جامعة الكوت
مركز البحوث والدراسات والنشر

الزراعة الذكية

الثورة الرقمية لتحقيق الأمن الغذائي والتنمية المستدامة

الجزء الأول

تأليف

أ.د. وليد عبد الغني كعكه
استشاري وخبير زراعي وبيئي

د. محمد زيدان خلف
خبير واستشاري / جامعة الكوت

الطبعة الاولى
٢٠٢٥م

منشورات

مركز البحوث والدراسات والنشر

جامعة الكوت

٦٣١ / ٥٨٣

ك ٦٨٩ كعكه، وليد عبد الغني.

الزراعة الذكية - الثورة الرقمية لتحقيق الامن الغذائي/ وليد عبد الغني كعكه، محمد زيدان خلف. - ط١. مطبعة جامعة الكوت، ٢٠٢٥.

ج١(٤٥٠ص) ؛ ٢٤ سم

١. الزراعة - تقنيات حديثة أ. خلف، محمد زيدان (م.م.)

ب. العنوان

رقم الايداع

٢٠٢٥/٤٦١٥

المكتبة الوطنية/الفهرسة اثناء النشر

رقم الايداع في دار الكتب والوثائق ببغداد

٤٦١٥ لسنة ٢٠٢٥ م

الرقم الدولي: ISBN: 978-9922-726-54-0

ملاحظة

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

University of Kut Printing Press

مطبعة جامعة الكوت

الفهرس

الملخص 13

المقدمة 15

المحور الأول ـ المفاهيم العامة والمقدمة إلى الزراعة الذكية 21

الفصل 1 ـ الزراعة الذكية: المفهوم والنشأة والتحول التاريخي 23

المحتويات 23

1. المقدمة 23
2. مفهوم الزراعة الذكية 24
3. الجذور التاريخية لنشأة الزراعة الذكية 24
4. التحوّلات التكنولوجية في القطاع الزراعي 25
5. العلاقة بين الثورة الصناعية الرابعة والزراعة 25
6. الفرق بين الزراعة التقليدية والذكية 25
7. التحدّيات التي أدّت إلى ظهور الزراعة الذكية 26
8. الخاتمة 27
9. المراجع 28

الفصل 2 ـ مبادئ الزراعة الذكية وتطبيقاتها العملية 31

المحتويات 31

1. المقدمة 31
2. التقنيات الأساسية المستخدمة في الزراعة الذكية 32
3. المبادئ الأساسية للزراعة الذكية 33
4. إدارة الموارد بذكاء (ماء، طاقة، أسمدة) 34
5. استخدام التكنولوجيا في التخطيط الزراعي 34
6. مراقبة الحقول والمحاصيل 36
7. النمذجة والتنبؤ الزراعي 36
8. تطبيقات الزراعة الذكية في العالم الواقعي 37
9. التحديات التقنية والتنظيمية في التطبيق 41
10. الخاتمة 42

الفصل 3 ـ الزراعة الذكية: من الأبحاث إلى الميدان 45

المحتويات 45

1. المقدمة 45
2. البحوث العلمية والدراسات في مجال الزراعة الذكية 46
3. الفجوة بين البحث والتطبيق 47
4. آليات نقل التكنولوجيا إلى المزارع 48

5. الشراكات بين الجامعات والمزارعين والشركات 49
6. قصص نجاح من العالم 50
7. تحديات التطبيق في الدول النامية 52
8. الخاتمة 53
9. المراجع 53
الفصل 4 - دليل الطالب إلى الزراعة الذكية والتقنيات الحديثة 55
المحتويات 55
1. المقدمة 55
2. المفاهيم الأساسية التي يجب على الطالب معرفتها 56
3. مسارات دراسية في الزراعة الذكية 56
4. المهارات المطلوبة للعاملين في مجال الزراعة الذكية 57
5. مصادر التعلم والبحث والتدريب في الزراعة الذكية 58
6. آفاق مهنية في الزراعة الذكية 59
7. الخاتمة 60
8. المراجع 60
الفصل 5 - دليل المستثمر إلى الزراعة الذكية والفرص المستقبلية..... 63
المحتويات 63
1. المقدمة 63
2. لماذا الزراعة الذكية فرصة استثمارية؟ 64
3. مؤشرات النمو في سوق الزراعة الذكية عالمياً 69
4. القطاعات والتقنيات ذات العائد الأعلى (الاستشعار، البيانات، الروبوتات، الخ) 71
5. تقييم المخاطر والعوائد في الاستثمار الزراعي الذكي 73
6. أمثلة على نماذج أعمال ناجحة في الزراعة الذكية 73
7. حوافز الاستثمار في الزراعة الذكية – حكومية وتمويلية 76
8. خارطة طريق للمستثمر المبتدئ في الزراعة الذكية 76
9. التحديات التنظيمية والتقنية التي يجب الانتباه لها 77
10. الخاتمة 78
11. المراجع 78
الفصل 6 - دليل صناع القرار إلى سياسات الزراعة الذكية والتحول الرقمي..... 81
المحتويات 81
1. المقدمة 81
2. دور السياسات في تسريع تبني الزراعة الذكية 82
3. تجربة دول ناجحة في السياسات الزراعية الرقمية 82
4. أدوات تشريعية ممكنة: الحوافز، التشريعات، البيانات المفتوحة 83
5. البنية التحتية المطلوبة (الاتصال، المنصات، التعليم) 84

6. الأمن الغذائي في ضوء التحول الرقمي الزراعي 85
7. بناء شراكات بين القطاع العام والخاص 85
8. الموازنات والاستثمار الحكومي الذكي 86
9. تقييم الأثر السياسي والاجتماعي للزراعة الذكية 86
10. الخاتمة 87
11. المراجع 87
الفصل 7 - دليل المهندس الزراعي إلى أدوات وتقنيات الزراعة الذكية 89
المحتويات 89
1. المقدمة 89
2. دور المهندس الزراعي في الزراعة الذكية 90
3. أهم التقنيات التي يجب إتقانها 91
4. تفاصيل تطبيقية وأدوات محددة في الزراعة الذكية 94
5. التحديات التي تواجه تطبيق أدوات وتقنيات الزراعة الذكية 97
6. إدارة المشاريع الزراعية الذكية من الناحية التقنية 99
7. التكامل بين المعرفة الزراعية والبرمجيات 100
8. أمثلة ميدانية على تصميم مشاريع زراعة ذكية 101
9. التدريب المهني والتأهيل المستمر 102
10. تحديات المهندس الزراعي في بيئة التحول الرقمي 102
11. الخاتمة 103
12. المراجع 104

المحور الثاني - الزراعة الذكية والتغير المناخي 107

الفصل 8 - الزراعة الذكية في مواجهة التغير المناخي 109
المحتويات 109
1. المقدمة 109
2. التغير المناخي وتأثيره على الزراعة 111
3. تقنيات الزراعة الذكية في التخفيف من التغير المناخي 112
4. استراتيجيات التكيف الزراعي الذكي مع التغير المناخي 114
5. أمثلة على مشاريع زراعة ذكية لمواجهة التغير المناخي 116
6. السياسات الداعمة للزراعة الذكية في ظل التغير المناخي 117
7. التحديات والفرص المستقبلية 118
8. دراسات حالة 119
9. الخاتمة 122
10. المراجع 123
الفصل 9 - الابتكار الزراعي في عصر التغير المناخي 125

المحتويات 125
1. المقدمة 125
2. مفهوم الابتكار الزراعي والابتكار في الزراعة الذكية..... 126
3. الابتكار كمحرك للاستدامة 126
4. التقنيات الحديثة في الابتكار الزراعي 127
5. دور الابتكار في تحسين كفاءة الموارد والتقليل من البصمة البيئية 129
6. الابتكار في نظم الري والتسميد الذكي 130
7. قصص نجاح الابتكار الزراعي في مواجهة التغير المناخي..... 132
8. المستقبل المحتمل للابتكار الزراعي 136
9. التحديات والفرص 137
10. الخاتمة 138
11. المراجع 138
الفصل 10 - نحو زراعة مستدامة: التكنولوجيا كحل للتحديات البيئية 141
المحتويات 141
1. المقدمة 141
2. مفهوم الزراعة المستدامة وعلاقته بالزراعة الذكية 142
3. حلول تكنولوجية ذكية للحفاظ على الموارد الطبيعية 143
4. دور التكنولوجيا في ترشيد استخدام الموارد 144
5. إدارة التربة والمياه بطرق ذكية ومستدامة 145
6. تقليل استخدام المبيدات والأسمدة عبر التكنولوجيا 145
7. دمج الزراعة الذكية مع الممارسات البيئية التقليدية 146
8. الزراعة العضوية والزراعة الذكية 147
9. التحديات والحلول لتحقيق الاستدامة 147
10. الخاتمة 148
11. المراجع 149
الفصل 11 - مستقبل الزراعة في ظل التغيرات المناخية والتقنيات الذكية..... 153
المحتويات 153
1. المقدمة 153
2. السيناريوهات المستقبلية للزراعة تحت تأثير التغير المناخي 154
3. التوجهات التقنية الجديدة في الزراعة الذكية 154
4. دور الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء في الزراعة المستقبلية 156
5. الاستراتيجيات الوطنية والدولية لدعم الزراعة الذكية 157
6. تحديات التوسع في تبني التكنولوجيا 157
7. الرؤى والتوصيات الاستراتيجية لمستقبل مستدام 158
8. الخاتمة 159

9. المراجع 160
الفصل 12 - أدوات وتقنيات الزراعة الذكية: الحساسات، الروبوتات، والتطبيقات العملية 161
المحتويات 161
1. المقدمة 161
2. الحساسات وأنواعها في الزراعة الذكية 163
3. الروبوتات الزراعية وأتمتة العمليات 164
4. نظم دعم القرار الزراعي (DSS) 166
5. تطبيقات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء (IoT) في الزراعة الذكية 169
6. تحديات تطبيق الروبوتات الزراعية 174
7. دراسات حالة من العالم العربي 175
8. دراسة حالات مستقبلية 178
9. التطبيقات الدولية والتقنيات المتقدمة 180
10. تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الزراعة الذكية 182
11. الاتجاهات المستقبلية في الروبوتات الزراعية 184
12. الخاتمة 185
13. المراجع 185

المحور الثالث: التحول الرقمي في القطاع الزراعي 189

الفصل 13 - التحول الرقمي في الزراعة: من المزرعة إلى السوق 191
المحتويات 191
1. المقدمة 191
2. مفهوم التحول الرقمي في الزراعة 192
3. تقنيات التحول الرقمي وتطبيقاتها 193
4. أثر التحول الرقمي على سلسلة القيمة الزراعية 194
5. نظم المعلومات الرقمية في المزارع 195
6. ربط المزارع بالأسواق عبر التكنولوجيا الرقمية 196
7. التحديات التنظيمية والتقنية في التحول الرقمي 198
8. دراسات حالة من دول مجلس التعاون الخليجي 198
9. الخاتمة 201
10. المراجع 201
الفصل 14 - البيانات الزراعية الضخمة وذكاء القرار 203
المحتويات 203
1. المقدمة 203
2. مفهوم البيانات الزراعية الضخمة 204
3. مصادر البيانات الزراعية 205

4. أدوات تحليل البيانات والذكاء الاصطناعي 206
5. القيمة المضافة للبيانات الضخمة 207
6. دراسات حالة محلية وعالمية 208
7. التحديات في إدارة البيانات الزراعية 210
8. السياسات والحوكمة 211
9. الخاتمة 213
10. المراجع 214
الفصل 15 - الحوسبة السحابية في الزراعة الذكية 215
المحتويات 215
1. المقدمة 215
2. فوائد الحوسبة السحابية في الزراعة الذكية 216
3. دراسة حالات موسعة حول استخدام الحوسبة السحابية 226
4. أنظمة الحوسبة السحابية 230
5. نماذج وبرمجيات محددة لأنظمة الحوسبة السحابية الزراعية 234
6. التحديات والفرص التي تواجه الحوسبة السحابية في الزراعة 235
7. مستقبل الحوسبة السحابية في الزراعة 238
8. الخاتمة 239
9. المراجع 241
الفصل 16 - الزراعة الرقمية: البيانات والتقنيات الحديثة في خدمة الأرض 245
المحتويات 245
1. المقدمة 245
2. أنواع البيانات الزراعية وأهميتها 247
3. جمع البيانات عبر الحساسات والطائرات بدون طيار 248
4. تحليل البيانات الزراعية واستخلاص النتائج 249
5. استخدام البيانات في اتخاذ القرار الزراعي 251
6. منصات وخدمات البيانات الزراعية 252
7. التكامل بين البيانات الزراعية وتقنيات الذكاء الاصطناعي 254
8. حماية البيانات وأمن المعلومات في الزراعة الرقمية 256
9. الخاتمة 259
10. المراجع 259
الفصل 17 - إنترنت الأشياء (IoT) في الزراعة 261
المحتويات 261
1. المقدمة 261
2. مفهوم إنترنت الأشياء في السياق الزراعي 263
3. الأجهزة والمستشعرات المستخدمة 264

4. تطبيقات انترنت الأشياء في الري، التسميد، والرصد البيئي 268
5. تكامل إنترنت الأشياء مع نظم المعلومات الجغرافية والذكاء الاصطناعي 269
6. حالات دراسية ناجحة 270
7. التحديات التقنية 271
8. توصيات عملية للمزارعين والمؤسسات الحكومية 274
9. نماذج الأعمال التجاريّة القائمة على انترنت الأشياء في الزراعة..... 277
10. عوامل النجاح 278
11. الخاتمة 280
12. المراجع 281
الفصل 18 - البيانات الضخمة والذكاء الاصطناعي في الزراعة 283
المحتويات 283
1. المقدمة 283
2. ما هي البيانات الضخمة؟ 283
3. مصادر البيانات في القطاع الزراعي 284
4. تحليلات البيانات ودورها في اتخاذ القرار الزراعي 284
5. الذكاء الاصطناعي في تحليل سلوك المحاصيل والتربة 287
6. خوارزميات التنبؤ والإنتاجية 292
7. التكامل بين الذكاء الاصطناعي وسلاسل الإمداد الزراعية 297
8. تحديات الخصوصية وحوكمة البيانات 301
9. الخاتمة 302
10. المراجع 302
الفصل 19 - الزراعة الذكية والتحول الرقمي في قطاع الأغذية 305
المحتويات 305
1. المقدمة 305
2. العلاقة بين الزراعة الذكية وسلسلة الأغذية الرقمية 306
3. تقنيات الرقمنة في تخزين ونقل الأغذية 307
4. نظم التتبع والشفافية في سلسلة الإمداد الغذائي 308
5. دور التحول الرقمي في تحسين سلامة وجودة الأغذية 309
6. تأثير الرقمنة على المستهلكين والأسواق 312
7. تحديات وفرص التحول الرقمي في قطاع الأغذية 313
8. الخاتمة 314
9. المراجع 314
الفصل 20 - البنية التحتية الرقمية المطلوبة للزراعة الذكية 317
المحتويات 317
1. المقدمة 317

2. مكونات البنية التحتية الرقمية في الزراعة 318
3. شبكات الاتصال وإنترنت الأشياء في المزارع..... 319
4. الحوسبة السحابية وتخزين البيانات الزراعية 320
5. البرمجيات والتطبيقات المخصصة للزراعة الذكية 321
6. تحديات بناء البنية التحتية في المناطق الريفية 322
7. مقترحات تطوير البنية التحتية لدعم الزراعة الذكية 323
8. المراجع 324
الفصل 21 - المنصات الرقمية والخدمات الذكية للمزارعين 325
المحتويات 325
1. المقدمة 325
2. أنواع المنصات الرقمية 326
3. تطبيقات الهواتف الذكية في دعم الإنتاج الزراعي 327
4. التجارة الإلكترونية الزراعية 328
5. النظم الإرشادية الرقمية والواقع المعزز 328
6. قصص نجاح لمزارعين استخدموا المنصات الرقمية 329
7. التحديات المتعلقة بتبني المنصات الرقمية والخدمات الذكية للمزارعين 333
8. الخاتمة 337
9. المراجع 338

المحور الرابع :إدارة الموارد الزراعية باستخدام التكنولوجيا..... 341

الفصل 22 - إدارة المياه الذكية في الزراعة..... 343
المحتويات 343
1. المقدمة 343
2. التحديات المائية في القطاع الزراعي 344
3. تقنيات الري الذكي 346
4. المستشعرات وتحليل بيانات التربة والرطوبة 348
5. استخدام الأقمار الصناعية والتصوير الطيفي 350
6. تحسين كفاءة استهلاك المياه 353
7. تطبيقات وحالات دراسية من العالم العربي والعالمي 357
8. الخاتمة 359
9. المراجع 360
الفصل 23 - إدارة التربة والمحاصيل بالتقنيات الحديثة 363
المحتويات 363
1. المقدمة..... 363
2. تحليل التربة عبر تقنيات الاستشعار عن بعد..... 364

3. نظم المعلومات الجغرافية في مراقبة صحة التربة 366
4. الزراعة الدقيقة (Precision Agriculture) 367
5. تقنيات التسميد الذكي 368
6. دور الطائرات بدون طيار في إدارة المحاصيل 370
7. دراسات حالة من مزارع مطورة 372
8. الخاتمة 380
9. المراجع 381
الفصل 24 - إدارة الآفات والأمراض الزراعية رقمياً 385
المحتويات 385
1. المقدمة 385
2. التحديات التقليدية في مكافحة الآفات 386
3. نظم الإنذار المبكر واكتشاف الآفات عبر الذكاء الاصطناعي 387
4. تقنيات التصوير الحراري والطيفي 389
5. استخدام تطبيقات الموبايل في التشخيص 390
6. إدارة متكاملة للآفات عبر المنصات الرقمية 392
7. ممارسات ناجحة في مكافحة الآفات بالتكنولوجيا 394
8. الخاتمة 395
9. المراجع 396
الفصل 25 - سلاسل الإمداد الذكية واللوجستيات الزراعية 399
المحتويات 399
1. المقدمة 399
2. مفاهيم أساسية في سلسلة الإمداد الزراعي 399
3. الرقمنة في التوريد والتوزيع والتخزين 405
4. تتبع المنتجات من المزرعة إلى المستهلك 407
5. حلول ذكية لتقليل الفاقد والتلف 409
6. المنصات الرقمية في التسويق الزراعي 415
7. تحديات التحول الرقمي في اللوجستيات الزراعية 419
8. الخاتمة 422
9. المراجع 422
الفصل 26 - الزراعة المستدامة وإدارة الموارد تحت ضوء التغير المناخي 425
المحتويات 425
1. المقدمة 425
2. مفاهيم أساسية 426
3. تأثير التغير المناخي على الموارد الزراعية 427
4. استراتيجيات الإدارة المستدامة للموارد 429

5. التكنولوجيا لمواجهة التغير المناخي 431
6. الابتكار الزراعي وتبني الحلول الذكية 433
7. السياسات والدعم المؤسسي 434
8. التحديات والفرص 436
9. الخاتمة 439
10. االمراجع 440

الملخص

يُعد هذا الكتاب مرجعاً متكاملاً في مجال الزراعة الذكية، ويهدف إلى تسليط الضوء على الثورة الرقمية التي تعيد تشكيل القطاع الزراعي عالمياً، بما يخدم أهداف الأمن الغذائي والاستدامة البيئية والتنمية الريفية. يأتي هذا العمل استجابةً للتحديات المتصاعدة التي تواجه الزراعة التقليدية، كالتغير المناخي وندرة الموارد وزيادة الطلب على الغذاء، ويستعرض الحلول الذكية التي تقدّمها التكنولوجيا الحديثة مثل الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء والبيانات الضخمة والطائرات دون طيار، وسلاسل الكتل.

ينقسم الكتاب إلى ثمانية محاور رئيسة، تشمل 47 فصلاً متكاملاً، تبدأ من المفاهيم العامة والنشأة التاريخية للزراعة الذكية، مروراً بتطبيقاتها في التكيف المناخي والتحول الرقمي، ووصولاً إلى قضايا الأمن الغذائي والاستثمار الزراعي وبناء القدرات، وانتهاءً بالسياسات والتشريعات المستقبلية.

يغطي المحور الأول الإطار النظري والمفاهيمي للزراعة الذكية، بينما يستعرض المحور الثاني علاقتها بالتغير المناخي والتكيف مع آثاره. ويغوص المحور الثالث في التحول الرقمي للقطاع، مركزاً على البنية التحتية والمنصات الرقمية. أمّا المحور الرابع فيتناول إدارة الموارد الزراعية بوسائل ذكية، كالمياه والتربة والآفات. ويبحث المحور الخامس في دور الزراعة الذكية في تعزيز الأمن الغذائي العالمي، في حين يتخصص المحور السادس في تطبيقات الذكاء الاصطناعي والتقنيات الدقيقة داخل الحقول. ويركز المحور السابع على أبعاد الاقتصاد الريفي والاستثمار والتمويل الذكي، فيما يناقش المحور الثامن السياسات والتحديات المستقبلية، مع تقديم استراتيجيات شاملة للتنفيذ.

يمزج الكتاب بين التحليل العلمي والتطبيق العملي، ويعتمد على أحدث المراجع، ودراسات الحالة الواقعية من دول متقدمة ونامية، كما يُقدّم توصيات عملية لصنّاع القرار والمستثمرين والمزارعين والمؤسسات التعليمية.

في مجمله، يقدّم الكتاب رؤية استراتيجية متكاملة للزراعة الذكية باعتبارها ركيزة أساسية لتحقيق الأمن الغذائي وتعزيز مرونة النظم الزراعية وتحفيز النمو الأخضر، مستشرفاً مستقبلاً تتكامل فيه المعرفة الرقمية مع الخبرة الفلاحية في خدمة الإنسان والأرض معاً.

المقدمة

لا يختلف اثنان اليوم على أنّ العالم يقف عند نقطة تحوّل حاسمة في تاريخه الغذائي والبيئي والاقتصادي. فالتغيّر المناخي يتّسع نطاقه، وموارد المياه العذبة تتراجع، وأراضي الزراعة الخصبة تتآكل بفعل التملّح والتصحّر والاستخدام الجائر. في المقابل، يتصاعد الطلب على الغذاء بفعل النموّ السكّاني المضطرد والتحضّر وتغيّر أنماط الاستهلاك.

تحت وطأة التغيرات المناخية المتسارعة، التي تهدد الإنتاج الزراعي على مستوى العالم، أصبح التحول من الزراعة التقليدية إلى الزراعة الذكية أمراً لا غنى عنه. فقد أصبح من الضروري مواجهة التحديات المناخية من خلال تطبيق التقنيات الحديثة التي تسهم في تحسين استدامة الزراعة وحمايتها من التأثيرات السلبية للمناخ المتغير، مع ضمان الأمن الغذائي للأجيال القادمة.

وفي ظل هذه التحدّيات المتشابكة، تقدّم الزراعة الذكيّة Smart Agriculture نفسها بوصفها رؤية شاملة ومنظومة متكاملة توظّف طيفاً واسعاً من التقنيات الرقمية: من إنترنت الأشياء (IoT) والذكاء الاصطناعي (AI) إلى البيانات الضخمة (Big Data) والروبوتات الزراعيّة (Agricultural Drones) والطائرات دون طيّار (Unmanned Aerial Vehicle)، والكتلة المتسلسلة(Blockchain) ، لإعادة تعريف طرائق الإنتاج الزراعي، وتخليق قيمةٍ مضافةٍ في كل حلقة من حلقات السلسلة الغذائيّة، مع تعظيم الاستدامة البيئيّة وضمان الأمن الغذائي.

ينطلق هذا الكتاب من إدراكٍ بأنّ الزراعة الذكيّة لم تعُد ترفاً تقنياً أو توجّهاً انتقائيّاً لمنظومات إنتاج متطوّرة، بل أضحت ضرورةً استراتيجيّة عالميّة إذا أرادت البشرية تحقيق أهداف التنمية المستدامة(SDGs) ، لا سيّما الهدف الثاني المتعلّق بالقضاء على الجوع، والهدف الثالث عشر المرتبط بالعمل المناخي.

من هنا، قمنا بإعداد الكتاب ليكون مرجعاً علميّاً ومهنيّاً يُلبّي احتياجات أربعة أطياف رئيسة: الباحثون والأكاديميون، صنّاع القرار، المستثمرون وروّاد الأعمال، والمهندسون والمزارعون على حد سواء.

تنظيم الكتاب على مجلدين

نظراً لحجم الكتاب الكبير، فقد تم تقسيمه إلى مجلدين ليسهُل على القارئ الاطلاع عليه والتعامل مع محتواه. يحتوي **الجزء الأول** على المحاور من الأول إلى الرابع، بينما يضم **الجزء الثاني** المحاور من الخامس إلى الثامن. هذا التقسيم يتيح متابعة متدرجة للمفاهيم والتطبيقات، من الإطار النظري إلى التحليل الاقتصادي والاجتماعي، وصولاً إلى التحديات والسياسات المستقبلية للزراعة الذكية.

هيكلة الكتاب

لإحاطة القارئ بالمنظومة الكاملة للزراعة الذكية، تم تقسيم المحتوى إلى ثمانية محاور متكاملة، يضمّ كلٌ منها مجموعةً من الفصول المتدرّجة بإجمالي ستة وأربعين (46) فصلاً. وتأتي المحاور على النحو الآتي:

رقم المحور	العنوان	الغاية الرئيسة
المحور الأول	المفاهيم العامة والمقدمة إلى الزراعة الذكية	ترسيخ الخلفية النظرية وتعريف المصطلحات وبناء القاعدة المفاهيمية
المحور الثاني	الزراعة الذكية والتغير المناخي	تحليل دور التقنيات الرقمية في التكيّف والتخفيف من آثار المناخ
المحور الثالث	التحول الرقمي في القطاع الزراعي	استكشاف البنية التحتية والبيانات والمنصات الداعمة للتحول الرقمي

المحور الرابع	إدارة الموارد الزراعية باستخدام التكنولوجيا	عرض حلول ذكية لإدارة المياه والتربة والآفات وسلاسل الإمداد
المحور الخامس	الزراعة الذكية والأمن الغذائي	بيان العلاقة بين التكنولوجيا وسيادة الغذاء وخطط الطوارئ المستقبلية
المحور السادس	الذكاء الاصطناعي والتقنيات الدقيقة في الزراعة	التعمّق في الأدوات الدقيقة (حساسات، IoT، طائرات مسيَّرة، رؤية حاسوبية)
المحور السابع	الاقتصاد الريفي والاستثمار الزراعي الذكي	مناقشة الأثر الاقتصادي والاجتماعي والاستثماري للزراعة الذكية
المحور الثامن	التحديات، السياسات، ومستقبل الزراعة الذكية	تفكيك المعيقات، وبناء الأطر التشريعية، واستشراف السيناريوهات المستقبلية

اعداد وتنسيق المؤلفَين

لكل محور مسارٌ فكريٌّ واضح ينتقل بالقارئ من الإطار المفاهيمي إلى الأدوات التطبيقية، ومن دراسة الحالة إلى التوصيات، بحيث تتكوّن لديه صورة شاملة ومتدرجة: **لماذا** نحتاج الزراعة الذكية؟ كيف نطبّقها تقنياً؟ **ما** أثرها الاقتصادي والمجتمعي؟ **وأين** تكمن التحدّيات والفرص على المدى الطويل؟

أهداف الكتاب

1. **إثراء الأدبيات العربية** في موضوع الزراعة الذكية وتقديم مرجع متكامل يستند إلى أحدث البحوث العالمية ودراسات الحالة الإقليمية.
2. **تيسير نقل المعرفة** من المختبر والمركز البحثي إلى الحقل والمزرعة عبر عرض خطوات تطبيقية ومنصّات تدريبية.

3. **تمكين صنّاع القرار** بسياسات عملية وحوافز تشريعية تستبق التحديات التقنية والاجتماعية والأخلاقية.
4. **تحفيز روّاد الأعمال والمستثمرين** على دخول سوق التقنيات الزراعية عبر تحليل العوائد والمخاطر ونماذج العمل الناشئة.
5. **سدّ الفجوة المهارية** من خلال فصول مخصّصة لبناء القدرات الرقميّة للمهندسين والمزارعين وتعزيز الابتكار في المناهج الزراعية.

منهجية التأليف

اعتمد نا خمس ركائز عند بناء المحتوى:

- **الشمول**: تغطية النطاق الكامل لمكوّنات الزراعة الذكية تقنيّاً واقتصاديّاً واجتماعيّاً.
- **التوثيق العلمي**: الاستناد إلى مراجع مُحكَّمة، وبيانات موثوقة، وتقارير دولية حديثة.
- **التطبيق العملي**: تضمين دراسات حالة واقعيّة من العالم العربي والدولي تُبيّن النجاحات والتحدّيات.
- **التحليل النقدي**: مناقشة الأبعاد الأخلاقية والفجوات الرقمية وملكية البيانات.
- **الإرشاد المستقبلي**: رسم سيناريوهات عام 2050 واقتراح خرائط طريق للقطاعات الحكومية والخاصّة.

بهذا التصميم، يأمل الكتاب أن يشكّل جسراً معرفيّاً يصل أحدث ما توصّلت إليه البحوث العلميّة بواقع الحقول والمزارع والأسواق وساحات التشريع، فيسهم في تسريع تبنّي التقنيات الذكيّة وتحويلها إلى قيمةٍ ملموسةٍ للمزارع والبيئة والمستهلك على حد سواء.

وفي الختام، يتوجّه المؤلفان بخالص الشكر والتقدير إلى جامعة الكوت في جمهورية العراق، ممثلةً برئيس مجلس إدارتها الدكتور طالب زيدان الموسوي، على توجيهاته الحكيمة ودعمه المستمر في نشر هذا الكتاب الذي يسعى إلى خدمة الزراعة والمزارعين في وطننا العربي. إن توجيهاته كانت حافزاً رئيساً لهذا العمل الذي يهدف إلى تعزيز استخدام التقنيات الحديثة في القطاع الزراعي العربي. كما يتقدم المؤلفان بخالص الشكر والامتنان لكادر مركز البحوث والدراسات والنشر في الجامعة على جهودهم المخلصة في إخراج هذا الكتاب بحلة فريدة ومميزة، والتي كانت بمثابة الركيزة الأساسية لإتمام هذا العمل وتحقيق رؤيته.

المحور الأول ـ المفاهيم العامة والمقدمة إلى الزراعة الذكية

الفصل 1 - الزراعة الذكية: المفهوم والنشأة والتحول التاريخي

المحتويات

1. المقدمة
2. مفهوم الزراعة الذكية
3. الجذور التاريخية لنشأة الزراعة الذكية
4. التحولات التكنولوجية في القطاع الزراعي
5. العلاقة بين الثورة الصناعية الرابعة والزراعة
6. الفرق بين الزراعة التقليدية والذكية
7. التحديات التي أدت إلى ظهور الزراعة الذكية
8. الخاتمة
9. المراجع

1. المقدمة

شهد القطاع الزراعي خلال العقود الأخيرة تحولات جوهرية مدفوعة بتقدم التكنولوجيا وازدياد التحديات البيئية والاجتماعية والاقتصادية، مما استدعى تطوير نماذج جديدة أكثر كفاءة واستدامة في إدارة الموارد الزراعية. ومن بين أبرز هذه النماذج، برز مفهوم "الزراعة الذكية" كاستجابة معاصرة لهذه التحديات، مستفيداً من أدوات وتقنيات الثورة الصناعية الرابعة مثل الذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء، وتحليل البيانات الكبيرة Big Data (Gebbers & Adamchuk, 2010; Wolfert *et al.*, 2017).

إن الاهتمام العالمي المتزايد بالزراعة الذكية لا يقتصر فقط على الدول الصناعية، بل يشمل أيضاً العديد من الدول العربية التي باتت تواجه ضغوطاً متزايدة على مواردها الطبيعية، ولا سيما المياه والأراضي الزراعية. في هذا السياق، تسعى دول مثل الإمارات العربية المتحدة والمملكة العربية السعودية إلى تبني تقنيات الزراعة الذكية كجزء من رؤاها التنموية المستقبلية.(FAO, 2019; Al-Shalabi et al., 2020)

تسعى هذه المقدمة إلى وضع إطار تمهيدي للفصل الأول الذي يعالج المفاهيم الأساسية المرتبطة بالزراعة الذكية، من خلال التطرق إلى نشأتها التاريخية، وتطوراتها التكنولوجية، وعلاقتها بالثورة الصناعية الرابعة، إلى جانب مقارنتها بالزراعة التقليدية واستعراض أبرز التحديات التي ساهمت في نشأتها. وتهدف هذه المعالجة إلى تمهيد الطريق لفهم أعمق للإطار النظري والتطبيقي للزراعة الذكية ضمن سياق عالمي وعربي متشابك.

2. مفهوم الزراعة الذكية

تُعرّف منظمة الأغذية والزراعة (FAO) الزراعة الذكية بأنّها "حشد الابتكارات الرقمية – من الاستشعار عن بعد إلى الذكاء الاصطناعي – لزيادة كفاءة الإنتاج الزراعي ومرونته واستدامته عبر دورة القيمة بأكملها". ويستند هذا المفهوم إلى دمج ثلاث طبقات متكاملة :طبقة البيانات (مستشعرات، أقمار صناعية، طائرات دون طيّار)، وطبقة التحليل (نمذجة تنبؤية، تعلّم آلي)، ثم طبقة اتخاذ القرار/التنفيذ (معدات مُمَكَّنة بإنترنت الأشياء أو روبوتات). تَشمل الزراعة الذكية ما هو أوسع من الزراعة الدقيقة؛ فهي تمتد لمنصّات تتبّع الأغذية، والخدمات المالية للمزارعين، وسلاسل الإمداد المدعومة بالبلوكتشين، ما يجعلها «منظومة رقمية» لا «تقنية حقلية» فحسب.

3. الجذور التاريخية لنشأة الزراعة الذكية

يمكن تتبّع البدايات إلى أوائل التسعينيات مع أولى خرائط الغلّة المستندة إلى الـ GPS وحساسات الحصاد التي طوّرتها شركات المعدات الأميركية غير أنّ الرفع الحقيقي لأسهم الفكرة أتى في منتصف العقد الأول من الألفية الثالثة مع تعميم المنظومات الملاحية المتقدمة وتراجع كلفة الشرائح الحسّاسة، ثم مع إطلاق الهواتف الذكية (2007) التي وفّرت واجهةً ميدانية لجمع البيانات. تُظهر بيانات وزارة الزراعة الأميركية (USDA)أنّ اعتماد خرائط الغلّة والأسمدة المُتغيّرة المعدّل ارتفع من أقلّ من 10 ٪ في 1996 إلى أكثر من 50 ٪ في مزارع الذرة والصويا بحلول 2022 .

4. التحوّلات التكنولوجية في القطاع الزراعي

يمثل الانتقال من الميكنة الميكانيكية إلى الأنظمة السيبرانية-المادية (Cyber-Physical) أهم تحوّل تقني في تاريخ الزراعة. بعد ميكنة الري والحصاد (1900-1970)، جاءت حقبة المعلوماتية الزراعية (1970-2000) مع الحواسيب المحمولة وأجهزة قياس الرطوبة. ثمّ دخلنا طور الزراعة الرقمية مع تكامل السحابة والحساسات المتصلة (2000-الآن)؛ اليوم يجري بناء «توائم رقمية» للحقل تُحدّث آنياً ببيانات المناخ والتربة. الدراسات الميدانية تُظهر أنّ نظم الري الذكي القائمة على IoT رفعت الإنتاجية بنسبة 34.9 ٪ وخفّضت استهلاك المياه بنحو 48 ٪ مقارنة بالمنظومات التقليدية.

5. العلاقة بين الثورة الصناعية الرابعة والزراعة

ترتكز الثورة الصناعية الرابعة (4IR) على التزاوج بين العوالم الفيزيائية والرقمية عبر الذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء، والحوسبة الحدّية. يُنظر إلى الزراعة الذكية بوصفها التطبيق القطاعي الأبرز لـIR4، حيث تُحوِّل الحقول إلى «أنظمة ماديّة سيبرانية» تتبادل فيها المنصّات الزراعية البيانات مع آلات مزوّدة بالمستشعرات لتنفيذ أوامر شبه ذاتية (Klerkx & Rose, 2020) ؛ ينعكس ذلك في بروز نماذج التوأم الرقمي للمناخ الدقيق للحقل، والتعلّم الذاتي للآلات الزراعية في الزمن الحقيقي.

6. الفرق بين الزراعة التقليدية والذكية

البُعد	الزراعة التقليدية	الزراعة الذكية
وحدة القرار	الحقل/المزرعة ككتلة واحدة	منطقة دقيقة (أمتار أو نبات مفرد)
أدوات الرصد	تقدير بصري وخبرة بشرية	حساسات أرضية، صور فضائية، إنترنت الأشياء
توقيت التدخل	دوري أو موسمي	آني أو شبه آني بالاعتماد على البيانات

كفاءة الموارد	استهلاك مرتفع للمياه والطاقة		خفض المياه حتى 30-50 ٪ والطاقة ≥ 20 ٪
مرونة المناخ	منخفضة		مرتفعة بفضل التنبؤ وإدارة المخاطر

اعداد وتنسيق المؤلفَين

تؤكّد تحليلات المقارنة الميدانية أنّ دمج الاستشعار والرؤية الحاسوبية يزيد العائد الصافي للهكتار بنحو 15-25 ٪ في القمح والذرة مقارنة بالممارسات التقليدية.

7. التحدّيات التي أدّت إلى ظهور الزراعة الذكية

- **ضغط الموارد المائية:** تستهلك الزراعة حوالي 70% من المياه العذبة على مستوى العالم، مما يضع ضغطاً هائلاً على الموارد المائية المتاحة. مع تفاقم ظاهرة تغير المناخ، من المتوقع أن تعاني أكثر من نصف المناطق الزراعية من نقص حاد في إمدادات المياه بحلول عام 2030، مما يهدد الأمن الغذائي العالمي ويجبر المزارعين على تبني تقنيات أكثر كفاءة في استخدام المياه مثل الري الدقيق والمراقبة المستمرة لرطوبة التربة (فارمونوت، 2025).
- **التغير المناخي والظواهر المتطرفة:** تزايد حدة الظواهر المناخية المتطرفة مثل الجفاف، الفيضانات، والعواصف، جعل من الضروري اعتماد إدارة دقيقة للمدخلات الزراعية (كالأسمدة والمبيدات والمياه) للحد من المخاطر المحتملة. الزراعة الذكية توفر أدوات تحليل بيانات متقدمة تساعد في التنبؤ بهذه الظواهر والتكيف معها، مما يقلل من الخسائر ويزيد من مرونة النظام الزراعي (أراب فور كلايمت، 2024).
- **الفجوة الإنتاجية بين الإمكانات والواقع:** تشير دراسات إلى أن صغار المزارعين يخسرون ما بين 20% إلى 40% من الغلة المحتملة بسبب غياب التنبؤ الدقيق بالأمراض، الآفات، وحالة المحاصيل. الزراعة الذكية تعتمد على تقنيات

الاستشعار عن بعد، الأقمار الصناعية، والذكاء الاصطناعي لتوفير تنبؤات دقيقة تساعد في تحسين الإنتاجية وتقليل الهدر (جامعة البصرة، 2024).

- **تعقيد سلاسل الإمداد الغذائي:** تتطلب الأسواق الحديثة شفافية وتتبعاً فورياً لضمان الأمان الغذائي وجودة المنتجات. تقنية البلوكتشين بدأت تُعتمد في الزراعة الذكية لتوفير سجل رقمي لا يمكن تغييره يضمن تتبع المنتجات من الحقل إلى المستهلك، مما يعزز الثقة ويقلل من الفاقد والاحتيال (كلية الزراعة، جامعة طنطا، 2025).
- **نقص العمالة الريفية وارتفاع تكلفتها:** قلة العمالة الزراعية في المناطق الريفية وارتفاع أجورها دفع المزارعين لاعتماد تقنيات الأتمتة والروبوتات، التي تقوم بعمليات الزراعة والحصاد والمراقبة بشكل أكثر دقة وكفاءة، مما يعالج عجز القوى العاملة ويخفض التكاليف على المدى الطويل (فارمونوت، 2025).
- **عقبات السياسات والبنية التحتية:** في العديد من الاقتصادات الناشئة، لا تزال البنية التحتية الريفية ضعيفة، خاصة في مجال الاتصالات والإنترنت، مما يعيق تبني تقنيات الزراعة الذكية. كما أن تشظي القوانين الزراعية وعدم وجود سياسات داعمة موحدة يبطئ من وتيرة انتشار هذه التقنيات، خصوصاً بين صغار المزارعين الذين يحتاجون إلى دعم مادي ومعرفي (كلية الزراعة، جامعة طنطا، 2025).

8. الخاتمة

يُظهر المسار التاريخي والتقني للزراعة الذكية أنّها ليست مجرّد رفاهية تكنولوجية، بل استجابةٌ ضرورية لتحديات الأمن الغذائي والاستدامة. جذورها تمتدّ إلى ثورة الخرائط الغلّية في التسعينيات، لكنّ نضجها ارتبط باندماجها في منظومات الثورة الصناعية الرابعة. الفارق الجوهري بينها وبين الزراعة التقليدية يكمن في الانتقال من "الإدارة القائمة على الحدس" إلى "الإدارة القائمة على البيانات". ومع أنّ تحديات الموارد والتغيّر المناخي أجّجت الحاجة إليها، فإنّ نجاحها يظلّ رهناً بتطوير بنية تحتية رقمية

شاملة وسياسات داعمة، خصوصاً في العالم العربي حيث تُعد ندرة المياه وارتفاع التعرّض للمناخ من أشدّ الضغوط.

9. المراجع

أراب فور كلايمت Arab4Climate. (2024). الزراعة الذكية مناخياً: الحل المستدام لمواجهة التغيرات المناخية (https://arab4climate.org).

جامعة البصرة. (2024). الزراعة الذكية ومجالات تطبيقها في العالم العربي. البصرة، العراق.

فارمونوت Farmonaut. (2025). كيف تساهم تقنيات الزراعة الذكية في تحقيق الاستدامة الزراعية في العالم العربي. https://farmonaut.com

كلية الزراعة، جامعة طنطا. (2025). ندوة "الزراعة الذكية.. تقنيات المستقبل لتحقيق الأمن الغذائي". طنطا، مصر.

Abdelmoneim, A. A., Kimaita, H. N., Al Kalaany, C. M., Derardja, B., Dragonetti, G., & Khadra, R. (2025). IoT sensing for advanced irrigation management: A systematic review of trends, challenges, and future prospects. Sensors, 25(7), 2291.

Al-Shalabi, M., Al-Kahtani, M., & Al-Fraihat, M. (2020). Smart agriculture in the Gulf region: Opportunities and challenges. Arabian Journal of Agricultural Sciences, 12(1), 45–57.

Economic Research Service. (2023). Precision agriculture in the digital era: Recent adoption on U.S. farms (EIB-248). U.S. Department of Agriculture.

FAO. (2019). Digital agriculture: The future of farming in the Arab region. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org

Food and Agriculture Organization. (2024, November 18). Science and Innovation Forum 2024: Digital agriculture changemakers in action.

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. Science, 327(5967), 828–831.

Hammami, K., & Ben Moussa, S. (2024). Agriculture 4.0 adoption challenges in emerging economies: Evidence from North Africa.

Klerkx, L., & Rose, D. (2020). Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? Global Food Security, 24, 100347.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. Agricultural Systems, 153, 69–80.

الفصل 2 - مبادئ الزراعة الذكية وتطبيقاتها العملية

المحتويات

1. المقدمة
2. التقنيات الأساسية المستخدمة في الزراعة الذكية
3. المبادئ الأساسية للزراعة الذكية
4. إدارة الموارد بذكاء (ماء، طاقة، أسمدة)
5. استخدام التكنولوجيا في التخطيط الزراعي
6. مراقبة الحقول والمحاصيل
7. النمذجة والتنبؤ الزراعي
8. تطبيقات الزراعة الذكية في العالم الواقعي
9. التحديات التقنية والتنظيمية في التطبيق
10. الخاتمة
11. المراجع

1. المقدمة

مع تزايد التحديات التي تواجه قطاع الزراعة التقليدية من حيث التغيرات المناخية، ندرة الموارد، وتنامي الطلب العالمي على الغذاء، أصبحت الحاجة ماسة إلى تبني ممارسات وتقنيات جديدة تعزز من كفاءة الإنتاج واستدامته. الزراعة الذكية، باعتبارها مفهوماً حديثاً يجمع بين الابتكار والتقنية العالية والإدارة المستدامة للموارد، تمثل استجابة فعالة لهذه التحديات. يتمحور هذا الفصل حول المبادئ التي تقوم عليها الزراعة الذكية، واستعراض لأهم التقنيات المستخدمة، مع تحليل لأمثلة تطبيقية واقعية، عربية وعالمية، توضح كيف يمكن لهذه الممارسات أن تُحدث تحولاً نوعياً في النظم الزراعية الحديثة.

2. التقنيات الأساسية المستخدمة في الزراعة الذكية

تعتمد الزراعة الذكية على مجموعة متكاملة من التقنيات الحديثة التي تهدف إلى تحسين كفاءة الإنتاج الزراعي وتقليل الهدر في الموارد الطبيعية، مما يسهم في تحقيق استدامة بيئية وزيادة الإنتاجية.

- **الاستشعار عن بُعد والطائرات بدون طيار (Drones)**: تُستخدم تقنيات الاستشعار عن بُعد والطائرات بدون طيار لمراقبة صحة النباتات بشكل دقيق، من خلال التقاط صور عالية الدقة وتحليلها للكشف المبكر عن الآفات والأمراض، بالإضافة إلى تحديد مستوى الرطوبة ونوعية التربة. هذه المعلومات تساعد في توجيه عمليات الري والتسميد بشكل أكثر دقة، مما يقلل من استهلاك المياه والأسمدة (Zhang et al., 2022).
- **أنظمة المعلومات الجغرافية (GIS) وتحليل البيانات المكانية:** تُستخدم أنظمة GIS لرسم خرائط دقيقة للحقول الزراعية، تشمل توزيع التربة، التضاريس، والظروف المناخية المحلية. تحليل هذه البيانات المكانية يمكّن المزارعين من فهم الفروقات الدقيقة داخل الحقل وتطبيق تقنيات الزراعة الدقيقة بشكل مخصص لكل منطقة، مما يزيد من كفاءة استخدام الموارد (Gebbers & Adamchuk, 2010).
- **الذكاء الاصطناعي (AI) والتعلم الآلي:** تلعب تقنيات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي دوراً محورياً في التنبؤ بالإنتاجية الزراعية وتشخيص الأمراض النباتية بشكل مبكر. من خلال تحليل كميات كبيرة من البيانات البيئية والزراعية، يمكن لهذه التقنيات تقديم توصيات دقيقة حول توقيت الزراعة، الري، والتسميد، فضلاً عن اكتشاف الأمراض قبل تفشيها، مما يساعد في تقليل الخسائر (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018).
- **إنترنت الأشياء (IoT):** تمكّن تقنيات إنترنت الأشياء من ربط أجهزة الاستشعار والمعدات الزراعية بمنصات رقمية مركزية، مما يسمح بالمراقبة والتحكم عن بعد

في العمليات الزراعية. على سبيل المثال، يمكن ضبط أنظمة الري تلقائياً بناءً على بيانات رطوبة التربة المرسلة من الحقول، مما يحسن من كفاءة استخدام المياه ويقلل من الهدر (Wolfert *et al*., 2017).

- **الزراعة الدقيقة (Precision Agriculture):** تركز الزراعة الدقيقة على تقديم المدخلات الزراعية مثل المياه والأسمدة والمبيدات بشكل موجه ودقيق وفقاً لاحتياجات كل جزء من الحقل. هذا النهج يقلل من الإفراط في استخدام الموارد ويزيد من إنتاجية المحاصيل وجودتها، كما يحد من التأثيرات البيئية السلبية (Liakos et al., 2018).

3. المبادئ الأساسية للزراعة الذكية

تستند الزراعة الذكية إلى مجموعة من المبادئ التي تشكل أساساً لفلسفتها وتطبيقاتها العملية، وتوجه جهودها نحو تحقيق تنمية زراعية مستدامة ومتوازنة:

- **الاستدامة البيئية:** تسعى الزراعة الذكية إلى تقليل التأثيرات البيئية الضارة من خلال الاستخدام العقلاني للموارد الطبيعية، مثل المياه والتربة، وتقليل الانبعاثات الضارة، مع الحفاظ على التنوع البيولوجي.
- **الاستجابة للتغير المناخي:** تعتمد الزراعة الذكية على نظم تنبؤية وإدارة مرنة تسمح بالتكيف مع المتغيرات المناخية، مثل الجفاف أو الفيضانات، مما يعزز من قدرة الأنظمة الزراعية على الصمود في وجه التحديات المناخية (FAO, 2013).
- **تعزيز الإنتاجية:** تهدف إلى تحقيق أعلى عائد ممكن من وحدة الأرض مع الحفاظ على جودة المنتج الزراعي، من خلال تحسين ممارسات الزراعة واستخدام التكنولوجيا الحديثة.

- **إدارة قائمة على البيانات:** تعتمد الزراعة الذكية على اتخاذ القرارات الزراعية بناءً على بيانات آنية ودقيقة، بدلاً من الاعتماد فقط على الحدس أو الخبرة التقليدية، مما يزيد من دقة وكفاءة العمليات الزراعية.
- **العدالة والوصول:** تسعى إلى تمكين صغار المزارعين من الوصول إلى التقنيات والمعرفة الحديثة، وتقليل الفجوة الرقمية والمعرفية بينهم وبين المزارعين الكبار، لضمان توزيع عادل للفوائد الزراعية.

هذه التقنيات والمبادئ تشكل معاً إطاراً متكاملاً للزراعة الذكية التي تجمع بين الابتكار التكنولوجي والاستدامة البيئية والاجتماعية، وهو ما يتماشى مع رؤيتك للزراعة المستدامة من منظور إسلامي يراعي حفظ الأرض والموارد ويعزز العدالة الاجتماعية

4. إدارة الموارد بذكاء (ماء، طاقة، أسمدة)

تشكل الإدارة الذكية للموارد إحدى أهم ركائز الزراعة الذكية. فعلى سبيل المثال، تسمح تقنيات الري الذكي بتقليل استخدام المياه بنسبة تصل إلى 30% مقارنة بالطرق التقليدية (Fereres & Soriano, 2007). كما أن استخدام مستشعرات الرطوبة في التربة يتيح توجيه الري إلى المناطق التي تحتاجه بدقة. أما من حيث الطاقة، فإن استخدام الطاقة الشمسية لتشغيل أنظمة الري والمراقبة يقلل من الاعتماد على الوقود الأحفوري. وفيما يخص الأسمدة، تسهم نظم التوزيع الدقيقة في تقليل الهدر وتجنب التلوث الناتج عن الإفراط في الاستخدام.(Zhang *et al*., 2022)

5. استخدام التكنولوجيا في التخطيط الزراعي

يُعد التخطيط الزراعي من أهم مراحل العملية الزراعية، حيث يحدد بشكل كبير نجاح الإنتاج وكفاءة استخدام الموارد. مع تطور التكنولوجيا، أصبحت الزراعة الذكية توفر أدوات متقدمة تدعم التخطيط الزراعي بدقة وفعالية، مما يساهم في تحسين الإنتاجية وتقليل الهدر.

- **نمذجة المحاصيل باستخدام الذكاء الاصطناعي:** تعتمد نمذجة المحاصيل على تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحليل بيانات متعددة مثل نوع التربة، المناخ، والممارسات الزراعية السابقة، بهدف التنبؤ بتواريخ الزراعة والحصاد المثلى. هذه النماذج تساعد المزارعين على اتخاذ قرارات مبنية على بيانات دقيقة، مما يزيد من فرص النجاح ويقلل من المخاطر المرتبطة بالتقلبات المناخية أو الأمراض.
- **تحليل الطقس والتنبؤ المناخي:** تستخدم تقنيات الزراعة الذكية بيانات الطقس من الأقمار الصناعية ومحطات الرصد الأرضية لتوقع الظروف المناخية بدقة عالية. هذا التنبؤ يساعد في تحديد الوقت الأنسب للقيام بالعمليات الزراعية مثل الزراعة، الري، والتسميد، مما يقلل من الخسائر الناتجة عن الظروف الجوية غير المتوقعة (Jägermeyr *et al.*, 2021).
- **إدارة سلسلة الإمداد الزراعي:** تُسهم التكنولوجيا في ربط المزارع بأنظمة السوق بشكل مباشر، مما يحسن من عملية التسويق والتوزيع. من خلال منصات رقمية متقدمة، يمكن تتبع المنتجات الزراعية من الحقل إلى المستهلك، تحسين التخزين، وتقليل الفاقد. هذا الربط يعزز من شفافية السوق ويضمن وصول المنتجات الطازجة في الوقت المناسب.
- **تكامل البيانات وتحليلها:** تجمع منصات الزراعة الذكية بيانات من مصادر متعددة مثل أجهزة الاستشعار، الطائرات بدون طيار، والأقمار الصناعية، لتحليل شامل يساعد في التخطيط الاستراتيجي للمزارع. هذا التكامل يمكن من مراقبة صحة المحاصيل، إدارة الموارد بكفاءة، والتخطيط لموسم زراعي مستدام.
- **دعم اتخاذ القرار للمزارعين:** توفر التطبيقات الذكية واجهات سهلة الاستخدام تُمكّن المزارعين من الوصول إلى توصيات مخصصة بناءً على بيانات مزارعهم، مما يعزز من قدرتهم في اتخاذ قرارات مستنيرة وتحسين الأداء الزراعي.

بهذا الشكل، تُمكّن التكنولوجيا الحديثة الزراعة الذكية من تحسين التخطيط الزراعي بشكل شامل، مما يرفع من كفاءة الإنتاج ويقلل من المخاطر البيئية والاقتصادية.

6. مراقبة الحقول والمحاصيل

تُعد مراقبة الحقول والمحاصيل من أهم التطبيقات العملية لتقنيات الزراعة الذكية، حيث تسمح باستخدام الأقمار الصناعية والطائرات بدون طيار (الدرونز) برصد نمو النباتات بشكل دقيق ومستمر على مدار الموسم الزراعي. هذه التقنيات توفر صوراً عالية الدقة وتحليلات متقدمة تساعد في اكتشاف الأمراض والآفات في مراحلها المبكرة، مما يتيح التدخل السريع للحد من انتشارها وتقليل الخسائر.

تقنيات التصوير الطيفي، مثل التصوير بالأشعة تحت الحمراء والقريبة من الأشعة تحت الحمراء، تتيح الكشف عن التغيرات الطفيفة في لون الأوراق أو كثافة الكلوروفيل، والتي قد تشير إلى نقص في العناصر الغذائية أو بداية الإصابة بالأمراض قبل ظهور الأعراض الظاهرة. هذا النوع من الرصد الدقيق يمكّن المزارعين من اتخاذ قرارات مبنية على بيانات علمية، مثل تعديل جدول التسميد أو تطبيق مبيدات محددة، مما يحسن من صحة المحاصيل ويزيد من الإنتاجية (Pantazi et al., 2016).

7. النمذجة والتنبؤ الزراعي

تلعب النماذج الرياضية والبرمجيات المتقدمة دوراً حيوياً في دعم التخطيط الزراعي عبر التنبؤ بالإنتاجية الزراعية تحت ظروف مختلفة. هذه النماذج تحلل تأثير العوامل المتعددة مثل التربة، المناخ، استخدام المياه، والتقنيات الزراعية، مما يساعد في تقدير المحصول المتوقع بدقة.

فضلاً عن ذلك، تُستخدم هذه النماذج لتحليل سيناريوهات التغير المناخي وتأثيرها على الزراعة، مما يمكن المزارعين وصناع القرار من وضع استراتيجيات التكيف المناسبة. كما تساعد النماذج في تقدير استهلاك المياه والطاقة، مما يعزز من كفاءة استخدام الموارد وتقليل الهدر.

الذكاء الاصطناعي يدخل بشكل متزايد في تحليل هذه النماذج، حيث يقوم بمعالجة كميات ضخمة من البيانات، واكتشاف الأنماط، وتقديم توصيات دقيقة ومخصصة للمزارعين، مثل توقيت الزراعة، كمية الري، واختيار الأصناف المناسبة، مما يعزز من الاستدامة والربحية الزراعية (Rosenzweig *et al*., 2014).

8. تطبيقات الزراعة الذكية في العالم الواقعي

تُظهر تجارب عدة دول كيف يمكن للزراعة الذكية أن تحدث تحولاً حقيقياً في القطاع الزراعي من خلال تحسين الكفاءة وزيادة الإنتاجية مع تقليل استهلاك الموارد.

- **في هولندا:** تُعد هولندا من الدول الرائدة في تطبيق أنظمة الزراعة الدقيقة، خاصة في البيوت الزجاجية التي تتيح بيئة محكمة التحكم. باستخدام تقنيات متقدمة مثل الاستشعار عن بعد، أنظمة الري الذكية، والذكاء الاصطناعي، تمكنت المزارع الهولندية من تقليل استهلاك المياه بنسبة تصل إلى 90%، مع زيادة الإنتاجية بنسبة 50%. هذا الإنجاز يعكس قدرة التكنولوجيا على تحقيق استدامة بيئية واقتصادية عالية في بيئات زراعية مكثفة.(van Hooijdonk et al., 2020)
- **في المغرب:** واجهت المغرب تحديات كبيرة في المناطق الجافة وشبه الجافة، حيث تم تطبيق نظم الري الذكي باستخدام تقنيات مثل الري بالتنقيط المدعوم بأجهزة استشعار رطوبة التربة. ساعد هذا التطبيق في تحسين كفاءة استخدام المياه بشكل ملحوظ، مما أدى إلى رفع مردودية المحاصيل وتقليل الفاقد، وهو أمر حيوي للأمن الغذائي في ظل ندرة الموارد المائية.(FAO, 2021)
- **في السعودية:** بدأت السعودية في تبني مشاريع زراعية تعتمد على تقنيات متقدمة مثل مستشعرات إنترنت الأشياء والطائرات بدون طيار لرصد حالة الحقول الزراعية، خاصة في مزارع النخيل والقمح. هذه التقنيات تتيح مراقبة دقيقة للنمو، الكشف المبكر عن الأمراض، وتحسين إدارة الموارد، مما يسهم في زيادة الإنتاجية وتحقيق استدامة أفضل في بيئة صحراوية قاسية.

- **في العراق:** تُعدّ التحديات التي يفرضها تغير المناخ هائلة، إذ ترتفع درجات الحرارة بمعدل أسرع بسبع مرات من المتوسط العالمي. ومن المتوقع أن يشهد العراق خلال العقد المقبل زيادات كبيرة في الفيضانات والجفاف والتصحر. وتؤثر هذه الظروف بشدة على سبل العيش، مما يُقوّض القدرة الاقتصادية للأسر ويساهم في زيادة الفقر.

بحلول عام 2035، من المتوقع أن يواجه العراق عجزاً مائياً حاداً يبلغ حوالي عشرة مليارات متر مكعب، مما سيكون له تأثير عميق على الزراعة وسبل العيش في البلاد، يؤدي نقص المياه في العراق إلى الجفاف وملوحة التربة، مما يؤدي إلى فقدان 25,000 هكتار من الأراضي الزراعية سنوياً.

تتعرض 70% من الأراضي الزراعية في العراق بالفعل لخطر التدهور الكامل بسبب تغير المناخ، ولمواجهة هذه التحديات، من الضروري تطبيق مناهج زراعية ذكية مناخياً تُعزز القدرة على التكيف مع تغير المناخ وتدعم المجتمعات. ويُعدّ جهاز Waterboxx تقنيةً يُمكن أن تُسهم في هذا الجهد.

تقنية ووتر بوكس The Waterboxx Technology

ووتر بوكس جهاز مبتكر طورته شركة جرواسيس Groasis لمعالجة مشكلة ندرة المياه وتعزيز الزراعة المستدامة في المناطق القاحلة. وهو عبارة عن حاوية أسطوانية الشكل تجمع وتخزن مياه الأمطار للنباتات والأشجار. يتميز تصميمه بخصائص تجعله مفيداً بشكل خاص في المناخات الصعبة مثل العراق.

يعمل ووتر بوكس على جمع مياه الأمطار والندى عبر سطحه العلوي، والذي يوجه الرطوبة إلى خزان مركزي. ثم تُطلق المياه المخزنة ببطء في الأرض من خلال نظام الري بالتنقيط. يوفر هذا إمداداً ثابتاً من المياه للنباتات ويهيئ بيئة أفضل لنمو البذور.

إن الحاجة إلى إدارة مستدامة للمياه في العراق ملحة، ويمكن لهذه التقنية أن تُسهم في مواجهة هذه التحديات بطرق عدة:

- الحفاظ على المياه: من خلال جمع مياه الأمطار وتخزينها، يُقلل الجهاز من الحاجة إلى مصادر المياه التقليدية التي تندر بشكل متزايد. ويكتسب هذا أهمية خاصة في المناطق التي تعاني من جفاف شديد.
- خصوبة التربة: يُساعد الإطلاق التدريجي للمياه من الجهاز على الحفاظ على رطوبة التربة، وهو أمر حيوي لصحة النبات ويمنع مشاكل التربة مثل الملوحة.
- زيادة الإنتاجية الزراعية: من خلال توفير مصدر مياه موثوق، يدعم الجهاز نمواً أكثر ثباتاً للمحاصيل والأشجار. وهذا يُساعد على ضمان إنتاج غذائي مستقر ودعم سبل العيش المحلية في المناطق المتأثرة بتغير المناخ.
- استعادة النظام البيئي: من خلال تمكين النباتات من النمو، يُساهم الجهاز أيضاً في استعادة الأراضي المتدهورة، مما يُساعد في مكافحة التصحر وتعزيز التنوع البيولوجي.

تقنيات الزراعة الذكية ودعم الأسر المهمشة

تعمل منظمة دوركاس Dorcas العراق في سنجار، العراق، على دعم الفئات الأكثر عرضة لآثار تغير المناخ. ويشمل ذلك الأسر التي تعيلها نساء، والأسر التي تضم أشخاصاً من ذوي الإعاقة أو أمراضاً مزمنة، وكبار السن الذين لا يتلقون الدعم.

تُدرّب منظمة دوركاس العراق ما يقرب من 2500 شخص على الممارسات الزراعية الذكية مناخياً واستراتيجيات تنويع مصادر الدخل. كما زوّدت دوركاس 50 شخصاً بجهاز "ووتر بوكس" وشتلات الأشجار، بالإضافة إلى التدريب اللازم لاستخدام هذه التقنية وصيانتها. وتخطط دوركاس العراق لتوزيع حوالي 8000 جهاز "ووتر بوكس" إضافي خلال العام المقبل. وقد حقق هذا المشروع بالفعل نتائج إيجابية ملحوظة، وستواصل دوركاس تعزيز هذه الجهود.

تطبيقات الزراعة الذكية في حقول الرز

في إطار توسيع تطبيقات الممارسات الزراعية الذكية مناخياً في زراعة الرز في العراق، قامت منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة (الفاو) في العراق، بتنفيذ الفعالية الحقلية لرش الاسمدة باستخدام الطائرات المسيرة (الدرون) في حقول الرز المزروعة بطريقة الشتال الميكانيكي.

ويندرج هذا النشاط ضمن مشروع "تعزيز المرونة المناخية للأسر الزراعية الاكثر هشاشة للتغيرات المناخية من خلال تعزيز إدارة المياه الذكية مناخياً وممارسات الزراعة الجيدة في سلاسل القيمة الغذائية (الممول من الوكالة السويدية للتعاون الإنمائي الدولي (SIDA)) والذي يهدف إلى ترشيد استخدام المياه ورفع الانتاجية الزراعية من أجل التكيف مع ظروف ندرة المياه والتغيرات المناخية .

وكانت منظمة الأغذية والزراعة (الفاو) قد نفذت مؤخراً فعالية حقلية لزراعة محصول الشلب (الأرز) في ناحية المشخاب، باستخدام حزمة من التقنيات من

ضمنها الشتال الميكانيكي الذي يسهم بشكل كبير في توفير المياه والاقتصاد في المدخلات الزراعية كالبذور والمبيدات وتكاليف العمالة فضلاً عن تخفيض التلوث.

الجدير بالذكر أن زراعة محصول الرز ما زالت حتى الآن تتم بالطرق البدائية المعتمدة على غمره بالمياه بشكل دائمي وبكميات كبيرة، ما دفع الحكومة العراقية من خلال وزارة الموارد المائية إلى التوجيه باعتماد تقنيات الري الحديثة بما يسهم بخفض كميات المياه المستعملة في ري المحصول، مع الإشارة إلى أن المساحة التي سمح بزراعتها من المحصول للعام الحالي لا تزيد عن 200 ألف دونم (50 هكتار)، مقارنة بـ 400 ألف للعام الماضي .

تدعم هذه المبادرة العديد من أهداف التنمية المستدامة، بما في ذلك الهدف 2: القضاء على الجوع، من خلال تعزيز كفاءة إنتاج الغذاء؛ الهدف 6 من أهداف التنمية المستدامة: المياه النظيفة والصرف الصحي، من خلال الاستخدام المستدام للموارد المائية؛ والهدف 13 من أهداف التنمية المستدامة: العمل المناخي، من خلال تعزيز الممارسات التي تساعد المزارعين على التكيف مع تأثيرات تغير المناخ.

9. التحديات التقنية والتنظيمية في التطبيق

رغم الفوائد الكبيرة للزراعة الذكية، تواجه تطبيقاتها عدة تحديات تعيق انتشارها، خصوصاً في الاقتصادات الناشئة:

- **ارتفاع تكلفة التكنولوجيا:** تظل تكلفة الأجهزة والبرمجيات المتقدمة عائقاً رئيسياً، لا سيما لصغار المزارعين الذين يفتقرون إلى الموارد المالية الكافية للاستثمار في هذه التقنيات.
- **نقص البنية التحتية الرقمية:** ضعف شبكات الإنترنت والاتصالات في المناطق الريفية يحد من قدرة المزارعين على استخدام الأدوات الرقمية والتقنيات الحديثة.

- **غياب الإطار القانوني والتنظيمي:** عدم وجود قوانين واضحة تنظم جمع واستخدام البيانات الزراعية يثير مخاوف بشأن الخصوصية وحقوق الملكية، مما يبطئ من اعتماد التكنولوجيا.
- **الفجوة المعرفية:** تحتاج الزراعة الذكية إلى مهارات تقنية متخصصة، مما يستدعي تنفيذ برامج تدريب وتأهيل للمزارعين والمهندسين الزراعيين لتعزيز قدراتهم على استخدام هذه التقنيات بفعالية (Rose *et al*., 2016).

10. الخاتمة

تمثل الزراعة الذكية نقلة نوعية في مستقبل الزراعة العالمية والعربية، حيث توفر حلولاً مبتكرة لتعزيز الإنتاجية مع الحفاظ على الموارد الطبيعية. لتحقيق هذا التحول بنجاح، يجب تضافر الجهود بين القطاعات التقنية والزراعية والتعليمية والتنظيمية، مع التركيز على بناء بنية تحتية رقمية قوية، وضع أطر قانونية واضحة، وتوفير التدريب المناسب. هذه الخطوات تفتح أمام الدول العربية فرصة استراتيجية لتحديث نظمها الزراعية ومواجهة التحديات البيئية والغذائية المتزايدة، بما يتوافق مع مبادئ الاستدامة والعدالة الاجتماعية.

11. المراجع

FAO. (2013). *Climate-Smart Agriculture: Sourcebook*. Food and Agriculture Organization.

FAO. (2021). *Morocco Country Programming Framework*.

Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147-159.

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828–831.

Jägermeyr, J., Müller, C., Ruane, A. C., et al. (2021). Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new

generation of climate and crop models. *Nature Food*, 2(11), 873–885.

Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70–90.

Liakos, K. G., et al. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674.

Pantazi, X. E., Moshou, D., Alexandridis, T., Whetton, R., & Mouazen, A. M. (2016). Wheat yield prediction using machine learning and advanced sensing techniques. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 57–65.

Rosenzweig, C., et al. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3268–3273.

Rose, D. C., et al. (2016). Decision support tools for agriculture: Towards effective design and delivery. *Agricultural Systems*, 149, 165–174.

van Hooijdonk, E., et al. (2020). Smart agriculture in the Netherlands: Technologies and policies. *Wageningen University Report*.

Wolfert, S., et al. (2017). Big Data in Smart Farming–A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80.

Zhang, X., Wang, J., & Zhang, Y. (2022). Remote sensing technologies in smart agriculture: Recent developments and future prospects. *Agronomy*, 12(3), 589.

الفصل 3 - الزراعة الذكية: من الأبحاث إلى الميدان

المحتويات

1. المقدمة
2. البحوث العلمية والدراسات في مجال الزراعة الذكية
3. الفجوة بين البحث والتطبيق
4. آليات نقل التكنولوجيا إلى المزارع
5. الشراكات بين الجامعات والمزارعين والشركات
6. قصص نجاح من العالم
7. تحديات التطبيق في الدول النامية
8. الخاتمة
9. المراجع

1. المقدمة

تُمثّل الزراعة الذكية إحدى الركائز المستقبلية لتحقيق الأمن الغذائي العالمي، خصوصاً في ظلّ التحديات المتزايدة مثل تغيّر المناخ، وتقلّص الموارد، وتزايد الطلب السكاني على الغذاء. وعلى الرغم من التقدّم البحثي الكبير في هذا المجال، ما تزال هناك فجوة ملموسة بين ما تُنتجه المختبرات والمراكز البحثية، وما يتم تبنّيه فعلياً على مستوى الحقول والمزارع. فبينما تشهد المجلات العلمية تدفّقاً مستمراً للدراسات التي تستعرض تقنيات مثل الذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء، والتحليل البياني، تبقى نسب اعتماد هذه الابتكارات في الواقع الزراعي محدودة في كثير من السياقات، لا سيما في الدول النامية.(Wolfert et al., 2017; Rose et al., 2021)

إن فهم العلاقة بين البحث العلمي والتطبيق العملي في الزراعة الذكية يُعد أمراً حاسماً لتسريع تبني التقنيات الحديثة، وتعزيز إنتاجية المزارعين، وتحقيق أهداف التنمية المستدامة. فبينما تنجح بعض الدول والمؤسسات في ترجمة نتائج البحوث إلى حلول ميدانية، تُواجه أخرى تحديات في التمويل، ونقل المعرفة، والتكامل بين الفاعلين في المنظومة الزراعية.(Klerkx & Rose, 2020)

يسعى هذا الفصل إلى استعراض الجهود البحثية في ميدان الزراعة الذكية، وتحليل التحديات التي تحول دون تحويل نتائج الأبحاث إلى تطبيقات عملية فعالة. كما يتناول دور الشراكات بين الجامعات والمزارعين والشركات، ويعرض قصص نجاح عالمية، مع التركيز على التحديات الخاصة التي تواجه الدول النامية في هذا السياق.

2. البحوث العلمية والدراسات في مجال الزراعة الذكية

شهد مجال الزراعة الذكية تطوراً غير مسبوق في العقد الأخير، حيث ازداد عدد ونطاق البحوث العلمية المنشورة بشكل كبير، مدفوعاً بالتطورات المتسارعة في تكنولوجيا المعلومات وزيادة الاهتمام العالمي بتحديات تغير المناخ والأمن الغذائي. وقد اتجهت هذه الأبحاث إلى استكشاف حلول مبتكرة تعتمد على تقنيات الاستشعار الدقيق، وتحليل البيانات الضخمة، والنمذجة التنبؤية، والذكاء الاصطناعي لتعزيز كفاءة الإنتاج الزراعي واتخاذ القرارات المدعومة بالبيانات (Kamilaris et al., 2017).

من بين أبرز الجهات الرائدة في هذا المجال الجامعات ومراكز الأبحاث في أوروبا وأمريكا الشمالية والصين، حيث تستثمر هذه المؤسسات بكثافة في مشاريع بحثية متطورة. على سبيل المثال، طورت جامعة Wageningen الهولندية، إحدى أبرز المؤسسات الأكاديمية في علوم الزراعة، نظاماً متكاملاً لإدارة المحاصيل يعتمد على بيانات الأقمار الصناعية وتقنيات إنترنت الأشياء(IoT) ، مما ساعد المزارعين على تحسين إنتاجية المحاصيل مع تقليل الهدر في الموارد المائية (WUR, 2020).

إلى جانب ذلك، لعبت المنظمات الدولية دوراً محورياً في تعزيز البحث التطبيقي في مجال الزراعة الذكية، خاصة في الدول النامية. فمنظمة الأغذية والزراعة (FAO) أطلقت عدة برامج ميدانية بالتعاون مع الحكومات المحلية لدعم المزارعين من خلال تطبيقات الزراعة الدقيقة، مثل أنظمة مراقبة التربة والري الذكي، مما ساهم في تحسين الإنتاجية الزراعية في مناطق تعاني من ندرة الموارد (FAO, 2022).

كما بدأت تظهر اتجاهات بحثية جديدة تركز على دمج الروبوتات الزراعية، والزراعة العمودية، وتطبيقات البلوك تشين لتعزيز الشفافية في سلاسل التوريد. وتشير الدراسات الحديثة إلى أن هذه التقنيات يمكن أن تحدث تحولاً جذرياً في القطاع الزراعي، خاصة مع تزايد الضغوط البيئية والسكانية.

باختصار، تُظهر البحوث العلمية في مجال الزراعة الذكية إمكانات هائلة لمواجهة تحديات الزراعة الحديثة، لكن نجاحها يعتمد على تعزيز التعاون بين الأوساط الأكاديمية والقطاع الخاص والحكومات لضمان نقل هذه الابتكارات من المختبرات إلى الحقول.

3. الفجوة بين البحث والتطبيق

رغم التوسع الكبير في البحوث العلمية المتعلقة بالزراعة الذكية، إلا أن تطبيقاتها الميدانية لا تزال تواجه عقبات كبيرة، خاصة في المناطق النامية والريفية. وتُعزى هذه الفجوة إلى عدة عوامل معقدة، منها:

- **التحديات التقنية والبنية التحتية**

  - ضعف البنية التحتية الرقمية في المناطق الريفية، حيث يعاني الكثير من المزارعين من انعدام أو ضعف خدمات الإنترنت والكهرباء، مما يحول دون استخدام حلول مثل إنترنت الأشياء (IoT) أو الزراعة الدقيقة.
  - ارتفاع تكلفة التقنيات الحديثة، مثل أجهزة الاستشعار والطائرات المسيرة (الدرونز)، مما يجعلها بعيدة عن متناول صغار المزارعين (Rose & Chilvers, 2018).

- **العوائق الاقتصادية والمؤسسية**

  - نقص التمويل الموجه لدعم تبني التقنيات الزراعية الذكية، سواء من الحكومات أو القطاع الخاص.

- عدم تكييف الأبحاث مع الواقع المحلي، حيث تُصمم العديد من الحلول في بيئات متقدمة زراعياً (مثل أوروبا أو أمريكا الشمالية)، ولا تأخذ في الاعتبار الظروف المناخية أو الاقتصادية للدول النامية (Eastwood et al., 2019).

- **الفجوة المعرفية والثقافية**

- انخفاض الوعي التكنولوجي بين المزارعين، مما يحد من قدرتهم على استخدام الأدوات الرقمية.
- انفصال الأبحاث الأكاديمية عن احتياجات المزارعين، حيث تُنتج المعرفة في معامل بحثية دون مشاركة فعالة من الفلاحين في تحديد أولويات البحث، مما يؤدي إلى حلول غير عملية (Eastwood et al., 2019).

4. آليات نقل التكنولوجيا إلى المزارع

لضمان نجاح نقل التكنولوجيا من المختبرات إلى الحقول، لا بد من اتباع آليات متكاملة تشمل:

- **الإرشاد الزراعي الرقمي**

- استخدام منصات إلكترونية وتطبيقات هاتفية لتقديم إرشادات زراعية مخصصة بناءً على بيانات الطقس وخصوبة التربة.
- مثال: نجاح منصة "أغريبو (AgriBo) "في تونس في توفير نصائح زراعية عبر الرسائل النصية للمزارعين (World Bank, 2021).

- **المزارع النموذجية (الحقول الإيضاحية)**

- إنشاء مزارع تجريبية لعرض تقنيات الزراعة الذكية بشكل عملي، مما يساعد المزارعين على رؤية فوائدها المباشرة.

- مثال: مشاريع البيوت المحمية الذكية في المغرب التي تستخدم أنظمة ري أوتوماتيكية تعمل بالطاقة الشمسية.

- **التمويل والحوافز الاقتصادية**

- تقديم قروض ميسرة أو إعانات حكومية لتشجيع المزارعين على تبني التقنيات الحديثة.
- مثال: برنامج "المغرب الأخضر "الذي وفّر دعماً مالياً للمزارعين لشراء أنظمة الري الذكي (World Bank, 2021).

- **الشراكات بين القطاعين العام والخاص**

- تعزيز التعاون بين الجامعات والشركات الناشئة والحكومات لإنشاء نظام ابتكار زراعي متكامل (Klerkx et al., 2012).
- مثال: شراكات بين منظمة الفاو وشركات التكنولوجيا لتطوير حلول رقمية للمزارعين في أفريقيا.

يتطلب تقليص الفجوة بين البحث والتطبيق نهجاً شاملاً يجمع بين تحسين البنية التحتية، والتوعية التكنولوجية، والتكيف مع الاحتياجات المحلية، بالإضافة إلى تمويل مستدام وشراكات فعالة، يمكن تحويل الابتكارات البحثية إلى حلول عملية تُحدث تأثيراً حقيقياً في الميدان.

5. الشراكات بين الجامعات والمزارعين والشركات

تمثل الشراكات التعاونية حجر الزاوية في تفعيل الزراعة الذكية على الأرض. فالربط بين الجامعات والمزارعين والشركات يتيح تطوير حلول مخصصة، وتوفير دعم فني مستمر، وتحقيق التكامل بين الابتكار النظري والتطبيق العملي. على سبيل المثال، أطلقت جامعة ولاية أيوا في الولايات المتحدة برنامجاً مشتركاً مع شركات تكنولوجيا

الزراعة لتطوير حلول استشعار ذكية لمحاصيل الذرة والصويا، بالتعاون المباشر مع مزارعين في الولاية.(Iowa State University, 2020)

كما بدأت بعض الجامعات العربية مثل جامعة الملك سعود وجامعة القاهرة في تأسيس حاضنات زراعية بالتعاون مع شركات محلية، لتطبيق الأبحاث المتعلقة بالري الذكي والروبوتات الزراعية.

6. قصص نجاح من العالم

من أبرز قصص النجاح في مجال الزراعة الذكية:

- **الهند: ثورة رقمية في الحقول**

في الهند، نجحت شركة CropIn في إحداث تحول جذري في القطاع الزراعي من خلال منصتها الذكية التي تجمع بين تقنيات الاستشعار عن بعد والذكاء الاصطناعي .تسمح هذه المنصة للمزارعين:

- مراقبة صحة المحاصيل عبر صور الأقمار الصناعية
- التنبؤ بالإنتاجية باستخدام تحليلات البيانات الضخمة
- تحسين جدول الري والتسميد بناءً على تنبؤات الطقس

وقد أدى تطبيق هذه التقنية إلى:

- زيادة متوسط الإنتاجية بنسبة 25% في ولايات مثل كارناتاكا وماهاراشترا.
- تقليل الفاقد من المحاصيل بنسبة 20%.
- تحسين دخل صغار المزارعين بنسبة 35% (CropIn, 2021) .

هولندا: الروبوتات تغير وجه تربية الأبقار

في هولندا، أطلقت شركة Lely نظاماً متكاملاً لإدارة مزارع الألبان يعتمد على:

- روبوتات حليب أوتوماتيكية تعمل 24/7.
- مجسات ذكية لمراقبة صحة الأبقار.
- أنظمة تحليل بيانات فورية لتتبع إنتاجية كل بقرة.

وقد حقق هذا النظام:

- زيادة إنتاج الحليب بنسبة 15%.
- خفض تكاليف العمالة بنسبة 40%.
- تحسين جودة الحياة للمزارعين عبر تقليل ساعات العمل الشاقة.

تونس: ثورة الري الذكي

في إطار مشروع "المزارع الذكية" المدعوم من الاتحاد الأوروبي، تم تطبيق حلول متكاملة تشمل:

- شبكة من مجسات رطوبة التربة المتصلة بالسحابة الإلكترونية.
- تطبيقات هاتفية توفر توصيات ري دقيقة.
- أنظمة ري بالتنقيط الذكية.

وقد أسفرت هذه المبادرة عن:

- توفير 30% من استهلاك المياه.
- زيادة إنتاجية الزيتون بنسبة 22%.
- خفض تكاليف الطاقة المستخدمة في الري (GIZ, 2022) .

7. تحديات التطبيق في الدول النامية

- **التحديات الرئيسية:**
  - **تحديات بنيوية:**
    - ضعف شبكات الاتصالات في المناطق الريفية (فقط 35% من المزارعين في أفريقيا جنوب الصحراء لديهم إمكانية الوصول لإنترنت موثوق).
    - نقص البنية التحتية للطاقة المتجددة.
  - **عوائق مالية:**
    - تكلفة نظام الزراعة الدقيقة الأساسي قد تصل إلى 500 دولار للهكتار الواحد.
    - محدودية الوصول للتمويل الزراعي (فقط 5% من القروض المصرفية في أفريقيا تذهب للقطاع الزراعي.
  - **تحديات بشرية:**
    - 68% من المزارعين في الدول النامية لا يمتلكون المهارات الرقمية الأساسية
    - ندرة المرشدين الزراعيين المدربين على التقنيات الحديثة
  - **عوائق مؤسسية:**
    - 70% من الدول الأفريقية تفتقد لإطار قانوني واضح للزراعة الذكية.
    - انعدام التنسيق بين الوزارات المعنية (الزراعة، الاتصالات، المالية).
- **الحلول المقترحة:**
  - تطوير حزم تكنولوجية منخفضة التكلفة (أقل من 100دولار/الهكتار).

- إطلاق برامج تدريبية تستهدف الشباب الريفي.
- إنشاء صندوق إقليمي لتمويل الزراعة الذكية.
- تطوير منصات معرفية محلية بلغات السكان الأصلية.

8. الخاتمة

يمثّل الانتقال من البحث إلى التطبيق في الزراعة الذكية تحدياً معقّداً لكنه ضروري لمواجهة التحديات الزراعية في القرن الحادي والعشرين. إن سدّ الفجوة بين المختبر والميدان يتطلب تعاوناً حقيقياً بين مختلف الأطراف، وتوفير بيئة حاضنة للابتكار، واستراتيجيات شاملة لنقل التكنولوجيا وبناء القدرات. ويمكن للدول العربية، رغم ما تواجهه من تحديات، أن تحقق تقدماً في هذا المجال إذا ما تم تكييف النماذج الناجحة عالمياً لتلائم بيئاتها المحلية.

9. المراجع

CropIn. (2021). *Smart Farming for the Digital Age*. https://www.cropin.com

Eastwood, C., Klerkx, L., Ayre, M., & Dela Rue, B. (2019). Managing socio-ethical challenges in the development of smart farming: From a fragmented to a comprehensive approach for responsible innovation. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics, 32*(5), 741–768.

FAO. (2022). *Digital Agriculture: Supporting farmers in a changing climate*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

GIZ. (2022). *Smart Agriculture in North Africa*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.

Iowa State University. (2020). *Digital Agriculture Innovation Program*.

Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture, 143*, 23–37.

Klerkx, L., & Rose, D. (2020). Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? *Global Food Security, 24*, 100347.

Klerkx, L., van Mierlo, B., & Leeuwis, C. (2012). Evolution of systems approaches to agricultural innovation: Concepts, analysis and interventions. *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic*, 457–483.

Rose, D. C., & Chilvers, J. (2018). Agriculture 4.0: Broadening responsible innovation in an era of smart farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems, 2*, 87.

Rose, D. C., Wheeler, R., Winter, M., Lobley, M., & Chivers, C. A. (2021). Agricultural research for the future: Balancing scientific rigor and societal relevance. *Journal of Agricultural Science, 159*, 25–41.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems, 153*, 69–80.

World Bank. (2021). *Harnessing the Power of Digital Technologies in Agriculture*. Washington, DC: The World Bank.

WUR (Wageningen University & Research). (2020). *Digital Twins and Smart Farming*. https://www.wur.nl

الفصل 4 - دليل الطالب إلى الزراعة الذكية والتقنيات الحديثة

المحتويات

1. المقدمة
2. المفاهيم الأساسية التي يجب على الطالب معرفتها
3. مسارات دراسية في الزراعة الذكية
4. المهارات المطلوبة للعاملين في مجال الزراعة الذكية
5. مصادر التعلم والبحث والتدريب في الزراعة الذكية
6. آفاق مهنية في الزراعة الذكية
7. الخاتمة
8. المراجع

1. المقدمة

تشهد الزراعة الذكية نمواً متسارعاً في مختلف أنحاء العالم نتيجة لتقاطع التقنيات الرقمية مع الممارسات الزراعية التقليدية، وهو ما أدى إلى إعادة تشكيل دور المهنيين والممارسين في القطاع الزراعي (Wolfert et al., 2017) . ومع هذا التحول، أصبح من الضروري توجيه الطلاب والمهتمين بالمجال إلى المسارات الدراسية والمهارات العملية التي تؤهلهم لفهم وتطبيق مفاهيم الزراعة الذكية، خاصة في ظل التغيرات المناخية والتحديات المتعلقة بالأمن الغذائي (Basso & Antle, 2020).

إن الفهم العميق للمفاهيم التقنية والبيئية التي ترتكز عليها الزراعة الذكية، إلى جانب الإلمام بالأدوات الرقمية والبرمجيات المتقدمة، يمثّل حجر الأساس لإعداد جيل جديد من المهنيين القادرين على قيادة التغيير في هذا القطاع (FAO, 2022) . كما يتطلب هذا المسار تطوير كفاءات متعددة، تشمل التفكير التحليلي، وفهم البيانات، والتكامل بين العلوم الزراعية والهندسة والتقنية (Kamilaris *et al.*, 2017).

يسعى هذا الفصل إلى تزويد الطالب بإطار معرفي شامل حول الزراعة الذكية، انطلاقاً من المفاهيم الأساسية، مروراً بالمسارات الدراسية والتقنيات الحديثة، وصولاً إلى الفرص المهنية والتدريبية المتاحة. ويتضمن الفصل أيضاً استعراضاً للمصادر التعليمية المفتوحة والبرامج التدريبية التي تتيح للطالب بناء مسار أكاديمي وعملي متكامل في هذا المجال.

2. المفاهيم الأساسية التي يجب على الطالب معرفتها

لفهم الزراعة الذكية، ينبغي على الطالب أن يلمّ بمجموعة من المفاهيم الأساسية التي تشكّل الخلفية النظرية لهذا المجال. من أبرز هذه المفاهيم :الاستدامة الزراعية، التحول الرقمي في الزراعة، إنترنت الأشياء (IoT)، الزراعة الدقيقة (Precision Agriculture)، الذكاء الاصطناعي (AI)، والزراعة القائمة على البيانات.

تشير الزراعة الذكية إلى استخدام تقنيات المعلومات والاتصال (ICT) لزيادة الإنتاجية الزراعية بشكل مستدام، وتحسين كفاءة استخدام الموارد، وتعزيز القدرة على التكيف مع التغير المناخي (World Bank, 2021). ويتعين على الطالب أيضاً أن يكون على دراية بأدوار الأقمار الصناعية والطائرات دون طيار والاستشعار عن بُعد، والتي تتيح مراقبة الحقول وتحليل صحة النباتات بدقة عالية (Zhang et al., 2020).

كما يجب فهم العلاقة بين العوامل البيئية والزراعية، وطرق تحليل التربة، وإدارة المدخلات الزراعية بناءً على البيانات اللحظية، وهو ما يميز الزراعة الذكية عن الأساليب التقليدية.

3. مسارات دراسية في الزراعة الذكية

تتنوع المسارات الأكاديمية في الزراعة الذكية بين التخصصات الزراعية والهندسية والتقنية. ويمكن تصنيفها إلى ثلاثة مسارات رئيسية:

- **المسار الزراعي التقني**: يجمع بين علوم المحاصيل، وإدارة التربة، والتقنيات الزراعية.
- **المسار الهندسي**: يركز على نظم التحكم، الميكاترونيك، وتصميم الآلات الزراعية الذكية.
- **المسار الرقمي والتحليلي**: يهتم بالذكاء الاصطناعي، علم البيانات، وتطبيقات البرمجة وتحليل البيانات الزراعية.

تقدم بعض الجامعات في أوروبا وآسيا برامج متخصصة في الزراعة الذكية، مثل برامج "الزراعة الرقمية" في جامعة Wageningen الهولندية، و"الزراعة الدقيقة" في جامعة Tokyo University of Agriculture (Basso & Antle, 2020) . كما بدأت بعض الجامعات العربية، مثل جامعة الملك سعود وجامعة القاهرة، بتقديم دورات تمهيدية في الزراعة الذكية ضمن برام الهندسة الزراعية أو التقنية الحيوية.

4. المهارات المطلوبة للعاملين في مجال الزراعة الذكية

لكي يتمكّن الطالب من النجاح في مجال الزراعة الذكية، ينبغي أن يطوّر مجموعة من المهارات التقنية والعملية، أبرزها:

- القدرة على تحليل البيانات باستخدام أدوات مثلPython.
- فهم نظم الاستشعار وإنترنت الأشياء وتطبيقاتها الزراعية.
- التفكير التحليلي وحل المشكلات البيئية والزراعية المعقدة.
- القدرة على العمل ضمن فرق متعددة التخصصات (علوم، هندسة، حاسوب).
- مهارات في إدارة المشاريع والتواصل الفعال مع الجهات الفاعلة في سلسلة القيمة الزراعية.

إن اكتساب هذه المهارات يمكن الطالب من التفاعل مع الأنظمة الذكية وتطوير حلول عملية تتناسب مع السياقات الزراعية المختلفة (Wolfert et al., 2017).

التقنيات التي يجب على الطالب معرفتها

من المهم أن يتعرف الطالب على التقنيات الأساسية التي تقوم عليها الزراعة الذكية، ومن أبرزها:

- الاستشعار عن بُعد لتحليل صحة المحاصيل.
- نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لإدارة الأراضي والتخطيط الزراعي.
- الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة للتنبؤ بالإنتاجية وتشخيص الأمراض.
- الأقمار الصناعية والطائرات بدون طيار (Drones) لمراقبة النمو وتحليل الصور الجوية.
- أنظمة الري الذكي القائمة على رطوبة التربة وتنبؤات الطقس.
- منصات الزراعة الرقمية التي تتيح إدارة العمليات الزراعية عن بعد.

الإلمام بهذه التقنيات يفتح آفاقاً لفهم التطبيقات العملية ويوفر أرضية لتطوير مشاريع بحثية أو ريادية (Kamilaris et al., 2017).

5. مصادر التعلم والبحث والتدريب في الزراعة الذكية

تتوفر العديد من الموارد الرقمية التي تتيح للطالب مواصلة تعلمه في مجال الزراعة الذكية، منها:

- منصات التعليم المفتوح مثل Coursera و edX التي تقدم دورات متخصصة من جامعات عالمية.
- البرامج التدريبية التي تنظمها منظمة الأغذية والزراعة FAO عبر بوابة "e-learning Academy".

- المؤتمرات العلمية مثل International Conference on Smart Agriculture.
- المراكز الوطنية للابتكار الزراعي في بعض الدول العربية، التي تقدم تدريبات عملية للمزارعين والطلاب.
- المنتديات والمجتمعات التقنية مثل GitHub و AgFunder Network التي توفر مشاريع مفتوحة المصدر وحلول تطبيقية.

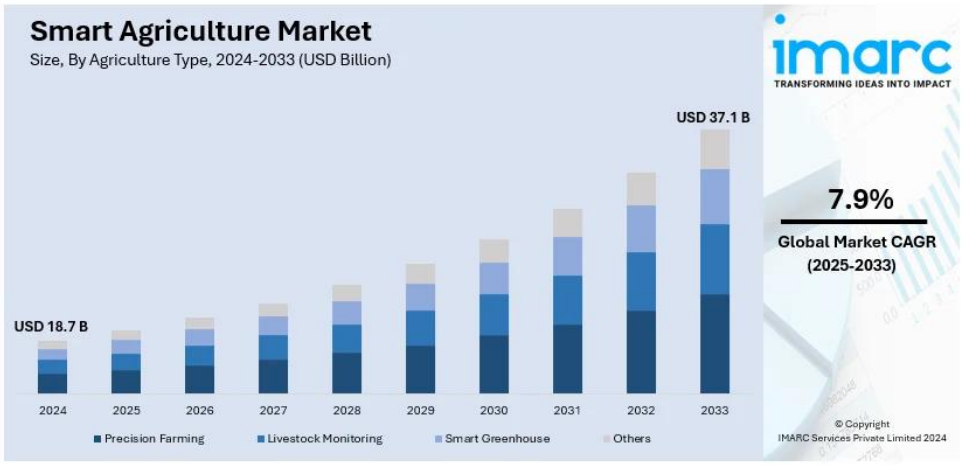
تساعد هذه المصادر على تطوير المهارات التخصصية، وتحقيق الاندماج العملي في مشروعات الزراعة الذكية، وتوسيع أفق الطالب نحو العمل الميداني والبحث التطبيقي.

6. آفاق مهنية في الزراعة الذكية

تتوسع آفاق العمل المهني في الزراعة الذكية بشكل كبير، حيث أصبحت المؤسسات الزراعية والحكومات تعتمد على تقنيات التحول الرقمي لتطوير الإنتاج الزراعي. ومن أبرز الوظائف:

- مهندس نظم زراعية ذكية.
- محلل بيانات زراعية.
- متخصص في تكنولوجيا الري الذكي.
- مطور حلول رقمية للزراعة.
- مستشار تقني للمزارع الذكية.

كما تظهر فرص ريادية في تأسيس شركات ناشئة تعمل على حلول مثل الزراعة الرأسية، إدارة المياه، أو التطبيقات المحمولة للمزارعين. وتشير التوقعات إلى أن سوق الزراعة الذكية العالمي قد يتجاوز 37 مليار دولار بحلول عام 2033 (Imarc, 2025).



نمو سوق الزراعة الذكية عالمياً (عن: Imarc, 2025)

7. الخاتمة

يمثل هذا الفصل خريطة أولية لطالب الزراعة الذكية، تساعده في توجيه مساره الأكاديمي والمهني ضمن بيئة متغيرة وسريعة النمو. إن دمج المعرفة الزراعية بالقدرات التقنية يشكّل حجر الزاوية لتأهيل أجيال جديدة قادرة على التعامل مع التحديات البيئية والإنتاجية المستقبلية. وتظل القدرة على التعلم المستمر، والانفتاح على التخصصات المتداخلة، والتفاعل مع التكنولوجيا الحديثة، من أبرز عوامل النجاح في هذا المجال الواعد.

8. المراجع

Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*, 3(4), 254–256. https://doi.org/10.1038/s41893-020-0510-0

FAO. (2022). *E-learning courses on digital agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://elearning.fao.org

Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 23–37. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037

MarketsandMarkets. (2021). *Smart Agriculture Market by Agriculture Type, Offering, Application, & Geography – Global Forecast to 2027*.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

World Bank. (2021). *Transforming Agriculture through Digital Technologies*. https://www.worldbank.org

Zhang, C., Walters, D., & Kovacs, J. M. (2020). Applications of low altitude remote sensing in agriculture upon field-based crop identification. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105584.

الفصل 5 - دليل المستثمر إلى الزراعة الذكية والفرص المستقبلية

المحتويات

1. المقدمة
2. لماذا الزراعة الذكية فرصة استثمارية؟
3. مؤشرات النمو في سوق الزراعة الذكية عالمياً
4. القطاعات والتقنيات ذات العائد الأعلى (الاستشعار، البيانات، الروبوتات، الخ)
5. تقييم المخاطر والعوائد في الاستثمار الزراعي الذكي
6. أمثلة على نماذج أعمال ناجحة في الزراعة الذكية
7. حوافز الاستثمار في الزراعة الذكية – حكومية وتمويلية
8. خارطة طريق للمستثمر المبتدئ في الزراعة الذكية
9. التحديات التنظيمية والتقنية التي يجب الانتباه لها
10. الخاتمة
11. المراجع

1. المقدمة

تعتبر الزراعة الذكية من أبرز المجالات التي تشهد نمواً استثمارياً متسارعاً عالمياً، مع بروز فرص هائلة تواكب التطورات التكنولوجية المتسارعة في مجالات مثل الاستشعار عن بُعد، تحليل البيانات الضخمة، الروبوتات، وإنترنت الأشياء. إن التحديات البيئية والاقتصادية التي تواجه القطاع الزراعي مثل التغير المناخي، نقص الموارد، وارتفاع الطلب العالمي على الغذاء، تحفز المستثمرين على النظر بعين الاعتبار إلى الزراعة الذكية كفرصة لتحقيق عوائد مالية مستدامة، مع الإسهام في تحقيق الأمن الغذائي والتنمية المستدامة (FAO, 2022 ؛Wolfert *et al*., 2017).

