =57.81 psi.

اذن معامل القشرة يساوي:

$$s_A = \left[1.15\sqrt{\frac{k_z}{k_y}}\frac{L}{h}\right]\left[\frac{p_i - p_{wt}}{|m|} - \log\frac{k_y t}{\phi\mu c_t L^2} + 1.76\right] - \ell n\frac{h}{r_w}$$

$$- 0.25\ell n\frac{k_x}{k_z} + \ell n \sin\frac{180^\circ z_o}{h} + 1.838$$

$$s_A = 1.15\sqrt{\frac{10}{50}\frac{900}{150}}\left[\frac{57.81}{15.3} - \log\frac{50 \times 360}{.2 \times 1 \times 15 \times 10^{-6} \times (900)^2} + 1.76\right]$$

$$- \ell n\ 600 - 0.25\ell n\ \frac{100}{10} + \ell n \sin\frac{180^\circ \times 75}{150} + 1.838$$

$$s_A = .02$$

مثال-10:

احسب الوقت اللازم لإنتهاء الجريان الشعاعي Radial flow عند المقطع العمودي على البئر الافقي الذي طوله 2000 قدم ، البئر يقع على مسافة 20 قدم من اعلى الطبقة . المعلومات المتوفرة الاتية:

$L = 2000\text{-ft}$, $h = 120$ ft; $r_w = 0.354$ ft; $\phi = 15.0\%$; $\beta_o = 1.235$ rb/stb; $\mu_o = 0.35$cP; $c_t = 10.0 \times 10^{-6}\text{psi}^{-1}$; $k = 0.8$mD (from well test data), $k_v = 0.2$mD (from core data)

الحل:

قيمة d_z او (z_w) :

$$d_z = (120/2) - 20 = 40\text{ ft.}$$

❖ حسب كود Goode فان الوقت المطلوب يساوي:

$$t = \frac{190.0 d_z^{2.095} r_w^{-0.095} \phi \mu_o c_t}{k_v}$$

$$= \frac{190.0 \times 40^{2.095} \times 0.354^{-0.095} \times 0.15 \times 0.35 \times 10.0 \times 10^{-6}}{0.2}$$

$$t = 1.25\text{ hr}$$

❖ حسب عودة Odeha فان الوقت المطلوب يساوي اقل القيمتين من المعادلتين الاتية:

$$t = \frac{1800 d_z^2 \phi \mu_o c_t}{k_v}$$

$$= \frac{1800 \times 40^2 \times 0.15 \times 0.35 \times 10.0 \times 10^{-6}}{0.2}$$

$$t = 7.56\text{ hr}$$

القيمة الاخرى للوقت حسب عودة:

$$t = \frac{125L^2\phi\mu c_t}{k_y}$$

$$= \frac{125 \times 2000^2 \times 0.15 \times 0.35 \times 10.0 \times 10^{-6}}{0.8}$$

$$t = 328.0\,\text{hr}$$

نستخدم القيمة الاقل و تساوي .7.56 hrs

❖ و بحسب طريقة اوزكان و باستخدام الشكل6-15 .

*نجد الطول اللابعدي:

$$L_D = \frac{2000}{2 \times 120}\sqrt{\frac{0.2}{0.8}} = 4.17 \quad , \quad (k_x = k_y = k_h)$$

*نصف القطر اللابعدي:

$$r_{wD} = \frac{2r_w}{L}\sqrt{\frac{k_h}{k_y}} = \frac{2 \times 0.354}{2000} \times 1 = 3.54 \times 10^{-4}$$

*استخدام المعلومات اعلاه و من الخط AA في الشكل6-15 نجد الوقت اللابعدي لنهاية الطور و الذي يساوي t_D=0.0015 ، نجد الوقت بالساعات لنهاية الطور و يساوي:

$$t = \frac{\phi\mu c_t L^2}{0.001055k_h} t_D$$

$$= \frac{0.15 \times 0.35 \times 10.0 \times 10^{-6} \times 2000^2}{0.001055 \times 0.8}(1.5 \times 10^{-3})$$

$$t = 3.73\,\text{hr}$$

*اذن مدة الجريان الشعاعي تنتهي ما بين .73 hrs-1.10 و هذا مدى غير مقبول ، لذلك يُفضل ان يكون الغلق عند قاع البئر و ليس من السطح من اجل الحصول على بيانات مفيدة لفترة الجريان الشعاعي العمودي المبكر.

مثال-11: احسب الوقت اللازم لابتداء و إنتهاء الجريان الخطي linear flow للمثال السابق بفرض ان قيمة k_x=k_y=0.8 md.

الحل:

اقصى مسافة ما بين البئر و اعلى او اسفل الطبقة:

$$D_z = h - d_z = 120 - 40 = 80\,\text{ft}$$

❖ حسب عودة فان الوقت المطلوب يساوي اقل القيمتين من المعادلتين الاتية:

$$t = \frac{1800 D_z^2 \phi \mu c_t}{k_v}$$

$$= \frac{1800 \times 80^2 \times 0.15 \times 0.35 \times 10 \times 10^{-6}}{0.2}$$

$$t = 30.24 \text{ hours}$$

القيمة الاخرى للوقت حسب عودة:

$$t = \frac{160 \phi \mu c_t L^2}{k_x}$$

$$= \frac{160 \times 0.15 \times 0.35 \times 10 \times 10^{-6} \times 2000^2}{0.8}$$

$$t = 420 \text{ hours}$$

❖ حسب كود فان الوقت المطلوب يساوي:

$$t = \frac{20.8 \phi \mu c_t L^2}{k_x}$$

$$= \frac{20.8 \times 0.15 \times 0.35 \times 10 \times 10^{-6} \times 2000^2}{0.8}$$

$$t = 54.6 \text{ hours}$$

اذن مدة الجريان الخطي تنتهي ما بين .55-420 hrs ، هذا يُوضح ان طول البئر الافقي عال جدا مقارنة بسُمك المكمن.

مثال-12 : باستخدام بيانات المثال السابق احسب بداية و نهاية مدة طور الجريان شبه الشعاعي المتاخرة Pseudoradial flow- LPRF ؟؟

❖ بحسب طريقة كوود فان بداية طور الجريان شبه الشعاعي يساوي:

$$t = \frac{1230 \phi \mu c_t L^2}{k_x}$$

$$= \frac{1230 \times 0.15 \times 0.35 \times 10 \times 10^{-6} \times 2000^2}{0.8} = 3229 \text{ h}$$

$$t = 134.5 \text{ days}$$

- و بحسب عودة فان المدة تبدأ :

$$t = \frac{1480\phi\mu c_t L^2}{k_x}$$

$$= \frac{1480 \times 0.15 \times 0.35 \times 10 \times 10^{-6} \times 2000^2}{0.8}$$

$$t = 3885\,\text{h} = 162\,\text{days}$$

❖ بحسب اوزكان Ozkan من الشكل6-15 و عند الخط المقطع BB فان t_D=3 ، اذن طور الجريان شبه الشعاعي يبدأ عند:

$$t = \frac{\phi\mu c_t L^2}{0.001055 k_h} t_D$$

$$= \frac{0.15 \times 0.35 \times 10.0 \times 10^{-6} \times 2000^2}{0.001055 \times 0.8}(3.0)$$

$$t = 7465\,\text{h} = 311\,\text{days}$$

سناخذ المدة من 135-311 days للوصول الى طور الجريان شبه الشعاعي. ولكون المدة طويلة فيُمكن ان نتغاضى عنها و ان نستفاد فقط من تفسير بيانات طوري الجريان الشعاعي العمودي و الخطي فقط.

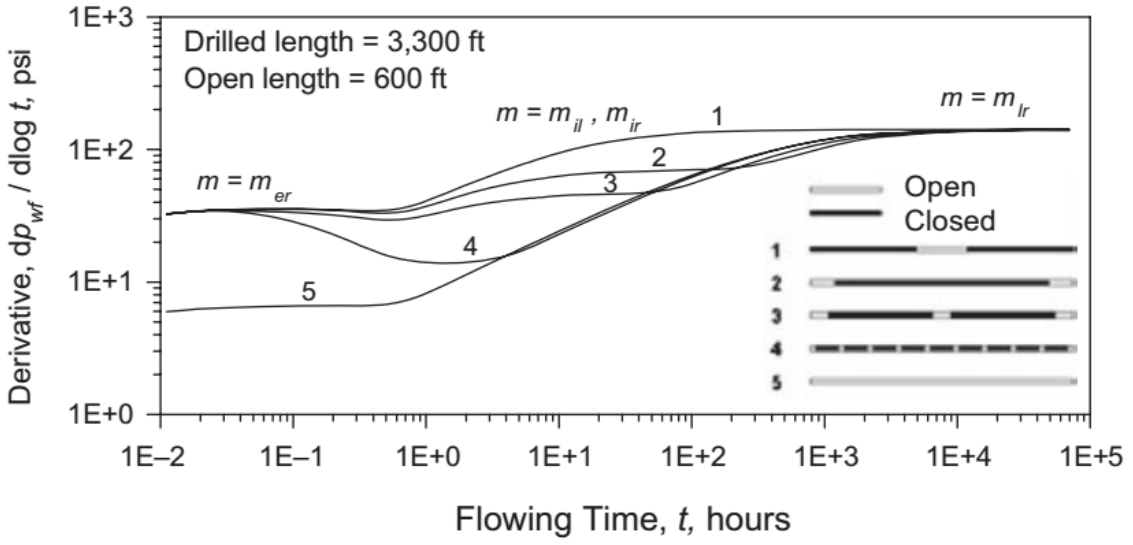
(Goode and Thambynayagam 1987; Ozkan 2001)	
Pay thickness, h, ft	110
Viscosity, μ, cp	1.5
Formation volume factor, B, RB/STB	1.5
Wellbore diameter, d, in.	8.5
Production rate, q, STB/D	3,000
Porosity, ϕ, fraction	0.1
Compressibility, c_t, psi^{-1}	3×10^{-5}
Horizontal-well length, L_h, ft	3300
Horizontal-well location, z_w, ft	55
Permeability in x-direction, k_x, md	50
Permeability in y-direction, k_y, md	100
Permeability in z-direction, k_z, md	25
Density, ρ (assumed), lbm/ft^3	48

الجدول6-11: بيانات البئر الافقي للمثال رقم-13

مثال-13 الآبار الأفقية المجزأة—Segmented Horizontal Wells

البيانات لهذا المثال أُدرجت في الجدول6-11 . المثال يُوضح تاثير طبيعة اكمال البئر الافقي على سلوك الضغط خلال الفحص كما في الشكل 6-37 . يُظهر الشكل 6-37 استجابات مشتقة الضغط لخمس حالات مختلفة في طريقة الاكمال completion. لكل الحالات فأن طول البئر المحفور هو 3300 قدم . الحالة رقم 5 هي حالة البئر الأفقية المفتوحة بالكامل اي بطول 3300 قدم. اما الحالات المتبقية فهي مفتوحة للجريان بحدود 600 قدم فقط و لكن بتوزيع للتثقيب مختلف (اكمال مختلف). الحالة 1 مطابقة لبئر أفقية مفتوحة بطول 600 قدم متواصل و مستمر. الحالات الثلاثة المتبقية فهي حالات مجزأة (segments).

الحالتان الاولى و الخامسة تظهران استجابات مشتقة الضغط المثالية عبر اظهار اطوار الجريان الثلاثة اما حالات الآبار المجزأة (على شكل segments) فليست استجاباتها واضحة كما في استجابات الحالتين 1 و5 فهنالك ضمور بعض اطوار الجريان او اختفائها. و كما هو موضح في الشكل 6-37 فان الحالات 2 إلى 4 تُظهر سلوك تدفق شعاعي intermediate pseudo-radial flow عبر الفحص و بفترات مختلفة و ذلك من اشكال الخطوط المستقيمة الافقية لكن سلوك الجريان الخطي غير واضح .



شكل 6-37 :تاثير اختيار الاكمال على مشتقة الضغط (اوزكان 2001)

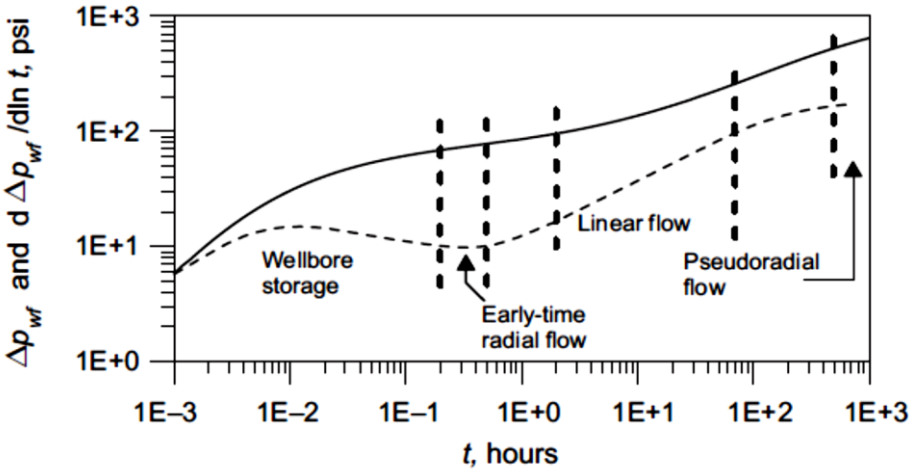
مثال14

بيانات هبوط الضغط لبئر نفطي افقي لمدة 1000 ساعة موضحة في الشكل اللوغاريتمي رقم6-38 . أُدرجت المعلومات ذات الصلة في الجدول6-12 .

المطلوب: اجراء تحليل لبيانات الفحص؟؟

الحل.

يُوضح الشكل 6-38 اطوار الجريان المؤشرة في مخطط الضغط و مشتقة الضغط اللوغاريتمي .



الشكل 6-38 : الرسم التشخيصي اللوغاريتمي و يُظهر اطوار الجريان الثلاثة الرئيسة عبر فحص البئر الافقي

❖ **تحليل طور الجريان الشعاعي المبكر Early Radial Flow ERF-**

كما هو موضح في الشكل6-39 نصف اللوغاريتمي فان بيانات ERF تظهرخطًا مستقيمًا بميل m = 22.81 ، باستخدام الميل نحسب معدل النفاذية بالمقطع العمودي و حسب المعادلة رقم-47 :

L_h, ft	2,000
z_w, ft	20
h, ft	40
p_i, psi	5,000
ϕ, fraction	0.15
c_t, psi^{-1}	2×10^{-5}
μ, cp	0.45
B, RB/STB	1.5
q, STB/D	1,000
r_w, ft	0.4

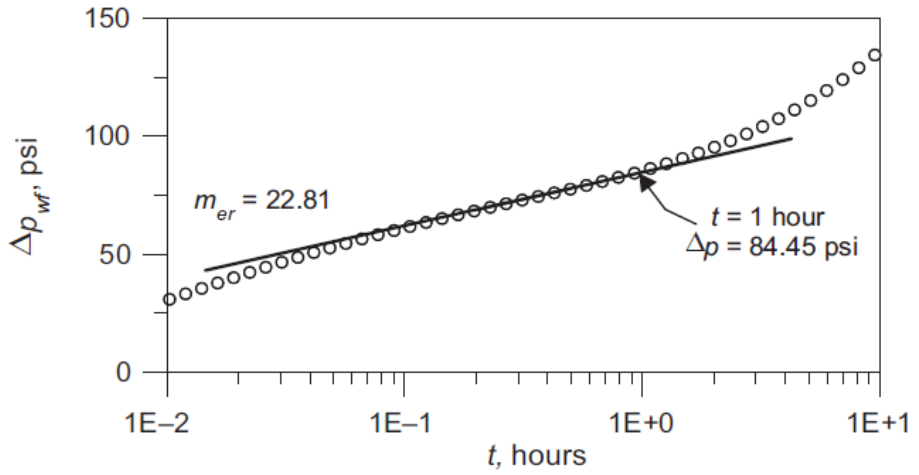
*Reprinted with permission from Imperial College Press.

جدول 6-12 :المعلومات المتوفرة للمثال رقم-14

$$\sqrt{k_y k_z} = \frac{162.6\times1,000\times1.5\times0.45}{22.81\times2,000} = 2.4 \text{ md.}$$

❖ نجد نصف القطر المكافىء لحساب معامل القشرة ويساوي:

$$r_{w,eq} = 0.5\times0.4\times\left[(6.3/0.91)^{0.25} + (0.91/6.3)^{0.25}\right] = 0.448 \text{ ft},$$



الشكل 6-39 : رسم بيانات فحص البئر الافقي للجريان الشعاعي المبكر
على احداثيات نصف لوغاريتمية للمثال رقم-14

❖ منها حساب s بحسب المعادلة رقم-48 :

$$S = 1.15\left(\frac{p_i - p_{1h}}{|m|} - \log\frac{\sqrt{k_v k_h}}{\phi\mu c_t r_w^2} + 3.23\right) \text{ ---------- 48}$$

$$s = \frac{1.151\times 3.5\times 40}{\sqrt{6.3\times 0.91}\times 2{,}000}$$

$$\times\left(\frac{84.45}{22.81} - \log 1 - \log\frac{\sqrt{6.3\times 0.91}}{0.15\times\left(2\times 10^{-5}\right)\times 0.45\times 0.448^2} + 3.23\right)$$

$$= 0.$$

- تحليل طور الجريان الخطي المتوسط– Intermediate Linear Flow ILF

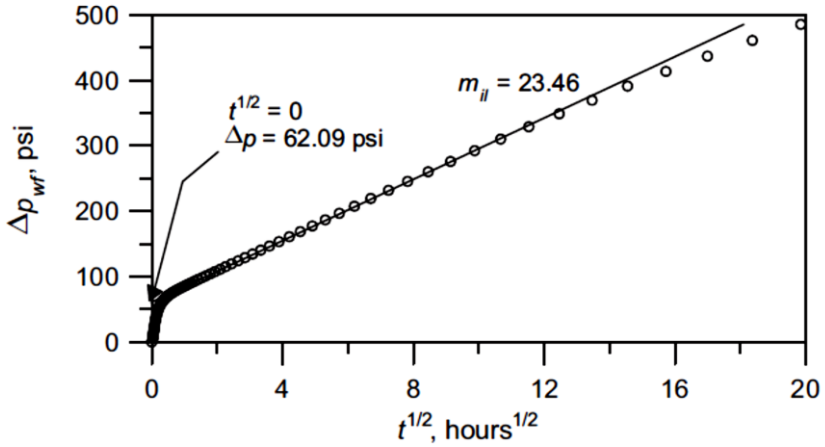
يُوضح الشكل6-40 علاقة هبوط الضغط كدالة للجذر التربيعي للوقت لحالة طور الجريان الخطي رُسمت على احداثيات عادية. ميل الخط المستقيم عبر البيانات هو m = 23.46. باستخدام الميل ، نحسب:

$$k_y = \left(\frac{8.13\times 1{,}000\times 1.5\times\sqrt{0.45}}{23.46\times\sqrt{0.15\times\left(2\times 10^{-5}\right)\times 2{,}000\times 40}}\right)^2 = 6.3 \text{ md}.$$

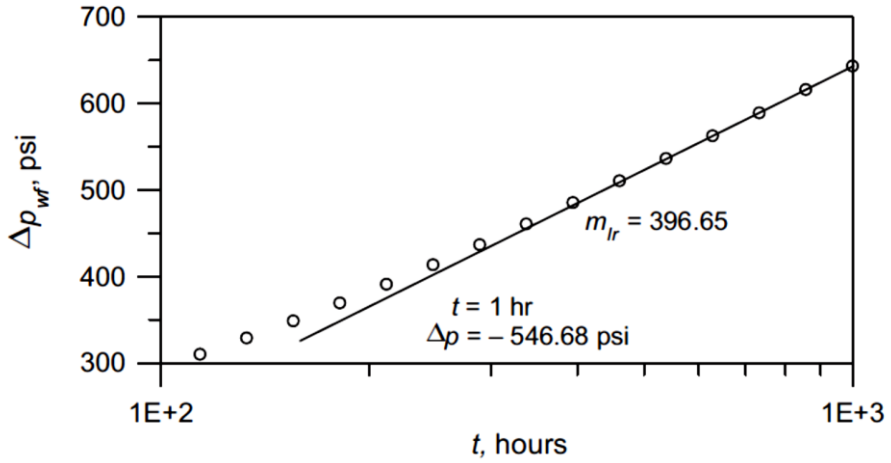
❖ يُمكن حساب عامل القشرة المكافىء الناتج عن تقارب الجريان في الاتجاه z (الاختراق الجزئي للبئر الافقي partial penteration)، sz ، وعامل القشرة s على ان نجد قيمة Δpwf = 62.09 psi at t = 0 من الشكل6-40 و كما يأتي على التوالي:

$$s_z = \ln\left(\frac{40}{0.448}\right) + 0.25 \times \ln\left(\frac{6.3}{0.91}\right) - \ln\left(\sin\frac{180 \times 20}{40}\right) - 1.838 = 3.14.$$

$$s = \frac{2{,}000 \times \sqrt{6.3 \times 0.91}}{141.2 \times 1{,}000 \times 1.5 \times 0.45} \times 62.09 - 3.14 = 0.02.$$



الشكل 6-40 : رسم بيانات فحص البئر الافقي للجريان الخطي المبكر على احداثيات عادية للمثال رقم-14



الشكل 6-41 : رسم بيانات فحص البئر الافقي للجريان الشعاعي المتاخر على احداثيات نصف لوغاريتمية للمثال رقم-14

❖ تحليل طور الجريان الشعاعي المتاخر- Late Radial Flow LRF-

علاقة الضغط مع الوقت باحداثيات نصف لوغاريتمية لبيانات طور الجريان شبه الشعاعي المتاخر موضحة في الشكل6-41 ، منها يُمكن ان نمرر احسن خط مستقيم و تحديد ميله و يساوي m = 396.65. باستخدام الميل نحسب:

$$\sqrt{k_x k_y} = \frac{162.6 \times 1{,}000 \times 1.5 \times 0.45}{396.65 \times 40} = 6.9 \text{ md.}$$

❖ الان يُمكن تحديد قيم النفاذية في الاتجاهات المختلفة و كما يأتي:

kx = 7.6 md ،kz = 0.91 md. و المعدل الهندسي للنفاذية :

$$k = \sqrt[3]{k_x k_y k_z} = 3.5 \text{ md.}$$

❖ لحساب معامل القشرة من بيانات LRF، نستخدم المعادلة رقم-49 . يتطلب حساب عامل القشرة الميكانيكي تحديد كون التوصيلية منتظمة uniform او توصلية لا نهائية infinite.
سنفترض في حساباتنا ان التوصيلية منتظمة uniform $x_D = 0$.

نقوم أولاً بحساب عامل القشرة الظاهري apparent skin s_a من المعادلة رقم-50 من القيم Δp_{wf} = -546.68psi عند t = 1hr. ساعة (الشكل6-41) :

$$s_a = 1.151\left(\frac{-546.68}{396.65} - \log 1 - \log\frac{\sqrt{7.6 \cdot 6.3}}{0.15 \times \left(2 \times 10^{-5}\right) \times 0.45 \times 0.448^2} + 3.23\right)$$
$$= -6.39.$$

يُمكن حساب عامل القشرة المكافىء pseudoskin s_p للبئر الأفقي من المعادلة رقم-83 و لما كان:

$$L_D = \frac{L_h}{2h}\sqrt{\frac{k_z}{k}} = \frac{2{,}000}{2 \times 40}\sqrt{\frac{0.91}{3.5}} = 12.75$$
$$\geq \frac{3.6}{\pi\left|\sqrt{k/k_x} - x_D\right|} = \frac{3.6}{\pi\left|\sqrt{3.5/7.6} - 0\right|} = 1.69,$$

يُمكننا استخدام المعادلة رقم-85 . و تتطلب الحاجة إلى حساب z_{wD} و r_{wD} و كما يأتي:

$$z_{wD} = \frac{20}{40} = 0.5$$

$$r_{wD} = \frac{0.448}{40} = 0.0112.$$

حساب عامل القشرة المكافىء من المعادلة 85 يتطلب ايضا حساب s_{pf} و F.

باستخدام المعادلة رقم-87 ، نحصل على σ :

$$\sigma\left(x_D, -\sqrt{\frac{k}{k_x}}, \sqrt{\frac{k}{k_x}}\right) = \frac{1}{2}\left[\left(0-\sqrt{\frac{3.5}{7.6}}\right)\ln\left|0-\sqrt{\frac{3.5}{7.6}}\right| - \left(0+\sqrt{\frac{3.5}{7.6}}\right)\ln\left|0.732+\sqrt{\frac{3.5}{7.6}}\right|\right] = 0.263.$$

اذن s_{pf} يساوي:

$$s_{pf} = \frac{1}{2}\ln\left(\frac{0.0112^2}{12.75^2}\,\frac{0.91}{\sqrt{7.6\times 6.3}}\right) + 1 + \sqrt{\frac{7.6}{3.5}}\times 0.236 = -6.70.$$

و F يساوي:

$$F = -\frac{1}{2\times 12.75}\sqrt{\frac{7.6}{3.5}}\ln\left\{4\times\sin\left[180\times\left(0.5+\frac{0.00112}{2}\right)\right]\times\sin\left(180\times\frac{0.00112}{2}\right)\right\} = 0.29$$

عامل القشرة المكافىء s_p يساوي:

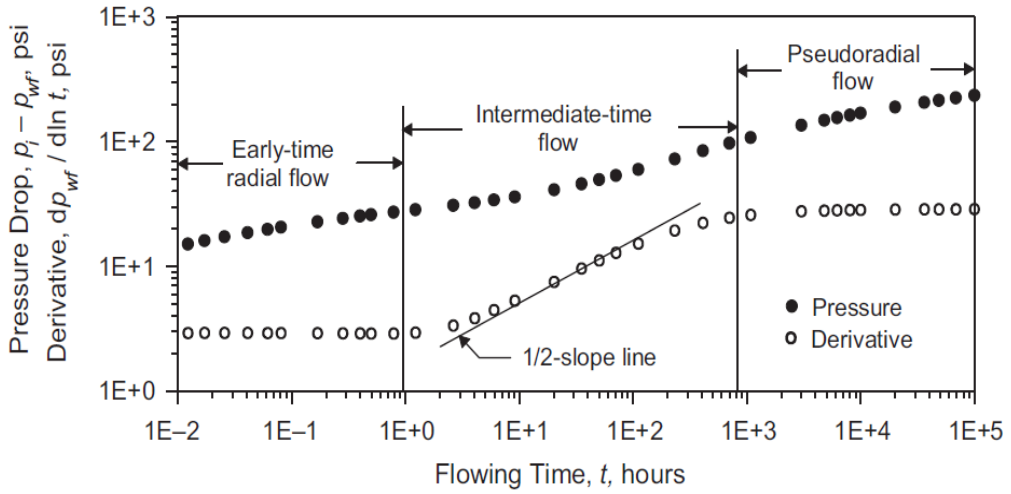
$$s_p = s_{pf} + F = -6.70 + 0.29 = -6.41,$$

من المعادلة ادناه نحصل على معامل القشرة :

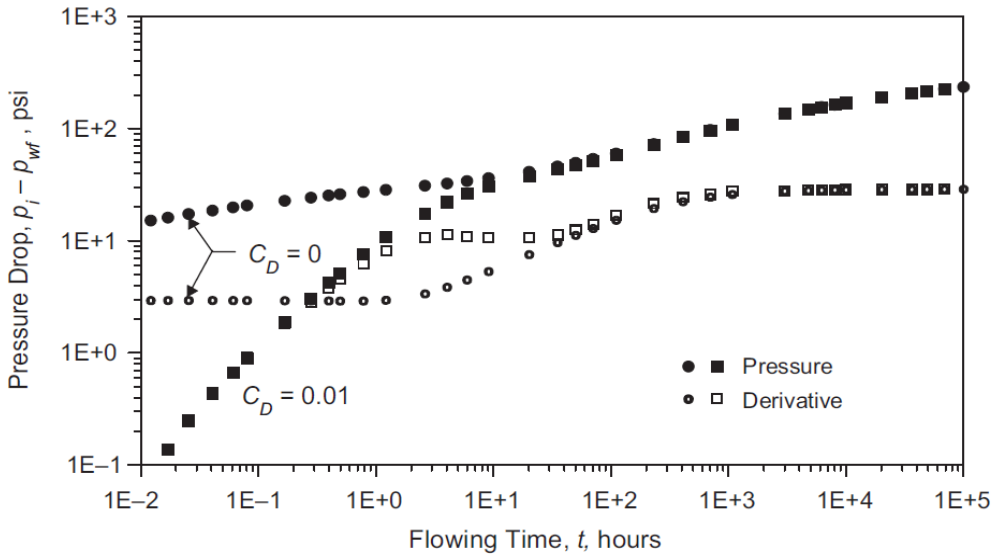
$$s = \sqrt{\frac{k_z}{k}}\left(s_a - s_p\right) = \sqrt{\frac{0.91}{3.5}}\left(-6.39 + 6.41\right) = 0.01.$$

10-6 تاثير تخزين البئر على سلوك فحص الابار الافقية

نلاحظ في الشكلين رقم 6-42 و رقم 6-43 بيانات فحص هبوط الضغط مرسومة على احداثيات لوغاريتمية لحالتي اختفاء و ظهور تاثير تخزين البئر على التوالي. تخزين البئر يتسبب في اختفاء منطقة طور الجريان الشعاعي المبكر و احيانا يتسبب في اختفاء حتى الجريان الخطي كما في الشكل6-43 .

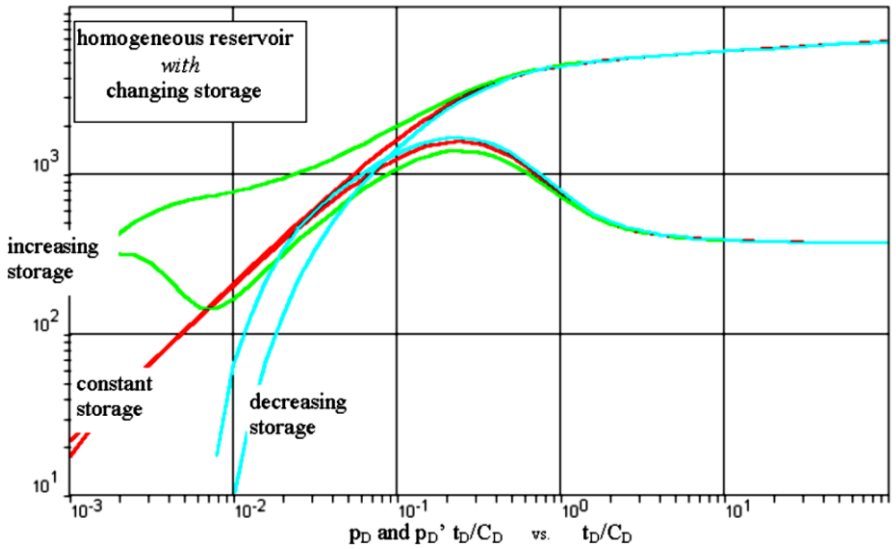


الشكل 6-42 : الرسم التشخيصي اللوغاريتمي و يُظهر اطوار الجريان الثلاثة الرئيسة عبر فحص البئر الافقي من دون تاثير عامل تخزين البئر(اوزكان2001)



الشكل 6-43 : الرسم التشخيصي اللوغاريتمي و يُظهر اطوار الجريان الثلاثة الرئيسة عبر فحص البئر الافقي بوجود تاثير عامل تخزين البئر و من دونه (اوزكان 1989)

الشكل6-44 يُوضح تاثير تخزين البئر على انحراف منحنيات الضغط و مشتقة الضغط ، فالمنحني باللون الاحمر يمثل سلوك الضغط و المشتقة لمكمن متجانس و لمعامل تخزين البئر ثابت .WBS=const. عندما يكون تخزين البئر غير ثابت (متغير) فذلك يتسبب في انحراف منحنيات الضغط و مشتقة الضغط نحو اليسار عندما يكون تخزين البئر في زيادة و نحو اليمين عند النقصان (decreasing).



الشكل 6-44 : الرسم التشخيصي اللوغاريتمي لبئر افقي ويظهر تاثير عامل تخزين البئر على سلوك الفحص عبر انحرافات المنحنيات يمينا و يسارا عن المنحني باللون الاحمر والذي يمثل سلوك الضغط و المشتقة لمكمن متجانس و بمعامل تخزين للبئر ثابت

References – المصادر

1. Amanat U. Chaudhry ، "Oil Well Testing Handbook "، Advanced TWPSOM Petroleum Systems، Inc. Houston، Texas ، Gulf Professional Publishing ، Copyright © 2004، Elsevier Inc.

2. Babu، D. K.، and Odeh، A. S. (1989). "Productivity of a Horizontal Well " SPE 19117.

3. BORISOV، JU.P. (1984). Oil Production Using Horizontal and Multiple Deviation Wells، trans. J. Strauss and S.D. Joshi (ed.) (Bartlesville، OK: Phillips Petroleum Co.، the R&D Library Translation).

4. Besson، J. 1990. Performance of Slanted and Horizontal Wells on an Anisotropic Medium. Paper SPE 20965 presented at the SPE European Petroleum Conference، The Hague، 22–24 October.

5. Domonique Bourdet، " Well Test Analysis ، The Use Of Advanced Interpretation Models" ، 9 2002 Elsevier r Science B.V.

6. Escobar، F. H.، Muñoz، O.F. and Sepúlveda J.A.، 2004. "Horizontal Permeability Determination from the Elliptical Flow Regime for Horizontal Wells". CT&F – Ciencia، Tecnología y Futuro، 2 (5): 83-95.

7. G.Bourdarot، " Well Testing: Interpretation Methods" @2010 Copyrigh Mercado Negro، Zulia، Venezuela.

8. GIGER، F.M.، REISS، L.H.، and JOURDAN، A.P. (1984). "The reservoir engineering aspect of horizontal drilling". Paper SPE 13024، Presented at the 59th SPE Annual Technical Conference and Exhibition، Houston، TX، Sept. 16–19.

9. Goode، P. A.، and Thambynayagam، R. K. M.، "Pressure Drawdown and Buildup Analysis for Horizontal Wells in Anisotropic Media،" SPE Formation Eval. (Dec. 1987)، 683-697.

10. Huinong Zhuang ، Nengqiang Liu، "Dynamic Well Testing In Petroleum Exploration And Development" @2013 Petroleum Industry Press. Published by Elsevier r Inc.

11. Jain، A.K. 1976. "An Accurate Explicit Equation for Friction Factor". Journal of Hydraulics Div. ASCE 102 (5):674–677.

12. JOSHI، S. (1991). "Horizontal Well Technology" ، Tulsa، OK: Penn Well.

13. John P. Spivey، W. John Lee، "Applied Well Test Interpretation" ، © Copyright 2013 Society of Petroleum Engineers.

14. Kamal، M.M.،Arash Pourabdol Shahrekordi1،Mohammad Behnood1، Armin Hosseinian3، Sajjad Mozaffari1، Seyed Jamal Sheikhzakariaee1"A Sensitivity Analysis For The Effective Parameters Disparity on Pressure and Pressure Derivative of Well-Testing in A Horizontal Well، " Petroleum and Coal · August 2024.

15. Kuchuk، F.J.، Goode، P.A.، Brice، B.W.، Sherrard، D.W.، and Thambynayagam، R.K.M. 1990. "Pressure Transient Analysis for Horizontal Wells". JPT 42 (8): 974–979، 1028–1031; Trans.، AIME، 289. SPE- 18300-PA.

16. Kuchuk، F. J.، Goode، P. A.، Wilkinson، D. J.، and Thambynayagam، R. K. M.، "Pressure Transient Behavior of Horizontal Wells With and Without Gas Cap or Aquifer،" paper SPE 17413، presented at the SPE California Regional Meeting، Long Beach، CA، March 7-25، 1988.

17. Medhat M. Kamal "Transient Well Testing" Monograph SPE © Copyright 2009 Society of Petroleum Engineers ، Chapter 14.

18. Mutalik، P. N.، Godbole، S. P.، and Joshi، S. D.، "Effect of Drainage Area Shapes on Horizontal Well Productivity،" paper SPE 18301، presented in the SPE 63rd Annual Technical Conference، Houston، TX،Oct. 2-5، 1988.

19.Odeh، A. S.، and Babu، D. K.، "Transient Flow Behavior of Horizontal Wells Pressure Drawdown and Buildup Analysis،" SPE Formation Eval. (March 1990)، 7-15.

20.Ozkan، E. and Raghavan، R. 1997. "Estimation of Formation Damage in Horizontal Wells". Paper SPE 37511presented at the SPE Production Operations Symposium، Oklahoma City، Oklahoma، 9–11 March.

21.Ozkan، E.، Raghavan، R.، and Joshi، S. D.، "Horizontal Well Pressure Analysis،" SPE Formation Eval. (Dec. 1989)، 567-575.

22.Ozkan، E. and Raghavan، R. 1990. "Performance of Horizontal Wells Subject to Bottomwater Drive". SPERE 5 (3): 375–383; Trans.، AIME، 289. SPE-18559-PA.

23.Ozkan، E.، Sarica، C.، and Haci، R. 1999. The Infl uence of Pressure Drop Along the Wellbore on Horizontal Well Productivity. SPEJ 4 (3): 288–301. SPE-57687-PA.

24.Ozkan، E.، Sarica، C.، Haciislamoglu، M.، and Raghavan، R. 1995. "Effect of Conductivity on Horizontal Well Pressure Behavior". SPE Advanced Technology Series (1): 85–94. SPE-24683-PA.

25.Ozkan، E. and Raghavan، R. 1991b. New Solutions for Well-Test-Analysis Problems: Part 2—Computational Considerations and Applications. SPEFE 6 (3): 369–378. SPE-1861-PA.

26.RENARD، G.I. and DUPUY، J.M. (1990). "Influence of formation damage on the flow efficiency of horizontal wells". Paper SPE 19414، Presented at the Formation Damage Control Symposium، Lafayette، LA، Feb. 22–23.

27.Yildiz، T. and Ozkan، E. 1998. A Simple Correlation To Predict Wellbore Pressure Drop Effects on Horizontal Well Productivity. Paper SPE 48938 prepared for presentation at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition، New Orleans، 27–30 September.

28.Yueming Cheng ، "Pressure Transient Testing And Productivity Analysis For Horizontal Wells" ، Ph.D Thesis، Texas A&M University ، 2003.

الفصل السابع

فحص الابار المائلة - Inclined well testing

1-7 المقدمة :

تُعد الآبار المائلة أحد التطورات المهمة في تقنيات الحفر الحديثة، إذ تُستخدم لتحسين التماس مع الطبقات المكمنية وزيادة كفاءة الإنتاج، لا سيما في المكامن ذات الامتداد الأفقي الواسع أو تلك التي تتطلب استهداف مناطق معينة من المكمن. وتُصمم هذه الآبار بزاوية انحراف تختلف عن الآبار العمودية أو الأفقية الصرفة، مما يضعها ضمن تصنيف خاص يستدعي نماذج تحليلية خاصة عند فحصها. يكون البئر عموديا اذا كانت زاوية الانحراف **أقل من** 10 - 5 درجات **عن** العمودي و البئر يُعد مائلا عند زاوية الانحراف بين 10 - 80 درجة عن العمودي و البئر افقي عند زاوية الانحراف 80 - 90 درجة .

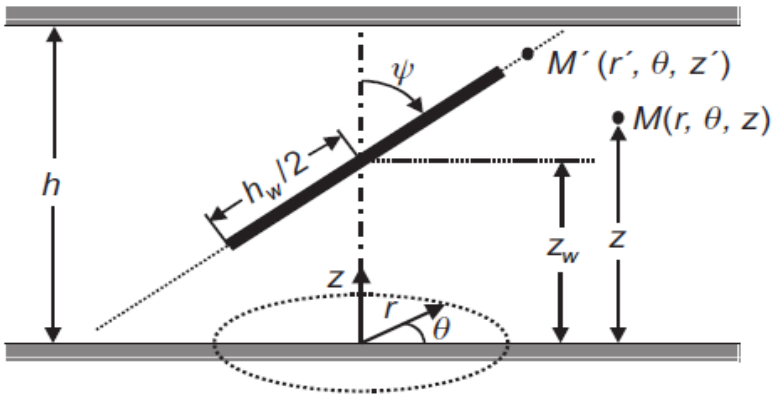
في سياق فحوصات الآبار (Well Testing)، يتطلب تحليل أداء الآبار المائلة اعتبارات إضافية تتعلق بتوزيع الضغط وتوجهات الجريان في المكمن. إذ إن مسار البئر المائل يؤدي إلى تغير في اطوار الجريان مقارنةً بالآبار العمودية أو الأفقية، ويؤثر في استجابة الضغط المقاسة أثناء فحوصات الإغلاق أو الحقن.

2-7 أهمية فحص الآبار المائلة:

يُعد فحص الآبار المائلة (Inclined Well Testing) أداة تحليلية أساسية لتقييم:

- خصائص المكمن (نفاذية، ضغط، سُمك، وجود طبقات متعددة) .
- درجة الضرر أو التحسن بالقرب من جدار البئر(Skin Factor) .
- مدى انتظام تدفق السوائل نحو البئر.
- تأثيرات الزاوية المائلة على سلوك الضغط والتدفق.

وعليه، فإن تحليل بيانات الفحص في الآبار المائلة يتطلب استخدام نماذج رياضية وتحليلية متقدمة تأخذ في الاعتبار الهندسة غير التقليدية للبئر .



الشكل 7-1 :مخطط لموديل البئر المائل Kamal(2009)

يُظهر الشكل7-1 موديل لبئر مائل بزاوية ميلان ψ = في مكمن غير متناهي Infinite reservoir ، بطول اختراق h_w ، الطبقة بسُمك متجانس h، له حدود سفلية عند z = 0 وعلوية عند السُمك h ، الحدود العليا والسفلى غير نفاذة Impermeable ، نقطة منتصف طول الاختراق تكون على ارتفاع z_w تقاس من الحد السفلي و بفرض ان الطبقة افقية و متجانسة و البئر بنصف قطر r_w ينتج بمعدل ثابت q.

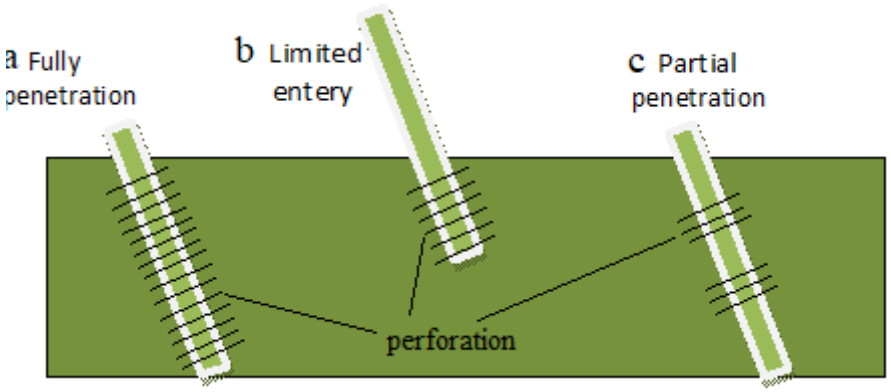
طول الاختراق h_w في الشكل7-1 يُمثل طول المنطقة المثقبة في البئر المائل المخترق للطبقة كليا Fully او جزئيا Partial وz_w ارتفاع نقطة المنتصف و h سُمك التكوين و تُحقق العلاقة الاتية:

$$h_w \le \min\left\{\frac{h}{\cos\psi},\ \frac{2z_w}{\cos\psi},\ \frac{2(h-z_w)}{\cos\psi}\right\} \quad \text{---------- 1}$$

حسب الشكل7-2 - a،b ، c على التوالي فان البئر المائل يحقق الاختراق الكلي لسُمك الطبقة المكمنية Fully penetration و يُعد هذا هو الإكمال المثالي للبئر لتعظيم إلانتاجية وتقليل تقييد التدفق(من المكمن الى جوف البئر) من جراء تأثير عامل القشرة skin. اذ ان البئر يخترق سُمك الطبقة المكمنية h كليا وغالبًا ما يكون مفتوحًا بالكامل (أو مثقبًا بشكل متجانس عبر السُمك). من الواضح و حسب الشكل7-2- a أن مساحة تماس البئر المائل مع الطبقة المكمنية اعلى مما للبئر العمودي ، هذا سيقلل من هبوط الضغط في البئر المائل مقارنة مع البئر العمودي عندما يكون الانتاج واحد.

و يسمى الاختراق او الدخول للطبقة محدودا Limited entry اذا يخترق جزءًا فقط من سُمك الطبقة المكمنية (مثلاً: 10 أمتار من أصل 30 مترًا).يتميز بكون التدفق غير متجانس من المكمن الى البئر المائل. في كثير من الأحيان يتم اختيار هذا النوع من الاكمال لتجنب تقاطع منطقة النفط و الماء Aquifer أسفل منطقة النفط، وبالتالي تأخير تكوين مخروط (تقمع) الماء (water coning) وإطالة العمر الاقتصادي للبئر.

و الاكمال الثالث يمثل الاختراق جزئي partial penetration اذ يخترق البئر المائل سُمك الطبقة كليا لكن التثقيب جزئي. الآبار المائلة والمخترقة جزئيًا شائعة جدًا في الحقول النفطية او الغازية خصوصا في الحفر البحري Offshore drilling. الهدف الأساسي هو ضمان توزيع أكثر اتساقًا لدخول او خروج السوائل على طول حفرة البئر ، خاصة أثناء علاجات تحفيز البئر مثل حقن الحامض أو التكسير الهيدروليكي.



الشكل 7-2 :مخطط يُوضح انواع الاكمال completion للبئر المائل

ان زاوية الميل ψ وطول الاختراق Penteration length ونسبة الاختراق Penteration ratio كلهاعوامل تُعتبر مؤثرة و بشكل كبير على سلوك جريان البئر خلال الفحص.

ملاحظة: قد تُستخدم تعريف المصطلحات Limited entry، Partial Penetration بشكل معكوس في بعض المصادر.

3-7 تحليل فحوصات الآبار المائلة بطريقة سينكو ، (Cinco ، 1975)

قدّم سنكو Cinco-Ley و سامنكو Samaniego-V. في منتصف السبعينيات نماذج من الحلول التحليلية لفحوصات الآبار غير العمودية (Non-Vertical Wells) ، ومنها الآبار المائلة، عبر تطوير حلول رياضية لحالات جريان ثلاثي الأبعاد في المكامن متجانسة.

هذا النموذج يُعد امتدادًا لنموذجهم في تحليل الشقوق الهيدروليكية، وقد تضمن تعديل شكل البئر ليشمل تأثير ميل البئر على شكل و توزيع الجريان والمقاومة المكمنية (Flow Geometry and Resistance).

اهم فرضيات نموذج Cinco في الآبار المائلة:

- المكمن متجانس (Homogeneous) و محدود الحجم أو غير محدود.
- السائل أحادي الطور وقابل للانضغاط قليلاً.
- البئر المائل يُمثل كمصدر خطي مائل في وسط ثلاثي الأبعاد.
- لا يتم إنتاج الموائع إلا من جزء محدد من مسار البئر (Partial Penetration)

ندرج ادناه تعاريف لبعض المعاملات ذات العلاقة والتي نحتاجها في تفسير فحص البئر المائل وهي على التوالي: الضغط اللابعدي ، الزمن اللابعدي ، نصف القطر اللابعدي، الارتفاع اللابعدي ، السُمك اللابعدي ، طول الاختراق اللابعدي و زاوية الميلان $\bar{\psi}$:

$$p_D = \frac{k_h h}{141.2 q B \mu}(p_i - p), \quad \text{---------- 2}$$

$$t_D = \frac{0.0002637\ k_h}{\phi c_t \mu r_w^2} t, \quad \text{---------- 3}$$

$$r_D = \frac{r}{r_w}, \quad \text{---------- 4}$$

$$z_D = \frac{z}{r_w}\sqrt{\frac{k_h}{k_z}}, \quad \text{---------- 5}$$

$$h_D = \frac{h}{r_w}\sqrt{\frac{k_h}{k_z}} \quad \text{---------- 6}$$

$$h_{wD} = \frac{h_w}{r_w}\sqrt{\frac{k_w}{k_z}} \quad \text{---------- 6}$$

$$\psi' = \tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{k_z}{k_h}}\tan\psi\right) \quad \text{---------- 7}$$

$$\tan\psi' = \sqrt{\frac{k_z}{k_h}}\tan\psi \quad \text{---------- 8}$$

ان k_h ، k_z تمثل النفاذية الافقية و العمودية للطبقة على التوالي و k_w تمثل معدل النفاذية للطبقة في المستوي العمودي على محور البئر المائل well axis و تساوي:

$$k_w = k_h\cos^2\psi + k_z\sin^2\psi \quad \text{---------- 9}$$

$b = h_w/h$،Penteration ratio

اوجد سينكو Cinco(1975) الاحداثيات القطبية r-Θ-z لنقاط الضغط المكافئة $\bar{M}$ عند باطن البئر المائل كامل الاختراق كما في الشكل 7-1 . و استخدم **اوزكان** Ozkan and Raghavan ، (2000) الاحداثيات القطبية للابار المائلة ذات الاختراقات المختلفة إذ توصل الى العلاقات الاتية:

$$r_D = \sqrt{1 + 0.09h_{wD}^2\sin^2\psi'} \quad \text{---------- 10}$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{0.3h_{wD}\sin\psi'}{r_D}\right) \quad \text{---------- 11}$$

$$z_D = z_{wD} \pm 0.3h_{wD}\cos\psi' \quad \text{---------- 12}$$

ان الزاوية Θ في الشكل-7-1 تمثل الزاوية الافقية بالاحداثيات القطبية ، الاشارة الموجبة و السالبة تشير الى موقع البئر في النصف العلوي او السفلي من الطبقة المكمنية.

4-7 اطوار الجريان عبر فحص البئر المائل Flow Regimes

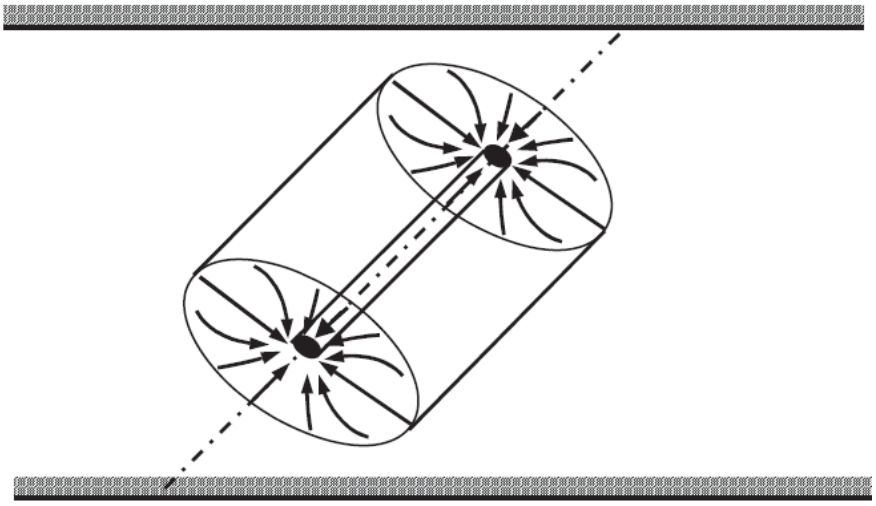
الآبار المائلة والنافذة جزئيًا (المخترقة للطبقة جزئيا Partial penteration او ذات الدخول المحدود Limited entery) تُظهر طورين للجريان الشعاعي الاول يظهر في وقت مبكرمن الفحص و يسمى الجريان الشعاعي المبكر Early Radial Flow-ERF و الثاني يظهر في وقت متأخر من الفحص و يسمى الجريان الشعاعي المتاخر Late Radial Flow-LRF ، تفصلهما مدة انتقالية Transitional flow period . الآبار ذات الاختراق الجزئي وذات نسب الاختراق b القليلة قد تُظهر طور الجريان الكروي Intermediate Spherical Flow-ISF عبر المدة الانتقالية من الطور ERF إلى الطور LRF. يظهر الجريان نصف كروي hemispherical في حال الدخول المحدود limited entry للبئر المائل الى الطبقة المكمنية او

ان التثقيب محدود ويلامس احدى حدود الطبقة; العلوي او السفلي. اما لنسب الاختراق الأكبر، فإن الانتقال بين فترات الجريان الشعاعي المبكر ERF و المتاخر LRF تكون غير واضحة إذ لا تحمل خصائص لاطوار جريان محددة او معروفة.

1-4-7 طور الجريان الشعاعي المبكر Early Radial Flow-ERF

يحدث الجريان الشعاعي المبكر ERF عند المنطقة القريبة من البئر في المستوى العمودي على محور البئر (الشكل3-7) و ذلك عبر الوقت المبكر من الفحص .ان سلوك الضغط اللابعدي لهذا الطور يخضع للحل الذي اوجده (Brons and Marting 1961; Cinco 1975) و حسب المعادلة ادناه:

$$p_{wD} = -\frac{h_D}{2h_{wD}}\mathrm{Ei}\left(-\frac{1}{4t_D}\right)+s \approx \frac{h_D}{2h_{wD}}(\ln t_D + 0.80907)+s \quad \text{---------- 13}$$



الشكل 3-7 :مخطط لطور الجريان الشعاعي المبكر ERF حول البئر المائل

يُمكن كتابتها بالوحدات الحقلية كما يأتي:

$$\Delta p_{wf} = \frac{162.6qB\mu}{\sqrt{k_h k_w}h_w}\left(\log t + \log\frac{k_h}{\phi c_t \mu r_w^2} - 3.23 + 0.87\frac{h_w}{h}\sqrt{\frac{k_w}{k_h}}s\right) \quad \text{---------- 14}$$

إذ ان s يمثل معامل القشرة الميكانيكي Mechanical skin.

- عند رسم علاقة ضغط الجريان p_{wf} او فرق ضغط الجريان Δp_{wf} مع الوقت t على رسم بياني نصف لوغاريتمي semi-log ، نحصل على علاقة خط مستقيم بميل يساوي:

$$|m_{er}| = \frac{162.6\,qB\mu}{\sqrt{k_h k_w}h_w} \quad \text{---------- 15}$$

منه يُمكن حساب :

$$\sqrt{k_h k_w} = \frac{162.6\, qB\mu}{|m_{er}|\, h_w} \quad \text{---------- 16}$$

من معرفة النفاذية الافقية k_h (كما في الفقرة اللاحقة) فبالامكان حساب معدل النفاذية باتجاه محور البئر المائل k_w. و اذا توفرت قيم كلتا النفاذيتين عندها يُمكن حساب النفاذية العمودية k_z من المعادلة في ادناه:

$$k_w = k_h \cos^2\psi + k_z \sin^2\psi \quad \text{---------- 17}$$

- حساب معامل القشرة الميكانيكي s بسبب الضرر بجوار فتحة البئر من المعادلة الاتية:

$$s = \frac{1.151h}{h_w}\sqrt{\frac{k_h}{k_w}}\left(\frac{\Delta p_{wf}}{|m_{er}|} - \log t - \log\frac{k_h}{\phi c_t \mu r_w^2} + 3.23\right) \quad \text{---------- 18}$$

إذ ان فرق الضغط Δp_{wf} يُقرأ من على الخط المستقيم عند اي وقت t.

إن عامل القشرة s للبئر المائل يُمكن حسابه ايضا عبر مقارنته مع عامل القشرة المقابل له في البئر العمودي عبر معرفة قيمة s من تفسير فحص البئر العمودي المجاور و حسب المعادلة ادناه :

$$s(\text{slanted}) = \frac{k_h h}{\left(k_h \cos^2\psi + k_z \sin^2\psi\right) h_w} s(\text{vertical}) \quad \text{---------- 19}$$

ينتهي الطور ERF عندما يصل تاثير الضغط عبر الفحص الى الحد العلوي أو السفلي upper or lower boundries للمكمن، ثم يبدأ تاثير الفترة الانتقالية transition period متمثلة بطور الجريان الكروي Intermediate Spherical Flow- ISF .

2-4-7 طور الجريان الكروي Intermediate Spherical Flow- ISF

يُمكن للآبار التي تخترق الطبقة المكمنية جزئيا Partial penteration و بنسبة اختراق h_w/h صغيرة في أن تُظهر طور الجريان الكروي Intermediate spherical flow – ISF و ذلك عبر المدة الانتقالية من طور الجريان الشعاعي المبكر ERF إلى طور الجريان الشعاعي المتاخر LRF مع ذلك فان المنطقة الانتقالية اعلاه قد لا تَظهر او تختفي عبر الفحص اذا كانت نسبة الاختراق h_w/h عالية.

ان سلوك الضغط لهذا الطور يخضع للحل الذي اوجده (Moran and Finklea 1962) و حسب المعادلة في ادناه:

$$\Delta p = -2452.9\frac{qB\mu\sqrt{\phi\mu c_t}}{k_s^{3/2}\sqrt{t}} + \frac{70.6qB\mu}{k_s r_s} \quad \text{---------- 20}$$

إذ ان r_s يُمثل نصف القطر الكروي الفعال للمنطقة المثقبة ويساوي:

$$r_s = 0.5\,h_w / \ln\left(h_w / r_w\right) \quad \text{---------- 21}$$

و ان k_s تمثل نفاذية المنطقة الكروية و تساوي:

$$k_s = \sqrt[3]{k_h^2 k_z} \quad \text{---------- 22}$$

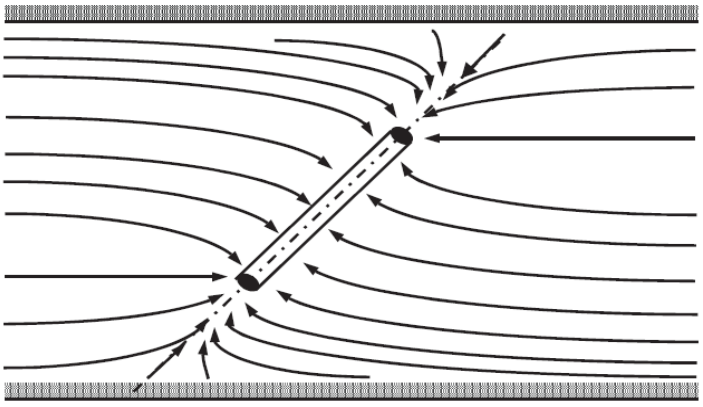
- يحصل الجريان نصف كروي Hemispherical flow في حالة الدخول المحدود Limited entery للبئر المائل في الطبقة المكمنية الشكل7-2-b او يُثقب البئر فقط عند الحد الاعلى Top boundry او الحد الاسفل من الطبقة عندها يكون سلوك طور الجريان كما في المعادلة رقم- 20 بعد ان ضرب الطرف الايمن بالعدد 2.

- عند رسم علاقة فرق ضغط الجريان Δp_{wf} مع الوقت t على رسم بياني لوغاريتمي log-log نحصل على علاقة خط مستقيم بميل يساوي m_{IS}=-1/2 ، إذ ان الميل يساوي:

$$\left|m_{is}\right| = \frac{2452.9\,qB\mu\sqrt{\phi\mu c_t}}{k_s^{3/2}} \quad \text{---------- 23}$$

يُمكن حساب النفاذية الكروية k_s من الميل ، اما اذا كان الجريان نصف كروي فان الطرف الايمن من المعادلة في اعلاه يُضرب بالعدد 2 اي يصبح الثابت 4905.8.

- يُمكن ايضا رسم علاقة Δp_{wf} vs $1/(t)^{0.5}$ على احداثيات عادية و في حالة وجود تاثير المنطقة الانتقالية سنحصل على علاقة خط مستقيم الميل له كما في المعادلة رقم-23.



الشكل 7-4 :مخطط لطور الجريان الشعاعي المتاخر LRF عبر فحص البئر المائل

7-4-3 طور الجريان الشعاعي المتأخر Late Radial Flow-LRF

يحدث الجريان الشعاعي المتاخر LRF (ويسمى ايضا الشبه شعاعي Pseudoradial flowاو الشعاعي الزائف) في مدة متاخرة من الفحص الشكل7-4 . ان سلوك الضغط لهذا الطور يخضع للحل الذي اوجده (**Cinco 1975**) و حسب المعادلة في ادناه:

$$p_{wD} = \frac{1}{2}(\ln t_D + 0.80907) + s_a \quad \text{---------- 24}$$

و بالوحدات الحقلية :

$$\Delta p_{wf} = \frac{162.6qB\mu}{k_h h}\left(\log t + \log\frac{k_h}{\phi c_t \mu r_w^2} - 3.23 + 0.87 s_a\right) \quad \text{---------- 25}$$

على ان يؤخذ بنظر الاعتبار شرط ان الوقت اللابعدي يكون اعلى من :

$$t_D \geq \max\left\{\begin{array}{c} 70 r_D^{*2} \\ \frac{25}{3}\left(r_D^* \cos\theta^* + \frac{h_D}{2}\tan\psi'\right)^2 \\ \frac{25}{3}\left(r_D^* \cos\theta^* - \frac{h_D}{2}\tan\psi'\right)^2 \end{array}\right\} \quad \text{---------- 26}$$

ان المعامل Apparent skin -sa يمثل معامل القشرة الظاهري او الكلي و يساوي:

$$s_a = s + s_p \quad \text{---------- 27}$$

إذ ان s معامل القشرة الميكانيكي و Pseudo skin factor- s_p معامل القشرة المكافىء للاختراق الجزئي للبئر و لميلان البئر .

- عند رسم علاقة ضغط الجريان p_{wf} او فرق ضغط الجريان Δp_{wf} مع الوقت t على رسم بياني نصف لوغاريتمي semi-log ، نحصل على علاقة خط مستقيم بميل يساوي:

$$|m_{lr}| = \frac{162.6qB\mu}{k_h h} \quad \text{---------- 28}$$

من الميل ممكن ان حساب قيمة النفاذية الافقية k_h.

و نجد sa كما يأتي:

$$s_a = 1.151\left(\frac{\Delta p_{wf}}{|m_{lr}|} - \log t - \log\frac{k_h}{\phi c_t \mu r_w^2} + 3.23\right) \quad \text{---------- 29}$$

ثم من المعادلة رقم-27 ممكن ان نجد قيمة s كالاتي:

$$s = s_a - s_p,$$

ان Pseudo skin factor- s_p معامل القشرة المكافىء (الزائف) يوفر وسيلة لمقارنة انخفاض الضغط او الإنتاجية) للبئر المائل مع بئر عمودي كامل الاختراق.

جوشي Joshi(1991) استخدم دليل الانتاجية Productivity Index-Js للبئر المائل للمقارنة مع البئر العمودي و كما يأتي:

$J_s/ J_v=\ln(r_e/r_w)/\ln(r_e/\bar{r}_w)$ --------- 30

$\bar{r}_w= r_w\exp(-s_p)$

إذ ان :

J_s - Productivity Index of slanted well

J_v - Productivity Index of vertical well

$\bar{r}_w$ -Effective wellbore radius

r_e -drainage radius

r_w -wellbore radius

لايجاد معامل القشرة المكافىء s_p و تعويضها في المعادلات اعلاه ، ممكن استخدام احدى العلاقات التجريبيةCorrelations ادناه:

1- علاقة سينكو- ***Cinco et al. Correlation***

اوجد سنكو Cinco (1975a and 1975b) المعادلة الاتية لايجاد معامل القشرة المكافىء s_p للاختراق الكامل Fully penteration للابار المائلة بزاوية ميلان تتراوح ما بين :

$$0 \le \psi' \le 75°$$

و يساوي:

$$s_p = -\left(\frac{\psi'}{41}\right)^{2.06} - \left(\frac{\psi'}{56}\right)^{1.865} \log\left(\frac{h_D}{100}\right) \text{ ---------- 31}$$

تتميز العلاقة اعلاه ببساطتها و دقتها.الا انها محدودة بشرط قيم زاوية الميل في اعلاه و الاختراق الكلي Fully penetration.

2- علاقة بيسون- ***Besson Correlation***

اوجد بيسون Besson (1990) المعادلة الاتية لايجاد معامل القشرة المكافىء s_p للاختراق الكامل Fully penteration للابار المائلة بزاوية ميلان تتراوح ما بين :

$$0 \le \psi \le 90° \text{ ---------- 32}$$

و يساوي:

$$s_p = \ln\left(\frac{4}{h_{wD}}\right) + \frac{h_D}{2h_{wD}} \ln\left(\frac{h_D h_{wD}}{4}\right) + \frac{h_D}{h_{wD}} \ln\left(\frac{\sqrt{\cos^2\psi + \frac{k_z}{k_h}\sin^2\psi}}{1+\sqrt{\cos^2\psi + \frac{k_z}{k_h}\sin^2\psi}}\right) \text{ ---------- 33}$$

3- علاقة اوزكان -راجافان ***Ozkan-Raghavan Correlation***

قدم أوزكان وراجافان (2000) علاقة عامّة لحساب معامل القشرة المكافىء s_p لزاوية ميل اعلى من:

$$\psi' > 0 \quad \text{---------- 34}$$

ولجميع اختراقات البئر المائل. تشمل العلاقة على دوال معقدة نسبيًا قد لا تكون سهلة للحسابات العملية ، لكن في حالة ان :

$$\frac{h_{wD}}{h_D} \geq \frac{2.3}{\sin\psi'} \quad \text{---------- 35}$$

ممكن ان نستخدم طريقة الحل الاسهل في ايجاد s_p و كما يأتي:

$$s_p = 1 + \frac{2}{h_{wD}\sin\psi'} \times \sigma\left(0.3h_{wD}\sin\psi', 1, -\frac{h_{wD}}{2}\sin\psi', \frac{h_{wD}}{2}\sin\psi'\right)$$

$$+ F\left(\frac{\pi}{h_D\sin\psi'}, z_D^* + z_{wD} + 0.3h_{wD}\cos\psi', z_D^* - z_{wD} - 0.3h_{wD}\cos\psi'\right) \quad \text{---------- 36}$$

المعامل σ يساوي :

$$\sigma(x,y,a,b) = \frac{1}{4}\left\{(x-b)\ln\left[(x-b)^2 + y^2\right] - (x-a)\ln\left[(x-a)^2 + y^2\right]\right\}$$

$$-\frac{y}{2}\left(\tan^{-1}\frac{x-a}{y} - \tan^{-1}\frac{x-b}{y}\right) \quad \text{---------- 37}$$

المعامل σ هو دالة للاحداثيات x ،y و الى المعاملات a،b :

$$\sigma\left(x, y, a, b\right)$$

و تعريف كل منها يساوي مقابله في ادناه :

$$\sigma\left(0.3h_{wD}\sin\psi', 1, -\frac{h_{wD}}{2}\sin\psi', \frac{h_{wD}}{2}\sin\psi'\right) \quad \text{---------- 38}$$

المعامل F يساوي:

$$F(\lambda, z_{D1}, z_{D2}) = -\frac{h_D}{2h_{wD}} \times \left\{\ln\left[1 - 2e^{-\lambda}\cos\left(\frac{\pi z_{D1}}{h_D}\right) + e^{-2\lambda}\right]\right.$$

$$\left. + \ln\left[1 - 2e^{-\lambda}\cos\left(\frac{\pi z_{D2}}{h_D}\right) + e^{-2\lambda}\right]\right\} \quad \text{---------- 39}$$

و المعامل F هو دالة للمعاملات λ، z_{D1}، z_{D2} :

$$F\left(\lambda, z_{D1}, z_{D2}\right)$$

و كل من المعاملات اعلاه يساوي مقابله في التعريف ادناه :

$$F\left(\frac{\pi}{h_D \sin\psi'}, z_D^* + z_{wD} + 0.3h_{wD}\cos\psi', z_D^* - z_{wD} - 0.3h_{wD}\cos\psi'\right) \text{ ---------- 40}$$

باستعمال $z_{wD}=h_D/2$ فان λ، z_{D1}، z_{D2} تساوي في ما يقابلها في ادناه:

$$F\left(\frac{\pi}{h_D \sin\psi'}, 2z_{wD} + 0.6h_{wD}\cos\psi', 0\right) \text{ ---------- 41}$$

مثال-1 **(كمال Kamal-2009)**

اوجد معامل القشرة المكافىء s_p للبئر المائل و حسب البيانات المتوفرة في ادناه:

Slant angle, ψ, degrees	65
Formation thickness, h, ft	100
Wellbore radius, r_w, ft	0.4
Anisotropy ratio, k_h/k_z	5

الحل:

حساب السُمك اللابعدي:

$$h_D = \frac{100}{0.4}\sqrt{5} = 559$$

حساب طول البئر المائل :

$$h_w = \frac{h}{\cos\psi} = \frac{100}{\cos 65} = 236.6 \text{ ft}$$

حساب الطول اللابعدي للبئر المائل :

$$h_{wD} = \frac{236.6}{0.4}\sqrt{5\cos^2 65 + \sin^2 65} = 774.5$$

حساب الزاوية:

$$\psi' = \tan^{-1}\left(\sqrt{0.2}\tan 65\right) = 43.8^{\circ}.$$

من **علاقة سينكو** فان s_p يساوي:

$$s_p = -\left(\frac{43.8}{41}\right)^{2.06} - \left(\frac{43.8}{56}\right)^{1.865} \log\left(\frac{559}{100}\right) = -1.62.$$

و من علاقة بيسون فان s_p يساوي :

$$s_p = \ln\left(\frac{4}{774.5}\right) + \frac{559}{2\times 774.5}\ln\left(\frac{559\times 774.5}{4}\right) + \frac{559}{774.5}\ln\left(\frac{\sqrt{\cos^2 65 + 0.2\times\sin^2 65}}{1+\sqrt{\cos^2 65 + 0.2\times\sin^2 65}}\right)$$

$$s_p = -1.8$$

و لعلاقة اوزكان -راجافان نتبع الخطوات ادناه لايجاد s_p :

❖ لان

$$h_{wD}/h_D = 1.39 \le \frac{2.3}{\sin\psi'} = 3.32$$

فان شرط طريقة اوزكان لا يتحقق و على اية حال سنستخدم العلاقة(لتوضيح طريقة الحساب) على ان نحسب اولا المعاملات σ،F و كما يأتي:

$$\sigma(x,y,a,b) = \frac{1}{4}\left\{(x-b)\ln\left[(x-b)^2+y^2\right] - (x-a)\ln\left[(x-a)^2+y^2\right]\right\}$$
$$-\frac{y}{2}\left(\tan^{-1}\frac{x-a}{y} - \tan^{-1}\frac{x-b}{y}\right)$$

❖ المعامل σ دالة للاحداثيات y، x والى المعاملات a،b :

$$\sigma\left(x, y, a, b\right)$$

و كل متغير منها يساوي ما يقابله في ادناه :

$$\sigma\left(0.3h_{wD}\sin\psi', 1, -\frac{h_{wD}}{2}\sin\psi', \frac{h_{wD}}{2}\sin\psi'\right)$$

و بالتعويض فان σ تساوي:

$$\sigma = \frac{1}{4}\left\{(160.8-268)\ln\left[(160.8-268)^2+1\right]\right.$$
$$\left.-(160.8+268)\ln\left[(160.8+268)^2+1\right]\right\}$$

$$-\frac{1}{2}\left(\tan^{-1}\frac{160.8+268}{1}-\tan^{-1}\frac{160.8-268}{1}\right)$$

$$\sigma = -1{,}639.71.$$

❖ نجد المعاملات λ، z_{D1}، z_{D2} :

$$F\left(\lambda, z_{D1}, z_{D2}\right)$$

فيما يقابلها في ادناه و باستخدام $z_{wD}=h_D/2$ فان :

$$F\left(\lambda, z_{D1}, z_{D2}\right)$$

$$F\left(\frac{\pi}{h_D \sin\psi'}, 2z_{wD}+0.6h_{wD}\cos\psi', 0\right)$$

$$F\left(\frac{\pi}{h_D \sin\psi'}=0.0081, 2z_{wD}+0.6h_{wD}\cos\psi'=894.4, 0\right)$$

باستخدام المعادلة رقم- 39 ينتج:

$$F = -\frac{559}{2\times 774.5}\left\{\ln\left[1-2e^{-0.0081}\cos\left(\frac{180\times 894.4}{559}\right)+e^{-2\times 0.0081}\right]\right.$$
$$\left.+\ln\left[1-2e^{-0.0081}\cos(0)+e^{-2\times 0.0081}\right]\right\}$$

$$F = 3.36$$

❖ اذن معامل القشرة المكافىء يساوي:

$$s_p = 1+\frac{2}{774.5\times\sin 43.8}(-1{,}639.71)+3.36$$

$$s_p = -1.76$$

ان الطرق المختلفة لحساب s_p في للمثال-1 اعطت نتائج متقاربة .

مثال2

تم اجراء فحص هبوط الضغط لبئر نفطي مائل لمدة 600 hrs. بيانات الفحص و الضغط و مشتقة الضغط أُدرجت في الجدول 7-2 . البيانات المتوفرة للبئر و المكمن و المائع أُدرجت في الجدول7-1 .

المطلوب : تفسير فحص هبوط الضغط للبئر المائل بطريقة الخط المستقيم؟؟

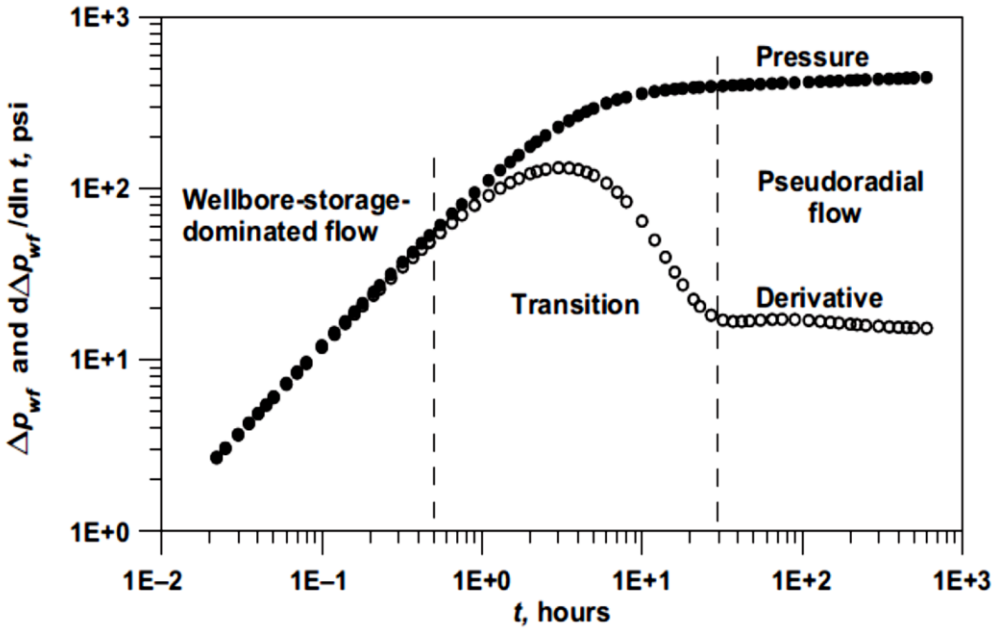
h_w, ft	100
z_w, ft	50
h, ft	100
p_i, psi	5000
ϕ, fraction	0.22
c_t, psi^{-1}	1.7×10^{-5}
μ, cp	0.54
B, RB/STB	1.6
q, STB	620
r_w, ft	0.4
ψ, degrees	65

جدول 7-1 :المعلومات المتوفرة للمثال رقم-2

الحل:

- نرسم بيانات فرق الضغط و مشتقة الضغط مع الوقت على رسم بياني لوغاريتمي كما في الشكل-7-5.

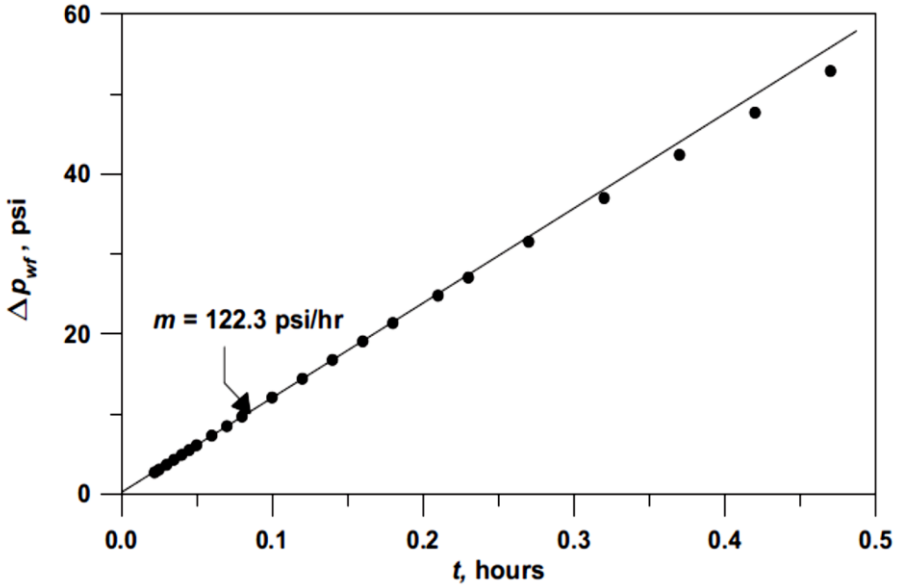
يُبين الشكل7-5 منذ البداية و بشكل واضح تاثير تخزين البئر و يستمر مع تاثير عامل القشرة حتى الوقت t = 20 hrs. . ان سلوك الضغط و مشتقة الضغط يشير إلى أن تأثيرات تخزين البئر أخفت تمامًا منطقة الجريان الشعاعي المبكر ERF ، لكن اظهرت منطقة الجريان الشعاعي المتاخر LRF بعد الوقت t = 20 hrs. .



الشكل 7-5 :الرسم التشخيصي اللوغاريتمي لفحص البئر المائل - المثال رقم-2

t (hours)	p_{wf} (psi)	d p_{wf}/dln$t$ (psi)	t (hours)	p_{wf} (psi)	d p_{wf}/dln$t$ (psi)
2.0E–2	2.456E+0	2.444E+0	4.0E+0	2.645E+2	1.284E+2
2.2E–2	2.700E+0	2.686E+0	4.5E+0	2.793E+2	1.241E+2
2.5E–2	3.067E+0	3.048E+0	5.0E+0	2.920E+2	1.188E+2
3.0E–2	3.676E+0	3.650E+0	6.0E+0	3.124E+2	1.070E+2
3.5E–2	4.283E+0	4.249E+0	7.0E+0	3.277E+2	9.491E+1
4.0E–2	4.890E+0	4.845E+0	8.0E+0	3.393E+2	8.351E+1
4.5E–2	5.495E+0	5.440E+0	1.0E+1	3.555E+2	6.429E+1
5.0E–2	6.099E+0	6.031E+0	1.2E+1	3.658E+2	4.995E+1
6.0E–2	7.302E+0	7.207E+0	1.4E+1	3.727E+2	3.967E+1
7.0E–2	8.501E+0	8.374E+0	1.6E+1	3.777E+2	3.242E+1
8.0E–2	9.695E+0	9.532E+0	1.8E+1	3.814E+2	2.736E+1
1.0E–1	1.207E+1	1.182E+1	2.0E+1	3.843E+2	2.385E+1
1.2E–1	1.442E+1	1.407E+1	2.1E+1	3.856E+2	2.252E+1
1.4E–1	1.676E+1	1.629E+1	2.2E+1	3.867E+2	2.142E+1
1.6E–1	1.908E+1	1.847E+1	2.5E+1	3.896E+2	1.914E+1
1.8E–1	2.138E+1	2.062E+1	3.0E+1	3.933E+2	1.737E+1
2.0E–1	2.366E+1	2.274E+1	3.5E+1	3.962E+2	1.681E+1
2.2E–1	2.592E+1	2.482E+1	4.0E+1	3.986E+2	1.672E+1
2.5E–1	2.929E+1	2.789E+1	4.5E+1	4.007E+2	1.681E+1
3.0E–1	3.481E+1	3.285E+1	5.0E+1	4.025E+2	1.693E+1
3.5E–1	4.024E+1	3.763E+1	6.0E+1	4.056E+2	1.714E+1
4.0E–1	4.556E+1	4.222E+1	7.0E+1	4.082E+2	1.723E+1
4.5E–1	5.079E+1	4.665E+1	8.0E+1	4.104E+2	1.723E+1
5.0E–1	5.593E+1	5.090E+1	1.0E+2	4.140E+2	1.708E+1
5.5E–1	6.097E+1	5.499E+1	1.2E+2	4.170E+2	1.687E+1
6.0E–1	6.593E+1	5.893E+1	1.4E+2	4.194E+2	1.665E+1
7.0E–1	7.558E+1	6.636E+1	1.6E+2	4.216E+2	1.646E+1
8.0E–1	8.490E+1	7.321E+1	1.8E+2	4.234E+2	1.629E+1
1.0E+0	1.026E+2	8.534E+1	2.0E+2	4.251E+2	1.615E+1
1.2E+0	1.191E+2	9.558E+1	2.2E+2	4.266E+2	1.603E+1
1.4E+0	1.345E+2	1.041E+2	2.5E+2	4.285E+2	1.589E+1
1.6E+0	1.490E+2	1.112E+2	3.0E+2	4.314E+2	1.570E+1
1.8E+0	1.624E+2	1.170E+2	3.5E+2	4.338E+2	1.558E+1
2.0E+0	1.751E+2	1.216E+2	4.0E+2	4.358E+2	1.549E+1
2.2E+0	1.868E+2	1.252E+2	4.5E+2	4.376E+2	1.542E+1
2.5E+0	2.031E+2	1.289E+2	5.0E+2	4.392E+2	1.537E+1
3.0E+0	2.270E+2	1.317E+2	6.0E+2	4.420E+2	1.530E+1
3.5E+0	2.473E+2	1.311E+2			

جدول 2-7 :بيانات فحص البئر المائل - المثال رقم-2



الشكل 7-6 : تفسير بيانات مدة تاثير تخزين البئر لفحص البئر المائل - المثال رقم-2

- حساب معامل تخزين البئر C

- رسم بيانات فرق الضغط مع الوقت لمنطقة تاثير تخزين البئر على رسم بياني عادي للمدة $t \leq 0.5$ hrs. الشكل7-6 . نمرر احسن خط مستقيم عبر نقاط الفحص و نجد الميل الذي يساوي m = 122.3 psi/hr.

- حساب معامل تخزين البئر C كما يأتي :

$$C = \frac{qB}{24|m|} = \frac{620 \times 1.6}{24 \times 122.3} = 0.338 \text{ bbl/psi.}$$

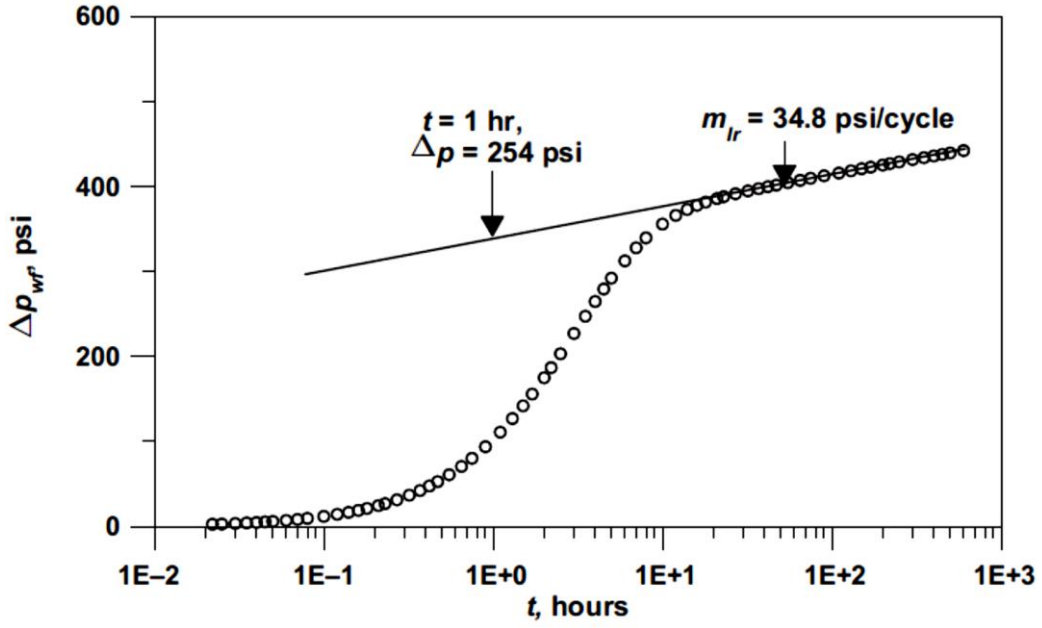
- حساب معامل تخزين البئر اللابعدي C_D كما يأتي :

$$C_D = \frac{5.615C}{2\pi\phi c_t h r_w^2}$$

$$C_D = \frac{5.615 \times 0.338}{2 \times \pi \times 0.22 \times (1.7 \times 10^{-5}) \times 100 \times (0.4)^2} = 5,048$$

تفسيرفترة طور الجريان الشعاعي المتاخر LRF:

- رسم بيانات فرق الضغط مع الوقت على رسم بياني نصف لوغاريتمي الشكل7-7 ، ولان منطقة طور الجريان الشعاعي المتاخر LRF تبدأ بعد المدة $t \geq 20$ hrs. فنمرر احسن خط مستقيم عبر نقاط الفحص بعد هذه المدة و نجد ميل المستقيم الذي يساوي m_r = 34.8 psi/cycle.



الشكل 7-7 :تفسير بيانات فحص البئر المائل لمدة تاثير
طور الجريان الشعاعي المتاخر- المثال رقم-2

من الميل نجد قيمة النفاذية الافقية للطبقة و تساوي:

$$k_h = \frac{162.6\,qB\mu}{|m_{lr}|h} = \frac{162.6\times 620\times 1.6\times 0.54}{34.8\times 100} = 25 \text{ md.}$$

- عند الوقت t=1 hr. نقرا قيمة فرق الضغط على الخط المستقيم في الشكل 7-7 و يساوي Δp_{wf}=254 psi و منه نحسب قيمة معامل القشرة الظاهري apparent skin factor - s_a :

$$s_a = 1.151\left[\frac{254}{34.8} - \log 1 - \log\frac{25}{0.22\times\left(1.7\times 10^{-5}\right)\times 0.54\times(0.4)^2} + 3.2\right]$$

$$s_a = 5.9.$$

- لحساب معامل القشرة الميكانيكي mechanical skin factor - s فلا بد من حساب معامل القشرة المكافىء pseudo skin factor – s_p ، إذ ان:

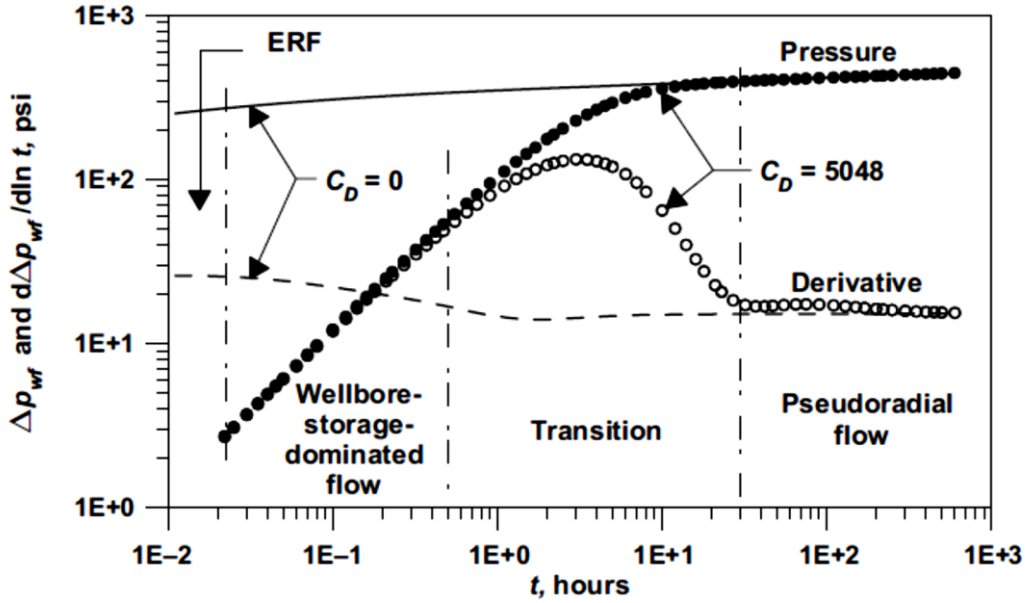
$s_a = s + s_p$

لكي نحسب s_p نحتاج الى النفاذية العمودية k_z والتي تُحسب من التفسير خلال فترة طور الجريان الشعاعي المبكر ERF. لما كان تخزين البئر يخفي الطور ERF فلا يُمكن الحصول على النفاذية العمودية و بالتالي ليس بالامكان حساب معامل القشرة الميكانيكي s من بيانات فحص البئر.

ومع ذلك، لتوضيح حساب s، سنفترض أن مدة ERF ظاهرة غير مخفية و بالتالي يُمكن تحديد النفاذية العمودية k_z من تفسير مدة الجريان ERF .

تفسيرفترة طور الجريان الشعاعي المبكر ERF:

يُوضح الشكل7-8 اختفاء طور تخزين حفرة البئر $C_D = 0$ للمنحنيين فرق الضغط و مشتقة الضغط .مدة الجريان الشعاعي المبكرERF ممكن تحديدها عند الوقت .$t \leq 0.02$ hrs.



الشكل 7-8 :الرسم التشخيصي لبيانات فحص البئر المائل لمدة تاثير طور الجريان الشعاعي المبكر للمثال رقم-2

يُوضح الشكل7-9 تفسير طور الجريان الشعاعي في الوقت المبكر باستخدام المخطط نصف لوغاريتمي semi-log لعلاقة هبوط الضغط مقابل الوقت. ميل الخط المستقيم المار ببيانات المدة $t \leq 0.02$ hrs. يساوي $m_{lr} = 59.2$ psi/cycle.

الان يُمكن حساب قيمة معدل النفاذية k_w باتجاه محور البئر المائل وتساوي:

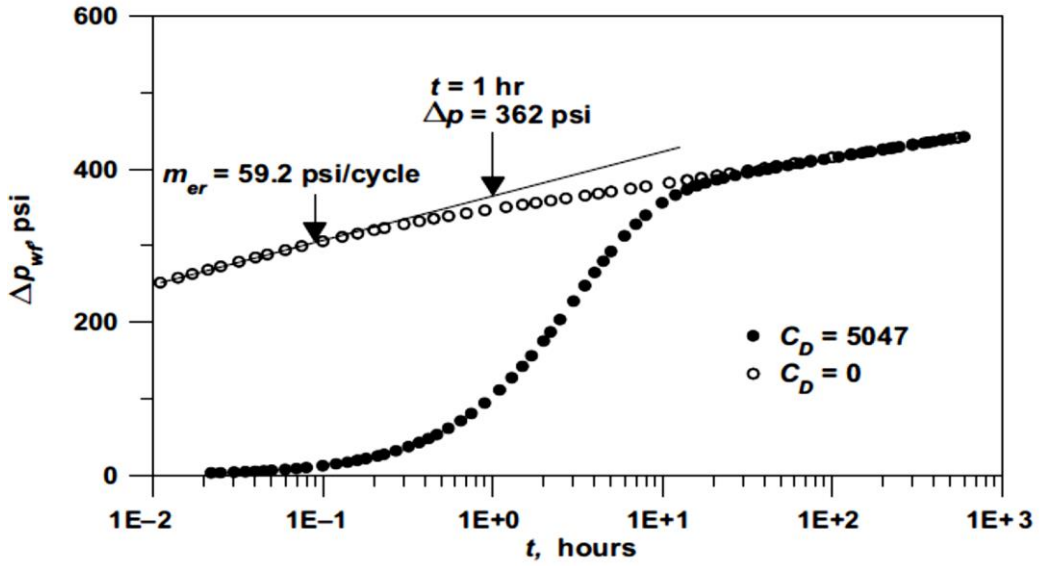
$$k_w = \frac{1}{k_h}\left(\frac{162.6\,qB\mu}{m_{er}h_w}\right)^2 = \frac{1}{25}\left(\frac{162.6\times 620\times 1.6\times 0.54}{59.2\times 100}\right)$$

$$k_w = 8.66.$$

❖ و حساب قيمة النفاذية العمودية:

$$k_z = \frac{k_w - k_h\cos^2\psi}{\sin^2\psi} = \frac{8.66 - 25\times\cos^2 65}{\sin^2 65}$$

$$k_z = 5.1 \text{ md.}$$



الشكل 7-9 :رسم نصف لوغاريتمي لتفسير بيانات مدة طور الجريان الشعاعي المبكر- المثال رقم-2

- عند الوقت t=1 hr. نقرا قيمة فرق الضغط على الخط المستقيم في الشكل اعلاه و يساوي Δp_{wf}=362 psi و منه نحسب قيمة معامل القشرة الميكانيكي s :

$$s = \frac{1.151\times 100}{100}\sqrt{\frac{25}{5.1}}\times\left[\frac{362}{59.2} - \log 1 - \log\frac{25}{0.22\times\left(1.7\times 10^{-5}\right)\times 0.54\times(0.4)^2} + 3.23\right]$$

$$s = 3.7$$

الان ممكن ان نستخدم احدى الطرق الثلاث في حساب معامل القشرة المكافىء s_p بعد توفر قيمة النفاذية العمودية و لان البئر مخترق جزئيا نستخدم طريقة اوزكان برغم من ان شرط الطريقة لم يتحقق.

- حساب المعاملات الاتية:

$$z_{wD} = \frac{50}{0.4}\sqrt{\frac{25}{5.1}} = 276.8, \quad h_D = \frac{100}{0.4}\sqrt{\frac{25}{5.1}} = 553.5,$$

$$h_{wD} = \frac{100}{0.4}\sqrt{5\cos^2 65 + \sin^2 65} = 327.3$$

$$\psi' = \tan^{-1}\left(\sqrt{0.2}\tan 65\right) = 43.8°.$$

- حساب قيمة المعامل σ ، بدءا نحدد المتغيرات المعتمدة :

$$\sigma\left(0.3h_{wD}\sin\psi',1,-\frac{h_{wD}}{2}\sin\psi',\frac{h_{wD}}{2}\sin\psi'\right)$$
$$=\sigma(68,1,-113.3,113.3)$$

اذن المعامل σ يساوي:

$$\sigma=\frac{1}{4}\left\{(68-113.3)\ln\left[(68-113.3)^2+1\right]-(68+113.3)\ln\left[(68+113.3)^2+1\right]\right\}$$
$$-\frac{1}{2}\left(\tan^{-1}\frac{68+113.3}{1}-\tan^{-1}\frac{68-113.3}{1}\right)$$
$$\sigma=-647$$

- حساب قيمة المعامل F ، بدءا نحدد المتغيرات المعتمدة باستخدام $z_{wD}=h_D/2$:

$$F\left(\frac{\pi}{h_D\sin\psi'},2z_{wD}+0.6h_{wD}\cos\psi',0\right)$$
$$=\mathrm{F}(0.0082,695.3,0)$$

- اذن المعامل F يساوي:

$$F=-\frac{553.5}{2\times327.3}\left\{\ln\left[1-2e^{-0.0082}\cos\left(\frac{180\times695.3}{553.5}\right)+e^{-2\times0.0082}\right]\right.$$
$$\left.+\ln\left[1-2e^{-0.0082}\cos(0)+e^{-2\times0.0082}\right]\right\}$$
$$F=7.1$$

معامل القشرة المكافىء s_p يساوي:

$$s_p=1+\frac{2}{327.3\times\sin43.8}(-647)+7.2$$
$$=2.5$$

معامل القشرة الميكانيكي s يساوي:

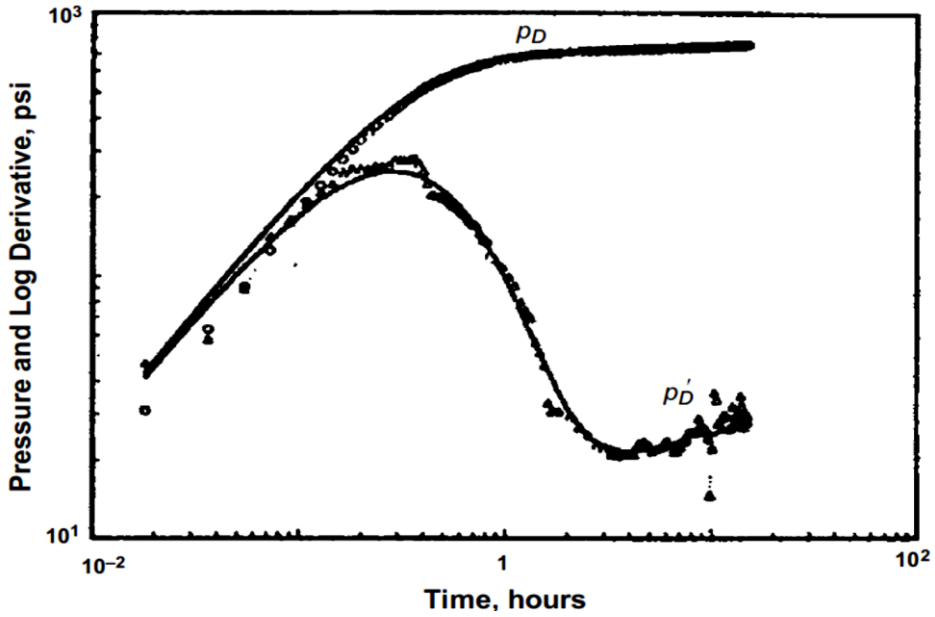
$$s=s_a-s_p=5.9-2.49$$
$$=3.4$$

5-7 ملاحظات عن فحوصات الابار المائلة:

الشكل7-10 يُمثل مخطط لوغاريتمي لبيانات فحص تصاعد الضغط Build-up لبئر مائل، مدة الفحص بحدود 15.2 ساعة ، البئر مخترق الطبقة بالكامل و بزاوية تصل اللى 48° (خطاب

وآخرون، Khatab 1991). من الشكل يتبين إختفاء منطقة الجريان الشعاعي المبكر ERF بسبب تاثير تخزين حفرة البئر ومعامل القشرة ، كما ولا يُمكن تمييز طور الجريان المتوسط أو المتأخر . يُمكن تفسير الميل المتزايد لبيانات مشتقة الضغط في المدة المتاخرة من الفحص على أنه استجابة لتأثير الحدود القريبة Nearby boundaries في مكمن متجانس.

لاحظ خطاب وآخرون(1991)، أن هذه البيانات يُمكن مطابقتها بشكل متماثل مع الموديل لمكمن مغلق متجانس و ايضا مع الموديل لمكمن لانهائي ثنائي المسامية Dual-porosity . لاختيار اي من الموديلين اعلاه نحتاج الى معلومات إضافية داعمة لتفسير .



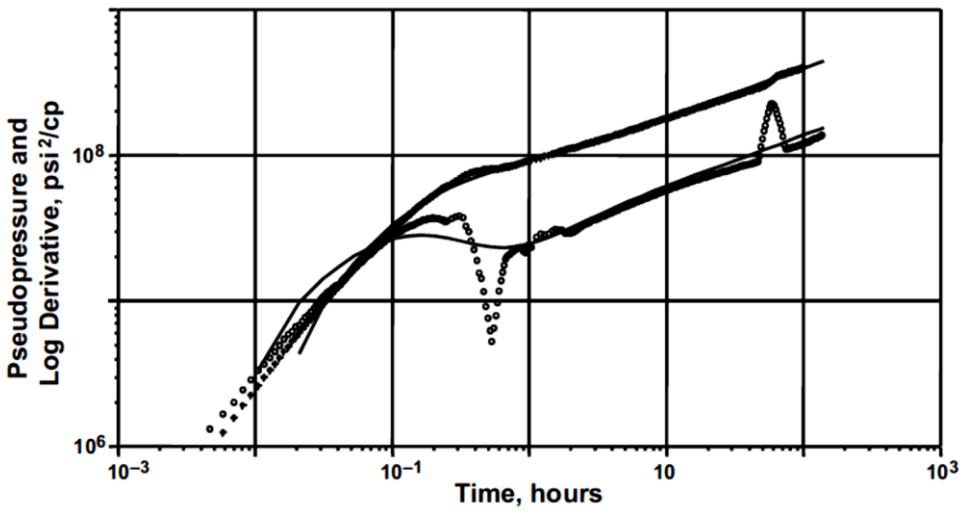
الشكل 7-10:الرسم التشخيصي اللوغاريتمي لفحص البئر المائل

مخترق الطبقة كليا Fully penetration (Khatab-1991)

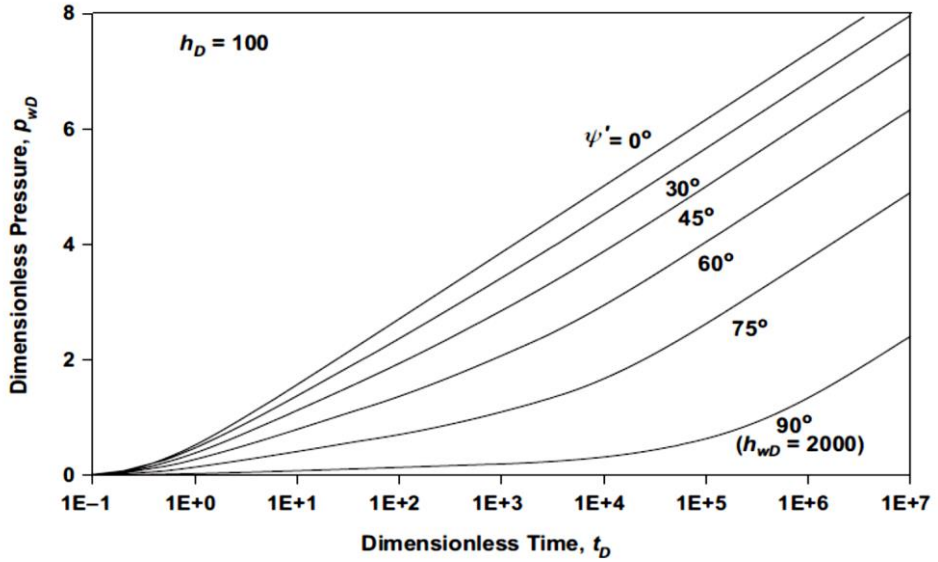
الرسم التشخيصي اللوغاريتمي في الشكل7-11 هو لبيانات فحص بئر غازي ، إذ يشير سجل الحفر إلى أنه بئر مائل . نظرًا لأن الزاوية الميل غير معروفة ، فقد تم تحليل البيانات بفرض زوايا مائلة مختلفة، ولوحظ اختلاف بسيط جدًا بين التطابقات التي تم الحصول عليها. مع ذلك، فإن جميع الموديلات التي تم اختبارها اعطت نسبة النفاذية العمودية الى النفاذية الافقية نسبة غير واقعية و بحدود ($kz/k = 53$)، مما يشير إلى مشاكل في التحليل.

7-6 تاثير زاوية الميلان و نسبة اختراق البئر على سلوك الضغط المقاس عبر الفحص

ان استجابة الضغط عبر فحص الابار المائلة تتاثر بزاوية الميل $\bar{\psi}$ طول البئر المائل h_w و نسبة الاختراق h_w/h. الشكل7-12 يُوضح تاثير زاوية الميل $\bar{\psi}$ على الضغط لبئر ذا اختراق كلي. بزيادة زاوية الميلان $\bar{\psi}$ يزداد طول اختراق البئر للطبقة (h_w) ويقل فرق الضغط اللابعدي



الشكل 7-11 :مطابقة بيانات فحص تصاعد الضغط Build-up بئر غازي مائل مخترق الطبقة كليا Fully penetration

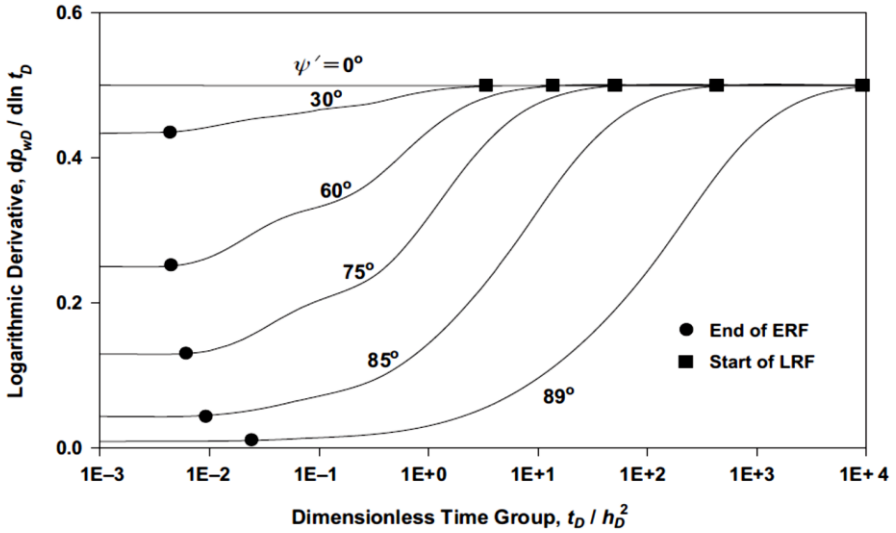


الشكل 7-12 :تاثير زاوية الميل على استجابة الضغط للابار العمودي ، الافقي و المائل عند الاختراق الكلي للطبقة Fully penetration (Raghavan-2000)

(P_{wD}) و يصل الحد الادنى لـ P_{wD} عندما قيمة الزاوية $\bar{\psi} = 90^{o}$ اي ان البئر يصبح افقيا و الحد الاعلى يكون عندما البئر عموديا اي عند الزاوية $\bar{\psi} = 0^{o}$.

الشكل-7-13 يُوضح تاثير زاوية الميل $\bar{\psi}$ على ظهور و تواجد اطوار الجريان و على طول مدة تواجدها عبر الفحص. بصورة عامة هنالك طوران للجريان يظهران عبر فحص البئر المائل ذو الاختراق الكامل للطبقة fully penetrating هما ERF و LRF . ان زيادة زاوية الميل

تؤدي إلى تأخير خفيف في نهاية طور الجريان الشعاعي المبكر Early radial Flow-ERF ولكنها تؤدي إلى تأخير واضح في بداية طور الجريان الشعاعي المتاخر Late radial Flow-LRF هذا يعني هنالك اطالة في المدة الانتقالية ما بين ERF و LRF إذ تصبح أطول مع زيادة زاوية الميل و طول البئر المائل h_w الذي يخترق الطبقة بالكامل. .لاحظ وحسب الشكل7-13 فان البئر العمودي ($\bar{\psi}=0$) له طور جريان شعاعي واحد في حين هنالك طوران شعاعيان للبئر الافقي ($\bar{\psi}=90^o$).

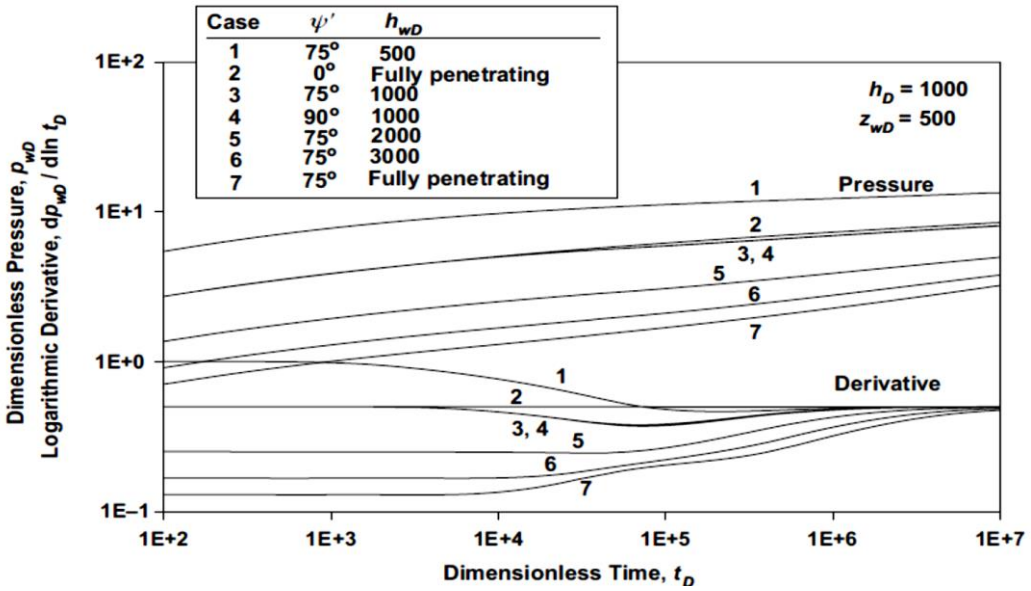


الشكل 7-13 :تاثير زاوية ميل البئر على اطوار الجريان ERF و LRF لكلا من البئر العمودي و البئر المائل عند الاختراق الكلي للطبقة Fully penetration (Raghavan-2000)

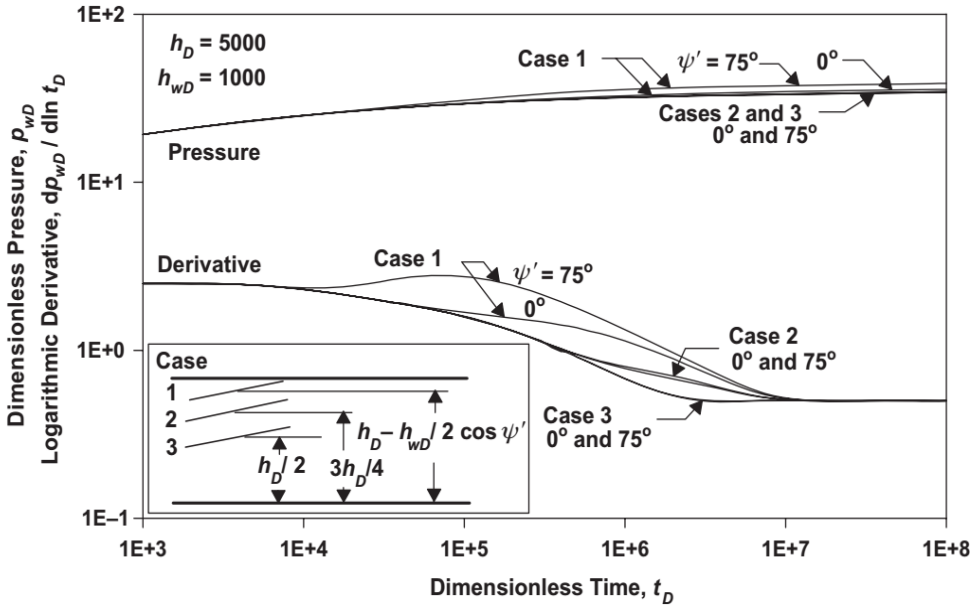
الشكل7-14 يُوضح العلاقة اللوغاريتمية ما بين الضغط و مشتقة الضغط اللابعدي مع الوقت اللابعدي (الرسم التشخيصي) ، إذ يعكس استجابات الضغط لتأثير الاختراق الجزئي للطبقة المكمنية. نُلاحظ ان حساسية استجابة البئر لطول الاختراق أكثر مما لزاوية الميل ، خصوصا عند المنحنيات رقم 3،5،6 لزاوية الميل $\bar{\psi}=75^o$. فبزيادة نسبة الاختراق فان فرق الضغط يقل ، في حين عند المنحنيين رقم 3،4 فبرغم من تغير زاوية الميلان الا ان استجابة الضغط لكليهما واحدة عند طول اختراق $h_{wD}=1000$.

يُظهر الشكل7-15 ثلاث حالات تعكس استجابات مختلفة لبيانات مشتقة الضغط عبر المرحلة الانتقالية من ERF إلى LRF . الحالات الثلاثة cases 3،2،1 رُتبت بحسب ميل البئر ونسبة اختراق البئر فالحالة الاولى عند الحد الاعلى لنسبة الاختراق، والثالثة لنسبة الاقل اختراقا (المخطط الاسفل في الشكل 7-15) . استجابة مشتقة الضغط في الحالة الثالثة3-case تُظهر خطًا مستقيمًا بميل مقداره -2/1 لتعكس طور الجريان الكروي Intermediate-time Spherical Flow –ISF بغض النظر عن تاثير زاوية الميل في حين الحالة الاولى case-1 تُظهر خطًا مستقيمًا بميل مقداره -2/1 لكن بقيمة مشتقة اعلى لتعكس طور الجريان نصف كروي Hemi-Spherical Flow HSF. لاحظ ان موقع البئر في الحالة الاولى يكون قريب الى احدى حدود

الطبقة العليا او السفلى في حين ان موقع البئر في الحالة الثالثة في منتصف الطبقة. يتلاشى كل من الجريان نصف الكروي والكروي عندما تصل موجة (اشارة) الضغط إلى الحدود العلوية والسفلية بالكامل إذ يظهر الجريان الشعاعي.



