جامعة الكوت
مركز البحوث والدراسات والنشر

تطبيقات تقنية النانو في الزراعة الحديثة

تأليف
الدكتور محمد زيدان خلف
خبير واستشاري / جامعة الكوت

الطبعة الاولى
٢٠٢٥

منشورات

مركز البحوث والدراسات والنشر

جامعة الكوت

٦٢٠ / ٥

خ ٨٧ خلف ، محمد زيدان.

تطبيقات تقنية النانو في الزراعة الحديثة/ محمد زيدان خلف . - ط١.- بغداد: مركز البحوث والدراسات والنشر، مطبعة جامعة الكوت ، ٢٠٢٥.

٣٢٠ ص؛ ٢٤سم .

١ -هندسة النانو. ٢. الزراعة الحديثة - أ- العنوان

رقم الايداع

٢٣٦٦ /٢٠٢٥

المكتبة الوطنية/الفهرسة اثناء النشر

رقم الايداع في دار الكتب والوثائق ببغداد

٢٣٦٦ لسنة ٢٠٢٥ م

ISBN: 978-9922-726-41-0

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

المحتويات

الموضوع	رقم الصفحة
تقنية النانو	8
تاريخ تطور تقنية النانو	9
الجسيمات النانوية في النظم البيئية الزراعية	10
تقنية النانو بديلا عن الأساليب الحالية في السيطرة على الآفات	12
الفصل الاول	
تطبيقات تقنية النانو في تحسين إنتاجية المحاصيل الزراعية	15
الأسمدة النانوية	16
الأسمدة النانوية مقابل الأسمدة التجارية	20
المبيدات النانوية	21
تقنية النانو في تنظيم إنبات البذور ونمو النباتات	25
الاجهادات اللااحيائية في النباتات	28
تكنولوجيا النانو كوسيط في تحمل الإجهاد اللاأحيائي	33
تطبيقات الجسيمات النانوية في زيادة انتاج المحاصيل الزراعية تحت ظروف الاجهادات	40
تطبيقات الجسيمات النانوية والأدوار التي تلعبها في تخفيف الاجهاد في النباتات	41
تكنولوجيا النانو الحيوية في تعديل الجينوم	56
طرائق التطبيقات المختلفة لتكنولوجيا النانو في الزراعة	57
اليات عمل الجسيمات النانوية في النبات	58
امتصاص الجسيمات النانوية	59
مسارات التفاعل بين الجسيمات النانوية والنباتات	59
أجهزة الاستشعار النانوية المستعملة لمراقبة النباتات الحية	61
الاستنتاجات	65
الفصل الثاني	
تقنية النانو في قطاع البذور	75
تقنية النانو نحو معالجات مستدامة للبذور	75
لماذا نحتاج إلى النانو في قطاع البذور؟	78
التطبيقات/ الكشف عن التلوث في حقل البذور	78
تقنية النانو في إدارة صحة البذور	79
بذور النانو الذكية	80
الأسمدة النانوية لإنبات البذور	80
التكنولوجيا الحيوية للبذور النانوية	82

المحتويات

الموضوع	رقم الصفحة
تكنولوجيا النانو في تعبئة البذور ومعالجتها	82
تقنية الباركود النانوية للبذور	83
مستشعرات نانوية لتخزين البذور	83
طلاء نانوي بوليمري للبذور	84
مبيدات الجسيمات النانوية	84
الجسيمات النانوية غير العضوية المستعملة في تكنولوجيا البذور	84
الجسيمات النانوية العضوية المستعملة في تكنولوجيا البذور	85
تركيبات هياكل نانوية محتملة من الجيل القادم لمعالجة البذور المستقبلية	85
مجالات دخول المواد النانوية المستعملة في تكنولوجيا البذور الى البيئة	86
الاستنتاجات	86
الفصل الثالث	
تطبيقات تقنية النانو في صناعة الغذاء	89
تطبيقات تقنية الجسيمات النانوية في معالجة الغذاء	95
تقنية الجسيمات النانوية في قوام وطعم ومظهر الطعام	98
المستحلبات النانوية	99
الجسيمات النانوية والقيمة الغذائية	100
الجسيمات النانوية وحفظ الغذاء او مدة صلاحيته	101
الكبسلة (التغليف) النانوية	101
تقنية الجسيمات النانوية وتغليف الأغذية	104
تقنيات النانو المستعملة في تغليف المواد الغذائية	109
أجهزة الاستشعار النانوية في كشف مسببات الامراض في الاغذية	110
الاستعمالات الحالية لتقنية النانو في الاغذية	111
قضايا السلامة	113
الاستنتاجات	115
الفصل الرابع	
تطبيقات تقنية النانو في الإنتاج الحيواني	119
توصيل المغذيات	119
المبيدات الحيوية والمضادات الحيوية النانوية في الانتاج الحيواني	122
جودة اللحوم والبيض	127
الجسيمات النانوية وجودة الحليب	130

المحتويات

الموضوع	رقم الصفحة
الطب البيطري	131
اللقاحات واللقاحات النانوية المساعدة	133
التكاثر	136
الآفاق المستقبلية	139
الفصل الخامس	
أولا: تطبيقات تقنية النانو في مجال التربة والمياه	143
الجسيمات النانوية في بيئة التربة والمياه	146
أستعمال الجسيمات النانوية في معالجة التربة	154
تطبيق الجسيمات النانوية لمعالجة المياه	157
الاستنتاجات	160
ثانيا: الجسيمات النانوية في التربة	163
الجسيمات النانوية والمجتمع الميكروبي للتربة	168
السمية النباتية للجسيمات النانوية	175
الجسيمات النانوية في الماء	182
الأسمدة النانوية	186
نحو تكنولوجيا النانو من أجل زراعة مستدامة	194
الاستنتاجات	198
الفصل السادس	
تطبيقات تقنية النانو في إدارة المياه الري وأنظمة الري	201
تطبيقات تقنية النانو في إدارة المياه	202
مراقبة واستشعار جودة المياه	202
تحلية المياه المُحسّنة بتقنية النانو	202
تطبيقات تقنية النانو في أنظمة الري	203
الري الدقيق والزراعة الذكية	203
تحسين أداء أنظمة الري	204
تقنية النانو لإزالة الزرنيخ من مياه الشرب	204
الري الدقيق المُمكّن بتقنية النانو في المناطق القاحلة	205
الاستنتاجات	205
الفصل السابع	
أولا- تقنية النانو في وقاية النبات	207