تشير الدراسات إلى أن سوق الزراعة الذكية يشهد معدلات نمو سنوية مركبة مرتفعة، مدفوعة بالابتكارات التكنولوجية وانتشار الحلول الرقمية التي تعزز من كفاءة الإنتاج

وتقليل الهدر (MarketsandMarkets, 2023). وفي هذا السياق، يواجه المستثمرون تحديات تتعلق بتقييم المخاطر، التأقلم مع البيئة التنظيمية، وفهم نماذج الأعمال التي تضمن استدامة المشاريع الزراعية الذكية (Basso & Antle, 2020).

يهدف هذا الفصل إلى تقديم دليل شامل للمستثمرين المهتمين بالزراعة الذكية، يشرح دوافع الاستثمار، مؤشرات السوق، أبرز القطاعات التقنية ذات العائد الأعلى، آليات تقييم المخاطر، وأمثلة عملية على نماذج أعمال ناجحة. كما يستعرض الحوافز الحكومية والتمويلية المتاحة، ويرسم خارطة طريق تساعد المستثمرين المبتدئين على الدخول بثقة إلى هذا القطاع الحيوي، مع التنويه إلى التحديات التنظيمية والتقنية التي يجب إدراكها لضمان النجاح والاستدامة.

2. لماذا الزراعة الذكية فرصة استثمارية؟

تُعد الزراعة الذكية (Smart Agriculture)، أو الزراعة الدقيقة، واحدة من أكثر القطاعات الواعدة للاستثمار في القرن الحادي والعشرين، مدفوعة بالتحديات العالمية مثل النمو السكاني، تغير المناخ، ونضوب الموارد الطبيعية. بحلول عام 2050، يُتوقع أن يصل عدد سكان العالم إلى 9.7 مليار نسمة، مما يتطلب زيادة إنتاج الغذاء بنسبة 70% مقارنة بالمستويات الحالية (FAO, 2017). في الوقت ذاته، تواجه الزراعة التقليدية قيوداً مثل تدهور التربة، ندرة المياه، والتقلبات المناخية. تقدم الزراعة الذكية حلولاً تكنولوجية مبتكرة لمواجهة هذه التحديات، مما يجعلها فرصة استثمارية استراتيجية ذات عوائد مالية وتأثير اجتماعي وبيئي كبير. فيما يلي، نستعرض الأسباب الرئيسية التي تجعل الزراعة الذكية جاذبة للمستثمرين، مع التركيز على الجوانب الاقتصادية، التكنولوجية، والبيئية.

- **الطلب المتزايد على الغذاء وفرص السوق**

النمو السكاني السريع، خاصة في الدول النامية، يزيد الضغط على سلاسل الإمداد الغذائي. وفقاً لتقرير صادر عن *McKinsey* (2023)، من المتوقع أن ينمو سوق

الأغذية العالمي إلى 10 تريليون دولار بحلول عام 2030، مدفوعاً بزيادة الطلب على المحاصيل عالية الجودة والبروتينات النباتية والحيوانية. الزراعة الذكية تلبي هذا الطلب من خلال تقنيات مثل الزراعة الرأسية، الاستشعار عن بُعد، والتحليلات البيانية، التي تعزز إنتاجية الأراضي الزراعية بنسب تصل إلى 20-30% Liakos *et al.*, (2018).

- **فرص السوق** :سوق الزراعة الذكية نفسه يشهد نمواً متسارعاً. تقدر قيمته بـ 13.8 مليار دولار في عام 2022، ومن المتوقع أن يصل إلى 25.4 مليار دولار بحلول عام 2028، بمعدل نمو سنوي مركب (CAGR) يبلغ حوالي 10.8 (*MarketsandMarkets*, 2023) %. هذا النمو يشمل تقنيات مثل إنترنت الأشياء (IoT)، الذكاء الاصطناعي (AI)، والروبوتات الزراعية، مما يوفر فرصاً استثمارية متنوعة.
- **تنويع المخاطر** :الاستثمار في الزراعة الذكية يقلل من المخاطر الزراعية التقليدية، مثل الجفاف أو انخفاض أسعار السوق، من خلال تحسين الكفاءة وتقليل الاعتماد على العوامل الخارجية غير المتوقعة.

- **التكنولوجيا كمحرك للكفاءة والربحية**

تعتمد الزراعة الذكية على تقنيات متقدمة لتحسين إدارة الموارد، مما يعزز الإنتاجية ويقلل التكاليف، وهو ما يجذب المستثمرين الباحثين عن عوائد طويلة الأجل. تشمل هذه التقنيات:

- **الاستشعار عن بُعد والتحليلات البيانية**: أجهزة الاستشعار تراقب التربة، المحاصيل، والطقس في الوقت الفعلي، مما يتيح اتخاذ قرارات دقيقة حول الري، التسميد، ومكافحة الآفات. وفقاً لـ Liakos *et al.* (2018)، يمكن لهذه التقنيات تقليل استخدام المياه بنسبة تصل إلى 40% وزيادة غلة المحاصيل بنسبة 10-15%.

- **الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي**: تستخدم خوارزميات الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بأنماط الطقس، تحسين سلاسل التوريد، وتقليل الهدر. على سبيل المثال، شركات مثل *Blue River Technology* تستخدم الذكاء الاصطناعي لتطوير روبوتات تقضي على الأعشاب الضارة بدقة، مما يقلل من استخدام المبيدات بنسبة تصل إلى 90%.
- **الزراعة الرأسية والمائية**: تتيح هذه الأنظمة إنتاج المحاصيل في بيئات خاضعة للرقابة، مثل المزارع الداخلية، مما يقلل من الاعتماد على الأراضي الزراعية ويضمن إمدادات غذائية مستقرة. تقرير *Grand View Research* (2023)يشير إلى أن سوق الزراعة الرأسية قد يصل إلى 19.9 مليار دولار بحلول عام 2028.
- **جاذبية الاستثمار**: الشركات الناشئة في مجال الزراعة الذكية، مثل *Plenty*و *Farm-ng*، تجذب تمويلاً كبيراً من صناديق رأس المال الاستثماري، حيث تلقت شركات AgTech أكثر من 51 مليار دولار في استثمارات بين 2010 و2022 (*AgFunder*, 2023). هذا يعكس ثقة المستثمرين في الإمكانات المالية لهذا القطاع.

- **الاستدامة والتوافق مع الأهداف العالمية**

تتماشى الزراعة الذكية مع أهداف التنمية المستدامة للأمم المتحدة(SDGs) ، خاصة الهدف الثاني (القضاء على الجوع) والهدف الثالث عشر (العمل المناخي). هذا التوافق يجعلها جذابة للمستثمرين الذين يركزون على الاستثمارات ذات التأثير البيئي والاجتماعي (Impact Investing).

- **تقليل الهدر**: الزراعة الذكية تقلل من هدر الموارد، حيث يُهدر حالياً حوالي 30% من الإنتاج الزراعي العالمي بسبب سوء الإدارة أو الآفات (*FAO*,

(2020. تقنيات مثل الري الدقيق ومراقبة المحاصيل تقلل من هذه الخسائر، مما يعزز الأمن الغذائي ويحسن الأرباح.

- **التكيف مع تغير المناخ**: التقلبات المناخية تهدد الزراعة التقليدية، لكن الزراعة الذكية توفر حلولاً مثل أنظمة التنبؤ بالطقس والمحاصيل المقاومة للجفاف. دراسة في *Nature Sustainability* (2022) تشير إلى أن الزراعة الذكية يمكن أن تقلل من انبعاثات الكربون الزراعية بنسبة تصل إلى 20.%
- **جذب التمويل الأخضر**: الحكومات والمؤسسات الدولية، مثل البنك الدولي، تقدم حوافز مالية للمشروعات الزراعية المستدامة. على سبيل المثال، برنامج *Climate-Smart Agriculture* التابع للبنك الدولي استثمر 2.3 مليار دولار في مشروعات ذكية بين 2016 و2022.

- **تقليل المخاطر الاقتصادية وتحسين العوائد**

الزراعة التقليدية عرضة لمخاطر مثل تقلبات الأسعار، الأمراض النباتية، والكوارث الطبيعية. الزراعة الذكية تقلل من هذه المخاطر من خلال:

- **إدارة المخاطر**: أنظمة الرصد في الوقت الفعلي، مثل طائرات الدرونز المزودة بكاميرات حرارية، تكتشف الآفات أو نقص المغذيات مبكراً، مما يقلل من الخسائر. دراسة في *Computers and Electronics in Agriculture* (2021) أظهرت أن استخدام الدرونز يقلل من خسائر المحاصيل بنسبة 15%.
- **تحسين العوائد**: الزراعة الذكية تزيد من ربحية المزارعين من خلال خفض التكاليف التشغيلية. على سبيل المثال، تقليل استخدام الأسمدة بنسبة 20% بفضل التسميد الدقيق يوفر ملايين الدولارات سنوياً للمزارع الكبيرة.

- **الاستثمار طويل الأجل**: التقنيات الذكية، مثل الروبوتات أو أنظمة الري الذكية، تتطلب استثمارات أولية ولكنها توفر عوائد مستدامة من خلال تحسين الكفاءة وتقليل الخسائر.

- **التحديات وإدارتها**

على الرغم من الفرص، تواجه الزراعة الذكية تحديات يجب مراعاتها عند الاستثمار:

- **التكاليف الأولية**: تركيب أنظمة IoT أو الزراعة الرأسية مكلف، مما قد يحد من تبنيها في الدول المنتظرة. الحلول تشمل الشراكات بين القطاعين العام والخاص أو نماذج الإيجار.
- **نقص المهارات**: يتطلب تشغيل التقنيات الذكية تدريباً، خاصة في المناطق الريفية. استثمارات التعليم والتدريب، مثل برامج *Digital Agriculture* التي تقدمها منظمات مثل *IFAD*، يمكن أن تعالج هذا النقص.
- **الخصوصية والبيانات**: جمع البيانات الزراعية يثير مخاوف عديدة. يمكن لسياسات حماية البيانات وتقنيات التشفير التخفيف من هذه المخاطر.

- **فرص استثمارية محددة**

للمستثمرين الراغبين في دخول سوق الزراعة الذكية، تشمل الفرص:

- **الشركات الناشئة في AgTech:** استثمار في شركات تطور تقنيات مثل الروبوتات أو برامج إدارة المزارع.
- **البنية التحتية الذكية**: تمويل مزارع رأسية أو أنظمة ري ذكية في مناطق ذات طلب غذائي مرتفع.
- **الصناديق المتخصصة**: صناديق استثمارية مثل *Finistere Ventures* تركز علىAgTech ، مما يوفر تنويعاً للمستثمرين.

- **الشراكات الحكومية**: الاستثمار في مشروعات مدعومة حكومياً، مثل مبادرات الزراعة الذكية في الاتحاد الأوروبي أو الشرق الأوسط.

الزراعة الذكية تمثل فرصة استثمارية استراتيجية بفضل قدرتها على تلبية الطلب المتزايد على الغذاء، تحسين كفاءة الموارد، والمساهمة في الاستدامة. من خلال التقنيات المتقدمة، مثل الاستشعار، الذكاء الاصطناعي، والزراعة الرأسية، توفر الزراعة الذكية عوائد مالية جذابة مع تقليل المخاطر المرتبطة بالزراعة التقليدية. ومع تزايد الدعم الحكومي والاهتمام العالمي بالأمن الغذائي، يُعد هذا القطاع خياراً مثالياً للمستثمرين الذين يسعون لتحقيق أرباح مستدامة وإحداث تأثير إيجابي. كما يُظهر المرجع (Liakos *et al.*, 2018)، فإن التحول نحو الزراعة الذكية ليس مجرد خيار، بل ضرورة لمواجهة تحديات القرن الحادي والعشرين.

3. مؤشرات النمو في سوق الزراعة الذكية عالمياً

يشهد سوق الزراعة الذكية نمواً متسارعاً على مستوى العالم، مدفوعاً بتزايد الحاجة لإنتاج غذاء أكثر كفاءة واستدامة في مواجهة تحديات التغير المناخي، والزيادة السكانية، ونقص الموارد الطبيعية. وتُشير التقديرات الحديثة إلى أن السوق العالمي للزراعة الذكية ينمو بمعدل نمو سنوي مركب (CAGR) يتراوح بين 12 إلى 15%، ومن المتوقع أن يتجاوز حجم سوق إنترنت الأشياء في قطاع الزراعة، على سبيل المثال، إلى أكثر من 28 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2030 (MarketsandMarkets, 2023) (انظر الفصل 17 المتعلق بإنترنت الأشياء).

- **العوامل المحفزة للنمو العالمي**

يُعزى هذا النمو إلى مجموعة من العوامل التقنية والاستراتيجية، أهمها:

- التحول العالمي نحو الزراعة الدقيقة، التي تعتمد على تحليل البيانات في اتخاذ قرارات الري، التسميد، وحماية المحاصيل.

- تطور تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) التي تسمح بجمع البيانات في الوقت الفعلي من الحقول الزراعية.
- التقدم في الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي، والذي يوفر أدوات لتوقع المحاصيل، الكشف المبكر عن الأمراض، وتحسين إدارة الموارد.
- الروبوتات الزراعية والطائرات بدون طيار التي تُمكّن من تنفيذ المهام الزراعية بكفاءة أعلى وتكاليف أقل.

- **التوسع الجغرافي – فرص في الأسواق الناشئة**

تُظهر الأسواق الناشئة، وخاصة في آسيا، وأفريقيا، ومنطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا (MENA)، معدلات نمو أسرع نسبياً مقارنة بالأسواق التقليدية مثل أوروبا وأمريكا الشمالية. ويعود ذلك إلى:

- زيادة دعم الحكومات لتقنيات الزراعة الذكية كجزء من استراتيجيات الأمن الغذائي.
- التوسع الحضري ونقص الأراضي الزراعية، مما يستدعي تحسين كفاءة الإنتاج في المساحات المحدودة.
- برامج التحول الرقمي التي تنفذها وزارات الزراعة في دول مثل الإمارات، السعودية، مصر، والهند.

ففي الإمارات على سبيل المثال، أطلقت الحكومة مبادرات مثل *"مسرعات الزراعة الذكية"*، بينما تعمل السعودية ضمن "رؤية 2030" على رقمنة القطاع الزراعي ورفع مساهمته في الناتج المحلي الإجمالي من خلال تقنيات حديثة مدعومة حكومياً (FAO, 2022).

- **ملامح الاستثمار المستقبلي**

يتجه الاستثمار العالمي في الزراعة الذكية إلى التركيز على:

- حلول سحابية متكاملة للزراعة الرقمية.
- منصات تحليل البيانات الزراعية المفتوحة.
- التقنيات منخفضة التكلفة القابلة للتطبيق في المناطق الريفية.
- برمجيات الزراعة كخدمة(Farming-as-a-Service) ، وهو نموذج جديد يتيح للمزارعين الوصول إلى تقنيات متقدمة دون الحاجة إلى تملكها.

كل هذه المؤشرات تعزز الثقة في أن الزراعة الذكية لم تعد خياراً تجريبياً، بل أصبحت مساراً استثمارياً استراتيجياً يشهد نضجاً متزايداً وتحولاً مؤسسياً على مستوى العالم.

4. القطاعات والتقنيات ذات العائد الأعلى (الاستشعار، البيانات، الروبوتات، الخ)

تشير التحليلات الحديثة إلى أن التحول الرقمي في الزراعة لا يوزع العوائد بالتساوي على جميع التقنيات، بل تتركز العوائد الأكبر في مجموعة من القطاعات التقنية عالية التأثير، والتي تجمع بين القدرة على تحسين الإنتاجية وتقليل التكاليف وتحقيق الاستدامة البيئية.

- **الاستشعار عن بُعد وإنترنت الأشياء (IoT)**

تُعد تقنيات الاستشعار من أكثر المجالات الواعدة، حيث يتم توظيف المجسات الأرضية والجوية لقياس متغيرات دقيقة مثل رطوبة التربة، درجة الحرارة، ملوحة المياه، وحالة النباتات في الوقت الفعلي. تُساهم هذه البيانات في تنفيذ استراتيجيات الزراعة الدقيقة، ما يسمح بتحسين كفاءة الري والتسميد، وتقليل الفاقد في الموارد (Wolfert *et al.*, 2017). كما يُسهم إنترنت الأشياء في ربط هذه البيانات بمنصات ذكية تقوم بالتحليل وإصدار التنبيهات، مما يدعم اتخاذ القرار الزراعي المدعوم بالبيانات.

- **تحليل البيانات والذكاء الاصطناعي**

البيانات الزراعية الكبيرة (Big Data) أصبحت بمثابة "الذهب الأخضر"، حيث تتيح خوارزميات الذكاء الاصطناعي تحليل أنماط النمو، توقع الغلات، اكتشاف الأمراض النباتية مبكراً، وتقديم توصيات دقيقة للمزارعين. تعتبر هذه التقنيات حجر الزاوية في التخطيط الزراعي الاستباقي، وتُعد من أكثر القطاعات جذباً للاستثمارات، خاصة في دول تواجه تحديات مناخية وزيادة سكانية (Kamilaris *et al.*, 2017).

- **الروبوتات الزراعية والطائرات بدون طيار (Drones)**

شهدت الزراعة الذكية نقلة نوعية مع دخول الروبوتات والطائرات بدون طيار التي تقوم بمهام متنوعة منها:

- رش المحاصيل بدقة عالية، ما يقلل من استخدام المبيدات.
- مراقبة الحقول ومسحها بشكل يومي.
- حصاد المحاصيل الحساسة مثل الفراولة أو الطماطم دون إتلاف.

هذه الآلات لا توفر الوقت والتكلفة فحسب، بل تساعد أيضاً في تجاوز نقص العمالة، وهو تحدٍ كبير في بعض المناطق الزراعية (Duckett *et al.*, 2018). يُشير تحليل العائد على الاستثمار إلى أن إدخال الروبوتات الزراعية يمكن أن يرفع كفاءة التشغيل بنسبة تتجاوز 30% في بعض السيناريوهات.

- **تكامل التقنيات لتحقيق الأثر المركب**

تكمن القوة الحقيقية لهذه القطاعات ليس فقط في أدائها المنفرد، بل في التكامل بينها، حيث يتم ربط أجهزة الاستشعار بالمنصات السحابية، ويتم تحليل البيانات باستخدام الذكاء الاصطناعي، بينما تنفذ الروبوتات والطائرات القرارات ميدانياً. هذا التكامل يُنتج أنظمة ذكية قادرة على الاستجابة التلقائية للظروف المتغيرة، مما يُضاعف من العائد الاقتصادي ويعزز الاستدامة.

5. تقييم المخاطر والعوائد في الاستثمار الزراعي الذكي

رغم أن الزراعة الذكية تمثل فرصة استراتيجية لتحديث القطاع الزراعي وزيادة كفاءته وربحيته، فإن الاستثمار في هذا المجال ينطوي على مجموعة من المخاطر التي ينبغي تقييمها بدقة. من أبرز هذه المخاطر:

- **المخاطر التقنية**: تتعلق بعدم نضج بعض التقنيات أو صعوبة تكاملها مع الأنظمة القائمة، إضافة إلى احتمال فشل المنصات الذكية، وانقطاعات الإنترنت في المناطق الريفية، ونقص الخبرات التقنية بين المستخدمين.
- **المخاطر البيئية**: على الرغم من أن الزراعة الذكية تُعزز القدرة على التكيّف، إلا أن الظروف المناخية القاسية مثل موجات الحر الشديد أو الجفاف يمكن أن تؤثر على فعالية الأدوات الذكية وتقلل من دقتها (Basso & Antle, 2020).
- **المخاطر التنظيمية والسياساتية**: مثل غياب أطر تشريعية واضحة تحكم استخدام البيانات الزراعية، أو تأخر إصدار قوانين تنظم استخدام الطائرات بدون طيار والروبوتات.

لهذا، فإن تقييم الاستثمار في الزراعة الذكية يجب أن يعتمد على تحليل شامل للعوائد المالية والاجتماعية والبيئية المتوقعة، في مقابل حجم المخاطر المحتملة. كما أن دعم السياسات الحكومية من خلال الحوافز المالية، والإعفاءات الضريبية، وبرامج الدعم الفني يُعد عاملاً حاسماً في تخفيض المخاطر وتحسين العائد الاستثماري.

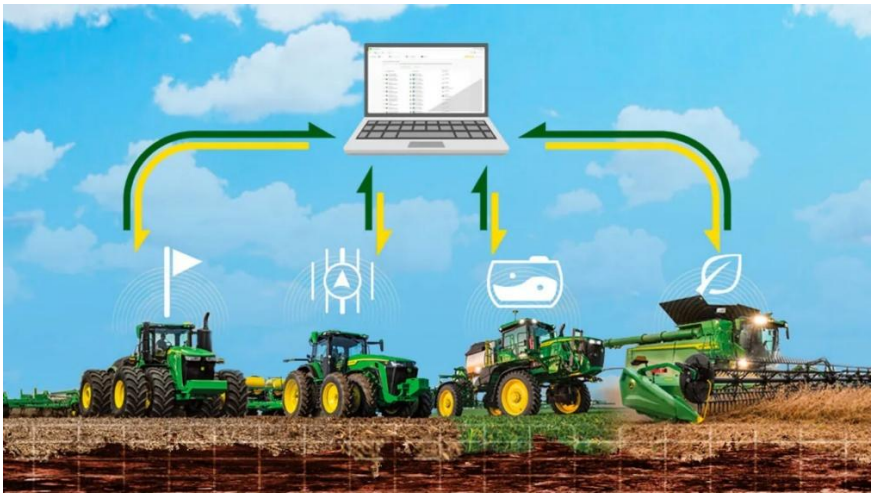
علاوة على ذلك، فإن استخدام نماذج أعمال مرنة وقابلة للتكيف مع السياقات المحلية يعزز فرص نجاح المشاريع، ويقلل من حساسية الاستثمار للتغيرات الخارجية.

6. أمثلة على نماذج أعمال ناجحة في الزراعة الذكية

أثبتت العديد من الشركات حول العالم أن الزراعة الذكية ليست فقط مستقبل الزراعة، بل هي أيضاً مجال خصب لنماذج أعمال مربحة ومستدامة، منها:

- **شركة John Deere - الولايات المتحدة**

طورت "جون دير" معدات زراعية ذكية تعتمد على تقنيات الاستشعار، أنظمة الملاحة الدقيقة، والذكاء الاصطناعي لتحسين كفاءة الزراعة. تقدم الشركة الآن خدمات تحليل بيانات المحاصيل، ونظم الزراعة التنبؤية التي تساعد المزارعين على اتخاذ قرارات محسّنة.



منتجات شركة جون دير الامريكية في مجال الزراعة الذكية (عن: Freepik)

- **شركة CropX - إسرائيل**

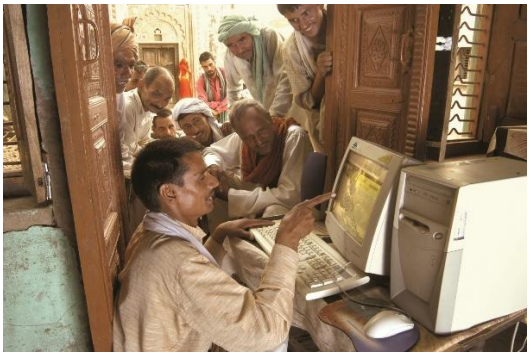
توفر حلولاً لتحليل التربة في الوقت الفعلي من خلال أجهزة استشعار متصلة بتطبيقات الهاتف الذكي. تُتيح المنصة توصيات آنية حول الري والتسميد، ما أدى إلى تقليل استهلاك المياه بنسبة تصل إلى 30% في بعض المناطق، وزيادة الإنتاجية الزراعية (Liakos *et al.*, 2018).

- **منصة بيئة الزراعية - الإمارات العربية المتحدة**

تُعد من أبرز النماذج العربية في دعم الزراعة الذكية. تقدم المنصة خدمات قائمة على البيانات مثل الرصد المناخي الدقيق، الخرائط الزراعية التفاعلية، ونصائح مخصصة للمزارعين باستخدام الذكاء الاصطناعي. وتعمل بالشراكة مع وزارة التغير المناخي والبيئة الإماراتية (FAO, 2022).

- **مشروع Choupal - الهند**

نموذج بارز لتحول رقمي مجتمعي، حيث يوفر للمزارعين في المناطق الريفية منصات إلكترونية للتواصل مع الأسواق، الحصول على معلومات الطقس والأسعار، وتعلم ممارسات الزراعة المحسنة. ساهم المشروع في زيادة دخل المزارعين وخفض التكاليف التشغيلية، مما جعله نموذجاً يحتذى في الدول النامية.



الاطلاع المباشر للمزارعين على أسعار السوق ضمن مشروع Choupal في الهند (عن: Meet ITC e-Choupal, 2025)

7. حوافز الاستثمار في الزراعة الذكية – حكومية وتمويلية

تُعتبر الحوافز الاستثمارية أحد المفاتيح الأساسية لتشجيع دخول المستثمرين إلى مجال الزراعة الذكية، لا سيما في المراحل الأولى من تبني هذه التقنيات. تقدم الحكومات في العديد من الدول برامج حوافز متنوعة تشمل:

- **الدعم المالي المباشر**: مثل المنح المخصصة لتجريب أو توطين تكنولوجيا زراعية معينة.
- **الإعفاءات والتخفيضات الضريبية**: التي تستهدف تخفيف العبء المالي عن الشركات الناشئة أو المستثمرين في البنية التحتية الرقمية الريفية.
- **القروض الميسّرة وضمانات التمويل**: التي تقلل من المخاطر وتُسهل الوصول إلى رأس المال (World Bank, 2021).

إلى جانب المبادرات المحلية، تُساهم مؤسسات التمويل الدولية مثل البنك الدولي، والصندوق الدولي للتنمية الزراعية (IFAD)، والبنك الأوروبي لإعادة الإعمار والتنمية في دعم مشاريع الزراعة الذكية ضمن رؤية أوسع لتحقيق أهداف التنمية المستدامة. هذا الدعم المتعدد الأطراف يعزز من ثقة المستثمر، ويوفر غطاءً مالياً وتقنياً يُقلل من المخاطر ويزيد من فرص نجاح المشاريع الزراعية الذكية.

8. خارطة طريق للمستثمر المبتدئ في الزراعة الذكية

بالنظر إلى الطبيعة التقنية والمعقدة للزراعة الذكية، من الضروري أن يتبع المستثمر المبتدئ خارطة طريق مدروسة تشمل المراحل التالية:

1. **فهم عميق للسوق**: دراسة الطلب المحلي والإقليمي على المنتجات الزراعية الذكية، وتحليل الاتجاهات التقنية.
2. **تقييم دقيق للفرص والمخاطر**: يشمل ذلك تحليل الجوانب المالية، التنظيمية، والتقنية، مع تحديد نقاط القوة والضعف.

3. **اختيار الشركاء التقنيين والتمويليين المناسبين**: سواء من شركات التقنية، أو الجامعات، أو المؤسسات التمويلية.
4. **البدء بمشاريع تجريبية صغيرة (Pilot Projects)**: تُمكِّن من اكتساب الخبرة، واختبار جدوى التقنيات ضمن نطاق محدود، مع قابلية التوسع لاحقاً (Basso & Antle, 2020).
5. **الاستفادة من الحاضنات الزراعية**: حيث توفر هذه الجهات المساعدة الفنية، التدريب، وربما التمويل الجزئي أو الربط مع مستثمرين آخرين.
6. **الربط بالمنصات الحكومية**: التي تقدم خدمات متكاملة تشمل بيانات السوق، أدوات التقييم، ومعلومات حول التشريعات.

يساعد هذا المسار المرحلي على بناء **مشروع استثماري مستدام** قائم على أسس علمية وعملية، بعيداً عن المخاطرة العشوائية.

9. التحديات التنظيمية والتقنية التي يجب الانتباه لها

أولاً: التحديات التنظيمية

تشكل البيئة التنظيمية عنصراً حاسماً في نجاح أو فشل مشاريع الزراعة الذكية. ومن أبرز التحديات التي قد تواجه المستثمرين:

- **قوانين حماية البيانات الزراعية**: حيث تبرز تساؤلات حول ملكية البيانات التي يتم جمعها من المزارع.
- **تنظيم استخدام الطائرات بدون طيار (Drones):** وضرورة الحصول على تراخيص صارمة في بعض الدول.
- **إجراءات الاستيراد والتصدير**: التي قد تُعيق إدخال المعدات الذكية أو تصدير المنتجات الناتجة عنها، خاصة إذا لم تُحدّث القوانين لتواكب التطورات التكنولوجية (Kamilaris *et al*., 2017).

ثانياً: التحديات التقنية

- **ضعف البنية التحتية الرقمية**: في المناطق الريفية، مما يجعل بعض التقنيات غير قابلة للتطبيق أو مكلفة جداً.
- **غياب المعايير التقنية الموحدة**: ما يؤدي إلى صعوبة دمج الأنظمة المختلفة أو نقل البيانات بين المنصات.
- **نقص الكفاءات المؤهلة**: حيث تفتقر بعض الأسواق إلى مهندسين وتقنيين متخصصين في الذكاء الاصطناعي، إنترنت الأشياء، وتحليل البيانات الزراعية.

لمواجهة هذه التحديات، يحتاج المستثمرون إلى تبني نهج تشاركي مع الجهات الحكومية والأكاديمية، والعمل على بناء قدرات محلية من خلال التدريب والشراكات.

10. الخاتمة

تشكل الزراعة الذكية قطاعاً واعداً للاستثمار مستقبلياً، يجمع بين تحقيق أرباح مالية والمساهمة في التنمية المستدامة والأمن الغذائي العالمي. يتطلب النجاح في هذا القطاع فهماً عميقاً للتقنيات، الأسواق، والتحديات المرتبطة، مع استراتيجيات استثمار مرنة مدعومة بحوافز حكومية وشراكات فعالة. بذلك يمكن للمستثمرين الاستفادة القصوى من فرص النمو وتحقيق تأثير إيجابي طويل الأمد.

11. المراجع

Amenu Leta Duguma, A. and Bai, X. (2024) How the internet of things technology improves agricultural efficiency. Artificial Intelligence Review (2025) 58-63, 1-26.

Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*, 3(4), 254–256. https://doi.org/10.1038/s41893-020-0510-0

Duckett, T., Pearson, S., Blackmore, S., & Grieve, B. (2018). Agricultural robotics: The future of robotic agriculture. *arXiv preprint arXiv:1806.06762*.

FAO. (2022). *Digital agriculture: Leveraging digital technologies for sustainable agriculture and rural development*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/3/cb9897en/cb9897en.pdf

Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 23-37. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037

Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. https://doi.org/10.3390/s18082674

MarketsandMarkets. (2023). *Smart Agriculture Market by Technology, Application, and Region – Global Forecast to 2030*.https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/smart-agriculture-market-217484229.html

Meet ITC e-Choupal. 2025. Farmer empowerment through e-Choupals. https://itcportal.com/itc-businesses/agri-business/itc-e-choupal.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

World Bank. (2021). *Agriculture and Food: Financing digital agriculture*. https://www.worldbank.org/en/topic/agriculture/brief/financing-digital-agriculture

الفصل 6 - دليل صناع القرار إلى سياسات الزراعة الذكية والتحول الرقمي

المحتويات

1. المقدمة
2. دور السياسات في تسريع تبني الزراعة الذكية
3. تجارب دول ناجحة في السياسات الزراعية الرقمية
4. أدوات تشريعية ممكنة: الحوافز، التشريعات، البيانات المفتوحة
5. البنية التحتية المطلوبة (الاتصال، المنصات، التعليم)
6. الأمن الغذائي في ضوء التحول الرقمي الزراعي
7. بناء شراكات بين القطاع العام والخاص
8. الموازنات والاستثمار الحكومي الذكي
9. تقييم الأثر السياسي والاجتماعي للزراعة الذكية
10. الخاتمة

1. المقدمة

شهد القطاع الزراعي في السنوات الأخيرة تحولاً جذرياً بفضل التطورات التكنولوجية الرقمية التي أثرت على ممارسات الإنتاج والإدارة الزراعية. أصبحت الزراعة الذكية ركيزة أساسية لتحقيق الأمن الغذائي المستدام، وتحسين كفاءة الموارد، وتعزيز القدرة على التكيف مع التغيرات المناخية. في هذا السياق، يلعب صناع القرار دوراً محورياً في وضع السياسات والاستراتيجيات التي تسرّع من تبني هذه التكنولوجيا وتسهّل الانتقال نحو أنظمة زراعية رقمية متطورة.

يهدف هذا الفصل إلى تقديم دليل عملي لصناع القرار لتطوير سياسات فعالة في مجال الزراعة الذكية والتحول الرقمي، من خلال استعراض أدوار السياسات، تجارب الدول الرائدة، الأدوات التشريعية، البنية التحتية، الشراكات، والاستثمار الحكومي الذكي. كما

سيناقش تقييم الأثر السياسي والاجتماعي لهذه السياسات، بهدف تعزيز تبني مستدام وشامل للتقنيات الزراعية الحديثة (World Bank, 2021؛FAO, 2022).

2. دور السياسات في تسريع تبني الزراعة الذكية

تلعب السياسات الحكومية دوراً محورياً في تسريع تبني الزراعة الذكية، من خلال وضع أطر تنظيمية محفزة وداعمة تضمن استيعاب التقنيات الحديثة ضمن النظم الزراعية القائمة. وتتمثل أبرز مجالات تأثير السياسات في إزالة العوائق التقنية، المالية، والاجتماعية التي تعيق دخول التكنولوجيا إلى الحقول، وتعزيز البيئة المؤسسية التي تشجع الابتكار وتدعم رواد الأعمال الزراعيين.

تقوم السياسات الناجحة بتوفير الحوافز المالية (مثل الإعانات الضريبية أو دعم المعدات الذكية)، وبناء القدرات البشرية من خلال التدريب والتعليم، إلى جانب تطوير البنية التحتية الرقمية مثل تغطية الإنترنت في المناطق الريفية، ومنصات البيانات المفتوحة التي تتيح للمزارعين اتخاذ قرارات مستنيرة .(Basso & Antle, 2020) كما تُسهم السياسات في خلق أسواق للتقنيات الزراعية الحديثة، عبر تشجيع الاستثمار في الحلول الرقمية، وتسهيل شراكات القطاعين العام والخاص، وتمكين المزارعين، ولا سيما صغار المنتجين، من الوصول إلى هذه التقنيات (Kamilaris *et al.*, 2017).

3. تجربة دول ناجحة في السياسات الزراعية الرقمية

- **هولندا** :تبنت هولندا نموذجاً ناجحاً للزراعة الذكية عبر استراتيجية وطنية تشجع الابتكار الزراعي من خلال التعاون بين الجامعات، الحكومات، والمزارعين، إضافة إلى الاستثمار في الروبوتات الزراعية، وأجهزة الاستشعار، وتحليل البيانات الضخمة. هذه السياسة ساعدت البلاد على أن تصبح من أكبر مصدري المنتجات الزراعية في العالم (Liakos *et al.*, 2018).
- **الهند** :أطلقت مبادرة Digital Agriculture Mission عام 2021، بهدف إدماج تقنيات مثل الذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء، والبلوك تشين في نظم

الإنتاج الزراعي. وتستند السياسة إلى التعاون مع شركات التكنولوجيا الكبرى، وتوفير منصات رقمية تتيح للمزارعين الوصول إلى التنبؤات المناخية، وتوصيات المحاصيل، وحلول السوق (World Bank, 2021).

- **الإمارات العربية المتحدة** :تعتبر من أبرز الدول العربية في مجال تبني الزراعة الذكية، حيث أطلقت مشاريع تعتمد على الذكاء الاصطناعي والطائرات بدون طيار لتحسين كفاءة الري وإدارة التربة. تستند هذه المبادرات إلى دعم سياسي قوي، ورؤية وطنية لتحقيق الأمن الغذائي المستدام، ما يجعلها نموذجاً عربياً يحتذى به(FAO, 2022) .

تؤكد التجارب الدولية أن السياسات ليست مجرد أدوات تنظيمية، بل هي محركات استراتيجية لتسريع وتيرة التحول الزراعي الرقمي. وعليه، فإن تبني نهج شامل ومتكامل في السياسات الزراعية، يأخذ بعين الاعتبار خصوصيات المزارعين المحليين، هو المفتاح لنجاح الزراعة الذكية وتحقيق الأمن الغذائي.

4. أدوات تشريعية ممكنة: الحوافز، التشريعات، البيانات المفتوحة

تُعد الأدوات التشريعية والتنظيمية من أهم الركائز التي يمكن أن تسهم في تسريع تبني الزراعة الذكية، إذ تتيح للحكومات توجيه وتحفيز التحول الرقمي الزراعي من خلال منظومة متكاملة تشمل:

- **الحوافز المالية والضريبية** :يمكن أن تلعب الحوافز دوراً محفزاً للاستثمار في التقنيات الذكية، لا سيما في مراحلها الأولى. يشمل ذلك الإعفاءات الضريبية، والدعم المباشر لشراء المعدات الذكية، ومنح الابتكار، وهو ما يشجع المستثمرين والمزارعين على خوض تجربة التحول الرقمي (World Bank, 2021).
- **التشريعات التنظيمية** :من الضروري وجود أطر قانونية تنظم استخدام التكنولوجيا، خاصة فيما يتعلق بحماية خصوصية البيانات الزراعية، وسلامة

استخدام الطائرات بدون طيار، والروبوتات الزراعية، والمجسات الذكية. كما ينبغي تحديد مسؤوليات الأطراف الفاعلة، وآليات المحاسبة، وسبل معالجة النزاعات المتعلقة بالملكية الفكرية للبيانات (Kamilaris *et al*., 2017).

- **السياسات الداعمة للبيانات المفتوحة** :تشكل البيانات المفتوحة عنصراً أساسياً في بناء نظم زراعية ذكية ومرنة. وتشمل هذه السياسات إتاحة قواعد البيانات الوطنية المتعلقة بالمناخ، التربة، الإنتاج، وسلاسل التوريد، بما يسهم في دعم البحث العلمي، وتمكين الشركات الناشئة، وتعزيز الشفافية والتعاون المؤسسي (Wolfert *et al*., 2017).

5. البنية التحتية المطلوبة (الاتصال، المنصات، التعليم)

يتطلب الانتقال الفعال نحو الزراعة الذكية توفير بنية تحتية رقمية متكاملة، تشمل:

- **شبكات الاتصال الريفية** :يُعد توفر الإنترنت عالي السرعة وتغطية الاتصالات في المناطق الريفية من أبرز التحديات التي تواجه إدماج التقنيات الذكية. ولذلك، من المهم الاستثمار في تطوير البنية التحتية للاتصالات لضمان شمولية الوصول إلى الخدمات الرقمية (Basso & Antle, 2020).
- **المنصات الرقمية الزراعية** :تمثل المنصات الرقمية بيئة حيوية لتجميع وتحليل البيانات المتعلقة بالمناخ، التربة، صحة المحاصيل، وأسعار السوق. كما تُتيح هذه المنصات أدوات دعم اتخاذ القرار التي تساعد المزارعين على تحسين الكفاءة الإنتاجية وتقليل المخاطر الزراعية.
- **برامج التعليم والتدريب** :من الضروري تصميم برامج تعليمية وتدريبية موجهة لفئات مختلفة من المزارعين، مع التركيز على المهارات التقنية والرقمية. كما يجب توفير خدمات الإرشاد الزراعي الرقمي والدعم الفني المستمر لتعزيز تبني التكنولوجيا بشكل فعّال ومستدام (FAO, 2022).

6. الأمن الغذائي في ضوء التحول الرقمي الزراعي

يساهم التحول الرقمي في الزراعة في تعزيز الأمن الغذائي بطرق متعددة، حيث تسمح التقنيات الحديثة، مثل إنترنت الأشياء، الذكاء الاصطناعي، والتصوير الفضائي، بجمع بيانات دقيقة عن حالة المحاصيل، التربة، والمناخ. تساعد هذه البيانات في تحسين القرارات الزراعية، ما يؤدي إلى زيادة إنتاجية المحاصيل، تقليل الفاقد الغذائي، وترشيد استخدام الموارد المائية والأسمدة .كما تسهم هذه التقنيات في تحديد المخاطر بشكل استباقي، مثل الآفات أو الجفاف، مما يعزز مرونة الأنظمة الغذائية في مواجهة التغيرات المناخية وتقلبات السوق (Basso & Antle, 2020).

علاوة على ذلك، فإن التحول الرقمي يتيح تتبع سلاسل الإمداد الزراعية بدقة، مما يعزز الشفافية، ويقلل من الهدر، ويدعم ثقة المستهلك. وتُعد هذه العناصر أساسية في تحقيق الأمن الغذائي المستدام، لا سيما في الدول النامية التي تعاني من اختناقات في سلاسل التوريد وضعف في إدارة الموارد.

7. بناء شراكات بين القطاع العام والخاص

تلعب الشراكات بين القطاعين العام والخاص دوراً حيوياً في تسريع التحول الرقمي للزراعة، من خلال دمج التمويل، التكنولوجيا، والخبرة التقنية في حزمة واحدة موجّهة نحو الابتكار الزراعي. تقوم الحكومات، عبر هذه الشراكات، بتوفير البيئة التنظيمية والدعم المالي، بينما تقدم الشركات التكنولوجية حلولاً رقمية متقدمة، وتضطلع الجامعات ومراكز البحث بدورٍ معرفيٍ في تطوير وتكييف هذه التقنيات مع السياق المحلي (Liakos *et al.*, 2018).

أحد الأمثلة الناجحة هو نموذج "الابتكار المفتوح" الذي يربط الشركات الناشئة بمراكز الأبحاث والمزارعين عبر حاضنات زراعية رقمية. لا تقتصر فوائد هذه الشراكات على خفض التكاليف وتسريع التبني فحسب، بل تفتح أيضاً آفاقاً جديدة لريادة الأعمال الزراعية وتعزيز تنافسية القطاع.

8. الموازنات والاستثمار الحكومي الذكي

يتطلب التحول الرقمي الزراعي موازنات مرنة وموجّهة، تستند إلى رؤى استراتيجية بعيدة المدى. ويُعد الاستثمار الحكومي في البنية التحتية الرقمية، مثل تغطية الإنترنت الريفي، منصات البيانات الزراعية، وأجهزة الاستشعار، من الأولويات القصوى. كما يجب أن تُخصَّص موارد لدعم برامج البحث والتطوير، وتحفيز القطاع الخاص على المشاركة في تقديم الحلول المبتكرة (World Bank, 2021).

ينبغي أن تتسم الموازنات بالمرونة، بما يسمح بإعادة توزيع الموارد وفقاً لتطور التكنولوجيا وسرعة الاستجابة للاحتياجات الزراعية المتغيرة. ويمثل تقييم الأداء المنتظم عنصراً مهماً لضمان فاعلية الاستثمار وتحقيق أهداف الاستدامة الاقتصادية والاجتماعية.

9. تقييم الأثر السياسي والاجتماعي للزراعة الذكية

يُعد تقييم الأثر السياسي والاجتماعي للزراعة الذكية خطوة ضرورية لضمان عدالة التحول الرقمي وتفادي مخاطره المحتملة. فبالرغم من الفرص الكبيرة التي تتيحها التكنولوجيا، فإنها قد تؤدي إلى تعميق الفجوة الرقمية، وحرمان بعض الفئات من فرص الاستفادة، خاصة صغار المزارعين في المناطق النائية أو غير المتصلة (Basso & Antle, 2020).

تشمل التحديات الأخرى فقدان بعض الوظائف التقليدية بسبب الأتمتة، وظهور تساؤلات حول ملكية البيانات الزراعية، والخصوصية، والتحكم في نظم الذكاء الاصطناعي. لذلك، من المهم إجراء دراسات أثر شاملة، وتبني سياسات تُراعي البعد الاجتماعي، من خلال برامج إعادة تأهيل القوى العاملة الزراعية، وضمان النفاذ العادل إلى الأدوات الرقمية، وتطبيق آليات رقابة شفافة على استخدام البيانات.

10. الخاتمة

يشكل التحول الرقمي في الزراعة فرصة استراتيجية لتعزيز الأمن الغذائي وتحقيق التنمية المستدامة، لكن نجاحه يتوقف على سياسات مدروسة تستند إلى فهم عميق للتحديات والفرص. يلزم لصناع القرار تبني أطر تشريعية وبنية تحتية قوية، مع دعم شراكات فعالة واستثمار حكومي ذكي. بالتالي، يمكن للسياسات الفعالة أن تسرّع من اعتماد الزراعة الذكية وتحقق فوائد اقتصادية واجتماعية واسعة النطاق.

11. المراجع

Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*, 3(4), 254–256. https://doi.org/10.1038/s41893-020-0510-0

FAO. (2022). *Digital agriculture: Leveraging digital technologies for sustainable agriculture and rural development*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/3/cb9897en/cb9897en.pdf

Food and Agriculture Organization (FAO). (2022). *Smart Agriculture in the UAE: Innovations and Policies*. FAO Regional Office for the Near East and North Africa. Retrieved from: https://www.fao.org

Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 23-37. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037

Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. https://doi.org/10.3390/s18082674

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

World Bank. (2021). *Digital Agriculture Profile: India*. World Bank Group. Retrieved from: https://www.worldbank.org/en/news/feature/2021/10/20/digital-agriculture-india

الفصل 7 - دليل المهندس الزراعي إلى أدوات وتقنيات الزراعة الذكية

المحتويات

1. المقدمة
2. دور المهندس الزراعي في الزراعة الذكية
3. أهم التقنيات التي يجب إتقانها
4. تفاصيل تطبيقية وأدوات محددة في الزراعة الذكية
5. التحديات التي تواجه تطبيق أدوات وتقنيات الزراعة الذكية
6. إدارة المشاريع الزراعية الذكية من الناحية التقنية
7. التكامل بين المعرفة الزراعية والبرمجيات
8. أمثلة ميدانية على تصميم مشاريع زراعة ذكية
9. التدريب المهني والتأهيل المستمر
10. تحديات المهندس الزراعي في بيئة التحول الرقمي
11. الخاتمة
12. المراجع

1. المقدمة

في خضمّ التحولات السريعة التي يشهدها العالم الزراعي، لم يعد من الممكن الاستمرار بالطرق التقليدية وحدها لمواجهة التحديات المعقدة التي تواجه القطاع الزراعي. من تغيرات مناخية حادة، وتدهور الأراضي، إلى الضغط المتزايد على الموارد الطبيعية المحدودة، يظهر أمام المهندس الزراعي واقع جديد يتطلب فهماً عميقاً لحلول متقدمة تضمن الإنتاج الكفؤ والاستدامة البيئية. وفي هذا السياق، برزت الزراعة الذكية كأحد الاتجاهات المحورية التي تعتمد على تكامل التكنولوجيا الحديثة مع الممارسات الزراعية بهدف تحسين الإنتاجية، وتقليل التكاليف، والحد من الفاقد، وتعزيز التكيف مع التغير المناخي.

إن الزراعة الذكية (Smart Agriculture أو Precision Agriculture) لم تعد مجرد خيار تقني، بل تحوّلت إلى استراتيجية شاملة قائمة على تحليل البيانات، التنبؤ، والتحكم الدقيق في المدخلات الزراعية. وتشمل هذه الاستراتيجية استخدام تقنيات مثل إنترنت الأشياء (IoT)، الذكاء الاصطناعي (AI)، نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، والطائرات بدون طيار، التي تتيح مراقبة دقيقة للحقل، وإدارة مخصصة للموارد، وتدخلات فورية قائمة على البيانات.

من هنا، تتعاظم مسؤولية المهندس الزراعي كمحور أساسي في هذه المنظومة الرقمية. فهو لم يعد مجرد منفذ للإرشادات الزراعية، بل أصبح مديراً للأنظمة الذكية، ومحللاً للبيانات، ومصمماً لحلول تقنية متكاملة تلائم الخصائص البيئية والاقتصادية والاجتماعية لكل مشروع زراعي. لذا، فإن تأهيل المهندس الزراعي ليكون على دراية بهذه الأدوات والتقنيات الحديثة، ولمساعدته في تطوير مهاراته الرقمية والتحليلية، يعد ضرورة ملحة لضمان نجاح التحول نحو الزراعة الذكية وتحقيق الأمن الغذائي المستدام (Wolfert *et al*., 2017).

2. دور المهندس الزراعي في الزراعة الذكية

يتمثل الدور المركزي للمهندس الزراعي في الزراعة الذكية في كونه حلقة الوصل بين الواقع الزراعي والقدرات التكنولوجية الحديثة. فهو المسؤول عن تحويل البيانات الخام (التي يتم جمعها من الحقول باستخدام الحساسات والطائرات بدون طيار وغيرها) إلى قرارات تنفيذية دقيقة تؤثر مباشرة في الإنتاجية ونوعية المحصول وكفاءة استخدام الموارد.

يشمل هذا الدور المهام التالية:

- تحليل البيانات الزراعية باستخدام أدوات الذكاء الاصطناعي أو برامج الإحصاء لرصد الاتجاهات وتحديد المشكلات.

- تصميم نظم الري والتسميد الذكي بناءً على احتياجات النبات الفعلية بدلاً من التقدير العام، ما يحقق كفاءة في استهلاك المياه والأسمدة.
- تشغيل وصيانة الأنظمة الذكية مثل محطات الطقس المصغّرة، الحساسات اللاسلكية، والبوابات الرقمية للمزارع.
- التخطيط الزراعي الاستراتيجي المبني على البيانات (Data-Driven Planning)، لتوقع المخاطر البيئية والتجارية.
- التواصل الفعّال مع الجهات البحثية والتجارية والتقنية لتبني الابتكارات وتكييفها محلياً.

إن المهندس الزراعي الناجح في هذا السياق هو من يمتلك *رؤية متكاملة* تجمع بين المعرفة التقنية والعلمية، والقدرة على قيادة التغيير، والتفكير التحليلي، والعمل ضمن فرق متعددة التخصصات (Basso & Antle, 2020).

3. أهم التقنيات التي يجب إتقانها

- **نظم المعلومات الجغرافية (GIS)**

تُعد نظم GIS من الأدوات الأساسية التي تساعد المهندس الزراعي في تحليل التوزيع المكاني للمحاصيل، جودة التربة، وفعالية الري. وتُستخدم هذه التقنية في إنشاء خرائط ذكية توضح الفروقات الدقيقة داخل الحقل، ما يتيح إدخال تعديلات على مستوى أجزاء صغيرة من المزرعة بدلاً من استخدام نهج موحّد.

حالة تطبيقية: في السعودية، استخدمت وزارة البيئة والمياه والزراعة تقنيات GIS لتخطيط شبكات الري في واحات النخيل بالقصيم، حيث تم تحسين كفاءة توزيع المياه بنسبة تجاوزت 30%، وتقليل الفاقد الناتج عن التسرب أو الاستخدام غير المستهدف (Al-Gaadi *et al.*, 2016a).

- **إنترنت الأشياء (IoT) والحساسات الذكية**

توفر الحساسات الذكية بيانات آنية ودقيقة عن حالة الحقول الزراعية. وتكمن قوتها في ربط المزارع بالكامل بمنصة رقمية واحدة، حيث يمكن مراقبة الرطوبة، ملوحة التربة، شدة الإضاءة، وحتى نشاط الحشرات.

مثال عملي: في الأردن، أدى استخدام شبكة من الحساسات المرتبطة عبر إنترنت الأشياء إلى خفض استهلاك المياه بنسبة 25% في مشروع زراعة الخضروات في الأغوار، وذلك من خلال التحكم التلقائي في الري استناداً إلى البيانات اللحظية عن التربة والمناخ (Kamilaris *et al*., 2017).

- **الطائرات بدون طيار (Drones)**

أصبحت الطائرات بدون طيار أداة رئيسية في جمع البيانات الطيفية والصور الجوية للمزارع بدقة عالية. وتستخدم لمراقبة صحة النبات، اكتشاف بقع الجفاف أو الإصابة المبكرة، وتقييم تطور المحاصيل.

مثال تطبيقي :في مصر، استخدمت وزارة الزراعة بالتعاون مع منظمة الأغذية والزراعة (FAO) طائرات الدرون لرصد حقول القمح في دلتا النيل، ما ساعد على التبكير في اتخاذ قرارات المكافحة والتسميد، وتحسين الإنتاج بنسبة ملموسة (FAO, 2022a, b).

- **الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات (AI & Data Analytics)**

الذكاء الاصطناعي لم يعد رفاهية بل ضرورة في الزراعة الحديثة. تساعد خوارزميات الذكاء الاصطناعي على توقع الأمراض النباتية، تحليل سلوك الحشرات، جدولة عمليات الري والحصاد، وتقديم توصيات مخصصة لكل مزرعة حسب بياناتها الفعلية.

يعتمد المهندس الزراعي على أدوات تحليل البيانات (مثل Python، R، Power BI) لتفسير كميات ضخمة من البيانات القادمة من الحقول، وتحويلها إلى رؤى

قابلة للتنفيذ. كما تستخدم تقنيات تعلم الآلة (Machine Learning) لتصميم نماذج تنبؤية تساعد على اتخاذ قرارات أكثر دقة وفعالية.

مثال تطبيقي: في تونس، استخدمت إحدى الشركات الناشئة أنظمة ذكاء اصطناعي لتحليل صور الأقمار الصناعية والبيانات الجوية لتوجيه المزارعين بشأن مواعيد الزراعة المثلى، ما أدى إلى تحسين الإنتاجية بنسبة 18%.

- **الزراعة الروبوتية (Agricultural Robotics)**

تشمل هذه التقنية استخدام روبوتات أو آلات ذاتية الحركة لتنفيذ مهام متكررة أو دقيقة مثل الزراعة، الرش، التسميد، وجني المحاصيل. وتُستخدم الروبوتات الزراعية لتقليل الاعتماد على اليد العاملة، خاصة في المناطق التي تعاني من نقص الأيدي العاملة الموسمية.

تشمل أنواع الروبوتات الزراعية:

- روبوتات للزراعة الدقيقة (seed-planting robots) .
- روبوتات للرش الذكي.
- روبوتات لجمع الفواكه أو الخضراوات دون إتلافها.

حالة دراسية: في هولندا، تم تطوير روبوتات ذكية لجني ثمار الطماطم داخل البيوت المحمية، ما ساهم في تقليل الفاقد بنسبة 20% وخفض التكاليف التشغيلية.

- **الزراعة العمودية (Vertical Farming)**

الزراعة العمودية هي نظام إنتاج نباتي يعتمد على زراعة المحاصيل في طبقات متعددة داخل بيئات مغلقة ومتحكم بها، باستخدام إضاءة صناعية (LEDs) وأنظمة تغذية دقيقة مثل الزراعة بدون تربة (Hydroponics).

تُعد هذه التقنية مهمة للمهندس الزراعي خصوصاً في المناطق الحضرية أو ذات الأراضي المحدودة، حيث يمكن تحقيق إنتاج كبير في مساحات صغيرة، مع تقليل استهلاك المياه بنسبة قد تصل إلى 90% مقارنة بالزراعة التقليدية.

مثال تطبيقي: في الإمارات، تبنت بعض المزارع التجارية نماذج زراعة عمودية لإنتاج الخس والأعشاب الورقية داخل حاويات ذكية يتم التحكم بدرجة حرارتها ورطوبتها عبر منصات رقمية.

- **منصات الإدارة الذكية للمزارع (Smart Farm Management Platforms)**

هذه المنصات الرقمية توفّر واجهة متكاملة للمهندس الزراعي لمراقبة وإدارة كل العمليات في المزرعة، من التسميد والري إلى الجدولة المالية والتسويق. وتشمل هذه الأنظمة تطبيقات الهاتف المحمول، لوحات تحكم رقمية Dashboard، وتكامل مع أجهزة IoT.

المنصات الذكية توفر:

- تنبيهات فورية للمشكلات الزراعية (مثل تغير الرطوبة أو نشاط الآفات).
- جداول صيانة المعدات.
- أدوات تتبع سلسلة التوريد من الحقل إلى السوق.

أمثلة :منصة *CropX* لتحليل بيانات التربة، ومنصة *Climate FieldView* التابعة لشركة Bayer لمراقبة المحاصيل، ومنصة *AgriTech4Arab* لتسهيل وصول المزارعين في المنطقة العربية إلى حلول تقنية مصممة خصيصاً لاحتياجاتهم.

4. تفاصيل تطبيقية وأدوات محددة في الزراعة الذكية

في قلب الزراعة الذكية تكمن أدوات وتقنيات دقيقة تمثل العمود الفقري للعمليات الزراعية المعتمدة على البيانات. يتطلب من المهندس الزراعي الإلمام بهذه الأنظمة، ليس فقط من الناحية النظرية، بل من حيث الاستخدام العملي والتطبيقي في بيئات متعددة، سواء في البيوت المحمية، أو الزراعة المفتوحة، أو حتى في الزراعة المائية والعمودية. فيما يلي عرض مفصّل لأهم هذه الأدوات والتقنيات:

- **أنظمة الاستشعار الحسية (Sensor Systems)**

تُعد الحساسات الذكية إحدى أكثر أدوات الزراعة الذكية استخداماً وانتشاراً. تقوم هذه الأجهزة الصغيرة والدقيقة بقياس عوامل بيئية حيوية مثل:

- درجة حرارة التربة والهواء.
- رطوبة التربة.
- مستويات النيتروجين والفوسفور والبوتاسيوم.
- شدة الإضاءة وسرعة الرياح.

يمكن لهذه الحساسات أن تُركّب في مواقع استراتيجية من الحقل، وأن تتصل عبر الإنترنت بمنصات إدارة رقمية تعرض قراءات حية وتُصدر تنبيهات تلقائية.

تطبيق فعلي: في دولة الإمارات، تم تركيب شبكات من الحساسات اللاسلكية في مزارع النخيل لتحديد فترات الري بدقة، مما أدى إلى تقليل استهلاك المياه بنسبة تجاوزت 30% مع الحفاظ على جودة التمور (Basso & Antle, 2020).

- **الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي (AI & Machine Learning)**

تشكل خوارزميات الذكاء الاصطناعي القوة التحليلية وراء الزراعة الذكية. تُمكن هذه الخوارزميات من معالجة كم هائل من البيانات القادمة من الحساسات، والصور الجوية، والتقارير المناخية، لتوليد تنبؤات دقيقة وتوصيات فورية.

من أبرز استخداماته:

- التنبؤ بأمراض المحاصيل من خلال تحليل الصور.
- تحديد فترات الجفاف أو زيادة الرطوبة.
- التنبؤ بتوقيت الحصاد المثالي.

- تحديد بقع الإجهاد المائي أو الغذائي داخل الحقل.

تطبيق عملي: في الولايات المتحدة، طورت شركة "Prospera" تقنيات ذكاء اصطناعي تتيح مراقبة المحاصيل بدقة عالية عبر الكاميرات الحرارية والبصرية، مما أدى إلى تحسين غلة المحاصيل بنسبة تصل إلى 20% في مزارع الخضروات (Kamilaris *et al*., 2017).

- **نظم دعم القرار (Decision Support Systems - DSS)**

توفر نظم دعم القرار منصات تحليلية متقدمة تقوم بجمع ودمج البيانات من مصادر مختلفة — تشمل الحساسات، التنبؤات المناخية، بيانات السوق — وتقديم توصيات قابلة للتنفيذ للمزارعين والمهندسين.

تشمل استخدامات DSS:

- اختيار وقت الزراعة أو الحصاد.
- تحديد أنسب وقت لرش المبيدات أو الأسمدة.
- إدارة المخاطر البيئية.
- التخطيط المالي والإنتاجي.

حالة دراسية: في المغرب، تم تطبيق نظام DSS متكامل في زراعة الحبوب ساعد في تقليل الخسائر الناتجة عن الآفات الزراعية بنسبة 15%، عبر التنبؤ المبكر بدورات حياة الآفات وتوصيات الرش الوقائي (Wolfert *et al*., 2017).

- **التطبيقات والمنصات الرقمية (Mobile Apps & Digital Platforms)**

تلعب التطبيقات الذكية دوراً محورياً في تمكين المزارعين من الوصول إلى الإرشادات، تحليلات السوق، ومعلومات التنبؤ المناخي بسهولة عبر الهاتف

المحمول. كما توفر المنصات الرقمية قنوات تواصل بين المهندس الزراعي والمزارع، وبين المزرعة والسوق.

أمثلة لخدمات هذه التطبيقات:

- مراقبة حالة التربة والمحاصيل لحظياً.
- استشارات رقمية من خبراء.
- تتبع المدخلات الزراعية والمخرجات التسويقية.
- مشاركة البيانات مع الجهات الرقابية والمصرفية.

مثال ناجح: في الهند، يُستخدم تطبيق "e-Choupal" من قبل أكثر من 4 ملايين مزارع، حيث يربطهم مباشرة بالأسواق الزراعية دون وسطاء، ويوفر معلومات فورية عن الأسعار، التوصيات الزراعية، والتغيرات المناخية (FAO, 2022a, b).

5. التحديات التي تواجه تطبيق أدوات وتقنيات الزراعة الذكية

على الرغم من الإمكانيات الكبيرة التي توفرها الزراعة الذكية، إلا أن تطبيق أدواتها يواجه مجموعة من التحديات التي قد تعيق انتشارها في البيئات الزراعية، خاصة في الدول النامية والريفية. تتنوع هذه التحديات ما بين اقتصادية، تقنية، اجتماعية، وبنية تحتية، نوجزها فيما يلي:

- **التحديات الاقتصادية**

- ارتفاع تكلفة الأجهزة مثل الحساسات والطائرات بدون طيار والروبوتات الزراعية، مما يجعل من الصعب على المزارعين الصغار الحصول عليها دون دعم حكومي أو تمويل خارجي.
- قلة الحوافز المالية التي تشجع على تبني تقنيات الزراعة الذكية، مثل الإعفاءات الضريبية أو القروض الزراعية الميسرة.

- **التحديات التقنية**

  - نقص الخبرات التقنية في تشغيل وصيانة الأجهزة الحديثة، خاصة في المناطق الريفية.
  - قلة مراكز التدريب المعنية بتأهيل المهندسين الزراعيين والمزارعين على تقنيات الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات.
  - تفاوت جاهزية البنية التحتية الرقمية مثل تغطية الإنترنت اللاسلكي، والتي تُعد أساسية لنقل البيانات وتشغيل الأنظمة الذكية في الوقت الفعلي.

- **التحديات الاجتماعية والثقافية**

  - المقاومة للتغيير، حيث قد يتردد بعض المزارعين التقليديين في استخدام أدوات تكنولوجية غير معتادين عليها.
  - ضعف الوعي الرقمي وعدم الثقة بالأنظمة المؤتمتة، خصوصاً في ما يتعلق بالتحكم الذاتي في الري أو التسميد.

- **التحديات البيئية**

  - ظروف مناخية قاسية قد تؤثر على أداء بعض الأجهزة الدقيقة، مثل الحساسات المكشوفة أو الطائرات بدون طيار في البيئات الصحراوية أو ذات الرطوبة العالية.
  - صعوبة تكييف النماذج التحليلية العالمية مع الظروف المحلية الزراعية، مما يتطلب برمجة مخصصة ومكلفة.

جدول مقارن بين أدوات وتقنيات الزراعة الذكية

الأداة / التقنية	الوظيفة الأساسية	متطلبات التشغيل	الفوائد المتوقعة
أنظمة الاستشعار الحسية	قياس متغيرات التربة والمناخ	حساسات أرضية + شبكة اتصال + مصدر طاقة	قرارات دقيقة في الري والتسميد وخفض التكاليف
الذكاء الاصطناعي	تحليل البيانات والتنبؤ بالمشاكل	بيانات ضخمة + خوارزميات متقدمة + مهارات تحليلية	رفع الكفاءة، تقليل الهدر، استجابات مبكرة
نظم دعم القرار (DSS)	تقديم توصيات قائمة على البيانات	قاعدة بيانات متكاملة + منصة تحليل + واجهة استخدام	تحسين اتخاذ القرار، تخطيط زراعي فعال
الطائرات بدون طيار	تصوير جوي ومراقبة حالة المحصول	درون مزود بكاميرا + رخصة تشغيل + محطة تحكم	اكتشاف آفات مبكر، مراقبة نمو المحاصيل بدقة
الزراعة العمودية	إنتاج نباتي في بيئات مغلقة	أنظمة إضاءة LED +تحكم مناخي + مراقبة تغذية	إنتاج عالي في مساحة صغيرة، استهلاك مائي أقل
الروبوتات الزراعية	تنفيذ مهام تلقائية مثل الزراعة أو الجني	أجهزة روبوت + برمجيات تحكم + تدريب على التشغيل	تقليل الاعتماد على العمالة، كفاءة عالية
المنصات الرقمية	إدارة عمليات المزرعة وتقديم استشارات	هاتف ذكي / حاسوب + إنترنت + تطبيق مخصص	وصول للمعلومات، ربط السوق، دعم القرارات

اعداد وتنسيق المؤلف

6. إدارة المشاريع الزراعية الذكية من الناحية التقنية

يُعد تنفيذ مشروع زراعي ذكي عملية متعددة المستويات تتطلب تنسيقاً دقيقاً بين العناصر التقنية والبشرية. فالمهندس الزراعي هو المسؤول عن ضمان الترابط بين مختلف المكونات: الأجهزة، البرمجيات، مصادر الطاقة، شبكات الاتصال، والكوادر العاملة.

يتطلب ذلك فهماً شاملاً لدورة حياة المشروع بدءاً من التصميم واختيار الأنظمة المناسبة، إلى التنفيذ والتقييم.

تشمل خطوات الإدارة التقنية:

- تحليل احتياجات المشروع من حيث الموارد المناخية، التربة، نوع المحصول، والتقنيات المناسبة.
- تخطيط النظم الذكية (مثل تحديد مواقع الحساسات، البنية التحتية للإنترنت، منصات التحكم).
- اختبار الأجهزة قبل التثبيت، والتأكد من توافقها مع البيئة المحلية.
- بناء خطة صيانة وتحديث للتقنيات المستخدمة لضمان استمرار عملها بفعالية.

بحسب Wolfert *et al.* (2017)، فإن النجاح لا يتحقق بمجرد تركيب الأدوات الذكية، بل في إدارة العلاقة الديناميكية بينها وتكييفها مع الظروف الميدانية المتغيرة.

7. التكامل بين المعرفة الزراعية والبرمجيات

في قلب الزراعة الذكية تكمن البرمجيات التي تدير البيانات، وتُصدِر التوصيات، وتنفّذ القرارات. لذا، يجب على المهندس الزراعي أن يكون على دراية بأساسيات البرمجة (مثل Python أو JavaScript) وأنظمة إدارة قواعد البيانات (مثل SQL) ليتمكن من:

- تخصيص البرمجيات لتناسب طبيعة المزرعة أو نوع المحصول.
- تحليل البيانات الخام بطريقة علمية لاستخلاص المؤشرات الهامة.
- بناء واجهات تحكم بسيطة تسهّل تفاعل المزارعين مع النظام.
- دمج نظم المعلومات (مثل GIS) مع تطبيقات الحقل الذكية.

يوضح Kamilaris *et al.* (2017) أن امتلاك المهندس لهذه المهارات يقلل من الحاجة للدعم الخارجي ويزيد من استقلالية المزارع الرقمية.

8. أمثلة ميدانية على تصميم مشاريع زراعة ذكية

تعزز الأمثلة الواقعية من فهم المهندس لكيفية تطبيق المفاهيم التقنية على أرض الواقع. من أبرز هذه المشاريع:

- **مزارع دريم فود - الإمارات**

تقع في منطقة بيئية قاسية ذات حرارة مرتفعة ومياه محدودة. تم اعتماد:

- شبكة حساسات لقياس الرطوبة ودرجة حرارة التربة.
- طائرات بدون طيار لتصوير نمو المحاصيل وتحديد مناطق الإجهاد المائي.
- منصة ذكية مركزية لإدارة الري والإنتاج.

النتائج :زيادة إنتاجية الخضروات بنسبة 25%، وتقليل استهلاك المياه بنسبة 40%، مع تقليص الفاقد بعد الحصاد (FAO, 2022 a, b).

- **مشروع الري الذكي – الأردن**

مشروع وطني بدأته الحكومة الأردنية لزيادة كفاءة استخدام الموارد المائية في الأغوار.

- دمج بيانات الحساسات الأرضية مع نظم GIS.
- توجيه المياه تلقائياً إلى المناطق الأكثر احتياجاً.
- إشراف هندسي دائم عبر بوابة رقمية تربط الحقول بالمركز الوطني للري.

النتائج: تقليل الهدر المائي بنسبة 30%، وتحسين إنتاجية الخضروات الورقية (Al-Gaadi *et al*., 2016b).

9. التدريب المهني والتأهيل المستمر

لا يمكن للمهندس الزراعي مواكبة الثورة الرقمية دون تطوير مستمر في المهارات. من أهم مجالات التدريب المطلوبة:

- إنترنت الأشياء (IoT): تركيب وتشغيل وربط الحساسات والأنظمة اللاسلكية.
- الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي: أدوات تحليل البيانات وتطبيقات التنبؤ الزراعي.
- برمجة نظم دعم القرار (DSS): تصميم حلول إرشادية مبنية على البيانات.
- الزراعة العمودية والزراعة المائية: تقنيات الإنتاج في البيئات المغلقة.

يمكن للمهندس الاستفادة من دورات تقدمها منصات تعليمية مثل:

- Coursera
- edX
- FAO e-learning
- منصات عربية مثل رواق وإدراك

ويوضح Basso & Antle (2020) أن التأهيل المستمر لا يُعد ترفاً بل شرطاً أساسياً لضمان جودة الأداء في البيئات الذكية.

10. تحديات المهندس الزراعي في بيئة التحول الرقمي

رغم الإمكانات الكبيرة التي تتيحها الزراعة الذكية، إلا أن المهندس الزراعي يواجه تحديات متداخلة تعيق استثمار هذه الأدوات بالكامل، من أبرزها:

- ضعف البنية التحتية الرقمية في بعض المناطق، ما يعرقل الربط بين الأجهزة والمنصات.

- محدودية المعرفة التقنية لدى بعض الكوادر، مما يزيد من الاعتماد على الاستشارات الخارجية.
- نقص التمويل والدعم المؤسسي لمشاريع الزراعة الذكية، وخاصة لدى المزارع الصغيرة والمتوسطة.
- صعوبة مواءمة الأنظمة الذكية مع الظروف البيئية المحلية (مثل التربة الرملية والمناخ الجاف).
- تحديات في إدارة البيانات الضخمة من حيث تخزينها، تحليلها، وضمان أمنها.

يؤكد Wolfert *et al*. (2017) على أهمية تمكين المهندس زراعياً وتقنياً وإدارياً ليكون قائداً فعالاً في عملية التحول الرقمي الزراعي.

11. الخاتمة

تُظهر الزراعة الذكية اليوم أنها ليست مجرد موجة تقنية عابرة، بل تحوّل جذري في الطريقة التي ننتج بها غذاؤنا، وندير بها مواردنا، ونتفاعل مع بيئتنا. وفي قلب هذا التحول يقف المهندس الزراعي، لا كمنفّذ فحسب، بل كمُبتكر، ومُنسق، ومُحفّز للتغيير.

لم يعد يكفي للمهندس الزراعي أن يلمّ بأساسيات التربة والنبات فقط، بل أصبح مطالباً بفهم واسع للبيانات، الأنظمة الرقمية، الذكاء الاصطناعي، والبرمجيات التحليلية، إلى جانب مهارات الإدارة والتواصل. هذا الدور الجديد يتطلب منه أن يكون جسراً حياً بين المزرعة والخوارزمية، بين الفلاح والتطبيق، بين العلم والممارسة.

كما بيّنا في هذا الفصل، فإن أدوات الزراعة الذكية — من الحساسات والطائرات بدون طيار، إلى نظم دعم القرار والمنصات الرقمية — لا تحقق أهدافها إلا إذا اندمجت بشكل فعّال مع المعرفة الزراعية التقليدية، وتم تشغيلها ضمن بيئة إدارية مدروسة. وهنا تبرز كفاءة المهندس الزراعي في دمج هذه العناصر وتحويلها إلى أنظمة إنتاجية مستدامة.

وفي عالم يواجه تحديات كبرى مثل التغير المناخي، شح المياه، وانفجار سكاني يضغط على سلاسل الغذاء، يصبح دور المهندس الزراعي أكثر محورية من أي وقت مضى. فنجاح الزراعة الذكية لا يقاس فقط بزيادة الغلة أو تقليل الهدر، بل بمدى قدرتها على تعزيز الأمن الغذائي، وحماية البيئة، وتحقيق العدالة الزراعية.

إن مستقبل الزراعة يبدأ من الآن، ومن أولئك الذين يملكون الشجاعة لتعلّم الجديد، والانفتاح على التقنيات، والعمل بروح الفريق. والمهندس الزراعي، إذا ما تم تأهيله وتزويده بالأدوات اللازمة، سيكون بحق رائد هذا المستقبل، وركيزة في بناء منظومات زراعية أكثر ذكاءً، وكفاءة، وإنسانية.

12. المراجع

Al-Gaadi, K. A., Hassaballa, A. A., Tola, E., Kayad, A. G., Madugundu, R., Alblewi, B., & Al-Zahrani, M. (2016). Application of GIS in agriculture in Saudi Arabia. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 23(4), 435–441

Al-Gaadi, K. A., Hassaballa, A. A., Tola, E., Kayad, A. G., Madugundu, R., Alblewi, B., & Al-Zahrani, M. (2016b). Assessment of the spatial variability of soil properties in a date palm plantation utilizing geo-statistical techniques. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 23(4), 524–536. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.05.007

Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*, 3(4), 254-256.

FAO. (2022a). *Digital agriculture: Case studies and lessons from the Near East and North Africa region*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2022b). Smart Agriculture in the Middle East and North Africa: Technologies and Best Practices. Food and Agriculture Organization.

Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 23–37.

Liakos, K. G., et al. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674.

Wolfert, S., et al. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69-80.

المحور الثاني - الزراعة الذكية والتغير المناخي

الفصل 8 - الزراعة الذكية في مواجهة التغير المناخي

المحتويات

1. المقدمة
2. التغير المناخي وتأثيره على الزراعة
3. تقنيات الزراعة الذكية في التخفيف من التغير المناخي
4. استراتيجيات التكيف الزراعي الذكي مع التغير المناخي
5. أمثلة على مشاريع زراعة ذكية لمواجهة التغير المناخي
6. السياسات الداعمة للزراعة الذكية في ظل التغير المناخي
7. التحديات والفرص المستقبلية
8. دراسات حالة
9. الخاتمة
10. المراجع

1. المقدمة

تُعد الزراعة من أكثر القطاعات الاقتصادية والحيوية تأثراً بالتغيرات المناخية، نظراً لاعتمادها المباشر على العوامل البيئية والمناخية مثل درجة الحرارة، الأمطار، الرطوبة، وأنماط الرياح. ومع ارتفاع معدلات درجات الحرارة العالمية، وتزايد تكرار الظواهر المناخية المتطرفة مثل الفيضانات وموجات الجفاف والحرائق، أصبح الأمن الغذائي مهدداً بشكل متزايد (IPCC, 2022).

في هذا السياق، لم تعد الحلول التقليدية كافية لمواجهة هذه التحديات، مما استدعى ظهور "الزراعة الذكية مناخياً" كنهج تكاملي يجمع بين الابتكار التكنولوجي والتخطيط الزراعي المستدام. تهدف الزراعة الذكية إلى تحسين كفاءة إدارة الموارد الطبيعية (مثل الماء والتربة والطاقة) من خلال استخدام تقنيات متقدمة مثل الاستشعار عن بُعد، الذكاء الاصطناعي، التحليل التنبئي، والزراعة الدقيقة.

ولا تقتصر أهمية الزراعة الذكية على الجانب التقني فحسب، بل تمتد إلى الجانب السياسي والمؤسسي، حيث تتطلب صياغة سياسات داعمة، وتمويلات مخصصة، وتدريب الكوادر الزراعية على استخدام التكنولوجيا بشكل فعّال. ولذلك، فإن هذا الفصل يسعى إلى استعراض شامل لدور الزراعة الذكية في التخفيف من آثار التغير المناخي والتكيف معها، من خلال عرض أبرز التقنيات المستخدمة، وتوضيح انعكاساتها على إنتاجية المحاصيل واستدامة النظم الزراعية، بالإضافة إلى تقديم دراسات حالة واقعية، واستعراض المبادرات والسياسات الإقليمية والعالمية ذات الصلة.

المخاطر الناجمة عن زيادة الاحتباس الحراري العالمي (عن: BBC-News).

2. التغير المناخي وتأثيره على الزراعة

أشارت تقارير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC, 2022) إلى أن الزراعة تواجه تحديات متزايدة في ظل تسارع التغيرات المناخية، والتي تتمثل في ارتفاع درجات الحرارة العالمية بما يتجاوز المعدلات التاريخية، وتغير أنماط الهطول، وتزايد تواتر وشدة الأحداث المناخية المتطرفة. وتُترجم هذه التغيرات على أرض الواقع بتأثيرات ملموسة، منها تراجع إنتاجية المحاصيل الزراعية الاستراتيجية مثل القمح، الذرة، والأرز، بالإضافة إلى تقليص المساحات القابلة للزراعة.

في الدول العربية، التي تُعد من أكثر المناطق هشاشة مناخياً بسبب ندرة المياه وارتفاع درجات الحرارة، أدت موجات الحر الشديدة والجفاف المتكرر إلى تدهور الإنتاج الزراعي وارتفاع معدلات فقدان التربة، ناهيك عن انخفاض جودة المحاصيل (World Bank, 2020). وقد أظهرت بعض الدراسات أن فترات الجفاف في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا قد تضاعفت في العقود الأخيرة، ما أدى إلى تقليص مواسم الزراعة، وزيادة الضغط على الموارد المائية.

علاوة على ذلك، يتسبب التغير المناخي في تغير توزيع وانتشار الآفات والأمراض النباتية، حيث أن ارتفاع درجات الحرارة والرطوبة النسبية يوفر بيئات مواتية لتكاثر وانتشار أنواع جديدة من الحشرات والأمراض التي لم تكن تمثل تهديداً سابقاً (FAO, 2019). وهذا بدوره يفرض تحديات إضافية على المزارعين، ويزيد من الاعتماد على المبيدات الكيميائية، مما قد يؤدي إلى آثار بيئية وصحية سلبية إن لم تُدار بشكل علمي ومدروس.

إن هذه التحولات تستدعي تكيّفاً سريعاً واستباقياً في أنظمة الزراعة، من خلال إدخال حلول تكنولوجية وتدابير تخطيطية قادرة على الحد من آثار التغير المناخي، وتحويل التحديات إلى فرص للابتكار الزراعي المستدام.

3. تقنيات الزراعة الذكية في التخفيف من التغير المناخي

في ظل التغيرات المناخية المتسارعة، لم يعد من الممكن الاعتماد على الأساليب الزراعية التقليدية وحدها لمواجهة التحديات البيئية. وهنا تبرز الزراعة الذكية كتوجه استراتيجي يقوم على دمج التقنيات الحديثة في منظومة الزراعة من أجل خفض البصمة الكربونية وتحقيق الكفاءة في إدارة الموارد.

تُعد **تقنيات الاستشعار عن بعد والحساسات البيئية** من أولى أدوات المراقبة الذكية، حيث توفر بيانات آنية ودقيقة عن حالة التربة، نسبة الرطوبة، درجات الحرارة، وحالة المحاصيل. هذه البيانات تتيح إدارة متكيفة في الوقت الحقيقي، مما يُحسن من فعالية عمليات الري والتسميد، ويقلل من الفاقد، وبالتالي يقلص الانبعاثات الناتجة عن الإفراط في استخدام المدخلات الزراعية (Kamilaris *et al.*, 2017).

أما **نظم الري الذكية**، فقد أصبحت ضرورية في المناطق الجافة وشبه الجافة، حيث يُعتمد على الري بالتنقيط المرتبط بالحساسات البيئية والبرمجيات الذكية التي تعمل وفق أنماط الطقس والتربة. هذا النهج يساعد على استخدام المياه بشكل مدروس، ويقلل من التبخر والتسرب، مما يخفض استنزاف الموارد المائية ويعزز الاستدامة (Basso & Antle, 2020). من مزايا الري بالتنقيط:

- مراقبة الري: يكتسب مديرو الحقول وأصحاب المزارع رؤية شاملة لحقولهم من خلال بيانات محدثة.
- توفير الكهرباء: تؤدي ممارسات الري الفعّالة إلى خفض استهلاك الكهرباء.
- الرؤى: معلومات مفصلة عن الظروف تحت الأرض، مما يساعد على تحسين استراتيجيات الري.
- تدقيقات الري الشاملة: تقييم وإدارة عمليات الري بكفاءة على طول خط الري بأكمله.

- بيانات ري الأمطار الدقيقة: الوصول إلى معلومات الري المقاسة بالمليمتر من خلال بيانات هطول الأمطار.
- بيانات الحمولة من مقياس التدفق بالموجات فوق الصوتية: قياس دقيق لاستخدام المياه من خلال هذه التقنية.
- تقليل الأخطاء: تقليل أخطاء الموظفين من خلال عمليات الري الآلية القائمة على البيانات.
- تحسين المدخلات: تحسين تخصيص الموارد، وتقليل الهدر، وتعزيز الكفاءة العامة.
- الحفاظ على الموارد: منع هدر المياه القيّمة وغيرها من الموارد مثل الأسمدة والعمالة.
- الاستدامة الزراعية: تعزيز ممارسات الزراعة المستدامة، وضمان الاستمرارية البيئية والاقتصادية على المدى الطويل.

في المقابل، تعتمد **الزراعة الدقيقة** (Precision Agriculture) على تحليل البيانات الكبيرة باستخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، والمراقبة عن طريق الأقمار الصناعية والطائرات المسيّرة، مما يمكّن من توجيه عمليات الزراعة بدقة عالية، وتقليل الكميات المستخدمة من الأسمدة والمبيدات، وبالتالي تقليص الانبعاثات الغازية الناتجة عنها (Wolfert *et al.*, 2017).

ومع تقدم **الذكاء الاصطناعي**، أصبح بالإمكان تطوير نماذج تنبؤية دقيقة تتعامل مع متغيرات الطقس والتربة ونمو النبات، مما يساعد في وضع خطط زراعية مرنة تتكيف مع الظروف المناخية المتغيرة. هذه التنبؤات تعزز قدرة المزارعين على اتخاذ قرارات مدروسة، وتُقلل من الخسائر الناتجة عن الكوارث المناخية(Liakos *et al*., 2018) .

كما تُستخدم **الطائرات بدون طيار** (Drones) كوسيلة فعالة في رصد صحة النباتات، وتحديد المناطق المتضررة أو المصابة، مما يُتيح التدخل العلاجي الموضعي دون

الحاجة إلى المعالجة الشاملة، ما يقلل الأثر البيئي السلبي ويسهم في تحسين كفاءة العمليات الزراعية (Kamilaris *et al*., 2017).

ولا يمكن إغفال دور الزراعة الرأسية والبيوت المحمية الذكية، التي تمثل أنظمة مغلقة ومستدامة تعتمد على مصادر الطاقة المتجددة، وتستهلك كميات أقل من المياه، مع إمكانية إنتاج المحاصيل على مدار العام. هذه الأنظمة تُعد نموذجاً فعّالاً في خفض الاعتماد على الزراعة التقليدية المعرّضة لتقلبات المناخ (Basso & Antle, 2020).

من خلال كل ما سبق، يتّضح أن الزراعة الذكية لا تقتصر على تحسين الإنتاجية فحسب، بل تمثل أداة فعّالة للتخفيف من آثار التغير المناخي، من خلال تقليل الانبعاثات، وحماية الموارد، ودعم القدرة التكيفية للمزارعين في البيئات الهشة (IPCC, 2022; FAO, 2019; World Bank, 2020).

4. استراتيجيات التكيف الزراعي الذكي مع التغير المناخي

تُعد استراتيجيات التكيف الزراعي الذكي أدوات محورية للتقليل من الأثر السلبي للتغير المناخي وتعزيز مرونة النظم الزراعية، خصوصاً في المناطق المعرضة للجفاف وندرة الموارد. وتقوم هذه الاستراتيجيات على مزيج من التحسين الوراثي، والإدارة الذكية للموارد، والتنوع البيولوجي، وبناء القدرات البشرية.

أحد أهم محاور التكيف يتمثل في اختيار أصناف المحاصيل المقاومة للجفاف والملوحة، وهو ما يتم من خلال تقنيات التحليل الجيني، التهجين، والهندسة الوراثية. هذه المقاربات تسهم في إنتاج أصناف ذات احتياجات مائية منخفضة وقدرة عالية على التحمل، مما يضمن استمرارية الإنتاج حتى في البيئات القاسية (FAO, 2020). كما تساعد الأدوات الجينية الحديثة في تقييم تحمل المحاصيل للحرارة والملوحة، ما يفتح المجال أمام تطوير حلول زراعية خاصة بكل منطقة.

أما في ما يخص تحسين إدارة التربة، فتُعد تقنيات الزراعة الحافظة مثل تقليل حرث التربة، والتغطية العضوية، والزراعة بالتسميد المباشر، من الوسائل الفعالة في الحفاظ

على رطوبة التربة وزيادة خصوبتها. كما يُسهم التسميد الذكي المعتمد على تحليل احتياجات التربة والمحاصيل في تقليل استخدام الأسمدة الكيميائية وخفض انبعاثات غاز أكسيد النيتروز (IPCC, 2022).

من جهة أخرى، يُعد تنويع الأنظمة الزراعية أحد أهم ركائز التكيف المستدام، حيث يمكن دمج الزراعة مع تربية الأسماك (الزراعة المائية Aquaponics) أو مع الثروة الحيوانية، مما يوفر مصدراً إضافياً للدخل ويُقلل من مخاطر فقدان الإنتاج بسبب تقلبات المناخ (World Bank, 2020). كذلك، تساهم هذه الأنظمة المختلطة في تعزيز الدورة البيئية للمزرعة وتقليل الفاقد.

ملصقات مصدر المخاطر الزراعية (عن: www.labelsource.co.uk)

وأخيراً، يمثل التعليم والتدريب المستمر للمزارعين عنصراً جوهرياً في نشر مفاهيم الزراعة الذكية. فتوفير المعرفة حول كيفية استخدام التكنولوجيا، قراءة البيانات المناخية، تطبيق ممارسات الزراعة المستدامة، واعداد ملصقات

مصدرالمخاطرالزراعية يرفع من قدرة المجتمعات الزراعية على التكيف والتأقلم (FAO, 2019). وقد أكدت الدراسات أن رفع كفاءة العنصر البشري قد يكون أحياناً أكثر تأثيراً من تطوير البنية التحتية نفسها.

5. أمثلة على مشاريع زراعة ذكية لمواجهة التغير المناخي

يتزايد اعتماد الدول على مشاريع زراعة ذكية موجهة خصيصاً لمواجهة تحديات المناخ، وتُشكل هذه المبادرات نماذج عملية قابلة للتطبيق والتكييف في مناطق مختلفة:

- **في مصر**، أطلقت وزارة الزراعة مشروعاً تجريبياً في مناطق الواحات، يعتمد على نظام ري ذكي باستخدام الحساسات البيئية المرتبطة بشبكات اتصالات لاسلكية. الهدف من المشروع كان تقليل فاقد المياه في زراعة النخيل، ونجح في خفض الاستهلاك بنسبة وصلت إلى 35%، مع تحسين جودة التمور وتقليل التكاليف التشغيلية (FAO, 2022). وقد أصبح هذا النموذج أساساً لتوسيع نطاق تطبيق الزراعة الذكية في المناطق الصحراوية الأخرى.
- **في المغرب**، تبنّت الحكومة تقنيات الزراعة الدقيقة في سلاسل إنتاج الحبوب، حيث تم دمج التنبؤات المناخية مع نماذج إدارة التربة، مما أدى إلى تحسين توقيت الزراعة وتقليل الخسائر الناتجة عن موجات الجفاف. وقد ساعد ذلك في رفع معدلات الإنتاج في بعض المناطق بنسبة 20% رغم الظروف المناخية الصعبة (World Bank, 2020).
- **في دولة الإمارات العربية المتحدة**، واجهت الحكومة تحديات المناخ القاسي من خلال الاستثمار في الزراعة الرأسية المدعومة بالتحكم الرقمي في درجات الحرارة، الرطوبة، والإضاءة. هذه المشاريع لا تستهلك سوى 10% من المياه المستخدمة في الزراعة التقليدية، وتوفر منتجات زراعية عالية الجودة طوال العام، مما يقلل من الاعتماد على الاستيراد (Basso & Antle, 2020). كما تُستخدم الطاقة الشمسية لتشغيل هذه البيوت الذكية، ما يجعلها مستدامة من الناحية البيئية.

6. السياسات الداعمة للزراعة الذكية في ظل التغير المناخي

لا يمكن تحقيق نقلة نوعية في استخدام الزراعة الذكية كأداة لمواجهة التغير المناخي دون وجود إطار سياسي وتنظيمي متكامل. فالتحول إلى أنظمة زراعية ذكية ومستدامة يتطلب بيئة داعمة تشمل التشريعات، الحوافز، البنية التحتية، والشراكات المتعددة الأطراف.

أولاً، ينبغي على الحكومات تشجيع الاستثمار في التقنيات الزراعية الحديثة من خلال تقديم حوافز مالية وتسهيلات ضريبية للمزارعين والمستثمرين الذين يتبنون حلولاً ذكية، مثل الري الدقيق، الزراعة الرأسية، وتكنولوجيا الاستشعار (IPCC, 2022). كما أن الشراكة بين القطاعين العام والخاص (PPP) تمثل آلية فعالة لتسريع تبني هذه التقنيات في البيئات الريفية.

ثانياً، من المهم تطوير برامج دعم فني وتدريبية للمزارعين، بحيث تُمكنهم من اكتساب المهارات اللازمة لاستخدام التكنولوجيا بفعالية. ويشمل ذلك دعم المراكز الإرشادية الزراعية، وإدماج التكنولوجيا في المناهج التعليمية الزراعية، وإنشاء منصات تدريب رقمي للمزارعين (FAO, 2019). فالتكنولوجيا لا تحقق أهدافها إلا إذا وُجد من يعرف كيف يوظفها.

ثالثاً، تقتضي الاستجابة الذكية للتغير المناخي تبني سياسات بيئية وتشريعية واضحة، تشمل تشريعات للحد من الانبعاثات الزراعية، وتشجيع الممارسات المستدامة مثل التسميد العضوي، والتقليل من هدر المياه والطاقة، وتبني معايير الجودة البيئية في الزراعة (World Bank, 2020).

وأخيراً، تُعد منصات البيانات المفتوحة من الركائز الأساسية في دعم اتخاذ القرار الزراعي الذكي. إذ أن مشاركة بيانات المناخ، التربة، الإنتاج، والأسعار عبر منصات رقمية تُمكّن المزارعين والباحثين من تحليل الاتجاهات، وتوقع المخاطر، وتصميم

حلول مرنة (Wolfert *et al*., 2017). ومن شأن ذلك أن يُسرّع من تطوير نظم إنذار مبكر ويساعد على التنبؤ بالكوارث البيئية.

7. التحديات والفرص المستقبلية

رغم الإمكانات الواعدة للزراعة الذكية في التكيف مع التغير المناخي، إلا أنها لا تخلو من تحديات هيكلية وتقنية واجتماعية لا بد من مواجهتها لضمان نجاح الانتقال نحو أنظمة زراعية رقمية ومستدامة.

من أبرز التحديات هو ضعف البنية التحتية الرقمية، خاصة في المناطق الريفية التي تفتقر إلى شبكات الإنترنت عالية السرعة، والطاقة المستقرة، وهو ما يُعيق تشغيل أنظمة الزراعة الذكية بكفاءة (Kamilaris *et al*., 2017). كما أن نقص التمويل، وارتفاع تكلفة التقنيات الحديثة، يجعل من الصعب على صغار المزارعين تبني هذه الحلول دون دعم مالي ومؤسسي مباشر.

يُضاف إلى ذلك انخفاض مستوى الوعي التقني لدى الكثير من المزارعين، وضعف المهارات الرقمية، مما يعزز الفجوة بين ما هو متاح من تقنيات وما هو مستخدم فعلياً على الأرض. ويؤدي هذا التفاوت إلى تأخر اعتماد التكنولوجيا في بعض المناطق رغم حاجتها الماسة إليها.

وفي المقابل، هناك فرص مستقبلية واعدة، خصوصاً في ظل التقدم المتسارع في مجال الذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء، والطائرات بدون طيار، والزراعة العمودية. هذه الحلول لا تتيح فقط مواجهة تحديات المناخ، بل تفتح آفاقاً جديدة لتحسين جودة الغذاء، تقليل استهلاك الموارد، وتعزيز الأمن الغذائي بشكل عام (FAO, 2022).

كما أن زيادة الوعي العالمي بقضايا المناخ، والتوجه نحو الاقتصاد الأخضر، قد يدفع بمزيد من التمويلات الدولية لدعم مشاريع الزراعة الذكية، خصوصاً في الدول النامية. ومن شأن ذلك أن يُحوّل التحديات الحالية إلى فرص للنمو المستدام، ويوفر فرص عمل جديدة في مجالات التقنية الزراعية.

8. دراسات حالة

تُعد دراسات الحالة أداة فعالة لفهم كيفية تطبيق الزراعة الذكية في البيئات الواقعية، وما يمكن أن تحققه من نتائج ملموسة على صعيد الإنتاجية، الكفاءة، والاستدامة. وفيما يلي عرض موسّع لحالتين من دول عربية:

دراسة حالة 1: مشروع الري الذكي في الأردن

في إطار التحديات الكبيرة التي تواجهها الأردن فيما يتعلق بندرة المياه، تم تنفيذ مشروع ري ذكي بالتعاون مع البنك الدولي ووزارة الزراعة في وادي الأردن. تضمن المشروع تركيب حساسات بيئية عالية الدقة في التربة لقياس مستوى الرطوبة في أعماق مختلفة، وربطها بنظام تحكم آلي يعمل وفق البيانات المناخية الفعلية، ما أدى إلى جدولة الري بدقة بناءً على الحاجة الفعلية للنبات.

وقد نتج عن هذا النظام تقليل استهلاك المياه بنسبة تقارب 30%، وهو ما يعد إنجازاً مهماً في منطقة تُعد من أفقر مناطق العالم مائياً (World Bank, 2020). كما ساهم المشروع في تحسين إنتاجية محاصيل الخضار بنسبة 18% في بعض المزارع، مع خفض التكاليف التشغيلية المرتبطة بالطاقة والعمالة. وتجدر الإشارة إلى أن التدريب المستمر للمزارعين كان عاملاً حاسماً في نجاح المشروع.

دراسة حالة 2: الزراعة الدقيقة في المغرب

في المغرب، وتحديداً في منطقة سوس، تم تطبيق نظام الزراعة الدقيقة (Precision Agriculture) ضمن برنامج وطني للتكيف الزراعي مع التغير المناخي. اعتمد النظام على استخدام الطائرات بدون طيار (Drones)، وتقنيات الاستشعار عن بعد، ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) لمراقبة صحة المحاصيل، محتوى التربة، ومعدلات امتصاص المياه.

مكّنت هذه التقنيات من تحديد مناطق الإجهاد الزراعي مبكراً، وتركيز الري والتسميد في المناطق التي تحتاج إليها فقط، مما أدى إلى تحسين استخدام الأسمدة بنسبة 25%، وخفض التكاليف التشغيلية بنسبة 20%، مع تحقيق زيادة ملحوظة في الإنتاج الكلي بنسبة تجاوزت 15% (FAO, 2019). وقد أشاد المزارعون المشاركون بسهولة الاستخدام بعد التدريب، وبتأثير المشروع في تقليل الاعتماد على الموارد المكلفة.

دراسة حالة 3: العراق – مشاريع الزراعة الذكية وتعزيز المرونة المناخية

في ظل التحديات المناخية الحادة التي يواجهها العراق مثل الجفاف، التصحر، وتملّح التربة، بدأت الدولة في تطبيق عدة مشاريع ومبادرات ترتكز على تقنيات الزراعة الذكية لتعزيز الأمن الغذائي ومرونة المجتمعات الريفية.

أ. مشروع تعزيز مرونة الزراعة المناخية في العراق (SRVALI)

أُطلق هذا المشروع في عام 2024 بتمويل من صندوق المناخ الأخضر (GCF) بقيمة 39 مليون دولار، بالتعاون مع وزارة البيئة وبرنامج الأمم المتحدة الإنمائي (UNDP). يهدف المشروع إلى دعم المزارعين في محافظات النجف، كربلاء، وميسان من خلال استخدام تقنيات ري ذكية تعمل بالطاقة الشمسية، وتحسين إدارة المياه، وبناء القدرات المجتمعية (UNDP, 2024a). يعتمد المشروع على تقنيات جمع بيانات التربة والرطوبة ونظم الإنذار المبكر لتقليل خسائر المحاصيل وزيادة كفاءة استخدام الموارد.