الشكل 7-14 :تاثير زاوية ميل البئر و الاختراق الجزئي على استجابة الضغط عبر الفحص (Raghavan-2000)



الشكل 7-15 :تاثير زاوية الميلان و موقع البئر المائل على استجابة الضغط عبر الفحص (Raghavan-2000)

References – المصادر

1. Besson، J. 1990. "Performance of Slanted and Horizontal Wells on an Anisotropic Medium". Paper SPE 20965 presented at the SPE European Petroleum Conference، The Hague، 22–24 October.
2. Brons، F. and Marting، V.E. 1961. "The Effect of Restricted Fluid Entry on Well Productivity". JPT 13 (2):172–184. SPE-1322-G.
3. Cinco-Ley، H 1974. "Unsteady-State Pressure Distribution Created by a Directionally Drilled Well، or A well With An Inclined Fracture ،" Ph.D. Dissertation، Stanford University.
4. Cinco، H.، Miller، F.G.، and Ramey، H.J. Jr. 1975a." Unsteady-State Pressure Distribution Created by a Directionally Drilled Well". JPT 27 (11): 1392–1400; Trans.، AIME، 259. SPE-5131-PA.
5. Cinco-Ley، H.، Ramey، H.J. Jr.، and Miller، F.G. 1975b. "Pseudo-Skin Factors for Partially-Penetrating Directionally-Drilled Wells". Paper SPE 5589 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition، Dallas، 28 September–1 October
6. Joshi، S. (1991). "Horizontal Well Technology" ، (Tulsa، OK: Penn Well).
7. Khattab، H.A.، Yeh، N.-S.، and Agarwal، R. 1991. "Pressure Transient Behavior of Slanted Wells in Single- and Multiple-Layered Reservoirs". Paper SPE 22730 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition، Dallas، 6–9 October.
8. Medhat M. Kamal "Transient Well Testing " Monograph SPE © Copyright 2009 Society of Petroleum Engineers.
9. Moran، J.H. and Finklea، E.E. 1962. "Theoretical Analysis of Pressure Phenomena Associated with Wireline Formation Tester". JPT 14 (8): 899–908; Trans.، AIME، 225. SPE-177-PA.
10. Ozkan، E. and Raghavan، R. 2000. "A Computationally Efficient، Transient-Pressure Solution for Inclined Wells". SPEREE 3 (5): 414–425. SPE-66206-PA.

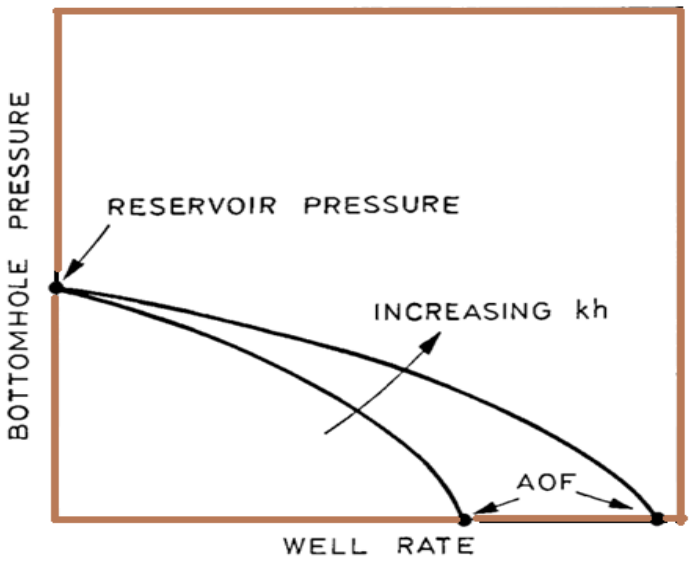
الفصل الثامن

فحص قابلية توصيل الغاز Deliverability Testing of Gas Wells

1-8 المقدمة :

فحوصات قابلية توصيل الغاز Gas Deliverability Test –GDT هي فحوصات تُنفذ على آبار الغاز لتقييم قدرتها على الإنتاج (توصيل الغاز الى السطح) تحت ظروف مختلفة و من ثم تحديد معدل التدفق الأمثل من خلال بناء علاقة الضغط بمعدل الإنتاج. تسمى احيانا بفحوصات القابلية الانتاجية Productivity test و تُنفذ في الابار الغازية و النفطية لتحديد قدرتها على الجريان في ظروف محددة من الضغوط المكمنية وضغوط الجريانية ومن ثم يُمكن ربطها مع بعضها في منحني أدائية الجريان Inflow Performance Relationship Curve-IPR كما في الشكل8-1.

GDT كانت تُحدد سابقا عن طريق فتح البئر الغازي الى ظروف الضغط الجوي مباشرة" ثم يقاس معدل الجريان. ممارسات "الجريان المفتوح" هذه كانت تتسب في اهدار للغاز، وأحيانًا خطرا على العاملين والمعدات و ربما ضارة بالمكمن. و برغم من انها وفرت معلومات عن قابلية الابار لانتاج و توصيل الغاز الى السطح الا ان المعلومات المكتسبة كانت محدودة في ظل ظروف جريان البئر المتغيرة غير المستقرة. مع ذلك، فقد تركت هذه للصناعة فكرة او مفهوم الجريان المفتوح المطلق للبئر (Absolute Open Flow Potential –AOFP or AOF) والذي يعكس مؤشرًا لإنتاجية البئر و الذي يُعّرف بانه اعلى معدل لجريان الغاز يُمكن أن يصله البئر عند فتحه في ظروف ضغط جوي عكسي Theoretical Atmospheric Backpressure (اي عند ضغط جرياني نظري في قاع البئر مساوي للضغط الجوي (p_{wf}=atmospheric pressure=14.7 psi او فرق ضغط صفر (gauge pressure 0).



الشكل 8-1 : منحني ادائية جريان البئر الغازي IPR

معلومات الفحص لقابلية توصيل الغاز GDT تُستخدم كفقرة مهمة تُثبت في عقود توريد الغاز طويلة الامد ما بين شركات الإنتاج وشركات الخطوط و الأنابيب السطحية و المستخدم النهائي.

إذ يُعد AOF كمعيار للحدود المسموح بها لإنتاج الغاز عند التفاوض على العقود على اساس نسبة مئوية معينة من معدل الجريان المفتوح AOF و ايضا يُستخدم كمعيار لمقارنة أداء الآبار.

2-8 استخدامات فحوصات قابلية توصيل الغاز GDT

ندرج ادناه اهم استخدامات فحوصات قابلية توصيل الغاز GDT (الشكل8-2):

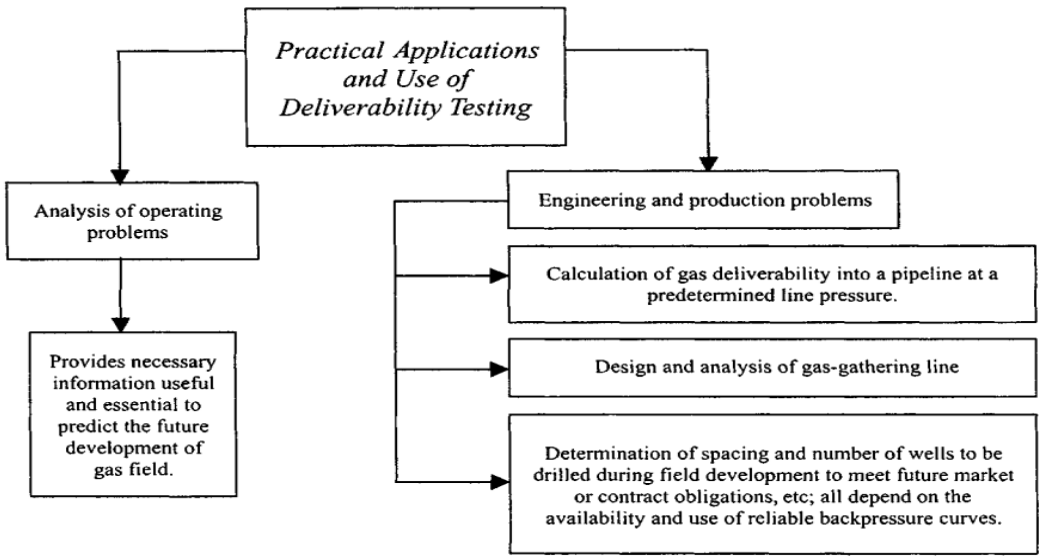
- حساب منحنى أدائية البئر IPR (Inflow Performance Relationship)ليمثل العلاقة بين معدل الجريان وضغط باطن البئر (Q vs. Pwf) كما في الشكل8-1 و منه يتم تحديد القدرة القصوى لإنتاج الغاز (AOF – Absolute Open Flow) و في تحديد معدل الجريان عند اي ضغط جرياني او ضغط مكمني .

- تحديد نوع و طبيعة الجريان في قاع البئر سواء اكان الجريان من النوع المضطرب Turbulent flow او من نوع الطبقي Laminar flow المستقر.

- حساب مؤشر الانتاجية Productivity index و ذلك لمعرفة كيف سيؤدي البئر تحت ضغوط تشغيل مختلفة.

- و منها يُمكن تحديد عدد الابار و توزيعها عند تطوير الحقل الغازي .

- دعم تصميم نظام الإنتاج (Production System Design) عبر الاختيار المناسب لأقطار الانابيب ، الضاغطات (المكابس) compressors وغيرها.



الشكل 8-2 : بعض الاستخدامات و التطبيقات العملية لفحوصات GDT

قبل التطرق الى انواع فحوصات GDT لا بد من التعرف على عامل مهم و مؤثر في تحديد نوع الفحص و هو وقت استقرار الضغط.

***وقت الاستقرار Stabilization Time**

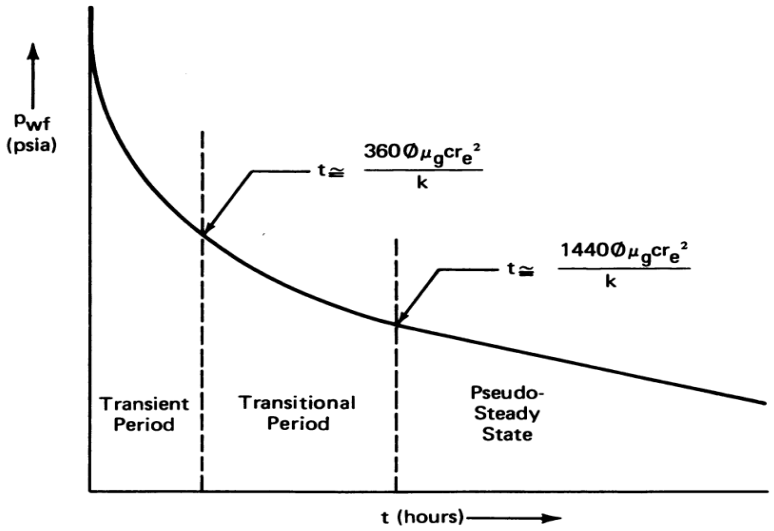
في فحوصات قابلية توصيل الغاز (Gas Deliverability Tests) واختبارات إنتاجية الغاز (Gas Productivity Tests)، يعكس مصطلحا "Stabilization Time" و

"Stabilization Pressure" إلى حالة التوازن الديناميكي التي يصل اليها البئر أثناء الفحص، بحيث تصبح قراءات الضغط ومعدل الجريان ثابتة أو شبه ثابتة مع الوقت.
و يُعرف على انه المدة الزمنية اللازمة حتى يصبح ضغط البئر (P_{wf}) ثابتًا أو يتغير بمعدل ضئيل جدًا مع الزمن عند تغيير معدل الجريان في فحص GDT .

تحديد وقت استقرار الضغط خلال الفحص يُعتبر عامل بالغ الأهمية لضمان دقة النتائج والا سنحصل على قراءات مضللة: مثل تقدير خاطيء للمعدل AOF يكون أعلى من الواقع او يتسبب في حسابات خاطئة للمعاملات (مثل C أو n ستُذكر لاحقا).

معرفة وقت استقرار الضغط له علاقة في تحديد نوع فحص GDT. فإذا كان الوقت المتوقع قصيرًا للاستقرار ، فالانسب إجراء الفحص التقليدي Conventional test و الذي يتطلب استقرار كامل (Full Stabilization) في كل معدل تدفق قبل الانتقال للمعدل التالي. و إذا كان الوقت المتوقع للاستقرار طويلًا فالانسب إجراء الفحوصات متساوية الفترات الزمنية Isochronal test أو فحوصات متساوية الفترات الزمنية المعدلة Modified isochronal test، إذ ان هذه الفحوصات لا تحتاج الى استقرارًا للضغط كاملًا .

وقت الاستقرار يستغرق فترة زمنية طويلة خلال فحص مكمن كبير ذو نفاذية منخفضة و يستغرق مدة قصيرًة لمكمن محدود ذو نفاذية عالية. غالبًا ما تُحدد الهيئات التنظيمية الحكومية تقديرات تقريبية للوصول لاستقرار Stabilization الضغط ، بحيث يصل فرق الضغط الى أقل من 0.1٪ عن القراءة التي تسبقه خلال مدة 15 دقيقة.



الشكل 8-3 : حدود اطوار الجريان عبر فحص هبوط الضغط

من الممكن حساب وقت الاستقرار ليمثل وقت الوصول للحالة شبه المستقرة Pseudo Steady State-PSS (الشكل 8-3) عند جريان البئر بمعدل ثابت . ان الوقت PSS يمثل الوقت الذي عنده يصبح معدل تغير الضغط مع الوقت ثابت اي ان dp/dt=constant . من الممكن تحديد وقت الاستقرار او الوقت PSS لمكمن دائري و الجريان شعاعي من المعادلة الاتية:

$$t_s = \frac{948\phi\bar{\mu}_g\bar{c}_t r_e^2}{k_g} \quad \text{---------- 1}$$

او من: Lee(1996)

$$t \cong \frac{1440\phi\mu_g c r_e^2}{k} \quad \text{---------- 2}$$

عندما لا تكون التكوينات Formations هندسية و تكون غير متناظرة فيُمكن ان يستغرق وقت الاستقرار فترة أطول بكثير مما يُحسب في المعادلة رقم-1 .

بالامكان استخدام المعادلة العامة ادناه في حساب وقت الاستقرار والتي تاخذ بنظر الاعتبار شكل و مساحة منطقة تصريف البئر:

$$t_{pss} = \frac{\phi\bar{\mu}_g\bar{c}_t A t_{DA}}{0.0002637 k_g} \quad \text{---------- 3}$$

ان قيمة t_{DA} تُقرأ من الجدول4-1 (الفصل الرابع/ الجزء الاول) إذ تمثل الوقت اللابعدي لبداية مدة الجريان شبه المستقر.

- ممكن تقدير وقت الاستقرار عبر تحديد نصف قطر منطقة البحث Radius of investigation-r_i و الذي يُعرف على أنه منطقة دائرية من المكمن يتأثر ضغطها من جراء انتاج البئر الواقع في مركزها. بمرور الوقت تتقدم اشارة الضغط بعيدا عن البئر فيتأثر المزيد من من عمق المكمن و يزداد r_i حتى تصل اشارة الضغط إلى الحدود الخارجية للمكمن. في هذه الحالة يصبح $r_i = r_e$ و عندها ندخل في حدود طور الجريان شبه المستقر PSS و نضمن فترة الاستقرار .

ان r_i يساوي:

$$r_i = \sqrt{\frac{k_g t}{948\phi\bar{\mu}_g\bar{c}_t}} \quad \text{---------- 4}$$

او من Chaudhry(2003)

$$r_{inv} = 0.032\sqrt{\frac{k\bar{p}_R}{\phi\bar{\mu}_g}} \quad \text{---------- 5}$$

و اذا كان $r_i < r_e$ ذلك يعني ان الفحص لازال بمرحلة طور الجريان اللا مستقر Unsteady State-USS.

kg = gas reservoir permeability، md

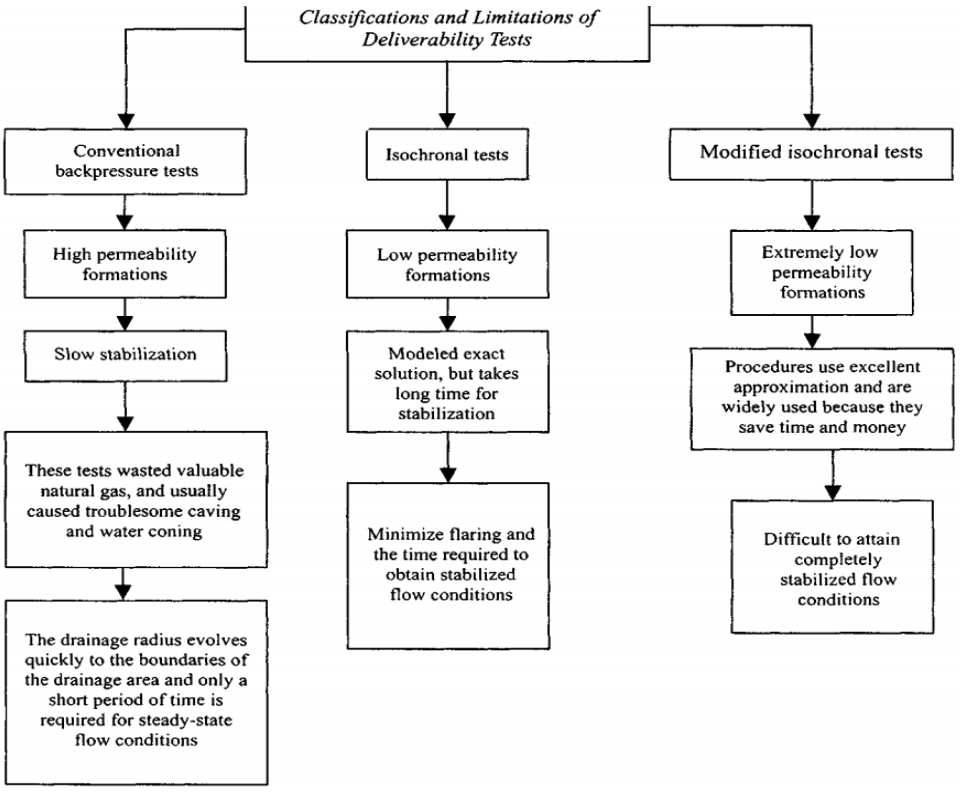
$\bar{\mu}_g$ Average gas viscosity، cP

Ø Porosity، fraction

$\bar{P}_R$ Stabilized shut-in reservoir pressure، psia

k permeability، md

c_t effective total compressibility ، psi^{-1}



الشكل 4-8 : انواع و محددات و استخدامات فحوصات قابلية توصيل البئر للغاز Gas deliverability test GDT

3-8 أنواع فحوصات قابلية توصيل الغاز GDT Types of Gas Deliverability Testing

هنالك ثلاثة انواع لفحص قابلية توصيل الغاز GDT (الشكل 4-8) و تتضمن ما يلي:

- فحص الضغط العكسي Conventional Back-pressure test
- فحص متساو الفترات الزمنية Isochronal test
- فحص متساو الفترات الزمنية المحور Modified isochronal test

1-3-8 فحص الضغط العكسي Back pressure test

فحص الضغط العكسي هو **فحص قابلية إنتاجية (Deliverability Test)** البئر ، يُستخدم أساسًا في **الآبار الغازية** و(أحيانًا النفطية) لدراسة العلاقة بين معدل جريان الغاز و الضغط المتولد عند قاع البئر أثناء الجريان.

يُعرف أيضًا بعدة تسميات:

- Four-Point Test
- Conventional Back-Pressure Test
- Conventional Deliverability Test
- Flow-After-Flow Test

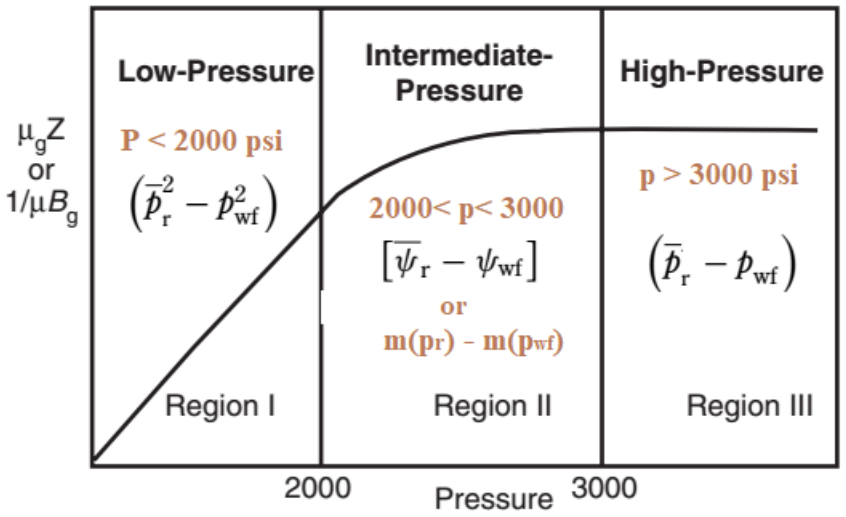
وجميعها تشير إلى نفس الفحص مع اختلاف التسمية حسب المنهجية.

منهجية إجراء الفحص تتضمن: يُشغَّل البئر عند عدة معدلات جريان متتالية (عادةً 4) تبدأ من المعدل الأصغر وتنتهي بالمعدل الأكبر ، عند كل معدل جريان يُنتظر حتى استقرار الضغط ثم يُسجَّل ضغط الجريان المستقر p_{wf} .

الضغط العكسي يعني وجود ضغط مُعاكس على فوهة البئر يقلل معدل الجريان مقارنة بالحالة المفتوحة على الضغط الجوي.

بصورة عامة فان الفحص يهدف أساسًا إلى:

حساب معاملات القابلية الإنتاجية: معامل القابلية C و معامل لاخطية الجريان n
و تقدير أقصى معدل جريان نظري للبئر AOF (Absolute Open Flow) عندما $p_{wf}=0$.



الشكل 5-8 : خواص الغاز PVT

اولا- الاساس النظري لفحص الضغط العكسي

تعتمد معادلات سلوك جريان الغاز في هذا الفحص على فرضية الجريان شبه المستقر (Pseudo-Steady-State Flow – PSS)، وعلى مدى الضغوط التشغيلية خلال الفحص، والتي تؤثر بشكل مباشر على الخواص الفيزيائية للغاز (PVT)، كما هو موضح في الشكل (5-8).

1- للضغوط العالية ، عندما يكون الضغط المكمني او الجرياني اعلى من p>3000 psi ، فان اللزوجة في انضغاطية الغاز تصبح ثابتة .$\mu_g z$=const. معادلة الجريان شبه المستقر للغاز عند هذه الظروف و لمكمن دائري تصبح:

$$Q_g = \frac{7.08\,(10^{-6})\,kh\,(\bar{p}_r - p_{wf})}{(\mu_g B_g)_{avg}\,[\ln(r_e/r_w) - 0.75 + s]} \quad \text{---------- 6}$$

2- للضغوط المتوسطة و التي تتراوح ما بين 2000<p<3000 psi ، فان اللزوجة في انضغاطية الغاز تكون متغيرة(راجع الشكل 8-5) و ان معادلة الجريان شبه المستقر للغاز تكون بدلالة الضغط المكافىء كما ياتي :

$$Q_g = \frac{kh\,[\bar{\psi}_r - \psi_{wf}]}{1422T\,[\ln(r_e/r_w) - 0.75 + s]} \quad \text{---------- 7}$$

3- للضغوط القليلة إذ يكون الضغط المكمني او الجرياني اقل من p<2000 psi . فان اللزوجة في انضغاطية الغاز تتغير بشكل منتظم و معادلة الجريان شبه المستقر للغاز في هذه الظروف تكون بدلالة مربع الضغط و كما ياتي:

$$Q_g = \frac{kh\,(\bar{p}_r^{\,2} - p_{wf}^2)}{1422T\,(\mu_g Z)_{avg}\,[\ln(r_e/r_w) - 0.75 + s]} \quad \text{---------- 8a}$$

باخذ لوغاريتم طرفي المعادلة اعلاه ينتج:

$$\log\ Q_g = \log(\bar{p}_r^{\,2} - p_{wf}^2) + \log\ \{\frac{kh}{1422T\,(\mu_g Z)_{avg}\,[\ln(r_e/r_w) - 0.75 + s]}\} \quad \text{---------- 8b}$$

إذ ان:

B_g bbl/scf ، gas formation volume factor.
Q_g Mscf/day، gas flow rate.
s skin factor
psia،$\bar{p}_r$ average reservoir pressure
psia،p_{wf} flowing bottom-hole pressure
ft،r_e Radius of external boundary
ft،r_w = wellbore radius
Z compressibility factor

*السلوك البياني وتأثير الجريان المضطرب

وفقا المعادلة رقم-b8 و في حال كان الجريان **مثاليًا و طبقيًا(Laminar Flow)** ، فإن رسم العلاقة بين: (Q_g) vs $(\acute{P}\text{-}P_{wf})^2$

على مقياس لوغاريتمي مزدوج (log-log) يعطي خطًا مستقيمًا بميل يساوي1=m (زاوية 45^o)

إلا أن السلوك الحقيقي للآبار الغازية غالبًا ما ينحرف عن هذا النموذج المثالي، حيث تكون

المنحنيات **غير خطية** وميلها لا يساوي الواحد، ويعود ذلك إلى عدة عوامل، أهمها الجريان المضطرب(Turbulent Flow) .

ففي حالة الجريان الشعاعي داخل مكمن دائري، تزداد سرعة الغاز كلما اقترب من فتحة البئر، مما قد يؤدي إلى حدوث اضطراب في الجريان قرب البئر. هذا الاضطراب يشكل مقاومة إضافية لدخول الغاز إلى البئر، ويسبب هبوطًا إضافيًا في الضغط، مشابهًا في تأثيره لهبوط الضغط الناتج عن القشرة الميكانيكية(Mechanical Skin Effect) .

*تعديل معادلات الجريان لتأثير الجريان المضطرب

بسبب هذا السلوك غير المثالي، لا يمكن استخدام معادلات الجريان السابقة مباشرة، بل يجب تعديلها بإدخال عامل قشرة إضافي ناتج عن الجريان المضطرب، يُعبَّر عنه بالحد:DQ_g حيث ان معدل جريان الغاز Q_g و الرمز D يمثل عامل الجريان المضطرب.

وبإدخال هذا الحد في معادلات الجريان شبه المستقر (PSS) للحالات الثلاث (الضغوط المنخفضة، المتوسطة، والعالية)، نحصل على الصيغ المعدلة لكل من:

1- معادلة مربع الضغط عندما p<2000 psi تصبح:

$$Q_g = \frac{kh\left(\bar{p}_r^2 - p_{wf}^2\right)}{1422T\left(\mu_g Z\right)_{avg}\left[\ln\left(r_e/r_w\right) - 0.75 + s + DQ_g\right]} \text{ ---------- 9}$$

إذ ان D تساوي:

$$D = \frac{Fkh}{1422T} \text{ ----------10}$$

حساب F من ما ياتي:

$$F = 3.161\left(10^{-12}\right)\left[\frac{\beta T \gamma_g}{\mu_g h^2 r_w}\right] \text{ ----------11}$$

إذ ان :

F = non-Darcy flow coefficient
k = permeability, md
T = temperature, °R
γ_g = gas gravity
r_w = wellbore radius, ft
h = thickness, ft
β = turbulence parameter as given by Equation 1.2.145:
$\beta = 1.88(10^{-10})k^{-1.47}\phi^{-0.53}$
ϕ is the porosity.

2- معادلة الضغط العادي عندما p>3000 psi :

$$Q_g = \frac{7.08\,(10^{-6})\,kh\,(\bar{p}_r - p_{wf})}{(\mu_g B_g)_{avg}\,T\,[\ln(r_e/r_w) - 0.75 + s + DQ_g]} \quad \text{---------- 12}$$

2- معادلة الضغط المكافىء عندما 2000<p<3000 psi:

$$Q_g = \frac{kh\,(\bar{\psi}_r - \psi_{wf})}{1422T\,[\ln(r_e/r_w) - 0.75 + s + DQ_g]} \quad \text{----------13}$$

ثانيا- خطوات تنفيذ الفحص (الشكل8-6):

يتطلب تنفيذ فحص الضغط العكسي توفر معدات قياس دقيقة تشمل:

- مجسّات قياس الضغط عالية الدقة(Pressure Gauges)
- مقياس لدرجة الحرارة (Thermometer) لقياس درجة حرارة عمود الغاز لغرض حساب خواص الغاز
- جهاز قياس معدل الجريان(Flow Meter) ، وغالبًا عدّاد الفتحة(Orifice Meter) ، على أن تتم معايرته مسبقًا قبل بدء الفحص

1- تهيئة البئر قبل الفحص

يُشترط قبل البدء بالفحص تنظيف البئر بالكامل من مخلفات الحفر و السوائل المتراكمة داخل البئر ويُنجز ذلك عبر:فتح البئر للجريان بمعدل عالٍ (أعلى من أعلى معدل مخطط للفحص) و الاستمرار بالجريان مدة كافية لضمان إزالة جميع المعيقات.

وفي بعض الحالات يُفتح البئر مباشرةً على الضغط الجوي(Blowing to Atmosphere) . ويُعد وجود السوائل أو المواد العالقة داخل البئر سببًا رئيسيًا لفشل الفحص أو تشويه نتائجه.

2- الغلق الأولي واستقرار الضغط

بعد تنظيف البئر، يُغلق البئر لمدة كافية بهدف: استعادة الضغط المكمني الأصلي Pi أو متوسط ضغط المكمن $\bar{P}$.

ويُعد الضغط مستقرًا عندما:لا يتجاوز تغير الضغط **0.1%** خلال فترة 15 دقيقة.

3- مراحل الجريان المتعاقب

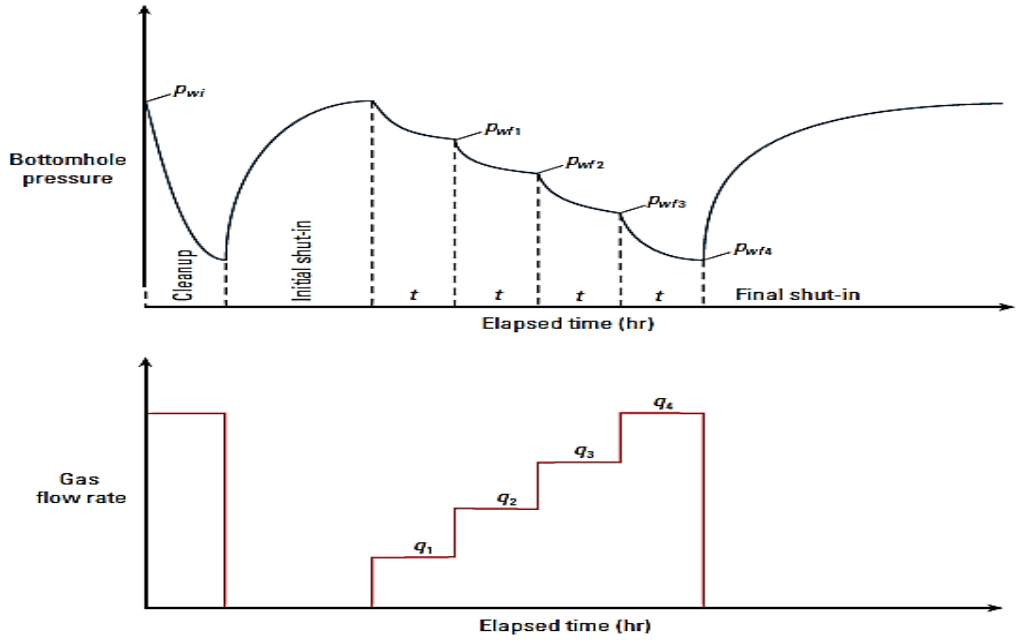
يُفتح البئر للجريان عند **معدل ثابت** $\mathbf{q_1}$ ولمدة كافية لضمان:استقرار ظروف الجريان و دخول الفحص ضمن نطاق الجريان شبه المستقر(PSS) و عند تحقق ذلك، يُقاس:

ضغط الجريان في قاع البئر P_{wf1} ، يُغيَّر معدل الجريان إلى q_2، ويُسجل:

ضغط الجريان الجديد P_{wf2} مباشرة عند تغيير المعدل. تُكرر العملية عادةً من 3 إلى 4 مراحل، بحيث يُسجَّل في كل مرحلة:معدل جريان الغاز و ضغط الجريان المستقر عند قاع البئر.

4- خصائص إجراء الفحص

- تكون فترات الجريان متساوية زمنيًا (الشكل8-6).
- يتم تغيير معدلات الجريان بصورة متتابعة دون غلق البئر.
- يمكن أن يكون التغيير تصاعديًا أو تنازليًا ، إلا أن التدرج التصاعدي $q_1<q_2<q_3...$ هو المفضل لأنه يعطي إشارة ضغط أوضح وأكثر استقرارًا للتحليل.



الشكل 8-6 : مخطط لتعاقب فترات الجريان مع تغيرات الضغط عبر فحص الضغط العكسي Back-pressure test

5- الغلق النهائي(Build-Up Test)

بعد إكمال مراحل الجريان: يُغلق البئر لإجراء فحص تصاعد الضغط(Build-Up Test) و يُستخدم هذا الفحص لتحليل إضافي لخصائص المكمن والبئر.

يُؤخذ على فحص الضغط العكسي التقليدي أنه يتطلب تحقق حالة الاستقرار عند كل معدل جريان وفي المكامن كبيرة المساحة ، ذات نفاذية منخفضة فإن الوصول إلى هذه الحالة قد يستغرق أشهرًا أو حتى سنوات مما يجعل الفحص مكلفًا و غير عملي في بعض الحالات.

وهذا ما أدى إلى تطوير فحوصات بديلة مثل: Isochronal Test و Modified Isochronal Test

ثالثا- تفسير الفحص بطريقة رولن- شلهارد Rawlins-Schellhardt Method

تُعد طريقة Rawlins–Schellhardt من أقدم وأكثر الطرق شيوعًا في تفسير بيانات فحص الضغط العكسي (Back-Pressure / Flow-After-Flow Test)، وتُستخدم لتحديد قابلية توصيل الغاز للبئر (Gas Deliverability).

تعتمد هذه الطريقة على علاقة أسية (Power-Law Equation) تربط معدل جريان الغاز (Q_g) بفرق مربع الضغط بين المكمن وقاع البئر(Pr^2-Pwf^2).

الأساس الفيزيائي للطريقة:

عند تضمين تأثير **الجريان المضطرب** في معادلات جريان الغاز عبر حد إضافي يعتمد على معدل الجريان DQ_g، تصبح معادلات الجريان غير خطية من الدرجة الثانية في $\mathbf{Q_g}$ (المعادلات

المذكورة انفا رقم-9 ، 12 و 13) مما يجعل حلها التحليلي المباشر غير عملي.

ولمعالجة هذا التعقيد:

اقترح **Rawlins & Schellhardt (1936)** علاقة تجريبية مبنية على بيانات حقلية لعدد كبير من الآبار الغازية واقترح **Houpeurt** لاحقًا صيغة نظرية مكملة .وقد أُعيدت صياغة معادلة الجريان شبه المستقر للغاز إلى الصيغة الأسية التالية:

$$Q_g = \frac{kh\,[\bar{p}_r^2 - p_{wf}^2]^n}{1422T\,(\mu_g Z)_{avg}\,[\ln(r_e/r_w) - 0.75 + s]} \quad \text{----------14}$$

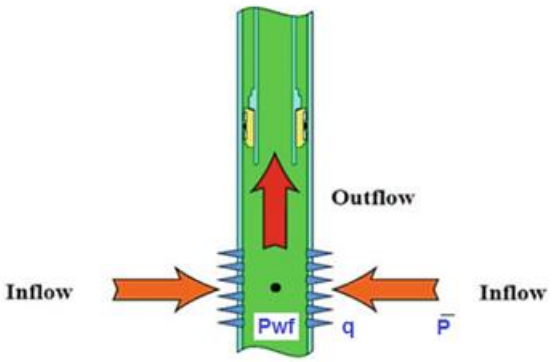
إذ تم تضمين معامل الاضطراب Turbulent factor-D في المعامل n.

فالمعامل (الأُس) n يعكس شدة اضطراب الجريان قيمته تتراوح ما بين $0.5 \le n \le 1$ فالجريان يُعتبر شديد الاضطراب Turbulent flow عندما n=0.5 و يُعتبر الجريان طبقي laminar flow عندما n=1 . اذا كانت قيمة n>1 or n <0.5 فمعناه هنالك خطأ في بيانات الفحص او في خطوات تنفيذ افحص فربما بسبب عدم كفاية فترة تنظيف البئر قبل اجراء الفحص او وجود سوائل في البئر الغازي مما يتطلب اعادة الفحص . لكن و للضرورة القصوى فانه بالامكان جعل قيمة n=0.5 اذا كانت قيمتها من الرسم n < 0.5 و جعلها n=1 اذا كانت قيمتها من الرسم n > 1

يُمكن اختصار معادلة السلوك الجرياني الاسي المعادلة-14 للبئرالغازي الى الاتي:

$$q = C\left(\bar{p}_r^2 - p_{wf}^2\right)^n \quad \text{----------15}$$

المخطط في الشكل8-7 يُوضح عمليا المعاملات الداخلة في معادلة فحص GDT المعادلة-15.



الشكل 8-7 : المتغيرات الداخلة في معادلة فحص GDT

و بدلالة ضغط الغاز المكافيء تُكتب المعادلة بالصيغة الاتية:

$$q = C\left[\,\bar{\psi}_r - \psi_{wf}\,\right]^n \quad \text{----------16}$$

احيان في مصادر اخرى تكتب بالصيغة الاتية:

$$q = C\left[m(\bar{p}) - m(p_{wf}) \right]^n$$ ----------16

حيث ان $m(p_{wf})=\psi(_{wf})$ ، $m(\bar{p})=\psi(_r)$ اي متكافئتان.

ان المعامل C هنا ثابت و يمثل معامل ادائية البئر الغازي C performance coefficient –C اذ يتضمن خواص الغاز و خواص المكمن و الشكل الهندسي للجريان و يساوي:

$$C = \frac{kh}{1422T\,(\mu_g Z)_{avg}\left[\ln(r_e/r_w) - 0.75 + s\right]}$$ ----------17

من المفترض ان يظل معامل الأداء C ثابتا و هذا يعني أن البئر قد بلغ نصف قطر بحث r_i مساو الى نصف قطر تصريف البئر الخارجي r_e .

المعادلات رقم-15 و رقم -16 في اعلاه تسمى معادلة قابلية توصيل بئر الغاز Deliverability eq. او معادلة الضغط العكسي- الراجع Back pressure eq. و التي تُستخدم للتنبؤ بمعدلات انتاج الغاز عند اي ضغط جرياني P_{wf} بعد معرفة قيم المعاملات n ، C .

*نطاق تطبيق طريقةRawlins–Schellhardt

تُطبق الطريقة أصلاً عند الجريان شبه المستقر(PSS) حيث يكون $r_i=r_e$. لا تكون مناسبة مباشرة للجريان اللامستقر(USS) ، لأن $r_i<r_e$ ومع ذلك، يمكن الاستفادة من الجريان اللامستقر لتقليل زمن وكلفة الفحص عبر صيغ معدلة تأخذ بنظر الاعتبار:تغير نصف قطر منطقة البحث و شكل منطقة التصريف و كما يلي:

$$Q_g = \frac{kh\left(\bar{p}_r^2 - p_{wf}^2\right)}{1422T\,(\mu_g Z)_{avg}\left[\frac{1}{2}\ln(4A/1.781C_A r_w^2) + s\right]}$$ ---------- 18

إذ ان :

Q_g = gas flow rate, Mscf/day
$\bar{p}_r$ = average reservoir pressure, psi
n = exponent
C = performance coefficient, Mscf/day/psi^2

Z compressibility factor

r_w well radius ft

C_A Shape factor

*** خطوات التفسير:**

-عند أخذ اللوغاريتم لطرفي المعادلة رقم-15 و حسب خواص اللوغاريتم ينتج :

$$\log(Q_g) = \log(C) + n\log\left(\bar{p}_r^2 - p_{wf}^2\right)$$ ---------- 19

بالترتيب نحصل على :

$$\log\left(\bar{P}^2 - P_{wf}^2\right) = \frac{1}{n}\log q_{sc} - \frac{1}{n}\log C \quad \text{---------- 20}$$

و عند استخدام الضغط المكافىء للغاز تصبح المعادلة كالاتي :

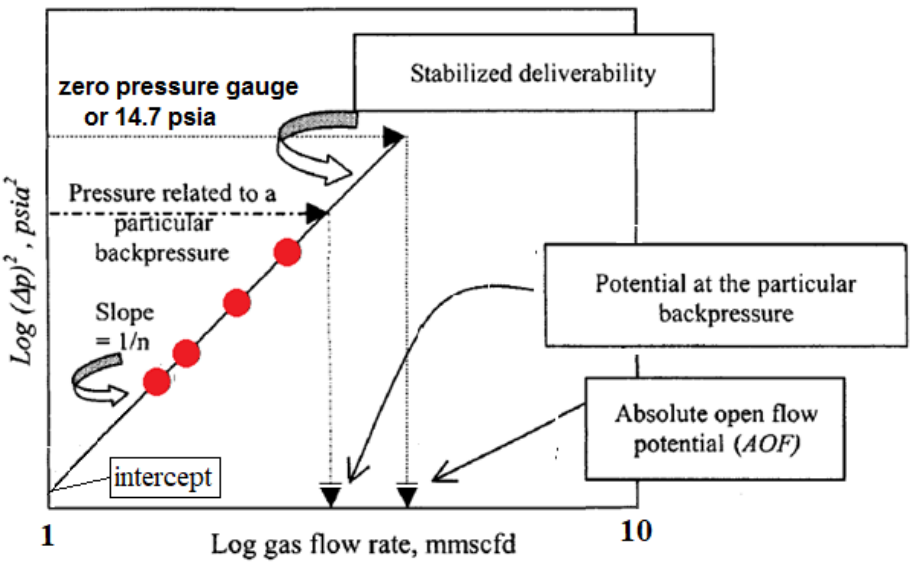
$$\log\left[\, m(\bar{p}) - m(p_{wf}) \,\right] = \frac{1}{n}\log q_{sc} - \frac{1}{n}\log C \quad \text{---------- 21}$$

- عند ترتيب بيانات الفحص بصيغة مربع الضغط كما في المعادلة رقم-20 ثم رسم علاقة $(\bar{P}\text{-}P_{wf})^2$ vs (Q_g) على احداثيات لوغاريتمية log-log الشكل8-8.

- نحصل على خط مستقيم عبر نقاط الفحص ، ميل الخط المستقيم يساوي 1/n و منه نجد قيمة n و تقاطعه مع الاحداثي الصادي يساوي [(1/n) log C] ومنه يُمكن حساب المعامل C.

- او يُمكن حساب المعامل C عبر تحديد نقطة لا على التعيين على الخط المستقيم و قراءة احداثياتها وتعويضها في المعادلة في ادناه:

$$C = \frac{Q_g}{\left(\bar{p}_r^2 - p_{wf}^2\right)^n} \quad \text{---------- 22}$$



الشكل 8-8 : تفسير فحص GDT

- بعد توفر قيم المعاملات n&C ، الان يُمكن التنبؤ بمعدل جريان البئر Q_g لأي قيمة P_{wf} من خلال تطبيق المعادلة رقم-20 .

- كما و يُمكن تحديد اقصى طاقة انتاجية للبئر Absolute open flow -AOF للبئر الغازي

بجعل قيمة P_{wf} = 14.65 psia او قيمتها P_{wf} =0 psig (بحسب وحدات الضغط) في المعادلة-15 لتصبح :

$$AOF = C\left(\bar{p}_r^{\,2} - 14.7^2\right)^n \quad \text{---------- 23}$$

$$AOF = C\left(\bar{p}_r^{\,2} - 0^2\right)^n \quad \text{---------- 24}$$

- و بمثل خطوات التفسير التي أُستخدمت لمربع الضغط يمكن اعادة استعمالها ايضا للضغط المكافىء للغاز m(p).

ملاحظات:

- يُمكن الحصول على احسن خط مستقيم يمر عبر ثلاث نقاط او الاربعة النقاط كلها. عندما لا يُمكن الحصول على علاقة خط مستقيم مقبولة ما بين ثلاث نقاط أو أكثر فيجب إعادة الفحص.
- يُفضل عند فتح البئر للجريان ان تكون معدلات الجريان المتعاقبة متزايدة. و في حالة ان الآبار تحتوي نسبة سائل مرتفعة مصاحب لانتاج الغاز أو ان ظروف درجة الحرارة غير عادية، فيُمكن استخدام الجريان المتعاقب المتناقص
- يجب أن يكون معدل الجريان الأدنى جريانا كافيًا لإبقاء البئر خاليًا من جميع السوائل.
- يُمكن تسجيل قراءات ضغط الجريان عند راس البئر p_s بدلا من قاع البئر p_{wf}.
- يُفضل تصحيح ضغط الجريان في قاع البئر p_{wf} الى عمق مرجعي Datum level يكون عند منتصف فترة تثقيب البئر- perforation interval.
- ان الانتشار الجيد لنقاط بيانات الفحص يمثل أحد المعايير المتعلقة بمقبولية الفحص و من أجل ضمان انتشار جيد للنقاط ، فيجب ألا يزيد ضغط الجريان في رأس البئر عند أدنى معدل للجريان عن 95% من ضغط البئر المغلق و عند اعلى معدل جريان فلا يزيد عن 75% من ضغط غلق البئر.
- لهذا النوع من الفحص و عند تسجيل القراءات فيجب أن يكون كلا من ضغط الجريان عند راس البئر و معدل الجريان ثابتا لمدة لا تقل عن 15 دقيقة.

مثال-1 :

لتوضيح كيفية تطبيق معادلة قابلية توصيل بئر الغاز (الضغط العكسي) رقم-15 نفترض لدينا المعلومات المتوفرة الاتية:

$$n = 0.93,\ C = 0.0037$$
$$\bar{p}_R = 3000 \text{ psia}$$

احسب معدل الجريان q عندما يكون ضغط الجريان P_{wf}=1850 psig؟؟

$$q_{sc} = C(\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2)^n$$
$$q_{sc} = 0.0037\ [(3000)^2 - (1850)^2]^{0.93}$$
$$q_{sc} = 6.96\ \text{MMSCF/D}$$

و احسب اقصى انتاجية نظرية ممكنة- AOF؟؟

هنا نعوض عن ضغط الجريان $p_{wf}=0$ و نجد AOF:

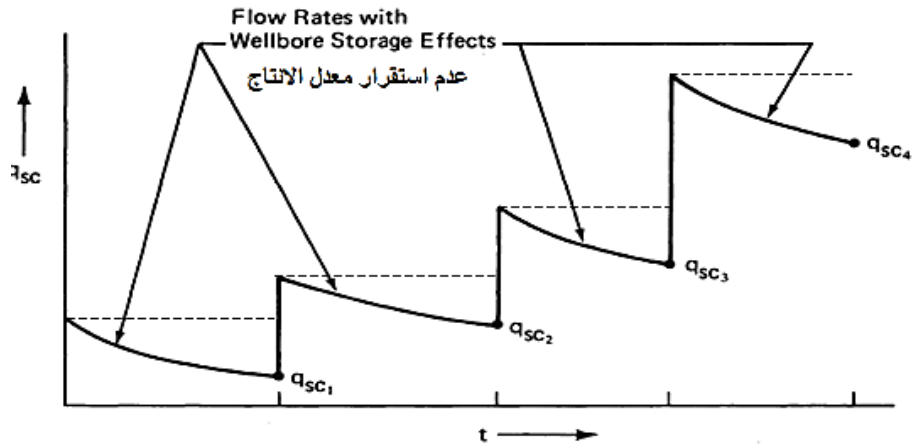
$$AOF = 0.037\ [(3000)^2 - (0^2)]^{0.93}$$
$$AOF = 10.86\ \text{MMSCF/D}$$

لاحظ:

- انه في حسابات المثال رقم-1 يُمكن استخدام كلتا المعادلتين رقم-15 او 16 .

- احيانا و للحاجة الانية فيُمكن الحصول على معادلة قابلية توصيل بئر الغاز الانتاجية او معادلة الضغط العكسي Backpressure equation من دون ظروف الحالة المستقرة لكل النقاط الاربعة و انما نكتفي بمعدل جريان مستقر واحد بشرط توفر قيمة n سواء اكانت القيمة مُفترضة assumed او معروفة known من قبل. على سبيل المثال عند استخدام فحص أحادي النقطة ، سمحت شركة أوكلاهو للمشغل بافتراض قيمة n تساوي 0.85. يسمى الفحص بهذه الحالة فحص احادي النقطة او الفحص بمعدل جريان واحد Single flow-rate test .

- أن الفحص التقليدي يتطلب أربع معدلات جريان ثابتة و مستقرة stabilized، لكن بسبب تأثيرات تخزين الآبار و تغيرات ضغط قاع البئر عبر الفحص ، فمن غير المرجح أن يظل معدل الجريان ثابتًا مع الوقت و عبر كل مدة جريان (الشكل8-9). و لتلافي التباين هذا في معدلات الجريان فقد اقترح وينستوك و كولبتس Winestock and Colpitts استخدام معدل الجريان في نهاية فترة كل جريان اي استخدام q_{sc4} .. q_{sc3}، q_{sc2}. في الشكل 8-9 . او استخدام المعادلات الموحدة Normalized equations اي بقسمة فرق مربع الضغط على معدل الجريان $\Delta P^2/Q$ بدلا من استخدام فرق مربع الضغط ΔP^2 و ذلك من اجل تقليل تاثير عدم استقرارية الجريان .



الشكل 8-9 : عدم استقرار معدلات الجريان عبر فحص GDT

مثال-2 :

أدرجت بيانات فحص الضغط العكسي Back pressure لبئر غازي في الجدول8-1 .

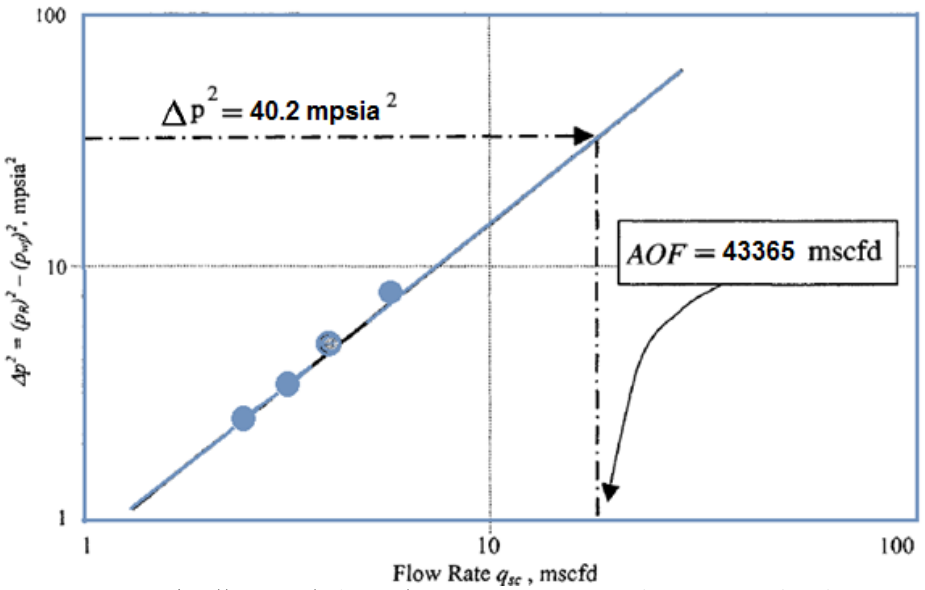
- اوجد معادلة قابلية توصيل بئر الغاز Deliverability equation ؟؟
- اوجد الانتاجية المطلقة للبئر - AOF؟؟
- حدد معدل انتاجية البئر في حال هبوط ضغط الجريان ليصبح P_{wf}= 175 psia ؟؟

الحل:

- رسم علاقة P^2-P^2_w & q_g على ورق لوغاريتمي الشكل8-10 .

Test	q_{sc} (mscfd)	P_{wf} (psia)	$(p_R)^2 - (p_{wf})^2$ ($\times 10^{-3}$ psia^2)
	0	201	40.4
1	2730	196	1.985
2	3970	195	2.376
3	4440	193	3.152
4	5550	190	4.301

الجدول8-1: بيانات فحص الضغط العكسي Back pressure للمثال رقم-2



الشكل 8-10 : تفسير بيانات فحص الضغط العكسي للمثال رقم-2

- رسم احسن خط مستقيم يمر ببيانات الفحص و نجد ميله الذي يساوي :

$$1/n = \frac{\log(\Delta p^2)_1 - \log(\Delta P^2)_4}{\log q_{sc1} - \log q_{sc4}} = \frac{\log(1.985 \times 10^3) - \log(4.301 \times 10^3)}{\log(2730) - \log(5550)} = 1.086$$

- اذن

$$n = 0.92$$

- نحسب المعامل C باخذ احداثيات النقطة الرابعة و كما يأتي :

$$C = \frac{q_{sc}}{(P_R^2 - P_{wf}^2)^n} = \frac{5550}{(4.301 \times 10^3)^{0.92}}$$

$$C = 2.52 \text{ mscfd/psia}$$

- تصبح صيغة معادلة قابلية توصيل بئر الغاز او انتاجية الغاز كما يأتي:

$$q_{sc} = 2.52(P_R^2 - P_{wf}^2)^{0.92}$$

- لحساب الانتاجية المطلقة للبئر AOF نعوض في المعادلة اعلاه عن P_{wf}=14.7 فينتج :

$$q_{sc}(AOF) = 2.52(201^2 - 14.7^2)^{0.92}$$
$$= 43365 \text{ mscfd}$$

- نحسب معدل انتاج البئر عندما يكون ضغط الجريان في قاع البئر P_{wf}=175 psia و كما يأتي:

$$q_{sc} = 2.52(201^2 - 175^2)^{0.92}$$
$$= 11812.691 \text{ mscfd}$$

حيث ان m تعني الف.

2-3-8 الفحص متساوي الفترات الزمنية - Isochronal test

الفحص متساوي الفترات الزمنية طُوِّر لتقليل زمن وكلفة فحوصات الضغط في المكامن منخفضة النفاذية.يستغرق الضغط العكسي حتى يصل للحالة المستقرة stabilized للطبقات ذات النفاذية القليلة فترة ليست بالقصيرة و هذا ينعكس سلبا على كُلف الفحص خصوصا اذا كان الغاز المنتج خلال الفحص يُحرق flaring عند السطح .

لتقليل زمن وكلفة فحوصات الضغط ، اقترح كلندر Cullender 1955 استخدام الفحص متساوي الفترات الزمنية Isochronal test ، إذ ينتج البئر باربع معدلات جريان مختلفة و لفترات زمنية متساوية- الشكل 8-11.

ليس بالضرورة ان تصل معدلات الانتاج كلها لحالة الاستقرار لكن من الضروري ان تتحقق حالة استقرار وثبوت في الانتاج على الاقل لنقطة واحدة مثلا عند -q_4 في الشكل 8-11.

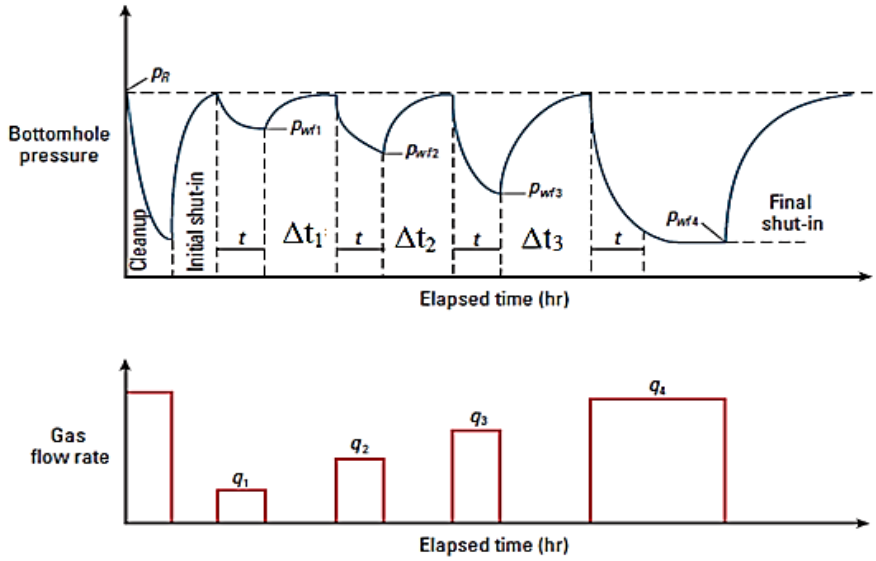
ان الاساس النظري للفحص يستند على ان نصف القطر -Radius of investigation ri الذي يتحقق من جراء انتاج البئر لا يعتمد على قيمة معدل الجريان وانما يعتمد طول الفترة الزمنية لجريان البئر (المعادلة رقم-4) ، لذا و لنفس الفترات الزمنية فان اشارة الضغوط المقاسة تحُقق نصف قطر واحد ، مقداره– r_i .

*** خطوات الفحص تتضمن:**

- بعد تنظيف البئر يُغلق و ننتظر حتى تستقر قراءة الضغط المغلق و هذا الضغط يمثل: الضغط المكمني الاصلي P_i او معدل الضغط المكمني $\bar{P}_r$.

يُفتح البئر للجريان بمعدل يساوي q_1 لفترة زمنية محددة t الشكل8-11 . وهي نفس المدة التي ستُستخدم لاحقًا مع باقي المعدلات. خلال هذه الفترة يتم تسجيل الضغط و معدل الجريان.

- ثم يغلق البئر لتسجيل تصاعد الضغط pressure buildup ننتظر حتى يعود الضغط إلى الضغط المكمني P_r ، يستغرق زمن الغلق Δt_1 .



الشكل 8-11 : مخطط فحص متساوي الفترات الزمنية - Isochronal test

- تغيير معدل الجريان وتكرار العملية:
  - يُفتح البئر مرة أخرى عند معدل جريان أعلى q_2 .
  - يستمر الإنتاج لنفس المدة الزمنية t.
  - بعدها يُغلق البئر حتى يعود الضغط إلى P_r .
  - زمن الغلق هذه المرة هو Δt_2 .

ملاحظة: لا يشترط أن تكون فترات الغلق متساوية $\Delta t_1 = \Delta t_2$ لكن الشرط الأساسي هو عودة الضغط P_r او معدل الضغط المكمني $\bar{P}_r$ قبل بدء المرحلة التالية.

- تكرار الفحص:
  - تُكرر نفس الخطوات السابقة من 3إلى 4 مرات عند معدلات جريان متزايدة.
  - تكون جميع فترات الفتح متساوية زمنيًا.
  - الفترة الأخيرة من الجريان تكون أطول (عادة 4–6 أضعاف الفترات السابقة).

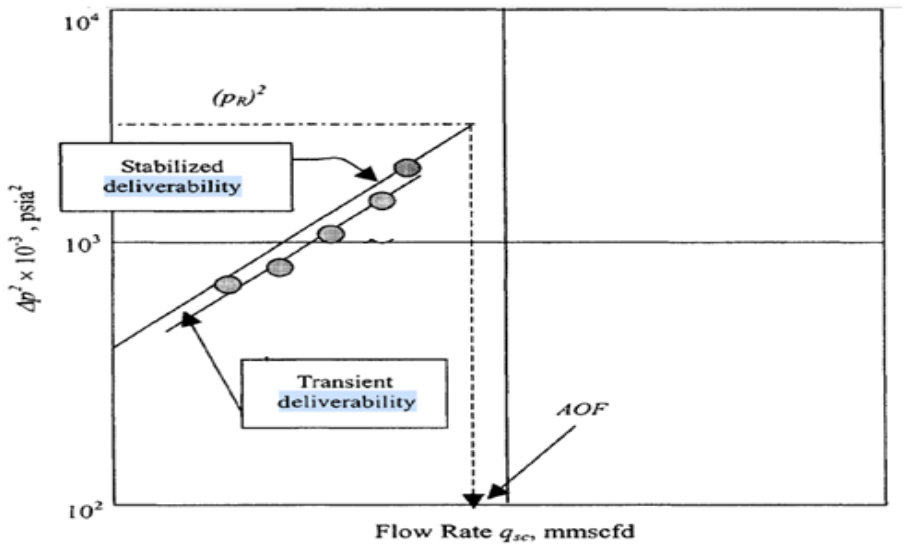
الهدف من إطالة الفترة الأخيرة هو التأكد من استقرار الجريان والضغط ، دخول البئر في نمط الجريان شبه المستقر(PSS) و وصول تأثير الفحص إلى حدود المكمن.

- **رسم** علاقة $(\bar{P}^2 - P_{wf}^2)$ vs q على ورق لوغاريتمي الشكل8-12.

- **إيجاد الميل**:رسم أفضل خط مستقيم يمر عبر نقاط الفحص غير المستقرة. نختار نقطتين على الخط المستقيم لحساب الميل ، و كما يأتي:

$$1/n = \frac{\log\left(\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2\right)_2 - \log\left(\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2\right)_1}{\log q_2 - \log q_1} \quad \text{---------- 25}$$

مقلوب الميل يساوي n.



الشكل8-12 : رسم لوغاريتمي لتفسير الفحص متساوي الفترات الزمنية - Isochronal test

- من الميل و نقطة الفحص المستقرة stabilized point الاخيرة ، نرسم خط موازي لخط نقاط الفحص اللامستقرة. الخط المستقيم الثاني العلوي في الشكل8-12، يمثل قابلية توصيل البئر الحقيقية.
- نجد معامل الانتاجية C من خلال التعويض بإحداثيات أي نقطة على الخط المستقيم في معادلة التوصيلية في ادناه :

$$C = \frac{q_2}{\left(\overline{p}_R^2 - p_{wf}^2\right)_2^n}$$

- اذن معادلة قابلية توصيل البئر الغازي Deliverability equation تصبح:

$$q_q = C\left(\overline{p}_R^2 - p_{wf}^2\right)^n$$

يُستفاد من الفحص هذا في حساب قابلية توصيل بئر الغاز Deliverability في الطبقات المكمنية ذات النفاذية القليلة. معادلة Deliverability الناتجة تُستخدم لتقدير إنتاجية البئر الغازي.

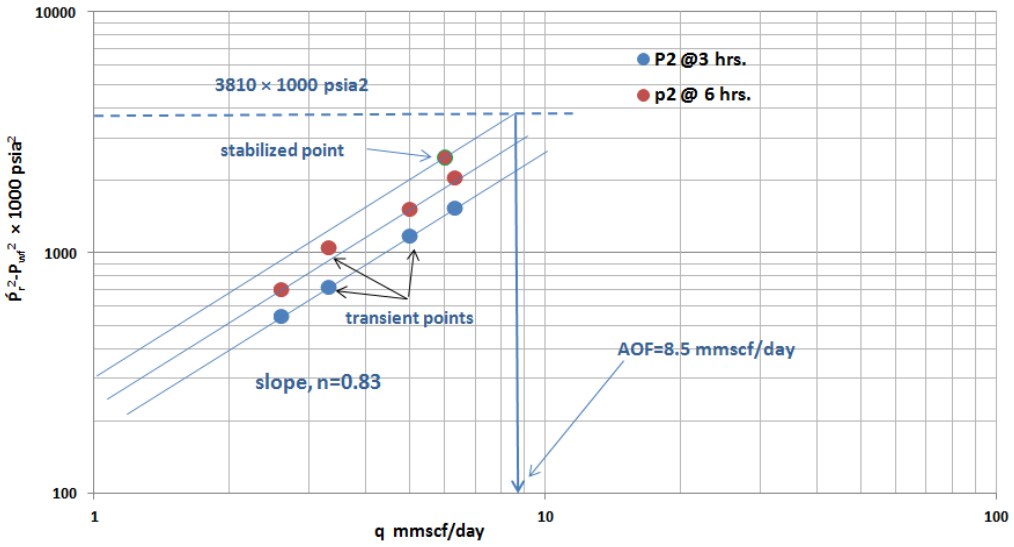
مثال-3 :

نُفذِ فحص متساوي الفترات الزمنية Isochronal test لبئر غازي باربع معدلات جريان غير مستقرة و توصل الى ان معدل الضغط المكمني بحدود Ṕ=1952 psia . قيست معدلات الجريان الاربعة و ضغط الجريان المصاحب لفترتين زمنية ; عند 3 ساعات و 6 ساعات. بعدها امتد الفحص لمدة 72 ساعة لاجل تحقيق حالة استقرار الجريان بمعدل 6 mmscf/day و بضغط جرياني مقاس بحدود P_{wf}= 1151 psia ، بيانات الفحص أُدرجت في الجدول8-2 في ادناه:

- المطلوب اجراء تفسير الفحص ؟؟ و حساب قيمة AOF؟؟
- ايجاد منحني ادائية الجريان للبئر - Inflow Performance Relationship IPR- curve ؟؟

	$t = 3$ hr		$t = 6$ hr	
q_{sc} (mscfd)	p_{wf} (psia)	$\frac{\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2}{\times 10^3}$ (psia^2)	p_{wf} (psia)	$\frac{p_R^2 - p_{wf}^2}{\times 10^3}$ (psia^2)
2600	1793	597	1761	709
3300	1757	724	1657	1064
5000	1623	1177	1510	1530
6300	1505	1545	1320	2068
6000	Extended flow $t = 72$ hr		1151	2485

الجدول8-2: بيانات فحص متساوي الفترات الزمنية Isochronal test للمثال رقم- 3



الشكل8-13 : رسم لوغاريتمي لتفسير بيانات الفحص المثال رقم-3

الحل:

- نرسم علاقة $(\bar{P}^2 - Pwf^2)$ vs q على ورق لوغاريتمي الشكل8-13 للفترتين ثلاث و ست ساعات.

- رسم افضل خط مستقيم يمر بنقاط الفحص اللامستقرة للفترتين ثلاث و ست ساعات و لتشابه الميل سنعتمد بيانات فحص الست ساعات لايجاد ما مطلوب و ذلك من اخذ نقطتين تقعان على الخط المستقيم و لتكن احداثياتها كما يأتي:

q_1=2600 mmscf/day ،q_4=6300 mmscf/day ويقابلهم من الاحداثي الصادي $(\bar{P}^2 - Pwf^2)_1$=709 psia^2 ،$(\bar{P}^2 - Pwf^2)_4$=2068 psia^2 . بتطبيق تعريف الميل و يساوي :

$$\frac{1}{n} = \frac{\log(\Delta P^2)_1 - \log(\Delta P^2)_4}{\log q_1 - \log q_4}$$

$$= \frac{\log(709) - \log(2{,}068)}{\log(2{,}600 - \log(6{,}300)} = 1.2$$

- اذن n=1/1.2 = 0.83
- و من الميل و نقطة الفحص المستقرة stabilized point نرسم خط موازي لخط نقاط الفحص اللامستقرة كما في الشكل 8-13.
- نجد مؤشر الانتاجية C بتعويض احداثيات نقطة الفحص المستقرة و كما يأتي :

$$C = \frac{q_{sc}}{(\overline{p}_R^2 - p_{wf}^2)^n} = \frac{6000}{(2485 \times 10^3)^{0.83}} = 0.0295$$

- حساب اعلى معدل انتاج للبئر AOF بجعل P_{wf}= 14.65 or P_{wf}= 0 في معادلة قايلية توصيل الغاز ادناه:

$$q_{sc} = 0.0295(\overline{p}_R^2 - p_{wf}^2)^{0.83}$$

ان الوحدات المستخدمة لمعدل الانتاج هي mscf/day و لمربع الضغط $psia^2$ و عليه :

$$q_{sc} = 0.0295(1952^2 - 14.7^2)^{0.83} = 8550.6 \text{ mscfd}$$

- كما و يمكن تحديد قيمة AOF من الرسم مباشرة على شرط اخذ الخط المستقيم الذي يمر بالنقطة المستقرة (استقرار ضغط الجريان و معدل الانتاج) كما في الشكل8-13.

p_{wf} (psi)	q_{sc} (mscfd)
1.952	0
1800	1768
1400	4695
1000	6642
600	7875
200	8477
0	8551

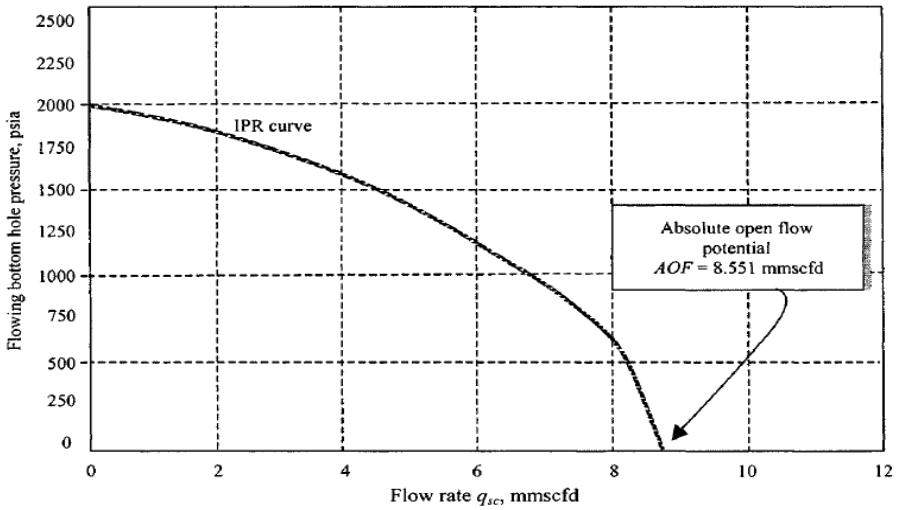
الجدول8-3: بيانات منحني ادائية الجريان للبئرIPR- المثال رقم-3

- لايجاد منحني ادائية الجريان للبئر - Inflow Performance Relationship IPR- curve نرتب الجدول8-3 لعلاقة معدل الانتاج q مقابل ضغط الجريان عند باطن البئرP_{wf} و نرسم النتائج على احداثيات عادية Cartesian كما في الشكل8-14 .
- يُستفاد من المنحني IPR في التنبؤ بمعدلات الانتاج المستقبلية للبئر الغازي عبر معرفة ما قد يصله ضغط جريان البئر و في تحديد انسب معدل جريان للبئر عبر مقارنته و تقاطعه مع ادائية انبوب الانتاج (الشكل8-15) إذ يتم ازالة كل معوقات انتاج الغازعبر الانبوب (مثلا الاحتكاك مع جدار انبوب الانتاج و ضغط عمود الغاز و السائل ان وجد ..) ليصل الى السطح. نتائجه تُستخدم في الدراسات المكمنية لتطوير الحقول الغازية و النفطية.

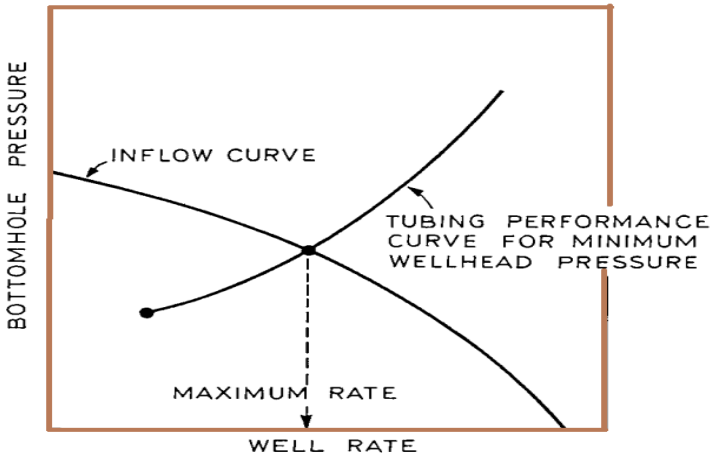
مثال-4 :

بيانات فحص متساوي الفترات الزمنية Isochronal test أُدرجت في الجدول8-4:

- احسب معدل الانتاج المطلق(اعلى انتاج) - AOF ؟؟



الشكل8-14 : منحني ادائية الجريان IPR للمثال رقم-3



الشكل8-15 : اقصى معدل جريان للبئر من تقاطع منحني ادائية الجريان IPR و منحني ادائية انبوب الانتاج

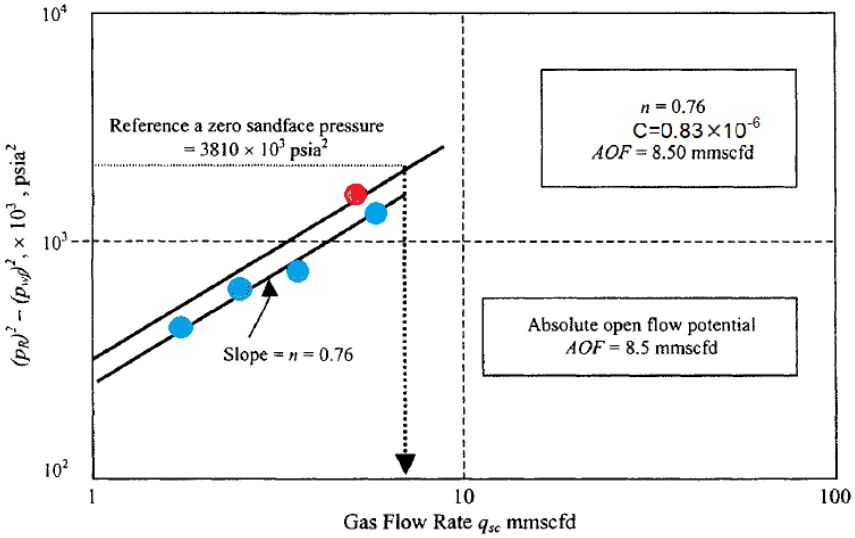
Test	Duration (hr)	p_{ws} or p_{wf} (psi)	q_q (mmscfd)	$\bar{P}^2 - p_{wf}^2$ (psi^2 × 10^3)
Initial shut-in	48	1952		
First flow	12	1761	2.6	709
First shut-in	15	1952		
Second flow	12	1694	3.3	941
Second shut-in	17	1952		
Third flow	12	1510	5.0	1530
Third shut-in	18	1952		
Fourth flow	12	1320	6.3	2070
Extended flow	72	1151	6.0	2486
Final shut-in	100	1952		

الجدول8-4: بيانات فحص متساوي الفترات الزمنية Isochronal test للمثال رقم- 4

الحل :

- رسم علاقة $(\bar{P}^2 - Pwf^2)$ vs q على ورق لوغاريتمي كما في الشكل16-8 .
- نحدد افضل خط مستقيم يمر بنقاط الفحص اللامستقرة و نجد ميله وذلك باخذ نقطتين تقعان على الخط المستقيم و لتكن احداثياتها، $(\bar{P}^2 - P^2_{wf})_1$=220 q_1=1 mmscf/day) ، $(\bar{P}^2 - P_{wf}{}^2)_2$=4600)، q_2=10 mmscf/day) ، و نطبق قانون الميل لايجاد ان n=0.76

- من الميل و نقطة الفحص المستقرة stabilized point نرسم خط موازي لخط نقاط الفحص اللامستقرة كما في الشكل16-8 .



الشكل16-8 : رسم لوغاريتمي لبيانات فحص متساوي الفترات الزمنية - Isochronal test -

المثال رقم-4

- حساب مؤشر الانتاجية C باستخدام فقط احداثيات النقطة المستقرة stabilized point ، و بالتعويض في المعادلة العامة ينتج :

$$C = \frac{q_2}{(\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2)_2^n} = \frac{6}{(2486\times10^3)^{0.76}}$$

$$C = 0.83\times10^{-6}$$

$$1/n = \frac{\log(\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2)_2 - \log(\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2)_1}{\log q_2 - \log q_1} = \frac{\log(4600\times10^3) - \log(220\times10^3)}{\log 10 - \log 1}$$

$$1/n = \log\left(\frac{4600}{220}\right) = 1.320$$

- معادلة قابلية توصيل الغاز Deliverability equation تصبح:

$$q_q = 0.83\times10^{-6}(\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2)^{0.76}$$

- حساب قيمة AOF ، بتعويض معدل الضغط المكمني Ṕr=1952 psi و بجعل قيمة P_{wf}=0 في المعادلة اعلاه(لاحظ ان الفرق في اختيار اي من P_{wf}=0 او P_{wf}=14.7 محدود):

$$AOF = 0.83 \times 10^{-6}\left(1952^2 - 0^2\right)^{0.76}$$
$$= 8.43 \text{ mmscf/day}$$

- كما و يُمكن تحديد AOF من الرسم مباشرة عبر تقاطع قيمة $(Ṕ^2 - 0^2)$=3810304 $psia^2$ مع خط الجريان المستقر كما في الشكل8-16 فان AOF=8.5 mmscf/day .

مثال-5 :

بيانات فحص متساوي الفترات الزمنية Isochronal test لبئر غازي أُدرجت في الجدول8-5. وصل البئر الى حالة استقرار الضغط عند P_{wf} = 1180 psia بعد مدة من الانتاج بمعدل q= 6 MMscf/D.

- المطلوب اجراء التفسير اللازم للفحص ؟؟

Duration of Flow Test (hours)	Sandface Pressure (psia)	Flow Rate (MMSCF/D)	Shut-in BHP (psia)
Shut-in	2200	0	2200
6	1892	2.8	2200
6	1782	3.4	2200
6	1647	4.8	2200
6	1511	5.4	2200

الجدول8-5: بيانات فحص متساوي الفترات الزمنية Isochronal test للمثال رقم- 5

p_{wf}(psia)	q_{sc} (MMSCF/D)	p_{wf}^2 (psia)²	$\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2$ (psia)²
2200 = $\bar{p}_R$	0	4.84×10^6	0
1892	2.8	3.58×10^6	1.26×10^6
1782	3.4	3.18×10^6	1.66×10^6
1647	4.8	2.71×10^6	2.13×10^6
1511	5.4	2.28×10^6	2.56×10^6
Stabilized Point			
1180	6.0	1.39×10^6	3.45×10^6

الجدول8-6:تهيئة بيانات الفحص للتفسير – المثال رقم-5

الحل:

- حساب فروقات الضغط و ترتيب البيانات كما في الجدول -8-6 .
- رسم علاقة $(Ṕ^2 - Pwf^2)$ vs q على ورق لوغاريتمي الشكل8-17 .
- نجد احسن خط مستقيم يمر بنقاط الفحص اللامستقرة و نجد ميله عبر اخذ نقطتين(باحداثياتهما) لا على التعيين على الخط المستقيم :

$$1/n = \frac{\log\left(\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2\right)_2 - \log\left(\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2\right)_1}{\log q_2 - \log q_1}$$

$$\frac{1}{n} = \frac{\log (5 \times 10^6) - \log (0.43 \times 10^6)}{\log (10^1 \times 10^6) - \log (1 \times 10^6)}$$

$$\frac{1}{n} = 1.07$$

- اذن n=0.94

- نجد مؤشر الانتاجية C فقط باستخدام احداثيات النقطة المستقرة stabilized point ، بالتعويض في المعادلة العامة ينتج :

$$C = \frac{q_{sc}}{(\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2)^n} = \frac{6}{(3.45 \times 10^6)^{0.94}}$$

$$C = 4.29 \times 10^{-6}$$

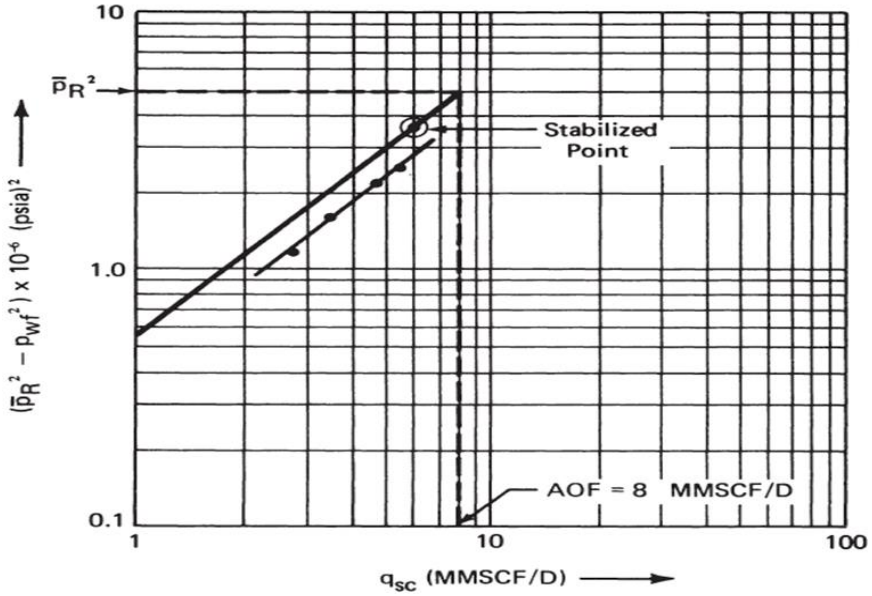
- نجد قيمة AOF بتعويض معدل الضغط المكمني Ṕr=2200 psia و بجعل قيمة P_{wf}=0 في المعادلة اعلاه اذن:

$$AOF = 4.29 \times 10^{-6} [(2200)^2 - (0)^2]^{0.94}$$

$$AOF = 8.25 \text{ MMSCF/D}$$

- و من الرسم تساوي :

AOF=8 MMscf/D



الشكل8-17 : رسم لوغاريتمي لتفسير بيانات الفحص متساوي الفترات الزمنية

- Isochronal test -المثال رقم-5

3-3-8 الفحص متساوي الفترات الزمنية المُعدل(المحور) - Modified Isochronol test

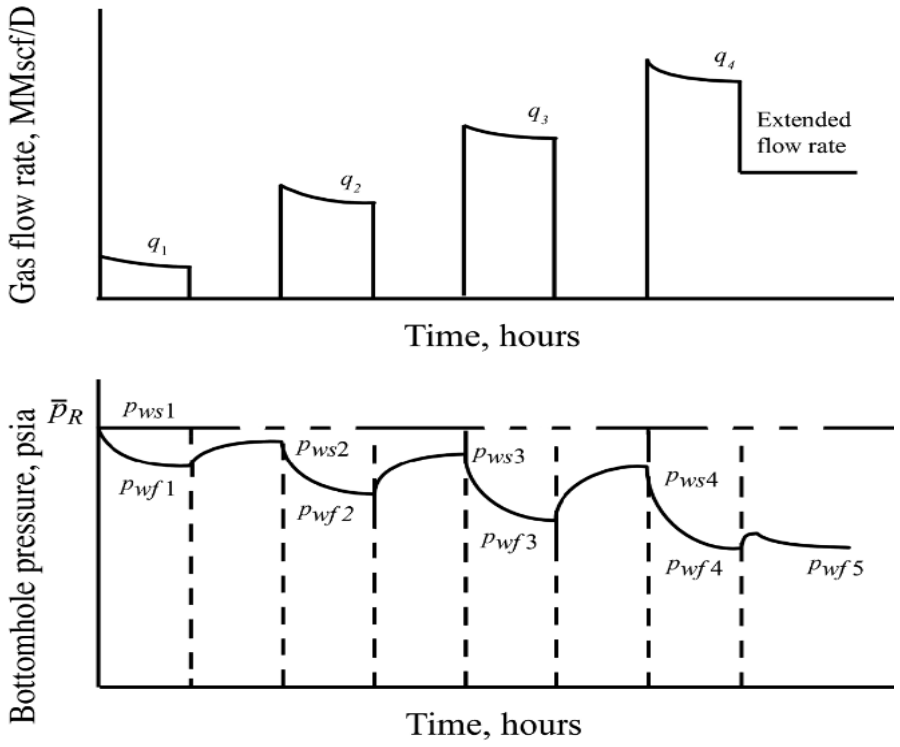
بالرغم من ان نتائج تفسير بيانات هذا الفحص تُعتبر تقريبية واقل دقة من فحص متساوي الفترات الزمنية - Isochronal test الا انها مقبولة و تُستخدم بشكل واسع لأنها تُوفر الوقت والمال . طريقة الفحص لا تشترط رجوع الضغط الى الحالة المستقرة عند غلق البئر لفحص تصاعد الضغط. انما تستخدم ضغط الغلق P_{ws}-shut in pressure المقاس مباشرة" و قبل بدء الانتاج اللاحق الشكل 8-18.

خطوات تنفيذ الفحص المُحور هذا Modified Isochronal test مشابهة تماما الى خطوات فحص متساوي الفترات الزمنية Isochronal test ما عدا كون طول فترات الفتح والغلق هنا متساوية بغض النظر عن قيم الضغوط في نهايات فترات الغلق و الفترة الاخيرة تمتد لفترة زمنية كافية لتحقق الاستقرار في الضغط والجريان -stabilized (الشكل8-18) .

طريقة تفسير الفحص ايضا مشابهة لسابقتها عدا كون الفحص المُحور يستخدم فرق مربع ضغط الغلق مساوي الى $(P_{ws}^2 - P_{wf}^2)$ بدلا من فرق مربع معدل الضغط المكمني $(\acute{P}^2 - P_{wf}^2)$ المُستخدم في فحص Isochronal test .

تفسير الفحص بطريقة هوبيرت Houpeurt Analysis

اضافة الى طريقة رولن- شلهارد Rawlins-Schellhardt المبسطة في تفسير فحوصات GDT ، يُمكن ايضا استخدام طريقة هوبيرت (1959) Houpeurt Analysis و تُعرف بالطريقة النظرية Theoretical method . تُستخدم لتحليل فحوصات قابلية توصيلية الغاز (Deliverability Tests) بدقة أعلى من طريقة Rawlins-Schellhardt، خاصة في حالات الجريان المضطرب (Turbulent Flow).



الشكل8-18 : مخطط فحص متساوي الفترات الزمنية المُحور- Modified Isochronal test

طريقة هوبيرت تفترض ، ان حدود المكمن الخارجية مغلقة closed outer boundary ، طور الجريان من النوع شبه المستقر pseudo-steady state PSS (المعادلات رقم-9 ، 12 و 13) ، المكمن متجانس و متماثل Homogeneous and Isotropic reservoir system و الجريان بطور واحد Single phase flow النفاذية ثابتة ، و اللزوجة في انضغاطية الغاز (μ_g z) ثابت.

بالامكان ترتيب معادلات الدرجة الثانية للانتاج في جزئين : جزء هبوط الضغط (aQ_g) من جراء الجريان الطبقي Laminar flow و جزء هبوط الضغط (bQ_g^2) من جراء الجريان المضطرب Turbulent flow (المعادلة 26):

* الجريان شبه المستقر PSS بدلالة مربع ضغط الغاز ، تكون العلاقة كما يأتي:

$$\bar{p}_r^2 - p_{wf}^2 = a\,Q_g + b\,Q_g^2 \quad \text{---------- 26}$$

ان a معامل الجريان الطبقي و يساوي:

$$a = \left(\frac{1422\,T\,\mu_g\,z}{kh}\right)\left[\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.75 + s\right] \quad \text{---------- 27}$$

و ان b معامل الجريان المضطرب و يساوي:

$$b = \left(\frac{1422\,T\,\mu_g\,z}{kh}\right) D \quad \text{---------- 28}$$

a = laminar flow coefficient
b = turbulent flow coefficient
Q_g = gas flow rate, Mscf/day
z = gas deviation factor
k = permeability, md
μ_g = gas viscosity, cp

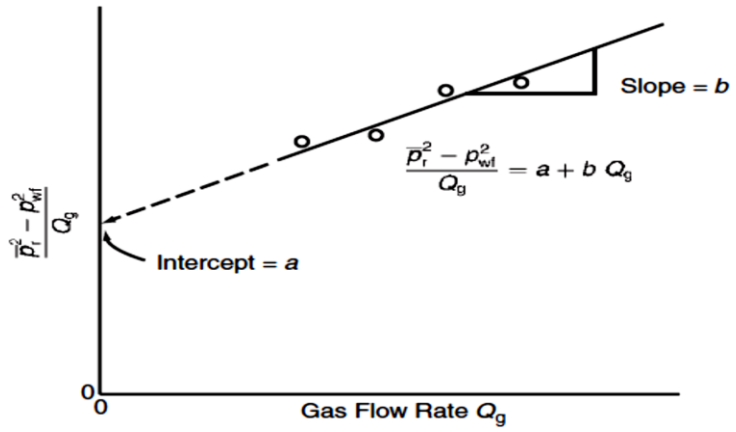
بالامكان ترتيب المعادلة اعلاه و تغييرها من معادلة لا خطية من الدرجة الثانية بدلالة معدل الجريان الى معادلة خطية من الدرجة الاولى بقسمة الطرفين على معدل الجريان Q_g فتصبح :

$$\frac{\bar{p}_r^2 - p_{wf}^2}{Q_g} = a + b\,Q_g \quad \text{---------- 29}$$

- عند رسم علاقة $\Delta p^2/q$ vs q على ورق عادي Cartesian سنحصل على علاقة خط مستقيم ميله يساوي b و تقاطعه مع الاحداثي الصادي يساوي a (الشكل8-19).

- نعوض عن قيم a، b في معادلة الجريان المربعة رقم-26 ، ثم نحلها لايجاد معدل انتاج الغاز Q_g عند اي ضغط جرياني P_{wf} باستخدام طريقة الدستور و كما يلي:

$$Q_g = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4b\left(\bar{p}_r^2 - p_{wf}^2\right)}}{2b} \quad \text{---------- 30}$$



الشكل8-19 : رسم بيانات مربع الضغط

* نعيد خطوات الحل نفسها و المُستخدمة في معادلة مربع الضغط نستخدمها بدلالة ضغط العادي للغاز اي عندما تكون قيمة متوسط الضغط اعلى من 3000 psia و كما يلي:

$$\bar{p}_r - p_{wf} = a_1 Q_g + b_1 Q_g^2 \text{ ---------- 31}$$

$$a_1 = \frac{141.2\,(10^{-3})\,(\mu_g B_g)}{kh}\left[\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.75 + s\right] \text{ ---------- 32}$$

$$b_1 = \left[\frac{141.2\,(10^{-3})\,(\mu_g B_g)}{kh}\right] D \text{ ---------- 33}$$

بالامكان ترتيب المعادلة رقم-31 اعلاه و جعلها معادلة خطية عبر قسمة الطرفين على معدل الجريان Q_g فتصبح :

$$\frac{\bar{p}_r - p_{wf}}{Q_g} = a_1 + b_1 Q_g \text{ ---------- 34}$$

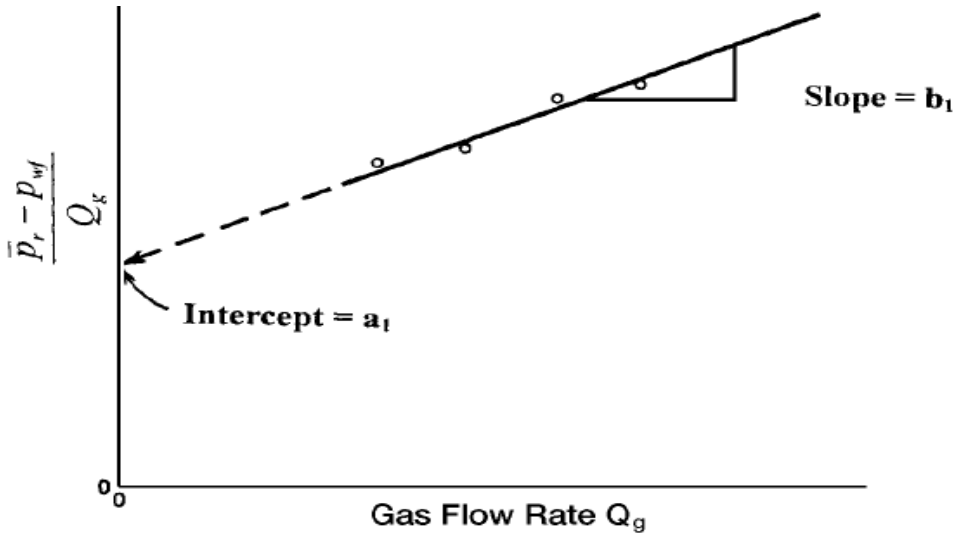
- عند رسم علاقة

$$\frac{\bar{p}_r - p_{wf}}{Q_g} \textbf{ vs } Q_g$$

على ورق عادي Cartesian ،نحصل على علاقة خط مستقيم ميله يساوي b_1 و تقاطعه مع الاحداثي الصادي يساوي a_1 كما في الشكل8-20 .

- نعوض قيم b_1 ، a_1 ، في معادلة الجريان المربعة .ثم حلها باستخدام معادلة الدستور لايجاد معدل انتاج الغاز Q_g عند اي ضغط جرياني P_{wf} و كما يأتي:

$$Q_g = \frac{-a_1 + \sqrt{a_1^2 + 4b_1\left(\overline{p}_r - p_{wf}\right)}}{2b_1} \quad \text{---------- 35}$$



الشكل8-20 : رسم بيانات الضغط العادي

* نعيد خطوات الحل نفسها و المُستخدمة في معادلة مربع الضغط نستخدمها بدلالة ضغط الغاز المكافىء (عندما تكون قيمة الضغط متوسطة Intermediate ما بين 2000-3000 psia) و كما يأتي:

$$\overline{\Psi}_r - \Psi_{wf} = a_2 Q_g + b_2 Q_g^2 \quad \text{---------- 36}$$

$$a_2 = \left(\frac{1422}{kh}\right)\left[\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.75 + s\right] \quad \text{---------- 37}$$

$$b_2 = \left(\frac{1422}{kh}\right) D \quad \text{---------- 38}$$

بالامكان ترتيب المعادلة رقم-36 اعلاه و جعلها معادلة خطية عبر قسمة الطرفين على معدل الجريان Q_g فتصبح :

$$\frac{\overline{\Psi}_r - \Psi_{wf}}{Q_g} = a_2 + b_2 Q_g \quad \text{----------39}$$

- عند رسم العلاقة:

$$\left(\frac{\overline{\Psi}_r - \Psi_{wf}}{Q_g}\right) \text{ versus } Q_g$$

على ورق عادي Cartesian سنحصل على علاقة خط مستقيم ميله يساوي b_2 و تقاطعه مع الاحداثي الصادي يساوي a_2 الشكل8-21.

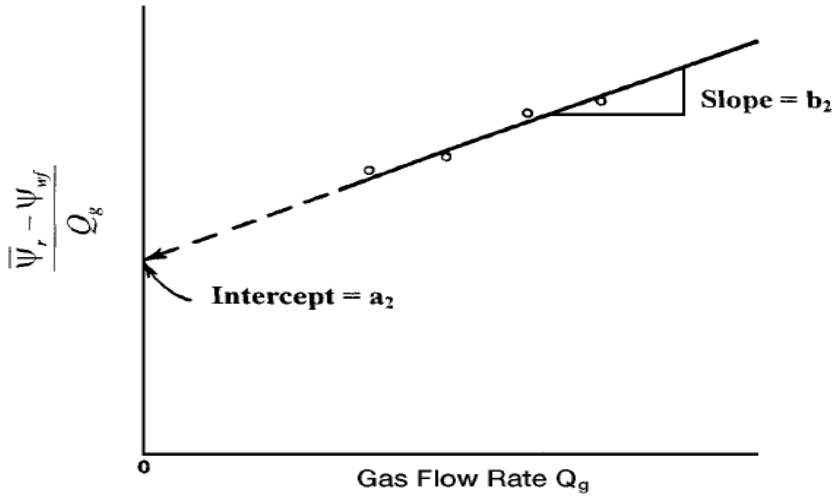
- نعوض قيم b_2 ، a_2 ، في معادلة الجريان المربعة رقم-36، و حلها بطريقة الدستور لايجاد معدل انتاج الغاز Q_g لاي ضغط جرياني P_{wf} و كالتالي:

$$Q_g = \frac{-a_2 + \sqrt{a_2^2 + 4\,b_2\,(\overline{\psi}_r - \psi_{wf})}}{2\,b_2} \quad \text{----------} \; 40$$

Qg = gas flow rate، mmscf/day

$m(p^-r) = \psi^-_r$ = average reservoir real-gas pseudo pressure، psi2/cp

ψ_{wf} = flowing real-gas pseudo pressure، psi2/cp



الشكل8-21 : رسم بيانات الضغط المكافىء

مثال-6 :

أُجرِ فحص متساوي الفترات الزمنية المُحور *Modified isochronal test* لبئر غازي فكان معدل الضغط المقاس عند راس البئر بحدود *Pwh=2388 psia* والضغط المكمني بحدود *Pr=3700 psia*. تم فحص البئر باربعة معدلات لجريان الغاز عبر اربعة فتحات لصمام راس البئر و هي *16،24،32،48 inches* . عند كل فتحة راس البئر، قيست كلا من معدلات الجريان و الضغوط عند راس البئر والضغوط عند قاع البئر و لفترات متساوية كانت بحدود ست ساعات *6 hrs.* . ثم تمديد مدة الجريان الاخيرة لاربعة و عشرين ساعة بمعدل جريان للغاز *6.148 mmscf/day* و الضغوط الجريانية المصاحبة عند راس البئر و عند قاع البئر على التوالي: *Pwh=1015 psia*، *Pwf=1727 psia* . خواص الغاز أُدرجت في الجدول8-7 و بيانات الفحص أُدرجت في الجدولين رقم 8-8 و 8-9 .

اوجد قابلية توصيل بئر الغاز للفحص متساوي الفترات الزمنية المُحور Modified isochronal test لحالتي الضغط عند راس البئر و الضغط في قاع البئر ؟؟؟

Compositional Gas Analysis Gas Properties and Pseudopressure

Component	mole %	Properties
N_2	0.11	MW = 21.20, T_c = 380.16°R
CO_2	7.82	s_g = 0.732, P_c = 645.08 psia
H_2S	0.0	P_{sc} = 14.65 psia, T_{sc} = 60°F
C_1	80.55	T_{wh} = 86^{0}F, T_R = 710°R
C_2	5.10	
C_3	4.36	
iC_4	0.87	
nC_4	0.77	
iC_5	0.22	
nC_5	0.09	
C_6	0.11	
C_7	0.00	
Total	100.0	

الجدول8-7: بيانات عامة للمثال رقم-6

Gas Well Deliverability Calculations at Wellhead Conditions

	Duration (hr)	Surface pressure (psia)	Choke size (inches)	$p^2 \times 10^3$ (psia^2)	$\Delta p^2 \times 10^3$ (psia^2)	Flow rate (mmscfd)
Initial shut-in	147.2	2388		5703		
Flow 1	6	2015	16	4060	1642	2.397
Shut-in	6	2388		5703		
Flow 2	6	1640	24	2690	3013	5.214
Shut-in	6	2388		5703		
Flow 3	6	1365	32	1863	3840	6.144
Shut-in	6	2368		5607		
Flow 4	6	1015	48	1030	4673	7.186
Extended flow	24	1015	32	1030	4673	6.148
Final shut-in	22.75	2388		5703		

الجدول8-8:بيانات ضغوط راس البئر لفحص متساوي الفترات الزمنية المُحور
المثال رقم-6- *Modified isochronal test*

	Duration (hr)	Bottom-hole pressure (psia)	Choke size (inches)	$p^2 \times 10^3$ (psia^2)	$\Delta p^2 \times 10^3$ (psia^2)	Flow rate (mmscfd)
Initial shut-in	147.12	3,700		13,690		
Flow 1	6	3,144	16	9,985	3,805	2.397
Shut-in	6	3,700		13,690		
Flow 2	6	2,566	24	6,584	7,106	5.214
Shut-in	6	3,700		13,690		
Flow 3	6	2,158	32	4,657	9,033	6.144
Shut-in	6	3,698		13,690		
Flow 4	6	1,836	48	3,371	10,352	7.186
Shut-in	22.75	3,690		13,616		
Extended	24	1,727	32	2,962	10,730	6.148

الجدول8-9: بيانات ضغوط باطن البئر لفحص متساوي الفترات الزمنية المُحور
المثال رقم-6- *modified isochronal test*

الحل: طريقة رولن- شلهارد *Rawlins-Schellhardt* المبسطة:

بيانات الضغط عند راس البئر :

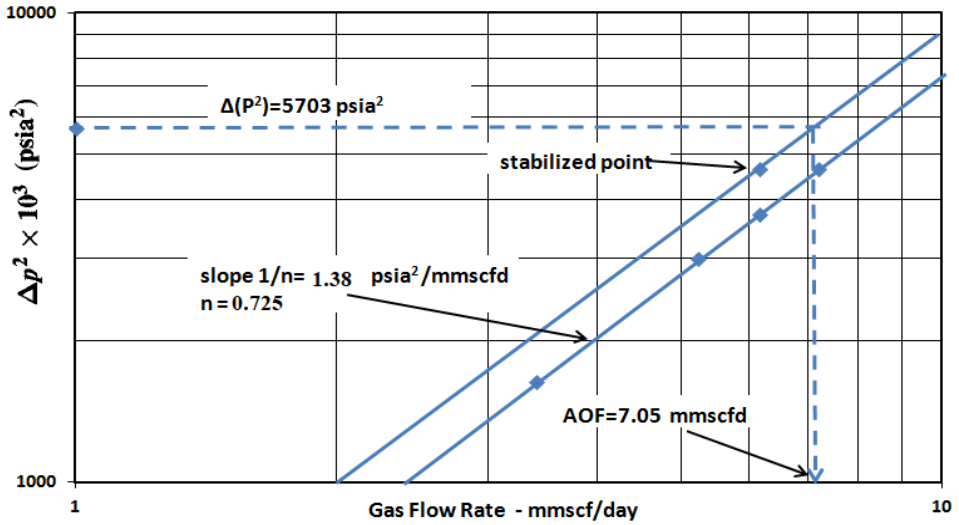
- نرسم علاقة $(P_{iwh}^2 - P_{wh}^2)$ vs q على ورق لوغاريتمي كما في الشكل8-22.
- نحدد احسن خط مستقيم يمر بنقاط الفحص اللامستقرة و نجد الميل عبر اخذ نقطتين تقعان على الخط المستقيم مع احداثيتهما و نطبق قانون الميل كما ياتي:

$$1/n = \frac{\log\left(P_{iwh}^2 - p_{wh}^2\right)_2 - \left(P_{iwh}^2 - p_{wh}^2\right)_1}{\log q_{sc,2} - \log q_{sc,1}} \quad \text{---------- 41}$$

$$1/n = \frac{\log\left(7200/1000\right)}{\log\left(10/2.4\right)}$$

$$1/n = 1.38$$

- اذن $n=0.73$



الشكل8-22 : رسم لوغاريتمي لبيانات ضغط راس البئر للمثال رقم-6

(فحص متساوي الفترات الزمنية المُحور *Modified isochronal test*)

- نجد مؤشر الانتاجية C بتعويض احداثيات نقطة الفحص المستقرة و كما يأتي :

$$C = \frac{q_{sc}}{\left(P_{iwh}^2 - p_{wh}^2\right)^n} = \frac{6.148}{\left(4673000\right)^{0.73}}$$

$$C = 8.3 \times 10^{-5} \text{mmscfd/psia}^2$$

- معادلة قابلية البئر في توصيل الغاز تصبح :

$$q_{sc} = 8.3 \times 10^{-5} \left(P_{iwh}^{2} - p_{wh}^{2} \right)^{0.73}$$

- نجد معدل الانتاج المطلق للبئر AOF بجعل P_{wh}= 14.65 or P_{wh}= 0 في معادلة قايلية توصيل الغاز ادناه :

$$AOF = 8.3 \times 10^{-5} \left(2388^{2} - 14.65^{2} \right)^{0.73}$$

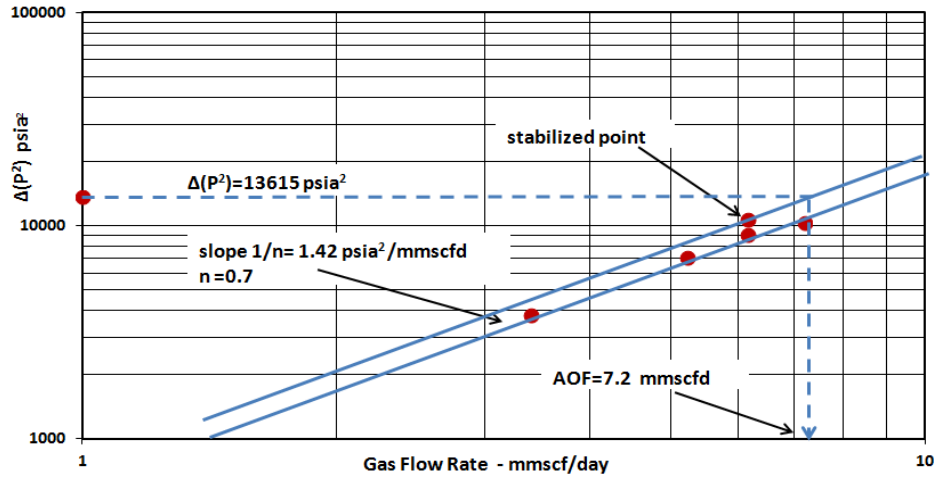
$$AOF = 7.1 \text{ mmscfd}$$

- ان الوحدات المستخدمة لمعدل الانتاج هي mmscf/day و لمربع الضغط $psia^2$.
- استخدمنا P_{iwh} Initial wellhead pressure للدلالة على الضغط المقاس عند راس البئر عند الاغلاق بعد كل فترة جريان .
- و استخدمنا P_{wh} Wellhead flowing pressure للدلالة على ضغط الجريان المقاس عند راس البئر عند كل فترة جريان .
- ممكن استخدام الرسم لتحديد قيمة AOF على شرط ان يكون التقاطع مع الخط المستقيم المار بنقطة الفحص المستقرة (استقرار ضغط الجريان و معدل الانتاج) الشكل8-22 .

كلا القيمتان متقاربة.

رسم بيانات ضغط الجريان في قاع البئر :

- نرسم علاقة $(\acute{P}^2 - P_{wf}^2)$ vs q على ورق لوغاريتمي ، الشكل 8-23.



الشكل8-23 : رسم لوغاريتمي لبيانات ضغط قاع البئر للمثال رقم-6- فحص متساوي الفترات الزمنية المُحور *Modified isochronal test*

- نحدد افضل خط مستقيم يمر بنقاط الفحص اللامستقرة و نجد الميل عبر اخذ نقطتين تقعان على الخط المستقيم و نطبق قانون الميل الذي يساوي :

$$1/n = \frac{(\overline{p}_R^2 - p_{wf}^2)_2 - (\overline{p}_R^2 - p_{wf}^2)_1}{\log q_{sc,2} - \log q_{sc,1}}$$

$$= \frac{\log(10000/3000)}{\log(7/3)}$$

$$1/n = 1.42$$

- اذن $n=0.7$

- حساب مؤشر الانتاجية C بتعويض احداثيات نقطة الفحص المستقرة و كما يأتي :

$$C = \frac{q_{sc}}{(\overline{p}_R^2 - p_{wf}^2)^n} = \frac{6.148}{(10{,}352000)^{0.7}}$$

$$C = 7.55 \times 10^{-5} \text{ mmscfd/psia}^2$$

- معادلة قابلية توصيل الغاز تصبح :

$$q_{sc} = 7.55 \times 10^{-5} (\overline{p}_R^2 - p_{wf}^2)^{0.7}$$

- حساب معدل الانتاج المطلق للبئر AOF بجعل P_{wf}= 14.65 or P_{wf}= 0 في معادلة قابلية توصيل الغاز ادناه :

$$AOF = 7.55 \times 10^{-5} (13{,}690000 - 14.65^2)^{0.7}$$

$$AOF = 7.4 \text{ mmscf/day}$$

ان الوحدات المستخدمة لمعدل الانتاج هي mmscf/day و لمربع الضغط $psia^2$.

- ممكن استخدام الخط المستقيم المار بنقطة الفحص المستقرة في تحديد قيمة AOF ، و ذلك من خلال حساب قيمة فرق مربع الضغط ($\overline{P}^2$ - P_{wf}^2) على اعتبار قيمة ضغط الجريان مساو الى الصفر (pressure per square inch gauge) 0 psig او 14.65 or 14.7 psia (pressure per square inch absolute) نمد خط افقي لقيمة الفرق من الاحداثي الصادي و يقطع خط الميل المستقر و نقرأ قيمة معدل الجريان المقابلة و التي تكافىء AOF (الشكل8-23).

- الجدول8-10 يلخص النتائج لقابلية انتاج البئر الغازي لحالتي ضغط الجريان السطحي و ضغط الجريان في باطن البئر .

	Wellhead conditions	Bottom hole conditions
n	0.73	0.7
C	8.3×10^{-5} mmscfd/psia^2	7.55×10^{-5} mmscfd/psia^2
AOF	7.1 mmscfd	7.2 mmscfd
Deliver. Eq.	$q_{sc} = 8.3 \times 10^{-5} (P_{iwh}^2 - p_{wh}^2)^{0.73}$	$q_{sc} = 7.55 \times 10^{-5} (\overline{p}_R^2 - p_{wf}^2)^{0.7}$

الجدول8-10: ملخص نتائج تفسير فحص قابلية توصيل الغاز *GDT* للبئر في المثال رقم-6

مثال-7 :

أدرجت بيانات فحص تعاقب الجريان Conventional Back Pressure or Flow after flow لبئر غازي في الجدول8-11 ادناه (بيانات الضغوط عند السطح و في باطن البئر). المعلومات الاخرى المتوفرة عن للبئر و المائع و المكمن كما يأتي:

$h = 200$ ft. $L = 3{,}050$ ft. $\phi = 0.25$. $C_A' = 30.8828$.
$A = 640$ acres. $r_w = 0.5$ ft. $T_{f,wf} = 90°$F. p_r=407 psi
$M_g = 20.71$ lb/lbm mol $\gamma_g = 0.715$.

q (MMscf/D)	$T_{f,tf}$ (°F)	p_{tf} (psia)	p_{wf} (psia)
0	75	375.2	407.60
4.288	70	371.2	403.13
9.265	73	361.3	393.03
15.552	77	343.8	375.79
20.177	77	327.1	359.87

الجدول8-11: بيانات الفحص متعاقب الجريان flow after flow للمثال رقم-7

اعمل تفسير للفحص باستخدام طريقة Rawlins- Schellhardt :
- اوجد معادلة قابلية البئر لتوصيل الغاز Deliverability equation ؟؟
- اوجد الانتاجية المطلقة للبئر - AOF؟؟

الحل:

- اعداد الحسابات اللازمة باستخدام بيانات الفحص للتحضير لرسم منحني قابلية التوصيل بطريقة Rawlins- Schellhardt (الجدول رقم 8-12).
- رسم علاقة q_g & P^2-P^2_w على ورق لوغاريتمي كما في الشكل8-24.
- رسم احسن خط مستقيم يمر ببيانات الفحص و حساب ميله الذي يساوي :

1/n=1.497

اذن قيمة n تساوي مقلوب الميل:

n= 0.668

q (MMscf/D)	p_{wf}^2 (psia^2)	$\Delta p^2 = \bar{p}^2 - p_{wf}^2$ (psia^2)
0	1.661×10^5	0
4.288	1.625×10^5	0.360×10^4
9.265	1.545×10^5	1.160×10^4
15.552	1.412×10^5	2.490×10^4
20.177	1.295×10^5	3.660×10^4

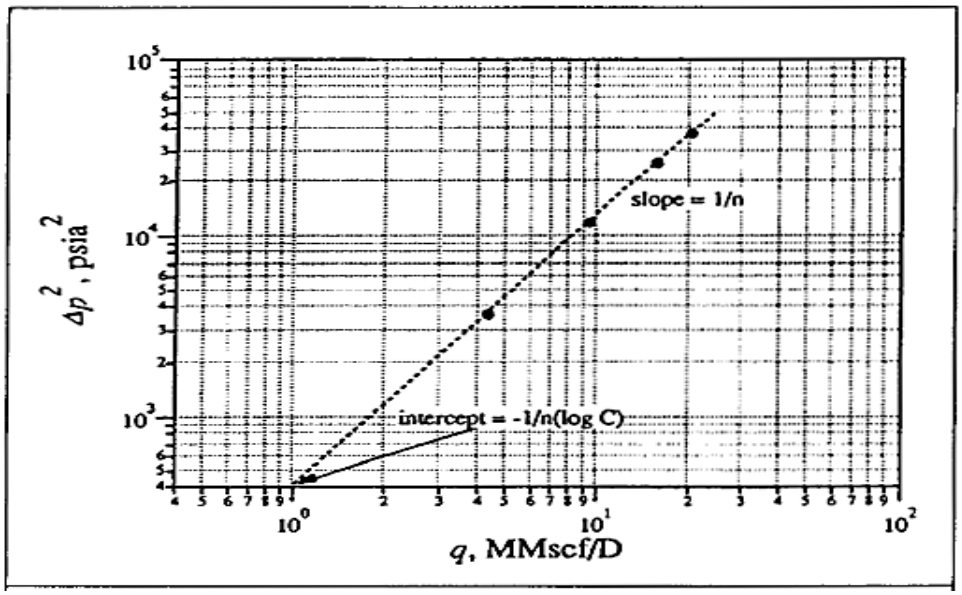
الجدول8-12: تهيئة بيانات الفحص متعاقب الجريان flow after flow للتفسير بطريقة Rawlins- Schellhardt - المثال رقم-7

- حساب قيمة C و حسب الصيغة الاتية:

$$C = \frac{q}{\left(\bar{p}_r^{2} - p_{wf}^{2}\right)^{n}}$$

- نختار نقطة تقع على الخط المستقيم و نحدد احداثياتها و لتكن:

q=15.552 MMscf/D at (ΔP^2)= 24900 psia



الشكل8-24 : رسم لوغاريتمي لتفسير بيانات مربع الضغط للمثال رقم-7

فحص الضغط العكسي Back pressure test

نعوضها في المعادلة في اعلاه لايجاد قيمة C :

$$C = \frac{q}{\left(\bar{p}_r^{2} - p_{wf}^{2}\right)^{0.668}} = \frac{15.552}{\left(24900\right)^{0.668}}$$

$$C = 0.0179$$

- حساب قيمة AOF بجعل ضغط الجريان مساوي الى الضغط الجوي و كما يأتي:

$$AOF = C[\bar{p}^2 - (14.65)^2]^n$$
$$= 1.795 \times 10^{-2}(1.659 \times 10^5)^{0.668}$$
$$= 55.1 \text{ MMscf/D.}$$

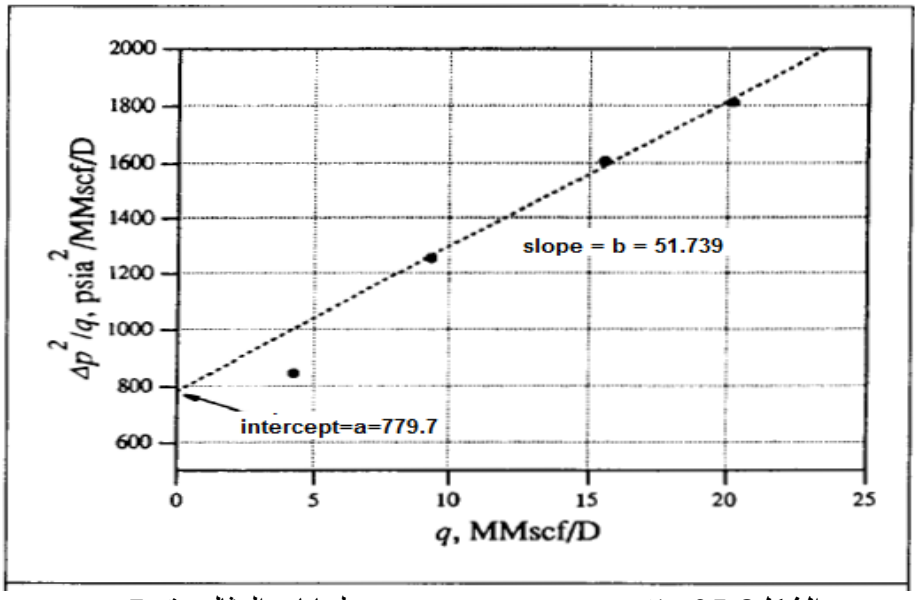
- من الرسم ، قيمة AOF=50 MMscf/D.