المحتويات

الموضوع	رقم الصفحة
تحديات مسببات الأمراض النباتية وحلولها	209
تحديات الآفات الحشرية وحلولها	211
ظهور تقنية النانو في وقاية النبات	212
الجسيمات النانوية: الأنواع، الخصائص، وطرائق التركيب	215
تطبيقات تقنية النانو في الكشف عن أمراض النبات والآفات الحشرية	217
استراتيجيات قائمة على الجسيمات النانوية لإدارة أمراض النبات والآفات الحشرية	219
الآثار البيئية ومخاوف السلامة لتكنولوجيا النانو في وقاية النبات	221
الآفاق مستقبلية	222
التحديات	223
الاستنتاجات	224
ثانيا- تقنية النانو في مكافحة الآفات: المزايا والتطبيقات والتحديات	228
مزايا وعيوب المبيدات النانوية	229
تأثير القضايا البيئية للمبيدات الحشرية التقليدية على التنوع البيولوجي	231
الكائنات المستهدفة بالمبيدات الحشرية	232
الكائنات الحية غير المستهدفة للمبيدات الحشرية	233
تأثير المبيدات الحشرية على التنوع البيولوجي للتربة	233
تأثير المبيدات الحشرية على التنوع البيولوجي للمياه	234
تأثير المبيدات الحشرية على صحة الإنسان	234
القضايا البيئية المتعلقة بتأثير المبيدات النانوية على التنوع البيولوجي	234
أمثلة على تأثيرات المبيدات النانوية على الكائنات غير المستهدفة	235
تأثير المبيدات النانوية على الإنسان	236
تطبيقات تكنولوجيا النانو في علم الحشرات	237
تكنولوجيا النانو لمكافحة الآفات الحشرية	237
أنواع الجسيمات النانوية المستعملة كمبيدات حيوية في تركيبات الإطلاق المُتحكم به	238
تحسينات مفيدة لمبيدات الآفات النانوية في مكافحة الآفات الحشرية	239
الاتجاهات التطورية في مبيدات الآفات النانوية	240
الآلية السامة للمواد النانوية	241
استيعاب الجسيمات النانوية (الالتقام الخلوي والإخراج الخلوي)	242
مبيدات حشرية نانوية نحاسية	243
السمية الخلوية لجسيمات النحاس النانوية	243

المحتويات

رقم الصفحة	الموضوع
244	مبيدات النانو الفضية
244	السمية الخلوية لجسيمات الفضة النانوية
244	السمية الخلوية للجسيمات النانوية البوليمرية
245	آلية عمل الجسيمات النانوية البوليمرية
245	الاستنتاجات
	الفصل السابع
251	ثالثا- تركيبات النانو في مكافحة الآفات الحشرية
252	الجسيمات النانوية
253	نانوألومينو-سيليكات
254	جسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية (TiO2)
255	النانوجل
256	المستحلب النانوي
257	المعلقات النانوية
257	التركيبات النانوية لإدارة آفات المخازن
258	آلية عمل مبيدات النانو
258	تخليق المواد النانوية
259	التخليق الأخضر للجسيمات النانوية
259	المكونات البيولوجية
	الفصل الثامن
261	تطبيق تكنولوجيا النانو في الزراعة وتقليل الخسائر بعد الحصاد وتجهيز الأغذية الآثار والتحديات على الأمن الغذائي
264	الحد من خسائر ما بعد الحصاد
	الفصل التاسع
268	السمية والمخاطر البيئية للمواد النانوية: التحديات والاحتياجات المستقبلية
272	وعود تقنية النانو
275	نقل ومصير المواد النانوية
278	سمية المواد النانوية
279	المواد النانوية المعدنية
280	اكاسيد المعادن النانوية
282	المواد النانوية الكربونية
283	النقاط الكمومية

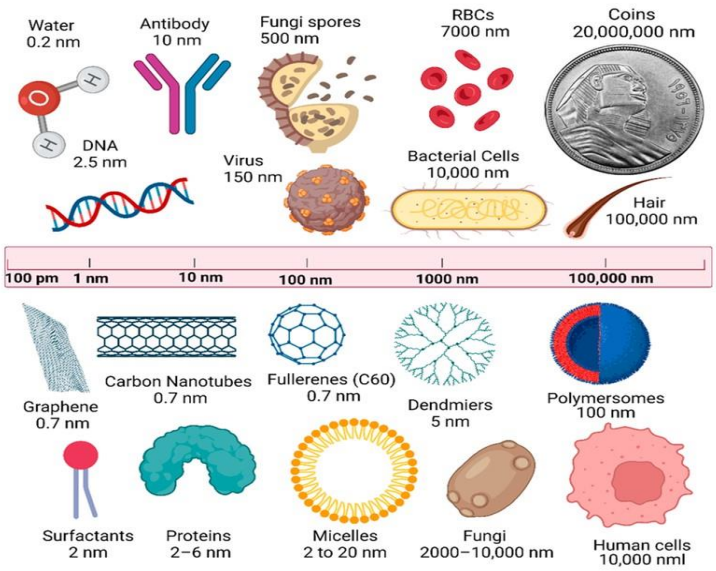
المحتويات

رقم الصفحة	الموضوع
284	التوقعات والاحتياجات المستقبلية
	الفصل العاشر
292	الأثر البيئي لتطبيقات تقنية النانو
293	التكنولوجيا الخضراء
294	انبعاث الجسيمات النانوية إلى البيئة
294	مراحل دورة المواد النانوية
294	تصنيع المنتج والتوظيف
295	التخلص
295	عملية إعادة التدوير
295	الانموذجات المستعملة لتقييم انبعاث الجسيمات النانوية
295	تحليل تدفق المواد
296	أنموذج المصير البيئي
297	تأثير الجسيمات النانوية على البيئة الخارجية
297	التأثير السلبي
300	التأثير الإيجابي
301	الاستنتاجات

تقنية النانو

تقنية النانو

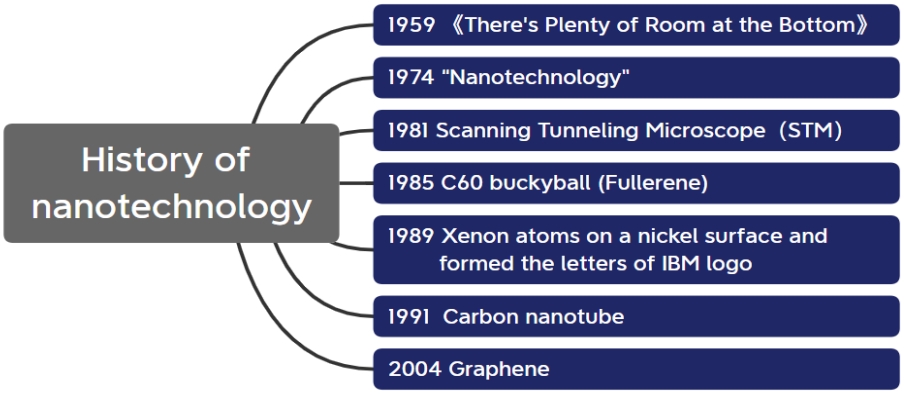
عُرِّف مصطلح "تقنية النانو" لأول مرة عام 1974 من قِبل نوريو تانيغوتشي من جامعة طوكيو للعلوم (Taniguchi, *et al.* 1974). النانو Nano أو جزء من مليار Billionth (10^{-9}) من المتر هو مُعامل القياس الذي يتراوح بين 1- 100 نانومتر، ويستعمل لقياس أبعاد الجسيمات على المستوى الجزيئي، بما في ذلك الذرات وغيرها. تقنية النانو هي فرع من فروع الهندسة يُعنى بمعالجة أبعاد الذرات والجزيئات الفردية خاصة التي يقل طولها عن 100 نانومتر. تتراوح أطوال روابط الكربون - كربون النموذجية، أو المسافة بين هذه الذرات في الجزء بين 0.12 – 0.15 نانومتر، ويبلغ قطر حلزون الحمض النووي المزدوج حوالي 2 نانومتر. وبالمثل، يبلغ طول أصغر أشكال الحياة الخلوية، وهي بكتيريا جنس الميكوبلازما، حوالي 200 نانومتر (شكل 1). تتعدد استخدامات وفوائد تقنية النانو في مجالات متنوعة، مثل الصناعات الدوائية والإلكترونيات، فضلا عن الزراعة، مثل المغذيات والمبيدات الحشرية . كما أنها أساسية في مجالات علمية أخرى، مثل الكيمياء والأحياء والفيزياء وعلوم المواد والهندسة.