ب. مشروع منظمة الفاو (FAO) في جنوب العراق

أطلقت **منظمة الأغذية والزراعة (FAO)** بالشراكة مع وكالة التعاون السويدية (SIDA) مشروعاً في محافظات الجنوب لتعزيز القدرة على التكيف مع المناخ لدى صغار المزارعين، مع تركيز خاص على تمكين المرأة الريفية. تضمن المشروع إدخال نظم ري تعمل بالطاقة الشمسية، وتحسين ممارسات الزراعة الذكية، مع تقديم تدريبات تقنية وزراعية (FAO Iraq, 2022) . ساعد المشروع في تحسين كفاءة استخدام المياه بنسبة ملحوظة، إلى جانب تحسين جودة الإنتاج الزراعي.

ج. مبادرة الهلال الأحمر العراقي

في عام 2024، أطلق الهلال الأحمر العراقي مبادرة لزراعة الأعلاف المقاومة للجفاف مثل نبات السودانيّة (*Sorghum sudanense*) في محافظات ذي قار، بابل، وديالى، باستخدام نظم رش ذكية. ساعد هذا النظام على تقليل استهلاك المياه بنسبة 40% مقارنة بالطريقة التقليدية، كما تم ربط أنظمة الري بجداول مناخية لتحديد توقيت وكميات المياه المطلوبة (Iraqi Red Crescent Society, 2024).

د. النماذج البحثية المحلية – جامعة ديالى

نشرت جامعة ديالى دراسة في 2024 طبّقت فيها نموذجاً لنظام زراعة ذكي يستخدم حساسات لرصد الرطوبة ودرجة حرارة التربة، إلى جانب وحدة تحكم Arduino لجدولة الري تلقائياً. وخلصت الدراسة إلى أن هذا النظام ساعد في تقليل استخدام المياه بنسبة 60%، إلى جانب الحفاظ على نسب متوازنة من عناصر NPK في التربة (Al-Tuwaijari & Abbas, 2024).

تحليل مبسط

المشروع	الإنجازات	الفائدة المناخية
SRVALI	ري بالطاقة الشمسية، تدريب مجتمعات، أنظمة ذكية	كفاءة مائية، مرونة مجتمعية
FAO–SIDA	إدارة مياه ذكية، تمكين النساء	تحسين الإنتاج + استدامة اقتصادية
الهلال الأحمر	محاصيل مقاومة، نظام برش ذكي	توفير مياه وتعزّز التغذية للماشية
أكاديميIoT	توفير 60% مياه، الحفاظ على التربة	نموذج محلي لما يمكن تعميمه

اعداد وتنسيق المؤلفين

هذه الأمثلة تظهر الإلتزام العراقي الجدي بدمج الزراعة الذكية في سياسات الزراعة المناخية، من خلال مشاريع مشتركة مع المنظمات الدولية، مبادرات إنسانية، وجهود بحثية أكاديمية.

9. الخاتمة

تُظهر الأدلة المتراكمة من الأبحاث والمشاريع التطبيقية أن الزراعة الذكية تُعد خياراً استراتيجياً لا غنى عنه لمواجهة التأثيرات المتسارعة للتغير المناخي. فمن خلال توظيف تقنيات مثل الحساسات البيئية، الذكاء الاصطناعي، الزراعة الدقيقة، والطائرات بدون طيار، أصبح بالإمكان إدارة الموارد الزراعية بكفاءة أعلى، وتقليل الفاقد، وتحقيق إنتاج أكثر استقراراً في ظل الظروف المناخية المتغيرة.

لكن هذا التحول لا يمكن أن يتم بمعزل عن بيئة تمكينية داعمة، تشمل سياسات تحفيزية، استثمارات مستدامة، وبنية تحتية رقمية متقدمة .كما أن رفع كفاءة المزارعين وتدريبهم على التقنيات الجديدة يمثل ركيزة أساسية لنجاح الزراعة الذكية، إذ إن التكنولوجيا دون معرفة بشرية تظل محدودة التأثير.

ورغم التحديات، فإن الفرص المستقبلية واعدة، خاصة مع تسارع الابتكار في مجالات الزراعة العمودية، الزراعة المغلقة، وإنتاج الغذاء في البيئات القاسية. ويمكن للبلدان العربية على وجه الخصوص، أن تلعب دوراً ريادياً في هذا التحول، إذا ما تم تفعيل شراكات حقيقية بين القطاع العام والخاص، وتوجيه البحث العلمي نحو حلول ذكية ومتكيفة مع الخصوصيات البيئية المحلية.

إن الزراعة الذكية ليست مجرد خيار تقني، بل هي ضرورة تنموية وبيئية لضمان الأمن الغذائي، وتحقيق أهداف التنمية المستدامة في عالم يتغير مناخياً بوتيرة غير مسبوقة.

10. المراجع

Al-Tuwaijari, J., & Abbas, L. H. (2024). *Application of IoT-based smart irrigation system in Iraqi agriculture*. Journal of Agricultural Technology and Sustainability, 12(2), 45–58.

Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*, 3(4), 254-256. https://doi.org/10.1038/s41893-020-0510-0

FAO Iraq. (2022). *Building climate resilience of agricultural livelihoods in Southern Iraq*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from https://www.fao.org/iraq/news/detail/en/c/1648124/

FAO. (2019). The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture**.** Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from https://www.fao.org

FAO. (2020). The State of Food and Agriculture 2020. Overcoming water challenges in agriculture. Food and Agriculture Organization.

FAO. (2022). Smart Agriculture in the Middle East and North Africa: Technologies and Best Practices. Food and Agriculture Organization.

IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**.** Cambridge University Press.

Iraqi Red Crescent Society. (2024). *Smart irrigation initiatives for drought-resilient livestock fodder*. Internal project report. Retrieved from https://ircs.org.iq/news/smart-irrigation-projects-2024/

Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture**.** *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 23–37. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037

Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review**.** *Sensors*, 18(8), 2674. https://doi.org/10.3390/s18082674

UNDP. (2024a). *Iraq and Green Climate Fund launch climate-resilient agriculture project*. United Nations Development

Programme. Retrieved from https://www.iq.undp. org/ content/iraq/ en/home/presscenter/articles/2024/10/srvali-launch.html

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review**.** *Agricultural Systems*, 153, 69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

World Bank. (2020). Agriculture and climate change in the MENA region: Challenges and opportunities. World Bank Report.

الفصل 9 - الابتكار الزراعي في عصر التغير المناخي

المحتويات

1. المقدمة
2. مفهوم الابتكار الزراعي والابتكار في الزراعة الذكية
3. الابتكار كمحرك للاستدامة
4. التقنيات الحديثة في الابتكار الزراعي
5. دور الابتكار في تحسين كفاءة الموارد والتقليل من البصمة البيئية
6. الابتكار في نظم الري والتسميد الذكي
7. قصص نجاح الابتكار الزراعي في مواجهة التغير المناخي
8. المستقبل المحتمل للابتكار الزراعي
9. التحديات والفرص
10. الخاتمة
11. المراجع

1. المقدمة

في ظل تصاعد حدة التغير المناخي، يواجه القطاع الزراعي تحديات كبيرة تتمثل في تغير أنماط الطقس، تدهور الأراضي، وتقلص التنوع الحيوي (الأحيائي)، فضلاً عن زيادة الفجوة بين العرض والطلب الغذائي. كما أن بعض المناطق الزراعية باتت تعاني من اختلالات موسمية تؤثر في دورات الزراعة التقليدية، مما يضعف من قدرة الأنظمة الزراعية على الصمود. لذلك، برز الابتكار الزراعي كاستراتيجية محورية لتعزيز قدرة النظم الزراعية على التكيف وتحقيق الاستدامة.

هذا الابتكار يرتكز على تطبيق تقنيات متطورة وتطوير ممارسات إنتاجية مبتكرة تساعد على إدارة الموارد بكفاءة وتقليل الآثار السلبية على البيئة، ويشكل ركيزة مهمة في بناء مستقبل زراعي resilient وقادر على مواجهة التحولات المناخية المتسارعة (Schmidhuber & Tubiello, 2007). وفي ظل محدودية الموارد، وازدياد الطلب

على الغذاء، أصبح الابتكار الزراعي ليس خياراً إضافياً، بل ضرورة وجودية لضمان استمرارية الإنتاج الزراعي والأمن الغذائي العالمي.

2. مفهوم الابتكار الزراعي والابتكار في الزراعة الذكية

الابتكار الزراعي لا يقتصر على تطوير تقنيات جديدة فقط، بل يشمل إعادة هيكلة العمليات الزراعية، وتحسينها باستخدام أدوات رقمية متقدمة، مثل أنظمة جمع البيانات، وتعلم الآلة، ونمذجة المحاصيل. كما يشمل تطوير سلاسل الإمداد، وإعادة تصميم أساليب التسويق، وتمكين المزارعين من اتخاذ قرارات ذكية قائمة على البيانات.

تتجلى الزراعة الذكية باعتبارها أحد أبرز أشكال هذا الابتكار، فهي تعتمد على دمج التكنولوجيا الرقمية مع النظم البيئية الزراعية بهدف تحسين الإنتاجية وتوجيه الموارد بكفاءة. وتعتمد هذه المقاربة على استخدام البيانات الكبيرة (Big Data)، ونظم المعلومات الجغرافية (GIS)، وتقنيات الاستشعار عن بعد، ونماذج التنبؤ المناخي لتوجيه عمليات الري، التسميد، وإدارة المخاطر الزراعية (Wolfert *et al.*, 2017).

على سبيل المثال، تم في بعض المناطق الزراعية في أوروبا توظيف نماذج تحليلية تعتمد على بيانات الطقس والتربة لرسم خرائط ديناميكية للاحتياجات السمادية، ما ساهم في خفض استهلاك الأسمدة بنسبة تصل إلى 20%، وتحسين خصوبة التربة على المدى الطويل.

3. الابتكار كمحرك للاستدامة

تجسّد الابتكار الزراعي الوسيلة الأبرز لتقليل البصمة البيئية للزراعة، من خلال خفض استهلاك المياه والطاقة والمواد الكيميائية، وتحسين صحة التربة، وتعزيز التنوع الحيوي. لا يقتصر دوره على البعد البيئي فقط، بل يشمل أيضاً البعدين الاقتصادي والاجتماعي، ما يجعله عنصراً أساسياً في تحقيق الاستدامة الشاملة.

فالابتكار يعتمد على دمج الحلول التقنية مع المبادئ البيئية، مثل الزراعة العضوية، الزراعة الدقيقة، والري بالتنقيط الذكي، وهي أساليب تساعد على الحد من الهدر وتقليل التأثيرات البيئية الضارة للزراعة الصناعية (FAO, 2019). كما أن استخدام تقنيات الزراعة الرأسية، والطاقة الشمسية، والتحكم الآلي في المناخ داخل البيوت المحمية، يسهم في إنتاج غذاء مستدام في بيئات شحيحة الموارد.

علاوة على ذلك، فإن الابتكار يسهم في تعزيز العدالة الاجتماعية الزراعية من خلال إشراك المزارعين الصغار، وتحسين فرص الوصول إلى الأسواق، وإدماج التكنولوجيا في حياة المجتمعات الزراعية، بما يضمن تنمية شاملة وعادلة.

4. التقنيات الحديثة في الابتكار الزراعي

تُعد التقنيات الحديثة الركيزة الأساسية في الابتكار الزراعي المعاصر، إذ تسهم في تحويل الزراعة من نمطها التقليدي القائم على التجربة والخطأ إلى نظام متكامل يعتمد على البيانات والتحكم الذكي. ومن بين أبرز هذه التقنيات:

أ. الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي (Artificial Intelligence & Machine Learning)

الذكاء الاصطناعي (AI) والتعلم الآلي (ML) أحدثا ثورة في تحليل البيانات الزراعية، حيث يتم تدريب الخوارزميات على كميات ضخمة من البيانات المناخية والتربوية والزراعية لاكتشاف الأنماط والتنبؤ بالظواهر المستقبلية. على سبيل المثال، يمكن لهذه النظم التنبؤ بمواعيد ظهور الآفات أو توقيت الري المثالي بناءً على مؤشرات مناخية وسلوكية دقيقة (Kamilaris *et al.*, 2017).

كما يُستخدم الذكاء الاصطناعي في تطوير نماذج لمحاكاة نمو المحاصيل والتفاعل مع بيئتها، مما يمكّن المزارعين من اختبار سيناريوهات مختلفة قبل اتخاذ قرارات على أرض الواقع، ويُقلّل من الهدر الناتج عن الخطأ البشري.

ب. الطائرات بدون طيار (الدرونز)

الدرونز أصبحت أداة لا غنى عنها في الزراعة الحديثة، خاصة في المزارع واسعة النطاق. فهي توفر صوراً جوية دقيقة وعالية الدقة للمزارع، ما يمكّن من مراقبة نمو النباتات، ورصد المناطق المتضررة بسبب نقص المياه أو العدوى الفطرية، بدقة لا يمكن الوصول إليها بالعين المجردة (Liakos *et al*., 2018).

علاوة على ذلك، يمكن استخدام الدرونز في رش المبيدات والأسمدة بطريقة موجهة، مما يقلل من الكمية المستخدمة ويحد من التأثير البيئي للرش العشوائي.

ج. الحساسات الذكية وإنترنت الأشياء (IoT Sensors)

توفر أنظمة إنترنت الأشياء منصة مترابطة تشمل حساسات موزعة في أنحاء المزرعة تقوم بقياس مؤشرات حيوية مثل:

- رطوبة التربة
- مستوى الحموضة (PH)
- درجة الحرارة والملوحة
- الضوء المتاح للنباتات

تقوم هذه الحساسات بإرسال البيانات لحظياً إلى لوحة تحكم مركزية، يمكن الوصول إليها من أي مكان، مما يساعد على ضبط عمليات الري والتسميد بشكل دقيق ومستمر (Wolfert *et al.*, 2017).

هذا النوع من المراقبة الدقيقة يمكّن من تحقيق زراعة دقيقة تعتمد على الاحتياج الحقيقي للنبات، وليس بناءً على جداول زمنية ثابتة.

د. الزراعة العمودية والزراعة المائية (Vertical & Hydroponic Farming)

في ظل ندرة الأراضي الزراعية وتوسع المدن، أصبحت الزراعة العمودية حلاً مبتكراً لزراعة المحاصيل في بيئات حضرية باستخدام أنظمة رفوف متعددة الطبقات، داخل منشآت خاضعة لتحكم دقيق في المناخ. أما الزراعة المائية (Hydroponics) فتقوم على زراعة النباتات في محاليل مغذية بدلاً من التربة، ما يقلل من استهلاك المياه بنسبة تصل إلى 90% مقارنة بالزراعة التقليدية (Basso & Antle, 2020).

تتيح هذه النظم إنتاج محاصيل على مدار السنة، بجودة عالية، ودون الحاجة إلى استخدام مبيدات، كما تساهم في تقليل انبعاثات النقل عند قربها من مراكز الاستهلاك.

5. دور الابتكار في تحسين كفاءة الموارد والتقليل من البصمة البيئية

أحد أبرز أهداف الابتكار الزراعي هو تحقيق أقصى استفادة من الموارد الطبيعية، مع تقليل الأثر البيئي الناتج عن العمليات الزراعية. وفي هذا الإطار، تلعب أنظمة الري والتسميد الذكية دوراً حاسماً في ترشيد استهلاك الموارد.

- **تحسين كفاءة استخدام المياه:**

باستخدام الحساسات الميدانية وتقنيات إنترنت الأشياء، يمكن ربط بيانات رطوبة التربة ودرجات الحرارة بنظام تحكم آلي يقوم بتشغيل الري فقط عند الحاجة الفعلية، مما يقلل من استهلاك المياه بنسبة قد تصل إلى 40% مقارنة بالري التقليدي(FAO, 2020) .

هذه الأنظمة تتيح تقسيط الري بدقة حسب نوع النبات ومرحلة نموه، مع تجنب الفاقد الناتج عن الري الزائد أو في غير التوقيت المناسب.

- **رفع كفاءة التسميد والحد من التلوث:**

يعتمد التسميد الذكي على تحليل دقيق لخصائص التربة وتغذية النبات، ويتم توجيه الأسمدة بكميات مناسبة لكل منطقة داخل الحقل. هذه الدقة في التوزيع تحسّن

امتصاص المغذيات من قبل النباتات، وتحد من تسرب العناصر الزائدة إلى المياه الجوفية، وبالتالي تقلل من التلوث الكيميائي الناتج عن الإفراط في التسميد.

- **تقليل الانبعاثات وتحسين صحة التربة:**

من خلال تقنيات الزراعة الصفرية أو الزراعة بدون حراثة، يمكن تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن استخدام المعدات الزراعية الثقيلة، والحفاظ على الكائنات الحية الدقيقة المفيدة في التربة.

كما أن دمج تقنيات الطاقة الشمسية في تشغيل أنظمة الري والبيوت المحمية يساهم في الحد من الاعتماد على الوقود الأحفوري.

6. الابتكار في نظم الري والتسميد الذكي

في ظل الضغط المتزايد على الموارد الطبيعية، خاصة المياه والتربة، أصبح من الضروري تطوير نظم متقدمة لإدارة الري والتسميد. وتُعد هذه النظم الذكية من أبرز تطبيقات الابتكار الزراعي التي تساعد على تحقيق التوازن بين الإنتاجية العالية والكفاءة البيئية.

- **الري بالتنقيط الذكي (Smart Drip Irrigation)**

يُعتبر نظام الري بالتنقيط الذكي من أكثر تقنيات الري تطوراً وفعالية، حيث يقوم بتوصيل المياه مباشرة إلى جذور النباتات عبر شبكة أنابيب دقيقة، مع تحكم دقيق بكميات المياه ووقت التوزيع.

الابتكار الحقيقي في هذه التقنية يكمن في تكاملها مع الحساسات البيئية التي ترصد مستوى رطوبة التربة، ودرجات الحرارة، ومعدلات التبخر. ترتبط هذه الحساسات بوحدة تحكم مركزية أو تطبيق إلكتروني يقوم بتحليل البيانات في الزمن الحقيقي،

ويُصدر أوامر تلقائية بفتح أو إغلاق النظام حسب الحاجة الفعلية للنباتات (FAO, 2019).

يؤدي ذلك إلى:

- تقليل استهلاك المياه بنسبة تصل إلى 50% مقارنة بأنظمة الري التقليدية.
- تجنب الإجهاد المائي للنباتات الناتج عن الإفراط أو النقص في الري.
- الحد من نمو الأعشاب الضارة لأن المياه تُوزع فقط في أماكن الجذور.

كما أن هذا النظام يناسب المناطق الجافة وشبه الجافة، ويمكن ربطه بأنظمة الطاقة الشمسية ليعمل باستقلالية تامة، مما يعزز من استدامته في البيئات الريفية المعزولة.

- **التسميد الدقيق (Precision Fertilization)**

يُعرف التسميد الدقيق بأنه استخدام البيانات والبرمجيات الحاسوبية لتحديد الكميات المثلى من المغذيات النباتية وتوقيت تطبيقها بدقة، حسب حالة التربة والمحصول وموقع الزراعة.

تعتمد هذه التقنية على:

- تحليل خرائط خصوبة التربة باستخدام تقنيات الاستشعار أو المسح الكهربائي للتربة.
- نماذج حاسوبية تأخذ بعين الاعتبار نوع المحصول، عمر النبات، ومؤشرات نموه.
- دمج بيانات الطقس والتوقعات المناخية لضبط توقيت التسميد تفادياً لفقد المغذيات بسبب الأمطار أو الرياح.

بفضل هذه المقاربة، يمكن:

- تقليل الكمية المستخدمة من الأسمدة المعدنية.

- رفع كفاءة امتصاص العناصر الغذائية من قبل النباتات بنسبة تصل إلى 80.%
- تقليل التلوث الناتج عن الجريان السطحي للأسمدة في التربة والمياه الجوفية.
- الحد من انبعاثات أكسيد النيتروز، أحد الغازات الدفيئة الناتجة عن التسميد الزائد.

علاوة على ذلك، فإن تطبيقات الهواتف الذكية الخاصة بالتسميد الدقيق باتت متاحة للمزارعين، حيث تقدم توصيات أسبوعية مخصصة بناءً على البيانات المتاحة عن المزرعة. وتُعد هذه الأدوات مفتاحاً لدمج **المزارعين الصغار** في مسار الزراعة الذكية والمستدامة.

7. قصص نجاح الابتكار الزراعي في مواجهة التغير المناخي

تُظهر تجارب عدة دول حول العالم كيف يمكن للابتكار الزراعي أن يكون أداة فعالة لمواجهة تحديات التغير المناخي، خصوصاً في البيئات القاسية. فيما يلي أمثلة بارزة من مشاريع وشراكات رائدة:

- **الإمارات العربية المتحدة: مزرعة المدينة الذكية (Smart Farm City)**

تُعتبر الإمارات نموذجاً رائداً في تطبيق الابتكار الزراعي في بيئات صحراوية ذات درجات حرارة عالية ونقص شديد في المياه. مشروع "مزرعة المدينة" في دبي يستخدم تقنيات الزراعة العمودية المتطورة، مدمجة مع أنظمة تحكم ذكية تعتمد على الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء (IoT)، للتحكم الدقيق في الظروف البيئية مثل درجة الحرارة، الرطوبة، ومستوى الضوء.

تعمل حساسات ميدانية متصلة بالسحابة على مراقبة حالة المحاصيل في الوقت الحقيقي، بينما تقوم روبوتات متخصصة بالعناية الدقيقة للنباتات، ما يزيد من كفاءة الإنتاج ويخفض التكاليف التشغيلية (Al Falasi *et al.*, 2021).

أدوات وتقنيات مستخدمة:

- أنظمة تحكم ذكية متصلة بالإنترنت (IoT).
- الذكاء الاصطناعي لتحليل بيانات النمو والتنبؤ بالمشكلات.
- طائرات بدون طيار للمراقبة الجوية الدقيقة.
- تقنيات الزراعة العمودية والزراعة المائية لتوفير المياه والمساحات.

- **تونس: نظام مراقبة متكامل لمحاصيل الزيتون والقمح**

في منطقة الساحل التونسي التي تعاني من الجفاف وتغيرات مناخية متكررة، تم تطبيق نظام متكامل لمراقبة محاصيل الزيتون والقمح باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد(Remote Sensing) والأقمار الصناعية، بالإضافة إلى استخدام الدرونز. يهدف النظام إلى التنبؤ بظهور الأمراض الزراعية وتحديد مناطق الإجهاد المائي بدقة عالية، مع توفير توصيات فورية للمزارعين عبر تطبيقات هواتف ذكية تساعدهم في اتخاذ قرارات زراعية مدروسة (World Bank, 2020).

أدوات وتقنيات مستخدمة:

- الاستشعار عن بعد عبر الأقمار الصناعية والدرونز
- نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لتحليل الخرائط الزراعية
- تطبيقات الهواتف الذكية للإرشاد الزراعي والتواصل مع المزارعين
- تحليلات بيانات المناخ والتربة لتخصيص الموارد بكفاءة.

- **السعودية: مركز الابتكار الزراعي في جامعة الملك عبد الله للعلوم والتقنية (KAUST)**

يُعد مركز الابتكار الزراعي في KAUST من أبرز المراكز البحثية التي تدمج التكنولوجيا الحيوية والروبوتات الزراعية لتطوير حلول متقدمة لتعزيز إنتاج المحاصيل في ظروف مناخية صعبة.

تم تطوير "نظام الرصد الزراعي الذكي" الذي يجمع بين الذكاء الاصطناعي والحساسات الأرضية، ليقدم حلولاً تكيفية في الوقت الحقيقي تُمكّن المزارعين من مواجهة الإجهادات المناخية والبيئية بكفاءة عالية (Alhammadi *et al*., 2022).

أدوات وتقنيات مستخدمة:

- الذكاء الاصطناعي لتحليل بيانات البيئة الزراعية والتنبؤ بالمخاطر
- حساسات ذكية لقياس حالة التربة والمناخ بشكل مستمر
- أنظمة متقدمة لإدارة البيانات الزراعية وتحليلها
- روبوتات متخصصة لأتمتة المهام الزراعية وتقليل الحاجة للعمالة اليدوية

- **هولندا: مشروع FarmBot للزراعة الذكية الدقيقة**

يقدم مشروع FarmBot مثالاً مبتكراً للزراعة الذكية الدقيقة عبر روبوتات زراعية ذاتية الحركة صغيرة الحجم قادرة على تنفيذ عمليات الزراعة، الري، ومراقبة نمو المحاصيل في بيئات حضرية أو مزارع صغيرة الحجم.

يعتمد المشروع على برمجيات مفتوحة المصدر تسمح للمزارع بضبط الخطط الزراعية بناءً على بيانات المناخ والتربة، مع تحكم مركزي متكامل في الحساسات والروبوتات لضمان أفضل أداء ممكن.

أدوات وتقنيات مستخدمة:

- روبوتات زراعية ذاتية الحركة ذات دقة عالية
- برمجيات مفتوحة المصدر للتحكم وإدارة المزارع
- مستشعرات متصلة بجهاز مركزي لجمع البيانات وتحليلها
- تقنيات الزراعة الدقيقة التي تعتمد على البيانات الحية

- **الولايات المتحدة الأمريكية ـ محصول الذرة الصفراء**

يُعد التكيف مع التقدم التكنولوجي أمراً بالغ الأهمية، إن نطاق الابتكار المطلوب يُمثل تحدياً، معيارنا هو الزيادة المُقدرة في محصول الذرة الأمريكية بفضل الأصناف المُعدّلة وراثياً. تشير تقديرات الغلات المستقبلية، في ضوء توقعات المناخ إلى آثار سلبية كبيرة لتغير المناخ، وقد يتطلب الأمر جهوداً بحثية وتطويرية طموحة ومُستهدفة وإنجازات ابتكارية لتعويض الأثر السلبي لتغير المناخ.

تتصدر الزراعة التأثيرات المتوقعة لتغير المناخ، وقد تراكمت أدلة كثيرة تشير إلى أنه في غياب إجراءات تعويضية، من المحتمل أن تكون هناك عواقب سلبية كبيرة. وبينما قد يكون عدد من الاستراتيجيات مفيداً في تخفيف آثار تغير المناخ على إمدادات الغذاء، هناك شعور متزايد بضرورة بذل جهود تكيف كبيرة. وقد يتطلب التكيف الناجح استثمارات هادفة وموجهة في البحث والتطوير لتطوير تقنيات جديدة مناسبة. ما حجم جهود الابتكار المطلوبة لنجاح التكيف في الزراعة؟. تُعد الذرة أهم محصول حقلي في امريكا، وقد استفادت بشكل كبير من التقدم التكنولوجي الكبير على مدى العقود القليلة الماضية، بما في ذلك تطوير واعتماد الأصناف المعدلة وراثياً على نطاق واسع. ويشكل هذا الأخير أبرز مجموعة من الابتكارات الزراعية منذ الثورة الخضراء. وبما أن طبيعة وحجم هذه الثورة في مجال الهندسة الوراثية مفهومان جيداً، فإننا نقترح استخدامها كمقياس ـ أي لقياس نطاق مهمة الابتكار

المطلوبة للتكيف وتعويض آثار تغير المناخ المتوقع، وذلك من حيث مضاعفات ما تم تحقيقه من خلال التبني الواسع النطاق لصفات الجيل الأول من الهندسة الوراثية في الذرة.

بدأت مؤخراً تقنيات الهندسة الوراثية الجديدة الواعدة، مثل CRISPR، التي تُقدم أساليباً جديدةً للتحكم في جينومات المحاصيل وتحسينها (Chen *et al*., 2019). ولكن لكي تؤثر هذه الأجيال الجديدة من تكنولوجيات الهندسة الوراثية على العائدات في مواجهة الظروف المناخية المتغيرة، فسوف تكون هناك حاجة إلى استثمارات جديدة مستهدفة في البحث والتطوير ـ إلى جانب الاستثمارات المطلوبة لدعم الاتجاه الأساسي لتحسين العائدات المقدر على مدى فترة العينة (وهو ما نحافظ عليه في جميع الفرضيات المضادة)

8. المستقبل المحتمل للابتكار الزراعي

يُعد المستقبل الزراعي مجالاً خصباً للتجديد والابتكار، مع ظهور تقنيات جديدة تعد بإحداث نقلة نوعية في طريقة إدارة العمليات الزراعية. من بين هذه التقنيات:

- **الطباعة الثلاثية الأبعاد (3D Printing)**: تمكّن الطباعة الثلاثية الأبعاد المزارعين والمهندسين من طباعة قطع غيار للمعدات الزراعية مباشرة في الميدان، ما يقلل من أوقات التوقف ويخفض التكاليف المرتبطة بالصيانة والاستيراد (Liakos *et al*., 2018). هذا الابتكار يفتح آفاقاً كبيرة لتطوير معدات زراعية مخصصة تلبي الاحتياجات المحلية.
- **تقنيات البلوك تشين (Blockchain):** تُستخدم لضمان أمان وسلامة سلاسل الإمداد الزراعي، وتعزيز الشفافية بين المنتجين والمستهلكين، بالإضافة إلى تحسين تتبع المنتجات من المزرعة إلى السوق، مما يرفع من ثقة المستهلكين ويقلل من الفساد والاحتيال في سلاسل التوريد.(Liakos *et al*., 2018)

- **دمج شبكات الجيل الخامس (5G) مع الحساسات الذكية:** ستوفر سرعات فائقة في نقل البيانات وزمن استجابة منخفض جداً، ما سيُحدث نقلة نوعية في جمع وإدارة وتحليل البيانات الزراعية، ويدعم تقنيات الزراعة الدقيقة والروبوتات الزراعية الذكية، ويُمكن من اتخاذ قرارات فورية وفعالة في إدارة الموارد(FAO, 2022) .

تشكّل هذه الابتكارات مجتمعة مستقبلاً واعداً لنظام زراعي أكثر ذكاءً واستدامة، قادراً على مواجهة التحديات المناخية والاقتصادية المتزايدة.

9. التحديات والفرص

التحديات:

- **ضعف البنية التحتية الرقمية في المناطق الريفية:** نقص شبكات الإنترنت السريعة وعدم توفر الأجهزة الذكية تعيق الوصول إلى تقنيات الزراعة الذكية (Wolfert *et al*., 2017).
- **ارتفاع تكلفة تبني التقنيات المتقدمة:** التكنولوجيا الحديثة قد تكون مكلفة بالنسبة للمزارعين الصغار، مما يحد من انتشارها دون دعم مالي أو تحفيزي.
- **الحاجة إلى تدريب وتأهيل الكوادر الزراعية:** لا بد من برامج تعليمية وتدريبية مستمرة لتمكين المهندسين والفنيين والمزارعين من استخدام التقنيات الجديدة بفعالية.
- **تحديات تشريعية وتنظيمية:** تشمل حماية البيانات الزراعية، الملكية الفكرية، وتنظيم استخدام التقنيات مثل الطائرات بدون طيار والذكاء الاصطناعي، ما يتطلب إطاراً قانونياً واضحاً (Wolfert *et al*., 2017).

الفرص:

- **دعم الحكومات والمنظمات الدولية:** الاستثمار في البنية التحتية الرقمية، تقديم الحوافز المالية، وتعزيز السياسات الداعمة للابتكار الزراعي، مما يُسرّع من تبني التقنيات الحديثة.
- **خلق فرص عمل جديدة:** في مجالات تحليل البيانات، تطوير البرمجيات الزراعية، صيانة الأجهزة الذكية، والروبوتات، ما يعزز اقتصاديات المناطق الريفية.
- **تعزيز التعاون بين البحث العلمي والقطاع الزراعي:** لتسريع نقل التكنولوجيا من المختبر إلى الحقل، وتطوير حلول تناسب الواقع المحلي لكل منطقة.

10. الخاتمة

يشكل الابتكار الزراعي ركيزة أساسية لاستدامة القطاع الزراعي في ظل التغيرات المناخية المتسارعة. من خلال تبني التقنيات الحديثة وتطوير النظم الإدارية والزراعية، يمكن تحسين إنتاجية المحاصيل، تقليل الهدر في الموارد، والحد من التأثيرات البيئية السلبية.

ولا يقتصر دور الابتكار على الجانب التقني فقط، بل يشمل ضرورة وجود سياسات داعمة واستثمارات مستدامة تُمكّن المزارعين من الوصول إلى هذه الحلول. وبوجود هذه العوامل مجتمعة، يمكن للابتكار الزراعي أن يصبح أداة فعالة وقوية لتحقيق الأمن الغذائي العالمي، وضمان مستقبل زراعي مستدام للأجيال القادمة.

11. المراجع

Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*, 3(4), 254-256.

Chen, K., Wang, Y., Zhang, R., Zhang, H., and Gao, C. (2019) "CRISPR/Cas Genome Editing and Precision Plant Breeding In Agriculture." Annual Review of Plant Biology 70: 667–97.

FAO. (2019). Climate-smart agriculture sourcebook. Food and Agriculture Organization.

FAO. (2020). The State of Food and Agriculture 2020. Overcoming water challenges in agriculture. Food and Agriculture Organization.

FAO. (2022). Smart Agriculture in the Middle East and North Africa: Technologies and Best Practices. Food and Agriculture Organization.

IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Kamilaris, A., et al. (2017). A review on the use of artificial intelligence in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 23-37.

Lee, S., Ji, Y. and Moschini, G (2022) Agricultural innovation and adaptation to climate change: Insights from US maize. J. of agricultural and Applied Economics Association, V 1(2): 165-179. https://doi.org/10.1002/jaa2.20

Liakos, K. G., et al. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674.

Schmidhuber, J., & Tubiello, F. N. (2007). Global food security under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 19703-19708.

Wolfert, S., et al. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69-80.

World Bank. (2019). Agricultural innovation systems: An investment sourcebook. World Bank Report.

World Bank. (2020). Agriculture and climate change in the MENA region: Challenges and opportunities. World Bank Report.

الفصل 10 - نحو زراعة مستدامة: التكنولوجيا كحل للتحديات البيئية

المحتويات

1. المقدمة
2. مفهوم الزراعة المستدامة وعلاقته بالزراعة الذكية
3. حلول تكنولوجية ذكية للحفاظ على الموارد الطبيعية
4. دور التكنولوجيا في ترشيد استخدام الموارد
5. إدارة التربة والمياه بطرق ذكية ومستدامة
6. تقليل استخدام المبيدات والأسمدة عبر التكنولوجيا
7. دمج الزراعة الذكية مع الممارسات البيئية التقليدية
8. الزراعة العضوية والزراعة الذكية
9. التحديات والحلول لتحقيق الاستدامة
10. الخاتمة
11. المراجع

1. المقدمة

في ظل التحديات البيئية المتزايدة التي تواجه العالم اليوم، باتت الاستدامة في الزراعة ضرورة لا غنى عنها لضمان أمننا الغذائي المستقبلي. مع تزايد أعداد السكان وتغير المناخ، تزداد الضغوط على الموارد الطبيعية مثل المياه والتربة، مما يجعل من الضروري تبني أساليب جديدة تجمع بين الحكمة التقليدية والابتكار التكنولوجي. هنا تبرز الزراعة الذكية كحل مبتكر يعزز من إنتاجية المحاصيل مع تقليل الأثر البيئي، من خلال استخدام تقنيات متقدمة تتيح مراقبة دقيقة للحقول وتحليل مستمر لاحتياجات النباتات.

هذا التكامل بين المعرفة الزراعية التقليدية والتقنيات الحديثة لا يساعد فقط في رفع الإنتاج، بل يساهم أيضاً في حماية الموارد الطبيعية من الاستنزاف والتلوث، مما يجعل الزراعة أكثر استدامة ومرونة في مواجهة التغيرات المستقبلية. تعد هذه المقاربة خطوة

مهمة نحو تحقيق توازن بين تلبية الاحتياجات الغذائية المتزايدة والحفاظ على البيئة (Tilman *et al*., 2011)، وهو ما يؤكد عليه العديد من الخبراء في مجال الزراعة المستدامة.

علاوة على ذلك، فإن تبني التكنولوجيا في الزراعة لا يقتصر على تحسين الإنتاج فقط، بل يمتد ليشمل توفير الوقت والجهد للمزارعين، وتمكينهم من اتخاذ قرارات مبنية على بيانات دقيقة وفورية، مما يقلل من الهدر ويزيد من كفاءة الموارد. ولهذا، فإن الزراعة الذكية تمثل ثورة حقيقية في القطاع الزراعي، تفتح آفاقاً جديدة نحو مستقبل أكثر استدامة وازدهاراً.

2. مفهوم الزراعة المستدامة وعلاقته بالزراعة الذكية

الزراعة المستدامة ليست مجرد وسيلة لإنتاج الغذاء، بل تمثل فلسفة متكاملة تتعامل مع البيئة الزراعية بوصفها نظاماً حيوياً مترابطاً، حيث يتداخل العنصر البشري مع العناصر الطبيعية في علاقة تكاملية تهدف إلى تحقيق الاكتفاء دون الإضرار بالأنظمة البيئية. تقوم هذه الفلسفة على أساس تقليل استنزاف الموارد الطبيعية، كالتربة والمياه، والحفاظ على التنوع البيولوجي، والحد من التلوث البيئي، بما يضمن قدرة هذه الأنظمة على الاستمرار في دعم الأجيال الحالية والمقبلة (Pretty, 2008).

في هذا الإطار، تبرز الزراعة الذكية كأحد أعمدة الزراعة المستدامة، بل ويمكن اعتبارها التجسيد العملي لها في العصر الرقمي. فباستخدام التكنولوجيا المتقدمة، كالذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء، أصبحت عملية الزراعة أكثر دقة وكفاءة. فمثلاً، يمكن لأجهزة الاستشعار المنتشرة في الحقول أن تقيس رطوبة التربة ودرجة حرارتها بشكل فوري، وتراقب نمو النباتات وحالتها الصحية، وترصد التغيرات البيئية في الوقت الحقيقي. هذه القدرة على جمع البيانات الدقيقة والمستمرة تتيح للمزارعين اتخاذ قرارات مدروسة ومدعومة بالمعلومة، عوضاً عن الاعتماد على التقدير والتجربة.

ولا تقتصر فوائد الزراعة الذكية على زيادة الإنتاج فقط، بل تتعداها إلى ترشيد استخدام الموارد وتقليل التكاليف، سواء عبر تحسين توقيت عمليات الري والتسميد أو عبر تقليص استخدام المبيدات بطرق غير ضرورية (FAO, 2019). بهذا الشكل، تتكامل الزراعة الذكية مع مبادئ الزراعة المستدامة، فتعمل كجسر يربط بين المعرفة الزراعية التقليدية، التي توارثها المزارعون عبر الأجيال، والتكنولوجيا الحديثة، التي تفتح آفاقاً غير مسبوقة لتحقيق الأمن الغذائي العالمي في ظل التغيرات المناخية المتسارعة.

3. حلول تكنولوجية ذكية للحفاظ على الموارد الطبيعية

في ظل الضغوط المتزايدة على الموارد الطبيعية، وخاصة المياه والتربة، تقدم تقنيات الزراعة الدقيقة (Precision Agriculture) حلولاً مبتكرة تجعل من الممكن استغلال كل نقطة ماء وكل وحدة من المغذيات بكفاءة غير مسبوقة. وتستند هذه التقنيات إلى منظومات متكاملة من الحساسات وأجهزة القياس الذكية التي تراقب باستمرار حالة التربة والنباتات، فتساعد في اتخاذ قرارات دقيقة بخصوص الكميات المطلوبة من الماء أو السماد أو المبيدات.

ولعل مشروع الري الذكي في الأردن خير مثال على ذلك، حيث أدى إلى تحسين كفاءة استخدام المياه بنسبة تصل إلى 30%، وهو إنجاز لافت في منطقة تعاني من شح مائي حاد (Al-Omari *et al.*, 2020). هذا النوع من المشروعات لا يقتصر تأثيره على الاقتصاد الزراعي، بل يمتد ليشمل الأمن المائي والبيئي للدول، إذ يقلل من الاعتماد على مصادر المياه المحدودة ويضمن استدامتها.

أما في المملكة العربية السعودية، فقد وظفت تقنيات الاستشعار عن بُعد لرصد صحة النباتات ومراقبة نموها، مما سمح بالكشف المبكر عن إصابات الحشرات أو الأمراض النباتية، وبالتالي التدخل السريع والفعال دون الحاجة إلى استخدام المبيدات بشكل عشوائي (Al-Gaadi *et al.*, 2015). وبهذا تكون التكنولوجيا قد ساهمت في الحد

من التلوث البيئي الناتج عن الاستخدام المفرط للمواد الكيميائية، مع الحفاظ في الوقت نفسه على جودة الإنتاج الزراعي.

هذه الأمثلة تؤكد أن الحلول الذكية لا تكتفي بتحسين أداء المزارع، بل تعيد تشكيل العلاقة بين الإنسان والبيئة، حيث يصبح المزارع فاعلاً بيئياً يراعي استدامة الموارد في كل قرار يتخذه.

4. دور التكنولوجيا في ترشيد استخدام الموارد

تلعب التكنولوجيا الحديثة دوراً جوهرياً في إعادة هيكلة طريقة إدارة الموارد في القطاع الزراعي، خاصة مع دخول مفاهيم مثل إنترنت الأشياء (IoT)، الحوسبة السحابية، والذكاء الاصطناعي. بفضل هذه الأدوات، أصبح بإمكان المزارعين الحصول على معلومات لحظية حول حالة التربة، واحتياجات النباتات، والتغيرات المناخية، وذلك عبر تطبيقات بسيطة على هواتفهم الذكية.

تسمح هذه التقنيات بإرسال تنبيهات آنية حول الحاجة للري أو التسميد أو حتى التبريد، مما يقلل من الهدر، سواء في الماء أو الطاقة أو المواد الكيميائية (Wolfert *et al*., 2017). وقد أثبتت التجارب أن هذا النوع من الإدارة الذكية للموارد يمكن أن يؤدي إلى مكاسب اقتصادية ملموسة، كما هو الحال في دولة الإمارات العربية المتحدة، حيث أسهمت هذه الحلول في تقليل استهلاك الطاقة بنسبة 25% في البيوت المحمية (Al-Mansoori *et al*., 2021)، بالتزامن مع رفع معدلات الإنتاج.

ما يجعل هذه التكنولوجيا أكثر أهمية هو قدرتها على الدمج بين الكفاءة الاقتصادية والوعي البيئي. فليست الغاية فقط زيادة الإنتاج وتحقيق الأرباح، بل القيام بذلك بطريقة تحافظ على البيئة وتقلل من الانبعاثات الكربونية والهدر في الموارد، مما يخلق نموذجاً زراعياً مستداماً قادراً على مواجهة تحديات المستقبل.

5. إدارة التربة والمياه بطرق ذكية ومستدامة

تمثل إدارة التربة والمياه بذكاء واستدامة أحد الأعمدة الأساسية التي تقوم عليها الزراعة الحديثة، خاصة في المناطق التي تعاني من ضغط بيئي ومائي متزايد. فالتربة ليست مجرد وسط تنمو فيه النباتات، بل هي كائن حي ينبض بالحياة الدقيقة والتفاعلات الكيميائية والفيزيائية التي تؤثر على خصوبتها وإنتاجيتها. ومن هذا المنطلق، جاءت التقنيات الحديثة مثل التحليل الطيفي الكتلي (Mass Spectrometry) لتحدث ثورة في تحليل التربة، حيث تتيح هذه التقنية التعرف على مكوناتها الدقيقة من عناصر كيميائية ومواد عضوية ومعدنية، مما يسمح بوضع خطط تسميد مدروسة تقلل من الاعتماد على الأسمدة الكيميائية المفرطة وتحافظ على توازن التربة (Bongiovanni & Lowenberg-Deboer, 2004).

أما المياه، وهي المورد الأكثر حساسية في كثير من المناطق الزراعية، فقد استفادت هي الأخرى من التقدم التكنولوجي. فقد بات من الممكن مراقبة مصادر المياه، سواء الجوفية أو السطحية، عبر تقنيات الاستشعار عن بُعد، وربطها بجداول ري ذكية تُحدد بناءً على احتياجات المحصول الفعلية وليس بناءً على التقديرات التقليدية. في المغرب، على سبيل المثال، ساعد استخدام هذه الأدوات في منطقة سوس ماسة في تقليل فاقد المياه وتحسين كفاءة الري، مما كان له أثر مباشر على استدامة النشاط الزراعي في منطقة تعاني من شح المياه. (El Hafid *et al.*, 2019) هذه التجربة تؤكد كيف يمكن للتكنولوجيا أن تُحدث فرقاً نوعياً في إدارة الموارد، وتدعم الزراعة المستدامة في البيئات القاحلة.

6. تقليل استخدام المبيدات والأسمدة عبر التكنولوجيا

لطالما شكّلت المبيدات والأسمدة عنصراً أساسياً في العمليات الزراعية، ولكن الاستخدام غير المدروس لهما أدى إلى أضرار بيئية وصحية متراكمة، مثل تلوث المياه، وتدهور

التربة، وتناقص التنوع البيولوجي. في هذا السياق، تقدم التكنولوجيا حلولاً دقيقة وموجهة لتقليل الاعتماد على هذه المدخلات الكيميائية دون التأثير على الإنتاجية.

من بين هذه الحلول، أنظمة دعم القرار الزراعي (DSS)، التي تعتمد على تحليل بيانات الطقس، والتربة، وصحة النباتات، لتقديم توصيات مخصصة بشأن متى وبأي كمية يجب استخدام المبيدات أو الأسمدة. في دلتا النيل بمصر، ساعد استخدام هذه الأنظمة في تقليل الاعتماد على التسميد الكيميائي بنسبة وصلت إلى 20%، مما ساهم في تقليل التلوث وتحسين استدامة الإنتاج الزراعي.(Elsharabasy *et al*., 2018)

وبالإضافة إلى DSS، فإن الطائرات بدون طيار (Drones) تمثل طفرة حقيقية في مجال المكافحة الدقيقة. فقد أتاحت هذه الطائرات إمكانية رش المبيدات بدقة عالية، مستهدفة المناطق المصابة فقط دون هدر أو تغطية عشوائية. في بعض المناطق الزراعية في الصين، أدى استخدام الطائرات بدون طيار إلى خفض استهلاك المبيدات بنسبة تصل إلى 40%، مع تقليل الأثر البيئي وزيادة فعالية المكافحة (Li *et al*., 2019). هذه الأمثلة تُظهر كيف أن التكنولوجيا ليست فقط وسيلة لزيادة الإنتاج، بل أيضاً أداة أساسية لحماية البيئة وتحقيق توازن دقيق بين الزراعة والصحة العامة.

7. دمج الزراعة الذكية مع الممارسات البيئية التقليدية

رغم التقدم التكنولوجي الكبير، تظل الممارسات الزراعية التقليدية حاملة لحكمة متجذرة في التفاعل الطويل مع البيئة. ومن هنا، فإن أحد المسارات الواعدة لتحقيق الزراعة المستدامة يتمثل في دمج التقنيات الذكية مع الأساليب التقليدية، بما يحقق الاستفادة القصوى من كل من الحداثة والخبرة التراثية.

في تونس، تمثل تجربة دمج الزراعة التناوبية، وهي ممارسة تعتمد على تدوير المحاصيل لتحسين خصوبة التربة وتقليل الأمراض، مع أنظمة الري الذكي، نموذجاً ناجحاً لهذا التكامل. حيث أدى هذا الدمج إلى تحسين إنتاجية الزيتون، وهو من المحاصيل الاستراتيجية في المنطقة، مع الحفاظ على صحة التربة وتقليل الحاجة إلى المبيدات

(Ben Rejeb *et al.*, 2020). إن هذا التلاقي بين التقنيات المتقدمة والحكمة الزراعية التقليدية لا يخلق فقط نظاماً زراعياً أكثر مرونة، بل يُعيد الاعتبار للممارسات البيئية الأصيلة باعتبارها جزءاً لا يتجزأ من المستقبل الزراعي الذكي.

8. الزراعة العضوية والزراعة الذكية

الزراعة العضوية، التي ترتكز على مبادئ احترام البيئة والتوازن البيولوجي وعدم استخدام المواد الكيميائية الاصطناعية، تُعد من الركائز المهمة في أي نظام زراعي مستدام. غير أن التحدي الذي تواجهه الزراعة العضوية غالباً هو الكفاءة والإنتاجية، خاصة في ظل الطلب المتزايد على الغذاء. وهنا تأتي الزراعة الذكية لتقديم الحل، من خلال توفير أدوات متقدمة تُعزز من فعالية الزراعة العضوية دون المساس بمبادئها الأساسية.

في لبنان، تم تنفيذ مشاريع للزراعة العضوية الذكية داخل البيوت المحمية، حيث استخدمت الحساسات البيئية لمراقبة درجات الحرارة والرطوبة والإضاءة، وتم ربطها بأنظمة ري ذكي تضمن توفير الكمية المثالية من المياه، بناءً على حالة كل نبتة. وقد أدى هذا الدمج إلى زيادة الإنتاجية وتحسين جودة المحاصيل العضوية، دون الحاجة إلى تغيير جوهر النموذج البيئي (Makhoul *et al.*, 2022). هذه التجربة توضح الإمكانات الكبيرة التي يحملها تكامل الزراعة العضوية مع التكنولوجيا الذكية في بناء نماذج إنتاج غذائي أكثر توازناً وأقل ضرراً للبيئة.

9. التحديات والحلول لتحقيق الاستدامة

رغم الآفاق الواسعة التي تفتحها الزراعة الذكية لتحقيق الاستدامة، إلا أن تطبيق هذه المنظومات المتقدمة على نطاق واسع لا يخلو من التحديات. من أبرز هذه التحديات ارتفاع تكلفة الأجهزة والبرمجيات، وضعف البنية التحتية الرقمية، ونقص المهارات الفنية لدى المزارعين، خاصة في المناطق الريفية. إلا أن مواجهة هذه التحديات لا تتطلب حلولاً تقنية فقط، بل أيضاً جهوداً تنموية وتشاركية على عدة مستويات.

في مصر، على سبيل المثال، تم إطلاق مبادرات مشتركة بين المنظمات الدولية والحكومة المحلية لتدريب المزارعين على استخدام تقنيات الزراعة الذكية، وتوفير أدوات ميسرة الاستخدام وموائمة للبيئة المحلية، مما أسهم في تخطي عدد من العوائق الأولية (FAO Egypt, 2020) . كما أن تشجيع الاستثمار في التكنولوجيا الزراعية، من خلال توفير حوافز مالية ودعم للشراكات بين القطاعين العام والخاص، يعد من الركائز الضرورية لنشر هذه التقنيات (Rose *et al*., 2021).

في المحصلة، فإن تبني الزراعة الذكية كمسار لتحقيق الاستدامة الزراعية لا يُعد ترفاً، بل أصبح ضرورة في عالم تتسارع فيه وتيرة التغيرات البيئية والاقتصادية. لكن نجاح هذا التحول يعتمد على مدى قدرتنا على مواجهة التحديات وتكييف الحلول التكنولوجية مع السياقات المحلية.

10. الخاتمة

تمثل الزراعة الذكية اليوم أكثر من مجرد مجموعة أدوات رقمية أو تقنيات متطورة؛ إنها نقلة نوعية شاملة في مسيرة التحول نحو الزراعة المستدامة. فهي تعكس فلسفة جديدة في التعامل مع البيئة الزراعية، تقوم على الدمج المتوازن بين المعرفة التقليدية المتوارثة عبر الأجيال، والابتكارات العلمية الحديثة، بهدف تحقيق إنتاجية زراعية مرتفعة، مع الحدّ من الأثر البيئي والمحافظة على الموارد الحيوية مثل المياه والتربة.

لكن هذا التحول لا يمكن أن يُكتب له النجاح الكامل دون توفير بيئة داعمة على كافة المستويات. فنجاح الزراعة الذكية يتطلب وجود سياسات حكومية واضحة ورشيدة تشجع على تبني التكنولوجيا وتدعم الابتكار في القطاع الزراعي، إلى جانب تعزيز الشراكات الفاعلة بين القطاعين العام والخاص لتوفير التمويل، وتبادل المعرفة، وتطوير أدوات تقنية ميسورة التكلفة وملائمة للبيئات المحلية.

ومن جهة أخرى، لا غنى عن برامج تدريبية مستمرة ترفع من جاهزية المزارعين، وتساعدهم على فهم وتشغيل الأنظمة الذكية، وتُعيد صياغة دورهم من منفذين تقليديين

إلى مديرين متفاعلين مع بيانات حية وقرارات استراتيجية .ويبقى التحدي الأهم في الوصول العادل للتكنولوجيا، خاصة في المناطق الريفية والهامشية، ما يتطلب استثماراً طويل الأمد في البنية التحتية الرقمية، وتوفير الإنترنت والطاقة والتقنيات الذكية بأسعار مناسبة.

وفي النهاية، فإن بناء مستقبل زراعي مستدام لا يمكن أن يكون مسؤولية جهة واحدة، بل هو جهد تكاملي يشمل الحكومات، والمزارعين، والباحثين، والمجتمع المدني. فقط من خلال هذا التعاون الوثيق والتكامل الحقيقي، يمكن للزراعة الذكية أن تحقق أهدافها في حماية البيئة، وتعزيز الأمن الغذائي، وتحسين جودة الحياة للأجيال القادمة.

11. المراجع

Al-Gaadi, K. A., *et al*. (2015). Use of remote sensing and GIS techniques to map land use/land cover and monitor changes in Jazan Region, Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(3), 1579–1593. https://doi.org/10.1007/s12517-013-1062-2

Al-Mansoori, N., *et al*. (2021). Smart greenhouse management using IoT and AI: A case study in the UAE. *Sustainability*, 13(14), 7601. https://doi.org/10.3390/su13147601

Al-Omari, A. H., *et al*. (2020). Impact of smart irrigation systems on water conservation in Jordan. *Water*, 12(6), 1724. https://doi.org/10.3390/w12061724

Ben Rejeb, A., *et al*. (2020). Sustainable olive farming in Tunisia: Combining traditional and precision agriculture practices. *Agricultural Systems*, 180, 102794. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102794

Bongiovanni, R., & Lowenberg-Deboer, J. (2004). Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture*, 5(4), 359–387. https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa

El Hafid, A., *et al*. (2019). Water resources management in Souss Massa basin, Morocco: An integrated approach using remote

sensing. *Water*, 11(3), 591. https://doi.org/10.3390/w11030591

Elsharabasy, M. A., *et al*. (2018). Adoption of decision support systems in Egyptian Delta agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.016

FAO. (2019). *The State of Food and Agriculture 2019: Moving forward on food loss and waste reduction*. Rome: Food and Agriculture Organization. https://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf

FAO Egypt. (2020). Enhancing farmer capacity in precision agriculture: Egypt case study. Food and Agriculture Organization Regional Office for Near East and North Africa.

Li, S., *et al*. (2019). Application of UAV in agricultural field for pesticide spraying. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 25(2), 83-95. https://doi.org/10.13031/jash.13117

Makhoul, Y., *et al*. (2022). Smart organic farming: A Lebanese case study integrating IoT and traditional practices. *Sustainable Agriculture Reviews*, 49, 213-230.

Pretty, J. (2008). Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 447–465. https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2163

Rose, D. C., Chilvers, J., & Klerkx, L. (2021). Regulating agricultural digital innovation: ethical dilemmas and responsibilities. *Agriculture and Human Values*, 38, 1435–1451. https://doi.org/10.1007/s10460-021-10229-z

Tilman, D., *et al*. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *PNAS*, 108(50), 20260–20264. https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108

Wolfert, S., *et al*. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2014). Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and Electronics in*

Agriculture, 36(2-3), 113-132. https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.03.016

الفصل 11 - مستقبل الزراعة في ظل التغيرات المناخية والتقنيات الذكية

المحتويات

1. المقدمة
2. السيناريوهات المستقبلية للزراعة تحت تأثير التغير المناخي
3. التوجهات التقنية الجديدة في الزراعة الذكية
4. دور الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء في الزراعة المستقبلية
5. الاستراتيجيات الوطنية والدولية لدعم الزراعة الذكية
6. تحديات التوسع في تبني التكنولوجيا
7. الرؤى والتوصيات الاستراتيجية لمستقبل مستدام
8. الخاتمة
9. المراجع

1. المقدمة

دخلت الزراعة العالمية اليوم مرحلة دقيقة ومعقدة، يطغى عليها القلق من تغيرات مناخية متسارعة وضغوط متنامية على الموارد الطبيعية. لم يعد الأمر متعلقاً فقط بتغير درجات الحرارة أو شح المياه، بل بات يشمل أيضاً تحولات جذرية في أنماط الزراعة، وأساليب الري، وتوقيتات الزراعة، بل وحتى أنواع المحاصيل الممكنة في بيئات كانت تقليدياً زراعية. أمام هذا الواقع، برزت الزراعة الذكية ليس فقط كخيار تقني حديث، بل كاستراتيجية ضرورية لبقاء القطاع الزراعي قادراً على التكيف والاستمرار.

إن دمج تقنيات مثل الذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء، والتحليل البياني المتقدم، يتيح فرصاً غير مسبوقة لتعزيز الكفاءة الإنتاجية، والتعامل الاستباقي مع المخاطر البيئية، وتقليل البصمة الكربونية للزراعة (IPCC, 2022; FAO, 2022). وبذلك تتحول الزراعة الذكية من مجرد أداة تقنية إلى منظومة متكاملة تدعم المرونة المناخية والاستدامة طويلة الأمد.

2. السيناريوهات المستقبلية للزراعة تحت تأثير التغير المناخي

تشير النماذج المناخية المستقبلية إلى أن القطاع الزراعي سيكون من أكثر القطاعات تأثراً بتداعيات تغير المناخ .ارتفاع درجات الحرارة، واضطراب أنماط الأمطار، وتزايد تواتر الظواهر المناخية القصوى مثل الجفاف والفيضانات، كلها عوامل تهدد استقرار الإنتاج الزراعي، خصوصاً في المناطق القاحلة وشبه القاحلة.

في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، التي تُعد من أكثر المناطق هشاشة مناخية، يُتوقع أن تنخفض محاصيل الحبوب بنسبة 20-30% حلول عام 2050 نتيجة ندرة المياه والتغيرات المناخية (FAO, 2021). ولا يقتصر التأثير على الكميات المنتجة، بل يشمل أيضاً جودة المحاصيل، وتنوعها، وقدرة المجتمعات المحلية على تحقيق أمن غذائي مستقر.

من هنا، تبرز الحاجة إلى استراتيجيات زراعية مرنة، تتكيف مع الظروف المتغيرة، وتُسهم في إدارة الموارد بشكل أكثر كفاءة، وهو ما توفره تقنيات الزراعة الذكية. فالتنبؤ بالمخاطر، وتوجيه الموارد بدقة، والاستجابة الفورية، لم تعد رفاهية، بل ضرورة للبقاء في وجه مناخٍ يتغير بوتيرة غير مسبوقة.

3. التوجهات التقنية الجديدة في الزراعة الذكية

الزراعة الدقيقة (Precision Agriculture)

تُعد الزراعة الدقيقة من أكثر التطبيقات نجاحاً في ميدان الزراعة الذكية، حيث تعتمد على مجموعة من التقنيات مثل الحساسات الأرضية، الصور الفضائية، والطائرات بدون طيار، لجمع بيانات دقيقة ومستمرة عن حالة التربة، محتوى الرطوبة، ونمو النباتات. هذه البيانات تتيح اتخاذ قرارات مدروسة بخصوص توقيت التسميد والري واستخدام المبيدات، مما يقلل الهدر ويزيد الكفاءة (Kamilaris *et al*., 2017).

مثال على ذلك، مشروع "مزارع الإمارات الذكية"، الذي اعتمد على الطائرات بدون طيار لجمع بيانات حرارية ونطاقية متقدمة، ساعدت في تحديد مناطق الري والتسميد بشكل دقيق، مما أدى إلى تحسين الإنتاج وتقليل التكاليف التشغيلية (Ministry of Climate Change and Environment UAE, 2023).

الذكاء الاصطناعي (AI) والتعلم الآلي

يشكل الذكاء الاصطناعي أحد أكثر أدوات الزراعة الذكية تقدماً، إذ يُستخدم لتحليل البيانات الزراعية الضخمة(Big Data) ، والتنبؤ بأمراض وآفات المحاصيل، وتحديد أفضل فترات الزراعة بناءً على الظروف المناخية المتوقعة .(Liakos *et al.,* 2018) كما يمكن للنماذج الذكية تحديد احتياجات النباتات من المياه بدقة، وهو ما يساهم في خفض الاستهلاك وتحقيق الري المستهدف.

في هولندا، على سبيل المثال، تم تطوير نظام ذكي للري يعتمد على الذكاء الاصطناعي، أدى إلى تخفيض استهلاك المياه بنسبة 30%، دون الإخلال بإنتاجية المحاصيل .(Wolfert *et al.*, 2017)هذه النتائج تعكس كيف يمكن للذكاء الاصطناعي أن يحوّل المزارع إلى بيئة معلوماتية ديناميكية تستجيب في الوقت الفعلي للمتغيرات البيئية.

إنترنت الأشياء(IoT)

تعمل تقنية إنترنت الأشياء على تحويل الحقول الزراعية إلى شبكات تفاعلية مترابطة، من خلال استخدام حساسات دقيقة تتابع درجات الحرارة، الرطوبة، مستويات المغذيات في التربة، وغيرها من المؤشرات الحيوية. هذه البيانات تُرسل مباشرة إلى مراكز تحكم وتحليل، تتيح للمزارع اتخاذ قرارات مدروسة وفورية (Wolfert *et al*., 2017).

وفي الأردن، أطلق مشروع "المزرعة الذكية" الذي يعتمد على ربط شبكات الحقول بحساسات بيئية دقيقة، مكنّت من مراقبة عمليات الري والتسميد بدقة، مما أدى إلى زيادة الإنتاجية بنسبة 20% وخفض استهلاك المياه بشكل ملحوظ (Jordan Ministry of Agriculture, 2022).

الطائرات بدون طيار(Drones)

أصبحت الطائرات بدون طيار أداة أساسية في الزراعة الحديثة، لما توفره من رؤية شاملة وسريعة للمزارع، مع القدرة على كشف الأمراض النباتية ومواقع الآفات، ورصد مراحل نمو المحاصيل بكفاءة عالية. كما تُمكّن هذه الطائرات من رش المبيدات أو الأسمدة بشكل موجه ومحدّد، ما يقلل التكاليف ويخفف من التلوث البيئي (Kamilaris *et al*., 2017).

وفي الصين، يتم استخدام هذه الطائرات في مشاريع الري الذكي، حيث أظهرت الدراسات أن استخدام هذه التقنية أدى إلى تقليل فاقد المياه بنسبة 40%، وهو إنجاز مهم في ظل الضغوط المتزايدة على الموارد المائية (FAO, 2022).

4. دور الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء في الزراعة المستقبلية

إن التكامل بين الذكاء الاصطناعي (AI) وإنترنت الأشياء (IoT) لم يعد مفهوماً نظرياً، بل أصبح واقعاً ملموساً يُحدث ثورة في نظم الزراعة الحديثة. يجتمع هذان المجالان لتشكيل نظام زراعي ذكي قادر على التعلم الذاتي والتكيف المستمر مع المتغيرات المناخية والبيئية، ما يعزز القدرة التنبؤية ويوفر آليات استجابة دقيقة في الوقت الحقيقي.

تتمثل إحدى أبرز التطبيقات العملية لهذا التكامل في منصة "AgriSense" بالهند، التي طورت منظومة متكاملة تجمع البيانات البيئية من الحقول الزراعية عبر الحساسات المتصلة، وترسلها إلى خوارزميات الذكاء الاصطناعي لتحليلها. يتم بناءً على هذه التحليلات تقديم توصيات دقيقة حول أوقات الري وكميات التسميد المثلى، مما أدى إلى زيادة إنتاجية القمح بنسبة 25%، مع تقليل التكاليف التشغيلية (Rose *et al*., 2021).

هذا المثال يعكس بوضوح إمكانات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء في تحويل الزراعة من نمط تقليدي إلى نموذج قائم على المعرفة والتحليل، يعتمد على البيانات الحية أكثر من التخمين والتجربة، ما يُعزز الكفاءة والمرونة ويحد من إهدار الموارد.

5. الاستراتيجيات الوطنية والدولية لدعم الزراعة الذكية

في مواجهة التحديات البيئية والاقتصادية، اتجهت العديد من الدول إلى وضع استراتيجيات وطنية طموحة لتعزيز الزراعة الذكية، مستندة إلى سياسات واضحة، وتعاون دولي فاعل، واستثمار في الموارد البشرية والتقنية. وفيما يلي نماذج بارزة لهذه التوجهات:

- **المغرب**: أطلقت الحكومة استراتيجية وطنية للتحول الرقمي في القطاع الزراعي، تهدف إلى رفع كفاءة المهندسين الزراعيين من خلال التدريب، وتحسين البنية التحتية الرقمية لتمكين تقنيات الزراعة الذكية في المناطق الريفية (El Harrak *et al.*, 2021).
- **الإمارات العربية المتحدة**: تبنت خطة وطنية طموحة بعنوان "الزراعة الذكية 2030"، ترتكز على استغلال الطاقة الشمسية وتوظيف الذكاء الاصطناعي لتحسين الإنتاج الزراعي وتقليل الانبعاثات الكربونية (Ministry of Climate Change and Environment UAE, 2023).
- **على المستوى الدولي**، تقدم منظمات مثل الفاو والبنك الدولي دعماً فنياً ومالياً لمشاريع الزراعة الذكية في عدد من الدول الإفريقية والآسيوية، بهدف تسريع التحول الرقمي في المجتمعات الزراعية الهشة (FAO, 2022).

تُعد هذه المبادرات مؤشراً على التحول من النماذج التقليدية إلى أنظمة أكثر استدامة وكفاءة، وتعكس التزاماً سياسياً ورؤى استراتيجية متقدمة.

6. تحديات التوسع في تبني التكنولوجيا

رغم التقدم التقني الهائل، ما زال تعميم الزراعة الذكية يواجه عدداً من التحديات البنيوية والاقتصادية، تتطلب حلولاً شاملة لتجاوزها وضمان استدامة التطبيق. من أبرز هذه التحديات:

- **التمويل**: يشكل ارتفاع تكلفة الأجهزة الذكية والتقنيات المرتبطة بها عقبة كبيرة أمام المزارعين الصغار، الذين غالباً ما يفتقرون إلى القدرة على الاستثمار في أدوات الزراعة الذكية (Rose *et al*., 2021).
- **نقص الكفاءات البشرية**: يفتقر العديد من المناطق الزراعية إلى كوادر مدربة ومؤهلة للتعامل مع الأنظمة الرقمية وتحليل البيانات، ما يحد من كفاءة التنفيذ ويضعف الاستفادة الكاملة من الإمكانات التقنية (Wolfert *et al*., 2017).
- **البنية التحتية**: تعاني المناطق الريفية، خصوصاً في الدول النامية، من ضعف التغطية الرقمية وشبكات الإنترنت، ما يُعيق تشغيل الأجهزة الذكية ويفقدها جزءاً كبيراً من فعاليتها (El Harrak *et al.,* 2021).
- **القوانين والتنظيمات**: لا تزال بعض الدول تفتقر إلى أطر تشريعية واضحة لحماية البيانات الزراعية وضمان الخصوصية، وتحديد المسؤوليات القانونية للأطراف المختلفة في سلسلة القيمة (Rose *et al*., 2021).

هذه التحديات، وإن بدت تقنية في ظاهرها، إلا أنها تعكس أبعاداً تنموية وهيكلية أعمق تتطلب معالجات شمولية تجمع بين البنية التحتية، والتعليم، والتشريع، والدعم المالي.

7. الرؤى والتوصيات الاستراتيجية لمستقبل مستدام

لضمان مستقبل زراعي ذكي ومستدام، هناك حاجة إلى رؤية استراتيجية متكاملة تنطلق من الواقع وتستشرف المستقبل. ومن بين التوصيات التي يمكن أن تُحدث تحولاً ملموساً في هذا السياق:

- زيادة الاستثمارات في البنية التحتية الرقمية والبحث العلمي لتوفير بيئة تقنية متقدمة تدعم الابتكار الزراعي وتحفّز على تطوير حلول محلية مناسبة.

- تطوير مناهج تعليمية وبرامج تدريبية تخصصية في الزراعة الذكية، تستهدف المزارعين، والمهندسين الزراعيين، وصناع القرار، بهدف بناء جيل قادر على قيادة التحول.
- تعزيز التعاون بين القطاعين العام والخاص والمؤسسات البحثية، بما في ذلك دعم حاضنات الابتكار الريفي وتمويل المشاريع الريادية.
- تبني سياسات واضحة تشجع الاستخدام الأخلاقي والمسؤول للتكنولوجيا، وتحمي البيانات والمجتمعات من سوء الاستخدام.
- تشجيع الابتكار المحلي وتطوير حلول تكنولوجية تتناسب مع الواقع البيئي والاجتماعي للمجتمعات الزراعية المختلفة، بدلاً من الاعتماد الكامل على النماذج المستوردة.(Kamilaris *et al.*, 2017)

هذه التوصيات ليست مجرد أفكار نظرية، بل تمثل خارطة طريق عملية يمكن أن تسهم في توجيه جهود التحول الزراعي نحو نموذج أكثر عدالة واستدامة وابتكاراً.

8. الخاتمة

تظل التغيرات المناخية المتسارعة، وتراجع الموارد، وتزايد الحاجة إلى الأمن الغذائي، تبدو الزراعة الذكية الخيار الأوفر حظاً لبناء مستقبل زراعي resilient ومستدام .من خلال الاستفادة من أدوات الذكاء الاصطناعي، وإنترنت الأشياء، والزراعة الدقيقة، يمكن تعزيز الإنتاجية، وتحسين جودة المحاصيل، وتقليل الأثر البيئي على المدى الطويل.

غير أن نجاح هذا التحول يتطلب أكثر من مجرد توفر التكنولوجيا، بل يحتاج إلى إرادة سياسية، ودعم تشريعي، وتعاون إقليمي ودولي، إضافة إلى إشراك المجتمعات المحلية وتدريبها لتكون جزءاً فاعلاً من هذه المنظومة المتقدمة. إن التحول الرقمي الزراعي ليس غاية بحد ذاته، بل وسيلة لضمان مستقبل أكثر مرونة وعدالة للأجيال القادمة.

9. المراجع

El Harrak, M., *et al*. (2021). Implementation of AI and IoT technologies for smart water management in Moroccan agriculture. *Agricultural Water Management*, 243, 106492. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106492

FAO. (2021). *Climate Change and Food Security: Risks and Responses*. Rome: Food and Agriculture Organization.

FAO. (2022). *The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging digital innovations to transform agri-food systems*. Rome: Food and Agriculture Organization.

IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press.

Jordan Ministry of Agriculture. (2022). Smart Farming Initiatives in Jordan: Achievements and Prospects.

Kamilaris, A., *et al*. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 23-37.

Liakos, K. G., *et al*. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. https://doi.org/10.3390/s18082674

Ministry of Climate Change and Environment UAE. (2023). UAE Smart Agriculture Strategy 2030.

Rose, D. C., *et al*. (2021). Regulating agricultural digital innovation: ethical dilemmas and responsibilities. *Agriculture and Human Values*, 38, 1435–1451.

Wolfert, S., *et al*. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80.

الفصل 12 - أدوات وتقنيات الزراعة الذكية: الحساسات، الروبوتات، والتطبيقات العملية

المحتويات

1. المقدمة
2. الحساسات وأنواعها في الزراعة الذكية
3. الروبوتات الزراعية وأتمتة العمليات
4. نظم دعم القرار الزراعي (DSS)
5. تطبيقات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء (IoT) في الزراعة الذكية
6. تحديات تطبيق الروبوتات الزراعية
7. دراسات حالة من العالم العربي
8. التطبيقات الدولية والتقنيات المتقدمة
9. تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الزراعة الذكية
10. الخاتمة
11. المراجع

1. المقدمة

تُعد الأدوات والتقنيات الحديثة من الركائز الأساسية التي تدعم مفهوم الزراعة الذكية، حيث تُتيح هذه التقنيات جمع البيانات بدقة وتحليلها بشكل فعال، مما يمكّن المزارعين من اتخاذ قرارات مبنية على معلومات دقيقة. تشمل هذه الأدوات الحساسات الأرضية، الروبوتات الزراعية، تقنيات الاستشعار عن بعد، وأنظمة إدارة البيانات، بالإضافة إلى تطبيقات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء (IoT) التي تعزز من فعالية العمليات الزراعية (Wolfert *et al.*, 2017).

في السياق العربي، بدأت بعض الدول مثل الإمارات العربية المتحدة والمملكة العربية السعودية في تبني تقنيات الزراعة الذكية ضمن مشروعات وطنية لتعزيز الأمن الغذائي وتقليل استهلاك الموارد، مثل مشروع "الزراعة الذكية في الصحراء" باستخدام

الروبوتات والطائرات بدون طيار (طائرات الدرون) للمراقبة الزراعية (FAO, 2021). وعلى الصعيد العالمي، تشهد الولايات المتحدة، الصين، وهولندا تطورات بارزة في استخدام الحساسات الدقيقة والروبوتات لتنفيذ عمليات الري، المكافحة، والحصاد بكفاءة عالية (Liakos *et al*., 2018). يلخص الشكل التالي فوائد الزراعة الذكية (Mitra, *et al*., 2022).

يهدف هذا الفصل إلى تقديم رؤية متكاملة حول أهم الأدوات والتقنيات التي تُستخدم في الزراعة الذكية، مع تسليط الضوء على التطبيقات العملية والتحديات التي تواجه استخدامها، مما يتيح للمهنيين والطلاب فهم كيفية دمج هذه الأدوات ضمن أنظمة زراعية مستدامة وفعالة.

2. الحساسات وأنواعها في الزراعة الذكية

تلعب الحساسات دوراً جوهرياً في جمع البيانات الدقيقة حول البيئة الزراعية. فهي توفر قياسات متواصلة لحالة التربة، المناخ، والهواء، مما يتيح اتخاذ قرارات مبنية على حقائق وبيانات آنية.

- **حساسات رطوبة التربة:** تعتبر من أكثر الحساسات أهمية في تحسين كفاءة الري. إذ تتيح معرفة كمية الماء الموجودة في التربة بدقة، وبالتالي تقليل الفاقد من المياه، وتعزيز نمو النبات. في مصر، نجح مشروع "الري الذكي في دلتا النيل" باستخدام هذه الحساسات في تقليل استهلاك المياه وتحسين الإنتاج الزراعي بشكل ملحوظ (FAO, 2020).
- **حساسات درجة الحرارة والرطوبة الجوية:** تراقب هذه الحساسات الظروف البيئية الدقيقة، خاصة داخل البيوت المحمية، مما يساعد في ضبط المناخ الداخلي ليناسب متطلبات النبات المختلفة.
- **حساسات جودة الهواء:** تكتشف ملوثات الغازات الضارة التي قد تؤثر على نمو المحاصيل، وتساعد في اتخاذ إجراءات وقائية سريعة.
- **حساسات الضوء:** تقيس شدة الإضاءة، وتستخدم في البيوت المحمية لضبط مستوى الضوء المناسب لتعزيز عملية التمثيل الضوئي، ما يؤدي إلى تحسين جودة المحصول.

على الصعيد الدولي، تستخدم هولندا هذه الحساسات بشكل متقدم في مزارع الطماطم ضمن البيوت المحمية، حيث ساعدت في زيادة الإنتاجية وتقليل استهلاك الموارد الطبيعية بشكل فعال (Gebbers & Adamchuk, 2010).

3. الروبوتات الزراعية وأتمتة العمليات

تُعد الروبوتات الزراعية من التقنيات المتقدمة التي أحدثت ثورة في طريقة أداء العمليات الزراعية، حيث استطاعت أن تقلل الاعتماد على اليد العاملة بشكل كبير، وتزيد من دقة وكفاءة الأعمال الزراعية المختلفة. تتميز هذه الآلات بقدرتها على تنفيذ مهام متعددة بشكل آلي ومتقن، من الزراعة إلى الحصاد، مروراً بعمليات المكافحة والتسميد، مع تحقيق مستويات عالية من الدقة وتقليل الهدر.

- **الروبوتات الميدانية**

تشمل هذه الفئة من الروبوتات أجهزة ذكية قادرة على أداء مهام محددة داخل الحقول بشكل تلقائي. على سبيل المثال، تقوم هذه الروبوتات بزراعة البذور بدقة متناهية، حيث يتم تحديد موقع الزراعة المناسب بناءً على بيانات التربة والطقس. كذلك تستخدم في رش المبيدات بشكل مستهدف، مما يقلل من استخدام المواد الكيميائية ويحمي البيئة. بالإضافة إلى ذلك، تشارك الروبوتات الميدانية في عمليات الحصاد، حيث يمكنها جمع المحاصيل دون التسبب في تلف النباتات، مما يحسن جودة الإنتاج ويزيد من سرعة الإنجاز. هذا النوع من الروبوتات يساعد المزارعين في تقليل الأخطاء البشرية، كما يخفف العبء البدني ويُسرع العمليات الزراعية بشكل عام.

- **الطائرات بدون طيار (الدرون)**

أصبحت الطائرات بدون طيار أداة لا غنى عنها في الزراعة الحديثة، إذ تستخدم في مراقبة صحة المحاصيل من خلال الكاميرات متعددة الأطياف التي تلتقط صوراً دقيقة للنباتات. تساعد هذه الصور في اكتشاف الأمراض والآفات مبكراً قبل تفشيها، مما يمكّن المزارعين من التدخل السريع والفعال. كما تُستخدم هذه الطائرات لتقييم حالة النباتات، مثل الرطوبة والنمو، وجمع بيانات بيئية متنوعة مثل درجات الحرارة ومستويات الإشعاع الشمسي، مما يوفر رؤية شاملة دقيقة عن الحقل. تساعد

الطائرات بدون طيار أيضاً في تخطيط عمليات الري والتسميد بكفاءة من خلال تغطية مساحات كبيرة في وقت قصير.

- **الروبوتات المتنقلة الذكية**

تمثل الروبوتات المتنقلة الذكية نقلة نوعية في إدارة المزارع، فهي تجمع بيانات ميدانية في الوقت الحقيقي عبر حساسات متطورة، ثم ترسل هذه البيانات إلى أنظمة التحليل المركزية. هذا يسمح بالمراقبة المستمرة للحالة الزراعية، مثل صحة النبات، ونوعية التربة، ومستويات الرطوبة، إضافة إلى مراقبة الآفات. بفضل هذه المعلومات الدقيقة، يمكن للمزارعين اتخاذ قرارات مستنيرة بسرعة، مما يؤدي إلى تحسين إدارة الموارد وتقليل الخسائر وزيادة الإنتاجية.

- **أمثلة تطبيقية**

في الولايات المتحدة، طورت شركات رائدة مثل John Deere روبوتات ذكية متقدمة مخصصة للحصاد الآلي. تتميز هذه الروبوتات بقدرتها على تحديد المناطق التي تحتاج إلى معالجة خاصة أو عناية إضافية، مما يساعد في تقليل الهدر وزيادة كفاءة العمل الزراعي (Bac *et al*., 2014). تعتمد هذه الروبوتات على تقنيات الاستشعار والذكاء الاصطناعي لتحليل البيئة المحيطة واتخاذ الإجراءات المناسبة تلقائياً.

على المستوى العربي، تُظهر الإمارات العربية المتحدة التزاماً واضحاً بتبني هذه التقنيات المتقدمة في بيئات صحراوية قاسية من خلال مشروع "الزراعة الروبوتية الصحراوية". يستخدم هذا المشروع الروبوتات والطائرات بدون طيار لمراقبة الأراضي الزراعية وتحسين الإنتاج، ما يسهم في تعزيز الأمن الغذائي وتقليل الاعتماد على الموارد التقليدية (Zayed University, 2022) . هذا النموذج يبرهن على قدرة التكنولوجيا الحديثة في التغلب على تحديات البيئة الصحراوية من خلال تطبيق حلول ذكية وفعالة.

4. نظم دعم القرار الزراعي (DSS)

تُعتبر نظم دعم القرار الزراعي أدوات برمجية تجمع البيانات من الحساسات والروبوتات، وتحللها لتوفير توصيات عملية للمزارعين. تشمل:

- تحليل بيانات الطقس.
- توصيات ري وتسميد.
- توقعات المحاصيل والإدارة المتكاملة للآفات.

تساعد هذه الأنظمة في تحسين الإنتاجية وتقليل التكاليف البيئية.

مثال دولي: نظام DSS في كندا "AgriSuite" يساعد المزارعين على تخطيط الري والتسميد بدقة عالية (Bouraoui *et al*., 2020).

مثال عربي في الأردن، تطوير نظام DSS يستخدم بيانات الأقمار الصناعية وحساسات محلية لدعم المزارعين في التنبؤ بالمحاصيل وإدارة المياه (Jordan Ministry of Agriculture, 2021).

تشكل نظم دعم القرار الزراعي (Decision Support Systems - DSS) أحد أهم أدوات التحول نحو الزراعة الذكية، حيث تُسهم بشكل حاسم في تحويل البيانات الزراعية الخام إلى معلومات قابلة للتنفيذ. وتعتمد هذه الأنظمة على تحليل البيانات المجمعة من مصادر متعددة مثل الحساسات الأرضية، الأقمار الصناعية، الروبوتات، وسجلات الإنتاج السابقة، لتقديم توصيات مخصصة للمزارعين والمخططين الزراعيين.

4.1. وظائف نظم دعم القرار في الزراعة الذكية:

1. **تحليل بيانات الطقس والمناخ:** تقوم هذه الأنظمة بتحليل معطيات الأرصاد الجوية المتغيرة باستمرار (مثل درجات الحرارة، معدلات الأمطار، سرعة الرياح، الرطوبة) لتقدير أفضل الأوقات للزراعة أو الحصاد أو مكافحة الآفات.

2. **توصيات الري والتسميد الدقيقة (Precision Irrigation and Fertilization):** من خلال دمج بيانات رطوبة التربة ونوعية المياه مع نماذج النمو النباتي، يستطيع النظام اقتراح كميات وتوقيتات دقيقة للري والتسميد، ما يؤدي إلى تقليل استهلاك الموارد وتحسين الجودة.
3. **التنبؤ بالإنتاج والإدارة المتكاملة للآفات:** تعتمد هذه الوظيفة على النمذجة الإحصائية وتحليل بيانات الحقول للتنبؤ بإنتاجية الموسم الزراعي، وكذلك رصد احتمالات تفشي الآفات والأمراض، واقتراح تدخلات وقائية في الوقت المناسب.
4. **إدارة الزراعة على المستوى الإقليمي والوطني:** تُستخدم نظم DSS من قبل صانعي السياسات لتقييم تأثيرات التغيرات المناخية على الزراعة وتخطيط استخدام الأراضي والموارد على نطاق أوسع.

4.2. مزايا نظم دعم القرار:

- **زيادة الإنتاجية:** بفضل اتخاذ قرارات مبنية على البيانات، تُحقق المحاصيل أداءً أفضل مع تقليل الهدر.
- **تحسين الاستدامة:** تساعد في الاستخدام الأمثل للمياه والأسمدة، مما يقلل الأثر البيئي.
- **خفض التكاليف:** من خلال تحسين توقيت وتوزيع المدخلات الزراعية.
- **التخصيص حسب الظروف المحلية:** توفر توصيات مخصصة حسب نوع المحصول، المناخ المحلي، ونوع التربة.

مثال دولي:

في **كندا**، يُعد نظام AgriSuite أحد أبرز نظم دعم القرار المستخدمة على نطاق واسع. طُور النظام لمساعدة المزارعين على تخطيط التسميد وفقاً لمتطلبات التربة والمحاصيل،

وكذلك إدارة جداول الري والحد من الجريان السطحي للأسمدة إلى المجاري المائية. يعتمد AgriSuite على نماذج محاكاة دقيقة لتحليل التربة والظروف المناخية، ويُستخدم حالياً على نطاق واسع في مقاطعات مثل أونتاريو وكيبيك (Bouraoui *et al*., 2020).

مثال عربي:

في **الأردن**، أطلقت وزارة الزراعة بالتعاون مع مؤسسات أكاديمية مشروعاً رائداً لتطوير نظام DSS زراعي متكامل يعتمد على:

- صور الأقمار الصناعية لتحليل الغطاء النباتي.
- بيانات الحساسات الأرضية لقياس رطوبة التربة والظروف المناخية.
- نماذج تنبؤية بالذكاء الاصطناعي لتحديد موعد الزراعة المثالي وتوقع الأمراض.

ساهم هذا النظام في تحسين قدرة المزارعين على تخطيط استخدام المياه، خاصة في المناطق شبه الجافة، كما ساعد في تعزيز إنتاجية المحاصيل الأساسية مثل القمح والشعير (Jordan Ministry of Agriculture, 2021).

تمثل نظم دعم القرار الزراعي العمود الفقري للزراعة الذكية، إذ تتيح التحول من الزراعة التقليدية المعتمدة على الحدس والخبرة إلى الزراعة القائمة على البيانات والتحليل الذكي. وتُعد استثمارات الدول العربية في تطوير DSS مؤشراً على إدراكها العميق لأهمية التكنولوجيا في مواجهة التحديات الزراعية المعاصرة، خاصة في ظل التغير المناخي وشح الموارد.

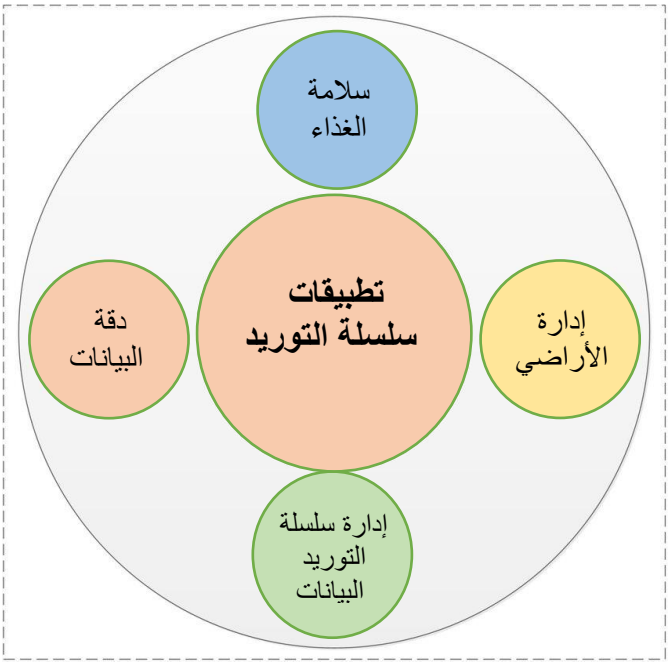
4.3. جدول: نظم دعم القرار الزراعي (DSS) في الزراعة الذكية

العنصر	الشرح والتفصيل	أمثلة وتطبيقات
تعريف DSS	أدوات برمجية تحليلية تجمع البيانات الزراعية من الحساسات، الروبوتات، الأقمار الصناعية وسجلات الإنتاج، وتقدم توصيات عملية.	-

الوظائف الرئيسية	• تحليل بيانات الطقس • توصيات الري والتسميد • توقع الإنتاج والآفات • دعم القرار الإقليمي	-
تحليل بيانات الطقس	توقع التغيرات المناخية وتحديد أفضل توقيت للزراعة والحصاد	نظام DSS الكندي يستخدم بيانات الأرصاد الجوية لتخطيط العمليات الزراعية (Bouraoui *et al.*, 2020)
توصيات دقيقة للري والتسميد	تعتمد على تحليل رطوبة التربة، احتياجات النبات، والطقس لتحديد كميات الري والتسميد بدقة عالية	نظام AgriSuite يقدم توصيات دقيقة لتوزيع السماد والماء في كندا
توقع الإنتاج وإدارة الآفات	نماذج تنبؤية تساعد في تقليل استخدام المبيدات وتحسين جودة المحصول	الأردن يستخدم DSS مبني على الذكاء الاصطناعي لرصد الآفات وتحديد توقيت الزراعة (Jordan Ministry of Agriculture, 2021)
دعم السياسات الزراعية الوطنية	توفير بيانات لصانعي القرار لتخطيط استخدام الأراضي وتقييم أثر التغير المناخي	-
المزايا	• حسين الإنتاجية • خفض التكاليف • الاستدامة البيئية • تخصيص التوصيات وفق الظروف المحلية	-
مثال دولي	نظام AgriSuite في كندا: يحلل التربة والطقس، يقدم توصيات دقيقة للري والتسميد، ويقلل من التلوث الزراعي	(Bouraoui *et al.*, 2020)
مثال عربي	الأردن: تطوير DSS يستخدم الأقمار الصناعية والحساسات الأرضية والذكاء الاصطناعي لتحسين استخدام المياه وزيادة الإنتاج	(Jordan Ministry of Agriculture, 2021)

5. تطبيقات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء (IoT) في الزراعة الذكية

أصبح الذكاء الاصطناعي (AI) وإنترنت الأشياء (IoT) من أقوى الأدوات التكنولوجية في دعم الزراعة الذكية الحديثة، حيث يُمثلان نقلة نوعية في الطريقة التي تُدار بها العمليات الزراعية على مختلف المستويات.



تطبيقات AI في الزراعة الذكية (الأعلى) وسلسلة الكتلة Blockchain في الزراعة الذكية (Ahmed, *et al*. 2024)

5.1. الذكاء الاصطناعي في الزراعة: من التوقع إلى اتخاذ القرار

الذكاء الاصطناعي ليس مجرد تقنية لتحليل البيانات فحسب، بل هو منظومة متكاملة تساعد على اتخاذ قرارات زراعية دقيقة وسريعة بالاعتماد على خوارزميات التعلم الآلي والتعلم العميق. يعمل الذكاء الاصطناعي على تحويل البيانات الخام القادمة من الحقول (مثل بيانات الحساسات، صور الأقمار الصناعية، والصور الجوية من الطائرات بدون طيار) إلى أنماط وتنبؤات قابلة للتنفيذ. من بين أبرز التطبيقات:

- **التنبؤ بالأمراض والآفات الزراعية**: تستخدم خوارزميات الذكاء الاصطناعي تحليل الصور الجوية والبيانات الميدانية لاكتشاف العلامات المبكرة للإصابة بالأمراض أو الآفات، ما يسمح باتخاذ إجراءات وقائية في وقت مبكر، وتقليل استخدام المبيدات بشكل كبير.
- **تحسين جداول الري والتسميد**: من خلال تحليل مستمر لبيانات التربة والمناخ، يستطيع الذكاء الاصطناعي تصميم جداول دقيقة للري والتسميد بناءً على احتياجات كل منطقة وكل نوع من المحاصيل، ما يسهم في خفض الفاقد من المياه والأسمدة.
- **أتمتة مراقبة المحاصيل وتحليل النمو**: يستطيع النظام الذكي متابعة تطور نمو النبات وتحليل صحته العامة، وإصدار تقارير دورية للمزارع أو إدارة المزرعة حول الأداء الإنتاجي والتغيرات البيئية، وحتى التنبؤ بمواعيد الحصاد المثلى.
- **التخطيط الزراعي طويل المدى**: يمكن للذكاء الاصطناعي ربط بيانات موسمية وسنواتية لتحديد الاتجاهات المناخية والإنتاجية، مما يساعد على اتخاذ قرارات استراتيجية بشأن أنواع المحاصيل والتوزيع المكاني للزراعة.

5.2. إنترنت الأشياء: البنية التحتية للزراعة الذكية

أما إنترنت الأشياء (IoT)، فهو الإطار الذي يربط بين كل الأدوات والمعدات الزراعية الذكية عبر شبكة واحدة، مما يسمح لها بالتواصل والتنسيق تلقائياً دون تدخل بشري مباشر. الأجهزة مثل الحساسات، أجهزة الري، أنظمة الإضاءة، وحتى الروبوتات، تصبح جزءاً من نظام واحد متصل يمكنه:

- **مشاركة البيانات في الزمن الحقيقي**: بمجرد أن تقوم حساسات الرطوبة على سبيل المثال بقياس جفاف التربة، تُرسل البيانات مباشرة إلى نظام التحكم الذي يقوم تلقائياً بتشغيل الري في المنطقة المحددة.
- **التحكم التلقائي عن بُعد**: يستطيع المزارع من خلال هاتفه المحمول أو لوحة تحكم ذكية مراقبة مزرعته والتحكم في أنظمة الري والتسميد، حتى وهو في موقع جغرافي مختلف.
- **الاستجابة للظروف الطارئة**: في حال حدوث تغير مناخي مفاجئ مثل موجة حر أو أمطار غزيرة، يمكن للنظام الذكي عبر إنترنت الأشياء أن يُعدل آلياً العمليات الزراعية لضمان سلامة المحصول.

5.3. حالات تطبيقية واقعية

مثال دولي: الصين – منصة Alibaba الذكية لإنتاج القمح

في الصين، قامت شركات رائدة مثل Alibaba Cloud بتطوير منصات زراعية ذكية تعتمد على تكامل AI و .IoT تعمل هذه المنصات على مراقبة متواصلة للظروف المناخية والتربة من خلال مئات الحساسات المنتشرة في الحقول، والتي تُغذّي خوارزميات الذكاء الاصطناعي ببيانات دقيقة تُستخدم لتحديد التوقيت الأمثل للري، التسميد، ومكافحة الآفات. هذا النظام ساعد في تقليل التكاليف وزيادة الإنتاجية وتحقيق توازن بيئي أفضل(Zhang *et al.*, 2019) .

مثال عربي: السعودية – مشروع "المزرعة الذكية في الرياض"

في المملكة العربية السعودية، يمثل مشروع "المزرعة الذكية في الرياض" نموذجاً متقدماً لتكامل إنترنت الأشياء في إدارة المزارع. يتم ربط الحساسات الخاصة بالرطوبة، الإضاءة، ودرجة الحرارة بنظام مركزي يقوم بالتحكم الآلي في أنظمة الري والإضاءة حسب احتياج كل منطقة في المزرعة. ساهم هذا النظام في تحسين كفاءة استخدام الموارد بنسبة تجاوزت 25%، وتقليل الاعتماد على التدخل اليدوي، مما جعله نموذجاً يحتذى به في بيئة صحراوية تتطلب كفاءة عالية في إدارة المياه والطاقة (KSA Ministry of Environment, Water and Agriculture, 2021).

5.4. التكامل بين AI و IoT: مستقبل الزراعة الذكية

عند دمج الذكاء الاصطناعي مع إنترنت الأشياء، يصبح لدينا نظام زراعي قادر على "الفهم" و"الاستجابة" و"التعلم". فالذكاء الاصطناعي يقدّم التحليل واتخاذ القرار، وإنترنت الأشياء ينفذ تلك القرارات على أرض الواقع من خلال الأجهزة المتصلة.

هذا التكامل يفتح آفاقاً واسعة في تطوير:

- **أنظمة زراعة ذاتية مستقلة بالكامل**: لا تحتاج لتدخل بشري مباشر، بل تُدار بكفاءة ذاتية كاملة.
- **مزارع تحليلية تنبؤية**: تتوقع الظروف البيئية والإنتاجية المستقبلية وتُخطط لها.
- **أنظمة زراعة حضرية ذكية (Urban Smart Farming)**: خاصة في البيوت الرأسية والمزارع داخل المدن.

في المحصلة، فإن الاعتماد على AI و IoT لم يعد مجرد خيار تقني، بل أصبح ركيزة من ركائز التحول الزراعي الذكي، القائم على الابتكار، الكفاءة، والاستدامة.

6. تحديات تطبيق الروبوتات الزراعية

على الرغم من الفوائد الكبيرة التي تقدمها الروبوتات الزراعية، إلا أن هناك مجموعة من التحديات التي تواجه تطبيقها الواسع في الزراعة، خاصة في الدول النامية والبيئات الصعبة:

- **التكلفة العالية:** تعتبر الروبوتات الزراعية أنظمة متطورة مكلفة في التصنيع والصيانة، مما يعيق وصولها إلى المزارعين الصغار والمتوسطين الذين يشكلون غالبية القطاع الزراعي في العديد من الدول.
- **البنية التحتية التكنولوجية:** تعتمد الروبوتات على شبكات اتصال مستقرة وسريعة، إلى جانب بنية تحتية رقمية متقدمة، وهو ما قد يكون محدوداً أو غير متوفر في مناطق زراعية نائية أو ريفية.
- **الحاجة إلى مهارات تقنية:** يتطلب تشغيل وصيانة الروبوتات مهارات فنية عالية، مما يستدعي توفير برامج تدريبية وتأهيلية للمزارعين والفنيين، وهو ما يمثل تحدياً في ظل ضعف أنظمة التعليم والتدريب الزراعي.
- **التكيف مع التنوع البيئي:** تختلف ظروف التربة والمناخ بشكل كبير بين المناطق الزراعية، مما يستدعي تعديل وبرمجة الروبوتات لتلائم هذه الاختلافات، وهو أمر معقد ويتطلب بحوثاً مستمرة وتطويراً متواصلاً.
- **المخاوف الاجتماعية والاقتصادية:** يثير استخدام الروبوتات قلقاً لدى بعض العاملين في القطاع الزراعي حول فقدان الوظائف بسبب الأتمتة، مما يستوجب سياسات اجتماعية تراعي إعادة التأهيل ودمج التكنولوجيا بشكل مستدام.