ثانيا ـ تفسير الفحص بطريقة Houpeurt والتي تتضمن الخطوات الاتية:

q (MMscf/D)	$\Delta p^2/q = (\bar{p}^2 - p_{wf}^2)/q$ (psia^2)/(MMscf/D)
4.288	0.8302×10^5
9.265	1.232×10^5
15.552	1.567×10^5
20.177	1.775×10^5

الجدول8-13: تهيئة بيانات الفحص متعاقب الجريان (Flow after flow(Back pressure للتفسير بطريقة Houpeurt - المثال رقم-7

- تهيئة البيانات للرسم كما في الجدول8-13 .
- رسم علاقة $\Delta(P^2)/q$ vs q كما في الشكل8-25.
- تحديد افضل خط مستقيم يمر بنقاط الفحص ، لاحظ ان الخط يمر على استقامة بالنقاط الثلاثة الاخيرة و قد أُهملت النقطة الاولى والتي تمثل اوطأ معدل لجريان الغاز لكونها لا تقع على الخط المستقيم .
- ميل المستقيم يساوي b=51.7 والتقاطع مع الاحداثي الصادي يساوي a=779.7.



الشكل8-25 : تفسير هوبيرت Houpeurt لبيانات المثال رقم-7 – فحص الضغط العكسي Back pressure test

- معادلة قابلية توصيل الغاز تصبح:

$$\Delta p^2 = \bar{p}^2 - p_{wf}^2 = 779.7\,q + 51.739\,q^2$$

- حساب قيمة AOF بتعويض قيمة ضغط الجريان في قعر البئر P_{wf} في المعادلة اعلاه مساوي الى الضغط الجوي = 14.65 psia و تصبح المعادلة من الدرجة الثانية و نحلها بطريقة الدستور و كالتالي:

$$AOF = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4b[\bar{p}^2 - (14.65)^2]}}{2b}$$

$$= \frac{\{-(7.797 \times 10^2) + \sqrt{(7.797 \times 10^2)^2 + 4(51.739)[(1.661 \times 10^5) - 214.623]}\}}{2(51.739)}$$

$$AOF = 49.6 \text{ MMscf/D}$$

مثال-8 :

بيانات فحص الضغط العكسي Back pressure test او فحص تعاقب الجريان - Flow after flow test أُدرجت في الجدول8-14 في ادناه:

Flow Rate (mmscfd)	$\bar{P}_R^2 - P_{wf}^2$ (psia^2)	$(\bar{P}_R^2 - P_{wf}^2)/q_{sc}$ (psia^2/mmscfd)
2.397	2,925,039	1,220,292
5.214	7,105,644	1,362,800
6.144	9,033,036	1,470,221
7.148	10,319,104	1,443,635
(Stabilized) 6.148	10,707,471	1,741,619

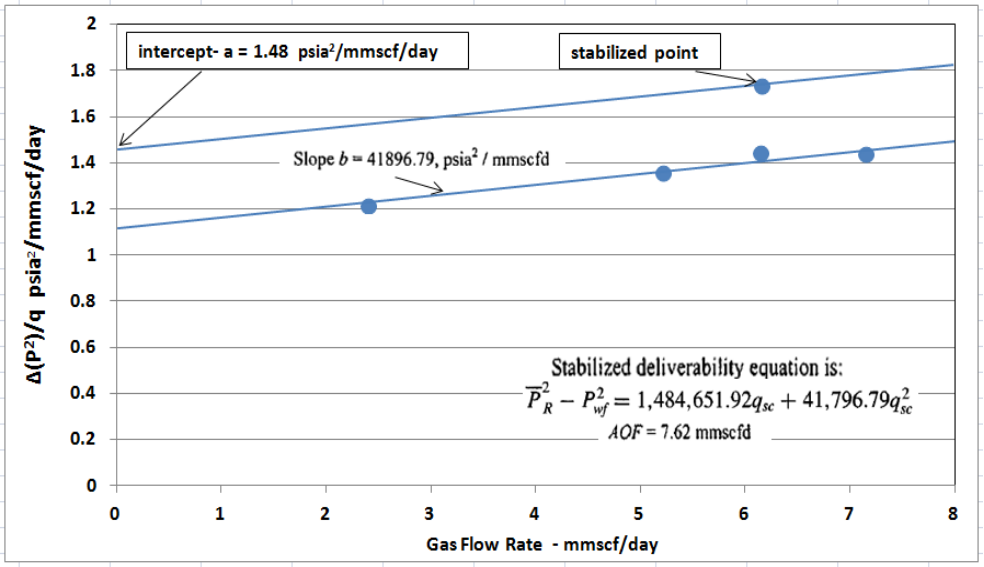
الجدول8-14: بيانات فحص الضغط العكسي Back pressure test للمثال رقم-8

- المطلوب اجراء تفسير الفحص بالطريقة النظرية - طريقة Houpeurt ؟؟

الحل:

- رسم علاقة $\Delta(P^2)/q$ vs q على ورق عادي الشكل8-26.
- تحديد احسن خط مستقيم يمر بنقاط الفحص غير المستقرة ونجد ميل الخط المستقيم b باخذ نقطتين تقعان على الخط المستقيم و لتكن q_1=5.214 mmscf/day، q_2=7.148 mmscf/day ويقابلهم من الاحداثي الصادي $(\acute{P}^2 - Pwf^2)_1/q_1$=1362000، $(\acute{P}^2 - Pwf^2)_2/q_2$=1443635 و نطبق قانون الميل و يساوي:

$$b = \frac{1,443,635 - 1,362,800}{7.148 - 5.214} = 41,796.79 \frac{\text{psia}^2}{\text{mmscfd}^2}$$



الشكل8-26 : رسم لوغاريتمي $\Delta(P^2)/q$ vs q – المثال رقم- 8

- من الميل و نقطة الفحص المستقرة stabilized point التي احداثياتها $(\bar{P}^2 - Pwf^2)/q=10707471psia^2$ ، q=6.148 mmscf/day نرسم خط مستقيم موازي لخط نقاط الفحص اللامستقرة (راجع الشكل8-26).

- ان الخط المستقيم المار بنقطة الفحص المستقرة يستعمل لتحديد التقاطع مع الاحداثي الصادي a (الشكل8-26) و يساوي:

$$a = \frac{(\overline{P}_R^2 - P_{wf}^2)_{stabilized} - bq_{stabilized}}{q_{stabilized}}$$

$$= \frac{10{,}707{,}471 - (41{,}796.79)(6.148)}{6.148} = \frac{10{,}707{,}471 - 1{,}579{,}831}{6.148}$$

$$a = \frac{9{,}127{,}640}{6.148} = 1{,}484{,}651.92\frac{\text{psia}^2}{\text{mmscfd}}$$

- معادلة قابلية توصيل بئر الغاز تصبح:

$$\overline{P}_R^2 - P_{wf}^2 = 1{,}484{,}651.92q_{sc} + 41{,}796.79q_{sc}^2$$

- حساب قيمة AOF عبر تعويض $P_{wf}=0$ في المعادلة في اعلاه و استخدام طريقة الدستور نتوصل الى ما يلي:

$$AOF = \frac{-1{,}484{,}851.92 + \sqrt{(1{,}484{,}851.92)^2 + 4(41{,}796.79)(3700)^2}}{2 \times 41{,}796.79}$$

$$= \frac{634{,}953.97}{83{,}593.58} = 7.62\,\text{mmscfd.}$$

مثال-9 :

تم اجراء فحص الضغط العكسي على بئر غازي عبر ثلاث نقاط ، معدل الضغط المكمني الاصلي بحدود 1952 psia ، بيانات الفحص أُدرجت في الجدول8-15 ادناه:

p_{wf} (psia)	$m(p_{wf}) = \psi_{wf}$ (psi^2/cp)	Q_g (Mscf/day)
1952	316×10^6	0
1700	245×10^6	2624.6
1500	191×10^6	4154.7
1300	141×10^6	5425.1

الجدول8-15: بيانات فحص الضغط العكسي Back pressure test للمثال رقم-9

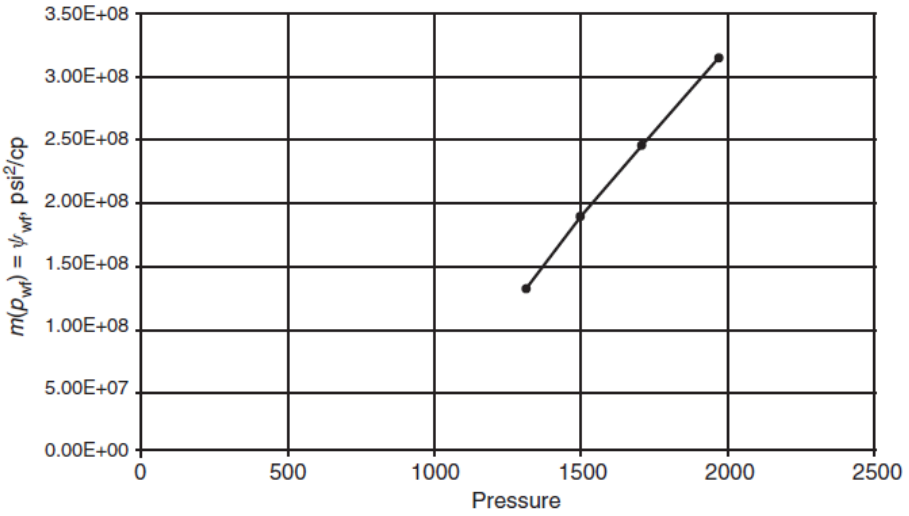
- رُسمت علاقة الضغط مع الضغط المكافىء في الشكل8-27 اعلاه.

مستخدما المعادلات بدلالة مربع الضغط ، الضغط المكافىء و معدل الضغط ،

اعمل تفسير للفحص باستخدام كلا من الطريقة التقليدية (Rawlins- Schellhardt) و طريقة Houpeurt .

- اوجد معادلة قابلية توصيل الغاز Deliverability equation ؟؟

- اوجد الانتاجية المطلقة للبئر - AOF؟؟



الشكل8-27 : الضغط المكافىء للغاز مقابل الضغط

الحل:

اولا- تفسير الفحص بطريقة Rawlins- Schellhardt

- تهيئة البيانات بصيغة تسمح برسم منحني قابلية توصيل الغاز كما في الجدول رقم8-16 .
- رسم علاقة Q_g & P^2-P^2_w على ورق لوغاريتمي الشكل8-28.
- رسم احسن خط مستقيم يمر ببيانات الفحص و حساب ميله من الرسم او من احداثيات نقطتين تقع على الخط المستقيم او امتداده و حساب الميل و يساوي :

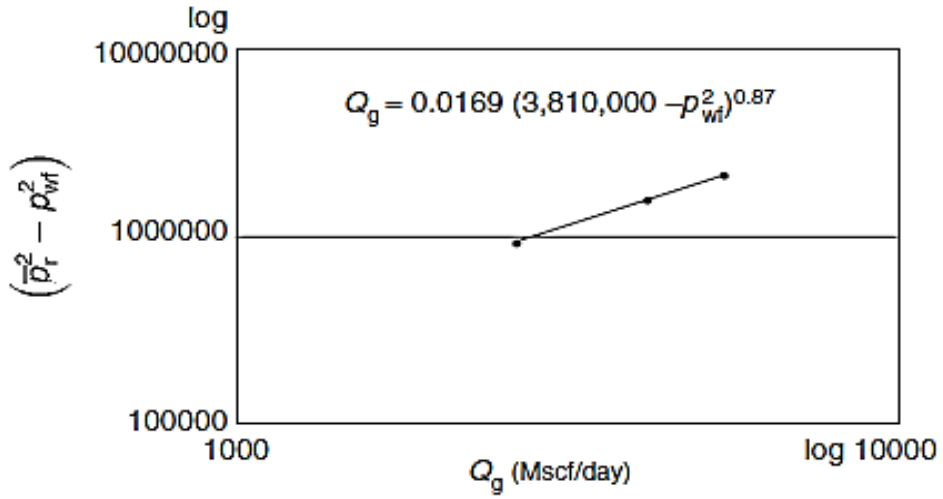
$$n = \frac{\log(Q_{g1}) - \log(Q_{g2})}{\log(\Delta p_1^2) - \log(\Delta p_2^2)}$$

$$= \frac{\log(4000) - \log(1800)}{\log(1500) - \log(600)}$$

$$n = 0.87$$

p_{wf}	p_{wf}^2 (psi$^2 \times 10^3$)	$(\bar{p}_r^2 - p_{wf}^2)$ (psi$^2 \times 10^3$)	Q_g (Mscf/day)
$\bar{p}_r = 1952$	3810	0	0
1700	2890	920	2624.6
1500	2250	1560	4154.7
1300	1690	2120	5425.1

الجدول8-16: - تهيئة بيانات الفحص للمثال رقم-9



الشكل8-28 : رسم لوغاريتمي لبيانات مربع الضغط للمثال رقم-9

فحص الضغط العكسي Back pressure test

- لايجاد مؤشر الانتاجية C نختار نقطة تقع على الخط المستقيم و نحدد احداثياتها و لتكن:

q=1800 Mscf/D at $\Delta(P^2)$= 600000 psi

نعوضها في المعادلة ادناه :

$$C = \frac{Q_g}{\left(\bar{p}_r^2 - p_{wf}^2\right)^n} = \frac{1800}{(600\,000)^{0.87}}$$

$$C = 0.0169\ \text{Mscf/psi}^2$$

- تصبح معادلة قابلية توصيل الغاز او قابلية توصيل بئر الغاز للانتاج (الشكل8-28) كالاتي:

$$Q_g = 0.0169(3\,810\,000 - p_{wf}^2)^{0.87}$$

- نجد قيمة AOF بجعل قيمة ضغط الجريان في قعر البئر $P_{wf}=0$ في المعادلة اعلاه:

$$AOF = 0.0169(3\,810\,000 - \mathbf{0})^{0.87}$$

AOF=8980 Mscf/day

ثانيا- تفسير الفحص بطريقة Houpeurt

- تهيئة البيانات للرسم و لانواع الضغوط الثلاثة :

فرق مربع الضغط $\Delta P^2/Q_g$ كما في الجدول8-17 .

فرق الضغط العادي $\Delta P/Q_g$ كما في الجدول8-18 .

فرق الضغط المكافىء $\Delta\psi(p)/Q_g$ كما في الجدول8-19 .

- رسم علاقة $\Delta(P^2)/Q_g$ vs Q_g على ورق عادي الشكل8-29 .

- رسم علاقة $(\Delta P)/Q_g$ vs Q_g على ورق عادي الشكل8-30 .

- رسم علاقة $\Delta\psi(p)/Q_g$ vs Q_g على ورق عادي الشكل8-31 .

p_{wf}	$(\bar{p}_r^2 - p_{wf}^2)$ (psi^2 × 10^3)	Q_g (Mscf/day)	$(\bar{p}_r^2 - p_{wf}^2)/Q_g$
$\bar{p}_r = 1952$	0	0	–
1700	920	2624.6	351
1500	1560	4154.7	375
1300	2120	5425.1	391

الجدول8-17: بيانات فرق مربع الضغط $\Delta P^2/Q_g$

p_{wf}	$(\bar{p}_r - p_{wf})$	Q_g (Mscf/day)	$(\bar{p}_r - p_{wf})/Q_g$
$\bar{p}_r = 1952$	0	0	–
1700	252	262.6	0.090
1500	452	4154.7	0.109
1300	652	5425.1	0.120

الجدول8-18: بيانات فرق الضغط العادي $\Delta P/Q_g$

p_{wf}	ψ (psi^2/cp)	$(\bar{\psi}_r - \psi_{wf})$	Q_g (Mscf/day)	$(\bar{\psi}_r - \psi_{wf})/Q_g$
$\bar{p}_r = 1952$	316×10^6	0	0	–
1700	245×10^6	71×10^6	262.6	27.05×10^3
1500	191×10^6	125×10^6	4154.7	30.09×10^3
1300	141×10^6	175×10^6	5425.1	32.26×10^3

الجدول8-19: بيانات فرق الضغط المكافىء $\Delta\psi(p)/Q_g$

- تحديد احسن خط مستقيم يمر بنقاط الفحص للاشكال الثلاثة ونجد ميل الخط المستقيم a وتقاطعه مع الاحداثي الصادي b و لكل حالة .
- من الشكل8-29 ، فان ميل الخط المستقيم يساوي b=0.0133 و تقاطعه مع الاحداثي الصادي يساوي a=318.
بتعويض الثوابت a، b في معادلة قابلية توصيل الغاز بدلالة مربع الضغط تصبح:

$$\bar{p}_r^2 - p_{wf}^2 = aQ_g + bQ_g^2$$

$$(3\,810\,000 - p_{wf}^2) = 318Q_g + 0.01333Q_g^2$$

- حساب قيمة AOF بتعويض P_{wf}=0 في المعادلة اعلاه ،اذن AOF=8763 Mscf/day.

- من الشكل8-30 ، فان ميل الخط المستقيم يساوي $b_1=1.11\times10^{-5}$ والتقاطع مع الاحداثي الصادي يساوي a_1=0.06. اذن معادلة قايلية توصيل الغاز بدلالة الضغط العادي تصبح:

$$\bar{p}_r - p_{wf} = a_1Q_g + b_1Q_g^2$$

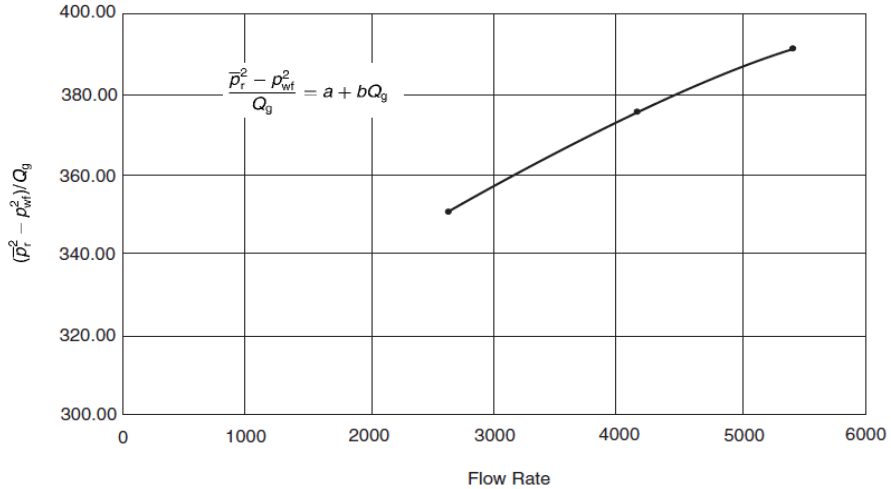
$$(1952 - p_{wf}) = 0.06Q_g + (1.111 \times 10^{-5})Q_g^2$$

حساب قيمة AOF من تعويض P_{wf}=0 في المعادلة اعلاه ، اذن AOF=10827 Mscf/day.

- من الشكل8-31 ، فان ميل المستقيم يساوي b_2=1.727 والتقاطع مع الاحداثي الصادي يساوي $a_2=22.28\times10^3$. اذن معادلة قايلية توصيل الغاز بدلالة الضغط المكافىء للغاز تصبح:

$$\bar{\psi}_r - \psi_{wf} = a_2Q_g + b_2Q_g^2$$

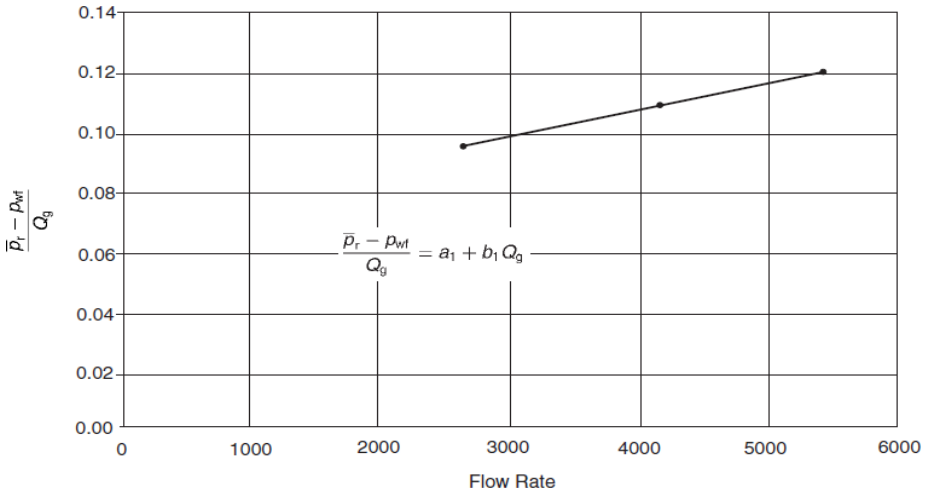
$$(316 \times 10^6 - \psi_{wf}) = 22.28 \times 10^3Q_g + 1.727Q_g^2$$



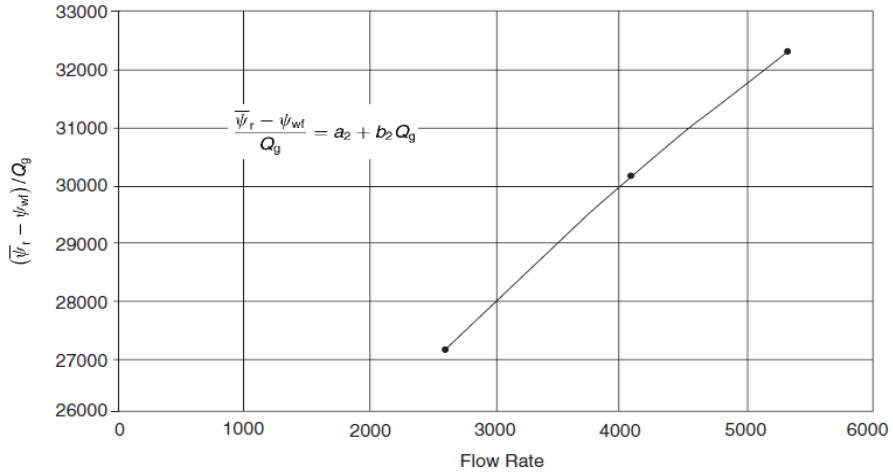
الشكل8-29 : تفسير الفحص بطريقة Houpeurt للمثال رقم-9 - مربع الضغط

- نجد قيمة AOF من تعويض $\psi_{(wf)}$=0 في المعادلة اعلاه ،اذن AOF=8342 Mscf/day.

- نحدد منحني ادائية الانتاج Inflow Performance Relationship - IPR لكل حالة عبر فرض قيم لضغوط الجريان p_{wf} و حساب مقابلها من معدلات جريان و على حسب المعادلة الخاصة لكل حالة.



الشكل8-30 : تفسير الفحص بطريقة Houpeurt للمثال رقم-9 - الضغط العادي



الشكل8-31 : تفسير الفحص بطريقة Houpeurt للمثال رقم-9 – الضغط المكافىء

- النتائج أُدرجت في الجدول8-20 و لغرض مقارنة نتائج IPR للحالات الاربعة رُسمت المنحنيات في الشكل8-32.

<u>مناقشة النتائج</u> :

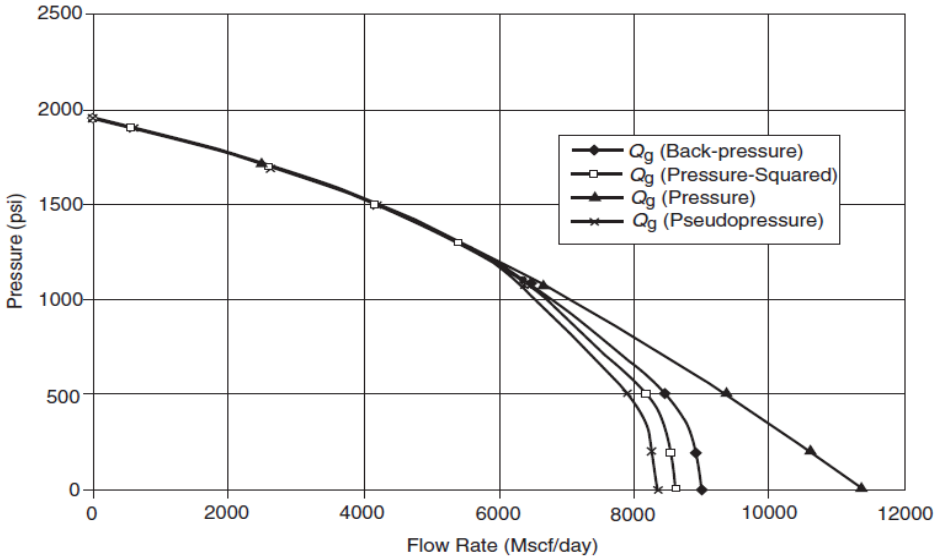
بحسب الجدول8-20 ، نلاحظ وجود اختلاف في معدلات الجريان المحسوبة بالطرق الاربعة ينتج عنه ايضا اختلاف في منحني ادائية الجريان IPR (الشكل8-32)، وعلى اعتبار ان طريقة الضغط المكافئ تعطي نتائج اكثر صحة لذا فلقد قورنت قيم معدلات الجريان المحسوبة بالطرق

الثلاث الاخرى مع نتائج طريقة الضغط المكافئ $\psi(p)$.

من المقارنة بمعدلات الجريان فهنالك نسبة خطأ بحدود 5.4% ، 6% و 11% للحالات مربع الضغط ، الضغط العكسي و الضغط العادي على التوالي. ان الفرق الكبير لحالة الضغط العادي يعود الى محددات ظروف الضغط لهذه الطريقة والتي تتطلب ضغوط اعلىpsi 3000 في حين ان حدود بيانات الضغط في المثال اقل من هذه القيمة.

Gas flow rate (Mscf/day)				
Pressure	*Back-pressure*	p^2 *approach*	*p approach*	ψ *approach*
1952	0	0	0	0
1800	1720	1675	1879	1811
1600	3406	3436	3543	3554
1000	6891	6862	6942	6460
500	8465	8304	9046	7742
0	8980	8763	10 827	8536
	6.0%	5.4%	11%	–

الجدول8-20: نتائج حسابات ادائية الانتاج IPR للحالات الاربعة



الشكل8-32 : علاقة ادائية الجريان للبئر لكل الحالات-المثال رقم-9

- معدل الخطأ النسبي *Mean Percent Error-MPE* المذكور في الجدول8-20 ، يُحسب رياضيا كما في المعادلة التالية:

$$MPE = \frac{100\%}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|T_i - E_i|}{T_i} \quad \text{----------} \quad 42$$

إذ ان n هنا تمثل عدد النقاط (عددها في المثال خمسة نقاط) و T-True values والتي تقابل في المثال القيم الحقيقية لمعدلات الجريان عند الضغط المكافىء و E-Expected values ما تقابلها من القيم المتوقعة في الطرق الاخرى.

References – المصادر

1. Amanat U. Chaudhry ،" Gas Well Testing Handbook " ، Advanced TWPSOM Petroleum Systems، Inc. Houston، Texas ، Gulf Professional Publishing ، Copyright © 2003، Elsevier r Inc.
2. Cullender، M.H. 1955. "The Isochronal Performance Method of Determining the Flow Characteristics of Gas Wells" ، Trans.، AIME 204: 137–142.
3. David A. T. Donohue ، Turgay Ertekin، " Gas well Testing Theory، Practice & Regulation" Copyright © 1982 by International Human Resources Development Corporation.
4. Earlougher، R.C. Jr. 1977. Advances in Well Test Analysis، Vol. 5. Richardson، Texas: Monograph Series، SPE.
5. Houpeurt، A. 1959. "On the Flow of Gases in Porous Media". Revue de L'Institut Francais du Petrole XIV (11): 1468–1684.
6. Jacques Hagoort، " Fundamentals of Gas Reservoir Engineering" ، Elsevier Science Publishing Comp. ، 1988.
7. Medhat M. Kamal "Transient Well Testing " Monograph SPE © Copyright 2009 Society of Petroleum Engineers.
8. "Manual of Back-Pressure Testing of Gas Wells" ، A publication of the Interstate Oil and Gas Compact Commission، 2000 EDITION.
9. Rawlins، E.L. ، Schellhardt، M.A.(1936). "Back-pressure Data on Natural Gas Wells and Their Application to Production Practices" ،(US Bureau of Mines Monograph 7).
10. W. John Lee، Robert A. Wattenbarger، " Gas Reservoir Engineering" ،Richardson، TX. 1996.

الفصل التاسع

تفسير فحوصات الابار بمساعدة الحاسوب -Computer aided analysis

1-9 المقدمة:

شهدت تقنيات تفسير فحوصات الآبار تطورًا كبيرًا مع التقدم في الحوسبة العلمية، إذ لم يعد تفسير بيانات الضغط العابر يعتمد فقط على الطرق اليدوية التقليدية مثل المطابقة المباشرة لمنحنيات النوع(Type Curves) ، بل أصبح يعتمد بصورة متزايدة على التحليل الحاسوبي للبيانات واستخدام الخوارزميات العددية. وقد أدى هذا التطور إلى تحسين دقة تفسير الاختبارات وتسريع عملية تحديد خصائص المكمن.

يُعرف هذا النهج باسم التفسير بمساعدة الحاسوب، حيث تُستخدم الحواسيب والبرمجيات المتخصصة لمعالجة بيانات الفحص (الجدول رقم-1)، وتحليل سلوك الضغط، وتطبيق نماذج مكمنية مختلفة بهدف تقدير الخصائص الأساسية للمكمن مثل النفاذية ومعامل الجلد وحدود المكمن. وقد ساهمت هذه التقنيات في تطوير منهجيات تحليل أكثر دقة مثل تحليل المشتقة اللوغاريتمية(Pressure Derivative Analysis) ، الذي أصبح جزءًا أساسيًا من التحليل الحديث لفحوصات الآبار.

يتميز استخدام الحاسوب في تفسير فحوصات الابار بما يلي:

1 - تسريع التقنيات الرسومية التقليدية من خلال السماح بالعرض السريع للرسوم البيانية وإجراء حسابات التقدير القياسية.

2- الدقة العالية في تحليل البيانات باستخدام نماذج رياضية معقدة لا يُمكن تنفيذها يدويًا.

2- إمكانية تحليل كميات كبيرة من البيانات عبر وقت قصير جدًا.

3- التعامل مع نماذج مكمنية معقدة (تشققات طبيعية و صناعية ، معدل متغير باستمرار ,طبقات متعددة، تضرر, الضغط الأولي غير محدد و غيرها).

4- دمج تحليل الفحص مع نتائج النمذجة الجيولوجية والديناميكية مثل برامج المحاكاة المكمنية (Reservoir Simulation).

5- تحسين دقة النتائج عبر استخدام خوارزميات التحسين (Optimization Algorithms) و تقنية فك الالتفاف Deconvolution .

القيود:

1- تعتمد دقة النتائج على صحة النموذج المفترض و جودته.

2- قد يتطلب تفسيرات متعددة للوصول إلى أفضل توافق.

مع ذلك، فان الحاسوب هو اداة بيد المهندس المسؤول عن التفسير يقوم بتوجيهه بحسب الخبرة والدراية الشاملة بتفاصيل المكمن جيولوجيا ومكمنيا. كما إن العرض الواضح والمتسلسل للرسومات البيانية الذي يقوم بها الحاسوب يتطلب من المفسر أن يكون على دراية كافية بمعنى هذه الأشكال و الرسومات البيانية و الاستدلال منها بطبيعة الموديل (المكمن/البئر) . كما يجب أن يكون لديه معرفة مقبولة بالأساس النظري في التفسير، و ماهية العوامل المؤثرة على سلوك النموذج المكمني.

No.	Software	Developer	Description	Key Features	Typical Applications
1	Ecrin	KAPPA Engineering	Integrated dynamic data analysis platform including Saphir، Topaze، Rubis، etc.	Multi-module environment (PTA، RTA، performance، simulation)، unified data workflow.	Field-wide dynamic data integration، from single-well to full-field analysis.
	Saphir	KAPPA Engineering	Industry-standard software for Pressure Transient Analysis (PTA).	Build-up / shut-in test analysis، derivative plots (Bourdet)، horizontal & multilayer models.	Reservoir characterization، permeability and skin estimation، boundary identification.
2	PanSystem ®	Weatherford International	One of the earliest and most widely used well test analysis tools (PTA & RTA).	Large analytical model library، powerful data management، detailed reporting.	Pressure and rate transient analysis in oil and gas fields.
3	Interpret	Paradigm / Emerson	Professional software for well test analysis (DST، WFT، TWT).	Multilayer analysis، interference testing، multi-well analysis.	Complex or multilayer reservoirs and well interference studies.
4	PIE Well-Test	PIE Software	Comprehensive pressure transient analysis package.	Easy-to-use interface، spreadsheet integration، flexible reporting.	Individual well test interpretation and field test data processing.

الجدول9-1 : البرمجيات المتخصصة في تفسير بيانات الفحص

9-2 سير العمل في تفسير فحص الآبارباستخدام الحاسوب (Well Test Interpretation Workflow)

نعرض فيما يلي خطوات سير العمل في تفسير فحوصات الآبار، والتي يُمكن تطبيقها على جميع أنواع الفحوصات باستخدام الحاسوب . مع ملاحظة أن بعض الخطوات قد تتطلب إجراءات إضافية ، بينما قد لا تحتاج بعضها الآخر ذلك. تتضمن الخطوات ما يلي (الجدول 9-2) :

1- جمع البيانات اللازمة للتفسير - Collect the data needed for interpretation.
2- مراجعة جودة البيانات (Quality control - QC) وإعدادها للتفسير.
3- فك بيانات الفحص (Deconvolve test data) .
4- تحديد اطوار الجريان من بيانات الفحص (Identify the flow regimes) .
5- تحديد النموذج المكمني في التفسير (Select the reservoir model) .

Collect Data

Review, QC, and Prepare Data for Interpretation

Review geology, geophysics, and petrophysics
Review well history and offset well data
*Review rate vs. time data
Compare gauge data
  **Synchronize gauges
  **Multiple downhole gauges
  **Wellhead tubing and annulus gauges
*Review *p* and *T* data
  Identify erratic readings
  Identify unexplained noise
*Select primary gauge
  Most accurate gauge?
  Gauge with lowest thermal sensitivity?
  Gauge closest to perfs?
  Gauge with highest frequency data?
*Synchronize rate data with primary gauge
  Identify time/pressure at start of each test period
  Sync rate changes with pressure data
*Convert pressures to midpoint of perforations
Calculate plotting functions
  Pseudopressure/pseudotime functions
  Rate-normalization
  Superposition time functions
Calculate pressure change and derivatives for each test period
**Identify non-reservoir phenomena
  Phase segregation/variable WBS
  Non-Darcy skin factor
  Movement of liquids past gauge
  Tidal effects/diurnal temperature effects
  Gauge precision artifacts
  Interference from offset wells
  Abrupt leaks
Evaluate whether or not test is interpretable

Deconvolve Data

Identify Flow Regimes

*Log-log diagnostic plot
  Radial flow—horizontal derivative
  Linear flow—½ slope
  Volumetric behavior—unit slope
  Spherical flow— –½ slope
  Bilinear flow—¼ slope
Specialized diagnostic plots

Select Reservoir Model

*Engineering data
  Type of completion
  Diagnostic plot
  Flow regime sequence
External data
  *Geology
  *Geophysics
  Petrophysics

Estimate Model Parameters

**Straight-line methods
  Radial flow
  Linear flow
  Volumetric behavior
  Spherical flow
  Bilinear flow
**Log-log methods
  Type-curve analysis
  Manual log-log analysis
*History matching
  **Manual history match
  Automatic history match
Confidence intervals
  *Validate assumptions with residual, lag plots
  If applicable, calculate confidence intervals

Validate Results

*Reality Check
Check consistency between flow periods
  **Wellbore storage
  *Permeability
**Check consistency with previous tests
**Calculate radius of investigation
  Beginning, end of each flow regime
*Simulate pressure response
*Compare simulated and measured pressures
  *Cartesian graph of all flow periods to ensure correct reservoir volume
  *Log-log graph of each test period to ensure correct permeability and skin
  **Semilog graph of each test period
  **Specialized graphs of each test period
Compare estimated with external data

* Required.
** Strongly recommended.

الجدول9-2: خطوات سير العمل في تفسير فحوصات الابار باستخدام الحاسوب John Lee(2013)

6- تحديد معاملات النموذج باستخدام طرق الخط المستقيم (Estimation of parameters characterizing the model)

7- محاكاة و مطابقة التاريخ الانتاجي و استجابة الضغط (Simulate or Match History

to Pressure Response)
8- تحديد فترات الثقة (Calculate confidence intervals)
9- تفسير معاملات النموذج التي تم تحديدها- (Interpret the estimated model parameters)
10- التحقق من صحة النتائج- (Validation of results)
فيما يلي توضيح مختصر لكل خطوة:

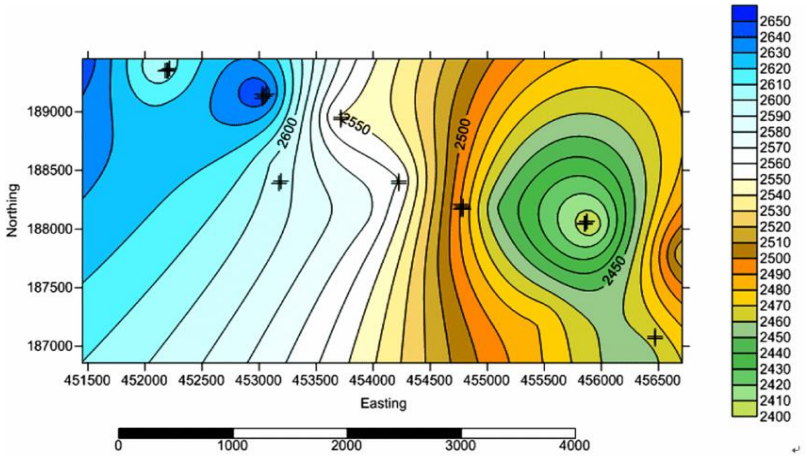
9-2-1 تجميع البيانات :

الجدول9-3 يتضمن البيانات الضرورية المطلوبة في تفسير الفحص . من الممكن تقسيم مصادر البيانات الى عدة مجموعات وهي:

1-الجيولوجيا- الجيوفيزياء :

تُعد مصادر معلوماتية مهمة في تفسير الفحص و تشمل :خرائط تركيبية - structure map الشكل9-1 ، خرائط للسُمك –Isopach map ، المقاطع العرضية cross sections عبر الابار

يستفاد منها في متابعة امتداد الطبقة المفحوصة و فيما اذا كان هنالك اتصال مع الطبقات المجاورة او كونها معزولة. معلومات اخرى : تشمل مثلا نوعية الصخرة كونها كلسية او رملية ، دلائل وجود تشققات ، مؤشرات على وجود الفوالق ، درجة تعقيد المكمن أفقياً و عموديا هذه المعلومات قد توفر اساس مفيد تساعد في تحليل بيانات فحص البئر.



الشكل9-1: خريطة تركيبية لعمق المكمن Structure map

2-البتروفيزياء

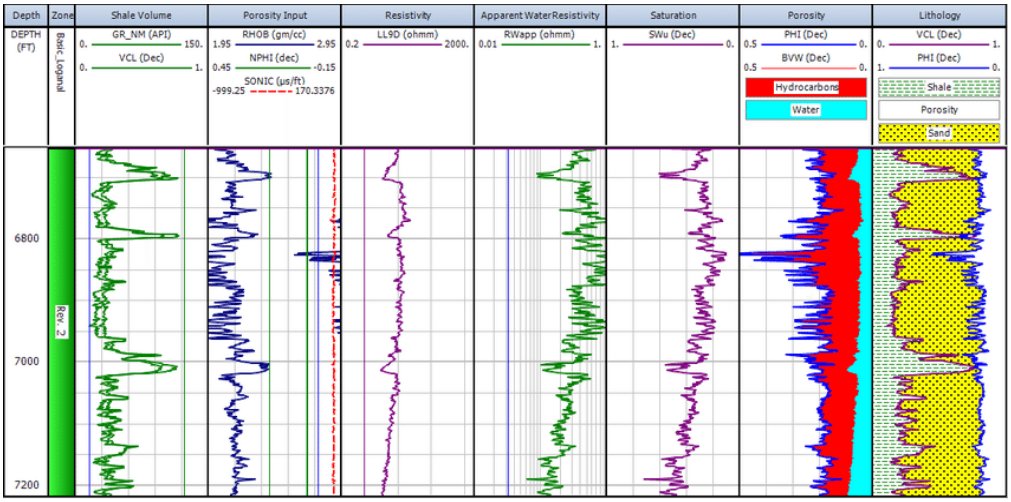
* تفسير مجسات الابار well logs (الشكل9-2): يستفاد منها في تحديد مسامية الطبقة و التشبع المائي و السُمك الصافي و هي بيانات ادخال للبرنامج الجاهز تساهم في اعداد حسابات تفسير الفحص.

*الفحوصات المختبرية للباب الصخري: Core analysis : و ذلك لحساب مثلا النفاذية والمسامية ، الانضغاطية و النفاذية النسبية في المختبر. يُمكن تحديد المعاملات اعلاه من علاقات عامة تجريبية Correlation (الفصل الاول/ في الجزء الاول) كما في تحديد الانضغاطية من مسامية الصخرة (الشكل رقم-9-3).

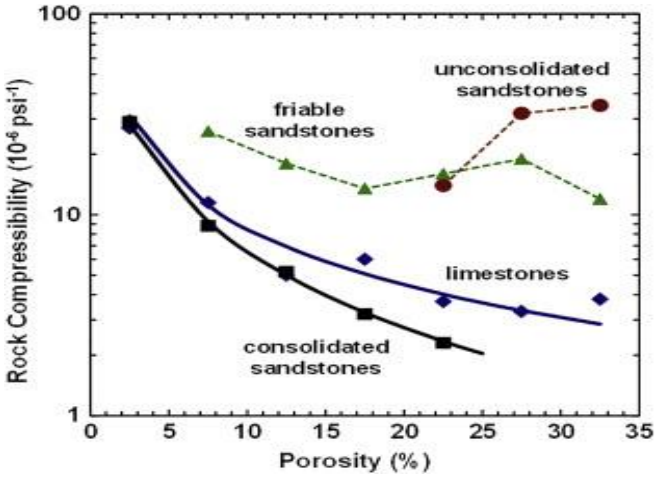
Geology and Geophysics	Rate Data
**Structure maps	*Detailed rate data before test for the least of
Cross Sections	Entire rate history
**Distances to boundaries	10x duration of test
Distances to fluid contacts	Time to reach PSSF
**Expected reservoir or sand body size	User Horner t_p approximation for earlier data
**Evidence of natural fracturing	Well Data
**Evidence of layering	Drilling report
Petrophysics	Mud weight
Logs	**Workover history
Gamma ray or SP	Stimulation treatments
Porosity	Recompletions
Borehole image log	Type of completion
Cement bond log	Type of stimulation
Interpreted logs	Matrix acid
*Average porosity	Hydraulic fracture
*Average fluid saturations	Acid frac
*Net-pay	Type of artificial lift
Lab data	**Wellbore schematic
**Pore volume compressibility	Casing/liners/tubing
Relative permeability data	Packers/bridge plugs
Reservoir Data	Fish
**Temperature	**Toolstring schematic
**Initial pressure	Placement and depth of gauges
**Datum elevation	Location of downhole shut-in tool
Reservoir fluid contacts	Previous pressure-transient tests
Fluid Property Data	Offset wells
Data for correlations—Oil	Bottomhole locations
API gravity	Production/injection history
Gas/oil ratio and gas gravity	Pressure-transient tests
Separator conditions	Test Data
Data for correlations—Gas	**Daily reports
Separator gas gravity	*Rate vs. time (oil, gas, water)
Impurities content	**Flowing and static gradient surveys
Yield and condensate gravity	Gauge Data
Separator conditions	**Gauge type and serial number
Data for parameter estimation	Date of most recent calibration
*Viscosity	*Pressure and temperature vs. time
*Formation volume factor	**Start date/time
*Compressibility	End date/time
**Bubblepoint pressure/dewpoint pressure	

* Required.
** Strongly recommended.

الجدول9-3: البيانات الضرورية لتفسير الفحص John Lee(2013)



الشكل9-2: تفسير مجسات الابار well logs



الشكل9-3: تحديد انضغاطية الصخرة

3-البيانات المكمنية:

و هي مطلوبة و ضرورية لتفسير بيانات الفحص و تشمل :

درجة حرارة المكمن ، الضغط المكمني الاصلي (من مصادر اخرى غير الفحص) ، سُمك الطبقة ، مستوى العمق المرجعي Datium level و ذلك لتصحيح الضغط المقاس الى عمق مقياس الضغط Guage ، مستويات تماس الموائع: منها يُمكن تحديد الاعماق المتوقع ان تتغير عندها نسب الانتقالية Mobility ratio .

4- بيانات المائع: اهم هذه الخواص هي ثلاثة تشمل المعامل الحجمي للموائع ، اللزوجة والانضغاطية . يُمكن الحصول عليها اما من علاقات تجريبية عامة منشورة (الفصل الاول/الجزء الاول) او من نتائج الفحوصات المختبرية .

5- بيانات تاريخ الانتاج قبل الفحص Well Production history .

6- بيانات البئر و تشمل:-تاريخ استصلاح البئر ، نوع الاكمال، الرفع الصناعي ، مخطط تجويف البئر، تقارير فحوصات البئر السابقة قد توفر معلومات مفيدة حول خصائص المكمن و تضرر البئر و المشاكل التي تمت مواجهتها اثناء الفحوصات السابقة.

7-بيانات الفحص:.

يجب أن تتضمن بيانات الفحص تقرير تصميم الفحص ، التقرير اليومي لمراحل الفحص ، حجم فتحة الخانق ،معدلات الجريان أو حجم الموائع مع الوقت ، مخطط للمعدات السطحية المستخدمة أثناء الفحص وبيانات الضغط المقاسة مع الوقت.

8- بيانات مقاييس الضغط.

عادة ما يتم تثبيت اثنان او ثلاثة من معدات قياس الضغط gauges داخل البئر و بمستويات مختلفة و ذلك لاجل الدقة في قراءات بيانات الضغط مع ذكر موضع و عمق كل مقياس للضغط.

2-2-9 مراجعة البيانات وضبط الجودة:

التاكد والتحقق من جودة و صحة البيانات المقاسة تعتبر من الخطوات المهمة قبل المباشرة بتفسير بيانات الفحص. يوصي مطر و سانتو Mattar and Santo (1992) بضرورة قضاء 50٪ من وقت المفسر في فحص البيانات الأولية والتحقق من صحتها و في مدى التوافق فيما بينها، و تشمل:

1- تقدير الأخطاء في خواص الصخور والموائع:

أحد المصادر الأولية للأخطاء في حساب المعاملات عبر تفسير فحص البئر هو عدم اليقين uncertainties في بيانات الإدخال. مثال في تحديد المعامل k ، يتطلب مراجعة دقة المعلومات الداخلة في حساب النفاذية كلا على حدة و تحديد ايا منها الاكثر تاثيرا على نتائج الفحص .

Input	Results				
	k_{calc}	$C_{wb\ calc}$	s_{calc}	$L_{x\ calc}$	A_{calc}
$\mu_{in} = \alpha\ \mu_{true}$	$\alpha\ k_{true}$	—	—	—	—
$\phi_{in} = \alpha\ \phi_{true}$	—	—	$s_{true} + 0.5\ln(\alpha)$	$L_{x\ true}/\alpha^{½}$	A_{true}/α
$c_{t\ in} = \alpha\ c_{t\ true}$	—	—	$s_{true} + 0.5\ln(\alpha)$	$L_{x\ true}/\alpha^{½}$	A_{true}/α
$h_{in} = \alpha\ h_{true}$	k_{true}/α	—	$s_{true} + 0.5\ln(\alpha)$	$L_{x\ true}/\alpha^{½}$	A_{true}/α
$q_{in} = \alpha\ q_{true}$	$\alpha\ k_{true}$	$\alpha\ C_{wb\ true}$	$s_{true} - 0.5\ln(\alpha)$	$\alpha^{½}\ L_{x\ true}$	$\alpha\ A_{true}$
$B_{in} = \alpha\ B_{true}$	$\alpha\ k_{true}$	$\alpha\ C_{wb\ true}$	$s_{true} - 0.5\ln(\alpha)$	$\alpha^{½}\ L_{x\ true}$	$\alpha\ A_{true}$
$r_{w\ in} = \alpha\ r_{w\ true}$	—	—	$s_{true} + \ln(\alpha)$	—	—

الجدول9-4: تاثير الاخطاء في بيانات الادخال Input data على نتائج تفسير الفحص

Spivey and Pursell(1988)

بورسيل و سبيفي Spivey and Pursell (1998) لخصا في الجدولين9-4 و 9-5 تاثير الاخطاء قي بيانات الادخال على نتائج تفسير فحص البئر العمودي في مكمن متجانس و متماثل الخواص بوجود حد واحد خارجي أو أكثر One boundry or more . العمود الاول في الجدول9-4 يتضمن بيانات الادخال في الفحص بنسب عدم يقين و تساوي القيمة الصحيحة مضروبة بنسبة الخطا α و الاعمدة اللاحقة في الجدولين اعلاه تبين تاثيرات ذلك الخطا على المعاملات المحسوبة من الفحص (مثل : النفاذية k_{calc} ، معامل تخزين جوف البئر$C_{WB\ calc}$ ، عامل القشرة S_{calc}، المسافة الى حدود المكمن $L_{x\ calc}$ و مساحة منطقة تصريف البئر A_{calc}. فمثلا الخطأ في ادخال لزوجة المائع بنسبة $0.8\mu_{true}$ (اعلى او اقل) من القيمة الصحيحة سيؤثر على النفاذية المحسوبة فقط و بنفس نسبة الخطأ و لا يؤثر على حسابات $C_{WB\ calc}$ و S_{calc} .. .

Input	Results			
	$V_{p\ calc}$	$V_{b\ calc}$	A_{calc}	N_{calc}
$\phi_{in} = \alpha\,\phi_{true}$	—	$V_{b\ true}/\alpha$	A_{true}/α	—
$c_{t\,in} = \alpha\,c_{t\,true}$	$V_{p\ true}/\alpha$	$V_{b\ true}/\alpha$	A_{true}/α	N_{true}/α
$h_{in} = \alpha\,h_{true}$	—	—	A_{true}/α	—
$q_{in} = \alpha\,q_{true}$	$\alpha\,V_{p\ true}$	$\alpha\,V_{b\ true}$	$\alpha\,A_{true}$	$\alpha\,N_{true}$
$B_{in} = \alpha\,B_{true}$	$\alpha\,V_{p\ true}$	$\alpha\,V_{b\ true}$	$\alpha\,A_{true}$	—
$(1-S_w)_{in} = \alpha\,(1-S_w)_{true}$	—	—	—	$\alpha\,N_{true}$

الجدول9-5: تاثير الاخطاء في بيانات الادخال input data على نتائج تفسير الفحص Spivey and Pursell(1988)

في حين ان الخطأ في حساب السُمك الصافي للطبقة لا يؤثر على نفاذيتها k فحسب بل و يؤثر أيضًا على عامل القشرة و على حساب المسافة إلى حدود المكمن و على مساحة منطقة تصريف البئر و بنسب كما مذكورة في الجدول9-4 في اعلاه.

الجدول9-5 يُوضح تاثير أخطاء بيانات الإدخال على الحجوم المحسوبة و هي الحجم المسامي $V_{p\ calc}$، الحجم الكلي للمكمن $V_{B\ calc}$، مساحة منطقة تصريف البئر A_{calc} و حجم المخزون النفطي N_{calc} و التي تساوي على التوالي:

$$V_p = A\phi h = \frac{0.234qB}{|m_{pss}|c_t}, \quad \text{---------- 1}$$

$$N = \frac{V_p(1-S_w)}{5.615B} = \frac{q(1-S_w)}{24|m_{pss}|c_t}. \quad \text{---------- 2}$$

$$A = \frac{V_p}{\phi h}. \quad \text{---------- 3}$$

إذ ان:

Ø = porosity ، fraction، N = initial oil in place ، STB ،q = flow rate ، STB/D،

Sw = water saturation، fraction، h = net-pay thickness، ft ، c_t = total compressibility، psi^{-1} ، A = drainage area، ft^2 ، B = formation volume factor، bbl/STB، Vp = reservoir pore volume، ft3 ، mpss = slope of cartesian straight-line during semistate flow،

ان التقديرات الخاطئة للانضغاطية في الجدول9-5 تتسبب في تقديرات خاطئة في كل الحجوم المحسوبة و الى حجم الخزين الهيدروكاربوني في حين ان تشبع النفط (1-Sw) الخاطىء سيعقبه حسابات خاطئة تنحصر فقط في نتائج حجم الخزين الهيدروكاربوني.

لاحظ ان انضغاطية الصخور الصلبة و التي لها مسامية في حدود 20 إلى 30٪ عادة ما تكون قيمتها بحدود 4×10^{-6} psi^{-1}. في حين انضغاطية الصخور غير صلبة تكون اعلى و تتراوح قيمتها ما بين $50\text{-}150\times10^{-6}$ psi^{-1}.

2- مراجعة بيانات الانتاج (بيانات الضغط و معدلات الجريان) مع الوقت:

و تمثل الخطوة الأولى في التحقق من جودة البيانات إذ يتم ذلك عبر رسم بيانات الانتاج والضغط مع الوقت على مخطط بياني بمقياس عادي cartesian. خلال مراجعة البيانات من المهم الاجابة على السؤال الاتي ،هل البيانات متكاملة و غير مقطوعة؟ هل توجد آبار قريبة من البئر تؤثر على قراءة و استجابة الضغط اثناء الفحص؟ ان اسوء حالة هي عندما تكون مدة إنتاج الابار المجاور مدة طويلة بحيث تؤثر و تتداخل مع قياسات بئر الفحص المعني .

3- مقارنة بيانات اجهزة قياس الضغط:

عندما تكون هنالك عدد من أجهزة (معدات) قياس الضغط مثبتة داخل البئر و باعماق مختلفة ، فيجب مقارنة بيانات القياس المسجلة عند جميع أجهزة القياس. والاخذ بنظر الاعتبار الامور الاتية:

- أي مقياس لديه استجابة سريعة و استقرارية؟
- ما هو المقياس الأقل حساسية لتقلبات درجات الحرارة؟
- ما هو المقياس الأقرب إلى مناطق التثقيب؟
- حدد البيانات المكتملة المطلوبة و مع اي جهاز قياس؟

4- مزامنة بيانات معدلات الجريان مع قياسات الضغط.

عادة ما يتم تسجيل بيانات الضغط بمعدات قياس ذات تردد أعلى بكثير(عادة ما يكون الفاصل في قراءات الضغط ما بين 1 الى 15 ثانية) مما لبيانات الجريان ، لذا يُستفاد من هذه الميزة في تحديد بدايات فترات الجريان وفترات إلاغلاق بدقة أكبر.

نقوم بمزامنة (مطابقة) سجل تاريخ الانتاج مع الضغط بحيث تتزامن بداية كل من فترات الجريان و الغلق مع بيانات الضغط المقاسة. في بعض الحالات ، قد تظهر في بيانات الضغط وجود فترات تغير بالضغط لا يقابلها اي تغير في سجل معدلات الجريان او لم يتم تسجيلها بشكل واضح في سجل معدلات الجريان. هنا من الممكن حساب او تقدير تلك التغييرات بمعدلات جريان من فترات

جريان أخرى مسجلة بوضوح.

5- حساب دوال الرسم Calculate Plotting Functions

تشتمل رسومات الفحص للابار النفطية على علاقات مختلفة مثل معدل الجريان و الضغط مع الوقت او تغيير الضغط و مشتقة الضغط (مشتقة بورديت)، او توحيد الانتاج Rate-normalized pressure تُرسم على الاحداثي الصادي مع الوقت او مع وقت هورنر او الوقت المكافئ أغاروال للجريان المتغير Agarwal multirate على الاحداثي السيني. بالنسبة لفحوصات الابار الغازية قد تشتمل الرسومات على علاقة مربع الضغط أو الضغط المكافىء أو او تطبيع الانتاج Rate -normalized pressure مع الوقت او مع وقت هورنر المصحح او الوقت المكافىء . ان كل رسم من الرسومات اعلاه يمثل موديلات مكمنية بدوال رياضية مختلفة . برغم من ان الحاسوب يقوم بالرسم و اجراء الحسابات ذات العلاقة ، لكن عليك أن تعرف ولديك الخبرة الكافية في معرفة ما هية انواع الرسومات و ما هي الدوال التي اعتمدها في الرسم البياني ، وكيف للبرنامج ان يحسبها وحدود limits كل رسم و الأهم من ذلك كله في معرفة الهدف من كل رسم بياني.

6- تحديد الظواهر غير المكمنية Identify Non-Reservoir Phenomena

كثير من الأحيان لا يُمكن التعرف بسرعة على بعض الظواهر غير مكمنية والتي لا تظهر عبر الرسم البياني العادي ، لكن يُمكن تمييزها من منحنى مشتقة الضغط المرسوم باحداثيات لوغاريتمية. من هذه الظواهر غير المكمنية:

❖ ظاهرة تخزين جوف البئر WBS

يتم تمييز ظاهرة WBS من خط ميل الواحد (زاوية 45^{o}) في الرسم البياني اللوغاريتمي لمشتقة الضغط ثم نحدد اسباب فيما لو كانت WBS متغيرة variable حيث من الممكن ان تكون ناجمة عن احد الاسباب الاتية: تغيير مفاجئ في معامل تخزين جوف البئر WBS أو انفصال segregation الموائع في باطن البئر أو نتيجة لتأثيرات حرارية.

❖ عامل القشرة بتاثير- اللا دارسي Non Darcy effect

بوجود عامل قشرة كبير موجب عبر فحص تصاعد او هبوط الضغط فان ميل منحني مشتقة الضغط في المنطقة الانتقالية بعد WBS يكون اكثر شدة في الانحدار ، فإذا كان الأمر كذلك قد يكون البئر تحت تاثير عامل قشرة - اللا دارسي.

❖ عدم انتظام قراءات الضغط Pressure Oscillations

نلاحظ ، هل هناك تذبذبات و عدم انتظام في قراءات الضغط في آبار النفط و التي تنتج بمعدلات عالية ، قد تحدث تذبذبات في قراءات الضغط لمدة قصيرة (عادة أقل من دقيقة لكل دورة Less than a minute per cycle) لا تلبث ان تتلاشى . في المناخات التي توجد فيها اختلاف كبير في درجة حرارة رأس البئر بين النهار والليل، قد تتسبب تقلبات درجة الحرارة اليومية ايضا في تذبذبات غير منتظمة ضمن المدى 24 ساعة.

❖ دقة مقياس الضغط

السلوك غير الطبيعي في منحني مشتقة الضغط ينجم اما بسبب مستوى الدقة في مقياس الضغط أو في طريقة حساب المشتقة نفسها. لذا يجب مراجعة بيانات الضغط المقاسة و المقابلة لأي أثر

غير طبيعي مشتبه به في المشتقة بعناية و تحديد فيما اذا كانت تمثل ظاهرة فيزيائية أم أنها نتيجة لخطا في العمليات الحسابية.

❖ نضوح مفاجئ

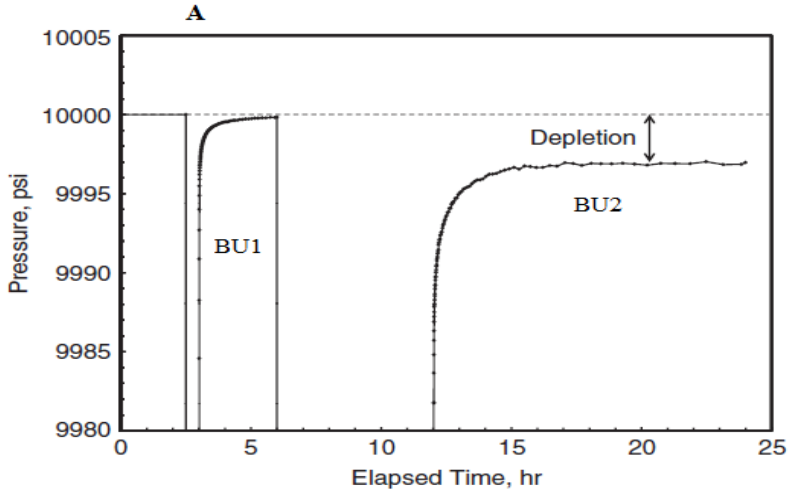
ان اي تغيير مفاجئ في قراءات الضغط ، او في ميل الضغط ، أو في ميل مشتقة الضغط سيكون ناتجًا عن ظاهرة غير طبيعية في جوف البئر و ليس من جراء السلوك المكمني. إذ قد يحدث نضوح مفاجئ في أي وقت أثناء الفحص و ذلك إما بسبب عطل ميكانيكي أو بسبب فتح الصمام من دون قصد.

7- معالجة الظواهر غير المكمنية.

بمجرد تحديد و حصر بعض الظواهر في كونها غير مكمنية ذلك يتطلب ان نجد لها تفسيرا مقبول. هنالك ثلاثة خيارات للتعامل مع هذه الظواهر وهي:

(1) اما نتجاهلها ، (2) ننظمها بموديل (3) إزالتها من بيانات الفحص.

ببساطة و في كثير من الحالات بالامكان ابعاد اي بيانات عن تفسير الفحص متأثرة بهذه الظواهر. هذا يكون ممكنًا فقط عندما تستغرق الظاهرة هذه مدة زمنية قصيرة وتحدث في وقت مبكر من الفحص إذ تتسبب في تغيير مؤقت في الضغط. و قد يكون من الضروري و في حالات قليلة اجراء تصحيح البيانات لإزالة آثار الظاهرة. على سبيل المثال ، يُمكن أن يتسبب مستوى السائل المتحرك بين مقياس الضغط و التثقيب في إحداث توازن دائم في الضغط ما بين الوقت الذي تم فيه تسجيل ضغط الجريان p_{wf} الأخير قبل الإغلاق والوقت أثناء تصاعد الضغط . اذا لم يتم تصحيح البيانات لتأثيرات حركة السوائل ، فإن بقاء الضغط الطارىء اعلاه سيؤدي إلى تقدير خاطىء بعامل القشرة.

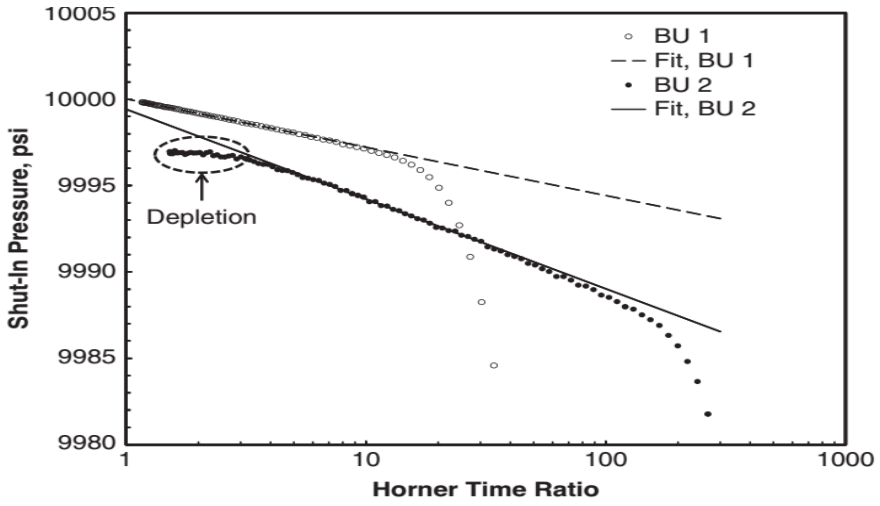


الشكل9-4: مثال فحص DST لبئر غازي

8- البحث عن مؤشر التداخل من آبار مجاورة لبئر الفحص.

تاثير التداخل Interference الناجم عن الإنتاج أو الحقن من بئر مجاور على بيانات الفحص يكون ضئيلًا و مهملا في الوقت المبكر من الفحص ويكون أكثر وضوحًا في نهاية الفحص.

الشكل رقم-4.9 يُوضح بيانات الفحص الطبقي Drill Stem Test-DST لبئر غازي استكشافي. هنالك فترتي جريان و فترتي غلق لفحص تصاعد الضغط BU1،BU2 . ان التداخل من بئر منتج مجاور سيتسبب في افقية (تسطيح) منحني الضغط اي حصول هبوط بالضغط (Depletion) عن الضغط الاصلي للمكمن كما موضح في مرتسم هورنر في الشكل 9-5. اما تاثير التداخل من بئر حقن مجاور سيتسبب في ان الضغط يرتفع اسرع و ربما اعلى مما لو لم يكن هنالك اي تداخل.



الشكل 9-5: رسم هورنر لبيانات فحص تصاعد الضغط للفترتين الاولى والثانية

9-2-3 فك بيانات الفحص (Deconvolve test data).

(Deconvolve test data)أو عملية الـ Deconvolution في فحص الآبار تعني" إلغاء الالتفاف "أو فك الارتباط الرياضي بين ضغط البئر ومعدل الجريان المتغير(الفصل الخامس). و ببساطة، تمثل تقنية رياضية متقدمة تُستخدم لتحويل بيانات الضغط الناتجة عن معدلات جريان متغيرة أو متذبذبة إلى استجابة ضغط كما لو كان البئر يتدفق بمعدل ثابت واحد طوال فترة الفحص.

في الفحوصات التقليدية، نركز على فترة الإغلاق (Build-up) لأن تحليلها أسهل. تسمح الـ Deconvolution للمهندس بـ:

- استغلال كامل البيانات بدمج فترات الجريان والإغلاق معاً في منحنى واحد شامل.
- تعطي رؤية أبعد في المكامن حيث تُزيد من نطاق الرؤية (Radius of Investigation)، مما يساعد في اكتشاف حدود المكمن (Boundaries) التي قد لا تظهر في فحص الإغلاق القصير.
- تُحسن جودة التشخيص حيث تعطي منحنى (Derivative) أكثر وضوحاً وأقل ضجيجاً (Noise)، مما يسهل عملية مطابقة النموذج.(Model Matching) .

تقوم البرمجيات الحديثة بمعالجة بيانات الضغط والوقت (Pressure-Time data) باستخدام خوارزميات رياضية (مثل خوارزمية Von Schroeter) لتحويل التاريخ المعقد للجريان إلى دالة استجابة الوحدة(Unit Rate Response) . باختصار فك الالتفاف هي عملية تنظيف وتوحيد للبيانات تجعل من الممكن رؤية خصائص المكمن البعيدة وكأننا أجرينا فحصاً مثالياً بمعدل تدفق ثابت لفترة طويلة جداً.

4-2-9 تمييز اطوار الجريان Identify Flow Regimes

يتمثل الإجراء المتبع في العديد من التحليلات بمساعدة الكمبيوتر في اتباع خطوط النهج التقليدية بقدر ما تكون قابلة للتطبيق، ثم توسيع التفسير باستخدام القدرات الإضافية التي يسمح بها النهج بمساعدة الكمبيوتر. وتكمن ميزة البدء بالتحليل على أسس تقليدية في أن التقنيات مألوفة للمهندس المشارك في العمل، ولا يتم التخلي عن الخبرة المكتسبة على مدى سنوات عديدة من تفسير الآبار التقليدية.وهكذا يظل التفسير بمساعدة الكمبيوتر معتمد على العروض الرسومية (في الواقع قد تقتصر أبسط المساعدة المقدمة بواسطة الكمبيوتر على ذلك).

ان تشخيص اطوار الجريان تُعد الخطوة المهمة في التفسير و الاداة المستخدمة في ذلك هي من الرسومات التي يقوم الحاسوب باعدادها و عرضها. من اهم هذه الرسومات هي الرسومات التشخيصية اللوغاريتمية Diagenestic plots والتي تعتمد تطابق احسن الخطوط المستقيمة الممكنة و المنحنيات المارة بنقاط الفحص. ان الرسومات و العروض البيانية غالبا ما تكون اسهل فهما مما تعرضه الجداول و الارقام. و عادة ما يقوم الحاسوب (او البرنامج الجاهز) بهذه المهمة نيابة عن المفسر حيث تتضمن اعداد الحسابات الخاصة بالرسومات و حسب متطلبات كل رسم ثم رسمها. كمفسر فمن الضروري ان يكون ملما بمهام ، انواع تلك الرسومات و الاشكال الناتجة عنها.

الجدول9-6 يتضمن بعض انواع الرسومات العامة المطلوبة عند تفسير بيانات الفحص في ظروف جريان مختلفة و المؤشرة ازاء كلا منها .الرسومات في الفقرتين الاتية تندرج ضمن الرسومات العامة المذكورة في الجدول و الفقرة التي تليها تُعتبر من الرسومات الخاصة .

ندرج ادناه و بنبذة مختصرة لاهم الرسومات التي تُستخدم في تفسير فحوصات الابار :

Flow Period	Characteristic	Plot
Inifinite acting radial flow (drawdown)	Semilog straight line	p vs $\log\Delta t$ (MDH plot)
infinite acting radial flow (buildup)	straight line p vs $\log(t_p + \Delta t)/\Delta t$	p vs $\log(t_p + \Delta t)/\Delta t$ (Horner plot)
wellbore storage	straight line p vs t unit slope $\log\Delta p$ vs $\log\Delta t$	$\log\Delta p$ vs $\log\Delta t$ (log-log type curve)
finite conductivity fracture	straight line slope ¼ $\log\Delta p$ vs $\log\Delta t$	$\log\Delta p$ vs $\log\Delta t$, or Δp vs $\Delta t^{1/4}$
infinite conductivity fracture	straight line slope ½ $\log\Delta p$ vs $\log\Delta t$	$\log\Delta p$ vs $\log\Delta t$, or Δp vs $\Delta t^{1/2}$
double porosity effects	S-shaped transition between semilog straight lines	p vs $\log\Delta t$ [difficult]
closed boundary	pseudosteady state, pressure linear with time	p vs Δt (Cartesian plot)
impermeable boundary	doubling of slope on semilog straight line	p vs $\log\Delta t$ (MDH plot)
constant pressure boundary	constant pressure flat line on all p/t plots	any

الجدول9-6: انواع الرسومات التشخيصية لمختلف اطوار الجريان ازائها

أ- الرسومات نصف لوغاريتمية Semi-log plot و الرسومات الديكارتية Cartesian plot

تُعد الرسومات نصف لوغاريتمية و الرسومات الديكارتية من الطرق التقليدية المهمة و السهلة في

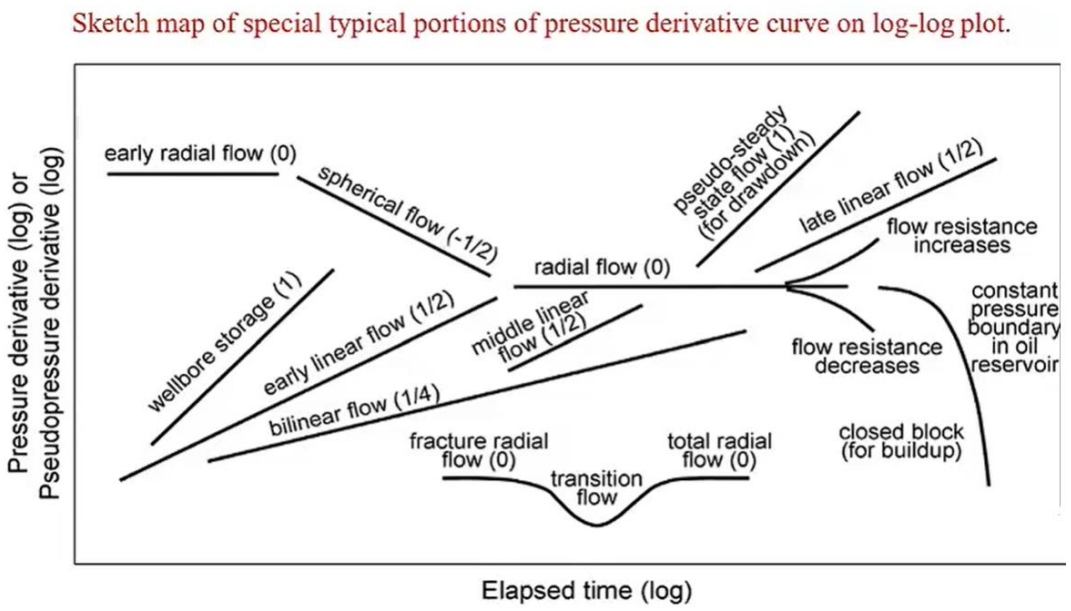
تحديد اطوار الجريان و في تفسير فحوصات الابار . ادرجت في الجدول9-6 انواع الرسومات التشخيصية و قد سبق التطرق لها تفصيلا في الفصول السابقة. مثال على ذلك عند فحص هبوط الضغط و لطور الجريان الشعاعي (العمود الاول الايسر في الجدول9-6) نرسم بيانات الفحص (ضغط الجريان مع الوقت - العمود الثالث) على احداثيات نصف لوغاريتمية بطريقة MDH . نحصل على خط مستقيم و من الميل ممكن حساب نفاذية و عامل القشرة.

ب- الرسم التشخيصي اللوغاريتمي - Log-Log Diagnostic Plot

يشتمل الرسم على علاقة لوغاريتمية لمُنحنيين: مشتقة الضغط نسبة للوقت (Bourdet t(dp/dt) derivative) مقابل الوقت Δt و فرق الضغط Δp مقابل الوقت Δt . يُعد الرسم البياني التشخيصي اللوغاريتمي (log-log Diagnostic plot) أفضل أداة متاحة حاليًا لتحديد أطوار الجريان المختلفة (اطوار الجريان الشعاعي، الكروي، الخطي، وغيرها).

كل طور من أطوار الجريان هذه يُظهر سلوكًا مميزًا عند المخطط اللوغاريتمي. الشكل 9-6 يُوضح ملخصًا لأشكال العديد من أطوار الجريان التي تظهر عبر فحوصات الآبار، والتي سنتطرق إليها بشكل مختصر كل على حدة في الفقرات اللاحقة.

على سبيل المثال في الشكل 9-6 و في الفترة المتأخرة من الفحص يعطي الرسم البياني التشخيصي اللوغاريتمي خطًا مستقيمًا بميل واحد في مكمن مغلق عند الجريان شبه المستقر Pseudo Steady State-PSS و يظهر ميل الواحد ايضا في الفترة المبكرة من الفحص ليعكس تاثير تخزين البئر Well Bore Storage-*WBS* . في حين يعطي خطًا مستقيمًا أفقيًا في الفترة المتوسطة ليعكس فترة تاثير طور الجريان الشعاعي اللامستقر Un-Steady State-USS . كما يُعطي خطًا مستقيمًا بميل نصف أو ربع في الأوقات المبكرة من فحص المكامن المتشققة هيدروليكيًا (Hydraulic fractures reservoir) عند طور الجريان الخطي (linear flow) أو الجريان الخطي الثنائي (bilinear flow).

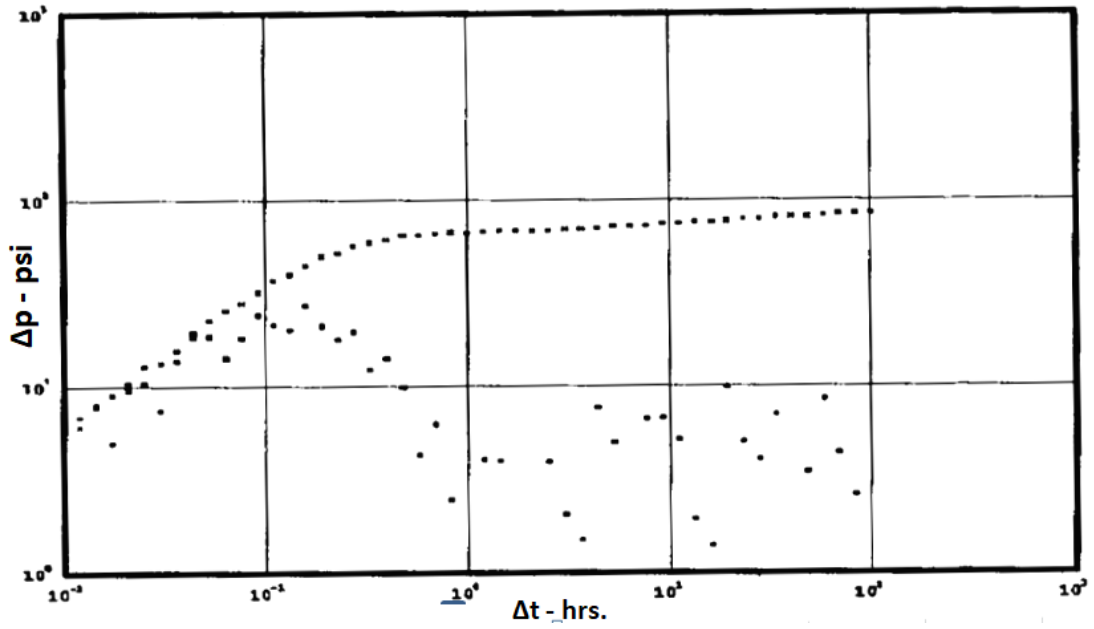


الشكل9-6: الرسم التشخيصي اللوغاريتمي المثالي للعديد من اطوار الجريان

ان حساب مشتقة الضغط بشكل صحيح تحتاج بعض الاهتمام لكون العملية المغلوطة في حساب الاشتقاق ستزيد من تذبذب البيانات (الشكل9-7) و بالنتيجة ستُضعف نتائج التفسير.

يُمكن استخدام مشتقة الضغط للاساس لوغاريتم الوقت(مشتقة بورديت) و ذلك لتقليل التذبذب و انتشار النقاط اللانظامي في رسم المشتقة . عملية الحساب العادية للمشتقة foreword تتم باعتماد نقاط متجاورة كما في المعادلة في ادناه:.

$$t\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_i = t_i\left[\frac{(t_i - t_{i-1})\Delta p_{i+1}}{(t_{i+1} - t_i)(t_{i+1} - t_{i-1})} + \frac{(t_{i+1} + t_{i-1} - 2t_i)\Delta p_i}{(t_{i+1} - t_i)(t_i - t_{i-1})} - \frac{(t_{i+1} - t_i)\Delta p_{i-1}}{(t_i - t_{i-1})(t_{i+1} - t_{i-1})}\right] \quad \text{---------- 4}$$



الشكل9-7: تذبذب البيانات عند رسم منحني مشتقة الضغط

او المشتقة للاساس اللوغاريتم تساوي:

$$t\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_i = \left(\frac{\partial p}{\partial \ln t}\right)_i$$

$$= \left[\frac{\ln(t_i / t_{i-1})\Delta p_{i+1}}{\ln(t_{i+1} / t_i)\ln(t_{i+1} / t_{i-1})} + \frac{\ln(t_{i+1} t_{i-1} / t_i^2)\Delta p_i}{\ln(t_{i+1} / t_i)\ln(t_i / t_{i-1})} - \frac{\ln(t_{i+1} / t_i)\Delta p_{i-1}}{\ln(t_i / t_{i-1})\ln(t_{i+1} / t_{i-1})}\right] \quad \text{---------- 5}$$

ان !بعاد نقاط الفحص عن بعضها البعض يساهم في تقليل التذبذب ، إذ لا يُفضل اختيار النقاط المتعاقبة المتقاربة عن بعضها البعض و يُفضل ان تبتعد بمقدار 0.2 time log cycle و تحقق الشرط الاتي(الشكل9-8):

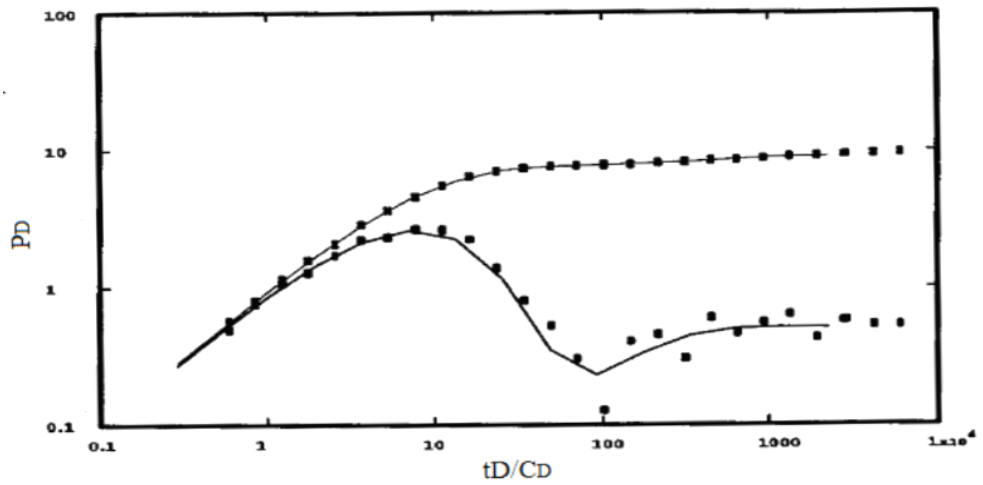
$$\ln t_{i+1} - \ln t_i \geq 0.2 \text{ ---------- } 6$$

$$\ln t_i - \ln t_{i-1} \geq 0.2 \text{ ---------- } 7$$

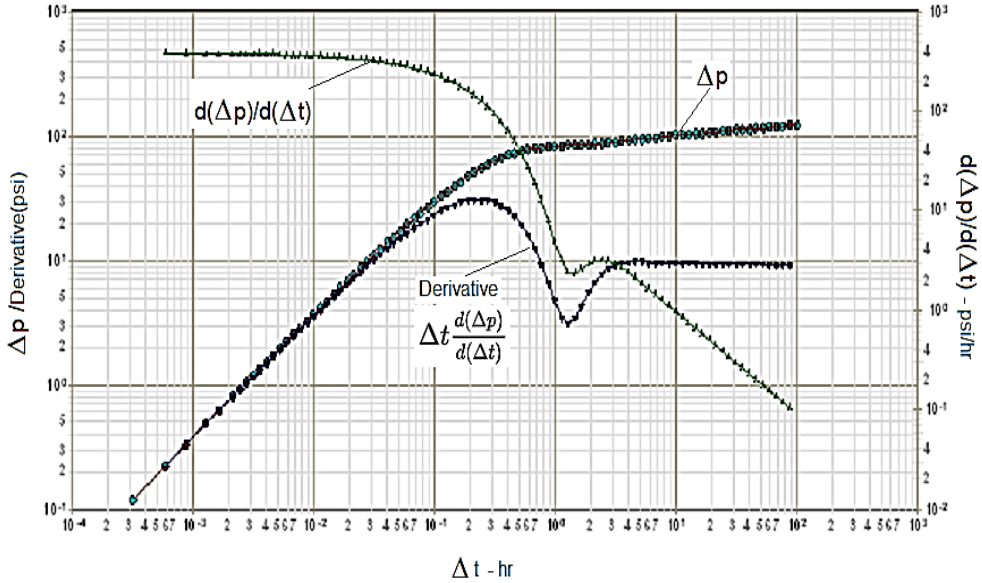
الشكل9-9 يُوضح الفرق ما بين مشتقة الضغط *Der* للاساس لوغاريتم الوقت والتي تساوي:

$$Der = \frac{d(\Delta p)}{d(\log \Delta t)} = \Delta t \frac{d(\Delta p)}{d(\Delta t)} \text{ ---------- } 8$$

و بين مشتقة الضغط العادية للاساس الوقت و تساوي *(dp/dt) or d(Δp)/d(Δt)*.



الشكل9-8: استقرار البيانات بعد تقليل التذبذب باستخدام المسافة 0.2 time log cycle



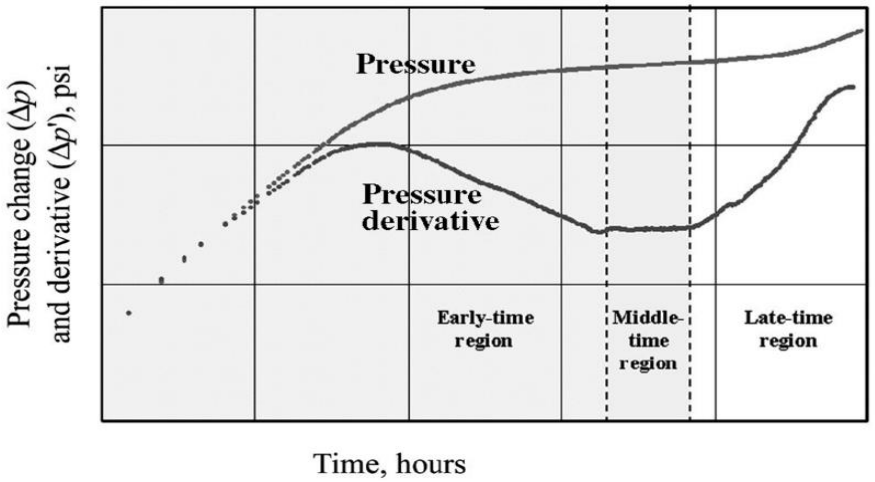
الشكل9-9: مقارنة منحني مشتقة الضغط العادي و منحني مشتقة الضغط للاساس لوغاريتم الزمن

باستخدام المشتقة اللوغاريتمية (الشكل9-10) ممكن ان نُميز ثلاث فترات او ثلاث مناطق للجريان: المنطقة او الفترة المبكرة Early Time Region -ETR او فترة تخزين البئر و الوسطى Middle Time Region MTR او فترة طور الجريان الشعاعي و المتأخرة Late Time Region LTR او فترة طور الجريان شبه المستقر.

ت- الرسومات او المخططات اللوغاريتمية الخاصة:

تشتمل على نوعين من الرسومات اللوغاريتمية و هي:

- مخطط الخط المستقيم في تشخيص طور الجريان Specific Flow-Regime Straight-Line Plots
- المخططات الخاصة في تشخيص اطوار الجريان Flow-Regime Specific Diagnostic Plots



الشكل9-10: تقسيم فترات الفحص الى ثلاث مناطق

Flow Regime	Slope of Logarithmic Derivative on Log-Log Diagnostic Plot	Flow Regime-Specific Derivative Log-Log Diagnostic Plot	Flow Regime-Specific Straight-Line Analysis Plot
Radial flow	0	$\frac{dp}{d\ln t}$ vs. t	p vs. log$t$
Linear flow	1/2	$\frac{dp}{dt^{1/2}}$ vs. t	p vs. $t^{1/2}$
Volumetric behavior	1	$\frac{dp}{dt}$ vs. t	p vs. t
Spherical flow	–1/2	$\frac{dp}{dt^{-1/2}}$ vs. t	p vs. $t^{-1/2}$
Bilinear flow	1/4	$\frac{dp}{dt^{1/4}}$ vs. t	p vs. $t^{1/4}$
Radial stabilization	–1		
Linear stabilization	–1/2		
Spherical stabilization	–3/2		

الجدول9-7: الرسومات البيانية التشخيصية الخاصة لتحديد بعض انواع اطوار الجريان.

الجدول9-7 يلخص اهم انواع اطوار الجريان التي تظهر عبر فحص الابار و الرسومات البيانية التشخيصية المصاحبة لها. العمود الاول الايسر يتضمن بعض انواع اطوار الجريان ، العمود الثاني يتضمن كيفية تشخيص اطوار الجريان في الرسم التشخيصي اللوغاريتمي المذكور في الفقرة- ب , والتي تظهر علاقات على شكل خطوط مستقيمة بميول مختلفة و العمود الثالث و الرابع يتضمن الرسومات اللوغاريتمية التشخيصية الخاصة.

ان طريقة رسم المخطط البياني التشخيصي اللوغاريتمي هو واحد بالنسبة لجميع اطوار الجريان ، في حين رسم المخططين التشخيصيين الثاني و الثالث يُستخدمان مع اطوار جريان معينة مثل رسم علاقة p vs $\Delta t^{1/2}$ على احداثيات عادية في تشخيص طور الجريان الخطي.

ث- العلاقات الرياضية العامة في تشخيص اطوار الجريان Power-Law Function Pressure Response

ان علاقة فرق الضغط مع الزمن لكل اشكال اطوار الجريان يُمكن ان نلخصها في المعادلة الاتية:

$$\Delta p = m_n t^n + b_n \quad \text{----------} \quad 9$$

بصورة عامة فعند رسم علاقة فرق الضغط Δp مع الزمن t^n على رسم بياني عادي سنحصل على خط مستقيم بميل m_n و تقاطع المستقيم مع الاحداثي الصادي يمثله b_n و الرمز n هو مؤشريدل على نوع(طبيعة) طور الجريان . عند اخذ اللوغاريتم لطرفي المعادلة رقم-9 و بفرض ان $b_n=0$ نحصل على:

$$\log(\Delta p) = \log(m_n t^n) = n\log(t) + \log(m_n) \quad \text{----------} \quad 10$$

و عند رسم العلاقة في المعادلة اعلاه على رسم بياني لوغاريتمي log-log scale سنحصل على علاقة خط مستقيم بميل n و يتقاطع مع الاحداثي الصادي بمقدار $\log(m_n)$. ان قيمة المؤشر n يعكس طبيعة طور الجريان فاذا كانت قيمة n تساوي n=1 و في المدة المبكرة من الفحص ، يدُل ذلك على ظهور تاثير تخزين جوف البئر WBS واذا كانت n=1 و لكن ضمن المدة المتاخرة من الفحص فيدل على تاثير حدود المكمن المغلق والذي يصاحبه طور الجريان شبه مستقر PSS و اذا كانت n=1/2 فدلالة على ان الجريان من النوع الخطي المبكر Early linear flow و هكذا لكل قيمة معينة لـ n يقابلها طور جريان معين كما في الجدول9-8.

يُوضح الجدول9-8 ايضا تفاصيل اشكال اطوار الجريان مع استجابة منحني فرق الضغط و منحني مشتقة الضغط لكل طور و قيمة الميل لكلا منها مع الفترات الزمنية لتواجد الطور و طبيعة المكمن سواء اكان مكمن متجانس او متشقق . لو اجرينا اشتقاق للمعادلة رقم-9 بدلالة الوقت ونضرب الاشتقاق بـ t فنحصل على الصيغة ادناه:

$$t\frac{\partial p}{\partial t} = t\left(nm_n t^{n-1}\right) = nm_n t^n \quad \text{----------} \quad 11$$

و باخذ لوغاريتم طرفي المعادلة -11 ينتج:

$$\log\left(t\frac{\partial p}{\partial t}\right) = \log\left(nm_n t^n\right) = n\log(t) + \log(nm_n) \quad \text{----------} \quad 12$$

Geometry	Log-log scale		Time range		
	Shape	*Slope =n*	*Early*	*Intermediate*	*Late*
Radial :		No 0	Double porosity restricted	Homogeneous behavior	Semi-infinite reservoir
Linear :		1/2 1/2	Infinite conductivity fracture	Horizontal well	Two parallel sealing boundaries
Bi-linear :		1/4 1/4	Finite conductivity fracture	Finite conductivity fault	Double porosity unrestricted with linear flow
Spherical :		No -1/2		Well in partial penetration	
Pseudo Steady State :		1 1	Wellbore storage	Layered no crossflow with boundaries	Closed reservoir (drawdown)
Steady State :		0 -1 (-∞)		Conductive fault	Constant pressure boundary

الجدول9-8:اشكال منحنيات الضغط و مشتقة الضغط عبراطوار الجريان المختلفة مع فترات ظهورها

و برسم علاقة مشتقة الضغط Der مع الوقت على رسم بياني لوغاريتمي نحصل على علاقة خط مستقيم بميل n ايضا و تقاطعه مع الاحداثي الصادي بمقدار $\log(nm_n)$. قيمة n يمثل ايضا مؤشر لطبيعة طور الجريان (الجدول9-8).عادة ما يرسم منحني فرق الضغط سويةً مع منحني مشتقة الضغط بمخطط بياني لوغاريتمي واحد . يتميز منحني فرق الضغط type curve عن منحني مشتقة الضغط بكونه لا يتاثر بشدة باطوار الجريان عكس منحني مشتقة الضغط . منحني فرق الضغط في المعادلة رقم-9 لا يُمكن تطبيقه لحالة الجريان الشعاعي (حالة خاصة) وانما يُمكن في ذلك ان نستخدم المعادلة الاتية :

$$\Delta p = m\log(t) + b \quad \text{---------- 13}$$

مشتقة الضغط عند الجريان الشعاعي (في الرسم اللوغاريتمي) تعطي خط مستقيم افقي له قيمة ثابتة و تساوي:

$$t\frac{\partial p}{\partial t} = t\left(\frac{2.303\,\mathrm{m}}{t}\right) = 2.303\,\mathrm{m} \quad \text{---------- 14}$$

ج - العلاقة الرياضية للتشخيص الخاص لطور الجريان Flow-Regime Specific Diagnostic -

حسب المعادلة رقم-9 فان مشتقة الضغط بالنسبة الى الوقت مرفوع للقوة n اي dp/t^n تصبح :

$$\frac{\partial p}{\partial t^n} = m_n \quad \text{---------- 15}$$

ناخذ لوغاريتم الطرفين ينتج ان :

$$\log \frac{\partial p}{\partial t^n} = \log m_n \quad \text{---------- 16}$$

اي في حالة رسم علاقة ما بين dp/dt^n و والوقت t (اي dp/dt^n vs t) على احداثيات لوغاريتمية , نحصل على خط مستقيم افقي يتقاطع مع الاحداثي الصادي عند قيمة ثابتة ، تساوي m_n . و يُمكن حساب مشتقة الضغط بالنسبة الى الوقت أُس n اي نسبة الى t^n (المعادلة رقم-15) بدلالة مشتقة الضغط كما يأتي:

$$\frac{dp}{dt^n} = \frac{1}{nt^{n-1}} \frac{dp}{dt} = \frac{1}{nt^n} \left(t \frac{dp}{dt} \right) \quad \text{---------- 17}$$

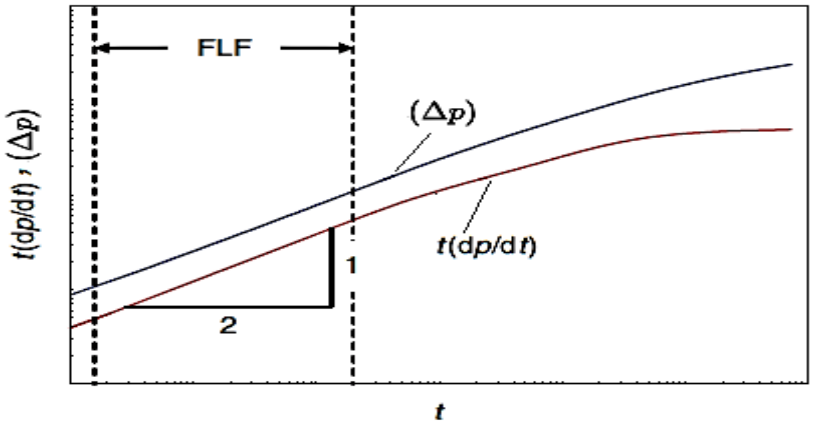
ح- تحليل الخط المستقيم النوعي في تشخيص اطوار الجريان Flow-Regime-Specific Straight-Line Analysis

العلاقة الرياضية للتشخيص الخطي لطور الجريان تخضع بحسب المعادلة رقم-9 إذ ان فرق الضغط يساوي:

$$\Delta p = m_n t^n + b_n$$

عند رسم علاقة فرق الضغط مع الزمن مرفوع للقوة n اي Δp vs t^n على ورق بياني عادي سنحصل على علاقة خط مستقيم الميل له m_n و التقاطع b_n . يُستخدم الرسم البياني هذا لتأكيد نوع طور الجريان بعدما تم تشخيص قيمة n من الرسم التشخيصي اللوغاريتمي. فان لم نحصل على علاقة خط مستقيم فيعني ان طور الجريان المفترض لم يكن صحيحا ، مما يتطلب مراجعة و البحث عن ماهية طور الجريان بدقة. المثال الاتي توضيح للمخططات التشخيصية الثلاثة:

ففي المخطط البياني اللوغاريتمي في الشكل9-11 يظهر علاقة خط مستقيم بميل النصف 2/1 و لكلا مُنحني فرق الضغط ومشتقة الضغط (المستقيمان متوازيان) الميل هذا يعكس طور الجريان الخطي المتجه من المكمن إلى الشق Formation Linear Flow-FLF (راجع الجدول9-8 العمود رقم 2).



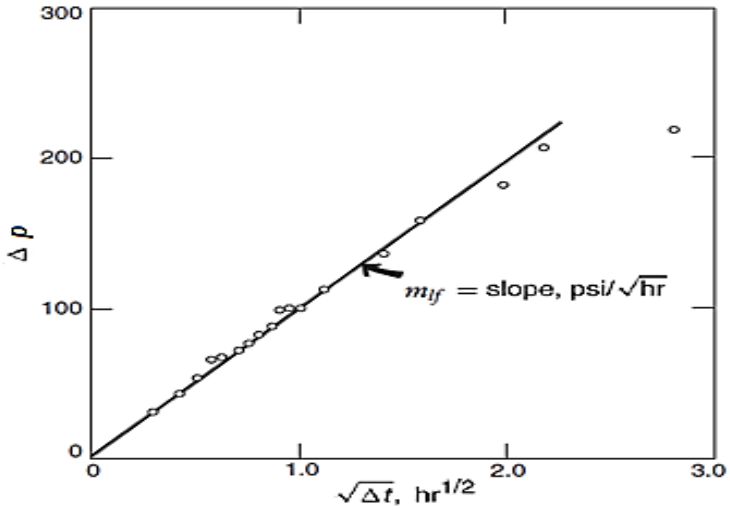
الشكل9-11: الرسم التشخيصي اللوغاريتمي

في حين ان المخطط البياني التشخيصي الخطي في الشكل9-12 والذي يُرسم على احداثيات عادية Cartesian لعلاقة الجذر التربيعي للوقت $t^{1/2}$ مع فرق الضغط Δp يظهر ذات طور الجريان الخطيFLF (راجع الجدول9-7- العمود رقم 4) و الذي يعطي علاقة خط مستقيم يمر بنقطة الاصل و بميل slope of linear flow m_{lf} يساوي:

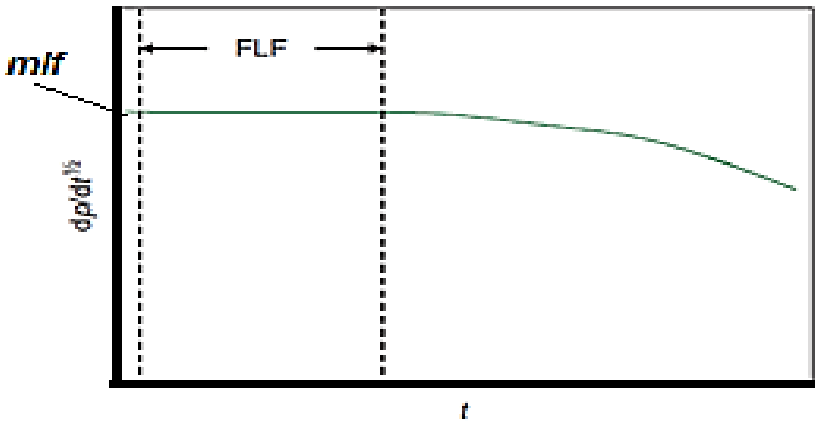
$$m_{lf} = \left[\frac{4.064QB}{hx_f}\sqrt{\frac{\mu}{k\phi c_t}}\right] \text{ ---------- } 18$$

إذ ان:

m_{lf} = slope of ، ft ، x_f= half fracture length، cp ،μ = viscosity، md ،k = permeability psi/ $time^{0.5}$. ،linear-fl ow straight line



الشكل9-12: الرسم التشخيصي الخطي الخاص على احداثيات عادية



الشكل9-13: الرسم التشخيصي الخاص على احداثيات لوغاريتمية

الشكل9-13 يُوضح المخطط البياني الثالث للتشخيص الخاص لذات الطورFLF لكن لعلاقة الوقت مع مشتقة الضغط للأساس الجذر التربيعي للوقت $dp/dt^{1/2}$ (راجع الجدول رقم 9-7

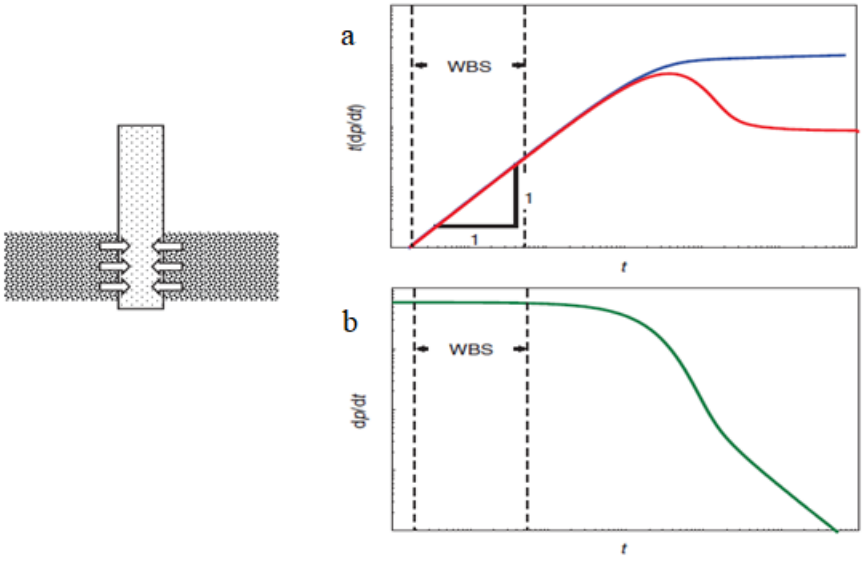
العمود رقم 3) فيعطي علاقة خط مستقيم أفقي قيمته تساوي m_{lf} (المعادلة رقم-16) . نضع في الاعتبار ان الجريان الخطي هذا قد يحدث في بداية الفحص كما في حال المكمن المتشقق عالي التوصيل High conductivity او في نهاية الفحص كما في حال بئر عمودي مخترق لقناة Channel ترسيبية مفتوحة من نهايتيها.

خ- اشكال منحنيات اطوار الجريان في المخططات التشخيصية :

يُستخدم الحاسوب(او البرامج الجاهزة (*Softwares*)) لتحقيق أنسب تطابق ما بين البيانات الحقلية المقاسة والبيانات المحسوبة من النموذج المكمني، وبالتالي توفر الوقت والجهد. يتم تشخيص النموذج المكمني سواء كان مكمنًا معقدًا أو مكمنًا متجانسًا عبر رسم بيانات الفحص الحقيقية في رسم بياني لوغاريتمي لفرق الضغط ومشتقة الضغط مع الوقت، ومطابقتها مع منحنيات موديلات مرجعية نظرية تمثل نماذج مكمنية مثالية تم تعريفها مسبقًا وتم تخزينها مع معادلاتها في مجلد المكتبة(*library*) .

ادناه سنوضح اهم الاشكال المعتمدة عند تفسير فحوصات الابار باستخدام الحاسوب و ذلك باستخدام الرسومات التشخيصية الثلاث دون الخوض في التفاصيل النظرية والتي سبق ان تطرقنا اليها في الفصول السابقة.

(ملاحظة : عندما نذكر الحاسوب فاشارة الى ان المهندس يقوم ببناء برنامج او رسم الاشكال من باستخدام مثلا الاكسيل و نذكر مصاحبة البرامج الجاهزة والتي هي من تقوم بالرسم على ان نضع في الاعتبار فهم الاسس النظرية التي نذكرها و الواجب اتقانها و معرفتها من قبل مهندسي المكامن).



الشكل9-14: بيانات فحص بئر عمودي تُظهر تخزين جوف البئر WBS الثابت

1- طور تخزين جوف البئر Weelbore Storage-WBS

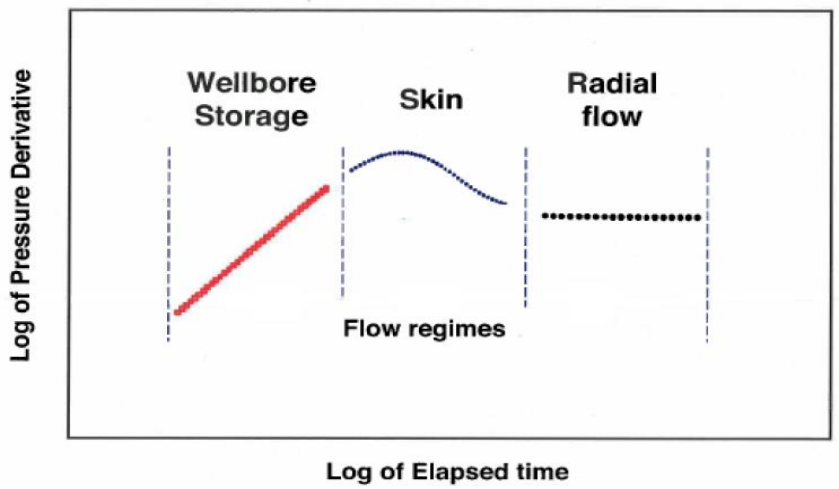
الرسم البياني اللوغاريتمي (Diagnostic plot) الاعلى في الشكل9-14 يُوضح تاثير تخزين جوف البئر WBS خلال المدة المبكرة من فحص البئر العمودي، إذ يتمثل بالخط المستقيم المائل بزاوية 45^o او بميل مقداره m=1 (هنا دليل او مؤشر طور الجريان n=1). يُستفاد من الرسم في تحديد ثابت تخزين حفرة البئر (C) ، تحديد بداية المدة المتوسطة من الفحص (بداية تاثير الجريان الشعاعي).

الرسم التشخيصي اللوغاريتمي الخاص (الشكل9-14 الاسفل) لعلاقة مشتقة الضغط dp/dt مع الوقت ، فيُظهر علاقة خط مستقيم افقي عند وجود تاثير تخزين جوف البئر Wellbore Storage – WBS (المعادلة رقم- 16عندما n=1) .

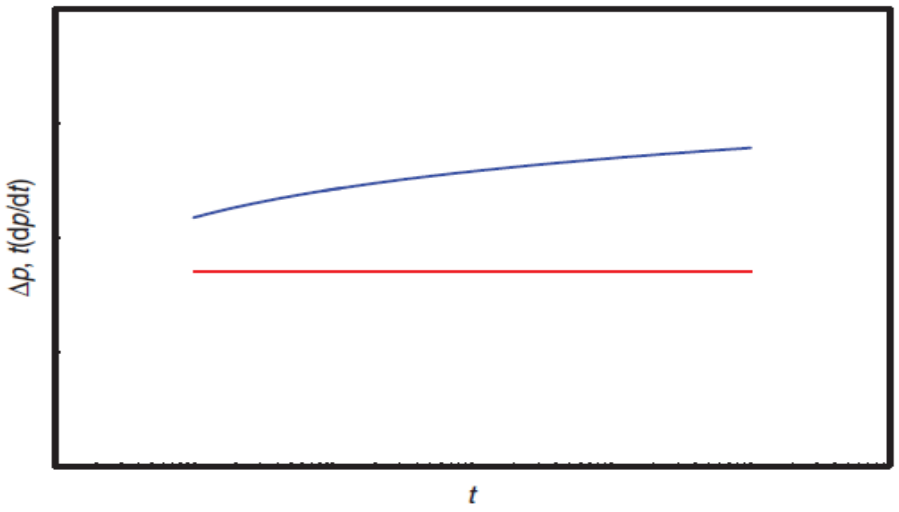
ملاحظة : لكل الحالات اللاحقة فان الرسومات اللوغاريتمية الخاصة (السفلى) تُظهر علاقة خط مستقيم افقي في حين الرسومات اللوغاريتمية لمشتقة الضغط (الرسومات العليا) تتميز بخطوط مستقيمة ذات ميول مختلفة و بحسب نوع طور الجريان(الرسومات من المصدر John P.(2013) .

2- طور الجريان الشعاعي اللامحدود Infinite Acting Radial Flow-IARF

الشكل9-15 يُوضح كيفية تمييز طور الجريان الشعاعي اللامحدود – Infinite Acting Radial Flow-IARF عند فحص بئر عمودي في مكمن دائري ، بيان ذلك الخط المستقيم الافقي لمشتقة الضغط في المدة المتوسطة من الفحص. يُستفاد منه في تحديد نفاذية المكمن k . كما و يُظهر الرسم ايضا وجود تاثير تخزين جوف البئر ، Wellbore Storage – WBS و عامل القشرة s .

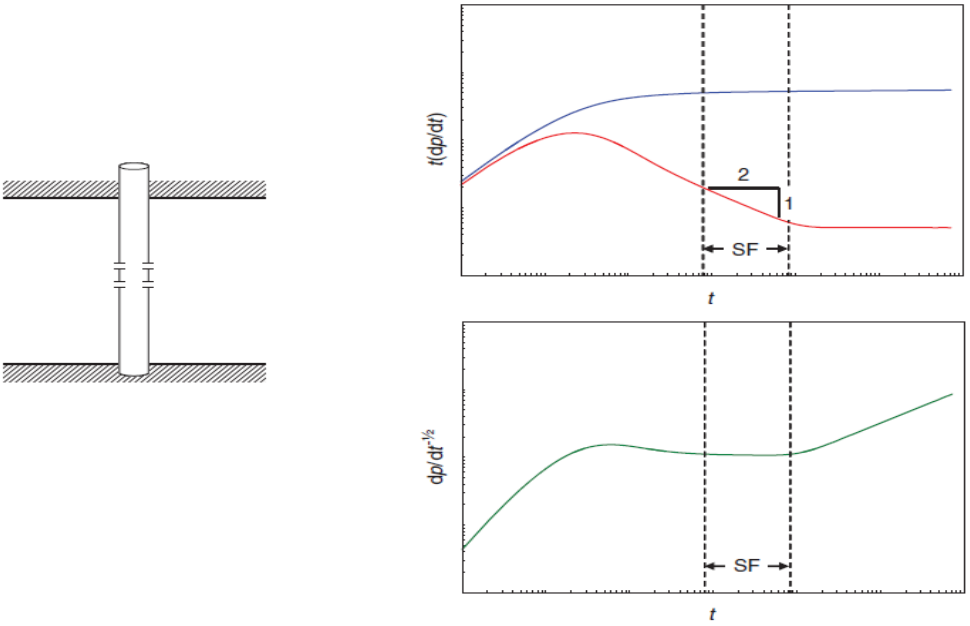


الشكل9-15: الرسم التشخيصي لبئر عمودي يُظهر طور الجريان الشعاعي مع عامل القشرة و تخزين جوف البئر WBS الثابت



الشكل9-16: الرسم التشخيصي لبئر عمودي يُظهر طور الجريان الشعاعي فقط من دون عامل القشرة s و تخزين جوف البئر WBS

الشكل9-16 يُظهر سلوك طور الجريان الشعاعي و لكن من دون تاثير تخزين جوف البئر WBS و لا عامل القشرة s .