شكل 1. أنموذجات لأبعاد بعض المواد النانوية ومقارنتها بالمواد الطبيعية

تاريخ تطور تقنية النانو History of nanotechnology development

في عام 1959، ألقى العالم Feynman خطابه النبوئي "هناك مساحة واسعة في القاع" في الحفل السنوي للجمعية الفيزيائية الأمريكية، والذي يُعدّ بداية تاريخ تقنية النانو. أشار Feynman إلى إمكانية التصغير على المستوى الذري، فضلا عن مناهج تنازلية وتصاعدية لتركيب المواد النانوية. بعد خمسة عشر عامًا، في عام 1974، استعمل العالم الياباني Norio Taniguchi مصطلح "تقنية النانو" لأول مرة لوصف الآلات الدقيقة في ورقة بحثية تناولت مفهوم تقنية النانو. في عام 1981، اخترع أحد علماء شركة آي بي إم (IBM) مجهر المسح النفقي (STM) Scanning Tunneling Microscope، والذي مثّل إنجازًا بالغ الأهمية في تطوير تقنية النانو وعلومها. بعد بضع سنوات، في عام 1989، تمكن فريق علمي آخر من شركة IBM من محاذاة 35 ذرة زينون على شكل أحرف IBM. فضلا عن ذلك، خلال الفترة من 1985 إلى 1991، اكتشف العلماء كرة الباكي C60 (الفوليرين) وأنابيب الكربون النانوية، والتي تتستعمل الآن على نطاق واسع في مواد المعلومات الإلكترونية، ومواد تخزين الطاقة، والطب، وغيرها من المجالات. في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، بعد اكتشاف العلماء للجرافين عام 2004، أصبحت المواد القائمة على عمود الكاربون الفقري backbone لمعظم مجالات العلوم والهندسة. يوضح (شكل 2) تاريخ تقنية النانو.



شكل 2. تاريخ تقنية النانو. عن (Yangru, 2024)

الجسيمات النانوية في النظم البيئية الزراعية Nanoparticles in Agroecosystems

في الوقت الحاضر، لا يوجد مجال لم تمسه تكنولوجيا النانو وابتكاراتها العلمية الرائدة بما في ذلك الزراعة. ولذلك، فقد تطرق استعمال تكنولوجيا النانو في الزراعة إلى العديد من المجالات بما في ذلك صناعة الأغذية، وتغذية النباتات النانوية، وحماية النبات وإنتاجية النبات (Thul, *et al*. 2013). فيما يتعلق بآثار الجسيمات النانوية أو المواد النانوية على النظم البيئية الزراعية، ينبغي التركيز على مصير وسلوك الجسيمات النانوية على المحاصيل الزراعية والآثار السامة المحتملة على النباتات والكائنات الحية الدقيقة الموجودة بشكل طبيعي في جذور التربة وتوليد النفايات النانوية في النظام البيئي الزراعي. فضلا عن ذلك، يجب عدم التغاضي عن الآثار السلبية للمواد النانوية (أو السمية البيئية النانوية، التي تولدها الجذور الحرة التي تؤدي إلى بيروكسيد الدهون وتلف الحمض النووي) على إنتاجية النبات والكائنات الحية الدقيقة في التربة وكذلك البيئة. ومن ثم، هناك حاجة للتنبؤ بالآثار البيئية لهذه الجسيمات النانوية في المستقبل المنظور.

هناك العديد من التقارير المتعلقة بالعلاقة بين الجسيمات النانوية وتأثير الجسيمات النانوية على البيئة ومن المعروف أن انواع عدة من الجسيمات النانوية من صنع الإنسان يتم إنتاجها بوساطة تقنيات تصنيع النانو. وبعيداً عن الفوائد، لم يتم حتى الآن تقديم معلومات مفصلة عن التحقيق المنهجي الذي يثير هذا الأمر. هناك مخاوف بشأن تأثيرات هذه الجسيمات النانوية على العمليات والكائنات البيئية المختلفة. تعد النظم البيئية للنباتات وكذلك بيئة المحاصيل الزراعية و/أو الحرجية هي المجالات الرئيسية لهذه الأبحاث. وهذا يعني أن النباتات والكائنات الحية الدقيقة تطورت من نفسها في ظل وجود مواد نانوية طبيعية. في الآونة الأخيرة، زاد احتمال تعرض النباتات لهذه المواد النانوية إلى حد كبير مع الإنتاج المتزايد المستمر واستعمال المواد النانوية الهندسية لمجموعة متنوعة من المنتوجات. لذلك، فإن القلق المتزايد بشأن احتمال حدوث عواقب سلبية غير مقصودة للجسيمات النانوية المهندسة في النظم البيئية الزراعية قد ولّد مبادرات بحثية جديدة تركز على فهم الآثار البيئية لهذه الجسيمات النانوية. فضلا عن ذلك، فإن مصير وانتقال الجسيمات النانوية في البيئات الأرضية بما في ذلك التربة والمياه والرواسب أو حول التأثيرات البيولوجية لهذه الجسيمات النانوية في البيئات الطبيعية، وينبغي أن يركز الجزء الأكبر من البحوث الحديثة في مجال السمية النانوية على أكثر من مجرد مختبرات خاضعة للرقابة العالية. ولذلك فإن الجسيمات النانوية تتواجد في البيئة بشكل طبيعي ومع ذلك، فإن الجسيمات النانوية الطبيعية موجودة بتركيزات منخفضة جدًا ولها تأثيرات ضئيلة (Klaine, *et al.* 2008؛ Remedios, *et al.* 2012). وفي العقود الأخيرة، ظهرت الجسيمات النانوية المصنعة، وتم دمجها في عدد متزايد من المنتوجات التجارية. نظرًا لفهم التهديد الذي تشكله الجسيمات النانوية بشكل أفضل ولمزيد من التحكم في تصريفها في النظام البيئي الزراعي، أصبحت الجهود العلمية والتجارية كبيرة جدًا. على الرغم من أنه في كثير من الحالات، لا يمكن تجنب إطلاق الجسيمات النانوية، إلا أن الهدف يجب أن يكون تقليل إطلاقات الجسيمات النانوية التي يمكن أن تشكل خطرًا كبيرًا على النظام البيئي

الزراعي أو على البشر. ويمكن الاستنتاج أن الجسيمات النانوية لها تأثيرات مختلفة في البيئة. وفيما يتعلق بهذه التأثيرات المختلفة للجسيمات النانوية على النظم البيئية الزراعية، ينبغي التركيز على مصير وسلوك الجسيمات النانوية على المحاصيل الزراعية، والآثار السامة المحتملة على النباتات، والكائنات الحية الدقيقة الموجودة بشكل طبيعي في جذور التربة وتوليد نفايات النانو في النظام البيئي الزراعي. بشكل عام، يمكن أن تشمل هذه النظم البيئية الزراعية التربة والمياه والنباتات والكائنات الحية الدقيقة والحيوانات وكذلك البشر.