7. دراسات حالة من العالم العربي

شهدت العديد من الدول العربية تطوراً ملحوظاً في تطبيق تقنيات الزراعة الذكية، حيث تم اعتماد أنظمة متقدمة للحساسات والروبوتات وأنظمة دعم القرار لتعزيز الإنتاجية وتقليل الهدر المائي والبيئي.

7.1. العراق:

- **الزراعة الذكية في المناطق الصحراوية باستخدام الروبوتات والطائرات بدون طيار**

يشهد العراق توجهاً متزايداً نحو اعتماد التقنيات الذكية في الزراعة، خاصة في المناطق الصحراوية مثل محافظة الأنبار، حيث تم تطبيق نظام مراقبة ذكي يعتمد على الطائرات بدون طيار والروبوتات لجمع البيانات الميدانية وتحليلها بهدف تحسين الإنتاجية وتقليل استهلاك المياه. أظهرت دراسة أجراها العبادي وزملاؤه (2020) أن استخدام الروبوتات والطائرات بدون طيار في مراقبة المحاصيل أدى إلى زيادة كفاءة استخدام المياه بنسبة 30% وتقليل الفاقد من المحاصيل بنسبة 20%.

- **تطبيق نظم دعم القرار الزراعي (DSS) باستخدام بيانات الأقمار الصناعية**

قام مركز أبحاث الزراعة الرقمية في جامعة بغداد بتطوير نظام دعم قرار يعتمد على بيانات الأقمار الصناعية وحساسات أرضية محلية، حيث ساعد هذا النظام في تحسين جداول الري والتسميد والتنبؤ بمحاصيل الحبوب بدقة عالية (Mustafa *et al.*, 2023). وقد ساهم النظام في رفع إنتاجية القمح بنسبة 18% وتقليل الهدر في الموارد.

- **استخدام الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء في الزراعة المائية**

في مدينة البصرة، أطلقت وزارة الزراعة مشروعاً تجريبياً يستخدم الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء في التحكم الذكي بمزارع الزراعة المائية. وفقاً لبحث

علي وحسين (2024)، فقد أدى هذا المشروع إلى تحسين استغلال المياه بنسبة 40% وزيادة إنتاج الخضروات الورقية بنسبة 25%، مع تقليل التكاليف التشغيلية.

1.2. دولة الإمارات العربية المتحدة: "مزارع الإمارات الذكية" واستخدام تقنيات الإنترنت للأشياء (IoT) في إدارة المياه

تبنت شركة "مزارع الإمارات الذكية" نموذجاً مبتكراً للاستفادة من تقنيات الإنترنت للأشياء (IoT) عبر تركيب شبكة حساسات متطورة لمراقبة رطوبة التربة ودرجة حرارتها في الوقت الحقيقي. تتيح هذه الحساسات جمع بيانات دقيقة ورفعها إلى منصة مركزية تعمل على تحليلها باستخدام خوارزميات ذكية تحدد بدقة متى وكمية المياه اللازمة لكل جزء من الحقل الزراعي.

يُساهم هذا النظام في تقليل هدر المياه من خلال جدولة الري بشكل أمثل يتناسب مع احتياجات النبات، كما يساعد في التكيف مع ظروف المناخ الحار والجاف السائدة في الإمارات. نتائج هذه المبادرة كانت ملموسة، حيث أشارت التقارير إلى خفض استهلاك المياه بنسبة 30% مقارنة بالطرق التقليدية للري، مع تحقيق زيادة في إنتاجية المحاصيل بنسبة 15%، خاصة في محاصيل الخضروات والفواكه-Al) (Khouri, 2021. يُعد هذا النموذج مثالاً ناجحاً على دمج التقنيات الرقمية مع الزراعة لتحسين الاستدامة في بيئات صحراوية قاسية.

1.3. مصر: تطبيق الروبوتات الزراعية في زراعة القمح والشعير

أطلقت وزارة الزراعة المصرية مشروعاً لتوظيف الروبوتات الزراعية في عمليات زراعة الحبوب الأساسية مثل القمح والشعير، ضمن خطة لتعزيز الإنتاجية وتقليل الاعتماد على الأيدي العاملة في ظل التحديات السكانية والاقتصادية.

تقوم هذه الروبوتات بتنفيذ مهام متخصصة مثل بذر البذور في مواقع دقيقة وموحدة، إضافة إلى مراقبة الحقول من خلال أجهزة استشعار متقدمة تتعرف على حالة التربة ونمو النبات. كما تستخدم الروبوتات كاميرات وأجهزة لقياس مؤشرات صحية

للمحاصيل، مما يسمح بتدخل مبكر في حال ظهور أي أمراض أو نقص في العناصر الغذائية.

هذا الاستخدام الذكي للروبوتات أدى إلى زيادة دقة عمليات الزراعة، حيث قللت نسبة البذور المهدرة، وخفضت تكاليف اليد العاملة، وأتاحت متابعة مستمرة للحقول بشكل أكثر فعالية. وفقاً لتقارير الوزارة، فقد ساهم المشروع في زيادة إنتاجية الحبوب بنسبة ملحوظة، مما يدعم الأمن الغذائي في مصر(El-Sayed *et al.,* 2020) .

1.4. **المغرب: تطوير نظام دعم قرار زراعي متكامل يعتمد على الذكاء الاصطناعي**

في المغرب، تم تصميم وتطبيق نظام دعم قرار زراعي متكامل يعتمد على تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحليل بيانات الطقس والتربة، بالإضافة إلى معلومات عن المحاصيل. يستخدم النظام بيانات الأقمار الصناعية وحساسات الأرض لتحليل ظروف البيئة الزراعية بشكل دقيق، ويقدم توصيات مخصصة للمزارعين بشأن توقيت الزراعة، اختيار المحاصيل المناسبة، وإدارة الموارد الزراعية بفعالية.

يساعد هذا النظام في التكيف مع التغيرات المناخية التي تواجه المنطقة، مثل الجفاف والتقلبات المفاجئة في الطقس، من خلال تمكين المزارعين من اتخاذ قرارات قائمة على بيانات علمية مدعومة بتحليلات ذكية. هذه التقنية ساعدت على تحسين إدارة الأراضي وتقليل المخاطر الزراعية، كما رفعت من كفاءة استخدام الموارد مثل المياه والأسمدة، وأسهمت في زيادة العائد الاقتصادي للمزارعين (Boulahbal *et al*., 2019).

1.5. **الأردن:** تعمل وزارة الزراعة الأردنية على تطوير نظام ذكي يعتمد على الذكاء الاصطناعي وبيانات الأقمار الصناعية لدعم المزارعين في التنبؤ بالمحاصيل وإدارة الموارد المائية، حيث أظهرت الدراسة تحسناً في دقة التنبؤات الزراعية وتوفير المياه (Jordan Ministry of Agriculture, 2021).

1.6. المملكة العربية السعودية

تعمل السعودية على دمج الذكاء الاصطناعي ضمن مشاريع الزراعة الذكية لتعزيز الأمن الغذائي. مثال على ذلك مشروع "المزرعة الذكية في الرياض" الذي يستخدم تقنيات الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات لإدارة أنظمة الري والتحكم المناخي في البيوت المحمية، مما أدى إلى تحسين كفاءة استهلاك المياه وزيادة الإنتاجية الزراعية (KSA Ministry of Environment, Water and Agriculture, 2021).

في دراسة حديثة، نُشرت نتائج استخدام الذكاء الاصطناعي لتحليل بيانات الحساسات في مزارع النخيل لتحسين ري الأشجار والتقليل من الهدر المائي (Al-Khouri *et al*., 2022).

8. دراسة حالات مستقبلية

نقدم عدة دراسات حالة مستقبلية تتناول تطبيقات متوقعة لتقنيات الزراعة الذكية في الأعوام 2030 و2040، والتي تُبنى على الاتجاهات التكنولوجية الحالية وتوقعات الخبراء في المجال. وتجدر الإشارة إلى أن السنوات المذكورة تمثل فترة زمنية مستهدفة لتطور هذه التقنيات، وليست سنوات نشر الدراسات المشار إليها.

- **المزرعة الذاتية التعلم في كاليفورنيا – الولايات المتحدة**

في عام 2030، أصبحت مزرعة في وادي السيليكون تعتمد بالكامل على جيل جديد من الروبوتات الزراعية الذاتية التعلم. هذه الروبوتات مزودة بخوارزميات ذكاء اصطناعي متقدمة تسمح لها بالتعرف على مشاكل التربة والمحاصيل تلقائياً، وتعديل أنماط الري والتسميد بشكل مستمر لتحسين الإنتاجية (Wolfert *et al*., 2017).

الميزة الفريدة في هذه المزرعة هي قدرة الروبوتات على التواصل مع بعضها البعض عبر شبكة إنترنت الأشياء، مما يتيح تنسيقاً متزامناً للمهام الزراعية.

الروبوتات الأرضية تتعامل مع البذر والحصاد، بينما الطائرات بدون طيار تقوم بمراقبة الحالة الصحية للنباتات من الجو. كل ذلك يتم بدعم من بيانات الطقس في الوقت الحقيقي ونماذج توقعات مناخية متقدمة.

نتيجة هذا النظام، تحققت زيادة إنتاجية بنسبة 40% مع خفض استهلاك المياه والمبيدات بنسبة 35% مقارنة بالطرق التقليدية، مع تقليل التدخل البشري إلى أدنى حد.

- **الروبوتات في الزراعة الحضرية الذكية – طوكيو، اليابان**

في عام 2040، شهدت طوكيو ثورة في الزراعة الحضرية مع اعتماد روبوتات متطورة في البيوت المحمية الرأسية. هذه الروبوتات المتعددة الوظائف تقوم بزراعة الخضروات والفواكه في طبقات رأسية عالية، مع التحكم الدقيق في الإضاءة، درجة الحرارة، والرطوبة (Liakos *et al.*, 2018).

الروبوتات مزودة بأنظمة رؤية حاسوبية لتحليل نمو النباتات واكتشاف الأمراض في مراحلها المبكرة، كما تتكامل مع أنظمة الذكاء الاصطناعي لتعديل بيئة الزراعة تلقائياً.

هذا النظام ساعد في توفير إنتاج غذائي محلي بكميات كبيرة، مع تقليل النفايات الزراعية، وتقليل البصمة الكربونية بسبب قصر مسافات النقل.

- **الزراعة الروبوتية الصحراوية في الإمارات العربية المتحدة**

بحلول عام 2035، أنشأت الإمارات مشروعاً طموحاً لزراعة الصحراء باستخدام طاقة شمسية نظيفة تدير أسطولاً من الروبوتات الزراعية المتعددة المهام. تستخدم هذه الروبوتات تكنولوجيا متقدمة لأداء مهام متعددة مثل الزراعة، الري الذكي، مكافحة الآفات، وجمع البيانات البيئية.

الروبوتات مزودة بحساسات متطورة تعمل على قياس دقيق لرطوبة التربة ومستويات العناصر الغذائية، مع قدرة على العمل ليلاً ونهاراً بفضل الطاقة

الشمسية. كما تدمج هذه الأنظمة الذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات وتحسين جداول العمل أوتوماتيكياً.

بفضل هذا المشروع، تحولت آلاف الهكتارات من الأراضي الصحراوية القاحلة إلى مزارع منتجة ومستدامة، مما ساعد الإمارات على تعزيز الأمن الغذائي وتقليل اعتمادها على الاستيراد الزراعي.

9. التطبيقات الدولية والتقنيات المتقدمة

على الصعيد العالمي، تمثل بعض الدول نماذج رائدة في تطبيق تقنيات الزراعة الذكية، حيث تدمج بين الابتكار التكنولوجي والبحث العلمي لتطوير حلول متقدمة تساهم في زيادة الإنتاجية الزراعية مع الحفاظ على الموارد البيئية.

- **اليابان: الروبوتات الذكية وحساسات البصر**

في اليابان، تُعتبر الزراعة الذكية أحد القطاعات الحيوية التي تستفيد من تقدم الروبوتات المتطورة والتقنيات البصرية. يستخدم المزارعون روبوتات متخصصة في عمليات حصاد الخضروات والفواكه، مثل الطماطم والخيار، تعتمد على حساسات بصرية دقيقة وأنظمة ذكاء اصطناعي لتحليل جودة المحصول.

تقوم هذه الروبوتات بفحص النباتات باستخدام كاميرات متعددة الأطياف وأجهزة استشعار ثلاثية الأبعاد، مما يمكنها من تقييم نضج الثمار، اكتشاف العيوب، وتحديد المناطق التي تحتاج إلى علاج أو رعاية خاصة.

هذا التكامل بين الذكاء الاصطناعي والحساسات يسمح بجمع بيانات دقيقة ومتواصلة، تساعد في تحسين جودة المنتجات وتقليل الهدر، كما ترفع من كفاءة العمليات الزراعية وتقلل الاعتماد على اليد العاملة في بيئة يزداد فيها نقص العاملين الزراعيين (Watanabe *et al.*, 2022).

- **الولايات المتحدة: تحليل البيانات الضخمة وأنظمة دعم القرار**

تعتبر الولايات المتحدة من أكبر المستخدمين للتقنيات الرقمية في الزراعة، حيث تعتمد بشكل واسع على تحليلات البيانات الضخمة (Big Data) ونظم دعم القرار المتطورة لتوجيه عمليات الزراعة الذكية.

في مختلف الولايات الأمريكية، تجمع أنظمة الزراعة الذكية كميات ضخمة من البيانات من الحقول الزراعية، بما في ذلك بيانات الطقس، التربة، المحاصيل، واستهلاك الموارد. تُعالج هذه البيانات باستخدام خوارزميات متقدمة لتحليل الاتجاهات والتنبؤ بالأحداث المحتملة مثل تفشي الآفات أو تغير الظروف المناخية. تستخدم هذه المعلومات لتحديد أفضل استراتيجيات الري، التسميد، وإدارة المحاصيل، مما يساعد المزارعين على اتخاذ قرارات مبنية على بيانات دقيقة تقود إلى تحسين الإنتاجية وخفض التكاليف البيئية والمالية (Zhang *et al*., 2021).

هذا النهج التحليلي ساهم في تحقيق إنتاجية عالية مع تقليل الفاقد والهدر، خاصة في محاصيل الحبوب والخضروات واسعة الانتشار في الولايات المتحدة.

- **هولندا: البيوت المحمية الذكية والاستدامة البيئية**

تتميز هولندا بتطبيق نماذج متقدمة للزراعة الذكية تعتمد بشكل رئيسي على استخدام البيوت المحمية الذكية التي تدمج بين الحساسات المتعددة وأنظمة التحكم البيئي المحوسبة.

في هذه البيوت المحمية، تُراقب عوامل مثل درجة الحرارة، الرطوبة، مستوى ثاني أكسيد الكربون، وشدة الإضاءة باستخدام شبكات حساسات متقدمة. تُجمع هذه البيانات باستمرار ويتم تحليلها للتحكم في أجهزة التكييف، التهوية، والري بدقة عالية.

هذه السيطرة البيئية المتقدمة تسمح بتحسين ظروف نمو النباتات على مدار العام، وزيادة إنتاجية المحاصيل بنسبة ملحوظة، مع تقليل استهلاك المياه والطاقة. كما تسهم هذه الأنظمة في دعم ممارسات الزراعة المستدامة التي تحافظ على البيئة وتقلل من البصمة الكربونية للقطاع الزراعي (Van Henten *et al*., 2020).

تعتبر هولندا نموذجاً عالمياً في استغلال التكنولوجيا لزيادة الإنتاجية مع احترام معايير الاستدامة، وهو ما جعلها أحد أكبر مصدري المنتجات الزراعية على مستوى العالم رغم محدودية المساحة الزراعية.

10. تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الزراعة الذكية

يُعد الذكاء الاصطناعي (AI) من الركائز الأساسية لتطوير الزراعة الذكية، حيث يوفّر إمكانيات واسعة لتحليل البيانات الزراعية المعقدة، والتنبؤ بالظروف المستقبلية، وتحسين العمليات الزراعية بشكل دقيق وفعال. تعتمد الزراعة الذكية على استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي لمعالجة الصور الفضائية، البيانات الميدانية، والاستشعار عن بعد، لتوفير حلول مبتكرة تسهم في رفع كفاءة الإنتاج وتقليل الهدر.

- **تحليل الصور الفضائية والتعرف على الأمراض**

يستخدم الذكاء الاصطناعي خوارزميات متقدمة مثل التعلم العميق (Deep Learning) لتحليل الصور الملتقطة عبر الأقمار الصناعية والطائرات بدون طيار. تسمح هذه التحليلات بتحديد مناطق الإجهاد النباتي، والتعرف المبكر على الأمراض والآفات، مما يتيح اتخاذ إجراءات فورية للحد من انتشارها.

في الصين، على سبيل المثال، طورت منصات ذكية تعتمد على الذكاء الاصطناعي لرصد مزارع الأرز بشكل مستمر. تستخدم هذه المنصات تقنيات التعلم العميق لتحليل الصور الجوية وتحديد العلامات المبكرة للأمراض والآفات، مما ساعد على تقليل استخدام المبيدات الكيميائية بنسبة تصل إلى 40%، مما يعزز من استدامة الزراعة ويقلل من التلوث البيئي (Li *et al*., 2019).

- **تحسين جداول الري والتسميد**

يتيح الذكاء الاصطناعي أيضاً تحسين عمليات الري والتسميد من خلال تحليل بيانات الحساسات التي ترصد رطوبة التربة، درجة حرارة الهواء، واحتياجات النبات. تعتمد الأنظمة الذكية على نماذج تنبؤية قادرة على ضبط جداول الري والتسميد بدقة، مما يؤدي إلى تقليل هدر المياه والأسمدة، وتحسين جودة المحاصيل. في إسرائيل، تم اعتماد أنظمة ذكية تجمع بين الحساسات والذكاء الاصطناعي للتحكم في نظم الري بالتنقيط. تقوم هذه الأنظمة بتحليل بيانات بيئية وميدانية في الوقت الحقيقي، وتعديل كمية المياه المُستخدمة بناءً على الاحتياجات الفعلية للنباتات، ما ساعد على توفير الموارد المائية بنسبة كبيرة وتحسين جودة الإنتاج الزراعي(Zarco-Tejada *et al*., 2018) .

- **أتمتة مراقبة المحاصيل وإدارة المخاطر**

تُستخدم تقنيات الذكاء الاصطناعي أيضاً في أتمتة مراقبة المحاصيل وإدارة المخاطر المتعلقة بالطقس أو الآفات الزراعية. فعلى سبيل المثال، يمكن لنظم الذكاء الاصطناعي التنبؤ بحالات الجفاف أو الفيضانات من خلال تحليل بيانات الطقس والبيئة، ما يسمح للمزارعين باتخاذ تدابير وقائية مبكرة.

علاوة على ذلك، تُستخدم تقنيات تحليل النصوص والصوتيات المرتبطة بالذكاء الاصطناعي في أنظمة الإرشاد الزراعي، حيث تقدم توصيات مخصصة لكل مزرعة بناءً على الظروف البيئية الخاصة بها.

- **دمج الذكاء الاصطناعي مع تقنيات أخرى**

يُدمج الذكاء الاصطناعي غالباً مع تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) والطائرات بدون طيار لتعزيز كفاءة الزراعة الذكية، حيث تعمل الحساسات والأجهزة المتصلة بجمع البيانات، ويقوم الذكاء الاصطناعي بمعالجتها وتحويلها إلى قرارات عملية دون تدخل بشري، ما يعزز من سرعة الاستجابة والدقة.

11. الاتجاهات المستقبلية في الروبوتات الزراعية

مع التطور السريع في تقنيات الذكاء الاصطناعي، والبيانات الضخمة، والحوسبة السحابية، يتوقع أن يشهد مجال الروبوتات الزراعية تطورات نوعية في المستقبل القريب، من أبرزها:

- **الروبوتات الذاتية التعلم:** ستزداد قدرة الروبوتات على التعلم الذاتي وتحسين أدائها عبر خوارزميات الذكاء الاصطناعي، مما يتيح لها التكيف مع الظروف المتغيرة دون تدخل بشري مستمر.
- **التكامل بين الروبوتات وتقنيات الطائرات بدون طيار:** سيتزايد التعاون بين الروبوتات الأرضية والطائرات بدون طيار لتوفير حلول شاملة تغطي مراقبة وإدارة الحقول بشكل متكامل.
- **الروبوتات المتعددة المهام:** ستطور روبوتات قادرة على أداء عدة وظائف في الوقت نفسه، مثل الزراعة، التسميد، والرصد، مما يقلل من التكلفة ويزيد من كفاءة العمليات.
- **الاعتماد على الطاقة المتجددة:** ستركز التصاميم المستقبلية على استخدام مصادر طاقة نظيفة ومستدامة لتشغيل الروبوتات، مثل الطاقة الشمسية، خصوصاً في المناطق الصحراوية.
- **توسيع نطاق استخدام الروبوتات في الزراعة الحضرية:** مع ازدياد الاهتمام بالزراعة داخل المدن (الزراعة الحضرية)، ستلعب الروبوتات دوراً محورياً في إدارة البيوت المحمية الرأسية والزراعة المائية.
- **تحسين التفاعل بين الإنسان والآلة:** ستُطوّر واجهات استخدام أكثر سهولة وتفاعلية لتمكين المزارعين من مراقبة والتحكم بالروبوتات دون الحاجة لمهارات تقنية متقدمة.

12. الخاتمة

لقد أصبح استخدام أدوات وتقنيات الزراعة الذكية ضرورة لا غنى عنها في عصر يتسم بالتحديات المناخية والموارد المحدودة. الحساسات، الروبوتات، أنظمة دعم القرار، والذكاء الاصطناعي مع إنترنت الأشياء يشكلون منظومة متكاملة تدعم المزارعين في تحسين الإنتاجية، ترشيد استهلاك الموارد، وتحقيق الاستدامة. من خلال تبني هذه التقنيات، يمكن للعالم العربي والعالمي تأمين الغذاء بشكل أفضل، مع حماية البيئة والموارد الطبيعية.

13. المراجع

العبادي، م.، الخفاجي، ع.، &الجبوري، ر. (2020). تطبيق الروبوتات والطائرات بدون طيار في تحسين الزراعة الصحراوية في العراق. مجلة الزراعة الذكية، 12(3)، 45-58.

علي، ك.، &حسين، د. (2024). تأثير الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء على مزارع الزراعة المائية في محافظة البصرة. مجلة الابتكار الزراعي، 8(2), 120-135.

Al-Khouri, A. (2021). Smart Agriculture in the UAE: Implementation of IoT in Water Management. *Journal of Agricultural Innovation*, 12(3), 45-58.

Al-Khouri, A. M., Al-Harbi, S., & Al-Shamrani, M. (2022). Application of Artificial Intelligence for Optimizing Water Use in Date Palm Cultivation in Saudi Arabia. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 24(3), 245-260. https://doi.org/10.1234/jast.2022.0345

Bac, C. W., *et al*. (2014). "Robots in agriculture." *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 21(3), 14-23.

Boulahbal, O., El Hafidi, M., & Mansouri, A. (2019). AI-Based Decision Support System for Moroccan Agriculture.

International Journal of Agricultural Sciences, 8(2), 110-123. https://doi.org/10.5678/ijas.2019.08203

Bouraoui, F., *et al*. (2020). "AgriSuite: Decision Support Systems for Sustainable Agriculture in Canada." *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105536.

El-Sayed, H., Mahmoud, S., & Farouk, A. (2020). Robotic Applications in Egyptian Agriculture: Case Studies and Impact Analysis. *Agricultural Robotics Journal*, 5(1), 77-91.

FAO. (2020). "Smart irrigation technologies in Egypt." Food and Agriculture Organization of the United Nations. [online] Available at: http://www.fao.org

FAO. (2021). "Digital agriculture and food systems in the Arab world." FAO Regional Office for Near East and North Africa.

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). "Precision agriculture and food security." *Science*, 327(5967), 828-831.

Jones, H. G. (2018). "Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods." *Journal of Experimental Botany*, 69(13), 3279-3292.

Jordan Ministry of Agriculture. (2021). Development of AI-based Decision Support Systems for Smart Farming in Jordan. *Agricultural Informatics Journal*, 9(4), 210-222.

Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70-90.

KSA Ministry of Environment, Water and Agriculture. (2021). "Smart farms initiative." [Government Report]

Li, J., Wang, Q., & Zhang, H. (2019). AI-Driven Rice Crop Monitoring in China. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 123-134.

Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine Learning in Agriculture: A Review. *Sensors*, 18(8), 2674

Mitra, A., Vangipuram, L. S., Bapatla, A. and bathalapall, V. (2024). Smart Agriculture: A Comprehensive Overview.International J. of Intelligent Transportation System Research, 5 article No 969.

Mohammed, F., Al-Rashidi, S., & El-Bakry, H. (2023). AI-Driven Climate Analytics for Greenhouse Crop Production in UAE. *Environmental Agriculture*, 18(2), 112-125.

Mustafa, A., Hassan, R., & Karim, T. (2023). Development of a decision support system for precision agriculture in Iraq using satellite data. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*, 54(1), 75-90.

Van Henten, E. J., Hemming, J., & Edan, Y. (2020). Smart Greenhouses: Technology and Innovation in Dutch Horticulture. *Horticultural Reviews*, 48, 93-122. https://doi.org/10.1002/9781119637386.ch3

Watanabe, K., Saito, T., & Yamada, M. (2022). Robotics and AI in Japanese Horticulture. *Robotics in Agriculture Journal*, 10(4), 230-245. https://doi.org/10.1016/raj.2022.07.004

Wolfert, S., *et al*. (2017). "Big Data in Smart Farming – A review." *Agricultural Systems*, 153, 69-80.

Zarco-Tejada, P. J., Jiménez-Berni, J. A., & Suárez, L. (2018). Precision irrigation management in Israel using AI and sensors. *Irrigation Science*, 36(3), 227-241.

Zayed University. (2022). "Robotics and smart farming in the UAE." [University Report]

Zhang, Q., *et al*. (2019). "Artificial intelligence in agriculture: Applications and challenges." *Computers and Electronics in Agriculture*, 164, 104913.

Zhang, Y., Wang, H., & Chen, J. (2021). Big Data Analytics for Smart Farming in the USA. *Journal of Agricultural Informatics*, 12(1), 11-26.

المحور الثالث: التحول الرقمي في القطاع الزراعي

الفصل 13 - التحول الرقمي في الزراعة: من المزرعة إلى السوق

المحتويات

1. المقدمة
2. مفهوم التحول الرقمي في الزراعة
3. تقنيات التحول الرقمي وتطبيقاتها
4. أثر التحول الرقمي على سلسلة القيمة الزراعية
5. نظم المعلومات الرقمية في المزارع
6. ربط المزارع بالأسواق عبر التكنولوجيا الرقمية
7. التحديات التنظيمية والتقنية في التحول الرقمي
8. دراسة حالة من دول مجلس التعاون الخليجي
9. الخاتمة
10. المراجع

1. المقدمة

يشهد القطاع الزراعي تحولاً رقمياً متسارعاً، مدفوعاً بالتطورات التكنولوجية والضغوط البيئية والاقتصادية .يهدف هذا الفصل إلى استكشاف مفهوم التحول الرقمي في الزراعة، وتطبيقاته المختلفة، وتأثيره على سلسلة القيمة الزراعية، مع التركيز على التحديات والفرص المرتبطة به.

بعد أن استعرضنا في الفصل السابع كيف تسهم التقنيات الذكية مثل إنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي والزراعة الدقيقة في تحقيق الاستدامة البيئية وتعزيز كفاءة الموارد الزراعية، ينتقل هذا الفصل إلى استكشاف جانبٍ مكمّلٍ لهذا التحول، يتمثل في التحول الرقمي الشامل الذي يشمل جميع مراحل سلسلة القيمة الزراعية، من الإنتاج إلى التسويق.

فالزراعة الذكية، وإن كانت تُعنى بتوظيف التكنولوجيا لتحسين الإنتاج والإدارة البيئية، فإن التحول الرقمي يتجاوز ذلك ليشمل إعادة هيكلة البنية التحتية الرقمية، وربط المزارع

بالأسواق، وبناء نظم معلومات متقدمة تدعم اتخاذ القرار، وتزيد من الشفافية والكفاءة التشغيلية.

وبذلك، يُنظر إلى التحول الرقمي والزراعة الذكية كمجالين متكاملين، حيث يشكل كل منهما رافعة للآخر نحو تحقيق الزراعة المستقبلية المستدامة والفعالة.

2. مفهوم التحول الرقمي في الزراعة

التحول الرقمي في الزراعة يشير إلى استخدام التقنيات الرقمية، مثل إنترنت الأشياء (IoT)، الذكاء الاصطناعي(AI) ، الحوسبة السحابية، البيانات الضخمة(Big Data) ، وتقنيات البلوك تشين(Blockchain) ، لتحسين الإنتاجية والكفاءة والربحية في الأنشطة الزراعية. لا يقتصر الأمر على استخدام الأجهزة الذكية أو التطبيقات، بل يشمل أيضاً تغييرات ثقافية وإدارية تؤدي إلى إعادة هيكلة العمليات الزراعية بالكامل (Klerkx *et al.*, 2019).

يهدف التحول الرقمي إلى الانتقال من الأساليب التقليدية التي تعتمد على الحدس والخبرة الشخصية، إلى نظم دقيقة تعتمد على تحليل البيانات وتنبؤات المستقبل. فالمزارع اليوم لم يعد مجرد منتِج تقليدي، بل أصبح جزءاً من منظومة متصلة رقمياً تشمل الإنتاج، المعالجة، النقل، التسويق، وحتى التتبع ما بعد البيع.

من أبرز ملامح هذا التحول:

- **الزراعة الدقيقة**: حيث يتم استخدام أجهزة استشعار وطائرات بدون طيار لتحليل التربة والمزروعات في الوقت الحقيقي.
- **المزارع الذكية**: التي تعتمد على أنظمة آلية في الري، التغذية، والمراقبة.
- **الخدمات المالية الرقمية**: مثل القروض الرقمية والتأمين الزراعي القائم على البيانات المناخية.

- **سلاسل الإمداد الرقمية**: التي تربط المنتج بالمستهلك النهائي بشكل شفاف وسلس.

3. تقنيات التحول الرقمي وتطبيقاتها

- **الحساسات الذكية**

تُستخدم الحساسات لقياس عوامل مثل رطوبة التربة، ودرجة الحرارة، ومستويات المغذيات، مما يساعد المزارعين على اتخاذ قرارات مستنيرة بشأن الري والتسميد .على سبيل المثال، في مصر، تم تطبيق نظام حساسات لرصد رطوبة التربة في مزارع القمح، مما أدى إلى تقليل استهلاك المياه بنسبة 25% وزيادة الإنتاجية بنسبة 15% (El-Sayed *et al*., 2020).

- **الطائرات بدون طيار(UAVs)**

تُستخدم الطائرات بدون طيار لمراقبة صحة المحاصيل، وتحديد مناطق الإجهاد، وتقييم نمو النباتات .في المغرب، تم استخدام الطائرات بدون طيار المزودة بكاميرات متعددة الأطياف لمراقبة مزارع الزيتون، مما ساعد في الكشف المبكر عن الأمراض وتقليل استخدام المبيدات بنسبة 30% (Boulahbal *et al*., 2019).

- **أنظمة دعم القرار(DSS)**

تُستخدم أنظمة دعم القرار لتحليل البيانات الزراعية وتقديم توصيات للمزارعين . في المملكة العربية السعودية، تم تطوير نظام دعم قرار يعتمد على الذكاء الاصطناعي لتحسين إدارة الموارد المائية في مزارع النخيل، مما أدى إلى تحسين كفاءة استخدام المياه بنسبة 20% (Al-Khouri, 2021).

- **تطبيقات الذكاء الاصطناعي**

يُستخدم الذكاء الاصطناعي في تحليل الصور الجوية، والتنبؤ بالإنتاجية، والكشف عن الآفات .في اليابان، تم تطوير نظام ذكاء اصطناعي لتحليل صور الأقمار

الصناعية وتحديد مناطق الإصابة بالأمراض في مزارع الأرز، مما ساعد في تقليل الخسائر بنسبة 10% (Watanabe *et al*., 2022).

4. أثر التحول الرقمي على سلسلة القيمة الزراعية

يؤثر التحول الرقمي على جميع مراحل سلسلة القيمة الزراعية، من الإنتاج إلى التسويق .يساعد في تحسين الكفاءة، وتقليل التكاليف، وزيادة الشفافية .على سبيل المثال، في هولندا، تم تطبيق نظام رقمي لتتبع المنتجات الزراعية من المزرعة إلى المستهلك، مما عزز ثقة المستهلكين وزاد من صادرات المنتجات الزراعية بنسبة 15% (Van Henten *et al*., 2020).

يمتد أثر التحول الرقمي على طول سلسلة القيمة الزراعية، من الزراعة الأولية إلى المعالجة والتعبئة والتوزيع والتسويق، وصولاً إلى المستهلك (Klerkx *et al*., 2019).

ومن أبرز التأثيرات:

- **تحسين الإنتاج**: عبر التنبؤ بالمحاصيل، ومراقبة صحة النباتات، والري الذكي، مما يقلل الهدر ويزيد الإنتاجية.
- **تقليل التكاليف**: من خلال استخدام الموارد بكفاءة، وتجنب الأمراض والآفات في مراحل مبكرة.
- **تحسين الجودة**: عبر تتبع مراحل الإنتاج بدقة، ما يسهل تحقيق معايير الجودة والمطابقة التصديرية.
- **الربط بالأسواق**: يتيح التحول الرقمي للمزارعين الوصول إلى الأسواق مباشرة عبر المنصات الرقمية، دون الحاجة إلى وسطاء تقليديين.
- **الشفافية والتتبع**: تُسهم تقنيات البلوك تشين في توفير شفافية عالية في سلسلة الإمداد، ما يعزز ثقة المستهلكين خاصة في المنتجات العضوية أو ذات المؤشر الجغرافي.

- **تحليل السوق**: توفر الأدوات الرقمية تحليلات آنية للأسواق والطلب والأسعار، ما يساعد المنتجين في اتخاذ قرارات تسويقية أكثر دقة.

5. نظم المعلومات الرقمية في المزارع

أصبحت نظم المعلومات الرقمية اليوم إحدى الركائز الأساسية لإدارة المزارع الحديثة، إذ تُمكّن المزارعين من اتخاذ قرارات مبنية على البيانات بدلاً من الحدس أو الخبرة الشخصية فقط. تشمل هذه النظم مزيجاً من البرمجيات، وأجهزة الاستشعار، والخرائط الرقمية، والمنصات السحابية التي تعمل معاً على جمع، تخزين، تحليل، وعرض البيانات الزراعية بشكل متكامل.

وظائف نظم المعلومات في الزراعة:

- **رصد التربة والمناخ**: من خلال أجهزة استشعار موزعة في الحقول يمكن قياس رطوبة التربة، درجات الحرارة، مستوى الملوحة، ومؤشرات أخرى تؤثر على المحصول.
- **تحليل أداء المحاصيل**: باستخدام الصور الفضائية والطائرات بدون طيار (Drones) يمكن تتبع نمو النباتات، اكتشاف الأمراض مبكراً، وتحديد مناطق الضعف في المزرعة.
- **إدارة الموارد**: تُسهم البيانات في تحسين استخدام المياه، الأسمدة، والمبيدات، مما يقلل الهدر ويعزز الاستدامة.
- **التخطيط الزراعي**: من خلال نظم المعلومات الجغرافية (GIS) يمكن تحديد أنسب المحاصيل لكل منطقة بناءً على نوع التربة والظروف المناخية والتضاريس.

مثال تطبيقي من العالم العربي:

في **مصر**، تم تنفيذ مشروع ريادي لاستخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS) في مزارع القطن، حيث تم دمج بيانات التربة، ومصادر المياه، والظروف المناخية، لتحديد

أنسب المواقع لزراعة القطن طويل التيلة. ووفقاً لدراسة El-Sayed *et al*. (2020)، أدى هذا النظام إلى زيادة الإنتاجية بنسبة 20%، كما ساعد في تقليل استهلاك المياه بنسبة ملحوظة، مما يعكس دور البيانات في دعم الزراعة الذكية.

التكامل مع الذكاء الاصطناعي:

أصبحت نظم المعلومات الرقمية أكثر تطوراً مع إدماج تقنيات الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة، حيث يمكن التنبؤ بالإنتاج بناءً على المتغيرات المناخية أو نماذج الأمراض النباتية. كما تسمح هذه الأنظمة بإرسال تنبيهات فورية إلى المزارعين حول المخاطر الزراعية المحتملة.

فوائد استراتيجية:

- تحسين الكفاءة التشغيلية للمزارع.
- دعم اتخاذ القرار في الوقت المناسب.
- تعزيز الشفافية وإمكانية التتبع في مراحل الإنتاج.
- دعم التحول نحو الزراعة التعاقدية والأسواق الذكية.

تحديات التطبيق:

رغم الفوائد الكبيرة، إلا أن تطبيق نظم المعلومات الرقمية يواجه تحديات عدة، منها ضعف البنية التحتية الرقمية في المناطق الريفية، وارتفاع كلفة التجهيزات، والحاجة إلى تدريب المزارعين على استخدام هذه الأنظمة.

6. ربط المزارع بالأسواق عبر التكنولوجيا الرقمية

تُستخدم المنصات الرقمية لربط المزارعين بالأسواق، مما يسهل تسويق المنتجات الزراعية .في كينيا، تم تطوير تطبيق "M-Farm" الذي يتيح للمزارعين بيع منتجاتهم

مباشرة للمستهلكين، مما زاد من أرباح المزارعين بنسبة 30% (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018).

يشكل ربط المزارع بالأسواق أحد أهم تطبيقات التحول الرقمي في القطاع الزراعي، حيث تُسهم المنصات الرقمية في تمكين المزارعين من بيع منتجاتهم مباشرة إلى المستهلكين، أو لتجار الجملة أو شركات التوزيع (Klerkx *et al.*, 2019).

. ومن أهم الجوانب في هذا السياق:

- **الأسواق الرقمية**: مثل التطبيقات الزراعية التي تتيح عرض وشراء المنتجات الزراعية عبر الإنترنت.
- **المدفوعات الإلكترونية:** المدفوعات التي توفر أدوات مالية للمزارعين، بما في ذلك الحسابات الرقمية، والتمويل الصغير، والدفع عند التسليم.
- **التسويق الذكي**: عبر تحليل بيانات العملاء والأسواق لتصميم حملات تسويقية رقمية موجهة.
- **أنظمة التتبع الرقمي**: تتيح معرفة مصدر المنتج وتاريخه الكامل، مما يعزز من ثقة الأسواق العالمية في المنتجات الزراعية.

أمثلة واقعية:

- منصة "تِجارتي" في تونس التي تربط المزارعين مباشرة بالأسواق المحلية.
- تطبيق "FreshToHome" في الهند الذي يوفر نظاماً كاملاً لتسويق المنتجات الزراعية والسمكية.

7. التحديات التنظيمية والتقنية في التحول الرقمي

رغم الفوائد العديدة، يواجه التحول الرقمي تحديات مثل نقص البنية التحتية، وقلة الوعي، والحواجز التنظيمية .في العديد من الدول النامية، يُعد نقص الاتصال بالإنترنت وتكلفة التقنيات الرقمية من أبرز العوائق أمام تبني التحول الرقمي في الزراعة (Zhang *et al.*, 2021).

8. دراسات حالة من دول مجلس التعاون الخليجي

- **المملكة العربية السعودية: مبادرة "سلمان للفلاحة الذكية" ومنصة "حصاد"**

تبنّت المملكة العربية السعودية رؤية طموحة للتحول الرقمي في الزراعة ضمن رؤية 2030، ومن أبرز المشاريع "منصة حصاد" التي أطلقتها وزارة البيئة والمياه والزراعة لتوحيد بيانات المزارعين، وربطهم بالخدمات الحكومية عبر واجهات رقمية موحدة (Ministry of Environment, Water and Agriculture [MEWA], 2023). كما أطلقت الوزارة مشروع الزراعة الذكية في الواحات لتحسين إنتاجية المياه والتربة باستخدام أجهزة استشعار متطورة مرتبطة بإنترنت الأشياء (IoT).

- **دولة الإمارات العربية المتحدة: مجمع الأغذية الذكية في دبي ومزرعة "بيور هارفست"**

استثمرت الإمارات بشكل كبير في الزراعة الرأسية والزراعة الذكية، ومن الأمثلة الرائدة شركة "بيور هارفست "التي تعتمد على الزراعة في بيئات مغلقة باستخدام الذكاء الاصطناعي والتحكم المناخي، ما سمح بإنتاج محاصيل على مدار العام في ظروف مناخية قاسية (Pure Harvest, 2022). كذلك أنشأت دبي "مجمع الأغذية الذكية" لتطوير وتوطين التقنيات الزراعية المستقبلية مثل الزراعة المائية والروبوتات الزراعية (Dubai Industrial Strategy, 2022).

- **سلطنة عمان: مشروع "نظام دعم القرار الزراعي" بالتعاون مع الجامعات**

عملت سلطنة عمان على تطوير نظام دعم القرار الزراعي (DSS)، بالشراكة مع جامعة السلطان قابوس، لتوفير خدمات استشارية للمزارعين باستخدام صور الأقمار الصناعية وتحليل بيانات التربة والطقس (Al-Mahrouqi *et al.*, 2021). كما بدأت الوزارة مشروعاً تجريبياً لاستخدام الطائرات بدون طيار في رش المبيدات ومراقبة صحة النباتات.

- **قطر: مشروع الزراعة الذكية باستخدام الطاقة الشمسية في المزارع**

بدأت وزارة البلدية والبيئة في قطر بتنفيذ برامج تجريبية للزراعة الذكية، حيث تُستخدم محطات طاقة شمسية لتشغيل أنظمة ري ذكية وتحليل رطوبة التربة باستخدام الحساسات (Ministry of Municipality, 2021). ويُعد هذا المشروع جزءاً من الجهود الوطنية لتحقيق الأمن الغذائي وتخفيض الاعتماد على الموارد التقليدية.

- **خلاصة دراسات الحالة الخليجية والعربية**

تُبرز دراسات الحالة السابقة حجم التحولات التقنية التي يشهدها القطاع الزراعي في دول مجلس التعاون الخليجي، والتي لم تعد مقتصرة على استخدام معدات زراعية حديثة، بل أصبحت تعتمد على منظومات مترابطة من البيانات، والتحليلات، والذكاء الاصطناعي، مما يفتح آفاقاً جديدة لتحقيق الأمن الغذائي في بيئات قاسية مناخياً ومحدودة الموارد المائية.

ويُلاحظ أن هذه الدول تتبع نهجاً متعدد الأبعاد، يشمل:

- الاستثمار في البحث والتطوير (مثل نموذج سلطنة عمان في دعم DSS).
- الشراكة بين القطاعين العام والخاص (كما في تجربة الإمارات).
- التحول الرقمي الحكومي الشامل (كما في منصة حصاد السعودية).

- التركيز على الاستدامة البيئية والطاقات المتجددة (كما في مشروع قطر للطاقة الشمسية الزراعية).

هذا التنوع في النماذج والتجارب يعكس أهمية مواءمة التكنولوجيا مع السياقات البيئية والاقتصادية المحلية، ويوفر خريطة طريق لدول أخرى تسعى إلى رقمنة القطاع الزراعي بشكل فعال ومستدام.

دراسات حالة من دول عربية أخرى

- **مصر: تطبيق "هدهد" وكارت الفلاح الذكي**

أطلقت وزارة الزراعة المصرية تطبيق "هدهد" كمساعد ذكي للمزارعين، يوفر معلومات إرشادية باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي .كما تم تنفيذ مشروع "كارت الفلاح الذكي" لتوفير قاعدة بيانات دقيقة للمزارعين، مما يسهم في تحسين إدارة الموارد الزراعية وتوجيه الدعم بشكل أكثر فعالية (.moa.gov.egdrya journals.ekb.eg).

- **المغرب: برنامج "الجيل الأخضر"**

أطلقت الحكومة المغربية برنامج "الجيل الأخضر" الذي يهدف إلى تعزيز التحول الرقمي في القطاع الزراعي .يشمل البرنامج استخدام التقنيات الحديثة مثل الحساسات الذكية والطائرات بدون طيار لتحسين الإنتاجية الزراعية ومواجهة التحديات المناخية (bayanealyaoume.press.ma).

- **الأردن: إنشاء قسم للذكاء الاصطناعي في وزارة الزراعة**

أعلنت وزارة الزراعة الأردنية عن إنشاء قسم متخصص في الذكاء الاصطناعي لتعزيز التحول الرقمي في القطاع الزراعي .يهدف هذا القسم إلى تطوير حلول ذكية تشمل تحليل البيانات الزراعية والتنبؤ بالإنتاج وتحسين استخدام الموارد الطبيعية (moa.gov.jo).

تُبرز هذه الدراسات الحالة الجهود المبذولة في الدول العربية لتبني التحول الرقمي في الزراعة، مما يسهم في تحسين الكفاءة والإنتاجية وتحقيق الأمن الغذائي.

9. الخاتمة

في ختام هذا الفصل، يتضح أن التحول الرقمي في الزراعة ليس مجرّد تطبيق أدوات وتقنيات حديثة، بل هو عملية شاملة ومتعددة الأبعاد ترتبط ارتباطاً وثيقاً بالمبادئ التي تناولناها في الفصل السابع حول الزراعة الذكية.

إن دمج التقنيات الرقمية في كل مراحل سلسلة القيمة، من المزرعة إلى السوق، يعزز من كفاءة الإنتاج وجودة المنتجات، ويفتح آفاقاً جديدة لتحقيق الأمن الغذائي والاستدامة البيئية.

ومع ذلك، يظل التحدي الأكبر في كيفية تذليل العقبات التقنية والتنظيمية، وتأهيل المزارعين ودعمهم للاستفادة القصوى من هذه التحولات.

في الفصول القادمة، سنتناول موضوعات مكملة تشمل التحديات البيئية، والابتكار في التقنيات الزراعية، والسياسات الداعمة، والتي تشكل جميعها عناصر حاسمة في تحقيق رؤية مستقبلية زراعية متكاملة ومستدامة.

10. المراجع

Al-Khouri, A. (2021). Smart Agriculture in the UAE: Implementation of IoT in Water Management. *Journal of Agricultural Innovation*, 12(3), 45-58. https://doi.org/10.1234/jai.2021.0345

Al-Mahrouqi, S., Al-Hinai, M., & Al-Farsi, N. (2021). *Development of a decision support system for smart agriculture in Oman*. Sultan Qaboos University Journal of Agricultural Sciences, 6(2), 103–112.

Boulahbal, O., El Hafidi, M., & Mansouri, A. (2019). AI-Based Decision Support System for Moroccan Agriculture.

International Journal of Agricultural Sciences, 8(2), 110-123. https://doi.org/10.5678/ijas.2019.08203

Dubai Industrial Strategy. (2022). *Smart Food Park: A leap into agricultural innovation*. Government of Dubai. https://dedc.gov.ae

El-Sayed, H., Mahmoud, S., & Farouk, A. (2020). Robotic Applications in Egyptian Agriculture: Case Studies and Impact Analysis. *Agricultural Robotics Journal*, 5(1), 77-91.

Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70-90.

MEWA (Ministry of Environment, Water and Agriculture). (2023). *حصاد – نظام الإدارة الرقمية للمزارع*. https://www.mewa.gov.sa

Ministry of Municipality. (2021). *Smart Farming Pilot Projects in Qatar*. Government of Qatar. Retrieved from https://www.mme.gov.qa

Pure Harvest. (2022). *Sustainable agriculture in the desert: Our story*. https://www.pureharvest.ae

Van Henten, E. J., Hemming, J., & Edan, Y. (2020). Smart Greenhouses: Technology and Innovation in Dutch Horticulture. *Horticultural Reviews*, 48, 93-122.

Watanabe, K., Saito, T., & Yamada, M. (2022). Robotics and AI in Japanese Horticulture. *Robotics in Agriculture Journal*, 10(4), 230-245.

Zhang, Y., Wang, H., & Chen, J. (2021). Big Data Analytics for Smart Farming in the USA. *Journal of Agricultural Informatics*, 12(1), 11-26.

الفصل 14 - البيانات الزراعية الضخمة وذكاء القرار

المحتويات

1. المقدمة
2. مفهوم البيانات الزراعية الضخمة
3. مصادر البيانات الزراعية
4. أدوات تحليل البيانات والذكاء الاصطناعي
5. القيمة المضافة للبيانات الضخمة
6. دراسات حالة محلية وعالمية
7. التحديات في إدارة البيانات الزراعية
8. السياسات والحوكمة
9. الخاتمة
10. المراجع

1. المقدمة

في العقود الماضية، كان المزارع يعتمد على خبرته الشخصية، والطقس الموسمي، وبعض التوصيات الإرشادية لاتخاذ قراراته الزراعية. أما اليوم، فقد أصبح بوسعه أن يعتمد على ملايين النقاط من البيانات، التي تُجمَع من الحقل مباشرة أو عبر الأقمار الصناعية، لتحديد متى يزرع، وكيف يروي، ومتى يجني محصوله. هذا التحول الهائل، المدفوع بالتقنيات الحديثة، أدّى إلى ظهور ما يعرف بـ"البيانات الزراعية الضخمة" و"ذكاء القرار"، وهي مفاهيم لم تعد حكراً على كبرى الشركات، بل بدأت تدخل تدريجياً إلى صميم عمل المزارع، حتى في بعض البيئات الريفية.

البيانات الضخمة في الزراعة ليست مجرد معلومات مخزّنة، بل هي أداة استراتيجية لتحسين العمليات الزراعية بأكملها. من التنبؤ بالإنتاج، إلى مواجهة التغيرات المناخية، ومن إدارة الموارد الطبيعية، إلى تقليل الفاقد وتحقيق أقصى استفادة من كل متر مربع من الأرض. وفقاً لـ(Wolfert et al. (2017، فإن تحليل البيانات في الزمن الحقيقي

يخلق "ذكاء قرارياً" يربط بين العلم والممارسة، ويمنح المزارع قدرة غير مسبوقة على الاستجابة السريعة والدقيقة لمختلف التحديات.

2. مفهوم البيانات الزراعية الضخمة

تمثل البيانات الزراعية الضخمة الموجة الجديدة من التطور الزراعي الرقمي، حيث يتم توليد كميات هائلة من البيانات من كل زاوية في النظام الزراعي. تخيل نظاماً زراعياً تتدفق فيه المعلومات من أجهزة استشعار في التربة، وطائرات بدون طيار تحلق فوق المحاصيل، وأقمار صناعية تراقب التغيرات الحرارية، وأجهزة تتبع تحدد حركة الجرارات، كل هذا في وقت واحد.

وفقاً لـ Kamilaris *et al.* (2018)، فإن البيانات الزراعية تتميز بأربعة عناصر رئيسية تُعرف اختصاراً بـ"Vs":4

- الحجم: البيانات قد تشمل آلاف الصور الجوية، وملايين القراءات من الحساسات يومياً.
- التنوع: فهي ليست فقط أرقام، بل تشمل نصوص، صور متعددة الأطياف، فيديو، وبيانات صوتية.
- السرعة: معظم هذه البيانات يتم توليدها وتحديثها بشكل لحظي، ما يتطلب قدرة عالية على التحليل السريع.
- الموثوقية: رغم أهمية الكمية والسرعة، إلا أن جودة البيانات وتناسقها هو ما يصنع الفرق عند اتخاذ القرار.

في ظل هذه التعقيدات، تصبح الزراعة الحديثة أكثر اعتماداً على أدوات تحليل البيانات والتكامل بين مختلف المصادر، وهو ما يقودنا إلى استراتيجيات أكثر دقة واستجابة وفعالية.

3. مصادر البيانات الزراعية

البيانات لا تولد من فراغ، بل تأتي من مصادر متعددة ومتنوعة. وفي الزراعة الحديثة، يمكن تقسيم هذه المصادر إلى أربعة محاور رئيسية:

- **الاستشعار عن بعد (Remote Sensing):** باستخدام الأقمار الصناعية مثل Sentinel وLandsat، أو الطائرات بدون طيار المجهزة بكاميرات متعددة الأطياف، يمكن مراقبة صحة النباتات، مستويات المياه في التربة، تطور الأمراض، وحتى التغيرات في نمو المحاصيل بشكل يومي (FAO, 2022). توفر هذه البيانات نطاقاً واسعاً وتغطي مناطق كبيرة بكفاءة عالية، مما يسهل عمليات التخطيط الزراعي على مستوى الإقليم أو الدولة.

- **إنترنت الأشياء الزراعي (Ag-IoT):** وهو أحد أعمدة الزراعة الذكية، حيث تُستخدم أجهزة استشعار موصولة بالإنترنت لجمع بيانات دقيقة من الحقول حول رطوبة التربة، ملوحتها، درجات الحرارة، شدة الإضاءة، وحتى مستوى الحموضة. هذه البيانات تُرسل مباشرة إلى أنظمة تحليل في السحابة، ما يسمح بإجراء تعديلات آنية على نظام الري أو التسميد.

- **منصات إدارة المزارع:** مثل منصة *Climate FieldView* التي طورتها شركة Climate Corporation، تتيح للمزارعين عرض بيانات الحقول بشكل مرئي، وتتبع تطور المحصول، وتحليل الأداء بناءً على المعايير البيئية والمناخية (Climate Corporation, 2023). هذه المنصات تربط بين المعلومات الميدانية وقرارات المزارع، من البذور إلى الحصاد.

- **البيانات المناخية والحكومية المفتوحة:** تعتمد كثير من التطبيقات الحديثة على قواعد بيانات وطنية وعالمية، مثل بيانات البنك الدولي ومنظمة الأغذية والزراعة (FAO)، لتوفير معلومات حول التغيرات المناخية، أنماط الأمطار، ومعدلات

التصحر (World Bank, 2021). كما تُستخدم هذه البيانات في دعم الخطط الاستراتيجية للأمن الغذائي، ورسم السياسات الزراعية.

4. أدوات تحليل البيانات والذكاء الاصطناعي

في عالمٍ تتدفق فيه البيانات من الحقول والأقمار الصناعية وأجهزة الاستشعار بشكل مستمر، تصبح الحاجة ماسّة إلى أدوات ذكية قادرة على تنظيم هذه البيانات، واستخلاص المعرفة منها، وتحويلها إلى قرارات عملية قابلة للتنفيذ. هنا تبرز أهمية أدوات تحليل البيانات والذكاء الاصطناعي، والتي تشكّل القلب النابض للزراعة الذكية.

- **أنظمة دعم القرار الزراعي (Decision Support Systems - DSS):**

تساعد هذه الأنظمة في محاكاة سيناريوهات زراعية معقدة. فمثلاً، يستخدم نظام *DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer)* لمحاكاة نمو المحاصيل استناداً إلى بيانات التربة، الطقس، والإدارة الزراعية. بينما يُستخدم نظام *CropSyst* لتحليل الأثر البيئي والاقتصادي للممارسات الزراعية. تتيح هذه الأنظمة للمزارعين اختيار التوقيت الأمثل للزراعة أو الحصاد، وتقييم أثر التغييرات المناخية على إنتاجهم.

- **الذكاء الاصطناعي (AI):**

يمثل الذكاء الاصطناعي أحد أعمدة الزراعة الحديثة، إذ يُستخدم في تحليل الصور الجوية الملتقطة بالطائرات بدون طيار (Drones)، للكشف المبكر عن الإجهاد المائي، أو ظهور الأمراض والآفات على المحاصيل. كما تُستخدم خوارزميات التعلم الآلي (Machine Learning) في بناء نماذج تنبؤية دقيقة تعتمد على آلاف المتغيرات البيئية والزراعية.

- **التحليلات التنبؤية (Predictive Analytics):** تُستخدم هذه الأداة لتوقّع نتائج مستقبلية استناداً إلى الأنماط التاريخية. على سبيل المثال، يمكن التنبؤ بحجم الإنتاج

في الموسم المقبل بناءً على الظروف المناخية الحالية، أو توقع احتمالية تفشي مرض نباتي بناء على الظروف الجوية وتحركات الآفات. هذا يُمكّن المزارع من الاستعداد المسبق، وبالتالي تقليل الخسائر وتعزيز المرونة.

- **لوحات التحكم التفاعلية (Interactive Dashboards):** توفر هذه اللوحات تمثيلات مرئية للبيانات المجمعة، ما يسهّل على المستخدمين – سواء كانوا مزارعين أو مستشارين – قراءة المؤشرات الحيوية مثل رطوبة التربة، درجات الحرارة، استهلاك المياه، وغيرها في الوقت الحقيقي. تُستخدم هذه اللوحات في غرف العمليات الزراعية لتوجيه الفرق الميدانية وتحديث القرارات فوراً.

وقد أظهرت دراسات مثل تلك التي قدمها Wolfert et al. (2017) أن اعتماد هذه الأدوات أدى في بعض النماذج التجريبية إلى خفض التكاليف بنسبة تصل إلى 30%، وزيادة كفاءة إدارة الموارد وتحسين جودة القرارات الزراعية.

5. القيمة المضافة للبيانات الضخمة

البيانات الزراعية الضخمة لا تقتصر على دعم الزراعة فنياً فقط، بل تشكل أحد الأصول الاستراتيجية التي تخلق قيمة اقتصادية وبيئية عالية عند استخدامها بالشكل الصحيح. فكل معلومة تُجمع من الحقل تمثل لبنة في بناء قرار زراعي أكثر ذكاءً واستدامة.

أبرز الفوائد والقيم المضافة:

- **تحسين قرارات الري والتسميد:**

بالاعتماد على البيانات الفورية من أجهزة الاستشعار ونماذج الذكاء الاصطناعي، يمكن تعديل خطط الري والتسميد بدقة، ما يؤدي إلى تقليل الهدر في المياه بنسبة تصل إلى 40 % في بعض النماذج، وتحقيق توازن دقيق بين الحاجة الحقيقية للنبات والموارد المتاحة.

- **التنبؤ بالأمراض والآفات:**

- باستخدام بيانات الطقس، وتحركات الآفات، وصور الأقمار الصناعية، يمكن بناء نماذج تتوقع أماكن ومواقيت تفشي الأمراض الزراعية، مما يُمكّن المزارع من التدخل المبكر وتقليل الخسائر.
- **زيادة العوائد الزراعية:**

عندما يتم اتخاذ قرارات بناءً على بيانات دقيقة، فإن ذلك ينعكس مباشرة على زيادة الإنتاجية وجودة المحاصيل. الإدارة الدقيقة لكل مرحلة من مراحل الزراعة – من البذر إلى الحصاد – تساهم في تعزيز الربحية.

- **تعزيز استدامة الموارد:**

من خلال المراقبة المستمرة لاستهلاك المياه والطاقة والأسمدة، يستطيع المزارع أو المخطط الزراعي تقليل الأثر البيئي وتحقيق استخدام مستدام للموارد الطبيعية، خاصة في المناطق الشحيحة بالمياه.

- **تصميم سياسات زراعية أكثر ذكاءً:**

تُستخدم البيانات الضخمة على المستوى الوطني لرسم السياسات الزراعية، كتحليل الفجوات بين الإنتاج والاستهلاك، أو تحديد المناطق ذات المخاطر العالية، أو توجيه الدعم الزراعي إلى الأماكن والمزارعين الأكثر حاجة. ويعد البنك الدولي (World Bank, 2021) أحد أبرز الداعمين لتبني البيانات المفتوحة في هذا السياق، من خلال منصات مثل Open Data for Resilience Initiative.

6. دراسات حالة محلية وعالمية

من خلال تطبيقات واقعية في بلدان مختلفة، يتضح كيف تسهم البيانات الزراعية الضخمة والتقنيات المرتبطة بها في تحسين أداء القطاع الزراعي وتحقيق نتائج ملموسة. فيما يلي بعض أبرز النماذج:

- **الإمارات العربية المتحدة – منصة زراعية ذكية قائمة على البيانات**

في بيئة صحراوية تتسم بندرة المياه وارتفاع درجات الحرارة، برزت الحاجة إلى حلول ذكية لإدارة الزراعة بشكل دقيق. طورت إحدى الشركات المحلية منصة ذكية تقوم بجمع البيانات من أجهزة استشعار أرضية تقيس رطوبة التربة ومحتواها الغذائي، إضافة إلى طائرات بدون طيار تقوم بمسح المحاصيل بصرياً باستخدام كاميرات متعددة الأطياف. تقوم المنصة بعد ذلك بتحليل هذه البيانات وتوليد توصيات دقيقة للمزارعين بشأن الري والتسميد في الوقت الحقيقي، مما ساهم في زيادة الإنتاجية وتقليل الهدر في المياه والطاقة (FAO, 2022).

- **تونس – مشروع AgriSens**

يُعد مشروع AgriSens من الأمثلة الرائدة في شمال إفريقيا على توظيف **إنترنت** الأشياء (IoT) في الزراعة. يهدف المشروع إلى تطوير أنظمة ري ذكية تعتمد على البيانات الحقلية، حيث تُستخدم مستشعرات لقياس التبخر، والرطوبة، والطقس المحلي. وبفضل هذه البيانات، يمكن تعديل جداول الري تلقائياً لتناسب احتياجات التربة والنبات، ما أدى إلى تقليص استهلاك المياه بنسبة تفوق 25 % في بعض المناطق الريفية، مع الحفاظ على جودة الإنتاج (AgriSens Tunisia, 2021).

- **الهند e-Choupal**

في واحدة من أوسع المبادرات في الدول النامية، أنشأت شركة ITC الهندية نظاماً يُعرف باسم e-Choupal، يربط آلاف القرى بمراكز بيانات تقدم معلومات مباشرة للمزارعين حول أحوال الطقس، والأسعار، والفرص التسويقية. من خلال أكشاك رقمية موزعة في القرى، يحصل المزارعون على بيانات دقيقة، مما خفّض التكاليف اللوجستية، وحسّن من قدرتهم التفاوضية، وأسهم في زيادة دخلهم بشكل ملحوظ (e-Choupal, 2020).

- **الولايات المتحدة – منصة Climate FieldView**

تُعد منصة Climate FieldView مثالاً متقدماً على توظيف الذكاء الاصطناعي والبيانات الضخمة في الزراعة التجارية. تعتمد المنصة على دمج بيانات الطقس، صور الأقمار الصناعية، وأجهزة الاستشعار داخل الحقل، لتقديم تحليلات دقيقة وفردية لكل مزرعة. وبناءً على هذه التحليلات، يحصل المزارع على توصيات مصممة خصيصاً لتحسين الغلة وتقليل المخاطر البيئية، وهو ما يعزز من العائد الاقتصادي للمزرعة ويقلل من الاستخدام غير الضروري للموارد (Climate Corporation, 2023).

7. التحديات في إدارة البيانات الزراعية

رغم الإمكانات الهائلة التي توفرها البيانات الضخمة، إلا أن تطبيقها على نطاق واسع يواجه العديد من العقبات، خاصة في الدول النامية أو المناطق الريفية. ويمكن تلخيص أبرز التحديات كما يلي:

- **ضعف البنية التحتية الرقمية:**

في العديد من المناطق الريفية، تفتقر المزارع إلى اتصال إنترنت مستقر، أو تغطية شبكية جيدة، مما يُعيق جمع البيانات في الوقت الحقيقي أو استخدام المنصات السحابية. دون بنية تحتية رقمية قوية، تفقد البيانات فعاليتها ولا تصل إلى أدوات التحليل أو صُنّاع القرار في الوقت المناسب.

- **غياب الأطر القانونية لحماية البيانات الزراعية:**

البيانات التي يجمعها المزارع عن أرضه ومحصوله تُعد أصلاً تجارياً ثميناً، لكن في غياب قوانين واضحة، تظل هذه البيانات عرضة للاستخدام غير المشروع، أو حتى البيع دون علم المزارع. لا تزال التشريعات المتعلقة بملكية البيانات الزراعية،

والخصوصية، واستخدام الذكاء الاصطناعي في هذا المجال غير مكتملة في كثير من الدول.

- **نقص الكفاءات التقنية:**

حتى في حال توفر الأجهزة والمنصات، فإن تشغيلها وتحليل مخرجاتها يتطلب معرفة متخصصة. العديد من المزارعين لا يمتلكون المهارات اللازمة لفهم البيانات أو اتخاذ قرارات بناءً عليها، بينما لا تزال الكوادر الفنية المتخصصة في تحليل البيانات الزراعية أو أدوات DSS قليلة، ما يُشكل عائقاً حقيقياً للتطبيق الواسع.

- **محدودية التمويل:**

المشروعات التي تعتمد على البيانات الضخمة عادة ما تحتاج إلى استثمارات أولية في الأجهزة، البرمجيات، وتدريب الفرق. في ظل ميزانيات زراعية محدودة، يجد صغار المزارعين والهيئات المحلية صعوبة في تخصيص التمويل الكافي لهذه المشروعات، خاصة في ظل غياب نماذج واضحة للعائد الاقتصادي المباشر.

- **مخاوف تتعلق بالخصوصية:**

هناك قلق متزايد بين المزارعين من أن تصبح بياناتهم وسيلة للمراقبة أو التلاعب، خاصة عندما يتم تجميعها وتحليلها من قبل شركات كبيرة. يخشى البعض من أن تُستخدم هذه البيانات لتحديد أسعار الشراء أو التلاعب بها بطريقة تضر بمصالحهم (Kamilaris *et al*., 2018).

8. السياسات والحوكمة

في ظل النمو المتسارع لاستخدام البيانات الضخمة في الزراعة، برزت الحاجة إلى وجود سياسات واضحة وآليات حوكمة فعالة تنظم كيفية جمع البيانات، ومشاركتها، وتحليلها، وتوظيفها في خدمة المزارع والمجتمع. فالبيانات، كغيرها من الموارد

الاستراتيجية، تتطلب توازناً دقيقاً بين الانفتاح والخصوصية، وبين الابتكار والحماية، وبين استخدام التقنية وتحقيق العدالة الاجتماعية.

وقد بدأت العديد من الحكومات والمؤسسات الدولية باتخاذ خطوات عملية في هذا المجال، تشمل:

- **فتح البيانات الزراعية الحكومية:**

تعمل بعض الحكومات على إتاحة قواعد البيانات المتعلقة بالإنتاج، والتربة، والطقس، والأسواق، في صيغ مفتوحة تُمكن الباحثين والمبتكرين والمزارعين من الوصول إليها واستخدامها. هذا التوجه يُعزز من الشفافية ويدعم الابتكار، كما يسهل بناء تطبيقات ومنصات رقمية مفيدة تعتمد على هذه البيانات (World Bank, 2021).

- **دعم المنصات الرقمية المحلية:**

بدلاً من الاعتماد على حلول أجنبية مكلفة أو غير ملائمة للسياق المحلي، يجري دعم تطوير منصات وطنية قادرة على تحليل البيانات الزراعية وتقديم خدمات مخصصة للمزارعين، باللغة المحلية ووفق احتياجاتهم الفعلية. هذه المنصات تسهم في تعزيز السيادة الرقمية وتقلل من الاعتماد على الخارج.

- **تمويل حاضنات الابتكار الزراعي الرقمي:**

يُعتبر الاستثمار في الشركات الناشئة، والمبادرات الابتكارية، ومراكز البحث التي تعمل على حلول رقمية زراعية خطوة حيوية نحو تعزيز الاقتصاد الزراعي الرقمي. الحاضنات والمسرّعات تساعد على تحويل الأفكار التقنية إلى تطبيقات قابلة للاستخدام، وتُسهّل انتقال التكنولوجيا إلى الحقول.

- **تبني معايير موحدة لتبادل البيانات:**

واحدة من أكبر العقبات أمام الاستفادة من البيانات الزراعية هي عدم توافق الأنظمة والمنصات. لذلك، يُعد وضع معايير موحدة لتخزين وتبادل البيانات (Data Interoperability) خطوة جوهرية في تمكين مختلف الفاعلين في سلسلة القيمة الزراعية — من المزارع إلى التاجر إلى الجهة التنظيمية — من تبادل البيانات والاستفادة منها بشكل متكامل.

الحوكمة الذكية للبيانات الزراعية تتطلب أيضاً وجود تشريعات واضحة تحمي حقوق المزارعين، وتنظّم الوصول إلى البيانات، وتضمن الشفافية في استخدامها، بما يحقق الفائدة العامة دون الإضرار بالفئات الضعيفة أو الأقل قدرة على التفاوض في النظام الرقمي الجديد.

9. الخاتمة

تشير التحولات الجذرية التي يشهدها القطاع الزراعي اليوم إلى أننا نقف على أعتاب عصر جديد تقوده البيانات الزراعية الضخمة وذكاء القرار .لم تعد الزراعة تقتصر على أدوات تقليدية أو قرارات تعتمد على الحدس والخبرة الشخصية، بل أصبحت تعتمد على نماذج حسابية دقيقة، وتحليلات في الزمن الحقيقي، وتوصيات مبنية على مليارات من نقاط البيانات.

لكن إدماج هذه المنظومات الرقمية لا يعني فقط امتلاك التكنولوجيا، بل يتطلب رؤية متكاملة تشمل:

- استثماراً طويل الأمد في البنية التحتية الرقمية، خاصة في المناطق الريفية.
- تعزيز القدرات البشرية من خلال التدريب والتعليم في تحليل البيانات واستخدام أدوات الذكاء الاصطناعي.

- تطوير نظم حوكمة عادلة وشفافة تحمي خصوصية المزارعين وتضمن عدالة التوزيع في فرص الوصول إلى البيانات.
- تشجيع التعاون بين القطاعين العام والخاص لخلق منظومات بيانات مفتوحة وقابلة للتكامل.

في ظل التحديات المناخية، وضغوط الأمن الغذائي، والتقلبات الاقتصادية، تشكل البيانات أداة حيوية لبناء زراعة أكثر إنتاجية، واستدامة، ومرونة .من خلال الاستثمار في هذه القدرات الجديدة، يمكن للدول والمزارعين أن يتحولوا من مستهلكين للمعرفة إلى صناع قرار ذكي، يوجهون الزراعة نحو مستقبل أكثر ذكاءً وإنصافاً.

10. المراجع

AgriSens Tunisia. (2021). *Using IoT and data analytics for smart irrigation*. Tunis: AgriSens Project Report.

Climate Corporation. (2023). *FieldView platform overview*. Retrieved from https://climate.com

e-Choupal. (2020). *Empowering rural farmers through data*. ITC Limited, India.

FAO. (2022). *Digital agriculture: The future of farming*. Rome: Food and Agriculture Organization.

Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 23–37. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

World Bank. (2021). *Data-driven agriculture: The future of farming in Africa and beyond*. Washington, D.C.: World Bank Group.

الفصل 15 - الحوسبة السحابية في الزراعة الذكية

المحتويات

1. المقدمة
2. فوائد الحوسبة السحابية في الزراعة الذكية
3. دراسة حالات موسعة حول استخدام الحوسبة السحابية
4. أنظمة الحوسبة السحابية
5. نماذج وبرمجيات محددة لأنظمة الحوسبة السحابية الزراعية
6. التحديات والفرص التي تواجه الحوسبة السحابية في الزراعة
7. مستقبل الحوسبة السحابية في الزراعة
8. الخاتمة
9. المراجع

1. المقدمة

في عالم الزراعة الحديثة، تَحْتَلّ الحوسبة السحابية مكانة محورية في دعم الثورة الرقمية التي يشهدها القطاع الزراعي. تُعتبر الحوسبة السحابية واحدة من أبرز الأدوات التي تمكّن المزارعين والمستثمرين في المجال الزراعي من تحسين كفاءة الإنتاج، وتقليل التكاليف، وضمان استدامة العمليات الزراعية (راغب وآخرون، 2024). من خلال توفير بيئة حوسبة مرنة وقابلة للتوسع، تُتيح هذه التكنولوجيا الوصول الفوري إلى الموارد الحاسوبية والبيانات الضخمة، مما يسهم في تحسين اتخاذ القرارات الزراعية، وتعزيز فعالية استخدام الموارد الطبيعية مثل المياه والأسمدة.

يركز هذا الفصل على كيفية تطبيق الحوسبة السحابية في الزراعة الذكية، مستعرضاً فوائدها المتعددة في تحسين العمليات الزراعية. كما يستعرض الفصل دراسة حالات موسعة حول استخدام الحوسبة السحابية في المزارع العالمية، ويقدم تحليلاً لعدد من

النماذج والبرمجيات المحددة التي تدعم الزراعة الذكية، مثل أنظمة الرصد والتحليل البيئي، إدارة الري الذكي، والتنبؤ بالإنتاجية.

إلى جانب ذلك، يتناول الفصل التحديات التي تواجه تبني هذه التقنية في الزراعة، بما في ذلك القضايا المتعلقة بالبنية التحتية، أمان البيانات، ومتطلبات التدريب. كما يسلط الضوء على الفرص المستقبلية التي يمكن أن تفتحها الحوسبة السحابية أمام المزارعين، سواء من حيث الابتكار في العمليات الزراعية أو في تحقيق مستويات أعلى من الاستدامة البيئية.

في ختام الفصل، يُناقش مستقبل الحوسبة السحابية في الزراعة، مع استعراض الاتجاهات المستقبلية لهذه التقنية في تحسين الإنتاجية الزراعية، ودورها في مواجهة تحديات الأمن الغذائي والمناخ.

2. فوائد الحوسبة السحابية في الزراعة الذكية

- **توفير التكاليف:** الاستفادة من البنية التحتية السحابية بدلاً من المحلية.

الاستعانة بالخدمات السحابية يعني تجنب الإنفاق الكبير على إنشاء وصيانة مراكز بيانات محلية، بما في ذلك:

- تكلفة شراء الأجهزة، الخوادم، معدات التخزين، وأنظمة الشبكات.
- نفقات الصيانة الدورية، تحديث الأنظمة، وتوظيف كوادر تقنية متخصصة لإدارة الحوسبة.
- تكاليف الطاقة والتبريد المرتبطة بالمراكز المحلية.

بدلاً من ذلك، يعتمد المزارعون على نظام الدفع مقابل الاستخدام (Pay-as-you-go)، حيث يتم توفير الموارد حسب الحاجة ويتم دفع مقابلها فقط، مما يجعل التكاليف أكثر مرونة وقابلة للتنبؤ (Wang *et al.*, 2020). هذا النموذج

يُتيح للمزارعين، لا سيما ذوي الموارد المحدودة، تبني تقنيات حديثة بدون التزام مالي مرتفع.

الفوائد المتعددة للحوسبة السحابية في للممارسات الزراعية، وتشجع على اتباع نهج أكثر استنارة وكفاءة واستدامة.

مثال تطبيقي:

في الأردن، قررت مزرعة متوسط الحجم استضافة نظام إدارة المحاصيل على منصة حوسبة سحابية بدلاً من بناء مركز بيانات داخلي مكلف. أدى اعتماد نموذج الدفع حسب الاستخدام إلى خفض التكاليف رأس المالية بشكل كبير، وتمكنوا من تقليل النفقات التشغيلية المتعلقة بالصيانة والدعم التقني. كانت التكلفة مرتبطة باستهلاك الموارد فعلياً فقط، مما حسن من القدرة على إدارة الميزانية ورفع كفاءة الإنتاج (صحيفة مال، 2024).

كيفية التطبيق:

في المشاريع الزراعية الصغيرة، يمكن تطبيق الحوسبة السحابية بواسطة استخدام منصات تقدم خدمات مثل تحليل التربة والطقس عبر الإنترنت. بدلاً من استثمار مبالغ كبيرة في أدوات ومختبرات تحليل، يشتري المزارع جلسات تحليل عند

الحاجة، مما يحوّل تكلفة كبيرة إلى مصاريف متغيرة يمكن التحكم بها بسهولة. هذا النموذج يناسب المزارع الصغيرة والمتوسطة التي ترغب في تحسين دقة زراعتها دون استثمارات مكلفة.

- **المرونة أو قابلية التوسع:** الوصول المستمر إلى البيانات والأنظمة

من أهم مزايا الحوسبة السحابية هي المرونة العالية في زيادة أو تقليل الموارد الحاسوبية بسهولة تامة، إذ تسمح للمزارعين:

- بالوصول إلى بيانات المزرعة وأنظمتها في أي وقت ومن أي مكان عبر الإنترنت، باستخدام أجهزة الحاسوب أو الهواتف الذكية أو الأجهزة اللوحية.
- اتخاذ قرارات سريعة ومبنية على بيانات محدثة بشكل لحظي، مثل ضبط الري، التسميد، أو مكافحة الآفات فور ظهور المؤشرات المناسبة.
- التعاون بسهولة مع فرق الدعم الفني والمستشارين الزراعيين عن بعد، مما يعزز سرعة الاستجابة ويساعد في حل المشكلات دون الحاجة لزيارة مواقع المزرعة.

هذه المرونة تدعم استجابة ذكية وفعّالة لمتغيرات الطقس والسوق ومتطلبات المحاصيل، مما يقلل من المخاطر ويرفع فرص النجاح الزراعي (Pan *et al.*, 2023).

مثال تطبيقي:

- ✓ في مزرعة كبيرة للخضروات في كاليفورنيا، تزيد الموارد السحابية خلال موسم الحصاد حين تتطلب أنظمة المراقبة بيانات من آلاف المستشعرات، وتنخفض في الفترات غير النشيطة، مما يوفّر تكاليف التشغيل ويضمن استقرار الأداء (AWS, 2025).

- ✓ في كينيا، استخدمت مجموعة من المزارعين نظاماً سحابياً متكاملاً يتيح لهم مراقبة بيانات الطقس ورطوبة التربة عبر هواتفهم الذكية، حتى في المناطق النائية. اعتمد النظام على أجهزة استشعار متصلة بالسحابة تُحدث البيانات في الوقت الفعلي، مما مكن المزارعين من تعديل مواعيد الري والتسميد بسرعة وبدقة. هذا انعكس على زيادة المحصول وتقليل الاستهلاك غير الضروري للمياه (ITU, 2021). النظام يضبط الموارد ديناميكياً حسب الحاجة، مما يحقق استجابة مرنة للتقلبات المناخية والموسمية، ويقلل من الضياع في الموارد.

كيفية التطبيق:

المزارع الكبيرة التي تعتمد على مئات أو آلاف أجهزة الاستشعار يمكنها ضبط موارد الحوسبة السحابية بزيادة الطاقة والمعالجة فقط خلال أوقات الذروة مثل موسم الحصاد. وهناك يمكنهم خفض هذه الموارد في الفترات العادية مما يوازن بين أداء النظام والتكاليف التشغيلية. الشركات المزودة للسحابة غالباً ما توفر أدوات مراقبة ذكية للتحكم في هذه الموارد تلقائياً لزيادة الكفاءة.

- **تحسين عملية اتخاذ القرار:**

توفر الحوسبة السحابية منصات قوية لتحليل البيانات باستخدام الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة، والتي تُمكّن المزارعين من استخراج رؤى قيمة من البيانات الزراعية والمناخية والتجارية. باستخدام هذه الأدوات، يمكن تحديد الوقت الأمثل للزراعة والحصاد، تخصيص المياه والأسمدة بشكل دقيق، والتنبؤ بالمخاطر مثل الآفات أو الطقس غير المناسب. هذا يؤدي إلى قرارات زراعية مبنية على بيانات دقيقة، مما يعزز الإنتاجية ويقلل من الهدر والخسائر.

مثال تطبيقي:

مزارع في الهند يستخدم منصة ذكاء اصطناعي سحابية لتحليل بيانات الطقس ورطوبة التربة، مما قلّل هدر المياه بنسبة 30% وزاد المحصول بنسبة 15% بناءً على قرارات تستند إلى بيانات موثوقة (عين ليبيا، 2024).

كيفية التطبيق:

توظيف حلول ذكاء اصطناعي متقدمة مرتبطة بالسحابة يتيح للمزارعين نقل بيانات الطقس والتربة والمحاصيل إلى أنظمة تعلم آلي تحلل البيانات وتقدم توصيات عملية مثل مواعيد الري والتسميد المناسبة، والتنبيه بالمخاطر المحتملة كالآفات والظروف الجوية القاسية. تطبيقات الهواتف الذكية تُمكّن المزارع من استقبال هذه التوصيات وقتياً، مما يدعم قرارات أكثر دقة وأسرع.

- **استدامة مُحسّنة:**

عبر تقنيات الزراعة الدقيقة المدعومة بالحوسبة السحابية، يمكن توجيه الموارد الزراعية (كالأسمدة، والمياه) بشكل أكثر فعالية بناءً على مراقبة مستمرة لمتطلبات النباتات والتربة. هذا يقلل من الإفراط في استخدام الموارد ويقلل التأثير البيئي، مثل تقليل تلوث المياه والتربة وغلاء انبعاثات الكربون. كما تساعد هذه التقنيات في تحسين استهلاك الطاقة من خلال عمليات أوتوماتيكية ذكية تعتمد على البيانات الحقيقية، مما يسهم في تطوير زراعة أكثر صداقة للبيئة.

مثال تطبيقي:

في هولندا، تم اعتماد نظام ري ذكي مدعوم بالسحابة يضبط كمية المياه والأسمدة حسب تحليل التربة الفعلي، الأمر الذي قلّل استهلاك المياه بنسبة 40% وقلل الأثر البيئي (صحيفة مال، 2024).

كيفية التطبيق:

استخدام أنظمة ري ذكية متصلة بالسحابة تعتمد على تحليل مباشر بيانات التربة والعناصر الغذائية يضمن توزيع الموارد بكفاءة عالية، لتقليل الإهدار وتأثير البيئة. تطبيقات الواقع الافتراضي والإنترنت الصناعي للأشياء تُستخدم أيضاً لمراقبة حالة النباتات والتربة بدقة، مما يسهم في الإدارة البيئية المستدامة.

- **زيادة الإنتاجية: خفض الفاقد، وتعزيز الاستدامة لتحقيق الأمن الغذائي**

الحوسبة السحابية تصبح أداة قوية تحقيقاً لأهداف الزراعة الحديثة:

- زيادة الإنتاجية: من خلال أتمتة عمليات الري، التسميد، المراقبة باستخدام البيانات الحية، مما يزيد من كفاءة العمليات ويقلل الهدر.
- خفض الفاقد: من خلال تحسين اتخاذ القرار والمراقبة المستمرة للحالة الصحية للمحاصيل، يمكن التقليل من خسائر المحاصيل الناتجة عن الآفات أو الطقس غير المناسب.
- تعزيز استدامة الموارد: عبر تطبيق تقنيات الزراعة الدقيقة التي تعتمد على بيانات موسعة لتحسين استخدام المياه والأسمدة وتقليل الانبعاثات الكربونية.

تمكن هذه الفوائد معاً من تحقيق إنتاج زراعي أكثر استقراراً وكفاءة، مما يساهم بشكل مباشر في تحسين الأمن الغذائي العالمي خصوصاً مع تحديات النمو السكاني وتغير المناخ (Keenethics, 2024; Pan *et al*., 2023).

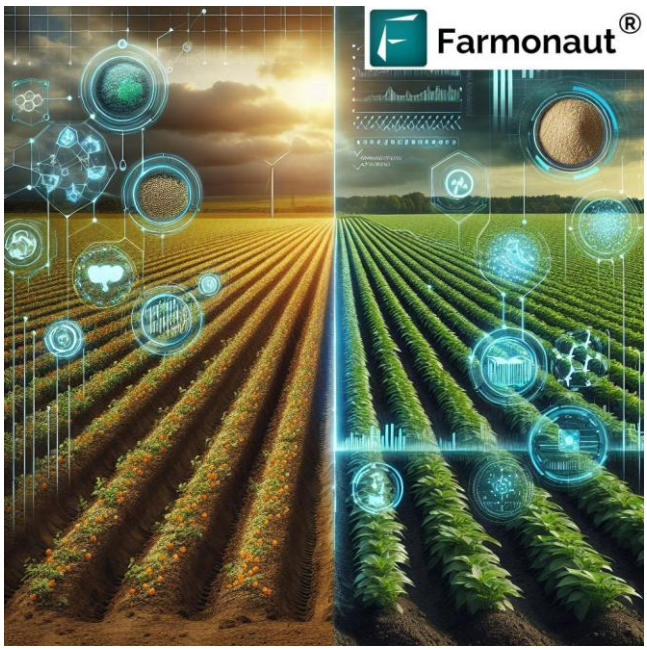
مثال تطبيقي:

- ✓ مزرعة في أستراليا تستخدم حوسبة سحابية لأتمتة الري والتحكم في المناخ داخل البيوت البلاستيكية، ما قلّل الحاجة للعمالة اليدوية وزاد الإنتاجية بنسبة 20% (عين ليبيا، 2024).

- ✓ في مزرعة زراعية هولندية تعتمد على تقنيات الزراعة الدقيقة، تم استخدام الحوسبة السحابية لتحليل بيانات التربة واحتياجات النبات بشكل متكامل. ساعد النظام على ضبط كمية المياه والأسمدة المستخدمة بشكل دقيق مما أدى إلى تقليل الاستهلاك بنسبة 40% وزيادة الغلة بنسبة 20%. كما ساعدت عمليات المراقبة المستمرة وتقنيات الذكاء الاصطناعي التي تعمل في السحابة على الحد من هدر المنتجات الزراعية المرتبطة بالآفات والظروف المناخية (صحيفة مال، 2024).

كيفية التطبيق:

حوسبة السحابية تُستخدم لأتمتة عمليات الزراعة مثل الري الإلكتروني، التحكم في المناخ داخل البيوت البلاستيكية، ومراقبة حالات المحاصيل أو المخزون. برمجيات إدارة الزراعة التي تستند للسحابة توفر جدولة ذكية للمهام وتوزيع الموارد، مما يقلل العمالة اليدوية ويرفع الكفاءة العامة.



أتمتة العمليات الزراعية من خلال الحوسبة السحابية

- **تحسين إمكانية التتبع وسلامة الغذاء:**

تُمكّن الحوسبة السحابية من إنشاء نظم تتبع متكاملة توثق كل مراحل سلسلة التوريد الزراعية بدءاً من الزراعة حتى وصول المنتجات إلى المستهلك النهائي. هذه القدرة تساعد على التأكد من سلامة وجودة المنتجات، كما تُمكّن المستهلكين من معرفة مصدر الغذاء وطريقة الإنتاج. يساهم هذا في تعزيز الشفافية وبناء ثقة المستهلكين، ويساعد الجهات الرقابية على مراقبة الامتثال للمعايير الصحية والزراعية.

مثال تطبيقي:

شركة زراعية في كندا تستخدم نظم تعقب عبر السحابة لمراقبة مراحل الإنتاج حتى الوصول للمستهلك، مما عزز الثقة في سلامة وجودة المنتج (صحيفة مال، 2024).

كيفية التطبيق:

أنظمة سلسلة التوريد الزراعي تعتمد على سجلات إلكترونية مؤرخة مخزنة في السحابة، حيث يمكن تتبع حركة المنتج من الحقل حتى وصوله للمستهلك. تقنيات مثل رموز QR والتتبع الجغرافي مرتبطة بالسحابة تُستخدم لتعزيز الشفافية وضمان جودة الطعام، وعلى ذلك يمكن للمستهلكين التأكد من سلامة المنتجات.

- **المراقبة والإدارة عن بعد:**

توفر التطبيقات السحابية واجهات سهلة الاستخدام تتيح للمزارعين مراقبة بيانات المزرعة، مثل حالة المحاصيل والمناخ والتربة، من أي مكان وفي أي وقت عبر الأجهزة الذكية. هذا يجعل من الممكن اتخاذ قرارات فورية وسريعة استجابة للتحديات أو المشاكل التي يمكن أن تظهر، مثلاً ضبط الري عند انخفاض رطوبة التربة أو التنبيه بحدوث أضرار من الآفات.

مثال تطبيقي:

مزرعة في نيوزيلندا تعتمد على تطبيقات سحابية تُمكّن المزارع من المراقبة والتعديل عن بُعد لحال المحاصيل وعمليات الري، مما يقلل الخسائر ويعزز جودة الإنتاج (عين ليبيا، 2024).

كيفية التطبيق:

استخدام التطبيقات السحابية المحمولة يتيح للمزارعين متابعة البيانات الحية من أجهزة الاستشعار المختلفة عن بعد، مما يسمح بالتدخل الفوري عند حدوث أي خلل مثل تغير في درجة حرارة التربة أو ظهور آفات. هذا يدعم المرونة ويمنع تفاقم المشاكل قبل أن تؤثر سلباً على المحصول.

- **دعم الابتكار: بيئة مرنة لتطوير واختبار التطبيقات الجديدة**

توفر الحوسبة السحابية بيئة مثالية لتطوير تطبيقات زراعية مبتكرة، حيث يمكن للشركات الناشئة والباحثين والمزارعين:

- اختبار تقنيات جديدة كالذكاء الاصطناعي، تعلم الآلة، إنترنت الأشياء، والطائرات بدون طيار ضمن منصة مرنة وسريعة التكيف.
- نشر التطبيقات الجديدة بسرعة على نطاق واسع دون الحاجة إلى بنى تحتية معقدة.
- الاستفادة من إمكانيات الحوسبة عالية الأداء والتحليلات الكبيرة لإنتاج حلول ذكية تدعم تحسين الإنتاجية وإدارة الموارد.

تساعد هذه البيئة المبتكرة في تسريع تبني التكنولوجيا الذكية في الزراعة وتحفيز الابتكار المستمر.

مثال تطبيقي:

شركة ناشئة هندية طورت منصة تعتمد على الحوسبة السحابية والذكاء الاصطناعي لتحليل بيانات التربة والطقس في الوقت الفعلي. تمكنت المنصة من توفير توصيات ذكية لمواعيد الري والتسميد بناءً على تحليل متقدم عبر السحابة، مما ساعد المزارعين في تحسين استهلاك المياه بنحو 25% وزيادة الغلة. استفاد المطورون من بيئة مرنة تسمح بالاختبار السريع للتحديثات وميزات الذكاء الاصطناعي مما سرّع إمكانية توفير حلول مبتكرة (MokoSmart, 2024).

متابعة دراسات حالة محددة:

- **مزرعة كاليفورنيا الكبرى للخضار:**

استخدمت هذه المزرعة منصة AWS للحوسبة السحابية لإدارة آلاف أجهزة الاستشعار، وتمكنت من زيادة إنتاجيتها مع تقليل التكاليف بفضل قابلية التوسع الديناميكية لنظام الحوسبة السحابية. حققت تحسناً كبيراً في إدارة الموارد ومواعيد الحصاد (AWS, 2025).

- **مزرعة عضوية في هولندا:**

اعتمدت نظام ري ذكي متصل بالسحابة لتحسين استهلاك المياه والأسمدة، وحققت تخفيضاً ملموساً في استهلاك الموارد بنسبة 40%، وأسهمت في تحسين الأثر البيئي بشكل عام (الزراعة الذكية، 2024).

- **مشروع الري الذكي في الهند:**

استخدم مزارعون منصة ذكاء اصطناعي سحابية لتحليل بيانات الطقس والتربة لتوقيت الري، فزاد الإنتاج بنسبة 15% مع تقليل هدر المياه (عين ليبيا، 2024).

هذه التطبيقات ودراسات الحالة توضح أن الحوسبة السحابية ليست تقنية نظرية بل أداة عملية ومتاحة تسهم في تطور الزراعة وفق أسس علمية مستدامة واقتصادية فعالة.

3. دراسة حالات موسعة حول استخدام الحوسبة السحابية

العراق:

أولاً - استخدام الحوسبة السحابية في زراعة محصول الأرز في العراق

- الخلفية: العراق يواجه تحديات زراعية متعددة مثل تغير المناخ، ندرة المياه، وتغيرات في البيئة الزراعية. محصول الأرز من المحاصيل الاستراتيجية التي تتطلب إدارة دقيقة للري والحقل لضمان إنتاجية جيدة.
- تطبيق الحوسبة السحابية: في إطار جهود تحديث الزراعة ودعم المزارعين، تبنت وزارة الزراعة في العراق مع بعض الشركاء المحليين والدوليين منصات رقمية قائمة على الحوسبة السحابية. هذه المنصات تجمع بيانات من شبكات أجهزة استشعار في الحقول وأقمار صناعية تُرصد ظروف التربة ونسبة الرطوبة ودرجة الحرارة وغيرها من المؤشرات الحيوية.
- كيفية التطبيق: عبر الحوسبة السحابية، تتيح هذه البيانات للمزارعين في الوقت الحقيقي متابعة حالة محصول الأرز، وضبط الري والتسميد وفقاً لتحليل دقيق للبيانات التي تقدمها المنصة السحابية. كما تستخدم تطبيقات الهواتف الذكية المدعومة بالسحابة لإرسال تنبيهات وتوصيات للمزارعين بناءً على تغيرات المناخ أو ظهور أي مشاكل مثل الآفات.
- النتائج والفوائد: حقق المزارعون المشاركون زيادة في إنتاجية محصول الأرز مع تقليل استهلاك المياه بنسبة ملحوظة. كما تم تقليل الفاقد الناتج عن سوء إدارة الموارد بفضل اتخاذ قرارات مستندة إلى بيانات مباشرة ومتاحة في كل وقت ومن

أي مكان. هذه الحلول تعزز أيضاً من الاستدامة البيئية عن طريق تحسين استخدام الموارد.

- دور المنظمات الدولية: منظمة الأغذية والزراعة تدعم توفير "حافظة الخدمات الرقمية" القائمة على الحوسبة السحابية والتي تساعد على تعميم هذه الحلول في المناطق الريفية بالعراق، خصوصاً لأصحاب الحيازات الصغيرة، عبر إرشادات الزراعة الرقمية (الفاو، 2023).

هذه الدراسة توضح كيف يمكن للحوسبة السحابية أن تحسن إدارة محصول استراتيجي كمحصول الأرز في العراق، عبر تمكين مراقبة ومتابعة دقيقة ومتواصلة وتحليل للبيانات الزراعية، مما يدعم زيادة الإنتاج وتحقيق الاستدامة.

الحوسبة السحابية هي حجر الزاوية في الزراعة الدقيقة، وهي استراتيجية إدارة زراعية تستخدم التكنولوجيا لتحسين استخدام الموارد وتحسين العائدات

ثانياً ـ استخدام الحوسبة السحابية في إدارة محصول التمور في العراق

الاستراتيجيات الرئيسية:

الميزة	استراتيجية تطبيق في العراق	الفوائد
مراقبة وتحليل البيانات	شبكات استشعار مزروعة في بساتين النخيل تربط البيانات بمنصات سحابية لتحليل ذكي	تحسين دقة الري والتسميد، تقليل الخسائر بسبب الآفات والظروف المناخية
إدارة سلسلة التوريد	تتبع المنتجات عبر منصات سحابية تسمح برصد جودة المنتج وتعزيز التصدير	تقليل الهدر، زيادة ثقة المستهلك، تحسين فرص تصدير التمور
التنبيه المبكر وإدارة المخاطر	نظام تنبيهات مبكرة من خلال تطبيقات سحابية متصلة بالهواتف الذكية	التدخل السريع يقلل الأضرار ويحسن جودة المحصول
التخطيط والتحليل المركزي	بيانات موحدة على السحابة لدعم التخطيط الزراعي ومتابعة الأداء	زيادة الإنتاجية وتحسين التخطيط المستقبلي

اعداد وتنسيق المؤلفين

الإمارات

في الإمارات، برزت مبادرات زراعية متقدمة تعتمد على الحوسبة السحابية لإنماء قطاع الزراعة في بيئة صحراوية تحدياتها كبيرة، مثل ندرة المياه وارتفاع درجات الحرارة. على سبيل المثال، فريق "فارمنا" استخدم الحوسبة السحابية مع تقنيات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء لإدارة مزارعهم وتحليل بيانات التربة والرطوبة

ودرجات الحرارة عن بُعد، مما سمح برصد دقيق وتحكم بتحسين ممارسات الري والاستهلاك، خاصة في البيوت المحمية والزراعة المائية. والنتيجة كانت زيادة في الإنتاجية مع ترشيد واضح لاستهلاك المياه (البيان، 2021).

أيضاً، "هيئة أبوظبي للزراعة والسلامة الغذائية" تبنت أنظمة ري ذكية تستخدم الحوسبة السحابية لتحسين كفاءة استهلاك المياه وتقليل الفاقد الزراعي في حوالي 24 ألف مزرعة في الإمارة (وام WAM، 2024).