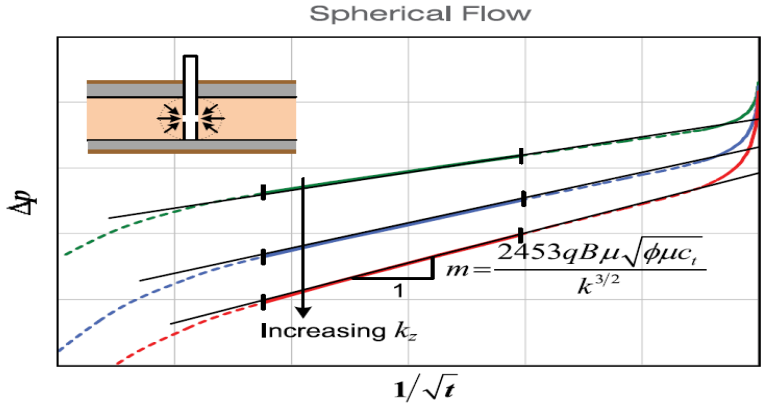
الشكل9-17: الرسم التشخيصي لبئر عمودي يُظهر طور الجريان الكروي SF مع عامل القشرة s و تخزين جوف البئر WBS

3- طور الجريان الكروي Spherical flow-SF

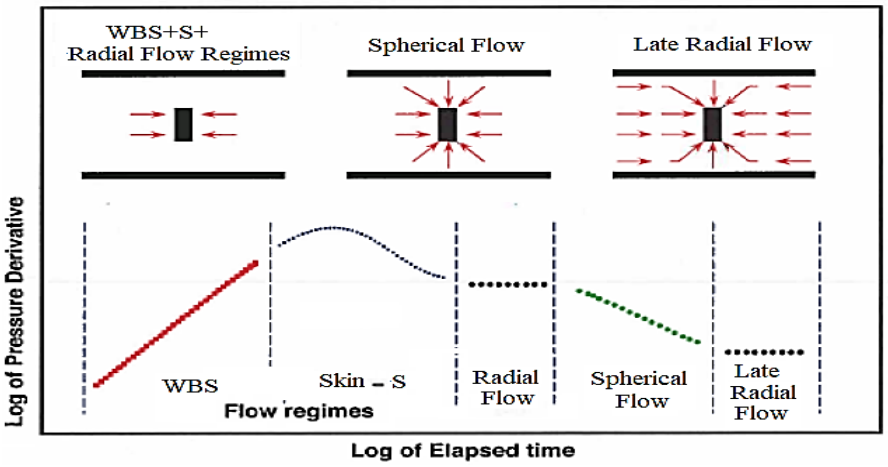
يحصل الجريان الكروي عند التثقيب المحدود لبئر عمودي يخترق الطبقة المكمنية (الشكل9-17). يُمكن تحديد طور الجريان الكروي بواسطة الرسم التشخيصي اللوغاريتمي لمشتقة الضغط والذي

يتخذ خطًا مستقيمًا بميل سالب نصف (1/2-). يُمكن أيضًا تحديد الجريان الكروي بواسطة الخط ألافقي على مخطط تشخيص الجريان الكروي اللوغاريتمي الخاص و الذي يمثل علاقة لوغاريتمية ما بين $dp/dt^{-1/2}$ مقابل الوقت t الشكل9-17 (الرسم الاسفل). يُمكن استخدام الجريان الكروي في تحديد النفاذية الكروية.

الشكل9-18 يُوضح العلاقة ما بين فرق الضغط Δp ومقلوب الجذر التربيعي للوقت $1/t^{1/2}$ على احداثيات عادية تاخذ العلاقة شكل خط مستقيم مائل في حال وجود تاثير الجريان الكروي.



الشكل9-18: الرسم التشخيصي الخاص لطور الجريان الكروي على احداثيات عادية لبئر عمودي مع تاثيرات النفاذية العمودية



الشكل9-19: الرسم التشخيصي المثالي لبئر عمودي يُظهر اطوار الجريان الكروي و الشعاعي مع عامل القشرة s و تخزين جوف البئر WBS

الشكل9-19 يُبين الحالة المثالية لسلوك اطوار جريان متعددة عند فحص بئر عمودي مفتوح جزئيا في طبقة مكمنية، يُمكن تمييز تاثيرات كلا من تخزين جوف البئر WBS و عامل القشرة Skin-s في المدة المبكرة من الفحص و طور الجريان الشعاعي في المدة الوسطى ثم طور الجريان الكروي في المدة الانتقالية ما بين طور الجريان الشعاعي في المدة المتوسطة و المتاخرة من الفحص .

4- طور الجريان شبه المستقر لبئر عمودي في مكمن دائري مغلق

Vertical well in a closed circular reservoir exhibiting PSS

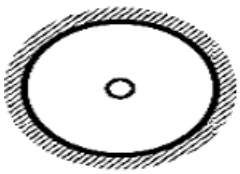
الشكل9-20 ، يُوضح ظهور منطقة طور الجريان شبه المستقر– Pseudo Steady State Flow-PSS في الوقت المتاخر من الفحص بيان ذلك ظهور الخط المستقيم المائل بزاوية 45^o او بميل مقداره m=1. ايضا من الشكل ممكن تمييز منطقة طور الجريان الشعاعي في الفترة المتوسطة من الفحص و منطقة تاثيري تخزين جوف البئر Wellbore Storage – WBS و عامل القشرة skin-s في الفترة المبكرة من الفحص.

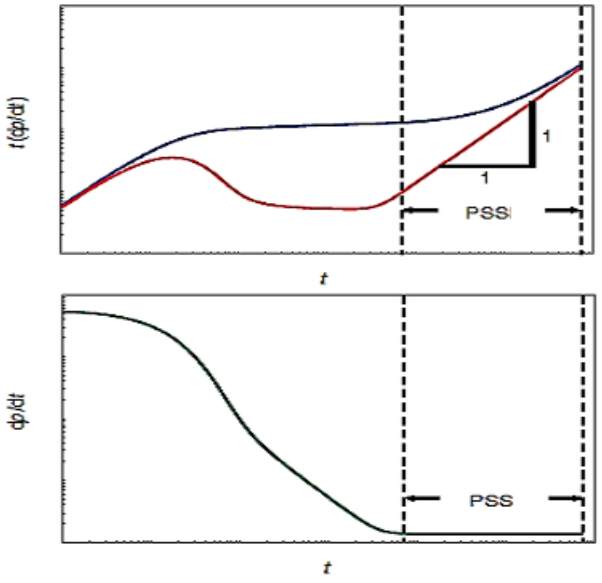
يُوضح الشكل9-20 ايضا تشخيص طور الجريان شبه المستقر PSS باستخدام المخطط البياني اللوغاريتمي لمشتقة الضغط العادي dp/dt مع الوقت t الذي يتخذ خطًا مستقيمًا افقيا عبر الجريان شبه المستقر.

5- طور الجريان شبه المستقر لبئر عمودي في مكمن مستطيل مغلق

Vertical well in a closed rectangular reservoir exhibiting PSS،

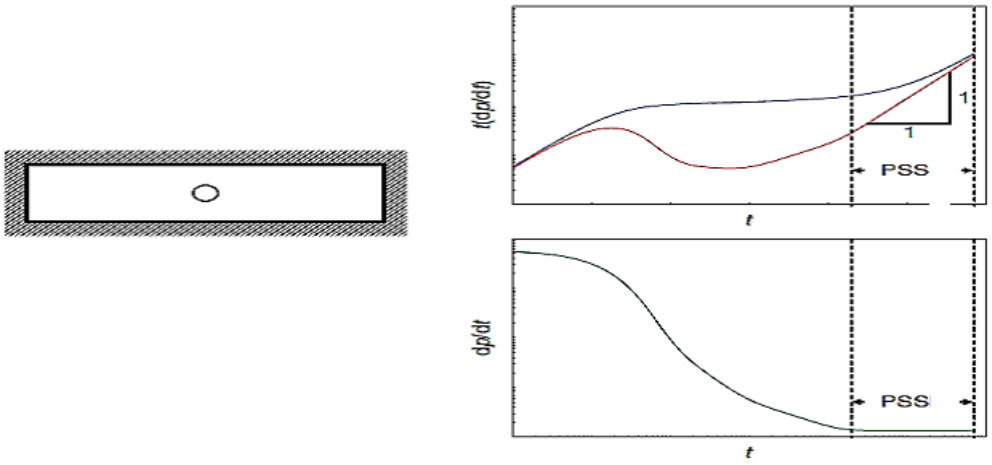
الشكل9-21 يُوضح سلوك الضغط عند فحص بئر عمودي يقع في مركز مكمن مستطيل مغلق . الحالة هذه تكون مشابهة لحالة بئر عمودي في مركز مكمن دائري مغلق لكن هنا تظهر منطقة انتقالية transition zone بشكل واضح وذلك عند الانتقال من طور الجريان الشعاعي اللامحدود(الخط الافقي) الى طور الجريان شبه المستقرPSS (خط مائل بميل يساوي واحد).



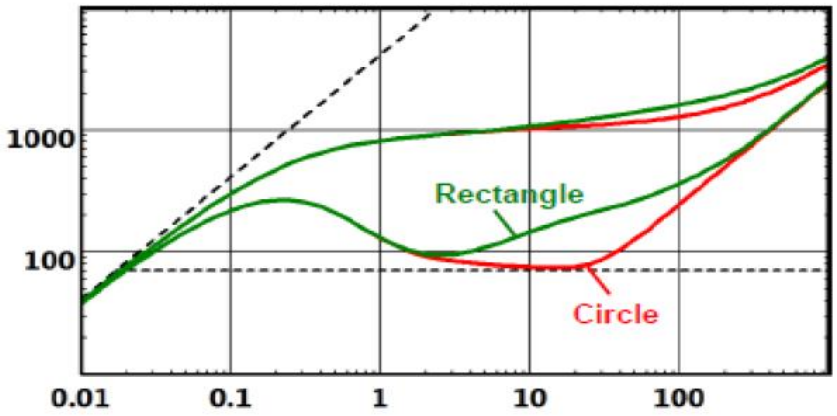


الشكل9-20: الرسم التشخيصي المثالي لبئر عمودي يُظهر اطوار الجريان شبه المستقرPSS و الشعاعي مع عامل القشرة s و تخزين جوف البئر WBS

ميل الخط المستقيم في المنطقة المتاخرة من الفحص في الرسم التشخيصي اللوغاريتمي مساو الى الواحد (الشكل9-21 -العلوي) و بخط مستقيم افقي في الرسم التشخيصي الخاص (الشكل9-21 السفلي) . الشكل9-22 يُوضح مقارنة لطول المدة الانتقالية ما بين بئر في مكمن مستطيل مغلق و في مكمن دائري مغلق.



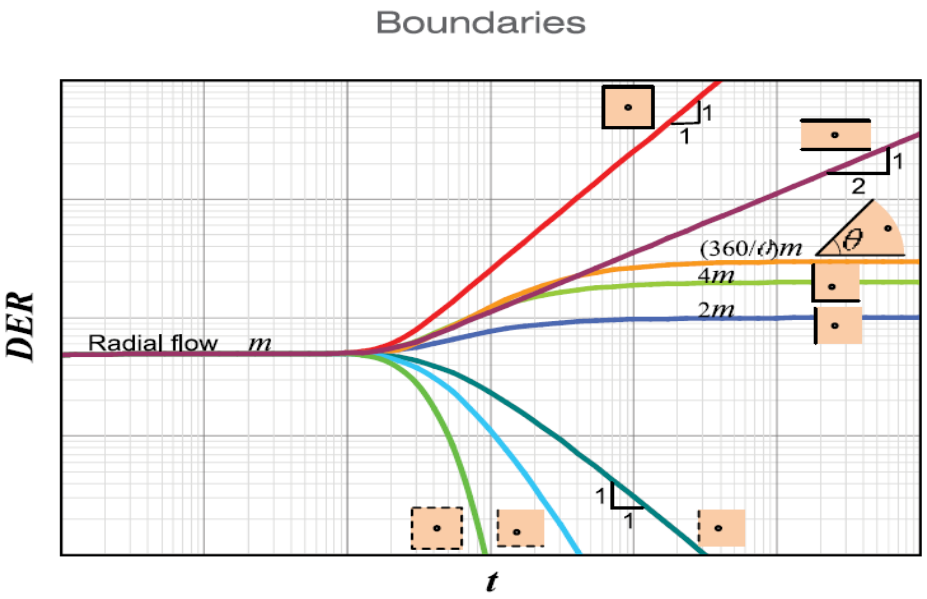
الشكل9-21: الرسم التشخيصي المثالي لبئر عمودي يُظهر طور الجريان شبه المستقر PSS في مكمن مغلق مع عامل القشرة s و تخزين جوف البئر WBS



الشكل9-22: الرسم التشخيصي المثالي لبئر عمودي يُظهر طور الجريان شبه المستقر لمنطقتي تصريف مستطيلة الشكل و دائرية

الشكل9-23 يوضح سلوك مشتقة الضغط لبئر عمودي عند وصول اشارة الضغط الى حدود المكمن (الفترة المتاخرة من الفحص) و لاشكال هندسية للمكمن متعددة و في مواقع مختلفة للبئر داخل المكمن (او منطقة التصريف) إذ تاخذ هيئة خطوط مستقيمة و بميول مختلفة. الاشكال تبدأ من المربع المغلق من اربع جهات والبئر في مركز المربع بميل الواحد m=1 و تنتهي بالشكل المربع المفتوح من جهاته الاربعة بوجود ضغط ثابت (دعم) من خلال انحدار شديد في سلوك مشتقة الضغط و بميل سالب .

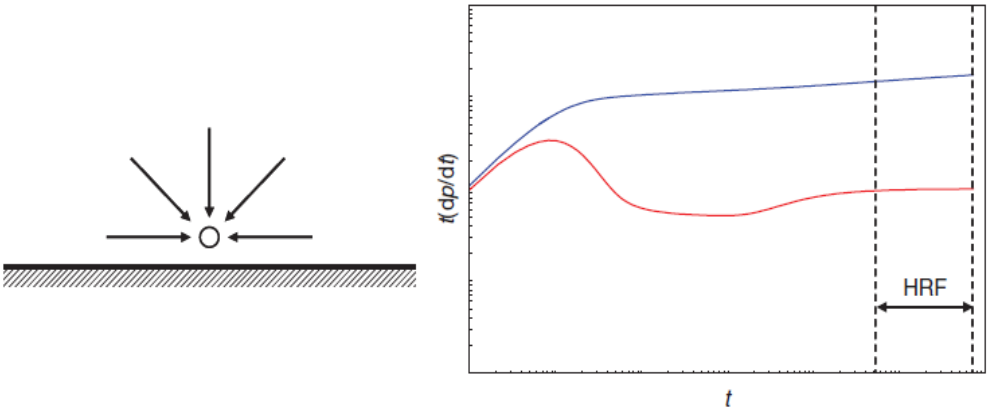
لاحظ ان سلوك الجريان الحاصل للابار الواقعة بالقرب من الحدود العازلة ياخذ شكل الخط الافقي و قيمة مشتقة الضغط عند هذه الخطوط تساوي ثابت مضروب في قيمة المشتقة m لمنطقة الجريان الشعاعي اللامحدود اي ممكن التعبير عنها رياضيا بالعلاقة (360/Θ)m إذ ان Θ/360 تُمثل الثابت و Θ تُمثل مقدار الزاوية المحصورة ما بين الحدين المغلقة للمكمن. فاذا كانت الزاوية $\Theta=90^{o}$ فان الثابت يساوي 4 و مشتقة الضغط تساوي 4m ، يُستفاد من هذه القيم في حسابات خواص المكمن (الشكل9-23) .



الشكل9-23: الرسم التشخيصي المثالي لبئر عمودي يقع في مكمن باشكال هندسية مختلفة ولمواقع للبئر مختلفة داخل المكمن

6- طور الجريان نصف شعاعي لبئر عمودي يقع بالقرب من حد عازل مفرد Vertical Well HRF،Near Single No-Flow Boundary

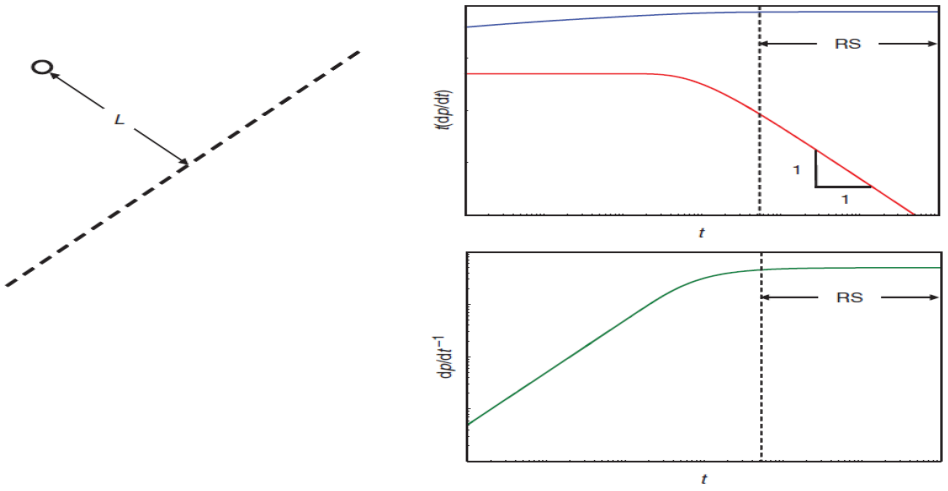
الشكل9-24 يُوضح تشخيص حدود المكمن من جهة واحدة قريبة لبئر عمودي اذ يتسبب بظهور الجريان نصف شعاعي Hemi Radial Flow -HRF في الفترة المتاخرة من الفحص و يُظهر الشكل9-24 ايضا وجود منطقة الجريان الشعاعي اللامحدود – Infinite-Acting Radial Flow IARF في الفترة المتوسطة من الفحص و كذلك تاثير تخزين جوف البئر Wellbore Storage – WBS و عامل القشرة skin-s في المدة المبكرة من الفحص.



الشكل9-24: الرسم التشخيصي المثالي لبئر عمودي في مكمن يقع بالقرب من حد boundary مكمني مفرد مغلق يُظهر طور الجريان نصف شعاعيHRF

7- طور الجريان الشعاعي المستقر(ثابت) Radial Stabilization-RS

الشكل9-25 (الرسم العلوي) يُوضح تشخيص لتاثير حدود المكمن من جهة واحدة قريبة للبئر العمودي ،هذا الحد يوفر مصدر داعم للضغط و ثابت عبر مدة الفحص. حسب الشكل فان مشتقة الضغط اولا تاخذ مسار الخط المستقيم الافقي ليعكس طور الجريان الشعاعي بميل يساوي الى الصفر .



الشكل9-25: الرسم التشخيصي المثالي لبئر عمودي يقع بالقرب من حد boundary مفرد مفتوح ثابت الضغط ، يُظهر طور الجريان الشعاعي المستقر RS

عندما تصل موجة انتقال الضغط الى حدود الضغط الثابت إذ يستقر الضغط stabilized pressure فتاخذ مشتقة الضغط في الوقت المتاخر من الفحص شكل خط مستقيم بميل سالب واحد و فرق الضغط (الثابت) ياخذ شكل خط افقي . الشكل9-25 السفلي يُوضح المخطط البياني اللوغاريتمي الخاص لعلاقة مشتقة الضغط للاساس مقلوب الوقت dp/dt^{-1} مع الوقت t للحالة اعلاه ، إذ يتشكل خط افقي ليعكس تاثير الجريان الشعاعي المستقر-RS .

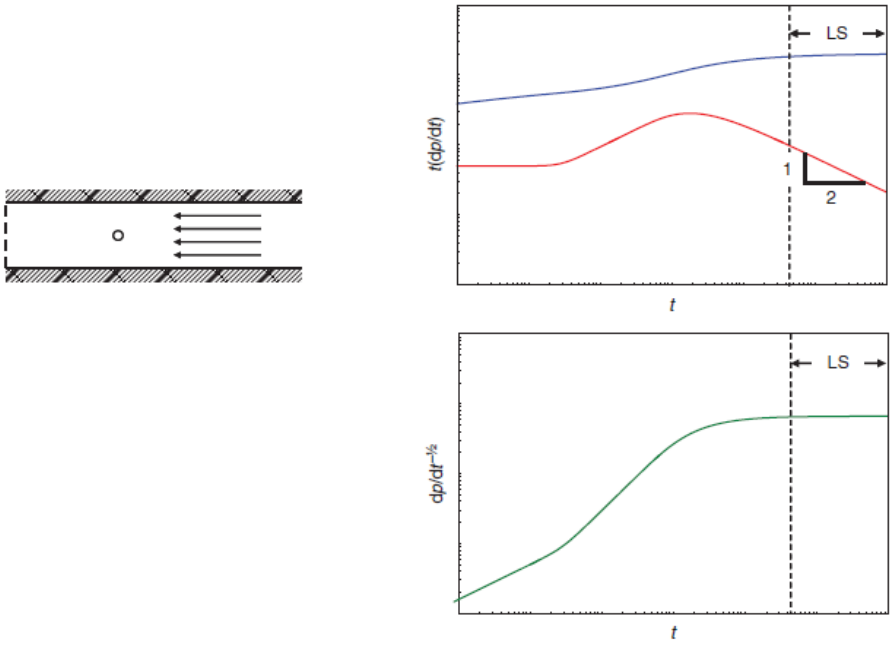
8- طور الجريان الخطي المستقرLinear Stabilization-LS لبئر عمودي يقع في وسط قناة ترسيبية ، احدى نهايتيها ضغط ثابت(وجود دعم لضغط المكمن)

الشكل9-26 يُوضح سلوك الضغط لبئر عمودي يقع في قناة channel احدى نهايتيها توفر مصدر داعم ثابت للضغط خلال فترة الفحص. عندما تصل موجة انتقال الضغط الى حدود الضغط الثابت حيث يستقر الضغط stabilized pressure ، تاخذ مشتقة الضغط بالمقابل مسار خط مستقيم بميل سالب نصف 1/2- و كذلك يُظهر الرسم البياني وجود منطقة الجريان الشعاعي اللامحدود. الشكل9-26(الرسم في الاسفل) لمخطط بياني لوغاريتمي خاص لعلاقة مشتقة الضغط للاساس الجذر التربيعي للوقت $dp/dt^{-1/2}$ مع الوقت t للحالة نفسها ، إذ يسلك الضغط سلوك الخط الافقي عند منطقة الجريان الخطي المستقر. لاحظ ان سلوك مشتقة الضغط هنا مشابهة الى الجريان الكروي المستقر و للتمييز فيجب مراجعة كل البيانات المتوفرة للفحص.

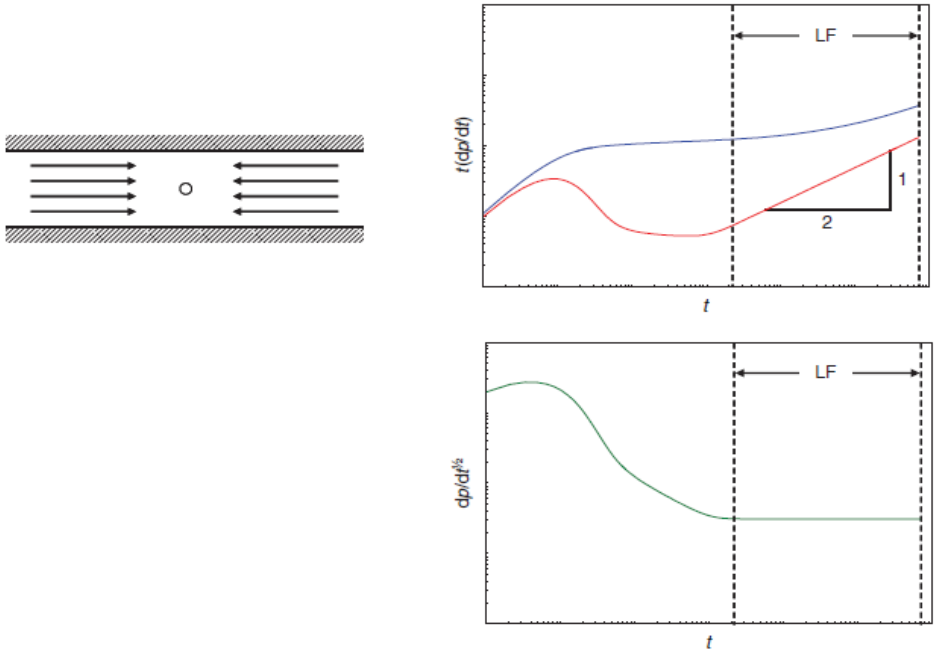
9- طور الجريان الخطي في اتجاهين لبئر عمودي يقع وسط قناة ترسيبية محدودة من الاعلى و الاسفل و مفتوحة من نهايتيها

في هكذا ظروف ، يحدث جريان خطيLinear Flow-LF في كلا الاتجاهين على طول القناة

و بيان ذلك ظهور ميل النصف m=1/2 للخط المستقيم الظاهر في وقت متاخر من الفحص كما في الشكل9-27 (العلوي).



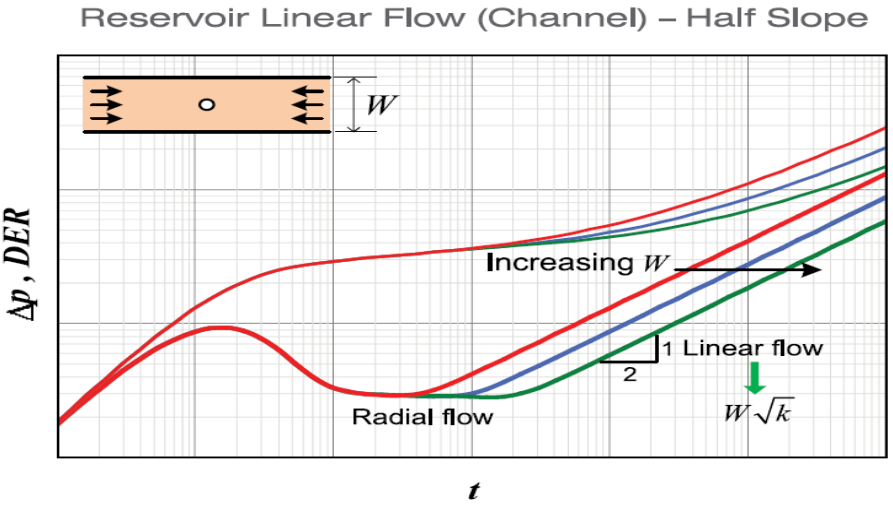
الشكل9-26: الرسم التشخيصي المثالي لبئر عمودي يقع في قناة ترسيبية مفتوحة من نهايتيها و احدى نهايتها بضغط ثابت (طور الجريان الخطي المستقرLS)



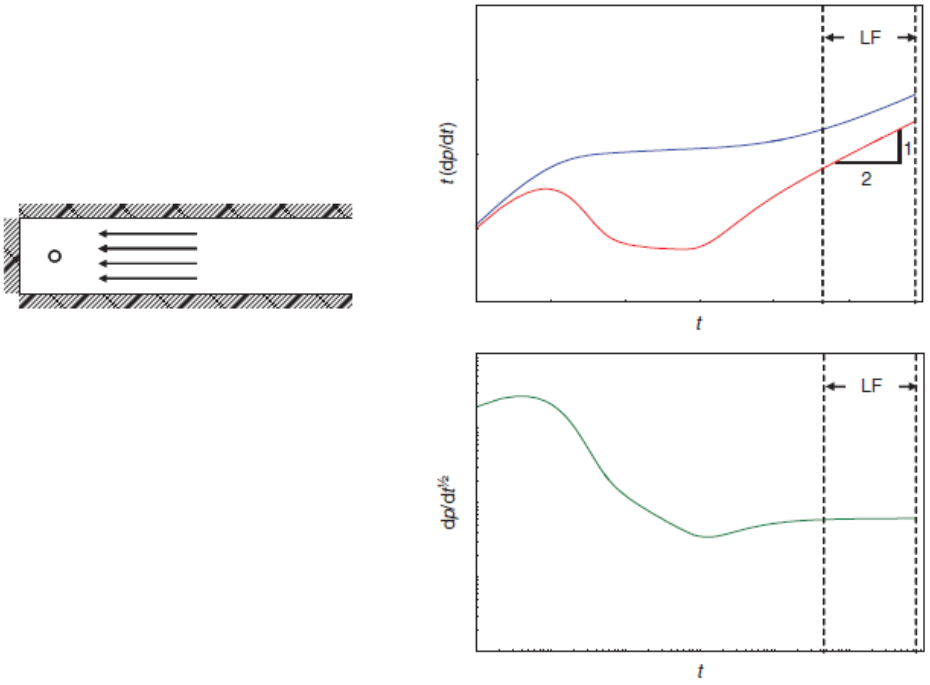
الشكل9-27: الرسم التشخيصي المثالي لبئر عمودي يقع في قناة ترسيبية مفتوحة من نهايتيها، يُظهر طور الجريان الخطي LF

كما و يُظهر الشكل وجود منطقة الجريان الشعاعي اللامحدود و كذلك تاثير تخزين جوف البئر WBS و عامل القشرة s في الوقت المبكر من الفحص. الشكل9-27 (في الاسفل) يُوضح العلاقة اللوغاريتمية الخاصة للحالة نفسها إذ تاخذ شكل خط مستقيم افقي.

الشكل9-28 يُظهر تاثير عرض القناة الترسيبية على منحني مشتقة الضغط فكلما زاد العرض كلما تأخر ظهور الجريان الخطي، إذ تنحرف منحنيات مشتقة الضغط نحو اليمين بزيادة العرض.



الشكل9-28: الرسم التشخيصي المثالي لبئر عمودي يقع في قناة ترسيبية مفتوحة من نهايتيها و احدى نهايتها ثابت الضغط ، يظهر طور الجريان الخطي المستقر بميل النصف



الشكل9-29: بئر عمودي يقع في قناة ترسيبية احدى نهايتها مفتوحة والاخرى مغلقة ، يُظهر طور الجريان الخطي LF في اتجاه واحد

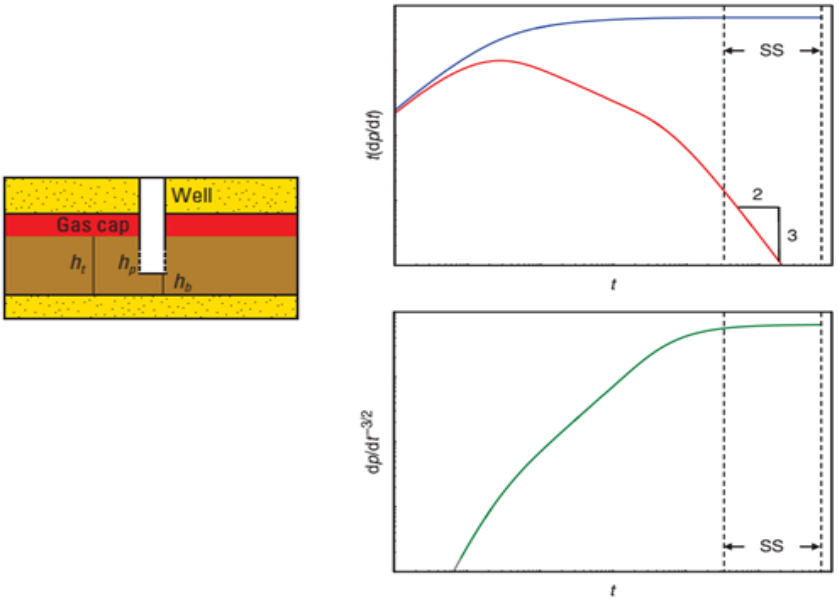
10- طور الجريان الخطي Linear Flow-LF في اتجاه واحد لبئر عمودي يقع في وسط قناة ترسيبية احدى نهايتيها مغلقة.

يتم تمييز الجريان الخطي Linear Flow-LF في اتجاه واحد على طول القناة وذلك عبر ظهور الخط المستقيم بميل النصف m=1/2 في الوقت المتاخر من الفحص(الشكل9-29) و كذلك فان منحني تغير الضغط Δp يقترب الى تشكيل خط مستقيم بميل النصف.

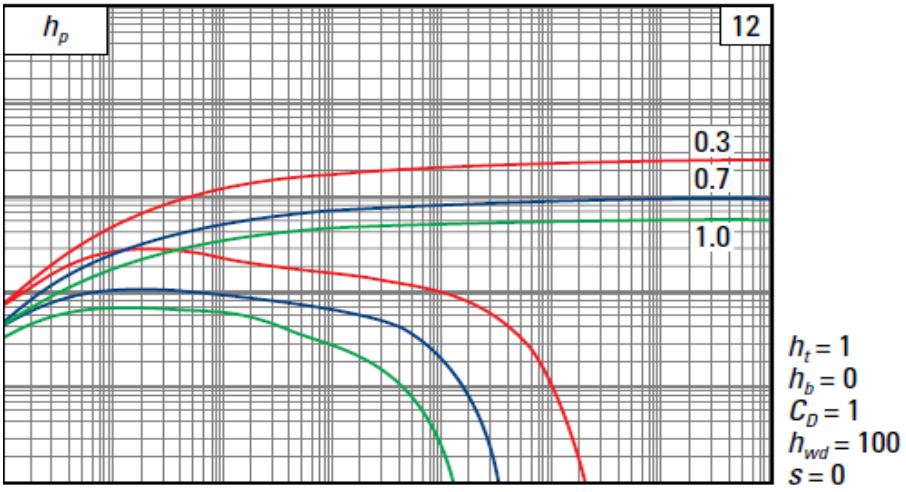
بالمقارنة مع الحالة السابقة فان منطقة الجريان الخطي LF تظهر هنا محدودة وتسبقها بروز منطقة انتقالية في حين منطقة الجريان الخطي للقناة channel المفتوحة في كِلا نهايتيها تكون متميزة و واسعة.

11- طور الجريان الكروي المستقر Spherical Stabilization -SS

طور الجريان الكروي المستقر لبئر عمودي يحدث عندما يُثقب في مكمن نفطي تعلوه قبة غازية Gas cap، يتميز بسُمك عالي للطبقة ، البئر مفتوح للجريان جزئيا (limited entry) و بمسافة قليلة اسفل من مستوى تماس الغاز بالنفط الشكل9-30. أثناء الاستقرار الكروي -**SS** سيكون لمشتقة الضغط ميل سالب يساوي 3/2- و ستقترب استجابة الضغط ΔP من قيمة ثابتة. كما و يظهر ايضا طور الجريان الكروي المستقر عند وجود دعم للضغط من جهة واحدة لحدود المكمن قريبة للبئر العمودي. هذا الحد يوفر مصدر للضغط مستقر و ثابت عبر مدة الفحص كما في حالتي الجريان الخطي المستقر و الجريان الشعاعي المستقر المذكورة في الفقرات السابقة. يُظهر الرسم اللوغاريتمي الخاص في الشكل9-30 (السفلي) علاقة خط مستقيم افقي عند طور الجريان الكروي المستقر SS.



الشكل9-30: بئر عمودي مثقب جزئيا بالقرب من مستوى تماس الغاز بالنفط في مكمن عالي السُمك ، يُظهر طور الجريان الكروي المستقر SS



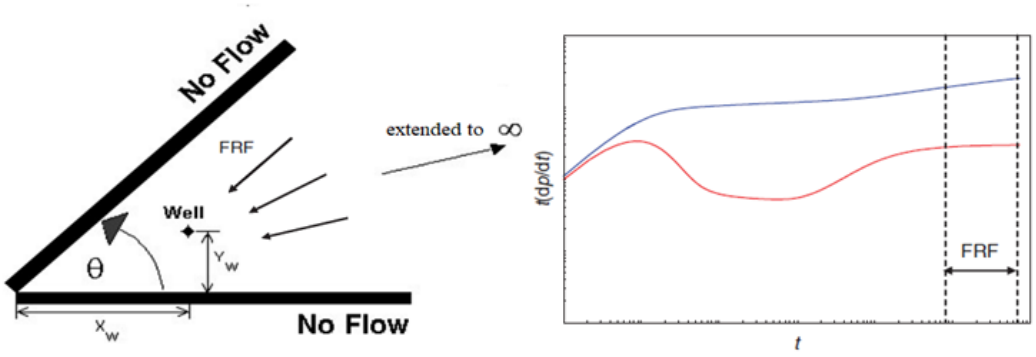
الشكل9-31: تاثير سُمك منطقة التثقيب على منحني مشتقة الضغط

الشكل 9-31 يُوضح تاثير سُمك منطقة التثقيب على منحني مشتقة الضغط.

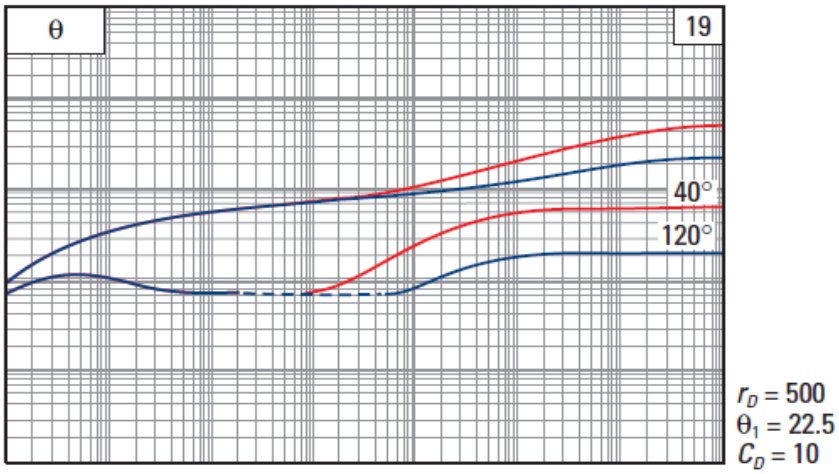
12- طور الجريان الشعاعي الجزئي Fractional Radial Flow- FRF

يحصل طور الجريان الشعاعي الجزئي FRF عندما يقع البئر العمودي بين فالقين او حدين عازلة تتقاطع بزاوية معينة Vertical Well Between Intersecting Sealing Faults

مقدارها Θ كما في الشكل9-32 . الرسم التشخيصي (Diagnostic plot) اللوغاريتمي في الشكل9-32 يُوضح ظهور الجريان الشعاعي الجزئي FRF في المدة المتاخرة من الفحص على شكل خط مستقيم افقي مع وجود منطقة انتقالية واضحة ما بينها و بين منطقة الجريان الشعاعي اللامحدود ، كذلك الرسم يُظهر تاثير تخزين جوف البئر WBS و عامل القشرة s في الفترة المبكرة من الفحص. الشكل9-33 يُوضح تاثير قيمة الزاوية ما بين الفالقين على تزحيف كلا المنحنيين.



الشكل9-32: بئر عمودي في مكمن يقطعه فالقين عازلة ، يُظهر طور الجريان الشعاعي الجزئيFRF



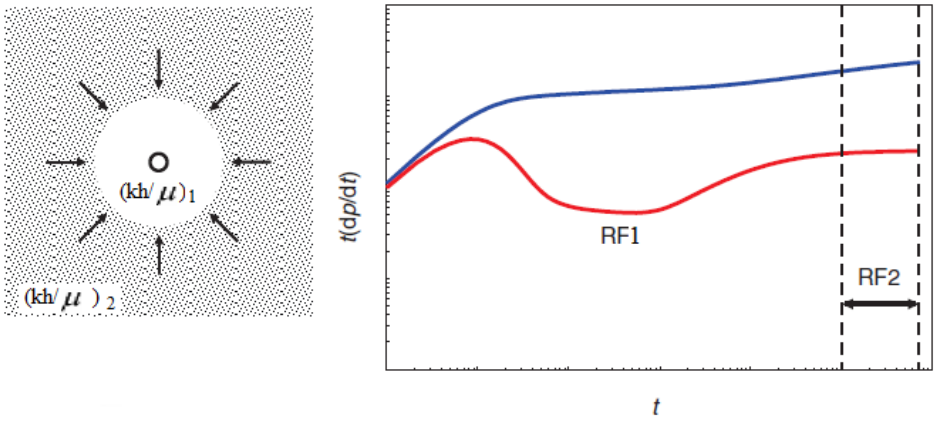
الشكل9-33: تاثير قيمة الزاوية ما بين الفالقين على مشتقة الضغط

13- طور الجريان الشعاعي في النطاق الخارجي لمكمن مركب

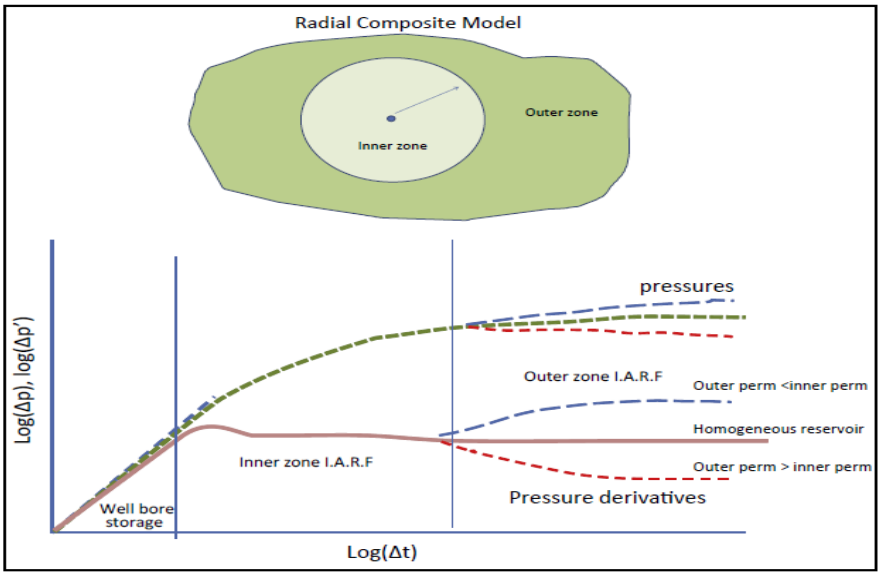
Radial Composite Reservoir، Radial Flow in Outer Zone-RF2

المكمن المركب يتكون من نطاقين او منطقتين ; الاول النطاق الداخلي Inner Zone له مواصفات مكمنية مثلا الانتقالية $(kh/\mu)_1$ تختلف عن الانتقالية $(kh/\mu)_2$ للنطاق الخارجي outer zone (الشكل9-34). يُمكن تشخيص الجريان الشعاعي للنطاق الداخلي Inner Zone Radial Flow – RF1 على شكل خط مستقيم افقي في الفترة المتوسطة من الفحص ثم يليه منطقة انتقالية و بعدها يظهر تاثير الجريان الشعاعي للنطاق الخارجي Outer Zone Radial Flow – RF2 ايضا على شكل خط مستقيم افقي مع وجود تاثير لكلا تخزين جوف البئر WBS و عامل القشرة s في الفترة المبكرة من الفحص.

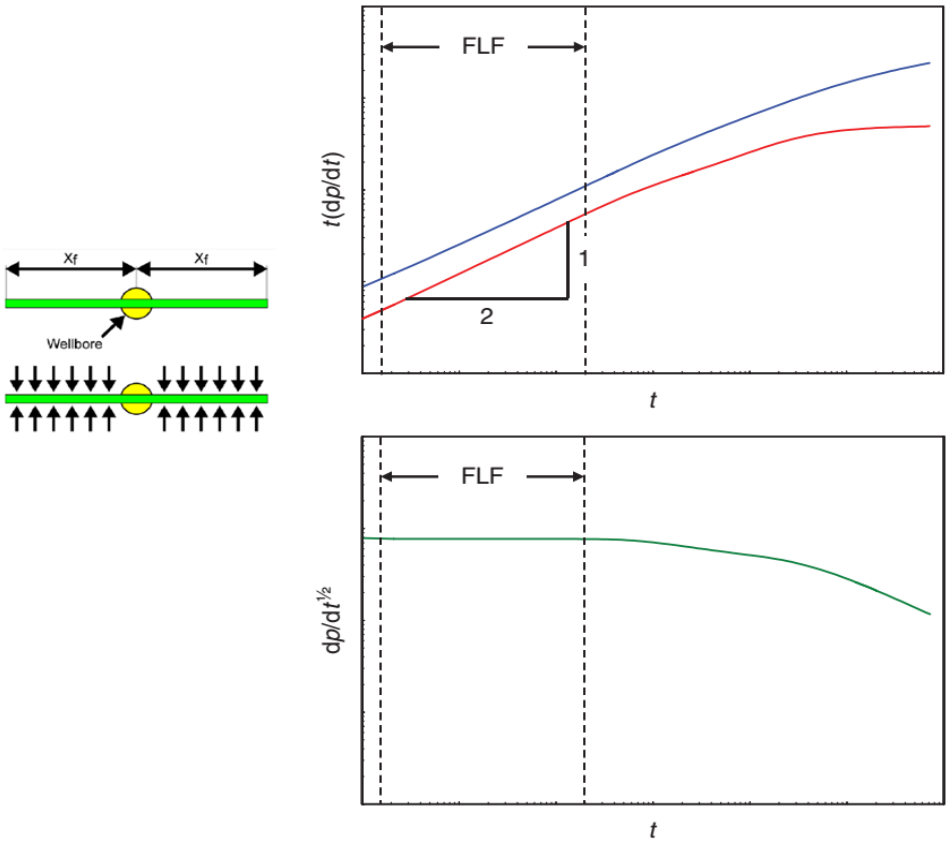
الشكل9-35 يُوضح تغير سلوك المنحنيات في حال تغير نفاذية النطاق الداخلي كان تكون اصغر او اعلى من نفاذية النطاق الخارجية.



الشكل9-34: بئر عمودي في مكمن مركب composite ، يُظهر طور الجريان الشعاعي للنطاق الداخلي RF1 و الخارجيRF2



الشكل9-35: تاثير نفاذية كل من النطاق الخارجي و الداخلي على منحني مشتقة الضغط في مكمن مركب Composite model

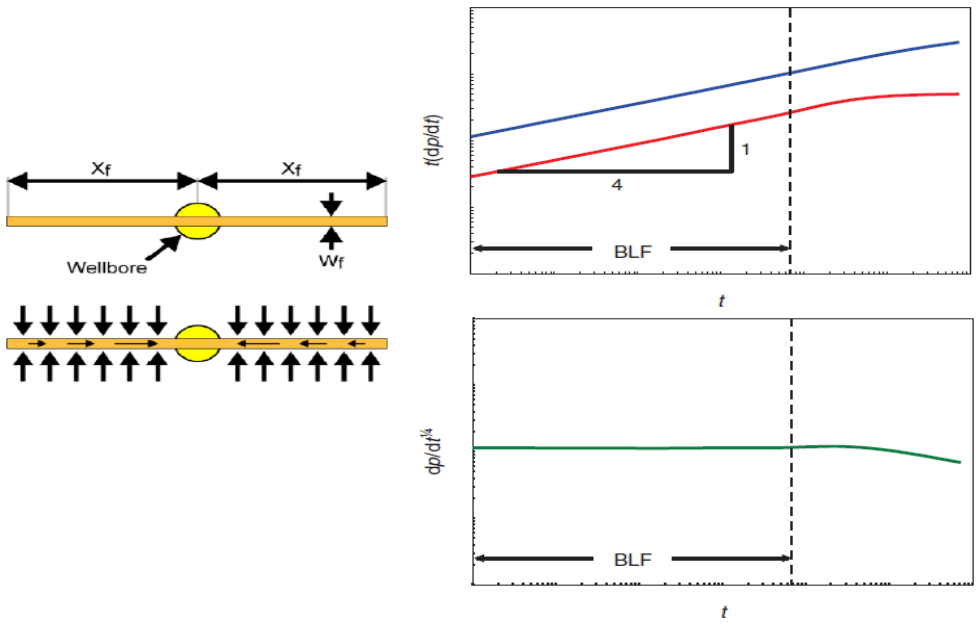


الشكل9-36: بئر عمودي في مكمن متشقق هايدروليكيا عالي التوصيلية، يُظهر طور الجريان المكمني الخطي FLF

14- طور الجريان الخطي المكمني Formation Linear Flow-FLF لمكمن متشقق هيدروليكيا

يظهر طور الجريان الخطي من المكمن باتجاه الشق Formation Linear Flow-FLF لبئر عمودي متشقق هيدروليكيا في بداية الفحص والشق من النوع عالي التوصيلية Hydrulic fracture -high conductivity (الشكل9-36). ينعكس تاثير الجريان الخطي على شكل خط مستقيم بميل النصف m=1/2 في الرسم التشخيصي اللوغاريتمي (Diagnostic plot). لم يظهر في الرسم تاثير لتخزين جوف البئر WBS و عامل القشرة s في الفترة المبكرة من الفحص بسبب ان نفاذية الشق العالية يطغى تاثيرها على كلا الظاهرتين. ان منحني تغير الضغط يشكل ايضا خط مستقيم بنفس الميل و يكون موازي الى خط مشتقة الضغط .

للتاكد من ان طور الجريان من النوع الخطي ، نرسم بيانات الفحص على احداثيات لوغاريتمية log-log plot ،الاحداثي الصادي يمثل $(dp/dt^{1/2})$ و الاحداثي السيني يمثل الوقت فنحصل على علاقة خط مستقيم افقي ليمثل الجريان الخطي في الفترة المبكرة من الفحص كما في الشكل9-36 (الاسفل) .



الشكل9-37: بئر عمودي في مكمن متشقق هايدروليكيا محدود التوصيلية، يُظهر طور الجريان الخطي الثنائي BLF

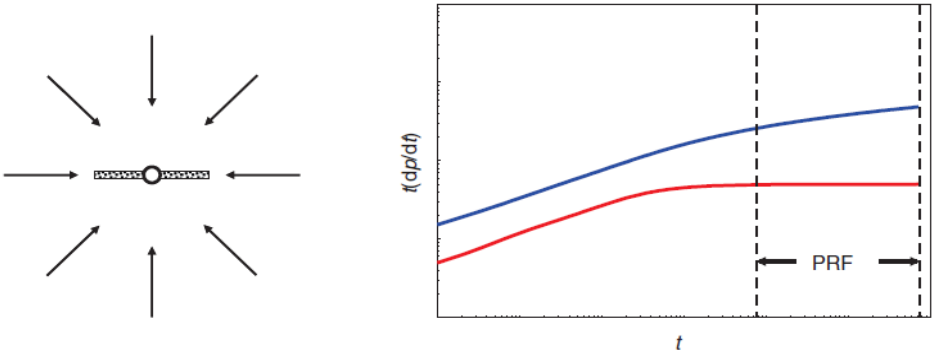
15-طور الجريان الخطي الثنائي(المزدوج) Bilinear Flow-BLF لمكمن متشقق هيدروليكيا:

الجريان الخطي الثنائي(المزدوج) Bi-Linear Flow-BLF يحدث في بداية الفحص لبئر عمودي يقع في مكمن متشقق هيدروليكيا والشق من النوع محدود التوصيلية Hydrulic fracture -finite conductivity (الشكل9-37). ينعكس ذلك على شكل خط مستقيم بميل

الربع m=1/4 في الرسم التشخيصي اللوغاريتمي (Diagnostic plot). لم يظهر في الرسم البياني تاثير تخزين جوف البئر WBS و عامل القشرة s في الفترة المبكرة من الفحص بسبب نفاذية الشق العالية . للتاكد من ان طور الجريان من النوع الخطي المزدوج ، نرسم بيانات الفحص على احداثيات لوغاريتمية log-log plot، الاحداثي الصادي يمثل ($dp/dt^{1/4}$) و الاحداثي السيني يمثل الوقت فنحصل على علاقة خط افقي ليمثل الجريان الخطي المزدوج BLF في الفترة المبكرة من الفحص كما في الشكل9-37 (الاسفل).

16- طور الجريان شبه الشعاعي Pseudo Radial Flow – PRF

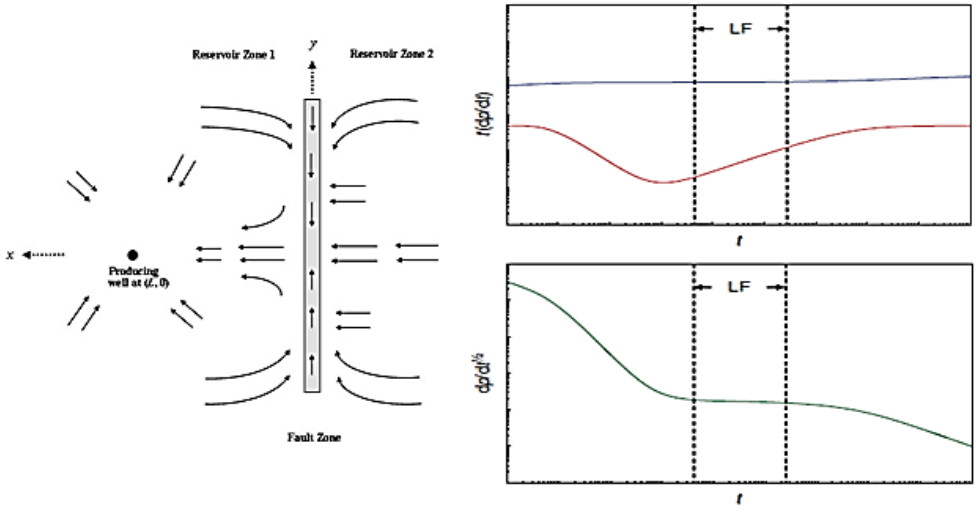
الشكل9-38 يُوضح الرسم البياني اللوغاريتمي (Diagnostic plot) لبئر عمودي يقع في مكمن متشقق هيدروليكيا Hydrulic fracture . طور الجريان من النوع شبه الشعاعي Pseudo Radial Flow – PRF . يظهر على شكل خط مستقيم افقي في الوقت المتاخر من الفحص على ان يسبقه دلائل على تاكيد وجود الشق من خلال خط ميل النصف او الربع للدلالة على ان جريان الموائع حاصل عبر الشقوق. لم يظهر في الرسم البياني تاثير لتخزين جوف البئر WBS و لعامل القشرة s .



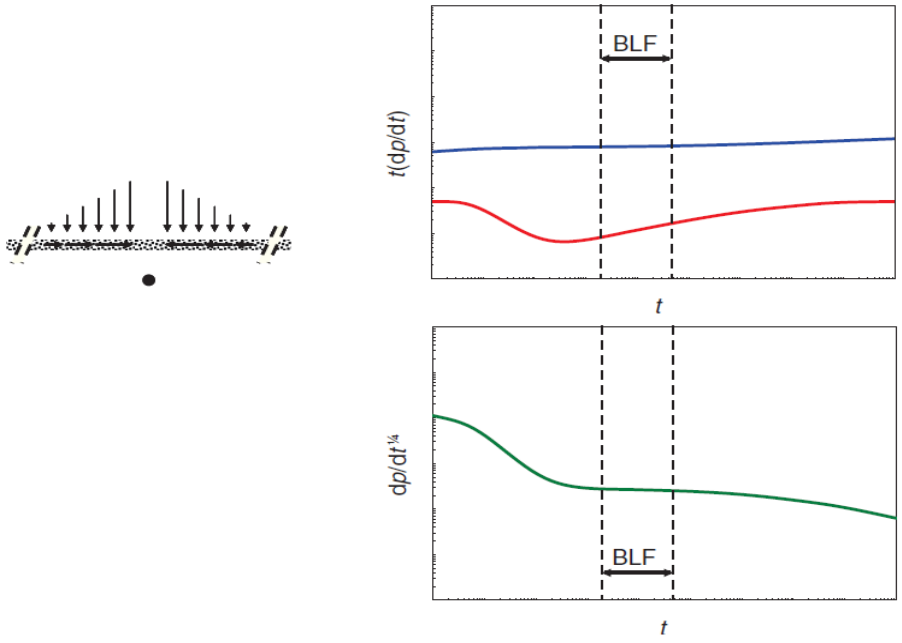
الشكل9-38: بئر عمودي في مكمن متشقق هايدروليكيا محدود التوصيلية، يُظهر طور الجريان شبه الشعاعي PRF

17- طور الجريان الخطي لبئر عمودي يقع بالقرب من فالق عالي التوصيلية Well Near a High-Conductivity Fault

الرسم البياني اللوغاريتمي التشخيصي (Diagnostic plot) في الشكل9-39 يُوضح استجابة الضغط و مشتقة الضغط جنبًا إلى جنب مع مخطط تشخيص الجريان الخطي لتاثير وجود بئر عمودي يقع بالقرب من فالق عالي التوصيلية High coductivity fault و يتسبب في نمو الجريان الخطيLinear Flow-LF من جهة الفالق الى البئر. بيان ذلك سلوك منحني مشتقة الضغط اذ تاخذ شكل خطا مستقيما بميل النصف في الفترة المتوسطة من الفحص و تاكيد ذلك بتشكل الخط المستقيم الافقي بالرسم التشخيصي الخاص لعلاقة $dp/dt^{1/2}$ vs t و عند ذات الفترة لمشتقة الضغط.



الشكل9-39: بئر عمودي بالقرب من فالق عالي التوصيلية، يُظهر طور الجريان الخطي LF



الشكل9-40: بئر عمودي بالقرب من فالق محدود التوصيلية، يُظهر طور الجريان الخطي الثنائي BLF

18- طور الجريان الخطي الثنائي لبئر عمودي بالقرب من فالق محدود التوصيلية Well Near a Finite-Conductivity Fault.

الرسم البياني اللوغاريتمي التشخيصي (Diagnostic plot) في الشكل9-40 يُوضح استجابة الضغط و مشتقة الضغط جنبًا إلى جنب مع مخطط تشخيص الجريان الخطي لتاثير وجود بئر عمودي يقع بالقرب من فالق محدود التوصيلية Finite coductivity fault و الذي يتسبب في حدوث جريان خطي ثنائيBilinear Flow-BLF من المكمن الى الفالق ومن الفالق الى البئر.

بيان ذلك ظهور ميل الربع m=-1/4 للخط المستقيم الظاهر عند بداية الفحص و تاكيد ذلك ظهور الخط المستقيم الافقي بالرسم التشخيصي الخاص لعلاقة $dp/dt^{1/4}$ vs t و عند ذات الفترة لمشتقة الضغط. هذا الموديل مشابه للبئر العمودي في شق محدود التوصيلية.

5-2-9 اختيار و تمييز الموديل المكمني- Identification and Reservoir Model

ان اختيار و تمييز الموديل المكمني بصورة صحيحة يمثل ركن اساسي في تفسير فحوصات الابار. ان استخدام نموذج مكمني غير مناسب أو تفسير جزء البيانات الخطأ يتسبب في فشل التفسير والحصول على نتائج غير مقنعة و استخدامها سيؤدي الى قرارات خاطئة في إدارة المكمن.

كرينكرتين (Gringarten-1984) وصل الى ان تحديد و تشخيص الموديل Model identification يتضمن ثلاث مكونات و تظهر في اوقات مختلفة عبر الفحص و في تسلسل زمني متعاقب تعكس استجابة الضغط عبر فحص البئر سواء اكان فحص لهبوط الضغط او تصاعد الضغط و كل مكون لا يعتمد على الاخر . تشمل المكونات الاتي:

اولا- الحدود الداخلية للموديل - Inner bounbaries

تشخيص الحدود الداخلية يجرى في منطقة الوقت المبكر Early Time Region- ETR من الفحص لتحديد حالة البئر نفسه و حال المنطقة القريبة حول البئر، إذ تتضمن تحديد المعاملات الاتية:

- تخزين جوف البئر - Wellbore storage
- عامل القشرة (الموجب والسلبي) - Skin
- الشقوق - Fractures
- الجريان المضطرب - Turbulence
- الاختراق الجزئي للمكمن - partial penetration

ثانيا- تحديد طبيعة المكمن- Reservoir identification :

و يجرى عبر تفسير البيانات في المدة المتوسطة من الفحص Middle Time Region- MTR من الفحص ليتضمن تحديد ايا من المكامن الاتية:

1- المكامن المتجانسة homogeneous reservoirs-

هي المكامن المثالية و تاخذ الشكل القياسي لمنحنيات تغير الضغط و مشتقة الضغط.

2- المكامن المعقدة heterogeneous reservoirs-

هي المكامن التي تنحرف عن الاشكال القياسية او النظامية لمنحنيات تغير الضغط و مشتقة الضغط و تتضمن المكامن المعقدة انواع المكامن الاتية:

* الموديل المكمني ثنائي المسامية - Dual porosity model

ويتمثل بالمكمن المتشقق الطبيعي إذ يتميز بوجود نظامين للمسامية ; مسامية الشق frature و مسامية النسيج الصخري matrix و يكون نظام النفاذية واحد للشق فقط.

* الموديل المكمني ثنائي النفاذية - Dual permeabilty model

ويتمثل بالمكمن المتشقق الطبيعي إذ يتميز بوجود نظامين للنفاذية : نفاذية الشق fracture و نفاذية النسيج الصخري matrix و يكون نظام المسامية واحد فقط للنسيج الصخري.

* الموديل المكمني التركيبي (ثنائي المسامية والنفاذية) Composite model

ويتمثل بالمكمن المعقد الذي يتميز بوجود نظامي نفاذية و نظامي مسامية من الداخل الى الخارج اذ ان المكمن يتكون من جراء تغير واضح بالخواص الفيزيائية للصخور افقيا او عموديا لاختلاف ظروف الترسيب او نتيجة لعمليات تحويرية تحدث بعد الترسيب (الاذابة او التكهف) تُغير من خواص الصخرة.

*الموديل المكمني متعدد الطبقات- Multilayers model

البئر ينتج من عدة طبقات تختلف في خواصها البتروفيزيائية من نفاذية او مسامية و قد تكون الطبقات معزولة عن بعضها البعض بطبقات طينية صماء او تكون مستمرة غير معزولة .

* الموديل المكمني المتشقق هيدروليكيا hydraulically fractured – يحصل التشقق صناعيا عبر حقن الماء في الطبقة المكمنية بضغط عالي اعلى من قابلية الصخرة على مقاومة التشقق و ذلك لغرض زيادة قابلية البئر على الانتاج و يتميز بنظام مسامي نفاذي معقد.

ثالثا- تحديد الحدود الخارجية - Outer bounbaries

تشخيص الحدود الخارجية يجرى على منحني البيانات في منطقة الوقت المتاخر Late Time Region- LTR من الفحص . بصورة عامة فان حدود المكمن اما تكون مغلقة Closed no-flow boundary فلا تسمح بعبور الموائع عبرها مما يتسبب بهبوط سريع للضغط المكمني اثناء عملية الانتاج او تكون الحدود مفتوحة مما يسمح بمرور الموائع كالماء من المستودع المائي aquifer للمكمن إذ تعتبر قوة دفع طبيعية مفيدة و ساندة للضغط المكمني-Constant pressure boundary و احيانا المكمن يكون من النوع المفتوح جزئيا ، فيوجد هبوط للضغط لكن محدود . ان طبيعة و شكل الحدود هذه لا شك ستشكل عامل انحراف و حيود اضافي في شكل منحني مشتقة الضغط القياسي . تشتمل انواع الحدود الخارجية للمكمن على ما يلي :

- وجود فالق عازل واحد - Single sealing fault
- وجود فالقين عازلة متوازية - Two parallel sealing faults
- وجود فالقين عازلة متقاطعة - Two intersecting sealing faults
- حدود ثابتة الضغط - Constant pressure boundary
- مكمن مغلق - Closed reservoir

ان تاثير اشكال الحدود الخارجية اعلاه ستصاحبه العديد من اطور الجريان Flow regime types المختلفة قبل او بعد منطقة الجريان الشعاعي نتيجة لتغيرات الضغط و عبر الفترات الزمنية المتعاقبة والتي تم ذكر بعضها في الفقرة السابقة.

6-2-9 تحديد معاملات الموديل Estimate Model Parameters

نستخدم طرق الخط المستقيم التقليدية أو الطرق اللوغاريتمية للحصول على تقديرات تقريبية لمعاملات المكمن (نفاذية، حجم المائع ، شكل الهندسي للمكمن ، المسافة الى حدود المكمن ...) ثم

نستخدم المطابقة اليدوية أو التلقائية للتاريخ الانتاجي للبئر لاجل تحسين قيم تلك المعاملات و كذلك للتأكد من أن الموديل المختار يتوافق كليا مع تاريخ معدل الانتاج و الضغط. سبق ان تطرقنا لكلتا الطريقتين.

7-2-9 المحاكاة و تطابق الضغط المقاس Simulate and History-Match Pressure Response

الطريقة الأكثر عمومية لتمثيل كلا من التاريخ الانتاجي للبئر و الموديلات المكمنية المعقدة هي باستخدام المحاكاة التحليلية analytical أو المحاكاة العددية numerical جنبا إلى جنب مع مطابقة التاريخ تلقائيا(automatic matching) باستخدام الحاسوب.

1- المحاكاة التحليلية Analytical Simulation

تستخدم المحاكاة التحليلية مبدأ التراكب الزمني superposition in time لحساب استجابة الضغط عبر للتاريخ الانتاجي المعطى ياتي ذلك من الحل اللابعدي لمعادلة الانتشار، بفرض معدل ثابت للإنتاج لظروف معينة للحدود الداخلية والخارجية للوسط المسامي. المحاكاة التحليلية قابلة للتطبيق بدقة فقط للأنظمة أحادية الطور(الانتاج من البئر بمائع واحد) single phase له قابلية انضغاط قليلة او ثابتة.

2- المحاكاة العددية Numerical Simulation

يُمكن للمحاكاة الرقمية أن تشكل نموذجًا عمليا لأي ظاهرة مكمنية سواء اكانت الظاهرة خطية أو غير خطية ، بما في ذلك الجريان متعدد الأطوار multi-phase flow ، وللمكامن المعقدة (عدم التجانس العمودي والجانبي) و لتمثيل حدود المكمن لاي شكل .مع ذلك ، فإن المحاكاة العددية تستغرق وقتًا أطول بكثير من حيث إعداد البيانات و مطابقة تاريخ الضغط وانتاج البئرمقارنة بالمحاكاة التحليلية.

3- مطابقة الضغط او التاريخ الانتاجي History Matching.

في مطابقة التاريخ الانتاجي للبئر ، يقوم الحاسوب بتثبيت خواص المكمن المعروفة known والمتوفرة دون تغيير قيمها ويغير في القيم غير المعروفة unknown و يُحسب الضغط و يقارن ما بين القيم المحسوبة و المقاسة و يكرر الحسابات بتغيير قيم معامل معين او معاملات يرى انها مؤثرة و حتى حصول التتطابق لقيم الضغط المحسوبة مع المقاسة.

 # بعض المبادىء العامة للتطابق

- مطابقة مدة تخزين جوف البئرWBS، ثم المدة الوسطى، ثم مطابقة حدود المكمن وأخيراً حجم المكمن أو الضغط المكمني الأولي Pi.

- استخدام المخطط اللوغاريتمي أثناء مطابقة المناطق المبكرة والوسطى .

- استخدام المخطط اللوغاريتمي والمخطط الديكارتي (ذي الاحداثيات العادية) معًا لمطابقة بيانات المدة المتأخرة من الفحص جنبًا إلى جنب مع المخططات الخاصة لتشخيص بعض اطوار الجريان اذا كان ذلك ملائما.

 # مبدأ التطابق

- تعديل معامل تخزين جوف البئر WBS-C لمطابقة البيانات التي تقع ضمن منطقة تاثير WBS. ان زيادة المعامل C سيحرك محاكاة خط ميل الواحد للضغط إلى اليمين (أو ألاسفل) ؛ تقليل المعامل C سينقل خط ميل الواحد إلى اليسار (أو ألاعلى).

استخدام المعادلة الاتية لحساب القيمة المستحدثة للمعامل C لاجل ازاحة خط ميل الواحد افقيا:

$$C_{new} = \left(\frac{\Delta t_{w,obs}}{\Delta t_{w,sim}}\right) C_{old} \quad \text{---------- 19}$$

يُقرأ قيمتين للوقت من الخطين المحسوب (من المحاكاة) $\Delta t_{w.sim}$ والمقاس(من بيانات الفحص) $\Delta t_{w.obs}$ ضمن منطقة تاثير تخزين جوف البئر لقيمة مشتقة ضغط معينة على الاحداثي الصادي. للازاحة العمودية نستخدم المعادلة الاتية:

$$C_{new} = \left(\frac{(t\Delta p')_{w,sim}}{(t\Delta p')_{w,obs}}\right) C_{old} = \left(\frac{\Delta p_{w,sim}}{\Delta p_{w,obs}}\right) C_{old} \quad \text{---------- 20}$$

لوقت معين على الاحداثي السيني و ضمن منطقة تاثير تخزين جوف البئر يُقرأ قيمتين لمشتقة الضغط او تغير الضغط من الخطين المحسوب(من المحاكاة) اما $(t\Delta p')_{w.sim}$ او $(\Delta p)_{w.sim}$ والمقاس اما $(t\Delta p')_{w.obs}$ او $(\Delta p)_{w.obs}$. تُجري المطابقة عبر المعادلتين رقم-19 و 20 .

- تعديل قيمة النفاذية لجعل مشتقة الضغط المحسوبة من المحاكاة مطابقًة للجزء الأفقي لمشتقة الضغط من البيانات الحقلية المقاسة. زيادة النفاذية ستحرك مشتقة الضغط في المحاكاة الى الأسفل و يحصل العكس عند تقليل النفاذية . إذا لم تُظهر مشتقة البيانات المقاسة فترة أفقية محددة واضحة، فسيكون من المستحيل فعليًا الحصول على تقدير وحيد للنفاذية وبالنتيجة فالتطابق يعطي قيمة للنفاذية غير صحيحة.

استخدام المعادلة الاتية لحساب القيمة المستحدثة للنفاذية k_{new} لاجل تحريك منحني مشتقة الضغط عموديا باستخدام منحني مشتقة الضغط:

$$k_{new} = \left(\frac{(t\Delta p')_{r,sim}}{(t\Delta p')_{r,obs}}\right) k_{old} \quad \text{---------- 21}$$

- تعديل قيمة عامل القشرة s لجعل تغيير الضغط المحسوب من المحاكاة يطابق تغير الضغط المقاس ضمن المدة المقابلة للجريان الشعاعي اللانهائي و حسب المعادلة :

$$s_{new} = s_{old} + \frac{(\Delta p_{r,obs} - \Delta p_{r,sim})}{2(t\Delta p')_r} \quad \text{---------- 22}$$

لوقت معين ضمن منطقة الجريان الشعاعي اللانهائي يتم اختيار قيمتين للتغير بالضغط من كلا المنحنيين المحسوب من المحاكاة $(\Delta p)_{r.sim}$ والمقاس $(\Delta p)_{r.obs}$ و كذلك قيمة مشتقة الضط $(t\Delta p')_r$.

- تعديل المسافة الى حدود المكمن لجعل مشتقة الضغط من المحاكاة تتطابق مع مشتقة البيانات المقاسة.

ان زيادة المسافة إلى حد المكمن ستحرك مشتقة المحاكاة إلى اليمين ؛ تقليل المسافة ستحرك مشتقة المحاكاة إلى اليسار. لاحظ ان الوصول الى حدود المكمن يتم في الوقت المتاخر من الفحص اي عند طور الجريان شبه المستقرPSS. ان زيادة المسافة الى حد المكمن بمقدار الضعف يتسبب في ازاحة مشتقة الضغط بالعامل 4 و حسب المعادلة ادناه:

$$L_{new} = \left(\sqrt{\frac{\Delta t_{obs}}{\Delta t_{sim}}} \right) L_{old}, \quad \text{---------- 23}$$

- باستخدام الرسم البياني العادي (الديكارتي-Cartesian) ، يتم تعديل الضغط المكمني الأولي و / أو حجم المكمن للحصول على التطابق الكلي. ان زيادة الضغط الأولي سيزيح منحني ضغط المحاكاة الى الأعلى بمقدار ثابت و زيادة حجم المكمن سيزيد منحني ضغط المحاكاة في نهاية الفحص من دون ان تتاثر استجابة ضغط المحاكاة في بداية الإنتاج .

- لتغيير النفاذية و عامل القشرة s_{old}، k_{old} في وقت واحد(سوية) مع الحفاظ على دليل الإنتاجية ثابتًا ، يُحسب عامل القشرة الجديد s_{new} كما يأتي:

$$s_{new} = (s_{old} + 8)\left(\frac{k_{new}}{k_{old}} \right) - 8 \quad \text{---------- 24}$$

مثال1 : تتوفر بيانات فحص هبوط الضغط Drawdown test لمكمن متجانس و المتضمنة : بيانات خواص النفط PVT و المسامية والسُمك و الانضغاطية و غيرها.

المطلوب : تحديد اجراءات التطابق ما بين بيانات الفحص الحقيقية المقاسة مع البيانات المحسوبة من الموديل؟؟

الحل:

المرحلة الأولى: بناء النموذج الرياضي (حساب الضغط النظري)

يقوم الحاسوب (برنامج الحاسوب) ببناء مكمن افتراضي في ذاكرته بناءً على المدخلات (علما ان من بين المدخلات تسمية نوع النموذج المكمني المقترح – متجانس او معقد , هنا حالة المكمن من النوع متجانس) و الخطوات تتضمن:

الخطوة الاولى- تطبيق معادلة الانتشار (Diffusivity Equation): يعتمد الحل التحليلي للمكمن المتجانس على المعادلة اللابُعدية (Dimensionless Equation). ومن الشائع عند استنتاج منحنيات الضغط باستخدام الحاسوب أو البرامج المتخصصة، الاعتماد على الحل التحليلي في فضاء "لابلاس" (Laplace Transform)؛ وذلك لفاعليته في صياغة المعادلة الشاملة التي تصف سلوك مختلف أنواع المكامن، كما ورد في دراسة (Marcel et al.- 1993) و (Marcel et al.-1992) .المعادلة العامة موضحة أدناه:

$$\bar{P}_{wD}(s) = \frac{s\bar{P}_{sD}(s) + S}{s[1 + C_D s(s\bar{P}_{sD}(s) + S)]}$$

اما المعادلة الخاصة في حسابات الضغط للمكمن المتجانس فتكتب بالصيغة الاتية:

$$\bar{P}_D(s) = \frac{K_0(\sqrt{s}) + S \cdot \sqrt{s}\, K_1(\sqrt{s})}{s[\sqrt{s}\, K_1(\sqrt{s}) + C_D s(K_0(\sqrt{s}) + S\sqrt{s}\, K_1(\sqrt{s}))]}$$

اذ ان :

- $\bar{p}_{wD}(s)$: The dimensionless wellbore pressure in the Laplace domain.
- $\bar{p}_D(s)$: The dimensionless reservoir pressure (sandface) for a line source or cylindrical source solution.
- s: The Laplace transform variable (dimensionless).
- S: The **skin factor**, representing the flow resistance or enhancement near the wellbore.
- C_D: The **dimensionless wellbore storage coefficient**, representing the dampening effect of the fluid volume within the wellbore itself.

$\bar{P}_D(s)$	الضغط البعدي عند جدار البئر في مجال لابلاس (Dimensionless Wellbore Pressure in Laplace space)
s	متغير لابلاس (Laplace variable)، يمثل التردد في المجال التحويلي
K_0, K_1	دوال بيسل المعدلة من النوع الثاني (Modified Bessel Functions of the Second Kind)
$\sqrt{s}$	ناتج التحويل الرياضي المرتبط بالانتشار الشعاعي
S	معامل القشرة (Skin Factor)، يمثل تأثير الضرر أو التحفيز حول البئر
C_D	معامل الخزن البئري البعدي (Dimensionless Wellbore Storage Coefficient)

الخطوة الثانية: تحويل الحل من فضاء 'لابلاس' إلى المجال الزمني (Time Domain) باستخدام خوارزمية (Stehfest Numerical Inversion)؛ وذلك لاستخراج قيم الضغط المحسوبة كدالة لمتغيرات المكمن المختلفة، كما في الصيغة الآتية:

$$P_{theor}(t) = f(t, k, S, C, \phi, \mu, c_t, h, \ldots)$$

ان الضغط النظري او المحسوب هو في الحقيقة يمثل مجموع ثلاثة أجزاء مدمجة في معادلة واحدة و هي:

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{WellboreStorage} + \Delta P_{Skin} + \Delta P_{Reservoir(k)}$$

المرحلة الثانية: توليد المنحنيات(The Predicted Curves)

بعد الحسابات أعلاه، يرسم البرنامج منحنيين أساسيين على لوحة الـ:Log-Log :

- منحنى الضغط : يمثل الفرق بين الضغط الابتدائي وضغط البئر المحسوب.
- منحنى المشتقة : وهو الأهم، لأنه يوضح شكل و سرعة تغير الضغط.

المرحلة الثالثة: عملية المطابقة (The Matching Process)

- تحديد الفرق(The Residuals) : بالبداية البرنامج يضع النقاط الحقيقية فوق المنحنى النظري. ثم يحسب المسافة (الخطأ) بين كل نقطة حقيقية والمنحنى المقابل لها باستخدام مثلا خوارزمية مجموع مربعات الأخطاء" (Sum of Squared Errors) او ما يسمى الانحدار اللاخطي Nonlinear regression و حسب الصيغة التالية :

$$\text{Error} = \sum_{i=1}^{N} [P_{measured}(t_i) - P_{theor}(t_i, k, S, C)]^2$$

- معيار الخطأ:

في المنحنيات اليدوية، المعيار هو "عين المهندس" ومدى اقتناعه بالتطابق البصري.

في الانحدار، المعيار هو تقليل "مجموع مربعات الأخطاء" (Sum of Squared Errors) رياضياً، وهو أمر أكثر دقة وموضوعية.حيث تُستخدم لذلك خوارزمية التحسين (Optimization Algorithm) (مثل.Levenberg-Marquardt) وظيفتها تغيير المدخلات بذكاء. فمثلا إذا وُجد أن المنحنى النظري أعلى من الحقيقي، يقوم تلقائياً بزيادة النفاذية في المعادلة لخفض المنحنى.

- التكرار:(Iterations) : الاستمرار في تغيير وإعادة حساب الضغط (المرحلة الأولى) ومقارنته. و لحين يصل الفرق (الخطأ) إلى أقل ما يُمكن (Global Minimum Error) و عندها يتوقف البرنامج.

لاحظ ان البرنامج خلال التطابق لا يغير قيم الضغط المجردة ، بل يغير البارامترات الفيزيائية مثل:

البارامتر	ماذا يمثل؟	كيف يؤثر على المنحنى؟
k (النفاذية)	خاصية فيزيائية للصخر	يغير ميل المنحنى في منطقة الجريان الشعاعي
S (Skin)	حالة البئر (تلف أو تحسن)	يزيح المنحنى رأسياً لأعلى أو لأسفل
C (التخزين)	انضغاطية السوائل في البئر	يغير شكل بداية المنحنى (الجزء المبكر)

حيث يدخل برنامج الحاسوب تاثير معاملات parameters عدة (مثل: تاثير C, s, k) في ان

واحد لايجاد منحني الضغط النظري (المحسوب) و الذي يُقارن مع الضغوط المقاسة. ان التطابق النهائي سيفرز القيم النهائية المتوقعة لكل من النفاذية , عامل القشرة و معامل تخزين البئر.

مثال-2 التطابق اليدوي Manual History Matching

(John P. Spivey، W. John Lee،(2013))

يُوضح المثال سير العمل لمطابقة التاريخ الانتاجي للبئر يدويا. بداية نحتاج إلى تحديد النفاذية المناسبة لاجراء المحاولة الأولى للمحاكاة. يُمكننا تقدير النفاذية من مؤشر إنتاجية المرحلة الواحدة باستخدام تغيير الضغط Δp عبر مدة الإنتاج السابقة لفحص تصاعد الضغط بافتراض أن عامل القشرة s يساوي 0 كما يأتي:

$$k = \frac{1000\mu BJ}{h} = \frac{1000\mu B}{h}\frac{q}{\Delta p}$$

$$= \frac{(1000)(0.42)(1.48)}{(11.5)}\frac{(575)}{(4{,}900 - 2{,}226.8)}$$

$$= 11.6 \text{ md.}$$

نحتاج أيضًا إلى فرض قيمة لمعامل تخزين جوف البئر WBS. بشكل عام ، يبدو أنه من الأسهل البدء بمعامل WBS منخفض جدًا بدلاً من معامل مرتفع جدًا. سنختار قيمة للمعامل WBS بشكل عشوائي و ليكن 0.01 psi .

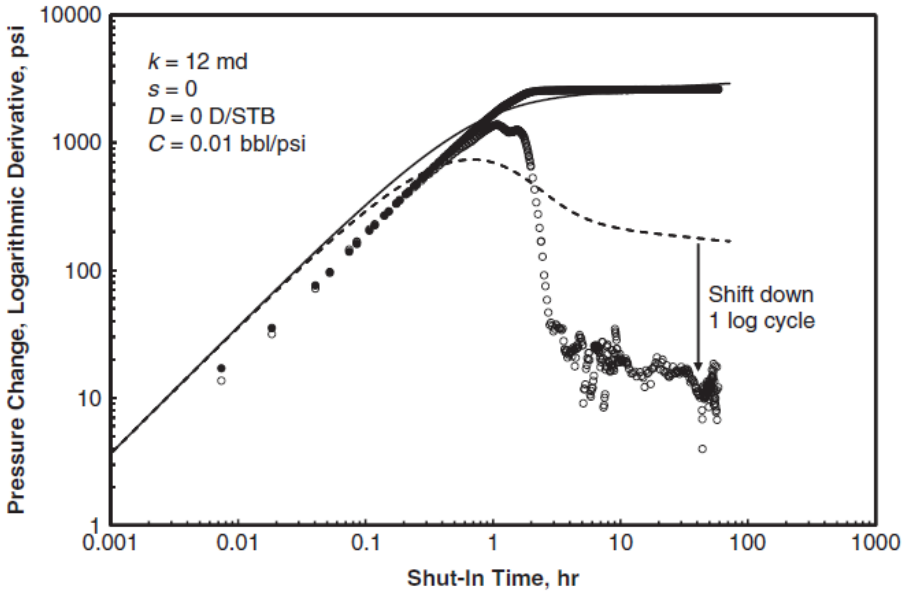


Fig. 11.5—Run 1, permeability estimated from drawdown assuming zero skin factor.

الشكل9-41: المحاولة الاولى Run1، تحديد النفاذية من هبوط الضغط قبل غلق البئر بفرض معامل القشرة s=0

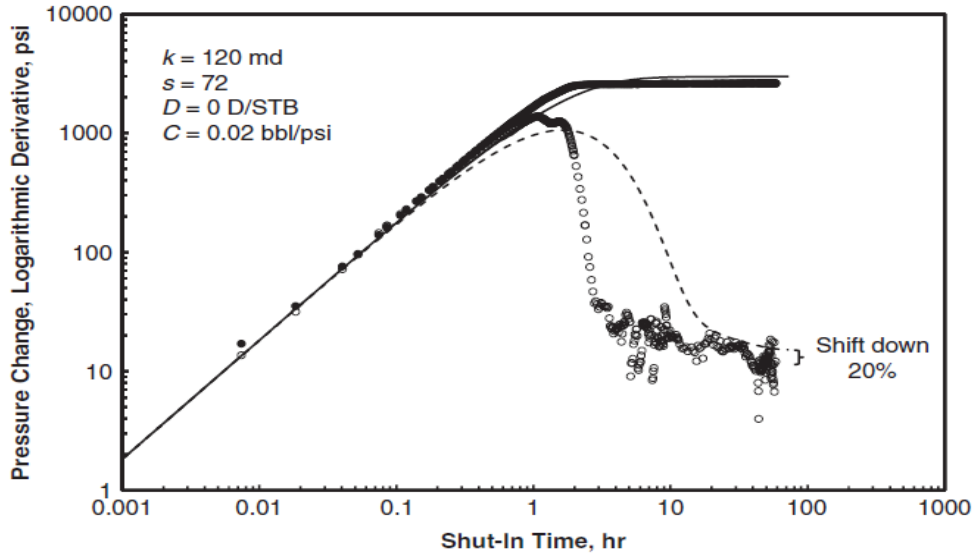
- الشكل9-41 يُوضح نتائج **أول محاولة** للمحاكاة ، لم نحصل على مطابقة ما بين البيانات الحقلية (المنحني بدوائر فارغة) و المحسوبة (المنحني المتقطع) . من الواضح و حسب البيانات الحقلية يبدو أن البئر به درجة كبيرة من الضرر. لتحسين المطابقة ، نحتاج إلى تحريك منحني مشتقة الضغط الى الأسفل بمقدار دورة لوغاريتمية واحدة و بعبارة أخرى زيادة النفاذية بالعامل 10. يبدو أن تطابق مشتقة الضغط في تحسن كما في الشكل9-42 ، لكن بحاجة إلى زيادة عامل القشرة للحفاظ على نفس دليل الإنتاجية. يبدو أيضًا أن معامل WBS منخفض . سنزيده بمعامل 2. نحسب عامل القشرة الجديد من المعادلة:

$$s_{new} = (s_{old} + 8)\left(\frac{k_{new}}{k_{old}}\right) - 8$$

$$= (0+8)\left(\frac{120}{12}\right) - 8$$

$$= 72.$$

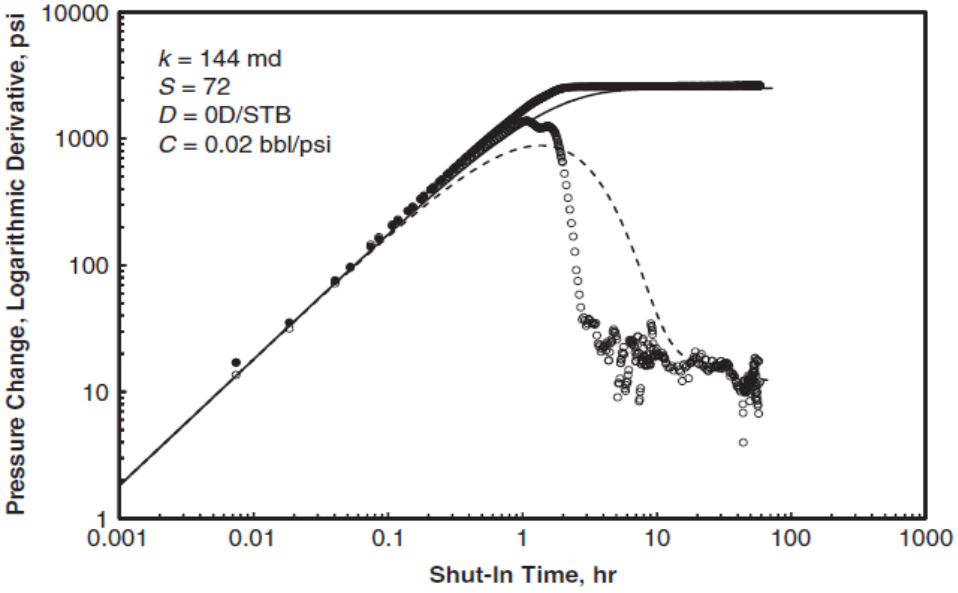
- الرسم البياني اللوغاريتمي في الشكل9-42 يُوضح نتائج **المحاولة الثانية** للمحاكاة باستخدام القيم الجديدة لكل من النفاذية زيادة الى k=120 md ، عامل القشرة زيادة الى s=72 و زيادة معامل تخزين جوف البئر الى C=0.02 bbl/psi. من الشكل9-42، يبدو هنالك حاجة لزيادة النفاذية حوالي 20% لتزحيف المشتقة الى الاسفل لتحقيق تطابق افضل.



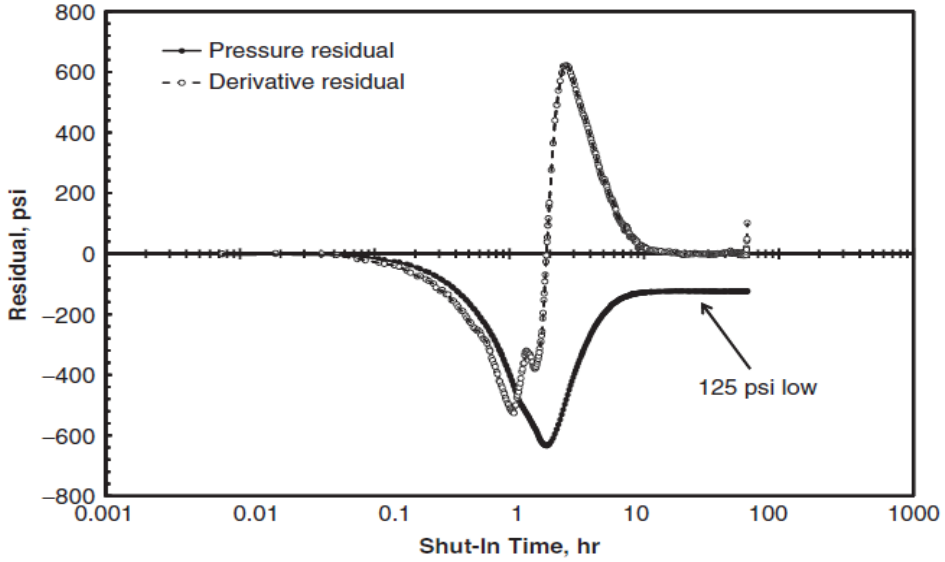
الشكل9-42: المحاولة الثانية Run2 ، زيادة قيمة النفاذية الى عشرة اضعاف بوجود تاثير معامل القشرة

- يُوضح الرسم البياني اللوغاريتمي في الشكل9-43 نتائج **المحاولة الثالثة** للمحاكاة. هنالك تطابق جيد و مقبول للمشتقة في نهاية الفحص. بينما الرسم البياني المتبقي في الشكل9-44 يُوضح أن هنالك فرق ليس بقليل و بحدود 125 psi في تغيير الضغط Δp للمحاكاة اقل مما لتغير الضغط المُقاس . السبب في ذلك ان انضغاط المقياس اللوغاريتمي للاحداثي الصادي y axis

اقل حساسية للاختلافات بين تغير ضغط المحاكاة و المُقاس مقارنة مع المقياس الصادي العادي في الشكل9-44.



الشكل9-43: المحاولة الثالثة Run3 ، زيادة اضافية الى قيمة النفاذية بنسبة 20%



الشكل9-44: المحاولة الثالثة Run3 ، فرق الضغط قليل مقارنة بالمُقاس في منحنيات الرسم المتبقي في حين ان مشتقة الضغط تبدو بتطابق جيد

نظرًا لأن مطابقة المشتقة تبدو معقولة ، فسوف نغير عامل القشرة لمطابقة تغير الضغط Δp.
يُمكن حساب المقدار الإضافي لعامل القشرة و المطلوب لتقليل فرق الضغط البالغ 125 psi كما يأتي:

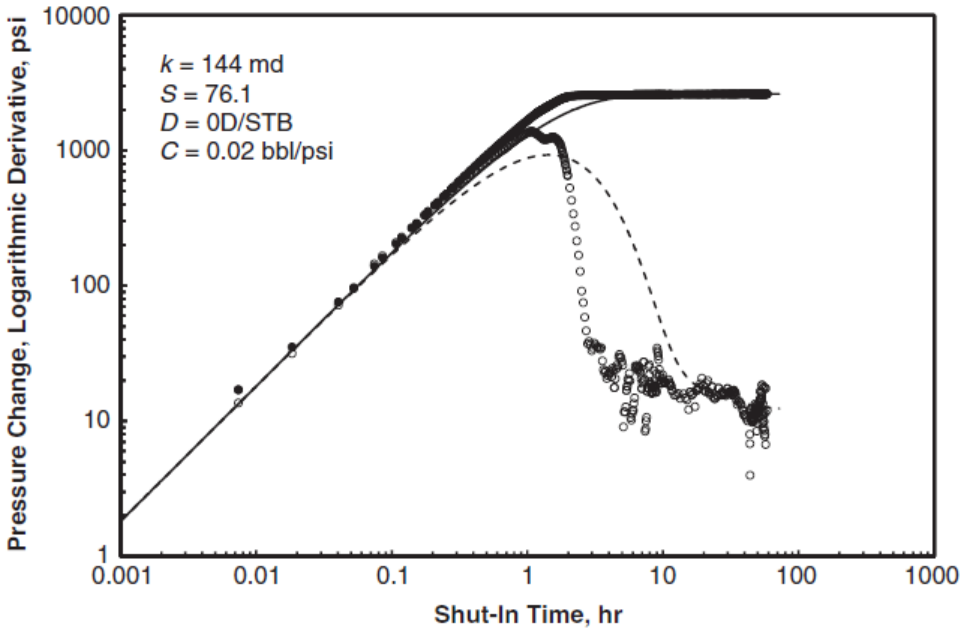
$$\Delta s = \frac{0.00708kh}{qB\mu}\Delta p$$
$$= \frac{(0.00708)(144)(11.5)}{(575)(1.48)(0.42)}(125)$$
$$= 4.1.$$

لاحظ ان الباقي (Residual) يعني الفرق بين القيمة المقاسة فعليًا من البئر و القيمة المحسوبة من النموذج اي ان $\text{Residual}=y_{\text{measured}}-y_{\text{calculated}}$. اذ ان :

y_{measured} يُمثل القياس الحقيقي مثلاً: ضغط البئر عند وقت معين.

$y_{\text{calculated}}$ القيمة التي يتوقعها النموذج عند نفس الوقت.

- تُستخدم منحنيات الباقي لتقييم جودة المطابقة، وتكشف أخطاء منهجية لا تظهر في منحنى الضغط او مشتقة وحده.و إذا كان الباقِي صغيرًا فالنموذج جيد و إذا كان الباقِي كبيرًا أو منتظمًا في الاتجاه فالنموذج يحتاج الى تحسين . إذا كانت البواقي تنخفض بشكل منهجي مع الزمن فقد يكون هناك تأثير تخزين (Wellbore Storage) غير مُدرَج في النموذج.إذا كانت البواقي في تزايد فجائي عند زمن معين فقد يكون هناك حدود مغلقة (Closed Boundary) لم تُوضف في النموذج.

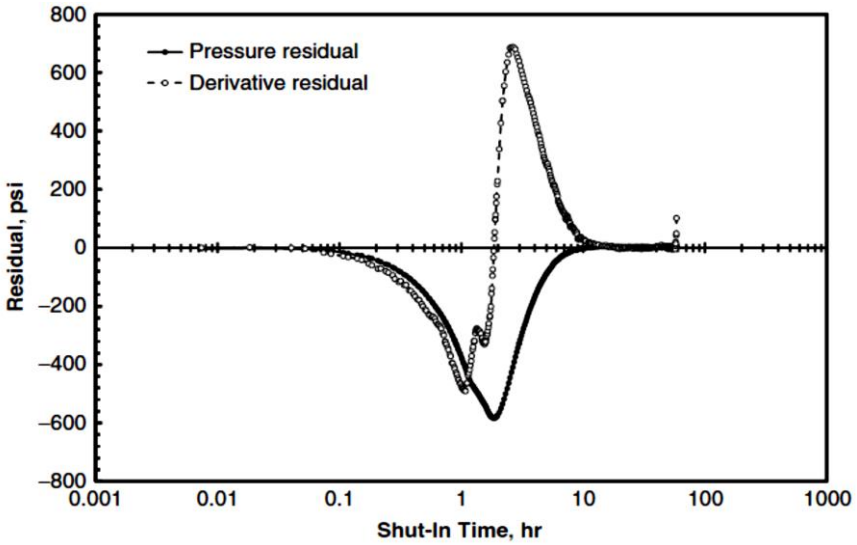


الشكل9-45: المحاولة الثالثة Run4 ، زيادة اخرى اضافية الى قيمة النفاذية بنسبة 20%

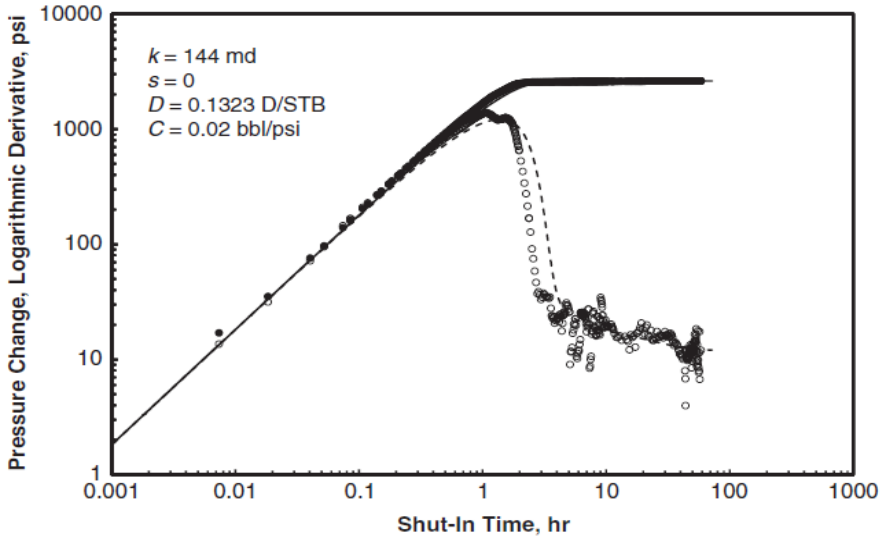
المحاولة الرابعة للمحاكاة و لاجل الحصول على تطابق بالطريقة اليدوية سنزيد عامل القشرة بالمقدار 4.1 اي من 72.1 الى 76 و نتائج هذه المحاولة تم رسمها في الاشكال9-45 و 9-46 .

يتبين من الشكلين9-45 و 9-46 حصول تطابق جيد جدا لكلا منحني فرق و مشتقة الضغط للمدة من 20 ساعة و حتى نهاية الفحص.

- للحصول على تطابق أفضل ، يجب أن ندخل ظواهر إضافية لمطابقة المنطقة الانتقالية من تاثير تخزين جوف البئر WBS إلى منطقة الجريان الشعاعي الأفقي اللانهائي. في فحص تصاعد الضغط ، يُمكن أن تتسبب معدلات الجريان المرتفعة بالقرب من فتحة البئر الى جريان لادارسي تؤدي الى حدوث انحدار حاد لمنحني مشتقة الضغط عبر المرحلة الانتقالية من WBS إلى منطقة الجريان الشعاعي .



الشكل9-46: المحاولة الرابعة Run4 ، الرسم البياني المتبقي لفرق الضغط و مشتقة الضغط



الشكل9-47: المحاولة الخامسة Run5 ، استبدال معامل القشرة s بمعامل القشرة اللادارسيnon-Darcy skin-D

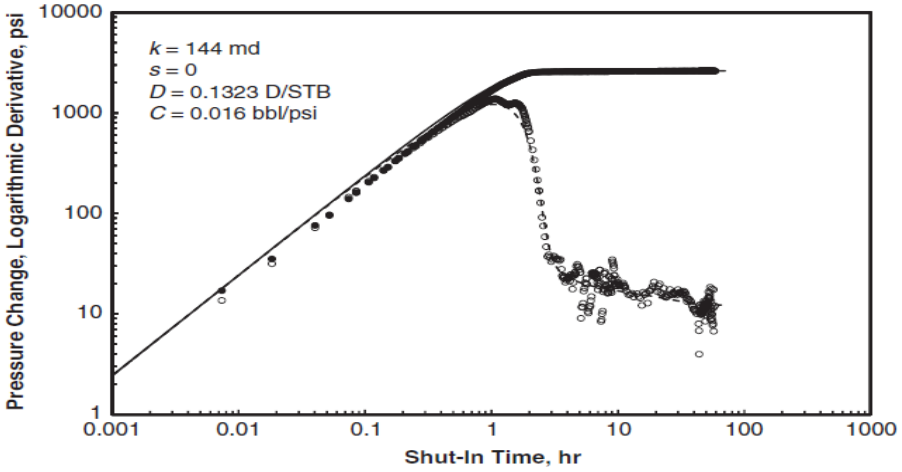
لذلك نجرب ان نستبدل عامل القشرة لدارسي Darcy skin-s بعامل قشرة مكافئ للا دارسي non-Darcy skin-D. نحسب معامل التدفق اللا دارسي المطلوب D بواسطة المعادلة ادناه:

$$D = \frac{s}{q} = \frac{76.4}{575} = 0.1323\ D/STB$$

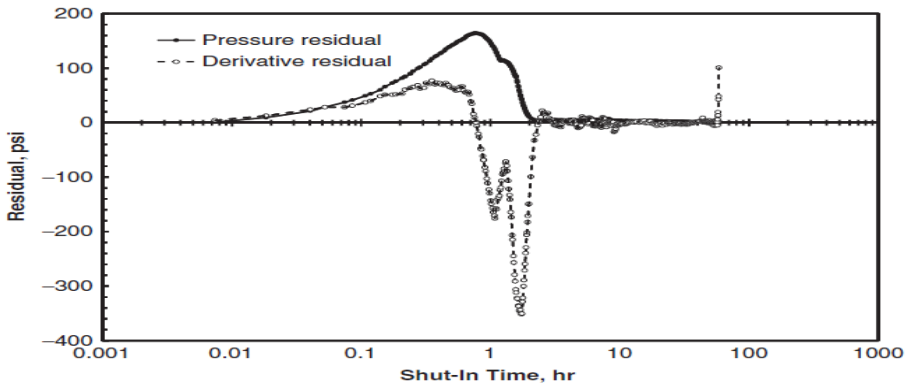
- الشكل 9-47 يُوضح نتائج **المحاولة الخامسة** للمحاكاة. بصورة عامة هنالك تطابق جيد جدًا عبر فترة WBS و لمدة من **10** ساعات حتى نهاية الفحص ، لكن الانحدار الحاد للمشتقة لا يتطابق جيدًا. نحتاج الى تزحيف منحني المحاكاة إلى اليسار بتقليل معامل WBS ؛ ممكن نقدر بيانيا التقليل المطلوب بنسبة 20٪.

- يُبين الشكل 9-48 المحاولة السادسة والاخيرة لمحاكاة سلوك البئر عبر الفحص ، إذ تم الحصول اخيرا على تطابق جيد جدا لكلا من منحني فرق الضغط و مشتقة الضغط المحسوب و المقاس (لبيانات الفحص) و لمدة الفحص الكلية.

- ان **المحاولة السادسة** الاخيرة حققت تطابق ممتاز لما يقارب 97 ٪ من مدة الفحص. ان الانخفاض الطفيف في مدة تخزين جوف البئر WBS والذي سيتلاشى بسرعة، لا يبدو سيؤثر على تطابق الفحص بأكمله فلا نحتاج جهد اضافي لاجل تطابق الفحص بأكمله.



الشكل9-48: المحاولة السادسة Run6 ، تقليل معامل القشرة بنسبة 20%



الشكل9-49: المحاولة السادسة Run6 ، الرسم البياني المتبقي لفرق الضغط و مشتقة الضغط

4- المطابقة التلقائية - Automatic History Matching

المطابقة التلقائية Automatic Matching للتاريخ الانتاجي للبئر ، والتي تسمى أحيانًا المطابقة التلقائية لنوع المنحني type curve ، تستخدم لذلك خوارزمية الانحدار غير الخطي Nonlinear regression لتقليل الفارق ما بين القيم المحسوبة و المقاسة الى ادنى حد ممكن . يعبر عن تلك الخوارزمية بدالة الهدف Objective function $F(\vec{\alpha})$ والهف هو تصغيرها الى ادنى حد ممكن. رياضيا دالة الهدف $F(\vec{\alpha})$ تساوي:

$$\chi^2 = F(\vec{\alpha}) = \sum_{j=1}^{N} \left(\frac{f(\vec{\alpha}; t_j) - p_j}{\sigma_j} \right)^2 \quad \text{---------- 25}$$

χ^2 chi squared" merit function

$F(\vec{\alpha})$ is the objective function to be minimized

p_j is the pressure recorded at time tj،

σ_j is the standard deviation of the pressure measurement for point j،

$\vec{\alpha}$is the vector of the parameters of the model function f،

$f(\vec{\alpha}; t_j)$ is the pressure predicted by the model functionat time t_j،

او يُمكن كتابة الطرف الايمن بالصيغة الاتية:

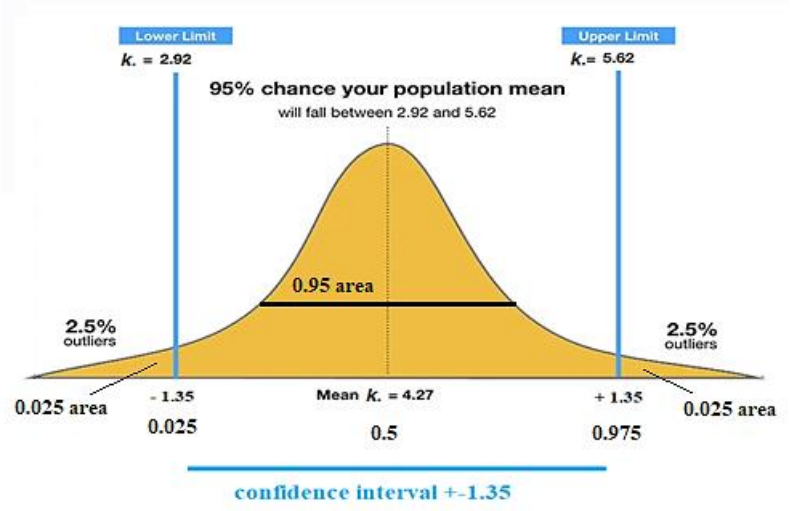
$$\sum_{i=1}^{n} \left[p_{measured}(t_i) - p_{model}(t_i, k, s, C, \ldots) \right]^2 \quad \text{---------- 26}$$

إذ ان الضغط المقاس $p_{measured}$ و الضغط المحسوب p_{model} من الموديل في اي وقت t_i عند ظروف مكمنية و بئرية محددة. البرنامج الجاهز يقوم باجراء التطابق التلقائي عبر تغيير المعاملات غير المؤكدة (بدرجة من عدم اليقين) بشكل منفصل اولا ثم تغيير جميع المعاملات غير المؤكدة في وقت واحد لاجل المطابقة النهائية.

8-2-9 تحديد فترات الثقة Calculate Confidence Intervals

فترة الثقة Confidence Interval-CI هي نطاق (مدى) من القيم الصحيحة لأحد خواص المكمن مثل النفاذية Permeability-k أو عامل القشرة Skin-s، مسامية الصخور Porosity-φ ضغط البئر Pressure-p تخزين المكمن Storativity (φc_t) ، اذ يتم تقدير النطاق من خلال البيانات المقاسة وتحليل المنحنيات، بحيث نتوقع أن القيمة الحقيقية تقع داخل النطاق بنسبة ثقة معينة (مثل 95%).

مثلا ، إذا كانت النفاذية المقدّرة estimated value بحدود k = 4.27 md و نسبة الثقة 95% فان فترة الثقة C.I للنفاذية تتراوح ما بين (2.92 md – 5.62 md) كما في الشكل 9-50 و هذا يعني أننا واثقون بنسبة 95% أن النفاذية الحقيقية تقع ضمن هذا المجال او النطاق.



الشكل9-50: حدود او مدى الثقة للنفاذية عند احتمالية او نسبة الثقة 95%

الصيغة الرياضية لفترة الثقة:

1- إذا كان حجم العينة صغيرا اي ان عدد العناصر العينة اقل من (n<30) لحساب فترة الثقة C.I ، تُستخدم المعادلة التالية:

$$\text{C.I}= \bar{x} \pm t_{\alpha/2,\, n-1} \cdot \frac{\breve{}}{\sqrt{n}} \quad \text{--------- 27}$$

2- إذا كان حجم العينة كبيرًا ، اي ان عدد العناصر العينة اكبر(n ≥ 30) و لحساب فترة الثقة C.I تُستخدم المعادلة التالية:

$$\text{C.I}= \bar{x} \pm z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{--------- 28}$$

SYMBOL	MEANING	
$\bar{x}$	Sample mean (e.g., average porosity from well logs)	متوسط العينة
s	Sample standard deviation (estimated from data)	الانحراف المعياري للعينة
σ	Population standard deviation (rarely known in practice)	الانحراف المعياري الشامل لكل مجموعة الاختبار
n	Sample size (number of measurements or wells)	حجم العينة
df	Degrees of freedom $= n - 1$	درجات حرية
α	Significance level $= 1 -$ confidence level Example: for 95% confidence, $\alpha = 0.05$	مستوى الدلالة
$t_{\alpha/2,\, df}$	Critical value from the **t-distribution** with df degrees of freedom, corresponding to two-tailed probability α	القيمة الحرجة من توزيع t مع درجات حرية df، المقابلة للاحتمال ثنائي الذيل
$z_{\alpha/2}$	Critical value from the **standard normal distribution** (e.g., $z_{0.025} = 1.96$ for 95% confidence)	القيمة الحرجة من التوزيع الطبيعي القياسي (على سبيل المثال، 1.96= z 0.025 لثقة 95%)
$\frac{s}{\sqrt{n}}$	Standard error of the mean (SEM)	ألخطأ المعياري

9-2-9 التحقق من صحة النتائج Validate Results

خطوة أخرى مهمة في خطوات العمل لاجراء التفسير هي التحقق من صحة نتائج التفسير. يتم ذلك عبر ما يلي:

1- التحقق بواقعية و بساطة من أن النتائج مقنعة.

عمليات التحقق تؤدي الى الرفض الفوري للنتائج (أو على الأقل إعادة الفحص) اعتمادا على مؤشرات واضحة تؤكد عدم صحتها. مثلا ان معامل القشرة s لا يُمكن أن يكون أكثر سلبية مما تعطيه المعادلة الاتية:

$$s_{\min} = -\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) \text{ ---------- } 28$$

$s_{\min}$ - the most negative skin factor possible، *re* - the drainage radius، *rw* - the wellbore radius.

ليس من المرجح ان تكون قيمة عامل القشرة اقل من 7- في احسن الاحوال ، الجدول9-9 يُوضح قيم عامل القشرة المتوقعة و علاقتها بنوع اكمال البئر.

Type of Completion	Typical Skin Factor Range*
Openhole completion, homogeneous reservoir	0
Openhole completion, naturally fractured reservoir	–1 to –3**
Acid treatment, homogeneous reservoir	–1 to –3
Acid treatment, naturally fractured reservoir	–3 to –7**
Small hydraulic fracture treatment	–3 to –5
Large hydraulic fracture treatment	–4 to –6
Cased-hole gravel pack	+8 to +20
Openhole gravel pack	+2 to +10
Frac pack	0 to +8

* These ranges are for favorable conditions. Local experience may suggest higher skin factors are more typical for a given area, but significantly lower skin factors are very unlikely.
** After Gringarten (1984).

الجدول9-9:حدود معامل القشرة المتوقعة في الظروف المناسبة لانواع مختلفة من عمليات اكمال البئر

قبل التحقق من عامل القشرة يجب التحقق قبلها من صحة معامل تخزين جوف البئر و النفاذية بحيث تكون النتائج متوافقة لفترات الفحص المختلفة. عادة، لا يزيد المعامل WBS لبئر غازي عن 0.2 bbl/psi – 0.05 ما لم يساهم جزء من المكمن بالتاثير بفعالية على قيمة WBS ، مثل تاثير شبكة الشقوق الطبيعية أو وجود طبقات بنفاذية عالية .

2- مقارنة نتائج الفحص مع فحوصات سابقة على نفس البئر

التحقق من تناسق الفحوصات الحالية مع الفحوصات السابقة مشابه لما ذكر من التحقق من تناسق نتائج الفحص بفترات متعددة ، مع الأخذ في الاعتبار احتمال حصول تغييرات رئيسة خاصة في المكمن و في حدود المكمن والتي من المرجح ان قد حدثت عبر فترات طويلة (أشهر أو سنوات) ما بين فحص و اخر.

3- حساب نصف قطر المتحقق r_i في بداية ونهاية كل طور جريان

يتم حسابه من :

$$r_i = \sqrt{\frac{kt}{948\phi\mu c_t}} \quad \text{---------- 29}$$

إذ ان r_i radius of investigation يمثل نصف القطر المتحقق بالقدم و t الوقت بالساعات.

اخيرا ان كان بالامكان فيُفضل مقارنة المعاملات من نتائج تفسير الفحص مع معاملات من مصادر اخرى خارجية.

مثال3 هبوط الضغط – Drawdown (Roland N. Horne (1990))

يوضح هذا المثال منهجية تفسير فحص البئر في مكمن متجانس، إن هذا النوع من الاستجابة يمثل السلوك القياسيً - ومع ذلك، فهو ليس ذا أهمية أكاديمية بحتة، نظرًا لأن العديد من الفحوصات الحقيقية تتصرف بهذه الطريقة. ممكن مراجعة المصدر اعلاه لأمثلة أكثر تعقيدا .