تقنية النانو بديلا عن الأساليب الحالية في السيطرة على الآفات

Nanotechnology as an alternative to current methods of pest control

التكنولوجيا النانوية في الزراعة هي القطاع الرئيس في بعض الدول والتي تساهم بنسبة 18٪ في الناتج المحلي الإجمالي و 50٪ من العمالة. الآفات هي عامل مهم في الحد من جودة وكمية المنتوجات. وقد قدرت الخسارة بنسبة 34٪ بسبب الأعشاب الضارة و18٪ بسبب الآفات الحشرية و16٪ بسبب مسببات الأمراض (Oerke, 2005). أن مفصليات الارجل مسؤولة عن تدمير ما يقدر بنحو 18-20٪ من إنتاج المحاصيل في جميع أنحاء العالم بقيمة تزيد عن 470 مليار دولار أمريكي (Sharma, *et al*. 2017). لتقليل الخسائر في المنتوجات الزراعية ضد الآفات المختلفة، يتم استخدام 2.26 مليون طن من المبيدات الحشرية كل عام (منظمة الصحة العالمية WHO). ومن بين الكل، تساهم 40٪ في مبيدات الأعشاب و17٪ في المبيدات الحشرية و10٪ في مبيدات الفطريات في العالم. من خلال استعمال المبيدات الحشرية، يصل 2٪ فقط إلى الهدف والباقي 98٪ يجعل التلوث في النظام البيئي عن طريق تلويث الهواء والماء والتربة. تقنية النانو أداة ناشئة في الزراعة لتحسين إنتاجية وجودة المحاصيل. بفضل خصائصها المذهلة، تتميز المواد النانوية بإطلاق بطيء ومستهدف مع مساحة سطحية كبيرة.

في هذا المجال، يُمكن لهذه التقنية أن تحل محلّ الأساليب الحالية لمكافحة الآفات باستخدام أجهزة استشعار النانو، ومبيدات الأعشاب النانوية، ومبيدات الآفات النانوية. تُساعد تقنية النانو في الحدّ من التلوث البيئي من خلال إنتاج مبيدات الآفات والأسمدة الكيميائية باستعمال الجسيمات النانوية والكبسولات النانوية ذات القدرة على التوصيل والامتصاص والانطلاق المُتحكّم. كما يُساهم تصنيع البلورات النانوية في زيادة كفاءة المبيدات الحشرية عند استعمالها بجرعات أقل (Sharon, *et al*. 2010). في الزراعة، تُستخدم الجسيمات النانوية المُصنّعة كحاملات نانوية لتوصيل مبيدات الأعشاب والحشرات والجينات والأسمدة بشكل مُستهدف. تُوفر الأشكال المُغلفة بالكبسولات النانوية إطلاقًا بطيئًا ومنضبطًا للأسمدة، مما يُقلل من الاستهلاك والتلوث البيئي. يُزيد استخدام جسيمات الفضة النانوية (AgNPs) على نبات الهليون *Asparagus officinalis* من محتوى الأسكوربات والكلوروفيل. وبالمثل، فقد زاد استعمال جسيمات الفضة النانوية على الفاصوليا والذرة من طول البراعم والجذور، ومساحة سطح الورقة، ومحتوى الكلوروفيل والكربوهيدرات والبروتين. وقد أدى استخدام جسيمات الفضة النانوية إلى تحفيز نمو وإنتاجية نبات الخردل الهندي *.Brassica juncea*

المصادر

Klaine, S. J., Alvarez, P. J., Batley, G. E., Fernandes, T. F., Handy, R. D. and Lyon, D.Y. Mahendra S, McLaughlin MJ, Lead JR. 2008. Nanomaterials in the environment: behavior, fate, bioavailability, and effects. Environ Toxicol Chem 27(9):1825–1851. doi: 10.1897/08-090.1

Oerke, E. C. 2005. Crop losses to pests. The Journal of Agricultural Science. 2005; 144(1):31-43.

Remedios, C., Rosario, F. and Bastos, V. 2012. Environmental nanoparticles interactions with plants: morphological, physiological, and genotoxic aspects. J Bot 2012:1–8, http://dx.doi.org/10.1155/2012/751686

Sharma, S., Kooner, R. and Arora R. 2017. Insect pests and crop losses. In Breeding Insect Resistant Crops for Sustainable Agriculture. Springer, Singapore, 2017, 45-66.

Sharon, M., Choudhary, A. K. and Kumar R. 2010. Nanotechnology in agricultural diseases and food safety. J Phytol. 2010; 2:83-92.

Taniguchi, N., Arakawa, C. and Kobayashi, T. 1974. On the basic concept of 'nano-technology'. In Proceedings of the International Conference on Production Engineering. 1974; 8(2):18-23.

Thul, S. T., Sarangi, B. K. and Pandey, R. A. 2013. Nanotechnology in agroecosystem: implications on plant productivity and its soil environment. Expert Opin Environ Biol 2:1.

Yingru, Wen. 2024. A review of applications and future prospects of Nanotechnology. Proceedings of the 4th International Conference on Materials Chemistry and Environmental Engineering. DOI: 10.54254/2755-2721/56/20240640

الفصل الاول

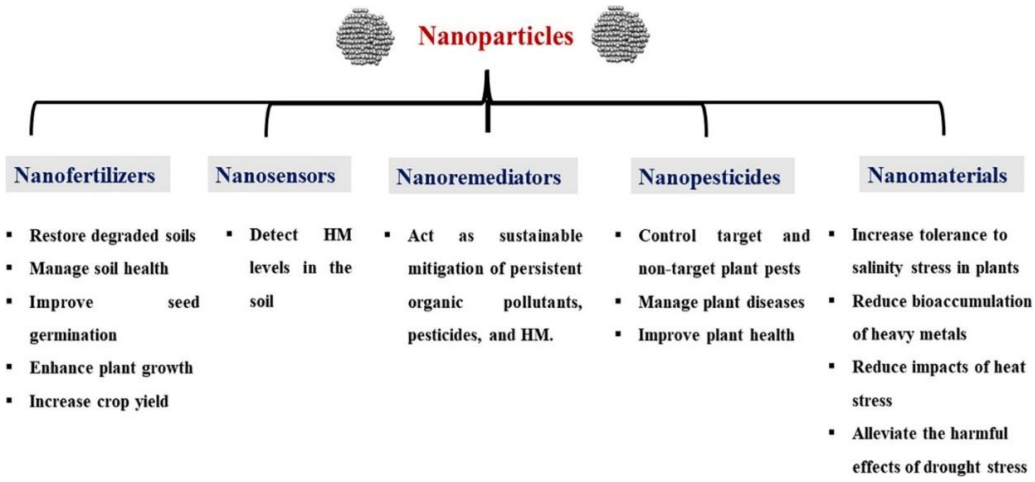
تطبيقات تقنية النانو في تحسين إنتاجية المحاصيل الزراعية

مقدمة

تعد تقنية النانو Nanotechnology مجالًا واعدًا له تطبيقات عدة في مختلف مجالات العلوم الحديثة، بما في ذلك الفيزياء والكيمياء الصيدلية وعلوم الكمبيوتر والزراعة والهندسة. إن الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية المميزة للجسيمات النانوية Nanoparticles (NPs) تمنحها القدرة على تعديل المواد الكيميائية والأجهزة الانموذجية. يتم تعريف الجسيمات النانوية (NPs) Nanoparticlesعلى أنها مواد طبيعية وصناعية ذات بعد واحد على الأقل يتراوح من 1 إلى 100 نانومتر ويمكن أن تكون هذه المواد مركبات عضوية أو غير عضوية أو بوليمرية (Bayda, *et al*.2020).