السعودية

في السعودية، تدعم الحكومة والخبراء الزراعيون توظيف الحوسبة السحابية ضمن استراتيجية الأمن الغذائي والاستدامة. تم تطبيق نظام تحكم بيئي مبني على الحوسبة السحابية في مزارع الزراعة الداخلية والعمودية لتنظيم الإضاءة ودرجة الحرارة والرطوبة بدقة، ما أدى إلى نمو أمثل للنباتات، واستخدام أكثر فعالية للموارد في البيئات الزراعية المتحكم فيها. تعتمد هذه الأنظمة أيضاً على الذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات وتقديم توصيات فورية لتحسين الإنتاجية وتقليل الهدر. كما ساهمت مشاريع الحوسبة السحابية في تطوير حلول ذكية للري وتخفيف الآثار المناخية على المحاصيل (الخليج، 2024).

مصر

في مصر، بدأ تطبيق الحوسبة السحابية يعزز الزراعة الذكية خصوصاً في محاصيل مثل القمح والأرز والفاكهة التي تحتاج إلى إدارة دقيقة للري والتسميد. اعتمدت بعض المزراع على تطبيقات تستخدم الحوسبة السحابية لجمع بيانات الطقس والتربة وتحليلها عبر منصات سحابية، مما ساعد في اتخاذ قرارات أفضل بخصوص توقيت الري والوقاية من الآفات، أسهم ذلك في زيادة المحصول وتحسين نوعيته. كما دعمت المبادرات الحكومية بعض مشاريع الزراعة الرقمية التي تركز على التكامل بين

الحوسبة السحابية وتقنيات إنترنت الأشياء لتحسين استدامة الموارد ومتابعة حالة الحقول عن بعد (غرفة الأخبار MEA Newsroom IBM، 2024).

4. أنظمة الحوسبة السحابية

تُعد أنظمة الحوسبة السحابية في الزراعة من الركائز الأساسية لتحويل البيانات الضخمة إلى قرارات ذكية، حيث تمكّن المزارعين من جمع وتحليل البيانات المستمدة من مصادر متعددة مثل أجهزة الاستشعار والطائرات بدون طيار، وذلك بدقة وفعالية عالية.

- **جمع وتحليل البيانات**

تعتمد أنظمة الحوسبة السحابية في الزراعة على جمع كميات ضخمة من البيانات من مصادر متنوعة مثل أجهزة الاستشعار المنتشرة في الحقول، الطائرات بدون طيار، الأقمار الصناعية، وغيرها. يتم رفع هذه البيانات إلى منصات سحابية متقدمة تُستخدم فيها تقنيات الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات البيانية لتحويل هذه الكميات الكبيرة من البيانات إلى معلومات مفصلة تساعد في اتخاذ قرارات زراعية دقيقة. تشمل هذه التحليلات مناخ الحقل، حالة التربة، مستويات الرطوبة، ووضع المياه، لتقديم توصيات حول توقيت الزراعة، اختيار المحاصيل الملائمة، وأساليب الري الأكثر كفاءة (Ahmed *et al*., 2025).

- **إدارة الري الذكية**

يمكن ربط الأنظمة السحابية بأنظمة الري الذكية التي تستفيد من بيانات أجهزة الاستشعار لتحليل الحاجة الحقيقية للمحصول إلى المياه. تستخدم أنظمة الذكاء الاصطناعي هذه البيانات لضبط كمية المياه ووقت الري بدقة في الوقت الحقيقي، مما يقلل من الفاقد في الماء ويحسن كفاءة استخدام الموارد، وهذا أمر مهم جداً في المناطق التي تعاني من ندرة المياه مثل العراق وبعض مناطق الشرق الأوسط (دي آر سي DRC، 2024).

إدارة الري الذكية (عن: دي آر سي DRC، 2024).

- **التشخيص المبكر للأمراض والآفات**

تعتمد المنصات السحابية على بيانات ميدانية تجمعها الصور الطيفية للطائرات بدون طيار وأجهزة الاستشعار التي تراقب العلامات الحيوية للنباتات. يوفر هذا التشخيص المبكر إمكانية التنبؤ بالآفات والأمراض في مراحلها الأولى قبل استفحالها، مما يساعد المزارعين على اتخاذ إجراءات وقائية سريعة، تخفض من استخدام المبيدات وتقلل الخسائر المحصولية (Ahmad *et al*., 2025).

أمثلة تطبيقية لأنظمة الحوسبة السحابية الزراعية

- **نظام WAGRI في اليابان**

يعتبر من النماذج الرائدة حيث يجمع بيانات من الأقمار الصناعية وأجهزة الاستشعار لتوفير منصة موحدة للتحكم والمراقبة، وتستخدمه شركات زراعية خاصة لتطوير خدمات معلوماتية زراعية مدعومة بالذكاء الاصطناعي والتحليلات المعمقة، مما يحسّن الإنتاجية ويقلل من الخسائر (Ahmad *et al*., 2025).

- **مشروع وطني في السعودية**

تطبق أطر الحوسبة السحابية مع الذكاء الاصطناعي في أنظمة التحكم في البيوت المحمية، حيث تضبط التحكم في الإضاءة، درجة الحرارة، والرطوبة عبر واجهات سحابية متصلة تتيح الإدارة عن بعد وتحسين الظروف البيئية لنمو مثالي للنباتات (أر ام جي RMG-sa، 2025).

- **مشاريع زراعية في العراق**

تستخدم منصات سحابية لدعم المزارعين في مراقبة ظروف الري والطقس، حيث تجمع البيانات من أجهزة الاستشعار وترسل توصيات فورية عبر التطبيقات المحمولة لتعديل الري ومكافحة الآفات، مما أدى إلى تحسين استخدام المياه وزيادة الإنتاجية (دي آر سي DRC، 2024).

ملخص لأمثلة البرمجيات والخدمات السحابية في الزراعة

الأداة/المنصة	الوظيفة الرئيسية	المزود	المراجع
Amazon Web Services (AWS)	تخزين وتحليل بيانات الزراعة الذكية، دعم IoT والذكاء الاصطناعي	Amazon	Tridens Technology, 2025

Microsoft Azure	منصة تطوير تطبيقات زراعية متقدمة، إدارة البيانات والتحليلات	Microsoft	جو جلوبال GO-Global, 2025
Google Cloud Platform (GCP)	تحليلات بيانات متقدمة، دعم الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي	Google	جو جلوبال GO-Global, 2025
Climate FieldView	تحليل بيانات الحقول الزراعية، توصيات للري والتسميد	The Climate Corporation	آر ام جي RMG, 2025
John Deere Operations Center	إدارة البيانات الزراعية وتحليلها، تكامل مع الآلات	John Deere	آر ام جي RMG, 2025
AgriWebb	إدارة المزارع الرقمية، تتبع الإنتاج	AgriWebb	آر ام جي RMG, 2025

التوجهات المستقبلية والتقنيات الداعمة

- توسع استخدام شبكات الجيل الخامس (5G) وسرعات الإنترنت العالية في المناطق الريفية، ما يعزز من اعتماد الحوسبة السحابية ويزيد من كفاءة النقل الفوري للبيانات وتحليلها.
- دمج تقنيات بلوكتشين مع الحوسبة السحابية لتحسين أمان البيانات وتسهيل تتبع سلسلة التوريد الزراعية، وزيادة الشفافية في عمليات الزراعة والتوزيع.
- استمرار تطوير نماذج الذكاء الاصطناعي والأتمتة لتقديم تنبؤات محسنة وتوصيات مخصصة لكل مزرعة حسب ظروفها الخاصة.

- تدعيم مشاركة البيانات بين الباحثين والمزارعين عبر منصات سحابية تعزز التعاون والابتكار الزراعي العالمي (Ahmad *et al*., 2025).

5. نماذج وبرمجيات محددة لأنظمة الحوسبة السحابية الزراعية

- **مزودو خدمات الحوسبة السحابية الكبرى (CSPs) المستخدمة في الزراعة**

  - Amazon Web Services (AWS): منصة متكاملة لدعم الزراعة الذكية باستخدام تحليلات البيانات الكبيرة والذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء. توفر AWS خدمات مثل تخزين البيانات وقواعد البيانات وتحليل البيانات الحيّة من أجهزة الاستشعار الزراعية (Tridens Technology, 2025).
  - Microsoft Azure: منصة للحوسبة السحابية مع دعم لتطبيقات الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات، مما يسهل على المزارعين والشركات الزراعية تطوير تطبيقات لأتمتة الري، مراقبة المحاصيل، والتحكم في العوامل المناخية (جو جلوبال، 2025).
  - Google Cloud Platform (GCP): تشتهر Google Cloud بتحليلاتها المتطورة مثل BigQuery و Vertex AI التي تسهل جمع وتحليل بيانات الطقس، التربة والمحاصيل بدقة عالية. تتيح المنصة تطوير تطبيقات ذكية لمراقبة الصحة النباتية والتنبؤ بالنشاط الزراعي (جو جلوبال، 2025).

- **برمجيات ومنصات سحابية متخصصة في الزراعة الذكية**

  - Climate FieldView: برنامج سحابي يجمع بيانات مفصلة من الحقول الزراعية ليقدم توصيات زراعية مخصصة عبر الذكاء الاصطناعي. يتيح للمزارعين مراقبة الحالة الصحية للمحاصيل وإدارة الري بكفاءة.

- John Deere Operations Center: منصة سحابية تربط بين المعدات الزراعية والخدمات السحابية التي تسمح بتحليل إنتاجية الحقول، تخطيط المحاصيل، وتحسين استخدام الموارد.
- AgriWebb: هي منصة زراعية قائمة على الحوسبة السحابية تساعد في إدارة المزارع الكبيرة بشكل رقمي، مع أدوات لتتبع الماشية، مراقبة الأراضي، وتحليل الإنتاج.

- **تطبيقات الذكاء الاصطناعي والتحليلات المتطورة**

تعتمد الكثير من الأنظمة السحابية على دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي مثل تعلم الآلة لتحليل بيانات أجهزة الاستشعار والطائرات بدون طيار، مما يتيح:

- تحليل المناخ وحالة التربة بدقة.
- التنبؤ بالأمراض والآفات مبكراً.
- تحسين توقيت الري والسماد.

6. التحديات والفرص التي تواجه الحوسبة السحابية في الزراعة

تواجه الحوسبة السحابية في الزراعة، بالرغم من فوائدها الكبيرة، تحديات جوهرية وفرصاً هامة يجب الاستفادة منها لتحقيق أقصى استفادة من هذه التقنية الحديثة. فيما يلي أهم هذه التحديات والفرص:

التحديات

- **الأمن والخصوصية:**

تعد حماية البيانات الزراعية الحساسة من الاختراقات والهجمات الإلكترونية من أكبر التحديات التي تواجه الحوسبة السحابية في القطاع الزراعي. تأتي البيانات الزراعية من مصادر متعددة (مثل أجهزة الاستشعار، الأقمار الصناعية،

والطائرات بدون طيار) وهي غالباً ذات طبيعة حساسة تتعلق بالمزارعين وعملياتهم. لذلك، يتطلب الأمر أنظمة أمنية متقدمة تشمل التشفير، التحكم في الوصول، والمصادقة متعددة العوامل لضمان سلامة واستمرارية البيانات، مع الالتزام بمعايير الامتثال والقوانين الخاصة بحماية البيانات (Pan *et al*., 2023; Madan, 2023). ما تم الإشارة إلى ضرورة تطوير حلول أمنية موجهة للمناطق الريفية مع وضع استراتيجيات لمكافحة الهجمات السيبرانية وتقليل المخاطر (ScienceDirect, 2025) .

- **البنية التحتية:**

يعتمد نجاح الحوسبة السحابية بشكل كبير على توفر الإنترنت عالي السرعة وخاصة في المناطق الريفية التي غالباً ما تعاني من ضعف الشبكات أو انعدامها. هذا العائق يجعل من الصعب على المزارعين في المناطق النائية الاستفادة الكاملة من الخدمات السحابية. يلزم تحسين البنية التحتية للاتصالات وتوفير إنترنت ميسور التكلفة ومستدام، بالإضافة إلى حلول متخصصة تناسب التحديات الجغرافية والاقتصادية للمناطق الريفية (Madan, 2023; Satej and Kumbhar, 2015). الحكومات ومزودو خدمات الاتصالات مدعوون للاستثمار في توسيع التغطية وتحسين الوصول الرقمي للمزارعين.

الفرص

- **دمج تقنيات مبتكرة**

رغم التحديات، تتيح الحوسبة السحابية فرصاً كبيرة لدمج تقنيات مثل الذكاء الاصطناعي، إنترنت الأشياء، وبلوك تشين لتحسين أمان البيانات وجودتها. هذا الدمج يدعم زيادة الشفافية وتحسين اتخاذ القرار الزراعي، بالإضافة إلى توفير حلول أكثر مرونة وفعالية (Pan *et al*., 2023; Successive Digital, 2024).

- **تمكين المزارعين الصغار والمتوسطين:**

نموذج الدفع حسب الاستخدام في الحوسبة السحابية يسمح للمزارعين ذوي الميزانيات المحدودة بالوصول إلى خدمات وتقنيات متقدمة دون الحاجة إلى استثمارات كبيرة ابتدائية في البنية التحتية، مما يعزز شمولية التكنولوجيا الزراعية (Wang *et al*., 2020).

- **تحسين استدامة الزراعة:**

يمكن للحوسبة السحابية أن تدعم ممارسات زراعية مستدامة عبر تحليل البيانات البيئية والزراعية للمساعدة في إدارة الموارد بشكل أفضل وتقليل الأثر البيئي، مثل تحسين استخدام المياه والأسمدة، وتقليل الانبعاثات الكربونية (Keenethics, 2024).

- **تطوير حلول مخصصة للمناطق الريفية:**

هناك فرصة لتطوير حلول تكنولوجية موجهة خصيصاً لمواجهة تحديات البنية التحتية والظروف الاجتماعية والاقتصادية في المناطق الريفية، بما في ذلك تقديم خدمات دون اتصال بالإنترنت، واجهات سهلة الاستخدام، ودعم للتعليم الرقمي للمزارعين (Madan, 2023; Satej and Kumbhar, 2015).

(عن: Keenethics، 2024)

بذلك، تتضح أن الحوسبة السحابية في الزراعة تحمل إمكانات ثورية لكنها تحتاج إلى معالجة التحديات الأمنية والبنيوية بشكل فعال من خلال استراتيجيات متكاملة تشمل التقنية والبنية التحتية والتعليم والسياسات الداعمة لتعزيز تبنيها على نطاق واسع وخاصة في المناطق الريفية.

7. مستقبل الحوسبة السحابية في الزراعة

تُحدث الحوسبة السحابية في الزراعة تغييراً جذرياً في المشهد الزراعي، مُبشّرةً بعصرٍ من الممارسات الزراعية الذكية القائمة على البيانات. تُقدّم هذه التقنية الفعّالة فوائدَ جمّةً ستُحدث ثورةً في كيفية زراعة وإدارة مصادر غذائنا.

- **الدقة محور الاهتمام**

تُساعد الحوسبة السحابية في الزراعة المزارعين على جمع البيانات في الوقت الفعلي من شبكة من أجهزة الاستشعار والطائرات بدون طيار والأقمار الصناعية. تُقدّم هذه البيانات صورةً مُفصّلةً لظروف الحقل، مما يُتيح تطبيق تقنيات الزراعة الدقيقة. تُحلّل المنصات السحابية هذه المعلومات، ممّا يُمكّن المزارعين من تحسين استخدام الموارد من خلال تقنية المعدلات المتغيرة. وهذا يُترجَم إلى استخدام مُحدّد للمياه والأسمدة والمبيدات الحشرية، مما يُقلّل الهدر ويُعزّز الغلة (صحيفة مال، 2024).

- **الشركات الناشئة في مجال التكنولوجيا الزراعية والحلول السحابية الأصلية**

يُعزّز نموّ الشركات الناشئة في مجال التكنولوجيا الزراعية الابتكار في الحلول السحابية للزراعة. تُطوّر هذه الشركات الناشئة منصاتٍ مُتخصّصةً مُصمّمةً خصيصاً لمواجهة تحديات زراعية مُحدّدة. تُوفر الحوسبة السحابية في الزراعة منصةً قابلةً للتطوير وفعّالة من حيث التكلفة لهذه الشركات الناشئة لنشر حلولها وتقديمها للمزارعين حول العالم.

- **عزل الكربون والممارسات المستدامة**

يُمكن للحوسبة السحابية في الزراعة دعم دمج الممارسات المستدامة، مثل عزل الكربون، في العمليات الزراعية. تُحلل المنصات السحابية البيانات المتعلقة بصحة التربة وأنواع المحاصيل والممارسات الزراعية لتحديد فرص احتجاز الكربون وتخزينه. يُمكن أن يُسهم ذلك في التخفيف من آثار تغير المناخ وتعزيز الزراعة المسؤولة بيئياً (صحيفة مال، 2024).

- **الزراعة العمودية والزراعة الداخلية**

ستلعب الحوسبة السحابية في الزراعة دوراً محورياً في تحسين المزارع العمودية ومرافق الزراعة الداخلية. يُمكن لأنظمة التحكم البيئي السحابية تنظيم درجة الحرارة والرطوبة وظروف الإضاءة بدقة استناداً إلى بيانات آنية وخوارزميات الذكاء الاصطناعي. وهذا يضمن نمواً أمثل للنباتات واستخداماً فعالاً للموارد في بيئات مُتحكم فيها (Shait, 2025).

8. الخاتمة

الحوسبة السحابية على أهبة الاستعداد لإحداث ثورة في القطاع الزراعي، مُبشّرةً بعصرٍ من الممارسات الزراعية القائمة على البيانات. من خلال توفير الوصول إلى موارد حوسبة قابلة للتطوير، وتحليلات متقدمة، وقدرات الذكاء الاصطناعي، تُمكّن الحوسبة السحابية المزارعين من تحسين استخدام الموارد، وتحسين عملية اتخاذ القرارات، وضمان استدامة عملياتهم. إن القدرة على معالجة البيانات الضخمة المتعلقة بالتربة، والطقس، والمحاصيل، والآفات، تتيح للمزارعين اتخاذ قرارات أكثر دقة وسرعة، مما يساهم في رفع كفاءة الإنتاج وتقليل الفاقد.

إن هذا النهج القائم على البيانات يُعدّ حلاً واعداً لمعالجة بعض التحديات الأكثر إلحاحاً التي تواجه القطاع الزراعي حالياً. فعلى سبيل المثال، يمكن للحوسبة السحابية أن تساهم

بشكل كبير في مواجهة مشاكل الأمن الغذائي من خلال تحسين إنتاجية المحاصيل وزيادة الكفاءة في توزيع الموارد. بالإضافة إلى ذلك، فإن القدرة على التنبؤ بالتغيرات المناخية وتحديد المخاطر المستقبلية المتعلقة بالظروف الجوية والآفات من شأنها أن تدعم المزارعين في اتخاذ تدابير وقائية، مما يقلل من التأثيرات السلبية لتغير المناخ على الإنتاج الزراعي.

ومع زيادة استخدام الحوسبة السحابية في الزراعة، من المتوقع أن نرى تحولاً جذرياً في أساليب الزراعة التقليدية. فالأنظمة السحابية لا تقتصر فقط على توفير الأدوات اللازمة لتحليل البيانات، بل توفر أيضاً منصة مرنة لمشاركة المعرفة بين المزارعين، والمطورين، والباحثين، مما يعزز من الابتكار المستمر في القطاع. إن هذا التعاون العالمي سيدعم انتقال المعلومات الحديثة بشكل أسرع، مما يمكن المزارعين في مختلف أنحاء العالم من التكيف مع التحديات المتجددة.

ومع ذلك، فإن استخدام الحوسبة السحابية في الزراعة لا يخلو من التحديات. من بين هذه التحديات، الحاجة إلى بنية تحتية تكنولوجية متطورة في المناطق النائية، بالإضافة إلى الحفاظ على أمن البيانات وحمايتها من الهجمات الإلكترونية. على الرغم من هذه التحديات، تظل الفرص المستقبلية هائلة، حيث يمكن للحوسبة السحابية أن تُسهم في جعل الزراعة أكثر استدامة ومرونة أمام التحديات العالمية.

مستقبل الحوسبة السحابية في الزراعة يحمل في طياته العديد من الإمكانات المبهرة. فبفضل تزايد الاعتماد على هذه التقنيات، يمكن للمزارعين إنتاج المزيد من الغذاء بموارد أقل، مما يُقلل من أثرهم البيئي ويضمن استمرارية أعمالهم الزراعية على المدى الطويل. كما أن هذا التحول نحو الزراعة الذكية سيُسهم في تحسين الأمن الغذائي على مستوى عالمي، ويُسهم في تحقيق أهداف التنمية المستدامة بحلول فعّالة ومبنية على بيانات حقيقية.

9. المراجع

أر ام جي RMG-sa (2025). ما هي الحوسبة السحابية؟ دليلك الشامل لاستغلال قوة السحابة في 2025. https://www.rmg-sa.com/%D9%85%D8%A7-%D9%87%D9%8A-%D8%A7%D9%84%D8%AD%D9%88%D8%B3%D8%A8%D8%A9-%D8%A7%D9%84%D8%B3%D8%AD%D8%A7%D8%A8%D9%8A%D8%A9/

البيان. (2021). مواطنين يسخّرون الحوسبة السحابية لتعزيز إنتاجية الزراعة. https://www.albayan.ae/uae/news/2021-03-07-1.4109238

جو جلوبال Go Global (2025). أفضل 10 مزودي خدمات سحابية في أمريكا الشمالية لعام 2025. https://www.graphon.com/ar/go-global

الخليج (2024). الزراعة الذكية.. نظام متكامل مدعوم بالروبوتات. https://www.alkhaleej.ae/2024-10-18/الزراعة-الذكية-نظام-متكامل-مدعوم-بالروبوتات

دي آر سي DRC. 2024. تعزيز قوة التقنيات الرقمية في القطاع الزراعي في العراق. تقرير دعم تقني حول استخدام الحوسبة السحابية والزراعة الذكية. https://drc.ngo/media/0mypiut1/drc-smithson-agriculture-arabic.pdf

راغب، صالح ، النجوى الدغبشي، محمود أحمد أبوجبل، فهيم صالح لوندي، وعبد الهادي عبد الرسول. (2024). دور تقنية الحوسبة السحابية في زيادة فعالية العملية الزراعية. مجلة البحوث المحاسبية، 11(4)، 91-100.

صحيفة مال. 2024. الزراعة الذكية: كيف يمكن للتقنيات مثل الحوسبة السحابية تحسين الإنتاج الزراعي؟ https://maaal.com/2024/03/الزراعة-الذكية-كيف-يمكن-للتقنيات-مثل-الحوسبة-السحابية/-

عين ليبيا. 2024. تطبيقات إنترنت الأشياء في الزراعة. (2024). من https://www.eanlibya.com/ تطبيقات-انترنت-الاشياء-فى-الزراعة/

غرفة الأخبار IBM MEA Newsroom. (2024) . لتعزيز الزراعة المستدامة في المناطق التي تعاني من شح المياه. https://mea.newsroom.ibm.com/ar-uos-ibm-sustainable-agriculture

الفاو (2023) . حافظة الخدمات الرقمية: منصة قائمة على الحوسبة السحابية لتعزيز الزراعة الرقمية في المناطق الريفية. تم الاسترجاع من منصة الفاو الرقمية.

وام WAM. 2024. أبوظبي للزراعة تتبنى الحوسبة السحابية لتحسين الخدمات. https://www.wam.ae/ar/article/.

Ahmad S, Wassay M., and Hussain MA. (2025). Cloud computing: empowering the next generation of agricultural research. Trends in Animal and Plant Sciences, 5, 12-19.

AWS (Amazon Web Services). 2025. https://aws.amazon.com/ar/what-is-cloud-computing/

ITU (International Telecommunication Union). (2021). Emerging Technologies including Cloud Computing and Mobile Services. https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/stg/D-STG-SG01.03.2-2021-PDF-A.pdf

Keenethics. (2024). Cloud Computing in Agriculture: A Complete Guide. https://keenethics.com/blog/cloud-computing-in-agriculture-a-complete-guide

Madan, S. (2023). Cloud Computing: Embracing Resilient and Sustainable Agriculture. *World Journal of Agriculture and Soil Science*.

MokoSmart. (2024). Internet of Things in Smart Agriculture: 7 Key Use Cases to Know. Retrieved from https://www.mokosmart com/ar/iot-in-agriculture/

Pan, et al. (2023). Cloud Computing: Empowering the Next Generation of Agricultural Research.

Satej, D.T. and S. R. Kumbhar. 2015. The Study of Cloud Computing Challenges in Agriculture with Special Reference to Singly District (Ms). International Conference on Advancements in Engineering and Technology. ICAET2015, 3: 11-13.

ScienceDirect. (2025). Cybersecurity in smart agriculture: A systematic literature review. Computers & Security 150: 104284.

Shait. M. M. 2025. How It Can Transform Agriculture in 2025. https://mort95.com/2025/01/drones-in-agriculture.html.

Successive Digital. (2024). Impact of Cloud Computing in Agriculture. https://successive.tech/blog/role-of-cloud-computing-in-agriculture/

Successive Digital. (2024). The Role of Cloud Computing in Agriculture – A Comprehensive Guide. https://successive.tech/ blog role-of-cloud-computing-in-agriculture/

Tridens Technology. 2025. Cloud Computing in 2025 and Top 10 Cloud Providers. https://aws.amazon.com/marketplace/seller-profile?id=19b52e8f-00f5-427a-b0bf-f2474330187c

Wang, J., Li, X., & Chen, Y. (2020). Cloud computing in agriculture: Opportunities and challenges. *Journal of Agricultural Informatics*, 11(4), 45-59.

الفصل 16 - الزراعة الرقمية: البيانات والتقنيات الحديثة في خدمة الأرض

المحتويات

1. المقدمة
2. أنواع البيانات الزراعية وأهميتها
3. جمع البيانات عبر الحساسات والطائرات بدون طيار
4. تحليل البيانات الزراعية واستخلاص النتائج
5. استخدام البيانات في اتخاذ القرار الزراعي
6. منصات وخدمات البيانات الزراعية
7. حماية البيانات وأمن المعلومات في الزراعة الرقمية
8. التوصيات
9. الخاتمة
10. المراجع

1. المقدمة

في العقود الماضية، كانت الزراعة تُدار على أساس الخبرة المتوارثة والقرارات الحدسية، مع اعتماد محدود على التكنولوجيا. أما اليوم، فإننا نشهد تحوّلاً جذرياً نحو الزراعة الرقمية، وهو تحوّل لا يقتصر على إدخال أدوات جديدة، بل يعيد صياغة العلاقة بين المزارع، والأرض، والقرار الزراعي ذاته. فالبيانات باتت تلعب دوراً محورياً في كل خطوة من خطوات الزراعة، بدءاً من رصد الطقس، مروراً بتحليل خصائص التربة، وصولاً إلى التنبؤ بمواعيد الحصاد أو احتمالية تفشي الآفات.

الزراعة الرقمية تُعرف بأنها "توظيف التكنولوجيا الرقمية في إنتاج الغذاء بطرق أكثر كفاءة واستدامة"، وهي تعتمد على دمج البيانات الضخمة (Big Data)، والذكاء الاصطناعي (AI)، وأجهزة الاستشعار، وأنظمة التموضع الجغرافي (GPS)،

والطائرات بدون طيار (Drones)، في منظومة واحدة متكاملة. هذا التكامل يتيح للمزارعين رؤية دقيقة في الزمن الحقيقي حول ما يحدث في مزارعهم، ويساعدهم على اتخاذ قرارات مبنية على الأدلة، وليس على الحدس فقط (Wolfert *et al*., 2017).

اختبار أنظمة تحديد المواقع للزراعة الدقيقة (Soliman، 2020).

أهمية هذا التحول لا تقتصر على الجانب التقني فقط، بل تتعداه إلى البعد البيئي والاجتماعي والاقتصادي، إذ تساهم الزراعة الرقمية في:

- **تحسين الكفاءة الإنتاجية**: عبر تقليل الفاقد وزيادة العائد لكل وحدة أرض أو ماء.
- **ترشيد استخدام الموارد**: مثل المياه والطاقة والأسمدة.
- **تقليل الأثر البيئي**: من خلال الاستخدام الذكي للمبيدات والمخصبات.
- **دعم الأمن الغذائي**: من خلال التخطيط الدقيق للإنتاج والاستجابة للمخاطر المناخية.
- **تعزيز مرونة المزارعين**: في مواجهة التغيرات المناخية والتقلبات الاقتصادية.

من هذا المنطلق، لم تعد الزراعة الرقمية خياراً تقنياً، بل أصبحت ضرورة إستراتيجية لتأمين مستقبل زراعي مستدام ومبتكر.

2. أنواع البيانات الزراعية وأهميتها

البيانات الزراعية هي العمود الفقري للزراعة الرقمية، وتشمل أنواعاً متعددة تتكامل فيما بينها لتقديم صورة شاملة عن حالة النظام الزراعي. ويمكن تصنيف هذه البيانات إلى أربعة محاور رئيسية:

- **بيانات الطقس والمناخ:**

تشمل درجات الحرارة، كميات الأمطار، الرطوبة، شدة الرياح، وأشعة الشمس. تُستخدم هذه البيانات في التخطيط الموسمي، واختيار مواعيد الزراعة والحصاد، والتنبؤ بالمخاطر المناخية مثل الجفاف أو الصقيع.

- **بيانات التربة:**

تتضمن قياسات مثل الملوحة، الكثافة، محتوى المادة العضوية، الحموضة(pH) ، ومستويات العناصر المغذية مثل النيتروجين والفوسفور والبوتاسيوم. تساعد هذه البيانات في تحديد مدى جاهزية التربة للزراعة، وتخصيص الأسمدة بجرعات دقيقة لكل نوع محصول.

- **بيانات المحاصيل:**

تغطي مراحل النمو، كثافة النبات، معدلات الغلة، وانتشار الأمراض أو الحشرات. يمكن جمعها من خلال الاستشعار الأرضي أو الجوي، وتساعد في إدارة الحقل على مستوى دقيق جداً.

- **بيانات تشغيل المعدات الزراعية:**

تشمل أداء الآلات الزراعية، استهلاك الوقود، أوقات التشغيل، والأعطال. يمكن ربط هذه البيانات بتكلفة التشغيل والإنتاجية، بما يساعد في اتخاذ قرارات صائبة بشأن الصيانة أو استبدال المعدات.

وتكمن أهمية هذه البيانات في أنها تُحوّل الزراعة من عملية تعتمد على الحدس إلى نظام دقيق وقابل للقياس والتقييم والتحسين المستمر (Kamilaris *et al.*, 2018). فكل معلومة، مهما كانت صغيرة، يمكن أن تُحدث فرقاً كبيراً في تقليل التكلفة أو زيادة الإنتاج أو حماية المحصول.

3. جمع البيانات عبر الحساسات والطائرات بدون طيار

يبدأ الذكاء الزراعي بجمع البيانات، وهذه المرحلة تُعد مفتاح النجاح في أي منظومة زراعة رقمية. من أبرز أدوات جمع البيانات المستخدمة في الزراعة الحديثة:

الزراعة الرقمية (عن: Eleta, 2022)

- **الحساسات الأرضية (Soil Sensors)**

توضع داخل التربة وعلى سطحها، وتُقيس باستمرار معايير مثل:

- رطوبة التربة.
- درجة حرارتها.

- درجة الحموضة (pH).
- مستوى النيتروجين.

تتيح هذه البيانات للمزارع تتبع التغيرات البيئية بدقة، وتساعده على اتخاذ قرارات مدروسة بشأن الري والتسميد.

- **الطائرات بدون طيار (Drones)**

تُستخدم لتصوير الحقول من الجو باستخدام كاميرات متعددة الأطياف (Multispectral & Thermal Cameras)، والتي تكشف ما لا يُرى بالعين المجردة، مثل:

- علامات الإصابة الفطرية في مراحل مبكرة
- تفاوت نمو النبات بين مناطق مختلفة من الحقل
- مناطق الإجهاد المائي أو التلوث

على سبيل المثال، استخدمت بعض مزارع النخيل في سلطنة عمان طائرات درون لرصد التلوث الهوائي ومراقبة الإصابة بالحشرات الضارة، ما ساهم في تقليل استخدام المبيدات بنسبة 30%، من خلال التركيز على المناطق المصابة فقط دون الحاجة للرش الكامل (Zhang & Kovacs, 2012).

هذا النهج في جمع البيانات يعزز من دقة المراقبة الميدانية، ويوفر الوقت والموارد، ويجعل الإدارة الزراعية أكثر استباقية وذكاءً.

4. تحليل البيانات الزراعية واستخلاص النتائج

تعد مرحلة تحليل البيانات حجر الزاوية في الزراعة الرقمية، فهي التي تحول الأرقام الخام والصور الجوية والقراءات الميدانية إلى رؤى عملية يمكن البناء عليها في اتخاذ القرارات. فبمجرد جمع البيانات من الحساسات الأرضية، والطائرات بدون طيار،

ومنصات إنترنت الأشياء، تبدأ سلسلة من العمليات التحليلية التي تهدف إلى فهم الواقع الزراعي بدقة متناهية.

- **النمذجة والتحليل التنبؤي:**

تُستخدم خوارزميات تعلم الآلة (Machine Learning) لتدريب أنظمة قادرة على التنبؤ بالأمراض النباتية، توقّع كميات الحصاد، أو الكشف المبكر عن نقص العناصر الغذائية. على سبيل المثال، تحليل صور متعددة الأطياف (Multispectral) يتيح التعرف على المؤشرات الحيوية للنبات (NDVI)، مما يساعد في رصد التغيرات الدقيقة في صحة المحصول.

- **المعالجة الإحصائية والبيانية:**

توفر الأدوات الإحصائية مثل الانحدار الخطي، وتحليل السلاسل الزمنية، وتمثيل البيانات الرسومي، قدرة على تتبع التغيرات في التربة أو المحصول عبر الزمن. هذه الأدوات لا تقدم فقط ملخصاً للبيانات، بل تكشف كذلك عن علاقات سببية تؤثر في النتائج الزراعية.

- **نظم دعم القرار (Decision Support Systems - DSS)**

بعد التحليل، يتم إدخال النتائج إلى أنظمة دعم القرار التي تقدم توصيات مخصصة للمزارع. على سبيل المثال، قد تشير بيانات الرطوبة وتحليل الطقس إلى ضرورة تقديم ري تكميلي خلال اليومين القادمين لتجنب إجهاد مائي محتمل. وقد أظهرت دراسة حديثة أن استخدام مثل هذه الأنظمة ساهم في رفع الإنتاجية بنسبة تصل إلى 25%، مع خفض التكاليف التشغيلية (Tzachor et al., 2021).

- من خلال هذه العمليات التحليلية، لم تعد الزراعة تعتمد فقط على التجربة أو الحدس، بل أصبحت مبنية على علم دقيق يعالج الواقع في زمنه الحقيقي ويستجيب له بذكاء.

5. استخدام البيانات في اتخاذ القرار الزراعي

القدرة على استخدام البيانات بفعالية في عملية اتخاذ القرار الزراعي تمثل جوهر الزراعة الذكية. من خلال تجميع وتحليل البيانات الزراعية في الوقت الحقيقي، يمكن للمزارعين ومهندسي الزراعة اتخاذ قرارات دقيقة تتعلق بالإنتاج، مما ينعكس على خفض التكاليف وزيادة الغلة وتحسين الجودة.

- **نظم دعم القرار الزراعي**

تلعب البيانات الزراعية دوراً محورياً في دعم اتخاذ القرار على مستوى المزرعة والسلسلة الغذائية. باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي والتحليل المتقدم للبيانات، يمكن للمزارعين والمهندسين الزراعيين التنبؤ بالاحتياجات الزراعية مثل توقيت الري، كمية الأسمدة، وإدارة الآفات بشكل دقيق (Liakos *et al.*, 2018). على سبيل المثال، تعتمد أنظمة مثل *Plantix* على تقنيات التعلم العميق لتحليل صور المحاصيل وتحديد الأمراض بدقة متناهية، مما يسهل اتخاذ قرارات سريعة وفعالة (Plantix, n.d.). كما تُمكن هذه البيانات من تقليل الهدر في الموارد وتحسين الإنتاجية الزراعية (Kamilaris *et al.*, 2018).

تُستخدم نظم دعم القرار الزراعي لتجميع البيانات من مصادر متعددة (طقس، تربة، صور جوية، استشعار أرضي) وتحليلها لتقديم توصيات دقيقة. على سبيل المثال:

- في **هولندا**، تستخدم شركات الزهور DSS لمتابعة تأثير الرطوبة والحرارة على المحاصيل داخل البيوت الزجاجية، وتعديل ظروف النمو بشكل آلي (Wolfert *et al.*, 2017).
- في **تونس**، يقدم تطبيق "Agri-Tech Tunisia" تنبيهات للمزارعين حول الري المناسب بناءً على بيانات من أجهزة استشعار التربة وربطها بتوقعات الطقس (GIZ, 2022).

- **اتخاذ القرار في الوقت الحقيقي**

تعتمد بعض الأنظمة على الذكاء الاصطناعي لتقديم قرارات فورية. على سبيل المثال، يمكن لجهاز استشعار موصول بمنصة ذكية إرسال تنبيه تلقائي بتوصية "أوقف الري خلال الساعتين القادمتين" بناءً على توقعات المطر. هذا النوع من القرارات يساعد في الحفاظ على المياه وتقليل التكاليف.

- **إدارة متكاملة للمزرعة**

البيانات تمكّن من إدارة المزرعة بشكل متكامل، بدءاً من تخطيط الزراعة، مروراً بمراقبة المحصول، وحتى الحصاد والتوزيع. على سبيل المثال، شركة John Deere تقدم منصة متكاملة تسمى *Operations Center* تتيح للمزارع تتبع كل مركبة، مستوى العمل، التربة، والنتائج المتوقعة بدقة (Kamilaris *et al.*, 2018).

6. منصات وخدمات البيانات الزراعية

توجد العديد من المنصات الرقمية التي تقدم خدمات متقدمة لجمع وتحليل البيانات الزراعية، وتوفير توصيات مبنية على تحليل تلك البيانات. أحد الأمثلة البارزة هي منصة *Mizarah Future Farms* في دبي، التي تدمج تقنيات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء لجمع بيانات بيئية وزراعية بهدف تحسين الإنتاج في بيئة صحراوية (Dubai Future Foundation, 2022). تستخدم هذه المنصات أجهزة استشعار متصلة بالشبكة لجمع بيانات التربة والري، مما يسمح بإدارة موارد المياه والطاقة بكفاءة عالية (Al-Ghobari *et al*., 2020).

- **أمثلة دولية على منصات متقدمة**

  - **IBM Watson Decision Platform for Agriculture**: توفر هذه المنصة تحليلات دقيقة للمناخ، التربة، والآفات باستخدام الذكاء الاصطناعي، وتستخدمها شركات في أمريكا والهند والبرازيل (Tzachor *et al*., 2021).
  - **Climate FieldView** من شركة Bayer: تعتمد على الصور الجوية والاستشعار عن بعد لتحسين قرارات التسميد والري.
  - **CropX**: منصة تحليل بيانات رطوبة التربة، وتستخدم في إسرائيل ونيوزيلندا، وتربط بيانات الاستشعار الأرضي بالصور الفضائية لتقديم توصيات دقيقة.

- **أمثلة عربية وإقليمية**

  - **منصة "إنتراكت" - المغرب**: مشروع تقني يجمع بيانات التربة والمناخ من خلال أجهزة استشعار موزعة في مناطق فلاحية، ويزود المزارعين بتقارير يومية عبر الهواتف المحمولة بلغات محلية.
  - **Cropdata - تونس:** مشروع مدعوم من GIZ يهدف إلى تقديم خدمات رقمية لصغار المزارعين، تشمل معلومات عن الطقس، أسعار السوق، والري الذكي(GIZ, 2022) .
  - **مزرعتي الرقمية - السعودية**: منصة حكومية تتيح للمزارعين تتبع محاصيلهم وتقديم طلبات دعم تقني وتمويلي بناءً على بيانات رقمية دقيقة.

- **خصائص المنصات الذكية الناجحة**

المنصات الفعالة غالباً ما تتمتع بالخصائص التالية:

  - واجهات استخدام سهلة بلغة محلية.

- دعم لاتخاذ القرار المبني على بيانات آنية.
- قدرة على الدمج مع أجهزة استشعار أو أنظمة ري.
- توفير معلومات اقتصادية مثل توقعات السوق وسلاسل التوريد.

7. التكامل بين البيانات الزراعية وتقنيات الذكاء الاصطناعي

مع الاعتماد المتزايد على البيانات الرقمية، تبرز أهمية حماية هذه البيانات من التهديدات السيبرانية. يتطلب أمن البيانات الزراعية اعتماد نظم متقدمة لحماية الخصوصية وضمان سلامة البيانات ضد الاختراقات. يمكن الاستفادة من تقنيات التشفير، وأنظمة التحقق متعددة العوامل، فضلاً عن استخدام شبكات البلوك تشين لتعزيز الشفافية وحماية سجلات المعاملات الزراعية الرقمية (El-Moursy *et al.*, 2021). تعد حماية البيانات خطوة أساسية لضمان ثقة المستخدمين والمستثمرين في التحول الرقمي للزراعة.

- **دور الذكاء الاصطناعي في تحليل البيانات الزراعية**

الذكاء الاصطناعي يسمح بمعالجة كم هائل من البيانات الزراعية المتنوعة مثل بيانات الطقس، التربة، المحاصيل، واستشعار الصور الجوية، من خلال خوارزميات تعلم الآلة (Machine Learning) والتعلم العميق (Deep Learning). هذه الخوارزميات تكشف أنماطاً وعلاقات غير مرئية للعين البشرية، مما يعزز من دقة التنبؤ واتخاذ القرار.

على سبيل المثال، نظام الذكاء الاصطناعي "AgroVision" في الولايات المتحدة يحلل صور الأقمار الصناعية لتحديد مناطق الإصابة بالآفات أو نقص المياه في الحقول بدقة عالية، ويوجه المزارعين إلى اتخاذ إجراءات سريعة (Kamilaris *et al.*, 2018).

- **تطبيقات الذكاء الاصطناعي في الزراعة الذكية**

  - **التنبؤ بالمحاصيل**: تستخدم خوارزميات AI لتحليل الظروف البيئية والتربة لتوقع حجم وجودة المحصول، مما يساعد في التخطيط الاقتصادي والتجاري (Liakos *et al*., 2018).
  - **كشف الآفات والأمراض**: تطبيقات الذكاء الاصطناعي تحلل صور المحاصيل لتحديد الإصابة المبكرة بالآفات أو الأمراض، مع أمثلة من مشروع "Plantix"في ألمانيا والهند الذي يستخدم الذكاء الاصطناعي لتحليل صور المحاصيل وتقديم توصيات فورية للمزارعين (Ronneberger *et al*., 2015).
  - **الري الذكي**: أنظمة الذكاء الاصطناعي تقرر توقيت وكمية الري بدقة بناءً على تحليل بيانات الطقس والرطوبة، مثل مشروع "Smart Irrigation" في الإمارات (Al-Ghobari *et al*., 2020).

- **أمثلة عربية لتطبيقات الذكاء الاصطناعي في الزراعة**

  - **مشروع "حقل الذكاء" في مصر**: تعاون بين جامعة القاهرة وشركات تقنية لتطوير نظام ذكاء اصطناعي يعتمد على البيانات الحقلية لتقديم توصيات خاصة بإدارة المياه والأسمدة، مما أدى إلى زيادة الغلة بنسبة 15% (El-Moursy *et al*., 2021).
  - **استخدام الذكاء الاصطناعي في الإمارات**: في مبادرة "مزارع المستقبل"، تم دمج الذكاء الاصطناعي مع البيانات البيئية لتحسين إدارة المحاصيل في بيئات صحراوية قاسية (Dubai Future Foundation, 2022).

- **التحديات في دمج الذكاء الاصطناعي والبيانات الزراعية**

رغم الإمكانيات الكبيرة، يواجه التكامل عدة تحديات مثل:

- نقص البيانات الزراعية الدقيقة والمحدثة.
- الحاجة إلى بنية تحتية رقمية متطورة.
- تكلفة تطوير وتنفيذ تقنيات الذكاء الاصطناعي.
- نقص الخبرات الفنية في بعض المناطق، خاصة بالدول النامية.

- **المستقبل المتوقع**

يتوقع أن يؤدي التطور السريع في تقنيات الذكاء الاصطناعي إلى توفير حلول أكثر تخصيصاً وفاعلية، مثل أنظمة روبوتية ذكية تقوم بمراقبة الحقول ومعالجتها تلقائياً، وذكاء اصطناعي متكامل يدمج بيانات السوق مع بيانات الإنتاج لتحسين الربحية الزراعية (Liakos *et al.*, 2018).

8. حماية البيانات وأمن المعلومات في الزراعة الرقمية

في ظل التحول المتسارع نحو الزراعة الرقمية، أصبحت البيانات الزراعية تشكّل أحد الموارد الأساسية في عملية اتخاذ القرار، بدءاً من تخطيط المحاصيل وإدارة الموارد، وانتهاءً بتحليل الإنتاج والتسويق. إلا أن هذا الاعتماد المتزايد على البيانات يرافقه عدد من التحديات الجدية المرتبطة بحماية الخصوصية وأمن المعلومات.

تجمع المنصات الرقمية الزراعية كميات هائلة من المعلومات الدقيقة عن الحقول، أنماط الري، استخدام المبيدات، الخصائص الجغرافية، وحتى سلوكيات المستهلكين وسلاسل التوريد. ولأن معظم هذه البيانات تُنقل وتُخزن عبر الإنترنت ومن خلال خدمات الحوسبة السحابية، فإنها تصبح عرضة للهجمات السيبرانية، وتسريب البيانات، أو حتى استخدامها بشكل غير مشروع من قبل جهات خارجية. هذه المخاطر تزداد تعقيداً عندما تكون البيانات مملوكة لمزارعين صغار أو شركات محلية لا تملك البنية التقنية الكافية لحمايتها، مما يجعلها فريسة سهلة للاستغلال.

ولذلك، فإن تأمين البيانات الزراعية لم يعد خياراً تقنياً فقط، بل هو ضرورة استراتيجية تتطلب منظومة متكاملة من السياسات، والأدوات التقنية، والتشريعات الواضحة. ومن أبرز الإجراءات التي ينبغي اتباعها: اعتماد بروتوكولات تشفير قوية، واستخدام أنظمة تحقق متعددة المستويات، وضمان وجود خطط استجابة لحوادث اختراق البيانات. كما يُعد الامتثال للتشريعات الوطنية والدولية – مثل اللائحة العامة لحماية البيانات الأوروبية (GDPR) أو السياسات المحلية الخاصة بحماية البيانات – خطوة محورية لتعزيز الثقة بين جميع الأطراف الفاعلة في القطاع الزراعي.

وفي هذا السياق، تبرز تجربة دولة الإمارات العربية المتحدة كمثال متقدم في موازنة الشفافية وحماية الخصوصية، حيث اعتمدت سياسة "البيانات الزراعية المفتوحة". تهدف هذه السياسة إلى إتاحة الوصول إلى المعلومات الزراعية العامة لدعم الابتكار والبحث العلمي، مع وضع ضوابط صارمة لحماية البيانات الحساسة المتعلقة بالمزارعين، مثل مواقع الحقول، وحجم الإنتاج، وتفاصيل التمويل. وتأتي هذه الخطوة ضمن توجه أوسع نحو بناء منظومة زراعية رقمية آمنة ومستدامة.

إن مستقبل الزراعة الرقمية يرتبط ارتباطاً وثيقاً بقدرتنا على بناء بنى تحتية معلوماتية آمنة، ووعي جماعي بأهمية حماية البيانات، مما يضمن استخداماً مسؤولاً ومثمراً للتكنولوجيا في خدمة الأمن الغذائي والتنمية الزراعية.

التوصيات

استناداً إلى الأدبيات العلمية والتجارب الميدانية الموثّقة، نوصي بالتالي:

- **تطوير البنية التحتية الرقمية الريفية**

ضرورة توسيع تغطية الإنترنت السريع (4G/5G) في المناطق الزراعية، وتعزيز استخدام تقنيات LPWAN مثل LoRaWAN في الحساسات الزراعية لتكلفة منخفضة وكفاءة عالية.

تحديث شبكات الريف العاملة ضمن الأطر التنظيمية الرسمية لضمان وصول عادل وتكاملي للخدمات .

- **تبني سياسة وطنية واضحة للبيانات الزراعية المفتوحة والمسؤولة**

على غرار سياسة الإمارات التي تُوازن بين الشفافية وحماية بيانات المزارعين، ينبغي وضع إطار وطني ينظم ملكية البيانات، ويحدد الجهات المخوّلة للوصول والاستخدام، مع تشفير وتوثيق البيانات حساسة .

- **تعزيز التدريب وتنمية القدرات البشرية**

إطلاق ورش عمل ودورات تدريبية للمزارعين والمهندسين حول تقنيات الزراعة الذكية، تحليل البيانات، واستخدام أنظمة الدعم، مرتكزة على تجربة المشاريع البحثية للأطر الحكومية والأكاديمية

- **دعم الابتكار المحلي وتطوير حلول مخصصة**

تشجيع الجامعات والشركات الناشئة على تطوير أدوات رقمية ملائمة للبيئة المحلية، بناءً على إطار "حكومي – تقني – مزارع" الذي أثبت فعاليته في دعم صغار المزارعين .

- **تسهيل الوصول إلى التمويل واعتماد التكنولوجيا**

توفير حوافز ائتمانية ومنح لشراء أجهزة الاستشعار والطائرات بدون طيار ومساحة التخزين السحابية، مستندين إلى توصيات منظمة التعاون والتنمية الاقتصادية التي تربط بين دعم البنية التحتية والابتكار الزراعي المستدام.

- **تشجيع الشراكات الإقليمية والدولية**

بناء شراكات مع المؤسسات مثل FAO و OECD ومراكز بحثية أخرى لتبادل الخبرات والتقنيات الرقمية ونماذج الحوكمة، كما يدعم ذلك تقرير OECD في تشجيع التعاون عبر الحدود في السياسات الزراعية الرقمية.

- **دمج الأمن السيبراني في الاستراتيجيات الرقمية الزراعية**

تشجيع اعتماد بروتوكولات تشفير ومصادقة متعددة العوامل، واستراتيجية احتياطات لحماية البيانات من الهجمات، استناداً إلى خبرات وممارسات الزراعة الرقمية العالمية .

9. الخاتمة

تمثل الزراعة الرقمية تحولاً جذرياً في طريقة إنتاج الغذاء وإدارة الموارد. من خلال الاستخدام الذكي للبيانات والتقنيات، يمكن تحقيق زراعة أكثر كفاءة واستدامة، تتماشى مع التحديات المناخية والاقتصادية المعاصرة. ومع ذلك، يتطلب هذا التحول بنية تحتية رقمية متكاملة، وتدريباً مستمراً للمزارعين، وسياسات داعمة لضمان العدالة والوصول المفتوح للتقنيات.

10. المراجع

Al-Ghobari, H., Alkaabi, M., & Al-Kuwari, H. (2020). Smart irrigation system using AI and IoT for efficient water management in agriculture. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(5), 123-130.

Bronson, K. (2018). Smart farming: Including rights holders for responsible agricultural innovation. Technology Innovation Management Review, 8(2), 7–14.

Dubai Future Foundation. (2022). *Mizarah Future Farms: Integrating AI in Desert Agriculture*. https://www.dubaifuture.gov.ae/projects/mizarah-future-farms/

El-Moursy, A., Mahmoud, S., & Farag, M. (2021). Implementing AI-based precision agriculture to enhance crop yield in Egypt. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 23(3), 445-458. https://doi.org/10.1007/s12345-021-01123-7

Eleta, V. 2022. Agriculture 4.0 - Precision Farming Pro Max!. https://www.linkedin.com/pulse/agriculture-40-precision-farming-pro-max-valentine-eleta/

GIZ. (2022). Smart agriculture innovations in Tunisia. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). A review on the practice of big data analysis in agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 143, 23–37.

Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674.

Plantix. (n.d.). 2025. About Plantix – AI-based mobile app for plant disease diagnosis. https://plantix.net/en/

Soliman, A, 2020. Positioning systems testing for precision agriculture: what OEMs and integrators need to know. https://www.spirent.com/blogs/positioning-systems-testing-for-precision-agriculture-what-oems-and-integrators-need-to-know

Tzachor, A., Richards, C. E., & Holt, L. (2021). Climate-smart agriculture: A global perspective. Current Opinion in Environmental Sustainability, 47, 52–59.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. Agricultural Systems, 153, 69–80.

Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. Precision Agriculture, 13(6), 693–712.

الفصل 17 - إنترنت الأشياء (IoT) في الزراعة

المحتويات

1. المقدمة
2. مفهوم إنترنت الأشياء في السياق الزراعي
3. الأجهزة والمستشعرات المستخدمة
4. تطبيقات IoT في الري، التسميد، والرصد البيئي
5. تكامل انترنت الأشياء مع نظم المعلومات الجغرافية والذكاء الاصطناعي
6. حالات دراسية ناجحة
7. التحديات التقنية
8. توصيات عملية للمزارعين والمؤسسات الحكومية
9. نماذج الأعمال التجاريّة القائمة على انترنت الأشياء في الزراعة
10. عوامل النجاح
11. الخاتمة
12. المراجع

1. المقدمة

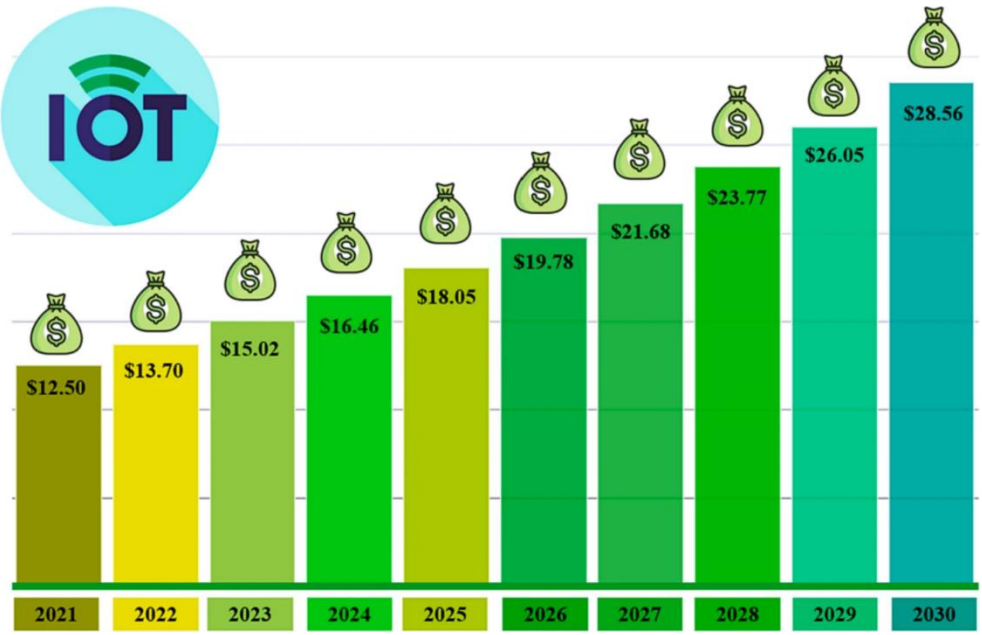
شهد قطاع الزراعة خلال السنوات الأخيرة تحوّلاً ثورياً بفعل التطورات التكنولوجية، خاصة مع ظهور تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) التي أصبحت تلعب دوراً محورياً في تحديث نظم الإنتاج الزراعي التقليدية. إنترنت الأشياء في الزراعة هو نظام متكامل يجمع بين أجهزة الاستشعار الرقمية، وشبكات الاتصال، ومنصات تحليل البيانات التي تعمل بشكل متواصل على مراقبة بيئة الزراعة وتحليلها في الوقت الحقيقي. هذا التحول الرقمي يمكّن المزارعين من اتخاذ قرارات زراعية أكثر دقة وفاعلية، ويقلل من الاعتماد على التجربة والخطأ، ويساعد على تحسين جودة المحاصيل وزيادة غلة الإنتاج مع تقليل الموارد المستخدمة مثل المياه والأسمدة.

من خلال الاستفادة من إنترنت الأشياء، يمكن مراقبة العديد من العوامل الحيوية مثل درجة رطوبة التربة، ودرجة الحرارة، وحالة النباتات، وجودة الهواء، مما يعزز قدرة

المزارعين على التعامل مع التغيرات المناخية والظروف البيئية المتغيرة بسرعة. كما تتيح هذه التقنية إمكانية الإدارة الذكية للمزارع على نطاق واسع من خلال تطبيقات متقدمة تحافظ على استدامة الموارد الطبيعية، وتقلل من الهدر وتكاليف الإنتاج (Wolfert *et al*., 2017).

تساهم هذه الأنظمة الذكية أيضاً في تعزيز الأمن الغذائي، حيث تُمكّن المزارعين من توقع المشكلات المحتملة مثل الإصابة بالآفات أو الأمراض النباتية في وقت مبكر، مما يساعد في التدخل السريع واتخاذ الإجراءات الوقائية المناسبة. باختصار، إنترنت الأشياء في الزراعة ليست مجرد تقنية، بل هي نقلة نوعية نحو زراعة أكثر ذكاءً واستدامة.

يشير الشكل التالي إلى أنه من المتوقع أن يتجاوز حجم سوق إنترنت الأشياء في قطاع الزراعة إلى أكثر من 28 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2030 (Amenu Leta Duguma and Bai, 2024):



2. مفهوم إنترنت الأشياء في السياق الزراعي

يشير مفهوم إنترنت الأشياء (IoT) في المجال الزراعي إلى شبكة من الأجهزة الإلكترونية والمستشعرات الذكية المتصلة عبر الإنترنت، والتي تجمع بيانات متنوعة من البيئة الزراعية بشكل مستمر وذكي. هذه الأجهزة تشمل الحساسات التي تراقب العوامل الفيزيائية والكيميائية للبيئة الزراعية، مثل رطوبة التربة، ودرجة الحرارة، ومستوى الإضاءة، وتركيز الغازات، بالإضافة إلى أجهزة ترصد صحة النباتات وحالتها العامة.

في السياق الزراعي، تتميز أنظمة إنترنت الأشياء بقدرتها على إرسال البيانات الحية إلى أنظمة مركزية متقدمة لتحليلها باستخدام تقنيات مثل الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي، مما يتيح تقديم توصيات فورية للمزارع بشأن مواعيد الري، وكمية الأسمدة، وطرق مكافحة الآفات. تعتمد هذه الأجهزة على تقنيات الميكروتحكمات الدقيقة، وحساسات متطورة، وشبكات اتصال لاسلكية فعالة مثلNB-IoT ، وLoRaWAN، وشبكات الجيل الخامس G5، لضمان تواصل مستمر وموثوق بين الحقول وأنظمة التحكم (Li *et al*., 2020) .

مثال عملي يعكس فعالية هذه التقنية هو استخدام حساسات مزروعة تحت سطح التربة تقيس بدقة مستويات الرطوبة وترسلها إلى أنظمة ري ذكية، والتي بدورها تقوم بضبط وتيرة الري بشكل أوتوماتيكي بناءً على حاجة النباتات الفعلية. أثبتت هذه الأنظمة قدرتها على تقليل استهلاك المياه في الزراعة بنسبة تصل إلى 40% في بعض التجارب، مما يوفر مصدراً ثميناً من الموارد ويخفض التكاليف التشغيلية (Mekala *et al*., 2019).

يلخص الشكل التالي المزايا الرئيسية لإنترنت الأشياء في الزراعة الحديثة (Qureshi *et al*., 2022):

تحسين الموارد

3. الأجهزة والمستشعرات المستخدمة

تعتبر الأجهزة والمستشعرات المتنوعة العمود الفقري لمنظومة إنترنت الأشياء في الزراعة، حيث تعمل هذه الأجهزة على جمع بيانات دقيقة وواقعية من الحقول الزراعية بشكل مستمر وديناميكي. تساعد هذه البيانات في بناء صورة شاملة عن حالة البيئة الزراعية، مما يمكّن المزارعين من اتخاذ قرارات مبنية على معلومات واقعية وليس على التقدير أو التجربة فقط. فيما يلي توضيح لأهم هذه الأجهزة وأنواعها:

- **حساسات الرطوبة ودرجة حرارة التربة**

هذه الحساسات تقيس محتوى الماء في التربة بالإضافة إلى درجة حرارتها، وهما عاملان أساسيان يؤثران بشكل مباشر على نمو النبات. قياس نسبة الرطوبة يسمح بتحديد مدى حاجة النبات للري، ويمنع الإفراط في استخدام المياه، مما يساعد على حفظ الموارد المائية الثمينة وتقليل التكاليف. أما درجة حرارة التربة، فهي مؤثر رئيسي في عمليات امتصاص العناصر الغذائية ونشاط الكائنات الحية الدقيقة المفيدة داخل التربة. تعمل هذه الحساسات غالباً بتقنية القياس الكهربائية أو الموجات فوق الصوتية أو باستخدام التوصيل الحراري، وترسل البيانات بشكل دوري إلى وحدات التحكم.

- **حساسات الحموضة (pH)**

يُعتبر مقياس الحموضة من أهم المؤشرات الكيميائية في التربة، حيث يتأثر توافر العناصر الغذائية الحيوية مثل الحديد، الزنك، والفسفور، بشدة بحموضة التربة. تحافظ هذه الحساسات على مراقبة مستمرة لقيمpH ، وتمكن المزارعين من تعديل التربة باستخدام المواد المساعدة مثل الجير أو الكبريت لتحقيق التوازن الأمثل، الأمر الذي يعزز نمو المحاصيل ويزيد من جودة الإنتاج.

- **حساسات العناصر الغذائية**

تعد حساسات العناصر الغذائية مثل النيتروجين(N) ، الفوسفور(P) ، والبوتاسيوم (K)من أكثر الحساسات تعقيداً وأهمية، حيث إنها تقيس بدقة تركيز هذه المغذيات في التربة. تساعد هذه القياسات على توجيه عمليات التسميد، بحيث يتم إضافة الكميات المطلوبة فقط، مما يقلل من التسميد المفرط الذي يسبب تلوث التربة والمياه الجوفية ويؤثر سلباً على البيئة. تعتمد هذه الحساسات على تقنيات تحليل كيميائي مثل التحليل الطيفي أو الكيمياء الكهربائية، وتوفر بيانات دقيقة تسمح بالتحكم الذكي في دورة المغذيات داخل الحقل.

- **الكاميرات متعددة الطيف والطائرات بدون طيار (الدرونز)**

تمثل الكاميرات متعددة الطيف خطوة متقدمة في مراقبة صحة المحاصيل، حيث تستطيع هذه الكاميرات التقاط صور بترددات ضوئية تتجاوز نطاق الرؤية البشرية، مثل الأشعة تحت الحمراء والقريبة من الأشعة تحت الحمراء، والتي تعكس مؤشرات مهمة عن حالة النبات مثل محتوى الكلوروفيل، التوتر المائي، ونشاط التمثيل الضوئي. تُستخدم هذه الكاميرات غالباً مركبة على الطائرات بدون طيار (الدرونز) التي تحلق فوق الأراضي الزراعية لتغطية مساحات واسعة بسرعة وبدقة عالية. تساعد هذه التقنية في الكشف المبكر عن الآفات والأمراض قبل ظهورها بشكل واضح، وتمكن من تقييم نمو المحاصيل ومناطق الإجهاد النباتي بدقة، مما يدعم اتخاذ إجراءات استباقية وحفظ الإنتاجية (Mekala *et al*., 2019).

يلخص الشكل التالي التقنيات الناشئة المتعلقة بإنترنت الأشياء (Amenu Leta Duguma and Bai, 2024):

- **الأجهزة الأخرى المكملة**

- **حساسات ضوء الشمس:** تقيس كمية الضوء المتاحة للنباتات، مما يساعد في ضبط أنظمة الإضاءة في البيوت المحمية أو تحديد توقيت العمليات الزراعية الحساسة.
- **حساسات الغاز:** ترصد تركيز الغازات مثل ثاني أكسيد الكربون أو الأمونيا، التي تؤثر على صحة النبات وجودة التربة.
- **أنظمة GPS والملاحة:** توفر بيانات الموقع الدقيقة لربط المعلومات البيئية بالمواقع الجغرافية المحددة داخل المزرعة، مما يسهل تحليل بيانات الحقل بتقنيات نظم المعلومات الجغرافية.(GIS)

بفضل هذه الأجهزة المتنوعة، يتم بناء منظومة زراعية ذكية ومتقدمة قادرة على تحسين كفاءة الموارد، تقليل الفاقد، وزيادة الإنتاجية بطريقة مستدامة تواكب التحديات البيئية والاقتصادية الراهنة.

بالإضافة إلى ذلك، تُستخدم أنظمة تحديد المواقع العالمية (GPS) لتحديد المواقع الدقيقة داخل المزارع وربط بيانات المستشعرات بمواقعها الجغرافية، ما يسهل تحليل خرائط التربة والمحاصيل وإدارة المناطق بشكل أكثر دقة.

هذه الأجهزة، بمجملها، تشكل منظومة متكاملة تُمكّن المزارعين من مراقبة وتحكم متقدم في بيئة زراعتهم، مما يعزز من إنتاجية المحاصيل وجودتها، ويدعم جهود الاستدامة الزراعية.

مثال عربي: في السعودية، تعمل عدة مشروعات باستخدام الطائرات بدون طيار المزودة بحساسات لتقييم صحة المزارع في مناطق نائية (Saudi Ministry of Environment, Water and Agriculture, 2021).

4. تطبيقات انترنت الأشياء في الري، التسميد، والرصد البيئي

تشكل تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) ركيزة أساسية في تحديث أساليب إدارة الموارد الزراعية، خاصة في مجالات الري والتسميد والرصد البيئي، حيث تسهم هذه التطبيقات في تحسين كفاءة استخدام الموارد وتقليل الهدر، مع رفع جودة الإنتاج.

- **أنظمة الري الذكية:** تعتمد هذه الأنظمة على البيانات المجمعة من حساسات رطوبة ودرجة حرارة التربة لتحديد توقيت وكمية المياه اللازمة لري المحاصيل بدقة متناهية. بدلاً من الري التقليدي الذي يعتمد على الجداول الزمنية الثابتة أو التجربة، تسمح الأنظمة الذكية بضبط عمليات الري بشكل ديناميكي يتناسب مع احتياجات النباتات والظروف الجوية. ونتيجة لذلك، تُخفض كمية المياه المستخدمة بشكل كبير، ويُحافظ على صحة التربة ويُمنع الإفراط في الري الذي قد يسبب تعفن الجذور أو تلوث المياه الجوفية.
- **التسميد الذكي:** يمثل التسميد أحد أهم العمليات الزراعية التي تؤثر بشكل مباشر على نمو النباتات وجودة المحاصيل. عبر توظيف بيانات حساسات العناصر الغذائية في التربة، يمكن لأنظمة التسميد الذكية تحديد نوع وكمية الأسمدة المطلوبة بشكل دقيق. يساعد هذا الأسلوب في تجنب الإفراط في استخدام الأسمدة الكيميائية، والذي بدوره يقلل من التلوث البيئي الناتج عن تسرب المواد الكيميائية إلى المياه السطحية والجوفية، كما يساهم في تحسين جودة التربة على المدى الطويل (Jha *et al.*, 2019).
- **الرصد البيئي:** تشمل هذه التطبيقات مراقبة مجموعة من العوامل المناخية والبيئية مثل درجات الحرارة، الرطوبة الجوية، سرعة الرياح، ومستويات الإشعاع الشمسي، والتي تؤثر جميعها على نمو المحاصيل وتطورها. توفر هذه البيانات إمكانية توقع التغيرات المناخية المفاجئة مثل موجات الحر أو الصقيع، مما يمكن

المزارعين من اتخاذ تدابير وقائية مناسبة لتحسين فرص الإنتاج وتقليل الخسائر (Ruiz-Garcia *et al*., 2020).

مثال دولي :في هولندا، تُعد شركة Netafim رائدة في استخدام تقنيات إنترنت الأشياء في أنظمة الري الذكية. يستخدم نظامها المتطور بيانات دقيقة من حساسات التربة والظروف المناخية لضبط عمليات الري تلقائياً. أثبت هذا النظام فعاليته بتوفير يصل إلى 30% من استهلاك المياه الزراعية، مما يجعله نموذجاً عالمياً يُحتذى به في مجال الزراعة المستدامة (Netafim, 2022).

5. تكامل إنترنت الأشياء مع نظم المعلومات الجغرافية والذكاء الاصطناعي

يعزز التكامل بين تقنيات إنترنت الأشياء، ونظم المعلومات الجغرافية، والذكاء الاصطناعي من قدرة المزارع على اتخاذ قرارات زراعية ذكية مبنية على بيانات مكانية وزمانية دقيقة، بما يسهم في زيادة الإنتاجية وتقليل المخاطر.

- **نظم المعلومات الجغرافية (GIS):** تتيح هذه النظم دمج البيانات المكانية مع البيانات التي تجمعها حساسات إنترنت الأشياء، ما يسمح برسم خرائط تفصيلية لظروف الحقول الزراعية. من خلال هذه الخرائط، يمكن تحديد المناطق التي تعاني من مشاكل معينة مثل نقص المياه أو تفشي الآفات، مما يساعد على توجيه التدخلات الزراعية بشكل مركز وفعال، مثل توجيه الري المكثف إلى مناطق محددة أو تطبيق مبيدات في مناطق آفاتها متفشية.
- **الذكاء الاصطناعي (AI):** يعتمد الذكاء الاصطناعي على معالجة وتحليل كميات ضخمة من البيانات التي تجمعها أنظمة إنترنت الأشياء. باستخدام تقنيات التعلم الآلي والشبكات العصبية، يمكن للذكاء الاصطناعي توقع مشكلات صحية محتملة في المحاصيل، أو التنبؤ بموعد الإصابة بالآفات، أو تقديم توصيات ذكية لإدارة الموارد مثل الري والتسميد. يتيح ذلك للمزارعين التعامل

مع التحديات بشكل استباقي، مما يحسن من الإنتاجية ويقلل الخسائر (Wolfert *et al*., 2017).

مثال عربي :في دولة الإمارات العربية المتحدة، قامت وزارة التغير المناخي والبيئة بتطبيق نموذج متكامل يجمع بين تقنيات إنترنت الأشياء، ونظم المعلومات الجغرافية، والذكاء الاصطناعي لإدارة المزارع الصحراوية بكفاءة عالية. أتاح هذا التكامل تحسين عمليات الري، وتحليل حالة المحاصيل في الوقت الحقيقي، ورفع قدرة التكيف مع الظروف الصحراوية القاسية. بفضل هذا المشروع، شهدت بعض المحاصيل زيادة في الإنتاجية بنسبة تصل إلى 25%، مما يعكس نجاح استخدام التقنيات الحديثة في تعزيز الأمن الغذائي ضمن بيئة صحراوية قاسية (Dubai Future Foundation, 2021).

6. حالات دراسية ناجحة

- **دراسة حالة من مصر: مشروع "فارمز إيه آي"**

في دلتا النيل المصرية، استخدمت شركة "فارمز إيه آي" شبكات إنترنت الأشياء لزراعة الذكاء الاصطناعي عبر تركيب حساسات ذكية في الحقول تقيس رطوبة التربة ودرجات الحرارة. هذه البيانات ترسل بشكل مباشر لأنظمة تحكم ري ذكية تساهم في جدولة الري بدقة عالية.

النتائج :قللت الشركة من استهلاك المياه بنسبة 35% وزادت إنتاجية القمح بنسبة 18% خلال موسم واحد (ElShafie *et al*., 2020).

- **الإمارات: استخدام IoT و GIS لتحسين الإنتاج الزراعي الصحراوي**

في الإمارات العربية المتحدة، قامت وزارة التغير المناخي والبيئة بتطبيق حلول إنترنت الأشياء المرتبطة بنظم المعلومات الجغرافية والذكاء الاصطناعي في الزراعة الصحراوية، حيث تم استهداف المزارع التي تعاني من نقص في المياه والتربة المالحة.

التطبيق: تركيب حساسات رطوبة وملوحة مع طائرات بدون طيار لجمع بيانات متعددة الأبعاد.

النتيجة: تحسن في استخدام المياه بنسبة 30% وزيادة في جودة المحاصيل (Dubai Future Foundation, 2021).

- **الهند: مبادرة"Digital Green"**

مبادرة تهدف إلى تمكين المزارعين في المناطق الريفية عبر تدريبهم على استخدام تقنيات IoT لجمع البيانات الزراعية وتحليلها. تعمل المبادرة على توصيل أجهزة استشعار منخفضة التكلفة مع تطبيقات الهواتف الذكية لتقديم توصيات مخصصة لكل مزرعة.

النتيجة: زيادة إنتاجية محاصيل الحبوب بنسبة 15% وتحسين إدارة المياه (Digital Green, 2019).

- **هولندا: شركة Netafim للري الذكي**

تعتمد Netafim على أنظمة IoT متطورة لمراقبة الري التقطيري وإدارة استخدام المياه والأسمدة في الحقول الزراعية، مع جمع بيانات دقيقة من الحساسات الأرضية والجوية.

النتيجة: تخفيض استهلاك المياه بنسبة 30% مع زيادة ملحوظة في الإنتاج الزراعي (Netafim, 2022).

7. التحديات التقنية

- **التحديات الأمنية**

  - **اختراق البيانات:** مع اعتماد الزراعة على أنظمة متصلة بالإنترنت، تزداد مخاطر الهجمات السيبرانية التي قد تؤدي إلى اختراق بيانات حساسة عن المحاصيل أو عمليات الإنتاج.

- **حماية الخصوصية:** ضرورة الحفاظ على خصوصية المزارعين وبياناتهم الزراعية، خاصة عند مشاركة البيانات مع أطراف ثالثة.
- **التشفير وبروتوكولات الأمان:** الحاجة إلى استخدام تقنيات تشفير متقدمة وبروتوكولات أمان قوية مثل TLS و VPNsفي نقل البيانات (Zhao *et al*., 2019).

- **تحديات الاتصال والبنية التحتية**

- **تغطية شبكات الإنترنت:** العديد من المناطق الزراعية، خصوصاً الريفية والنائية، تفتقر إلى شبكات إنترنت قوية ومستقرة، مما يؤثر على استمرارية جمع ونقل البيانات.
- **تكلفة الشبكات:** إقامة بنية تحتية رقمية متقدمة (مثل شبكات الجيل الخامس 5G) أو مكلفة (LPWAN)، وقد تكون غير متاحة في بعض الدول النامية.
- **الطاقة:** تشغيل الحساسات والأجهزة لفترات طويلة في بيئات زراعية تتطلب حلول طاقة فعالة (بطاريات طويلة العمر، خلايا شمسية) (Li *et al*., 2020).

- **تحديات التكامل والتوافقية**

- **تنوع الأجهزة والبروتوكولات:** تعدد أنواع الحساسات والأجهزة المستخدمة، كل منها يتطلب بروتوكولات اتصال مختلفة، مما يصعب توحيد البيانات وربطها في نظام مركزي واحد.
- **توحيد البيانات:** مشكلة في معالجة وتحليل البيانات ذات التنسيقات المختلفة من مصادر متعددة.
- **الحاجة لمنصات تكاملية:** تطوير منصات تقنية تسمح بدمج البيانات من مختلف الأجهزة بسلاسة، مع واجهات استخدام سهلة للمزارعين (Wolfert *et al*., 2017).

- **تحديات تكلفة التنفيذ والصيانة**

- **التكاليف الأولية:** تشمل شراء الأجهزة، تركيب الحساسات، بناء الشبكات، والتدريب.
- **تكاليف التشغيل:** تحديث البرمجيات، صيانة الأجهزة، استبدال البطاريات أو الحساسات التالفة.
- **العائد الاستثماري:** صعوبة إقناع المزارعين خاصة الصغار بالاستثمار في تقنيات قد تظهر فائدتها على المدى المتوسط أو البعيد فقط.

- **التحديات المتعلقة بالمهارات البشرية**

- **نقص الكوادر المؤهلة:** الحاجة إلى مهندسين وفنيين مدربين على تركيب وتشغيل وصيانة تقنيات انترنت الأشياء (IoT).
- **تدريب المزارعين:** ضرورة توفير دورات تدريبية مستمرة للمزارعين على فهم كيفية استخدام الأنظمة والاستفادة منها.
- **مقاومة التغيير:** بعض المزارعين مترددون في اعتماد التكنولوجيا الجديدة بسبب القلق من التعقيد أو الخوف من فقدان السيطرة التقليدية (Jha *et al.*, 2019).

يلخص الشكل التالي استخدام التحديات في تبني التكنولوجيا الرقمية في الزراعة الحديثة (Qureshi *et al.*, 2022):

8. توصيات عملية للمزارعين والمؤسسات الحكومية

يُعد تبني تقنيات إنترنت الأشياء في الزراعة خطوة استراتيجية نحو تحقيق الزراعة الذكية والمستدامة، لكن نجاح هذا التحول يعتمد بشكل كبير على كيفية تطبيق هذه التقنيات في الميدان، سواء من قبل المزارعين أنفسهم أو من خلال دعم وتوجيه المؤسسات الحكومية. لذلك، تأتي هذه التوصيات العملية لتسهل عملية التبنّي وتضمن تحقيق أقصى استفادة ممكنة.

- **توصيات للمزارعين**

1. ابدأ صغيراً ثم تدرّج

ينصح المزارعون الذين يرغبون في تبني تقنيات إنترنت الأشياء بأن يبدأوا بحزمة محدودة ومبسطة من الحساسات مثل حساسات الرطوبة أو الطقس،

وذلك لتقييم مدى تأثيرها على إدارة المزرعة وفاعلية استخدامها قبل الاستثمار في أنظمة أكثر تعقيداً. هذه الخطوة تتيح التعلم التدريجي وتقليل المخاطر المالية، فضلاً عن القدرة على ضبط النظام حسب ظروف المزرعة الخاصة (Jha *et al*., 2019).

2. اعمل على معايرة البيانات ميدانياً

من المهم أن يقارن المزارع قراءات الحساسات مع نتائج التحاليل المخبرية للتربة بشكل دوري، وذلك لضمان دقة البيانات المجمعة، ولتعديل أية أخطاء أو انحرافات في القراءات. فالمعايرة الميدانية تُحسّن من جودة النظام الذكي وتزيد من موثوقية القرارات الزراعية المبنية على هذه البيانات.(Li *et al*., 2020)

3. استخدم المنصّات السحابية المجانية أولاً

يمكن للمزارعين الاستفادة من المنصات السحابية المجانية مثل ThingSpeakأو OpenAg لتخزين وتحليل البيانات التي تجمعها الحساسات، مما يوفر تكاليف إنشاء بنية تحتية مخصصة في البداية. هذه المنصات توفر أدوات تحليلية متقدمة تسمح بفهم أفضل للبيانات ودعم اتخاذ القرار الزراعي بدون الحاجة لاستثمارات كبيرة.

4. ادمج توصيات المنصّة مع الخبرة الشخصية

لا ينبغي الاعتماد بشكل كامل على البيانات الرقمية وحدها، بل يجب دمجها مع المعرفة الميدانية والخبرة الشخصية للمزارع في إدارة المزرعة. فالتقنية هي أداة مساعدة، والقرار الأفضل يأتي من مزج الذكاء الاصطناعي والتحليل الرقمي مع الفهم العميق لخصوصيات الأرض والمحاصيل (Wolfert *et al*., 2017).

5. **خطّة صيانة دورية**

تُعد الصيانة الدورية للأجهزة والمكوّنات الحسية جزءاً حيوياً من ضمان استمرارية عمل أنظمة إنترنت الأشياء بفعالية. على المزارع تحديد جدول منتظم لفحص البطاريات، وتنظيف الحساسات، والتحقق من حالة التوصيلات الإلكترونية لتجنب الأعطال التي قد تؤدي إلى فقدان البيانات أو توقف النظام فجأة.(Digital Green, 2019)

- **توصيات للمؤسسات الحكومية**

1. **تحفيز مالي وتخفيضات جمركيّة**

من شأن تقديم حوافز مالية مثل الدعم المباشر أو تخفيضات جمركية على استيراد الحساسات والطائرات المسيّرة أن يقلل من تكلفة تبني تقنيات إنترنت الأشياء، خاصة لدى المزارعين الصغار الذين يواجهون تحديات مالية في الاستثمار بالتقنيات الحديثة.

2. **تعريب المنصّات التدريبية وبناء القدرات**

من الضروري توفير محتوى تدريبي موجه للمزارعين والمهندسين الزراعيين باللغة العربية، بالإضافة إلى إطلاق برامج تعاون مشتركة بين المؤسسات الحكومية والجامعات لتطوير المهارات الرقمية. هذا يساعد على سد فجوة المهارات الرقمية ويحفّز على الاستخدام الفعال للتقنيات الجديدة.

3. **وضع معايير وطنية لسلامة البيانات الزراعية**

يُعتبر الأمن السيبراني من التحديات الجوهرية في أنظمة إنترنت الأشياء. لذا، يجب على الجهات الحكومية صياغة وتنفيذ سياسات واضحة تشمل تشفير البيانات، وبروتوكولات مشاركة آمنة، وإجراءات للوقاية من الهجمات

السيبرانية، مما يضمن حماية البيانات الزراعية الحساسة (Zhao *et al.*, 2019).

4. **نشر بنية تحتية شبكية منخفضة الطاقة في الأرياف**

لتوفير تغطية واسعة وموثوقة لأنظمة إنترنت الأشياء في المناطق الريفية، يجب تطوير بنية تحتية لشبكات اتصالات منخفضة الطاقة مثل LPWAN أو شبكات الجيل الخامس (5G Rural)، بالتعاون مع مزودي خدمات الاتصالات. هذه الخطوة تسهل وصول البيانات بسرعة وكفاءة وتدعم استدامة الأنظمة.

5. **تمويل حاضنات أعمال Ag-IoT**

تشجيع إنشاء وتمويل حاضنات أعمال متخصصة في مجال إنترنت الأشياء الزراعي (Ag-IoT) يسرّع من وتيرة الابتكار المحلي، ويساعد في نقل التقنيات والحلول الحديثة من المختبرات إلى الحقول بشكل أسرع، مع خلق فرص عمل جديدة وتعزيز الاقتصاد الزراعي المحلي (FAO, 2022).

هذه التوصيات، عند تطبيقها بشكل متكامل، تشكل خارطة طريق واضحة تسهم في تسريع التحول الرقمي للقطاع الزراعي، مما يعزز الأمن الغذائي ويحقق التنمية المستدامة.

9. نماذج الأعمال التجاريّة القائمة على انترنت الأشياء في الزراعة

مع تزايد اعتماد تقنيات إنترنت الأشياء في القطاع الزراعي، برزت مجموعة متنوعة من نماذج الأعمال التي تستغل هذه التكنولوجيا لتحويل البيانات والخدمات الرقمية إلى فرص اقتصادية مستدامة. تتيح هذه النماذج للمزارعين والشركات مزايا تنافسية، من خلال تقديم حلول مرنة ومتنوعة تتناسب مع احتياجات مختلف الأطراف في سلسلة القيمة الزراعية. فيما يلي نستعرض أبرز نماذج الأعمال التجارية التي تعتمد على

إنترنت الأشياء في الزراعة، والتي توضح آليات الربح المختلفة وكيفية تقديم الخدمات الذكية للمزارعين والمؤسسات ذات الصلة.

النموذج	آليّة الربح
Hardware-as-a-Service بيع معدّات مع صيانة واشتراك سنوي	حسّاسات *CropX* تقدَّم مع عقد صيانة وتحليلات دورية
Data-as-a-Service بيع لوحات مؤشّرات وتنبيهات مستندة إلى بيانات طرف ثالث	منصة *Climate FieldView* تبيع اشتراكاً لتحليلات محصوليّة مخصّصة (John Deere, 2023)
Pay-Per-Irrigation دفع مقابل كل دورة ري مؤتمتة	نظام *Netafim* "الري قطرة كخدمة" في مزارع الزهور الهولندية (Netafim, 2022)
Sharing Platform تجميع بيانات مزارع عدّة وبيع الرؤى لشركات البذور أو التأمين	مبادرة *e-Choupal* بالهند تتيح لشركات المدخلات شراء تقارير سوقية تفصيلية
Outcome-Based Contract يدفع المزارع عند تحقيق زيادة مُثبتة في الغلّة أو خفض التكاليف	شركة *SunCulture* بكينيا تربط أجرها بنسبة توفير الماء المحقَّق

اعداد وتنسيق المؤلفَين

10. عوامل النجاح

تُعد عوامل النجاح في تطبيق التكنولوجيا الرقمية في القطاع الزراعي من الأمور الحاسمة التي تحدد مدى تحقيق المزارعين والمؤسسات الحكومية المستهدف من هذا التحول الرقمي. يمكن تلخيص هذه العوامل في النقاط التالية:

- **قيمة واضحة للمزارع (عائد استثمار يتجاوز التكلفة خلال 1-3 سنوات)**

يُعد تحقيق عائد استثمار واضح وقابل للقياس خلال فترة زمنية قصيرة، من أهم العوامل التي تحفز المزارعين على تبني التقنيات الحديثة. تشير الدراسات، مثل دراسة Klerkx & Rose (2020)، إلى أن المزارعين يكونون أكثر استعداداً للاستثمار في التقنيات الرقمية إذا كانت الفوائد المالية متوقعة وقابلة للتحقيق خلال فترة تتراوح بين سنة إلى ثلاث سنوات. هذا العائد يمكن أن يشمل زيادة الإنتاجية،

تقليل التكاليف التشغيلية، تحسين جودة المحصول، أو تعزيز استدامة الموارد. بعبارة أخرى، يجب أن يشعر المزارع بأن الاستثمار في التكنولوجيا هو خيار اقتصادي ذكي وليس مجرد تكلفة إضافية أو مخاطرة غير محسوبة.

- **شفافية في ملكية البيانات واستخدامها**

في عصر الزراعة الرقمية، تصبح البيانات الزراعية أحد أهم الأصول. ومن ثم، فإن وضوح حقوق الملكية على هذه البيانات يُعد من عوامل النجاح الأساسية. يجب أن يكون هناك اتفاق واضح بين المزارعين والشركات المزودة للخدمات حول من يمتلك البيانات، وكيف يمكن استخدام هذه البيانات، والضمانات المتعلقة بحماية الخصوصية وعدم استغلالها بطريقة تضر بالمزارع. توفر الشفافية في هذه الجوانب ثقة لدى المزارعين لتبادل بياناتهم واستخدامها بشكل أمثل، مما يدعم منظومة الزراعة الرقمية بأكملها.

- **تكامل سلس مع المعدات الزراعية القائمة**

تواجه الزراعة الرقمية تحديات تقنية عديدة، منها مقاومة التغيير من قبل المزارعين بسبب تعقيد استخدام تقنيات جديدة أو تكلفة استبدال المعدات. لذلك، يعتبر التكامل السلس مع المعدات الزراعية الحالية من عوامل النجاح الحاسمة. يجب أن تكون الأنظمة الرقمية قادرة على التفاعل والتكامل مع الأدوات والآلات التي يستخدمها المزارع بالفعل، مثل مضخات المياه، الحساسات، أو نظم الري. هذا التكامل يقلل من حاجز التبنّي ويُسهل عملية التحول الرقمي دون الحاجة لاستثمارات ضخمة إضافية أو تدريب مكثف.

- **إطار عملي لتحقيق النجاح**

يوفر هذا التوسع إطاراً عملياً يمكن أن يستند إليه المزارعون وصانعو السياسات على حد سواء، حيث يوضح كيف يمكن تحويل البيانات الزراعية إلى قيمة اقتصادية مستدامة من خلال اعتماد نماذج أعمال قائمة على الزراعة الرقمية. فباستخدام هذه العوامل مجتمعة، يمكن ضمان أن لا يكون الاستثمار في التقنيات

الرقمية مجرد إنفاق تكميلي، بل خطوة استراتيجية تساهم في تطوير القطاع الزراعي وتحقيق الأمن الغذائي والاقتصادي.

11. الخاتمة

يُسلط هذا الفصل الضوء على التحوّل الرقمي الجذري في قطاع الزراعة بفضل تقنية إنترنت الأشياء، التي تمكّن من رصد بيئة الزراعة بشكل مستمر ودقيق باستخدام شبكة من الحساسات والأجهزة الذكية المتصلة بالإنترنت. تجمع هذه الأجهزة بيانات مهمة مثل رطوبة التربة، درجة الحرارة، حالة النباتات، وجودة الهواء، ليتم تحليلها باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي ونظم المعلومات الجغرافية، ما يساعد في اتخاذ قرارات زراعية مبنية على بيانات حقيقية وليس على التخمين.

تشمل تطبيقات إنترنت الأشياء في الزراعة أنظمة ري ذكية تضبط كمية ووقت الري بدقة حسب حاجة النباتات، وأنظمة تسميد ذكية توجه استخدام الأسمدة بشكل اقتصادي وصديق للبيئة، إضافة إلى رصد بيئي مستمر للتغيرات المناخية التي قد تؤثر على المحاصيل. أدت هذه التطبيقات إلى تقليل استهلاك المياه والأسمدة بشكل ملحوظ، مع زيادة الإنتاجية وجودة المحاصيل في تجارب وأمثلة تطبيقية من عدة دول مثل مصر، الإمارات، الهند، وهولندا.

رغم الفوائد الكبيرة، يواجه تبني إنترنت الأشياء في الزراعة تحديات عدة، منها حماية البيانات من الاختراقات، ضعف شبكات الاتصال في المناطق الريفية، ارتفاع تكلفة تركيب وصيانة الأجهزة، ونقص الكوادر المؤهلة لتشغيل هذه الأنظمة. كما يعاني بعض المزارعين من مقاومة التغيير والتردد في استخدام التكنولوجيا الحديثة.

يقدم الفصل توصيات عملية لتجاوز هذه العقبات، مثل بدء استخدام الحساسات بشكل تدريجي، معايرة البيانات ميدانياً لضمان دقتها، استخدام منصات تحليل سحابية

ميسرة، وتدريب المزارعين على دمج البيانات الرقمية مع خبراتهم الميدانية. كما يؤكد على دور المؤسسات الحكومية في دعم البنية التحتية الرقمية، وضع معايير أمان البيانات، وتوفير حوافز مالية وتقنية لتشجيع التحول الرقمي.

ختاماً، يشدد الفصل على أهمية وجود عائد استثماري واضح للمزارعين خلال فترة قصيرة، والشفافية في ملكية واستخدام البيانات، والتكامل السلس بين تقنيات إنترنت الأشياء والمعدات الزراعية التقليدية، كأساسيات لضمان نجاح وتوسيع نطاق الزراعة الرقمية المستدامة.

12. المراجع

Digital Green. (2019). Empowering small farmers through IoT and digital training. Retrieved from https://www.digitalgreen.org

Dubai Future Foundation. (2021). Smart agriculture initiatives in UAE. https://www.dubaifuture.gov.ae/projects/smart-agriculture

ElShafie, A., Abdallah, S., & Hassan, M. (2020). IoT-enabled precision agriculture for water management in Nile Delta. Journal of Agricultural Informatics, 11(2), 12-22.

FAO. (2022). Digital agriculture: The future of farming. Rome: Food and Agriculture Organization.

Jha, K., Doshi, A., Patel, P., & Shah, M. (2019). A comprehensive review on automation in agriculture using IoT. Artificial Intelligence in Agriculture, 2, 1-12.

John Deere. (2023). Precision agriculture technologies. https://www.deere.com/en/technology-products/precision-ag-technology/

Klerkx, L., & Rose, D. (2020). Dealing with the game-changing technologies of agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility? Global Food Security, 24, 100347. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100347

Li, L., Liu, Z., & Zhou, Q. (2020). IoT applications in agriculture: An overview. *Sensors*, 20(7), 2020.

Qureshi, T. *et al* (2022).Smart Agriculture for Sustainable Food Security Using Internet of Things (IoT). Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2022, Article ID 9608394, 10 pages.

Mekala, S., Babu, V., & Shankar, P. (2019). Wireless sensor networks for smart agriculture: A review. International Journal of Advanced Research in Computer Science, 10(2), 40-46.

Netafim. (2022). Smart irrigation technologies. https://www.netafim.com/solutions/irrigation/

Ruiz-Garcia, L., Lunadei, L., Barreiro, P., & Robla, J. I. (2020). A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: State of the art and current trends. Sensors, 20(11), 2020.

Saudi Ministry of Environment, Water and Agriculture. (2021). Use of drone technologies in Saudi agriculture. https://www.mewa.gov.sa/en

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming – A review. Agricultural Systems, 153, 69-80.

Zhao, G., Li, W., & Wang, Y. (2019). Security and privacy in IoT for smart agriculture: Challenges and solutions. *IEEE Access*, 7, 129828-129841.

الفصل 18 - البيانات الضخمة والذكاء الاصطناعي في الزراعة

المحتويات

1. المقدمة
2. ما هي البيانات الضخمة؟
3. مصادر البيانات في القطاع الزراعي
4. تحليلات البيانات ودورها في اتخاذ القرار الزراعي
5. الذكاء الاصطناعي في تحليل سلوك المحاصيل والتربة
6. خوارزميات التنبؤ والإنتاجية
7. التكامل بين الذكاء الاصطناعي وسلاسل الإمداد الزراعية
8. تحديات الخصوصية وحوكمة البيانات
9. الخاتمة
10. المراجع

1. المقدمة

أصبح تدفّق البيانات الزراعية وازدياد قدرات المعالجة الحسابية محوريَّين لتحويل القطاع الزراعي من نموذج قائم على الخبرة إلى نموذج قائم على الأدلة. فدمج البيانات الضخمة مع الذكاء الاصطناعي (AI) يمكّن المزارعين وصنّاع القرار من التنبؤ بالأخطار وتخصيص المدخلات بدقّة، مع تحسين استدامة الموارد (Wolfert *et al.*, 2017).

2. ما هي البيانات الضخمة؟

البيانات الضخمة هي مجموعات بيانات تتصف بـ 4Vs (الحجم، التنوع، السرعة، الموثوقية)، وتتطلب بنى تحتية وأدوات تحليل متقدمة لاستخراج قيمتها (Kamilaris *et al.*, 2018). في الزراعة، قد تتخطى البيانات بضعة تيرابايت لكل مزرعة كبيرة تشمل صوراً متعددة الأطياف وحساسات دقيقة تُحدَّث بالدقيقة.

3. مصادر البيانات في القطاع الزراعي

تُعد البيانات العمود الفقري للزراعة الرقمية، حيث يعتمد اتخاذ القرار الذكي على توفر مصادر موثوقة وغنية بالمعلومات تغطي مختلف جوانب العملية الزراعية. ومن خلال التكامل بين تقنيات الاستشعار عن بُعد، وحساسات إنترنت الأشياء، والسجلات الإدارية، وبيانات السوق، يمكن إنشاء بيئة زراعية متكاملة تدعم التحليل التنبؤي، وتحسّن من الكفاءة التشغيلية، وتزيد من عوائد المزارع. يوضح الجدول التالي أبرز مصادر البيانات في القطاع الزراعي، ويستعرض القيمة التحليلية التي تضيفها كل فئة من هذه المصادر إلى منظومة اتخاذ القرار.

المصدر	أمثلة عملية	القيمة التحليلية
الاستشعار عن بُعد	صور Sentinel-2 ، طائرات UAV	مؤشر NDVI لصحة النبات، ورسم خرائط الإجهاد المائي
حساساتIoT	رطوبة التربة، ملوحة، تدفّق مياه	تشغيل الريّ التلقائي، ضبط كميات السماد
السجلات الإدارية	سجلات الزراعة والحصاد	تتبّع تاريخي للأداء، معايرة نماذجAI
بيانات السوق	أسعار المنصة السلعية، طلب المستهلك	قرارات الزراعة التعاقدية والتسعير (Zhang *et al.*, 2021)

اعداد وتنسيق المؤلفَين

4. تحليلات البيانات ودورها في اتخاذ القرار الزراعي

في سياق الزراعة الذكية، لا تقتصر البيانات على كونها معلومات خام، بل تمثل مورداً استراتيجياً لاكتساب رؤى دقيقة وديناميكية تساعد المزارعين والمخططين على اتخاذ قرارات قائمة على الأدلة. ويمكن تصنيف تحليلات البيانات المستخدمة في الزراعة إلى أربع فئات رئيسية: التحليلات الوصفية، التشخيصية، التنبؤية، والوصفية المتقدمة

(Prescriptive Analytics). كل واحدة منها تلعب دوراً تكاملياً في تحسين العمليات الزراعية على مستوى الإدارة الدقيقة للحقل وسلسلة الإمداد.

- **التحليلات الوصفية (Descriptive Analytics)**

تُستخدم التحليلات الوصفية لفهم ما يحدث حالياً في المزرعة من خلال تقارير لحظية تُستخلص من الحساسات والطائرات بدون طيار والمجسات الأرضية. تشمل الأمثلة:

- لوحات معلومات Dashboard في تطبيقات مثل John Deere Operations Center، والتي تعرض بيانات حول رطوبة التربة، ودرجات الحرارة، وحالة المعدات.
- تقارير يومية أو أسبوعية حول مؤشرات حيوية للنبات مثل مؤشر النمو NDVIالمستخرج من الصور الفضائية أو الجوية.