البئر يجري بمعدل ثابت في فحص هبوط الضغط , البينات المتوفرة و بيانات الضغط المقاسة ادرجت في الجدولين رقم-9-10 و رقم-9-11

FLUID PROPERTIES			
Bo, bbl/STB	1.21	Viscosity, cp	0.92
Ct, 10^-6 psi	8.72		
RESERVOIR PROPERTIES			
Porosity	0.21	Formation Thickness, ft	23
Wellbore Radius, ft	0.401		
WELL TEST INFORMATION			
Type of Test	Drawdown	Date of test	01/01/90
Directory/Path	D:	Main Data file	examp41.mai
Pressure Data file	examp41.prs	Rate Data file	examp41.flr
WELLBORE ESTIMATES			
Storage, bbl/psi	1.541e-2	Cd	2033
CDe2s	3.962e8	Skin Factor	6.09
DeltaP across skin, psi	1350	Pwf, psi	2989
Flow Efficiency	0.5531		
RESERVOIR ESTIMATES			
Permeability, md	77.1	Semi-log slope, 'm'	255.2
Parameter name	cd.e^2s	Parameter value	1e10
BOUNDARY ESTIMATES			
Duration of Trans., hrs	21.6	Radius of Invest., ft	1006
PRESSURE ESTIMATES			
p*, psia	6009	p bar, psia	6009

الجدول9-10:بيانات الفحص المتوفرة

1- تمييز فترات الجريان -Flow Periods :

- تحليل الرسم اللوغاريتمي في (الشكل رقم9-51)

الدورة اللوغاريتمية الأولى:في بداية الرسم، هناك مؤشر واضح لتأثير تخزين البئر (Wellbore Storage)، حيث نلاحظ ميل الوحدة (Unit Slope) الذي يميز هذه الفترة.

الدورة اللوغاريتمية الثانية: تقع هذه الدورة بين الفترتين الأولى والثالثة، وهي تمثل فترة انتقالية (Transition Period). نلاحظ وجود حدبة في مشتقة الضغط، وهي ميزة تظهر تقريبًا دائمًا

في نهاية استجابة التخزين.

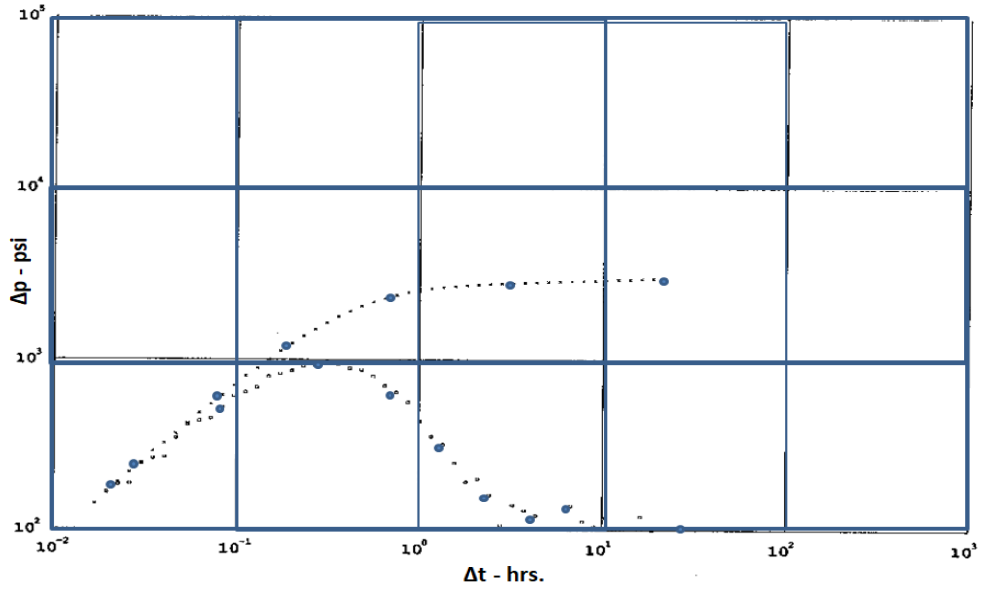
T of start	STB/day
0.00000	2500.00

PRESSURE HISTORY

T, hrs	P, psia	DeltaT	DeltaP
0.00000	6009.00		
0.00000	6009.00	0.00000	0.00000
0.01670	5867.82	0.01670	141.179
0.01933	5845.93	0.01933	163.074
0.02237	5819.44	0.02237	189.565
0.02590	5792.50	0.02590	216.502
0.02997	5765.01	0.02997	243.991
0.03469	5720.90	0.03469	288.096
0.04016	5688.36	0.04016	320.644
0.04648	5642.92	0.04648	366.079
0.05380	5587.43	0.05380	421.572
0.06227	5521.66	0.06227	487.339
0.07207	5459.70	0.07207	549.301
0.08342	5389.75	0.08342	619.250
0.09655	5306.48	0.09655	702.519
0.11176	5211.11	0.11176	797.894
0.12935	5117.79	0.12935	891.213
0.14972	5009.74	0.14972	999.256
0.17330	4886.13	0.17330	1122.88
0.20058	4769.13	0.20058	1239.87
0.23217	4635.16	0.23217	1373.84
0.26872	4501.08	0.26872	1507.92
0.31103	4365.85	0.31103	1643.15
0.36001	4219.70	0.36001	1789.30
0.41669	4089.84	0.41669	1919.16
0.48230	3960.16	0.48230	2048.84
0.55824	3835.59	0.55824	2173.41
0.64614	3727.20	0.64614	2281.80
0.74788	3630.08	0.74788	2378.92
0.86564	3538.77	0.86564	2470.23
1.00194	3465.23	1.00194	2543.77
1.15970	3411.56	1.15970	2597.44
1.34230	3361.60	1.34230	2647.40
1.55366	3318.80	1.55366	2690.20
1.79829	3289.38	1.79829	2719.62
2.08144	3263.02	2.08144	2745.98
2.40918	3231.28	2.40918	2777.72
2.78852	3216.27	2.78852	2792.73
3.22758	3200.34	3.22758	2808.66
3.73579	3175.40	3.73579	2833.60
4.32401	3162.30	4.32401	2846.70
5.00485	3139.87	5.00485	2869.13
5.79289	3133.46	5.79289	2875.54
6.70502	3114.87	6.70502	2894.13
7.76076	3092.78	7.76076	2916.22
8.98274	3081.99	8.98274	2927.01
10.3971	3062.07	10.3971	2946.93
12.0342	3047.29	12.0342	2961.71
13.9291	3037.98	13.9291	2971.02
16.1223	3018.23	16.1223	2990.77
18.6608	3002.85	18.6608	3006.15
21.6000	2988.93	21.6000	3020.07

الجدول9-11:بيانات الضغط المقاسة مع الوقت

الدورة اللوغاريتمية الثالثة: في هذه الدورة، ينخفض منحني مشتقة الضغط ويصبح مسطحًا (Flat)، مما يشير إلى بداية الجريان الشعاعي اللانهائي.(Infinite Acting Radial Flow)



الشكل9-51: تمييز فترات الجريان

ملاحظة: لا توجد أي استجابات أخرى للمكمن مشار إليها، فلا توجد تأثيرات لحدود المكمن بعد فترة الجريان الشعاعي اللانهائي.

- التحقق من صحة النموذج

قبل قبول نموذج التفسير المقترح (تخزين البئر متبوعًا بجريان شعاعي لا نهائي)، من الضروري إجراء اختبار للتأكد من صحة النموذج(Model Validation Test) .

- القاعدة الأساسية للتحقق:

إذا كانت منطقة التسطيح في المشتقة مؤشرًا حقيقيًا على وجود خط مستقيم نصف لوغاريتمي حالي، فإن هذا الخط المستقيم يجب أن يبدأ بعد دورة ونصف لوغاريتمية (1.5 Log Cycle) من نهاية فترة ميل الوحدة (استجابة التخزين).

- التطبيق على البيانات:

نهاية استجابة التخزين (ميل الوحدة): عند حوالي 0.1 ساعة. بداية الجريان الشعاعي اللانهائي (الخط المستقيم نصف اللوغاريتمي): عند حوالي ساعتين من الفحص.

هذا يتوافق مع القاعدة المذكورة أعلاه (الفاصل الزمني بين 0.1 ساعة وساعتين يمثل حوالي دورة ونصف لوغاريتمية)، مما يؤكد صحة النموذج كما هو موضح في الشكل 9-51.

- أهمية تحديد بداية الجريان الشعاعي:يُعد هذا الاهتمام بتحديد بداية فترة الجريان الشعاعي اللانهائي أمرًا بالغ الأهمية، وذلك للأسباب التالية:

- تحديد النفاذية :(Permeability) يعتمد حساب النفاذية بشكل أساسي على ميل الخط المستقيم في هذه الفترة

- تحديد معامل القشرة :(Skin Factor) يحسب من الضغط على الخط المستقيم.

- تحديد ضغط المكمن :(Reservoir Pressure) يمكن تقديره من استقراء الخط المستقيم.
لذلك، فإن إيجاد الخط المستقيم نصف اللوغاريتمي بشكل صحيح هو أمر حاسم في تحديد قيم دقيقة وموثوقة لهذه البارامترات المهمة.
اذن و بناءً على التحليل أعلاه فقد تم تحديد ثلاث فترات جريان واضحة: تخزين، انتقالي، جريان شعاعي لانهائي . تم التحقق من صحة النموذج باستخدام قاعدة الدورة والنصف اللوغاريتمية.
نستنتج أن التقييم الأولي للنموذج المكمني صحيح، ونثبته للاستخدام المستقبلي. تم تحديد زمني بداية ونهاية الفترات بدقة:نهاية التخزين: 0.1 ساعة و بداية الجريان الشعاعي: ساعتين. هذا التحليل الدقيق يؤسس لفهم صحيح لسلوك المكمن ويضمن دقة البارامترات المحسوبة في المراحل اللاحقة من التفسير.

2- تقدير المعلمات-Estimating_Parameters

بالانتقال إلى الخطوة الثانية، يتم تقدير خواص المكمن. من الأنسب بدءا تقدير سعة تخزين البئر ، حيث سيوفر ذلك مؤشرًا أدقّ على وقت انتهاء تخزين البئر. يوضح الشكل 9-52 علاقة الرسم البياني اللوغاريتمي لانخفاض الضغط Δp مقابل زمن الإنتاج، مع رسم خط مستقيم ذي ميل يساوي واحدًا يمر عبر البيانات الأولية.

يُمكن تقدير معامل التخزين C من معادلة الخط المستقيم ذي الميل الواحد:

$$C = \frac{qB\Delta t}{24\Delta p}$$

C = Wellbore storage coefficient, typically in bbl/psi or bbl/psi
q = Flow rate (production or injection rate), in STB/day or bbl/day
B = Formation volume factor, in RB/STB or bbl/STB
Δt = Time at a point on the unit-slope line, in hours
Δ p=Pressure change (difference between initial/shut-in pressure and flowing pressure) at the same point on the unit-slope line, in psi.

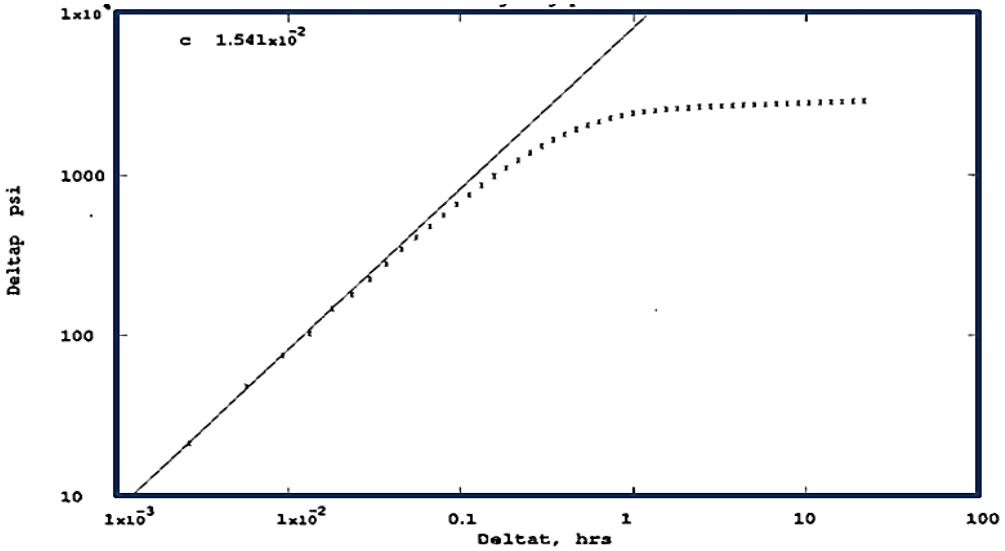
و ذلك من خلال تسجيل احداثيات أي نقطة على الخط و تعويضها في المعادلة اعلاه. القيمة المقدرة لمعامل التخزين C تساوي 0.0154 برميل قياسي/باوند لكل انج مربع. في الشكل9-52، يظهر أن البيانات تبدأ بالابتعاد عن خط الميل الواحد قبل مرور 0.1 ساعة بقليل. لاحظ أن شكل توزيع البيانات يتاثر بالقيمة العددية لضغط المكمن الابتدائي pi . قيمة pi في فحص هبوط الضغط هذا، هي الضغط المقاس في قاع البئر قبل فتحه للجريان مباشرةً.
بالانتقال إلى الرسم البياني نصف اللوغاريتمي للضغط مقابل الزمن(P_w vs t) كما في الشكل9-53 , فيُمكن ملاحظة جزء من البيانات على شكل خط مستقيم (يبدأ عند حوالي ساعتين كما هو متوقع). يسمح ميل هذا الخط m بتقدير النفاذية k باستخدام المعادلة:

$$kh = 162.6\,\frac{qB\mu}{|m|}$$

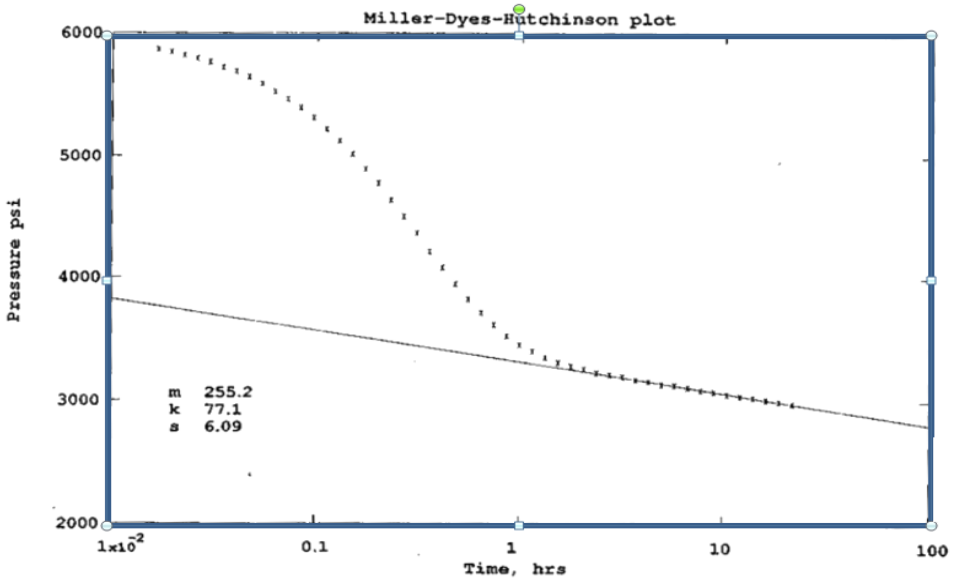
نعوض لايجاد النفاذية:

$$kh = 162.6\,\frac{(2500)(1.21)(0.92)}{255.2} = 1773\ md\text{-}ft$$

$$k = 77.1\ md\ \ (since\ h = 23\ ft)$$



الشكل9-52 : تمييز فترة تخزين البئر



الشكل9-53 تمييز طور الجريان الشعاعي

لتحديد عامل القشرة نجد قيمة الضغط عند ساعة واحدة النقطة p_{1hr} و هي نقطة تقع على الخط المستقيم او امتداده و تساوي 3330 psi ثم يُحسب عامل القشرة كالتالي:

$$s = 1.151\left[\frac{p_i - p_{1hr}}{|m|} - \log\frac{k}{\phi\mu c_t r_w^2} + 3.2274\right]$$

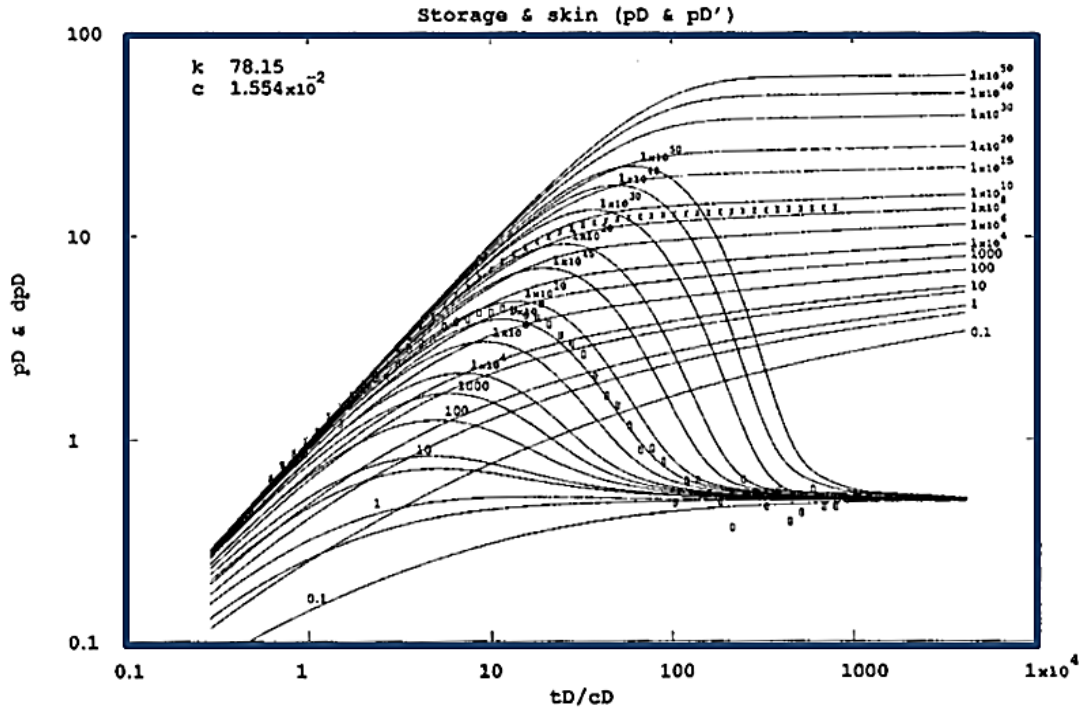
$$s = 1.151\left[\frac{6009 - 3330}{255.2} - \log\frac{77.1}{(0.21)(0.92)(8.72\times10^{-6})(0.41)^2} + 3.2274\right] = 6.09$$

3- تطابق المنحنيات - Type Curve Match

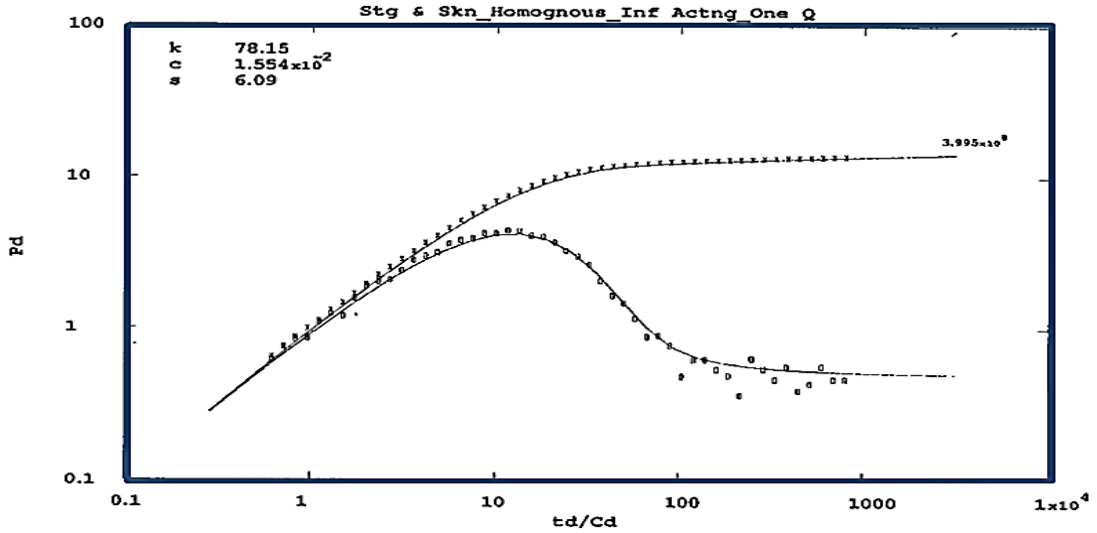
على الرغم من أن خواص المكمن قد تم تقديرها مسبقًا باستخدام الطرق التقليدية، إلا أن تطبيق تقنية تطابق المنحنيات يوفر العديد من المزايا الإضافية. ففي حين تعتمد طريقة الرسم نصف اللوغاريتمي وخط الميل للوحدة على استخدام أجزاء محدودة من البيانات، فإن أسلوب تطابق المنحنيات يعتمد على كامل مجموعة البيانات المتاحة. وهذا يساهم في تحقيق اتساق أعلى عبر جميع الأزمنة، كما يتيح الاستفادة من بيانات الفترات الانتقالية الواقعة بين أنظمة الجريان المختلفة.

استنادًا إلى نتائج المطابقة (الشكل 9-54)، ومن دون الخوض في التفاصيل الإجرائية المتعلقة برسم البيانات أو مطابقتها مع المنحنيات النظرية وتحديد نقاط التطابق.إذ تم تناول هذه الخطوات بالتفصيل في الفصول السابقة, تم إجراء المطابقة النهائية باستخدام الحاسوب (الشكل 9-55)، مما مكّن من تحديد خواص المكمن بدقة أعلى. وقد تم عرض النتائج في الجدول (9-12) إلى جانب نتائج الطريقة التقليدية لغرض المقارنة.

تُظهر نتائج الجدول تقاربًا كبيرًا بين الطريقتين، مما يعزز الثقة في التفسير ويؤكد وجود درجة عالية من التناسق في النتائج. ويُعد هذا التوافق أفضل بكثير مقارنةً بالطرق اليدوية المعتمدة على الرسم البياني، حيث تم في هذه الحالة استخدام تقنيات حاسوبية وخوارزميات متقدمة لتحديد الميل (slope)بدقة. وبذلك، تصبح عملية مطابقة المنحنيات مهمة شبه آلية، يقتصر دور المفسر فيها على تقييم جودة المطابقة واتخاذ القرار بشأن مدى ملاءمتها.



الشكل9-54 تطابق المنحنيات النوعي



الشكل9-55 :تطابق المنحنيات بمساعدة الحاسوب

Parameter	Slope matching	Type Curve
k (md)	77.1	78.15
s	6.09	6.22
C (STB/psi)	0.0154	0.0155

الجدول 9-12 : مقارنة نتائج تفسير الفحص من تطابق النحنيات النوعي و الطريقة التقليدية

4- مديات الثقة Confidence Intervals

تضمن الجدول (9-13) عشرين تقديرًا مختلفًا لقيمة النفاذية، تم الحصول عليها من خلال تفسير بيانات نفس المثال من قبل مجموعة مكوّنة من عشرين طالبًا في هندسة النفط. وباستبعاد أعلى وأدنى القيم باعتبارهما قيماً شاذة(Outliers) ، تُظهر التقديرات المتبقية تباينًا بحدود ±10%. ويعكس ذلك وجود درجة من عدم اليقين ضمن هذا التقييم البشري تُقدّر بحوالي ±10% بالنسبة للقيمة الحقيقية للنفاذية.

أما مديات الثقة للخواص المكمنية، فقد تم إدراجها في الجدول (9-14)، حيث جرى تحديدها باستخدام المنهجية الموضحة في الفقرة المشار إليها سابقًا. وتشير النتائج إلى أن مدى الثقة للنفاذية يبلغ حوالي ±11.84 ملي دارسي، أي ما يعادل نسبة ±15.36%. في حين يبلغ مدى الثقة لمعامل القشرة (Skin Factor) حوالي ±1.89، أي بنسبة تقارب ±31%.

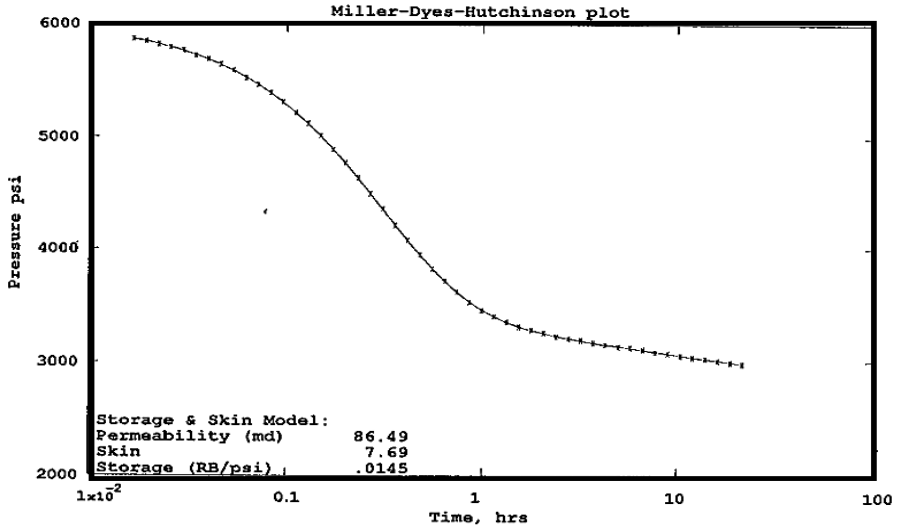
تعكس هذه القيم مستوى عدم اليقين المرتبط بعملية التفسير، وتُبرز أهمية استخدام أساليب تحليل متقدمة لتقليل هذا التباين وتعزيز موثوقية النتائج.

k estimates				
80.10	81.52	73.43	78.11	82.35
75.07	75.35	70.08	82.76	77.44
74.44	76.93	79.86	75.31	87.86
75.11	76.71	76.14	81.81	74.34

الجدول 9-13 : نتائج تجربة تحليل بيانات الفحص من قبل 20 مهندس مكامن

Parameter	Estimate	Confidence Interval (absolute)	Confidence Interval (percent)
Permeability (md)	77.10	± 11.84	± 15.36%
Skin	6.090	± 1.890	± 31.04%
Storage (RB/psi)	.01541	± $.5666\times10^{-3}$	± 3.68%

الجدول 9-14 : مقارنة نتائج تفسير الفحص من تطابق المنحنيات النوعي و الطريقة التقليدية



الشكل9-56: التطابق النهائي بمساعدة الحاسوب

5- الانحدار غير الخطي- Nonlinear Regression

يُتيح استخدام تقنية الانحدار غير الخطي للحاسوب الوصول إلى أفضل تطابق ممكن مع البيانات المقاسة، وذلك بالاعتماد على نموذج المكمن المُحدد مسبقًا (خزن البئر وتأثير القشرة، مكمن ذو امتداد لا نهائي، دون تأثير حدودي). وتتطلب هذه العملية توفير تقديرات ابتدائية للخواص المكمنية المجهولة، لذا تم اعتماد القيم المستحصلة سابقًا من التحليل البياني كنقطة بداية.

يوضح الرسم نصف اللوغاريتمي في الشكل (9-56) نتيجة التطابق النهائي، حيث يُظهر توافق أعلى بكثير بين البيانات المقاسة والنموذج النظري. وينعكس هذا التحسن بوضوح في نتائج الجدول (9-15)، إذ أصبحت فترات الثقة أضيق بشكل ملحوظ مقارنة بالطرق السابقة.

وبالاعتماد على الانحدار غير الخطي، انخفضت مديات الثقة للنفاذية إلى حوالي ±1.046 ملي دارسي، أي ما يعادل نسبة ±1.21%. كما انخفضت مديات الثقة لمعامل القشرة (Skin Factor)إلى حوالي ±0.1687، أي بنسبة تقارب ±2.19%.

تؤكد هذه النتائج أن استخدام تقنيات الانحدار غير الخطي يسهم بشكل كبير في تقليل عدم اليقين وتحسين دقة تقدير خواص المكمن، مقارنةً بالطرق البيانية التقليدية.

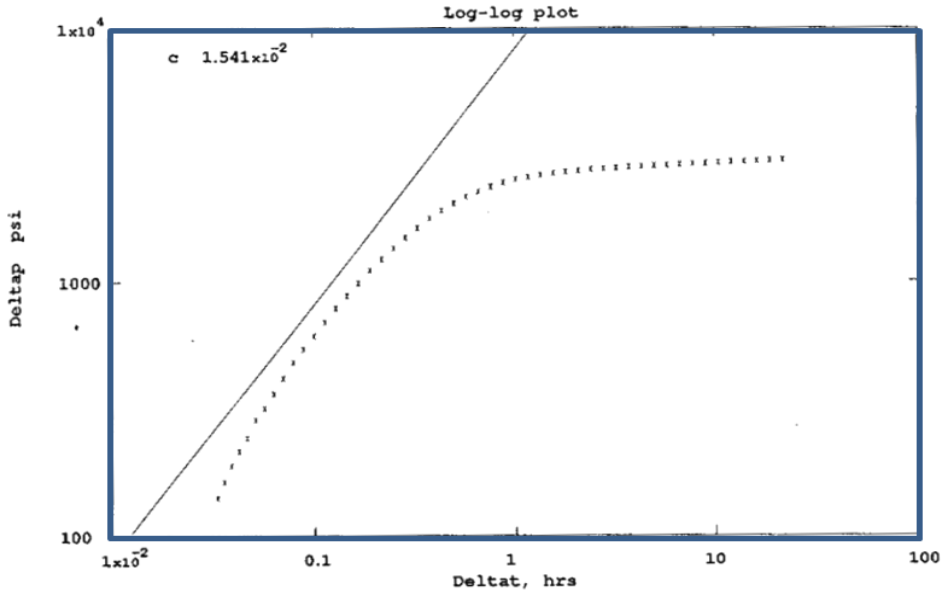
Parameter	Estimate	Confidence Interval (absolute)	Confidence Interval (percent)
Permeability (md)	86.49	± 1.046	± 1.21%
Skin	7.690	± .1687	± 2.19%
Storage (RB/psi)	.01453	± $.3718\times10^{-4}$	± .26%

الجدول 9-15 : تحسن فترات الثقة باستخدام الانحدار غير الخطي

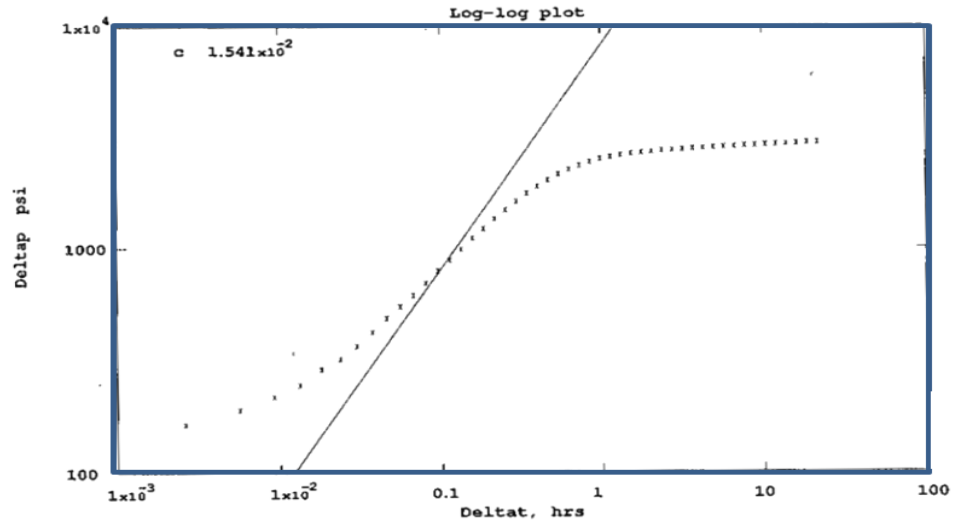
6- اخطاء ازاحة الزمن - Time Shift Errors

تُعد دقة تحديد لحظة بدء جريان البئر وتزامنها مع بداية تسجيل قياسات الضغط من العوامل الحاسمة في تفسير بيانات الاختبار، إذ إن أي خطأ في هذا التوقيت يؤثر بشكل مباشر على بيانات الزمن المبكر، ولا سيما بيانات خزن البئر.(Wellbore Storage)

في هذا المثال، ووفقًا للأشكال السابقة، تمتد فترة خزن البئر إلى حوالي ست دقائق فقط من زمن الاختبار. وعليه، فإن حدوث خطأ زمني بسيط بمقدار دقيقة واحدة يمكن أن يؤدي إلى تغيير ملحوظ في شكل المنحني على الرسم اللوغاريتمي، مما ينعكس سلبًا على دقة تقدير معامل خزن حفرة البئر.



الشكل9-57 : ازاحة الوقت مبكرا



الشكل9-58 : ازاحة الوقت متاخرا

يوضح الشكل (9-57) تأثير إزاحة الزمن إلى الأمام (أي اعتبار أن الاختبار بدأ قبل دقيقة واحدة

من الزمن الحقيقي)، حيث يظهر المنحني اللوغاريتمي بعد تقديم نقطة الصفر الزمنية. في المقابل، يبين الشكل (9-58) تأثير إزاحة الزمن إلى الخلف (أي تأخير بداية الاختبار دقيقة واحدة عن الزمن الحقيقي).(

وعلى الرغم من أن خط الميل للوحدة (Unit Slope Line) في الشكلين (9-57) و(9-58) يظهر في موقع قريب من موقعه في البيانات الأصلية الصحيحة، إلا أن ذلك يُبرز مدى صعوبة تحديد هذا الخط بدقة عند وجود خطأ زمني بسيط. وبالتالي، فإن حتى انحراف زمني محدود يمكن أن يؤدي إلى تفسيرات غير دقيقة، خاصة في المراحل المبكرة من الاختبار.

تؤكد هذه النتائج أهمية الضبط الدقيق للزمن المرجعي (Time Zero) لضمان موثوقية تفسير فحوصات الآبار.

7- تاثير حدود المكمن Boundary Effects

في مجموعة بيانات هذا المثال، لا يوجد دليل على أن استجابة الضغط متأثرة بحدود المكمن (الشكل9-51) . مع مرور وقت الفحص، يزداد انتشار الضغط في المكمن، وبالتالي تعكس استجابة الضغط في البئر ظروف المكمن عند نصف قطر أكبر.

بالنسبة للمكمن الدائري المغلق، تبدأ استجابة حدود المكمن في الوقت اللا بعدي عند $t_{DA}=0.1$. نظرًا لعدم ملاحظة أي استجابة من هذا القبيل في بيانات المثال، فهذا يعني أن t_{DA} عند الزمن t = 21.6ساعة) آخر نقطة بيانات تم قياسها،(الجدول 9-11) يكون أصغر من 0.1 كما هو موضح في الحسابات أدناه.

$$t_{DA} = \frac{0.000264\, k\, t}{\phi \mu c_t A} < 0.1 \quad , \quad \frac{0.000264(86.49)(21.6)}{(0.21)(0.92)(8.76\times10^{-6})\, A} < 0.1$$

$$A > 2.93\times10^{6}\ ft^2 \quad , \quad r_e > 965\ ft$$

من هنا يُمكن الاستنتاج أن نصف القطر المتحقق كان أقل من نصف قطر المكمن الفعلي والا لكان هنالك استجابة الضغط لحدود المكمن .

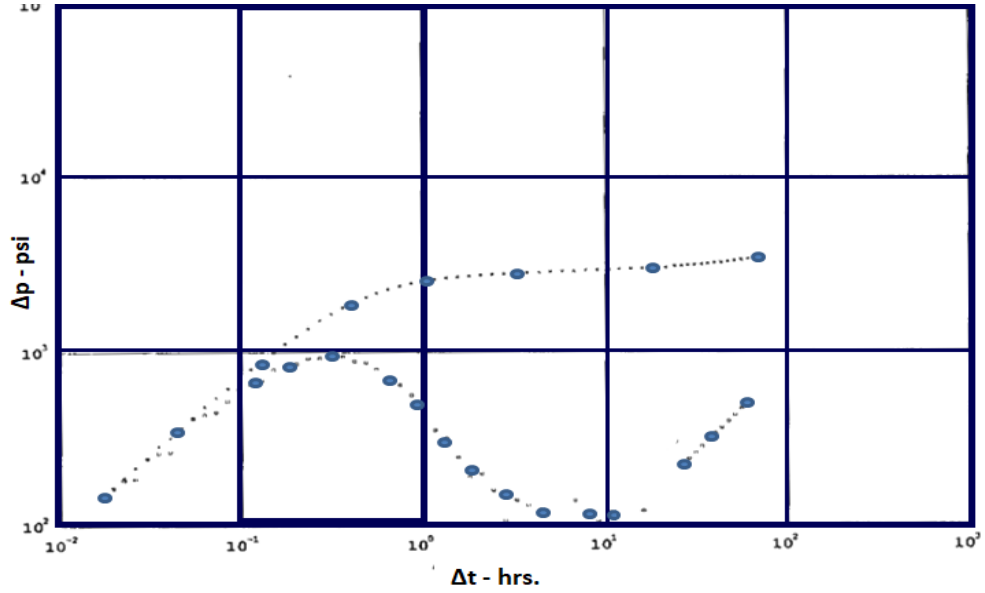
لتقدير موقع الحدود بدقة أكبر، من الضروري إطالة فترة الفحص. تم إدراج يومين إضافيين من بيانات التغير في الضغط المقاس إضافة إلى 21.6 ساعة الأصلية من الجريان والبيانات الاضافية ادرجت في الجدول 9-16.

t (hrs)	p (psia)
24.25	2939.3
26.37	2921.5
28.67	2902.3
31.17	2881.4
33.90	2858.7
36.86	2834.0
40.07	2807.2
43.57	2778.0
47.38	2746.2
51.51	2711.7
56.01	2674.2
60.90	2633.4
72	2540.7

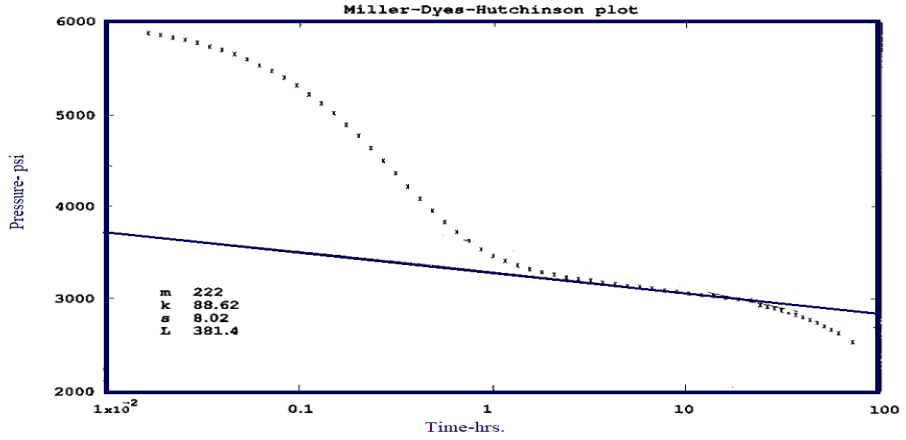
الجدول9-16 : بيانات الفحص الاضافية (لمدة يومين)

تحليل البيانات الموسعة (مع تأثير حدود)

يكشف تحليل الرسم التشخيصي (الشكل 9-59) عن وجود تأثير حدودي واضح في الفترة المتأخرة من الفحص، والذي من المحتمل أن يكون استجابة طور الجريان شبه المستقر (Pseudo steady state) نحتاج إلى تأكيد ذلك من خلال الرسوم البيانية الأخرى.



الشكل9-59 : تمييز طور الجريان شبه المستقر من الرسم اللوغاريتمي



الشكل9-60 : تمييز طور الجريان شبه المستقر من الرسم نصف لوغاريتمي- Semi-log

ملاحظات هامة على الرسوم البيانية:

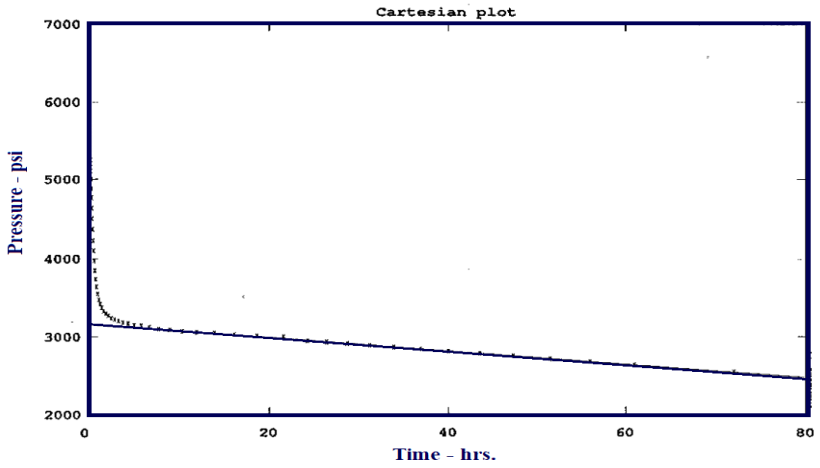
-الرسم اللوغاريتمي :(Log-Log Plot)

الانحراف عن السلوك السابق يكون أكثر وضوحًا على رسم المشتقة مقارنة بالرسم السابق (بدون تأثير الحدود).

الرسم نصف اللوغاريتمي - (Semi-Log Plot) الشكل 9-60: نلاحظ تأثير الحدود بشكل أوضح من المخطط اللوغاريتمي المزدوج.

الرسم الديكارتي - (Cartesian Plot) الشكل 9-61: و بناءً على الملاحظات السابقة للمشتقة والرسم نصف اللوغاريتمي، نرسم المخطط الديكارتي للضغط مقابل الزمن.

يظهر هذا الرسم سلوكًا خطيًا يميز الحالة شبه المستقرة(Pseudo steady state) .



الشكل 9-61:تمييز طور الجريان شبه المستقر من الرسم الديكارتي- Cartesian

- انتباه بشأن الرسم الديكارتي:

من السهل العثور على خطوط مستقيمة على الرسم البياني الديكارتي (الشكل 9-61) حتى في حالة عدم وجود أي منها. على سبيل المثال، ليس من الصعب تخيل وجود خط مستقيم على الرسم البياني الديكارتي، حتى مع وجود 21.6 ساعة فقط من البيانات الأصلية.

لذلك، من المهم جداً تحديد الحالة شبه المستقرة بشكل واضح على المخططات اللوغاريتمية ونصف اللوغاريتمية قبل رسمها على المخطط الديكارتي.

- حساب مساحة المكمن

من الرسم الديكارتي نحدد ميل الخط المستقيم $m_{Cartesian}$=8.54 psi/hr . منه يُمكن تقدير مساحة المكمن كما ياتي:

$$m_{Cartesian} = \frac{0.2342\,qB}{(\phi c_t h)A}$$

$$A = \frac{0.2342\,qB}{\phi c_t h\, m_{Cartesian}} = \frac{0.2342(2500)(1.21)}{(0.21)(8.72\times10^{-6})(23)(8.54)}$$

$$A = 1.9697\times10^{6}\ ft^2; \quad r_e = 792ft$$

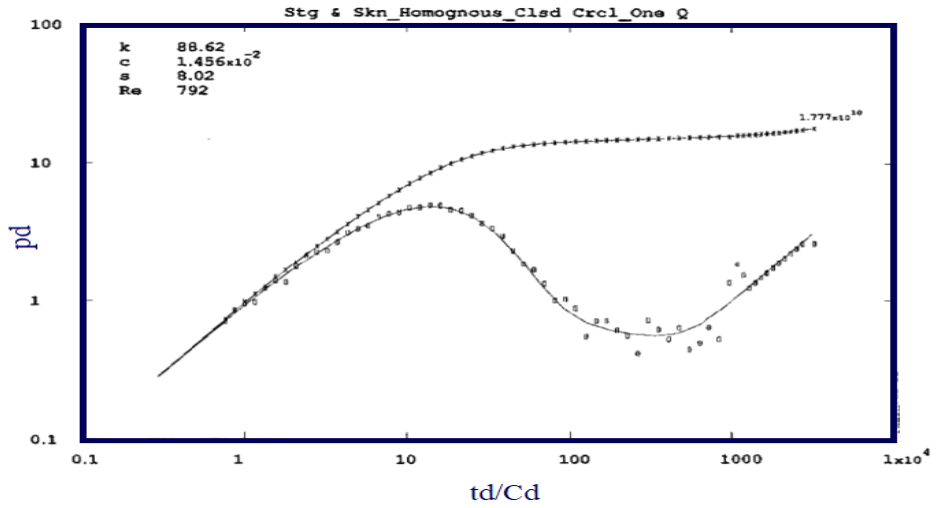
- النتائج والتحقق:

المثير للاهتمام أن نصف القطر المحسوب re = 792 ft أقل من نصف قطر منطقة الدراسة الذي تم تقديره سابقًا (965 قدمًا). هذا يعني أنه: كان من الخطأ اعتبار 965 قدمًا الحد الأدنى لحجم المكمن، حيث لاحظنا الآن من البيانات الموسعة أن استجابة الحدود كانت قد بدأت بالفعل، إلا أنها لم تكن بارزة بما يكفي لتكون ملحوظة في البيانات الأصلية.

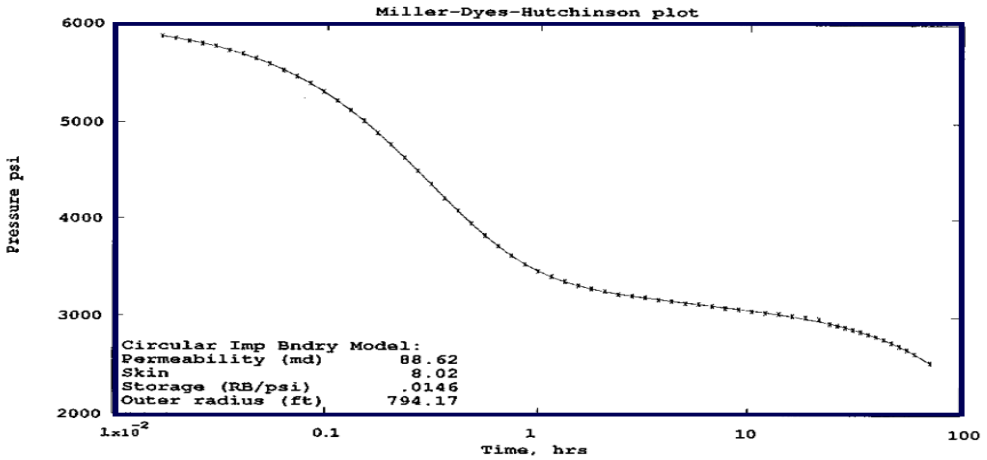
يؤكد ذلك التحقق من تطابق المنحنيات النوعي باستخدام الحاسوب(الشكل 9-62)، حيث أن تقدير re = 792 ft يُعتبر متناسقًا تمامًا مع الرقم المستخلص من ميل الخط المستقيم الديكارتي.

- التحسين النهائي باستخدام الانحدار غير الخطي:

باستخدام الانحدار غير الخطي (Non-linear regression) في الرسم نصف اللوغاريتمي (الشكل 9-63)، يمكن تحسين التقدير وتأكيد أن حدود الثقة تقع ضمن الحدود المقبولة (الجدول 9-17).



الشكل9-62 : تطابق المنحنيات النوعي باستخدام الحاسوب



الشكل9-63 :التطابق باستخدام الانحدار غير الخطي

Parameter	Estimate	Confidence Interval (absolute)	Confidence Interval (percent)
Permeability (md)	88.62	± 1.759	± 1.98%
Skin	8.020	± .2832	± 3.53%
Storage (RB/psi)	.01456	± $.5702\times10^{-4}$	± .39%
Outer radius (ft)	794.2	± 5.541	± .70%

الجدول9-17 :نتائج حدود الثقة النهائية

References – المصادر

1. Gringarten، A. (1984). Interpretations of tests in fissured and multilayered reservoirs with double-porosity behavior.J. Pet. Technol.، Apr.، 549–554
2. John P. Spivey، W. John Lee،(2013) "Applied Well Test Interpretation ،" © Copyright 2013 Society of Petroleum Engineers.
3. Marcel J.; Roland N. Horne,(1993) " Well-Test-Model Recognition With Laplace Space" (SPE 22682-PA).
4. Marcel Bourgeois , Elf Aquitaine , (1992). " Well Test Interpretation Using Laplace Space Type Curves." School of Earth Energy & Environmental Sciences. https://purl.stanford.edu/sx402ph6635
5. Medhat M. Kamal "Transient Well Testing " Monograph SPE © Copyright 2009 Society of Petroleum Engineers.
6. Mattar، L.، and Santo، M. 1992. How Wellbore Dynamics Affect Pressure Transient Analysis. J. Cdn. Pet. Tech. 31(2) 32–40. PETSOC 92-02-03.
7. Olivier F. Allain، and Roland N. Horne." Use of Artificial Intelligence in Well-Test Interpretation" March 1990 • JPT.
8. Ramey Jr.، H.J. 1992. Advances in Practical Well-Test Analysis (includes associated paper 26134). J Pet Technol 44 (6): 650–659. SPE-20592-PA.
9. Richard Wheato"،Fundamentals Of Appllied Reservoir Engineering Appraisal، Economics and Optimization" ، Copyright © 2016 Elsevier Ltd.
10. Roland N. Horne " Modern Well Test Analysis ، A computer-Aided Approach" Copyright@1990، by Petroway،Inc.
11. Spivey، J.P. and Pursell، D.A. 1998. "Errors in Input Data and the Effect on Well-Test Interpretation Results". Presented at the SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference، Midland، Texas، USA، 23–26 March. SPE-39773-MS.
12. Marcel J.; Roland N. Horne,(1993) " Well-Test-Model Recognition With Laplace Space" (SPE 22682-PA).

الفصل العاشر

تفسير فحوصات الآبار باستخدام الذكاء الاصطناعي

Well Test Interpretation Using Artificial Intelligence

1-10 المقدمة

تُعتبر فحوصات الآبار من الركائز الأساسية في هندسة المكامن لتقييم خصائص المكمن وسلوك البئر، حيث توفر بيانات حيوية عن النفاذية، ضغط المكمن، عامل القشرة، والحدود الجيولوجية. لعقودٍ طويلة، اعتمد المهندسون على الطرق التحليلية الكلاسيكية ومعادلات المصدر الخطي Linear solution مرورًا بمشتقة الضغط Pressure derivative و طرق تطابق المنحنيات Type curve matching وصولًا إلى تقنيات متقدمة مثل فك الالتفاف (Deconvolution) والمحاكاة العددية Numerical simulation و قد استندت هذه الطرق إلى المعادلات الفيزيائية في تحليل منحنيات الضغط و الجريان. ورغم ما حققته هذه الأساليب من دقة وموثوقية، إلا أنها تتطلّب خبرة المهندس، وتستغرق وقتًا طويلاً، وجودة البيانات، وافتراضات مسبقة حول الموديل(النموذج) المكمني ونظام الجريان. كما وقد تعاني من مشكلات مثل عدم وحدانية الحل أو الحساسية للضوضاء في البيانات.

في هذا السياق، برز الذكاء الاصطناعي (Artificial Intelligence – AI) كأداة واعدة تسعى إلى تجاوز بعض القيود التقليدية لتفسير فحوصات الآبار، من خلال قدرته على تحليل كميات كبيرة من البيانات، والتعامل مع السلوكيات غير الخطية، واستخلاص الأنماط الخفية في بيانات الضغط والزمن دون الحاجة إلى فرض نموذج فيزيائي صريح في المراحل الأولية من التفسير. تقوم فكرة الذكاء الاصطناعي على تعلم العلاقة بين مدخلات فحوصات الآبار (الضغط، مشتقة الضغط ,الزمن، معدل الجريان، خواص الموائع، ومعاملات البئر) ومخرجاتها، التي تنقسم إلى فئتين رئيسيتين:

الأولى: المصنفات (Classification) وتشمل أنواع النماذج المكمنية (مكمن متجانس , مكمن متشقق Fracture reservoir) و أنماط الجريان.

الثانية: مُقدِّرات الانحدار (Regression) وتشمل الخواص المكمنية الكمية مثل: النفاذية (permeability-k)، معامل القشرة(skin-s) ، الضغط الابتدائي للمكمن-(Initial pressure Pi)، معامل تخزين البئر(Wellbore storage-C) ، ومعاملات المكامن المزدوجة المسامية Dualporosity reservoir مثل (نسبة تخزين الشق اوميغا=ω Storativity Ratio) و (معامل الجريان المسامي(البيني) لمدا = λ Interporosity Flow Coefficient) .

لربط المدخلات بالمخرجات، تُستخدم خوارزميات إحصائية ورياضية من دون اساس فيزيائي متعددة تهدف إلى تحقيق أقل فرق بين تنبؤات البرنامج والنتائج الحقيقية المستمدة من الطرق التحليلية التقليدية. بعد اكتمال مرحلة التدريب والتحقق، يصبح البرنامج جاهزاً لتفسير بيانات فحص آبار جديدة لم يرها من قبل، بدقة عالية وفي فترات زمنية قياسية مقارنة بالطرق التقليدية.

لقد ساهم التطور في تقنيات التعلم الآلي (Machine Learning-ML) والشبكات العصبية الاصطناعية Artificial Neural Networks-ANNs والتعلم العميق-Deep Learning DL في فتح آفاق جديدة لتسريع عملية التفسير، وتقليل عدم اليقين Uncertainties، ودعم اتخاذ القرار الهندسي.

و يُعد عمل (Allain &Roland Horne -1990) من أوائل المحاولات المنهجية لتوظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في تفسير فحوصات الآبار و من المتقدمين في هذا المجال. حيث قدّما إطارًا للتعرّف الآلي على نموذج المكمن بالاعتماد على استجابة مشتقة الضغط (Pressure Derivative) وقد مثّلت هذه الدراسة نقطة انطلاق مهمة نحو أتمتة عملية التشخيص، وفتحت المجال أمام تطوير خوارزميات أكثر تقدّمًا في السنوات اللاحقة .وفي العام نفسه، وضع Al-Kaabi & Lee -1990) حجر الأساس للتطبيق العملي للشبكات العصبية الاصطناعية في هذا المجال، من خلال استخدام شبكة متعددة الطبقات (Multilayer Perceptron – MLP) لأغراض التفسير الآلي لفحوصات الآبار. وقد استهدفت دراستهما تصنيف نوع المكمن انطلاقًا من منحنى مشتقة الضغط، مع تغطية طيف واسع من النماذج المكمنية تحت ظروف حدود داخلية وخارجية متنوعة، مما عزّز إمكانية تعميم النموذج على حالات تشغيلية مختلفة. لاحقًا اقترح (Kumoluyi -1995) استخدام الشبكات العصبية من الرتب العليا (Higher-Order Neural Networks – HONN)، بهدف تحسين القدرة التمثيلية للنموذج العصبي في توصيف سلوك البئر/المكمن اعتمادًا على البيانات الحقلية الفعلية، وليس فقط البيانات الاصطناعية. وقد شكّل هذا التوجه خطوة نحو زيادة تعقيد البنية الشبكية لاستيعاب العلاقات غير الخطية عالية الرتبة في بيانات الضغط العابر Pressure transient-PT . و استخدم فافيري (Vaferi et al. -2011) الشبكات متعددة الطبقات -MLP في تطوير برنامج ذكاء اصطناعي للتعرف الالي على نماذج المكامن النفطية Models من بيانات فحوصات الآبار كما و استخدم احمدي (Ahmadi et al -2017) الشبكات MLP، PNN،GRNN في بناء نموذج ذكاء اصطناعي لتفسير فحوصات الآبار للتشخيص الالي لنوع النموذج المكمني Classification و في تقدير الخواص Regression المكمنية مستخدما في ذلك تقنية تصميم التجارب Design of Experiments -DOE في التهيئة و تحضير البيانات قبل التعلم.

مع التطور المتسارع في تقنيات التعلم العميق DL، ظهرت تطبيقات أكثر حداثة. فقد اقترح (Hongyang Chu et al. -2019) توظيف الشبكات العصبية التلافيفية (Convolutional Neural Networks – CNN) لتطوير منهجية آلية جديدة لتقييم أنواع منحنيات فحوصات الآبار، وذلك عبر التعامل مع منحنيات الضغط والمشتقة بوصفها صورًا Image-based Interpretation، مما أتاح استخلاص الخصائص المميزة تلقائيًا دون الحاجة إلى استخراجها يدويًا. وفي السياق ذاته، قدّم (Panel Daolun et al. -2020) نموذجًا قائمًا على الشبكات التلافيفية (CNN) للتفسير الآلي لفحوصات الآبار، مع تركيز خاص على المكامن المركبة شعاعيًاRadial Composite Reservoirs ، حيث أظهر النموذج قدرة جيدة على التمييز بين المناطق المختلفة ذات النفاذية المتباينة ضمن النظام المركب.

قدم (Khaled A. M et al.-2024) تقييما في كفاءة ودقة نماذج التعلم الآلي المختلفة في مهام تحليل الضغط العابر (PTA). ركز في تحقيقاته الأولية على دمج الشبكات العصبية الالتفافية (CNN) وشبكات الذاكرة الطويلة قصيرة المدى (LSTM) لتعزيز الدقة في تقدير المعلمات المكمنية وتحديد النماذج المكمنية. وقد توصل الى ان النماذج القائمة على الأشجار (XGBoost و Random Forest) تتفوق على الشبكات CNN-LSTM في مهام تحليل الضغط العابر، خاصة في التعميم على بيانات جديدة لم يستخدمها النموذج في التدريب . و ان نماذج Random

Forest هي الأفضل في تقدير المعلمات المكمنية الكمية (النفاذية ومعامل القشرة) و XGBoost هو الأفضل في تحديد نوع النموذج المكمني (تصنيف).

استخدم (Rakesh Kumar et al. -2022) الخوارزمية الجينية Generic algorithm GA والشبكات العصبية الاصطناعية لتحديد وتوصيف أنظمة المكامن المتجانسة و المتشققة و تقدير خواص المكمن تلقائيًا من بيانات فحوصات الآبار(GA "طريقة بحث مستوحاة من الطبيعة، تحاكي التطور البيولوجي باختيار (الافضل) أفضل الحلول للمشكلات المعقدة، خاصة عندما تكون الطرق التقليدية غير قابلة للتطبيق). وقد توصل الى ان المصنف المحسن يقوم بتحديد جميع نماذج المكمن بدقة تصنيف أعلى من 79% و دقة بتوصيف خواص المكمن بأخطاء نسبية متوسطة أقل من 4.5%.

و في اطار المكامن المتشققة Fracture reservoirs قدم (Freites et al. -2023) نموذج أولي (Proof-of-Concept) يعتمد على تعلُّم الآلة، يتيح التعامل بكفاءة مع التنوّع الكبير في منحنيات مشتقة الضغط (p') المرتبطة بالشقوق، من خلال تصنيفها آليًّا وتحديد الأنماط المميزة للشقوق. ولتحقيق ذلك، أنشأ مجموعة بيانات اصطناعية من محاكاة عددية تضم 2560 منحنىً لـ (p')، تمثّل طيفًا واسعًا من خصائص شبكات الشقوق. سمح التدريب التصنيفي بتحديد السمات الجيولوجية الرئيسية المؤثرة في منحنيات (p')، المتمثلة بالمسافة من البئر إلى أقرب شق ، و درجة اتصال الشقوق (Fracture Connectivity)، و كثافة الشقوق (Fracture Intensity). كما يقترح امكانية توسيع تطبيقاتها على مكامن أخرى مشققة طبيعيًّا.

و في إطار التوجهات البحثية الحديثة نحو دمج القوانين الفيزيائية الحاكمة ،مثل معادلة الانتشار كقيود ضمن عملية تدريب الشبكات العصبية، برزت أهمية الشبكات العصبية المستنيرة بالفيزياء (Physics-Informed Neural Networks,PINNs) ، حيث قدّم (Dongyan Fan 2025) نموذجًا متقدمًا لتفسير فحوصات الآبار يُعرف بـLa-PPINN ، (A framework of parallel physics-informed neural network with Laplace transform) يعمل في فضاء تحويل لابلاس. يعتمد النموذج على دمج معادلات جريان الموائع مباشرة ضمن دالة الخسارة أثناء التعلم، بالتوازي مع بيانات الضغط المقاسة، بهدف عكس معاملات البئر والمكمن بدقة. وأظهرت النتائج أن تمثيل المسألة في فضاء لابلاس يسهم في تقليل التعقيد الحسابي وتحسين الاستقرار العددي، في حين تعزز البنية المتوازية للشبكة من كفاءة الحل ودقته. كما أثبت النموذج قدرته على مطابقة منحنيات ضغط الفحص و تحديد خواص المكمن و معامل القشرة بدقة عالية حتى بوجود ضوضاء ، و لأنظمة مكمنية متعددة تشمل المسامية المزدوجة، والمساميّة الثلاثية (مسامية النسيج الصخري + الشقوق الدقيقة + الشقوق الكبيرة)، إضافة إلى المكامن المركبة. و طور (Hongyang et al. 2025) إطار عمل هجين باسم PiCrossformer يجمع بين الشبكات العصبية المدعومة بالفيزياء (PINNs) ونمذجة السلاسل الزمنية باستخدام Crossformer. يُستخدم هذا الإطار لتحقيق تنبؤ عالي الدقة لسلوك الضغط العابر في مكامن التخزين الجوفي للغاز الطبيعي خلال فترة فحص تصاعد الضغط (Build-up) دون الحاجة لعمليات إغلاق إضافية للآبار. يحقق النموذج دقة تنبؤ تصل إلى 99.98%، مما يضمن موثوقية بيانات مشتقة الضغط. أظهر التطبيق على الحالة الواقعية لمشروع تخزين الجوفي للغاز في الصين أن ضغط المكمن الابتدائي يبلغ 31.7877 ميغاباسكال والنفاذية 11.6 ملي دارسي.

2-10 مقارنة التقسير بالذكاء الاصطناعي مع طرق التفسير الاخرى

1- مقارنة الذكاء الاصطناعي بمشتقة بوردية ومنهجية التوليف المباشر(TDS)

تُعد مشتقة الضغط (Bourdet Derivative=dp/dlnt=t(dp/dt) وفق منهجية بوردية (Bourdet-1983)حجر الزاوية في التحليل الحديث لفحوصات الآبار، حيث تُستخدم للكشف عن أنماط الجريان المختلفة (مثل الجريان الشعاعي، و الخطي و الكروي) وتأثير سعة التخزين، وجود صدوع واستخلاص انواع و خواص المكمن من السلوك اللوغاريتمي للضغط. طوّرت منهجية التوليف المباشر (Tiab Direct Synthesis – TDS) هذه الفكرة إلى إطار تحليلي متكامل يسمح باستخراج المعلمات المكمنية (النفاذية، معامل القشرة skin، ومعاملات المكامن المتشققة مثل ω و λمباشرةً من نقاط محددة على منحنى المشتقة، دون الحاجة لمطابقة منحنيات نمطية.

في المقابل، يتعامل الذكاء الاصطناعي (خاصة الشبكات العصبية) مع مشتقة الضغط كبصمة سلوكية تمثل استجابة المكمن، حيث يتعلّم النموذج خلال مرحلة التدريب الربط بين شكل المشتقة وقيم الخواص المكمنية. وعلى خلاف منهجية TDS التي تعتمد على علاقات تحليلية فيزيائية صريحة عند نقاط زمنية محددة (Tiab -1995) ، يقوم الذكاء الاصطناعي باستخلاص هذه المعلمات بطريقة ضمنية تعتمد على التعرف الآلي على الأنماط، دون الحاجة لتحديد يدوي لنمط الجريان أو اختيار نقاط تفسير محددة .هذا النهج يحمل إمكانات حقيقية في تسريع التحليل الأولي، خاصة عند معالجة مجموعات كبيرة من الفحوصات و تقليل التحيّز البشري الناتج عن اختلاف خبرات المحللين و الكشف عن أنماط معقدة قد تفوتها العين البشرية في المشتقات المتأثرة بالضوضاء.مع ذلك، فإن غياب العلاقة التحليلية الصريحة بين المدخلات والمخرجات في النماذج الذكية يجعل من الصعب التحقق من صحة النتائج فيزيائياً، وهو أمر حاسم في القرارات الاستثمارية عالية التكلفة.

2- مقارنة الذكاء الاصطناعي بتطابق المنحنيات النوعي - Type Curves Matching

من الناحية المنهجية، يمكن النظر إلى تفسير فحوصات الآبار باستخدام الذكاء الاصطناعي على أنه امتداد رقمي متقدم لفكرة تطابق المنحنيات(Type Curve Matching) (Bourdet-1983) ، مع اختلاف جوهري في آلية التنفيذ. ففي حين يعتمد تطابق المنحنيات التقليدي على مقارنة بيانات بئر واحدة مع مجموعة محدودة من المنحنيات التحليلية المشتقة من نماذج فيزيائية مفترضة (مثل المكمن المتجانس، المسامية المزدوجة، وجود صدع). يعتمد الذكاء الاصطناعي على مقارنة السلوك الزمني للضغط مع عدد هائل من الأنماط المرجعية التي تم تعلمها مسبقًا خلال مرحلة التعلم Learning دون فرض قيود فيزيائية صريحة ، والتي تمثل عمليًا «مكتبة رقمية واسعة» من منحنيات النوع Type curves المحتملة. وبذلك، فإن عملية التفسير باستخدام الذكاء الاصطناعي لا تتطلب من المستخدم اختيار نموذج مكمني أو نمط جريان صريح في المرحلة الأولى، بل تقوم الخوارزمية باستخلاص أقرب سلوك مكمني استنادًا إلى التشابه الإحصائي بين البيانات المدخلة والأنماط الرقمية المخزنة في النموذج. الاستثناء الواعد الذي يجمع بين مرونة التعلم من البيانات والالتزام بالفيزياء الحاكمة ، هو النماذج الهجينة -Physics) Informed Neural Networks - PINN)، التي تدمج معادلة الانتشار كقيد فيزيائي أثناء

التدريب (Chen-2023) .

3- مقارنة الذكاء الاصطناعي بفك الالتفاف Deconvolution

بالمقارنة مع تقنية فك الالتفاف(Deconvolution) ، التي تهدف إلى إعادة بناء استجابة المكمن لوحدة معدل جريان ثابت انطلاقًا من بيانات إنتاج غير منتظمة عبر حل مسألة عكسية حساسة للضجيج وعدم انتظام القياسات (تنقية استجابة الإشارة Impulse Response عبر حل معادلات عكسية) (Gringarten-2010) ، فإن نماذج الذكاء الاصطناعي تعتمد على تعلّم العلاقة بين بيانات الضغط–الزمن والخواص المكمنية من خلال التدريب الإشرافي، دون الحاجة إلى صياغة رياضية صريحة للمسألة العكسية.

يوفّر هذا النهج مرونة عددية في التعامل مع البيانات المعقدة أو غير المثالية، إلا أنه يفتقر إلى التمثيل الفيزيائي الصريح الذي تتميز به تقنية فك الالتفاف ، حيث تبقى العلاقة بين المدخلات والمخرجات ضمنية داخل بنية النموذج ولا ترتبط مباشرة بمعادلات الجريان التحليلية.

لذا فلا يُنظر إلى الذكاء الاصطناعي كبديل عن طريقتي تطابق المنحنيات أو فك الالتفاف، بل بوصفه أداة تفسيرية مساندة يمكن توظيفها لتسريع التقدير الأولي للخواص المكمنية، أو للتحقق من اتساق النتائج المستخلصة باستخدام الأساليب الفيزيائية التقليدية و كمفسِّر أنماط في البيانات المعقدة التي تتحدى النمذجة التحليلية التقليدية.

3-10 مفاهيم أساسية في الذكاء الاصطناعي لفحوصات الابار

الذكاء الاصطناعي هو فرع من علوم الحاسوب يهدف إلى إنشاء أنظمة قادرة على أداء مهام تتطلب عادةً ذكاءً بشريًّا، مثل التعلّم، التحليل، التنبؤ، واتخاذ القرار. هنا لا نستخدم الذكاء العام، بل ذكاء اصطناعي مصمم خصيصًا لمهمة تفسير فحوصات الابار ، مثلا تقدير النفاذية من منحنى ضغط او تحديد نوع الموديل المكمني.

حتى نفهم كيفية عمل الذكاء الاصطناعي في تفسير فحوصات الابار، من الضروري استيعاب مفاهيم اساسية تتعلق بهيكلية البرنامج و التقنيات الأساسية التي تشكل جوهره. هذه التقنيات ليست مجرد أدوات برمجية ، بل هي نماذج رياضية وإحصائية معقدة قادرة على التعلم من البيانات واستنتاج الأنماط واتخاذ قرارات مستقلة (الشكل 10-1). أهم هذه الاساسيات (اهم المصادر النظرية في الذكاء الاصطناعي (Ian Goodfellow-2016) ، (Trevor-2009) :

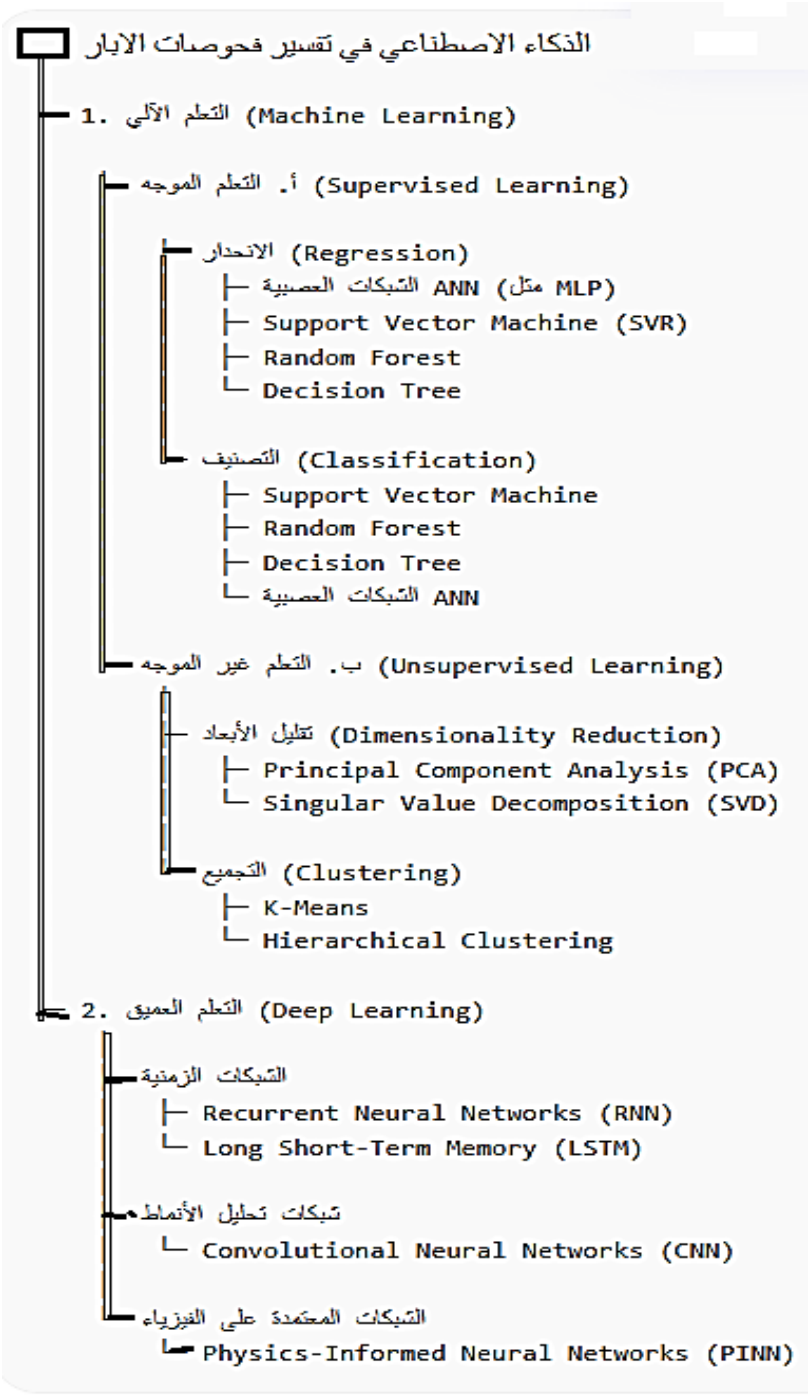
10-3-1 - تعلم الآلة (Machine Learning - ML)

يعتبر **تعلم الآلة** العمود الفقري لمعظم تطبيقات الذكاء الاصطناعي. و هو يعني من تمكّين أجهزة الكمبيوتر (الالات) من التعلم من البيانات دون أن تكون مبرمجة سابقا وتمكينها من تحسين أداءها مع مرور الوقت، وتعزيز قدرتها على اتخاذ القرارات وإجراء التنبؤات وأداء المهام بالاعتماد على تلك البيانات. ينقسم تعلم الآلة إلى ثلاثة أنواع رئيسية:

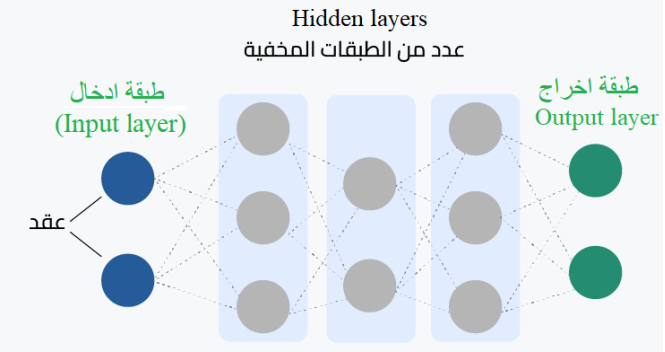
1- التعلم تحت إشراف (الموجه- Supervised Learning):

يُعدّ التعلّم تحت الإشراف او التعلم الموجه أكثر أنماط الذكاء الاصطناعي استخدامًا في تفسير

فحوصات الآبار، وفيه تتدرب خوارزميات الذكاء الاصطناعي على مجموعات بيانات مصنفة ومنظمة، أي مجموعات بيانات تحتوي على أمثلة للمدخلات Inputs والمخرجات Outputs التي يُفترض أن تنتجها الخوارزمية بناء على هذه المدخلات (الشكل10-2). فمثلًا إذا أردنا تطوير



الشكل 10-1 : اساسيات الذكاء الاصطناعي في فحوصات الابار



الشكل 10-2 :مدخلات و معالجات و مخرجات البيانات في انظمة التعلم الموجه

خوارزمية في تحديد نوع المكمن كان يكون متجانس او مكمن متشقق و باستخدام أسلوب التعلم بإشرافٍ فإننا نعطي الخوارزمية مجموعة البيانات تحتوي مثلا منحنيات مشتقة الضغط تحت تصنيف أو وسم (موسومة Labels) بعنوان ان هذا النوع يمثل مكمن متجانس و منحنيات مشتقة الضغط اخرى تحت تصنيف بعنوان مكمن متشقق . ثم نسمح للخوارزمية بتحليل كل البيانات و تصنيفها مكمنيا من خلال التعرف على صفات و سمات المنحني الذي يعود لاي من المكمنين . فإذا ما انتهت الخوارزمية من التدرب يمكن أن نعطيها بعد ذلك بيانات جديدة لفحوصات ابار (منحنيات مشتقة الضغط) لم تتدرب عليها من قبل لنفس الغرض في التصنيف , فإن كان التصنيف متطابق مع نوع المكمن الحقيقي يعني اجابة دقيقة فيمكن اعتماد النموذج AI و تعميمه كنموذج صالح للتطبيق . أما إذا لم تكن إجابات الخوارزمية متطابقة فحينئذ تحتاج إلى مزيد من التدريب على مجموعات بيانات اكثر، أو إلى تعديل الخوارزمية لزيادة دقتها. تكمن قوة هذا النهج في دقته العالية عندما تتوفر مجموعة تدريب كبيرة وممثلة، إلا أن أداءه يعتمد بشدة على جودة البيانات وصحة القيم المرجعية المستخدمة في التدريب.

2- التعلم بدون إشراف(غير الموجه - Unsupervised Learning)

يختلف التعلم بدون إشراف عن التعلم تحت إشراف في أن الخوارزميات تتدرب على مجموعات بيانات غير مصنفة أو موسومة، ويعمل نموذج الذكاء الاصطناعي بنفسه على تصنيفها تلقائيًا بناء على أوجه التشابه والاختلاف بين البيانات، فمثلًا عند تطوير نموذج ذكاء اصطناعي للتعرف على أنواع اطوار الجريان (مثلا طور جريان خطي ، شعاعي او كروي ...) فإننا لا نزود النموذج بأسماء الأنواع، ولا نصنف الأنواع في مجموعة البيانات، وإنما نعطي للنموذج منحنيات مشتقة الضغط لهذه الأنواع فقط، فيبدأ في تصنيف البيانات ضمن فئات استنادًا إلى أشكالها و انماط تغير المنحني والخصائص المشتركة بينها. ويشيع استخدام هذا النوع من التعلم في المهام المعقدة التي تتطلب تصنيفًا وترتيبًا لكميات كبيرة جدا من البيانات غير المنظمة.

كما و يلعب التعلُّم غير المُوجَّه دورًا مهمًا في مرحلة معالجة البيانات السابقة للتفسير (Data Preprocessing) من أبرز تقنياته :

- تحليل المكونات الرئيسية (PCA – Principal Component Analysis): تُستخدم PCA لتقليل أبعاد بيانات مشتقة الضغط Dimensionality Reduction إلى عدد أقل من "المكونات" دون فقدان السلوك الفيزيائي الأساسي(2021)Saifi Redha .

- التفكيك باستخدام القيم المنفردة (SVD – Singular Value Decomposition) : تقنية رياضية (هو الأساس الرياضي لـPCA لكنه يُستخدم أيضًا بشكل مستقل) تُستخدم لتقليل الأبعاد واستخراج السمات الأساسية من منحنيات الضغط و في ازالة الضوضاء.

- التجميع – (Clustering) مثل خوارزمية K-Means Clustering و Hierarchical Clustering تستخدمان في تصنيف منحنيات الضغط حسب الشكل و في تجميع آبار ذات سلوك المتشابه في مجموعات و لتجميع عيّنات فحوصات الآبار ذات السلوك.

مثال 1 توضيحي:شركة تمتلك بيانات فحص لـ 500 بئر في حقل جديد، دون وجود تصنيف مسبق لأنواع المكامن. باستخدام خوارزمية K-Means على منحنيات مشتقة الضغط بعد تقليل أبعادها بـتحليل المكونات الرئيسية (PCA – Principal Component Analysis)، يكتشف النموذج وجود أربع مجموعات مميزة. عند مراجعة هذه المجموعات هندسياً، يجد المهندسون او الخبراء أن:

المجموعة الأولى تتوافق مع المكامن الرملية المتجانسة.

المجموعة الثانية تُظهر سلوكاً يدل على وجود أنظمة شقوق.

المجموعة الثالثة تشير إلى تأثيرات حدودية معقدة.

المجموعة الرابعة تحتوي على ثلاث آبار فقط ذات سلوك شاذ ،اتضح لاحقاً أنها تعاني من مشاكل في أداة القياس.

هذا الاكتشاف التلقائي ممكن ان يسمح للشركة بإعادة تقييم نموذج المكمن الكلي للحقل، وتحديد الآبار التي تحتاج لفحص ميداني عاجل، دون الحاجة لتحليل كل بئر يدوياً.

مثال2 توضيحي:

نفترض توفر 150 فحصًا لآبار(منحنيات مشتقة ضغط) ، وكل فحص يحتوي على 250 نقطة من منحنى المشتقة. ان التحدي في هذه الحالة هو ان تدريب شبكة PNN على هذه البيانات سيستغرق وقتًا طويلاً وقد يؤدي إلى.Overfitting .

الحل:

- تطبيق PCA لاستخراج أول 7 مكونات (تحافظ على 96% من التباين) . اذا كان المكون الاول PC1 يشبه منحنىً يرتفع بسرعة ثم يستقر، هذا قد يعكس بشكل غير مباشر النفاذية العالية.

إذا كان المكون الثاني PC2 يحتوي على وادي فقد يعكس سلوك المكمن ثنائي المسامية.

- استخدام هذه المكونات السبعة كمدخلات لشبكةPNN تعطي نتيجة:

وقت تدريب أقل بنسبة 70.% و دقة تصنيف أعلى (97 % مقابل 92 %) بسبب تقليل الضوضاء(من جراء كثرة البيانات).

3- التعلم المعزز :(Reinforcement Learning-RL) :

يختلف التعلّم المعزَّز جذريًا عن النوعين السابقين، إذ يعتمد على مفهوم التفاعل مع بيئة ديناميكية، حيث يتخذ النموذج قرارات متتابعة ويحصل على مكافآت أو عقوبات بناءً على جودة

هذه القرارات (Maxime Toquebiau-2025) . في سياق فحوصات الآبار، يُعدّ استخدام التعلّم المعزَّز محدودًا جدًا ولا يُعدّ من الأدوات الشائعة في التفسير التقليدي للبيانات العابرة للضغط Pressure transient analysis. ويرجع ذلك إلى أن تفسير فحوصات الآبار مسألة تحليل بيانات ثابتة (Offline Analysis) أكثر من كونها عملية تحكم تفاعلية. ومع ذلك، يمكن أن يظهر دور التعلّم المعزَّز بشكل غير مباشر في تطبيقات مستقبلية مثلا كطبقة ذكاء فوقية تُحسِّن عملية الحصول على البيانات التي ستُحلَّل لاحقاً بتلك التقنيات ، فهو يهتم بتصميم تسلسل التشغيل الأمثل للحصول على منحنى ضغط عالي الجودة او يمكن استخدامه في تحسين استراتيجيات تشغيل الفحوصات ، أو دمجه مع المحاكاة المكمنية لتحديد أفضل تسلسل للإجراءات التشغيلية (مثل مدة الإغلاق، معدلات الجريان، وتوقيت أخذ القياسات) .

2-3-10 التعلّم العميق (Deep Learning)

يُعتبر التعلّم العميق (DL) تخصصًا متقدمًا ضمن التعلّم الآلي(ML) ، وكلاهما يندرج تحت مظلة الذكاء الاصطناعي .(AI) ويُسمّى "عميقًا" لأن الشبكات العصبية العميقة فيه تحتوي على ثلاث طبقات مخفية Hidden layer فأكثر، مما يمكّنها من استخراج سمات تلقائية متدرجة التعقيد من البيانات الخام، مشابهة لطريقة عمل الدماغ البشري في تحليل الصور (من الحواف إلى الأشكال إلى الصورة الكاملة).

في سياق فحوصات الآبار، وعلى عكس الشبكات الضحلة (السطحية) (Shallow Neural Networks) التي تحتوي على طبقة مخفية واحدة وتعتمد على هندسة سمات يدوية ، فإن الشبكات العميقة تعالج البيانات الخام كاملةً دون افتراضات مسبقة، وتستخرج السمات الأكثر تمييزًا تلقائيًا. على سبيل المثال، يمكن لشبكة عميقة مكونة من 5 طبقات استقبال منحنى الضغط الخام (آلاف النقاط) والتنبؤ مباشرة بقيمة النفاذية، دون حاجة لحساب المشتقة يدويًا.

ومع ذلك، فإن فعالية التعلّم العميق مشروطة بتوفر كم كبير من بيانات التدريب الممثلة، كما أن نتائجه غالبًا ما تكون صندوقًا أسود(Black Box) ، مما يستلزم ربطها بالإطار الفيزيائي (مثل معادلات الجريان) لضمان واقعية التفسير الهندسي.

ملاحظة **:**ليس كل شبكة عصبية تعلّمًا عميقًا، فقط تلك ذات ثلاث طبقات مخفية فأكثر.

فيما يلي أبرز أنواع الشبكات العميقة وتطبيقاتها في فحوصات الآبار:

1- الشبكات التلافيفية (Convolutional Neural Networks – CNNs)

تُعدّ الشبكات التلافيفية (CNNs) أحد نماذج التعلم العميق (DL) التي طُوِّرت أساساً لمعالجة البيانات ذات البنية المكانية، لا سيما الصور، إلا أن استخدامها توسّع ليشمل تحليل السلاسل الزمنية والإشارات الهندسية المعقدة. في سياق فحوصات الآبار(Well Testing) ، تمثل منحنيات الضغط ومشتقة الضغط بيانات زمنية تحتوي على أنماط شكلية مميزة تعكس أنظمة الجريان المختلفة داخل المكمن، الأمر الذي يجعل CNN إطاراً مناسباً لاستخراج هذه الأنماط بصورة تلقائية. تعتمد الشبكات التلافيفية على مبدأ الالتفاف(Convolution) ، حيث تُطبَّق

مرشحات (Filters) صغيرة على البيانات المدخلة لاكتشاف الأنماط المحلية مثل الميل، نقاط الانعطاف، أو التغيرات الحادة في المشتقة.

تتكون البنية الأساسية للشبكة التلافيفية من ثلاث طبقات رئيسية. أولاً طبقات الالتفاف (Convolution Layers)التي تنتج خرائط سمات (Feature Maps) تعكس استجابة المرشحات للأنماط المحلية في البيانات. ثانياً، طبقات التجميع (Pooling Layers) التي تقلل الأبعاد وتحافظ على أهم السمات، مما يسهم في تقليل الضوضاء وتحسين الاستقرار العددي. وأخيراً، الطبقات كاملة الربط (Fully Connected Layers) التي تُستخدم لإنتاج المخرجات النهائية سواء في مهام الانحدار مثل تقدير النفاذية (k) والمعامل القشرة(s) ، أو في مهام التصنيف مثل تحديد نوع نظام الجريان أو طبيعة المكمن. على الرغم من مزاياها في التقاط العلاقات غير الخطية المعقدة وتقليل الحاجة إلى استخراج ميزات يدوية مكثفة، إلا أن الشبكات التلافيفية تتطلب عادةً قاعدة بيانات تدريب كبيرة نسبياً وقدرة حسابية أعلى مقارنة بالنماذج التقليدية، كما أن قابليتها للتفسير أقل من النماذج القائمة على القواعد. ومع ذلك، فإنها تمثل خياراً مناسباً في تصميم نماذج ذكاء اصطناعي متقدمة لتفسير فحوصات الآبار، خاصة عند التعامل مع منحنيات خام ذات سلوك غير خطي معقد كما في المكامن المتشققة ثنائية المسامية.

مثال3 للتوضيح:

شبكة CNN عميقة (5 طبقات تلافيفية) تم تدريبها على 10000 منحنى للضغط ، تمكّنت من تصنيف نوع المكمن بدقة 98.5% ، متفوّقة قليلاً على الشبكات الضحلة PNN بدقة (97%) لكن بوقت تدريب أطول (ساعات مقابل ثوانٍ) (LI Daolun-2020) .

2- الشبكات المتكررة (RNNs) وشبكات الذاكرة طويلة قصيرة المدى(LSTM)

تُعد الشبكات العصبية المتكررة (Recurrent Neural Networks – RNNs) نماذج مخصصة لمعالجة البيانات المتسلسلة ذات البعد الزمني، حيث تعتمد مخرجاتها على المدخلات الحالية والحالة المخفية المنقولة من الخطوات الزمنية السابقة. وعلى خلاف الشبكات ذات التغذية الأمامية (Feedforward Networks) مثل الشبكات متعددة الطبقات(MLP) ، التي تتعامل مع كل عينة (كل مشتقة ضغط لكل بئر) بشكل مستقل أو تعتمد على ميزات مشتقة مسبقًا، فإن RNN تعالج بيانات الضغط مقابل الزمن كسلسلة مترابطة، مما يسمح بتمثيل الاعتماد الزمني بين نقاط القياس. إلا أن الشبكات المتكررة التقليدية تعاني من مشكلة تلاشي التدرج (Vanishing Gradient)، مما يحد من قدرتها على الاحتفاظ بالمعلومات بعيدة المدى، ويؤدي إلى ضعف تمثيل التأثيرات الزمنية الممتدة.

ولمعالجة هذه الإشكالية، طُوّرت بشبكات الذاكرة الطويلة قصيرة المدى (Long Short-Term Memory – LSTM)، وهي بنية متقدمة من RNN تتضمن خلية ذاكرة (Cell State) وآليات تحكم تعرف بالبوابات (بوابة الإدخال، بوابة النسيان، وبوابة الإخراج)، تتيح تنظيم تدفق المعلومات عبر الزمن والاحتفاظ بالمؤثرات طويلة المدى ذات الأهمية الفيزيائية.

ويمكن توظيف RNN و LSTM في التنبؤ بالسلوك المستقبلي للضغط ، أو في تحليل بيانات

الإنتاج طويلة الأمد ومراقبة الحقول عبر فترات زمنية ممتدة. مع ذلك، ورغم الطبيعة الزمنية لبيانات فحوصات الآبار، فإن قِصر مدة الاختبارات ووجود نماذج فيزيائية حاكمة واضحة يقللان من الحاجة إلى الشبكات المتكررة مقارنةً بتطبيقات زمنية أخرى، مما يجعل النماذج المعتمدة على الميزات أكثر شيوعًا في هذا المجال.

3-الشبكات العصبية المقيّدة فيزيائياً – (Physics-Informed Neural Networks PINNs)

تُعد الشبكات العصبية المقيّدة فيزيائياً (PINNs) أحد الاتجاهات الحديثة التي تجمع بين تقنيات تعلم الآلة والنمذجة الفيزيائية، حيث يتم تضمين المعادلات التفاضلية الحاكمة للظاهرة المدروسة ضمن عملية التدريب على شكل قيود رياضية تُضاف إلى دالة الخسارة (و هي دالة تقيس الفرق ما بين القيم الحقيقية و القيم المقدرة من النموذج). وبدلاً من الاعتماد على البيانات الحقلية وحدها، تُصاغ دالة الخسارة الكلية كمحصلة لمركبتين أساسيتين: خسارة البيانات (Data Loss) التي تقيس الفرق بين القيم المقاسة والقيم المتنبأ بها، وخسارة فيزيائية (Physics Loss) تمثل بواقي (Residual) معادلة الانتشار الشعاعي .(Radial Diffusivity Equation) وبهذا يُجبر النموذج على احترام القوانين الفيزيائية الأساسية أثناء عملية التعلم، مما يقلل من الحلول غير المتسقة فيزيائياً.

في سياق فحوصات الآبار، تُستخدم PINNs بصورة خاصة في معالجة المسائل المعكوسة (Inverse Problems)، حيث يكون الهدف تقدير معاملات المكمن مثل النفاذية(k) من بيانات الضغط أو معاملات الجريان في المكامن ثنائية المسامية، من خلال تدريب الشبكة على مطابقة بيانات الضغط المقاسة مع ضمان توافق الحل مع معادلة الجريان. كما يمكن توظيف هذا الإطار لحل معادلة الانتشار مباشرة دون دون الحاجة إلى بناء شبكة عددية صريحة كما في الطرق التقليدية، إذ تعتمد الشبكة على الاشتقاق التلقائي لضمان تحقق المعادلة التفاضلية. أو في الحالات التي تتسم بندرة البيانات أو ارتفاع مستوى الضوضاء، إذ يعمل القيد الفيزيائي كآلية تنظيم (Regularization) طبيعية تعزز قدرة النموذج على التعميم وتحسن استقراره العددي . (Maziar-2019).

وعلى الرغم من أن تطبيق PINNs في مجال فحوصات الآبار لا يزال ضمن نطاق الأبحاث المتقدمة أكثر منه في التطبيقات الصناعية، بسبب وجود حلول تحليلية وعددية راسخة، فإن هذا الإطار يمثل توجهاً واعداً نحو تطوير نماذج هجينة تجمع بين صرامة النمذجة الفيزيائية ومرونة تقنيات الذكاء الاصطناعي، خاصة في المكامن المعقدة، أو في الأنظمة غير الخطية، أو عند محدودية البيانات الحقلية المتاحة.

3-3-10 نماذج تعلُّم الآلة الاخرى الخاضعة للإشراف Supervised Machine Learning Techniques (Goodfellow-2016)

في سياق تفسير فحوصات الآبار، يُعدّ تعلُّم الآلة الخاضع للإشراف (Supervised Machine Learning) الركيزة الأساسية لأتمتة تحليل البيانات وتحويل منحنيات الضغط إلى معرفة هندسية قابلة للاستخدام. تعتمد هذه التقنيات على بيانات تدريب مصنّفة مسبقًا سواء كانت

تصنيفات لأنواع المكامن أو قيمًا فعلية للمعايير الفيزيائية لبناء نماذج قادرة على التنبؤ بدقة عند مواجهة حالات جديدة.

تشمل هذه المجموعة طيفًا واسعًا من النماذج، بدءًا من النماذج الخطية البسيطة التي تكشف العلاقات المباشرة بين المدخلات و المخرجات، وصولاً إلى الشبكات العصبية المعقدة القادرة على التقاط الأنماط غير الخطية الدقيقة. ومن أبرز هذه النماذج او التقنيات: الانحدار الخطي، آلات المتجهات الداعمة(SVM) ، أشجار القرار، الغابات العشوائية، والشبكات العصبية الاصطناعية(ANNs) .كل تقنية تمتلك نقاط قوة وقيودًا تجعلها أكثر ملاءمة لسيناريوهات محددة ، مثل توفر البيانات، طبيعة المهمة (تصنيف أم انحدار)، أو الحاجة إلى الشفافية في اتخاذ القرار. وفيما يلي استعراض لأبرز هذه التقنيات وتطبيقاتها في تفسير فحوصات الآبار.

ملاحظة : الشبكات العميقة تعتبر ايضا من نماذج تقنيات تعلم الالة الخاضعة للاشراف تتميز باستخراج الميزات (Feature Engineering) تلقائياً من البيانات الخام و ليس يدويا . كما و تتميز بقدرتها على العمل في أنماط تعلم أخرى مثل Unsupervised Learning التعلم غير خاضع لإشراف.

10-3-3-1: النماذج الخطية (Linear Models) : تتضمن التقنيات التالية:

1- الانحدار الخطي (Linear Regression)

يعد الانحدار الخطي أحد أبسط خوارزميات التعلم الآلي الخاضع للإشراف (Supervised Learning) ويُستخدم غالبًا كنموذج مرجعي (Baseline Model) يهدف إلى نمذجة العلاقة بين متغير مدخل واحد أو أكثر ومتغير مخرج كمي مستمر عبر معادلة خطية.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad \text{---------- 1}$$

اذ ان :

y: المتغير المستهدف (مثل: النفاذية k).

$x_1, x_2, \ldots, x_n$: المتغيرات المدخلة (مثل: ميل المنحنى، زمن الاستقرار).

$\beta_0, \beta_1, \ldots, \beta_n$: المعاملات التي تتعلمها الخوارزمية.

ε: الخطأ (الفرق بين القيمة الحقيقية والمتوقعة).

2- دالة الخطأ (Loss Function)

و تُستخدم عادةً مجموع مربعات الفروقات (Ordinary Least Squares – OLS) ، بحيث يتم إيجاد المعاملات التي تقلل مجموع مربعات الفروقات بين القيم الحقيقية والمتوقعة.

في تطبيق فحوصات الآبار، يمكن استخدام الانحدار الخطي لتقدير علاقات بسيطة، مثل العلاقة الخطية بين معدل الجريان وانخفاض الضغط في طور الجريان المستقر (Darcy Flow) .

مثال4 توضيحي:

بيانات التدريب: 100 حالة فحص معروفة نفاذيتها وميل منحنى الضغط خلال الفترة المتوسطة للطور الشعاعي.

المدخلات :(Input) الميل (x)

المخرجات (Output) :النفاذية (y)

المعادلة الناتجة :

$$k=5.2-38.7\times(\text{الميل})$$

المعامل السلبي يشير إلى أن زيادة الميل تؤدي إلى انخفاض النفاذية، بما يتوافق مع المبادئ الفيزيائية للتحليل الشعاعي.

الاستخدام العملي :عند فحص بئر جديد، يمكن حساب الميل من منحنى الضغط ثم تقدير النفاذية فورًا باستخدام المعادلة.

ملاحظات :بالرغم من بساطته وامتثاله لتعريف التعلم الآلي ، فإن الانحدار الخطي محدود في التعامل مع العلاقات غير الخطية أو التفاعلات المعقدة في المكامن، كما أنه حساس للضوضاء والقيم الشاذة، مما قد يستدعي معالجة مسبقة للبيانات.

لذا، غالبًا ما يُستخدم الانحدار الخطي كنموذج مرجعي لمقارنة الأداء مع النماذج غير الخطية المتقدمة مثل SVM و ANNوCNN، التي توفر تمثيلًا أكثر مرونة للعلاقات المعقدة في بيانات المكامن.

10-3-3-2 : النماذج غير الخطية (Non-Linear Models)

تتميز بقدرتها على اكتشاف الأنماط المعقدة والعلاقات غير المباشرة في بيانات الضغط والمشتقة، والتي لا يمكن للطرق الخطية التقليدية التقاطها. سنتناول في هذا الاتجاه أربع نماذج رئيسية هي: آلات المتجهات الداعمة (SVM)، أشجار القرار (Decision Trees)، الغابات العشوائية (Random Forest)، وأخيراً الشبكات العصبية الاصطناعية (ANNs).

1- آلات المتجهات الداعمة (Support Vector Machines – SVM)

(Trevor et al. 2009)

آلات المتجهات الداعمة (SVM) تُعد إحدى تقنيات التعلم الآلي الخاضع للإشراف (Supervised Learning)، وتُستخدم في كل من مهام التصنيف (Classification) والانحدار (Regression)، حيث يُعرف تطبيقها في الحالة الثانية باسم دعم المتجهات للانحدار (Support Vector Regression – SVR). تقوم الفكرة الأساسية لـ SVM على إيجاد حد فاصل (Decision Boundary) أو (Hyperplane) و الذي هو عبارة عن سطح رياضي

يفصل بين الفئات المختلفة في فضاء الخصائص Feature Space مع تعظيم الهامش (Margin)(هي المسافة بين الحد الفاصل وأقرب نقاط بيانات من كل فئة) والتي تُعرف باسم متجهات الدعم (Support Vectors) . يؤدي تعظيم هذا الهامش إلى تحسين قدرة النموذج على التعميم وتقليل خطر الإفراط في التخصيص Overfitting .هذا الحد يكون خطًا مستقيمًا في بعدين (2D) او مستويًا في ثلاثة أبعاد (3D) او Hyperplane مستوى فائق **(**في الأبعاد الأعلى).

في حدود الهامش (Margin) في SVM لا يكتفي SVM بالحد الفاصل فقط، بل يبحث عن أكبر هامش فصل بين الفئتين.

معادلات الحدود هي:

$w \cdot x + b = +1$

$w \cdot x + b = -1$

والمسافة بينهما (عرض الهامش) تساوي:

$Margin = 2/||w||$

لتحسين المسالة (Optimization Problem) فان SVM يحاول إيجاد أفضل حد فاصل عبر حل المسألة التالية:

$Min\ (1/2)||w||^2$

حيث ان :

الانحياز b : bias , متجه الميزات x : feature vector , متجه الاوزان w : weight vector

في حال عدم قابلية البيانات للفصل خطياً، تُستخدم مفهوم النواة (Kernel) لتحويل البيانات إلى فضاء أعلى أبعاداً بحيث تصبح قابلة للفصل. ومن أشهر الدوال النواتية المستخدمة : Polynomial Kernel و Radial Basis Function (RBF) ، حيث تُعد الأخيرة الأكثر شيوعاً في التطبيقات الهندسية بسبب قدرتها على تمثيل العلاقات غير الخطية المعقدة .

في سياق فحوصات الآبار، يمكن توظيف SVM في مهام التصنيف لتحديد نوع المكمن (متجانس، ثنائي المسامية، متشقق طبيعيًا) أو لتصنيف أنظمة الجريان(Linear، Radial ، Bilinear) اعتماداً على ميزات و سمات مستخرجة من منحنيات الضغط ومشتقتها، مثل الميل Slope، عرض الوادي Valley ، أو مستوى الهضبة Plateau . أما في حالةSVR ، فيمكن استخدامها لتقدير معاملات المكمن مثل النفاذية (k) و معامل القشرة (Skin Factor) ، ومعامل التخزين النسبي (ω) ، من خلال تعلم دالة تقريبية تحقق أقل انحراف ممكن ضمن هامش خطأ محدد.

تتميز SVM بفعاليتها في المساحات عالية الأبعاد (عالية السمات)، وقدرتها على التعامل مع عدد

كبير من الميزات مقارنة بعدد العينات (عدد الابار او عدد منحنيات الضغط او مشتقة الضغط) ، إضافة إلى استقرارها النسبي مع بيانات متوسطة الحجم. كما أن استخدامها لمفهوم التنظيم (Regularization) يمنحها قدرة جيدة على التعميم عند استخدامها لعينات اخرى ، خاصة بعد إجراء المعالجة المسبقة المناسبة للبيانات.

2- أشجار القرار(Decision Trees)

تُستخدم في مهام التصنيف (Classification) والانحدار(Regression) تختلف عن الخوارزميات الخطية أو المتجهات، إذ تعتمد على المنطق الشرطي لبناء نموذج هرمي يشبه الشجرة، يتكون من:

العقد (Nodes) : تمثل اختبارات شرطية على الميزات او(السمات Features)

الفروع (Branches) :تمثل نتائج هذه الاختبارات.

الأوراق (Leaves) :تمثل القرار النهائي أو القيمة المتوقعة.

الفكرة الاساسية تتضمن تقسيم فضاء البيانات إلى مناطق فرعية متجانسة قدر الإمكان، عبر سلسلة من الاختبارات على الميزات، بحيث تختار كل عقدة أفضل ميزة تميز البيانات. يقاس تجانس العقدة باستخدام معايير مثل تقليل عدم النقاء (Impurity) في التصنيف أو تقليل الخطأ في الانحدار.

فمثلا في التطبيق لفحوصات الآبار:

لمهمة التصنيف : لتحديد نوع المكمن (متجانس، ثنائي المسامية، متشقق طبيعيًا) أو نظام الجريان (Bilinear، Linear،Radial)، باستخدام الميزات المستخرجة من منحنيات الضغط مثل الميل، مدة الهضبة، نقاط الانكسار.

الانحدار :تقدير النفاذية (k) ، معامل القشرة (s) ، معاملات التخزين (ω) ، حيث تمثل الأوراق النهائية قيمة عددية بدلاً من فئة.

تمتاز أشجار القرار كونها سهلة الفهم والتفسير هندسيًا، تعكس المنطق التحليلي للفحص و لا تتطلب افتراضات خطية ، وقادرة على التعامل مع ميزات غير مترابطة و لكنها حساسة للضوضاء. قد تؤدي الأشجار الكبيرة جدًا إلى الإفراط في التخصص (التعلم) (Overfitting) اي تتخصص في تفاصيل بيانات التدريب وتفقد قدرتها على التعميم. ما يستدعي وضع قيود مثل الحد الأقصى للعمق أو الحد الأدنى لعدد العينات في العقدة.

إن اختيار أفضل تقسيم في كل عقدة لأشجار القرار تعتمد على معايير قياس جودة الانقسام (Splitting Criteria)، ومن أشهرها:

إنتروبيا (Entropy) : الذي يقيس مقدار عدم اليقين أو الفوضى في مجموعة البيانات.

$$\text{Entropy(H)} = -\sum_{i=1}^{c} p(i)\log_2 p(i) \quad \text{---------- 2}$$

و مؤشر جيني(Gini Impurity) : يُستخدم بشكل واسع في Random Forest و Decision Trees. و يقيس نقاء العقدة ، القيمة 0 تعني أن جميع العينات في العقدة تنتمي لفئة واحدة.

$$G = \sum_{1}^{c} p_i^2 - 1 \quad \text{---------- 3}$$

، C-Number of classes in the node ،H- Entropy of the node (measure of uncertainty)
G-Gini impurity of the node،p_i- i Probability of a sample belong to class.

3- الغابات العشوائية (Random Forest)

نموذج يعتمد على مجموعة من أشجار القرار (Decision Trees) لتقليل التباين Variance وزيادة الدقة في التنبؤ. الفكرة تشبه استشارة عدة خبراء بدلاً من الاعتماد على خبير واحد، حيث يقوم كل "خبير" بدراسة البيانات بشكل مستقل، ثم تُدمج النتائج.

التطبيق في فحوصات الآبار يتضمن :

التصنيف :تمييز نوع المكمن أو نظام الجريان باستخدام الميزات الهندسية المستخرجة من منحنيات الضغط، مثل الميل، مدة الهضبة، ونقاط الانكسار.

الانحدار :تقدير النفاذية(k) ، معامل القشرة(s) بدقة أعلى من شجرة واحدة، مع تقليل تأثير القيم الشاذة.

الآلية التقنية الرئيسية تتضمن :

عشوائية البيانات: فلكل شجرة يتم اختيار عينة عشوائية من البيانات و مع التكرار يقل تأثير القيم الشاذة والضوضاء.

و عشوائية السمات Feature Randomness: فعند كل انقسام في الشجرة، يتم اختيار عدد محدود من الميزات عشوائيًا، لمنع هيمنة متغير واحد وضمان استكشاف العلاقات المتنوعة بين المتغيرات.

و تقليل التباين (Variance Reduction) : بدمج مئات الأشجار وأخذ المتوسط (للانحدار) أو التصويت بالأغلبية (للتصنيف)، تقل الأخطاء الفردية ويُظهر الإشارة الحقيقية فقط.

اذن Random Forest عبارة عن مجموعة من أشجار القرار (مئات أو آلاف الأشجار)، ما يفعله بالضبط هو ان كل شجرة تعطي تنبؤاً، والنموذج يأخذ متوسط النتائج (للانحدار) أو الأكثرية (للتصنيف).

تتميز الغابات العشوائية بكونها أكثر استقرارًا من شجرة واحدة، مقاومة للضوضاء، قادرة على تمثيل العلاقات غير الخطية و إمكانية معرفة أهمية كل ميزة (Feature Importance) لتحديد المتغيرات الأكثر تأثيرًا. لكن تتطلب حسابات أكثر من شجرة واحدة و الأداء يعتمد على جودة وكمية الميزات الهندسية المدخلة.

المقارنة ما بين النماذج الثلاثة اعلاه ادرجت في الجدول رقم-10-1 .

النموذج	نوع المسألة الأكثر شيوعًا في Well Testing	أمثلة تطبيقية
Support Vector Machine (SVM)	Classification غالبًا، ويمكن استخدامه للـ Regression	تصنيف نوع المكمن (متجانس، مسامية مزدوجة)، التعرف على نمط الجريان
Random Forest	Classification و Regression	تقدير النفاذية k، Skin factor، أو تصنيف نوع المكمن
Decision Tree	Classification غالبًا، ويمكن استخدامه للـ Regression	تصنيف نماذج المكامن أو تحديد نوع السلوك الجرياني من بيانات الفحص

الجدول 10-1 :ملخص مهام النماذج غير الخطية

مثال5 توضيحي

أ-عند التنبؤ بـ Skin Factor لبئر باستخدام 100 شجرة:

النتيجة النهائية :يقوم النموذج بجمع كل هذه التوقعات وأخذ المتوسط الحسابي :

$$\text{Final Prediction} = \frac{\sum_{i=1}^{100} \text{Tree}_i}{100} \approx +3.8$$

ب- مثال رقمي: نتائج دراسة لتقدير النفاذية (Permeability) من بيانات فحص وجد ان :

- الانحدار الخطي :(Linear Regression) أعطى خطأ (RMSE) مقداره 15%.

- الشبكة العصبية :(ANN) أعطت خطأ مقداره 8% (جيدة لكن تحتاج وقت تدريب).

- الغابات العشوائية :(Random Forest) أعطت خطأ مقداره 5% فقط.

السبب Random Forest :استطاعت التقاط العلاقات غير الخطية المعقدة بين معدل الجريان والمشتقة دون أن تحفظ ضوضاء البيانات كما تفعل ANN أحياناً.

4- تقنيات غير خطية (للحالات المعقدة)

1- t-SNE أو UMAP

تحافظ على العلاقات المحلية بين المنحنيات.تُستخدم غالبًا للتصور البصري (Visualization) أكثر من التدريب.

2- شبكات عصبية Autoencoders :

تتعلم تمثيلاً مضغوطًا غير خطي عبر ترميز ثم فك تشفير البيانات. مفيدة عندما تكون العلاقات بين النقاط معقدة جدًا. مثلا تدريب Autoencoder على 10000 منحنى لاستخراج تمثيل اقل مضغوط.

5- الشبكات العصبية الاصطناعية التقليدية او الضحلة Shallow Artificial Neural Networks ANNs

تُعتبر الشبكات العصبية الاصطناعية (ANNs) (تمييزا لها عن الشبكات العميقة) إحدى أهم نماذج تعلّم الآلة، وتندرج غالبًا ضمن إطار التعلّم الخاضع للإشراف . وقد استُلهمت فكرتها من آلية عمل الجهاز العصبي البشري، حيث تحاكي طريقة معالجة الخلايا العصبية للمعلومات ونقل الإشارات بينها.

تتكوّن الشبكة من وحدات حسابية بسيطة تُسمّى العصبونات(Neurons) ، ترتبط فيما بينها عبر أوزان (Weights) قابلة للتعديل أثناء التدريب. وتتألف بنيتها عادةً من طبقة إدخال Input Layer، وطبقة مخفية واحدة أو عدد محدود من الطبقات المخفية Hidden layer، وطبقة إخراج (Output Layer) .

تهدف هذه الشبكات إلى تعلّم العلاقات غير الخطية المعقّدة بين المدخلات والمخرجات مباشرة من البيانات، دون الحاجة إلى صياغة نموذج رياضي فيزيائي صريح يصف تلك العلاقات. يتم تدريب النموذج باستخدام بيانات ذات مخرجات معروفة، ثم يُستخدم لاحقًا للتنبؤ أو لتقدير القيم أو لتصنيف أنماط الجريان وأنواع المكامن عند معالجة بيانات جديدة.

تتميّز الشبكات العصبية التقليدية (الضحلة) بقدرتها على تمثيل العلاقات غير الخطية والتعامل مع الأنظمة المعقّدة، إلا أن أداءها يعتمد بشكل كبير على جودة البيانات وعدد العصبونات المختارة، كما قد تتعرض لمشكلة الإفراط في التعلم ما لم تُستخدم تقنيات تنظيم مناسبة.

اولا- انواع الشبكات العصبية التقليدية Neural Network-NN

نوضح في الفقرات اللاحقة اهم انواع الشبكات العصبية التقليدية المستخدمة في تفسيرات فحوصات الابار:

أ- الشبكات العصبية متعددة الطبقات Multilayer Perceptron (MLP)

تُعتبر MLP من الهياكل الكلاسيكية في الشبكات العصبية ذات التغذية الأمامية (Feed-Forward Neural Networks)، وقد استُخدمت في الدراسات مثل Vaferi (2011) لتصنيف أنواع المكامن (متجانسة، ثنائية المسامية) وتقدير معالمها الفيزيائية مثل النفاذية وعامل القشرة تحت ظروف حدودية مختلفة (صدوع، حدود مغلقة، إلخ) .

يتكون هيكل MLP من:

- طبقة إدخال :تمثّل مؤشرات فحص البئر (مثل: قيم الضغط، مشتقة الضغط، معدل الجريان).

- طبقة أو أكثر من الطبقات المخفية :تتعلّم العلاقات غير الخطية بين المدخلات والمخرجات. عندما تكون الطبقات المخفية محدودة (1–2 طبقة)، تُصنّف الشبكة ضمن الشبكات التقليدية (السطحية) ؛ أما عند تجاوز هذا العدد بشكل اكبر، فتدخل ضمن الشبكات العميقة.

- طبقة إخراج :تُنتج القيم المقدرة (مثل: النفاذية، عامل القشرة).

ب- الشبكة العصبية الاحتمالية (Probabilistic Neural Network – PNN)

طوّر سبيخت (1990) Specht شبكة PNN استنادًا إلى نظرية القرار البايزية وتقدير كثافة

الاحتمال باستخدام طريقة Parzen Window ، تعتمد الشبكة على دالة نواة غاوسية لتقدير احتمال انتماء منحنى فحص جديد إلى كل فئة (مثل: مكمن متجانس، مكمن ثنائي المسامية)، ثم تصنّفه إلى الفئة ذات الاحتمال الأعلى.

دالة النواة الغاوسية (وتُسمى أيضاً (RBF Kernel — Radial Basis Function) هي دالة رياضية تقيس التشابه بين نقطتين في الفضاء، حيث:

- كلما اقتربت النقطتان كلما زاد التشابه (القيمة تقترب من 1)
- كلما ابتعدت النقطتان كلما قلّ التشابه (القيمة تقترب من 0)

بشكل مختصر فأن Specht بنى PNN على ثلاث ركائز (الجدول رقم-10-2):

1. قاعدة بايز لاتخاذ القرار الأمثل.
2. تقدير الكثافة الاحتمالية لمعرفة توزيع كل فئة نوافذ Parzen .
3. الدالة الغاوسية (Gaussian Kernel) .