مع النمو السكاني السريع وتدهور البيئة، تواجه الزراعة التقليدية تحديات غير مسبوقة. لعبت الأسمدة والمبيدات الحشرية أدوارًا محورية في تلبية احتياجات الإنتاج الغذائي لعقود من الزمن. ومع ذلك، فإن الاستخدام المفرط لهذه المواد الكيميائية يعيق أيضًا التنمية الزراعية المستدامة. إن زيادة استخدام تكنولوجيا النانو يمكن أن يوفر حلولاً مبتكرة لتحسين الزراعة المستدامة، والتي من شأنها أيضًا تلبية الطلب على الغذاء. وقد أظهرت الدراسات الحالية أنه يمكن استعمال تكنولوجيا النانو على نطاق واسع لمعالجة المشاكل الزراعية المختلفة، مثل الاستعمال المفرط للأسمدة والمبيدات الحشرية، وإجهاد النبات الناجم عن المناخ القاسي. علاوة على ذلك، تعمل المواد النانوية على تعزيز نمو النبات وإنبات البذور وتحمل الإجهاد بشكل كبير. وكذلك تشمل تطبيقات تكنولوجيا النانو أيضًا مراقبة حالة نمو النبات، والتعديل السريع والبسيط للجينوم والتعبير الجيني في الخلايا النباتية السليمة (Singh,*et al*. 2021; Demiere, *et al* 2021).

في الوقت الحالي، زادت الأبحاث المتعلقة بتكنولوجيا النانو المطبقة في الزراعة بشكل كبير. ومع ذلك، هناك عدد قليل من المراجعات التي تدمج جميع جوانب تكنولوجيا النانو المستعملة في إنتاج المحاصيل معًا، وخاصة أجهزة الاستشعار النانوية الناشئة والتكنولوجيا الحيوية النانوية (شكل 1) .

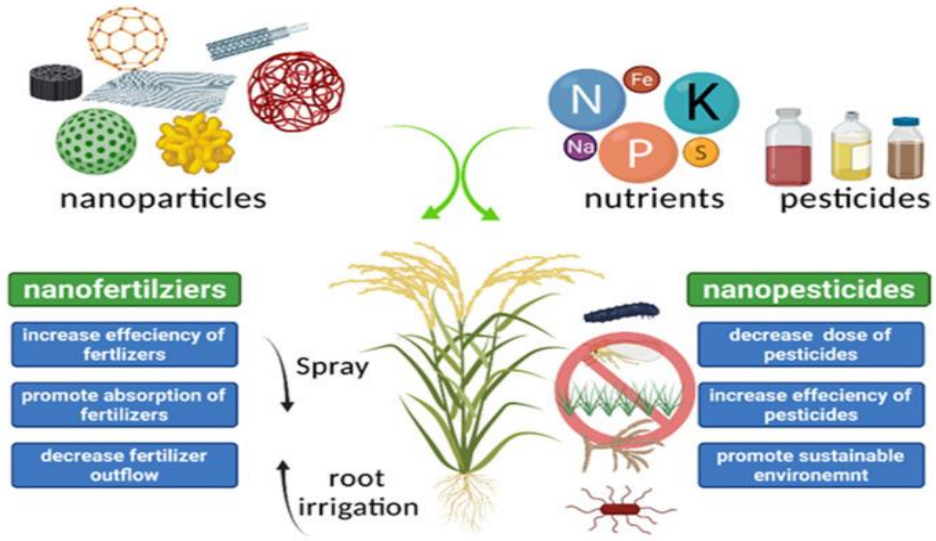


شكل 1. التطبيقات المحتملة لتكنولوجيا النانو في انتاج المحاصيل. عن El-Saadony, *et al*, 2022

الأسمدة النانوية Nanofertilizers

أن الأسمدة الكيمائية لا غنى عنها للنظم الزراعية الحديثة. ومع ذلك، فإن كفاءة المنتوجات الكيميائية الاصطناعية تتناقص منذ عقود، فضلا عن كونها مصحوبة بتلوث المياه وتلوث التربة وانبعاثات الغازات الدفيئة. يمكن لتقنية النانو أن تمهد الطريق للزراعة المستدامة (شكل 2). الأسمدة النانوية هي مغذيات معدنية يتم تصنيعها بشكل رئيس عن طريق التغليف مع الجسيمات النانوية NPs ويمكن تصنيفها إلى مغذيات كبيرة ومغذيات دقيقة. يتم تغليف المغذيات الكبيرة مثل الكربون (C)، والنيتروجين (N)، والبوتاسيوم (K)، والفوسفور (P)، والكالسيوم (Ca)، والكبريت (S)، والمغنيسيوم (Mg) بمواد نانوية مختلفة، لتحسين امتصاص المحاصيل للأسمدة.

وتقليل تدفق الأسمدة. توفر مساحة السطح المحددة العالية والثبات العالي والتوافق الحيوي الممتاز لمركبات الجسيمات النانوية NPs مركبات الأسمدة NP مع زيادة كفاءة الإطلاق صفات جيدة لتحسين إنتاجية المحاصيل (Zulfiqar, *et al*. 2019). على سبيل المثال، أظهرت اليوريا هيدروكسي اباتيت Urea-hydroxyapatite NPs (HA) إمكانات كبيرة لإطالة وقت الإطلاق وتقليل استهلاك الأسمدة النيتروجينية. تحصل اليوريا على مزايا الجسيمات النانوية NPs من خلال التفاعل مع مجموعات الأمين والكربونيل من HA NPs(هايدروكسي اباتيت نانوبارتكل). أظهرت بيانات التجارب الحقلية أنه بالمقارنة مع اليوريا النقية، فإن هجينات اليوريا النانوية Nanohybrids of urea مع الهيدروكسي اباتيت Hydroxyapatite تزيد من كفاءة استعمال النيتروجين الزراعي بنسبة 30٪ تقريبًا. (Kottegoda, *et al*. 2017) فضلا عن ذلك، كشفت العديد من الدراسات أن المساحة السطحية النوعية العالية وكثافة الجسيمات النانوية NPs تمنح الهجينات النانوية تفاعلية عالية .



شكل 2. نموذج تطبيق مبسط للأسمدة النانوية والمبيدات النانوية. يتم تغليف الأسمدة والمبيدات الحشرية بواسطة جسيمات نانوية متعددة الاستخدامات. يمكن استخدام الأسمدة النانوية والمبيدات النانوية عن طريق الرش أو الري لزيادة كفاءة المواد الكيميائية النانوية، وتعزيز امتصاص الأسمدة، وتقليل تدفق الأسمدة وجرعات المبيدات الحشرية وتعزيز الاستدامة البيئية. عن (Liu,*et al*. 2021) .