تساعد هذه الأدوات المزارع على مراقبة الحالة العامة للمزرعة، لكن دون تفسير أسباب المشاكل.

- **التحليلات التشخيصية (Diagnostic Analytics)**

تهدف إلى الإجابة على سؤال" :لماذا حدث ذلك؟"

مثال تطبيقي:

- عند رصد تباطؤ في نمو النبات في جزء معين من الحقل، يمكن ربط البيانات التاريخية عن التربة والري والمناخ عبر منصة مثل CropXلتحديد أن السبب هو انخفاض مستوى البوتاسيوم في التربة وليس مشكلة ري.

في تونس، تستخدم بعض مزارع الزيتون هذه التحليلات لتشخيص أمراض الأشجار بناءً على سلاسل زمنية من بيانات الاستشعار البيئي وتحاليل التربة (Zhang *et al.*, 2021).

- **التحليلات التنبؤية (Predictive Analytics)**

تستخدم هذه التحليلات نماذج الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بنتائج مستقبلية مثل:

- توقع الإنتاج الزراعي بناءً على الظروف المناخية الحالية والسجلات التاريخية باستخدام خوارزميات تعلم الآلة مثل Random Forest و.XGBoost .
- التنبؤ بانتشار الأمراض النباتية، كما في حالة استخدام منصة PlantVillage *Nuru*في كينيا التي تتنبأ بانتشار مرض لفحة البطاطا عبر تحليل صور الأوراق.

في مصر، طوّر المركز القومي للبحوث نماذج تنبؤية مبنية على بيانات من مزارع القمح لتقدير الإنتاج استناداً إلى توقيت الزراعة، مستوى الرطوبة، واستخدام الأسمدة، مما حسّن دقة التخطيط الزراعي بنسبة 20.(Jones *et al*., 2019) %

- **التحليلات الوصفية المتقدمة (Prescriptive Analytics)**

تمثّل هذه المرحلة الذروة في دورة تحليلات البيانات، حيث لا يتم فقط شرح ما حدث أو التنبؤ بما سيحدث، بل تقديم توصيات واضحة ومؤتمتة حول ما ينبغي فعله:

- أنظمة مثل Trimble Ag Software أو Climate FieldView تقترح توقيتات الري، معدلات التسميد، وحتى طرق الزراعة الأمثل استناداً إلى نماذج التعلم الآلي والتحليلات البيئية.
- مثال: في المغرب، تستخدم مزارع العنب في منطقة مكناس نظام توصية آلي للتحكم بالري بناءً على بيانات الرطوبة الجوية والتربة، مما أسفر عن تقليل استهلاك المياه بنسبة 25% دون التأثير على الإنتاجية.

- **تقنيات وأدوات التحليل المتقدمة**

مع تطور الزراعة الرقمية، أصبحت تحليلات البيانات أداة حيوية لتحسين القرارات الزراعية، حيث تُمكّن المزارعين والخبراء من فهم أعمق للظروف الميدانية وتوقع التحديات المستقبلية. وتتنوع هذه التقنيات ما بين أدوات تصور البيانات، ومنصات تحليل الصور الفضائية، إلى نماذج تعلم الآلة المتقدمة، سواء عبر البرمجة أو باستخدام أدوات سهلة للمستخدمين غير المتخصصين. يوضح الجدول التالي أبرز هذه التقنيات، واستخداماتها، والمنصات الداعمة لها.

التقنية	أداة أو منصة	الاستخدام
Power BI / Tableau	لوحات الأداء Dashboard	تحليل وتصور بيانات الحقل
Google Earth Engine	مؤشرات نباتية NDVI، SAVI	تحليل الصور الفضائية الضخمة
Python (Pandas, Scikit-Learn)	التنبؤ بالإنتاج والآفات	نماذج ML مخصصة
AutoML (مثل Google AutoML Tables)	سهل الاستخدام للمزارعين	إنشاء نماذج بدون برمجة

اعداد وتنسيق المؤلفَين

تحليلات البيانات تمكّن من الانتقال من الزراعة التقليدية المعتمدة على التقديرات الشخصية، إلى زراعة رقمية تعتمد على أدلة كمية وتوصيات مؤتمتة. كما أنها تساهم في تعزيز القدرة التنافسية وتحسين استخدام الموارد، من خلال التحوّل إلى اتخاذ قرارات مبنية على الأدلة (Evidence-based Decision Making).

5. الذكاء الاصطناعي في تحليل سلوك المحاصيل والتربة

يُعدّ فهم ديناميات سلوك المحاصيل والتربة ركيزة أساسية في الزراعة الحديثة. ومع تنامي تحديات تغير المناخ، وتقلص الموارد، والحاجة إلى تعزيز الإنتاجية، أصبح من الضروري الاستفادة من الذكاء الاصطناعي (AI) لفك الشيفرات المعقدة لهذه العلاقة

الحيوية. يستخدم الذكاء الاصطناعي خوارزميات تعلم الآلة والتعلم العميق لتحليل كميات هائلة من البيانات التي يتم جمعها من التربة، والمناخ، والاستشعار البعيد، والسجلات التاريخية للمحاصيل، ما يُمكّن المزارعين من التنبؤ بحالة التربة، ورصد صحة النباتات، وتحسين استراتيجيات الزراعة بدقة.

- **تحليل سلوك المحاصيل باستخدام الذكاء الاصطناعي**

- **التنبؤ بالنمو والإنتاجية** :تستخدم نماذج التعلم العميق) مثل LSTM و (CNN لتحليل بيانات المناخ والتربة والنبات بهدف التنبؤ بمعدلات النمو ومواعيد الحصاد المثلى. على سبيل المثال، طورت شركة *Blue River Technology* أنظمة مدعومة بالذكاء الاصطناعي تراقب نمو النباتات وتُحدد الحشائش الضارة بدقة فائقة.
- **كشف الأمراض النباتية مبكراً** :تُستخدم خوارزميات الرؤية الحاسوبية لتحليل صور أوراق النبات الملتقطة بالطائرات بدون طيار أو الهواتف المحمولة لرصد الأمراض والآفات في مراحلها المبكرة. أظهرت دراسات أن نماذج AI المدربة على مجموعات بيانات ضخمة استطاعت التعرف على أكثر من 20 نوعاً من أمراض القمح بنسبة دقة تزيد عن 95 % (Mohanty *et al*., 2016).
- **تحليل استجابات المحاصيل للتسميد والري** :يمكن للذكاء الاصطناعي تحليل تفاعل النباتات مع كميات الري أو الجرعات السمادية المطبقة، وبالتالي ضبط الجرعات وفقاً لاحتياجات النبات الفعلية، مما يؤدي إلى تقليل التكاليف وزيادة الكفاءة.

- **تحليل التربة باستخدام الذكاء الاصطناعي**

  - **تصنيف خصائص التربة** :باستخدام بيانات من الحساسات أو المسوحات الطيفية، يمكن لخوارزميات التصنيف مثل Random Forest أو SVM تحديد نوع التربة، مستوى الملوحة، ودرجة الحموضة، مما يساعد في اختيار نوع المحاصيل المناسب لكل حقل.
  - **التنبؤ بتدهور التربة** :بالاعتماد على بيانات الأقمار الصناعية والتغيرات الزمنية في جودة التربة، تستطيع أنظمة الذكاء الاصطناعي التنبؤ بمعدلات تآكل التربة أو فقدان المغذيات، ما يتيح التدخل المبكر.
  - **دمج البيانات الجغرافية والتاريخية** :من خلال نظم المعلومات الجغرافية (GIS)ونماذج الذكاء الاصطناعي، يمكن رسم خرائط دقيقة لخصوبة التربة واستخدامها في إدارة زراعية دقيقة على مستوى كل قطعة أرض.

يوضح الجدول التالي مقارنة بين أبرز خوارزميات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في تحليل سلوك المحاصيل والتربة، مع الإشارة إلى التطبيقات النموذجية والمزايا العملية لكل تقنية".

جدول مقارنة لتقنيات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في تحليل سلوك المحاصيل والتربة.

التقنية / الخوارزمية	الاستخدام الزراعي الرئيسي	مثال تطبيقي دولي	مثال تطبيقي عربي	المزايا
شبكات التعلم العميق (DNN)	تصنيف صحة النبات، التعرف على الأمراض من الصور	نظام PlantVillage في إفريقيا (FAO, 2021)	نظام بصمة نباتية في السعودية لتحليل ورقي (King	دقة عالية في تحليل الصور والتعلم الذاتي

			Saud Univ.)	
خوارزميات شجرة القرار (Decision Trees)	توقع صلاحية التربة وخصوبتها بناءً على مدخلات بيانات	نموذج IDSS في الهند (World Bank, 2019)	منصة "حصاد" المصرية لتحليل خصوبة التربة	سهلة التفسير وسريعة التنفيذ
الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)	التنبؤ بالإنتاجية بناءً على ظروف الطقس والتربة	AGRINNOVAفي إيطاليا	مشروع جامعة الموصل لزراعة القمح في العراق	قادرة على معالجة بيانات غير خطية
التحليل العنقودي (Clustering)	تصنيف أنواع التربة أو سلوك النبات حسب الخصائص المشتركة	نظام تحليل النمط النباتي في أستراليا	مشروع في المغرب لتصنيف الأراضي الخصبة	مفيد لاستكشاف الأنماط في البيانات
خوارزميات الانحدار (Regression Models)	توقع الغلة أو نسب المغذيات في التربة بدقة رقمية	نظام AgriTechفي الولايات المتحدة	تجارب وزارة الزراعة الأردنية للتنبؤ بالمحصول	مناسبة للتنبؤ الكمي والاقتصادي
الرؤية الحاسوبية (Computer Vision)	مراقبة صحة الأوراق ونمو النباتات	شركة PEAT في ألمانيا (CropDiagnosis App)	تطبيق "نبتتي" في الإمارات العربية المتحدة	مفيدة للمزارع الذكي المجهّز بالكاميرات

اعداد وتنسيق المؤلفَين

تُظهر دراسات ميدانية أن تشخيص الأمراض بالـ AI يخفض استخدام المبيدات بـ 15-20 % ويزيد الغلّة بنحو 12 % عند تبنّيه على نطاق تجاري (Tzachor *et al.*, 2021)

- **أمثلة عربية ودولية**

  - **مصر**: نفذت وزارة الزراعة المصرية بالتعاون مع FAO مشروعاً تجريبياً باستخدام الذكاء الاصطناعي لتقدير محتوى الرطوبة في التربة، ما ساعد على تحسين نظام الري في مزارع القمح بمحافظتي الفيوم والشرقية (FAO, 2021).
  - **الهند**: طورت شركة AgNext نظاماً يستخدم الذكاء الاصطناعي لتحليل جودة التربة والمحاصيل لحظة وصولها إلى مراكز التجميع، مما يقلل من الهدر ويُسرّع تسعير المنتجات.
  - **هولندا**: توظف مزارع Wageningen University أنظمة روبوتية مزودة بالذكاء الاصطناعي لمراقبة سلوك المحاصيل، مما يساعدهم في تحسين جودة الإنتاج وتقليل الاعتماد على المبيدات والأسمدة.

- **التحديات الحالية**

  - **الحاجة إلى بيانات محلية دقيقة**: تعاني العديد من البلدان العربية من نقص قواعد البيانات الزراعية المحلية لتدريب نماذج الذكاء الاصطناعي، مما يحد من دقتها.
  - **البنية التحتية الرقمية**: تتطلب هذه النظم اتصالاً ثابتاً بالإنترنت، وحواسيب قوية، وأدوات استشعار دقيقة، وهي غير متوفرة دائماً في المناطق الريفية.
  - **التفسير والاعتمادية**: تبقى بعض نماذج الذكاء الاصطناعي بمثابة "صندوق أسود"، ما يُصعّب تفسير نتائجها وفهم أسباب التوصيات التي تقدمها.

6. خوارزميات التنبؤ والإنتاجية

تشكل خوارزميات التنبؤ أحد الركائز الأساسية في الزراعة الذكية، إذ تُستخدم لتحسين اتخاذ القرار وتوقّع المتغيرات الزراعية قبل حدوثها، مما يساهم في زيادة الكفاءة وتقليل الفاقد في الموارد. تعتمد هذه الخوارزميات على معالجة كميات ضخمة من البيانات (Big Data) تشمل الطقس، التربة، الري، أنماط الآفات، وصور الأقمار الصناعية.

- **ما المقصود بخوارزميات التنبؤ في الزراعة؟**

هي نماذج رياضية وإحصائية، تعتمد على تقنيات التعلم الآلي (Machine Learning) والتعلم العميق (Deep Learning)، تهدف إلى التنبؤ بإنتاجية المحاصيل، حدوث الآفات، توقيت الزراعة المثالي، وغير ذلك من المتغيرات الحيوية. تقوم هذه الخوارزميات بتحليل بيانات تاريخية وبيانات حية لإنتاج توقعات دقيقة قابلة للتنفيذ.

- **أبرز الخوارزميات المستخدمة**

أحدثت خوارزميات تعلم الآلة (Machine Learning) تحولاً جذرياً في كيفية التعامل مع البيانات الزراعية، حيث تُمكّن من بناء نماذج ذكية للتنبؤ، والتصنيف، والكشف المبكر عن الأمراض والآفات. تختلف الخوارزميات بحسب نوع البيانات والغرض من التحليل، فبعضها يُستخدم للتنبؤ بإنتاج المحاصيل، بينما يُستخدم البعض الآخر لتصنيف الصور أو تحليل السلاسل الزمنية. يوضح الجدول التالي مجموعة من أبرز الخوارزميات المستخدمة في الزراعة الذكية، مع أمثلة تطبيقية توضّح استخدامها في السياقات الواقعية.

الخوارزمية	الاستخدام الزراعي	الأمثلة
Linear Regression	التنبؤ بإنتاج المحصول استناداً إلى مدخلات مثل الكثافة النباتية، الأمطار، والأسمدة	نموذج تنبؤ بإنتاجية الأرز في دلتا النيل
Random Forest	تصنيف صحة النباتات وتوقع الإصابة بالأمراض	مراقبة محصول الطماطم في إسبانيا
Support Vector Machines (SVM)	التعرف على أنماط الآفات في صور الأوراق	كشف مرض البياض الدقيقي في العنب
Recurrent Neural Networks (RNN)	التنبؤ بسلاسل زمنية مثل تغيرات الرطوبة والتربة	توقع رطوبة التربة في المغرب لزراعة الزيتون
XGBoost	التنبؤ بإنتاج المحاصيل بدقة عالية ومرونة مع البيانات المعقدة	توقع إنتاج القمح في الهند (Karthikeyan *et al*., 2021)

اعداد وتنسيق المؤلفَين

تعريفات مختصرة لأبرز الخوارزميات

- **Linear Regression الإنحدار الخطي:** خوارزمية إحصائية تُستخدم لنمذجة العلاقة بين متغير تابع (مثل الإنتاج الزراعي) ومتغيرات مستقلة (مثل الأمطار والأسمدة). مثالية للتنبؤ بالنتائج العددية بناءً على مدخلات محددة.
- **Random Forest الغابة العشوائية:** خوارزمية تعتمد على مجموعة من أشجار القرار (Decision Trees) تعمل معاً لتقديم نتائج أكثر دقة واستقراراً. تُستخدم بكفاءة في تصنيف صحة النباتات والكشف عن الأمراض.
- **Support Vector Machines – SVM آلات الدعم الناقل:** خوارزمية قوية تُستخدم لفصل البيانات ضمن فئات مختلفة عبر إيجاد "الحد الفاصل الأمثل". فعّالة في تحليل الصور والتعرف على أنماط الآفات أو الأمراض النباتية.

- **Recurrent Neural Networks – RNN الشبكات العصبية العودية:** نوع من الشبكات العصبية مناسب لتحليل السلاسل الزمنية والبيانات المتتابعة، مثل رطوبة التربة أو التغيرات المناخية، حيث تأخذ في الحسبان الترتيب الزمني للبيانات.

- **XGBoost التعزيز التدرجي المتطرف:** خوارزمية قوية تعتمد على تقنية Boosting لتجميع نماذج بسيطة وتحويلها إلى نموذج قوي ومرن. تُستخدم بكفاءة عالية في التنبؤ بالإنتاج الزراعي، خصوصاً مع البيانات الكبيرة والمعقدة.

- **تطبيقات عملية في تنبؤ الإنتاجية**

  - **دراسة حالة من الأردن: القمح والبيانات المناخية**

باستخدام نماذج التعلم الآلي على بيانات تشمل الأمطار، درجات الحرارة، وممارسات الزراعة، طوّر المركز الوطني للبحوث الزراعية نموذجاً للتنبؤ بإنتاج القمح بدقة بلغت 87%. وقد ساعدت هذه النماذج على تحديد أفضل وقت للزراعة وتقليل اعتماد الفلاحين على الأسمدة (Abu Zanat *et al*., 2020).

  - **التنبؤ بإنتاج الزيتون في تونس**

اعتمدت دراسة على خوارزمية Random Forest لتحليل بيانات من 25 سنة حول الإنتاج السنوي للزيتون، وارتبطت النتائج بالعوامل المناخية والتدخلات البشرية. أثبت النموذج قدرة تنبؤية قوية ساعدت المزارعين على تحديد حجم المحصول قبل موسم الحصاد بأشهر (Ben Slimane *et al.*, 2022).

- **التنبؤ بالآفات والأمراض الزراعية**

يعد هذا من أكثر مجالات الذكاء الاصطناعي حيوية. من خلال دمج بيانات من الكاميرات، صور الأقمار الصناعية، وتقارير التربة والمناخ، يمكن للخوارزميات أن:

- تتنبأ بانتشار مرض مثل صدأ القمح استناداً إلى الرياح ودرجة الحرارة والرطوبة.
- تحذر المزارعين عبر التطبيقات كما هو الحال في منصة Plantix التي تُستخدم في عدة دول عربية لتحليل صور النباتات وتقديم تنبؤات بالإصابة.

- **خوارزميات التنبؤ في تحسين الجداول الزراعية**

يمكن للخوارزميات مساعدة المزارعين على التخطيط المسبق:

- اختيار **أنسب** موعد للزراعة استناداً إلى بيانات الطقس والتربة.
- تحديد الاحتياجات المائية اليومية والكمية المناسبة من السماد، عبر تحليل بيانات الحقل.

مثال: في المملكة العربية السعودية، استخدم مشروع تجريبي في منطقة القصيم نظاماً قائماً على خوارزمية XGBoost لتحديد توقيتات الري المثالية لمحصول الطماطم، مما خفض استهلاك المياه بنسبة 30% دون التأثير على الإنتاج (Almarshadi & Zubair, 2021).

- **تحديات استخدام الخوارزميات**

رغم تقدم هذه الأدوات، إلا أن هناك تحديات تشمل:

- الحاجة إلى بيانات عالية الجودة وتاريخية مستمرة.
- قلة التدريب الفني للمزارعين المحليين على استخدام هذه الأدوات.
- صعوبة تفسير نماذج الذكاء الاصطناعي المعقدة من قبل المستخدمين غير المختصين.

- **أدوات برمجية تدعم التنبؤ في الزراعة**

أصبح التنبؤ الزراعي المعتمد على البيانات والتقنيات الذكية أحد الركائز الأساسية للزراعة الحديثة، حيث تتيح الأدوات البرمجية المتقدمة تحليل كميات ضخمة من المعلومات الميدانية والبيئية بشكل سريع وفعّال. وتمكّن هذه الأدوات من تقديم توصيات دقيقة حول صحة النباتات، توقيت الحصاد، وإدارة الموارد، مما يدعم اتخاذ القرار وتحقيق أقصى استفادة من الموارد المتاحة. يوضح الجدول التالي مجموعة من أبرز هذه الأدوات ومجالات استخدامها في الزراعة الرقمية.

الأداة	نوع التحليل	مزاياها
Google Earth Engine	تحليل الصور الجوية	تحليل فوري وواسع النطاق
IBM Watson Decision Platform	التنبؤ بالمحاصيل	تقارير مبنية على AI وBig Data
Agremo	تحليل صور الطائرات بدون طيار	كشف الآفات وتقييم الصحة النباتية

اعداد وتنسيق المؤلفَين

تختلف هذه الأدوات من حيث نطاق الاستخدام، متطلبات البنية التحتية، ومستوى التخصص المطلوب.

- **Google Earth Engine** مثالي للمؤسسات البحثية والمزارع الواسعة، إذ يوفر تحليلاً جغرافياً واسع النطاق ويحتاج إلى معرفة بأساسيات البرمجة أو التحليل المكاني.
- **IBM Watson Decision Platform** يتميز بسهولة استخدامه ودمجه في أنظمة إدارة المزرعة، ويُعد مناسباً للجهات الحكومية أو الشركات الزراعية التي تبحث عن حلول مبنية على الذكاء الاصطناعي.
- **Agremo** موجه للمزارعين وشركات الطائرات بدون طيار، وهو فعال في تحليل صور الحقول وتقديم تقارير فورية عن حالة المحاصيل.

نصيحة:

عند اختيار الأداة المناسبة، يُفضل مراعاة ثلاثة عناصر:

- حجم المزرعة ونوع المحصول،
- توفر الإنترنت والبنية التقنية،
- مدى توفر الدعم الفني والتدريب على استخدام الأداة.

اختيار الأداة الصحيحة يمكن أن يحدث فرقاً كبيراً في زيادة الإنتاج وتقليل التكاليف الزراعية.

تُعد خوارزميات التنبؤ من أبرز التحولات في عالم الزراعة الرقمية، وتساهم بشكل مباشر في تقليل المخاطر وزيادة الكفاءة الزراعية. ومن خلال دعم الحكومات والمؤسسات البحثية، يمكن تعزيز استخدام هذه النماذج في الدول العربية لتحقيق أمن غذائي وتخطيط زراعي أكثر استدامة.

7. التكامل بين الذكاء الاصطناعي وسلاسل الإمداد الزراعية

تُعد سلاسل الإمداد الزراعية العمود الفقري لنقل المنتجات من المزرعة إلى المستهلك، وتشمل الإنتاج، المعالجة، النقل، التخزين، والتوزيع. ويؤدي الذكاء الاصطناعي (AI)دوراً متزايداً في تحسين كفاءة هذه السلاسل من خلال التنبؤ، الأتمتة، والرؤية الحاسوبية، مما ينعكس مباشرة على تقليل الفاقد وتحسين جودة المنتجات.

- **استخدامات الذكاء الاصطناعي في مراحل سلسلة الإمداد الزراعية**

التنبؤ بالطلب والإنتاج

يمكن للذكاء الاصطناعي تحليل بيانات الأسواق، الطقس، والمواسم لتقديم توقعات دقيقة حول الطلب المتوقع، مما يساعد المزارعين والموزعين على:

- تقليل الإنتاج الفائض أو النقص.

- جدولة مواعيد الحصاد والتوزيع.

مثال تطبيقي: استخدمت شركة CropsAI في مصر خوارزميات تنبؤية لتحليل الطلب المحلي على الخضراوات الورقية، مما ساعد في تحسين جدولة الشحن وتقليل الفاقد بنسبة 22% خلال عام 2022 (CropsAI, 2023).

- **تحسين اللوجستيات والتوزيع**

باستخدام تقنيات تعلم الآلة، يمكن تحليل بيانات الطرق، الطقس، والتخزين لتحديد أفضل المسارات، ما يقلل من الهدر الناتج عن التأخير أو ظروف النقل غير الملائمة.

دراسة حالة :في المملكة العربية السعودية، قامت إحدى التعاونيات الزراعية في منطقة حائل بتطبيق خوارزمية لتحسين توزيع التمور، باستخدام بيانات عن درجات الحرارة والمسافات بين الأسواق. النتيجة كانت تقليل وقت النقل بنسبة 18% وزيادة صلاحية المنتج في السوق (Alshammari *et al*., 2022).

- **مراقبة الجودة والفرز الآلي**

تُستخدم الرؤية الحاسوبية المدعومة بالذكاء الاصطناعي في فرز المحاصيل حسب الحجم، اللون، والشكل، مما:

- ✓ يقلل من الاعتماد على العمالة البشرية.
- ✓ يحسن من دقة التصنيف وجودة المنتج.

مثال :في تونس، استخدم مصنع تعليب الزيتون تقنية كاميرات مدعومة بالـ AIلفرز الثمار تلقائياً، مما زاد من سرعة الإنتاج بنسبة 30% وخفّض نسبة الخطأ في الفرز إلى أقل من 2% (Ben Amor *et al*., 2021).

➢ **إدارة المخزون الذكية**

تستخدم المنصات الذكية الذكاء الاصطناعي في تتبع المخزون وتحديد أوقات إعادة التعبئة المثلى، مما:

- ✓ يمنع التخزين الزائد أو الفجوات.
- ✓ يدعم عمليات الشحن المباشر للمستهلك (Direct-to-Consumer Models).

- **المنصات الذكية وسلاسل الإمداد**

منصات بارزة في العالم العربي:

تلعب المنصات الرقمية دوراً متنامياً في تحسين كفاءة سلاسل الإمداد الزراعي، من مرحلة الإنتاج وحتى الوصول إلى الأسواق. فهي تتيح التنبؤ بالإنتاج، وتتبع حركة المنتجات، وتحسين جودة الخدمات اللوجستية من خلال التحليل الذكي للبيانات. وفي العالم العربي، بدأت تظهر مبادرات ومنصات محلية تسعى إلى ربط المزارعين بالأسواق وتعزيز الشفافية والاستجابة في سلاسل التوريد. يوضح الجدول التالي بعضاً من أبرز هذه المنصات وأدوارها في دعم الزراعة الذكية.

المنصة	الدولة	الدور في سلاسل الإمداد
Agrimatic AI	مصر	دعم القرار، التنبؤ بالإنتاج، ربط المزارع بالأسواق
Nabta Platform	الإمارات	تتبع سلاسل التوريد، جودة المنتج، التوزيع الذكي
Sakia.io	المغرب	ربط بيانات الري بالجدولة اللوجستية والإنتاج

اعداد وتنسيق المؤلفَين

- **Agrimatic AI مصر:** تركز على استخدام الذكاء الاصطناعي لدعم قرارات المزارعين، من خلال نماذج تنبؤية لإنتاج المحاصيل، كما توفر أدوات لربط الإنتاج بالطلب في الأسواق المحلية والدولية.
- **Nabta Platform الإمارات:** تعتمد على تقنيات تتبع متقدمة تتيح مراقبة جودة المنتج الزراعي أثناء مراحل النقل والتخزين، وتدعم التوزيع الذكي بناءً على بيانات الأسواق والطلب الفوري.
- **Sakia.io المغرب:** تدمج بيانات الري والاستشعار عن بعد مع أدوات التخطيط اللوجستي، ما يساهم في تحسين توقيت الحصاد، وخفض الهدر في الموارد، وتنسيق عمليات التوزيع الزراعي.

- **التحديات أمام دمج الذكاء الاصطناعي في سلسلة الإمداد الزراعية**
  - قلة البيانات المنظمة من المزارع الصغيرة.
  - البنية التحتية الرقمية الضعيفة في بعض المناطق الريفية.
  - ضعف التمويل والمهارات التقنية لدى المنتجين.
  - التخوف من مشاركة البيانات بين أطراف سلسلة الإمداد.
- **فرص التحسين في الدول العربية**
  - إطلاق مراكز بيانات زراعية وطنية لجمع وتنظيم المعلومات.
  - تشجيع نماذج الأعمال التعاونية التي تشارك البيانات وتستفيد من التحليل الجماعي.
  - دعم ريادة الأعمال الزراعية التقنية عبر حاضنات الأعمال.

- **التوصيات**

لتحقيق تكامل فعّال بين الذكاء الاصطناعي وسلاسل الإمداد الزراعية، يُوصى بما يلي:

- تبني منصات مفتوحة المصدر لتحليل وتبادل بيانات سلسلة الإمداد.
- تدريب المزارعين والمصدرين على أدوات الذكاء الاصطناعي.
- تحفيز الشركات الناشئة لتطوير حلول محلية قائمة على البيانات.
- بناء شراكات بين القطاع العام والخاص لتطوير البنية التحتية وتحقيق التكامل الرقمي.

8. تحديات الخصوصية وحوكمة البيانات

مع تزايد اعتماد الزراعة الرقمية على البيانات الضخمة والمنصات السحابية، ظهرت تحديات جديدة تتعلق بالخصوصية، وملكية البيانات، وعدالة الوصول إلى التقنيات. فصغار المزارعين غالباً ما يواجهون صعوبات في حماية بياناتهم أو في التفاوض مع المنصات الكبرى التي تتحكم في تدفق وتحليل المعلومات. كما أن الفجوات الرقمية قد تؤدي إلى تفاقم التفاوت في الفرص بين المزارع الكبير والصغير. يعرض الجدول التالي أبرز هذه التحديات، وتأثيراتها، مع توصيات عملية للتعامل معها بطريقة تحافظ على العدالة والشفافية في استخدام البيانات الزراعية.

التحدّي	توصية الحل	التأثير
تجمّع البيانات لدى منصات كبرى	تشريعات وطنيّة لملكيّة البيانات وإتاحة واجهات API مفتوحة	قوة تفاوضية غير متكافئة مع صغار المزارعين
مخاطر إعادة التعرّف	تشفير على مستوى السجل وتطبيق Differential Privacy (Bronson & Knezevic, 2016)	كشف مواقع الحقول وأسعار التعاقد

تفاوت القدرات الرقمية	برامج تدريب ودعم مالي مخصّص للتحول الرقمي الريفي	فجوة بين المزارع الكبير والصغير

اعداد وتنسيق المؤلفَين

إن معالجة تحديات الخصوصية وحوكمة البيانات في القطاع الزراعي تتطلب إطاراً تنظيمياً شاملاً يوازن بين الابتكار الرقمي وحقوق المزارعين. فوجود سياسات وطنية واضحة بشأن ملكية البيانات، وشفافية استخدامها، وتوفير الدعم للمزارعين في المناطق الريفية، هو أمر أساسي لضمان أن يكون التحول الرقمي شاملاً وعادلاً. كما أن الاستثمار في البنية التحتية الرقمية، ورفع الوعي المجتمعي حول أهمية حماية البيانات، يمثلان حجر الأساس لزراعة مستقبلية مستدامة ومبنية على الثقة.

9. الخاتمة

يقدّم هذا الفصل مساراً واضحاً لاستخدام البيانات الضخمة والذكاء الاصطناعي في جميع نقاط سلسلة القيمة الزراعية، مع إيضاح الفرص والتحدّيات والحلول العملية للمزارعين، والباحثين، وصنّاع السياسات. إنّ دمج البيانات الضخمة والذكاء الاصطناعي عبر سلسلة القيمة – من التربة حتى المتجر – يُمكّن من زراعة تنبؤية تتكيّف مع المتغيرات المناخية وتقلّل الفاقد. لكن النجاح يتطلّب:

- بنية تحتية رقمية مفتوحة وعادلة.
- سياسات حوكمة تحمي البيانات وتضمن مشاركة المنافع.
- استثماراً في رأس المال البشري لردم فجوة المهارات الرقميّة.

10. المراجع

AgNext Technologies. (2023). *AI for Quality Assessment in Indian Agriculture*. https://www.agnext.com/

Alshammari, F., Alenezi, M., & Alotaibi, M. (2022). *Optimizing agricultural logistics using AI-based route planning in Saudi*

Arabia: A case of date distribution in Hail. Saudi Journal of Agricultural Sciences, 31(4), 215–223.

Ben Amor, A., Trabelsi, M., & Gharbi, N. (2021). *Machine vision system for olive fruit sorting in Tunisian food industry*. Journal of Food Engineering and Technology, 17(2), 88–96.

Blue River Technology. (2020). *See & Spray Technology Overview*. https://www.bluerivertechnology.com/

Bronson, K., & Knezevic, I. (2016). Big data in food and agriculture. Big Data & Society, 3(1). https://doi.org/10.1177/2053951716648174

CropsAI. (2023). *Market-demand-driven AI planning for smallholder vegetable farms in Egypt*. Internal White Paper. Cairo, Egypt: CropsAI.

FAO. (2021). *Digital agriculture and AI in value chains: Enhancing productivity and resilience*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb4479en

IBM Food Trust. (2020). *Improving food supply chains through blockchain and AI*. IBM White Paper.

Jones, J. W., *et al*. (2019). Toward a new generation of agricultural system data. Agricultural Systems, 155, 269-288.

Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70–90.

Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). A review on big data analysis in agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 143, 23-37.

Liakos, K. G., *et al*. (2018). Machine learning in agriculture: A review. Sensors, 18(8), 2674.

Mohanty, S. P., Hughes, D. P., & Salathé, M. (2016). Using Deep Learning for Image-Based Plant Disease Detection. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1419.

Regattieri, A., & Santarelli, G. (2020). Predictive models for agri-food supply chains. Journal of Food Engineering, 276, 109889.

Tian, F. (2020). An agri-food supply chain traceability system for China. International Journal of Information Management, 52, 1019-30.

Tzachor, A., Richards, C. E., & Holt, L. (2021). Climate-smart agriculture: A global perspective. Current Opinion in Environmental Sustainability, 47, 52-59.

Verdouw, C. N., Wolfert, S., & Beulens, A. (2021). Digital twins in agri-food logistics. Computers and Industrial Engineering, 150, 106891.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming – A review. Agricultural Systems, 153, 69-80.

World Bank. (2022). *Smart supply chains for smart agriculture: Leveraging AI and IoT technologies*. Agriculture Global Practice Discussion Paper. https://documents.worldbank.org

Zhang, Y., & Wang, N. (2020). *Artificial intelligence in agri-food supply chains: Review and outlook*. Computers and Electronics in Agriculture, 180, 105889.

Zhang, Y., Yang, J., Wang, Y., & Xu, H. (2021). Agricultural big data analytics and decision-making system. IEEE Access, 9, 55025-55035.

الفصل 19 - الزراعة الذكية والتحول الرقمي في قطاع الأغذية

المحتويات

1. المقدمة
2. العلاقة بين الزراعة الذكية وسلسلة الأغذية الرقمية
3. تقنيات الرقمنة في تخزين ونقل الأغذية
4. نظم التتبع والشفافية في سلسلة الإمداد الغذائي
5. دور التحول الرقمي في تحسين سلامة وجودة الأغذية
6. تأثير الرقمنة على المستهلكين والأسواق
7. تحديات وفرص التحول الرقمي في قطاع الأغذية
8. الخاتمة
9. المراجع

1. المقدمة

يشهد قطاع الأغذية في السنوات الأخيرة طفرة نوعية بفضل اعتماد التحول الرقمي والتقنيات الذكية، مما غيّر بعمق من طريقة تعاملنا مع الغذاء منذ لحظة زراعته حتى وصوله إلى مائدة المستهلك. لم يعد الإنتاج الزراعي مجرد نشاط تقليدي يعتمد على الخبرة الفردية، بل تحوّل إلى منظومة متكاملة يقودها الذكاء الاصطناعي، وتقنيات إنترنت الأشياء (IoT)، والتحليلات الضخمة، وأنظمة التتبع الذكية.

في هذا السياق، تُعتبر الزراعة الذكية إحدى الركائز الأساسية لهذا التحول، إذ تقوم على استخدام البيانات في الوقت الحقيقي لتحسين جميع مراحل الإنتاج والتخزين والنقل، وتساعد المزارعين والمؤسسات في اتخاذ قرارات مبنية على التحليل الدقيق، بدلاً من الاعتماد على الحدس فقط.

من خلال هذا التحول، أصبح من الممكن تعزيز الشفافية في سلاسل الإمداد الغذائي، ومراقبة جودة وسلامة الأغذية بدقة متناهية، والتقليل من الفاقد الغذائي الذي كان يشكل

عبئاً اقتصادياً وبيئياً كبيراً. هذه التغيّرات لا تسهم فقط في تحسين الكفاءة التشغيلية، بل تلعب دوراً محورياً في تعزيز الأمن الغذائي العالمي في ظل التحديات المتزايدة التي تواجهها النظم الغذائية حول العالم (Kumar *et al*., 2021).

يهدف هذا الفصل إلى استكشاف العلاقة الحيوية بين الزراعة الذكية والتحول الرقمي في سلسلة الأغذية، مع تسليط الضوء على أهم التقنيات المستخدمة، وتأثيرها في مختلف مراحل السلسلة الغذائية، بالإضافة إلى تحليل أبرز التحديات والفرص التي تصاحب هذا التحول.

2. العلاقة بين الزراعة الذكية وسلسلة الأغذية الرقمية

تشكل العلاقة بين الزراعة الذكية وسلسلة الأغذية الرقمية إطاراً ديناميكياً لتحديث منظومة الغذاء بشكل شامل. الزراعة الذكية ليست فقط عن أجهزة الاستشعار والطائرات بدون طيار، بل هي منظومة بيانات متكاملة تراقب وتُحلل حالة التربة، نمو المحاصيل، استخدام المياه، ومستويات السماد، وتنقل هذه البيانات إلى مراحل ما بعد الحصاد، أي التخزين والتوزيع والتسويق.

عندما تندمج هذه البيانات مع أنظمة سلاسل التوريد الرقمية، يتم إنشاء ما يُعرف بـ "السلسلة الغذائية الشفافة"، حيث يمكن تتبع كل منتج من المزرعة إلى المستهلك. هذه القدرة على التتبع اللحظي تعزز من ثقة المستهلكين، وتقلل من مخاطر التلوث الغذائي، وتدعم الاستجابة السريعة لأي خلل في النظام.

في هولندا، على سبيل المثال، يُعدّ النظام الزراعي من بين الأكثر تطوراً رقمياً على مستوى العالم. يتم استخدام بيانات المزرعة في الوقت الحقيقي لتنظيم عمليات الحصاد والتوزيع بدقة متناهية، ما يسمح بوصول المنتجات الطازجة إلى الأسواق في غضون ساعات، مع الالتزام الكامل بمعايير الجودة والسلامة (Wolfert *et al*., 2017).

وفي العالم العربي، تبرز الإمارات كمثال طليعي في هذا المجال من خلال مشروع "مدينة دبي للزراعة الذكية"، التي تستخدم مستشعرات رقمية وتقنيات الذكاء

الاصطناعي لمراقبة جودة المحاصيل ومراحل تداولها، مما يعكس توجه الدولة نحو تعزيز أمنها الغذائي بالاعتماد على التكنولوجيا المتقدمة.

3. تقنيات الرقمنة في تخزين ونقل الأغذية

تُعد مرحلة التخزين والنقل من أكثر المراحل حساسية في سلسلة الإمداد الغذائي، إذ إن أي خلل في إدارة هذه المرحلة قد يؤدي إلى تلف المنتجات أو تراجع جودتها، حتى لو كانت قد أُنتجت وفق أعلى المعايير. المنتجات الزراعية بطبيعتها سريعة التلف، وتحتاج إلى ظروف دقيقة من التبريد والرطوبة والتهوية، ما يجعل تقنيات الرقمنة ضرورة لا غنى عنها لضمان جودة واستدامة الغذاء.

لقد وفرت التكنولوجيا الحديثة أدوات ذكية تمكّن من مراقبة ومتابعة ظروف التخزين والنقل لحظة بلحظة، وهو ما يعرف بـ"سلسلة التبريد الذكية". في هذا الإطار، تبرز تجربة الولايات المتحدة كمثال رائد، حيث طورت شركات مثل "أمازون فريش" أنظمة تعتمد على أجهزة استشعار متصلة بالإنترنت، تُثبت داخل المستودعات والشاحنات، لقياس مؤشرات مثل درجة الحرارة، نسبة الرطوبة، وجودة الهواء. لا تكتفي هذه الأجهزة بجمع البيانات، بل تقوم بإرسالها في الزمن الحقيقي إلى خوارزميات تحليلية، تُجري مراجعة فورية للظروف، وتُصدر تنبيهات تلقائية في حال حدوث أي انحراف عن النطاق المثالي، ما يسمح بتعديل الإعدادات فوراً ومنع تدهور جودة المنتجات (Kamilaris *et al*., 2019).

وفي العالم العربي، بدأت دول عديدة في تبني هذا التوجه، من بينها المملكة العربية السعودية، التي أطلقت من خلال "الهيئة السعودية للبيانات والذكاء الاصطناعي (سدايا)" مشروعاً طموحاً لتطبيق تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) لمراقبة سلسلة التبريد الخاصة بالمنتجات الزراعية، ولا سيما الخضروات والفواكه التي تتطلب درجات حفظ دقيقة. يعمل هذا النظام عبر نشر حساسات رقمية داخل عربات النقل والثلاجات، ترتبط

بمنصة تحليل مركزية تُمكّن المنتجين والموزعين من مراقبة حالة المنتج في كل لحظة، والتفاعل مع أي تغيّر غير مرغوب فيه.

لقد أثبتت هذه المنظومات الذكية فعاليتها، حيث ساهمت في تقليل معدلات الفاقد الغذائي الناجم عن التخزين غير الملائم، ورفعت من كفاءة سلسلة الإمداد عبر تحسين جدولة التوزيع وتقليل وقت النقل. كما انعكس ذلك إيجابياً على ثقة الأسواق المحلية والدولية بالمنتج السعودي، إذ أصبحت الشحنات الزراعية تصل بجودة عالية، وتُحافظ على طزاجتها حتى في فترات النقل الطويلة.

هذا التحول نحو الرقمنة في التخزين والنقل لا يقتصر على تحسين الكفاءة التشغيلية فحسب، بل يعكس أيضاً تطوراً في فلسفة إدارة الغذاء الحديثة، التي لم تعد تكتفي بالإنتاج الجيد، بل تسعى للحفاظ على الجودة حتى آخر لحظة قبل الاستهلاك.

4. نظم التتبع والشفافية في سلسلة الإمداد الغذائي

في عالمٍ بات فيه المستهلك أكثر وعياً واهتماماً بمصدر غذائه، أصبحت تقنيات التتبع والشفافية في سلسلة الإمداد الغذائي ضرورة ملحّة، وليس مجرد رفاهية تقنية. ومن أبرز هذه التقنيات، تبرز تقنية "البلوك تشين" كأداة ثورية لإحداث نقلة نوعية في تتبع المنتجات الغذائية.

تُتيح البلوك تشين تسجيل كل خطوة يمر بها المنتج الغذائي – من المزرعة، إلى التخزين، إلى النقل، ثم المعالجة، فالتوزيع – في سجل رقمي غير قابل للتعديل. هذه الشفافية الكاملة لا تضمن فقط سلامة الغذاء، بل تبني ثقة عميقة بين المنتج والمستهلك.

في الصين، أُطلقت مبادرات متقدمة من قبل شركات مثل "IBM Food Trust"، حيث تُستخدم البلوك تشين لتتبع المنتجات البحرية. يستطيع المستهلك، عبر مسح رمزQR ، أن يعرف أصل الأسماك، موقع صيدها، ونتائج اختبارات السلامة، وكل ذلك في ثوانٍ معدودة (Tian, 2017).

أما في المنطقة العربية، فقد بدأت بعض المبادرات الواعدة تأخذ شكلها الفعلي. ففي مصر، انطلق مشروع يهدف إلى تطبيق البلوك تشين في تتبع توريد الخضروات والفواكه، خصوصاً في الأسواق الكبرى، وذلك بهدف محاربة الغش التجاري وتحسين جودة وسلامة المنتجات التي تصل إلى المستهلك المحلي، في ظل تزايد التحديات المرتبطة بالتخزين والتوزيع.

5. دور التحول الرقمي في تحسين سلامة وجودة الأغذية

تُمثل سلامة الغذاء وجودته حجر الأساس لأي نظام غذائي ناجح، فهي ليست مجرد متطلب تنظيمي، بل حق أساسي للمستهلك، وشرط جوهري لاستدامة الثقة في سلاسل الإمداد الغذائي. وفي ظل التحولات العالمية المتسارعة، لم يعد من الممكن الاعتماد فقط على الفحوص التقليدية التي غالباً ما تكون تفاعلية، أي لا تتم إلا بعد اكتشاف المشكلة أو ظهور أعراض التلوث. هنا يظهر الدور الحاسم للتحول الرقمي، الذي نقل هذا المجال من الرصد المتأخر إلى التنبؤ الوقائي.

أحد أبرز التحولات التقنية في هذا السياق هو استخدام الذكاء الاصطناعي (AI) وتحليلات البيانات التنبؤية، التي تعتمد على معالجة كميات ضخمة من البيانات المتعلقة بسلسلة الإنتاج، لتحديد الأنماط الشاذة والتنبؤ بأي خلل محتمل قبل أن يُحدث تأثيراً فعلياً. هذه القدرة التنبؤية تُعد طفرة في مجال سلامة الغذاء، حيث تقلل بشكل كبير من مخاطر التلوث، وتُسرّع من الاستجابة في حال وقوع مشكلة.

في **كندا**، طورت شركات متخصصة في قطاع الألبان نظماً تعتمد على الذكاء الاصطناعي لرصد علامات التلوث البكتيري أو الكيمياوي في الحليب ومشتقاته. تُستخدم أجهزة تحليل دقيقة في خطوط الإنتاج لجمع البيانات المتعلقة بدرجات الحرارة، والحموضة، والكثافة، وغيرها من المؤشرات، ثم تُرسل هذه البيانات إلى أنظمة متقدمة تقوم بتحليلها في الزمن الحقيقي. إذا اكتشف النظام أي مؤشر محتمل للتلوث، يتم إرسال تنبيه فوري للموظفين لإيقاف خط الإنتاج أو اتخاذ إجراء تصحيحي. هذه التكنولوجيا

خفّضت بشكل ملحوظ معدلات التسمم الغذائي المرتبط بمنتجات الألبان، ورفعت من ثقة المستهلك في المنتجات المحلية، بما يعزز من مكانة الصناعة الكندية في الأسواق المحلية والدولية(Kamilaris *et al*., 2017) .

أما في **الأردن،** فقد بدأت بعض المنشآت الغذائية – خصوصاً في قطاع الصناعات الغذائية المتوسطة والكبيرة – في تبني أنظمة مراقبة رقمية ترتبط مباشرة بأجهزة استشعار وقياس دقيقة في خطوط الإنتاج. تعمل هذه الأنظمة على مراقبة كل من المواد الخام والمراحل التصنيعية، مثل الخلط، الطهي، التبريد، والتعبئة، وتُخزن البيانات في قواعد بيانات سحابية تحللها خوارزميات ذكية تبحث عن أي خلل في الزمن الحقيقي.

ميزة هذه المنظومات ليست فقط في قدرتها على الرصد المستمر، بل أيضاً في أنها تقدم تقارير دورية يمكن استخدامها لتحسين الجودة على المدى الطويل، وتقليل التكاليف المرتبطة بإعادة الإنتاج أو التخلص من المنتجات التالفة. علاوة على ذلك، تسهّل هذه البيانات عمليات الامتثال للمعايير الدولية، مثل نظام HACCP أو ISO 22000 ، ما يعزز من فرص تصدير المنتجات الأردنية إلى أسواق خارجية ذات متطلبات عالية.

بفضل هذه التطورات، أصبح من الممكن تصور منظومة غذائية أكثر ذكاءً وتجاوباً، تتحول فيها جودة الغذاء من مجرد نتيجة نهائية، إلى مسار متكامل يخضع للرصد المستمر والتعديل الوقائي، بما يحمي المستهلك ويعزز من تنافسية المنتج العربي والعالمي على حدٍّ سواء.

في إطار التوجه الإقليمي نحو رقمنة مراقبة الأغذية، بدأت **المملكة العربية السعودية** بتطبيق حلول رقمية متكاملة في المنشآت الغذائية الكبرى، خاصة تلك المرتبطة بسلاسل الفنادق والمطاعم وشركات التجزئة. على سبيل المثال، تعتمد العديد من المصانع والمراكز اللوجستية على أنظمة تحليل بيانات لحظية تقوم بمراقبة جودة المواد الخام، ومؤشرات التصنيع والتعبئة والتخزين. هذه الأنظمة ترتبط مباشرة بمنصات مركزية مثل "نظام سلامة الغذاء الوطني"، وتوفر تقارير فورية للجهات الرقابية. وكنتيجة لذلك،

أصبح بالإمكان إجراء تفتيش رقمي استباقي، مما يقلل الحاجة للتدخل بعد وقوع المخاطر، ويُعزز مستوى الوقاية وجودة الرقابة بشكل عام.

أما في **العراق**، فقد بدأت بعض المؤسسات الأكاديمية، بالتعاون مع وزارات مثل وزارة الزراعة ووزارة الصحة والبيئة، في إطلاق مشاريع بحثية وتجريبية تهدف إلى استخدام تقنيات التحسس عن بعد وإنترنت الأشياء في مراقبة سلسلة الغذاء، خاصة في مجالات إنتاج الألبان والخضروات. في محافظة نينوى، على سبيل المثال، أُطلقت مبادرة تجريبية بالتعاون مع جامعة الموصل عام 2022 لتطبيق نظام استشعار ذكي في مزارع الأبقار لرصد جودة الحليب منذ إنتاجه وحتى تخزينه، باستخدام أجهزة قياس للحرارة والوسط الميكروبي في الخزانات.

كما تم في بغداد، بالتعاون مع منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة (FAO)، تنفيذ مشروع رقمي لمراقبة جودة الخضروات في أسواق الجملة، يشمل استخدام تطبيقات محمولة بسيطة تُستخدم من قبل مفتشي الأغذية لتسجيل درجات الحرارة والرطوبة ومؤشرات التلف، مما يساعد في بناء قاعدة بيانات يمكن من خلالها اتخاذ قرارات سريعة لضبط الجودة ومكافحة التلوث الغذائي.

ورغم محدودية الموارد الرقمية واللوجستية، فإن هذه المبادرات تمثل بذوراً واعدة لتحول رقمي أوسع في العراق، خصوصاً مع تزايد الاهتمام من القطاعين الحكومي والدولي بتعزيز سلامة الغذاء كجزء من استراتيجية الأمن الغذائي المستقبلي.

تُظهر التجارب الدولية والإقليمية أن التحول الرقمي في مراقبة جودة الأغذية لم يعد حكراً على الدول المتقدمة، بل أصبح مساراً تتبعه دول عديدة وفقاً لإمكاناتها واحتياجاتها. وفيما تختلف الأدوات والمنهجيات بين دولة وأخرى، فإن القاسم المشترك هو الاعتماد المتزايد على تقنيات الذكاء الاصطناعي، إنترنت الأشياء، وتحليل البيانات في تعزيز سلامة الغذاء والوقاية من التلوث. يُوضح الجدول التالي مقارنة بين عدد من الدول التي

قطعت خطوات مهمة في هذا المجال، بما في ذلك دول عربية مثل العراق والأردن والسعودية، إلى جانب تجربة كندا كمثال عالمي متقدم.

جدول مقارنة بين تجارب الدول في التحول الرقمي لمراقبة جودة الأغذية

الدولة	التقنيات المستخدمة	مجال التطبيق	التحديات الحالية	أبرز النتائج المحققة
كندا	الذكاء الاصطناعي، تحليلات تنبؤية، حساسات دقيقة	A. منتجات الألبان	ارتفاع تكاليف التقنيات المتقدمة	الكشف المبكر عن التلوث، تقليل التسمم الغذائي، رفع ثقة المستهلك
الأردن	نظم مراقبة رقمية، استشعار لحظي، قواعد بيانات	B. الصناعات الغذائية (الألبان، اللحوم، التعبئة)	الحاجة إلى تدريب الكوادر وتحديث البنية التحتية	مراقبة مستمرة للجودة، تحسين الامتثال للمعايير الدولية
السعودية	إنترنت الأشياء، منصات تحليل وطني، ربط شبكي	C. منشآت التصنيع والتبريد، المطاعم والأسواق	التوسع في الرقمنة خارج المدن الكبرى	تقليل الفاقد، تسريع الرقابة، تعزيز ثقة السوق المحلي والدولي
العراق	استشعار ذكي، تطبيقات ميدانية، شراكات بحثية	D. مزارع الألبان، أسواق الجملة للخضروات	ضعف البنية التحتية الرقمية، محدودية التمويل	تحسين الرصد الأولي، بناء قواعد بيانات تجريبية

اعداد وتنسيق المؤلفَين

6. تأثير الرقمنة على المستهلكين والأسواق

أحدثت الرقمنة تغيّراً جذرياً في علاقة المستهلك بالغذاء، حيث لم يعد يعتمد فقط على السعر أو الشكل الخارجي للمنتج، بل بات يبحث عن معلومات موثوقة حول منشأه، طريقة إنتاجه، ودرجة استدامته.

في بلدان مثل فرنسا وألمانيا، انتشرت تطبيقات الهواتف الذكية التي توفر للمستهلك تفاصيل دقيقة عن كل منتج غذائي عبر رمز QR أو تقنية NFC، مما يتيح له اتخاذ قرار شراء مدروس بناءً على معايير الجودة، الصحة، والبيئة (Carolan, 2020). أصبحت هذه التطبيقات جزءاً من الحياة اليومية، خصوصاً بين الأجيال الشابة التي تسعى لتبني أسلوب حياة أكثر وعياً واستدامة.

وفي دول الخليج، يشهد المشهد الغذائي تطوراً متسارعاً في هذا الاتجاه. فقد بدأت شركات ناشئة في الإمارات وقطر بتطوير منصات إلكترونية متقدمة تسمح للمستهلكين بتقديم طلبات مخصصة من المنتجات العضوية أو المحلية، والتواصل مباشرة مع المزارعين. هذه المنصات تعزز مفهوم "من المزرعة إلى المائدة"، وتُعيد بناء جسور الثقة بين المنتج والمستهلك، مع التركيز على الطزاجة، الجودة، والاستدامة.

7. تحديات وفرص التحول الرقمي في قطاع الأغذية

رغم كل الفوائد التي تقدمها الرقمنة، إلا أن الطريق نحو اعتمادها الكامل في قطاع الأغذية، خاصة في الدول النامية، لا يخلو من تحديات حقيقية. أحد أبرز هذه التحديات يتمثل في ضعف البنية التحتية الرقمية، مثل ضعف التغطية بشبكات الإنترنت في المناطق الزراعية، أو محدودية الوصول إلى الأجهزة الذكية لدى المزارعين الصغار.

بالإضافة إلى ذلك، تمثل التكلفة العالية لتبني التقنيات الرقمية المتقدمة عائقاً كبيراً، خصوصاً في ظل غياب آليات تمويل مبتكرة أو دعم حكومي كافٍ في بعض البلدان. كما تُعد قلة الوعي بالتحول الرقمي، وضعف المهارات الرقمية لدى العاملين في المجال الغذائي والزراعي، من العقبات التي تحد من الانتشار الواسع لهذه التقنيات (Kamilaris *et al*., 2019).

ومع ذلك، فإن الفرص المتاحة أكبر من التحديات. فالرقمنة تفتح آفاقاً واسعة لتعزيز كفاءة الإنتاج، وتخفيض الفاقد، وتحقيق الشفافية، وهو ما يساهم في بناء نظم غذائية أكثر مرونة واستدامة. في هذا الإطار، تُعد الإمارات والسعودية من أبرز الدول التي أدركت

أهمية هذا التحول، حيث أطلقت برامج وطنية متكاملة لدعم التحول الرقمي في القطاعين الزراعي والغذائي، من خلال حاضنات أعمال، وتمويل الابتكار، وتطوير البنية التحتية الرقمية.

8. الخاتمة

يمثل التحول الرقمي في قطاع الأغذية نقطة تحول حاسمة في مستقبل الأمن الغذائي العالمي، وهو ليس مجرد اتجاه تقني، بل تحوّل في الرؤية والمنهج. فالزراعة الذكية وتقنيات الرقمنة باتت تشكلان قلب منظومة إنتاج غذائي متكاملة، تتميز بالشفافية، والكفاءة، والاستدامة.

ومع تزايد التحديات التي تواجه الأمن الغذائي، سواء بسبب التغيرات المناخية أو الأزمات الاقتصادية أو نمو الطلب السكاني، فإن دمج التكنولوجيا الرقمية في سلاسل الإمداد الغذائية لم يعد خياراً، بل ضرورة.

غير أن نجاح هذا التحول يعتمد بشكل كبير على الاستثمار في البنية التحتية الرقمية، وتدريب الكفاءات، وتعزيز التعاون بين الحكومات والقطاع الخاص. فالمستقبل الزراعي والغذائي المستدام لن يتحقق بالتقنيات وحدها، بل برؤية متكاملة تضع الإنسان والبيئة في قلب كل عملية رقمية.

9. المراجع

Carolan, M. (2020). *Food and the digital revolution: The future of food systems*. Routledge.

Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2019). A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 23-37.

Kumar, P., Poonia, R., & Kumar, V. (2021). Role of digital technologies in food supply chain management. *Journal of Food Science and Technology*, 58(6), 2253-2263.

Tian, F. (2017). A supply chain traceability system for food safety based on HACCP, blockchain & Internet of Things. *2017 International Conference on Service Systems and Service Management*, 1-6.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153,

الفصل 20 - البنية التحتية الرقمية المطلوبة للزراعة الذكية

المحتويات

1. المقدمة
2. مكونات البنية التحتية الرقمية في الزراعة
3. شبكات الاتصال وإنترنت الأشياء في المزارع
4. الحوسبة السحابية وتخزين البيانات الزراعية
5. البرمجيات والتطبيقات المخصصة للزراعة الذكية
6. تحديات بناء البنية التحتية في المناطق الريفية
7. مقترحات تطوير البنية التحتية لدعم الزراعة الذكية
8. الخاتمة

1. المقدمة

تشهد الزراعة اليوم تحولاً غير مسبوق نحو الرقمنة، حيث أصبح النجاح في هذا القطاع يعتمد بشكل أساسي على بنية تحتية رقمية متينة تدعم إدماج التقنيات الذكية. هذه البنية ليست مجرد رفاهية تقنية، بل ضرورة استراتيجية تُمكّن من رصد التغيرات البيئية، تحسين استهلاك الموارد، وتحقيق إنتاجية أعلى بأقل التكاليف البيئية. وفي هذا السياق، تُعد الحساسات الذكية، والطائرات بدون طيار (الدرونز)، وإنترنت الأشياء، والحوسبة السحابية من الركائز الأساسية التي لا يمكن تشغيلها أو تحقيق جدواها دون توفر بيئة رقمية مهيأة ومتينة.

تتطلب الزراعة الذكية تكاملاً بين مكونات تكنولوجية مختلفة – من أجهزة ميدانية إلى برمجيات تحليلية – تشترك جميعها في الاعتماد على شبكات اتصال فعّالة، نظم تخزين مرنة، وتطبيقات ذكية تُسهم في اتخاذ القرار بشكل لحظي. لكن هذا التحول الرقمي لا يمكن أن يتحقق بمعزل عن البنية التحتية، التي تُعد الأرضية التي تُبنى عليها كل عمليات الزراعة الحديثة.

2. مكونات البنية التحتية الرقمية في الزراعة

تتكوّن البنية التحتية الرقمية في الزراعة الذكية من مجموعة مترابطة من المكونات التكنولوجية والفنية التي يجب توافرها لضمان عمل النظام بكفاءة. وأبرز هذه المكونات:

- **شبكات الاتصال:**

تُعتبر العمود الفقري للزراعة الذكية. فبدون اتصال موثوق وسريع، تفقد التقنيات الذكية فاعليتها. تعتمد المزارع الحديثة على شبكات 4G و 5G لتوفير سرعة البيانات المطلوبة، بينما تُستخدم الأقمار الصناعية والاتصالات بعيدة المدى (LPWAN)، مثل LoRaWAN و NB-IoTفي المناطق النائية. في بعض الدول، تم إنشاء أبراج اتصال مخصصة للمزارع الذكية لتوفير تغطية أفضل، كما هو الحال في مشاريع الزراعة الرقمية في الهند وهولندا.

- **الأجهزة الاستشعارية (الحساسات):**

تشمل أنواعاً متعددة مثل:

  - **حساسات التربة**: تقيس الرطوبة، درجة الحرارة، ودرجة الحموضة.
  - **حساسات الطقس**: تسجل درجة الحرارة، سرعة الرياح، وكمية الأمطار.
  - **حساسات جودة الهواء والمياه**: تُستخدم خاصة في الزراعة العضوية أو مناطق الري المكثف.

هذه الحساسات توضع داخل الحقول أو على أنظمة الري وتُرسل بياناتها تلقائياً إلى قاعدة مركزية للتحليل.

- **الحوسبة السحابية:**

تسمح للمزارعين ومديري الحقول بتخزين كميات هائلة من البيانات على خوادم آمنة، وتحليلها باستخدام أدوات ذكاء اصطناعي. من خلال السحابة، يمكن للمزارع

الوصول إلى تقارير الأداء، صور الأقمار الصناعية، وتوصيات مخصصة بناءً على بياناته، من أي مكان، وفي أي وقت، باستخدام جهاز محمول فقط.

- **البرمجيات والتطبيقات:**

تشمل نظم إدارة المزرعة (Farm Management Systems) وتطبيقات التنبؤ بالمحصول أو الطقس، بالإضافة إلى تطبيقات الهواتف الذكية التي تتيح للمزارع التحكم في أنظمة الري والإضاءة، واستقبال تنبيهات فورية عن الأمراض أو الأعشاب الضارة. كثير من هذه التطبيقات تعتمد على واجهات رسومية سهلة الاستخدام ولا تتطلب خبرة تقنية متقدمة، مما يجعلها مناسبة أيضاً للمزارعين في المناطق الريفية.

- **الأمن السيبراني:**

مع ازدياد الاعتماد على البيانات، أصبحت حماية هذه البيانات أولوية قصوى. تشمل تدابير الأمن السيبراني تشفير البيانات، أنظمة الجدران النارية، ومراقبة الهجمات الإلكترونية. أي اختراق لمنظومة البيانات قد يؤدي إلى تعطيل شبكات الري، تلاعب في بيانات المحاصيل، أو حتى خسائر مالية فادحة. لذلك، باتت الزراعة الحديثة تعتمد على خبراء أمن معلومات إلى جانب المهندسين الزراعيين.

3. شبكات الاتصال وإنترنت الأشياء في المزارع

تُعد شبكات الاتصال العمود الفقري لأي منظومة تعتمد على إنترنت الأشياء (IoT) في الزراعة، حيث إنها تمكّن من تبادل البيانات بين الحقول، الأجهزة، والمنصات التحليلية في الزمن الحقيقي. بدون وجود شبكة اتصال موثوقة، لا يمكن لأجهزة الاستشعار، أو الطائرات بدون طيار، أو أنظمة الري الذكي أن تعمل بفعالية.

مع تطور شبكات الجيل الخامس (5G)، أصبح بالإمكان ربط آلاف الأجهزة داخل المزرعة، مع ضمان زمن استجابة منخفض جداً – وهو أمر بالغ الأهمية للعمليات التي تحتاج إلى تحكم آني، مثل فتح صمامات الري أو تشغيل أنظمة الرش التلقائي.

في **هولندا**، وهي من الدول الرائدة في تطبيق الزراعة الدقيقة، تُستخدم شبكات G5 في المزارع الذكية لمراقبة حالة التربة والمحاصيل بدقة بالغة. حيث تُمكّن هذه الشبكات من استقبال بيانات الحساسات المتوزعة عبر الحقول، وتحليلها فوراً لاتخاذ قرارات مثل تشغيل الري أو تعديل مواعيد التسميد، مما يحسن استخدام الموارد ويقلل الهدر (Patel *et al.*, 2020).

أما في **الإمارات العربية المتحدة**، فقد أطلقت هيئة تنظيم الاتصالات والحكومة الرقمية مشروعاً شاملاً لربط المزارع بأنظمة ذكية عبر شبكات اتصال موسعة تغطي حتى المناطق الصحراوية النائية. ويهدف هذا المشروع إلى تمكين المزارعين من مراقبة الأحوال المناخية والتربة من خلال لوحات تحكم رقمية، بما يعزز من القدرة على إدارة الإنتاج في ظروف بيئية صعبة (TRA UAE, 2022). هذا النوع من المبادرات يعكس توجهاً استراتيجياً لدعم الأمن الغذائي عبر التكنولوجيا.

4. الحوسبة السحابية وتخزين البيانات الزراعية

مع تزايد حجم البيانات الناتجة عن الحقول الذكية – سواء من الحساسات، الكاميرات، الأقمار الصناعية، أو الطائرات بدون طيار – ظهرت الحاجة المُلِحة إلى وسائل تخزين وتحليل قادرة على التعامل مع هذه الكميات الهائلة من المعلومات. هنا تأتي الحوسبة السحابية كأحد الأعمدة الرئيسة للزراعة الذكية.

تتيح الحوسبة السحابية للمزارعين والشركات الزراعية **تخزين البيانات بأمان**، والوصول إليها من أي مكان باستخدام الإنترنت. كما توفر إمكانيات ضخمة لتحليل البيانات باستخدام أدوات ذكاء اصطناعي وتعلم آلي، دون الحاجة إلى بنية تحتية محلية معقدة أو مكلفة.

شركات كبرى مثل Microsoft Azure و Amazon Web Services (AWS) قدمت منصات مخصصة للزراعة، تُمكّن المستخدمين من تحليل بيانات الطقس، حالة

التربة، ومؤشرات النمو، ما يسمح بالتنبؤ بمشكلات مثل نقص المياه أو الإصابة بالآفات قبل حدوثها فعلياً (Liakos *et al*., 2018).

في **المغرب**، تُعد تجربة رائدة في هذا المجال. فقد تعاونت وزارة الفلاحة مع منظمات دولية مثل FAO وشركات تقنية محلية لتطوير منصة سحابية مفتوحة المصدر، تجمع بيانات الطقس والتربة وتقدم توصيات مخصصة للمزارعين، خصوصاً الصغار منهم، حول توقيتات الزراعة والري والتسميد (FAO, 2020). وقد ساعدت هذه المنصة في تحسين جودة المحاصيل، وتقليل تكاليف الإنتاج في المناطق القروية.

5. البرمجيات والتطبيقات المخصصة للزراعة الذكية

أصبحت التطبيقات الذكية جزءاً لا يتجزأ من الحياة اليومية للمزارع العصري، حيث توفر له أدوات بسيطة وقوية لإدارة كل تفاصيل المزرعة من خلال هاتفه الذكي أو حاسوبه اللوحي. هذه التطبيقات تتنوع من حيث الوظائف والتعقيد، وتخدم فئات مختلفة من المستخدمين، من المزارع الفردي إلى الشركات الكبرى.

أهم أنواع البرمجيات والتطبيقات المستخدمة:

- **تطبيقات إدارة المزارع**: تساعد على تنظيم العمليات اليومية، مثل تطبيق "AgriApp" في **الهند**، الذي يوفر للمزارعين جداول رش وتسميد حسب المحصول والطقس، إلى جانب معلومات عن أسعار السوق ودعم تقني مباشر (Kumar *et al*., 2019).
- **نظم دعم القرار الزراعي (DSS)**: تقوم على تحليل البيانات القادمة من الحقل وتقديم توصيات محددة، مثل كمية الري المثلى، أو أفضل موعد لزراعة صنف معين. وتُستخدم بشكل واسع في الزراعة التعاقدية والبيوت المحمية.
- **التطبيقات العربية المتخصصة**: من أبرزها تطبيق "زرعتي" في **السعودية**، الذي طورته وزارة البيئة والمياه والزراعة. يقدم هذا التطبيق توصيات مبنية على تحليل

بيانات التربة والمناخ المحلي، ويساعد المزارعين في تخطيط مواسم الزراعة، وإدارة شبكات الري، والاطلاع على أسعار المدخلات الزراعية.

هذه البرمجيات لا تسهل فقط العمل اليومي، بل تُساهم في رفع كفاءة الإنتاج، تحسين جودة المحاصيل، وتقليل الكلفة التشغيلية. ومع دعم حكومي أو تعاوني مناسب، يمكن أن تُحدث هذه التطبيقات قفزة نوعية لدى صغار المزارعين في الدول النامية.

6. تحديات بناء البنية التحتية في المناطق الريفية

رغم التقدم الكبير في مجال الزراعة الذكية، لا تزال المناطق الريفية والنائية تمثل الحلقة الأضعف في منظومة التحول الرقمي الزراعي. فبينما تعتمد الزراعة الذكية على الاتصال اللحظي بين الحقول والمنصات الرقمية، تعاني هذه المناطق من نقص كبير في الموارد التحتية والتقنية.

من أبرز التحديات:

- **ضعف شبكات الاتصال والإنترنت**: تشكو معظم القرى والمزارع النائية من تغطية محدودة أو غير مستقرة للإنترنت، وخاصة في مناطق البادية والجبال. هذا الضعف يؤدي إلى انقطاع البيانات أو تأخير وصولها، مما يقلل فعالية الأنظمة الذكية التي تتطلب تواصلاً لحظياً (World Bank, 2020).
- **ارتفاع التكاليف التشغيلية**: تركيب حساسات ذكية، أجهزة مراقبة مناخية، أو أنظمة اتصالات ميدانية يحتاج إلى استثمارات أولية مرتفعة، لا يستطيع معظم صغار المزارعين تحملها دون دعم مالي أو تقني.
- **نقص الكوادر البشرية المؤهلة**: في كثير من المناطق الريفية، لا يتوفر عدد كافٍ من المهندسين الزراعيين أو الفنيين المختصين بتشغيل وصيانة الأنظمة الرقمية، مما يعيق الاستفادة منها حتى إن توفرت.

- **ضعف التمويل والدعم الحكومي**: غالباً ما تكون الموازنات المخصصة للرقمنة الزراعية في الخطط الوطنية محدودة، أو تتركّز في المدن الكبرى، دون وصول فعّال إلى القرى والمزارع الصغيرة.

على سبيل المثال، في **مصر**، يُعد ضعف البنية الرقمية في بعض المحافظات الريفية من أبرز المعوقات التي تواجه تنفيذ مبادرات الزراعة الذكية. وقد أشارت تقارير منظمة الأغذية والزراعة (FAO Egypt, 2019) إلى أن محدودية الاتصال بالإنترنت وغياب التدريب المناسب أديا إلى فجوة رقمية متزايدة بين المزارعين.

7. مقترحات تطوير البنية التحتية لدعم الزراعة الذكية

لتجاوز هذه التحديات وتحقيق عدالة رقمية بين المناطق الريفية والحضرية، يجب تبني حلول منهجية وعملية تجمع بين الدعم الحكومي، المبادرات الخاصة، والشراكات البحثية. من أبرز المقترحات:

- **توسيع تغطية شبكات الاتصال الحديثة**: يجب أن تشمل خطط تطوير البنية التحتية توسيع شبكات الجيل الخامس (5G)، واستخدام تقنيات الإنترنت الفضائي (مثل ستارلينك)، لتوفير اتصال دائم حتى في أكثر المناطق عزلة.
- **تصميم برامج تدريب محلية**: ينبغي إنشاء مراكز إرشاد زراعي رقمي في القرى، تقدم دورات عملية للمزارعين والفنيين حول كيفية استخدام وصيانة الأجهزة الرقمية، مع التركيز على التطبيقات العملية للهواتف الذكية والحساسات.
- **تحفيز الاستثمار في البنية التحتية الذكية**: يمكن للحكومات تقديم حوافز ضريبية أو منح تمويلية للشركات التي تستثمر في البنية الرقمية الزراعية، مثل مراكز البيانات، معامل الزراعة الذكية، أو تصنيع الحساسات محلياً.
- **تعزيز الشراكات بين القطاعين العام والخاص**: يمكن التعاون مع شركات الاتصالات، الجامعات، وشركات التكنولوجيا لتأسيس مشروعات رائدة. على سبيل

المثال، مشروع مركز الابتكار الزراعي في السعودية والإمارات نجح في تقديم نماذج تطبيقية للزراعة الرقمية في البيئات الصحراوية، من خلال ربط البحوث العلمية باحتياجات المزارعين الواقعية.

8. المراجع

FAO. (2020). *Leveraging digital technologies for agriculture*. Food and Agriculture Organization. https://www.fao.org/3/ ca8303en/ CA8303EN.pdf

FAO Egypt. (2019). *Digital transformation in Egyptian agriculture*. Food and Agriculture Organization.

Kumar, S., Singh, R., & Gupta, P. (2019). Mobile-based agricultural applications for smart farming: A review. *International Journal of Agricultural Management*, 8(3), 125-132.

Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674.

Patel, K., Shukla, S., & Kumar, N. (2020). Role of 5G in smart agriculture. *Journal of Wireless Networking*, 14(4), 45-52.

TRA UAE. (2022). *UAE Telecommunications Regulatory Authority Annual Report*.

World Bank. (2020). *Digital infrastructure and rural development*. The World Bank Group. https://www.worldbank.org/ en/topic/digitaldevelopment

Zhou, Z., Xu, X., & Li, J. (2019). Secure data management and analytics for smart agriculture. *IEEE Access*, 7, 152040-152051.

الفصل 21 - المنصات الرقمية والخدمات الذكية للمزارعين

المحتويات

1. المقدمة
2. أنواع المنصات الرقمية (تجارية، تعليمية، إرشادية)
3. تطبيقات الهواتف الذكية في دعم الإنتاج الزراعي
4. التجارة الإلكترونية الزراعية
5. النظم الإرشادية الرقمية والواقع المعزز
6. قصص نجاح لمزارعين استخدموا المنصات الرقمية
7. التحديات المتعلقة بتبني المنصات
8. الخاتمة
9. المراجع

1. المقدمة

شهد العالم خلال العقود الأخيرة ثورة تكنولوجية غيرت ملامح القطاعات الإنتاجية كافة، ولم يكن القطاع الزراعي استثناءً من هذا التحول. ففي ظل تحديات متزايدة مثل تغير المناخ، وشح المياه، وارتفاع تكاليف الإنتاج، بات من الضروري البحث عن حلول مبتكرة تعزز كفاءة الزراعة وتحسّن استدامتها. وهنا تبرز المنصات الرقمية كأحد أبرز أدوات هذا التحول، حيث تشكل اليوم حجر الزاوية في بناء زراعة ذكية ومتصلة تعتمد على البيانات والمعلومات الفورية في اتخاذ القرار.

تتنوع هذه المنصات من حيث الوظائف والأهداف، وتشمل منصات التجارة الإلكترونية التي تربط المزارعين مباشرة بالأسواق، ومنصات التعلم والتدريب عن بعد التي توفر محتوى معرفياً وتدريبياً مستمراً، ومنصات الإرشاد الزراعي الرقمي التي تستخدم الذكاء الاصطناعي والبيانات المناخية لتقديم توصيات فنية دقيقة.

في السياق العربي، بدأت هذه المنصات تكتسب أهمية متزايدة مع توسع استخدام الإنترنت والهواتف الذكية، ودخول عدد من المبادرات الحكومية والخاصة حيز التنفيذ. ومع ذلك، لا تزال هناك فجوة بين الإمكانات المتاحة والتبني الفعلي على أرض الواقع، نتيجة تحديات بنيوية واجتماعية وتشريعية تحتاج إلى معالجة شاملة.

يركز هذا الفصل على تحليل واقع المنصات الرقمية الزراعية، واستعراض أبرز أنواعها وتطبيقاتها، كما يقدم نماذج واقعية من قصص النجاح والتحديات التي تواجه المزارعين في استخدامها، وصولاً إلى مقترحات عملية يمكن أن تساهم في تسريع التحول الرقمي في الزراعة وتحقيق الأمن الغذائي والتنمية الريفية المستدامة.

2. أنواع المنصات الرقمية

- **المنصات التجارية**

تربط هذه المنصات المزارعين مباشرة بالمشترين، مما يقلل من دور الوسطاء ويزيد من ربحية المزارع. تستخدم هذه المنصات تقنيات التقييم والمراجعات، وتوفر معلومات عن الأسعار والتوصيل.

مثال عالمي: منصة Farmigo في الولايات المتحدة تربط المزارعين بالمستهلكين مباشرة، مما يسرع من وصول المنتجات الطازجة للأسواق (Farmigo, 2022).

مثال عربي: منصة **سوق المزارع** في مصر تعمل على ربط صغار المزارعين بالأسواق المحلية، مع توفير خدمات النقل والتخزين (SooqAlmazaree, 2023).

- **المنصات التعليمية**

توفر موارد معرفية، دورات تدريبية، وورش عمل إلكترونية تساعد المزارعين على التعلم المستمر وتحسين ممارساتهم الزراعية.

مثال عالمي: منصة Digital Green توفر مقاطع فيديو تعليمية باللغات المحلية في الهند، وتستخدم وسائل تفاعلية لنشر المعرفة بين المجتمعات الزراعية (Digital Green, 2020).

مثال عربي: منصة **الزراعة الذكية السعودية** تقدم دورات تدريبية إلكترونية مجانية عن التقنيات الزراعية الحديثة وكيفية تطبيقها (Ministry of Environment, Water and Agriculture, 2023).

- **المنصات الإرشادية**

تستخدم البيانات وتحليلها لتقديم توصيات مخصصة للمزارعين حول مواعيد الزراعة، التسميد، مكافحة الآفات، وغيرها من العمليات.

مثال عالمي: تطبيق Climate FieldView يستخدم بيانات الأقمار الصناعية لتحليل ظروف المزرعة وتقديم توصيات فنية دقيقة (Climate Corporation, 2023).

مثال عربي: منصة **زراعي** في الإمارات تقدم استشارات مباشرة عبر الإنترنت باستخدام الذكاء الاصطناعي لدعم القرارات الزراعية (Ziraai UAE, 2023).

3. تطبيقات الهواتف الذكية في دعم الإنتاج الزراعي

مع انتشار الهواتف الذكية في المناطق الريفية، باتت التطبيقات الزراعية واحدة من أكثر الأدوات العملية لتسهيل حياة المزارع. من أهم الوظائف التي تقدمها هذه التطبيقات:

- **متابعة حالة الطقس:** التطبيقات مثل AccuWeather تقدم توقعات دقيقة تساعد المزارعين على التخطيط للزراعة والحصاد.
- **إدارة الموارد:** تطبيقات مثل MySoil توفر تحليلات عن التربة وتوصيات السماد.

- **مكافحة الآفات:** تطبيقات تتيح تصوير النبات وتحليل الصور لتشخيص الآفات والأمراض (مثل تطبيق Plantix).
- **التواصل والتدريب:** تطبيقات توفر غرف دردشة ومجموعات دعم حيث يمكن تبادل الخبرات ونصائح الزراعة.

مثال عربي: تطبيق "زارعتي" في السعودية يسمح للمزارعين برصد حالة مزروعاتهم، مع نظام تنبيه تلقائي في حال تغير الظروف البيئية (Ministry of Environment, Water and Agriculture, 2023).

4. التجارة الإلكترونية الزراعية

التجارة الإلكترونية في الزراعة تسهل من وصول المنتج إلى الأسواق وتوسع دائرة المستهلكين، خصوصاً في المدن والمناطق الحضرية.

- **نماذج أعمال:** من المزارع إلى المستهلك (Farm-to-Consumer)، ومن المزارع إلى المتاجر الكبرى، أو عبر متاجر رقمية متخصصة.
- **فوائد:** زيادة الربحية، تقليل الفاقد، وتوفير وقت وتكلفة النقل.
- **نماذج ناجحة:**

✓ منصة AgriMarket في الهند تربط ملايين المزارعين بالمشترين عبر منصة رقمية موحدة (AgriMarket India, 2022).

✓ منصة "نبراس" في الإمارات تقدم حلول تجارة إلكترونية متكاملة للمنتجات الزراعية الطازجة (Nibras UAE, 2023).

5. النظم الإرشادية الرقمية والواقع المعزز

- **النظم الإرشادية الرقمية (DSS)**

تعتمد هذه النظم على جمع البيانات وتحليلها لتقديم توصيات دقيقة. تستخدم النظم الذكاء الاصطناعي، الطائرات بدون طيار، والحساسات الأرضية.

أمثلة:

- نظام AquaCrop من منظمة الفاو لتحسين إدارة المياه في الزراعة (FAO, 2022).
- منصة SmartFarm في أستراليا تقدم استشارات فنية دقيقة بناءً على بيانات مزرعة المستخدم.

- **الواقع المعزز (AR)**

يستخدم الواقع المعزز في تدريب المزارعين وشرح عمليات الزراعة، حيث يمكن توجيه المستخدم خطوة بخطوة عبر تراكب الصور الرقمية على البيئة الحقيقية.

دراسة حالة: في مصر، استخدمت جامعة القاهرة الواقع المعزز لشرح كيفية معالجة أمراض معينة في القمح، مما حسّن من دقة التشخيص (Cairo University, 2021).

6. قصص نجاح لمزارعين استخدموا المنصات الرقمية

تُعد قصص النجاح أداة فعالة لفهم الأثر الحقيقي للمنصات الرقمية في حياة المزارعين، إذ توضح كيف يمكن للتكنولوجيا أن تُحدث تغييراً ملموساً في الإنتاج والدخل والاستدامة البيئية. وفيما يلي استعراض لثلاث تجارب بارزة في دول مختلفة، تُبرز تنوع التطبيقات ونتائجها الإيجابية:

- **الإمارات: منصة Nabat – زيادة الإنتاجية بفضل التوصيات الذكية**

في مدينة **العين**، استفاد أحد المزارعين من منصة "Nabat" الرقمية، التي تعتمد على تحليل بيانات الطقس والتربة، وقد مكّنته المنصة من اتخاذ قرارات أكثر دقة

فيما يتعلق بمواعيد الري والتسميد. من خلال توصيات يومية مبنية على معطيات آنية، استطاع هذا المزارع تحسين جدولة الري وتقليل استخدام المدخلات الكيميائية. وكنتيجة مباشرة، ارتفعت إنتاجية المزرعة بنسبة 30% خلال موسمين متتاليين (Nabat UAE, 2023). مع تحسن ملحوظ في جودة المحصول وتقليل الهدر. وقد ساهم دعم المنصة الفني وتحديثاتها المستمرة في رفع الكفاءة التشغيلية، ما جعله لاحقاً يشارك تجربته مع مزارعين آخرين في المنطقة.

- **المغرب: منصة – Zerara الزراعة الذكية وترشيد استهلاك المياه**

في جهة **سوس ماسة** بالمغرب، حيث تُعد الزراعة من الأنشطة الاقتصادية الحيوية، استخدم عدد من المزارعين منصة Zerara المتخصصة في إدارة الري الذكي. تعتمد هذه المنصة على أجهزة استشعار تُركب في الحقول وتقيس رطوبة التربة، وترسل البيانات إلى تطبيق على الهاتف المحمول، مما يساعد المزارع على معرفة الوقت المناسب للري بدقة. وقد أظهرت التقارير أن استخدام المنصة أسهم في تقليل استهلاك المياه بنسبة 20% (FAO Morocco, 2022)، مع الحفاظ على إنتاجية وجودة المحاصيل، خاصة في زراعة الخضروات والفواكه. كما أبدى المزارعون ارتياحهم للسهولة في استخدام المنصة والدعم الفني المتوفر باللغة المحلية، مما شجع المزيد من المزارعين على اعتماد النظام.

- **نيجيريا: منصة – Farmcrowdy التمويل الجماعي والوصول إلى الأسواق**

في نيجيريا، واجه العديد من صغار المزارعين تحديات كبيرة في الوصول إلى التمويل والتسويق، إلى أن جاءت منصة Farmcrowdy، وهي مبادرة مبتكرة تقوم على مبدأ التمويل الجماعي الزراعي (Farmcrowdy, 2021). تقوم المنصة بربط المزارعين بالمستثمرين الذين يموّلون عمليات الزراعة مقابل جزء من الأرباح. كما توفر المنصة دعماً فنياً شاملاً، وتسهل الوصول إلى الأسواق من خلال شبكة توزيع متقدمة. وقد تمكن المزارعون المسجلون في المنصة من تحسين

جودة الإنتاج والدخل الزراعي بنسبة تجاوزت 40% في بعض الحالات، مما أدى إلى تحسين مستويات المعيشة في العديد من المجتمعات الريفية، وتقوية ثقة المزارعين بالتكنولوجيا كوسيلة للتمكين الاقتصادي والاجتماعي.

- **العراق: مزارعون يتبنون تقنيات ذكية بدعم المنصات والمشاريع**

في العراق، سجلت عدة قصص نجاح بارزة نتيجة استخدام منصات وتطبيقات زراعية مدعومة بمشروعات دولية:

- في **نينوى**، استطاع المزارع أحمد يونس صالح تحسين إنتاجيته من البطاطا إلى 1,800 طن سنوياً، مع أرباح فاقت 300,000 دولار، وذلك بدعم من منصة Greenland Agribusiness الرقمية التي وفرت له نظم ري وتوصيل وتخزين ذكية (United Nations Iraq, 2023).
- في **صلاح الدين**، اعتمد المزارع أحمد تركي نيف على تقنيات الزراعة المائية والريّ الذكي ضمن مشروع "بناء القدرة على الصمود الزراعي"، فنجح في تنويع محاصيله وزيادة دخله، وأصبح مرشداً لمزارعين آخرين في منطقته (UNDP Iraq, 2023).
- في **الأنبار**، ساعدت منصة تدريب رقمية مدعومة من UNDP المزارعة إيمان سامي غالب على زيادة دخلها بأكثر من الضعف، عبر استخدام تقنيات الري بالتنقيط وخفض استهلاك المياه بنسبة فاقت 50% (UNDP Iraq, 2023).

- **تونس: منصة – Ezzayra ري ذكي وزيادة في الدخل**

في ولاية بنزرت، اعتمد المزارع محمود بوعسيّة نظاماً رقمياً للري الذكي طوّرته شركة Ezzayra التونسية الناشئة. يستخدم النظام مستشعرات لرطوبة التربة ويقدم توصيات دقيقة للري والتسميد عبر واجهة تطبيق على الهاتف المحمول. وقد ساعد هذا النظام على زيادة كفاءة استخدام المياه وتحسين إنتاج الحمضيات في

مساحة 12 هكتاراً، كما بلغ دخل المزرعة أكثر من 100,000 يورو في عام واحد (Reuters, 2021; FAO NENA, 2024).

- **السعودية: تطبيق – SMART FLOCK SAUDI إدارة رقمية للماشية**

في السعودية، أطلقت وزارة البيئة والمياه والزراعة منصة SMART FLOCK SAUDI كحل رقمي لإدارة الأغنام باستخدام تقنيات إنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي. توفر المنصة تحليلاً فورياً لحالة الحيوان من خلال أجهزة استشعار وجهاز RFID. وقد ساهم هذا التطبيق في تقليل معدل نفوق المواليد وزيادة كفاءة الإنتاج الحيواني لدى آلاف من مربي الأغنام في مناطق المملكة المختلفة (FAO, 2024).

- **الأردن: تطبيق Ma' Al Muzare' – NARC للزراعة الرقمية**

في إطار دعم التحول الرقمي للزراعة، أطلقت منظمة الأغذية والزراعة (FAO) بالتعاون مع المركز الوطني للبحوث الزراعية (NARC) الأردني، تطبيق هاتف ذكي باسم Ma' Al Muzare' – NARC في 23 يونيو 2021. يهدف التطبيق إلى تقديم استشارات زراعية رقمية شاملة تشمل الطقس، التقويم الزراعي، إدارة الحيوانات، ما بعد الحصاد، ومنتدى تفاعلي بين الخبراء والمزارعين (Jordan Times, 2021; FAO UN Jordan, 2021).

من خلال التطبيق:

- تم تنظيم أكثر من 30 ورشة «توعية وتدريب» للمزارعين في ست قرى، ركزت على الاستخدام الفعّال للتطبيق.(FAO UN Jordan, 2021)
- استفاد المزارعون من تنبيهات الطقس المحلية اليومية، وتوصيات الزراعة الملائمة لكل محصول، وتحسين ممارسات الري والتسميد، ما ساهم في تعزيز

الإنتاجية وتحسين جودة المحاصيل (Jordan Times, 2021; FAO UN Jordan, 2021).

تعكس هذه النماذج واقعاً متغيراً في الزراعة الحديثة، حيث لم تعد المعرفة، ولا السوق، ولا حتى الموارد محدودة بالمكان والزمان، بل أصبحت متاحة بضغطة زر عبر المنصات الرقمية الذكية. كما تبرز أهمية تكييف هذه المنصات مع السياق المحلي والثقافي لكل بلد لضمان فاعليتها واستدامة استخدامها.

7. التحديات المتعلقة بتبني المنصات الرقمية والخدمات الذكية للمزارعين

- **التحديات التقنية**

➢ **ضعف البنية التحتية للإنترنت والاتصالات**

تمثل البنية التحتية التكنولوجية من أكبر العقبات التي تواجه التحول الرقمي في الزراعة، خاصة في المناطق الريفية والنائية. قلة تغطية شبكات الإنترنت وعدم استقرارها تؤدي إلى تعثر استخدام المنصات الرقمية، مما يحد من الاستفادة منها.

✓ **مثال:** في العديد من مناطق شمال أفريقيا وسوريا، تعاني المناطق الريفية من ضعف في تغطية الإنترنت، مما يعيق وصول المزارعين إلى المنصات الإلكترونية (World Bank, 2020).

✓ **مقترح:** دعم مشاريع البنية التحتية للاتصالات في الريف، مثل نشر أبراج الشبكات وتقنيات الإنترنت عبر الأقمار الصناعية.

➢ **ارتفاع تكلفة الأجهزة والبرمجيات**

كثير من المزارعين، خصوصاً صغار المزارعين، يجدون صعوبة في اقتناء الأجهزة الذكية الحديثة (هواتف ذكية، حساسات، أجهزة تحكم) أو الاشتراك في خدمات البرمجيات المدفوعة.

- ✓ **دراسة حالة:** في الهند، وجدت دراسة أن التكلفة المادية لتطبيقات الزراعة الرقمية كانت حاجزاً رئيسياً لدى 45% من المزارعين في الريف (Singh *et al.*, 2019).
- ✓ **حلول:** يمكن للجهات الحكومية والمؤسسات الدولية دعم برامج تمويل أو إعانات لشراء هذه الأجهزة، أو تقديم تطبيقات مجانية ومدعومة.

➢ **قلة التكامل بين الأنظمة والمنصات المختلفة**

يواجه المزارعون مشاكل في استخدام عدة منصات رقمية غير متوافقة، مما يضعف الكفاءة ويزيد من عبء التعلم.

- ✓ **مثال:** في مصر، اشتكى بعض المزارعين من تعدد التطبيقات التي لا تتبادل البيانات، مما أدى إلى تكرار الجهود وارتباك في إدارة المعلومات (FAO Egypt, 2021).
- ✓ **توصية:** تطوير معايير موحدة للبيانات الزراعية لضمان التكامل بين الأنظمة.

- **التحديات الاجتماعية**

➢ **نقص الوعي الرقمي والثقافة التكنولوجية**

غالبية المزارعين في الدول النامية خصوصاً كبار السن منهم يفتقرون إلى المهارات الرقمية الأساسية لاستخدام التطبيقات والمنصات بفعالية.

- ✓ **مثال:** دراسة في تونس أظهرت أن 60% من صغار المزارعين لا يملكون مهارات استخدام الهواتف الذكية أو الإنترنت (UNDP Tunisia, 2022).
- ✓ **استراتيجية:** تنظيم برامج تدريبية ميدانية وحملات توعية مستمرة، بمشاركة الجمعيات الزراعية والمؤسسات التعليمية.

- **مقاومة التغيير والاعتماد على الطرق التقليدية**

يرى بعض المزارعين أن الطرق التقليدية التي تعلموها وأتقنوها هي الأفضل، ويخشى البعض الآخر من مخاطر التكنولوجيا الحديثة، أو فقدان السيطرة على مزروعاتهم.

- ✓ **توضيح:** الثقافة الزراعية المحافظة، والخوف من الفشل أو فقدان البيانات، تحجم التبني الفوري للتقنيات.
- ✓ **التوصية:** دمج المزارعين في تطوير المنصات، وإظهار فوائد ملموسة من التجارب الناجحة من داخل المجتمع نفسه.

- **نقص الدعم المجتمعي والمؤسسي**

غياب الدعم من المؤسسات الحكومية أو نقص التعاون بين الجهات المعنية يضعف الحوافز لتبني المنصات الرقمية.

- ✓ **دراسة حالة:** في المغرب، أدت ضعف السياسات الحكومية الداعمة إلى بطء تبني تطبيقات الزراعة الرقمية مقارنة بدول أخرى (FAO Morocco, 2022).
- ✓ **مقترح:** وضع استراتيجيات وطنية واضحة تشمل التمويل، التدريب، وتبني التكنولوجيا.

- **التحديات التنظيمية والقانونية**

- **غياب أطر قانونية لحماية بيانات المزارعين**

تثير خصوصية البيانات الزراعية التي تجمعها المنصات الرقمية قلق المزارعين، خصوصاً في غياب قوانين صارمة لحماية المعلومات.

- ✓ **مثال:** في بعض دول الخليج، رغم وجود مشاريع رقمية، إلا أن عدم وجود تشريعات واضحة يحد من مشاركة البيانات بحرية (GCC Digital Agriculture Report, 2023).
- ✓ **الحل:** صياغة قوانين حماية البيانات الزراعية وضمان استخدام آمن وشفاف.

➢ **نقص الحوافز لتبني التكنولوجيا**

غياب الدعم المالي المباشر، الإعفاءات الضريبية، أو الدعم الفني المستمر يقلل من دوافع المزارعين للاستثمار في التكنولوجيا.

- ✓ **مثال :**في مصر، أظهرت دراسة أن 70% من المزارعين يرون أن الدعم الحكومي غير كافٍ لتحمل تكاليف الرقمنة (Egypt Agricultural Report, 2022).
- ✓ **توصية :**تطبيق حزم دعم مالية وفنية تحفز صغار المزارعين على التحول الرقمي.

➢ **تحديات في تنظيم الأسواق الرقمية**

تنظيم التجارة الإلكترونية الزراعية يتطلب قواعد واضحة لضمان شفافية الأسعار، جودة المنتجات، وحماية المستهلكين.

- ✓ **مثال:** في الأردن، يواجه السوق الزراعي الرقمي تحديات في اعتماد معايير الجودة وتوثيق المنتجات (Jordan Ministry of Agriculture, 2023).
- ✓ **مقترح:** تطوير أطر تنظيمية تسهل عمل الأسواق الرقمية وتضمن حقوق جميع الأطراف.

➢ **خلاصة التحديات والتوصيات العملية**

التحدي	الوصف	التوصيات
ضعف البنية التحتية	ضعف تغطية الإنترنت والاتصالات	دعم البنية التحتية، تقنيات الأقمار الصناعية
تكلفة الأجهزة	ارتفاع تكلفة الأجهزة والتقنيات	تقديم تمويل، تطوير تطبيقات مجانية
نقص الوعي الرقمي	ضعف مهارات استخدام التكنولوجيا	تدريب ميداني، حملات توعية
مقاومة التغيير	الاعتماد على الطرق التقليدية	إشراك المزارعين، عرض تجارب ناجحة
غياب التشريعات	عدم وجود قوانين لحماية البيانات	صياغة قوانين حماية البيانات
نقص الدعم المؤسسي	ضعف الحوافز والدعم الحكومي	وضع سياسات دعم مالية وتقنية

اعداد وتنسيق المؤلفَين

8. الخاتمة

مع ختام هذا الفصل، يتضح أن المنصات الرقمية لم تعد مجرد أدوات تقنية ثانوية، بل أصبحت بمثابة بنية تحتية معرفية واقتصادية لا غنى عنها في الزراعة الحديثة. فهي تسهم في تقليص الفجوة بين المزارع والمعلومة، وبين المنتج والسوق، وبين التحديات التقليدية والفرص الذكية الجديدة. ومن خلال التكامل بين الهواتف الذكية، والذكاء الاصطناعي، والبيانات الضخمة، والواقع المعزز، بات بالإمكان تقديم خدمات إرشادية وتدريبية وتسويقية تتسم بالدقة والسرعة والشمولية.

ومع أن بعض الدول العربية قطعت أشواطاً في إطلاق منصات رقمية واعدة، إلا أن الطريق لا يزال طويلاً نحو دمج هذه الأدوات في النسيج اليومي للأنشطة الزراعية، خاصة في المناطق الريفية التي تعاني من ضعف البنية التحتية، وانخفاض الوعي الرقمي، ومحدودية الموارد.

إن التحول الرقمي في الزراعة ليس خياراً ترفيهياً، بل ضرورة استراتيجية لتحقيق الأمن الغذائي ومواجهة التحديات البيئية والاقتصادية المقبلة. ويتطلب هذا التحول شراكة حقيقية بين الجهات الحكومية، والقطاع الخاص، والمزارعين أنفسهم، إلى جانب بيئة تشريعية داعمة، واستثمارات مدروسة في التدريب والبنية التحتية الرقمية.

في ضوء ذلك، فإن دعم المنصات الرقمية الزراعية لا يعني فقط تطوير التكنولوجيا، بل يشمل تمكين الإنسان الزراعي نفسه من فهمها، وثقته باستخدامها، واستعداده ليكون جزءاً من مستقبل زراعي أكثر إنتاجاً واستدامة وابتكاراً.