الركيزة / المفهوم	المعادلة الأساسية	الغرض/الدور
نظرية القرار البايزي (Bayesian Decision Theory)	$P(\omega_i \mid x) = \frac{P(x \mid \omega_i) P(\omega_i)}{P(x)}$	تحدد كيف نتخذ القرار الأمثل في ظل عدم اليقين، باختيار الفئة ذات الاحتمال الأعلى
تقدير الكثافة الاحتمالية بطريقة Parzen Window	$f_i(x) = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} K(x - x_{ij})$	تحسب احتمال أن العينة X تنتمي للفئة C_i من خلال تقدير توزيع البيانات
الدالة الغاوسية (Gaussian Kernel)	$K(x, x_i) = \exp\left(-\frac{\|x - x_i\|^2}{2\sigma^2}\right)$	X تقيس التشابه بين العينة الجديدة وكل عينة تدريب X_{ij} باستخدام نواة Gaussian. مع معامل تسوية σ يتحكم في عرض النافذة

الجدول10-2 : المفاهيم الاساسية لشبكة PNN

النتيجة :شبكة تصنيف قوية، سريعة التدريب، وتعطي مخرجات احتمالية (وليس تصنيفاً جافاً)، مع أساس نظري متين من الإحصاء ونظرية القرار.

في تطبيقات فحوصات الآبار تُستخدم PNN بشكل رئيسي في مهام تصنيف نوع المكمن و كشف وجود صدوع أو حدود مكمنية من خلال تحليل سلوك منحنيات الضغط والمشتقة. . وتتميّز

بسرعة تدريب فائقة لأنها لا تتطلب تكرارات أو انتشارًا عكسيًّا , واستقرار عالٍ في النتائج عند توفر بيانات تدريب ممثلة. كما انها خيارًا ممتازًا في سياق فحوصات الآبار، حيث تكون البيانات محدودة نسبيًّا، والسرعة والدقة أولوية قصوى.
.ومع ذلك، فإن أداء PNN يعتمد بشكل حاسم على ضبط معامل الانتشار (Spread Parameter)، اذ أنها تحتفظ بجميع بيانات التدريب في الذاكرة أثناء الاستدلال وهو ما قد يؤثر على الكفاءة عند توسيع النظام لآلاف الآبار.
(معامل الانتشار(Spread Parameter) هو الرقم الذي يحدد مدى اتساع أو ضيق نطاق تأثير نقطة البيانات عند التدريب.يمثل معلمة تحكم عرض دالة النواة الغاوسية (Gaussian Kernel) المستخدمة في طبقة النموذج (Pattern Layer) للشبكة PNN ويرمز له غالبًا بالرمز σ (سيغما)).

ت- شبكة الانحدار المعمّم – (Generalized Regression Neural Network GRNN)

تشترك GRNN مع الشبكة العصبية الاحتمالية (PNN) في الاعتماد على دوال النواة الغاوسية والتقدير غير المعلمي، لكنها مصممة خصيصًا لمهام الانحدار (Regression) أي تقدير قيم عددية مستمرة بدلًا من التصنيف.

تتميّز GRNN بقدرتها على تمثيل العلاقات غير الخطية بين مؤشرات منحنى الفحص (مثل نقاط مشتقة الضغط) والمعالم المكمنية (مثل النفاذية k وعامل القشرة S) دون افتراض مسبق عن شكل العلاقة الرياضية. في تطبيقات فحوصات الآبار، تُستخدم GRNN لتقدير المعايير الفيزيائية بدقة من منحنيات الضغط. و استكمال القيم المفقودة ضمن المنحنى نفسه.

ومن أبرز مزاياها أنها لا تتطلب تدريبًا تكراريًّا ، بل تبني نموذجها فورًا من بيانات التدريب المخزّنة، مما يجعلها مثالية عند صغر حجم قاعدة البيانات أو عدم كفايتها لتدريب نماذج عميقة.

مع ذلك، فإن GRNN ضعيفة جدًّا في الاستقراء :(Extrapolation) فهي لا تستطيع تقدير قيم خارج نطاق بيانات التدريب. فمثلاً، إذا كانت أعلى نفاذية في بيانات التدريب هي 800 مللي دارسي، فقد تفشل في تقدير نفاذية = 2000 مللي دارسي لبئر جديد. لذا، يجب أن تكون بيانات التدريب شاملة لجميع السيناريوهات المتوقعة في الحقل المستهدف.

الجدول رقم10-3 يوضح مزايا و عمل كل شبكة.

النموذج	مخرجات	الحاجة لضبط معاملات	حجم الشبكة	سرعة الاختبار	سرعة التدريب	نوع المشكلة الأساسي
MLP	قيم عددية أو احتمالات	عالية	معتدل	سريعة	بطيئة	تصنيف + انحدار
PNN	احتمالات الفئات	منخفضة	كبير	بطيئة	سريعة جداً	تصنيف
GRNN	قيم عددية متصلة	منخفضة	كبير	بطيئة	سريعة	انحدار

الجدول 10-3: بعض مواصفات الشبكات الاصطناعية الضحلة (التقليدية)

ثانيا- البنية الهيكلية للشبكات الاصطناعية

أ- العُقد (العصبونات) Neurons

تمثل العصبونات الوحدة الحسابية الأساسية في الشبكة. تستقبل مجموعة من القيم المدخلة، وتقوم بدمجها خطيًا باستخدام أوزان (Weights) وانحياز (Bias)، ثم تمرر الناتج عبر دالة تفعيل (Activation Function) لإنتاج مخرج واحد. رياضيًا يمكن تمثيل ذلك بدءا بمجموع اوزان المدخلات كما يلي:

$$z = \sum_{i=1}^{n} x_i w_i + b \quad \text{---------- 4}$$

حيث x_i تمثل المدخلات ، w_i الأوزان، و b الانحياز.

و باستخدام احدى دوال التنشيط على المجموع f(z) لايجاد قيم المخرجات النهائية :

$$y = f(z)$$

تمثل هذه العملية نموذجًا مبسطًا لآلية عمل الخلية العصبية البيولوجية التي تستقبل الإشارات وتدمجها ثم تنقل الاستجابة إلى الخلايا التالية.

ب- الطبقات(Layers)

تُنظَّم العصبونات ضمن طبقات متتابعة، بحيث تنتقل المعلومات تدريجيًا من طبقة إلى أخرى فيما يُعرف بتدفق البيانات داخل الشبكة. و يمكن تصنيف الطبقات إلى:

- **طبقة الإدخال:(Input Layer)** تستقبل البيانات الخام. عدد العصبونات في هذه الطبقة يساوي عدد المتغيرات الداخلة، مثل الضغط، الزمن، معدل الجريان، أو نقاط مشتقة الضغط (مثلاً 30 نقطة من منحنى المشتقة).

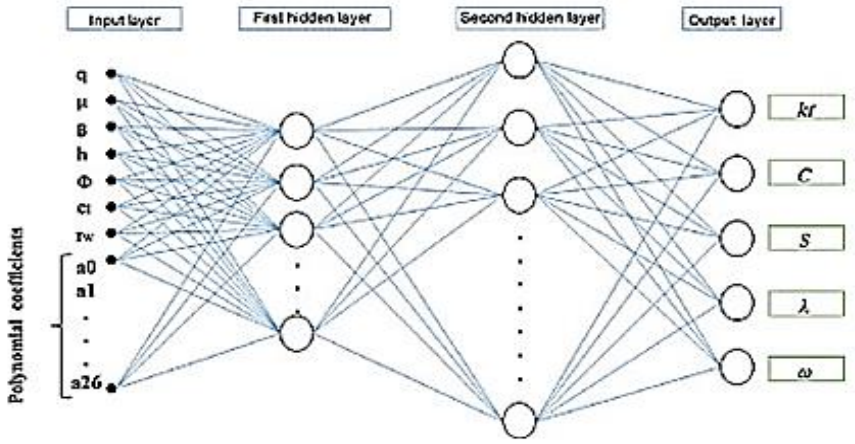
- **الطبقات الخفية:(Hidden Layers)** تمثل القلب الحسابي للشبكة، حيث يتم استخراج العلاقات غير الخطية بين المدخلات والمخرجات. هذه الطبقات لا تمثل معادلات فيزيائية (مثل قانون دارسي) ولا طبقات جيولوجية فعلية، بل هي وحدات حسابية تتعلم الأنماط من البيانات. يحدد عدد الطبقات الخفية وعدد العصبونات في كل طبقة وفقًا لتعقيد المسألة وحجم البيانات المتاحة.

- **طبقة الإخراج:(Output Layer)** تنتج القيم النهائية المطلوبة. عدد العصبونات فيها يعتمد على طبيعة المسألة:عصبون واحد في مسائل الانحدار (مثل تقدير النفاذية فقط).

عدة عصبونات في مسائل التصنيف (مثل تحديد نوع المكمن أو أطوار الجريان).

يوضح الشكل رقم 10-3 مثالًا لبنية شبكة عصبية مستخدمة في تفسير بيانات فحوصات الآبار، حيث تتكون من طبقة إدخال بعدد عصبونات يساوي عدد المتغيرات المدخلة، وطبقتين مخفيتين بعدد عصبونات يتناسب مع تعقيد البيانات، وطبقة إخراج تضم خمسة عصبونات لتمثيل خمسة متغيرات مطلوبة، مما يصنف المسألة ضمن مسائل الانحدار المتعدد (Multiple Regression) لكون المخرجات متعددة.

ملاحظة : ليس كل أنواع الشبكات العصبية تستخدم في.Well Testing و الأكثر شيوعًا هي:
MLP – GRNN – PNN – CNN – LSTM بينما PINN تعتبر تقنية بحثية حديثة.
و لاهمية ANNs في تفسير فحوصات الابار ندرج في الجدول التالي تخصصات عمل تلك الشبكات مع بعض الاستثناءات:



الشكل 10-3 : هيكلية الشبكات العصبية الاصطناعية

الجدول 10-4 يلخص مقارنة بين الشبكات الاصطناعية التقليدية او الضحلة و الشبكات العميقة .

المعيار	الشبكات العصبية التقليدية (Shallow Neural Networks)	الشبكات العصبية العميقة (Deep Neural Networks)
عدد الطبقات المخفية	طبقة مخفية واحدة غالبًا	عدة طبقات مخفية (2 إلى عشرات الطبقات)
مستوى التعقيد	بسيط نسبيًا	أكثر تعقيدًا
القدرة على تمثيل الأنماط	مناسبة للعلاقات البسيطة أو المتوسطة	قادرة على تمثيل العلاقات والأنماط المعقدة
حجم البيانات المطلوب	يعمل جيدًا مع بيانات صغيرة أو متوسطة	يحتاج عادة إلى بيانات كبيرة
زمن التدريب	سريع نسبيًا	أطول بسبب كثرة الطبقات
القدرة الحسابية المطلوبة	منخفضة	أعلى (قد تحتاج GPU)
أمثلة الشبكات	Multilayer Perceptron, Generalized Regression Neural Network, Probabilistic Neural Network	Convolutional Neural Network, Recurrent Neural Network, Long Short-Term Memory
نوع المشكلات	Regression و Classification البسيطة	Regression و Classification المعقدة وتحليل الأنماط

الجدول 10-4 : مقارنة بين الشبكات الاصطناعية الضحلة و الشبكات العميقة .

4-3-10 : مقارنة بين نماذج تعلم الآلة في تفسير فحوصات الآبار

يمكن النظر إلى نماذج (تقنيات) تعلم الآلة المستخدمة في تفسير فحوصات الآبار ضمن تسلسل تطوري يعكس درجة اعتمادها على البيانات مقابل الفيزياء و في مجال استخدامها. و بصورة عامة فيمكن اعتبار ANNs و SVMأدوات فعّالة عند توفر سمات هندسية واضحة، بينما

قاعدة عامة في Well Testing

نوع المسألة	الشبكات الأكثر استخدامًا
Regression (تقدير λ ، ω ، Skin ، k)	MLP ، GRNN ، LSTM ، PINN
Classification (نوع المكمن أو نمط الجريان)	MLP ، PNN ، CNN
كلاهما	MLP ، CNN ، RNN

الجدول 10-5 : مهام الشبكات العصبية الاصطناعية

التقنية	نوع التعلُّم	التصنيف أو الانحدار؟	ملاحظات
آلات المتجهات الداعمة (SVM)	تعلُّم خاضع للإشراف (Supervised Learning)	• **تصنيف** (Classification) • يمكن استخدامها للانحدار (SVR)	تُستخدم لفصل الفئات عبر "أفضل حد فاصل"؛ شائعة في تصنيف أنواع الخزانات من منحنيات الضغط.
الانحدار الخطي (Linear Regression)	تعلُّم خاضع للإشراف	• **انحدار** (Regression)	يُقدّر قيمًا عددية مستمرة (مثل: النفاذية، عامل الجلد) بناءً على علاقات خطية.
أشجار القرار (Decision Trees)	تعلُّم خاضع للإشراف	• **تصنيف وانحدار**	تُنتج قرارات شفافة (مثل: "إذا كان الميل > 0.5 → خزان منخفض النفاذية").
الغابات العشوائية (Random Forests)	تعلُّم خاضع للإشراف	• **تصنيف وانحدار**	تجميع (Ensemble) لعدة أشجار قرار؛ أكثر دقة ومتانة من الشجرة الواحدة.
الشبكات العصبية الاصطناعية التقليدية/الضحلة – (ANNs) (مثل: MLP, PNN, GRNN)	تعلُّم خاضع للإشراف	• **تصنيف** (PNN) • **انحدار** (GRNN, MLP)	تُستخدم على نطاق واسع في فحوصات الآبار؛ PNN للتصنيف، GRNN للتقدير العددي.
الشبكات العصبية العميقة (Deep Neural Networks) (مثل: CNNs, LSTMs)	تعلُّم خاضع للإشراف (في الغالب)	• **تصنيف وانحدار**	تُدرّب عادةً على بيانات مصنّفة؛ لكن يمكن استخدامها في سياقات غير خاضعة للإشراف (مثل Autoencoders).

الجدول10-6: مقارنة بين نماذج تعلم الآلة في تفسير فحوصات الآبار

تُستخدم RNN و LSTM في التطبيقات ذات الطابع الزمني الممتد، في حين تمثل PINNs خيارًا متقدمًا عند الحاجة إلى دمج الفيزياء مباشرة ضمن عملية التعلم. يعتمد اختيار النموذج الأمثل على طبيعة البيانات المتاحة، وهدف الدراسة، ومدى الرغبة في تضمين القيود الفيزيائية ضمن عملية التفسير. الجدول10-6 يتضمن مقارنة بين نماذج تعلم الآلة في تفسير فحوصات الآبار.

مثال-6 للتوضيح: تحديد او تقدير نفاذية المكمن (Permeability-k) ، من بيانات فحص الضغط لبئر نفطي.

-المدخلات (Input Layer) : الزمن t بالساعات ، ضغط البئر P_{wf} بالـ psi ، معدل الجريان q بالبرميل/يوم ، لزوجة النفط μ ، سمك المكمن h.

- المخرجات (Output Layer): تحديد النفاذية k بالمليدارسي.

- البنية المقترحة للشبكة العصبية MLP البسيطة:

- طبقة إدخال: 5 عُقد (حسب عدد المدخلات في المثال)
- طبقة خفية واحدة: 8 عُقد
- طبقة اخراج: 1 عُقدة (k)

- كل عُقدة في الطبقة الخفية تجري عملية حساب:

$$z=w_1 \cdot t+w_2 \cdot P_{wf}+w_3 \cdot q+w_4 \cdot \mu+w_5 \cdot h+b$$

- مخرجات كل عقدة تمرر عبر دالة تنشيط Activation or Transfer function. تُطبّق دالة تنشيط (مثل:Rectified Linear Unit- ReLU) والتي تتمثل بالصيغة الاتية:

$$R(z) = \begin{cases} z & z > 0 \\ 0 & z <= 0 \end{cases} \quad \text{---------- 5}$$

$$a= \text{ReLU}(z)=\max(0) \quad \text{--------- 6}$$

ان القيم a ليست ذات معنى فيزيائي قابلة للقياس بل هي تمثيل رياضي داخلي تعلمته الشبكة خلال التدريب لتربط بين المدخلات والمخرجات.اي بمعنى : إذا كانت القيمة المدخلة موجبة فمررها كما هي و إذا كانت سالبة أو صفر فحوّلها إلى صفر. اي دالة رياضية شّرطية تُطبَّق على مّخرج كل عُقدة (نيورونNeuron-) في الشبكة العصبية لتحديد ما إذا كان يجب "تنشيط" العقدة أم لا حتى تنتقل إلى الطبقة التالية في الشبكة العصبية .

لحساب المخرجات فانها تساوي = النفاذية= $f(z)$ (الشكل 10-4) اي ان :

$$\text{Output} = f\left(\sum_{i=1}^{n} w_i x_i + b\right) \quad \text{---------- 7}$$

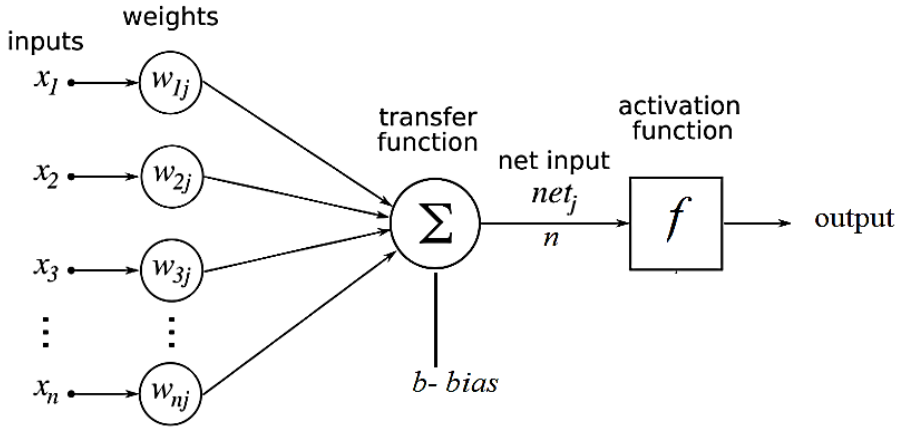
اي ان عدد و نوع عقد الاخراج ستحدد نوع المهمة في ان تكون (تصنيف Classification أم انحدار Regression) . بالنتيجة يتم تحديد قيمة نفاذية المكمن.

4-10 : تصميم نموذج ذكي لتفسير فحوصات الآبار(Designing an AI Model)

يتضمن تصميم النموذج الذكي AI الفقرات التالية:

1-4-10 : تعريف المشكلة (الهدف) (Problem Formulation)

أول خطوة محورية هي تحديد طبيعة مهمة التفسير بدقة ، وتشمل :



الشكل10-4: مخطط يوضح الربط بين مدخلات و مخرجات الشبكات عبر تقدير الاوزان و دوال الجمع و التنشيط

- اما تصنيف (Classification) الموديل او النظام المكمني ، يعني تحديد نوع المكمن مثلا (مثلا المكمن متجانس Homogeneous او متشقق ثنائي المسامية Dual-Porosity او متعدد الطبقات ....) .

- تقدير عددي(Regression) لتحديد خواص المكمن (مثلا حساب معامل القشرة Skin ، النفاذية Permeability ، معامل تخزين البئر Wellbore Storage اوميغا ω او لمدا λ) .

- أو مهمة هجينة قي تحديد نوع المكمن و تقدير خواصه في نفس النموذج.

التحديد الصحيح للمشكلة ينعكس مباشرة على اختيار نوع النموذج الذكي وبنية الشبكة العصبية الاصطناعية.

2-4-10 : إعداد وتهيئة البيانات لما قبل التدريب (Data Pre-processing)

تعد هذه المرحلة الحجر الزاوية لضمان دقة نماذج الذكاء الاصطناعي في تحليل فحوصات الآبار، وتتضمن الخطوات التسلسلية التالية:

1-2-4-10 : مصادر البيانات Data Sources:

البيانات المدخلة و توفرها تُعد الأساس في تغذية و نجاح اي برنامج ذكاء اصطناعي AI ، ادناه مختلف مصادر بيانات فحوصات الابار:

1- بيانات حقلية حقيقية (Field Data)

مثل : بيانات الضغط مقابل الزمن(Pressure vs Time) ، مشتقة الضغط (Bourdet derivative)، التاريخ الانتاجي (Production history) ، والبيانات هذه هي الأهم والأكثر موثوقية و تمثل الاستجابة الفيزيائية الحقيقية للمكمن. اضافة الى بعض المعاملات التي تميز فحص الابار و التي ادرجت بعضها في الجدول رقم- 10-7.

N⁰	Parameter	Min. value	Max. value	Median	Mean
1	Reservoir pressure (RP), MPa	2,36	19,7	11,65	11,16
2	Bottom-hole pressure (BP), MPa	0,46	12,73	5,22	5,31
3	Fluid flow rate (LC), m^3/d	0,05	48,4	9,6	12,7
4	Water content (WC), %	0,0	99,9	18,7	31,36
5	Compressibility coefficient of formation (CF), 1 \(MPa*10000)	0,81	3,53	1,99	2,05
6	Compressibility coefficient of rock (RC), 1\(MPa*10000)	0,47	1,2	0,86	0,87
7	Compressibility coefficient of oil, 1\(MPa*10000)	5,52	15,76	9,8	9,86
8	Volume coefficient of oil	1,01	1,5	1,13	1,17
9	Well depth (D), m	862	2390	1509	1542,6
10	Porosity (Po), %	5,6	26,0	14,0	14,72
11	Permeability of the near bottom-hole formation zone (NWBZ) (Per), μm^2	0,0001	69,15	0,08	0,45
12	Oil saturation pressure with gas (SP), MPa	3,9	21,3	11,9	11,57
13	Effective oil-saturated thickness (OSRTh), m	0,4	17,5	6,3	6,68
14	Oil viscosity (OV), mPa*s	0,67	98,28	4,56	11,78
15	Gas content (GC), m^3/ton	1183	231,4	64,2	79,56
16	Oil density (OD), g\cm^3	0,669	0,973	0,807	0,804
17	Specific coefficient of productivity (PRO), m^2*MPa*s/(day*MPa)	0,001	2881,6	3,22	33,67

الجدول 10-7- المعاملات الاولية للموديل الذكي(Andrey V. 2025)

2- بيانات اصطناعية (Synthetic Well Test Data)

توليد بيانات اصطناعية للضغط مع الوقت باستخدام نماذج رياضية فيزيائية (مثل حل معادلة الانتشار للضغط) او من برامج مثل MATLAB او**Python** او من Saphir (KAPPA) او من محاكات المكمن (Reservoir Simulation) لاستخدامها في تدريب برنامج الذكاء الاصطناعي.

فمثلا توليد بيانات الضغط مع الوقت من معادلة انتقال الضغط Pressure transient في مكمن لا محدود بفرض مدخلات متغيرة:

$$p_{wf} = p_i - \frac{162.6\, Q_o\, B_o\, \mu}{kh} \times \left[\log(t) + \log\left(\frac{k}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) - 3.23 + 0.87s \right]$$

p = pressure, psia t = time, hours ϕ = porosity, fraction k= permeability, md
c_t = total compressibility, psi^{-1} μ = viscosity, cp rw=wellbore radius, ft

3- بيانات مفتوحة المصدر (Open Source Data)

مثل بيانات لبحوث أكاديمية، منصات مشاركة البيانات، مشاريع بحثية حكومية ، كتب نفطية او مجلات علمية .لكي يتم اعتماد البيانات في برنامج التعلم سواء اكانت معلومات حقلية حقيقية او بيانات اصطناعية و لكي تحقق قناعة في نتائجها ، فيجب ان تتوفر فيها: شروط الجودة و ان تكون البيانات كافية لتغطية الأنماط المختلفة اثناء التدريب و تنوع مكمني (متجانس، ثنائي المسامية، مع صدع..) او جيولوجي (مكامن رملية، كلسية) او تنوع تشغيلي (آبار إنتاج، حقن) مع تحقيق التوازن في توزيع البيانات بين أنواع الموديلات المكمنية المختلفة .

ملاحظة : يجب التمييز بين الحصول على بيانات من مئات فحوصات الابار متعددة و متنوعة بهدف بناء موديل AI في التفسير (كمصمم برنامج) و ما بين المستخدم User للبرنامج AI لتفسير بيانات فحص بئر واحد او عدة ابار الحقل ضمن فعالية تفسير AI Testing.

10-4-2-2 : أخذ العينات (Sampling)

الفكرة هنا في اختيار نقاط مفتاحية من منحنى مشتقة الضغط بدلًا من استخدام جميع النقاط بمعنى اختيار جزء من البيانات الخام بناءً على المعايير الزمنية أو المكانية. (مثلا بدلا من استخدام 2000 نقطة من منحني مشتقة الضغط في فحص تصاعد الضغط Buil-up test نختار 50 منها بتوزيع منتظم عبر الزمن) .النقاط المفتاحية تاخذ بنظر الاعتبار التغيرات الحرجة في اتجاهات المنحني : مثلا بداية استقرار المنحني ، موضع الحد الاعلى (يدل على تأثير تخزين البئر) ، بداية الرف الأفقي (يدل على مكمن ثنائي المسامية او الجريان الشعاعي) ، الطور المتأخر (يرتبط بالنفاذية) .تتميز sampling بانها تحافظ على السمات الفيزيائية دون تشويه لكن تتطلب معرفة هندسية لاختيار النقاط الصحيحة.

نحتاجه في فحوصات الآبار لعدة اسباب منها:

- كثافة البيانات (حجم) , مثلا في فحص تصاعد الضغط Buil-up test قد يُسجّل قراءة كل ثانية فالنتيجة مئات او آلاف النقاط.
- العديد من النقاط زائدة: فأجزاء طويلة من المنحنى تكون مستقرة ولا تحمل معلومات جديدة.
- خطر الإفراط في التخصيص (Overfitting) : فإذا كان عدد السمات أكبر من عدد لحالات المدربة ، يحفظ النموذج البيانات بدلًا من تعلم الأنماط.
- تحسين سرعة التدريب: تدريب نموذج على 10 سمات أسرع بكثير من تدريبه على 200 سمة.

ملاحظة : خطوة تقليل حجم البيانات Sampling تكون في البداية لتسرع جميع الخطوات اللاحقة (تنظيف، تحويل، تدريب) . كما ان اختيار العينات Sampling هو غير Sampling لمعالجة عدم توازن الفئات (Imbalance Handling) هذا النوع يحدث بعد التنظيف .

3-2-4-10 : تنظيف البيانات Data Cleaning:

تنظيف البيانات هو عملية اكتشاف وتصحيح (أو إزالة) البيانات التالفة أو غير الدقيقة أو غير المكتملة أو غير المنطقية أو المكررة من مجموعة البيانات. الهدف هو تحسين جودة البيانات لتكون مناسبة للتحليل وبناء النماذج.في مجال فحوصات الآبار، البيانات تأتي من أجهزة قياس حساسة تعمل تحت سطح الأرض و بظروف ضغوط وحرارة عالية، مما يعني أنها عرضة للأخطاء بشكل كبير. تنظيف البيانات تتضمن المعالجات الاتية :

1- معالجة البيانات الناقصة (Missing Data Handling)

البيانات الناقصة تحدث بسبب أعطال أجهزة القياس، انقطاع التسجيل، أو استبعاد قراءات غير موثوقة تتسبب في فراغات في منحنى الضغط . تجاهلها قد يؤدي إلى تحيز النماذج. معالجتها تتم اما بدمج البيانات من آبار مجاورة لنفس الطبقة المكمنية لاستكمال البيانات المفقودة او تعبئة القيمة المفقودة بآخر قيمة صحيحة او تعبئة القيمة المفقودة بأول قيمة صحيحة تالية او باستخدام طرق استيفاء احصائية منها : استيفاء خطي (Linear Interpolation) للفترات القصيرة او استيفاء سبلين (Spline Interpolation) في الفترات الأطول ، لايجاد نقاط ضغط مفقودة في منحنى فحص تصاعد الضغط مع الحفاظ على انسيابية المنحنى. او استخدام خوارزمية KNN K-Nearest Neighbors- Imputation - توليد القيم بناءً على أقرب الجيران في الفضاء متعدد الأبعاد.

2- إزالة التشويش (Noise Filtering)

المشكلة هي تذبذبات صغيرة وعشوائية تخفي القراءة الحقيقية للبيانات و قد تُفسّر خطأً كسلوك شقوق أو تأثير تخزين بئري. لحل المشكلة نلجأ الى مرشح سافيتزكي (Savitzky-Golay Filter) يزيل الضوضاء عالية التردد مع الحفاظ على الخصائص الفيزيائية (مثل الحواف والذروات) او مرشحات الموجات (Wavelet Denoising) فعّالة في الحفاظ على التغيرات المفاجئة (مثل حالة انهيار او هبوط شديد بالضغط).

3- تصحيح القيم الشاذة غير الفيزيائية (Outlier Correction)

المشكلة هي في قراءات شاذة و أخطاء قياس صريحة لا تتوافق مع سلوك المكمن (مثل: كأن يكون ضغط سالب او قفزة ضغط مفاجئة دون سبب هندسي). هذه القيم قد تُعطّل تدريب النموذج

أو تضلل النموذج بان تُنتج تقديرات خاطئة (مثل: نفاذية عالية او عامل قشرة عالي).

الكشف عنها يتم باستخدام خوارزميات Z-Score أو.Isolation Forest و معالجتها باستبدال القيمة الشاذة باستخدام تقنيات التجميع (Clustering) مثل متوسط الجيران K-Means أو بإعادة الاستيفاء (Interpolation) او الطرق البصرية(Visual Inspection) برسم منحنى

الضغط والبحث عن القفزات غير الطبيعية او Isolation Forest و هي خوارزمية من طرق تعلم الآلة تعزل القيم الشاذة.

4- الاتساق و التحقق الفيزيائى (Physical Consistency)

قبل المتابعة لأي خطوة تالية ، يتم إخضاع البيانات لاختبارات توافق مع مع المبادىء الفيزيائية و جريان السوائل في المكامن. يتضمن ذلك التحقق من منطقية سلوك مشتقة الضغط، مثل رصد قمة سعة تخزين البئر (WBS Hump) واستقرار منطقة الجريان الشعاعي (Radial Flow Plateau). كما يتم استبعاد الحالات التي تظهر قفزات ضغط غير مبررة فيزيائياً، أو تلك التي تسفر عن نتائج خارج النطاق الهندسي المعقول (مثل قيم معامل القشرة 'Skin' المتطرفة أو النفاذية غير المنطقية). يحدث احيانا خلط بين الوحدات مثل psi و bar أو بين متر وقدم فنحتاج الى توحيد الوحدات في كل البيانات . تضمن هذه الخطوة عدم تدريب النموذج على بيانات مضللة ، مما يرفع من موثوقية التقديرات الميدانية للنموذج.

مثال7 للتوضيح:
البيانات الخام المتوفرة : توفر بيانات فحص Build-up , قراءات الضغط كل 5 ثوانٍ لمدة 24 ساعة.
المشكلات المكتشفة:
حجم بيانات عالي اكثر من 17 الف قراءة ممكن تقليل القراءات لكل 10 ثواني فتقل الى النصف.
قيم مفقودة :من الساعة 02:00 إلى 02:05 (5 دقائق) لا توجد قراءات.
ممكن حلها باستخدام Forward Fill تفترض أن الضغط استمر كما كان في آخر قراءة.
قيم شاذة :في الساعة 05:30، قفزة مفاجئة من 2450 psi إلى 3000 psi ثم العودة لـ 2460 psiخلال 10 ثوانٍ. تحليليا , هذا غير ممكن فيزيائياً (Spike) و حلها ممكن **با**زالة هذه القراءة الثانية واستبدالها باستيفاء خطي بين القراءات قبلها وبعدها.
تشويش عالي التردد :تذبذبات صغيرة (±5 psi طوال التسجيل). **الحل :**تطبيق مرشح Savitzky-Golay (نافذة من 11 نقطة حول كل نقطة تذبذب) لتنعيم المنحنى مع الحفاظ على الشكل العام للمنحني.

تناسق :تم التأكد أن وقت بداية الاغلاق (Shut-in time) هو 00:00 والضغط مع الوقت يزداد تصاعدياً.

النتيجة :بيانات نظيفة وجاهزة للانتقال للمرحلة اللاحقة.

10-4-2-4 : دمج البيانات (Data Integration)

دمج البيانات هو عملية دمج مصادر بيانات متعددة ومتنوعة في تمثيل موحد يُستخدم لتدريب

النموذج أو اتخاذ القرار. في سياق فحوصات الآبار، لا يقتصر التحليل احيانا على منحنى الضغط فقط، بل يشمل دمج مصادر مكملة لتحسين الدقة والموثوقية.

فيما يلي بعض نواع البيانات التي تُدمج في فحوصات الآبار:

- **البيانات الجيولوجية: مثل** نوع الصخر (رملية، كاربونية) ، طبيعة السحنات الصخرية (mudstone..،grainstone) ، سمك الطبقة(h) ، عمق البئر. المعلومات هذه تساهم في اختيار النموذج المكمني المناسب (متجانس، ثنائي المسامية) و في تقييد نطاق الخواص البتروفيزيائية .

- **بيانات تاريخ الإنتاج : مثل** معدلات الإنتاج السابقة و ضغوطات المكمن التاريخية. والتي تساهم في تقييد نطاق ضغط المكمن الابتدائي (Pi).

- **البيانات الزلزالية(Seismic) :** مثل الخصائص الزلزالية للطبقة المكمنية و وجود الصدوع أو الحواجز و التي تساهم في تفسير سلوك الحدود في فحص البئر.

و غيرها مثل بيانات اللباب الصخري Cores و بيانات الخواص الفيزيائية للموائع المكمنية PVT .

النموذج يتعلم من **تمثيل** موحد للبيانات ، لا يمكن تدريبه على مصادر منفصلة دون دمج مسبق، لأن كل مصدر له هيكل مختلف (أعمدة مختلفة) و النموذج يحتاج مصفوفة إدخال موحدة

(N عينة (صفوف مثلا عدد الابار)× M متغير(اعمدة - قيم الضغط)).

5-2-4-10 : تحويل البيانات (Data Transformation)

هو عملية تعديل شكل أو نطاق القيم الرقمية لبيانات الفحص (مثل الضغط، الزمن، مشتقة الضغط) قبل إدخالها إلى نموذج الذكاء الاصطناعي لغرض جعل البيانات متوافقة مع افتراضات الخوارزمية و تحسين استقرار التدريب وسرعة التقارب و ضمان أن جميع المتغيرات لها تأثير متوازن على النموذج (خاصةً عند اختلاف و حداتها أو مقاييسها).

أنواع التحويلات الشائعة في فحوصات الآبار:

1- التحويل اللوغاريتمي (Log Transformation)

- الهدف :جعل التوزيع أكثر تقارباً من التوزيع الطبيعي (Gaussian) .

- الصيغة: $f_0(y)_{new}=\log(y)$

يُستخدم التحويل اللوغاريتمي لأن المعايير الفيزيائية مثل النفاذية (k) ومعامل التدفق بين المسامات (λ) تتبع توزيعاً أسّياً فالقيم تتراوح من (0.01 إلى 1000). بدون هذا التحويل، تُعطي الشبكة أولوية للقيم الكبيرة وتتجاهل الصغيرة. فمثلا تحويل قيم النفاذية من [1، 1000 mD] إلى [0، 6.9] عبر اللوغاريتم الطبيعي قبل تدريب الشبكة الاصطناعية GRNN .

2- التحويل العكسي (Inverse Transformation)

هو عكس التحويل اللوغاريتمي ، يهدف الى اعادة تحويل مخرجات النموذج إلى وحداتها الأصلية بعد التدريب ، لأن النموذج يُدرّب على القيم المحوّلة (مثل log(k)) ، لكن المهندس يحتاج القيمة الحقيقية (k) للتقرير.

3- التطبيع (Normalization)

يهدف لتحويل جميع القيم إلى نطاق او مدى ثابت (عادةً بين 0 و 1) و حسب الصيغة التالية:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad \text{---------- 8}$$

X = البيانات ، X_{max} = اعلى قيمة في البيانات ، X_{min} = اوطأ قيمة ، X_{norm} = القيمة الموحَّدة لكل نقطة.

4- التوحيد Z-Score – (Standardization)

- الهدف : يجعل البيانات تتبع التوزيع الطبيعي بمتوسط Mean 0 وانحراف معياري Standard deviation 1, تتراوح قيمته ما بين [-3,+3] .

- الصيغة:

$$X_{std} = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad \text{---------- 9}$$

اذ ان :μ=المتوسط الحسابي (Arithmetic Mean) ، σ = الانحراف المعياري Standard Deviation

X = البيانات ، $X_{standardized}$ = القيمة الموحَّدة

لاحظ ان الفقرتين الاخيرة لا نستعملهما كليهما و انما احداهما.

مثال8 للتوضيح:

المهمة :تقدير النفاذية (k) من منحنى مشتقة الضغط باستخدام الشبكة الاصطناعية GRNN ؟

الخطوات:

1. جمع قيم k من 200 حالة تدريب (تتراوح بين 0.5 mD و 2500)
2. تطبيق الصيغة $k_{new}=\log(k)$ Log Transformation على القيم الآن تصبح ضمن المديات بين -0.3 to 3.39 .
3. تدريب الشبكة GRNN على k_{new}.
4. عند التنبؤ ببئر جديد باستخدام السبكة GRNN فالنتيجة يُخرِج $k_{new}=5.2$ ثم نُعيد التحويل فتصبح :

$k=e^{5.2}\approx 181$ mD

خلاصة: تحويل البيانات لا يعتبر تحسينًا اختياريًّا، بل خطوة حاسمة في بناء نموذج ذكي موثوق لتفسير فحوصات الآباروبدونه، حتى أفضل خوارزمية ستُنتج نتائج مشوّشة أو غير دقيقة بسبب عدم توازن البيانات أو طبيعتها غير الخطية.

6-2-4-10 : هندسة السمات Feature Engineering

1- استخراج السمات (المعلمات) (Feature Extraction)

في سياق فحوصات الآبار، استخراج السمات يعني تحويل المنحنيات الزمنية الخام (الضغط، و مشتقة الضغط و الجريان) إلى مؤشرات ذات معنى تعكس الخصائص الفيزيائية للبئر و المكمن . فبدلاً من التعامل مع آلاف النقاط الضغط ، نستخرج بصمة المكمن.

امثلة على السمات من المنحنى الخام مثلا من المشتقة اللوغاريتمية (Pressure Derivative) يمكن استخراج سمات متعددة كان يكون زمن بدء استقرار المشتقة (Radial Flow Plateau) و هي التي بعدها تستقر المشتقة أفقياً، نعتمد عليها حصراً لحساب النفاذية . و قاع الفتحة (valley) فهي ميزة تظهر كنزول في المشتقة، وهي العلامة المميزة للمكامن المتشققة ثنائية المسامية (Double Porosity) .و من بيانات الضغط , الميل (Slope) مثل ميل هورنر (الذي يمثل النفاذية). الجدول رقم-10-8 يوضح بعض هذه السمات التي تستخدم في Regression و Classification.

2- اختيار السمات(المعلمات)(Feature Selection)

بعد استخراج عشرات السمات ، نختار فقط الأكثر تأثيراً (Relevant) التي تساعدنا في تمييز مثلا موديل المكمن، لتجنب التضليل الناتج عن البيانات الزائدة(Overfitting) .

من طرق الاختيار في فحوصات الابار Well Testing :

- استخدام تحليل المكونات الرئيسية (PCA) و هي خوارزمية تُستخدم لتقليص عدد المتغيرات المستخرجة من معدات القياس مع الحفاظ على 95% من المعلومات التي تصف المكمن.

اسم السمة(Feature)	طريقة الحساب / التعريف	الدلالة الفيزيائية(Interpretation)
زمن الحد الأدنى tmin	الزمن الذي تصل فيه p' إلى أقل قيمة لها.	يرتبط بـ تأثير التخزين البئري (Wellbore Storage). كلما زاد tmin زاد تأثير التخزين.
قيمة الحد الأدنى pmin $'p\min'$	أقل قيمة لـ p' في المنحنى.	يُستخدم مع tmin لتقدير معامل التخزين البئري CD.
الميل في الطور المتأخر m late	ميل الخط المستقيم في الجزء المتأخر من منحنى p' بعد الاستقرار.	يرتبط عكسيًا بالنفاذية k: $k \propto m\ late$.
الرف الأفقي(Plateau)	فترة زمنية حيث ثابتة $p' \approx$ بعد الطور الانتقالي.	مؤشر قوي على خزان ثنائي المسامية (Dual Porosity) ارتفاع الرف يرتبط بـ ω نسبة حجم الشقوق/المصفوفة.
فرق الضغط بين قاع الوادي والرف $\Delta p = p_{plateau} - p_{min}$	الفرق بين قيمة الرف الأفقي وقيمة الحد الأدنى.	يُستخدم لتقدير معامل التدفق بين المسام λ كلما كبر Δp قلّ λ
الهَنَب (Hump)	ارتفاع مؤقت في p' بعد الحد الأدنى قبل استقرار المنحنى.	قد يدل على :وجود شقوق, تفاعل مع طبقات مجاورة, أو تغير في خصائص الخزان مع العمق.
نقطة الصفر في المشتقة الثانية $p''=0$ عند time	الزمن الذي تكون فيه المشتقة الثانية $p''=0$ أي أن ميل p' يصبح ثابتًا.	يشير إلى بداية الطور المتأخر (Radial Flow Regime).
زمن الاستقرار الكامل tradial	الزمن الذي يبدأ فيه الطور الشعاعي المستقر حيث p' خط مستقيم.	يُستخدم لتقدير نصف قطر التحقيق وحجم الخزان.

الجدول 10-8 -A: استخراج السمات لانواع مكامن مختلفة لمهام Regression

(Mahdi-2024)

Resevoir Type	Characteristic components
Infinite acting radial flow function	line with unit slope, hump, smooth line.
Closed fault boundary	a line with unit slope, hump, zero slope straight line, a second straight line with a double value for pressure derivative
No flow boundary	a line with unit slope, hump, zero slope straight line, a line with unit slope
Constant pressure boundary	line with unit slope, hump, zero slope straight line, downward trend
Pseudo steady state dual porosity with interporosity flow	a line with unit slope, hump , zero slope straight line, smooth line, valley, second straight line or line with unit slope, hump, valley, zero slope straight line
No flow boundary pseudo steady state dual porosity with interporosity flow	line with unit slope, hump, zero slope straight line, valley, second straight line, line with unit slope, hump, valley, zero slope line, line with unit slope

الجدول B-8-10 : استخراج السمات لانواع مكامن مختلفة لمهام (Mahdi-2024) Classification

- و استخدام Correlation Matrix في استبعاد الميزات او السمات التي لها ارتباط شرطي قوي جداً ببعضها (مثلاً إذا كان لدينا ميزتان تعبران عن نفس الشيء، نختار الأوضح منهما).

- او استخدام ReliefF هي خوارزمية ذكية غير خاضعة للإشراف بالكامل (يمكن استخدامها في مهام تصنيف أو انحدار) تُستخدم لتقييم أهمية كل سمة (Feature) بناءً على قدرتها على التمييز بين العينات المتشابهة.

- او استخدام Recursive Feature Elimination (RFE) مع Random Forest هو أسلوب لاختيار أهم المتغيرات (Feature Selection) يعمل بطريقة تكرارية عبر حذف أضعف المتغيرات تدريجيًا حتى يبقى العدد الأمثل منها.

<u>مثال 9 للتوضيح:</u>

عند استخدام الذكاء الاصطناعيفي (Machine Learning)لتصنيف نوع المكمن (متشقق، طبقي، حدود مغلقة)

<u>نستخرج السمات Extraction features</u> :تحدد "المشتقة" و"قيمة الضغط الابتدائي" و"تغير الحرارة."

- اختيار السمات Selection features :تكتشف أن "تغير الحرارة" لا يؤثر على نوع الموديل، فتقوم بحذفه والاعتماد فقط على نمط المشتقة (Derivative Pattern) لاتخاذ القرار.

الخلاصة: استخراج السمات تجعل البيانات قابلة للقراءة هندسياً و اختيار السمات تجعل الموديل أسرع وأدق عبر حذف الحشو.

10-2-4-7 : تقليل الأبعاد Data or Dimensionality Reduction

هو عملية تحويل البيانات عالية الأبعاد (مع عدد كبير من المتغيرات أو السمات) إلى تمثيل منخفض الأبعاد مع الحفاظ على أكبر قدر ممكن من المعلومات والمعلومات الهيكلية الأساسية للبيانات الأصلية.

فمثلا في فحص الآبار، قد يكون لديك عشرات المتغيرات لكل بئر (ضغط، حرارة، لزوجة، مسامية، نفاذية، سمك الطبقة، نسبة الغاز، ثابت التخزين، إلخ). رياضياً، كل متغير هو "بُعد." تقليل الأبعاد هو عملية تحويل هذه البيانات من فضاء عالي الأبعاد (مثلاً 20 متغير) إلى فضاء منخفض الأبعاد (مثلاً 3 متغيرات مركبة) يسهل على خوارزميات الذكاء الاصطناعي معالجتها دون فقدان المعلومات الأساسية.

برغم من اهميتها المحدودة في مجال فحوصات الآبارلكن حين استخدامها تكون مفيدة في إزالة الضجيج :(Noise Filtering) فغالباً ما تكون الأبعاد الزائدة مجرد ضوضاء أو بيانات مكررة (Redundant) . التقليل يساعد في استخلاص الإشارة الحقيقية للمكمن و سرعة في التطابق (Faster History Matching)عند استخدام الـ AI لتطابق المنحنيات, اذ إن تقليل الأبعاد يسرع العملية.

فمثلا : إذا كان لديك بئر تم اختباره بـ 3 أنواع من اجهزة قياس الضغط (Gauges) , فبدلاً من إدخال 3 أعمدة ضغط للـ AI، نستخدم الدالة PCA لدمجها في عمود واحد يمثل أفضل قراءة ضغط ممكنة مع استبعاد الأخطاء.

رقم البئر (ID)	النفاذية (k)	معامل القشرة (s)	الضغط الابتدائي (P_i)	معدل الجريان (q)	لزوجة النفط (μ)	مسامية الطبقة (ϕ)	... (أعمدة أخرى)
بئر 1	md 50	2.5+	psi 4000	bbl/d 200	cp 2	0.15	...
بئر 2	md 120	1.2-	psi 3500	bbl/d 500	cp 1.5	0.22	...

مثال10 توضيحي:

افترض هنالك بيانات 50 بئر متوفرة (الجدول في اعلاه).

- **الصفوف :(Rows)** تمثل العينات أو الاختبارات المختلفة (مثلاً: بئر 1، بئر 2، بئر 3...).

- **الأعمدة :(Columns)** تمثل السمات أو الأبعاد.(Features/Dimensions)"

و لكل بئر هنالك 100 قراءة للضغط مع الزمن اي ان بيانات زمنية بحدود = 50×100 و لكل بئر بيانات ادخال اخرى تتضمن 10 خاصيات مثل Q، Pi، r_w ، porosity ..... و غيرها اي ان بيانات ثابتة= 50×10 .

فكيف نأخذ عينات Sampling و تقليل ابعاد Dimensionality Reduction ؟

أخذ عينات على القراءات الزمنية :

بدل إدخال 100 نقطة ضغط لكل بئر نختار 30 نقطة فقط بتوزيع لوغاريتمي للزمن أو نستخدم لكل 10 ثواني نقطة بدلا من كل 5 ثواني.

النتيجة: بيانات زمنية بدل من = 50×100 تصبح = 50×30

تقليل عدد الابعاد

الخصائص الـ 10 الثابتة ، لو كانت بعض المتغيرات مترابطة بشدة (مثلاً k و kh أو φ و compressibility) يمكن تطبيق Principal Component Analysis-PCA فتتحول 10 سمات (ابعاد) الى 6 .

النتيجة النهائية للبيانات : بدلا من 50 × 100 × 10 تتحول الى 50 × 30 × 6

ملاحظة: ادرجت المعادلات الخاصة بمعالجات البيانات في الملحق – A .

10-4-3 : تحديد منهجية الموديل (AI Modeling Strategy)

بعد الانتهاء من تهيئة البيانات فيزيائياً ورقمياً، يتم إعداد بيئة التدريب من خلال الخطوات التالية:

10-4-3-1 : ترميز البيانات وتحديد الأهداف (Data Labeling & Target Definition):

تعد هذه الخطوة الجسر الرياضي الذي يحول لغة المهندس الميدانية إلى لغة حسابية يفهمها النموذج، وتختلف آلية التنفيذ حسب طبيعة المخرج المطلوب (تصنيف Classification أم تقدير Regression (تنبؤ بالقيم)) :

1- مهام التصنيف:(Classification Tasks)

يتم تحويل الميزات الوصفية (Categorical) إلى قيم رقمية محددة لتمكين الخوارزمية من التمييز بين الأنماط المكمنية المختلفة.

المفهوم :استخدام الترميز الرقمي (Label Encoding) لتحويل أسماء الأنظمة أو الحالات إلى أرقام.

نوع المكمن	(One-Hot Encoding) التمثيل الرقمي
متجانس (بلا حدود)	[1, 0, 0, 0, 0, 0]
متجانس مع حدود مغلقة	[0, 1, 0, 0, 0, 0]
متجانس مع حدود ثابتة الضغط	[0, 0, 1, 0, 0, 0]
مزدوج المسامية	[0, 0, 0, 1, 0, 0]
مع صدع أصم	[0, 0, 0, 0, 1, 0]
أفقي	[0, 0, 0, 0, 0, 1]

الجدول 10-9: مفهوم استخدام الترميز الرقمي

فمثلا :عند تصنيف نظام الجريان (Flow Regime) ، يتم تخصيص الرقم (0) لتمثيل "الجريان الشعاعيRadial Flow ، والرقم (1) لتمثيل الجريان الخطي(الجدول 10-9) Linear Flow هذا يسمح للنموذج بتوقع فئة طور الجريان او نوع المكمن بناءً على بصمة المشتقة.

2- مهام التنبؤ الرقمي:(Regression Tasks)

عند التعامل مع الخصائص الفيزيائية المستمرة (Continuous) مثل نفاذية النفط أو عامل القشرة ، يتم تحديد القيمة الرقمية كهدف مباشر(Target Variable) . فيتم صياغة دالة رياضية تربط ميزات الضغط بقيمة نفاذية المكمن. ونظراً للتفاوت الكبير في قيم النفاذية (التي قد تتراوح من 0.1 إلى md5000 ، يتم تطبيق التحويل اللوغاريتمي لتقليل الانحياز الإحصائي (Skewness) وضمان دقة التعلم في النطاقات المنخفضة والعالية على حد سواء.

3- ممكن ترميز معلومات مساعدة ، تشمل جودة المنحنى (جيد، متوسط، ضعيف) ، وجود شذوذ (نعم/لا) و اخرى مثل ملاحظات الخبير.

10-4-3-2 : موازنة الفئات المكمنية (Reservoir Class Balancing):

هي عملية معالجة إحصائية للبيانات نستخدمها قبل بدء التدريب ، تهدف لضمان أن النموذج الذكي لا يتجاهل السيناريوهات النادرة أو المعقدة لمصلحة السيناريوهات الشائعة.

فعندما نجمع بيانات فحص الآبار من حقول مختلفة لاستخدامها في تدريب خوارزميات الذكاء الاصطناعي(مثل الشبكات العصبية للتنبؤ بنوع المكمن)، غالباً ما نواجه واقعاً غير متوازن مثل:

الفئة الأغلبية (Majority Class) : معظم المكامن مثلاً تسلك سلوك مكمن متجانس Homogeneous Reservoir ، قد تمثل بيانات هذه المكامن 80% أو 90% من مجموعة البيانات المتاحة.

الفئة الأقلية (Minority Class) المكامن المعقدة أو النادرة مثلاً: مكامن ثنائية المسامية Dual Porosity، أو مكامن قريبة من حدود فالق Fault ، قد تمثل هذه البيانات نسبة ضئيلة جداً 10% أو أقل.

المشكلة هنا إذا قمنا بتدريب نموذج AI على هذه البيانات كما هي، سيتعلم النموذج في التنبؤ في أن يقول دائماً مكمن طبيعي متجانس. و سيحقق دقة عالية (Accuracy 90%)، لكنه يفشل في اكتشاف المكامن المعقدة . لذا و للحل نقوم بتعديل مجموعة البيانات (Dataset) بحيث يرى النموذج عدداً متساوياً تقريباً من الأمثلة لكل نوع من أنواع المكامن أو مشاكل الجريان.

لنفترض أننا نبني نموذج ذكاء اصطناعي لتصنيف منحنيات الضغط (Derivative Curvature)إلى 3 فئات:

1. **Radial Flow (تدفق شعاعي):** (شائع جداً - لدينا 1000 عينة).
2. **Linear Flow (تدفق خطي):** (أقل شيوعاً - لدينا 100 عينة).
3. **Bilinear Flow (تدفق ثنائي الخط):** (نادر جداً - لدينا 10 عينات).

بدون موازنة، سيهمل النموذج "التدفق الثنائي الخطي".

التقنيات المستخدمة في الموازنة

اما زيادة العينات للفئة النادرة(Oversampling) من خلال توليد البيانات الاصطناعية (مثل SMOTE) او تقليل العينات للفئة الغالبة (Undersampling) من خلال حذف جزء كبير من البيانات الشائعة بشكل عشوائي.

10-4-3-3 : تقسيم البيانات(Data Splitting)

هي عملية تقسيم البيانات المتاحة (بيانات الضغط، منحنيات مشتقة الضغط) إلى ثلاث مجموعات منفصلة، لكل منها وظيفة محددة لضمان أن النموذج "يتعلم" بشكل صحيح ولا يقوم فقط بحفظ المعلومات.

في فحوصات الآبار، هدفنا هو بناء نموذج يمكنه التنبؤ بسلوك بئر لم يره من قبل أو التعميم على مكامن جديدة. إذا قمنا بتدريب النموذج على جميع البيانات واختبرناه على نفس البيانات، سيكون النموذج في حالة تسمى الافراط في التعلم (Overfitted) وسيعطيك نتائج ممتازة في التدريب لكنه سيفشل في الحقل عند تطبيقه على بئر جديد.

لذا و لمنع هذه الظاهرة يتم تقسيم البيانات الى ثلاث مجموعات:

1- مجموعة التدريب - (Training Set) حوالي 70-80%

2- مجموعة التحقق - (Validation Set) حوالي 10-15%

3- مجموعة الاختبار - (Test Set) حوالي 10-15%

10-4-3-4 : اختيار خوارزمية التعلم الآلي المناسبة

يُعد اختيار خوارزمية التعلّم الآلي (Machine Learning) مرحلة محورية في تصميم نموذج ذكي لتفسير فحوصات الآبار، وانطلاقاً من مبدأ "لا يوجد نموذج واحد يناسب الجميع (No Free Lunch Theorem)"، اذ يعتمد الاختيار على مجموعة من المعايير المدروسة منها: طبيعة المشكلة او نوع المهمة المطلوبة (سواء كانت تصنيفاً Classification لنمط المكمن، أو تقديراً للمعاملات Regression)، حجم بيانات التدريب، درجة اللاخطية في العلاقات، وجود ضوضاء في البيانات (Noise) ، الحاجة إلى التفسير الفيزيائي، وسرعة التدقيق والاستقرار العددي.

ونظراً لأن التعلم الآلي مجال واسع يشمل طيفاً من الخوارزميات التي تتعلم من البيانات، فإن الخيارات المتاحة تشمل الخوارزميات الشجرية (مثلRandom Forest ، XGBoost)، والشبكات العصبية (مثل MLP ، PNN، GRNN)، إضافة إلى النماذج الإحصائية التي سبق التطرق إليها.

فمثلا إذا كان الهدف هو تصنيف نظام الجريان بناءً على ميزات ثابتة (Features)، نختار خوارزمية الغابة العشوائية .(Random Forest) أما إذا كان الهدف هو تحليل سلسلة زمنية كاملة للضغط ، فقد نختار الشبكات العصبية المتكررة (LSTM) .

مع ملاحظة ان بعض الشبكات العصبية مثل MLP تتميز بمرونة عالية في التعامل مع التصنيف والانحدار؛ فيُستخدم للتصنيف عند اختيار دالة خسارة Categorical Cross Entropy ودالة تنشيط Sigmoid في طبقة المخرجات، بينما يستخدم للانحدار عند اختيار دوال خطأ مثل MSE أو MAE وطبقة مخرجات خطية (Linear Activation).

10-4-4 : مرحلة تدريب الشبكات العصبية Training Phase

في تطبيقات الذكاء الاصطناعي الخاصة بتفسير فحوصات الآبار(Well Testing) ، تهدف الشبكات العصبية الاصطناعية (ANNs) إلى تعلم العلاقات غير الخطية بين بيانات الفحص (مثل الضغط، مشتقاته، والزمن) وبين الخصائص المكمنية (مثل النفاذية، معامل القشرة) أو نوع نظام الجريان او نوع المكمن. تعتمد دورة التدريب على التعلم الموجه (Supervised Learning)، حيث تتوفر بيانات إدخال موسومة بقيم حقيقية معروفة (Ground Truth). تتكرر دورة التدريب عبر عدة حلقات (Epochs) حتى تصل الشبكة إلى خطأ مقبول في المطابقة ما بين بيانات الادخال مع قيم تنبؤ النموذج predicted .

ان مراحل التدريب تشتمل على: (الجدول رقم-10-10).

1- الانتشار الأمامي (Forward Propagation)

تهدف هذه المرحلة إلى توليد التنبؤ الأولي y_{pred} من بيانات الإدخال من خلال تطبيق:

أ- الجمع الخطي (Linear Combination)

لكل عقدة عصبية، يتم حساب مجموع موزون للمدخلات مع إضافة قيمة التحيز:

$$z = \sum_{i=1}^{n} x_i w_i + b$$

xi المدخلات (مثل الضغط، الزمن، معدل الجريان).

wi الأوزان، تعكس أهمية كل مدخل.

b الانزياح (Bias) الذي يسمح بتحريك دالة التنشيط وزيادة مرونة الشبكة.

بالبداية اختيار w,b اختيار عشوائي ثم تحديثها في المرحلة اللاحقة (المرحلة الرابعة).

ب- تطبيق دوال التنشيط (Activation Function)

بعد حساب المجموع، تُطبق دالة التنشيط لإنتاج مخرج العقدة ، مما يسمح للشبكة بتمثيل العلاقات غير الخطية. الناتج بعد دالة التنشيط هو التنبؤ الأولي y_{pred} لكل عينة (مراجعة الشكل رقم-10-4):

$$\text{Output} = f\left(\sum_{i=1}^{n} w_i x_i + b\right) = f(z) = y_{pred} = \text{permeability}$$

2- دالة الخسارة (Loss Function)

تقيس الفرق بين القيم المتوقعة y_{pred} من الخطوة السابقة والقيم الحقيقية y_{actual} باستخدام مثلا متوسط مربع الخطأ(MSE) كما في المعادلة الاتية:

$$L_{MSE} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(y_i - \hat{y}_i)^2 \quad \text{---------- 10}$$

حيث ان :

- Σ: Summation symbol (add up all the errors).
- y_i: Actual value.
- $\hat{y}_i$: Predicted value.
- $(y_i - \hat{y}_i)^2$: The squared difference (residual) for each observation.
- m: Number of observations (sample size).

دالة الخسارة او الخطأ = Loss function-L_{MSE}

يعطي MSE وزناً أكبر للأخطاء الكبيرة. فإذا تنبأ النموذج بضغط 1000 بينما الحقيقي 500، فهذا خطأ كبير جداً وسيظهر MSE عدداً كبيراً. تساعد دالة الخسارة خوارزمية التحسين على معرفة اتجاه تصحيح الأوزان لتقليل الخطأ. هنالك العديد من دوال الخسارة أُدرجت في (الجدول رقم-10-10).

3- الانتشار العكسي (Backpropagation)

تهدف هذه المرحلة الى تقليل (تصحيح) الاخطاء من خلال حساب مشتقات دالة الخسارة بالنسبة لكل وزن و لكل انحياز bias (Lu Jia,2025) . فيتم تطبيق قاعدة السلسلة (Chain Rule) لحساب تدرجات الأوزان(المشتقة):

$$\frac{\partial Loss}{\partial w} = \frac{\partial Loss}{\partial \hat{y}} \cdot \frac{\partial \hat{y}}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial w} \quad \text{---------- 11}$$

حيث ان :

الجزء	مصدره	المعنى
$\frac{\partial Loss}{\partial \hat{y}}$	مشتقة دالة الخسارة	كيف يتغير الخطأ بتغير المخرجات
$\frac{\partial \hat{y}}{\partial z}$	مشتقة دالة التنشيط	كيف تتغير المخرجات بتغير المدخلات
$\frac{\partial z}{\partial w}$	مشتقة المجموع المرجح	كيف يتغير المدخل بتغير الوزن

و بنفس الطريقة تطبيق قاعدة السلسلة (Chain Rule) لحساب تدرجات الانحياز:

$$\frac{\partial L}{\partial b} = \frac{\partial L}{\partial \hat{y}} \cdot \frac{\partial \hat{y}}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial b} \quad \text{---------- 12}$$

قاعدة السلسلة في الانتشار العكسي تجمع بين مشتقة دالة الخسارة ومشتقة دالة التنشيط معاً في سلسلة متصلة.

4- تحديث الأوزان (Weight Update – Gradient Descent)

بعد الحصول على تدرجات الاوزان ، يتم تعديل الأوزان و الانحياز تدريجيًا لتقليل الخطأ كالاتي:

$$W_{new} = W_{old} - \eta \frac{\partial L}{\partial W} \quad \text{---------- 13}$$

$$b_{new} = b_{old} - \eta \frac{\partial L}{\partial b} \quad \text{---------- 14}$$

η :معدل التعلم (Learning Rate) ببساطة، هو طول الخطوة التي يتخذها النموذج أثناء البحث عن أقل نسبة خطأ , لا توجد قيمة واحدة تناسب الجميع، لكن يمكن اجراء محاولات تحديده من البحث الشبكي (Grid Search) بتجربة قيم ثابتة ومقارنة النتائج (مثل قيم: 0.1، 0.01، 0.001).

تعاد دورة الحسابات لحين تقارب القيم الحقيقية y_{real} مع القيم المقدرة y_{pred} . يمكن استخدام أنواع متعددة من دوال Gradient Descent ،بعضها ادرجت في الجدول-10-10 .
الخوارزميات و الدوال المصاحبة لمراحل تدريب الشبكات العصبية الاصطناعية و نماذج التعلم الموجه الاخرى ادرجت في الجدولين رقم- 10-10 و رقم 10-11 على التوالي.

10-4-5 : مقارنة بين تدريب الشبكات العصبية و نماذج التعلم الآلي التقليدية الاخرى

يختلف أسلوب تدريب الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) جوهريًا عن تدريب نماذج التعلم الآلي التقليدية مثل Support Vector Machine-SVM و Decision Tree-DT وRandom Forest-RF، سواء من حيث البنية الرياضية، آلية التحسين، الحساسية للبيانات، أو قابلية التفسير الهندسي. ويظهر هذا الاختلاف بوضوح عند تطبيق هذه النماذج في تفسير فحوصات الضغط العابر وتقدير خصائص المكامن.

الخطوة	الوصف	الخوارزميات/التقنيات المستخدمة	التطبيق في فحوصات الآبار
الانتشار الأمامي (Forward Propagation)	حساب المخرجات من المدخلات عبر طبقات الشبكة	• دوال التنشيط (Activation Functions): - Sigmoid: $\phi(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}$ - Tanh: $\phi(z) = \frac{e^{z}-e^{-z}}{e^{z}+e^{-z}}$ - ReLU: $\phi(z) = \max(0, z)$ - Leaky ReLU - Softmax (للتصنيف) • تهيئة الأوزان (Weight Initialization): - Xavier/Glorot - He - Random Normal - Zeros	• **ReLU:** شائع في الشبكات العميقة لتحليل منحنيات الضغط • **Sigmoid/Tanh:** يستخدم في الشبكات الصغيرة لتقدير الخواص المكمنية • **Softmax:** لتصنيف أنماط الجريان (شعاعي، خطي، كروي)

دالة الخسارة **(Loss Function)**	قياس الفرق بين المخرجات المتوقعة والحقيقية	**للانحدار (Regression):** • **MSE:** $Loss = \frac{1}{n}\sum(y_i - \hat{y}_i)^2$ • **MAE:** $Loss = \frac{1}{n}\sum\|y_i - \hat{y}_i\|$ • **Huber Loss:** (مزيج من MSE و MAE) • **MAPE:** $Loss = \frac{100\%}{n}\sum\|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\|$ **للتصنيف (Classification):** • **Cross-Entropy:** $Loss = -\sum y_i \log(\hat{y}_i)$ • **Binary Cross-Entropy:** $Loss = -[y\log(\hat{y}) + (1-y)\log(1-\hat{y})]$ • **Hinge Loss (J SVM):** $Loss = \max(0, 1 - y \cdot \hat{y})$	• **MSE/MAE:** (S) ومعامل الجلد (k) لتقدير النفاذية • **MAPE:** مفيد عندما تختلف قيم النفاذية بين آبار مختلفة • **Cross-Entropy:** لتصنيف نوع المائع (نفط، غاز، ماء) • **Hinge Loss:** لتصنيف أنماط الجريان مع SVM
الانتشار العكسي **(Backpropagation)**	حساب مشتقات الخطأ بالنسبة للأوزان	• **قاعدة السلسلة (Chain Rule):** $\frac{\partial Loss}{\partial w} = \frac{\partial Loss}{\partial \hat{y}} \cdot \frac{\partial \hat{y}}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial w}$ • **تقنيات التدرج (Gradient Techniques):** - **Vanilla Backpropagation** - **Gradient Clipping:** لمنع انفجار التدرجات - **Weight Decay:** تنظيم L2 ضمني • **Batch Normalization:** تطبيع مخرجات الطبقات	• **Gradient Clipping:** مهم عند استخدام بيانات ضغط ذات نطاقات واسعة • **Batch Normalization:** يساعد في استقرار التدريب مع بيانات الآبار غير المتجانسة
تحديث الأوزان **(Weight Update)**	تعديل الأوزان لتقليل الخطأ	**خوارزميات التحسين (Optimizers):** **أساسية:** • **SGD:** $w_{new} = w_{old} - \alpha\frac{\partial Loss}{\partial w}$ • **SGD with Momentum:** $v_t = \beta v_{t-1} + \alpha\nabla Loss$ **متقدمة (Adaptive):** • **Adam:** $w_{new} = w_{old} - \alpha\frac{\hat{m}_t}{\sqrt{\hat{v}_t}+\epsilon}$ • **RMSprop:** $w_{new} = w_{old} - \alpha\frac{\nabla w}{\sqrt{E[g^2]_t}+\epsilon}$ • **Adagrad:** معدل تعلم متكيف لكل معامل **من الدرجة الثانية (Second-order):** • **Levenberg-Marquardt (LM):** $w_{new} = w_{old} - (J^T J + \mu I)^{-1} J^T e$ • **SCG (Scaled Conjugate Gradient):** بدون بحث خطي • **BFGS, L-BFGS**	• **Adam:** الأكثر شيوعاً للشبكات المتوسطة والعميقة • **Levenberg-Marquardt:** مفضل للشبكات **الصغيرة** (طبقة أو طبقتين) لتقدير دقيق لمعاملات المكمن (ω, λ) • **SCG:** جيد مع بيانات الضغط المزعجة، متوسط الذاكرة • **SGD with Momentum:** مستقر مع البيانات غير المستقرة

الجدول 10-10 : مراحل تدريب الشبكات العصبية

التقنية	نوع المشكلة	خوارزميات التدريب / التحسين	دالة الخسارة / المعيار
آلات المتجهات الداعمة (SVM)	•التصنيف (نوع الخزان) •الانحدار (SVR)	أ. خوارزميات التحسين: • Sequential Minimal Optimization (SMO) • Gradient Descent (لـ SVR) ب. اختيار النواة: • Linear Kernel • RBF Kernel • Polynomial Kernel	التصنيف: • Hinge Loss الانحدار: (SVR) • ε-Insensitive Loss
أشجار القرار (Decision Trees)	•التصنيف (نوع الخزان) •الانحدار (تقدير الخواص)	أ. خوارزميات التقسيم: • ID3 (لـ التصنيف) • C4.5 (لـ التصنيف) • CART (لـ التصنيف والانحدار) ب. معايير التقسيم: • Gini Impurity • Information Gain • Variance Reduction	التصنيف: • Gini Impurity • Entropy الانحدار: • MSE (Variance)
الغابات العشوائية (Random Forest)	•التصنيف (نوع الخزان) •الانحدار (تقدير القيمة الغذائية، العشرة)	أ. خوارزمية التجميع: • Bootstrap Aggregating (Bagging) ب. معايير التقسيم: • Gini Impurity (افتراضي) • Information Gain ج. ضبط المعايير: • Random Search • Grid Search	التصنيف: • Gini Impurity: الانحدار • MSE

الجدول 10-11 : الخوارزميات والدوال المصاحبة لتدريب نماذج التعلم الموجه الاخرى.

1- الاختلاف في آلية التعلم

تعتمد الشبكات العصبية على نموذج رياضي متعدد الطبقات يتم فيه تحديث الأوزان باستخدام

خوارزمية الانتشار العكسي (Backpropagation) بالاقتران مع خوارزميات تحسين تكرارية مثل Gradient Descent . وتتم عملية التعلم عبر تقليل دالة الخطأ تدريجيًا خلال عدد من الدورات التدريبية(Epochs) ، مما يسمح للنموذج بالتقاط العلاقات غير الخطية المعقدة بين منحنيات الضغط ومشتق الضغط وخصائص المكمن.

في المقابل، تعتمد SVM على حل مسألة تحسين محددة لإيجاد افضل مستوى فاصل (Hyperplane) يفصل البيانات بأكبر هامش ممكن (قريب الى النقاط)، دون الحاجة إلى تدريب تكراري متعدد الطبقات. أما أشجار القرار فتبني النموذج من خلال تقسيم البيانات تدريجيًا وفق

معايير نقاء إحصائية (مثل Gini أو Information Gain)، دون استخدام خوارزميات تحسين تدرجية. وتمثل الغابات العشوائية امتدادًا لذلك عبر تجميع عدد كبير من أشجار القرار بهدف تقليل التباين وتحسين الاستقرار الإحصائي.

2- القدرة على تمثيل السلوك الفيزيائي المعقد

في سياق فحوصات الآبار، غالبًا ما تكون العلاقة بين استجابة الضغط وخصائص المكمن غير خطية بشدة، خصوصًا في الحالات متعددة أطوار الجريان أو المكامن ثنائية المسامية. تتميز الشبكات العصبية بقدرتها العالية على تمثيل هذه العلاقات غير الخطية المعقدة، مما يجعلها مناسبة لاكتشاف الانتقالات بين أطوار الجريان (Flow Regimes) أو توصيف سلوكيات ثنائية المسامية.
أما SVM فتكون فعالة في مهام التصنيف (مثل تحديد نوع المكمن)، لكنها أقل مرونة عند الحاجة إلى نمذجة سلوك ديناميكي متعدد المراحل.
أشجار القرار توفر تفسيرًا مباشرًا للقرارات، لكنها قد تعاني من الإفراط في التخصيص.الغابات العشوائية توفر توازنًا جيدًا بين الدقة والاستقرار، خاصة في تقدير المعلمات العددية مثل النفاذية.

3- الحساسية للبيانات والتعميم

الشبكات العصبية عادةً ما تتطلب حجم بيانات كبير وتكون حساسة لتطبيع المدخلات، كما أن خطر الإفراط في التعلم يكون مرتفعًا في حال عدم استخدام تقنيات تنظيم مناسبة.
SVM تتعامل جيدًا مع البيانات محدودة الحجم نسبيًا، لكنها تصبح مكلفة حسابيًا عند تضخم عدد العينات.
أشجار القرار أقل حساسية لتطبيع البيانات لكنها أكثر عرضة للتباين العالي، بينما تقلل الغابات العشوائية هذا التباين عبر أسلوب التجميع(Ensemble Learning)

4- قابلية التفسير الهندسي

الشبكات العصبية غالبًا ما توصف بأنها "صندوق أسود"، مما قد يصعّب تفسير العلاقة الفيزيائية المباشرة بين المدخلات والمخرجات. في المقابل، توفر أشجار القرار مسارًا منطقيًا واضحًا لاتخاذ القرار، ويمكن استخدام الغابات العشوائية لتحليل أهمية المتغيرات. أما SVM ذات النواة غير الخطية فتكون أقل شفافية من حيث التفسير الفيزيائي.

5- خلاصة المقارنة

- عند الحاجة إلى تمثيل سلوك ديناميكي غير خطي ومعقد في منحنيات الضغط والمشتقة، تكون الشبكات العصبية أكثر ملائمة.
- عند التركيز على التصنيف أو عند توفر بيانات محدودة، قد تكون SVM أو الغابات العشوائية أكثر استقرارًا.
- إذا كانت قابلية التفسير الهندسي أولوية، فإن أشجار القرار توفر ميزة واضحة.

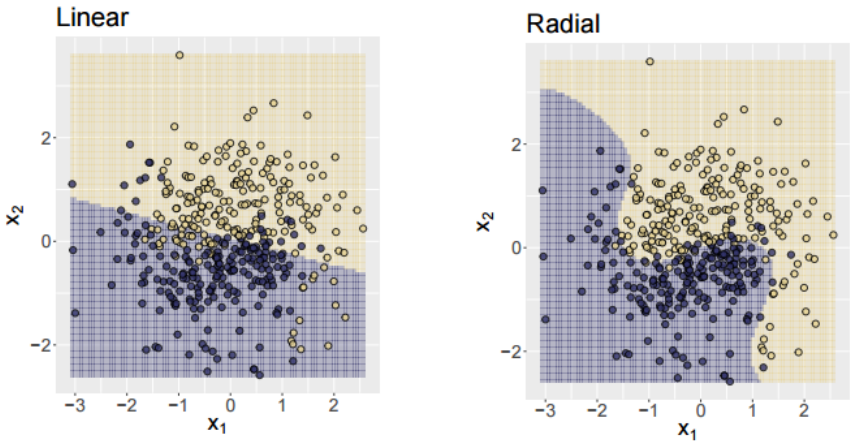
بالتالي، يعتمد اختيار خوارزمية التدريب المناسبة في تفسير فحوصات الآبار على طبيعة البيانات، حجمها، الهدف من النموذج (تصنيف أو تقدير عددي)، ومتطلبات التفسير الهندسي.

6-4-10 مرحلة التحقق Validation Phase

مرحلة التحقق هي عملية ضبط جودة تدريب النموذج و تقييم ادائه قبل مرحلة الاختبار النهائية Testing . الهدف منه ليس قياس النتيجة النهائية، بل ضبط المعاملات (Hyperparameters Tuningوهي إعدادات يحددها المهندس وليس النموذج , تتحكم في هيكل النموذج, وفي سلوك التدريب و قدرة التعميم) ومعرفة ما إذا كان النموذج يتعلم فعلاً أم أنه يحفظ البيانات فقط (Overfitting). تُستخدم فيها مجموعة بيانات منفصلة تماماً عن بيانات التدريب، تعرف باسم مجموعة التحقق (Validation Set) .

في سياق نماذج التعلم الآلي المستخدمة في فحوصات الآبار، نستخدم مجموعة التحقق لضبط المعاملات الحرجة (Hyperparameters) لكل نموذج الي على النحو التالي:

- في الغابات العشوائية (Random Forest) : تحديد العدد الأمثل للأشجار (Number of Trees)وأقصى عمق للشجرة (Max Depth) و عدد السمات عند كل تقسيم (max_features). نراقب خطأ التحقق، فإذا توقف عن النقصان رغم زيادة الأشجار، نتوقف لمنع التعقيد غير الضروري.



الشكل رقم-10-5 مقارنة بين انواع النواة (Kernel) -الخطية و الشعاعية في التقاط الجوانب الرئيسية لحدود القرار Ott Toomet(2026)

- في آلات ناقلات الدعم (SVM) :في اختيار نوع النواة (Kernel) (مثلا خطية،شعاعية RBF الشكل رقم-10-5) و أفضل قيم للمعاملات المنظمة مثل C و Gamma التي تحقق احسن فصل للبيانات دون الوقوع في الضجيج (Noise) .

- في الشبكات العصبية الاصطناعية (ANNs) التحقق هو الأهم هنا، حيث يُستخدم لتحديد البنية المثلى للشبكة (عدد الطبقات المخفية Hidden Layers وعدد العصبونات (Neurons) والأهم من ذلك، يُستخدم لتطبيق تقنية التوقف المبكر(Early Stopping) حيث يتم مراقبة خطأ

التحقق أثناء التدريب، فإذا بدأ الخطأ بالارتفاع (بينما يستمر خطأ التدريب بالانخفاض)، يتم إيقاف التدريب فوراً لمنع ظاهرة التجهيز الزائد (Overfitting) التي تشتهر بها الشبكات العصبية بمعنى ان النموذج يتحسن في البيانات التي يعرفها (التدريب)و يسوء في البيانات التحقق الجديدة.

<u>ان اهم الخوارزميات والتقنيات الشائعة مع الشبكات العصبية الاصطناعية تتضمن الاتي:</u>

1- لضبط الجودة في مشاكل الانحدار(Regression Problems) مثل التنبؤ بالضغط أو النفاذية

, نستخدم متوسط الخطأ التربيعي Mean Squared Error MSE او متوسط مربع الخطأ الجذري (RMSE - Root Mean Square Error) يعطي وزناً أكبر للأخطاء الكبيرة او نستخدم متوسط الخطأ المطلق (MAE - Mean Absolute Error) يمثل متوسط مطلق الفرق بين القيم المتوقعة والحقيقية.

معامل التحديد(R^2 - R-Squared) : يعطي النسبة المئوية للتغير في البيانات التي يستطيع النموذج تفسيرها. (القيم القريبة من 1 تعني نموذجاً ممتازاً) .

2- لضبط الجودة لمهام التصنيف (Classification Problems) فنستخدم :(مصفوفة الالتباس :(Confusion Matrix): هو جدول يوضح عدد التوقعات الصحيحة والخاطئة لكل فئة (مثلاً: كم عدد الآبار المتشققة التي تنبأ بها النموذج بشكل صحيح) . و درجة (F1-Score) : يمثل متوسط التوازن بين الدقة (Precision) والاستدعاء (Recall) مفيد جداً عندما تكون البيانات غير متوازنة (كما ذكرنا في فقرة (Class Balancing) .

3-استراتيجيات التحقق المتقاطع (Cross-Validation Strategies) : فبدلاً من الاعتماد على تقسيم واحد (Training/Validation) فقط، نستخدم تقنيات أكثر ذكاءً لاستغلال البيانات بشكل أفضل، خاصة عندما تكون البيانات قليلة (وهذا شائع في(Well Testing) مثل:

التحقق المتقاطع بـ-K طيات (K-Fold Cross-Validation) : حيث يتم تقسيم البيانات بالكامل إلى K أجزاء (مثلاً 5 أجزاء). يتم تدريب النموذج 4 مرات و التحقق مرة واحدة، ثم نكرر الجولات هنا 5 مرات لضمان استقرار النموذج.. في النهاية يعطي متوسط النتائج ، فائدته تضمن أن كل نقطة بيانات تم استخدامها للتحقق مرة واحدة على الأقل، كما وتقلل من عشوائية اختيار بيانات التحقق.

4- تقنيات ضبط المعلمات الفائقة (Hyperparameter Tuning Algorithms) : في مرحلة

التحقق، نحاول إيجاد أفضل إعدادات للنموذج (مثل عدد الأشجار فيRandom Forest ، أو عدد الطبقات المخفية في الشبكة العصبية). بعض الخوارزميات المستخدمة لذلك مثل:

البحث الشبكي:(Grid Search) :و هي تقنية تقوم بتجربة كل تركيبة ممكنة من المعاملات المحددة مسبقاً واختيار الأفضل أداءً على بيانات التحقق.

و البحث العشوائي:(Random Search) : بدلاً من تجربة كل الاحتمالات، تقوم باختيار مجموعات عشوائية من المعاملات لفترة زمنية محددة. غالباً ما تكون أسرع وأكثر كفاءة من Grid Search.

و Cross-Validation : تقسيم البيانات للتحقق بعدة جولات Grid Search / Random Search لاختيار أفضل مجموعة من المعلمات.

و Bayesian Optimization : الأكثر تقدماً وكفاءة. اقتصادي من حيث يختصر عدد دورات التدريب (Training Runs) إلى أقل عدد ممكن، مع الوصول إلى أفضل أداء.

الخلاصة: في مرحلة التحقق، نستخدم K-Fold Cross-Validation لضمان استغلال البيانات، و Grid Search لضبط الإعدادات، ونقيس النجاح باستخدام RMSE (للأرقام) و F1-Score (للتصنيف). الجدول رقم-10-12 يوضح بعض من الخوارزميات و الدوال في مرحلة التحقق لنماذج مختلفة من التعلم الموجه.

نوع النموذج	مقاييس الأداء(Metrics)	تقنيات/خوارزميات التحقق
الشبكات العصبية الاصطناعية(ANNs) (مثل : MLP, (GRNN, PNN	• للتصنيف: الدقة (Accuracy)، مصفوفة الارتباك • للانحدار: RMSE، MAE، R^2، الخطأ النسبي (%)	• K-Fold Cross-Validation • Hold-out Validation • Grid Search لضبط Hyperparameters
آلات المتجهات الداعمة (SVM)	• للتصنيف: Accuracy، F1-Score، Precision/Recall • للانحدار (SVR RMSE، R^2)	• Nested Cross-Validation • Randomized Search (للتوفير في الوقت) • Bayesian Optimization
الغابات العشوائية (Random Forest)	• للتصنيف: Accuracy، F1-Score، Precision/Recall • للانحدار (SVR، RMSE، R^2)	• Out-of-Bag (OOB) Validation (مدمجة في RF) • K-Fold Cross-Validation • Feature Importance Analysis
أشجار القرار (Decision Tree)	• للتصنيف: Accuracy : Depth، Number of Leaves • للانحدار: MSE، MAE	• Hold-out Validation • Cross-Validation • Pruning عبر التحقق

الجدول 10-12 : الخوارزميات المصاحبة لمرحلة التحقق لنماذج التعلم الموجه.

10-4-7 : مرحلة الاختبار Testing Phase

في هذه المرحلة، يتم إدخال بيانات لم يرها النموذج أبداً لا أثناء التدريب ولا أثناء ضبط الإعدادات في (Validation). الهدف هنا ليس تعديل النموذج (فالنموذج هنا يكون قد تم تجميده وانتهى تعليمه)، بل الهدف هو إعطاء التقييم النهائي الحقيقي لأداء النموذج.

1- التقييم : بعد الانتهاء من التدريب والتحقق، تُقدم بيانات الاختبار مرة واحدة لمعرفة دقة التوقعات. التقييم يمكن أن يكون على مستويات متعددة:

مستوى المنحنى :مدى مطابقة شكل منحنى الضغط أو مشتقة الضغط.

مستوى المعلمة :دقة تقدير النفاذية، معامل القشرة، أو خصائص المكمن الاخرى.

مستوى القرار :مدى صحة التوصيات التشغيلية بنسبة مئوية .

2- مقاييس التقييم النهائية

فمثلا في مقياس التقييم النهائي للشبكات العصبية الاصطناعية ANNs نستخدم:

- عامل التحديد R^2 : لقياس مدى تطابق التنبؤ مع الواقع.

متوسط الخطأ المطلق Mean Absolute Error -MAE :هو متوسط مجموع الفروقات المطلقة بين القيم الحقيقية والقيم التي توقعها النموذج. يُستخدم هذا المقياس عندما يكون الهدف هو التنبؤ بقيمة عددية دقيقة (مثل قيمة الضغط، أو معدل الجريان، أو النفاذية).

- متوسط مربع الخطأ (RMSE) : لمعرفة كم نسبة الخطأ بالوحدات الحقيقية (مثلاً خطأ 2 ملي دارسي عن القيمة الحقيقية في النفاذية) .

- متوسط الخطأ النسبي المطلق (Mean Absolute Percentage Error - MAPE) :يعبر عن متوسط الخطأ كنسبة مئوية من القيمة الحقيقية , سهل التفسير .

- مقياس متوسط الخطأ المئوي المطلق (Mean Absolute Percentage Error - MAPE). يعبر عن الخطأ كنسبة مئوية، مما يسهل مقارنة دقة النماذج عبر آبار أو حقول مختلفة.

ملاحظة: لا يجوز أبداً بعد رؤية نتائج Testing العودة وتعديل النموذج لتحسينه. فإذا أعطى النموذج نتيجة سيئة فيTesting ، فهذا يعني أن النموذج فشل في التعميم (Generalization) ويجب إعادة بناء هيكل النموذج من البداية (العودة لمرحلة التدريب).بمعنى انه لا يوجد بعد تعديل للنموذج (No Tuning) و الا فيتم اعتماده كبرنامج AI متكامل.

ادرجت الخوارزميات المصاحبة لنماذج التعليم الالي الاخرى في الجدول رقم-10-13 .

الدقة- (Accuracy) :تعني نسبة التنبؤات الصحيحة من إجمالي التنبؤات.

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad \text{----------} 16$$

الدقة تكون مفيدة عندما تكون الفئات متوازنة (مثال: 50% خزانات متجانسة، 50% ثنائية المسامية). و مشكلتها إذا كانت الفئات غير متوازنة (مثال: 95% متجانسة، 5% ثنائية المسامية)، فقد يعطي دقة عالية جدًا حتى لو فشل في اكتشاف أي خزان ثنائي المسامية.

فمثلا TP = 3 :، TN = 95 ،FP = 0 ،FN = 2 فان:

Accuracy = (3 + 95) / 100 = 98%

لكنه فشل في اكتشاف 2 من أصل 5 خزانات ثنائية المسامية.

نوع النموذج	هدف مرحلة الاختبار في فحوصات الآبار	مقاييس التقييم النهائية (Evaluation Metrics)
الشبكات العصبية الاصطناعية (ANNs) (PNN, GRNN, MLP)	-تقييم أداء النموذج على بيانات لم يرها إطلاقًا -التحقق من قدرته على التعميم -مقارنة النتائج مع التحليل التقليدي (مثل Kappa Saphir)	- للتصنيف-الدقة(Accuracy) : مصفوفة الارتباك، F1-Score - للانحدارRMSE : MAE، R^2، الخطأ النسبي(%) - الواقعية الفيزيائية للنتائج (مثل: هل k>0؟)
آلات المتجهات الداعمة (SVM / SVR)	-اختبار قدرة النموذج على التمييز بين أنواع المكامن (متجانس، ثنائي المسامية...) -تقييم دقة تقدير المعايير مثل النفاذية أو عامل الجلد	•للتصنيفAccuracy :، Precision، Recall •للانحدارRMSE ، R^2 •استقرار الأداء عبر حالات مختلفة
الغابات العشوائية (Random Forest)	-التأكد من أن النموذج لا يعتمد على سمات غير موثوقة -تقييم الأداء النهائي في تصنيف نوع الخزان أو تقدير المعايير	•للتصنيف:Accuracy :(كمقارنة (Out-of-Bag Error •للانحدارRMSE : MAE •تفسير القرار عبر أهمية السمات
أشجار القرار (Decision Tree)	-اختبار بساطة وشفافية النموذج -التحقق من أن قواعد القرار منطقية هندسيًا (مثلا: "إذا كان زمن الحد الأدنى < 2 ساعة يعني خزان ثنائي المسامية"	• للتصنيف: Accuracy، Depth، عدد الأوراق • للانحدار: MSE، MAE • وضوح قواعد القرار

الجدول 10-13 : الخوارزميات المصاحبة لمرحلة الاختبار Testing لنماذج التعلم الموجه (Goodfellow (2016)

(الدقة الإيجابية) PRECISION: يعني انه من بين كل ما صنّفه النموذج كـ "إيجابي"، كم منها صحيح؟

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad \text{---------- 17}$$

يركّز المقياس هذا على جودة التصنيف الإيجابي بقليل من الأخطاء الإيجابية(FP) . في

فحوصات الآبار:إذا كان Precision = 0.9 فهذا يعني:"من بين كل 10 آبار صنّفها النموذج كـ 'ثنائية المسامية'، 9 منها فعلاً كذلك."

الاستدعاء أو الحساسية-Recall : من بين كل الحالات الإيجابية الحقيقية، كم منها اكتشفها النموذج؟

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad \text{---------- 18}$$

اذ يركّز على قدرة النموذج على اكتشاف جميع الحالات الإيجابية و قليل من الأخطاء السلبية (FN). في فحوصات الآبار:فمثلا اذا كان Recall = 0.8 فهذا يعني:"اكتشف النموذج 80% من الخزانات الثنائية المسامية الموجودة فعليًّا.

حيث ان الرموز تُعرف كما ياتي:

True Positive TP : الحالة التي يكون فيها التصنيف صحيحًا وإيجابيًّا , فمثلا: يقول النموذج أن البئر تالفة ، وهو فعلاً كذلك, ويؤكد تحليل الضغط وجود عامل قشرة مرتفع.

True Negative TN: التصنيف صحيح وسلبي, فمثلا النموذج يقول أن البئر نظيف (بدون قشرة)، وتؤكد نتائج الفحص الفعلية أن البئر يعمل بشكل مثالي.

False Positive FP: تنبأ النموذج بـ "إيجابي"، لكنه كان خاطئًا (إنه في الواقع سلبي)), اي تصنيف خاطئ كـ "إيجابي" فمثلا, يحذرك النموذج من أن البئر تالفة، ولكن في الواقع البئر بخير. وقد يؤدي هذا إلى تكاليف غير ضرورية للتحفيز أو التحميض.

False Negative FN: يُعرف أيضًا باسم: خطأ النوع الثاني. تصنيف خاطئ كـ "سلبي" , تنبأ النموذج بـ "سلبي"، لكنه كان خاطئًا (إنه في الواقع إيجابي).فمثلا: النموذج يقول أن البئر بخير، لكنه في الواقع يعاني من أضرار جسيمة. وهذا أمر خطير لأنك تفوت فرصة إصلاح البئر وزيادة الإنتاج.

الجدول رقم-10-14 يقارن بين مراحل التعلم الثلاثة.

ملاحظة :

- ممكن مراجعة المصادر في ادناه فيما يتعلق بالخوارزميات و المعادلات المصاحبة لكل مراحل التعلم الالي و كذلك الاساس النظري : Goodfellow(2016), Toomet (2026), Kili Technology. (2023), Taiyong Li (2023), Taiyong Li Wu (2023) . اضافة الى المصادر الاختصاص بفحوصات الابار.

- الامثلة السابقة هي للتوضيح فقط اما الحسابات الرياضية و الاحصائية الحقيقية فهي معقدة لكثرة البيانات(بعشرات الالاف) و تعقيد بنية الشبكة , فتتعامل مع مصفوفات Matrices و متجهات Vectors للارقام.

مثال11 - لتوضيح استخدام الشبكات PNN في تحديد نوع المكمن Classification:

البيانات : لنفترض أن لدينا 7 آبار كبيانات تدريب، ونوع المكمن لكل منها معروف من الدراسات

الجيولوجية والمختبرية (الجدول رقم10-15) .

المطلوب: معرفة الى اي نوع من من فئات المكامن ينتمي البئرالجديد X و بحسب المعلومات المتوفرة له.

معيار المقارنة	مرحلة التدريب (Training Phase)	مرحلة التحقق (Validation Phase)	مرحلة الاختبار (Testing Phase)
الهدف الرئيسي	تعلم الأنماط والعلاقات من البيانات	ضبط المعاملات الفائقة (Hyperparameters) واختيار أفضل نموذج	تقييم الأداء النهائي للنموذج على بيانات جديدة
البيانات المستخدمة	مجموعة التدريب (Training Set) 70-80% من البيانات الكلية	مجموعة التحقق (Validation Set) 10-15%	مجموعة الاختبار (Testing Set) 10-15%
تكرار الاستخدام	عدة مرات (تحديث الأوزان)	عدة مرات (بعد كل تعديل)	مرة واحدة فقط في النهاية
المعالجة الرئيسية	الانتشار الأمامي (Forward) + الانتشار العكسي (Backpropagation) تحديث الأوزان	تقييم الأداء فقط (لا تحديث للأوزان)	تقييم الأداء النهائي فقط
الغرض	تقليل دالة الخسارة (Loss Function)	اختيار أفضل المعاملات الفائقة (C, gamma, layers)	قياس قدرة التعميم (Generalization)
مشكلة Overfitting	يظهر عندما يكون الأداء على التدريب عالياً جداً	يكشف Overfitting عندما يقل أداء التحقق	يكتشف Overfitting إذا كان الأداء أقل من المتوقع
المخرجات	نموذج مدرب (Weights & Biases)	أفضل معاملات فائقة + اختيار النموذج	تقرير الأداء النهائي (دقة، R^2، F1-Score)
التطبيق في فحوصات الآبار	تعلم العلاقة بين منحنيات الضغط وخواص المكمن	اختيار أفضل عدد طبقات أو معاملات	تقييم دقة النموذج على آبار جديدة لم تُستخدم من قبل
سمس آخر	مرحلة التعلم / التركيب.	مرحلة الضبط / التطوير.	مرحلة التأكيد / المحاكاة.

الجدول رقم-10-14 :مقارنة بين مراحل التعلم الثلاثة.

- اختيار هذه السمات جاءت بناءا على ان العمق من المؤشرات الحرارية والضغط و تختلف بين المكامن. المسامية و النفاذية في الصخور الرملية عادة أعلى من الصخورالكربونية (الكلسية) , و التشبع المائي يختلف حسب نوع الصخرة وطبيعة التبلل Wettability.

رقم البئر	العمق (متر)	المسامية (%)	النفاذية (mD)	نسبة الماء (%)	نوع المكمن
بئر 1	2500	22	120	15	مكمن رملي 🟢
بئر 2	2550	24	150	10	مكمن رملي 🟢
بئر 3	2800	12	5	45	مكمن كربوناتي 🔵
بئر 4	2850	10	3	50	مكمن كربوناتي 🔵
بئر 5	3100	18	80	25	مكمن مختلط 🟠
بئر 6	3150	19	85	22	مكمن مختلط 🟠
بئر 7	**3050**	**17**	**75**	**28**	مكمن مختلط 🟠
البئر X	**2900**	**15**	**60**	**30**	**???**

الجدول 10-15: بيانات ابار التدريب السبعة و البئر X مجهول المكمن

- مديات السمات المختارة ادرجت في الجدول ادناه:

السمة	القيمة القصوى (Max)	القيمة الدنيا (Min)
العمق (متر)	3150	2500
المسامية (%)	24	10
النفاذية (mD)	150	3
نسبة الماء (%)	50	10

الجدول 10-16: مديات السمات المختارة

1- نجري تطبيع البيانات باستخدام الصيغة:

$$X_{normalized} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

البيانات بعد التطبيع تصبح كما في الجدول الاتي:

رقم البئر	العمق (Normalized)	المسامية (Normalized)	النفاذية (Normalized)	نسبة الماء (Normalized)	نوع المكمن
بئر 1	0.000	0.857	0.796	0.125	مكمن رملي
بئر 2	0.077	1.000	1.000	0.000	مكمن رملي
بئر 3	0.462	0.143	0.014	0.875	مكمن كربوناتي
بئر 4	0.538	0.000	0.000	1.000	مكمن كربوناتي
بئر 5	0.923	0.571	0.524	0.375	مكمن مختلط
بئر 6	1.000	0.643	0.558	0.300	مكمن مختلط
بئر 7	**0.850**	**0.600**	**0.500**	**0.450**	مكمن مختلط
البئر X	0.615	0.357	0.388	0.500	???

الجدول 10-17 السمات بعد التطبيع

2- حساب المسافة بين البئر X المُطبع وكل بئر تدريب مُطبع(سبع ابار) , و تساوي :
المسافة =الجذر التربيعي لمجموع مربع فرق السمات [(فرق العمق المُطبع)^2 + (فرق المسامية المُطبعة)^2 + (فرق النفاذية المُطبعة)^2 + (فرق نسبة الماء المُطبعة)^2] . و ادرجت النتائج في الجدول الاتي:

البئر	المسافة	مجموع المربعات	فرق الماء^2	فرق النفاذية^2	فرق المسامية^2	فرق العمق^2
بئر 1	0.967	0.935	0.141	0.166	0.250	0.378
بئر 2	1.152	1.327	0.250	0.375	0.413	0.289
بئر 3	0.592	0.350	0.141	0.140	0.046	0.023
بئر 4	0.731	0.534	0.250	0.151	0.127	0.006
بئر 5	0.418	0.175	0.016	0.018	0.046	0.095
بئر 6	0.547	0.299	0.040	0.029	0.082	0.148
بئر 7	0.361	0.130	0.003	0.013	0.059	0.055

الجدول 10-18 : حساب المسافة بين البئر X وكل ابار التدريب

3- تطبيق الدالة الغاوسية: نحول المسافات إلى قيم تأثير باستخدام الغاوسية على فرض ان $\sigma = 0.282$، حيث $\sigma^2 = 0.08$ و يعتبر قيمة مناسبة لمدى القيم المطبعة [0,1] .

$$Effect = \exp-((Distance)^2/\sigma^2) == \exp- ((Distance)^2/0.08)$$

ادرجت النتائج في الجدول الاتي:

البئر	التأثير (قيمة التشابه)	(المسافة)^2/0.08	(المسافة)^2	المسافة
بئر 1	0.000008	11.69	0.935	0.967
بئر 2	0.00000006	16.59	1.327	1.152
بئر 3	0.0125	4.38	0.350	0.592
بئر 4	0.0013	6.68	0.534	0.731
بئر 5	0.112	2.19	0.175	0.418
بئر 6	0.024	3.74	0.299	0.547
بئر 7	0.196	1.63	0.130	0.361

الجدول 10-19 : حساب التاثير من تطبيق الدالة الغاوسية

4- ايجاد مجموع التأثيرات لكل فئة و حساب متوسط التاثير بقسمة المجموع على عدد الابار لكل فئةو , ادرجت النتائج في الجدول الاتي:

الفئة	الآبار	قيم التشابه	(S) المجموع	(S/n) المتوسط
رملي	بئر 1, بئر 2	0.000008 + 0.00000006	0.000008	0.000004
كربوناتي	بئر 3, بئر 4	0.0125 + 0.0013	0.0138	0.0069
مختلط	بئر 5, بئر 6, بئر 7	0.112 + 0.024 + 0.196	0.332	0.1107

الجدول 10-20: تحديد متوسط التاثير لكل فئة

5- حساب احتمال عائدية البئر لاي نوع من المكامن باستخدام المتوسط:

مجموع المتوسطات = 0.000004 + 0.0069 + 0.1107 = **0.1176**

الاحتمالية = متوسط تاثير كل فئة / مجموع المتوسطات , ادرجت النتائج في الجدول الاتي:

الفئة	المعادلة	الاحتمال
رملي	0.000004 / 0.1176	0.003%
كربوناتي	0.0069 / 0.1176	5.9%
مختلط	0.1107 / 0.1176	94.1%

الجدول 10-21: تحديد احتمال عائدية البئر X لاي من الفئات الثلاث .

اذن البئر الجديد X ينتمي الى فئة المكامن المختلطة باحتمالية % 94.1 .

10-4-8 : نشر النماذج الذكية في فحوصات الآبار: من التقييم المختبري إلى التطبيق الميداني Model Deployment in Well Testing: From Laboratory Evaluation to Field Application

بعد الانتهاء بنجاح من مرحلة الاختبار (Testing) والتأكد من أداء النموذج المقترح على بيانات غير مرئية، تبدأ المرحلة الأكثر أهمية من الناحية التطبيقية والميدانية :مرحلة النشر (Deployment) . في سياق فحوصات الآبار، تمثل هذه المرحلة الانتقال الحاسم من البيئة البحثية المختبرية إلى بيئة الإنتاج الفعلية(الحقلية)، حيث يصبح النموذج أداة تشغيلية متاحة لمهندسي المكامن وفريق العمليات الحقلية لتحليل بيانات الضغط والتنبؤ بخصائص المكمن بشكل آلي ومستمر.

من الضروري التوضيح أن النشر لا يتطلب تطوير خوارزميات جديدة أو تعديل البنية الرياضية للنموذج؛ فالنموذج يكون قد اكتمل من الناحية الخوارزمية بعد اجتيازه مرحلة الاختبار بنجاح. ما يحدث في مرحلة النشر هو تحويل هذا النموذج الجاهز (من حيث المبادئ الرياضية) إلى خدمة برمجية متكاملة قادرة على التفاعل مع الأنظمة الحقلية القائمة.

في مجال فحوصات الآبار، يتطلب النشر خطوات هندسية-تشغيلية محددة تراعي خصوصية البيانات وطبيعة العمل الميداني. تبدأ العملية بحفظ النموذج المُدرَّب بصيغة قابلة للنشر (Model Serialization) مثل Pickle أو Joblib لنماذج Python ، أو باستخدام تنسيق ONNX الذي يسمح بتشغيل النموذج على منصات مختلفة . يلي ذلك بناء واجهة برمجية (API) باستخدام أطر عمل مثل FastAPI أوFlask ، تغلف النموذج وتسمح للتطبيقات الأخرى بالتواصل معه عبر بروتوكولات موحدة.

أما على مستوى البنية التحتية، فغالباً ما يتم استضافة النموذج على خوادم محلية-On) (premiseداخل شبكة الشركة، نظراً لحساسية بيانات الآبار والحقول النفطية ولأسباب تتعلق بأمن وسرية المعلومات. في بعض التطبيقات المتطورة، يمكن نشر النموذج على أجهزة الحافة (Edge Devices)المرتبطة مباشرة بآبار القياس، مما يتيح تحليلاً فورياً لبيانات الضغط بزمن استجابة منخفض (Low Latency) دون الحاجة إلى نقل البيانات إلى خوادم مركزية.

يمثل **التكامل مع الأنظمة الحقلية القائمة** جوهر مرحلة النشر في فحوصات الآبار. يتطلب ذلك ربط النموذج المنشور مع مصادر البيانات الحية مثل أنظمة SCADA التي توفر قراءات الضغط والمعدلات بشكل لحظي، ومع قواعد بيانات الآبار التاريخية، وأيضاً مع برامج المحاكاة

المتخصصة مثل Petrel و .ECLIPSE هذا التكامل هو ما يحول النموذج من أداة بحثية مستقلة إلى جزء لا يتجزأ من سير العمل الهندسي اليومي، حيث يمكن لمهندس المكامن استلام تقارير تحليل آلية لكل بئر جديد دون تدخل يدوي.
من المهم الإشارة إلى أن اكتمال مرحلة النشر لا يعني اكتمال تطوير البرنامج بالكامل، إذ تبقى مجموعة من المكونات الأساسية لتحويل النموذج إلى برنامج متكامل usable وقابل للاستخدام من قبل المهندسين الميدانيين. من أبرز هذه المكونات:

1- تصميم واجهة المستخدم : (UI/UX Design) تمكين مهندسي المكامن من التفاعل مع النموذج بسهولة دون الحاجة إلى خبرة برمجية، من خلال واجهات رسومية بديهية تسمح برفع بيانات الآبار وعرض النتائج بشكل واضح.

2- تطوير النهايات الخلفية : (Backend Integration) ربط النموذج مع قواعد البيانات المركزية للشركة لتمكين الوصول السلس إلى بيانات الآبار التاريخية والجديدة، وتخزين نتائج التحليل بشكل منظم.

3- بناء لوحات تحكم تفاعلية : (Dashboard Creation) عرض نتائج التحليل بشكل مرئي ومفهوم من خلال رسوم بيانية تفاعلية، خرائط حقلية، ومؤشرات أداء رئيسية (Key Performance Indicators **KPIs)** تساعد في اتخاذ القرار.

4- نظام تقارير آلي : (Reporting System) إعداد تقارير دورية (يومية، أسبوعية، شهرية) عن أداء الآبار ونتائج التحليل بصيغ مألوفة مثل PDF أوExcel ، وإرسالها تلقائياً إلى الجهات المعنية.

5- إدارة المستخدمين والصلاحيات : (User Management) التحكم بمن يمكنه الوصول إلى النموذج ونتائجه، وتحديد مستويات وصول مختلفة (مشرف، مهندس، فني) لحماية البيانات الحساسة.

6- الأمن والامتثال : (Security & Compliance) تطبيق معايير أمن المعلومات لحماية بيانات الآبار من الاختراق أو التسرب، والامتثال للوائح والمعايير المعتمدة في صناعة النفط والغاز.

لا تنتهي مسؤولية المطور بعد النشر، بل تبدأ مرحلة جديدة لا تقل أهمية هي المراقبة والصيانة المستمرة . (Continuous Monitoring) نظراً للطبيعة الديناميكية للمكامن النفطية، حيث تتغير ظروف الضغط وخواص الجريان مع الوقت، يجب إنشاء أنظمة لمراقبة أداء النموذج باستمرار. ذلك يشمل كشف ما يعرف بانحراف المفهوم (Concept Drift) أو انحراف البيانات (Data Drift)، وهي ظواهر تؤدي إلى تدهور دقة النموذج تدريجياً مع تغير سلوك المكمن . بناءً على هذه المراقبة، يتم تحديد اللحظة المناسبة لإعادة تدريب النموذج (Retraining) بدمج البيانات الجديدة، مما يضمن استمرارية فعاليته طوال دورة حياة الحقل.

ادناه تعريف بعض المصطلحات :

المصطلح	التعريف المختصر	مثاله في فحوصات الآبار
UI/UX Design UI=User Interface UX=User Experience	تصميم شكل البرنامج وسهولة استخدامه	واجهة سهلة لرفع بيانات الضغط ورؤية النتائج
KPIs	مقاييس رقمية لتقييم الأداء	دقة التصنيف، زمن التحليل، عدد الآبار المحللة
Data Drift	تغير خصائص البيانات مع الوقت	تغير أنماط الضغط بسبب انخفاض ضغط المكمن

باختصار، تمثل مرحلة النشر (Deployment) الجسر الذي يربط بين الإنجاز البحثي المتمثل في بناء نموذج دقيق، وبين القيمة المضافة الحقيقية المتمثلة في تحسين كفاءة العمليات الميدانية ودعم قرارات تطوير الحقل. لكن اكتمال البرنامج يتطلب تكامل جميع المكونات المذكورة أعلاه، من واجهات مستخدم وأنظمة تقارير وإدارة صلاحيات، لتقديم حل متكامل يمكن للمهندسين الاعتماد عليه في عملهم اليومي. بدون هذه المرحلة الشاملة، يبقى النموذج مجرد تمرين أكاديمي، أما مع النشر المتقن والتطوير الكامل للبرنامج والمراقبة المستمرة، فيتحول إلى أداة استراتيجية تعزز قدرة الفرق الهندسية على تحليل فحوصات الآبار بسرعة وموثوقية.

10-4-9 منصّات مساعدة في بناء نماذج الذكاء الاصطناعي

عند تطوير برنامج ذكاء اصطناعي (AI) لتفسير فحوصات الآبار، يمكن الاعتماد على بيئات برمجية متخصصة مثل Python أو MATLAB، وكلاهما يوفّر أدوات متقدمة مثل منظومة متكاملة من المكتبات العلمية المتقدمة و صناديق أدوات (Toolboxes) لمعالجة البيانات وبناء النماذج الرياضية و تقنيات في الاختيار الإحصائي والتقييم. يُعد MATLAB خيارًا تقليديًا قويًا في التطبيقات الهندسية بفضل تكامله العالي مع النمذجة العددية وتحليل الإشارات، إضافة إلى توفر صناديق أدوات (Toolboxes) مخصصة للتعلّم الآلي ومعالجة البيانات كما في الجدول رقم-10-22.

في المقابل، تُعد لغة Python الخيار الأكثر انتشارًا في مجال الذكاء الاصطناعي والتعلّم الآلي نظرًا لكونها مفتوحة المصدر، وواسعة الدعم المجتمعي، وتحتوي على منظومة غنية من المكتبات العلمية. فمن خلال مكتبات مثل NumPy وSciPy يمكن تنفيذ المعالجات العددية بكفاءة، بينما توفّر مكتبات scikit-learn أدوات للنماذج الكلاسيكية مثل MLP وتقنيات الاختيار الإحصائي والتقييم (الجدول رقم-10-23).

أما في مجال التعلّم العميق، فتُستخدم أطر عمل مثل TensorFlow و PyTorch لتطوير الشبكات العميقة بما فيها الشبكات الفيزيائية المعتمدة على القوانين (Physics-Informed Neural Networks – PINNs)، والتي تُعد ذات أهمية خاصة في مسائل تفسير فحوصات

الآبار المعتمدة على معادلات الجريان. كما يمكن تنفيذ نماذج مثل GRNN و PNN باستخدام بعض المكتبات المتخصصة أو من خلال بنائها برمجيًا اعتمادًا على المكتبات العددية.
إضافةً إلى ذلك، تتميز Python بسهولة دمجها مع أدوات تحليل البيانات الاخرى، وتمثيل النتائج البيانية، وقواعد البيانات، وأنظمة المحاكاة، مما يجعلها بيئة مرنة ومتكاملة لتطوير أنظمة ذكية متقدمة لتفسير بيانات الضغط العابر في المكامن النفطية.

مثال12- (Vaferi et al. 2011)

الهدف : تطوير موديل ذكاء اصطناعي AI للتشخيص Classification الالي في تحديد نوع المكمن (Reservoir Model Recognition) من بيانات فحوصات هبوط الضغط Drawdown test باستخدام شبكة عصبية من نوع Multi-Layer Perceptron (MLP) ، اي التركيز على مرحلة تشخيص النموذج فقط وليس تقدير المعاملات المكمنية Regression

الحل :

1- النماذج المكمنية المدروسة خلال التدريب Reservoir models

تم تدريب الشبكة على 8 نماذج مكمنية ، تضمنت نماذج المكامن المتجانسة و المكامن المتشققة مزدوجة المسامية Dual porosity مع أنواع مختلفة لحدود المكمن الخارجية مثل مكمن مغلق، مكمن بضغط ثابت، مكمن بالامتداد اللامحدود ، مكمن مع وجود فالق اصم مفرد . هذه النماذج تغطي معظم الحالات العملية في فحوصات الآبار(الجدول رقم -10-24).

الأداة / الصندوق	نوع الأداة	الاستخدام المحتمل في Well Testing
Wavelet Toolbox	تحليل متعدد المقاييس	إزالة الضوضاء من بيانات الضغط، تحليل الإشارات الزمنية في اختبار الآبار
Parallel Computing Toolbox	حوسبة متوازية	تسريع عمليات المحاكاة، تحسين المطابقة مع Type Curves، تدريب النماذج
Statistics and Machine Learning Toolbox	تعلم آلي	تصنيف نماذج المكامن، تحليل البيانات الإحصائي
Deep Learning Toolbox	شبكات عصبية	تدريب الشبكات العميقة لتحليل بيانات الضغط
ONNX Support Package	توافق النماذج	استيراد أو تصدير نماذج التعلم العميق بين MATLAB وبيئات أخرى
TensorFlow	إطار تعلم عميق	استخدام نماذج مدرّبة خارج MATLAB داخل البيئة التحليلية
PyTorch	إطار تعلم عميق	استيراد النماذج أو تشغيلها بالتكامل مع MATLAB
دالة newpnn	شبكة عصبية احتمالية	تنفيذ نموذج PNN لتصنيف نوع المكمن من منحنيات الضغط
دالة newgrnn	شبكة عصبية معممة	تنفيذ نموذج GRNN لتقدير خواص المكمن مثل النفاذية أو معامل الجلد
PNN (newpnn)	شبكات ضحلة	دالة مدمجة مباشرة: لإنشاء شبكة PNN
GRNN (newgrnn)	شبكات ضحلة	دالة مدمجة مباشرة: لإنشاء شبكة GRNN

الجدول10-22 : البرمجيات والأدوات المساعدة في MATLAB-

الأداة / المكتبة	نوع الأداة	الاستخدام في Well Testing
NumPy	مكتبة حسابات عددية	تنفيذ العمليات الرياضية، معالجة بيانات الضغط والزمن
SciPy	مكتبة علمية	حل المعادلات التفاضلية، تحسين النماذج المكمنية
Pandas	تحليل بيانات	تنظيم بيانات الاختبار الزمني والضغط
Matplotlib	رسم بياني	رسم منحنيات الضغط ومشتق الضغط (Log-Log plots)
scikit-learn	تعلم آلي	نماذج تصنيف المكامن والتنبؤ بالخواص مثل النفاذية
TensorFlow	تعلم عميق	تطوير الشبكات العصبية ونماذج PINNs لمحاكاة الجريان
PyTorch	تعلم عميق	تدريب الشبكات العصبية وتحليل الأنماط في بيانات الضغط
SymPy	رياضيات رمزية	التعامل مع المعادلات التحليلية للجريان في المكامن
pyGRNN	شبكة عصبية	تنفيذ نموذج GRNN لتحليل العلاقات غير الخطية في البيانات
Neupy	شبكات عصبية	تنفيذ نماذج مثل PNN و GRNN

الجدول10-23: البرمجيات والأدوات المساعدة في Python-

Model number	Model description
1	Homogeneous reservoir, infinite acting boundary
2	Homogeneous reservoir, single sealing fault boundary
3	Homogeneous reservoir, constant pressure outer boundary
4	Homogeneous reservoir, no flow outer boundary
5	Dual porosity reservoir, infinite acting boundary
6	Dual porosity reservoir, single sealing fault boundary
7	Dual porosity reservoir, constant pressure outer boundary
8	Dual porosity reservoir, no flow outer boundary

الجدول10-24 - انواع الموديلات المكمنية المختارة

2- مصدر البيانات(Data source)

البيانات المستخدمة للتدريب Training والاختبار Testing كانت اصطناعية (Simulated Data) تم توليدها باستخدام الحلول التحليلية Analytical solution لنماذج مكامن شائعة

الاستخدام.