يعد استعمال الأسمدة النانوية واعدًا جدًا لتعزيز امتصاص الأسمدة وزيادة إنتاجية المحاصيل. أفادت الدراسات الحديثة أن تحميل N وP وK في الكايتوسان النانوي Chitosan NPs يزيد من اكتساب N وP وK بنسبة 17.04% و16.31% و67.50% على التوالي، مقارنةً بغير المعالج في نباتات القهوة المستنبتة. لقد أدى رش أوكسيد المغنيسيوم النانوي (MgO) NPs على القطن إلى زيادة كبيرة في إنتاجية بذور القطن بنسبة 42.2٪ مقارنةً بغير المعالج. علاوة على ذلك، تتحكم الأسمدة النانوية أيضًا في فقدان الأسمدة وتقليل الأضرار التي تلحق بالتربة. أدى هيدروكسيد مزدوج الطبقات Layered double hydroxide (LDH) المحمل بأيونات الفوسفات إلى زيادة كبيرة في قيمة الرقم الهيدروجيني للتربة وتقليل امتصاص التربة للفسفور، أن الهجينات النانوية المذكورة أعلاه، ذات المسام الوفيرة والحجم الأقل، تسهل امتصاص العناصر الغذائية مثل الأسمدة المغلفة بواساطة الجسيمات النانوية NPs، وخاصة المسامية منها، وقد تتضرر بسبب العوامل البيئية مثل المطر والرياح بينما يتم نقل هذه المركبات بسهولة إلى الخلايا النباتية. تعمل هذه الميزة على إطالة وقت إطلاق الأسمدة وتحسين الخواص الفيزيائية والكيميائية للتربة. على وجه التحديد، تتفاعل الأسمدة التقليدية كيميائيًا أو هيكليا مع الجسيمات النانوية NPs مثل الهيدروكسي اباتيت HA أو الكيتوسان NPs، وهذه الأنواع من التفاعلات تساعد الأسمدة على التخلص من حالة التدهور بسبب العوامل البيئية. فضلا عن ذلك، فإن التفاعلات الكيميائية للجسيمات النانوية NPs والأسمدة تقلل وتجانس حجم جزيئات الأسمدة. تمنح هذه العملية الأسمدة النانوية الثبات ومساحة سطحية عالية محددة، مما يزيد بشكل كبير من كفاءة الأسمدة (Guo, *et al.* 2018).

تم أيضًا احتواء المغذيات الدقيقة مثل الحديد (Fe)، والبورون (B)، والمنغنيز (Mn)، والنحاس (Cu)، والزنك (Zn)، والموليبدينوم (Mo) في مواد نانوية مثل الكيتوسان، وأكسيد الزنك (ZnO NPs)، Cu NPs وCa NPs، التي تعمل على تحسين إمكانية الوصول الفعال للمغذيات الدقيقة إلى النباتات. تلعب هذه المغذيات

الدقيقة أدوارًا حاسمة في التفاعلات الفسيولوجية والكيميائية المتنوعة للنبات، بما في ذلك عملية التمثيل الضوئي ومكونات الإنزيمات ومنشطات الإنزيمات. علاوة على ذلك، فإن استخدام الأسمدة النانوية المصنوعة من المغذيات الدقيقة يعزز نمو النبات ويزيد الإنتاجية. على سبيل المثال، أدى تسميد الفراولة بسماد أوكسيد الزنك النانوي ZnO NPs إلى زيادة كبيرة في تكوين الثمار وإنتاجية الحبوب مقارنة بالفراولة المسمدة بكبريتات الزنك ($ZnSO_4$). يؤدي نقص فيتامين B إلى إتلاف نمو البراعم وإنبات حبوب اللقاح. ومع ذلك، فإن التطبيق الورقي لبورات الكالسيوم النانوية ($CaO_2B_2O_3 \cdot {}_{10}H_2O$ NPs) على الخس عزز تراكم فيتامين B بمقدار 1.54 و3.95 ضعفًا في البراعم والجذور، على التوالي، مقارنة بالمعالجة باستخدام محلول مغذي في إضافة فيتامين B2 التقليدي (Meier, *et al*. 2020). ومن خلال ذلك يمكن للمغذيات الدقيقة الإضافية أن تعزز معدل التمثيل الضوئي ونشاط الإنزيم المضاد للأكسدة. تؤدي هذه العمليات الفسيولوجية إلى ارتفاع الأوزان الجافة وأطوال البراعم وأطوال الجذور والكتلة الحيوية. كما ان التطبيق الورقي أو المنقوع للمغذيات الدقيقة النانوية يزيد بشكل كبير من الإنتاجية ويعزز نمو النبات.

يعد توزيع حجم الجسيمات النانوية NPs حالة فعالة تتعلق بكفاءة الإخصاب. ومن المثير للاهتمام أن الأسمدة النانوية جميعها قللت من أحجام الجزيئات وزادت أعداد الجزيئات لكل وحدة، ما أدى إلى ارتفاع المساحات السطحية النوعية. أن زيادة التفاعل مع الأوراق والجذور تمكن النباتات من امتصاص الأسمدة بشكل أفضل. بالإضافة إلى ذلك، فإن الخصائص الفريدة للجسيمات النانوية NPs تؤدي إلى تأثيرات دائمة. الأسمدة المغلفة بالجسيمات النانوية NPs تقاوم التحلل عن طريق التحلل المائي والتحلل الضوئي والتبخر وتحلل الكائنات الميكروبية والتهوية. فضلا عن ذلك، قد تساعد تركيباتها المسامية وصفاتها الصغيرة الحجم على نقل الجسيمات النانوية NPs إلى الخلايا عن طريق الناقلات الجزيئية أو القنوات الأيونية، ما ينشط مسارات الإشارات المتعلقة بالهرمونات النباتية أو عوامل النمو الأخرى.

الأسمدة النانوية مقابل الأسمدة التجارية Nanofertilizers Versus Commercial Fertilizers

يمكن إطلاق المواد الكيميائية الزراعية بطريقة خاضعة للرقابة، ويمكن تسليم الجزيئات الكبيرة بشكل انتقائي. ومن خلال دمج الناقلات النانوية والمواد الكيميائية، يمكن تحسين الاستعمال الفعال للأسمدة والمبيدات الحشرية، ما يؤدي إلى خفض الكمية المستخدمة دون المساس بإنتاجية المحاصيل. في المقابل، توفر الأسمدة التجارية فوائد أقل للنباتات بسبب حجم جزيئاتها الأكبر وانخفاض قابليتها للذوبان. فضلا عن ذلك، يؤدي الاستخدام المتكرر للأسمدة الكيماوية إلى تراكم المواد السامة التي تعطل التوازن البيئي في التربة. بالإضافة إلى ذلك، فإن الاستعمال المفرط للأسمدة الكيمائية يمكن أن يساهم في تلوث التربة بسبب الترشيح أو عدم استخدامها بالكامل من قبل النباتات، وبالتالي يتم تحويل الباقي إلى أملاح غير قابلة للذوبان في التربة.