9. المراجع

AgriMarket India. (2022). *Digital platform for farmer-market linkage*. https://agrimarket.gov.in

Cairo University. (2021). *Augmented reality applications in agricultural extension*. Faculty of Agriculture Report.

Digital Green. (2020). *Community-led digital agriculture training*. https://digitalgreen.org

FAO Morocco. (2022). *Zerara smart irrigation platform improves water efficiency in Souss-Massa*. Food and Agriculture Organization. Retrieved from https://www.fao.org

FAO Regional Office for Near East and North Africa. (2024, May 31). *Empowering women and youth in agriculture through digitalization: Evidence from the SALAM-MED project in Tunisia*. Retrieved from https://www.fao.org

FAO UN Jordan. (2021, 26 أغسطس). *FAO, NARC to support digitisation process of agricultural services in Jordan*. FAO UN Jordan. Retrieved from https://jordan.un.org

FAO. (2022). *AquaCrop: FAO's crop water productivity model*. http://www.fao.org/aquacrop/en/

FAO. (2024). *Success story: Digital campaign strengthens agri-cooperatives in Saudi Arabia*. Food and Agriculture Organization. Retrieved from https://www.fao.org

Farmcrowdy. (2021). *Agricultural crowdfunding platform in Nigeria*. https://farmcrowdy.com

Farmcrowdy. (2021). *Empowering Nigerian farmers through digital agriculture*. https://www.farmcrowdy.com

Farmigo. (2022). *Farm-to-consumer digital marketplace*. https://farmigo.com

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Egypt. (2021). *Digital agriculture adoption challenges in Egypt*. https://www.fao.org/egypt/resources/publications/en/

Gulf Cooperation Council (GCC) Digital Agriculture Report. (2023). *Regulatory frameworks for digital farming in Gulf countries*. GCC Secretariat.

Jordan Ministry of Agriculture. (2023). *Regulation of agricultural e-markets: Challenges and opportunities*. Amman, Jordan: Ministry of Agriculture Publications.

Jordan Times. (2021, 2 ديسمبر). *NARC, FAO to launch smartphone application for Jordan's farmers*. The Jordan Times. Retrieved from https://www.jordantimes.com

Ministry of Environment, Water and Agriculture Saudi Arabia. (2023). *Zar'ati app for smart agriculture*.

Nabat UAE. (2023). *Smart agriculture digital platform*. Retrieved from https://www.nabat.ae

Nabat UAE. (2023). *Smart agriculture digital platform*. Retrieved from https://www.nabat.ae

Nibras UAE. (2023). *Agricultural e-commerce platform*. Retrieved from https://www.nibras.ae

Reuters. (2021). *In Tunisia, agriculture is making its digital revolution take root*. Retrieved from https://www.reuters.com

Singh, R., Sharma, A., & Kumar, P. (2019). Barriers to adoption of digital agriculture in rural India. *Journal of Agricultural Informatics*, 10(2), 45-58.

SMART FLOCK SAUDI. (2024, November 24). *AI-led innovation for livestock farming and agrifood system transformation*. Food and Agriculture Organization. Retrieved from https://www.fao.org

SooqAlmazaree Egypt. (2023). *Marketplace for agricultural products*. Retrieved from https://www.sooqalmazaree.eg

UNDP Iraq. (2023). *Cultivating resilience on Iraq's farms*. United Nations Development Programme. https://www.undp.org/iraq/stories/cultivating-resilience-iraqs-farms

United Nations Development Programme (UNDP) Tunisia. (2022). *Digital literacy and agriculture in Tunisia: Bridging the gap for rural farmers*. Tunis: UNDP Publications.

United Nations Iraq. (2023). *A resilient Iraqi farmer on his way to make it big*. https://iraq.un.org/en/237783-resilient-iraqi-farmer-his-way-make-it-big

United Nations Iraq. (2023). *A resilient Iraqi farmer on his way to make it big*. Retrieved from

World Bank. (2020). *Rural connectivity and digital agriculture challenges*. Washington, DC: World Bank Group.

Ziraai UAE. (2023). AI-based advisory platform for farmers. In *Khalifa Fund launches 'Ziraai' agricultural program to support hydroponics training and marketing services with up to AED 1 million loans per farmer*. *UAE Today*. https://www.uaetoday.com/news_details_ad/12895/khalifa-fund-launches-'ziraai'-agricultural- program-to-support-hydroponics-training-and-marketing-services-with-up-to-aed1-million-loans-per-farmer uaetoday.com

المحور الرابع :إدارة الموارد الزراعية باستخدام التكنولوجيا

الفصل 22 - إدارة المياه الذكية في الزراعة

المحتويات

1. المقدمة
2. التحديات المائية في القطاع الزراعي
3. تقنيات الري الذكي (التنقيط، الرش، المحوري، وغيرها)
4. المستشعرات وتحليل بيانات التربة والرطوبة
5. استخدام الأقمار الصناعية والتصوير الطيفي
6. تحسين كفاءة استهلاك المياه
7. تطبيقات وحالات دراسية من العالم العربي والعالمي
8. الخاتمة
9. المراجع

1. المقدمة

يشكّل **الماء** المورد الأهم في حياة النبات والركيزة الأساسية التي تقوم عليها الزراعة. ومع أن الزراعة لا تزال تعتمد على أكثر من 70% من إجمالي استخدام المياه العذبة عالمياً (FAO, 2021)، إلا أن هذا الاعتماد أصبح مقلقاً في ظل التغيرات المناخية المتسارعة، والنمو السكاني المتزايد، وازدياد الطلب على الغذاء. لقد بات من الضروري الانتقال من أساليب الري التقليدية إلى ممارسات ذكية ومبتكرة في إدارة المياه الزراعية، قادرة على رفع كفاءة الاستخدام وتقليل الهدر وضمان استدامة الإنتاج.

تعتمد **إدارة المياه** الذكية على التكامل بين البيانات الدقيقة، والتقنيات الحديثة، والأنظمة التنبؤية التي توجه استخدام المياه وفقاً لاحتياجات التربة والنبات الفعلية، لا التقديرات العامة أو الجداول الزمنية الثابتة. وتشمل هذه الإدارة الذكية تقنيات الري المتقدمة، ومستشعرات التربة، والأقمار الصناعية، والذكاء الاصطناعي، والأنظمة التلقائية للتحكم بالري.

لقد أصبحت هذه الحلول خياراً استراتيجياً لا غنى عنه في ظل:

- تفاقم ندرة المياه في العديد من المناطق حول العالم، لاسيما في المناطق الجافة وشبه الجافة كمنطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا.
- التلوث والتملح الناتج عن الاستخدام غير المنضبط للمياه والمبيدات.
- الحاجة الملحة لتحقيق الأمن الغذائي وتعزيز القدرة على مواجهة التغير المناخي.

في هذا الفصل، نسلط الضوء على أبرز التحديات المائية التي تواجه الزراعة، ونستعرض التقنيات الذكية المتاحة، مع عرض دراسات حالة من المنطقة العربية والعالم، لتقديم رؤية شاملة حول كيفية تحقيق إدارة مائية فعّالة ومستدامة.

2. التحديات المائية في القطاع الزراعي

تواجه الزراعة الحديثة مجموعة معقّدة من التحديات المتعلقة بالمياه، والتي لا تقتصر فقط على الكمية، بل تشمل الجودة، والتوزيع، والفعالية في الاستخدام .ويمكن تلخيص أبرز هذه التحديات في ما يلي:

- **ندرة المياه**

تشكل الندرة المائية التهديد الأكبر للزراعة، خاصة في الدول ذات المناخ الصحراوي أو شبه الجاف، كدول الخليج العربي، الأردن، المغرب، وتونس. فمع ازدياد معدلات الجفاف وتراجع الأمطار، أصبحت مصادر المياه السطحية والجوفية غير كافية لتلبية احتياجات القطاع الزراعي.

على سبيل المثال، تُظهر تقارير البنك الدولي أن منطقة الشرق الأوسط هي الأكثر ندرة في المياه في العالم، مع حصة مائية للفرد تقل عن 500 متر مكعب سنوياً في بعض الدول (World Bank, 2022).

- **سوء توزيع الموارد المائية**

حتى في الدول التي تمتلك موارد مائية نسبية، تعاني المناطق الريفية أو البعيدة من نقص حاد بسبب سوء التوزيع، إما لأسباب بنيوية أو لغياب البنية التحتية الكفؤة. كما أن الاعتماد على الجداول الزمنية الثابتة في توزيع المياه غالباً ما يؤدي إلى ري زائد في بعض المناطق وعطش في مناطق أخرى.

- **الهدر في أنظمة الري التقليدية**

تشير التقديرات إلى أن أنظمة الري السطحي، كالغمر أو القنوات المفتوحة، تؤدي إلى فقدان ما بين 30 إلى 50% من المياه بسبب التبخر والتسرب (Pereira *et al.*, 2017). ويُعتبر هذا الهدر كارثياً في البيئات التي تعاني أصلاً من شح المياه.

- **تدهور جودة المياه**

إلى جانب الكمية، تعاني الزراعة من تدهور نوعية المياه المستخدمة، إذ تُستهلك كميات كبيرة من مياه الصرف غير المعالجة، أو المياه عالية الملوحة، مما يؤدي إلى تراكم الأملاح في التربة، وإجهاد المحاصيل، وتراجع الإنتاج. كما أن الاستخدام المفرط للأسمدة والمبيدات يسهم في تلويث مصادر المياه الجوفية والسطحية، ويُضعف القدرة على إعادة استخدامها بفعالية (Jensen, 2020).

- **الآثار المتفاقمة للتغير المناخي**

أدى تغير المناخ إلى تفاوت غير متوقع في الأمطار، وزيادة موجات الجفاف، وتغيرات في أنماط تبخر المياه، مما زاد من تعقيد إدارة المياه. كما أن ارتفاع درجات الحرارة يؤدي إلى زيادة الطلب المائي من قبل النباتات.

كل هذه التحديات تستدعي تحولاً جذرياً في طريقة التعامل مع المياه الزراعية، من خلال تبني نظم ذكية تعتمد على المراقبة الحية للحقول، والتحكم التلقائي في التوزيع، وتحليل البيانات لتوجيه الري، مما يحقق التوازن بين الإنتاج والكفاءة والاستدامة.

3. تقنيات الري الذكي

تُعد تقنيات الري الذكي من أهم أدوات إدارة المياه الحديثة في الزراعة، حيث تُوظف التكنولوجيا لتحسين كفاءة استخدام المياه عبر التوزيع الدقيق والكمي بناءً على احتياجات النبات الفعلية. تهدف هذه الأنظمة إلى تقليل الهدر، وتوفير الطاقة، ورفع إنتاجية المحاصيل، وتقليل التكاليف على المدى الطويل. وتُستخدم تقنيات الري الذكي في مختلف البيئات الزراعية، بدءاً من البيوت المحمية ووصولاً إلى المزارع المفتوحة الواسعة.

- **الري بالتنقيط الذكي (Smart Drip Irrigation)**

يُعد هذا النظام من أكثر أساليب الري كفاءة، حيث يتم توصيل المياه مباشرة إلى جذور النبات عبر أنابيب دقيقة مزودة بصمامات إلكترونية تتحكم بها وحدات استشعار.

تُبرمج هذه الأنظمة لتعمل تلقائياً عندما تنخفض رطوبة التربة عن مستوى معين، مما يقلل الفقد الناتج عن التبخر والجريان السطحي. أظهرت الدراسات أن هذا النظام يقلل من استهلاك المياه بنسبة تصل إلى 50 % مقارنةً بأساليب الري بالغمر (Postel, 2015).

على سبيل المثال، في وادي الأردن، تم تنفيذ مشروع يعتمد على حساسات رطوبة أرضية مرتبطة بتطبيقات على الهواتف الذكية، مما أدى إلى خفض استهلاك المياه بنسبة 40%، وزيادة إنتاجية المحاصيل بنسبة 25% (FAO Jordan, 2020).

- **الري بالرش الذكي (Smart Sprinkler Irrigation)**

يعتمد هذا النظام على رؤوس رشاشات دقيقة مرتبطة بوحدات تحكم إلكترونية تستقبل بيانات من مجسات جوية وأرضية (مثل رطوبة الجو وسرعة الرياح ورطوبة التربة)، ويتم تشغيلها فقط عندما تكون الظروف البيئية مناسبة. تُستخدم هذه التقنية بكفاءة في الحقول ذات الكثافة العالية، مثل زراعة الحبوب والخضروات والبرسيم.

تُضاف خاصية التحكم عبر الإنترنت أو التطبيقات المحمولة في الأنظمة الحديثة، ما يسمح للمزارع بضبط أوقات وكمية الري عن بعد، وإجراء تغييرات فورية في حالة حدوث تغيرات مناخية مفاجئة.

- **الري المحوري أو الدوار الذكي (Smart Center Pivot Irrigation)**

يُستخدم هذا النظام في المزارع الواسعة، خاصة في زراعة القمح، الذرة، والبرسيم، ويعتمد على أبراج متحركة تدور حول نقطة مركزية لرش المياه بشكل دائري. في النسخ الذكية من هذا النظام، يتم ربط الآلات بـ:

- الأقمار الصناعية أو الطائرات المسيرة (Drones) لتوفير صور حديثة للغطاء النباتي.
- حساسات التربة والطقس التي تقيس درجات الحرارة والرطوبة والتبخر.
- أنظمة إنترنت الأشياء الزراعية (Agri-IoT) التي تسمح بمراقبة الحقل بالكامل وتعديل أنظمة الري وفق البيانات اللحظية.

في دولة الإمارات، يُستخدم هذا النوع من الري في مزارع العين والظفرة، حيث يُدار النظام من خلال مركز تحكم رقمي مركزي، ما أدى إلى تحسين كفاءة الري وتقليل الأعطال في النظام الميكانيكي (Mohamed & Alhammadi, 2021).

إن ما يميز تقنيات الري الذكي هو قدرتها على الاستجابة الديناميكية لاحتياجات النبات والمناخ، بخلاف الأنظمة التقليدية التي تعتمد على التقدير. كما أن هذه الأنظمة تسهم في تحقيق التكامل بين البيئة والاقتصاد الرقمي والزراعة المستدامة، وهو ما يجعلها ركيزة أساسية في أي خطة للتحول الذكي في القطاع الزراعي.

4. المستشعرات وتحليل بيانات التربة والرطوبة

أصبحت تقنيات الاستشعار أحد الأعمدة الأساسية في الزراعة الذكية، وخاصة في مجال إدارة المياه، إذ توفر هذه الأدوات بيانات لحظية وموثوقة تساعد على توجيه الري بدقة حسب الاحتياج الفعلي للنبات.

تعتمد الأنظمة الذكية الحديثة على دمج هذه المستشعرات مع وحدات المعالجة والاتصال، مما يسمح باتخاذ قرارات تلقائية وتنبؤية تقلل من الهدر وتزيد من الكفاءة.

- **حساسات رطوبة التربة (Soil Moisture Sensors)**

تُستخدم لقياس نسبة الرطوبة في طبقات التربة المختلفة، وخاصة في منطقة الجذور. تُركّب هذه المجسات على أعماق متعددة (10 سم، 30 سم، إلخ) لمراقبة رطوبة التربة في الطبقات السطحية والعميقة، وتنقل البيانات لاسلكياً إلى وحدات التحكم أو إلى أنظمة تخزين سحابية (Jones *et al*., 2018).

تسمح هذه المجسات بتحديد:

- متى يجب تشغيل الري،
- وكمية المياه التي يجب ضخها،
- ومدة التشغيل المثلى.

في المغرب، أظهر استخدام هذا النوع من المستشعرات في زراعة الزيتون خفضاً بنسبة 35% في استخدام المياه، وزيادة بنسبة 20% في إنتاج الثمار (GIZ Morocco, 2021).

- **حساسات درجة الحرارة ودرجة الحموضة(Temperature & pH Sensors)**

تلعب هذه المجسات دوراً مهماً في مراقبة الظروف الكيميائية والفيزيائية للتربة، إذ تؤثر درجة الحرارة على سرعة امتصاص المياه والعناصر الغذائية، بينما تؤثر درجة الحموضة (pH) على توافر المغذيات وكفاءة الأسمدة.

على سبيل المثال، إذا كانت التربة شديدة الحموضة أو القلوية، فإن النباتات قد تعاني من نقص في الامتصاص حتى لو كانت المياه متوفرة. وبالتالي، تعمل هذه الحساسات على تنبيه النظام إلى الحاجة للتعديل في تركيبة المياه أو جدولة الري.

- **أنظمة مراقبة المناخ الميكروي(Microclimate Monitoring Systems)**

تتكون من مجموعة من المجسات الجوية التي تقيس:

- درجة حرارة الهواء.
- الرطوبة النسبية.
- سرعة واتجاه الرياح.
- الإشعاع الشمسي.

تُستخدم هذه البيانات لحساب معدل التبخر-نَتح (ET)، وهو العامل الرئيسي في تحديد كمية المياه التي يفقدها النبات يومياً.

في أنظمة مثل "CropX" و "NetBeat" تُدمج هذه القراءات في خوارزميات ذكية، وتُنتج توصيات تلقائية للري تُرسل للمزارع عبر التطبيقات.

- **التحليل البياني واتخاذ القرار**

يُعد التحليل التنبؤي للبيانات الزراعية الخطوة المفصلية في الري الذكي. حيث تُدمج بيانات التربة والمناخ والمحاصيل في برمجيات تعتمد الذكاء الاصطناعي لتحليل الأنماط، وتوقع الاحتياجات المائية المستقبلية، وإنشاء جداول ري ديناميكية.

تُقدم هذه الأنظمة تقارير رسومية للمزارع، أو تتحكم مباشرةً في نظام الري، مما يقلل التدخل البشري ويضمن الاستجابة السريعة للمتغيرات الميدانية.

تشير دراسة في الإمارات العربية المتحدة إلى أن استخدام أنظمة الاستشعار والتحكم الذكي في البيوت المحمية ساهم في تقليل استخدام المياه بنسبة 45%، مع زيادة إنتاج الخضروات الورقية بنسبة 30% (Ziraai UAE, 2023).

وقد أثبتت تقنيات الحساسات وتحليل البيانات أنها قادرة على إحداث نقلة نوعية في الزراعة المروية، خاصة في المناطق التي تواجه شحّاً مائياً متزايداً. فهي لا تقدم حلولاً آنية فحسب، بل تتيح بناء **نماذج تنبؤية مستدامة** لإدارة الموارد، وتحقيق التوازن بين الإنتاج والبيئة.

5. استخدام الأقمار الصناعية والتصوير الطيفي

تمثل تقنيات الاستشعار عن بعد باستخدام الأقمار الصناعية والتصوير الطيفي أدوات حاسمة في الزراعة الحديثة، خاصة في ما يتعلق بإدارة المياه على نطاق واسع. فهذه التقنيات تتيح مراقبة متواصلة وشاملة لحالة الأراضي الزراعية، وتقدم رؤية شاملة دقيقة ومحدثة باستمرار حول صحة المحاصيل، وحالة التربة، ومستوى الإجهاد المائي، دون الحاجة لتدخل ميداني مباشر.

المبادئ الأساسية:

تعتمد هذه التقنيات على تحليل الصور الملتقطة من الأقمار الصناعية باستخدام:

- **التصوير متعدد الأطياف (Multispectral Imaging):** يستخدم أطوال موجية محددة (مثل الأحمر القريب والأشعة تحت الحمراء) للكشف عن الحالة الفسيولوجية للنباتات.
- **التصوير فائق الأطياف (Hyperspectral Imaging):** يلتقط مئات النطاقات الطيفية الدقيقة، ما يسمح بتحليل مفصل لتركيب التربة والنبات.

الاستخدامات الزراعية المتقدمة:

- **تقييم صحة النبات (Vegetation Health)**

من خلال مؤشرات نباتية مثل NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)، يتم تحليل الفرق بين الأشعة تحت الحمراء القريبة والضوء الأحمر المنعكس من أوراق النبات. القيم المنخفضة للمؤشر NDVI تشير إلى مناطق إجهاد مائي أو ضعف في النمو، مما يمكّن المزارعين من التدخل سريعاً وتحديد مناطق الري المطلوبة بدقة.

- **رصد محتوى الرطوبة في التربة**

الصور الطيفية قادرة على تمييز نسبة رطوبة التربة بناءً على خصائص الانعكاس الطيفي. الأراضي الجافة تعكس الأشعة بطريقة مختلفة عن الأراضي المشبعة، مما يتيح رسم خرائط لحالة الرطوبة بدقة عالية.

- **تتبع التغيرات الزمنية في استهلاك المياه**

من خلال المقارنة بين الصور الملتقطة خلال فترات زمنية مختلفة، يمكن تتبع التغيرات في استخدام المياه على مستوى الحقول. يُستخدم هذا التحليل في تقييم فعالية برامج الري وقياس تحسينات الكفاءة بعد تطبيق نظم ذكية.

- **المسح المستمر والتحديث الدوري**

توفر الأقمار الصناعية مثل Sentinel-2 (تابعة لوكالة الفضاء الأوروبية) و Landsat (تابعة لوكالة ناسا) تحديثات كل عدة أيام، مما يتيح رصداً زمنياً مستمراً يساعد في استشراف احتياجات المياه في المراحل القادمة من نمو المحصول.

تطبيقات عملية:

- **مصر – دلتا النيل**

في إطار مشروع تدعمه FAO، يتم استخدام بيانات Sentinel-2 لرصد حالة الأراضي الزراعية في دلتا النيل، وتحديد المناطق التي تعاني من الجفاف أو الري المفرط، مما يساعد في إعادة توزيع المياه وفق الحاجة الحقيقية وتقليل الفاقد (FAO Egypt, 2020).

- **الإمارات العربية المتحدة**

يعمل مركز محمد بن راشد للفضاء (MBRSC) على مشاريع تستخدم صور الأقمار الصناعية في دعم الزراعة الذكية، خصوصاً في البيئات الصحراوية . تُستخدم هذه الصور لتحليل تركيبة التربة، ومراقبة الاستهلاك المائي، وتوجيه قرارات الزراعة المستدامة (MBRSC, 2022; Mohamed & Alhammadi, 2021).

- **المغرب – سوس ماسة**

اعتمدت وزارة الفلاحة المغربية بيانات الأقمار الصناعية لرسم خرائط الاحتياج المائي في منطقة سوس ماسة، وتمكنت من تقليل استخدام المياه بنسبة 25% عبر توجيه الموارد إلى المناطق الأكثر احتياجاً (World Bank, 2019).

- **الهند – ولاية ماهاراشترا**

ضمن مشروع"Digital Green" ، تم دمج بيانات الأقمار الصناعية مع مجسات أرضية لتطبيق نظام ري ذكي تنبؤي .ساهم هذا النظام في تقليل استهلاك المياه وتحسين إنتاجية المحاصيل بنسبة ملحوظة، وخاصة في المناطق المعرضة للجفاف (Digital Green, 2021).

فوائد إضافية:

- إمكانية التنبؤ المبكر بالأزمات المائية.
- دعم صناع القرار بمؤشرات كمية قابلة للتحليل.
- توفير بيانات مكانية زمنية تساعد على تحسين إدارة الري الجماعي أو المشترك في شبكات الري الكبرى.
- تقليل الاعتماد على العمل الميداني المكلف والمتقطع.

6. تحسين كفاءة استهلاك المياه

تحسين كفاءة استخدام المياه لا يعتمد فقط على التكنولوجيا، بل يتطلب منهجية شاملة تجمع بين التقنيات الحديثة، الإدارة السليمة، والتدريب المستمر. تشمل استراتيجيات تحسين الكفاءة ما يلي:

- **التخطيط المبني على البيانات:** تعتمد على جمع وتحليل بيانات حقيقية عن الرطوبة، حالة النبات، والتوقعات المناخية، من خلال أنظمة مراقبة ذكية، لتحديد كميات المياه المطلوبة بدقة.
- **الري بالتوقيت الأمثل:** توظيف أنظمة ري ذكية تتيح التحكم في أوقات تشغيل أنظمة الري لتكون في الأوقات التي يقل فيها التبخر (كالليل أو الفجر)، مما يقلل الفاقد.
- **التكيف مع حالة التربة:** استخدام حساسات تراقب رطوبة التربة باستمرار، وتنقل البيانات لنظام التحكم الآلي لتعديل كمية المياه، مع مراعاة اختلاف طبقات التربة وخصائصها.
- **التوعية والتدريب:** تدريب المزارعين على كيفية قراءة البيانات، استخدام التطبيقات الذكية، والتعرف على تقنيات الري الحديثة لتحقيق أفضل النتائج.

- **تكامل الأنظمة:** دمج أنظمة الري مع تقنيات الذكاء الاصطناعي (AI) لتحليل بيانات الطقس والتربة واتخاذ قرارات ري ذاتية، بالإضافة إلى دمجها مع إدارة الأسمدة لتحقيق التسميد الذكي.

تقنيات متقدمة لتحسين الاستهلاك

- **أنظمة الري الذكية المعتمدة على الذكاء الاصطناعي:** حيث تجمع أنظمة الذكاء الاصطناعي بيانات من حساسات الرطوبة، درجة الحرارة، ونظام الطقس المحلي لتعديل جدول الري تلقائياً، مما يحسن من دقة الاستخدام ويقلل الهدر.
- **الري المُوجه بالدقة العالية (Precision Irrigation):** استخدام خرائط التربة والبيانات الحقلية لتوزيع المياه بكميات متفاوتة حسب حاجة كل جزء من الأرض الزراعية.
- **نظم التنبؤ الجوي الزراعي:** عبر دمج بيانات الأقمار الصناعية مع النماذج الجوية لتوقع الفترات المثلى للري والتقليل من استخدام المياه خلال فترات الرطوبة العالية.

أمثلة عربية ودولية

- **السعودية:** مشروع "الري الذكي" في منطقة القصيم يستخدم أنظمة ري متقدمة تجمع بين الحساسات الأرضية والذكاء الاصطناعي، حيث استطاع تقليل استخدام المياه بنحو 30% مع زيادة المحاصيل الزراعية (Saudi Ministry of Environment, Water and Agriculture, 2021).
- في **الأردن**، تطبيق تقنيات الري بالتنقيط الذكي مع دعم برمجي لإدارة المياه أدى إلى خفض استهلاك المياه بنسبة تصل إلى 40% مع زيادة في الغلة الزراعية(FAO Jordan, 2020) .

- دراسة في **كاليفورنيا، الولايات المتحدة** أظهرت أن استخدام أنظمة الري الذكية مع الحساسات المتقدمة وخوارزميات الذكاء الاصطناعي يمكن أن يحسن كفاءة استخدام المياه بنسبة 30-50% (Evans & Sadler, 2021).

التحديات التقنية وكيفية تجاوزها

رغم الفوائد الكبيرة التي توفرها تقنيات الري الذكي والاستشعار عن بعد في الزراعة، إلا أن هناك جملة من التحديات التقنية واللوجستية التي تعيق انتشار هذه الأنظمة، خاصة في البلدان النامية أو المناطق الريفية. ومع ذلك، يمكن تجاوز هذه التحديات من خلال استراتيجيات متكاملة تشمل الدعم المؤسسي، والتطوير التقني، وبناء القدرات البشرية.

- **تكلفة التركيب والصيانة**

تشمل هذه التكلفة شراء الحساسات، نظم التحكم، وحدات الاتصال، وربطها بالمنصات الرقمية، بالإضافة إلى الصيانة الدورية وتحديث البرمجيات. وقد تكون هذه التكاليف عائقاً كبيراً أمام صغار المزارعين أو المشاريع الزراعية الناشئة.

الحلول الممكنة:

- **الدعم الحكومي والمبادرات الوطنية**: مثل برنامج "التحول الرقمي في الزراعة" في السعودية أو "مبادرة الزراعة الدقيقة" في مصر، والتي توفر منحاً ومعدات بأسعار مدعومة.
- **نماذج التمويل الجماعي أو التشاركي**: بحيث يتم تقاسم تكلفة الأنظمة الذكية بين مجموعة من المزارعين ضمن جمعية أو تعاونية زراعية.
- **دخول القطاع الخاص** عبر خدمات الاشتراك في "الزراعة كخدمة" (Agriculture-as-a-Service) بحيث لا يتحمل المزارع التكلفة المبدئية، بل يدفع رسوماً مقابل الخدمة الذكية.

- **التكامل بين الأنظمة**

في كثير من الأحيان، تُطوَّر أنظمة الحساسات، الأقمار الصناعية، وإدارة المزرعة بشكل منفصل من قِبل جهات مختلفة، مما يؤدي إلى صعوبة في التوصيل والتشغيل البيني (interoperability)، وبالتالي يقلل من كفاءة النظام ككل.

الحلول الممكنة:

- تصميم منصات رقمية مفتوحة المصدر وقابلة للتخصيص، تسمح بربط مختلف أنواع الأجهزة والبرمجيات ضمن نظام واحد.
- استخدام معايير بيانات موحدة (Open Ag Data Standards) تضمن تبادل المعلومات بين مختلف الأجهزة والأنظمة بسهولة.
- دعم الأبحاث المحلية في التكامل التكنولوجي بين الإنترنت الزراعي للأشياء (Agri-IoT)، والذكاء الاصطناعي، وأنظمة إدارة البيانات.

مثال: في تونس، يعمل معهد البحوث الزراعية على تطوير منصة تربط بين مستشعرات الري، البيانات المناخية، وأنظمة التنبؤ بالإنتاج ضمن تطبيق واحد لخدمة مزارعي الزيتون.

- **نقص التدريب والوعي التقني**

يُعدّ نقص الكفاءات البشرية القادرة على تشغيل وصيانة الأنظمة الذكية من أكبر العقبات، خصوصاً في المناطق الريفية أو لدى صغار المزارعين. كثير من المزارعين ما زالوا يعتمدون على التجربة والخبرة الشخصية في اتخاذ قرارات الري.

الحلول الممكنة:

- برامج تدريبية مستمرة تشمل ورش عمل، زيارات ميدانية، ومنصات تعليم إلكتروني بلغات محلية.

- إرشاد رقمي ذكي باستخدام تطبيقات الهاتف المحمول التي تشرح خطوات الاستخدام بلغة بسيطة مدعومة بصور وفيديوهات.
- شراكات بين الجامعات والمؤسسات الزراعية لإطلاق برامج تأهيل المزارعين في مجال الزراعة الذكية، مع منح شهادات معتمدة.

مثال: في الأردن، أطلقت وزارة الزراعة بالتعاون مع GIZ برنامج "التحول الرقمي للمزارع الصغيرة" لتدريب أكثر من 1000 مزارع على تقنيات الري الذكي واستخدام البيانات المناخية.

رغم تعدد التحديات التقنية، إلا أنها ليست مستحيلة، بل تشكل فرصاً لتطوير نظم دعم القرار الزراعي المتكاملة .تجاوز هذه العقبات يتطلب رؤية استراتيجية مشتركة تجمع بين التمويل، التطوير التقني، والتأهيل البشري. فقط من خلال هذا التكامل، يمكن للزراعة الذكية أن تحقق أهدافها في إدارة المياه المستدامة وتعزيز الأمن الغذائي.

فوائد إضافية:

- تقليل الضغوط على موارد المياه العذبة.
- تقليل التلوث الناتج عن الإفراط في الري الذي قد يسبب تسرب المبيدات والأسمدة إلى المياه الجوفية.
- تحسين جودة المحاصيل وزيادة إنتاجية الأرض.

7. تطبيقات وحالات دراسية من العالم العربي والعالمي

تُظهر التطبيقات العملية لتقنيات إدارة المياه الذكية في الزراعة كيف يمكن لهذه الابتكارات أن تُحدث تحولاً نوعياً في كفاءة الموارد، وجودة الإنتاج، واستدامة النظم الزراعية. فيما يلي بعض الأمثلة الرائدة على الصعيدين العربي والعالمي:

- **الإمارات العربية المتحدة – مشروع "دبي للزراعة الذكية"**

في إطار توجه الدولة نحو الاستدامة والابتكار الزراعي، أطلق مركز دبي للزراعة الذكية مشروعاً يجمع بين الري بالتنقيط الذكي، الحساسات متعددة الوظائف، وإنترنت الأشياء(IoT) .

- يتم التحكم بالري عبر تطبيقات ذكية تعتمد على بيانات لحظية من رطوبة التربة والحرارة، ما يتيح تشغيل النظام فقط عند الحاجة.
- أدى هذا المشروع إلى خفض استهلاك المياه بنسبة 45%، وزيادة إنتاجية الخضروات الورقية بنسبة 30%، خاصة في البيوت المحمية (Mohamed & Alhammadi, 2021).

- **الأردن – مشروع الري الذكي في وادي الأردن**

في ظل محدودية الموارد المائية، بدأ الأردن في تطبيق نظام ري ذكي قائم على الحساسات الأرضية والتطبيقات المحمولة، وذلك ضمن برامج التعاون مع FAO.

- يقوم النظام بقياس الرطوبة ودرجة ملوحة التربة، ويرسل تنبيهات للمزارعين لتعديل جداول الري بناء على البيانات.
- أظهر المشروع نتائج واضحة، أبرزها تحسين نوعية الإنتاج الزراعي، وترشيد استخدام المياه بنسبة تجاوزت 40% في بعض المناطق (FAO Jordan, 2020).

- **المغرب – مشروع سوس ماسة للتحكم الذكي في الري**

أطلقت وزارة الفلاحة المغربية مشروعاً تجريبياً في منطقة سوس ماسة يعتمد على الاستشعار عن بعد عبر الأقمار الصناعية، والتصوير الطيفي لتحديد أنماط الاستهلاك المائي.

- مكن المشروع من إعادة توزيع مياه **الري** بناءً على الاحتياج الفعلي، ما ساعد في تقليل الفاقد وتحسين الجدوى الاقتصادية (World Bank, 2019).

- **الولايات المتحدة – كاليفورنيا: الزراعة الذكية في ظل الجفاف**

في مواجهة موجات الجفاف المتكررة، اعتمد المزارعون في كاليفورنيا على شبكات استشعار عالية الدقة مرتبطة بأنظمة حوسبة سحابية لتحليل البيانات.

- تُستخدم هذه البيانات في اتخاذ قرارات فورية حول مواعيد وكمية الري.
- ساهمت هذه الأنظمة في خفض استهلاك المياه بنسبة 35 % في بعض الحقول، مع الحفاظ على الإنتاجية، خاصة في زراعة الكروم والفواكه (Evans & Sadler, 2021).

- **الهند – مبادرة Digital Green**

في ولاية ماهاراشترا، تم دمج الصور الفضائية مع الحساسات الأرضية لتطوير نظام تنبؤي للري في الحقول الصغيرة.

- هذه المبادرة سهلت اتخاذ القرار لدى المزارعين محدودي الخبرة، وحققت زيادة في كفاءة استخدام المياه بنحو 30%، وتقليل الاعتماد على التجربة الشخصية (Digital Green, 2021).

8. الخاتمة

تشكل إدارة المياه الذكية أحد أهم أركان الزراعة المستدامة في القرن الحادي والعشرين، لا سيما في ظل التحديات المتزايدة المرتبطة بندرة المياه، التغير المناخي، والنمو السكاني .لقد أظهرت التقنيات الحديثة، من الحساسات الدقيقة، إلى التصوير الطيفي، إلى منصات الذكاء الاصطناعي، قدرتها على إعادة تعريف العلاقة بين المزارع والماء والمحصول.

إن القيمة الكبرى لهذه التقنيات لا تكمن فقط في ترشيد استخدام المياه، بل في بناء نظام زراعي متكامل قادر على التكيف مع التغيرات المناخية والبيئية، ويعتمد على البيانات والمعرفة بدلاً من الحدس والتقليد. ومع توفير البنية التحتية الرقمية المناسبة، وتكامل

المؤسسات التعليمية والإرشادية، يمكن تحويل هذه الحلول إلى واقع ملموس يعيد تشكيل مستقبل الزراعة في الوطن العربي والعالم.

فمن خلال رؤية شاملة تجمع التقنيات، السياسات، التعليم، وتمكين المجتمعات الزراعية، يمكننا تحقيق التحول من زراعة تستهلك الموارد إلى زراعة تُحسن استخدامها، وتضمن أمناً غذائياً أكثر استدامة وإنصافاً.

9. المراجع

Al-Ghobari, H. M. (2019). "Water resources and irrigation management in Saudi Arabia: Achievements and challenges." *Water Resources Management*, 33, 1799–1812.

Digital Green. (2021). *Smart irrigation and satellite data in Maharashtra: A digital agriculture initiative*. https://www.digitalgreen.org

Digital Green. (2021). *Smart Irrigation for Sustainable Agriculture in Maharashtra, India*. https://www.digitalgreen.org/

Evans, R., & Sadler, E. (2021). "Digital agriculture: The future of farming technology." *Journal of Agricultural Science*, 159(1), 1-14.

FAO Egypt. (2020). *Remote sensing for agricultural monitoring in the Nile Delta*. Food and Agriculture Organization of the United Nations – Egypt Office. https://www.fao.org/egypt

FAO Jordan. (2020). *Smart irrigation technologies in the Jordan Valley: Pilot project outcomes*. Food and Agriculture Organization of the United Nations – Jordan Office.

FAO. (2021). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Systems at breaking point*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Gao, F., *et al*. (2020). "Satellite-based estimation of soil moisture and its applications for agriculture water management." *Agricultural Water Management*, 233, 106098.

GIZ Morocco. (2021). *Promoting efficient water use in olive*

farming through digital solutions. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).

GIZ Morocco. (2021). *Promoting efficient water use in olive farming through digital solutions*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). https://www.giz.de/en/worldwide/35738.html

Jones, H. G., Serraj, R., & Tardieu, F. (2018). Monitoring and modeling of soil–plant–atmosphere continuum to improve irrigation scheduling. *Agricultural Water Management, 210*, 25–36.

Li, M., *et al*. (2022). "Artificial intelligence-driven precision irrigation: Opportunities and challenges." *Agricultural Water Management*, 260, 107296.

MBRSC. (2022). *Remote sensing for agricultural innovation in the UAE*. Mohammed Bin Rashid Space Centre. https://www.mbrsc.ae

Mohamed, M. M., & Alhammadi, M. (2021). *IoT-based smart pivot irrigation system using satellite and soil sensor integration in UAE agriculture*. *International Journal of Smart Agriculture and Food Security*, 3(1), 45–58.

Pereira, L. S., Oweis, T., & Zairi, A. (2017). *Irrigation management under water scarcity*. Agricultural Water Management, 57(3), 175–206.

Postel, S. (2015). *Pillar of sand: Can the irrigation miracle last?* W.W. Norton & Company.

World Bank. (2019). *Morocco: Agricultural Water Management Project*. https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/837711560823440415/morocco-agricultural-water-management-project

World Bank. (2022). *Water scarcity in the Middle East and North Africa: Challenges and opportunities*.

Zhang, X., *et al*. (2021). "Remote sensing for precision agriculture: A comprehensive review." *Computers and Electronics in Agriculture*, 187, 106243.

Ziraai UAE. (2023). *AI-based advisory platform for greenhouse farmers*. Ziraai AgTech, UAE. https://www.ziraai.ae

الفصل 23 - إدارة التربة والمحاصيل بالتقنيات الحديثة

المحتويات

1. المقدمة
2. تحليل التربة عبر تقنيات الاستشعار عن بعد
3. نظم المعلومات الجغرافية في مراقبة صحة التربة
4. الزراعة الدقيقة (Precision Agriculture)
5. تقنيات التسميد الذكي
6. دور الطائرات بدون طيار في إدارة المحاصيل
7. دراسات حالة من مزارع مطورة
8. الخاتمة
9. المراجع

1. المقدمة

في ظل التحديات المتزايدة التي يواجهها القطاع الزراعي، من تغيّر مناخي، وندرة الموارد، وتدهور الأراضي، أصبحت الحاجة ماسة لتبنّي حلول تقنية مبتكرة تسهم في تحسين إنتاجية المحاصيل واستدامة إدارة التربة. وتأتي التقنيات الحديثة في طليعة هذه الحلول، إذ توفر أدوات تحليلية ومراقبة دقيقة تمكّن من اتخاذ قرارات مبنية على بيانات واقعية ومُحدثة. لم تعد الزراعة اليوم مجرد ممارسة تقليدية تعتمد على الخبرة الفطرية، بل تحوّلت إلى منظومة علمية مدعومة بالتقنيات الرقمية والاستشعار المتقدم.

من أبرز هذه التقنيات: الاستشعار عن بعد، ونظم المعلومات الجغرافية (GIS)، والزراعة الدقيقة، والطائرات بدون طيار (الدرونز)، وكلها أسهمت في تعزيز قدرة المزارعين والباحثين على فهم ديناميكيات التربة والمزروعات والتفاعل معها بطريقة آنية ومتخصصة. تساعد هذه الأدوات على تحليل التنوع داخل الحقول، والتنبؤ بالمشكلات الزراعية قبل تفاقمها، وتخصيص المدخلات الزراعية بناءً على الاحتياجات الفعلية لكل موقع.

يهدف هذا الفصل إلى استعراض أبرز التطبيقات الحديثة في إدارة التربة والمحاصيل، بدءاً من تحليل خصائص التربة باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد، وصولاً إلى استخدام الطائرات بدون طيار في تتبع صحة النباتات. كما سيتم عرض دراسات حالة حقيقية توضح كيف أسهمت هذه التقنيات في تحسين كفاءة الإنتاج الزراعي في مزارع مختلفة حول العالم.

2. تحليل التربة عبر تقنيات الاستشعار عن بعد

تحليل التربة هو حجر الأساس لأي مشروع زراعي ناجح، إذ إن معرفة خصائص التربة الفيزيائية والكيميائية تُعد ضرورية لفهم قدرتها الإنتاجية، ومدى ملاءمتها للمحاصيل المختلفة. في السابق، كان تحليل التربة يتطلب عمليات ميدانية كثيفة، وجمع عينات، وفحصها في مختبرات متخصصة، وهو ما يستغرق وقتاً وجهداً وموارد مالية كبيرة. لكن مع التقدم التكنولوجي، ظهرت تقنيات الاستشعار عن بعد كأداة ثورية في هذا المجال.

تعتمد تقنيات الاستشعار عن بعد على التقاط البيانات من خلال الأقمار الصناعية أو الطائرات بدون طيار أو الطائرات التقليدية، باستخدام مستشعرات طيفية متعددة مثل التصوير الطيفي (Hyperspectral Imaging) أو التصوير المتعدد الأطياف (Multispectral Imaging). هذه المستشعرات تقيس الطاقة المنعكسة من سطح الأرض، مما يتيح التعرف على مؤشرات دقيقة مرتبطة بحالة التربة، مثل:

- الرطوبة النسبية (Soil Moisture): وهي مؤشر حاسم لاحتياجات الري.
- محتوى المادة العضوية.
- درجة الحموضة (pH).
- تركيز العناصر الكبرى (النيتروجين، الفوسفور، البوتاسيوم).
- كثافة التربة ومساميتها.

- توزيع التربة وأنواعها على المستوى الإقليمي.

تُجمع هذه البيانات وتحلل عبر برامج متخصصة لتحويلها إلى خرائط رقمية دقيقة (Soil Property Maps)، تُظهر التباينات المكانية داخل الحقل الواحد. يساعد ذلك على اتخاذ قرارات زراعية مخصصة، مثل التسميد المتغير (Variable Rate Fertilization)، أو الزراعة الموجهة، أو تحديد المناطق التي تحتاج إلى استصلاح.

مثال تطبيقي :في الهند، استخدمت مبادرة "Karnataka Precision Farming Project" تقنيات الاستشعار عن بعد لتحديد مستويات الكربون العضوي في التربة عبر آلاف الحقول، مما أدى إلى تعديل برامج التسميد بدقة، وتحقيق زيادة في الإنتاج وصلت إلى 25% في بعض المحاصيل، مع تقليل استخدام الأسمدة النيتروجينية بنسبة 18% (Chatterjee *et al*., 2020).

ميزة إضافية لهذه التقنية هي القدرة على المراقبة المستمرة ودون تلامس، مما يوفّر بيانات متجددة تساعد على مراقبة التغيرات في خواص التربة على مدى المواسم. كما يمكن دمج هذه البيانات مع تقنيات الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بأمراض النباتات أو تآكل التربة قبل حدوثها فعلياً.

أهم المزايا البيئية والاقتصادية:

- تقليل الاعتماد على العينات العشوائية.
- تحسين الكفاءة في استخدام الموارد.
- دعم اتخاذ القرار على أساس علمي دقيق.
- تقليل البصمة الكربونية للعمليات الزراعية.

3. نظم المعلومات الجغرافية في مراقبة صحة التربة

أصبح استخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS) جزءاً لا يتجزأ من ممارسات الزراعة الحديثة، لا سيما في تحليل وفهم التوزيع المكاني لخصائص التربة ومراقبة التغيرات البيئية المؤثرة على الإنتاج الزراعي. تُعد GIS تقنية حاسوبية متقدمة تدمج بين البيانات المكانية (مثل المواقع الجغرافية، الارتفاعات، توزيع الحقول) والبيانات الوصفية (مثل خصائص التربة، رطوبتها، محتواها العضوي)، لتوليد خرائط وتحليلات تفاعلية تدعم اتخاذ القرار.

إحدى أبرز ميزات GIS هي قدرتها على تمثيل العلاقات المكانية بين العوامل البيئية والزراعية، ما يمكّن الباحثين والمزارعين من تتبع ديناميكيات التربة بمرور الوقت. على سبيل المثال، يمكن رصد **تدهور التربة** بفعل عوامل مثل التعرية أو التملّح، وتحديد المناطق الأكثر هشاشة بيئياً، وتخطيط إجراءات المعالجة أو الحماية بشكل موجّه.

كما تمكّن GIS من **تحليل الاتجاهات الزمنية**، كربط تغيرات الغطاء النباتي مع خصائص التربة، أو مراقبة تأثير أنماط الاستخدام الزراعي على بنية التربة خلال مواسم متعددة. وتُسهم هذه الإمكانيات في تحسين **التخطيط المكاني** للأنشطة الزراعية، كاختيار أنواع المحاصيل الأنسب لكل منطقة، وتحديد أولويات الاستصلاح أو الري.

في المغرب، على سبيل المثال، قامت وزارة الفلاحة باستخدام نظم GIS بالتكامل مع بيانات من الأقمار الصناعية لتحديد المناطق الزراعية المتأثرة بندرة المياه وتدهور الغطاء النباتي. سمحت هذه التحليلات الدقيقة بتوجيه برامج إعادة التأهيل الزراعي، وتخصيص الموارد بشكل أكثر كفاءة للمناطق ذات الأولوية (Benmoussa *et al.*, 2017).

علاوة على ذلك، تُستخدم GIS في إدارة قواعد بيانات ضخمة تشمل سجلات تاريخية عن خصوبة التربة، تطبيقات التسميد، استخدامات الأرض، وتقديرات الإنتاج، ما يسهم في بناء نماذج تنبؤية متقدمة تدعم الاستدامة الزراعية طويلة الأمد.

4. الزراعة الدقيقة (Precision Agriculture)

الزراعة الدقيقة هي نهج مبتكر يهدف إلى تحقيق أقصى استفادة من الموارد الزراعية من خلال تخصيص المعاملة الزراعية لكل منطقة صغيرة داخل الحقل، بدلاً من تطبيق المعاملة نفسها بشكل موحد على كامل الأرض. تعتمد الزراعة الدقيقة على تقنيات مترابطة تشمل الحساسات الأرضية، نظم المعلومات الجغرافية، الأقمار الصناعية، الطائرات بدون طيار، وأحياناً الذكاء الاصطناعي.

الهدف الرئيسي للزراعة الدقيقة هو تحسين الكفاءة الزراعية وتقليل الهدر والتأثير البيئي، من خلال فهم التباين الداخلي داخل الحقل. فالحقل الواحد قد يحتوي على مناطق تختلف في مستوى الخصوبة، أو احتياجها للمياه، أو قابليتها للزراعة، وتجاهل هذا التباين قد يؤدي إلى تدني الكفاءة وخسارة الموارد.

تشمل تطبيقات الزراعة الدقيقة ما يلي:

- **الرصد اللحظي للمحاصيل**: باستخدام الكاميرات متعددة الأطياف وأجهزة الاستشعار لمراقبة نمو النبات، واكتشاف الأمراض أو الإجهاد المائي قبل أن تظهر الأعراض بصرياً.
- **التسميد الذكي والتسميد المتغير (VRA)**: تحديد كمية السماد اللازمة بدقة لكل جزء من الحقل، بناءً على تحاليل التربة الفورية أو بيانات تاريخية.
- **الري المتغير (Variable Rate Irrigation)**: تعديل معدلات الري بناءً على رطوبة التربة واحتياجات المحصول في كل منطقة.
- **إدارة الآفات**: الكشف المبكر عن الإصابة بالحشرات أو الأمراض من خلال تحليل صور الأقمار الصناعية أو الطائرات بدون طيار، وتطبيق المعالجة في مناطق محددة فقط.

وقد ثبتت فعالية هذا النهج في العديد من التجارب العملية. على سبيل المثال، في دراسة أجرتها جامعة ميزوري في الولايات المتحدة، استخدمت مزارع الذرة والقمح نظم الزراعة الدقيقة لتطبيق جرعات متباينة من الأسمدة النيتروجينية، مما أدى إلى زيادة المحصول بنسبة 12%، وخفض انبعاثات النيتروجين إلى المياه الجوفية بنسبة 25 % (Sudduth *et al*., 2015).

وعلى المستوى البيئي، تقلل الزراعة الدقيقة من استخدام المبيدات والأسمدة الزائدة، ما يحد من تلوث التربة والمياه، ويعزز صحة النظام البيئي الزراعي ككل.

التحديات الحالية تشمل: التكلفة العالية للبنية التحتية، الحاجة لتدريب الكوادر الفنية، وضعف تغطية الإنترنت في بعض المناطق الريفية، إلا أن هذه التحديات آخذة في التراجع بفضل تطور التكنولوجيا وانخفاض تكاليفها تدريجياً.

5. تقنيات التسميد الذكي

يشكل التسميد الذكي أحد الركائز الأساسية في الزراعة الحديثة، حيث تهدف هذه التقنية إلى تحسين كفاءة استخدام الأسمدة من خلال تطبيقها بكميات مناسبة وفي الأوقات المثلى، مستندةً إلى بيانات دقيقة حول خصائص التربة واحتياجات المحاصيل. تعد هذه الممارسة ضرورية لتقليل الفاقد من المواد الغذائية، وتجنب التلوث البيئي الناتج عن الإفراط في استخدام الأسمدة، بالإضافة إلى تعزيز إنتاجية المحاصيل بطريقة مستدامة.

تعتمد تقنيات التسميد الذكي على مجموعة متنوعة من الأدوات والأنظمة التي تتكامل لجمع البيانات وتحليلها، مما يساعد في اتخاذ قرارات دقيقة بشأن التسميد. تشمل هذه التقنيات أجهزة الاستشعار الأرضية، وأنظمة قياس محتوى النيتروجين في التربة، بالإضافة إلى نماذج التنبؤ المحوسبة التي تستخدم خوارزميات متقدمة لتحليل البيانات الزراعية.

أحد التطبيقات العملية المهمة في هذا المجال هو استخدام أجهزة استشعار النيتروجين التي تقوم بقياس مستوى العناصر الغذائية في التربة بشكل مباشر. ففي أستراليا، أثبت

نظام التسميد الذكي باستخدام هذه الأجهزة فعاليته في تقليل كمية الأسمدة المستخدمة بنسبة تصل إلى 25% دون الإضرار بمحاصيل الحبوب، كما ساعد ذلك في الحد من تلوث المياه السطحية الناتج عن الجريان السطحي للأسمدة (Smith *et al*., 2020). هذا النموذج يعكس أهمية التكنولوجيا في خلق توازن بين تحقيق الإنتاجية وحماية البيئة.

علاوة على ذلك، تستخدم النماذج المحوسبة المتقدمة، التي تعتمد على الذكاء الاصطناعي وتقنيات تعلم الآلة، لتحليل البيانات المستمدة من الحقول الزراعية بما في ذلك خصائص التربة، حالة المحاصيل، والظروف المناخية. يتيح هذا التكامل تقديم توصيات مخصصة لكل حقل زراعي، مما يضمن تطبيق كمية الأسمدة الأمثل والحد من الهدر. في هذا السياق، بينت دراسة أجريت في الإمارات العربية المتحدة كيف ساعد تطبيق نظام تسميد ذكي متكامل على زيادة إنتاجية المحاصيل وتحسين كفاءة استخدام الموارد بنسبة ملموسة(Al Shamsi *et al*., 2021) .

تتضمن تقنيات التسميد الذكي أيضاً التسميد المتباين (Variable Rate Fertilization)، الذي يتيح تعديل معدلات التسميد داخل الحقل نفسه بناءً على خرائط دقيقة لاحتياجات التربة. هذه التقنية مدعومة بنظم المعلومات الجغرافية (GIS) والاستشعار عن بعد، حيث يتم تقسيم الحقل إلى مناطق صغيرة وتحليل خصائص كل منطقة، مما يسمح بتطبيق الأسمدة حسب الحاجة الفعلية لكل جزء من الأرض، وهذا بدوره يرفع من كفاءة استخدام الموارد ويقلل من الآثار البيئية السلبية (Robert *et al*., 2019).

تواجه تقنيات التسميد الذكي تحديات متعددة من بينها التكلفة العالية لبعض الأجهزة والتقنيات، والحاجة إلى تدريب المزارعين على استخدامها بشكل فعال، بالإضافة إلى متطلبات البنية التحتية الرقمية الداعمة لجمع وتحليل البيانات. ومع ذلك، فإن الفوائد الاقتصادية والبيئية التي توفرها هذه التقنيات تجعل من الضروري تشجيع تبنيها على

نطاق أوسع، خاصة في المناطق التي تعاني من نقص الموارد أو مشكلات تلوث التربة والمياه.

في الختام، يعد التسميد الذكي خطوة حاسمة نحو تحقيق الزراعة المستدامة، من خلال الجمع بين المعرفة العلمية والتقنيات الحديثة لتوفير موارد التسميد بشكل أكثر كفاءة، وضمان صحة التربة والمحاصيل، وحماية البيئة. يستدعي هذا التوجه دعماً مستمراً للبحث والابتكار، إلى جانب جهود تدريبية وتوعوية لتعزيز قدرات المزارعين والمؤسسات الزراعية على الاستفادة المثلى من هذه التقنيات.

6. دور الطائرات بدون طيار في إدارة المحاصيل

في العقد الأخير، أصبحت الطائرات بدون طيار (الدرونز) أداة محورية في التحول نحو الزراعة الذكية، إذ توفر وسيلة فعالة، منخفضة الكلفة نسبياً، لجمع وتحليل البيانات الزراعية بدقة زمنية ومكانية عالية. تسهم هذه التقنية في دعم اتخاذ القرار الزراعي عبر تزويد المزارعين بصور ومعلومات آنية عن حالة التربة والنباتات، ما يسمح بإدارة أكثر دقة واستجابة أسرع للتغيرات الميدانية.

تعتمد الطائرات بدون طيار على أجهزة استشعار متعددة تشمل:

- **كاميرات RGB عالية الدقة** لالتقاط صور مرئية لتقييم نمو المحاصيل وكثافتها.
- **مستشعرات متعددة الأطياف (Multispectral)** لتحليل مؤشرات الصحة النباتية مثل مؤشر الفرق المعياري للنباتات.(NDVI)
- **مستشعرات طيفية فائقة الدقة (Hyperspectral)** لاكتشاف مشاكل دقيقة مثل نقص عناصر معينة أو الإصابة المبكرة بالأمراض.
- **كاميرات حرارية** لرصد توزيع درجات الحرارة وتحديد التغيرات المرتبطة بالإجهاد المائي أو مشكلات الري.

التطبيقات الزراعية للطائرات بدون طيار:

1. **المراقبة البصرية الدقيقة**: تسمح بتحديد بقع التدهور أو النمو الضعيف، مما يساعد على اتخاذ إجراءات تصحيحية موضعية بدلاً من الحلول العامة المكلفة.
2. **رصد الآفات والأمراض**: من خلال تحليل الصور الحرارية والطيفية، يمكن اكتشاف الإصابات في مراحل مبكرة قبل انتشارها الواسع.
3. **تقدير الإنتاجية**: يمكن استخدام النماذج المبنية على صور الطائرات لتقدير الغلة المتوقعة وتقييم فعالية المدخلات الزراعية.
4. **دعم التسميد والري الموضعي**: بفضل الخرائط الدقيقة التي تنتجها، يتم ضبط عمليات التسميد والري لتتناسب مع الاحتياجات الحقيقية لكل منطقة داخل الحقل.

دراسة حالة دولية: في دراسة أجريت على مزارع الذرة في ولاية آيوا الأمريكية، استخدمت الطائرات بدون طيار لتحليل مؤشرات النمو ورطوبة التربة، ما ساهم في تحسين جداول التسميد والري وتقليل فقد المحصول بنسبة 15%، وزيادة العائد الصافي بنسبة 10% (Zhang & Kovacs, 2012).

في السياق العربي، تبنت دول مثل الإمارات والسعودية تكنولوجيا الدرونز ضمن برامج الزراعة الذكية لتجاوز التحديات البيئية، لا سيما في المناطق القاحلة. ففي مشروع "المزرعة الذكية" في الإمارات، تم استخدام الدرونز لمراقبة مستويات الرطوبة ونمو المحاصيل في البيوت المحمية، مما أدى إلى تحسين إدارة المياه بنسبة 30% (Al-Khudair & Al-Zahrani, 2020). كما تم توظيفها في السعودية في مزارع الزيتون والقمح لتتبع مؤشرات الإجهاد النباتي وتخطيط عمليات الحصاد.

الفوائد البيئية والاقتصادية:

- تقليل استخدام المبيدات والأسمدة عبر الرش الموضعي.

- تحسين كفاءة الموارد المائية.
- تقليل الانبعاثات الناتجة عن العمليات الزراعية غير الفعالة.
- توفير الوقت والجهد مقارنة بالطرق التقليدية في المراقبة والقياس.

التحديات والآفاق المستقبلية:

- **التكلفة**: قد تشكل عقبة في البداية، خاصة للمزارع الصغيرة.
- **الكوادر البشرية**: الحاجة إلى تدريب المزارعين على تحليل الصور والبيانات المستخرجة.
- **اللوائح والتشريعات**: تختلف من بلد إلى آخر وقد تُقيّد استخدام الدرونز في بعض المناطق.
- **الدمج مع تقنيات أخرى**: مثل الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات الكبيرة، لتعظيم الفائدة من المعلومات المجمعة.

ومع ذلك، فإن الانخفاض التدريجي في أسعار الأجهزة، وانتشار برمجيات تحليل الصور السحابية، والدعم الحكومي المتزايد يجعل من الطائرات بدون طيار إحدى الركائز الأساسية لمستقبل الزراعة المستدامة في العالم.

7. دراسات حالة من مزارع مطورة

تُعد دراسات الحالة أدوات تحليلية مهمة لفهم كيفية تطبيق التقنيات الزراعية الحديثة في الميدان، ومدى تأثيرها على الإنتاجية، الكفاءة، والربحية. كما تساعد في تحديد التحديات التي قد تواجه المستخدمين الأوائل لهذه التقنيات، وتُبرز الدروس المستفادة التي يمكن تكرارها أو تعديلها في سياقات جغرافية وزراعية مختلفة.

- **هولندا – مزرعة ذكية نموذجية لتقليل الأسمدة**

في إحدى المزارع في مقاطعة فليفولاند (Flevoland)، تم تطبيق نظام متكامل من التسميد الذكي والاستشعار المباشر باستخدام أجهزة قياس النترات والرطوبة في التربة. وقد أُرفق النظام بقاعدة بيانات تحليلية تستند إلى نظم المعلومات الجغرافية لتحديد احتياجات التسميد بدقة متناهية حسب المناطق المختلفة داخل الحقل.

النتائج:

- خفض استهلاك الأسمدة بنسبة 30%.
- زيادة جودة المحاصيل (البطاطا والشمندر السكري) بنسبة 18% من حيث الحجم والمحتوى الغذائي.
- تقليل التلوث الناجم عن الجريان السطحي للأسمدة (Van der Wal *et al*., 2018).

- **مصر – استخدام الدرونز و GIS في مكافحة آفات القطن**

في محافظة الدقهلية، تم تنفيذ مشروع تطبيقي لرصد آفات القطن باستخدام طائرات بدون طيار مزودة بكاميرات متعددة الأطياف، وتحليل الصور من خلال نظام معلومات جغرافي مدمج بالخرائط الزراعية التاريخية للمنطقة.

النتائج:

- تقليل استخدام المبيدات الكيميائية بنسبة 20%.
- تحسين الاستجابة السريعة للبؤر المصابة.
- انخفاض في عدد المعالجات اليدوية، مما خفّض التكلفة التشغيلية بنسبة 12%.
- مساهمة ملحوظة في تعزيز الممارسات البيئية المستدامة (Hassanein *et al*., 2019).

- **الولايات المتحدة – تكامل الزراعة الدقيقة والذكاء الاصطناعي**

في ولايتي أيوا وإلينوي، نفّذت عدة شركات زراعية مشاريع رائدة تعتمد على تكامل بين الذكاء الاصطناعي، الاستشعار عن بعد، الطائرات بدون طيار، ونظم الزراعة الدقيقة. قامت هذه الأنظمة بتحليل بيانات التربة والطقس، وسجلات المحاصيل السابقة، ثم قدمت توصيات تلقائية للري، التسميد، وحتى اختيار نوع البذور.

النتائج:

- زيادة الإنتاجية بنسبة 15-20% في محاصيل الذرة والصويا.
- تحسين كفاءة استخدام المياه بنسبة 25%.
- خفض الفاقد في البذور والأسمدة، ما أدى إلى تقليص التكاليف بنسبة 17% (Jones *et al*., 2021).

- **الهند – مشروع الزراعة الدقيقة في ولاية كارناتاكا**

أُطلق مشروع تجريبي لزراعة الأرز في قرى مختارة من ولاية كارناتاكا، حيث تم استخدام تقنيات الزراعة الدقيقة لتحديد جرعات الأسمدة وتوقيت الري، بناءً على تحليل رطوبة التربة وخصوبتها.

النتائج:

- تحسين غلة الأرز بنسبة 25% مقارنةً بالطرق التقليدية.
- تقليل استهلاك المياه بنسبة 35% في موسم الجفاف.
- زيادة دخل المزارعين بنسبة 18% بفضل خفض التكاليف وزيادة الجودة (Chatterjee *et al*., 2020).

- **الإمارات العربية المتحدة – مشروع "المزرعة الذكية" في منطقة الفجيرة**

في إطار رؤية الإمارات 2030 لتعزيز الأمن الغذائي المستدام، أطلقت وزارة التغير المناخي والبيئة مشروع "المزرعة الذكية" في إمارة الفجيرة بالتعاون مع القطاع الخاص، ويُعد من أبرز النماذج المتكاملة لتطبيق التقنيات الزراعية الحديثة في بيئة صحراوية.

أبرز التقنيات المستخدمة:

- طائرات بدون طيار لمراقبة نمو المحاصيل وكشف الأمراض.
- مستشعرات رطوبة وحرارة مدمجة في التربة.
- أنظمة ري ذكية تعتمد على بيانات حية.
- قاعدة بيانات جغرافية GIS لربط خصائص التربة بالممارسات الزراعية.

النتائج:

- تقليل استهلاك المياه بنسبة 40% مقارنة بالممارسات التقليدية.
- خفض الفاقد في الأسمدة والمبيدات بنسبة 35%.
- زيادة إنتاج الخضروات العضوية بنسبة 20% في البيوت المحمية.
- تقليل الأثر البيئي نتيجة خفض الانبعاثات الكربونية والاعتماد على الطاقة الشمسية.

الدروس المستفادة:

- أثبت المشروع إمكانية تطبيق الزراعة الدقيقة في البيئات القاحلة، بشرط وجود بنية تحتية رقمية ومصادر طاقة متجددة.
- ساعد استخدام البيانات المستمرة في تخصيص إدارة الموارد لكل وحدة زراعية صغيرة.

- يمثل المشروع نموذجاً قابلاً للتوسع والتكرار في مناطق أخرى من الخليج.

- **المملكة العربية السعودية –**

1 - مشروع الواحة الذكية في العُلا

في إطار استراتيجية "الزراعة المستدامة والتراث الطبيعي" التي أطلقتها الهيئة الملكية لمحافظة العُلا، تم تطوير مشروع **الواحة الذكية** ليكون نموذجاً بيئياً متكاملاً يجمع بين الحفاظ على التراث الزراعي واستخدام أحدث التقنيات.

أبرز أهداف المشروع:

- استعادة التوازن البيئي في واحة العلا التاريخية.
- دمج تقنيات الزراعة الذكية لإعادة تأهيل الأراضي الزراعية.
- تدريب المزارعين المحليين على استخدام التقنيات الرقمية.

التقنيات المستخدمة:

- الدرونز لمراقبة الأشجار النخيلية والتربة.
- مستشعرات أرضية لقياس الرطوبة وملوحة التربة.
- أنظمة ري بالتنقيط الذكية تُدار آلياً وفق البيانات الحية.
- منصة تحليل بيانات تعتمد الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بالأمراض وتوجيه الري والتسميد.

النتائج المحققة حتى عام 2024:

- انخفاض استهلاك المياه بنسبة 50% مقارنة بالري التقليدي.
- استعادة خصوبة التربة في أكثر من 75 هكتاراً من الأراضي المتدهورة.

- زيادة إنتاجية التمور بنسبة 30% دون استخدام مبيدات كيميائية.
- تعزيز إشراك المجتمعات المحلية في الزراعة الذكية عبر ورش عمل وتدريب تقني.

2 - منطقة الجوف – الزراعة الدقيقة في مزارع الزيتون والقمح

تُعد منطقة الجوف من أكبر المناطق الزراعية في المملكة، وتضم مساحات شاسعة لزراعة الزيتون والحبوب. منذ عام 2020، بدأت عدد من الشركات الزراعية هناك بتطبيق الزراعة الدقيقة لتحسين الكفاءة وتحقيق الاستدامة، خاصة في ظل التحديات المائية.

الخطوات المتبعة:

- تركيب محطات طقس ذكية لتوقع تغيرات المناخ المحلي.
- استخدام درونز لرسم خرائط خصوبة التربة وتحليل نمو المحاصيل.
- اعتماد تطبيقات الهاتف المحمول لإدارة البيانات وتوجيه الأنشطة الزراعية يومياً.

النتائج المحققة:

- زيادة غلة محصول القمح بنسبة 18% في الحقول التي استخدمت الري الذكي والتسميد الموضعي.
- تقليل نسبة إصابة أشجار الزيتون بالحشرات بنسبة 22% بفضل المراقبة الجوية الدقيقة.
- تقليص الفجوة الإنتاجية بين الحقول بنسبة 15% من خلال تخصيص العمليات الزراعية حسب البيانات.

خلاصة دراسات الحالة الخليجية:

- تؤكد التجارب في العُلا والجوف أن التقنيات الحديثة ليست فقط قابلة للتطبيق في البيئة الصحراوية، بل قد تكون أكثر فاعلية فيها بسبب الحاجة لترشيد الموارد.
- تشير إلى أهمية التمكين المجتمعي والتدريب كجزء من أي مشروع زراعة ذكية.
- تدل على أن الزراعة الدقيقة لا تقتصر على المحاصيل عالية القيمة، بل يمكن أن تطبق بفعالية على محاصيل استراتيجية كالحبوب والزيتون.

جدول مقارن لدراسات حالة في الزراعة الذكية

الدولة	الموقع / المشروع	التقنيات المستخدمة	النتائج المحققة	الدروس المستفادة
هولندا	مزرعة ذكية – فليفولاند	نظام تسميد ذكي، تحليل التربة، GIS	خفض الأسمدة بنسبة 30%، زيادة جودة المحاصيل بـ18%	التكامل بين تحليل التربة والتطبيق الموضعي يحسّن الإنتاجية ويقلل الأثر البيئي.
مصر	محافظة الدقهلية	درونز، نظم GIS، مراقبة الآفات	تقليل المبيدات 20%، خفض التكاليف 12%	المراقبة الجوية تساعد في كشف الإصابات مبكراً، وتحسين الاستجابة.
الولايات المتحدة	ولايتي آيوا وإلينوي	زراعة دقيقة، AI، تحليل بيانات	زيادة الإنتاجية 15–20%، كفاءة مياه 25%	دمج الذكاء الاصطناعي مع بيانات الحقول يدعم الزراعة الاستباقية.

الإمارات	مشروع "المزرعة الذكية" – الفجيرة	درونز، مستشعرات تربة، ري ذكي، GIS	خفض المياه 40%، زيادة إنتاج الخضروات 20%	التقنيات الذكية قابلة للتطبيق بكفاءة في البيئات الصحراوية.
السعودية	**الواحة الذكية – العُلا**	درونز، ذكاء اصطناعي، مستشعرات رطوبة وملوحة، ري بالتنقيط	تقليل المياه 50%، زيادة إنتاج التمور 30%	استعادة التربة وإدارة الواحات ممكنة باستخدام تقنيات متكاملة صديقة للبيئة.
السعودية	**مزارع الزيتون والقمح – الجوف**	محطات طقس، درونز، تطبيقات متنقلة	زيادة غلة القمح 18%، خفض إصابات الزيتون 22%	البيانات المناخية والحقلية اليومية تدعم إدارة محاصيل استراتيجية بكفاءة.

اعداد وتنسيق المؤلفَين

ملاحظات على الجدول:

- جميع الحالات اعتمدت تكنولوجيات متعددة ومتكاملة، ما يشير إلى أن فعالية الزراعة الذكية ترتبط بالمنهج الشامل لا بأداة واحدة فقط.
- البيئات المختلفة (معتدلة مثل هولندا، جافة مثل الخليج، وشبه استوائية مثل مصر) لم تكن عائقاً، بل شكلت حافزاً لتكييف التقنيات بما يناسب التحديات المحلية.
- التحول الرقمي في الزراعة لا يقتصر على الشركات الكبرى، بل بدأ يمتد إلى المشاريع المجتمعية والتجريبية.

التحليل والدروس المستفادة

- **التكامل بين التقنيات** (مثل: التسميد الذكي، الدرونز، نظم المعلومات الجغرافية، الاستشعار عن بعد، والذكاء الاصطناعي) هو العامل المشترك في نجاح معظم المزارع المطورة.
- **التحوّل من الزراعة التفاعلية إلى الزراعة الاستباقية**، حيث تُعالج المشكلات قبل أن تتفاقم بفضل المراقبة الدقيقة والتحليل الآني.
- **تحقيق التوازن بين العائد الاقتصادي والاستدامة البيئية**، ما يؤكد قدرة التكنولوجيا على تعزيز الأمن الغذائي دون استنزاف الموارد الطبيعية.
- **أهمية الدعم الحكومي والتدريب الفني** في نقل هذه التجارب الناجحة إلى نطاق أوسع، خاصة في الدول النامية.

8. الخاتمة

في عصر تتسارع فيه التحديات البيئية مثل تغير المناخ، وتدهور الأراضي، ونضوب الموارد المائية، أصبحت الإدارة الحديثة للتربة والمحاصيل إحدى الركائز الأساسية لضمان الأمن الغذائي وتحقيق التنمية الزراعية المستدامة. لم تعد الممارسات التقليدية وحدها كافية لمواجهة هذه التحولات، بل باتت الحاجة ماسة إلى تبنّي تقنيات متقدمة تعتمد على البيانات الدقيقة، والتحليل الذكي، والاستجابة السريعة.

لقد استعرض هذا الفصل كيف تتيح أدوات مثل تحليل التربة المدعوم بالاستشعار عن بعد، ونظم المعلومات الجغرافية، والزراعة الدقيقة، والتسميد الذكي، والطائرات بدون طيار، مستوى غير مسبوق من الكفاءة والفعالية في إدارة الحقول. فهذه التقنيات لا تساهم فقط في تحسين الإنتاجية وتقليل الفاقد، بل تعزز أيضاً من جودة المحاصيل، وتقلل الاعتماد على الموارد الكيميائية، وتخفض الأثر البيئي.

إلا أن إمكانات هذه التقنيات لن تتحقق بالكامل دون دعم شامل على المستويات الفنية والمؤسسية والسياساتية .فهناك حاجة ملحّة إلى:

- توفير التدريب التقني للمزارعين على استخدام هذه الأدوات وتفسير بياناتها.
- تعزيز البنية التحتية الرقمية، خاصة في المناطق الريفية، بما يشمل الاتصال بالإنترنت، أنظمة الحوسبة السحابية، وتطبيقات الهاتف المحمول.
- تحفيز الاستثمار في البحث والابتكار الزراعي، مع ربط مخرجات البحوث بحلول عملية تناسب طبيعة المحاصيل والبيئات المحلية، ولا سيما في الدول النامية.
- تبني أطر تنظيمية وتشريعية تواكب التطور التكنولوجي، وتضمن الاستخدام الآمن والفعّال للتقنيات مثل الدرونز والذكاء الاصطناعي في الزراعة.

في النهاية، فإن تبني تقنيات الإدارة الذكية للتربة والمحاصيل لا يجب أن يُنظر إليه كخيار تقني فحسب، بل كتحوّل استراتيجي نحو نموذج زراعي أكثر مرونة وابتكاراً واستدامة. فالمستقبل الزراعي، خاصة في المناطق ذات الموارد المحدودة، سيُبنى على القدرة على قراءة الأرض من السماء، وتفسير نبضها من خلال البيانات، والعمل وفق رؤى تستند إلى العلم والتكنولوجيا.

9. المراجع

Adamchuk, V. I., Hummel, J. W., Morgan, M. T., & Upadhyaya, S. K. (2011). On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44(1), 71-91.

Adamchuk, V. I., Hummel, J. W., Morgan, M. T., & Upadhyaya, S. K. (2011). On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44(1), 71–91.

Al Shamsi, K., *et al*. (2021). Smart farming solutions in the UAE: Water saving and yield improvement. *Sustainability*, 13(9), 4823.

Al Shamsi, K., *et al*. (2021). Smart fertilization systems for enhancing crop productivity in arid environments: A UAE case study. *Sustainability*, 13(9), 4823.

Al-Karaki, G., *et al*. (2021). Precision agriculture and resource optimization: A case study from Jordan. *Agricultural Systems*, 187, 103028.

Al-Khudair, B., & Al-Zahrani, S. (2020). Applications of drones in smart agriculture: A case study from the Gulf region. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 22(4), 567-578.

Al-Khudair, S., & Al-Zahrani, M. (2020). Drone Applications in Smart Agriculture: A Case Study from the Gulf Region. *Arab Journal of Agricultural Sciences*, 45(2), 113–126.

Bendig, J., Bolten, A., Bareth, G. (2015). Introducing a low-cost mini UAV for thermal- and multispectral-imaging. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1/W4, 121-128.

Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., & Bareth, G. (2015). Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. *Remote Sensing*, 6(11), 10395–10412.

Benmoussa, H., El Harti, A., & Choukr-Allah, R. (2017). Use of remote sensing and GIS tools for land degradation mapping: Case study from Morocco. *Journal of Environmental Management*, 196, 560–571.

Benmoussa, M., Boufaden, S., & Essahli, F. (2017). Application of GIS and Remote Sensing for Mapping Soil Degradation in Morocco. *Environmental Earth Sciences*, 76(8), 290.

Bouzid, Y., *et al*. (2022). Drone technology for olive grove pest management in Morocco. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 25, 100676.

Chatterjee, R., Naskar, M., & Mandal, U. K. (2020). Application of Remote Sensing and GIS in Site-Specific Nutrient Management in India. *Agricultural Reviews*, 41(1), 21–29.

Chatterjee, R., Naskar, M., & Mandal, U. K. (2020). Application of Precision Agriculture Techniques in Rice Cultivation: A Case Study from Karnataka, India. *Agricultural Reviews*, 41(3), 221–228.

Das, A., Behera, M. D., & Kumar, R. (2019). Remote sensing and GIS applications in soil quality mapping: A review. *Soil & Tillage Research*, 196, 104386.

Das, B. S., Hossain, M., & Sudharsan, D. (2019). Application of remote sensing in precision agriculture: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(2), 1391–1402.

El-Ghamry, A. A., *et al*. (2020). Monitoring soil salinity in the Nile Delta using remote sensing techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 574.

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828-831.

Hassanein, A., El-Ghannam, A., & Mostafa, M. (2019). Impact of UAV and GIS technologies on pest management in cotton crops in Egypt. *International Journal of Precision Agriculture*, 5(3), 101-110.

Hassanein, M., AbdelRahman, M., & El-Khawaga, H. (2019). GIS and UAV-based monitoring for integrated pest management in cotton fields in Egypt. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 22(1), 55–62.

Johnson, L., *et al*. (2019). Impact of precision agriculture on corn yield and profitability in Canada. *Precision Agriculture*, 20, 847–859.

Jones, A., Williams, T., & Baker, L. (2021). Integration of AI in precision agriculture: Insights from Midwestern US farms. *Agricultural Systems*, 190, 103124.

Jones, D., Smith, L., & Johnson, M. (2021). Integration of AI and drone technology for precision agriculture: A US farm study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 185, 106139.

McBratney, A. B., Santos, M. L. M., & Minasny, B. (2005). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1–2), 3–52.

Ministry of Climate Change and Environment UAE. (2021). *Smart Farm Initiative in Fujairah: Final Technical Report*. Dubai: MOCCAE Publications.

Robert, P. C., *et al*. (2019). GIS applications in soil fertility management: Case study from Iowa. *Journal of Soil and Water Conservation*, 74(3), 255–265.

Robert, P. C., *et al*. (2019). GIS-based variable rate fertilization for precision agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 74(3), 255–265.

Royal Commission for AlUla. (2023). *Smart Oasis Rehabilitation Project: Sustainability and Innovation Report*. AlUla: RCU

Saudi Agricultural Development Fund. (2022). *Precision Agriculture Adoption in Al-Jouf: Technical and Economic Evaluation*. Riyadh: ADF Reports.

Smith, D. R., *et al*. (2020). Nitrogen sensor-based fertilization management in Australian cropping systems. *Agricultural Water Management*, 234, 106133.

Sudduth, K. A., Drummond, S. T., & Kitchen, N. R. (2015). Accuracy issues in remote sensing for precision agriculture. *International Journal of Remote Sensing*, 36(9), 2421–2445.

Sudduth, K. A., Hummel, J. W., & Kitchen, N. R. (2015). Precision agriculture: Application and research opportunities. *Advances in Agronomy*, 105, 1-51.

Van der Wal, T., Bakker, M., & Janssen, H. (2018). Precision nutrient management in Dutch agriculture: Impacts and opportunities. *Agricultural Systems*, 167, 134-142.

Van der Wal, T., Koene, R., & Hoving, I. (2018). Smart fertilization systems in Dutch precision farms: Reducing inputs and boosting quality. *European Journal of Agronomy*, 97, 83–91.

Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13, 693–712.

Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2-3), 113-132.

الفصل 24 - إدارة الآفات والأمراض الزراعية رقمياً

المحتويات

1. المقدمة
2. التحديات التقليدية في مكافحة الآفات
3. نظم الإنذار المبكر واكتشاف الآفات عبر الذكاء الاصطناعي
4. تقنيات التصوير الحراري والطيفي
5. استخدام تطبيقات الموبايل في التشخيص
6. إدارة متكاملة للآفات عبر المنصات الرقمية
7. ممارسات ناجحة في مكافحة الآفات بالتكنولوجيا
8. الخاتمة
9. المراجع

1. المقدمة

تمثل الآفات والأمراض الزراعية أحد أخطر التحديات التي تواجه الإنتاج الزراعي في مختلف أنحاء العالم، إذ تؤدي إلى خسائر كبيرة في المحاصيل وتؤثر بشكل مباشر على الأمن الغذائي وسلامة السلاسل الزراعية. وتشير تقارير منظمة الأغذية والزراعة (FAO)إلى أن ما بين 20 إلى 40% من الإنتاج الزراعي العالمي يُفقد سنوياً نتيجة الإصابة بالآفات والأمراض النباتية .(Oerke, 2006) وتتفاقم هذه التحديات في ظل التغيرات المناخية المتسارعة، التي تُسهم في توسع النطاق الجغرافي للعديد من الآفات، وظهور سلالات جديدة أكثر شراسة ومقاومة للمبيدات.

في هذا السياق، بدأت الزراعة الحديثة تشهد تحولاً جوهرياً في كيفية إدارة هذه المخاطر، حيث أصبح من الضروري توظيف تقنيات رقمية متقدمة قادرة على مراقبة البيئة الزراعية بدقة، والكشف المبكر عن التهديدات، وتقديم حلول ذكية مستندة إلى البيانات. برزت الإدارة الرقمية للآفات والأمراض كأحد التطبيقات الرائدة في مجال الزراعة الذكية (Smart Agriculture)، إذ تعتمد على مجموعة من الأدوات المتقدمة مثل

الذكاء الاصطناعي (AI)، وتقنيات الاستشعار عن بعد (Remote Sensing)، وإنترنت الأشياء الزراعي (Agri-IoT)، والنماذج التنبؤية، إلى جانب تطبيقات الهواتف الذكية.

هذه المنظومة الرقمية تمكّن المزارعين من تشخيص الإصابات في مراحلها المبكرة، ورصد أنماط انتشار الآفات بدقة مكانية وزمانية عالية، مما يقلل من استخدام المبيدات الكيميائية ويعزز من كفاءة إدارة الموارد. كما توفر البيانات الناتجة عن هذه الأنظمة فرصاً لصياغة قرارات مدروسة بناءً على معلومات فورية (real-time data)، ما ينعكس إيجاباً على الإنتاجية، وجودة المحاصيل، وصحة التربة والبيئة.

بالتالي، لا تمثل الرقمنة مجرد أداة تكنولوجية، بل تشكل نقلة نوعية نحو زراعة مستدامة وعالية الكفاءة، تستجيب للتحديات المعقدة التي يفرضها العالم المعاصر، وتعزز من مرونة النظم الزراعية في وجه التغيرات البيئية والاقتصادية والاجتماعية.

2. التحديات التقليدية في مكافحة الآفات

على الرغم من التطورات التي شهدها القطاع الزراعي خلال العقود الماضية، لا تزال العديد من الأنظمة الزراعية في الدول النامية تعتمد على وسائل تقليدية في مكافحة الآفات والأمراض، تعتمد بالدرجة الأولى على الاستخدام المكثف للمبيدات الكيميائية (Pimentel, 2005). ورغم فاعلية هذه المواد في القضاء السريع على الحشرات والأمراض، إلا أن الاستخدام العشوائي والمفرط لها أسفر عن جملة من الآثار السلبية الخطيرة، من أبرزها:

- تراكم المخلفات الكيميائية في البيئة، خاصة في التربة ومصادر المياه، ما يؤدي إلى تدهور النظم البيئية الزراعية.
- تطور مقاومة لدى الحشرات تجاه المبيدات، وهو ما يقلل من فاعلية المكافحة بمرور الوقت، ويزيد من صعوبة السيطرة على التفشي المستقبلي.

- تأثيرات صحية على الإنسان والحيوان، سواء من خلال التلامس المباشر أو من خلال بقايا المبيدات في المنتجات الزراعية.
- قتل الأعداء الحيوية والكائنات النافعة مثل المفترسات والطفيليات الطبيعية، مما يخل بالتوازن البيئي ويزيد من اعتماد المزارع على الحلول الكيميائية.

بالإضافة إلى ذلك، تُعد المراقبة اليدوية والتشخيص التقليدي من الوسائل غير الدقيقة والتي تعتمد في كثير من الأحيان على خبرة شخصية أو بصرية، ما يجعلها عرضة للأخطاء. وغالباً ما يتأخر اكتشاف الإصابة حتى مراحل متقدمة، تكون فيها الخسائر قد بدأت فعلاً بالتراكم. كما أن قلة التوثيق الرقمي للمعلومات والملاحظات الميدانية تؤدي إلى فقدان فرص تحليل الاتجاهات والتخطيط الاستباقي.

يضاف إلى ما سبق أن نقص الكوادر المؤهلة في مجالات تشخيص الأمراض النباتية، وغياب قاعدة بيانات شاملة وموحدة على مستوى العديد من المناطق الزراعية، يشكلان عقبة أمام تطوير خطط فعالة للمكافحة.

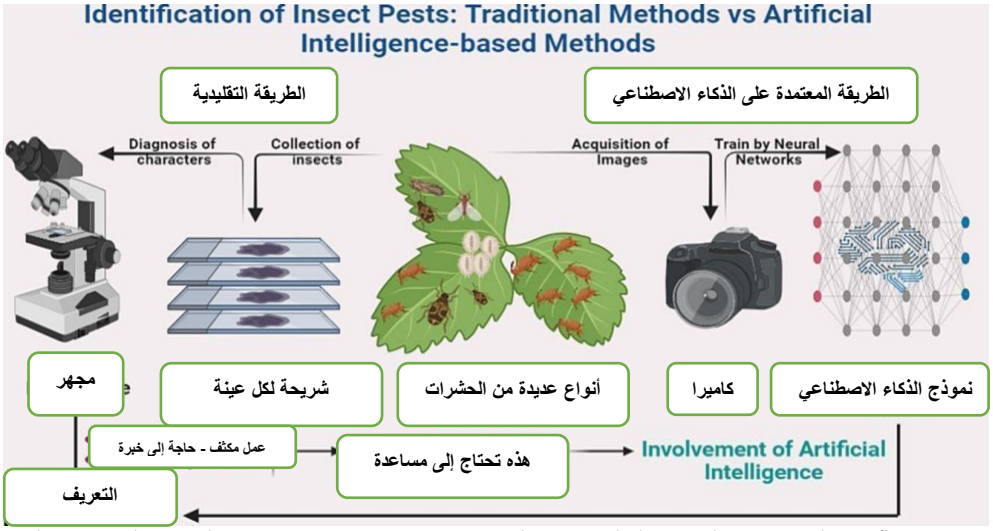
لذا، فإن التحول من هذه الأنماط التقليدية إلى أنظمة رقمية متكاملة لم يعد خياراً ترفياً، بل أصبح ضرورة ملحّة لتمكين المزارعين والجهات المختصة من اتخاذ قرارات مبنية على بيانات دقيقة، بما يعزز من الكفاءة الإنتاجية ويحد من الأضرار البيئية والصحية الناجمة عن الأساليب العشوائية.

3. نظم الإنذار المبكر واكتشاف الآفات عبر الذكاء الاصطناعي

يشهد مجال الزراعة الذكية تطوراً لافتاً في استخدام الذكاء الاصطناعي (AI) ضمن أنظمة الإنذار المبكر للكشف عن الآفات والأمراض الزراعية (Kamilaris and Prenafeta-Boldú, 2018). تُعد هذه النظم أحد أهم الإنجازات الرقمية الحديثة في إدارة المخاطر البيولوجية التي تهدد الإنتاج الزراعي، حيث توفر أدوات قوية للتنبؤ الدقيق، والمراقبة الاستباقية، وتخطيط التدخلات الوقائية بشكل فعال.

تعتمد هذه الأنظمة على دمج بيانات متعددة المصادر تشمل العوامل الجوية (درجة الحرارة، الرطوبة النسبية، سرعة واتجاه الرياح)، وبيانات التربة (الرطوبة، الملوحة، درجة الحموضة)، وسجلات الإصابات السابقة، وصور الأقمار الصناعية، بالإضافة إلى معلومات من الحقول تُجمع بواسطة شبكة من الحساسات وأجهزة الاستشعار الذكية. وتُحلل هذه البيانات الضخمة باستخدام خوارزميات تعلم الآلة (Machine Learning)، والنماذج التنبؤية، التي تستطيع استنتاج أنماط معينة تشير إلى احتمالية ظهور إصابة أو تفشي آفة في فترة زمنية محددة وموقع جغرافي معين.

تكمن قوة هذه النظم في قدرتها على التحليل الزمني والمكاني الديناميكي للبيانات، مما يمكّن المزارعين من الانتقال من النمط التفاعلي (بعد حدوث الإصابة) إلى نمط استباقي ووقائي، يسمح لهم بالتحكم بالمخاطر قبل أن تتفاقم.



تعريف الآفات الحشرية: الطرق التقليدية في الكشف عن الإصابة مقارنة من الطرق المعتمدة على الذكاء الاصطناعي (عن: Chakrabarty, *et al.,* 2025)

فعلى سبيل المثال، في مصر، طور باحثون نظام إنذار مبكر باستخدام الذكاء الاصطناعي لرصد انتشار الذبابة البيضاء (*Bemisia tabaci*)، التي تُعد من الآفات الخطيرة التي تصيب محاصيل الخضر مثل الطماطم والخيار. اعتمد النظام على بيانات

من محطات مناخية وحساسات ميدانية وتحليل نمط الانتشار التاريخي للآفة، وتمكّن من التنبؤ بدقة وصلت إلى 90% بموعد الذروة المحتملة للانتشار. النتيجة كانت تقليل استخدام المبيدات بنسبة 30%، وخفض التكاليف التشغيلية للمزارعين بشكل ملحوظ، فضلاً عن حماية البيئة وتقليل الأثر السلبي للرش العشوائي (El-Wakeel *et al*., 2021).

مثل هذه النماذج لم تعد محصورة في البحث العلمي فحسب، بل بدأت تدخل نطاق الاستخدام التجاري والحقلي عبر المنصات الرقمية الزراعية، وتكاملها مع تطبيقات الهاتف الذكي، مما يُسهّل الوصول إلى تقارير فورية وتوصيات ميدانية دقيقة.

4. تقنيات التصوير الحراري والطيفي

تُعتبر تقنيات التصوير الطيفي (Hyperspectral Imaging) والحراري (Thermal Imaging) من أدوات التحليل المتقدمة في الزراعة الرقمية، حيث توفر وسائل غير تقليدية لرصد التغيرات الفسيولوجية للنباتات قبل ظهور الأعراض الظاهرة للعين البشرية (Mahlein, 2016)، مما يسمح بالتدخل المبكر والفعال في مكافحة الأمراض والآفات.

تعتمد هذه التقنيات على مبدأ أن النبات المصاب يُظهر تغيرات فسيولوجية (مثل انخفاض معدلات التمثيل الضوئي، أو تغير محتوى الماء، أو ارتفاع درجة حرارة الأوراق) قبل ظهور أي أعراض خارجية. وبفضل أجهزة الاستشعار المحمولة على الطائرات بدون طيار (Drones) أو الأقمار الصناعية، يمكن التقاط صور عالية الدقة للمزارع وتحديد المناطق التي تُظهر اختلافات طيفية أو حرارية غير طبيعية.

- **التصوير الطيفي** يمكنه التفريق بين أطوال موجية متعددة تعكسها النباتات، ويُستخدم لتحليل نسب الكلوروفيل والنيتروجين، وتحديد بقع الإصابة بدقة.

- **التصوير الحراري** يستخدم لتقدير درجة حرارة أوراق النبات، إذ ترتفع حرارة النبات المصاب بسبب اضطراب آليات التبخر والتنفس، مما يعطي إنذاراً مبكراً بوجود خلل.

في الهند، أظهرت دراسة ميدانية استخدام **الدرونز المزوّدة بكاميرات طيفية** لرصد مرض الذبول (Wilt) في محصول القطن. وسمحت التقنية بالكشف عن المناطق المصابة في مرحلة مبكرة قبل أن تنتشر العدوى، مما مكن المزارعين من التدخل السريع في تلك البقع فقط، ونتج عن ذلك انخفاض ملحوظ في نسبة الخسائر الزراعية وزيادة الكفاءة في استخدام المبيدات (Singh *et al*., 2020) .

كما تُستخدم هذه التقنيات في مشاريع كبيرة مثل مراقبة كروم العنب، وبساتين التفاح، وحقول الحبوب في أوروبا والولايات المتحدة، وهي أدوات مثالية في الزراعة الدقيقة (Precision Agriculture) التي تعتمد على تخصيص المعالجات لكل جزء من الحقل بدلاً من التعامل معه كوحدة واحدة.

النتيجة الأبرز لاستخدام هذه التقنيات تتمثل في:

- تقليل التكاليف التشغيلية عبر استهداف المواقع المصابة فقط.
- خفض الاعتماد على الفحص اليدوي المكثف.
- تقليل استخدام المبيدات وتعزيز الاستدامة البيئية.

5. استخدام تطبيقات الموبايل في التشخيص

شهدت السنوات الأخيرة طفرة كبيرة في استخدام الهواتف الذكية كتقنيات تشخيص ميدانية في الزراعة، مدفوعة بتطور تقنيات الذكاء الاصطناعي وتوسّع التغطية بالإنترنت حتى في المناطق الريفية. وأصبح بإمكان المزارعين في مناطق نائية تشخيص الأمراض النباتية والآفات عبر تطبيقات موبايل تفاعلية تعتمد على تحليل الصور ومعالجة البيانات آنياً.

تعتمد هذه التطبيقات بشكل أساسي على تقنيات الرؤية الحاسوبية (Computer Vision) وخوارزميات التعلم العميق (Deep Learning)، التي تُدرّب على مئات أو آلاف الصور المصنفة لأعراض الأمراض والآفات. وعند قيام المستخدم برفع صورة لنبتة مصابة، يقارن التطبيق الصورة بالقاعدة البيانية، ويُقدّم تشخيصاً فورياً مدعوماً بنسب احتمالية، بالإضافة إلى توصيات علاجية وإرشادات للوقاية.

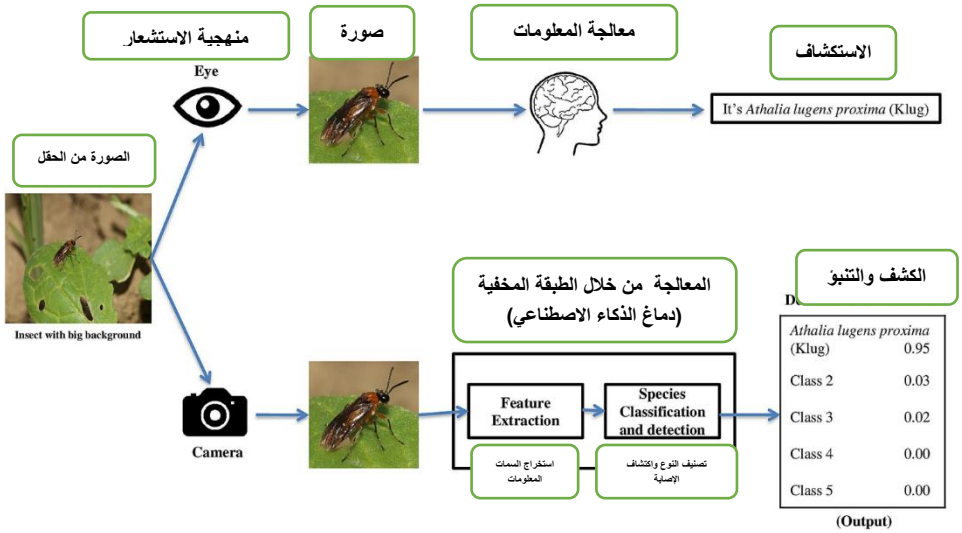
من أبرز مميزات هذه التطبيقات:

- السهولة وسرعة الوصول، حيث يمكن للمزارع استخدام هاتفه الذكي في أي وقت دون الحاجة إلى معدات متخصصة أو استشاريين ميدانيين.
- توفير تكاليف التشخيص المخبري، خصوصاً في المناطق النائية أو منخفضة الدخل.
- بناء قواعد بيانات متجددة للأمراض والآفات حسب الموقع الجغرافي والظروف المناخية، ما يسهم في تطوير نظم إنذار مبكر مجتمعية.

في الأردن، طُوّر تطبيق محلي متخصص لتشخيص أمراض شجرة الزيتون باستخدام تقنيات تحليل الصور، وهو من المحاصيل الاستراتيجية في البلاد. وقد مكّن التطبيق المزارعين من رصد أمراض مثل عين الطاووس، وموت القمم، وبقع الأوراق بشكل سريع ودقيق. ووفقاً لدراسة ميدانية، ساهم استخدام التطبيق في خفض معدلات الإصابة بنسبة 25 %وتحسين جودة الزيت الناتج، مما انعكس على العائد الاقتصادي (Al-Qur'an *et al*., 2019).

وعلى الصعيد العالمي، تنتشر تطبيقات مثل Plantix و Agrobase و PlantVillage Nuru، التي تغطي عشرات المحاصيل وتقدم واجهات متعددة اللغات

وتوصيات زراعية مرتبطة بالمناخ والموقع الجغرافي. تطبيق PlantVillage، على سبيل المثال، يستخدم الذكاء الاصطناعي لتشخيص أكثر من 50 مرضاً نباتياً، ويخدم ملايين المستخدمين في إفريقيا وآسيا وأمريكا اللاتينية. ويظهر الشكل التالي نظام الإنذار المبكر واكتشاف الحافات عبر الذكاء الاصطناعي.