- المعاملات المستخدمة في التوليد : تغيير المعاملات ضمن نطاقات واقعية (النفاذية، معامل المكمن ، معامل التخزين، إلخ) و كما في الجدول رقم-10-25 .

Model	Parameters	Min	Max
Homogeneous reservoir with various boundaries	k	20	400
	s	−1	2
	W_{SC}	0.001	0.1
Dual porosity reservoir with various boundaries	k	20	200
	s	−1	2
	W_{SC}	0.001	0.01
	ω	0.001	0.1
	λ	10^{-6}	10^{-4}

الجدول10-25 : الخواص المكمنية و نطاقاتها المستخدمة في توليد بيانات الفحوصات

- عدد نماذج البيانات: تم توليد 120 منحنى مشتقة ضغط لكل نموذج مكمني. يصبح مجموع البيانات الكلي لثمان نماذج مكنية 960 منحني.

- تقسيم البيانات: 75% بيانات تدريب Training و 25% بيانات تقييم Validation لفحص ادائية الشبكة ، أي يصبح تقريبًا عدد البيانات (منحني) 720 للتدريب و 240 منحني للتقييم.

3- المعالجة المسبقة (Preprocessing) :

- تحويل الضغط إلى مشتقة بورديت Bourdet derivative باستخدام الصيغة التالية:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_i = \frac{\left[\frac{p_i - p_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}(t_{i+1} - t_i) + \frac{p_{i+1} - p_i}{t_{i+1} - t_i}(t_i - t_{i-1})\right]}{t_{i+1} - t_{i-1}} \quad \text{---------- 19}$$

- أخذ 33 نقطة متساوية البعد من كل منحنى لمشتقة الضغط (Sampling).

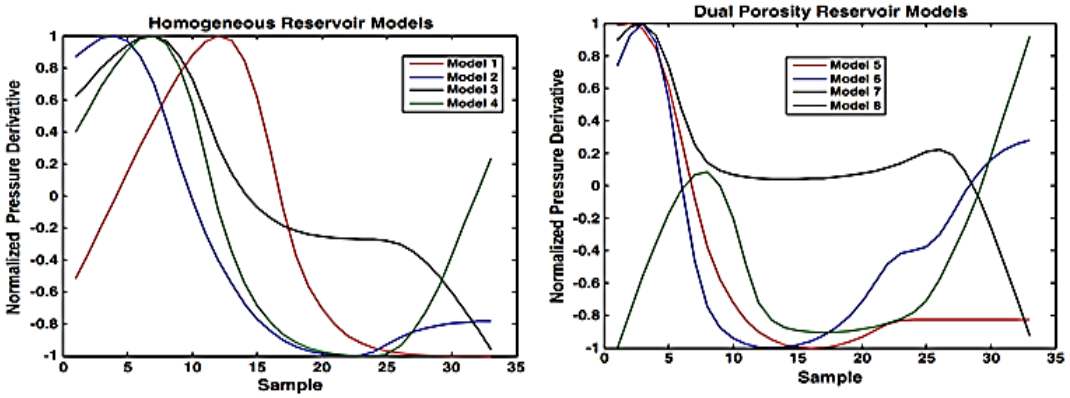
- تطبيع البيانات Normalization : تُطبق خطوات المشتقة و التطبيع Normalization ليس فقط على بيانات التدريب ولكن أيضًا على بيانات التقييم Training data and Validation data. الشكل رقم-10-6 يوضح منحنيات مشتقة الضغط لكلا نظامي المكمن(اربعة منحنيات للمكمن المتجانس و اربعة للمكمن ثنائي المسامية).

تصبح مدخلات الشبكة = 33 قيمة لمشتقة ضغط مطبعة (راجع الشكل رقم- 10-7).

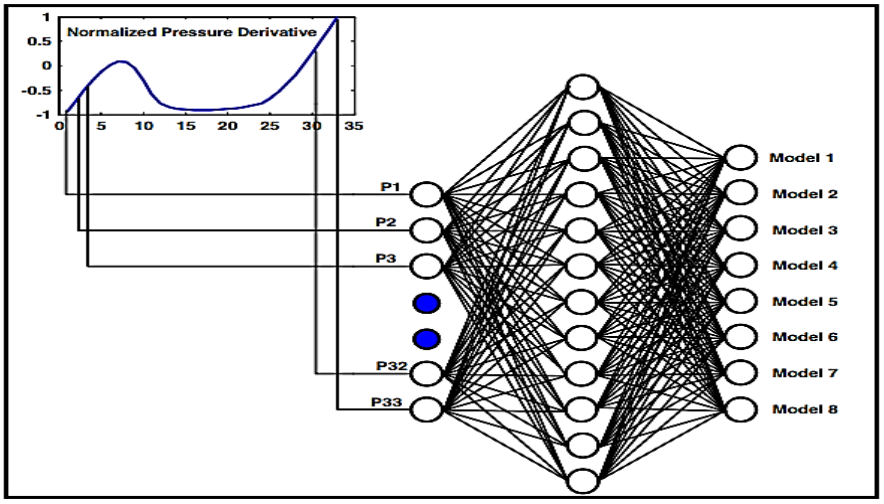
4- هيكل الشبكة العصبية

- **النوع:**تم استخدام الشبكة العصبية الاصطناعية ذو الطبقات المتعددة (MLP Multi-Layer Perceptron network) كما في الشكل 10-6 والتي تتميز ببنية تغذية تقدمية Feed-

Forward structure (العمليات تجري للامام من خلايا الادخال و الخلايا المخفية الى خلايا الاخراج).



الشكل10-10- مشتقة تطبيع الضغط لكلا نظامي المكمن المتجانس و الثنائي المسامية بتقسيمات مختلفة



الشكل10-7 : الهيكل المفترض للشبكة الاصطناعية مع مشتقة الضغط كبيانات ادخال

5- البنية (الهيكلية)المثلى للشبكة: (الشكل رقم-10-7)

- طبقة إلادخال Input layer : 33 خلية (ثلاثة وثلاثون نقطة متساوية المسافات من كل منحنى لمشتقة الضغط في شبكة MLP) .

- الطبقة المخفية Hidden layer: 12 خلية (optimized) ، اذ تم تقدير عدد الخلايا العصبية الانسب في الطبقة الخفية عن طريق تقليل الأخطاء النسبية المتوسطة (MRE- Mean Relative Errors) المعادلة رقم 20 على مجموعات بيانات الفحص. كما تم استخدام تقليل أخطاء التربيع المتوسطة (MSE- Mean Square Errors) المعادلة رقم 21 لبيانات التدريب

أثناء تدريب training الشبكة .تم التوصل الى ان أفضل أداء تحقق عند12 Hidden خلية Neurons.

$$MRE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{Out_{Real}-Out_{net}}{Out_{Real}}\right) \quad \text{---------- 20}$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Out_{Real}-Out_{net})}{n} \quad \text{---------- 21}$$

- طبقة إخراج Output layet : 8 خلايا (تمثل 8 نماذج مكمنية)

- دوال التنشيط:

Hidden layer: Tan-Sigmoid

Output layer: Log-Sigmoid

6- خوارزمية تدريب الشبكة :

تم مقارنة عدة خوارزميات تدريب Training algorithms كما في الجدول رقم-10-26 .

Training algorithm	CPU[10]/epoch	Epoch
Scaled conjugate gradient	0.02142	518
Conjugate gradient with Polak–Ribiere updates	0.02297	642
Conjugate gradient with Powell–Beale restarts	0.02304	739
Levenberg–Marquardt	0.45469	492

الجدول10-26 : الوقت المقدر لكل حلقة لانواع خوارزميات التدريب

كانت الانسب كانت Scaled Conjugate Gradient (SCG) لكونها الأسرع من حيث زمن المعالجة (0.021 ثانية لكل دورة تدريب epoch).

و خوارزمية **Scaled Conjugate Gradient (SCG)** واحدة من أسرع وأكفأ خوارزميات التدريب للشبكات العصبية (ANNs) , و هي خوارزمية تحسين (Optimization) تُستخدم لتحديث أوزان الشبكة العصبية.

7- نتائج التدريب

- تحديد دقة و ادائية الشبكة في التصنيف classification خلال مرحلة التدريب كانت باعتماد مؤشرين إحصائيين: (1) حساسية الشبكة Network sensitivity و (2) دقة التصنيف الكلية Total classification accuracy.

نتائج الدقة في من جراء استعمال بيانات التدريب كانت جيدة جدا و ادرجت في الجدول ادناه .

Statistical parameter (%)	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8
Sensitivity	100	96.67	93.33	96.67	90	96.67	100	93.33
Total classification accuracies	95.83							

الجدول10-27: مؤشر دقة التصنيف لنتائج التدريب

8- التقييم Validation و التعميم (خارج نطاق التدريب)

- تم توليد 8 حالات جديدة ببارامترات (معاملات) جديدة خارج خارج مجموعات البيانات التدريبية Training للتقييم (الجدول رقم-10-28)
- النتيجة ان الشبكة تعرفت على جميع النماذج باحتمالية $\leq 80\%$.

Reservoir model/parameter		k	s	W_{SC}	ω	λ
Homogeneous reservoir with various boundaries	Model 1	450	3	0.0008	–	–
	Model 2	480	−2	0.12	–	–
	Model 3	420	2.5	0.11	–	–
	Model 4	10	−3	0.0007	–	–
Dual porosity reservoir with various boundaries	Model 5	230	2.8	0.05	0.12	10^{-7}
	Model 6	250	−2	0.08	0.0006	10^{-8}
	Model 7	10	−2	0.07	0.11	10^{-9}
	Model 8	300	3	0.0005	0.0008	$10^{-7.5}$

الجدول 10-28:توليد 8 حالات جديدة لغرض تقييم Validation عمل الشبكة

9- مرحلة الاختبار Testing ببيانات حقلية حقيقية

تم اختبار الشبكة على:

- بيانات حقلية من المصدر Horne (1995) لمكمن متجانس - حد لانهائي (يماثل النموذج رقم 1) Infinite Acting و قد تم التعرف عليه باحتمال ≈ 0.95.

2- بيانات حقل أحواز الرملي - ايران (Ahwaz Sandstone) لموديل مكمني ثنائي المسامية بحد ثابت الضغط –الموديل رقم-7 (Dual Porosity – Constant Pressure) و قد تم التعرف عليه باحتمال ≈ 0.95

3- بيانات مثال رقم 6.1 من Horne (Dual Porosity) لمكمن ثنائي المسامية - حد لانهائي (نموذج 5) + تشويش. و قد تم التعرف عليه باحتمال ≈ 0.8

ملاحظة: بيانات الاختبار بيانات حقيقية والشبكة نجحت في التعرف على النماذج الحقيقية بدقة عالية.

الخلاصة

المثال يقدم حلاً ذكيًا، سريعًا، ودقيقًا لتفسير فحوصات الابار. الشبكة المقترحة و برغم من ان التدريب تم على بيانات اصطناعية فقط فقد أثبتت: بنية بسيطة (MLP بطبقة مخفية واحدة) ، قدرة عالية على التعميم. دقة مقبولة على بيانات حقيقية.

مثال13:(Ahmadi et al 2017) بناء نموذ ذكاء اصطناعي لتفسير فحوصات الآبار

المنهجية المقترحة :

1-الهدف: تطوير منهجية شاملة تعتمد على الشبكات العصبية الاصطناعية بالتكامل مع تصميم التجارب (Design of Experiments -DOE) من أجل:

1. التشخيص Classification الالي لنوع النموذج المكمني.
2. تقدير الخواص Regression المرتبطة بالمكمن.
3. اختيار أفضل هيكل ومعاملات للشبكة العصبية بشكل منهجي.

Type of variable	Variable	Symbol	Type of reservoir model
Reservoir rock properties	Permeability	K	VH/VDP
	Net pay thickness	h	VH/VDP
	Skin factor	S_d	VH/VDP
	porosity	φ	VH/VDP
	Storativity ratio	ω	VDP
	Inter-porosity flow coefficient	λ	VDP
Wellbore properties	Dimensionless wellbore storage	C_D	VH/VDP
	Wellbore radius	r_w	VH/VDP
Reservoir geometry	Reservoir extent	X_e (Y_e)	VH/VDP
	Reservoir outer boundary	Boundary	VH/VDP
Production data	Production time	t_p	VH/VDP
	Production rate	q_o	VH/VDP
Reservoir fluid properties	Initial reservoir pressure	P_i	VH/VDP
	Water saturation	S_w	VH/VDP
	Reservoir temperature	T_{res}	VH/VDP
	API gravity	API	VH/VDP
	Oil formation volumetric factor	B_o	VH/VDP
	Oil viscosity	μ_o	VH/VDP
	Total compressibility	C_t	VH/VDP
	Oil compressibility	C_o	VH/VDP
	Solution gas oil ratio	R_s	VH/VDP

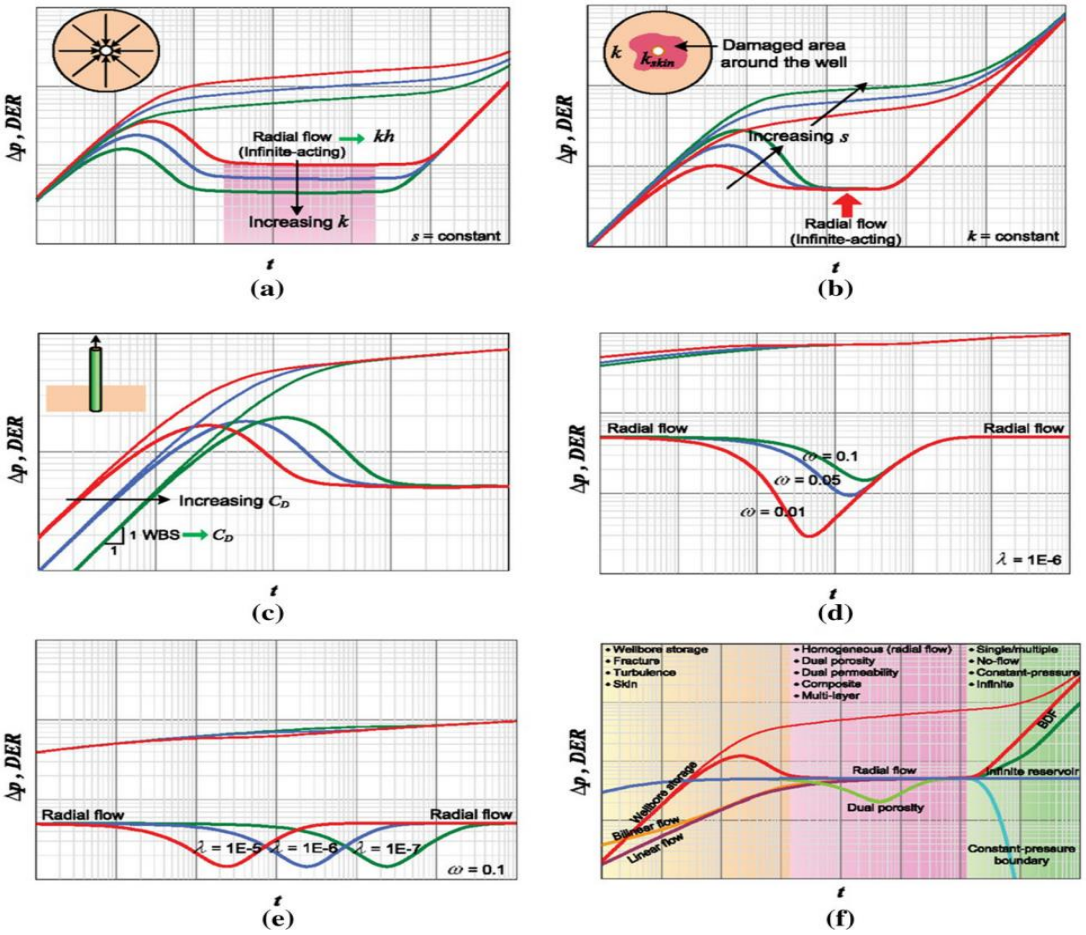
جدول10-29: قائمة بكل المتغيرات المستخدمة في تصميم فحص الابار لكلا الموديلين VDP/VH

2- تحديد نطاق الدراسة: بداية يتم تعريف نموذجين مختلفين من النماذج المكمنية و هما:

- بئر عمودي في مكمن متجانس Vertical well in a Homogeneous reservoir (VH)
- و بئر عمودي في مكمن ثنائي المسامية Vertical well in a Double-Porosity system (VDP) و لكل نموذج هنالك مجموعة معاملات مصاحبة (variables) كما في الجدول رقم-10-29 .

- تم حصر 21 متغيرًا variables يؤثر في فحص الآبار(الجدول رقم-10-29) .

- استبعاد 6 من المتغيرات مؤكدة التأثير (و هي النفاذية، عامل القشرة Skin، معامل التخزين، ω، λ و الحدود) و عدم تضمينها في مرحلة DOE . هذا الاستبعاد ليس لأنها غير مهمة، بل على العكس ، لأن تأثيرها مؤكد وغير ملتبس ولا يحتاج إلى اختبار إحصائي إضافي . إن تأثير كل من هذه المعاملات على مشتقة الضغط موثق بوضوح كما في الشكل رقم- 10-8 .



الشكل 10-8 : تاثير خواص مكمنية مختلفة على شكل مشتقة الضغط: a- permeability. e-inter-porosityflow coffient d- storativity ratio c-wellbore storage b-skin factor f- outer boundary

- الابقاء على 15 متغيرًا . و من بين الـ 15 يختار المتغيرات الأكثر تأثيراً على منحني مشتقة الضغط .باستخدام (Principal component analysis –PCA) كتقنية اضافية في تقليل الابعاد و يطُبق تحليل إحصائي متعدد المتغيرات (Multivariate analysis of variance (MANOV اخر على النتائج الاخيرة لاختيار المتغيرات المؤثرة النهائية.

- و قد تبين ان 7 متغيرات فقط كانت المؤثرة من بين 15.

3- تصميم العامل الجزئي (Fractional Factorial Design)

الانتقال من مرحلة فحص العوامل إلى مرحلة بناء مجموعة بيانات تدريبية قوية وشاملة، لتكون هي الاساس الذي سيتعلم منه النموذج الذكي (الشبكات العصبية) فيما بعد. التركيز هنا على توليد أكبر عدد ممكن من التجارب التمثيلية التي تغطي مديات واقعية للمتغيرات.

Table 8 Different levels of the well-testing variables for the fractional factorial design (The numbers in parentheses, where provided, are the corresponding values in SI units)

Variable	1st level	2nd level	3rd level	4th level	Field units (SI units)
K	10 (9.87E−15)	100 (9.87E−14)	500 (4.93E−13)	1200 (1.18E−12)	md (m^2)
h	20 (6.10)	200 (60.96)	1000 (304.79)	1800 (548.61)	ft (m)
S_d	5−	0	5	20	Dimensionless
C_D	100	1000	5000	10,000	Dimensionless
ω	0.001	0.05	0.1	0.3	Dimensionless
λ	1×10^{-8}	1×10^{-6}	1×10^{-5}	1×10^{-4}	Dimensionless
ϕ	5	15	20	30	%
C_t	1×10^{-6} (1.45E−10)	5×10^{-6} (7.25E−10)	1×10^{-5} (1.45E−9)	5×10^{-5} (7.25E−9)	psi^{-1} (Pa^{-1})
r_w	0.25 (7.6E−2)	0.3 (9.1E−2)	0.35 (0.11)	0.4 (0.12)	ft (m)
X_e	1500 (457.18)	3000 (914.36)	4000 (1219.14)	5000 (1523.93)	ft (m)
q_o	500 (9.2E−4)	1500 (2.76E−3)	2500 (4.60E−3)	4000 (7.36E−3)	STBD (m^3/s)
μ_o	0.5 (5E−4)	5 (5E−3)	15 (0.015)	40 (0.04)	cp (Pa·s)
B_o	1	1.1	1.2	1.3	RBBL/STB (Rm^3/Sm^3)

الجدول 10-30: مستويات مختلفة لمتغيرات فحوصات الآبار في تصميم العامل الجزئي (Fractional factorial design)

ANN	Target	Number of training examples
MLP1	Permeability	1164
MLP2	Skin factor	1164
GRNN1	Wellbore storage Coefficient	1164
GRNN2	Storativity ratio	774
PNN1	Inter-porosity flow coefficient	774
PNN2	Type of reservoir model	1164

الجدول10-31: عدد التجارب لكل شبكة في مهام التدريب

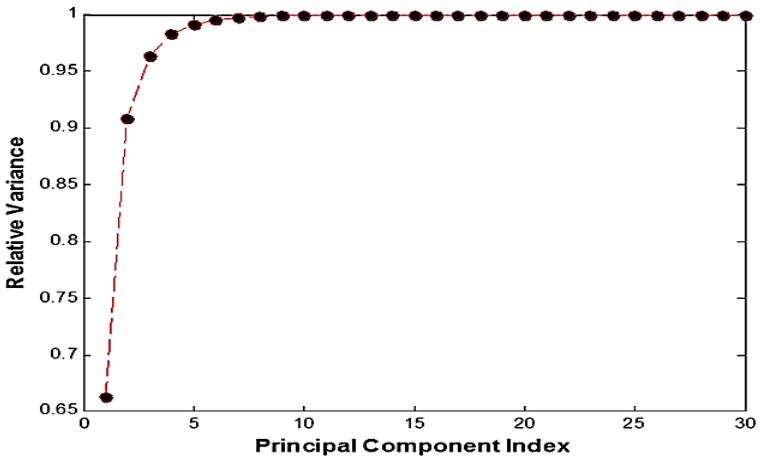
- تم دمج الـ 7 متغيرات المعنوية من الفقرة السابقة زائدا 6 متغيرات مؤكدة التأثير فتصبح 13 = متغيرًا.

- تم تحديد 4 مستويات لقيم كل متغير (عالي و واطىء و بينهما ليكون تمثيل واسع للمكامن) كما في الجدول رقم -10-30 .

- تم توليد 774 تجربة للنموذج ثنائي المسامية و توليد 390 تجربة للنموذج المتجانس.

مجموع التجارب 774+390 = 1164 منحنى مشتقة الضغط لكلا النموذجين (راجع الجدول رقم-10-31 و الشكل رقم-10-10 الجزء العلوي) .

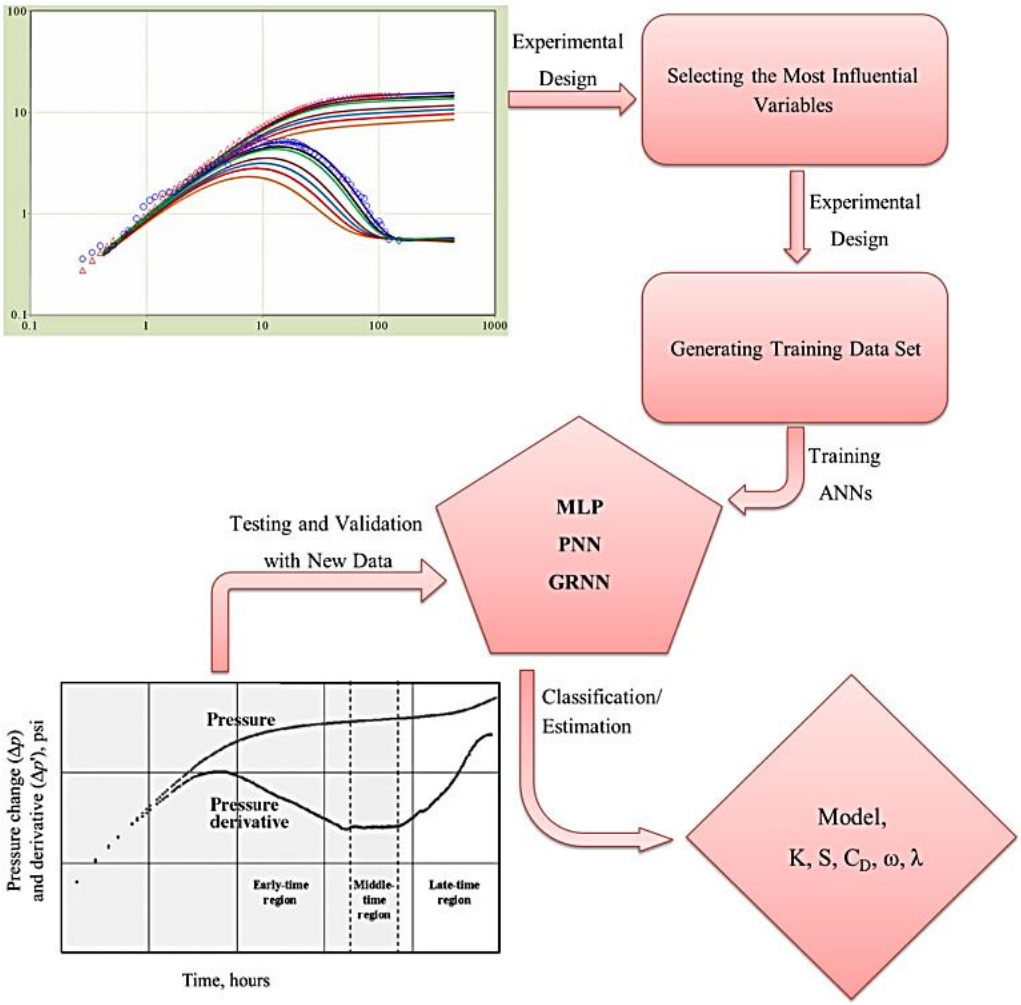
- باستخدام PCA مرة اخرى (الشكل رقم-10-9) تم تقليل الأبعاد إلى 8 مكونات رئيسية بدلا من 13 تمثل 99.9% من التباين الكلي total variance(اول 8 متغيرات في الجدول10-30).



الشكل-10-9 : رسم نتائج PCA

- النتيجة :اكتشاف أن أول 8 مكونات أساسية هي المؤثرة بدلا من 13 متغير الجدول رقم-10-30 . تصبح عدد بيانات الادخال(المتغيرات الثابتة) للشبكات الاصطناعية ستكون 8 .

(ملاحظة : لا يكون الفهم على ان المدخلات للشبكة هي قيم للنفاذية او اوميغا لا وانما تعتبرها الشبكة اهداف تسعى للتنبؤ بها . تظل المدخلات هي قيم الضغط و مشتقة الضغط مع الزمن , و يجري تدريب الشبكة و افهامها على ان المنحني رقم واحد(البئر رقم-1) مثلا له ميل m=0.4 و وقت نهاية سعة تخزين البئر .0.15 hrs و ارتفاع القمة المبكرة لمنحني مشتقة الضغط 45 psi و سمك المكمن h=200 ft والهدف هي النفاذية ولهذا المنحني او لهذا البئر فان النفاذية k=120 mD . و هكذا للبئر الثاني والى البئر مثلا مائة . الى هذا الحد فقد تدربت الشبكة و انتهت فترة التدريب . الان للتحقق سندخل منحني جديد لبئر جديد لم تره من قبل و نطلب منها حساب النفاذية كهدف , فتجد ان الميل يساوي m=.3 و وقت نهاية سعة تخزين البئر .0.1 hrs و ارتفاع القمة المبكرة لمنحني مشتقة الضغط 35 psi . الشبكة ستتنبا بقيمة النفاذية كمخرجات و تعطي k=140 mD).



الشكل رقم-10-10: رسم تخطيطي للنموذج المقترح في تفسير وتحليل فحوصات الآبار باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية

4- نمذجة الشبكات العصبية (المرحلة الثانية من تصميم التجارب (DOE)) يتضمن :

أ. أنواع الشبكات المستخدمة: تم استخدام ثلاثة انواع من الشبكات العصبية الاصطناعية ، انواعها و مهامها و انواع المخرجات التي تنتجها ذكرت في الجدول رقم- 10-31 .

النوع	المهمة	المخرجات
MLP	تقدير (Regression)	النفاذية (K)، Skin factor (S)
GRNN	تقدير (Regression)	معامل التخزين (CD)، نسبة التخزين (ω)
PNN	تصنيف (Classification)	نوع المكمن، معامل التدفق البيني (λ)

الجدول10-31: مهام الشبكات العصبية الاصطناعية في المثال

ب. تحويل المتغيرات (Target Transformation) : يتم تدريب الشبكات على قيم محولة وليس البارامترات (المتغيرات) مباشرة مثل ميل منحني الضغط عند ساعة واحدة او قيم ω من فرق الضغط ما بين قاع الوادي و الهضبة في مشتقة الضغط (الجدول رقم-10-32) .

Well-testing parameter	ANN target	Equation for transforming the well-testing model parameter to the ANN target
Permeability (K)	m	$m = \frac{162.6 q_o \mu_o B_o}{Kh}$
Skin Factor (S_d)	p_{1h}	$p_{1h} = m \cdot \left(\frac{S_d}{1.15} - \log\left(\frac{t_p+1}{t_p}\right) + \log\left(\frac{K}{\phi \mu_o C_t r_w^2}\right) - 3.23\right) + p_{wf}(t_p)$
Dimensionless Wellbore Storage (C_D)	m_{C_D}	$m_{C_D} = \frac{q_o B_o}{24C}$; $C = \frac{C_D \phi C_t h r_w^2}{0.89}$
Storativity Ratio (ω)	Δp_ω	$\Delta p_\omega = m \cdot \log(\omega)$
Inter-porosity Flow Coefficient (λ)	λ	No transformation is needed

Where q_o, μ_o and B_o are the oil production rate, oil viscosity and oil formation volume factor respectively; h is the formation thickness; t_p means the production time before shutting-in the well; ϕ stands for the formation porosity; C_t is the total compressibility; r_w shows the wellbore radius, and p_{wf} implies the bottom-hole flowing pressure

الجدول10-32 : الاهداف لتدريب الشبكات العصبية الاصطناعية المقترحة وتقدير سمات فحص الآبار المختلفة في حالة الأنظمة المتجانسة وذات المسامية الثنائية (المعادلات بوحدات الحقل من Bourdarot 1999؛ Lee 1982)

نوع المكمن (النموذج)	عدد التجارب (المنحنيات) الأصلية	عدد نقاط البيانات لكل منحنى (بعد أخذ العينات)	عدد المدخلات النهائية للشبكة العصبية (بعد تقليل الأبعاد)
(VDP) المكمن ذو المسامية المزدوجة	774	30	8 (مكونات أساسية)
(VH) المكمن المتجانس	390	30	8 (مكونات أساسية)

الجدول 10-33:تحديد عدد التجارب وتهيئة بيانات مرحلة التدريب في المثال

النتيجة النهائية لهذه المرحلة: بعد هذه العمليات المنهجية ، أصبح لدينا مجموعتان جاهزتان وعالية الجودة من بيانات التدريب و كما في الجدول رقم-10-33 . لاحظ ان الشبكة الواحدة تقوم بمهمتين في ان واحد لكلا VH+VDP اي ان عدد التجارب في مهمة حساب النفاذية تساوي = 774+390 =1164 , لكن لتحديد ω فقط نحتاج عدد تجارب VDP و تساوي 774 تجربة في مرحلة التدريب.

5- تحديد هيكلية الشبكة

- تم إنشاء عدة نماذج للشبكة MLP تختلف في بنيتها من حيث عدد خلايا الطبقة المخفية ، دوال التنشيط Activation functions و خوارزمية التعلم Learning algorithm و ذلك لاختيار افضل عدد خلايا عصبية و دوال تنشيط (الجدول رقم-10-34).

Number of hidden Neurons	Learning algorithm	Activation function
5 to 22	Levenberg–Marquardt backpropagation	Hyperbolic tangent sigmoid
	Bayesian regulation backpropagation	Log-sigmoid
	Scaled conjugate gradient backpropagation	Linear

الجدول10-34: المعايير المختلفة في دراسة شبكة MLP في المثال

Learning algorithm	Activation function	Minimum MSE	Number of hidden neurons
Hyperbolic tangent sigmoid	Levenberg–Marquardt backpropagation	0.00067	10
	Scaled conjugate gradient backpropagation	0.0091	22
	Bayesian regulation backpropagation	0.00041	17
Log-sigmoid	Levenberg–Marquardt backpropagation	0.19529	18
	Scaled conjugate gradient backpropagation	0.19589	10
	Bayesian regulation backpropagation	0.19589	7
Linear	Levenberg–Marquardt Backpropagation	0.0053	22
	Scaled conjugate gradient backpropagation	0.0053	5
	Bayesian regulation backpropagation	0.0053	7

الجدول10-35: استخدام (MSE) والعدد الأمثل للخلايا العصبية المخفية لاختيار أفضل شبكة MLP في تقدير النفاذية وعامل القشرة كلا على حدة.

- **النتيجة** : فان أفضل أداء تحقق باستخدام 17 خلية عصبية Neurons في الطبقة المخفية Hidden layer مع دالة التنشيط نوع الظل الزائدي السيني.(tan-sigmoid) و خوارزمية الانتشار العكسي التنظيمي البايزي (Bayesian Regulation) الجدول رقم-10-35 .

6- النماذج النهائية والتحقق (الشكل رقم10-10) :

- بالنسبة للشبكة MLP : بُنيت شبكتان منفصلتان من نوع MLP واحدة للنفاذية والأخرى لمعامل القشرة باستخدام المعايير المثلى السابقة.

- أظهرت المخططات الانحدارية (Regression Plots) و مخططات المقارنة بين القيم المستهدفة والمخرجات توافقاً جيد ، مما يؤكد دقة الشبكتين المدربتين في تقدير هاتين المعلمتين الهامتين.

-في الجزء الثاني: استخدام الشبكات العصبية الاحتمالية (PNN) للتصنيف و(GRNN) العامة الانحدارية

7- تقييم أداء الشبكات

- أظهرت المخططات الانحدارية و مخططات التصنيف توافقاً قوياً لبيانات التقييم، حيث ظهر

ذلك من قيمة معيار الاداء المتدني الذي يعكس مدى تطابقها. و ان ادائية دقة التصنيف Classification على بيانات التقييم كانت 100% (الجدول ادناه رقم-10-36).

المتغير	نوع الشبكة	معيار الأداء	القيمة
النفاذية (K)	MLP	MSE	1.35×10^{-4}
Skin factor	MLP	MSE	2.94×10^{-5}
معامل التخزين (CD)	GRNN	MSE	5.33×10^{-5}
نسبة التخزين (ω)	GRNN	MSE	6.74×10^{-5}
نوع المكمن	PNN	Misclassification	0%
معامل التدفق (λ)	PNN	Misclassification	0%

الجدول 10-36: نتائج اداء الشبكات المختلفة حيث يظهرتوافقاً قوياً لبيانات التقييم من خلال القيم المتدنية لمعيار الاداء

8- اختبار صحة و ادائية الشبكات Testing of Trained Models

لأجل اختبار كفاءة وموثوقية النماذج المعتمدة على الشبكات العصبية الاصطناعية المقترحة في تفسير فحوصات الآبار، جرى اختبارها باستخدام مجموعة من الحالات الحقلية الحقيقية. شملت هذه الحالات , مجموعة من سبعة ابار لفحوصات تصاعد الضغط(Buildup Tests) ، ثلاثة منها تمثل مكامن متشققة من نوع المسامية المزدوجة (VDP) وأربعة لمكامن متجانسة (VH) تغطي ظروفًا مختلفة من حيث خصائص الصخور والمكامن ومعدلات الإنتاج.

9- النتائج: جميع النماذج المكمنية تم تشخيصها بنجاح correctly بنسبة 100%.

- تقدير المعاملات (مخرجات البرنامج) Regression كان قريبًا جدًا من التحليل التقليدي Conventional analysis. و ادرجت الفروقات(الخطأ) في الجدول – 10-37 .

البارامتر	متوسط الخطأ النسبي
النفاذية (K)	5.64%
Skin factor	4.66%
CD	2.70%
ω	5.32%
λ	3.03%

الجدول10-37: نسبة الفرق مابين القيم المقدرة للمعاملات Regression من الشبكات الاصطناعية و القيم الحقيقية من التحليلات التقليدية

5-10 التحديات والاعتبارات في تفسير فحوصات الآبار بتطبيق الذكاء الاصطناعي

يواجه تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي في تفسير فحوصات الآبار عددًا من التحديات المنهجية والعملية، يعود معظمها إلى طبيعة البيانات وتعقيد السلوك الفيزيائي للجريان في المكامن. تُعد جودة البيانات من أبرز هذه التحديات، إذ غالبًا ما تتسم بيانات الضغط ومعدل الإنتاج بالضوضاء، والانقطاعات الزمنية، وعدم الانتظام، مما يؤثر مباشرة في دقة النماذج المعتمدة على التعلم من البيانات. كما أن محدودية البيانات المتاحة لفحص واحد تمثل قيدًا أساسيًا، خاصة عند استخدام نماذج تتطلب قواعد بيانات كبيرة للتدريب.

ومن الاعتبارات الجوهرية أيضًا قابلية تفسير نتائج النماذج الذكية، حيث تميل بعض نماذج الذكاء الاصطناعي إلى العمل كـ«صناديق سوداء»، مما يصعّب ربط المخرجات بالسلوك الفيزيائي المعروف للمكمن، ويحد من ثقة المهندس بالنتائج ما لم تُدعَم بأسس فيزيائية أو تحليلية واضحة. ويبرز تحدي التعميم، إذ قد تعمل النماذج المدربة بكفاءة ضمن حقل أو نوع مكمن محدد، لكنها تفشل عند تطبيقها على ظروف جيولوجية أو تشغيلية مختلفة.

لذا فان التوجه في تفادي هذه المشاكل يكون نحو تطوير نماذج هجينة تدمج الفيزياء التحليلية مع الذكاء الاصطناعي، وليس استبدالها. تشمل هذه الاتجاهات الشبكات المُدرَكة فيزيائياً (Physics-Informed Neural Networks) التي تستخدم التحليل الفيزيائي كأساس مع الذكاء الاصطناعي للتحقق المتبادل و الأتمتة الجزئية. ان الاساس و المبدأ التوجيهي الأساسي في تفسير بيانات فحوصات الآبار يكمن في ان : الفيزياء هي الأساس، والذكاء الاصطناعي سيكون أداة مساعدة وليس بديلاً عن الفهم الفيزيائي.

References -المصادر

1. Allain OF, Horne RN (1990) "Use of artificial intelligence in well-test interpretation". JPT 42(3):342–349. doi:10.2118/18160-PA.
2. Alian C. Gringarten (2008) "From Straight Lines to Deconvolution: The Evolution of the State of the Art in Well Test Analysis" SPE(102079).
3. Al-Kaabi AU, Lee WJ (1990) "An artificial neural network approach to identify the well test interpretation model: applications". Paper SPE 20552 presented at the 65th annual technical conference and exhibition, New Orleans, LA.
4. Bourdet, D., et al. (1983). "Pressure derivative application to well test analysis". SPE Paper 11210.
5. Bourdet, D., Whittle T.M., (1983)." A new set of type curves simplifies well test analysis", World Oil, May, 95–106.
6. Bourdarot G (1999) "Well testing: interpretation methods ".Editions TECHNIP.
7. Dongyan Fan, Can Yang(2025) "A framework of parallel physics-informed neural network with Laplace transform for well testing interpretation". Physics of Fluids 37.014114.
8. Freites A., Corbett P. G. Rongier , Geiger S.(2023) "Automated Classifcation of Well Test Responses in Naturally Fractured Reservoirs Using Unsupervised Machine Learning" , Published online: 18 March 2023 ,https://doi.org/10.1007/s11242-023-01929-1.
9. GOODFELLOW I, BENGIO Y, COURVILLE A.(2016) "Deep learning". Cambridge, MA, USA: MIT Press.
10. Guru N., Prashanth P., Mandar K. (2021) " Deep Similarity Learning for Well Test Model Identification" . SPE-204675-MS.
11. He، Y.، Chen، Z.، & Yu، W. (2023)."Physics-informed neural networks for pressure transient analysis with irregular flow rates". SPE Journal، 28(4)، 1125–1140. **https://doi.org/10.2118/196452-PA**.
12. Hongyang Chu , (2019) "An Automatic Classification Method of Well Testing Plot Based on Convolutional Neural Network (CNN) ". Energies (MDPI) in July 2019.
13. Hongyang Chu; Jingyuan Yang; John Lee(2025) , "A Data-Driven Deep Learning Framework for Pressure Transient Analysis in Large-Scale Underground Gas Storage Systems" SPE-228211-MS.

14. Johann Faouzi, Olivier Colliot (2022) "Classic machine learning algorithms" HAL Id: hal-03830094 https://hal.science/hal-03830094v1.
15. Khaled A., M. H. Abdalla1 • Hamid Khattab (2024) "Enhancing pressure transient analysis in reservoir characterization through deep learning neural networks", Discover Applied Sciences .
16. Kili Technology**.** (2023, July 5). Training, Validation and Test Sets: How To Split Machine Learning Data.
17. Kumoluyi AO, Daltaban TS, Archer JS (1995) "Identification of well test models by use of higher-order neural networks". Paper SPE 27558 presented at the SPE European petroleum computer conference, Aberdeen.
18. Lee WJ (1982) ."Well testing". Society of petroleum engineers of AIME.
19. Mohan K.,Godofredo P. (2002)." Applied Geoststisticals for Reservoir Characterization". Society of Petroleum Engineers, Texas.
20. Toomet, O. (2026). Machine learning lecture notes [Lecture notes]. Information School, University of Washington. Retrieved March 14, 2026, from https://faculty.washington.edu/otoomet/
21. Panel Daolun LI , Xuliang LIU (2020) , "Automatic well test interpretation based on convolutional neural network for a radial composite reservoir" Petroleum Exploration and Development", Volume 47, Issue 3, June 2020, Pages 623-631.
22. Rakesh Kumar Pandey, Shrey Aggarwal,(2022) "Metaheuristic algorithm integrated neural networks for well-test analyses of petroleum reservoirs" **www.nature.com/scientific reports** و 2022 12:16551.
23. Taiyong Li Wu Deng Jiang Wu. (2023) "Advanced Machine Learning Applications in Big Data Analytics" Editorial Office MDPI. doi.org/10.3390/books978-3-0365-8487-4
24. Tiab، D. (1995). "Direct synthesis of well test data" , Journal of Petroleum Scienceand Engineering،13(3–4)،193–204. **https://doi.org/10.1016/0920-4105(95)00020-F**.
25. Vaferi، B.، Eslamloueyan، R.، & Ayatollahi، S. (2011). " Automatic recognition of oil reservoir models from well testing data by using multi-layer perceptron networks". Journal of Petroleum Science and Engineering،77(3–4)،254–262.
https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.03.002

الفصل الحادي عشر

تصميم فحص الابار Wells Test Design

1-11 المقدمة :

تُعد فحوصات الآبار (Well Testing) أداة تحليلية حيوية لفهم سلوك الطبقة المكمنية وتقييم أداء البئر. لكن قبل تنفيذ أي فحص ميداني، يصبح من الضروري تصميم الفحص بعناية لضمان أن الفحص سيُعطي بيانات دقيقة ذات معنى تتوافق مع أهداف المشروع والاعتماد عليها في تقييم خصائص المكمن و ظروف البئر. لا تقتصر أهمية التصميم على الجانب الفني فحسب، بل تشمل أيضًا الاعتبارات الاقتصادية والتشغيلية، لما لفحوصات الآبار من كلفة عالية وتأثيرها على توقف الإنتاج.

تصميم فحص الآبار يمثل المرحلة التحضيرية العملية والفنّية التي تسبق تنفيذ الفحص الميداني ، و يبدأ مبكرًا ، عادةً يبدأ بعد مرحلة تحديد أهداف objectives الفحص وقبل اتخاذ القرار النهائي بالمباشرة بالفحص و بوقت معقول. ان التحضيرات و الاستعداد للفحص هو مفتاح الضمان لنجاح فحوصات الآبار. و لكون عملية التصميم هي عملية تكرارية (محاولات متكررة) تنطوي على مراعاة العديد من التفاصيل الدقيقة للفحص فهي تستغرق دائمًا وقتًا أطول مما نتوقعً. فمثلا التخطيط لاجراء فحص معقد قد يستغرق عامًا كاملا . مثال على ذلك فحص بئر في ظروف مكمنية حرجة من ضغط و حرارة عالية High Pressure/High Temperature HP/HT إذ يستلزم توفير الوقت الكافي لتحديد المعدات الملائمة و ضمان التعديلات الضرورية على جهاز الحفر قبل البدء بالفحص. حتى بالنسبة لفحوصات البئر العادي ، يُفضل أن يبدأ التخطيط قبل إصدار برنامج الفحص بمدة ثلاثة أشهر ليتم إرساله إلى الشركاء ومناقشته وتعديله ثم البت فيه.

مع ذلك و بمجرد حفر البئر و اجراء تخطيط البئر well logging عندها يُمكن الضبط النهائي لتصميم الفحص بدقة ووفق متطلبات الفحص التي يحددها الهدف المرجو من الفحص. ببساطة فتصميم الفحص يعني عملية التنبؤ لما سيكون عليه سلوك الفحص على أساس تحقيق أهداف الفحص و باستخدام ما متوفر انيا من معلومات تتعلق بخواص المكمن ، موائع المكمن و بيانات البئر كما و يتضمن الالتزام بقيود الشركات فيما يتعلق بالكلفة والمدة الزمنية للفحص والسلامة في تنفيذ الفحص و ضمان حفظ البيئة من التلوث.

عادة" ما يُستعان بالحاسوب (واحيانا يدويا) لاعداد برنامج تصميم الفحص ، مستخدما أيًا من البرامج الجاهزة كاداة محاكاة simulator لتوصيف موديل الفحص المتوقع بعد تحقيق تطابق بيانات الضغوط او الانتاج المخمنة estimated غير الحقيقية باستخدام موديل واحد أو أكثر. يُعالج المهندس بيانات المحاكاة هذه كما لو كانت قياسات فحص حقيقية ويحاكي اي تفسيرًا يحقق أهداف الفحص على ان يُضبط السلوكيات المطلوبة عند بدء الفحص. إذا كانت الشكوك في البيانات المتوفرة uncertainties عالية فذلك يستدعي تجريب عدد من السيناريوهات كافية لتغطية نطاق ما يُمكن مواجهته من احتمالات و ظروف خلال الفحص والا فقد يتطلب تصميم الفحص الحاجة لقياسات حقيقية خلال الوقت الفعلي للفحص للحصول على قناعة كافية في النتائج. لقد اصبحت تكنلوجيا المعلومات ونقلها متوفرة بحيث عند بدء الفحص تُرسل البيانات المقاسة مباشرة الى مركز الحاسبة لتحليلها انيا ثم الاستفادة منها لاجراء التعديل المناسب في برنامج التصميم انيا ايضا و عند الحاجة.

- يُمكن للبرامج الجاهزة ان تصل الى محاكاة دقة المقياس Gauge resolution بسهولة لكن هنالك أمرًا بالغ الأهمية و هو الكلفة مقابل ادائية و كفاءة المقاييس المطلوبة. فمثلا تتميز المكامن عالية النفاذية و عبر فحص تصاعد الضغط Build-up بعودة سريعة إلى الضغط المكمني الاصلي P_i وهذا يتطلب مقاييس دقيقة للتحسس باستجابة الضغط على ان نراعي حصر دقة جهاز او عدة قياس الضغط مع التكلفة.

- تصميم فحوصات الابار يُمثل ايضا ممارسة اقتصادية و خلالها يجب التوصل إلى حل وسط بحيث تكون تكلفة الفحص متوافقة مع قيمة المعلومات التي نحصل عليها. في الوضع البحري Off-shore على وجه الخصوص تكون النفقات عالية جدًا و ترتبط بوقت جهاز الحفر إذ ان الوقت المخصص للفحص يقابله تكلفة مادية برغم من ان التوجه الهندسي البحت يستحسن ان تكون فترات الجريان او الغلق عبر الفحص طويلة بما في الكفاية لكي نحصل على بيانات متكاملة.

- كما يتطلب تصميم فحص البئر اهتمامًا خاصًا باجراءات السلامة والتي تمثل أحد الاعتبارات الرئيسة. على سبيل المثال في ظروف حرارة وضغط عالي في مكامن الغاز المتكثف Gas condensate، يتم الاحتفاظ بنظام فحص طبقي DST امن من السطح الى باطن البئر و في نفس الوقت تقليل كثافة المعدات و بساطتها قدر الإمكان لتقليل المخاطر من جراء احتمالية عطلها.

- المَعلمات التي يتم حسابها عند تصميم الفحص تشمل: الوقت اللازم لزوال تأثيرات تخزين البئر، الوقت اللازم لانتهاء فترة الضغط العابرة Pressure transient و تحديد أقصى تغيير في الضغط خلال المدة العابرة و حدود تغيير الضغط في أوقات محددة.

- قبل التطرق الى خطوات تصميم فحوصات الابار ، هنالك بعض الاعتبارات العملية المهمة يجب مراعاتها عند التصميم و تشمل:

- نوع المكمن (Homogeneous،Fractured، Dual Porosity) ، إذ يؤثر على نوع الفحص والمدة المطلوبة.
- نوع البئر ، هل البئرعمودي، أفقي او مائل؟؟.
- نوع المائع (نفط، غاز، ماء).
- حالة البئر المُخطط له ، إنتاجي أو حقن .
- وجود طبقات متعددة أو تداخلات ابار مجاورة هذا قد يؤدي إلى تداخل البيانات و يحتاج إلى تصميم خاص.
- القيود التشغيلية مثل السعة التخزينية على السطح أو وقت التوقف المسموح.

ان اختيار نوع الفحص يُعتبر من الامور المهمة و الحاسمة في تصميم الفحص ، كأن يكون فحص لتصاعد الضغط Build-up او هبوط الضغط Drawdown او فحص متعدد الجريان ، فحص التداخل و غيرها و الاختيار يكون بحسب الغرض من الفحص. بمجرد اختيار الفحص المناسب يصار الى تحديد : طول فترة تأثير تخزين البئر ، طول مدة الفحص Test duration (بالاخص تحديد طول مدة الجريان الشعاعي اللامتناهي) و اقصى استجابة متوقعة للضغط او

فرق الضغط pressure response عبر تلك المدة كذلك تحديد فرق الضغط لأوقات محددة (تحديد اقصى الضغوط سيُمكننا من اختيار معدات قياس الضغط المناسبة). من الامور المهمة الاخرى في التصميم هي في تحديد البيانات المطلوبة لانجاز تصميم الفحص و كيفية الحصول عليها.

2-11 سيناريوهات تصميم فحوصات الابار

في الوقت الذي يهدف تفسير بيانات فحص الابار الى تحديد خواص المكمن و المساعدة في اتخاذ قرارات أفضل في إدارة المكامن، فإن الغرض من التصميم الجيد للفحص هو لضمان إمكانية الحصول على بيانات فحص جيدة ، قابلة للتفسير و ملائمة لتحقيق أهداف الفحص. هنالك العديد من سيناريوهات الفحص تعتمد حالة البئر في كونه انتاجي او للحقن ؟ بئر استكشافي ام تطويري ام بئر تقييمي؟ ، هل الفحص متعدد الابار او الفحص المفرد. بصورة عامة فان السيناريوهات هذه تختلف اختلافًا كبيرًا في أهدافها و في كمية البيانات لكل منها و في تكلفة و تنفيذ الفحص . لغرض الاختصار فالجدول11-1 يلخص انواع السيناريوهات لتصميم الفحص و الاهداف الرئيسة من هذه السيناريوهات.

Scenario	Objective
Drill-stem testing (DST) for exploration/appraisal well	• Collect the fluid sample • Determine reservoir pressure and temperature • Determine in-situ permeability • Formation evaluation
Extended well testing	• Determine hydrocarbons in place • Investigate reservoir boundaries • Estimate reservoir connectivity • Understanding reservoir drive mechanisms • Obtain more data that can't be acquired by short-term testing
Producing well	• Determine average drainage area pressure for material balance calculations, monitor movement of a fluid contact, diagnose specific productivity or injectivity problems
Development well	• Determine skin factors • Optimize completion strategies for subsequent wells • Collect permeability data for future use in reservoir modeling • Analyze reservoir connection in anticipation of implementing improved recovery
Well with rate-dependent skin factor	• To quantify rate-dependent skin factors by conducting a multi-rate test • Provides an inflow performance relationship • Estimates non-Darcy flow coefficient, permeability, and skin factor
Well with low productivity /Injectivity	• Determine the main reason for low or declining productivity or injectivity • Calculating skin factor • Effective permeability • Pressure in the average drainage area
Stimulated well	• Identify stimulation best practices for the reservoir • Determine reservoir permeability after stimulation

الجدول11-1 : انواع السيناريوهات لتصميم الفحص و الاهداف الرئيسة من هذه السيناريوهات.

ادناه امثلة على بعض السيناريوهات :

المثال الاول: تصميم بئر انتاجي مقابل البئر الاستكشافي

تندرج فحوصات البئر الانتاجي Producing well ضمن إحدى الفئتين ، اما مجدولة و هي الشائعة إذ ينفذ الفحص عبر فترات زمنية محددة و دورية و ذلك لتحديد معدل ضغط منطقة الفحص و كذلك لمراقبة ارتفاع مستوى تماس الموائع . او فئة غير مجدولة بإجراء الفحوصات لغرض تشخيص مشكلات إنتاجية انية معينة او مشاكل خلال الحقن.

خلال التاريخ الانتاجي للبئر تتوفر الكثير من البيانات المفيدة لاستخدامها في التصميم فمثلا إذا تم فحص البئر الانتاجي سابقا أو توفر فحص لبئر انتاجي قريب له فلا مانع من استخدام ذات التصميم تلك الفحوصات في البئر الحالي. هذا سيوفر المال اذ ان الابار الانتاجية واطئة النفاذية تستغرق عند الفحص مدة اطول و استجابتها للضغط تكون واضحة عكس الابار ذات النفاذية العالية.

المثال الثاني: البئر الاستكشافي Exploration well : هنالك ثلاثة أهداف أساسية لفحص لآبار الاستكشافية تشمل: جمع عينات من موائع المكمن ، تحديد النفاذية في ظروف المكمن و ضغط ودرجة حرارة المكمن الاصلي، اضافة الى اهداف اخرى مثل تحديد الخزين النفطي او تضرر البئر. عند حفر البئر الاستكشافي فالبيانات المتوفرة تكون محدودة جدا لذا يعتمد تصميم وتخطيط برنامج الفحص فقط على معلومات الجيولوجيا والجيوفيزياء وعلى الأهداف الاقتصادية (يستند التصميم الأولي للفحص على الحد الأدنى للكُلفة).

المثال الثالث: الابار الانتاجية مقابل ابار الحقن**:** الاختلاف فيما بين هذه الابار يكمن في الغرض منها و في طبيعة المعدات و اجهزة القياس المطلوبة لتنفيذ الفحص حيث تكون المعدات و الاجهزة لابار الحقن اعلى كلفة مما للابار الانتاجية .

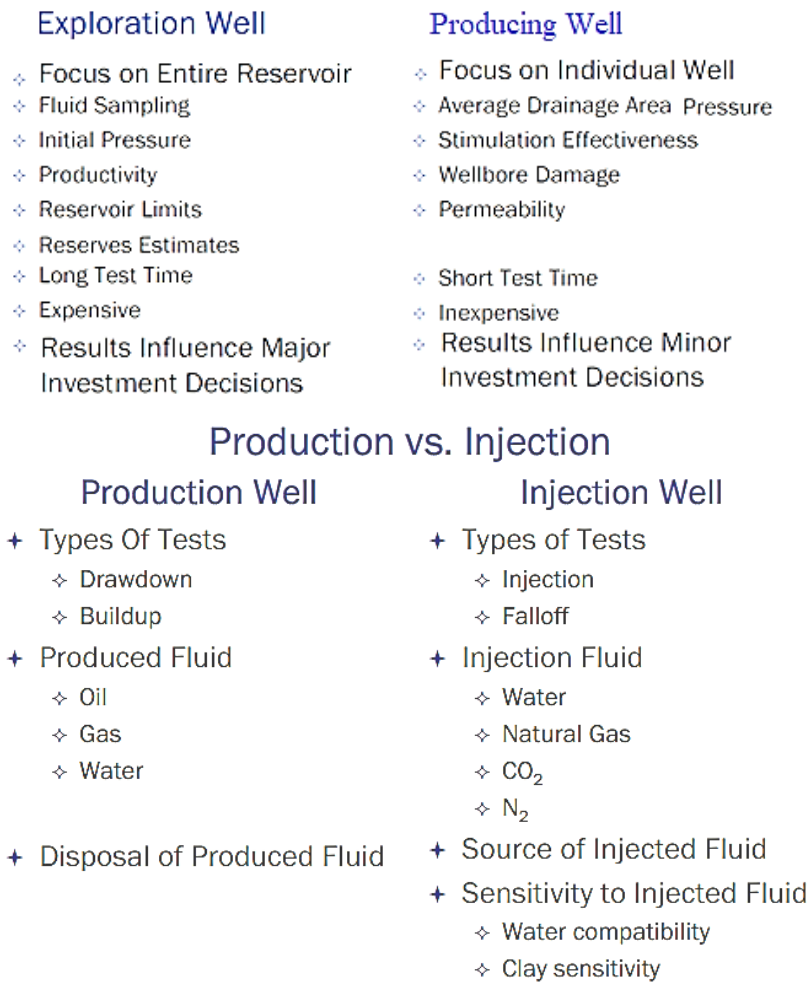
الجدول11-2 يلخص المقارنة ما بين كلا من فحص البئر الاستكشافي و الانتاجي و ما بين البئر الانتاجي و الحقن .

3-11 اساسيات تصميم فحص الابار

تتضمن العناصر المهمة الاتية:

1- تعريف الهدف من الفحص.
2- اختيار نوع الفحص المناسب.
3- جمع البيانات اللازمة للتصميم.
4- تقدير اولي لبعض معاملات المكمن او البئر.
5- تقدير المدة الزمنية لكل مرحلة.
6- اختيار معدات القياس المناسبة.
7- وضع خطة التنفيذ والسلامة.
8- توقع النتائج المحتملة وتحليلها الأولي باستخدام برامج محاكاة.

ان الاستعانة بالموديل المكمني لمحاكات الفحص Simulation و الطرق التحليلية Analytical و العلاقات التجريبية Correlations هي ادوات مهمة في بناء برنامج تصميم الفحص.



الجدول11-2 : مقارنة ما بين كلا من فحص البئر الاستكشافي و الانتاجي (الاعلى)
و ما بين بين البئر الانتاجي و بئر الحقن(الاسفل) .

الجدول11-3 يتضمن عناصرتصميم فحص الابار.

11-3-1 تعريف الغرض من الفحص - Define Test Objectives

الخطوة الأولى في تصميم فحص البئر هو في تحديد الغرض او الهدف من الفحص. أُدرجت في الجدول11-4 ملخص لاهم اهداف الفحوصات و من هذه الاهداف:

الحصول على عينات لموائع المكمن، تحديد مقدار الضرر Degree of damage ، تقييم مدى فعالية عملية تنشيط البئرEvaluating stimulation ، المسافة إلى حدود المكمن Distance to reservoir boundaries ، حجم الهيدروكربونات Hydrocarbons in place ، الحجم المسامي Pore volume ، مساحة منطقة تصريف Drainage area ، ضغط المكمني الاصلي (الاولي) أو متوسط الضغط Initial or Average drainage area pressure و اتصال طبقات المكمن connectivity و غيرها.

Define Test Objectives

Fluid sampling
In-situ permeability
Distances to boundaries
Hydrocarbons in place
Average drainage area pressure

Consider Alternatives to Well Testing

Wireline formation testing
Log-derived permeability estimates
Rate-transient/production data analysis

Collect Data

Estimate Reservoir Properties

Permeability
Skin factor
Wellbore storage coefficient
Distances to boundaries
Hydrocarbons in place

Estimate Time to Reach Flow Regimes...

Time to end of wellbore storage
Surface shut-in
Bottomhole shut-in
Time to reach specific flow regimes
Time to reach desired radius of investigation
Time to prove minimum hydrocarbons in place

...Or, Estimate Time to Verify Economics

Estimate minimum J
Draw horizontal line for J
Estimate minimum OOIP
Draw unit-slope line for OOIP
Economic well must have derivative below horizontal line, and cross unit-slope line to confirm economic reservoir

Estimate Flow Rate

Low enough to avoid bubblepoint or dewpoint
High enough to lift liquids
High enough to get clean pressure response
Low enough to maintain critical flow
Low enough to sustain rate for entire flow period

Determine Flow Rate Sequence

Estimate Magnitude of Pressure Response

Infinite-acting radial flow
Linear flow
Pseudosteady-state flow

Select Gauges

Operating temperature and pressure range
Accuracy
Resolution
Drift
Stabilization time

Simulate Test

Simulate wellbore hydraulics
Simulate reservoir pressure response
Analyze simulated pressure response
Does test design satisfy test objectives?

الجدول11-3 : عناصرتصميم فحص الابار

ان الأهداف المذكورة في الجدول أعلاه شاملة ، لكن ليست هي بالقائمة النهائية ،قد يضاف لها عدة اهداف أُخر و حسب طبيعة الفحص. لاحظ انه بالامكان حساب و تخمين العديد من الأهداف أعلاه من مصادر غير الفحص ، مثلا إمكانية تحديد النفاذية من اللباب الصخري cores او من تفسير مجسات (سجلات) الابار well logs المفتوحة اضافة الى فحص الابار.

الفقرة الاخيرة من الاهداف في الجدول 11-4 (To satisfy regulatory obligations) تتعلق بتنفيذ و الالتزام بالتعليمات والاوامر الصادرة من الدوائر الحكومية فيما يتعلق بمخرجات الفحص و في امور الحفاظ على البيئة. لا نتطرق الى شرح الاهداف إذ سبق التطرق لاهداف فحوصات الابار المختلفة في الفصول السابقة .

Important well test objectives:

- Reservoir pressure & temperature.
- Well bore storage.
- Boundary Information - Radius of investigation -drainage area calculations.
- To obtain fluid samples for laboratory analysis.
- To estimate in-situ permeability.
- To quantify damage or stimulation.
- To estimate distances to boundaries.
- To estimate hydrocarbons in place or drainage area.
- To estimate initial or average drainage area pressure.
- To evaluate reservoir connectivity.
- To Determine storativity.
- To Evaluate reservoir heterogeneities.
- To Assess fracture length and conductivity.
- To Assess completion and stimulation productivity.
- To satisfy regulatory obligations.

الجدول11-4 : اهداف فحوصات الابار

11-3-2 اختيار نوع الفحص المناسب:

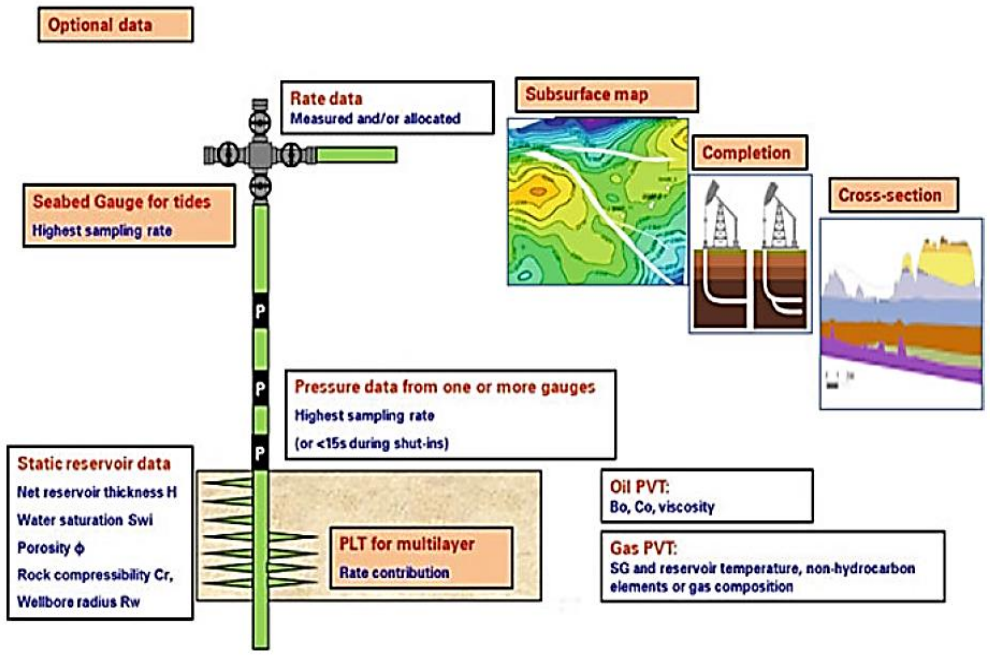
حسب الهدف من الفحص وظروف المكمن، يُمكن اختيار أحد الفحوص الاتية:

- فحص هبوط الضغط Drawdown Test
- فحص تصاعد الضغط Build-up Test
- احدى فحوصات الحقن مثل Injection/Falloff، Step Rate Test
- فحوصات التداخل Interference or Pulse Test

11-3-3 تجميع البيانات Data collection

التصميم الجيد للفحص يتطلب تجميع البيانات اللازمة عن البئر و المكمن والموائع. بالنسبة للآبار الاستكشافية فالبيانات المتاحة في البداية تقتصر على البيانات الزلزالية و الموديل التركيبي الناتج من تفسير تلك البيانات. بعد حفر البئر ستتوفر سجلات البئر المفتوح well logs ، و نماذج لموائع المكمن، برغم من ذلك فلا يتوفر الوقت الكافي للتفسير التفصيلي لهذه البيانات قبل بدء الفحص.

اما الابار التطويرية فالمعلومات تكون قد توفرت بفعل التاريخ الانتاجي للبئر اضافة للعمليات الحقلية الانية التي تجري على البئر او من نتائج تحاليل مختبرية او تفسير سجلات الابار او نتائج عمليات التحميض للطبقة المكمنية و غيرها .الشكل11-1 يُوضح مجموعات البيانات و مصادر الحصول عليها.



الشكل11-1 : البيانات عند تصميم الفحص و مصادر الحصول عليها

11-3-4 تخمين الخصائص المكمنية Estimate Reservoir Properties

يتطلب تصميم الفحص تقديرات(تخمين) اولية تقريبية (قد تُفرض) للخصائص و التي سيتم تحديدها فيما بعد من الفحص منها على سبيل المثال: النفاذية، عامل القشرة ،معامل تخزين البئر المسافات إلى حدود المكمن والضغط المكمني و غيرها.

1- تقدير(تخمين) قيمة النفاذية عند تصميم الفحص

من المفارقات أن التصميم الجيد للفحص يعتمد على تقدير معقول لنفاذية المكمن المراد فحصه و في نفس الوقت فان حساب و تحديد النفاذية هو هدف رئيسي للفحص. من الممكن الحصول على تقدير اولي للنفاذية من المصادر الرئيسة الاتية :

- من آبار قريبة nearby wells مجاورة ، مثقبة و تنتج من نفس الطبقة المكمنية المستهدفة في الفحص للبئر الحالي.
- النفاذية من بيانات سجل الابار well logs.

الاستقادة من سجل الابار في تخمين النفاذية وذلك من خلال توفر المسامية φ و التشبع المائي Connate water saturation-S_{wirr}. على سبيل المثال معادلة Timur التي طورتها شركة Chevron تحسب النفاذية كما يأتي:

$$\sqrt{k} = 100\frac{\phi^{2.25}}{S_{w,irr}} \quad k: md \text{ ---------- } 1$$

او تطبيق معادلات تيمور و كوتز Coates or Timur والتي تربط بين النفاذية والمسامية وتشبع المائع.

- تخمين النفاذية من بيانات فحوصات لباب الصخور cores في المختبر، فبوجود بيانات من عينات لباب مأخوذة من نفس الطبقة، تعطي تقديرًا جيدًا للمدى المتوقع للنفاذية.
- تخمين النفاذية بطريقة النقطة الواحدة (Lee et al. 1984) one point method

هي طريقة بسيطة لتقدير نفاذية الطبقة المكمنية عند توفر قراءة واحدة للضغط والجريان (أثناء تشغيل قصير) تفترض ان الجريان شعاعي لامحدود وحيد الطور. ان سلوك الضغط لبئر منتج Producer تحت تاثير الجريان الشعاعي اللامحدود Infinite-acting radial flow يكون حسب المعادلة في ادناه:

$$p_i - p_{wf} = \frac{70.6qB\mu}{kh}\left[\ln\left(\frac{kt}{1{,}688\phi\mu c_t r_w^{\,2}}\right)+2s'\right] \quad \text{---------- 2}$$

بالترتيب فيُمكن حساب النفاذية لنقطة واحدة كما يأتي:

$$k = \frac{141.2qB\mu}{h\left(p_i - p_{wf}\right)}\left[\ln\left(\frac{r_d}{r_w}\right)-\frac{3}{4}+s'\right] \quad \text{---------- 3}$$

وان r_d يمثل نصف القطر الواصل الى منطقة طور الجريان اللامحدود و يُساوي :

$$r_d = \sqrt{\frac{kt}{377\phi\mu c_t}} \quad \text{---------- 4}$$

وان الزمن $t = t_p$

اذ ان t_p للبئر النفطي يساوي :

$$t_p = (24N_p/q) \quad \text{---------- 5}$$

و للبئر الغازي يساوي :

$$t_p = \frac{24\,G_p}{q_g} \quad \text{---------- 6}$$

في حال ان معدل هبوط الضغط Drawdown للبئر الغازي اقل من نسبة 10% من الضغط الاصلي للمكمن ، فان حساب اللزوجة و المعامل الحجمي للغاز Bμ يجري عند الضغط الاصلي للمكمن ، اما اذا كان هبوط الضغط Drawdown اعلى من ذلك فان حساب خواص الغاز يجري عند معدل الضغط الحسابي اي ان :

$$\bar{\bar{p}} = 0.5\left(\bar{p} + p_{wf}\right) \quad \text{---------- 7}$$

$P^{=}$ = average reservoir pressure، psi ،p^{-} = initial pressure، psi، pwf = flowing bottomhole pressure، psi ،Np = cumulative oil production، STB ،Gp = cumulative gas production ، Mscf ،q = flow rate، STB/D، q_g = gas flow rate، Mscf/D، r_d = transient-drainage radius، ft، r_w = wellbore radius، ft ، B = formation volume factor، bbl/STB، ct = total compressibility، psi^{-1} ، k = permeability، md، s = skin factor، dimensionless، s′ = total skin factor، dimensionless ، μ = viscosity، cp ،Ø = porosity، fraction ، h = net-pay thickness، ft ،t = time، hour ،tp = Horner pseudoproducing time، hour

الطريقة لا تصلح للمكامن المعقدة أو الشقوق أو الجريان متغير و يُمكن تحسين التقدير لاحقًا باستخدام تحليل المنحنيات المتكامل. لايجاد النفاذية بالطريقة اعلاه نستخدم اسلوب المحاولة و الخطأ – trial and error كما في المثال ادناه.

مثال-1 حساب النفاذية بطريقة النقطة الواحدة one point method.

حدد نفاذية المكمن الاولية بحسب بيانات البئر الغازي في الجدول11-5 في ادناه:

G_p	2093 MSCF	C_t	1.78×10^{-4} psi^{-1}
h	23 ft	S	0
ϕ	15%	B_{gi}	0.810 BBL/MSCF
p_i	3450 psi	P_{wf}	2387 psia
r_w	0.33 ft	q_g	6278 MSCF/D
μ_{gi}	0.0209 cp		

الجدول11-5 : بيانات المثال رقم-1.

- حساب طول مدة الإنتاج t_p كما يأتي:

$$t_p = \frac{24\,G_p}{q_g} = \frac{24 \times 2093}{6278} = 8 \text{ hr}$$

- نفرض قيمة اولية للنفاذية تساوي k=0.1 md (لاحظ للابار الغازية نفرض قيمة k=0.1 md وللابار النفطية ممكن ان نفرض قيمة k=1-10 md)

- حساب نصف قطر التصريف r_d كما في ادناه:

$$r_d = \sqrt{\frac{kt}{377\phi\mu c_t}}$$

$$= \sqrt{\frac{0.1 \times 8}{377 \times 0.15 \times 0.0209 \times 1.78 \times 10^{-4}}} = 62 \text{ ft.}$$

- حساب النفاذية باستخدام المعادلة رقم-3 و كما يأتي:

$$k = \frac{141.2 q_g B_{gi} \mu_{gi}}{h(p_i - p_{wf})}\left[\ln\left(\frac{r_d}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + S\right]$$

$$k = \frac{141.2 \times 6278 \times 0.810 \times 0.0209}{23 \times (3450 - 2387)}\left[\ln\left(\frac{62}{0.33}\right) - \frac{3}{4} + 0\right] = 2.8\ \text{mD}.$$

- نُعيد المحاولة باستخدام المعادلة رقم-4 لحساب نصف القطر على اساس قيمة النفاذية الجديدة:

$$r_d = \sqrt{\frac{2.8 \times 8}{377 \times 0.15 \times 0.0209 \times 1.78 \times 10^{-4}}} = 323\ \text{ft}.$$

❖ ثم نُعيد حساب النفاذية :

$$k = \frac{141.2 \times 6278 \times 0.810 \times 0.0209}{23 \times (3450 - 2387)}\left[\ln\left(\frac{323}{0.33}\right) - \frac{3}{4} + 0\right] = 3.8\ \text{mD}.$$

نُكرر المحاولة لحساب نصف القطر من قيمة النفاذية الجديدة :

$$r_d = \sqrt{\frac{3.8 \times 8}{377 \times 0.15 \times 0.0209 \times 1.78 \times 10^{-4}}} = 379\ \text{ft}.$$

$$k = \frac{141.2 \times 6278 \times 0.810 \times 0.0209}{23 \times (3450 - 2387)}\left[\ln\left(\frac{379}{0.33}\right) - \frac{3}{4} + 0\right] = 3.86\ \text{mD}.$$

القيمة الاخيرة للنفاذية تقترب من سابقتها و تختلف بحدود 3% والفرق مقبول.

لاحظ ان تقديرات ما قبل الفحص اي عند التصميم تكون بناءً على مقارنات من ابار او مكامن مناظرة للمكمن الحقيقي اضافة الى الخبرة و تخضع للتحقق من صحة استجابة الضغط الفعلية أثناء الفحص.

2- تحديد عامل القشرة

عامل القشرة الكلي هو ثابت يستخدم لضبط معادلة الجريان لتناسب تطبيقها في الظروف غير المثالية . إن عامل القشرة يُستخدم للنظر في الآثار المتجمعة لعدة امور لم يتم أخذها بنظر الاعتبار في الأساس النظري عند اشتقاق معادلات الجريان و التعبير الشامل لعامل القشرة يكافيء:

$$S = S_D + S_{C+\theta} + S_P + \sum S_{PS}, \quad \text{----------} \quad 8$$

إذ ان S يتالف من عدة مركبات وهي ; S_D يمثل عامل الضرر نتيجة عمليات الحفر او الاكمال او التسميت ، $S_{C+\Theta}$: يمثل جزء عامل القشرة نتيجة لتاثير انحراف البئر عن العمودية بزاوية Θ او نتيجة للاكمال الجزئي للبئر ، S_P يمثل تاثير اكمال بطانة البئر well casing و يعتمد على عدد الاطلاقات (كثافتها) عمقها و زاوية و قطر التثقيب. $\sum S_{PS}$-Pseudo skin يمثل جزء عامل القشرة بسبب تاثير جريان اللادارسي non-Darcy effect في الابار الغازية او تاثير

الجريان متعدد الاطوار multiphase flow.

المركبات هذه لا يُمكن تمييزها بشكل منفصل عدا بعضها ، لذا يُعبر عنها بقيمة واحدة جامعة S.

عامل القشرة مهم في تصميم الفحص في حال عدم توفره يُمكن فرض قيمته اعتمادا على نوع الاكمال و كما في الجدول11-6 ادناه.

Type of Stimulation or Completion	Skin Factor *(s)*
Natural completion	0
Small acid treatment	–1.0
Intermediate acid treatment	–2.0
Large acid or small fracture treatment	–3.0
Intermediate fracture treatment	–4.0
Large fracture treatment in low-permeability reservoir	–6.0
Very large fracture treatment in low-permeability reservoir	–8.0
Fracpack	0 to +8

الجدول11-6 : تقدير قيم عامل القشرة حسب نوع اكمال البئر well completion.

قدّم ستاندنغ(1979) Standing حدود لقيم عوامل القشرة الإجمالية تتراوح من 0.25 إلى 4 في الحالات التي لا يُمكن فيها الحصول على تخمين لعامل القشرة .

5-3-11 تخمين الفترات الزمنية لاطوار الجريان المتوقعة Estimate Test Period to Reach Expected Flow Regime

واحدة من أهم معايير التصميم هي طول مدة الفحص اذ ان الوقت يمثل كُلفة cost وقد تكون الكُلَف عالية خصوصا في الآبار الاستكشافية البحرية. ان تكلفة الفحص لا يُمكن استردادها مما يتوجب ان تكون قيمة البيانات من جراء الفحص تحقق الهدف من الفحص.

في الفقرات التالية ننظر في الوقت المناسب للوصول إلى أنظمة او اطوار الجريان المرغوبة لفحص مثالي يُنجز بمعدل جريان ثابت ، بقليل من الضوضاء noise في اشارة الضغط pressure signal المتوقعة أو بدون ضوضاء خلال الفحص ، اضافة الى امكانية تحديد طول مدة الفحص الكلي" Test duration .

1- تخمين بداية فترة المنطقة الوسطى Time to Beginning of Middle Time Region-MTR

المنطقة الوسطى هي منطقة الجريان الشعاعي اللامحدود وتحديد بدايتها او المدة التي تستغرقها عبر تصميم الفحص مهم جدا لكون تحليل البيانات من خلالها نحصل على نفاذية الطبقة و معامل القشرة. تاثير تخزين جوف البئر - WBS يشكل في بعض الفحوصات مشكلة للوصول لهذه المنطقة خصوصا عند فحص المكامن قليلة النفاذية. فلو كان الفحص يعتمد الاغلاق من على السطح وليس الاغلاق عند قاع البئر ، فهنا يساهم حجم أنبوب الانتاج بالكامل في احداث تأثير

التخزين. بينما في حال الإغلاق في قاع البئر (صمام الغلق و الفتح عند القاع) سيختفي تاثير التخزين في هذه الحالة . و للتحوط و لتلافي تاثير WBS يتطلب ان تكون مدة تصاعد الضغط Build-up ما لا يقل عن 50-60 ساعة للحصول على فترة زمنية مقبولة نضمن عندها ظهور الخط المستقيم نصف لوغاريتمي للمنطقة الوسطى (MTR) (لتحديد الميل و منه في حساب النفاذية) بشكل واضح.
حتى نحدد بداية منطقة الجريان الوسطى MTR فلا بد من ان ناخذ بنظر الاعتبار حساب ثلاثة فترات زمنية منفصلة و هي: فترة نهاية تخزين الآبار بالنسبة للآبار غير المنشطة Unstimulated wells ، و فترة بداية الخط المستقيم نصف اللوغاريتمي للآبار المنشطة Stimulated wells و فترة نهاية الجريان الكروي أو الجريان نصف الكروي Spherical flow or Hemispherical flow بالنسبة للابار المخترقة المكمن كليا لكن التثقيب محدود (partial perforation) او للابار المخترقة الطبقة جزئيا limited entry.

- الوقت لنهاية مدة تخزين البئر في الابار غير المنشطة Time to End of Wellbore Storage –WBS (not stimulated)،

- نقطة نهاية الـ :(End of Wellbore Storage- WBS) هي اللحظة الزمنية التي يبدأ بعدها سلوك الضغط في الاستجابة لخصائص المكمن الحقيقية .تحديد هذه النقطة بدقة هو أمر بالغ الأهمية لبدء التحليل الصحيح للبيانات.
- لفحص هبوط الضغط Drawdown test او الحقن Injectivity test فان نهاية مدة تخزين جوف البئر - WBS عادة ما يتم تحديدها من معادلة (Earlougher 1977):

$$t_{eWBS} > \frac{(200{,}000 + 12{,}000S)\mu}{kh} C \quad \text{---------- 9}$$

و بدلالة الزمن اللابعدي كالاتي :

$$\left(\frac{t_D}{C_D}\right)_{eWBS} = 60 + 3.5s \quad \text{---------- 10}$$

إذ ان t_{eWBS} يمثل الوقت بالساعات لانتهاء مدة تخزين جوف البئر - Time to end of Wellbore storage-WBS
- في حال توفر دليل (او مؤشر)الانتاجية للبئر Productivity index-J يُمكن استخدام المعادلة الاتية:

$$t_{eWBS} = \frac{200C}{JB} \quad \text{----------11}$$

المعادلتان رقم-9 و رقم- 11 تفترضان ان البئر يخترق الطبقة المكمنية بالكامل و مفتوحة للانتاج بالكامل ، تخزين جوف البئر - WBS ثابت و لا يوجد تاثير لتضرر اللادارسي non-darcy skin وان عامل القشرة موجب او صفر. لحل المعادلتين ، نحتاج الى تقدير قيمة معامل تخزين جوف البئر C- WBS من تفاصيل الاكمال و فرض قيمة kh/μ (السُمك من التقارير الجيولوجية ، اللزوجة من علاقات عامة (الفصل الاول/الجزء الاول) و النفاذية كما في الفقرة السابقة) و قيمة لعامل القشرة s . إذا كانت قيمة $s < 0$ يُوصي بجعل $s = 0$ و ذلك للحصول على نتائج متحفظة.

كما و يُمكن تحديد وقت انتهاء مدة تخزين جوف البئر باعتماد وقت الجريان اللامستقر من مشتقة الضغط في منطقة الجريان اللامستقر (الخط الافقي) إذ نأخذ نسبة سماح Tolerance (زيادة بالوقت اضافية) مره 10% و اخرى 20% من وقت الوصول لمنطقة الجريان اللامستقر ، و يُحسب وقت نهاية مدة تخزين جوف البئر - WBS للحالتين على التوالي وكما يأتي(ممكن مراجعة المثال رقم-2 للتطبيق):

$$t_{eWBS} = \left\{23{,}500 \ln\left(C_D e^{2s}\right) + 80{,}000\right\} \frac{\mu}{kh} C \quad \text{----------12}$$

$$t_{eWBS} = \left\{40{,}000 \ln\left(C_D e^{2s}\right) + 180{,}000\right\} \frac{\mu}{kh} C \quad \text{----------13}$$

اذ ان تخزين البئر اللابعدي C_D يساوي:

$$C_D = \frac{0.894}{\phi c_t h r_w^{\,2}} C \quad \text{----------14}$$

و بدلالة الزمن اللابعدي فيكون على التوالي:

$$\left(\frac{t_D}{C_D}\right)_{eWBS} = 6.93 \ln\left(C_D e^{2s}\right) + 23.7 \quad \text{----------15}$$

$$\left(\frac{t_D}{C_D}\right)_{eWBS} = 11.84 \ln\left(C_D e^{2s}\right) + 53 \quad \text{----------16}$$

تشترط المعادلتان اعلاه ان مجموعة تخزين البئر اللابعدي $C_D e^{2s}$ تكون اكبر او يساوي:

$$C_D e^{2s} \geq 10^3 \quad \text{----------17}$$

لملاحظة الفرق ما بين المعادلات الثلاثة رقم-10، 15 و 16 تم رسمها في الشكل11-2 إذ ان اطول مدة لضمان انتهاء تاثير تخزين البئر تكون عند معادلة نسبة سماح 20% واقلها للزمن المحسوب من المعادلة رقم-16 .

حيث ان :

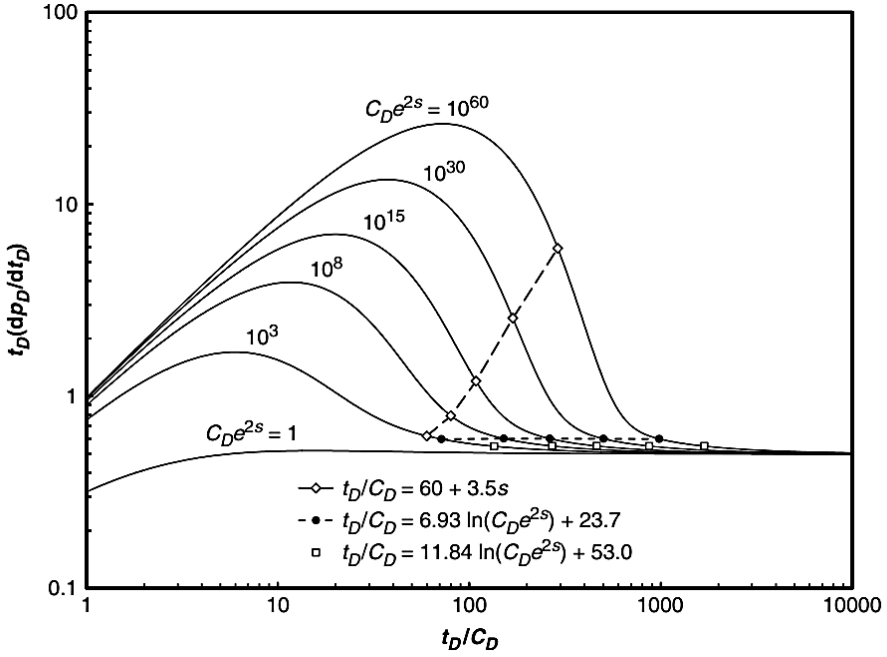
C = wellbore-storage coefficient، bbl/psi ، t_D = dimensionless time، t_{eWBS} = time to end of wellbore storage، hour

فمثلا لو كانت القيم : $c_t = 171 \times 11^{-6} psi^{-1}$، $r_w = 0.5ft$، $h = 250ft$، Ø-fraction، $k = 100md$

$s = 70.28$، $C = 0.06$ bbl/psi فان C_D تساوي:

$$C_D = \frac{0.894}{\phi c_t h r_w^{\,2}} C = \frac{0.894}{(0.27)\left(171 \times 10^{-6}\right)(250)(0.5)^2}(0.065) = 20.14$$

$$C_D e^{2s} = 20.14 e^{(2)(70.28)} = 2.25 \times 10^{62}.$$



الشكل11-2 : مقارنة نهاية مدة تخزين البئر حسب المعادلات الثلاثة رقم 16، 15 ، 10

وقت نهاية تخزين البئربحسب المعادلة رقم-14 يساوي:

$$t_{eWBS} = \left[40{,}000 \ln\left(C_D e^{2S}\right) + 180{,}000\right] \frac{\mu}{kh} C$$

$$= \left[(40{,}000) \ln\left(2.25 \times 10^{62}\right) + 180{,}000\right] \frac{(0.0225)}{(100)\,(250)} (0.065) = 0.346 \text{ hour.}$$

- الوقت لنهاية مدة الجريان الكروي او نصف الكروي- Time to End of Spherical or Hemispherical Flow

عند الانتقال من فترة تخزين جوف البئر - WBS إلى فترة الجريان الشعاعي اللامحدود قد يظهر تاثير الجريان الكرويً أو الجريان نصف الكرويً على استجابة الضغط المقاس في حال كون البئر يخترق الطبقة جزئيا او قد يخترق الطبقة كليا لكن التثقيب جزئيا (لا يغطي سمك الطبقة كليا).

- هنا يُمكن تحديد الوقت الذي ينتهي فيه **الجريان الكروي** Spherical flow كما يلي:

$$t = 300 \frac{\emptyset \mu c_t h^2}{k_v} \quad \text{----------} \quad 18$$

- و بدلالة الزمن اللابعدي فيكون كالاتي:

$$t_D = 0.08 h_D^{\,2}. \quad \text{----------} \quad 19$$

إذ ان السُمك اللابعدي h_D يساوي :

$$h_D = \frac{h}{r_w}\sqrt{\frac{k_h}{k_v}} \quad \text{---------- 20}$$

- ان الوقت الذي ينتهي فيه طورالجريان نصف كرويHemispherical flow يُحسب كما في المعادلة التالية:

$$t = 1.200\frac{\emptyset\mu c_t h^2}{k_v} \quad \text{---------- 21}$$

و بدلالة الزمن اللابعدي فيكون كالاتي:

$$t_D = 0.32h_D^2 \quad \text{---------- 22}$$

- الوقت حتى بداية الجريان الشعاعي اللامحدود لبئر مُنشط *Time to Beginning of Infinite-Acting Radial Flow for a Stimulated Well*:

إذا كان في المخطط اجراء عملية تنشيط او تحفيز Stimulation للبئر فيُمكن تقدير الوقت اللازم لبداية ظهور طور الجريان الشعاعي باستخدام المعادلة الاتية :

$$t = 94,800\frac{\emptyset\mu c_t r_{wa}^2}{k} \quad \text{---------- 23}$$

إذ ان :

$$r_{wa} = r_w e^{-s} \quad \text{---------- 24}$$

و بدلالة الزمن اللابعدي فيكون على الاتي:

$$\frac{t_D}{C_D} = \frac{25}{C_D e^{2s}} \quad \text{---------- 25}$$

إذا كانت النفاذية أحد أهداف تصميم فحص الابار وليس حدود المكمن فان المعادلات اعلاه تضمن أن يكون الفحص طويلًا بما يكفي ليكون تاثير الجريان اللامحدود خارج المنطقة القريبة من حفرة البئر. و لكي نضمن ظُهور منطقة الجريان الشعاعي اللامحدود في منحنى مشتقة الضغط فيجب أن تكون مدة الفحص على الأقل من 3 إلى 5 مرات (بما لا يقل عن 1/2 إلى 2/3 دورة لوغاريتمية ضمن مدة الطور الشعاعي) مدة التأثيرات القريبة من حفرة البئر مثل تاثير تخزين البئر wellbore sorage ، الجريان الكرويspherical flow و التنشيط stimulation . او بما يعادل عن 1-1.5 cycles in time دورة لوغاريتمية من الرسم اللوغاريتمي التشخيصي بعد انحراف منحني مشتقة الضغط عن خط ميل الواحد لمنطقة تخزين جوف البئر (الشكل11-2) .

r_w = wellbore radius، ft ، r_{wa} = apparent wellbore radius، ft ، s = skin factor، k_h = horizontal permeability، md ، k_v = vertical permeability، md ، h_D = dimensionless thickness، ft

2- تحديد بداية مدة طور الجريان شبه المستقر Pseudo Steady State-PSS

- بئر في مكمن مغلق Well in a Closed Reservoir.

عند توفر خواص المكمن و اذا كان الهدف من تصميم الفحص هو في الوصول الى حدود المكمن و تحديد نوعه و المسافة الى حدود المكمن، فيجب تقدير الوقت اللازم لبدء الدخول الى منطقة الجريان شبه المستقر اي بدء الخط المستقيم المرسوم على مرتسم بياني عادي Cartesian لعلاقة الضغط مقابل الوقت او بداية الخط المستقيم بميل الواحد على الرسم اللوغاريتمي التشخيصي Diagnostic plot في المدة المتاخرة من الفحص و يُحسب كما يأتي:.

$$t = 948\frac{\emptyset\mu c_t r_e^2}{k} \quad \text{---------- 26}$$

او من الوقت اللابعدي و يساوي:

$$t_{pss} \equiv \frac{\varphi\mu c_t A(t_{DA})_{pss}}{0.0002637k} \quad \text{---------- 27}$$

إذ ان t_{pss} يمثل الوقت عند بداية الدخول في مرحلة الجريان شبه المستقر و الذي عنده يتقاطع الخط الأفقي لمشتقة الضغط عند طور الجريان الشعاعي مع خط ميل الواحد الذي يمثل بداية سلوك الجريان شبه المستقر. ان $(t_{DA})_{pss}$ يقرأ من العمود الخامس في الجدول4-1 (الفصل الرابع/الجزء الاول) "Exact for t_{DA}>.".

*البئر في شق او قناة *Well in a Channel*

المعادلة ادناه تعطي الوقت الذي عنده يتقاطع الخط الأفقي(مشتقة الضغط) للجريان الشعاعي اللامحدود مع خط ميل النصف الذي يمثل انتهاء طورالجريان الخطي للشق او القناة :

$$t = 300\frac{\emptyset\mu c_t w^2}{k} \quad \text{---------- 28}$$

ft ،w= width of channel or fracture

*وجود حد عازل واحد–*Single no-flow boundary*

باستخدام معادلة نصف قطر منطقة البحث r_i ، مع استبدال طول المسافة L من البئر الى حدود المكمن بدلا عن r_i، و بترتيب المعادلة لحساب الوقت الذي ينتهي فيه التدفق الشعاعي اللانهائي لبئر بالقرب من حد واحد مفرد ، تصبح كما يلي:

$$t = 948\frac{\emptyset\mu c_t L^2}{K} \quad \text{---------- 29}$$

ft. ،L = distance to boundary

بصورة عامة و لضمان المدة الكافية للوصول الى اطوار الجريان اعلاه فيجب أن تكون طول مدة الفحص على الأقل من 3 إلى 5 أضعاف الفترات المحسوبة من استخدام المعادلات الثلاثة اعلاه .

*في نظام المكمن المتشقق طبيعيا ثنائي المسامية ، فان بداية و نهاية الخط المستقيم المائل الثاني في الرسم نصف-لوغاريتمي يكون على التوالي :

$$t_D = C_D(60 + 3.5\,s) \quad \text{---------- 30}$$

و

$$t_D = \frac{\omega(1-\omega)}{6.6\,\lambda} \quad \text{---------- 31}$$

❖ نهاية المنطقة الانتقالية في نظام المكمن المتشقق طبيعيا - ثنائي المسامية يكون عند الوقت :

$$t_D = \frac{1.2(1-\omega)}{\lambda} \quad \text{---------- 32}$$

ω= dimensionless fracture storativity.

λ= dimensionless interporosity flow coefficient.

3-تحديد طول مدة(فترة) الفحص Test Duration

يجب أن تكون طول المدة الإجمالية لإجراء الفحص كافية لضمان الوصول إلى استجابة المكمن موضوع البحث او الهدف وهذا الذي يهُمنا. على سبيل المثال، إذا كان الهدف من الفحص هو تقييم فعالية التحميض Acidizing في إزالة عامل القشرة (تضرر الطبقة)، فمن الضروري الحصول على بيانات كافية تتجاوز فترة تخزين جوف البئر و ذلك لنتمكن من تحديد الخط المستقيم نصف لوغاريتمي، خصوصا إذا كنا نعتمد طريقة الدورة اللوغاريتمية كاملة one logartmic cycle للتفسير في منطقة طور الجريان الشعاعي اللانهائي ، لذا فسيتعين إجراء الفحص لمدة لا تقل عن :

$$t_D \geq 10 \times C_D(60 + 3.5\,s) \quad \text{---------- 33}$$

من ناحية أخرى، اذا كان مطلوبًا تخمين نصف قطر منطقة تصريف البئر r_e ، فسنحتاج إلى فترة كافية لنحصل على استجابة الضغط ضمن منطقة طور الجريان شبه المستقر PSS . وربما نحتاج ايضا الى دورة لوغاريتمية كاملة على فرض أن شكل منطقة تصريف البئر دائرية ، عليه يتعين إجراء الفحص لمدة لا تقل عن:

$t_{DA} \geq 1$ ---------- 34

- لاحظ عند تخمين أوقات الفحص نضع في الاعتبار فيما إذا كان جزء من استجابة الضغط المطلوبة تتداخل و تتجاوز على استجابة الضغط لطور جريان لاحق و ربما يؤدي ذلك الى إخفاء جزء مهم من بيانات مهمة في البحث.

على سبيل المثال، عندما يُظهر البئر تخزين storage عالي في مكمن صغير نسبيًا، سينعكس هذا على استجابة الضغط ، بحيث قد يستمر تاثيرها إلى منطقة طور الجريان شبه المستقر PSS من دون ظهور منطقة طور الجريان الشعاعي (تختفي). يحدث ذلك في مكمن دائري إذا كان :

$$C_D \geq \frac{A}{r_w^2} \frac{0.1}{(60 + 3.5\,s)} \quad \text{---------- 35}$$

لذا و لتلافي مثل هكذا !شكال فلا بد من ان تكون قيمة عامل تخزين البئر اقل من :

$$C \leq \frac{2\pi\phi c_t h A}{5.615} \frac{0.1}{(60 + 3.5\,s)} \quad \text{---------- 36}$$

و بمثل الاعتبار اعلاه(المعادلة رقم-55) لكن في المكامن المتشققة طبيعيا (المسامية المزدوجة Double porosity)، فيُمكن معرفة وقت تمدد تأثير تخزين البئر بحيث يغطي على اطوار الجريان الشائعة للمكمن المتشقق(طوري الجريان الشعاعي المبكر و المتاخر) و يجعل صعوبة او استحالة التفسير ، يحدث ذلك إذا:

$$C_D(60 + 3.5\,s) \geq \frac{\omega(1-\omega)}{6.6\,\lambda} \quad \text{---------- 37}$$

6-3-11 تخمين او تقدير معدل الجريان Estimate Test Rate

تصميم الفحص يحتاج الى تحديد معدلات الجريان وتوقيت مرحلتي فحص هبوط و تصاعد الضغط Build-up . ان استجابة الضغط المقاس خلال الفحص يتأثر كثيرا بمعدلات الجريان ، فيجب إعطاء أقصى قدر من العناية في اختيار و تخمين معدلات الجريان في فحوصات الابار.

- ان معدل الجريان الأدنى للمائع و لأي فحص جرياني يكون على الأقل مكافئا للمعدل المطلوب لرفع المائع من البئر و يحافظ على درجة حرارة رأس البئر أعلى من تلك التي ستسمح بتكوين الهيدرات (ماء في الابار الغازية).

- يكون الجريان عالي بما يكفي لإحداث استجابة او اشارة واضحة بالضغط بحيث يُمكن التقاطها بمقياس الضغط gauge .

- معدلات الجريان لا تكون مرتفعة لدرجة تؤدي إلى سحب الماء من منطقة تماس الهيدروكاربون بالماء إلى البئر أو تتسبب في إنتاج الرمل .

- لا تتسبب المعدلات المختارة بحدوث التكثف العكسي في محيط جدار البئر أو في المنطقة القريبة من جدار البئر نفسه في مكامن الغاز المتكثف Gas condensate reservoir.

- بعض الاعتبارات التشغيلية تُقيد حدود معدل الجريان أثناء الفحص ، منها على سبيل المثال:

سعة المرافق والمنشات السطحية ذات العلاقة ، ضغط التشبع saturation pressure / ضغط

نقطة الندى dew point ، إنتاج الرمل مع النفط و تضرر الطبقة المكمنية.

- تخمين معدل الجريان الأقصى للبئر عادة ما يتم عند الحد الأقصى المصمم لهبوط الضغط و هذا المعدل يُمكن الحفاظ عليه وادامته خلال الفحص باستخدام المعادلة الاتية:

$$q_{max} = \frac{k_{min} h}{162.6 B\mu \left(\log\left(\frac{k_{min} t}{\phi \mu c_t r_w^{\ 2}} \right) - 3.23 + 0.869 s' \right)} \Delta p_{max} \quad \text{---------- 38}$$

هنا ينبغي استخدام الحد الأدنى من النفاذية المتوقعة لتقدير الحد الأقصى لمعدل الجريان المستدام.

بصورة عامة فمعدلات الجريان المقترحة الدنيا والقصوى عبر الفحص هي تلك الناتجة عن تخفيضات الضغط بنسبة 5% و 25%، من ضغط إغلاق البئرShut-in pressure و على التوالي. تقريبًا هذا يعادل حوالي 10% و75% من المعدل النظري الأقصى المفتوح لانتاج البئر Absolute open flow potential AOFP or AOF و الذي يمثل أقصى معدل نظري يُمكن للبئر أن ينتجه عندما يكون ضغط الجريان في قاع البئر مساو للضغط الجوي.

- يُمكن تحديد معدل الجريان للفحص من معرفة دليل الانتاجية للبئر Jss-productivity index عند ظروف الجريان شبه المستقرة PSS . عندها يُحسب معدل الجريان باستخدام معدل الضغط المكمني average pressure لمنطقة تصريف البئر كما يأتي:

$$q_s = J_{sss}\left(\overline{P} - P_{wf}\right) \quad \text{---------- 39}$$

إذ ان Jsss تمثل مؤشر او دليل الانتاجية عند حالة الجريان شبه المستقر a semi-steady state or pseudo -steady state-PSS و يساوي:

$$J_{sss} = \frac{kh}{141.2\ B\mu\left(\ln\frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S\right)} \quad \text{---------- 40}$$

و ممكن تحديده من علاقة أدائية التدفق للبئرIPR-Inflow Performance Relationship الشكل3-11 .

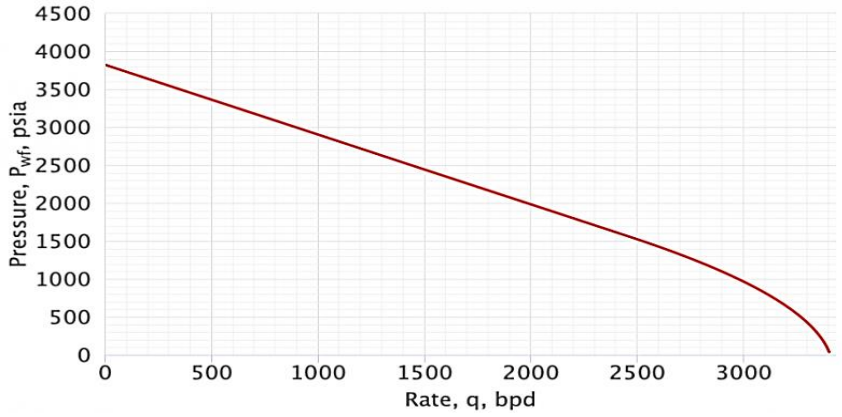
- في حالة فحص البئر الاستكشافي ، فليس من المؤكد أن نصل بطور الجريان إلى طور الحالة شبه المستقرة PSS، احيانا يستغرق مدة طويلة و هذا يزيد من تكاليف الفحص، لكن من الممكن أثناء الفحص أن نسمح بجريان البئر في ظروف الجريان غير المستقر USS unsteady state . في هذه الحالة يتم برمجة تصميم فحص البئر لحالة الجريان غير المستقر USS ويُحسب الجريان باستخدام المعادلة الاتية:

$$q_s = J_t\left(\overline{P} - P_{wf}\right) \quad \text{---------- 41}$$

إذ ان J_t تمثل مؤشر الانتاجية عند حالة الجريان غير المستقر USS un-steady state or transient

و ان مؤشر الانتاجية J_t يساوي:

$$J_t = \frac{2\pi kh}{B\mu\left(\frac{1}{2}\ln\frac{4kt_p}{\gamma\emptyset\mu r_w^2} + S\right)} \quad \text{---------- 42}$$



الشكل11-3 : سلوك الجريان داخل للبئر IPR

وان t_p يمثل طول مدة الجريان الرئيسة .

STB/D/psi ،Jt = transient productivity index

STB/D/psi،J_{SSS} = semi-steady state flow productivity index

- تعاقب معدلات الجريان. Flow Rate Sequence

عادة ما تتضمن سيناريوهات تصميم الفحص فترة فتح واحدة رئيسة لجريان البئر و تليها فترة غلق لتصاعد الضغط Build-up. لكن و احيانا يفتح البئر للجريان بمعدلات متعددة و متعاقبة الغرض منها لتاكيد تحقيق أهداف الفحص فعلى سبيل المثال، نحتاج فحص الجريان بمعدلات متعددة لتحديد التضرر من جراء تاثير اللا دارسي على الجريان non-Darcy flow effect.

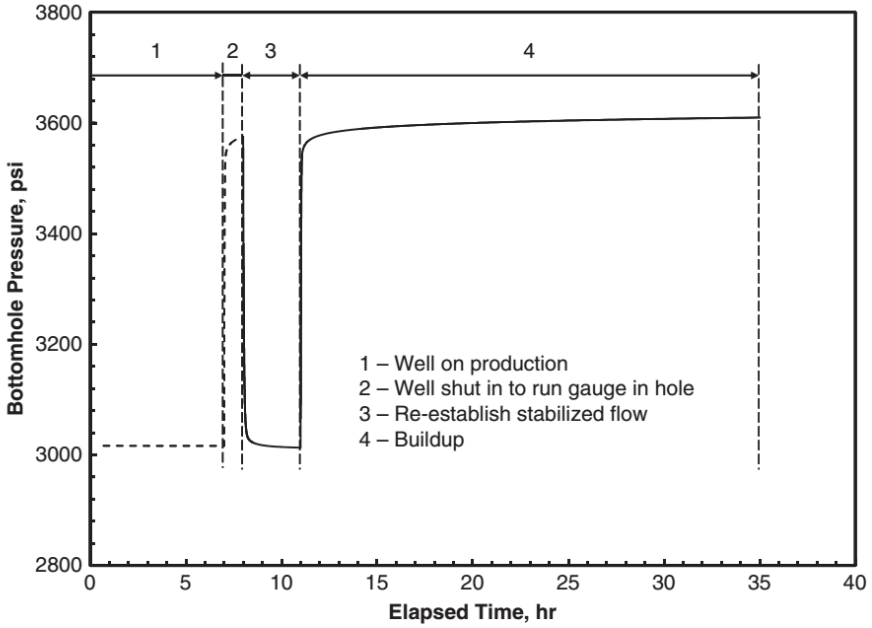
A- بالنسبة للبئر الاستكشافي

يتضمن الفحص التقليدي فترة جريان قصيرة، يليه غلق البئر، ثم فترة جريان ثانية أطول و يليها غلق نهائي لتصاعد الضغط Build-up (يمكن مراجعة فصل الفحص الطبقي DST).

B- بالنسبة للبئر الانتاجي

لفحص تصاعد الضغط Build-up و حسب الشكل11-4 ، يُفتح البئر للانتاج (الفترة رقم-1) بحيث نضمن ان طول فترة الفتح كافية لاستقرار معدل الجريان و استقرار نسبة الغاز الى السائل GLR . من المتوقع ان تكون طول هذه الفترة بعدة مرات طول مدة الغلق الاولى. ثم و خلال الفترة رقم-2 يُغلق البئر لانزال معدات القياس وتثبيتها في باطن البئر. بعدها و خلال الفترة رقم-3 يعاد فتح البئر للجريان و لحين استقرار الجريان و نسبة GLR .

فريلي Frailey et al. (1994) اقترح ان تكون طول المدة هذه بما لا يقل عن 3-2 مرات طول مدة الغلق الاولي . اخيرا و خلال الفترة رقم-4 يُغلق البئر لتصاعد الضغط Build-up على ان تكون طول فترة الغلق هذه عدة مرات اطول من فترة الانتاج الرئيسة .



الشكل11-4 : فترات فحص تصاعد الضغط Build-up للبئر الانتاجي

11-3-7 تخمين استجابة الضغط- Estimate Test Pressure Response

ان تحديد استجابة الضغط عبر تصميم الفحص عملية مهمة و تستغرق بالنسبة للأنظمة المعقدة وقتًا طويلاً مما يتطلب المساعدة باستخدام جهاز الحاسوب لتقليل الجهد المطلوب في تقدير قيمة استجابة الضغط في عملية التصميم. للأنظمة البسيطة نسبيًا نستخدم طريقة التراكب Superposition لتحديد (تخمين)استجابة الضغط و حسب المعادلة في ادناه:

$$p_{wf} = p_i - 141.2 \frac{\mu q \beta}{kh} \left| p_D(t_D, r_D, \ldots) + s \right| \quad \text{---------- 43}$$

اساسا يُمكن تقدير استجابة الضغط من ميل الخطوط المستقيمة في الرسوم البيانية لأطوار الجريان المتوقعة ، أو يُمكن محاكاتها باستخدام إما محاكاة تحليلية أو عددية. بمجرد تقدير استجابة الضغط بعدها يُمكن تفسير البيانات بالطرق العادية لتحقيق هدف الفحص.

لذا في تحديد استجابة الضغط نحتاج الى ميل الخطوط المستقيمة في الرسوم البيانية لأطوار الجريان المتوقعة و نحتاج وقت بدء و انتهاء تلك الاطوار.

- ميل خط المستقيم نصف اللوغاريتمي لطور الجريان الشعاعي Slope of Semilog Graph During Radial Flow يُحدد باستخدام المعادلة الاتية:

$$m = \pm 162.6 \frac{q\beta\mu}{kh} \quad \text{----------44}$$

- و من الميل فان فرق الضغط يساوي:

$$\Delta p = \pm m \log(t_2/t_1) \quad \text{----------45}$$

الان بالامكان حساب مقدار التغير بالضغط ΔP خلال الفحص لفترتين زمنية (وقتين) t_1، t_2 على الخط المستقيم النصف لوغاريتمي إذ ان t_1 يُمثل وقت بداية الخط المستقيم نصف لوغاريتمي و t_2 وقت نهاية الخط المستقيم(او يمكن عند اي وقت). الاشارة الموجبة والسالبة في المعادلة-45 تُميز نوع الفحص فيما لو كان فحص هبوط للضغط Drawdown او فحص حقن.

- بدلا من حساب مقدار التغير بالضغط ΔP يُمكن اجراء بعض التحوير المناسب للمعادلة اعلاه لتحديد الضغط عند أي نقطة (وقت) من على الخط المستقيم نصف اللوغاريتمي (تصاعد الضغط Build-up) كما في ادناه:

$$P_{ws} = p_{1\,hr} + m \log(\Delta t - 1) \quad \text{---------- 46}$$

الضغط عند ساعة واحد ة P_{1hr} يُمكن تحديده من معادلة عامل القشرة و ذلك بعد فرض قيمة s و قيمة ضغط الجريان في قاع البئر P_{wf} عند نهاية مدة الجريان t_p.

عند اختيار معدات قياس الضغط Gauge يجب أن تكون اداة قياس الضغط المختارة هذه حساسة بدرجة كافية لاكتشاف اي تغير للضغط المتوقع أثناء مدة الفحص. اختيار مقياس الضغط يكون ضمن مديات الضغط و التي تنحصر ما بين الحد الاعلى للضغط و يتمثل بالضغط المكمني الاصلي Pi و الحد الادنى هو اقصى هبوط للضغط متوقع عبر الفحص. لكن في حالة الوصول الى حدود المكمن و للآبار التي تشهد هبوط عالي للضغط نضع في الاعتبار الحاجة الى مدة غلق طويلة لأجل استقرار الضغط.

- ممكن تحديد مشتقة الضغط عند الجريان الشعاعي والمتمثلة بقيمة الخط الافقي في المرتسم اللوغاريتمي لعلاقة مشتقة الضغط مع الوقت و تساوي:

$$\left(t\frac{dp}{dt}\right)_{IARF} = \frac{70.6qB\mu}{kh} \quad \text{---------- 47}$$

ان ميل خط المستقيم العادي لطور الجريان شبه المستقر Slope of Cartesian Graph During Pseudosteady-State Flow يُحدد باستخدام المعادلة الاتية:

$$|m_{PSS}| = \frac{0.234qB}{Ah\phi c_t} \quad \text{---------- 48}$$

8-3-11 مقاييس الضغط- pressure gauges

يجب دراسة نوع وعدد و موقع و ظروف عمل أجهزة قياس الضغط (من حرارة و ضغط) بعناية لضمان تحقيق أهداف الفحص و تم أدراج ملخص لانواع مقاييس الضغط و خصائصها في الجدول 11-7 .