تلعب المواد الكيميائية النانوية دورًا مهمًا في تعزيز كفاءة استعمال المغذيات وإدارة جودة المياه من أجل الزراعة المستدامة. ومع ذلك، فإن التراكم الحيوي والتعرض طويل الأمد للمصادر الطبيعية للنباتات قد يكون له تأثير سلبي على النباتات الصالحة للأكل والسلاسل الغذائية، يمكن تناول الجسيمات النانوية النيتروجينية N وترسيبها في الأنسجة الصالحة للأكل لنباتات المحاصيل. كما يمكن أن يؤدي تراكم الجسيمات النانوية أو أيونات المعادن في حالتها الطبيعية إلى تعطيل الأنشطة الفسيولوجية للنبات وتؤثر في سلامة المنظمات العضية الخلوية ودون الخلوية. وتعديل محتوى البروتينات والدهون والأحماض النووية عن طريق إنشاء جذور الهيدروكسيل. بشكل عام، قد تولد التطبيقات الواسعة النطاق للجسيمات النانوية عددًا كبيرًا من الصعوبات من الناحية البيئية والأخلاقية والصحية والسلامة .(Rajput, *et al*. 2018).

حتى الآن، كانت الآثار السلبية المحتملة للجسيمات النانوية على صحة الإنسان مجرد تخمينات وغير مثبتة. من خلال تطوير العديد من الجسيمات النانوية كأدوات جديدة لصناعة الزراعة اسهمت في زيادة شعبية تكنولوجيا النانو. هناك حاجة ملحة لزيادة

معرفتنا وفهمنا للفوائد والعيوب المحددة المرتبطة باستعمال هذه التكنولوجيا. لقد أدى تقدم تكنولوجيا النانو إلى إنتاج كميات كبيرة منها المصنعة في البيئة الزراعية. على الرغم من أن هذه التكنولوجيا لها مزايا عده، إلا أن الباحثين والخبراء يشعرون بالقلق إزاء التخلص غير الآمن من المواد النانوية بكميات كبيرة (عدة مئات من الأطنان) كل عام. يوصى بوجود NPs في مختلف الأجسام الخاضعة للرقابة (الهواء الجوي، والأجسام المائية، والتربة، والهيدروبيونات، والطحالب، والفطريات، وأنسجة النباتات / الحيوانات البرية). بالمقارنة مع المصادر الأخرى، فقد خضع مصير وحركة الجسيمات النانوية NPs في التربة لقليل جدًا من الأبحاث. وفي الوقت نفسه، توفر التربة العناصر الغذائية الأساسية للمحاصيل الغذائية، والتي يمكن أن تعمل أيضًا كحوض تجميع للجسيمات النانويــة NPs (Rajput et al., 2020).

المبيدات النانوية Nanopesticides

يحمل التويلف النانوي Nanoformulation أو تغليف المبيدات الحشرية Encapsulation ومبيدات الأعشاب ومبيدات الفطريات ومبيدات البكتيريا بمواد نانوية إمكانات هائلة لتقليل جرعات المبيدات الحشرية الكيميائية وزيادة إنتاج المحاصيل وتعزيز التنمية المستدامة. تشتمل الناقلات النانوية Nanocarriers للمبيدات النانوية على الجسيمات النانوية NPs بوليمرية (مثل الكيتوسان والدهون الصلبة)، والجسيمات النانوية NPs غير المعدنية غير العضوية (مثل NPs السيليكا والطين النانوي) والجسيمات النانوية NPs المعدنية (مثل Cu NPs وZnO NPs) (El-Naggar, *et al*. 2020) وقد أظهرت العديد من الدراسات أن المبيدات الحشرية النانوية أكثر كفاءة في قتل الآفات وأقل احتمالا للتسبب في آثار جانبية على البشر. على سبيل المثال، أظهرت الجسيمات النانوية للكيتوسان المحملة على مبيدات السبينوساد والبيرميثرين المطبقة على ذبابة الفاكهة السوداء توافرًا حيويًا معززًا حتى عند الجرعات الأقل من السبينوساد الحر والبيرميثرين الحر، وتسببت المركبات

النانوية في تقليل الأضرار التي لحقت بالبشر والبيئة ، وعند تغليفها بواسطة الجسيمات النانوية NPs، تصبح جزيئات المبيدات الحشرية النانوية أصغر حجمًا وأكثر مركزية، مما يمنحها الاستقرار وقدرة إطلاق بطيئة. هذه الخصائص تزيد من نشاط المبيدات الحشرية وتقلل من سميتها تجاه الإنسان. فضلا عن ذلك، توفر السمية البيولوجية للجسيمات النانوية NPs عالية التركيز طريقًا فريدًا للتثبيط المباشر لنمو الآفات والبكتيريا والفيروسات. على سبيل المثال، العديد من المبيدات الحشرية النانوية تستفيد من سمية الجسيمات النانوية NPs المعدنية. أظهر أوكسيد الألومنيوم NPs (Al_2O_3) إمكانات كبيرة للقضاء على خنفساء الرز *Sitophilus oryzae* على الأرز المخزن مقارنة بالمعالجة السائبة باستعمال أوكسيد الالمنيوم Aluminum oxide Al_2O_3. تم التحقق من أن الفيرومونات وسيلة واعدة وفعالة للسيطرة على العديد من الآفات لذلك تعمل مركبات الناقلات النانوية والفيرومونات على تضخيم مزايا الفيرومونات الجنسية (Bhagat, *et al.* 2013). على سبيل المثال، أدت المواد الهلامية النانوية المحملة بميثيل يوجينول والتي تم تطبيقها في بساتين الجوافة إلى زيادة عدد الحشرات الممسوكة في المصائد مقارنة بمجموعة المقارنة التي تحتوي فقط على ميثيل يوجينول.

أظهرت مبيدات الأعشاب، التي تستعمل على نطاق واسع لإزالة الأعشاب الضارة، العديد من الآثار الجانبية، بما في ذلك الآثار السامة على الكائنات الحية، وتلوث المياه وتلوث التربة والهواء، منذ الإنتاج التجاري لهذه المركبات الكيميائية. يعد تغليف مبيدات الأعشاب بالجسيمات النانوية وسيلة واعدة لتقليل بقايا مبيدات الأعشاب في البيئة وزيادة كفاءة مكافحة الحشائش. من بين الأنواع المختلفة من الجسيمات النانوية NPs، تعد الدهون الصلبة هي الناقلات النانوية الأكثر ملائمة لمبيدات الأعشاب النانوية نظرًا لاستقرارها الكيميائي الجيد واستقلابها البسيط. على سبيل المثال، أدى التطبيق الورقي لعديد السكريات المحمل بميثيل سلفورون Solid lipid NP-based nanoherbicides على الادغال التي تنمو في القمح إلى انخفاض ملحوظ في الكتلة