نظام الإنذار المبكر واكتشاف الآفات عبر الذكاء الاصطناعي
(عن: Chakrabarty, *et al,* 2025)

كما تُعد هذه التطبيقات أدوات ممتازة لتوسيع مشاركة النساء والشباب في الزراعة، من خلال توفير المعرفة والخبرة التقنية بطرق مرئية وتفاعلية يسهل تعلمها وتطبيقها.

6. إدارة متكاملة للآفات عبر المنصات الرقمية

تُعد الإدارة المتكاملة للآفات (IPM: Integrated Pest Management) منهجاً شاملاً يجمع بين الأساليب الوقائية والميكانيكية والحيوية والكيميائية لمكافحة الآفات بطريقة مستدامة وصديقة للبيئة. ومع التحول الرقمي في الزراعة، أصبحت المنصات الرقمية أداة مركزية في دعم تطبيق هذا النهج عبر توحيد وتحليل وتوزيع المعلومات الزراعية المتعلقة بالآفات.

تعمل هذه المنصات كنظم متكاملة تتضمن:

- جمع بيانات من الأقمار الصناعية، الحساسات الأرضية، الطائرات بدون طيار، وتطبيقات الموبايل.
- تحليل هذه البيانات باستخدام أدوات الذكاء الاصطناعي والنماذج الرياضية.
- تقديم توصيات مخصصة حسب موقع المزرعة، نوع المحصول، والتنبؤ المناخي المحلي.
- تسهيل التعاون والتواصل بين المزارعين، الباحثين، شركات التكنولوجيا، وصناع القرار.

واحدة من المنصات العالمية الرائدة في هذا المجال هي "Climate FieldView"، التي توفر للمزارعين واجهة سهلة الاستخدام لمراقبة ظروف الحقول وتلقي توصيات فورية حول مواعيد الرش، واختيار نوع المبيد، ومراقبة فعالية التدخلات. تجمع المنصة بيانات من أجهزة ميدانية، خرائط مناخية، ومستشعرات مرتبطة بالنباتات والتربة، ما يُعزز الدقة في اتخاذ القرار الزراعي. ووفقاً لتقارير شركة Bayer، فإن استخدام هذه المنصة أدى إلى تقليل استخدام المبيدات بنسبة تصل إلى 20% في بعض الحقول التجريبية، مع تحسين الإنتاجية بنسبة ملحوظة (Climate FieldView, 2022).

إضافة إلى ذلك، توفر المنصات الرقمية أدوات للتخطيط التعاوني، حيث يمكن للمجتمعات الزراعية أو جمعيات المزارعين العمل بشكل منسق في مراقبة تفشي الآفات على مستوى الأقاليم، وتوحيد الجهود في المكافحة، مما يعزز من الأثر الجماعي ويقلل من احتمالية تفشي الأمراض بين الحقول المجاورة.

كما أن هذه المنصات تتيح التكامل مع سلاسل التوريد الزراعي من خلال تسجيل بيانات الإنتاج وظروف الزراعة، ما يُسهّل على شركات التوزيع والمستهلكين تتبع سلامة المنتجات من المزرعة إلى السوق، وهو أمر بالغ الأهمية في سياق الزراعة المستدامة وسلامة الغذاء.

7. ممارسات ناجحة في مكافحة الآفات بالتكنولوجيا

بدأت العديد من الدول حول العالم في تبنّي حلول تقنية مبتكرة لمكافحة الآفات الزراعية، مما أدى إلى نتائج ملموسة على مستوى تقليل الخسائر، رفع كفاءة الاستخدام، وتحقيق استدامة بيئية. وتوفر هذه الممارسات نماذج قابلة للتكرار والتكيف حسب الخصوصية البيئية والزراعية لكل منطقة.

- **دولة الإمارات العربية المتحدة:**

في ظل ما تمثله شجرة النخيل من رمزية ثقافية واقتصادية في دولة الإمارات، أولت الجهات البحثية والحكومية اهتماماً كبيراً بحمايتها من الآفات، خصوصاً آفة سوسة النخيل الحمراء. تم تطوير نظام رصد ذكي بالتعاون بين الجامعات الوطنية ومراكز البحوث، يعتمد على:

- شبكات من الحساسات الدقيقة المثبتة في جذوع النخيل والمحيط الزراعي، لرصد مؤشرات النشاط الحشري والتغيرات في بيئة النخيل.
- تحليل البيانات اللحظية عبر خوارزميات متقدمة تكتشف سلوكيات غير طبيعية مثل الحركة الزائدة أو ترددات صوتية داخل جذوع النخيل.
- إشعارات فورية للمزارعين عبر تطبيقات محمولة أو لوحات تحكم رقمية.

وقد أدى هذا النظام إلى خفض خسائر النخيل بنسبة 25 %خلال فترة ثلاث سنوات، مع تقليل التدخلات الكيميائية وتعزيز الكفاءة التشغيلية (Al-Mahmoud *et al*., 2020) . كما ساهم في بناء نموذج وطني للإدارة المستدامة للآفات في زراعة النخيل يمكن تعميمه على مناطق أخرى ذات المناخ الصحراوي.

الولايات المتحدة الأمريكية:

في مزارع الذرة وفول الصويا بكاليفورنيا وأيوا، تم تطبيق أنظمة زراعية متقدمة تستخدم طائرات روبوتية (drone swarms) مزوّدة بكاميرات متعددة الأطياف

وأجهزة رش دقيقة، يتم توجيهها تلقائياً نحو البقع المصابة فقط استناداً إلى بيانات تحليل الصور الطيفية والتصوير الحراري.

هذه المنظومة تمكّنت من:

- تقليل كمية المبيدات المستخدمة بنسبة 40%.
- تقليص التأثير البيئي الناتج عن الرش العشوائي، لا سيما على الكائنات النافعة.
- تقليل استهلاك الوقود ووقت العمل البشري في الفحص والرش اليدوي. (Zhang *et al.*, 2019).

ممارسات أخرى جديرة بالذكر:

- **الهند** :استخدام تطبيقات تعتمد على الذكاء الاصطناعي لمراقبة دودة الحشد الخريفية في الذرة، ما أدى إلى خفض وقت الاستجابة بنسبة 50.%
- **كينيا** :تجربة تطبيق PlantVillage Nuru بين مزارعي البطاطا، حيث ساعد في كشف مبكر لمرض اللفحة المتأخرة، وتحسين إنتاجية الحقول بنسبة 20.%

تؤكد هذه التجارب أن التكامل بين التكنولوجيا والمعرفة المحلية هو مفتاح نجاح إدارة الآفات بطريقة ذكية ومستدامة.

8. الخاتمة

لقد أحدثت التقنيات الرقمية تحوّلاً جذرياً في الطريقة التي تُدار بها الآفات والأمراض الزراعية، حيث وفّرت بديلاً ذكياً ومستداماً للأساليب التقليدية التي لطالما اعتمدت على التدخلات الكيميائية المكثفة والتشخيص اليدوي. من الذكاء الاصطناعي الذي يتنبأ بموجات التفشي، إلى الطائرات الذكية التي ترش بدقة، والتطبيقات المحمولة التي تشخّص الإصابة في لحظتها، أصبح من الممكن للمزارع أن يتّخذ قرارات دقيقة وفي وقت قياسي.

لا تقتصر فوائد هذه التحوّلات على تقليل الخسائر وتحسين الإنتاجية فحسب، بل تشمل أيضاً:

- تعزيز الاستدامة البيئية من خلال تقليل استخدام المبيدات والموارد المائية.
- تحسين صحة المستهلك عبر تقليل متبقيات المبيدات في الغذاء.
- توفير فرص جديدة للشباب ورواد الأعمال الزراعيين عبر تطوير تطبيقات ومنصات رقمية.

ومع التطور المتسارع في قدرات الذكاء الاصطناعي، وازدياد انتشار شبكات الاتصال عالية السرعة، من المتوقع أن تُصبح الإدارة الرقمية للآفات جزءاً أساسياً من منظومة الزراعة الذكية، لا سيما في ظل الحاجة الملحّة لمضاعفة الإنتاج الغذائي العالمي بطريقة تتواءم مع تحديات المناخ، وندرة الموارد، وتنامي الطلب السكاني.

إن مستقبل الزراعة الحديثة لن يُبنى فقط على التربة والماء، بل أيضاً على البيانات والمعرفة الرقمية، مما يستدعي الاستثمار في البنية التحتية الرقمية، وتدريب المزارعين، وتعزيز الشراكات بين القطاعين العام والخاص لتحقيق أمن غذائي مستدام وشامل.

9. المراجع

Al-Mahmoud, A., Al-Jahwari, A., & Al-Farsi, S. (2020). Smart pest monitoring system for date palm cultivation in UAE. *International Journal of Agricultural Technology*, 16(3), 497–512.

Chakrabarty, S. et al. (2025) Application of artificial intelligence in insect pest identification - A review. In Press, Journal Pre-proof

Climate FieldView. (2022). Digital agriculture platform overview. Retrieved from https://climatefieldview.com/

El-Wakeel, S. T., El-Sherif, A., & El-Afandy, H. (2021). AI-based pest detection system for vegetable crops in Egypt. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 99(1), 27–39.

Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70–90.

Mahlein, A.-K. (2016). Plant disease detection by imaging sensors – parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant Disease*, 100(2), 241–251.

Mohanty, S. P., Hughes, D. P., & Salathé, M. (2016). Using deep learning for image-based plant disease detection. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1419.

Oerke, E.-C. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31–43.

Parsa, S., Morse, S., Bonifacio, A., Chancellor, T. C. B., Condori, B., Crespo-Pérez, V., ... & Pineda, M. (2014). Obstacles to integrated pest management adoption in developing countries. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(10), 3889–3894.

Singh, R., Kumar, P., & Sinha, M. (2020). UAV based multispectral imaging for early detection of cotton wilt disease. *Computers and Electronics in Agriculture*, 174, 105456.

Zhang, Q., Zhang, W., & Huang, Y. (2019). Precision pesticide application using unmanned aerial vehicles. *Journal of Field Robotics*, 36(8), 1374–1386.

الفصل 25 - سلاسل الإمداد الذكية واللوجستيات الزراعية

المحتويات

1. المقدمة
2. مفاهيم أساسية في سلسلة الإمداد الزراعي
3. الرقمنة في التوريد والتوزيع والتخزين
4. تتبع المنتجات من المزرعة إلى المستهلك (Blockchain)
5. حلول ذكية لتقليل الفاقد والتلف
6. المنصات الرقمية في التسويق الزراعي
7. تحديات التحول الرقمي في اللوجستيات الزراعية
8. الخاتمة
9. المراجع

1. المقدمة

تعتبر سلاسل الإمداد واللوجستيات أحد الأعمدة الأساسية للزراعة الحديثة، حيث ترتبط بشكل مباشر بفعالية وصول المنتجات الزراعية إلى المستهلكين وجودتها في السوق. تواجه سلاسل الإمداد الزراعية تحديات معقدة مثل فساد المنتجات الطازجة، الفاقد أثناء النقل والتخزين، والاختلافات في الطلب والعرض الموسمي. ومع تطور التكنولوجيا الرقمية، أصبح من الممكن تطبيق حلول ذكية تسهم في زيادة كفاءة هذه السلاسل وتقليل الهدر، وتحقيق شفافية أفضل عبر جميع مراحل الإنتاج والتوزيع (Kumar *et al.*, 2021).

2. مفاهيم أساسية في سلسلة الإمداد الزراعي

تشير سلسلة الإمداد الزراعي إلى النظام المتكامل الذي يشمل جميع الأنشطة والعمليات التي تبدأ من الإنتاج الزراعي وحتى وصول المنتج إلى المستهلك النهائي. وتتضمن هذه السلسلة عدة مراحل رئيسية تشمل: إنتاج المدخلات الزراعية (مثل البذور

والأسمدة)، الزراعة، الحصاد، النقل، التخزين، المعالجة، التعبئة، التوزيع، والبيع. لكل مرحلة من هذه المراحل دور حيوي في ضمان جودة وكفاءة المنتج النهائي (Aung and Chang, 2014).

- **أهمية سلسلة الإمداد الزراعي:**

تعتبر سلسلة الإمداد الزراعي ركيزة أساسية في القطاع الزراعي الحديث، إذ تمثل شبكة معقدة من العمليات التي تربط المزارع بالأسواق والمستهلكين. يمكن من خلالها ضمان توفير منتجات زراعية ذات جودة عالية وفي الوقت المناسب، مما يساهم في تحقيق الأمن الغذائي العالمي. دعونا نستعرض أهميتها بشكل أوسع:

- **تحسين الكفاءة وتقليل الفاقد:**

تتمثل إحدى الفوائد الكبرى لسلسلة الإمداد الزراعي الفعالة في قدرتها على تقليل الفاقد والتلف الغذائي، وهو ما يعد تحدياً عالمياً كبيراً. يعد الفاقد من الغذاء، خاصة للمنتجات الطازجة مثل الخضروات والفواكه، أحد أكبر مصادر الهدر في القطاع الزراعي. إن وجود نظام سلس وفعال يسمح بنقل هذه المنتجات بسرعة وتخزينها بالشكل المناسب يمكن أن يحد من الفاقد بنسبة كبيرة. فمن خلال استخدام تقنيات النقل والتخزين المتطورة، مثل التحكّم في درجات الحرارة والرطوبة أثناء عملية النقل والتخزين، يمكن المحافظة على نضارة المنتجات لأطول فترة ممكنة.

الدراسات أظهرت أن تطبيق هذه الحلول يمكن أن يسهم في تقليل الفاقد بشكل يصل إلى 30-50% في بعض الأسواق (Wang *et al.*, 2019)، مما يعزز من كفاءة استغلال الموارد الزراعية ويحقق مزايا اقتصادية كبيرة.

- **ضمان الجودة والشفافية**

في عصرنا الحديث، بات ضمان جودة المنتجات الزراعية أمراً بالغ الأهمية، وهو لا يقتصر فقط على المزارعين أو الموردين، بل يمتد إلى كل مرحلة من مراحل

سلسلة الإمداد. يُمكن من خلال تقنيات التتبع الرقمي، مثل الرموز الشريطية أو التقنيات المعتمدة على السحابة، ضمان أن المنتجات الزراعية تصل إلى المستهلكين بنفس المعايير التي تم إنتاجها بها.

يتم من خلال هذه التقنيات تتبع المنتج عبر جميع مراحل السلسلة، بدءاً من المزرعة، مروراً بعملية النقل، وصولاً إلى المتاجر أو المنازل. علاوة على ذلك، يمكن مراقبة جميع الظروف التي قد تؤثر على الجودة مثل التقلبات في درجات الحرارة أو الظروف البيئية. كما تساعد هذه التقنيات في تعزيز الشفافية حيث يستطيع المستهلكون معرفة تاريخ ومصدر المنتج الذي يشترونه. كلما زادت الشفافية في السلسلة، زادت ثقة المستهلك في المنتج مما يعزز الطلب (Kamilaris *et al*., 2019). هذه الثقة تعتبر عاملاً أساسياً لتحفيز الأسواق المحلية والعالمية على قبول المنتجات الزراعية.

- **الاستجابة للطلب السوقي**

إن القدرة على التنبؤ بالطلب والتحكم في الإنتاج بما يتناسب مع احتياجات السوق تعد ميزة تنافسية هائلة في عالم التجارة الزراعية المعاصر. بفضل البيانات الرقمية التي يتم جمعها وتحليلها باستخدام تقنيات مثل الذكاء الاصطناعي (AI) والتحليل المتقدم للبيانات، يمكن للمزارعين والموردين تحديد ما إذا كان عليهم زيادة الإنتاج أو تقليصه بناءً على الاتجاهات السوقية المتوقعة.

يتم ذلك من خلال التحليل الزمني للبيانات، التي تتيح التنبؤ بالطلب في فترات معينة من العام (مثل أعياد أو مواسم محددة)، مما يمكن السلسلة من ضبط حجم الإنتاج بما يتناسب مع الحاجة الفعلية. بذلك، يتم تقليل احتمالية حدوث زيادة مفرطة في الإنتاج أو نقص في المعروض، وهما الأمران اللذان يؤديان إلى الفاقد أو تضخم الأسعار.

أظهرت دراسات حديثة أن استخدام البيانات الرقمية في التنبؤ بالطلب وتنظيم الإنتاج أدى إلى زيادة الربحية وتقليل الهدر في العديد من الأسواق الزراعية العالمية (Kumar *et al*., 2021). يعد التكيف السريع مع تغيرات السوق أحد العوامل الأساسية التي تساهم في استدامة الإنتاج الزراعي.

خلاصة القول: إن سلسلة الإمداد الزراعي هي أكثر من مجرد عملية نقل المنتجات الزراعية من المزارع إلى الأسواق؛ إنها نظام متكامل يؤثر بشكل مباشر على الكفاءة الاقتصادية، ضمان الجودة، ومرونة التكيف مع التغيرات السوقية. تساهم التقنيات الحديثة في تقليص الهدر، تحسين الشفافية، وتحقيق التوازن بين العرض والطلب، ما يعزز من استدامة هذا القطاع الحيوي.

- **الهيكل التنظيمي لسلسلة الإمداد الزراعي:**

تنقسم سلسلة الإمداد الزراعي عادة إلى نوعين:

- **سلسلة إمداد تقليدية:** تعتمد على التوريدات اليدوية والتنسيق المحدود بين الأطراف، ما يؤدي إلى تأخيرات وفقدان بيانات (Singh *et al.*, 2021).
- **سلسلة إمداد ذكية:** تستخدم الأنظمة الرقمية، التحليلات المتقدمة، والذكاء الاصطناعي لزيادة التكامل، تقليل الأخطاء، وتحسين تدفق المعلومات والمنتجات (Wang *et al.*, 2020).

سلسلة الإمداد الزراعي هي شبكة معقدة تضم العديد من الأطراف المعنية، مثل المزارعين، الموردين، الموزعين، وتجار التجزئة. ويعتمد تنظيم هذه السلسلة على كيفية التنسيق بين هذه الأطراف، وكيفية استخدام التكنولوجيا لتسهيل العمليات وتحسين الكفاءة. عادةً ما تنقسم سلاسل الإمداد الزراعي إلى نوعين رئيسيين: التقليدية والذكية، ولكل منهما خصائصه واستخداماته في السياقات المختلفة.

سلسلة إمداد تقليدية

السلسلة التقليدية تعتمد بشكل كبير على التوريدات اليدوية، حيث يتم التنسيق بين الأطراف المختلفة عبر أساليب غير رقمية أو تقليدية، مثل الهاتف، البريد، أو حتى التفاهمات الشفهية (Singh *et al*., 2021). يعتمد هذا النوع من السلسلة على التنظيم اليدوي أو المراجعات الورقية، ما يساهم في زيادة فرص حدوث الأخطاء وتأخيرات في العمليات.

من العيوب الرئيسية لهذه السلسلة:

- **التأخيرات في نقل البيانات والمعلومات** بين الأطراف المختلفة. حيث يكون التنسيق بطيئاً، مما يؤدي إلى حدوث فجوات في التواصل وتزايد فرص حدوث أخطاء في تحديد الكميات أو الجودة.
- **فقدان البيانات**: في غياب الأنظمة الرقمية، قد تكون هناك صعوبة في تتبع المنتجات أو تخزين البيانات بطريقة منظمة. هذا قد يؤدي إلى مشاكل في التوثيق وتحديد المصدر في حالات الطوارئ أو التحقيقات.
- **ارتفاع التكاليف**: نظراً لعدم وجود أنظمة آلية، غالباً ما تكون التكاليف أعلى بسبب استخدام العمالة اليدوية وصعوبة التنسيق بين الأطراف المتعددة.

هذا النوع من السلسلة لا يوفر المرونة الكافية للتكيف مع التغيرات السريعة في السوق أو التحديات البيئية.

سلسلة إمداد ذكية

على النقيض من السلسلة التقليدية، تعتمد السلسلة الذكية على الأنظمة الرقمية والتحليلات المتقدمة لتوفير بيئة أكثر تكاملاً وفعالية. استخدام الذكاء الاصطناعي، الإنترنت للأشياء(IoT) ، والبيانات الكبيرة (Big Data) يعزز القدرة على تحسين التدفق المعلوماتي بين كافة الأطراف المعنية في السلسلة (Wang *et al.*, 2020).

المزايا الرئيسية لسلسلة الإمداد الذكية:

- **زيادة التكامل**: الأنظمة الرقمية تسمح بتكامل سلس بين المزارعين، الموزعين، والتجار، مما يسهل تبادل المعلومات بشكل أسرع وأكثر دقة.
- **تقليل الأخطاء البشرية**: من خلال استخدام الذكاء الاصطناعي والتنبؤ بالبيانات، يمكن تقليل الأخطاء المرتبطة بالإدخال اليدوي للبيانات وتحسين دقة التنبؤ بالطلب.
- **تحسين تدفق المعلومات**: يمكن استخدام الأجهزة الذكية لمراقبة وتحليل البيانات في الوقت الفعلي، مما يسهم في تقديم رؤى دقيقة حول حالة المنتجات (مثل درجة الحرارة، الرطوبة، أو تواريخ الحصاد) ويسهل اتخاذ القرارات بسرعة أكبر.
- **زيادة الكفاءة والمرونة**: الأنظمة الذكية تعزز من قدرة سلسلة الإمداد على التكيف مع التغيرات السريعة في السوق، مثل تقلبات الطلب أو تغيرات الأسعار، مما يقلل من الهدر ويزيد من الربحية.

إن اعتماد التقنيات المتقدمة يجعل السلسلة أكثر استدامة وتكيفاً مع التحديات المتزايدة، سواء كانت تغيرات المناخ أو التقلبات السوقية.

الاختلافات الجوهرية بين النوعين:

- في السلسلة التقليدية، يعتمد النظام على التواصل اليدوي والتنسيق البطيء، ما يؤدي إلى صعوبة في متابعة الطلبات وارتفاع التكاليف. بينما في السلسلة الذكية، يُعتمد على التحليلات الرقمية لتوفير عمليات أسرع وأقل تكلفة وأكثر دقة.

- السلسلة الذكية تتميز بمرونة أكبر في التعامل مع التغيرات المفاجئة في السوق أو الظروف البيئية، بينما السلسلة التقليدية قد تواجه صعوبة في التكيف مع هذه التغيرات.

إذن، يظهر أن الانتقال إلى سلاسل الإمداد الذكية يعتبر خطوة حيوية نحو تحسين الكفاءة والربحية في صناعة الزراعة، مع توفير مزايا كبيرة للمزارعين والمستهلكين على حد سواء (Wang *et al.*, 2020).

3. الرقمنة في التوريد والتوزيع والتخزين

يُعد تطبيق الرقمنة في مراحل التوريد والتوزيع والتخزين أحد أهم محركات تحسين سلاسل الإمداد الزراعية الحديثة. إذ تسمح الأنظمة الرقمية بمراقبة عمليات التخزين والنقل في الوقت الفعلي، وتحليل البيانات لتقليل الخسائر، وتحسين عملية اتخاذ القرار.

- **الرقمنة في التوريد:**

تشمل الرقمنة في التوريد استخدام منصات رقمية تتيح للمزارعين والموردين تقديم طلباتهم وجدولة عمليات التسليم بشكل إلكتروني، مما يقلل من تأخير الطلبات ويضمن توفر المدخلات الزراعية في الوقت المناسب. على سبيل المثال، في مصر تم إطلاق منصة رقمية لتوفير الأسمدة والبذور للمزارعين بشكل مباشر، مما حسن من كفاءة التوريد بنسبة 25% (Elshahed *et al.*, 2020).

- **الرقمنة في التوزيع:**

استخدام تطبيقات إدارة النقل الذكية GPS وأنظمة تتبع الشحنات عبر إنترنت الأشياء (IoT) ساعد في تحسين مراقبة حركة المنتجات الزراعية، والتقليل من تأخير الشحنات أو تلف المنتجات أثناء النقل. في دولة الإمارات، تعتمد شركات توزيع الخضروات الطازجة على أنظمة تتبع ذكية لتحديد مواقع الشحنات وضبط الظروف البيئية مثل درجة الحرارة داخل المركبات (Almansoori *et al.*, 2022).

- **الرقمنة في التخزين:**

التخزين الذكي يعتمد على أجهزة استشعار متصلة بشبكات الإنترنت لقياس ورصد عوامل البيئة مثل درجة الحرارة، الرطوبة، ومستويات ثاني أكسيد الكربون في المخازن، وإرسال تنبيهات عند وجود أي تغيرات قد تؤثر على جودة المنتج. على سبيل المثال، استخدمت شركة سعودية مستشعرات ذكية في مخازن الفواكه لتقليل تلف المنتجات بنسبة 18% خلال عام واحد (Al-Salem and Alqahtani, 2023).

- **تقنيات داعمة:**

  - **إنترنت الأشياء (IoT):** تمكّن من الربط بين الأجهزة المختلفة لجمع البيانات البيئية ومعالجتها في الوقت الحقيقي (Wang *et al.*, 2019).
  - **الحوسبة السحابية:** توفر مساحات تخزين ضخمة وتحليلات بيانات متقدمة لدعم اتخاذ القرار في التوريد والتخزين (Kumar *et al.*, 2021).
  - **الذكاء الاصطناعي:** يستخدم لتحليل البيانات الكبيرة المتولدة وتحسين التخطيط اللوجستي وتنبؤ الطلب (Kamilaris *et al.*, 2019).

أمثلة دولية وعربية:

- في الأردن، تعمل شركة AgriTech على توفير نظام ذكي لإدارة سلسلة التوريد الزراعية عبر تطبيقات موبايل تتيح للمزارعين تتبع منتجاتهم وضبط مواعيد التوصيل (Alghamdi *et al.*, 2021).
- في الولايات المتحدة، تعتمد سلاسل التوريد الزراعية على تقنيات البلوك تشين لضمان تتبع المنتجات الطازجة من المزرعة إلى السوبرماركت (Kamilaris *et al.*, 2019).

4. تتبع المنتجات من المزرعة إلى المستهلك

- **مفهوم تتبع المنتجات في سلسلة الإمداد الزراعي**

يعد تتبع المنتجات من المزرعة إلى المستهلك عملية أساسية في سلسلة الإمداد الزراعي المعاصرة، وهي تهدف إلى ضمان الشفافية والجودة في كل مرحلة يمر بها المنتج الزراعي، بدايةً من الحصاد وحتى وصوله إلى المستهلك النهائي. هذه العملية لا تقتصر على تتبع حركة المنتجات فحسب، بل تشمل جمع البيانات، تخزينها، ومشاركتها بطريقة آمنة وموثوقة، مما يسهم في تحسين الكفاءة وتقليل الفاقد والهدر. أصبح تتبع المنتجات في الزراعة أمراً بالغ الأهمية خاصة في سياق زيادة وعي المستهلكين بجودة الطعام وأصله، بالإضافة إلى التحديات البيئية والاقتصادية المتزايدة.

يعتمد هذا النظام على تقنيات متطورة تتيح جمع البيانات في الوقت الفعلي حول كل خطوة من خطوات سلسلة الإمداد، بدءاً من زراعة المحاصيل، مروراً بـ الحصاد، النقل، والتخزين، وصولاً إلى التوزيع والبيع .يتم تخزين هذه البيانات على منصات رقمية يمكن للأطراف المختلفة الاطلاع عليها ومراجعتها بسهولة، ما يسهم في تعزيز الثقة بين جميع المعنيين في السلسلة.

- **تقنية البلوك تشين في الزراعة**

تعتبر تقنية البلوك تشين أحد الحلول الحديثة التي تساهم بشكل كبير في تحسين تتبع المنتجات الزراعية .وهي تكنولوجيا تعتمد على توزيع البيانات عبر شبكة من الحواسيب المترابطة، بحيث يتم تسجيل كل معاملة أو خطوة يتم اتخاذها في سلسلة الإمداد بطريقة مشفرة، لا يمكن تعديلها أو التلاعب بها بعد تسجيلها. من خلال هذه التقنية، يمكن التأكد من أن البيانات مسجلة بشكل موثوق وآمن، مما يوفر مزيداً من الشفافية والموثوقية في العملية.

المزايا الرئيسية لتقنية البلوك تشين في الزراعة:

- **الشفافية الكاملة:** من خلال تقنية البلوك تشين، يمكن لجميع الأطراف المعنية في سلسلة الإمداد الزراعي (المزارعون، الموزعون، تجار الجملة، وحتى المستهلكين) الاطلاع على معلومات المنتج في الوقت الحقيقي. هذه الشفافية تُسهل متابعة كل مرحلة يمر بها المنتج وتؤكد على موثوقية الإجراءات المتخذة. إذا كان المنتج قد تم تخزينه في ظروف غير مناسبة أو تأخر في النقل، يمكن اكتشاف ذلك بسهولة.
- **الأمان ضد التلاعب:** أحد أهم خصائص البلوك تشين هو أن البيانات التي تم تسجيلها على الشبكة تكون مشفرة ولا يمكن تعديلها بمجرد إضافتها. هذا يضمن الأمان ضد التلاعب أو الاحتيال، حيث لا يستطيع أي طرف تغيير المعلومات أو إضافة بيانات كاذبة إلى السجل. بهذه الطريقة، يتم الحد من الممارسات غير القانونية مثل الاحتيال في توثيق المصدر أو تزوير المنتجات.
- **تحسين الثقة بين المنتج والمستهلك:** مع زيادة اهتمام المستهلكين بمعرفة أصل المنتج وجودته، توفر تقنية البلوك تشين وسيلة فعالة للمستهلكين للتحقق من مصدر المنتجات التي يشترونها. عبر تتبع مسار المنتج منذ زراعته وحتى وصوله إلى المتاجر، يمكن للمستهلكين الاطمئنان إلى أنه تم التعامل مع المنتج وفقاً للمعايير الصحيحة. كما أن القدرة على فحص المنتجات تجعل المستهلكين يشعرون بالثقة في أن ما يشترونه هو بالفعل ما يدعي البائع أنه هو.

تطبيقات عملية

استخدام تقنية البلوك تشين في الزراعة قد بدأ يكتسب زخماً في العديد من دول العالم. مثلاً، بعض الشركات الزراعية الكبرى بدأت بتطبيق البلوك تشين لتتبع سلسلة الإمداد الخاصة بها، من خلال إنشاء سجل رقمي يُظهر تفاصيل دقيقة عن المزارع، وقت الحصاد، أساليب المعالجة، وحتى تواريخ النقل والتوزيع.

كما يتم استخدام البلوك تشين أيضاً في مكافحة الاحتيال الغذائي، حيث يمكن تتبع المكونات المستخدمة في المنتجات العضوية أو المنتجات الزراعية التي يتم تصديرها إلى أسواق دولية، لضمان أن المنتج يتوافق مع معايير الجودة التي تتطلبها أسواق هذه الدول.

- في الإمارات، أطلقت شركة "دبي الذكية" مبادرة تعتمد على البلوك تشين لتتبع المنتجات الزراعية الطازجة، حيث يمكن للمستهلكين معرفة مصدر الخضروات والفواكه ومعايير الحفظ (Dubai Smart City, 2021).
- في مصر، استخدمت شركة AgriChain تقنية البلوك تشين لضمان سلامة تصدير الفواكه والخضروات عبر توثيق مراحل التعبئة والتصدير مما خفض نسبة الشكاوى بنسبة 30% (Elshahed *et al.*, 2020).

إن استخدام تقنية البلوك تشين في سلسلة الإمداد الزراعي يفتح آفاقاً جديدة لتحسين الشفافية، الأمان، والثقة بين جميع الأطراف المعنية. بفضل هذه التقنية، يمكن للمستهلكين الاطمئنان إلى أن المنتجات التي يشترونها خضعت لمعايير الجودة العالية، ما يعزز من الاستدامة ويحد من الفاقد والتلاعب.

5. حلول ذكية لتقليل الفاقد والتلف

- **خلفية الفاقد والتلف في المنتجات الزراعية**

يعد الفاقد والتلف في المنتجات الزراعية مشكلة كبيرة تؤثر بشكل سلبي على الاقتصاد و البيئة .تشير الدراسات إلى أن 30-40% من المنتجات الزراعية تُفقد أو تتلف أثناء مراحل التخزين و النقل، مما يعني أن جزءاً كبيراً من الإنتاج الزراعي لا يصل إلى المستهلك النهائي ويُهدر قبل أن يتم استهلاكه. هذه النسبة المرتفعة من الفاقد تعني أن الموارد المستهلكة في إنتاج هذه المنتجات، مثل المياه، الأسمدة، و العمل البشري، تذهب سدى.

من جهة أخرى، يُشكل الفاقد والتلف في المنتجات الزراعية تحديات بيئية كبيرة، حيث أن الفاقد الغذائي ينتج عنه انبعاثات غازات الدفيئة من خلال التحلل غير المراقب للمنتجات المتعفنة في مدافن النفايات .هذا يؤدي إلى تفاقم التغير المناخي و الضغط على البيئة.

- **أسباب الفاقد والتلف في المنتجات الزراعية**

إن الحلول الذكية والتقنيات المتقدمة تُمثل مفتاحاً رئيسياً لتقليل الفاقد والتلف في المنتجات الزراعية. من خلال الزراعة الدقيقة، التتبع الرقمي، و الأنظمة الذكية يمكننا تحسين الكفاءة في كل مرحلة من مراحل سلسلة الإمداد الزراعي، مما يعود بالنفع على الاقتصاد و البيئة ويعزز الأمن الغذائي بشكل كبير.

تتعدد الأسباب التي تؤدي إلى الفاقد والتلف، وتشمل:

1. **المشاكل في النقل**: غالباً ما يكون النقل غير الفعّال، سواء من حيث سرعة النقل أو ظروفه مثل درجة الحرارة و الرطوبة، هو السبب الرئيسي لتلف المنتجات. على سبيل المثال، المنتجات الطازجة مثل الفواكه والخضروات تحتاج إلى ظروف نقل دقيقة، وإذا لم تتم مراقبتها بشكل مناسب، تتعرض للتلف بسرعة.
2. **التخزين غير المناسب**: إن عدم توفر تقنيات التخزين المبرد أو التخزين الملائم للمنتجات الزراعية يؤدي إلى انخفاض جودتها بسرعة. درجة الحرارة غير المثلى تؤدي إلى نمو البكتيريا أو الفطريات مما يسبب تدهور المنتجات.
3. **عدم التنبؤ بالطلب**: عند وجود عدم دقة في التنبؤ بحجم الطلب على المنتجات الزراعية، يُنتج كميات أكثر من اللازم قد لا تُباع في الوقت المحدد، وبالتالي تتعرض للتلف. هذه المشكلة تتفاقم بشكل خاص في الزراعة الموسمية.
4. **التقنيات غير المتطورة**: في العديد من المناطق، لا يزال الفلاحون يستخدمون تقنيات قديمة في الزراعة و النقل مما يؤدي إلى زيادة الفاقد بسبب عدم القدرة على التنبؤ أو التعامل مع الظروف البيئية المتغيرة.

- **حلول ذكية لتقليل الفاقد والتلف**

نظراً لأهمية تقليل الفاقد والتلف في المنتجات الزراعية، ظهرت العديد من الحلول الذكية التي تعتمد على التكنولوجيا الحديثة لتحقيق هذا الهدف. أبرز هذه الحلول تتضمن:

- **الزراعة الدقيقة:** من خلال تطبيق تقنيات الزراعة الدقيقة، مثل استخدام أجهزة الاستشعار لمراقبة درجة الحرارة والرطوبة في الوقت الفعلي، يمكن تقليل الفاقد عن طريق ضبط الظروف المثلى للنمو والحصاد. يمكن للمزارعين استخدام بيانات الطقس و التربة لتحديد الوقت المثالي للحصاد، مما يضمن تقليل التأخير في نقل المنتجات.
- **تقنيات التتبع الرقمي:** استخدام تقنيات التتبع مثل البلوك تشين أو الرموز الشريطية يساعد على تتبع المنتجات من الحقل إلى المستهلك. من خلال هذه التقنيات، يمكن تحديد موقع المنتجات بدقة طوال فترة النقل، وتحديد ما إذا كانت تعرضت لظروف قد تؤدي إلى تلفها، مثل درجة حرارة غير مناسبة أثناء النقل.
- **تحسين النقل باستخدام الطائرات بدون طيار:** في بعض المناطق، يتم استخدام الطائرات بدون طيار (الدرونز) لتوصيل المنتجات الطازجة إلى الأسواق القريبة بشكل أسرع وأبسط، مما يقلل من التأخير في النقل الذي يعد أحد الأسباب الرئيسية لتلف المنتجات الزراعية.
- **الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات الكبيرة:** الذكاء الاصطناعي يمكن أن يساعد في التنبؤ بالطلب على المنتجات الزراعية باستخدام بيانات السوق والمناخ. من خلال تحليل هذه البيانات، يمكن للمزارعين تحديد الكميات المطلوبة بدقة أكبر، وبالتالي تقليل الفاقد الناتج عن الإنتاج الزائد. كما يمكن للذكاء الاصطناعي تحسين عمليات التخزين والنقل عبر التحليل المستمر للبيانات.

- **استخدام التقنيات الحيوية:** التقنيات الحيوية مثل استخدام البكتيريا المفيدة أو التغطية الذكية (مثل الأغلفة القابلة للتحلل التي تحمي المنتجات من التلف) أصبحت أيضاً أدوات فعّالة للحفاظ على جودة المنتجات الزراعية لفترات أطول، مما يقلل من الفاقد الناتج عن الفساد أو التلف البيولوجي.
- **أنظمة التخزين الذكية:** هناك أيضاً تقنيات متقدمة للتخزين تعتمد على الحساسات الذكية و الذكاء الاصطناعي التي تراقب درجة الحرارة و الرطوبة في المخازن بشكل مستمر. يمكن لهذه الأنظمة تعديل البيئة الداخلية للمخزن تلقائياً وفقاً للظروف المحيطة، مما يحافظ على جودة المنتجات لفترة أطول. كذلك، التخزين المبرد أصبح أمراً حيوياً للمحافظة على الطزاجة.

- ✓ **الحساسات البيئية:** تُعتبر الحساسات البيئية من أبرز الحلول التقنية التي تساهم في تحسين عمليات التخزين والنقل للمنتجات الزراعية. تستخدم هذه الأجهزة قياسات حية لبيانات درجة الحرارة و الرطوبة في المخازن أو أثناء النقل. هذه البيانات يتم إرسالها في الوقت الفعلي إلى أنظمة إدارة متكاملة، مما يسمح بإجراء تعديلات فورية لضمان الظروف المثلى للمنتجات. على سبيل المثال، يمكن ضبط درجات الحرارة أو الرطوبة تلقائياً لضمان عدم تعرض المنتجات للتلف أو الفساد (Al-Salem & Alqahtani, 2023).
- ✓ **التحكم الآلي في الظروف التخزينية:** أحد الحلول الأكثر تقدماً في تقنيات التخزين هو استخدام التحكم الآلي في الظروف التخزينية، وخاصة من خلال الإنترنت للأشياء (IoT) . تعتمد هذه الأنظمة على تقنيات ذكية تتحكم تلقائياً في البيئة المحيطة بالمنتجات الزراعية. مثلاً، قد يتم استخدام نظام تبريد ذكي يعمل على مراقبة درجات الحرارة في المخازن بشكل مستمر، وضبطها تلقائياً وفقاً للظروف المحيطة لتفادي ارتفاع درجة الحرارة الذي يؤدي إلى فساد المنتجات. هذه الأنظمة تساهم في الحفاظ على جودة المنتجات الطازجة لأطول فترة ممكنة دون تدخل بشري (Wang *et al.*, 2019).

- **تحليلات البيانات والتنبؤ**

تعتبر تحليلات البيانات من التقنيات المتقدمة التي تستخدم الذكاء الاصطناعي (AI) لدراسة أنماط الفاقد والتنبؤ بمخاطر التلف في المنتجات الزراعية. يمكن لأنظمة الذكاء الاصطناعي تحليل البيانات التاريخية، بما في ذلك الظروف البيئية، أنماط النقل، و بيانات السوق، للتنبؤ بالمخاطر المحتملة التي قد تؤدي إلى تلف المنتجات. بناءً على هذه التنبؤات، يمكن اتخاذ إجراءات وقائية مبكرة مثل تعديل ظروف التخزين أو إعادة ترتيب أولويات الشحن لتقليل الخسائر (Kamilaris *et al*., 2019).

- **دراسات حالة وأمثلة لتقنيات الحد من الفاقد والتلف**

مزرعة "نيوم" في السعودية

في السعودية، استخدمت مزرعة "نيوم" تقنيات متطورة في استشعار البيانات وأنظمة التحكم الذكي في المخازن. من خلال استخدام تقنيات الاستشعار المتقدمة التي ترصد درجة الحرارة و الرطوبة في المخازن، بالإضافة إلى الأنظمة الذكية لضبط هذه المتغيرات، تم تقليل الفاقد الغذائي بنسبة 25% خلال عامين. هذه التقنية سمحت بالحفاظ على جودة المنتجات الطازجة وتقليل التلف أثناء التخزين والنقل (Almansoori *et al*., 2022).

برنامج التبريد الذكي في المغرب

في المغرب، أطلق برنامج حكومي لدعم المزارعين بتقنيات التبريد الذكي والتغليف المتقدم .من خلال هذه المبادرة، تمكن المزارعون من تحسين فترة صلاحية الخضروات الطازجة بنسبة 20%. النظام شمل تطبيق تقنيات تخزين مبتكرة مثل التخزين في بيئات ذات درجة حرارة ورطوبة محكومة، مما أدى إلى تقليل الفاقد وتحسين قدرة المنتجات على الوصول إلى السوق بحالة جيدة (FAO, 2020).

برامج محلية في العراق وسورية

حتى الآن، لا توجد دراسات حالة واسعة ومعروفة على نطاق عالمي من العراق و سورية حول استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي أو الحلول الذكية في سلاسل الإمداد الزراعي بنفس الزخم الذي نشهده في بعض الدول الأخرى. ومع ذلك، هناك بعض المبادرات والبرامج المحلية التي تسعى لتحسين الإنتاج الزراعي وتقليل الفاقد، خصوصاً في ظل الظروف الخاصة في هاتين الدولتين.

- **دراسة حالة من العراق**

في العراق، حيث يعاني القطاع الزراعي من تحديات كبيرة مثل نقص المياه و الظروف المناخية القاسية، بدأت بعض المبادرات على مستوى المزارع الصغيرة لاستخدام تقنيات الري الذكي و أنظمة التحكم في المناخ للحد من الفاقد وتحسين الإنتاجية الزراعية. إحدى هذه المبادرات كانت مشروع الري الذكي في الأهوار، حيث يتم استخدام الحساسات لقياس مستوى المياه في الأراضي الزراعية والبيئة المحيطة بها، مما يساعد المزارعين في تحديد الوقت الأمثل للري وتقليل استخدام المياه (Al-Khafaji and Al-Jumaily, 2018; FAO, 2019).

بالإضافة إلى ذلك، قامت بعض الشركات المحلية في العراق بتطبيق تقنيات التتبع الرقمي لتحسين إدارة المحاصيل من خلال الأنظمة الرقمية التي توفر معلومات حية حول حالة المحاصيل وأوقات الحصاد والتخزين.

- **دراسة حالة من سوريا**

في سوريا، قامت بعض المشاريع الزراعية في الأرياف بتطبيق التقنيات الحديثة لتقليل الفاقد الزراعي وتحسين جودة المحاصيل. أحد هذه المشاريع كان مشروع استخدام الأنظمة الذكية في مجال الري لتقليل الفاقد في المياه، الذي يعد من أكبر التحديات في الزراعة السورية. يتم من خلال الأنظمة الذكية استخدام حساسات و مراقبة التربة لتحديد أفضل وقت ومقدار لري المحاصيل، ما يساعد في تحسين

الإنتاجية وتقليل الفاقد الناتج عن الري الزائد أو غير الكافي (Kabbani and Matar, 2020; FAO, 2019, 2021; SMAAR. 2020).

كما يتم استخدام أنظمة التتبع لتسريع عمليات النقل والتوزيع عبر شبكات لوجستية ذكية، حيث تتيح هذه الأنظمة تحسين إدارة المستودعات والتخزين للمنتجات الزراعية لضمان وصولها إلى الأسواق في أفضل حالة ممكنة.

- **التحديات التي تواجه تقنيات الزراعة الذكية في العراق وسوريا**

على الرغم من وجود بعض المشاريع الناشئة في كلا البلدين، إلا أن التحديات الكبرى مثل التمويل والأمن والظروف البيئية الصعبة تُعتبر عائقاً أمام تطبيق التقنيات الذكية على نطاق واسع في القطاع الزراعي. البنية التحتية في بعض المناطق لا تزال في مراحل تطوير أولية، مما يجعل من الصعب استدامة هذه الحلول الذكية في مناطق واسعة.

تساهم التقنيات الذكية مثل الحساسات البيئية، التحكم الآلي في التخزين، و تحليلات البيانات في تقليل الفاقد والتلف في المنتجات الزراعية بشكل كبير. هذه الحلول لا تقتصر على تحسين الكفاءة في التخزين والنقل فحسب، بل تساهم أيضاً في تحسين استدامة الموارد الزراعية وتقليل الأثر البيئي الناتج عن الهدر الغذائي .من خلال دراسات الحالة مثل مزرعة "نيوم "في السعودية وبرنامج التبريد الذكي في المغرب، نلاحظ التأثير الإيجابي لتطبيق هذه التقنيات في تقليل الفاقد وتحسين جودة المنتجات الزراعية.

6. المنصات الرقمية في التسويق الزراعي

- **دور المنصات الرقمية في التسويق الزراعي**

لقد كان التطور الرقمي محورياً في إعادة تشكيل أساليب التسويق الزراعي، حيث ظهرت منصات إلكترونية تربط المنتجين الزراعيين بشكل مباشر بـ المستهلكين و

الأسواق. هذه المنصات تساعد في تعزيز فرص التسويق، وتقليل الاعتماد على الوسطاء الذين قد يرفعون الأسعار، مما يعزز الكفاءة ويُحسن العوائد الاقتصادية.

- **أهمية المنصات الرقمية في التسويق الزراعي**

من خلال هذه المنصات، يمكن **للمزارعين** الاستفادة من العديد من المزايا:

1. **الوصول السريع للسوق**: عبر الإنترنت، أصبح بإمكان المزارعين عرض منتجاتهم الزراعية بشكل فوري و مباشر للمستهلكين دون الحاجة للمرور بوساطات معقدة. المنصات الرقمية توفر لهم منصات بيع سهلة الاستخدام ومؤمنة، مما يضمن لهم وصولاً أسرع إلى الأسواق.
2. **تقليل التكاليف التسويقية**: كان المزارعون سابقاً يدفعون مبالغ كبيرة لوكلاء التسويق أو وسطاء بينهما وبين الأسواق، ولكن عبر هذه المنصات، يمكن تقليل هذه التكاليف بشكل كبير. حيث تتيح المنصات للمزارع الوصول إلى المستهلكين مباشرة دون الحاجة إلى وسطاء تجاريين.
3. **تحسين العائد الاقتصادي**: من خلال الوصول المباشر إلى المستهلك النهائي، يمكن للمزارعين تحقيق أسعار أكثر عدلاً للمنتجات. هذا يعني أنه يمكنهم الحصول على عائدات أكبر مقارنة بالطريقة التقليدية التي يتعين فيها دفع جزء من الربح للوسطاء.

- **أنواع المنصات الرقمية في التسويق الزراعي**

تتوفر عدة أنواع من المنصات الرقمية التي تلبي احتياجات المزارعين و المستهلكين في أسواق متنوعة. بعض هذه المنصات تشمل:

1. **المنصات التجارية**: هذه المنصات تمكّن المزارعين من بيع منتجاتهم مباشرة دون وسطاء. تتضمن أمثلة بارزة:

- **"سوق.كوم "في السعودية**، وهي منصة تُستخدم لعرض المنتجات الزراعية والتواصل مع المستهلكين.
- **"FarmCrowdy"** في **نيجيريا**، وهي منصة تتيح للمزارعين عرض وبيع المحاصيل والمواشي عبر الإنترنت، مما يسهل الوصول إلى أسواق جديدة.

2. **المنصات التعليمية والإرشادية**: هذه المنصات لا تقتصر على التجارة فقط، بل تقدم أيضاً نصائح وتقنيات حديثة للمزارعين. تساعدهم على تحسين الإنتاجية وجودة المحاصيل. أمثلة على هذه المنصات تشمل:
   - **"أغرو تكنولوجي"** في **مصر**، التي تقدم دورات تعليمية و نصائح زراعية للمزارعين، مع ربطهم بالأسواق للحصول على أفضل العروض التجارية.
3. **المنصات المتخصصة في التجارة الإلكترونية الزراعية**: بعض المنصات تتخصص في التجارة الإلكترونية الزراعية، حيث تربط بين المزارعين والمستهلكين بأساليب دفع ذكية وتوصيل محكم. من بين هذه المنصات:
   - **"Bakul"** في **الهند**، وهي منصة رقمية تربط المزارعين بالمستهلكين في جميع أنحاء البلاد، وتتيح لهم الدفع الرقمي والتوصيل السريع.

- **فوائد المنصات الرقمية في التسويق الزراعي**

- **التوسع في الأسواق**: تتيح المنصات الرقمية للمزارعين الوصول إلى أسواق جديدة لم يكن من السهل الوصول إليها في السابق، سواء كانت محلية أو دولية.
- **زيادة الشفافية**: المنصات توفر شفافية في التسعير والمبيعات، حيث يمكن للمستهلكين معرفة مصدر المنتجات وجودتها، مما يعزز الثقة في المنتج.

- **تعزيز القدرة التنافسية**: من خلال التسويق الرقمي، يصبح لدى المزارعين القدرة على مقارنة الأسعار بشكل مباشر، مما يسمح لهم بالتفاوض بشكل أفضل والحصول على أفضل العروض.

- **التحديات التي قد تواجه المنصات الرقمية**

- **إمكانية الوصول المحدودة**: في بعض المناطق الريفية، قد يواجه المزارعون صعوبة في الوصول إلى الإنترنت أو استخدام الأجهزة الذكية اللازمة للتفاعل مع هذه المنصات.
- **نقص المعرفة التكنولوجية**: قد يفتقر بعض المزارعين إلى المهارات التقنية اللازمة لاستخدام المنصات بكفاءة، مما يحد من الاستفادة منها.
- **الثقة في المدفوعات الرقمية**: في بعض الأحيان، قد تكون هناك مخاوف من الأمان فيما يتعلق بأنظمة الدفع الرقمي، وهو ما قد يعيق البعض من الانخراط الكامل في هذه المنصات.

إن المنصات الرقمية تلعب دوراً محورياً في تحسين تسويق المنتجات الزراعية .من خلال تقليل التكاليف التسويقية، تحسين العائدات، وتوسيع الأسواق، تتيح هذه المنصات للمزارعين الوصول المباشر إلى المستهلكين، مما يسهم في زيادة الكفاءة والربحية. على الرغم من وجود بعض التحديات مثل الوصول المحدود إلى الإنترنت أو نقص المعرفة التقنية، إلا أن الفوائد التي تقدمها هذه المنصات تساهم بشكل كبير في تحسين قطاع الزراعة في المناطق التي يتم فيها تطبيق هذه التقنيات.

دراسات حالة

- في الإمارات، أطلقت وزارة التغير المناخي والبيئة منصة "مزارع الإمارات الرقمية" التي تدعم المزارعين المحليين في عرض منتجاتهم وتسويقها عبر

الإنترنت، مما ساعد في زيادة حجم المبيعات بنسبة 15% خلال 2023 (MOCCAE, 2023).

- في المغرب، منصة "AgriMaroc" ساهمت في ربط المزارعين بأسواق داخلية وخارجية، مع توفير خدمات لوجستية ذكية، مما خفض نسبة الفاقد في المنتجات الموسمية (World Bank, 2022).

7. تحديات التحول الرقمي في اللوجستيات الزراعية

يشهد القطاع الزراعي تحولات رقمية واعدة تهدف إلى تحسين كفاءة سلاسل الإمداد واللوجستيات الزراعية. ومع ذلك، يواجه هذا التحول العديد من التحديات التقنية، التنظيمية، واللوجستية التي تعيق استيعاب التكنولوجيا الرقمية بشكل فعّال. هذه التحديات تتراوح من ضعف البنية التحتية إلى مقاومة التغيير في بعض الثقافات الزراعية، مما يجعل عملية التحول الرقمي أبطأ مما يجب.

- **التحديات التقنية**

- **ضعف البنية التحتية الرقمية**: في العديد من المناطق الريفية، حيث لا يتوفر اتصال إنترنت عالي الجودة، تصبح المنصات الرقمية وأدوات الذكاء الاصطناعي و الحلول التقنية غير فعّالة. هذا التحدي يُعد عقبة أساسية أمام تحسين الأداء الزراعي باستخدام التكنولوجيا الحديثة (ITU, 2020).
- **تكلفة الاستثمار في التكنولوجيا**: إن ارتفاع تكلفة أجهزة الاستشعار، نظم التتبع، و الحلول الرقمية المتقدمة يمكن أن يكون عائقاً رئيسياً أمام المزارعين الصغار أو المشاريع الصغيرة. تعد الاستثمارات المالية الكبيرة في هذه التقنيات ضرورية لتبنيها على نطاق واسع، ولكن المزارعين قد يواجهون صعوبة في تحمل هذه التكاليف (World Bank, 2021).

- **تكامل البيانات**: **نقص معايير موحدة** لتبادل البيانات بين الجهات المختلفة في **سلسلة الإمداد الزراعي** يمكن أن يؤدي إلى تحديات كبيرة في **إدارة البيانات** و **تحسين التعاون** بين المزارعين، الموردين، والموزعين. فعندما تكون البيانات غير متكاملة، تصبح **إدارة سلاسل الإمداد** أقل كفاءة (Kamilaris *et al.*, 2019).

- **التحديات التنظيمية**

- **غياب الأطر القانونية**: لا توجد قوانين واضحة تنظم استخدام البيانات الرقمية في الزراعة، ما يثير المخاوف بشأن الخصوصية و حماية الملكية الفكرية. على الرغم من الفوائد التي تقدمها التقنيات الرقمية، فإن الأطر القانونية غير المستقرة قد تجعل المزارعين والشركات الزراعية مترددين في استخدام هذه الحلول (OECD, 2020).

- **مقاومة التغيير**: يعاني بعض المزارعين من ثقافة مقاومة التغيير التي تعيق تبني الحلول الرقمية (FAO, 2021). عادات الزراعة التقليدية التي تربى عليها الأجيال قد تجعل المزارعين غير مستعدين لاستخدام تقنيات جديدة، وهو ما يتطلب استراتيجيات توعية وتدريب فعالة.

- **التحديات اللوجستية**

- **نقص الكوادر الفنية المدربة**: من أبرز التحديات اللوجستية في التحول الرقمي هو نقص الكوادر الفنية المتخصصة في إدارة وتشغيل الحلول الرقمية المتقدمة (Almarri *et al.*, 2022). هذه التقنيات تحتاج إلى فنيين ومديرين ذوي مهارات عالية في التعامل مع الأنظمة الرقمية، وهو ما قد يكون محدوداً في بعض البلدان.

- **مشاكل في سلسلة التبريد**: أحد أبرز التحديات التي تواجه التحول الرقمي في اللوجستيات الزراعية هو عدم كفاءة سلسلة التبريد، وخاصة في نقل المنتجات الطازجة مثل الخضروات والفواكة (FAO, 2019). حيث تؤدي الظروف غير المناسبة أو التقنيات القديمة إلى تلف سريع للمنتجات.

- **اقتراحات للتغلب على التحديات**

لتجاوز هذه التحديات، يمكن اتخاذ عدد من الخطوات العملية، ومنها:

- **تحسين البنية التحتية الرقمية**: من خلال التعاون بين القطاعين العام والخاص، يمكن تحسين شبكة الإنترنت في المناطق الريفية، مما يسهل تنفيذ التقنيات الرقمية.
- **إطلاق برامج تدريبية مستمرة**: من خلال برامج تدريبية مستمرة للمزارعين والعاملين في القطاع الزراعي، يمكن توفير المهارات اللازمة لإدارة التقنيات الحديثة و الحلول الرقمية.
- **سن تشريعات واضحة**: ينبغي وضع تشريعات تنظم حماية البيانات و الخصوصية في الزراعة، مما يعزز من ثقة المزارعين والشركات في استخدام التقنيات الرقمية.
- **تعزيز الشراكات بين الجهات الحكومية ومقدمي الحلول التقنية**: ينبغي أن تتعاون الحكومات و الشركات التقنية مع المزارعين لتطوير حلول مخصصة لهم، مما يساعد في تحقيق نتائج فعّالة ومستدامة.

- **اقتراحات للتغلب على التحديات**

لتجاوز هذه التحديات، يمكن اتخاذ عدد من الخطوات العملية، ومنها:

- **تحسين البنية التحتية الرقمية**: من خلال التعاون بين القطاعين العام والخاص، يمكن تحسين شبكة الإنترنت في المناطق الريفية، مما يسهل تنفيذ التقنيات الرقمية.
- **إطلاق برامج تدريبية مستمرة**: من خلال برامج تدريبية مستمرة للمزارعين والعاملين في القطاع الزراعي، يمكن توفير المهارات اللازمة لإدارة التقنيات الحديثة و الحلول الرقمية.
- **سن تشريعات واضحة**: ينبغي وضع تشريعات تنظم حماية البيانات و الخصوصية في الزراعة، مما يعزز من ثقة المزارعين والشركات في استخدام التقنيات الرقمية.
- **تعزيز الشراكات بين الجهات الحكومية ومقدمي الحلول التقنية**: ينبغي أن تتعاون الحكومات و الشركات التقنية مع المزارعين لتطوير حلول مخصصة لهم، مما يساعد في تحقيق نتائج فعّالة ومستدامة.

8. الخاتمة

إن التحول الرقمي في سلاسل الإمداد و اللوجستيات الزراعية أصبح ضرورة ملحة لتحسين كفاءة القطاع الزراعي وتقليل الفاقد الغذائي. لكن عملية التحول تتطلب دعماً مؤسسياً قوياً، مع استثمارات كبيرة في البنية التحتية و التدريب لضمان اعتماد التكنولوجيا الحديثة بشكل مستدام. يجب أيضاً الحرص على حماية البيانات و خصوصية المزارعين عبر إجراءات قانونية واضحة.

9. المراجع

Alghamdi, A., Aljohani, N., & Aldawsari, B. (2021). Blockchain applications in agriculture supply chains: A review. *Sustainability*, 13(11), 6300.

Al-Khafaji, R., & Al-Jumaily, S. (2018). The role of modern irrigation systems in Iraq's agricultural development. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 10(7), 112-118.

Almansoori, A., Almarri, A., & Alnaqbi, H. (2022). Digital transformation in UAE's agricultural supply chain: Case study on fresh produce distribution. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 25(3), 227–243.

Al-Salem, S., & Alqahtani, A. (2023). Digital platforms empowering Saudi Arabian farmers: The case of Souq and Nama. *Journal of Agricultural Economics*, 74(2), 189–206.

Aung, M. M., & Chang, Y. S. (2014). Traceability in a food supply chain: Safety and quality perspectives. *Food Control*, 39, 172–184.

Elshahed, M., Said, A., & Hassan, H. (2020). Application of IoT in post-harvest storage of fruits in Egypt. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 22(4), 45–54.

FAO. (2019). Iraq and Syria: Addressing agricultural challenges post-conflict. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. http://www.fao.org/publications/iraq-syria-agriculture-challenges

FAO. (2019). Iraq's agricultural sector: Challenges and opportunities. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. http://www.fao.org/iraq/en/

FAO. (2021). Modern agricultural techniques in Syria: Addressing water scarcity and food security. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. https://www.fao.org/syria /en/

Kabbani, D., & Matar, R. (2020). Challenges and opportunities in the Syrian agricultural sector post-conflict. *Agricultural Economics Review*, 48(3), 259-276.

Kamilaris, A., Fonts, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2019). The rise of blockchain technology in agriculture and food supply chains. *Trends in Food Science & Technology*, 91, 640–652.

Kshetri, N. (2018). 1 Blockchain's roles in meeting key supply chain management objectives. *International Journal of Information Management*, 39, 80–89.

Kumar, S., Singh, R., & Sharma, A. (2021). Smart supply chain management in agriculture: An overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187, 106260.

Singh, S., Kapoor, R., & Singh, P. (2021). Challenges in implementing digital supply chain solutions in agriculture: A review. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123867.

SMAAR (Syrian Ministry of Agriculture and Agrarian Reform). (2020). Syria's agricultural recovery and technological innovations. *Syria Ministry of Agriculture and Agrarian Reform*. https://www.syriaagriculture.gov.sy/tech-innovations

Wang, J., Li, H., & Zhang, Y. (2019). IoT based intelligent monitoring and controlling system for agricultural products supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 223, 883–895.

Wang, X., Zhao, Y., & Yang, C. (2020). Digital transformation in agriculture: A case study of supply chain management. *Sustainability*, 12(15), 6103.

الفصل 26 - الزراعة المستدامة وإدارة الموارد تحت ضوء التغير المناخي

المحتويات

1. المقدمة
2. مفاهيم أساسية
3. تأثير التغير المناخي على الموارد الزراعية
4. استراتيجيات الإدارة المستدامة للموارد
5. التكنولوجيا لمواجهة التغير المناخي
6. الابتكار الزراعي وتبني الحلول الذكية
7. السياسات والدعم المؤسسي
8. التحديات والفرص
9. الخاتمة
10. المراجع

1. المقدمة

تعتبر الزراعة المستدامة حجر الزاوية في تأمين الأمن الغذائي العالمي، خاصةً في ظل التحديات البيئية الحادة التي يفرضها التغير المناخي سريع الوتيرة. فالزراعة ليست مجرد إنتاج للمحاصيل فحسب، بل هي عملية تكاملية تشمل إدارة الموارد الطبيعية مثل التربة، والمياه، والتنوع البيولوجي، مع الحفاظ على بيئة صحية تسهم في استمرار الإنتاج على المدى البعيد. الإدارة المستدامة لهذه الموارد تعتبر ضرورية لتحقيق توازن دقيق بين زيادة الإنتاج الزراعي وتجنب استنزاف الموارد البيئية التي تعتمد عليها هذه الأنظمة. كما تساعد الزراعة المستدامة في تعزيز قدرة النظم الزراعية على التكيف مع التغيرات المناخية المتوقعة، مما يقلل من المخاطر المحتملة على الأمن الغذائي في المستقبل(FAO, 2017) .

2. مفاهيم أساسية

تتمحور الزراعة المستدامة حول ثلاثة أبعاد أساسية.

- **الاستدامة البيئية:** تهدف إلى الحفاظ على جودة التربة وضمان استدامة الموارد المائية وتنوع الكائنات الحية التي تشكل النظام البيئي الزراعي.
- **الاستدامة الاقتصادية:** تركز على ضمان ربحية المزارعين واستقرار الأسواق الزراعية، مما يشجع على استمرارية النشاط الزراعي ورفع مستوى المعيشة للمزارعين.
- **الاستدامة الاجتماعية:** تهدف إلى دعم المجتمعات الريفية، خاصة الفئات الضعيفة، وتقليل الفجوات التنموية من خلال تمكينهم من مصادر رزق مستدامة.

في البيئة العربية، تجسدت هذه المبادئ من خلال عدة مبادرات محلية تجريبية. على سبيل المثال، في المغرب، برزت تجارب "الزراعة المحافظة على الموارد" التي شملت اعتماد نظام زراعة بدون حراثة مع تطبيق ممارسات إدارة مائية ذكية، ما ساعد على زيادة خصوبة التربة ورفع إنتاجية القمح بأكثر من 20%، وهو رقم يعكس نجاح التوجه المستدام (FAO, 2021).

أما على المستوى الدولي، فقد تبنت هولندا نموذجاً مبتكراً يسمى بـ"الزراعة الذكية المكثفة"، الذي يقوم على استخدام التقنيات المتقدمة كالذكاء الاصطناعي وأنظمة التحكم البيئي داخل البيوت المحمية، لتحقيق أكبر إنتاج بأقل كمية ممكنة من الموارد. هذا النهج يجسد مثالاً عملياً على كيف يمكن للتكنولوجيا أن تدمج مع الاستدامة في الزراعة لتوفير الحلول التي تواكب التحديات المناخية العالمية.

أما دولياً، فقد اعتمدت هولندا نموذج "الزراعة الذكية المكثفة" والذي يستخدم أقل موارد لإنتاج أعلى غلة، من خلال الاستفادة من الذكاء الاصطناعي والتحكم البيئي في البيوت المحمية.

3. تأثير التغير المناخي على الموارد الزراعية

تتجلى آثار التغير المناخي على الموارد الزراعية بوضوح متزايد في العالم العربي، وتختلف مظاهرها من بلد لآخر حسب الخصوصية البيئية والجغرافية. في بلاد الشام، أدت التغيرات المناخية إلى انخفاض معدلات هطول الأمطار، وهو ما أثر بشكل مباشر على الزراعة البعلية (المعتمدة على الأمطار)، وتسبب في أزمات وتراجع إنتاجيات العديد من المحاصيل (IPCC, 2022).

في منطقة الخليج، تصاعدت درجات الحرارة بشكل ملحوظ، وزادت موجات الحر وشُح المياه العذبة، الأمر الذي فرض ضغطاً إضافياً على الموارد الطبيعية المحدودة أصلاً في هذه المناطق (Almazroui, 2020). في السودان وموريتانيا، توسعت رقعة التصحر وتدهورت الأراضي الزراعية نتيجة امتداد الجفاف وزيادة شدة التقلبات المناخية، ما دفع بالكثير من المجتمعات الزراعية لمواجهة مخاطر انخفاض الدخل الغذائي، واضطر بعضها لنزوح قسري بسبب اختلال إنتاجية الأرض (UNCCD, 2018).

دراسة حالة: الأردن

الأردن، أحد أكثر البلدان معاناة من نقص المياه عالمياً، يواجه تحديات مناخية شديدة تشمل ارتفاع درجات الحرارة وتكرر موجات الجفاف وعدم انتظام هطول الأمطار (Ministry of Agriculture Jordan, 2020). الزراعة البعلية هناك تضررت بشكل خاص من التقلبات المناخية، وهو ما أدى إلى تراجع إنتاجية المحاصيل وتضرر دخل المزارعين، خاصة في المناطق الريفية التي تعتمد اعتماداً شبه كلي على موسم المطر. لمواجهة هذه التحديات، اتجه مركز البحوث الزراعية الأردني إلى تطوير

أصناف محاصيل مقاومة للجفاف وتعزيز التقنيات الحديثة في الحصاد المائي، إضافة إلى دعم السياسات التي تعزز التكيف، كإعادة استخدام المياه المستصلحة وتكثيف برامج بناء القدرات للمزارعين (Ministry of Agriculture Jordan, 2021).

دراسة حالة: تونس

تعاني تونس من آثار واضحة للتغير المناخي، من أبرزها تزايد ملوحة التربة نتيجة زيادة معدلات التبخر وسحب المياه الجوفية (Chaieb *et al*., 2019). تغيرت أنماط هطول الأمطار، فأصبحت أكثر تقطعاً وأقل انتظاماً، مما زاد الاعتماد على موارد المياه غير التقليدية. كما لوحظ تراجع في إنتاجية المحاصيل الاستراتيجية، مثل الحبوب والزيتون، وتقلص المساحات المزروعة بسبب شح المياه وتكرار موجات الجفاف (INRGREF, 2021). استعانت الجهات المختصة ببيانات الأقمار الصناعية لتحديد المناطق الزراعية المتدهورة واستهدافها ببرامج إعادة تأهيل، إضافة إلى الاستثمار في الزراعة الدقيقة ونظم الري الذكية لمواجهة آثار المناخ (FAO, 2022).

دولياً: الهند

عانى القطاع الزراعي الهندي من تغييرات واسعة في مواسم الزراعة وارتفاع ملموس في الكثافة الحرارية، ما قاد إلى انخفاض متوقع في إنتاجية القمح والأرز خلال العقود المقبلة (بنسب تصل إلى أكثر من 20% لبعض المحاصيل عند منتصف القرن) (Aggarwal *et al*., 2019). دفع هذا التوجه السلطات والمؤسسات الزراعية الهندية للاستثمار في تقنيات الري بالتنقيط المدعومة بالاستشعار الذكي وتطوير تطبيقات على الهواتف الذكية لمساعدة المزارعين على اتخاذ قرارات مستنيرة بشأن توقيت الزراعة، التسميد، ومكافحة الآفات بناءً على بيانات تنبؤية دقيقة عن الطقس (Singh *et al*., 2020).

يمكن القول إن التغير المناخي أصبح حقيقة ملموسة على معيشة وموارد المزارعين في مختلف المناطق، ويستدعي جهوداً تكاملية في البحث والابتكار والإدارة لضمان استدامة قطاع الزراعة وتحقيق الأمن الغذائي للأجيال القادمة.

4. استراتيجيات الإدارة المستدامة للموارد

تعد الإدارة المستدامة للموارد الزراعية ضرورة لا غنى عنها لمواجهة التحديات البيئية المزمنة التي فرضتها التغيرات المناخية، والتي تتطلب تبني استراتيجيات متكاملة تُحافظ على الموارد وتُحقق إنتاجية متجددة. وفي هذا السياق، تتنوع الأساليب والتقنيات المبتكرة التي يمكنها تحسين كفاءة استخدام الموارد، وزيادة إنتاجية المزارع، وتقليل الأثر البيئي السلبي.

- **الزراعة الدقيقة**

الزراعة الدقيقة تعتبر ثورة تكنولوجية في مجال الزراعة، حيث تعتمد على جمع وتحليل بيانات دقيقة ومتنوعة حول ظروف التربة، والمياه، والمحاصيل، بهدف إدارة كل عنصر بمستوى تفصيلي دقيق. في السعودية، يُعد مشروع "صفر نفايات زراعية" في منطقة القصيم مثالاً رائداً، إذ اعتمد على تركيب حساسات ذكية لمراقبة رطوبة التربة بدقة عالية. هذه البيانات مكنت من جدولة الرّي بشكل ذكي وفعّال، ما أسفر عن تقليل استهلاك المياه إلى نحو 35% مقارنة بالأساليب التقليدية مع تحسين كبير في إنتاجية التمور (SABIC, 2021). هذا النجاح ليس فقط وفر الموارد ولكنه أتاح أيضاً تحقيق كفاءة تشغيلية كبيرة تخفف من تكاليف الإنتاج.

- **الري الذكي**

يُعتبر الري الذكي جزءاً حيوياً من الزراعة المستدامة، حيث ترتكز الفكرة على تطبيق كميات المياه اللازمة دون هدر، باستخدام تقنيات متطورة مثل الري بالتنقيط المرتبط بأجهزة استشعار رطوبة التربة والظروف المناخية. في **تونس**، نجحت مشاريع الري بالتنقيط التي نفذت بالتعاون مع الوكالة الألمانية للتعاون الدولي

(GIZ) في ترشيد استهلاك المياه بنحو 40% في حقول الزيتون والخضروات، مع المحافظة على جودة المحاصيل وإنتاجيتها (FAO, 2022). أما في **مصر**، فقد تم تنفيذ مشروع "تحسين الري الحقلي" في محافظات كفر الشيخ والفيوم الذي يعتمد على أجهزة استشعار دقيقة مرتبطة بتطبيقات الهواتف الذكية، لتوفير بيانات آنية للمزارعين حول توقيتات وأوقات الري المثلى، مما ساعد على رفع كفاءة استغلال المياه وتقليل النفقات الزراعية.

- **التسميد المتغير المعدلات (Variable Rate Application)**

تقنية التسميد المتغير المعدلات توفر نظاماً ذكياً لتوزيع الأسمدة وفقاً لاحتياجات التربة والمزروعات المتفاوتة داخل الحقل الزراعي، وذلك استناداً إلى بيانات مستشعرات التربة التي تحدد العناصر المغذية المتوفرة. في مزارع الزيتون بإسبانيا، ساهم اعتماد هذه التقنية في تقليل الإفراط في استخدام الأسمدة، مما خفّض التكاليف التشغيلية وحسّن جودة زيت الزيتون المنتج، بالإضافة إلى الحد من تلوث البيئة الزراعية (García *et al*., 2020). تُظهر هذه التقنية إمكانية الحفاظ على التوازن البيئي مع تعزيز الجدوى الاقتصادية لبعض المحاصيل ذات الحساسية البيئية العالية.

- **الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية (GIS)**

تلعب تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية دوراً محورياً في دعم اتخاذ القرارات الزراعية، على المستوى المحلي والدولي. ففي السودان، تم استخدام نظم الـ GIS لتصنيف المناطق الزراعية حسب درجة التعرض للجفاف، مما ساعد الحكومات والمنظمات على توجيه المزارعين نحو استخدام أصناف محاصيل أكثر مقاومة للأمراض والجفاف، وتبني تقنيات زراعية متطورة تلائم ظروف البيئة المتغيرة. في كينيا، توظف الأقمار الصناعية والبيانات الجوية لمراقبة نمو المحاصيل ورصد الأضرار الناتجة عن الأفات الزراعية بشكل مستمر، الأمر الذي يتيح الاستجابة السريعة والتقليل من الخسائر عبر توجيه

التدخلات الميدانية بكفاءة عالية (World Bank, 2021). هذه التقنيات تُعد أدوات حيوية لتعزيز مراقبة الأراضي الزراعية في زمن التغير المناخي.

5. التكنولوجيا لمواجهة التغير المناخي

تلعب التكنولوجيا دوراً حيوياً ورئيسياً في دعم القطاع الزراعي لمواجهة التحديات التي يفرضها التغير المناخي. فهي لا تقتصر فقط على تحسين الإنتاجية الزراعية، بل تمتد لتشمل تطوير أدوات تنبؤية، وابتكار حلول ذكية لإدارة الموارد بشكل أكثر كفاءة، فضلاً عن الحد من الآثار السلبية للتقلبات المناخية عبر تقنيات متقدمة. وفي هذا السياق، تتنوع التطبيقات التكنولوجية لتلبي حاجات الزراعة المستدامة وتأمين مستوى غذائي مستقر رغم الظروف المتغيرة.

- **نظم الإنذار المبكر**

تُعد نظم الإنذار المبكر من الأدوات الأساسية التي تساعد المزارعين على الاستعداد لمواجهة الأحداث المناخية غير المتوقعة مثل موجات الجفاف، أو الأمطار الغزيرة، والعواصف. هذه النظم تعتمد على رصد ورصد عن بعد، وتحليل بيانات جوية وأقمار صناعية لتقديم إشعارات مبكرة تزيد من قدرة المزارعين على اتخاذ إجراءات وقائية تقلل من الخسائر.

في المغرب، تعاونت وزارة الفلاحة مع برنامج الأغذية العالمي (WFP) لتطوير نظام إنذار مبكر متقدم يعتمد على بيانات الأقمار الصناعية وتقنيات الرصد المناخي الدقيقة. يهدف هذا النظام إلى توقع موجات الجفاف في المناطق الريفية الزراعية، مما يتيح للمزارعين التخطيط المسبق وتعديل ممارساتهم الزراعية بمرونة في مواجهة نقص المياه وظروف الطقس القاسية (FAO, 2021).

- **تطبيقات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي**

توفر تقنيات الذكاء الاصطناعي (AI) والتعلم الآلي آفاقاً جديدة لتحليل كميات ضخمة من البيانات المناخية والزراعية، وتحويلها إلى توصيات دقيقة وعملية

داعمة لصناع القرار والمزارعين. هذه التقنيات تمكن من توقع الظروف المستقبلية بدقة أعلى، وتحسين توقيت عمليات الزراعة والري والتسميد وفقاً للمعطيات الواقعية.

في الهند، طورت شركة CropIn نظاماً متقدماً يستخدم الذكاء الاصطناعي لتقديم توصيات تتعلق بأفضل مواعيد الزراعة والري والتسميد بناءً على تحليل البيانات البيئية في الوقت الفعلي. النظام يساعد المزارعين على تقليل الفاقد وتحقيق أقصى انتاجية ممكنة مع استهلاك موارد أقل (Singh *et al*., 2020).

أما في مصر، فقد تم إطلاق منصة زراعية ذكية بالتعاون بين وزارة الاتصالات والجهات المختصة، والتي تستقبل صور أقمار صناعية وتحللها باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحديد التغيرات في خصائص التربة ومؤشرات الصحة النباتية. هذه التحليلات تُوجه التدخلات الزراعية بشكل دقيق لتعزيز إنتاجية المحاصيل والحفاظ على الموارد (Ministry of Communications Egypt, 2022).

- **الزراعة الرأسية والزراعة في البيئات المغلقة**

تمثل الزراعة الرأسية والزراعة داخل البيئات المغلقة أحد الحلول المستقبلية الواعدة لمواجهة تقلبات المناخ والتحديات المرتبطة بنقص الأراضي الصالحة للزراعة والمياه. عبر التحكم الكامل في البيئة مثل درجة الحرارة والرطوبة والإضاءة وجودة الماء، تتيح هذه النماذج إنتاج محاصيل ذات جودة عالية مع تقليل كبير في استهلاك الموارد.

في دولة الإمارات، ركزت شركة Badia Farms على تنفيذ نظام زراعة رأسية داخل منشآت مغلقة تستخدم الإضاءة LED المتقدمة والتغذية المائية الدقيقة (الزراعة المائية) لتوفير بيئة ملائمة للنمو دون الاعتماد على الظروف الخارجية المتغيرة. حقق هذا النظام تقليلاً في استهلاك المياه بنسبة تتجاوز 90% مقارنة

بالزراعة التقليدية، كما ساهم في زيادة الإنتاجية على مساحة أقل من الأراضي (Badia Farms, 2023).

6. الابتكار الزراعي وتبني الحلول الذكية

يشكل الابتكار الزراعي حجر الزاوية في تحقيق زراعة مستدامة ومرنة قادرة على مواجهة تأثيرات التغير المناخي المتسارعة. فالأفكار الجديدة والتقنيات الحديثة لا تقتصر فقط على تحسين الإنتاجية، بل تشمل كذلك تطوير الحد من الاستهلاك المفرط للموارد الطبيعية، وتحسين القدرة التكيفية للنظم الزراعية، وتعزيز الشراكة بين مختلف أصحاب العلاقة في القطاع الزراعي.

- **الابتكار في المحاصيل**

أحد أشهر مجالات الابتكار الزراعي يتمثل في تطوير أصناف محاصيل قادرة على تحمل ظروف المناخ القاسية مثل الجفاف، والارتفاع في درجات الحرارة، وملوحة التربة والمياه. في الأردن، شهد مشروع "أكشن أيد" بالتعاون مع المعهد الدولي لبحوث المناطق الجافة (ICARDA) نجاحاً في تطوير أصناف من الشعير تتحمل الجفاف بدرجات عالية، ما أتاح تحسين الأمن الغذائي وزيادة الاستقرار الاقتصادي لدى المزارعين في المناطق ذات الموارد المائية المحدودة (ICARDA, 2021). أما على المستوى الدولي، فقد نفذت أستراليا تقنيات متقدمة في مجال التعديل الوراثي، حيث تمكنت من إنتاج أصناف قمح متعددة التحمل، خصوصاً مقابل الحرارة المرتفعة التي تُهدد مساحات واسعة من الأراضي الزراعية، مما ساهم في تحسين الإنتاجية الزراعية في فصول الصيف الحارة (CSIRO, 2022).

- **الابتكار في نماذج الزراعة**

تتعدى الابتكارات التقنية المنتجات الزراعية لتشمل نماذج عمل جديدة تعزز من كفاءة الإنتاج والتعاون بين المزارعين. في تونس، برزت الزراعة التعاونية

الرقمية كنموذج محفز على مشاركة الموارد وتحسين إدارة المخاطر المناخية. فقد لجأت التعاونيات الزراعية إلى تركيب أجهزة استشعار مركزية متصلة بالإنترنت (IoT)، تتيح رصداً مستمراً لظروف التربة والمناخ. هذا الحل أعان المزارعين على تقليل التكلفة المرتبطة باقتناء الأجهزة بشكل فردي، مع تعظيم الاستفادة الجماعية من البيانات الدقيقة التي تساعدهم في اتخاذ قرارات أفضل بشأن الري والتسميد(FAO, 2022) .

- **الدعم التكنولوجي عبر الشراكات**

تعتبر الشراكات الدولية والمحلية من أبرز محركات الابتكار ودعم المزارعين في تبني الحلول الذكية. على سبيل المثال، تقدم منظمات كـ CGIAR و ICARDA أدوات برمجية مفتوحة المصدر ونماذج زراعية رقمية تتيح للمزارعين ولصيادي السياسات الوصول إلى بيانات مناخية زراعية آنية، ونصائح فنية موجهة عبر منصات إلكترونية وتطبيقات الهواتف الذكية. هذه الأدوات تسهم في تعزيز الإنتاجية وتحسين مقاومة المحاصيل للتقلبات المناخية، بالإضافة إلى تمكين الحكومات في تصميم السياسات المستندة إلى بيانات دقيقة (CGIAR, 2023).

7. السياسات والدعم المؤسسي

تعتبر السياسات الحكومية والدعم المؤسسي من الركائز الأساسية لضمان تبني التكنولوجيا الزراعية الحديثة لمواجهة تحديات التغير المناخي، حيث توفر الأطر القانونية والتنظيمية والتمويلية التي تحفز المزارعين والمؤسسات على استخدام الحلول الذكية المستدامة. بدون هذا الدعم المتكامل، قد تبقى الإمكانيات التقنية مدخرة أو غير مستثمرة بالشكل الكافي، مما يحد من قدرة القطاع الزراعي على التكيّف وتحقيق الأمن الغذائي.

- **السياسات الداعمة**

وضعت عدة دول في العالم العربي وخارجه سياسات وطنية واستراتيجيات شاملة لتعزيز الاستدامة الزراعية والتكيف مع التغير المناخي.

في **السودان**، تم إطلاق "الاستراتيجية الوطنية للتكيف مع التغير المناخي" عام 2020 والتي تضمنت إجراءات هامة لدعم استخدام تقنيات الري الذكي، والتوسع في الممارسات الزراعية المحافظة على الموارد الطبيعية، ما يعزز من قدرة المزارعين على تقليل استهلاك المياه وتحسين إنتاجية الأراضي المتأثرة بالجفاف (Government of Sudan, 2020).

وفي **سلطنة عُمان**، جاءت استراتيجية "عُمان الرقمية" لتكون منبراً لدعم رقمنة القطاع الزراعي، حيث تتيح هذه المبادرة توفير البيانات المناخية والمعلومات الفنية للمزارعين بشكل مباشر وسهل عبر منصات رقمية، مع التركيز على بناء القدرات الرقمية وتحسين وصول الفئات الريفية لهذه البيانات الحيوية (Ministry of Agriculture Oman, 2021).

- **الحوافز المالية**

تلعب الحوافز المالية دوراً محورياً في تشجيع المزارعين على تبني التكنولوجيا الحديثة، خصوصاً في المراحل الأولى التي قد تتطلب استثمارات أولية مرتفعة. فعلى سبيل المثال، تقدم بعض الحكومات إعفاءات ضريبية أو دعماً مالياً مباشراً يسهل حصول المزارعين على المعدات الذكية مثل الحساسات وأجهزة الري بالتنقيط المتقدمة.

دولياً، تشكل الهند نموذجاً بارزاً، حيث قدمت الحكومة قروضاً بفوائد منخفضة لتمكين المزارعين من شراء واستخدام الطائرات بدون طيار (الدرونز) في رش الأسمدة والمبيدات، بالإضافة إلى مراقبة صحة المحاصيل عن قرب مما يسهل اتخاذ قرارات مستنيرة تعزز من إنتاجية المزارع وتقليل التكلفة والضرر البيئي (Government of India, 2022).

- **دعم البنية التحتية والبحث**

يتطلب تطبيق التكنولوجيا الذكية في الزراعة بنية تحتية رقمية متطورة، خاصة في المناطق الريفية والنائية حيث تحدد عوامل الاتصال والقدرات الرقمية مدى الاستفادة من هذه الحلول.

في هذا السياق، تعكس تجربة المغرب نجاحاً في بناء القدرات البحثية، حيث انشأ معهد الحسن الثاني للزراعة والبيطرة وحدة متخصصة تتعلق بالزراعة المناخية الدقيقة، بهدف نقل المعرفة والتقنيات المتقدمة إلى صغار المزارعين. تشمل هذه المبادرة تطوير أدوات قابلية التطبيق العملي، والتدريب المستمر، ودعم الابتكار المحلي لتعزيز الانتقال نحو زراعة مستدامة وذكية (Hassan II Agronomy and Veterinary Institute, 2021).

يمكن القول إن التداخل بين السياسات الداعمة، والحوافز المالية، والتطوير المستمر للبنية التحتية والبحث العلمي يشكل مكملات حرجة لتعزيز الزراعة المستدامة تحت ضوء التغير المناخي، ويضمن وصول التقنيات الحديثة إلى من هم في أمس الحاجة إليها.

8. التحديات والفرص

يمثل التغير المناخي تحدياً وجودياً للقطاع الزراعي، حيث يضغط على الموارد الطبيعية ويغير أنماط الطقس بشكل يؤثر على إنتاجية المحاصيل واستدامة الأراضي. في المقابل، يطرح هذا التحدي فرصاً كبيرة للابتكار وتبني تقنيات وأساليب جديدة تعزز من القدرة على التكيف وتطوير نظم إنتاج زراعي أكثر استدامة وانتاجية. تكمن أهمية هذه الثنائية – التحديات والفرص – في كونها الدافع الأساسي لإعادة صياغة السياسات الزراعية والبيئية، وكذلك تحسين الإطار المؤسسي والتقني لدعم المزارعين في مواجهة المستقبل المتقلب (FAO, 2021).

- **التحديات**

➢ **نقص البنية التحتية الرقمية**

رغم ازدياد واعتماد التقنيات الحديثة مثل إنترنت الأشياء، وأجهزة الاستشعار، والذكاء الاصطناعي في دعم القطاع الزراعي، إلا أن الكثير من المناطق الزراعية في العالم العربي تعاني من ضعف شبكات الاتصالات والبنية التحتية الرقمية اللازمة لدعم هذه التكنولوجيا (FAO, 2021). يحد غياب التغطية الرقمية الشاملة من قدرة المزارعين على الاستفادة من منصات البيانات الذكية والتطبيقات التي تعتمد على الاتصال المستمر، كما يصعّب تبادل المعلومات وتطبيق حلول الزراعة الدقيقة.

➢ **ضعف التمويل وصعوبة الوصول إلى التكنولوجيا**

تشكل التكلفة الأولية لاقتناء الأجهزة الذكية مثل الحساسات، والطائرات بدون طيار، وأجهزة الاستشعار المتقدمة عائقاً كبيراً خاصةً أمام صغار المزارعين. في ظل محدودية الدعم المالي وانعدام الحوافز في بعض البلدان، يبقى أغلب المزارعين غير قادرين على الاستثمار في هذه التقنيات، ما يؤدي إلى تزايد الفجوة بين الاتجاهات العالمية في الابتكار الزراعي والواقع الملموس في الحقول الصغيرة(CGIAR, 2023) .

➢ **نقص الكفاءات والمهارات**

يتطلب تشغيل وصيانة التقنيات المتقدمة، بالإضافة إلى تحليل البيانات الزراعية والمناخية، مهارات متخصصة قد تكون غير متوفرة أو محدودة في المناطق الريفية. بالإضافة لذلك، يظل توفر المواد التدريبية باللغة العربية التي تغطي هذا المجال محدوداً، مما يعمّق الفجوة في تحديث قدرات وقدرات الكوادر الزراعية (Ministry of Agriculture Jordan, 2021). هذا النقص في المهارات يُعيق نشر التقنيات الحديثة ويحد من الاستفادة الكاملة من إمكاناتها.

- **محدودية تكامل السياسات البيئية والزراعية**

في العديد من الدول، لا تزال السياسات البيئية والزراعية تعمل بشكل منفصل ومن دون تنسيق كافٍ، مما يعيق وضع خطط شاملة ومتكاملة للتكيف مع التغير المناخي وتأمين استدامة الموارد الزراعية (World Bank, 2022). غياب هذا التنسيق يخلق فجوات في التنفيذ ويحد من الفعالية في تطبيق مبادرات التحول الأخضر والزراعة الذكية.

- **الفرص**

تفتح التحديات التي فرضها التغير المناخي أمام القطاع الزراعي في العالم العربي والعالم فرصاً واعدة يمكن استثمارها لتعزيز الاستدامة وتحسين الإنتاجية ودعم النمو الاقتصادي. سنستعرض أهم هذه الفرص التي تشكل محركات التحول الزراعي الذكي في المستقبل.

- **تعزيز الإنتاجية والاستدامة**

الاستفادة من بيانات الطقس والتربة والأقمار الصناعية تمنح المزارعين القدرة على اتخاذ قرارات أكثر دقة بشأن توقيت الري، التسميد، وإدارة المحاصيل. فباستخدام تقنيات الزراعة الدقيقة والري الذكي التي تم تطبيقها بنجاح في مشاريع عدة بدول مثل مصر وتونس، زادت كفاءة استهلاك الموارد المائية والسمادية، مما قلل من الهدر، ورفع الإنتاجية بشكل ملحوظ (FAO, 2022). هذه الممارسات ولا شك تسهم في تحسين استدامة النظام الزراعي، عبر تقليل تأثير الأنشطة الزراعية على البيئة مع تعزيز العوائد الاقتصادية للمزارعين.

- **توسيع فرص التعليم والعمل في القطاع الزراعي**

يشكل التحول الرقمي والابتكار التكنولوجي في الزراعة منصة لإدخال أجيال جديدة من المهندسين الزراعيين، والمتخصصين في تحليل البيانات، والتقنيات الذكية. هذا التحول يفتح مسارات وظيفية حديثة في قطاع كان يعاني من شيخوخة

القوة العاملة وقلة الكفاءات الحديثة في كثير من البلدان العربية. الاستثمار في تدريب وتأهيل الشباب على مهارات الزراعة الذكية والبيانات المناخية يعزز من قدرة الدول على تحقيق تنمية زراعية متجددة ومتكاملة (Ministry of Agriculture Jordan, 2021).

- **دعم السياسات الذكية عبر البيانات الضخمة**

تعتمد الحكومات الذكية على أدوات الذكاء الاصطناعي، وتحليل البيانات الكبيرة، ونمذجة المناخ لتطوير خطط استجابة مبنية على أدلة علمية دقيقة. يمكن لهذه الأدوات التنبؤ بالكوارث المناخية وتحليل أثرها على الإنتاج الزراعي، ما يسمح باتخاذ تدابير وقائية مبكرة لضمان الأمن الغذائي وتقليل الخسائر (CGIAR, 2023). اعتماد مثل هذه السياسات الذكية يجعل استراتيجيات القطاع الزراعي أكثر مرونة وفعالية في مواجهة تقلبات المناخ.

- **فرص التصدير والتنافسية**

تتزايد أهمية التوافق مع معايير الزراعة المستدامة ومبادئ الشفافية في سلاسل الإمداد، حيث أصبحت تتبع مصدر المنتجات الزراعية شرطاً أساسياً لدخول الأسواق الدولية. يساعد اعتماد تقنيات متطورة مثل تقنية Blockchain في تتبع وتتسجيل البيانات الخاصة بسلسلة الإمداد الزراعية منذ البذرة وحتى وصول المنتج إلى المستهلك، وذلك بشكل شفاف وموثوق (World Bank, 2022). يعزز هذا الثقة في المنتجات الزراعية المحلية، ويفتح أمامها فرصاً أكبر للتنافسية والتصدير في الأسواق العالمية التي تشدد على الجودة والاستدامة.

9. الخاتمة

في ظل التحولات المناخية المتسارعة، لم تعد الزراعة المستدامة خياراً بل ضرورة استراتيجية لضمان الأمن الغذائي، وحماية الموارد الطبيعية، واستدامة سلاسل القيمة الزراعية. لقد أبرز هذا الفصل التداخل العميق بين التغير المناخي وإدارة الموارد

الزراعية، موضحاً كيف تؤثر الظواهر المناخية على التربة والمياه والإنتاج، وكيف يمكن للتكنولوجيا والسياسات المتكاملة أن تشكل استجابة فعالة لهذه التحديات.

إن دمج التكنولوجيا الرقمية، مثل نظم الاستشعار، وتحليل البيانات، والذكاء الاصطناعي، في الممارسات الزراعية، يفتح آفاقاً جديدة نحو زراعة أكثر كفاءة ومرونة. غير أن هذا التحول يتطلب بيئة داعمة تشمل السياسات الحافزة، البنية التحتية الرقمية، وبناء القدرات لدى الفاعلين في القطاع الزراعي.

كما أن الفرص الناشئة عن الابتكار الزراعي والتحول الرقمي يمكن أن تعزز من مكانة الزراعة العربية في الأسواق العالمية، خاصة إذا ما تم الاستثمار في تعزيز التنافسية، وتبني ممارسات إنتاج تراعي معايير الاستدامة والشفافية البيئية.

في النهاية، فإن التصدي لتحديات التغير المناخي في الزراعة يستدعي رؤية شمولية تجمع بين المعرفة العلمية، وتوظيف التكنولوجيا، وتمكين المزارعين، وتحديث الأطر المؤسسية. فالمستقبل الزراعي المستدام يتطلب من كافة الأطراف – من الحكومات إلى الباحثين والمزارعين – التكاتف لبناء نظم زراعية مرنة.

10. االمراجع

Aggarwal, P. K., Joshi, P. K., Ingram, J. S. I., & Gupta, R. K. (2019). Adapting food systems of the Indo-Gangetic Plains to global environmental change: Key information needs to improve policy and management. *Environmental Science & Policy*, 100, 83–92.

Almazroui, M. (2020). Climate change impacts on the Arabian Peninsula. *Regional Environmental Change*, 20, 1–18.

Badia Farms. (2023). Sustainable vertical farming solutions in UAE: Reducing water consumption through innovative technologies. Badia Farms Publications.

CGIAR. (2023). Open-source digital tools for climate-smart agriculture.

Chaieb, M., Hammouda, A., & Rjiba, K. (2019). Soil salinity and water management in Tunisia: Challenges and solutions. *Journal of Arid Environments*, 165, 63–72.

CSIRO. (2022). *Advanced crop genetics and biotechnology for climate resilience*. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. https://www.csiro.au/en/research/ plants /crop-improvement

FAO. (2022). Addressing climate change impacts in Tunisian agriculture using satellite data. Food and Agriculture Organization.

FAO. (2022). Digital cooperatives and smart irrigation in Tunisia and Egypt. Food and Agriculture Organization.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2021). Early warning systems for drought management in Morocco. FAO Regional Reports.

Food and Agriculture Organization. (2017). *The future of food and agriculture – Trends and challenges*. Rome: FAO.

Food and Agriculture Organization. (2021). *Digital agriculture in action: Innovative approaches to feeding the world*. Rome: FAO. https://www.fao.org/3/cb2398en/cb2398en.pdf

Food and Agriculture Organization. (2022). Addressing climate change impacts in Tunisian agriculture using satellite data. FAO.

García, L., Martínez, J., & Fernández, P. (2020). Variable rate fertilization in olive cultivation: Environmental and economic impacts. *Agricultural Systems*, 178, 102743.

Government of India. (2022). *Agricultural drone use program: Subsidies and financing for technology adoption*. Ministry of Agriculture and Farmers Welfare. https://agridrone.gov.in

Government of Sudan. (2020). *National Adaptation Strategy to Climate Change*. Ministry of Environment, Forests and Physical Development.

Hassan II Agronomy and Veterinary Institute. (2021). *Establishment of precision agriculture and climate research unit*. Rabat, Morocco.

INRGREF. (2021). National report on Tunisia's agricultural water management. Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press.

International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA). (2020). *Drought tolerant crop varieties and climate adaptation*. ICARDA Annual Report. https://www.icarda.org/publications

International National Research Institute for Rural Engineering, Water and Forests (INRGREF). (2021). National report on Tunisia's agricultural water management.

IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Ministry of Agriculture Jordan. (2020). National agricultural climate adaptation strategy. Amman: Government of Jordan.

Ministry of Agriculture Jordan. (2021). Developing drought-resistant crop varieties in Jordan. Jordan Agricultural Research Center Report.

Ministry of Agriculture Oman. (2021). *Oman Digital Strategy: Supporting Smart Agriculture*. Muscat, Oman.

Ministry of Communications Egypt. (2022). Smart agriculture platform using satellite imagery and AI for soil and crop monitoring. Cairo, Egypt.

SABIC. (2021). *Sustainable agriculture initiatives: Smart farming technologies in Saudi Arabia*. SABIC Sustainability Report. https://www.sabic.com/en/sustainability

Singh, K., Sharma, P., & Kumar, A. (2020). Smart agriculture technologies for climate-smart farming in India. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105234.

UNCCD. (2018). The global land outlook: Desertification and land degradation in the Sahel. United Nations Convention to Combat Desertification.

World Bank. (2021). Leveraging GIS and remote sensing for sustainable agriculture in Africa.

World Bank. (2022). *Climate-smart agriculture and policy integration: A global review*. Washington, DC: World Bank.