	Gauge Type					
	Mechanical	Metal Strain	Capacitance	Sapphire	Standard Quartz	Compensated Quartz
Advantages	Reliable Simple Rugged	Improved resolution Fast pressure response Rugged and small	Greater stability Lower power requirement	Improved stability Improved accuracy Fast pressure and temperature response Good resolution Very rugged	Best resolution Best stability Best accuracy	Best resolution Best stability Best accuracy Best dynamics Higher pressure range
Disadvantages	Poor resolution Poor stability Poor accuracy Tedious to read	Moderate stability Moderate accuracy Moderate temperature-response time	Poor dynamic response Slower sampling Temperature and vibration sensitivity	Moderate temperature sensitivity	Poor dynamic response High temperature sensitivity Limited pressure range Cost	More electronics Cost
	Pressure, psi					
Maximum range						
Pressure, psi	20,000	20,000	20,000	20,000	11,000	15,000
Temperature, °F	392	347	347	347	347	347
Resolution (full scale and sampling time) from analog chart						
At 20,000 psi and 1 second	−5	0.50	0.20	0.20	NA	NA
At 15,000 psi and 1 second	−2	0.20	0.15	0.10	NA	0.003
At 10,000 psi and 10 seconds	−2	0.10	0.05	0.05	0.007	0.001
Accuracy						
At 20,000 psi	−20	18	NA	6	NA	NA
At 15,000 psi	−15	12	−12	5	NA	(0.01% of reading +2.0 psi)
At 10,000 psi	−10	10	−10	4	(0.25% of reading +0.05 psi)	(0.01% of reading +20 psi)
Drift, 10,000 psi and 302°F						
First day	−5	<2 to 10	<3	<3	<2	<0.2
First 4 days	−10	<3 to 12	<5	<5	0.2 (18 days)	0.2 (7 days)
Long term, per week	−5	<2 to 4	1 to 7	<1	<0.1	<0.1
	Stabilization Time					
After a 5,000-kpsi step	10 minutes*	30 seconds	8 minutes	20 seconds*	6 minutes	Always within 1 psi
After a 50°F step	10 minutes*	10 minutes	40 minutes	10 minutes	25 minutes	Stable within 25 seconds
	Relative Cost					
	Low	Low	Medium-high	Low-medium	High	High

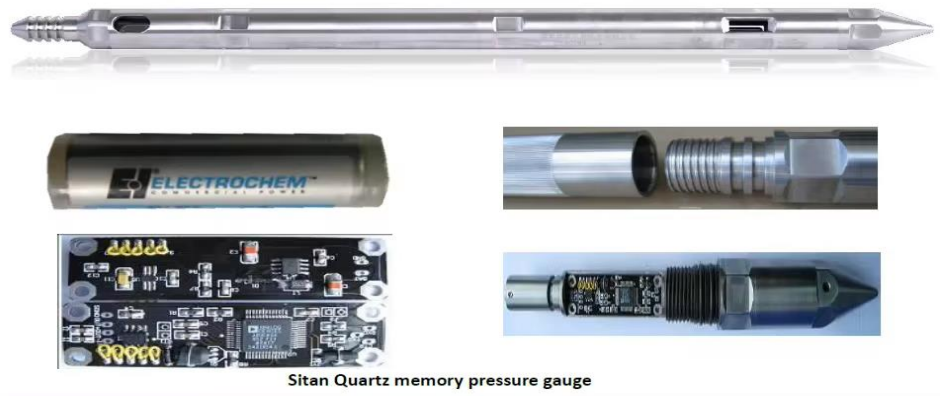
*Estimated.
NA = not applicable.

الجدول11-7 : ملخص مقارنة لانواع مقاييس الضغط و خصائصها

الشكل11-5 يمثل مقياس الضغط من النوع Quartz pressure gauge و هو احد انواع مقاييس الضغط الشائعة الاستعمال و الذي تُستخدم في فحوصات الابار Well testing ، الاكمال Completion ، قياس تدرج الضغط Pressure gradient ، تنشيط الابار Stimulation و غيرها.

11-3-9 وضع خطة التنفيذ والسلامة.

ان الهدف من الخطة اعلاه هو لضمان سلامة الأفراد، المعدات، والبيئة أثناء تنفيذ فحص البئر خاصة و أن الفحوص تُجرى أحيانًا في ظروف عمل خطرة مثل:



الشكل11-5 : مكونات مقياس الضغط من النوع Sitan Quartz

- ضغوط عالية High pressure
- وجود غازات سامة (مثل كبريتيد الهيدروجينH_2S)
- درجات حرارة مرتفعة High temperature
- تسرب محتمل للسوائل أو الغازات

يُراعى عند تحديد متطلبات الأمان الامور الاتية:

1- استخدام أدوات مقاومة للتآكل وأدوات قياس آمنة وأنابيب تتحمل ضغوط عالية.

2- توفير ظروف السلامة أثناء التشغيل مثل أجهزة إنذار و اقنعة للتنفس و بدلات عمل مناسبة .

3- تحديد خطط الطوارىء الواجب اتخاذها في حال حدوث تسرب أو انفجار أو احتراق.

4- موقع البئر هل البئر في منطقة سكنية أم نائية؟ يؤثر ذلك على الاحتياطات الأمنية والبيئية.

5- التعامل مع الموائع الخارجة من البئر (نفط، ماء، غاز) بطريقة آمنة وصديقة للبيئة.

10-3-11 توقع النتائج باستخدام برامج المحاكاة (Predicting Test Results Using (Simulation Software

قبل تنفيذ الفحص الميداني، يتم محاكاة سلوك البئر و المكمن باستخدام برامج متخصصة مثل البرامج Saphir ، Ecrin ، PROSPER و ذلك :

- لفهم كيفية تنفيذ الفحص.
- لتحديد ما إذا كانت البيانات كافية للوصول إلى الأهداف.
- لاختيار أفضل إعدادات الفحص (مثل الزمن، معدل الجريان)

خطوات استخدام هذه البرامج في مرحلة التصميم:

1. إدخال بيانات أولية : مثل ضغط المكمن، النفاذية المتوقعة، سُمك الطبقة، نوع السائل.

2. اختيار نموذج المكمن المناسب: Homogeneous، Fractured، Dual Porosity، إلخ
3. تحديد شروط الفحص : نوع الفحص، معدل الجريان ، زمن كل مرحلة.
4. تشغيل المحاكاة : لمعرفة كيف سيبدو منحنى الضغط و الجريان .
5. تحليل النتائج المتوقعة : هل يُمكن عبرها استخلاص معامل القشرة؟ أم ضغط المكمن؟
6. تعديل خطة الفحص إن لزم الأمر : مثل زيادة زمن الإغلاق أو تغيير معدل الانتاج او الحقن.

ندرج ادناه عدد من الامثلة لتوضيح مسار العمل في تصميم فحوصات لابار مختلفة:

مثال-2 تصميم الفحص لبئر غازي Earlougher(1977)

تم العثور على احتياطي اقتصادي من الغاز عبر حفر بئر استكشافية جديدة في حقل غازي. وفقًا لسجلات الابار well logs فان عمق المنطقة المستهدفة يتراوح من 8195 إلى 8445 قدمًا (اي ان السُمك الكلي للطبقة h=250 ft)، مع إكمال completion مؤقت مفتوح لـ 50 قدمًا من السُمك الكلي للطبقة المستهدفة. الجدول11-8 يتضمن معلومات عن خواص الصخور و الموائع. العمق 8320 قدم يمثل العمق المرجعيdatum depth .درجة حرارة السطح 32 F^o و التدرج الحراري يساوي $2F^O/ft$.

وفقًا لبيانات سجلات البئر well logs ، فالنفاذية تتراوح بين k=100-1000 md. وان الهبوط الكلي للضغط المسموح به يمثل نسبة 10٪من الضغط المكمني الأصلي . في إطار الميزانية المخصصة للبئرBudget فانه يُسمح بمدة فحص إجمالي لا تزيد عن 72 ساعة ، غير مسموح بحرق اكثر من كمية الغاز المدرجة في الجدول11-8، عامل القشرة بسبب الاكمال المحدود partial completion (وليس الكلي) للطبقة المكمنية بحدود S=10 .متوفر لدى الشركة نوعان من معدات قياس الضغط و هي : Piezo gauge and a Quartz gauge

الاول Piezo gauge له دقة قياس بحدود 0.05 psi والثاني Quartz gauge له 0.01 psi. كلا المقياسان لهما مديات للقياس كالاتي 0-5000 psi ، 0-10000 psi ، 0-15000 psi و المقاييس تعمل الى حد 300°F ظروف حرارة .

h	250 ft
ϕ	27%
S *(limited entry)*	10
r_w	0.50 ft
B_g	0.810 bb/MSCF
μ_g	0.0225 cP
C_t	171×10^{-6} psi^{-1}
C_g	216×10^{-6} psi^{-1}
P_i	3,868.8 psi
Pressure gradient	0.465 psi/ft
Max allowed gas to flare	25 MMscf

الجدول11-8 : بيانات المثال رقم- 2.

الحل:

* بسبب المعلومات المتوفرة و الوافية و كخطوة اولى ممكن ان نحدد الضغط الاصلي للمكمن اعتمادا على تدرج الضغط pressure gradient=0.465 psi/ft (بحسب كثافة المائع) و العمق و نحدد درجة الحرارة بحسب العمق و التدرج الحراري الذي يساوي

temperature gradient=$2F^{O}$/100 ft و كما يأتي:

$$p_i = d\,\frac{dp}{dz} = (8{,}320)\,(0.465) = 3{,}868.8 \text{ psi}$$

$$T_f = T_{surf} + d\,\frac{dT}{dz} = 32 + (8{,}320)\left(\frac{2}{100}\right) = 198.4\,^{\circ}\text{F}$$

* اعلى هبوط للضغط مسموح به يساوي عشرة بالمائة من الضغط الاصلي للمكمن ، و يساوي:

$$\Delta p_{\max} = 0.1 p_i = 386.9 \text{ psi}.$$

* اذن فاوطأ ضغط للجريان عند قاع البئر بعد طرح اعلى هبوط للضغط مسموح به ، يساوي:

$$p_{wf\,\min} = p_i - \Delta p_{\max} = 3{,}868.8 - 386.9 = 3{,}481.9 \text{ psi}$$

* لكون جزء من الطبقة مفتوح للجريان(بحدود 50 ft) وليس كل الطبقة فنتوقع حدوث الجريان الكروي لذا نحتاج لمعرفة نسبة النفاذية العمودية الى الافقية (غير معروفة) لاجل تحديد وقت انتهاء تاثير الجريان الكروي. اذا نفترض ان النسبة تساوي k_v/k_h=0.1.

* للحصول على تقدير مقبول للنفاذية عبر تفسير الفحص فنحتاج على الأقل إلى نصف دورة لوغاريتمية من البيانات ضمن المنطقة الوسطى للفحص MTR (منطقة الجريان الشعاعي اللامحدود).

لتحديد مقدارالوقت الذي يبدأ عندها الجريان الشعاعي اللامحدود MTR، نحتاج إلى تحديد وقت نهاية تخزين البئر WBS ؟ ووقت نهاية الجريان الكروي؟.

* حساب معامل تخزين Wellbore.

مساحة مقطع باطن البئر A_{wb} تساوي:

$$A_{wb} = \frac{\pi d_{csg}^{\,2}}{4} = \frac{(3.14)}{4}\left(\frac{6}{12}\right)^2 = 0.1963 \text{ ft}^2.$$

لما كان العمق العمودي للبئر 8445 ft ، نفرض ان العمق الكلي للبئر 8600 ft من ضمنها 155 ftالانحراف عن الاتجاه العمودي.

ان حجم حفرة البئر V_{wb} عندما يكون صمام الغلق على السطح يساوي:

$$V_{wb} = dA_{wb} = (8{,}600)\,(0.1963) = 1{,}688 \text{ ft}^3 = 300.8 \text{ bbl}$$

بفرض ان الغاز يملا الحفرة ، نحسب معامل تخزين البئر من انضغاطية المائع و حجم حفرة البئر كما يأتي:

$$C_{wb} = c_{wb} V_{wb} = \left(216 \times 10^{-6}\right)(300.8) = 0.065 \text{ bbl/psi}$$

* حساب عامل القشرة الهندسي S_p

لكون جزء من الطبقة مفتوح للجريان وليس كل الطبقة (بحدود 50 ft) فنتوقع حدوث الجريان الكروي و الذي يصنف كاحد مركبات عامل القشرة S ، بداية نحسب المعاملات اللابعدية الاتية: r_d، h_{pD} ، h_{1D} إذ ان :

$$r_D = \frac{r_w}{h}\left(\frac{k_v}{k_h}\right)^{1/2} = \frac{0.5}{250}(0.1)^{1/2} = 0.0006325,$$

$$h_{pD} = \frac{h_p}{h} = \frac{50}{250} = 0.2,$$

$$h_{1D} = \frac{h_1}{h} = \frac{100}{250} = 0.4$$

h_p سُمك التثقيب 50 ft ، h_1 المسافة من اعلى التثقيب الى اعلى الطبقة 100 ft

* حساب القيم A و B لاستخدامها في الخطوة اللاحقة و كما يأتي:

$$A = \frac{1}{h_{1D} + h_{pD}/4} = \frac{1}{0.4 + 0.2/4} = 2.222$$

$$B = \frac{1}{h_{1D} + 3h_{pD}/4} = \frac{1}{0.4 + (3)(0.2)/4} = 1.818$$

اذن S_p يساوي:

$$s_p = \left(\frac{1}{h_{pD}} - 1\right)\ln\frac{\pi}{2r_D} + \frac{1}{h_{pD}}\ln\left[\frac{h_{pD}}{2 + h_{pD}}\left(\frac{A-1}{B-1}\right)^{1/2}\right]$$

$$= \left(\frac{1}{0.2} - 1\right)\ln\left(\frac{\pi}{(2)(0.0006325)}\right) + \frac{1}{0.2}\ln\left[\frac{0.2}{2 + 0.2}\left(\frac{2.222-1}{1.818-1}\right)^{1/2}\right]$$

$$= 20.28$$

عليه فان عامل القشرة الكلي يساوي:

$$s_t = \frac{h}{h_p}s + s_p = \frac{250}{50}(10) + 20.28 = 70.28.$$

* حساب وقت انتهاء تخزين البئر Time to End of Wellbore Storage

نحسب عامل تخزين جوف البئر - WBS اللابعدي:

$$C_D = \frac{0.894}{\phi c_t h r_w^{\ 2}} C = \frac{0.894}{(0.27)\left(171\times10^{-6}\right)(250)(0.5)^2}(0.065) = 20.14$$

* نجد C_De^{2s}

$$C_De^{2s} = 20.14e^{(2)(70.28)} = 2.25\times10^{62}$$

*حساب وقت انتهاء تاثير تخزين جوف البئر - WBS بسماح 10%:

$$t_{eWBS} = \left[40{,}000\ln\left(C_De^{2S}\right)+180{,}000\right]\frac{\mu}{kh}C$$

$$= \left[(40{,}000)\ln\left(2.25\times10^{62}\right)+180{,}000\right]\frac{(0.0225)}{(100)(250)}(0.065)$$

$$= 0.346 \text{ hour.}$$

* وقت انتهاء تاثير الجريان الكروي:

$$t_{eSF} = 300\frac{\phi\mu c_t h^2}{k_v} = (300)\frac{(0.27)(0.0225)\left(171\times10^{-6}\right)(250)^2}{(0.1)(100)} = 1.95 \text{ hour}$$

* حساب الوقت لبداية Time to Beginning of MTR

نظرًا لأن الجريان الكروي يستمر لمدة أطول بكثير من مدة تخزين جوف البئر - WBS ، فلا يبدو أن هناك أي فائدة من استخدام الإغلاق عند قاع البئر ، والذي لن يقلل من الوقت للوصول إلى نهاية التدفق الكروي. سيستمر نظام الجريان الكروي بحدود :

$\log(t_{eSF})-\log(t_{eWBS}) = \log(1.95)-\log(0.346)=0.75$

أو ثلاثة أرباع دورة اللوغاريتم ثم الدخول الى منطقة MTR و هذه تكون كافية لتقدير معقول للنفاذية الكروية.

*نصف قطر منطقة البحث Radius of Investigation

لكون اقصى مدة مسموح بها لاجراء الفحص تساوي 72 hrs. . نفرض ان مدة الفتح البئر للجريان تستغرق 24 hrs. ومدة الغلق لتصاعد الضغط Build-up تستغرق 48 hrs. من المعادلة ادناه و باستخدام قيمة النفاذية الدنيا k=100 md و لمدة جريان 24 hrs. نجد نصف قطر منطقة البحث :

$$r_i = \sqrt{\frac{kt}{948\emptyset\mu C_t}}$$

$$r_i = \sqrt{\frac{100 \times 24}{948 \times 0.27 \times 0.0225 \times 171 \times 10^{-6}}} = 1560 \text{ ft}$$

*نُعيد الحسابات لايجاد r_i و للحالات – يوم و يومين و ثلاثة ايام ولقيمتي النفاذية k=100- 1000 md و النتائج أُدرجت في ادناه:

k	100 md			1000 md		
Time -hrs	**24**	**48**	**72**	**24**	**48**	**72**
ri- ft	**1560**	**2210**	**2700**	**4940**	**6980**	**8550**

تخمين معدل جريان الفحص و المعدلات المتعاقبة Estimate Test Rate and Determine Flow Rate Sequence

في هذا المثال و لتخمين معدل الجريان و مدة الجريان التي يستغرقها الفحص فيجب أن نأخذ في الاعتبار المحددات الاتية : ان الحد الأقصى المسموح به لهبوط الضغط Drawdown هو ΔP=386.88 psi، والحد الأقصى لحجم الغاز المراد حرقه 25 MMscf. اذن معدل الجريان الذي يُمكن ادامته ضمن الحدود اعلاه يُحسب كالاتي:

$$q_{max} = \frac{k_{min} h}{162.6 B\mu \left(\log\left(\frac{k_{min} t}{\phi \mu c_t r_w^{\,2}} \right) - 3.23 + 0.869 s' \right)} \Delta p_{max}$$

$$= \frac{(100)(250)}{(162.6)(0.810)(0.0225)\left(\log\left(\frac{(100)(24)}{(0.27)(0.0225)(171\times10^{-6})(0.5)^2} \right) - 3.23 + 0.869(70.28) \right)}$$

q_{max} = 48.1 MMscf/D

نظرًا لأن حجم حرق الغاز يقتصر على طاقة استيعاب 25 MMscf/D ولان كل الغاز المنتج سيحرق لذا فاننا سنتقيد بالحد الأقصى لمعدل الجريان و الذي يُمكننا إنتاجه لمدة 24 ساعة هو 25 MMscf/D، و ليس q_{max} = 48.1 MMscf/D . اذن سنصمم مدة الجريان لمدة 24 hrs بمعدل 25 MMscf/D ، يليها غلق البئر لتصاعد الضغط Build-up لمدة 48 hrs .

تخمين قيمة استجابة الضغط المتوقعة Estimate the Magnitude of the Expected Pressure Response

- تخمين الحد الاعلى لهبوط الضغط Maximum drawdown Drawdown في نهاية مدة الجريان قبل الغلق للنفاذية 100 md يساوي:

$$\Delta p = 162.6 \frac{qB\mu}{k_{min} h} \left[\log\left(\frac{k_{min} t}{\phi \mu c_t r_w^{\,2}} \right) - 3.23 + 0.869 s' \right]$$

$$= 162.6\frac{(25{,}000)(0.810)(0.0225)}{(100)(250)}\left[\log\left(\frac{(100)(24)}{(0.27)(0.0225)\left(171\times10^{-6}\right)(0.5)^2}\right)\right.$$

$$\left.-3.23+0.869(70.28)\right]$$

$$\Delta p = 201.0 \text{ psi},$$

- تخمين الحد الأدنى لضغط الجريان في قاع البئر minimum flowing bottom hole pressure يساوي:

$$p_{wf} = p_i - \Delta p = 3{,}868.8 - 201.0 = 3{,}667.8 \text{ psi}$$

نُعيد الحسابات اعلاه في حال النفاذية تساوي 1000 md فان ΔP=20.4 psi و ان P_{wf}=3848.4 psi.

-ايجاد ميل الخط المستقيم نصف اللوغاريتمي Slope of Semilog Straight-Line

نستخدم الحد الادنى للنفاذية والتي تساوي k=100 md ثم نطبق المعادلة الاتية:

$$|m| = \frac{162.6qB\mu}{kh} = \frac{(162.6)(25{,}000)(0.810)(0.0225)}{(100)(250)} = 2.96 \text{ psi/cycle}$$

و باستخدام الحد الاعلى للنفاذية والتي تساوي k=1000 md فان الميل يساوي m=0.296 psi/cycle

- تحديد دقة جهاز مقياس الضغط الذي سيستخدم في الفحص ، بحسب طريقة بورديت لتحديد دقة المقياس σ_p و التي اساسها تقليل نسبة تشويش اشارة الضغط في مشتقة الضغط باقل نسبة (عادة يُستخدم نسبة 10%) فيجب ان تكون دقة المقياس σ_p اقل مما تُحسب في معادلة بورديت الاتية :

$$\sigma_p \le 0.1\left(\sqrt{2}L\right)\left(t\frac{dp}{dt}\right) \cong 0.06Lm. \quad \text{---------} 49$$

إذ ان الميل m للخط نصف لوغاريتمي خلال طور الجريان الشعاعي اللانهائي يساوي:

$$|m| = \frac{162.6qB\mu}{kh}$$

و ان قيمة مشتقة الضغط لفترة طور الجريان الشعاعي اللانهائي المعادلة رقم-47 تساوي:

$$\left(t\frac{dp}{dt}\right)_{IARF} = \frac{70.6qB\mu}{kh}$$

فان :

$$\left(t\frac{dp}{dt}\right)_{IARF} = 0.434\ \text{m} \text{ ---------- } 50$$

مشتقة الضغط tdp/dt، L عامل التخفيف Smoothing parameter و عادة يوصى بان تكون قيمته L=0.1 . بالتعويض في المعادلة رقم-49 نحصل على دقة مقياس تكون اقل من :

$$\sigma_p \le 0.006m$$

لحالة النفاذية الواطئة و بتطبيق المتراجحة اعلاه فان مقياس الضغط سيقيس دقة الى حد:

$$\sigma_p \le 0.006m = (0.006)(2.96) = 0.018\ \text{psi}$$

و للنفاذية العالية فان مقياس الضغط سيقيس الى دقة لحد:

$$\sigma_p \le 0.0018\ \text{psi}$$

-و بحسب ما متوفر من مقاييس ضغط في المثال ، يُمكن استخدام مقياس الضغط من النوع Quartz gauge للنفاذية الواطئة (الجدول11-7 يُوضح انواع مقاييس الضغط gauges و مدياتها و دقة القياس) الذي دقة القياس له الى حد 0.01 psi . لكن مقياس الضغط هذا غير ملائم للنفاذية العالية والتي تحتاج مقياس بدقة قياس 0.0018 psi . لتفادي ذلك يُمكن زيادة نسبة تشويش اشارة الضغط الى 20% بدلا من 10% و استخدام عامل التنعيم L=0.28 فيصبح عندئذ المقياس اعلاه ملائم على ان ننتبه الى شدة الانحراف بالاشارة بسبب التغيير اعلاه.

* الضغط الاعلى المتوقع هو P=3869 psi ، فيمكن اختيار جهاز القياس للحد الاعلى 5000 psi و سيكون مناسبا. لكن يُحتمل ان نصادف ضغطا مقاسا اعلى و لتجنب ذلك و للتحوط فيُمكن ان نستخدم المقياس بضغط اعلى و المتوفر في المثال هو 10000 psi.

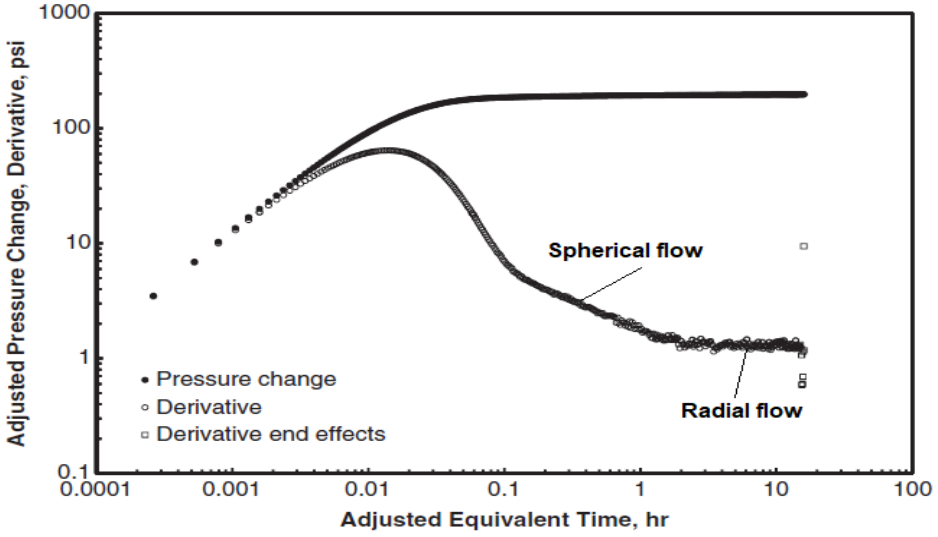
* **الان نجري محاكاة للبيانات** في تصميم الفحص بمساعدة الحاسوب و البرامج الجاهزة لكي يقوم بالحسابات وفق بيانات الادخال و لحالتين : الاولى النفاذية تساوي k=100 md والثانية k=1000 md .

لاحظ ، انه من المفيد ان نذكر ان الاستعانة بالحاسوب سيُمكننا من اجراء معالجة للبيانات و تفسير الفحص في موقع الحقل او بنقل المعلومات مباشرة الى مركز الحاسوب باستخدام ناقل البيانات عن بعد Remote Data Transmission . هذا سيساعد في تحديث تصميم الفحص انيا .

***الحالة الاولى: k=100 md**

بعد ادخال كل البيانات المتوفرة و المحسوبة الى الحاسوب و التي تم تحديدها اوليا في تصميم الفحص ، سنحصل على رسومات بيانية و نتائج تحليلها . الرسم البياني اللوغاريتمي في الشكل11-6 و الذي يُبين علاقة فرق الضغط و مشتقة الضغط مع الوقت للحالة الاولى بمعامل تنعيم 0.1. الجريان الكروي ينتهي بحدود ساعتين ثم يبدأ بعده منطقة Middle Time Region-MTR كما هو متوقع. يستمر الجريان الكروي أكثر بقليل من دورة لوغاريتمية واحدة،

و تستغرق المنطقة الوسطى بحدود دورة لوغاريتمية واحدة ، لذلك ستكون كافية لتحديد كلا من النفاذية الكروية و الأفقية لهذه الحالة.



الشكل11-6 : محاكاة الفحص لحالة 100 md ، المثال رقم- 2

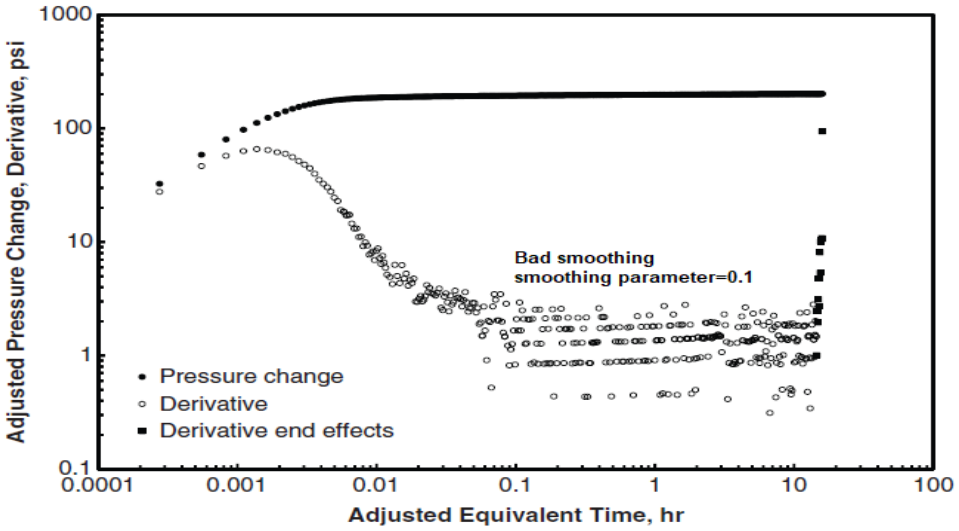
تفسير الخط نصف اللوغاريتمي Semilog يُعطي نفاذية أفقية تبلغ k=99 md ، معامل قشرة يبلغ s = 68.2 ، وضغط مكمني أولي يبلغ Pi=3869.9 psi ، بما يتفق جيدًا مع قيم k=100 md ،s = 70.2، و Pi=3868.8 psi المستخدمة للمحاكاة. يعطي التفسير المباشر لبيانات الجريان الكروي نفاذية كروية تبلغ 46.8 md ، ونفاذية عمودية تبلغ 10.5 md ؛ مرة أخرى، قريبة جدا من قيم الخواص المناظرة 46.4 md و 10 md.

***الحالة الثانية: k=1000 md**

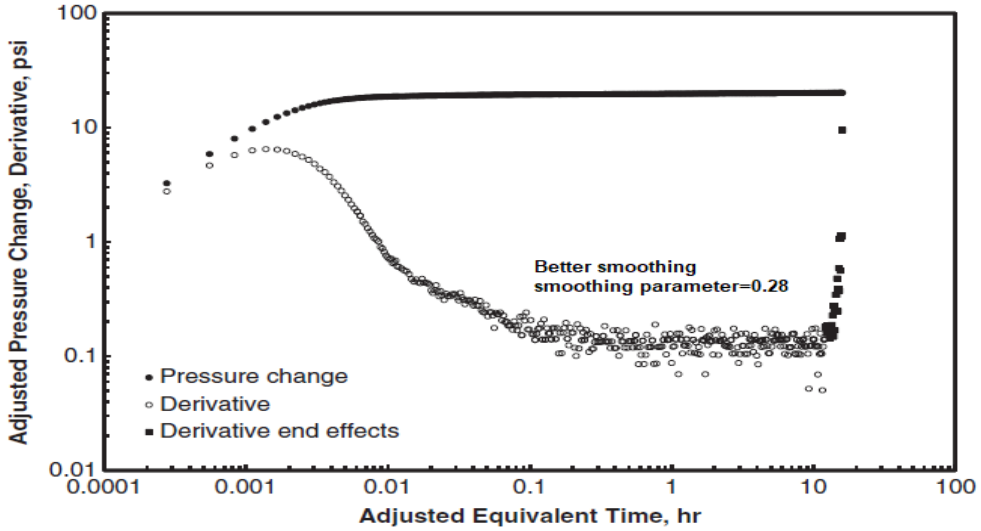
الرسم البياني اللوغاريتمي في الشكل11-7 يُبين الحالة الثانية مع معامل تنعيم 0.1.

استخدمت طريقة بورديت المعادلة رقم-50 لحساب مشتقة الضغط للبيانات ذات دقة قياس منخفضة إذ نلاحظ هنالك تذبذب البيانات ، مما يتطلب زيادة معامل التنعيم إلى 0.28 الشكل11-8، هذا يعطي مشتقًة للضغط أكثر سلاسة من السابقة و تحسنا و لكن ليس سلسًا كما في الحالة الاولى (100 md). هنا يتم تحديد اطوار الجريان الكروي والشعاعي بسهولة، و طور الجريان الكروي يدوم تقريبًا دورة لوغاريتمية واحدة، و الجريان الشعاعي يدوم ما يقرب من دورتين لوغاريتمية.

حتى مع بيانات الضغط المتذبذبة (المشوشة) ، فإن تفسير خط النصف لوغاريتمي semilog للبيانات عند الجريان الشعاعي يعطي نفاذية بحدود k=998.1 md معامل قشرة يبلغ s = 69.3 ، والضغط المكمني الأولي يبلغ Pi=3868.9 psi ، في توافق ممتاز مع قيم المدخلات k=1000 md و s = 70.28 و Pi=3868.8 psi . ايضا يُعطي تفسير الخط المستقيم للبيانات في الجريان الكروي نفاذية كروية تبلغ468 md ونفاذية عمودية تبلغ 102.9 mdو هي قريبة جدا من قيم الخواص المناظرة 464 md و 100 md.



الشكل11-7 : محاكاة الفحص لحالة 1000 md ، هنالك تذبذب بالحسابات معناه عامل النعومة 0.1 غير فعال ، المثال رقم- 2



الشكل11-8 : محاكاة الفحص لحالة 1000 md ، تغيير عامل النعومة من 0.1 الى 0.28 ،المثال رقم- 2

*المثال هذا كان للتوضيح ، لكن لو كان هذا تصميمًا لفحص حقيقي، لكُنا قد نظرنا إلى أكثر من حالتي المحاكاة هنا، مع التركيز بشكل خاص على حساسية البيانات التي تحتوي على قدر كبير من عدم اليقين، وتأثير الحدود Boundaries.

فيما يلي بعض الأسئلة و امكانية اجراء محاولات إضافية لدعم التصميم ندرجها ادناه.

❖ ماذا يحدث إذا كانت النسبة kv/kh 0.01 بدلاً من 0.1 ؟

- ماذا يحدث إذا كان اقصى حد لتوقف الجريان على بعد 1500 قدم من البئر ؟
- إلى أي مدى يُمكن اكتشاف حدود المكمن ؟

مثال-3 تصميم فحص تصاعد الضغط Build-up Earlougher(1977)

نرغب في إجراء فحص تصاعد للضغط في بئر نفطي لمكمن فوق ضغط الاشباع ، تم تطويره على مساحة 40 acres. يُحتمل في أن الحقل ينتج عند الحالة شبه المستقرة Pseudo steady state ؛ يتم التاكد من هذا الاشتباه لاحقًا عند حل المثال. ينتج البئر حاليًا بمعدل q_o=132 stb/day و q_w=23 stb/day عند ضغط جريان P_{wf}=2450 psi. البيانات المتوفرة من عمليات الإنتاج و الفحوصات المختبرية و تفسير مجسات الابار الاتي:

q_o= 132 stb/day; q_w= 23 stb/day;μ_o= 2.30 cp ;μ_w= 0 .94 cp; c_o= 14.6 x 10^{-6} psi^{-1}; c_w= 3.2x11^{-6}; cf= 3.4 x10^{-6}; b_o= 1.21 bbl/stb; b_w= 1.0 bbl/stb; A=40 acres =1742400 ft^2; h=63 ft; Ø=16.3% ; r_w=0.26 ft ; depth =3600 ft; tubing =2 3/8" OD ; Vu=.00387 bbl/ft.

تم تخمين الخواص الاتية .Estimated data: k = 135 md; s=2

- بناءأ على المعلومات المتوفرة فان البئر تطويري انتاجي و ليس استكشافي ، إذ ان معلومات الانتاج q و بعض الخواص المكمنية و الموائع متوفرة .
- بناءً على معدلات الجريان المسجلة و توفر خواص السوائل وبيانات النفاذية النسبية فإننا يُمكن ان نحدد قيمة تشبع الموائع و النفاذية النسبية:

Sw= 0.29; So= 0.71 ; krw= 0.02 ; kro= 0.2.

- لكون الانتاج متعدد الاطوار (نفط+ماء) و ليس بطور واحد فنجد الانضغاطية الكلية في ظروف المكمن و تساوي:

$$ct = c_oS_o + c_wS_w + c_gS_g + c_f = = (14.6x.71+3.2x.29+3.4)10^{-6}$$

$$ct= 14.7\ x10^{-6}\ psi^{-1}.$$

- يُمكن ان نتحقق من الانضغاطية الكلية لظروف باطن البئر بحسب توفر المعلومات ، هنا فان الانتاجية الكلية بظروف البئر تساوي:

$$q_tB_t = q_oB_o + q_wB_w$$

$$q_tB_t = 132x1.21 + 23x1.00 = 182.7$$

$\mathbf{c_{twb}}$ –total compressibility@wellbore اذن الانضغاطية الكلية لظروف باطن البئر تساوي:

$$c_{twb}=c_o\frac{q_o\beta_o}{q_t\beta_t} + c_w\frac{q_w\beta_w}{q_t\beta_t}$$

$c_{twb}= 13.2x10^{-6}$ psi^{-1} for the wellbore.

قيم الانضغاطية متقاربة.

- يجب أيضًا تقدير قيمة الانتقالية Mobility الكلية للسوائل$(k/\mu)_T$ المنتجة في التكوين من خلال المعادلة:

$$(k/\mu)_T= k(k_o/\mu_o + k_w /\mu_w)$$

$$\mathbf{(k/\mu)_T}= k(0.2/2.3 +0.02/0.94)= 0.11\ k = \mathbf{0.11\times135}$$

- الان نجد حدود الخط المستقيم نصف لوغاريتمي (منطقة الجريان الشعاعي اللامحدود) والذي سيكون محصور مابين اوطا وقت الذي يمثل وقت نهاية تاثير تخزين جوف البئر - WBS و ما بين اعلى وقت الذي تمثله المعادلة رقم- 12 و 27 على التوالي:.

$$\Delta t > \frac{170{,}000\ C\ e^{0.14s}}{(kh/\mu)}$$

$$t_{pss} \equiv \frac{\phi\mu c_t A(t_{DA})_{pss}}{0.0002637k}$$

لتطبيق المعادلة اعلاه نحتاج الى تحديد معامل تخزين البئر، بفرض ان حفرة البئر مليئة بالسائل على ان نستخدم الانضغاطية الكلية ct و الانتقالية الكلية $(k/\mu)_T$ و اعتبارقيمة النفاذية k=135 md. و عامل القشرة يقدر بـ s = 2.0.

- أولاً نحسب معامل تخزين البئر C و يساوي:

$$C=V_u\times c_t$$

$$C= 0.00387x3600x13.2x10^{-6}$$

$$C= 1.84 \times 10^{-4}\ bbl/psi.$$

إذ ان Vu يمثل حجم حفرة البئر

نطبق المعادلة :

$$\Delta t > \frac{170{,}000x1.84x10^{-4}xe^{0.14x2}}{0.11x135x63}$$

$\Delta t > 0.044$ hours = 2.65 minutes.

النتيجة اعلاه تبين بان مدة تاثير تخزين البئر قليلة و لا تتسبب في احداث مشكلة ملحوظة في بيانات الضغط.

- الان نتحقق فيما لو كان البئر سينتج ضمن منطقة الجريان شبه المستقر pseudo steady state-pss. نسبة للشكل الهندسي المربع لمنطقة تصريف البئر و البئر يقع في المركز فان

$(t_{DA})_{pss} = 0.1$ و عليه فان وقت الوصول الى حالة الجريان شبه المستقر تساوي:

$$t_{pss} \equiv \frac{\phi \mu c_t A (t_{DA})_{pss}}{0.0002637k}$$

$$t_{pss} \equiv \frac{0.163 \times 14.7 \times 10^{-6} \times 1'742,400 \times 0.1}{0.0002637 \times 0.11 \times 135}$$

tpss >>107 hours >> 4.5 days

لكون البئر فعليا منتج لعدة اسابيع و بالمقارنة مع الوقت اعلاه فتاكد لنا ان جريان البئر يكون في الحالة شبه المستقرة PSS. ايضا . الوقت اعلاه يُمثل وقت بداية الخط المستقيم المائل المرسوم على مرتسم بياني عادي cartesian لعلاقة الضغط مقابل الوقت والذي نحتاج الى تحديد ميله .

- لتقدير نهاية الخط المستقيم نصف اللوغاريتمي ، نستخدم المعادلة رقم 12 و عامل الشكل لمنطقة التصريف المناسبة من الفصل 4 /الجزء الاول او الشكل 11-10. و نظرًا لأن المكمن ينتج في الحالة شبه المستقرة ، فإننا نفترض أن الشكل الهندسي للمكمن عبارة عن مربع مغلق و البئر يقع في المركز.

لايجاد الوقت اللابعدي لنهاية مدة الجريان الشعاعي اللامتناهي ، نستخدم قيمة $t_{pDA} \approx 0.1$ من الجدول4-1 والمنحنى رقم 1 في الشكل 11-9 (لكل شكل هندسي رقم معين) لطريقة هورنر و الشكل11-10 لطريقة ميلر-دايز-هاجنسون MDH. سنحصل على القيم الاتية:

$(\Delta t_{DA})_{esl} \approx 0.013$) – لمخطط هورنر Horner و $(\Delta t_{DA})_{esl} \approx 0.0038$) لمخطط Miller-Dyes-Hutchinson-MDH. ثم بتطبيق المعادلة الاتية :

$$\Delta t = \frac{\phi \mu c t A (\Delta t_{DA})_{esl}}{0.0002637k} = 1070(\Delta t_{DA})_{esl}$$

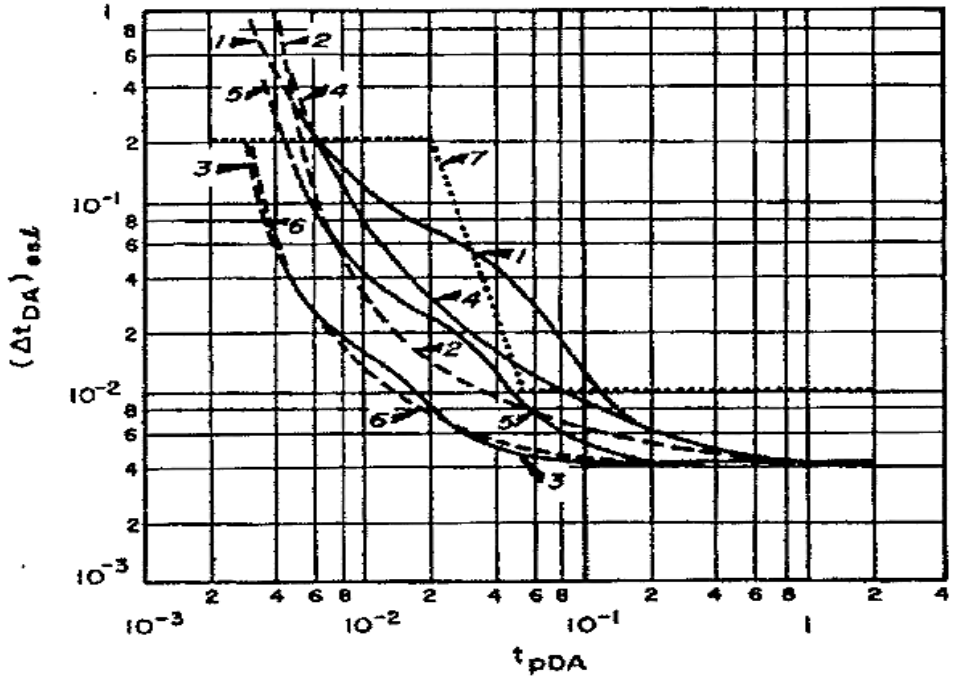
اذن و بالتعويض فان وقت نهاية الخط نصف اللوغاريتمي end of semilog line-esl في مخطط هورنر يساوي :

$\Delta t = (1,070)(0.013) = 14$ hours

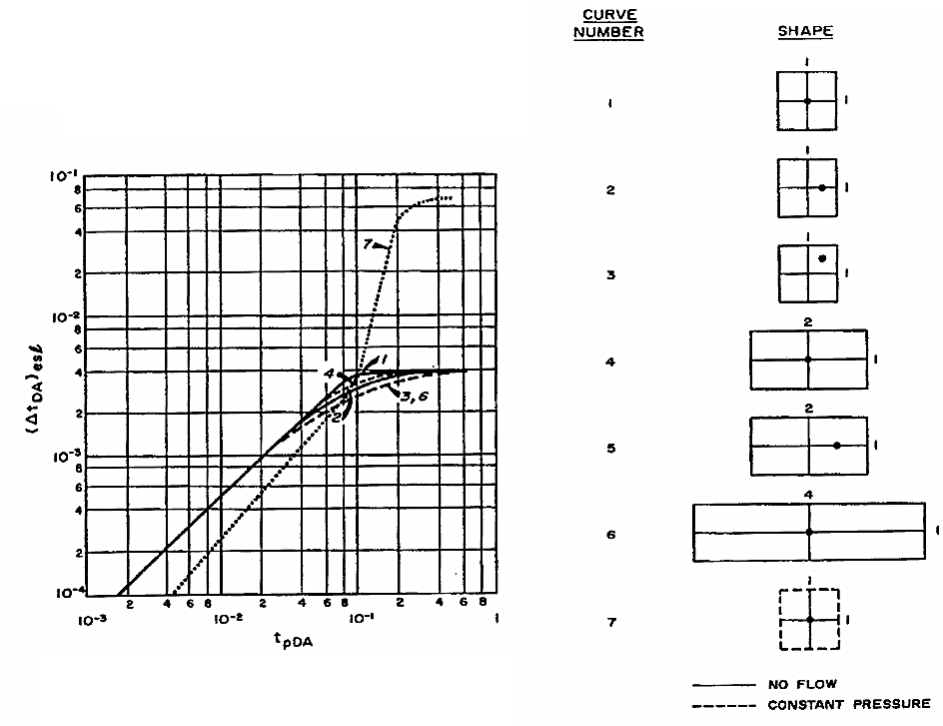
وقت نهاية الخط نصف اللوغاريتمي في مخطط MDH :

$\Delta t = 1070 \times 0.0038 = 4.1$ hours

الأوقات اعلاه ربما تكون متحفظة بعض الشي بسبب ربما تاثير انتاج الآبار المجاورة كونها منتجة و لم تغلق ، وبالتالي فإن البئر المعني بالفحص لن يكون في الواقع وسط مربع مغلق بمساحة 40 ccres . ومع ذلك ، نلاحظ ان وقت الخط المستقيم نصف لوغاريتمي في المخطط لهورنر يبدو هو الاعلى.



الشكل11-9 مخطط لتحديد نهاية الخط نصف اللوغاريتمي في منحني هورنر
للمثال رقم- 3 Earlougher(1977)



الشكل11-10 : : الرسم الايمن- الاشكال الهندسية المقترحة للمكمن و موقع البئر و الرسم الايسر مخطط لتحديد وقت نهاية الخط نصف اللوغاريتمي في مخطط MDH للمثال رقم- 3 Earlougher(1977)

- حساب ميل خط المستقيم نصف لوغاريتمي :

$$m = 162.6\frac{\mu q \beta}{kh} = 162.6\frac{182.7}{0.11x135x63}$$

$$m = 31.8 \text{ psi/cycle.}$$

قيمة الميل m الواطئة نسبيًا تبين إلى ان الزيادة بالضغط عبر مدة غلق البئر تسير ببطء ، لذلك نحتاج إلى نصب مقاييس حساسة للضغط. قد نلجا الى تثبيت إنتاج البئر بمعدل أعلى قبل فحص تصاعد الضغط Build-up لزيادة استجابة الضغط .

- نُخمن مستوى الضغط المتوقع أثناء تصاعد الضغط Build-up و لاي وقت لاحق سيكون ضمن منطقة الجريان اللا متناهي . للقيام بذلك نرتب معادلة عامل القشرة بصيغة تهدف لايجاد الضغط عند ساعة واحدة P1hr كما يأتي:

$$p_{1hr} = p_{wf} + m\left[\log\left(\frac{k}{\phi\mu c_t r_w^2}\right) - 3.23 + 0.86859s\right]$$

$$= 2{,}450 + 31.8\left[\log\left(\frac{(0.11)(135)}{(0.163)(14.7\times10^{-6})(0.26)^2}\right) - 3.2275 + 0.86859\,s\right]$$

$$p_{1hr} = 2600 + 27.6s$$

معادلة حساب فرق الضغط من الميل عند اي وقت تساوي:

$$\Delta p = \pm m \log(t_2/t_1)$$

معادلة حساب الضغط من الميل عند اي وقت و بتاثير معامل القشرة تساوي:

$p_{(\Delta t)} = 2600 + 27.6s + 31.8 \log \Delta t.$

إذا كانت قيمة عامل القشرة s = 2 و مدة الفحص 24 ساعة فالضغط يساوي:

$p(24) = 2600 + 27.6*2 + 31.8 \log(24) = 2700$ psi

اذن و بحسب الضغط p ≈2700 psi ، فجهاز قياس الضغط الذي تم اختياره يقرا لمدى 3300psi يكون مناسب و قادرًا على اكتشاف تغيير ضغط الى حد 30 psi.

- يُمكن أيضًا تقدير متوسط الضغط المتوقع P′ باستعمال طريقة ديتزDietz ، بجعل C_A = 30.88 لمنطقة التصريف مربعة الشكل. ان الوقت الذي يصل فيه الخط المستقيم semilog إلى معدل الضغط P′ يُحسب من المعادلة التالية:

$$(\Delta t)_{p'} = \frac{\varphi\mu c_t A}{0.0002637 k C_A}$$

$$(\Delta t)_p = \frac{(0.163)(14.7 \times 10^{-6})(1{,}742{,}400)}{0.0002637\ \ (0.11)(135)(30.88)}$$

$(\Delta t)_p = 34.5$ hours.

نعوض في معادلة الضغط في ادناه:

$P' = 2{,}600 + 27.6x2 + 31.8 \log(34.5) > 2{,}704$ psi.

لاحظ خلال اربعة و عشرين ساعة لفحص تصاعد الضغط Build-up فان الزيادة بالضغط كانت بحدود 100 psi بينما عبر $\Delta t = 34.5$ hrs فان الزيادة بالضغط كانت 104 psi .

B_o=oil formation volume factor ، q_o=oil flow rate ،q_w=water flow rate
B_w= water formation volume factor bbl/stb،bbl/stb

تصميم الفحص النبضي – Pulse testing design

ان المعرفة او التنبؤ بمقدار الضغط المقاس في ابار المراقبة عبر تصميم الفحص النبضي مهم في تحديد نوع مقياس الضغط (gauge) ، مديات المقياس و دقته . كذلك من المهم التحديد المسبق لطول مدة الفحص والتي تعتبر من الامور المهمة في تصميم الفحص النبضي ، اوجد Kamal and Brigham (1975) طريقة لتصميم الفحص النبضي والتي تم ذكرها في فصل الفحص النبضي / الجزء الاول.

مثال-4 تصميم الفحص النبضي Tarek(2005)

اوجد تصميم ملائم لتنفيذ الفحص النبضي مستخدما المعاملات التقريبية ادناه:

$$\mu = 3\ \text{cp}, \quad \phi = 0.18, \quad k = 200\ \text{md} \quad h = 25\ \text{ft}, \quad r = 600\ \text{ft},$$
$$c_t = 10 \times 10^{-6}\ \text{psi}^{-1} \quad B = 1\ \text{bbl/STB}, \quad Q = 100\ \text{bbl/day}, \quad F' = 0.6$$

الحل :

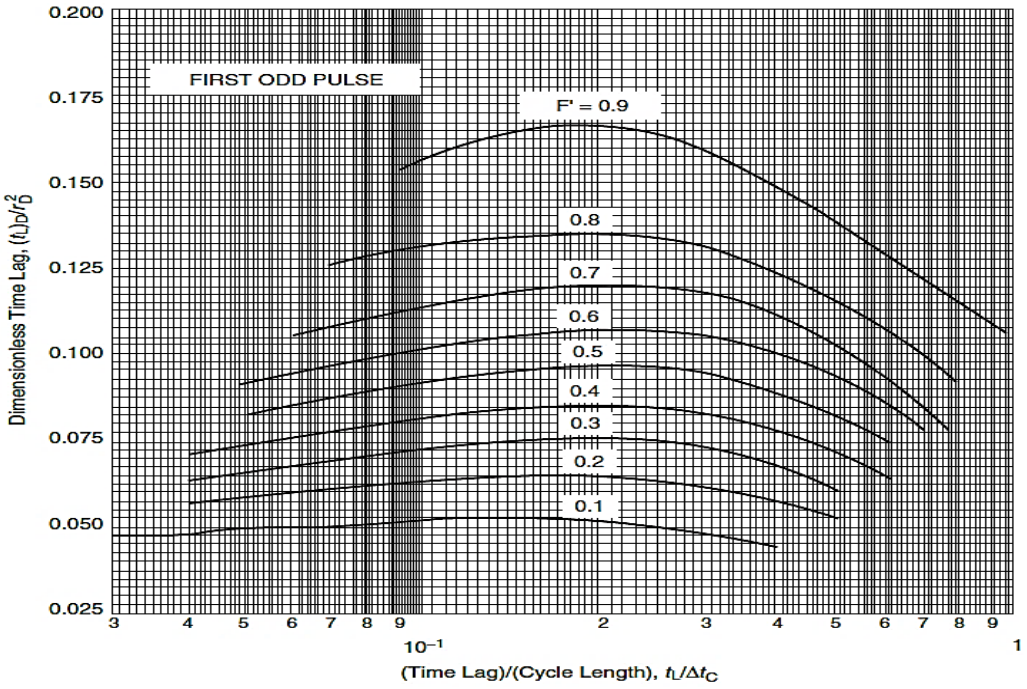
- نحدد وقت التاخير اللابعدي $(t_L)_D$ time lag من قيمة نسبة النبضة F'=0.6 و هي القيمة العادية التي تُستخدم في الفحص النبضي لمكمن نفطي ، نستخدم النبضات الفردية ، اذن وقت التاخير اللابعدي :

For odd pulses $\quad (t_L)_D = 0.09 + 0.3F'$

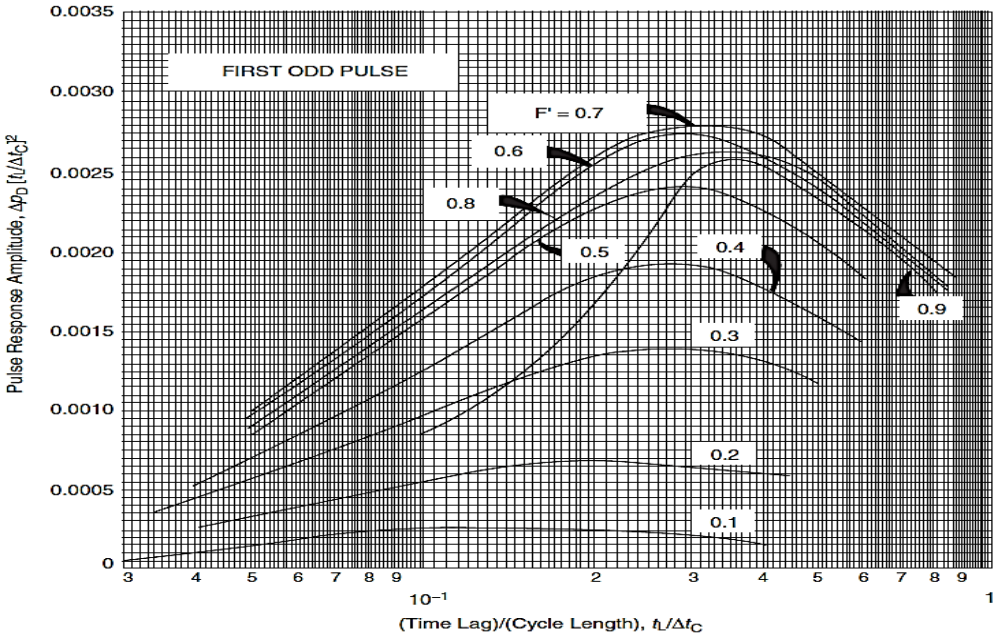
$$(t_L)_D = 0.09 + 0.3(0.6) = 0.27$$

- **نختار** النبضة الفردية الاولى و نحسب مجموعة وقت التاخير اللابعدي من الشكل11-11 و يساوي:

$$\left[(t_L)_D / r_D^2\right]_{\text{Fig}} = 0.106$$



الشكل11-11 : علاقة وقت التاخير و طول الدورة cycle الكاملة للنبضة الفردية الاولى



الشكل11-12 : علاقة وقت التاخير و استجابة الضغط للنبضة الفردية الاولى

- حساب مجموعة سعة الضغط اللابعدي من الشكل11-12 و تساوي:

$$\left[\Delta p_D (t_L/\Delta t_C)^2\right]_{Fig} = 0.00275$$

- **حساب** المعاملات الاتية :

وقت التاخير - time lag t_L

$$t_L = \left[\frac{\phi \mu C_t r^2}{0.0002637\bar{k}}\right]\left[(t_L)_D / r_D^2\right]_{Fig}$$

$$= \left[\frac{(0.18)(3)(10\times10^{-6})(660)^2}{(0.0002637)(200)}\right](0.106)$$

$$t_L = 4.7 \text{ hours}$$

- طول مدة دورة كاملة (غلق و فتح) cycle time- Δt_C:

$$\Delta t_C = \frac{t_L}{(t_L)_D} = \frac{4.7}{0.27} = 17.5 \text{ hours}$$

- طول مدة النبضة عند الغلق - Pulse length (shut-in) Δt_p:

$$F^{\backslash} = \frac{\Delta t_p}{\Delta t_C} = \frac{\Delta t_p}{\Delta t_p + \Delta t_f}$$

$$\Delta t_P = \Delta t_C F^{\backslash} = (17.5)(0.27) \approx 5 \text{ hours}$$

- طول مدة النبضة عند الجريان او الفتح - Pulse length (flow) Δt_f:

$$\Delta t_f = \Delta t_C - \Delta t_P = 17.5 - 4.7 \approx 13 \text{ hours}$$

- نجد سعة او مدى الضغط من المعادلة الاتية:

$$\Delta p = \left[\frac{141.2QB\mu}{h\bar{k}\left[(t_L)_D\right]^2}\right]\left[\Delta p_D (t_L/\Delta t_C)^2\right]_{Fig}$$

$$= \left[\frac{(141.2)(100)(1)(3)}{(25)(200)(0.27)^2}\right](0.00275)$$

$$\Delta p = 0.32 \text{ psi}$$

اذن و بناء" على حسابات تصميم الفحص النبضي اعلاه و للنبضات الفردية نتوصل الى ما يلي ;

يُغلق البئر لخمس ساعات 5 hrs و يُفتح للجريان لثلاث عشر ساعة 13 hrs و تُعاد كل دورة عبر ثمان عشر ساعة 18 hrs، دقة مقياس الضغط المطلوب يكون الى اقل من 0.3 psi . الحسابات اعلاه ممكن ان تعاد لحالة النبضة الزوجية الاولى.

إذ ان :

$F^{\backslash}$ =Pulse ratio

hours،t_L= time lag

$(t_L)_D$= Dimensionless time lag

r_D= Dimensionless distance

hours ،Δt_C = cycle length

hours،Δt_p = pulse period

hours،Δt_f = cycle period

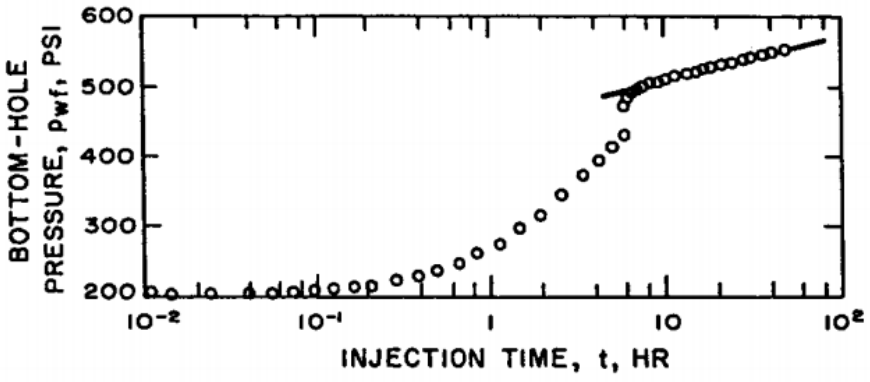
r = distance between the active well and observation well، ft

مثال-5 :

تصميم فحص بئر الحقن Injection-Well Test Design Earlougher(1977)

تم اقتراح عمل برنامج لتصميم فحص لبئر حقن باستخدام بيانات العديد من آلابار المتوفرة و المغمورة بالماء . المكمن مغمور بالماء كليا والنفط المتبقي في المكمن هو النفط المتخلف residual oil فقط و الذي لا يُمكن استرداده بالطرق التقليدية وانما بطرق الاستخلاص المدعم الاخرى. الضغط المكمني منخفضًا إذ كان مستوى السائل الساكن على عمق 600 قدم تحت السطح. نظرًا لأهمية الفحوصات ، وبما أنه من المتوقع عند الحقن يتغير تخزين جوف البئر - WBS wellbore storage لكون مستوى السائل منخفض ، فقد تقرر حساب استجابة الضغط المتوقعة باستخدام طريقة محاكاة المكمن Reservoir simulator .

توفرت بيانات خواص المكمن لبرنامج المحاكاة و من جراء الحسابات اعطى المنحني البياني نصف لوغاريتمي في الشكل11-13 علاقة الضغط مع الوقت والتي تمثل الاستجابة لفحص الحقن.



الشكل11-13 : حساب استجابة ضغط الحقن للمثال رقم- 5

كما هو متوقع ، ارتفع مستوى السائل في البئر أثناء الحقن حتى وصل إلى السطح بعد حوالي 5.9 ساعة من بدء الحقن. الزيادة السريعة للضغط في الشكل11-13 هو نتيجة لانخفاض معامل تخزين جوف البئر - WBS حيث حصل توازن ما بين ضغط عمود ارتفاع مستوى السائل و ضغط الحقن.

لتحديد النفاذية قمنا بتفسير الخط المستقيم نصف اللوغاريتمي و الذي يبدأ بعد حوالي الوقت 10

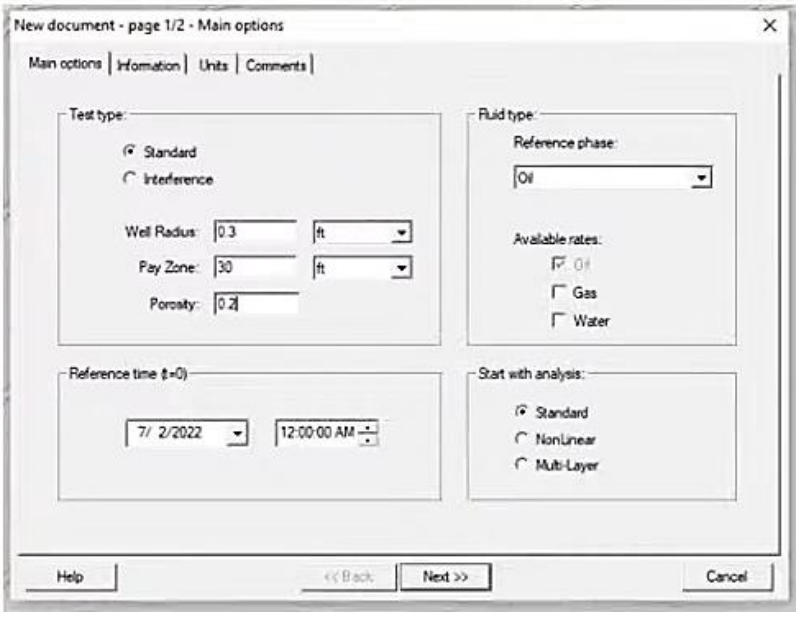
ساعات ، اظهرت حسابات المحاكاة قيمة للنفاذية بحوالي 15 بالمائة أقل من قيمة الإدخال وكذلك عامل القشرة اقل بمقدار 1.1.

يُعزى هذا الاختلاف بسبب الانخفاض السريع في تخزين جوف البئر - WBS مماجعل انحدار الخط المستقيم سريع. ان النتائج اظهرت اختلاف عن التي ادخلت الى نظام المحاكاة هذا يدل على احتمال كون البيانات المدخلة غير دقيقة على افتراض أن نظام المحاكاة يعمل بشكل صحيح . ايضا يجب ان نضع في الاعتبار الفرضيات التي قامت عليها حسابات المحاكاة و مدى ملائمة نوع الفحص الذي تم اختياره و بيانات الادخال في ذلك.

مثال-6 Mumen Mohammed(2002)

تصميم فحص تصاعد الضغط Build-up لبئر نفطي منتج ، باستخدام البرنامج الجاهزة ؟؟

- يطلب البرنامج في البداية ادخال البيانات الاتية ;نوع الفحص –،نصف قطر البئر - r_w=0.3 ft، سُمك الطبقة الصافي- h=30 ft ، تاريخ البدء الفحص ، نوع المائع - نفط oil و اختيار طريقة التفسير: الخطية القياسية standard (الشكل11-14).

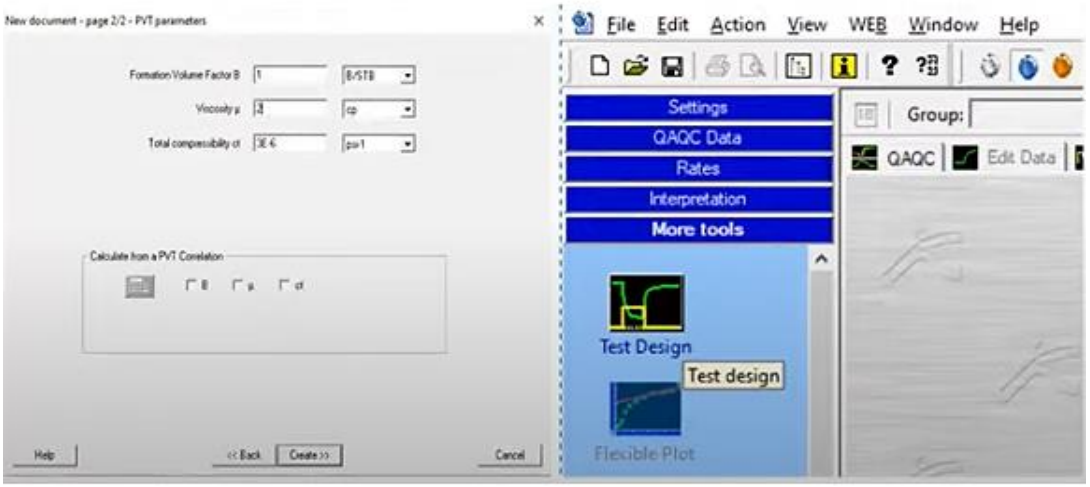


الشكل11-14 : نافذة البيانات العامة للمكمن و البئر للمثال رقم-6

- ندخل بيانات خواص المائع PVT الشكل11-15. في حال عدم توفر هذه المعلومات فنلجا الى استخدام علاقات عامة calculation from PVT correlation في البرنامج لتحديد خواص المائع المطلوبة.

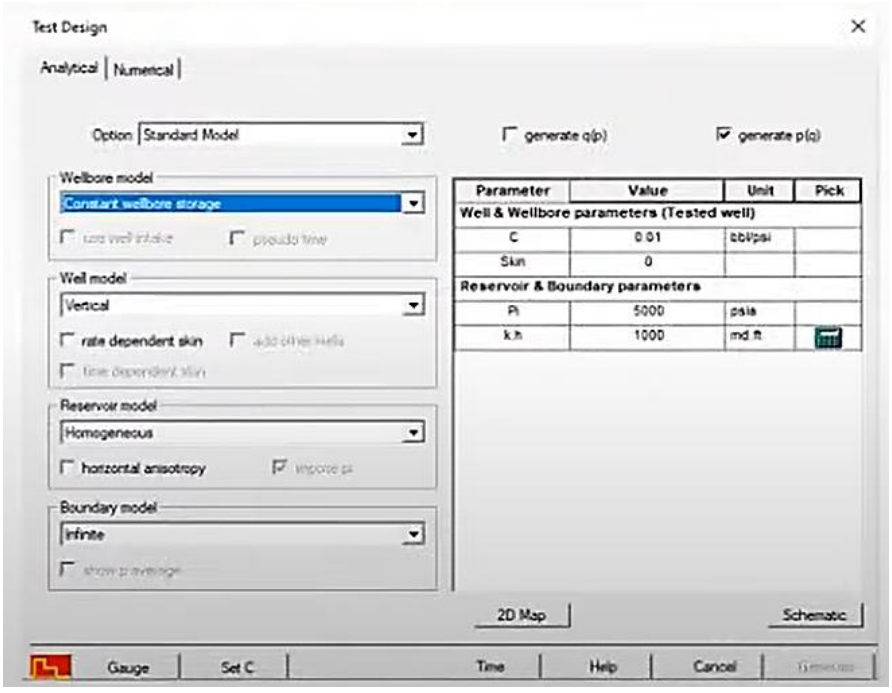
- نختار تصميم الفحص test design الشكل11-15.

- من نافذة تصميم الفحص Test Design الشكل11-16، نُدخل المعلومات المطلوبة و تشتمل على مايلي:



الشكل11-15 : نافذة خواص المائع (اليسار) و اختيار تصميم الفحص (اليمين) للمثال رقم-6

- اختيار الاسلوب التحليلي analytical لتفسير المثال وليس العددي Numerical ، ثم من موديل باطن البئر wellbore model نختار نظام تخزين البئر الثابت Constant WBS و نختار موديل البئر العمودي vertical بالنسبة الى موديل البئر well model.



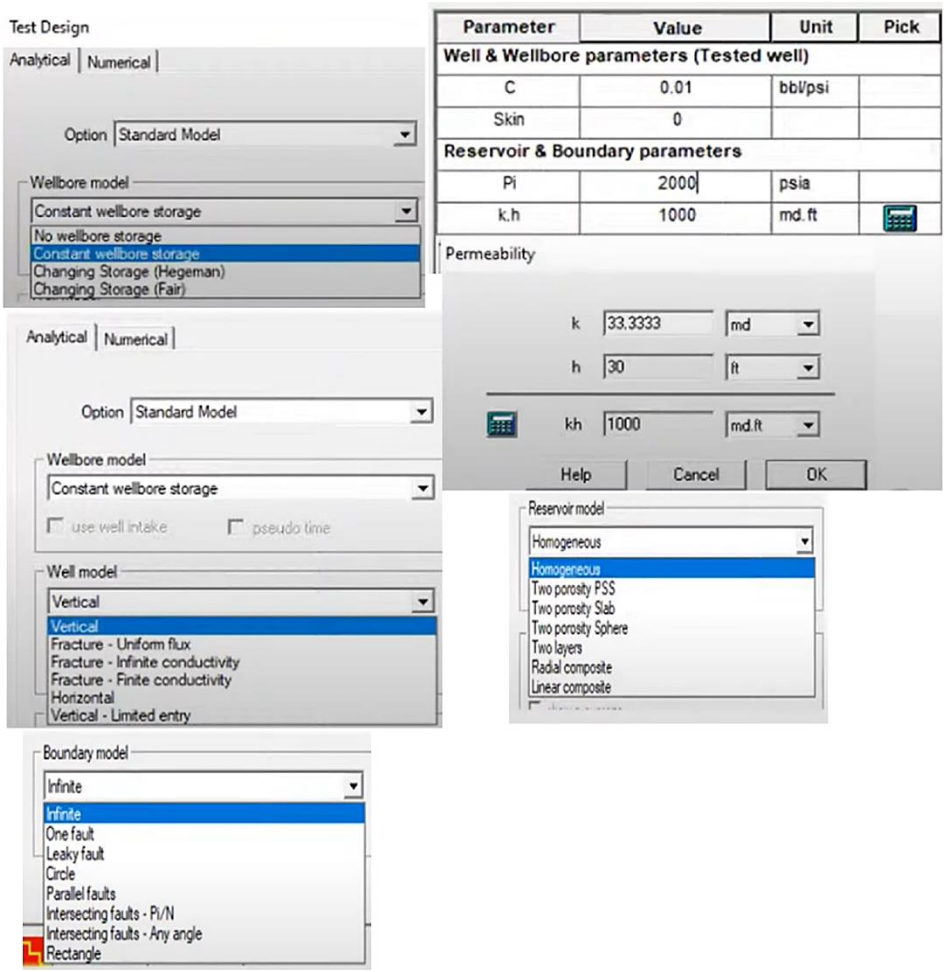
الشكل11-16 : نافذة تصميم الفحص للمثال رقم-6

- نكمل ادخال المعاملات الاتية ; حاصل ضرب النفاذية في السُمك الصافيk*h=1000 md.ft ، الضغط المكمني الاصلي Pi=2000 psi ، عامل القشرة skin=0 ، معامل تخزين البئر

C=0.01 bbl/psi . المعاملات اعلاه يتم تحديدها من مصادر مختلفة او نفرضها.

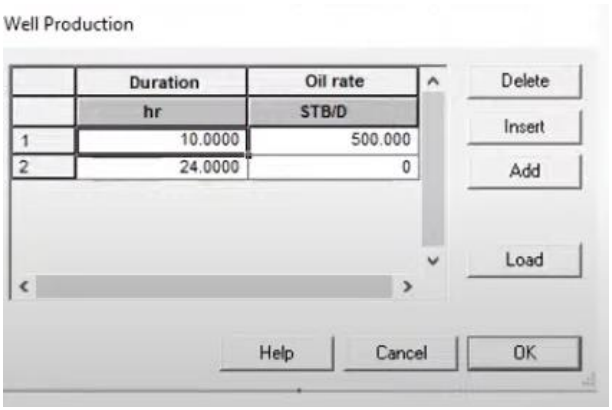
- استكمال اجراءات ادخال البيانات المطلوبة لتصميم الفحص و ثم نختار الموديل المكمنيreservoir model من النوع المتجانس Homogeneous ،و نختار حدود المكمن اللامتناهي infinite .

لاحظ هنالك خيارات متعددة تظهر عند اختيار الموديلات المذكورة في اعلاه و قد توضحت في الشكل11-17.



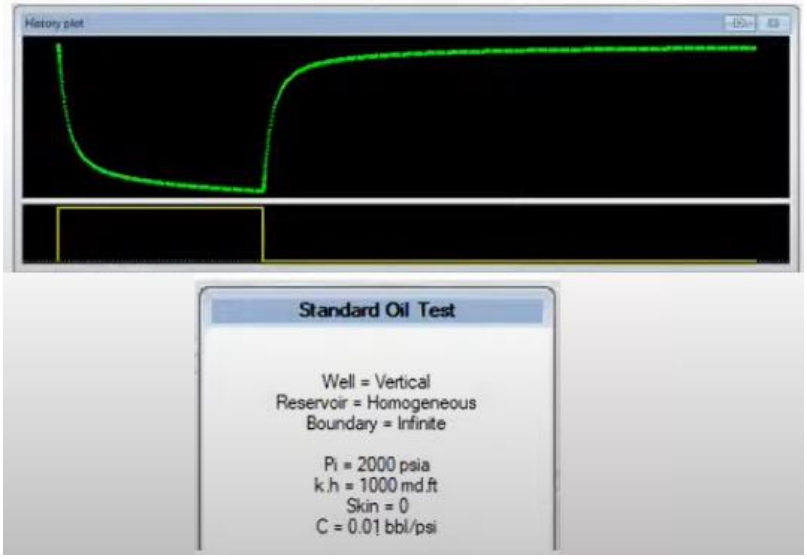
الشكل11-17 : تفاصيل نوافذ الادخال لمعلومات تصميم الفحص ، المثال رقم-6

- ثم الى نافذة انتاج البئر well production. إذ نُدخل طول فترات الجريان و الغلق. المثال يحدد مدة جريان البئر عشر ساعات بمعدل جريان q=500 stb/day ثم يغلق لمدة يوم كامل - 24 hrs. ، الشكل11-18.



الشكل11-18 : ادخال فترات الجريان و الغلق للمثال رقم-6

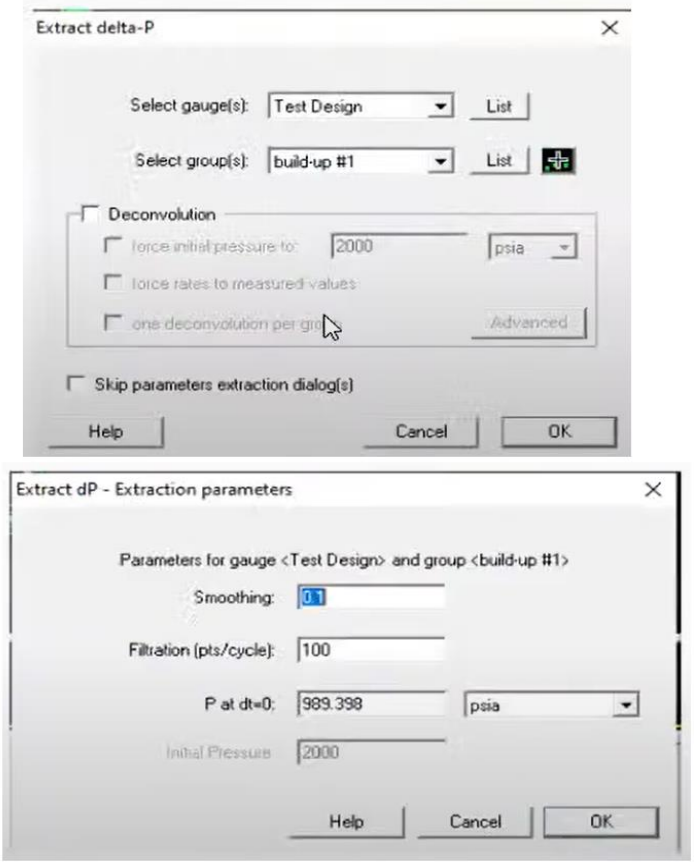
- بعد التاكد من اكتمال بيانات تصميم الفحص ، نعمل generate ، البرنامج يقوم بعرض بيانات الادخال الشكل 11-19.



الشكل11-19 : عرض بيانات الادخال لتصميم الفحص، المثال رقم-6

- ثم الى خطوة التفسير interpretation (من الشكل 11-15)، من نافذة الضغط Extract pressure نختارالمقياس المعني بالفحص Select gauges و تحديد مجموعة الفحص المصاحبة لهذا المقياس. ثم ندخل في نافذة Extraction parameters معلومات المقياس و تتضمن دقة القياس Smoothing=0.1، و Filtration=100 التي تمثل عدد النقاط لدورة لوغاريتمية واحدة ثم بادخال ضغط الجريان عند باطن البئر و يساوي $P_{wf@\ dt=0}$=989.4 psi الشكل11-20 . بعدها يبدا البرنامج بالحسابات.

بعدها يُظهر البرنامج رسم بياني نصف لوغاريتمي للعلاقة ما بين الضغط المغلق و وقت هورنر و رسم بياني لوغاريتمي للعلاقة ما بين فرق الضغط و مشتقة الضغط مع الوقت الشكل11-21.



الشكل11-20 :معلومات الضغط ، المثال رقم-6

المرحلة هذه تعتبر مهمة إذ نحتاج الى مراجعة الرسومات البيانية المعروضة (خصوصا الرسم اللوغاريتمي) بشكل مضبوط و تقييمها من إذ كونها حققت الهدف من تصميم الفحص ;

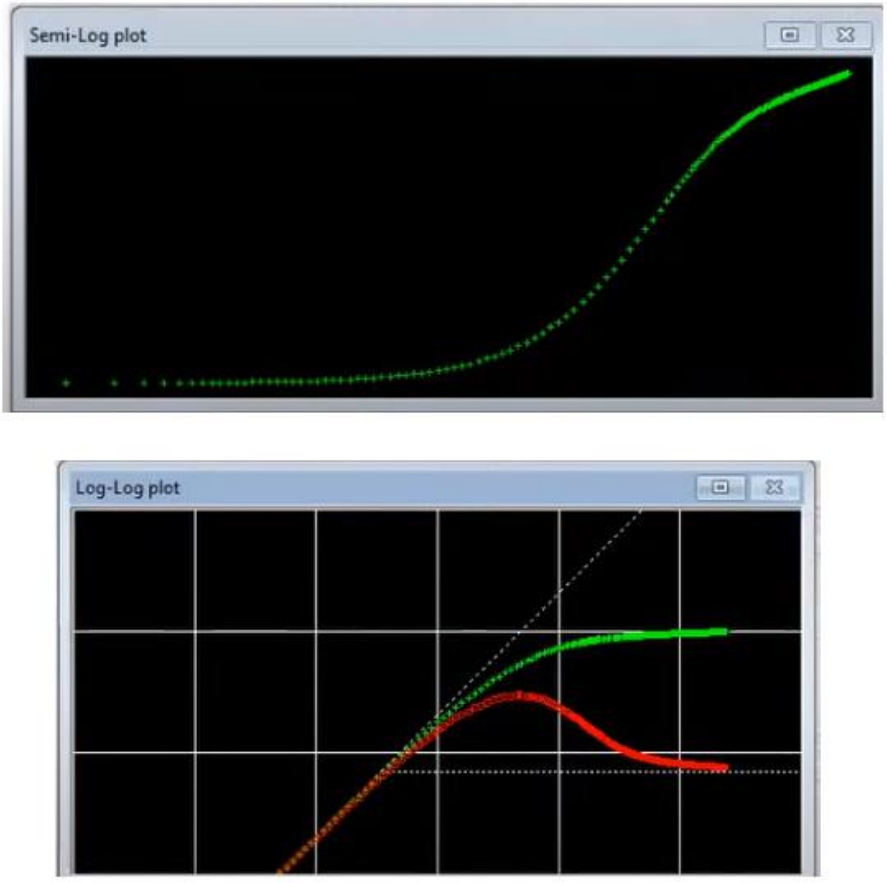
مثلا هل تم الدخول الى منطقة الجريان الشعاعي اللامتناهي ام لا ؟ و هل مدة الدخول كافية لحساب النفاذية ؟

هل هنالك عدم تجانس و ضوضاء في اشارة الضغط و ما السبب في ذلك ؟؟ .

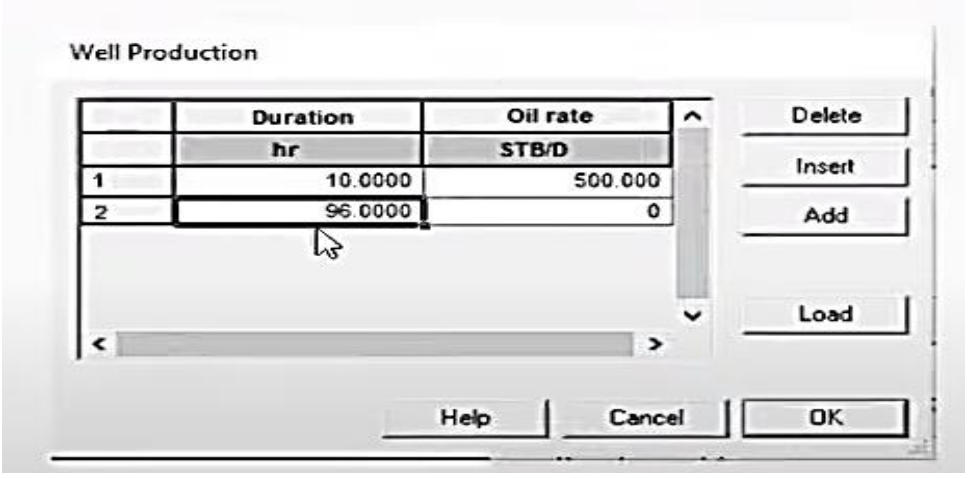
في هذا المثال نلاحظ ان منطقة الجريان الشعاعي غير واضحة في الرسم اللوغاريتمي و تحتاج الى ان يصل الخط الافقي الى ما يزيد عن نصف الى ثلثي دورة لوغاريتمية في منطقة الجريان الشعاعي اللامحدود، لعلاج ذلك نلجا الى زيادة مدة الغلق الى .96 hrs بدلا من 24 hrs.

نُعيد المحاولة بنفس الخطوات السابقة و باستخدام المعلومات المحدثة في الشكل-11-22 . سنحصل على الرسم اللوغاريتمي في الشكل-11-23.

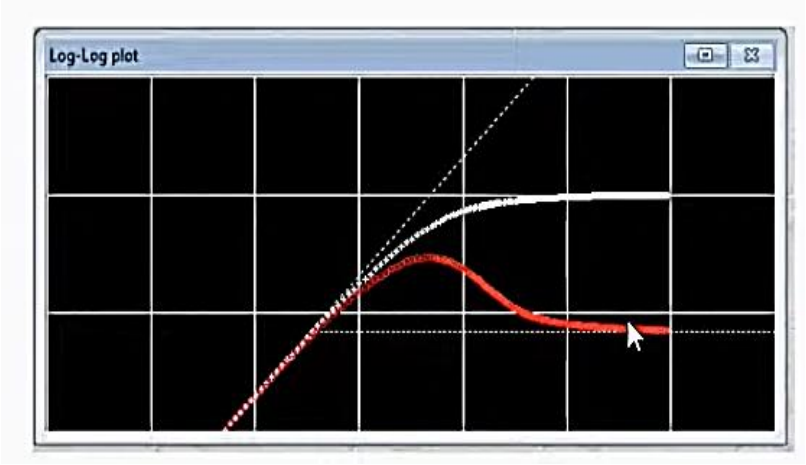
نلاحظ مدة الجريان الشعاعي واضحة إذ بالامكان عبرها حساب النفاذية و عامل القشرة و حساب تخزين البئر خلال المدة المبكرة للفحص عند الخط المستقيم بميل الواحد . بعد ذلك نقارن مدى تطابق النتائج المحسوبة مع بيانات الادخال.



الشكل11-21 :رسم منحني هورنر نصف لوغاريتمي(الاعلى) و رسم منحني مشتقة الضغط اللوغاريتمي(الاسفل)، المثال رقم-6



الشكل11-22 :البيانات المُحدثة لفترات الفتح و الغلق ، المثال رقم-6



الشكل11-23 :الرسم النهائي لمنحني مشتقة الضغط ، المثال رقم-6

مثال 7 : تصميم فحص التداخل Medhat(2009)

لمعرفة التداخل ما بين بئري المراقبة و البئر المنتج تقرر اجراء تصميم فحص التداخل Interference test ما بين البئرين و حسب المعلومات المتوفرة :

Formation net thickness	45 ft
Porosity	0.13 fraction
Total system compressibility	6.5 E–6 psi^{-1}
Permeability	100 md
Distance between wells	1,750 ft
Fluid viscosity	0.7 cp
Fluid formation volume factor	1.2 RB/STB
Expected flow rate	1,300 STB/D

نفترض ان تغيير الضغط عند بئر المراقبة بحدود 5 psi ؟؟

الحل :

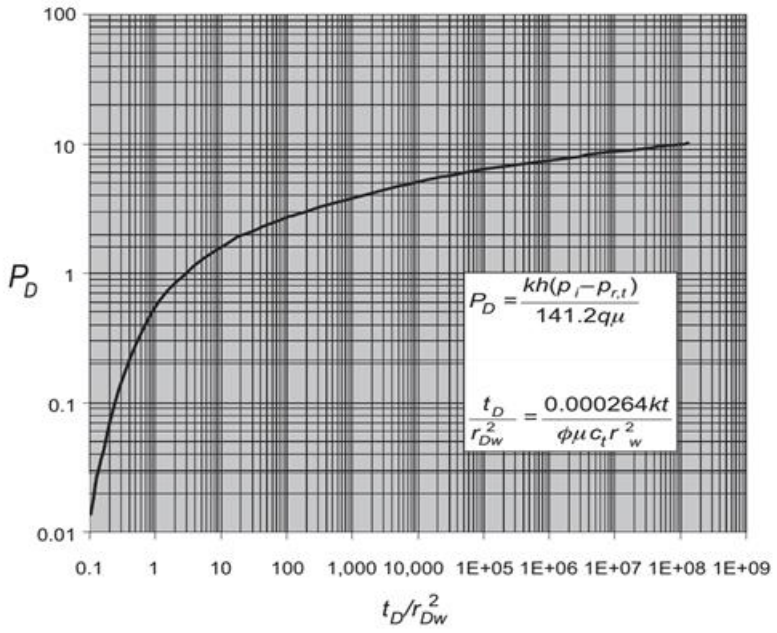
- حساب الضغط اللابعدي :

$$p_D = \frac{kh(p_i - p_{r,t})}{141.2qB\mu}$$

$$p_D = (100)(45)(5)/(141.2)(1,300)(1.2)(0.7) = 0.1459.$$

- من القيمة P_D و الشكل 11-24 ادناه نحدد قيمة $t_D/r^2_{Dw}=0.3$.
- بما ان الوقت اللابعدي يساوي:

$$t_D = \frac{0.0002637kt}{\phi\mu c_t r_w^2}$$



الشكل11-24 :علاقة الضغط اللابعدي و الوقت اللابعدي ، المثال رقم-7

وبالتعويض عن t_D بما يساويها في الاحداثي السيني (راجع الشكل11-24) ينتج :

$$t_D/r_{Dw}^2 = \frac{0.0002637kt}{\phi\mu c_t r_w^2}$$

❖ ثم نعوض في المعادلة اعلاه لحساب الوقت بالساعات و كما يلي:

$$t = (0.3)(0.13)(0.7)(6.5\ \text{E–6})(1{,}750)^2/(0.0002637)(100) = 20.61\ \text{hours.}$$

هذا يعني ان فرق الضغط الذي مقداره Δp=5 psi سيتم تسجيله عند بئر المراقبة بعد مرور 21 hrs و بمعدل جريان للبئر الفعال بحدود 1300 stb/day . لذا تُجهز المعدات المطلوبة في الفحص بحسب معلمات وقت استلام اشارة الضغط و فرق الضغط و معدل الجريان المثبت في اعلاه.

ممكن مراجعة المثالين رقم-7 و رقم- 8 في الفصل-14 / الجزء الاول بخصوص تصميم الفحص النبضي.

References – المصادر

1. Earlougher RC Jr. "Advances in Well Test Analysis". Monograph Series. Vol. 5،Dallas، TX: SPE; 1977..
2. Frailey، S.M.، Pierce، A.E.، and Crawford، G.E. 1994. “Establishing Design Criteria for Pressure Buildup Tests”. Present at the Southwestern Petroleum Short Course، 20–21 April، Texas Tech University، Lubbock، Texas، USA.
3. George Stewart، " Well Test Design and Analysis"، Copyright© 2011 by PennWell Corporation، Tulsa، Oklahoma..
4. John P. Spivey، W. John Lee، “ Applied Well Test Interpretation “، © Copyright 2013 Society of Petroleum Engineers.
5. Medhat M. Kamal "Transient Well Testing " Monograph SPE © Copyright 2009 Society of Petroleum Engineers.
6. M. O. Oyvekonwu ، “Program For Designing Pressure Transients، Computers & Geosciences”، Vol. 15. No. 7. pp. 1067-1088. March-1989.
7. Mumen Mohammed ، "Well Test Design،" OPA Energy ، presentation 53rd Free Webinar، 2002.
8. Standing، M. B. 1979، "Calculating damage effects in well flow problems" unpubl، notes، Standford، Univ.، 20 p.
9. Stuart Mcaleese، "Operational Aspects Of Oil And Gas Well Testing،" © 2000 Elsevier B.V.
10. Tarek Ahmed ، Paul D. McKinney ، "Advanced Reservoir Engineering" ، Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier r ، 2005.
11. Tarek Al-Arbi Omar Ganat، "Modern Pressure Transient Analysis of Petroleum Reservoirs" ، Springer Nature Switzerland AG 2023.

APPENDIX –A – الملحق

جدول المعادلات الرياضية لعمليات معالجة البيانات
(Mathematical Formulations of Data Preprocessing Operations)

المعالجة (Processing)	المعادلات الرياضية (Mathematical Formulations)
معالجة الضوضاء (Noise Handling / Reduction)	• المتوسط المتحرك (Moving Average): $\hat{x}_t = \frac{1}{k}\sum_{i=0}^{k-1} x_{t-i}$ *حيث k الزمن عند الممهدة القيمة $\hat{x}_t$ و النافذة حجم t.* • مرشح (Savitzky-Golay Filter): $\hat{x}_t = \sum_{i=-m}^{m} c_i x_{t+i}$ *حيث c_i معاملات متعددة الحدود المُلائمة.*
كشف ومعالجة القيم الشاذة (Outlier Detection)	• المدى الربيعي (IQR): $IQR = Q_3 - Q_1$ شاذ إذا: $x < Q_1 - 1.5 \times IQR$ أو $x > Q_3 + 1.5 \times IQR$ • Z-Score: $z = \frac{x-\mu}{\sigma}$ شاذ إذا: $\|z\| > 3$
معالجة القيم المفقودة (Handling Missing Values)	• التعويض بالمتوسط (Mean Imputation): $\hat{x}_{missing} = \bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$ • التعويض بالوسيط (Median Imputation): $\hat{x}_{missing} = \text{Median}(x)$ • التعويض بالأمام (Forward Fill) للسلاسل الزمنية: $\hat{x}_t = x_{t-1}$ إذا كانت x_t مفقودة
اختزال الميزات (Dimensionality Reduction)	• تحليل المركبات الرئيسية (PCA): $X' = XW$ *حيث X مصفوفة البيانات الأصلية، W مصفوفة المتجهات الذاتية (Eigenvectors)، و X' البيانات المسقطة في الفضاء الجديد.* • القيم الذاتية (Eigenvalues): $\|C - \lambda I\| = 0$ *حيث C مصفوفة التباين المشترك (Covariance Matrix).*
التطبيع (Normalization)	• Min-Max Scaling (إلى [0,1]): $X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$ • Min-Max Scaling (إلى [a,b]): $X_{norm} = a + \frac{(X - X_{min})(b-a)}{X_{max} - X_{min}}$

• Z-score Standardization: $X_{std} = \frac{X-\mu}{\sigma}$ حيث $\mu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$ (المتوسط) و σ (الانحراف المعياري) $\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^2}$. • Robust Scaling: $X_{robust} = \frac{X-\text{Median}(X)}{IQR}$	التوحيد (Standardization)
• تحويل فورييه السريع (FFT) لاستخراج الترددات: $X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi kn/N}$ • استخراج السمات الزمنية: المتوسط المتحرك $\mu_t = \frac{1}{k}\sum_{i=t-k+1}^{t} x_i$ التباين المتحرك $\sigma_t^2 = \frac{1}{k}\sum_{i=t-k+1}^{t}(x_i-\mu_t)^2$	استخراج السمات (Feature Extraction)
• معامل ارتباط بيرسون (Pearson Correlation): $r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}}$ • مربع كاي (Chi-squared) للبيانات الفئوية: $\chi^2 = \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{c}\frac{(O_{ij}-E_{ij})^2}{E_{ij}}$ • Lasso (L1 Regularization): $\min_w \|Xw-y\|_2^2 + \lambda\|w\|_1$	اختيار السمات (Feature Selection)
• أخذ عينات عشوائي بسيط (Simple Random Sampling): $P(\text{اختيار العنصر}) = \frac{1}{N}$ • أخذ عينات طبقية (Stratified Sampling): $n_h = n \times \frac{N_h}{N}$ حيث h، N_h حجم الطبقة h في المجتمع، و n_h حجم العينة من الطبقة h، و N حجم المجتمع الكلي. • SMOTE (Synthetic Minority Oversampling Technique): $x_{new} = x_i + \lambda \times (x_{zi} - x_i)$ حيث $\lambda \in [0,1]$ رقم عشوائي، x_i نقطة من الفئة القليلة، و x_{zi} أحد جيرانها.	أخذ العينات (Sampling)
• الترميز التسلسلي (Label Encoding): $f : \text{Category} \rightarrow \{0,1,2,\ldots,k-1\}$ • الترميز الأحادي (One-Hot Encoding): لـ 3 فئات: [فئة أ, فئة ب, فئة ج] $\rightarrow \begin{cases} [0,0,1] \rightarrow \text{فئة أ} \\ [0,1,0] \rightarrow \text{فئة ب} \\ [1,0,0] \rightarrow \text{فئة ج} \end{cases}$	ترميز البيانات الفئوية (Encoding)

• ترميز الهدف (Target Encoding):
$\hat{x}_{category} = \frac{1}{n_{category}} \sum_{i \in category} y_i$

قاموس الرموز الرياضية لعمليات معالجة البيانات

(Glossary of Mathematical Symbols for Data Preprocessing)

الرمز	الوصف
رموز عامة	
x	قيمة البيانات الأصلية
$\hat{x}$	القيمة المقدرة أو المُعالجة
n	عدد نقاط البيانات
i, j, k, m	مؤشرات أو عدادات
t	الزمن
N	حجم المجتمع الكلي
معالجة الضوضاء (Noise Handling)	
k	حجم النافذة (Window Size)
x_t	قيمة البيانات عند الزمن t
$\hat{x}_t$	القيمة الممهدة عند الزمن t
c_i	معاملات مرشح Savitzky-Golay
m	نصف عرض النافذة لمرشح S-G

كشف القيم الشاذة (Outlier Detection)	
Q_1	الربع الأول (First Quartile) - 25% من البيانات
Q_3	الربع الثالث (Third Quartile) - 75% من البيانات
IQR	المدى الربيعي (Interquartile Range) = $Q_3 - Q_1$
μ	المتوسط الحسابي (Mean)
σ	الانحراف المعياري (Standard Deviation)
z	درجة Z (Z-score)
$\|z\|$	القيمة المطلقة لـ z

معالجة القيم المفقودة (Missing Values)	
$\bar{x}$	المتوسط الحسابي للقيم الموجودة
$x_{missing}$	القيمة المفقودة
$\hat{x}_{missing}$	القيمة المقدرة للتعويض
x_{t-1}	القيمة السابقة مباشرة في السلسلة الزمنية
اختزال الميزات (Dimensionality Reduction)	
X	مصفوفة البيانات الأصلية
X'	مصفوفة البيانات بعد الاختزال
W	مصفوفة المتجهات الذاتية (Eigenvectors)
C	مصفوفة التباين المشترك (Covariance Matrix)
λ	القيمة الذاتية (Eigenvalue)

$\|\cdot\|$	محدد المصفوفة (Determinant)
التطبيع (Normalization)	
X_{min}	الحد الأدنى للقيم
X_{max}	الحد الأقصى للقيم
X_{norm}	القيمة بعد التطبيع (عادة بين 0 و1)
a, b	الحدود الدنيا والعليا للتطبيع
التوحيد (Standardization)	
X_{std}	القيمة بعد التوحيد (Standardized Value)
$\text{Median}(X)$	الوسيط (القيمة الوسطى)
X_{robust}	القيمة بعد التوحيد المقاوم
استخراج السمات (Feature Extraction)	
X_k	قيمة التردد في تحويل فوريير
x_n	قيمة الإشارة الزمنية عند النقطة n
$e^{-i2\pi kn/N}$	دالة أسية مركبة (Complex Exponential)
i	الوحدة التخيلية ($i^2 = -1$)
π	الثابت الرياضي (3.14159...)
μ_t	المتوسط المتحرك عند الزمن t
σ_t^2	التباين المتحرك عند الزمن t

r_{xy}	معامل ارتباط بيرسون
$\bar{x}, \bar{y}$	متوسطات المتغيرات x و y
χ^2	إحصاء مربع كاي (Chi-squared)
O_{ij}	التكرار المشاهد (Observed Frequency)
E_{ij}	التكرار المتوقع (Expected Frequency)
r, c	عدد صفوف وأعمدة جدول الاحتمالات
w	متجه الأوزان في نموذج الانحدار
y	متجه المخرجات (Target)
$\|Xw - y\|_2^2$	مربع المسافة الإقليدية (L2 norm)
$\|w\|_1$	معيار L1 (مجموع القيم المطلقة)
λ	معامل التنظيم (Regularization Parameter)
أخذ العينات (Sampling)	
P	الاحتمال
N_h	حجم الطبقة h في المجتمع
n_h	حجم العينة من الطبقة h
x_{new}	نقطة جديدة مصطنعة من SMOTE
x_{zi}	أحد جيران النقطة x_i
λ	معامل عشوائي للتوليد

ترميز البيانات الفئوية (Encoding)	
f	دالة الترميز
Category	القيمة الفئوية الأصلية
k	عدد الفئات
$[1, 0, 0]$	متجه الترميز الأحادي
$\hat{x}_{category}$	القيمة المستبدلة بالفئة (Target Encoding)
$n_{category}$	عدد نقاط الفئة
y_i	قيمة الهدف للنقطة i

APPENDIX –B- الملحق

تحويل الوحدات

Table A–1
Permeability Conversions

To convert from	To	Multiply by	Inverse
mD	Darcy	1.000000E–03	1.000000E+03
mD	meter^2 (m^2)	9.86923E–16	1.01325E+15
mD	centimeter^2 (cm^2)	9.86923E–12	1.01325E+11
mD	micrometer^2 (μm^2)	9.86923E–04	1.01325E+03
mD	$\frac{(cm^3/s)cP}{cm^2(atm/cm)}$	1.00000E–03	1.00000E+03
mD	$\frac{(cm^3/s)cP}{cm^2[(dyne/cm^2)/cm]}$	9.86923E–10	1.01325E+09
mD	$\frac{(ft^3/s)cP}{ft^2(psi/ft)}$	7.32441E–08	1.36530E+07
mD	$\frac{(ft^3/s)cP}{cm^2[(cm\ water)/cm]}$	3.41780E–11	2.92585E+10
mD	$\frac{(B/D)cP}{ft^2(psi/ft)}$	1.12712E–03	8.87217E+02
mD	$\frac{(gal/min)cP}{ft^2[(ft\ water)/ft]}$	1.42515E–05	7.01681E+04
mD	ft^2	1.06232E–14	9.41340E+13

Table A–2
Temperature Conversions

	°F	°C	°R	K
Degree Fahrenheit (°F)	1.000	(°F – 32)/1.8	°F + 459.67	(°F + 459.67)/1.8
Degree Celsius (°C)	1.8(°C) + 32	1.000	1.8(°C) + 491.67	°C + 273.15
Degree Rankine (°R)	°R – 459.67	(°R – 491.67)/1.8	1.000	°R/1.8
Kelvin (K)	1.8(K) – 459.67	K – 273.15	1.8(K)	1.000

Table A–3
Volume Conversion Multiplication Factors

	in^3	ft^3	cm^3	m^3
Cubic inches (in^3)	1.0	5.787035×10^{-4}	1.638706×10	1.638706×10^{-5}
Cubic feet (ft^3)	1.728×10^3	1.0	2.831685×10^4	2.831685×10^{-2}
Cubic centimeters (cm^3)	6.102376×10^{-2}	3.531466×10^{-5}	1.0	1.000×10^{-6}
Cubic meters (m^3)	6.102376×10^4	3.531466×10	1.000×10^6	1.0

Table A–4
Density Conversion Multiplication Factors

	gm/cm^3	lb/ft^3	kg/l	kg/m^3
gm/cm^3	1.0	6.242797×10	1.0	1.000×10^3
lb/ft^3	1.601846×10^{-2}	1.0	1.601846×10^{-2}	1.601846×10
kg/l	1.0	6.242797×10	1.0	1.000×10^3
kg/m^3	1.000×10^{-3}	6.242797×10^{-2}	1.0×10^{-3}	1.0

Table A–5
Rate of Flow Conversion Multiplication Factors

	ft^3/min	US gal/day	bbl/day	m^3/s
ft^3/min	1.0	1.077195×10^4	2.564749×10^2	4.719474×10^{-4}
US gal/day	9.283374×10^{-5}	1.0	2.380952×10^{-2}	4.381264×10^{-8}
bbl/day	3.899017×10^{-3}	42.0	1.0	1.840131×10^{-6}
m^3/s	2.11888×10^3	2.282477×10^7	5.434396×10^5	1.0

Table A–6
Mass Conversion Multiplication Factors

	Ounces (avoir) (oz)	Pounds (avoir) (lb)	Metric ton (t) (tonne)	Kilograms (kg)
Ounces	1.0	6.25×10^{-2}	2.834952×10^{-5}	2.834952×10^{-2}
Pounds	16.0	1.0	4.535924×10^{-4}	4.535924×10^{-1}
Metric ton	3.527397×10^4	2.204622×10^3	1.0	1.000×10^3
Kilograms	3.527397×10	2.204622	1.000×10^{-3}	1.0

Table A–7
Velocity Conversion Multiplication Factors

	ft/s	ft/min	ft/h	m/s
ft/s	1.0	60.0	3600.0	3.048000×10^{-1}
ft/min	1.666666×10^{-2}	1.0	60.0	5.080000×10^{-1}
ft/h	2.777777×10^{-4}	1.666666×10^{-2}	1.0	8.466667×10^{-5}
m/s	3.28084	1.968504×10^{2}	1.181102×10^{4}	1.0

Table A–8
Viscosity (Absolute) Conversion Multiplication Factors

	cP	poise g/(cm s)	lb/(ft s)	Pascal second (Pa s)
Centipoise	1.0	1.00×10^{-2}	6.719689×10^{-4}	1.000000×10^{-3}
poise g/(cm s)	100.0	1.0	6.719689×10^{-2}	1.000×10^{-1}
lb/(ft s)	1.488164×10^{3}	1.488164×10	1.0	1.488164
Pascal second (Pa s)	1.000×10^{3}	10.0	6.719689×10^{-1}	1.0

Table A–9
Kinematic Viscosity: Absolute Viscosity in Mass Units Divided by Mass Density Conversion Factors

	gm/cm^3	lb/ft^3	kg/l	kg/m^3
gm/cm^3	1.0	6.242797×10	1.0	1.000×10^{3}
lb/ft^3	1.601846×10^{-2}	1.0	1.601846×10^{-2}	1.601846×10
kg/l	1.0	6.242797×10	1.0	1.000×10^{3}
kg/m^3	1.000×10^{-3}	6.242797×10^{-2}	1.0×10^{-3}	1.0

Table A–10
Land Measurement Conversion Multiplication Factors

	gm/cm^3	lb/ft^3	kg/l	kg/m^3
gm/cm^3	1.0	6.242797×10	1.0	1.000×10^{3}
lb/ft^3	1.601846×10^{-2}	1.0	1.601846×10^{-2}	1.601846×10
kg/l	1.0	6.242797×10	1.0	1.000×10^{3}
kg/m^3	1.000×10^{-3}	6.242797×10^{-2}	1.0×10^{-3}	1.0

1 League = 3 miles, 1 square mile = 640 acres, 1 township = 36 square miles, 1 section = 1 square mile, 1 rod = 16.5 feet.

Table A–11
Length Conversion Multiplication Factors

	Inches (in)	Feet (ft)	Yards (yd)	Miles (mi)
Inches (in)	1.0	8.333333×10^{-2}	2.777778×10^{-2}	1.578282×10^{-5}
Feet (ft)	12.0	1.0	3.333333×10^{-1}	1.893939×10^{-4}
Yards (yd)	36.0	3.0	1.0	5.681818×10^{-4}
Miles (mi)	6.336003×10^{4}	5.280×10^{3}	1.760×10^{3}	1.0
Centimeter (cm)	3.937008×10^{-1}	3.28084×10^{-2}	1.093613×10^{-2}	6.213712×10^{-6}
Meter (m)	39.37008	3.28084	1.093613	6.213712×10^{-4}
Kilometer (km)	39.37008×10^{3}	3.28084×10^{3}	1.093613×10^{3}	6.213712×10^{-1}

Table A–11
Length Conversion Multiplication Factors

	Centimeter (cm)	Meter (m)	Kilometer (km)
Inches (in)	2.540	2.540×10^{-2}	2.540×10^{-5}
Feet (ft)	30.480	3.048×10^{-1}	3.048×10^{-4}
Yards (yd)	91.44	9.144×10^{-1}	9.144×10^{-4}
Miles (mi)	1.609344×10^{5}	1.609344×10^{3}	2.609344
Centimeter (cm)	1.0	1.000×10^{-2}	1.000×10^{-5}
Meter (m)	100.0	1.0	1.000×10^{-3}
Kilometer (km)	1.000×10^{5}	1.000×10^{3}	1.0

Table A–12
Area Conversion Multiplication Factors

	in^2	ft^2	mi^2
Square inches (in^2)	1.0	6.944444×10^{-3}	2.490977×10^{-10}
Square feet (ft^2)	1.440×10^{2}	1.0	3.587007×10^{-8}
Square miles (mi^2)	4.014489×10^{9}	2.787840×10^{7}	1.0
Square centimeters (cm^2)	1.550×10^{-1}	1.076391×10^{-3}	3.861022×10^{-11}
Square meters (m^2)	1.550×10^{3}	10.763910	3.861022×10^{-7}
Square kilometers (km^2)	1.550×10^{9}	1.076391×10^{7}	3.861022×10^{-1}

Table A–12
Area Conversion Multiplication Factors

	cm^2	m^2	km^2
Square inches (in^2)	6.451600	6.451600×10^{-4}	6.451600×10^{-10}
Square feet (ft^2)	9.290304×10^{2}	9.290304×10^{-2}	9.290304×10^{-8}
Square miles (mi^2)	2.589988×10^{10}	2.589988×10^{6}	2.589988
Square centimeters (cm^2)	1.0	1.000×10^{-4}	1.000×10^{-10}
Square meters (m^2)	1.000×10^{4}	1.0	1.000×10^{-6}
Square kilometers (km^2)	1.000×10^{10}	1.000×10^{6}	1.0

1 darcy = 1000 mD, 1 mD = 9.86×10^{-16} m^2 = 9.86×10^{-12} cm^2 = 1.127×10^{-3} (B/D)cP/ft^2(psi/ft).

1 Acre = 43,560 ft^2

Table A–14
Pressure Conversion Multiplication Factors

	atm	bar	lbf/in^2	kgf/cm^2
atm (std)	1.0	1.013250	1.46960×10	1.033228
bar	9.869233×10^{-1}	1.0	1.450377×10	1.019716
lbf/in^2 (psi)	6.804573×10^{-2}	6.894757×10^{-2}	1.0	7.030695×10^{-2}
kgf/cm^2	9.678411×10^{-1}	9.806650×10^{-1}	1.422334×10	1.0
inHg (32 °F)	3.342097×10^{-2}	3.386380×10^{-2}	4.911529×10^{-1}	3.453147×10^{-2}
mmHg (32 °F)	1.315789×10^{-3}	1.333220×10^{-3}	1.933672×10^{-2}	1.359506×10^{-3}
ft H_2O (39.2 °F)	2.949894×10^{-2}	2.988980×10^{-2}	4.335149×10^{-1}	3.047912×10^{-2}
Pa	9.869233×10^{-6}	1.000×10^{-5}	1.450377×10^{-4}	1.019716×10^{-5}

Table A–14
Pressure Conversion Multiplication Factors

	inHg (32 °F)	mmHg (32 °F)	ftH_2O	Pa
atm (std)	2.992133×10	7.600×10^{2}	3.389952×10	1.013250
bar	2.953006×10	7.500638×10^{2}	3.345623×10	1.000000
lbf/in^2 (psi)	2.036026	5.171507×10	2.306730	6.894757
kgf/cm^2	2.895909×10	7.355613×10^{2}	3.280935×10	9.806650
inHg (32 °F)	1.0	2.54×10^{2}	1.132955	3.386380
mmHg (32 °F)	3.93701×10^{-2}	1.0	4.460451×10^{-2}	1.333220
ft H_2O (39.2 °F)	8.826475×10^{-1}	2.241926×10	1.0	2.988980
Pa	2.953006×10^{-4}	7.500638×10^{-3}	3.345623×10^{-4}	1.0

Table A–15
Conversion of Common Field Units to Metric (SI) Units (Base conditions: Field 60 °F, 14.65 psia; Metric (SI) 15 °C, 101.325 kPa)

Field Unit	Multiplication Factor	Metric (SI) unit	Symbol
Acre	4.046856E+03	Square meter	m^2
Acre	4.046856E–01	Hectare	ha
Acre-foot	1.233482E+03	Cubic meter	m^3
Atmosphere	1.01325E+02	Kilopascal	kPa
Barrel (35 imp. gal.)	1.589873E–01	Cubic meter	m^3
Btu per standard cubic foot (60 °F, 14.65 psia)	8.799136E–01	Kilojoule per mole	kj/mol
Centipoise	1.0E+00	Millipascal	mPa*s
Cubic foot	2.831685E–01	Cubic meter	m^3
Cubic foot gas per gallon (60 °F, 14.65 psia)	7.494773E+00	Mole per cubic meter	mol/m^3
Darcy	9.869233E–01	Square micrometer	μm^2
Degree Fahrenheit	(°F – 32)5/9E+00	Degree Celsius	°C
Degree Rankine	5/9E+00	Kelvin	K
Gallon (Cdn)	4.54609E–03	Cubic meter	m^3
Gallon (US)	3.785412E–03	Cubic meter	m^3
Gas constant	8.31432E+00	Joule per mole kelvin	J/(mol*K)
Mcf (thousand cubic	1.191574E+00	Kilomole	kmol
foot) (60 °F, 14.65 psia)	2.826231E+01	cubic meter (API)	m^3 API
Millidarcy	9.869233E–04	Square micrometer	μm^2
MMcf (million cubic foot)	1.191574E+00	Megamole	mmol
(60 °F, 14.65 psia)	2.826231E+01	cubic meter (API)	m^3 API
Pound-force per square inch (psi)	6.894757E+00	Kilopascal	kPa
Pound-mass	4.535924E–01	Kilogram	kg
Psi per foot	2.262059E+01	Kilopascal per meter	KPa/m
Section (540 acres)	2.589988E+06	Square meter	m^2
Section (640 acres)	2.589988E+02	Hectare	ha
Standard cubic foot	1.191574E+00	Mole	mol
(60 °F, 14.65 psia – ideal gas)	2.826231E–02	cubic meter (API)	m^3 API
Tcf (trillion cubic foot)	1.191574E +00	Teramole	Tmol
(60 °F, 14.65 psia)	2.826231E–02	cubic meter (API)	m^3 API
Ton (US short – 2000 lb)	9.071847E–01	Tonne	t
Ton (UK long – 2240 lb)	1.016047E+00	Tonne	t

APPENDIX –C – الملحق
تسمية الرموز الاغريقية

GREEK ALPHABET

Upper Case	Lower Case	Name
A	α	alpha
B	β	beta
Γ	γ	gamma
Δ	δ	delta
E	ε	epsilon
Z	ζ	zeta
H	η	eta
Θ	θ	theta
I	ι	iota
K	κ	kappa
Λ	λ	lambda
M	μ	mu
N	ν	nu
Ξ	ξ	xi
O	ο	omicron
Π	π	pi
P	ρ	rho
Σ	σ	sigma
T	τ	tau
Y	υ	upsilon
Φ	ϕ	phi
X	χ	chi
Ψ	ψ	psi
Ω	ω	omega