الحيوية للأعشاب مقارنة بمبيدات الأعشاب العادية. وبينت الدراسات أن الجسيمات النانوية NPs المحملة بمبيدات الأعشاب كانت أقل سمية من مبيدات الأعشاب العادية. أظهرت دراسة أخرى لمبيدات الأعشاب النانوية الدهنية الصلبة القائمة على الجسيمات النانوية NPs خصائص إطلاق ونشاط مبيدات الأعشاب أفضل من مبيدات الأعشاب العادية. أدى تغليف مبيد الأترازين بواسطة الجسيمات النانوية NPs الدهنية الصلبة إلى تثبيط نمو *Raphanus ravanistrum* (أحد أنواع الحشائش) بشكل كبير مقارنة بالمجموعة الطبيعية المعالجة بمبيدات الأعشاب التقليدية. فضلا عن ذلك، لم يكن لتركيز مبيدات الأعشاب النانوية المختبرة أي سمية تجاه محصول الذرة. كما ذكر أعلاه، يبدو أن الجسيمات النانوية المعدنية NPs لديها إمكانات فريدة لإنتاج مبيدات الفطريات النانوية. على سبيل المثال، بالمقارنة مع مستخلصات الأوراق الحرة، أظهرت المبيدات النانوية المكونة من جسيمات الفضة النانوية NPs (Ag NPs) ومستخلص أوراق الريحان المقدس زيادة في تثبيط البكتريا *Xanthomonas axonopodis* pv على الرمان. كشفت التجارب التي فحصت النشاط البكتيري أن الجسيمات النانوية النحاسية NPs تمنع نمو خمس انواع من البكتيريا، وهي *Agrobacterium tumefaciens*، و*Dickeya addantii*، و *Erwinia amylovora*، و*Pectobacterium carotovorum*، و *Pseudomonas savastanoi pv*. علاوة على ذلك، تتمتع الجسيمات النانوية المعدنية NPs بالقدرة على تثبيط البكتيريا/الفطريات، ويمكن للجسيمات النانوية غير المعدنية NPs من تثبيط الأمراض النباتية ايضا. على سبيل المثال، تمكنت الجسيمات النانوية للكيتوسان NPs من السيطرة بشكل فعال على العدوى بواساطة البكتريا *Xanthomonas Campestris* في الفلفل الحار مقارنة بالمجموعة غير المعالجة (Esyanti, *et al.* . (2020وكذلك ، تمنع الجسيمات النانوية المعدنية NPs أيضًا نشاط الفطريات. على سبيل المثال، قللت جسيمات الكوبالت النانوية Cobalt ferrite NPs ($CoFe_2O_4$) و ($NiFe_2O_4$) من حدوث ذبول الفيوزاريوم مقارنة بتلك الموجودة في النباتات غير

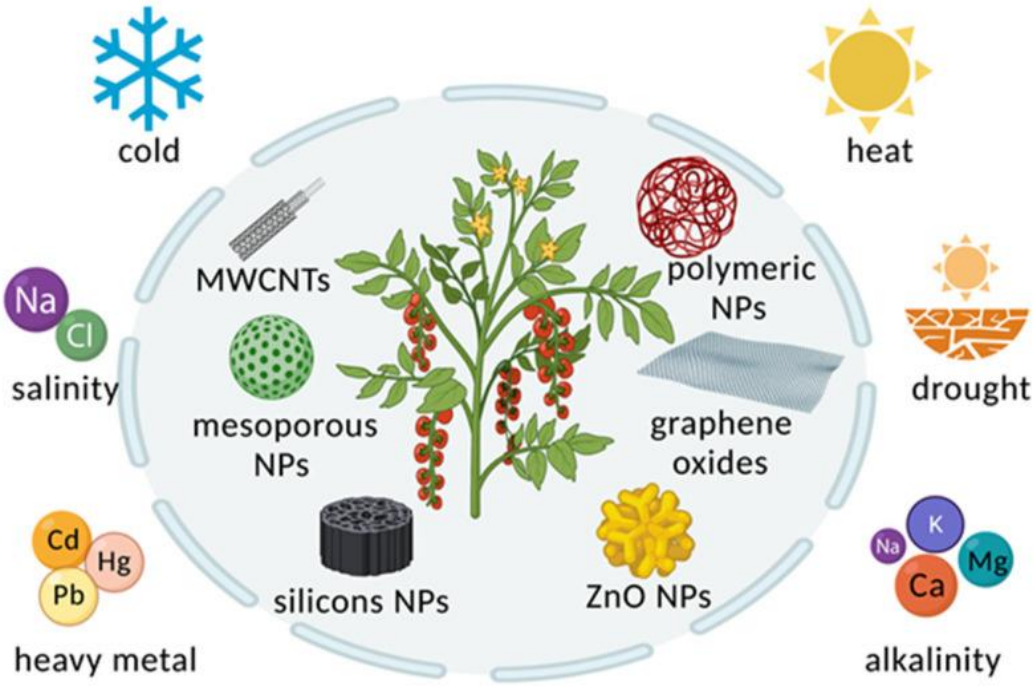
المعالجة، ولم يكن لهذه الجسيمات النانوية NPs أي آثار جانبية على نمو نباتات الفلفل. فضلا عن ذلك، تحتوي مجموعات الجسيمات النانوية NPs ومبيدات الفطريات على توزيعات مركزة لحجم الجسيمات ومساحات سطحية كبيرة محددة، ما يحسن النشاط المضاد للفطريات ويطيل أوقات إطلاق مبيدات الفطريات. أفادت العديد من الدراسات أن مبيدات الفطريات المغلفة بـالجسيمات النانوية NPs كان أداؤها رائعًا في السيطرة على الفطريات. عززت الجسيمات النانوية للكيتوسان Chitosan- Hexaconazole NPs المتشابكة مع Tripolyphosphate (TPP) تثبيط نمو الفطر *Ganoderma boninense* مقارنة مع Hexaconazole النقي. فضلا عن البكتيريا والفطريات، تؤدي الفيروسات النباتية إلى خسائر هائلة في إنتاج المحاصيل بسبب ازدواجها السريع وتنوعها الجيني وتطورها الديناميكي. أصبحت الجسيمات النانوية NPsأدوات إدارة واعدة لمنع الغزو الفيروسي بطرائق مختلفة، مثل التفاعل مع الأحماض النووية، وتحفيز الاستجابات المناعية للنبات، وتوليد أنظمة تدخل الحمض النووي الريبي (RNA). أدى التطبيق الورقي لأنابيب الكربون النانوية Carbon nanotubes (CNTs) على التبغ إلى قمع أعراض فيروس فسيفساء التبغ Tobacco mosaic virus (TMV) بشكل فعال مقارنة بالتحكم بغير المعالج كما انخفض مستوى التعبير النسبي لبروتينات الغلاف الفيروسي في النباتات المعالجة بأنابيب الكربون النانوية Carbon nanotubes (CNTs). زادت تركيزات حمض الساليسيليك Salicylic acid وحمض الأبسيسيك Abscisic acid في النباتات المعالجة بالأنابيب النانوية الكربونية بشكل كبير مقارنة بتلك الموجودة في المجموعة غير المعالجة. أن الأنابيب النانوية الكربونية تمنع عدوى فيروس TMV عن طريق إعاقة تكاثر الفيروس وحركته(Adeel, *et al.* 2021) . ذكرت دراسة حديثة أن الجسيمات النانوية المعدنية NPs مثل جسيمات الفضة Ag NPs يمكن أن تتفاعل مع بروتين الغلاف وتحفز الاستجابة المناعية للنبات لمنع العدوى بفيروس فسيفساء الطماطم (ToMV) وفيروس البطاطس Y (PVY). انخفضت إصابة الطماطم

بـفيروسات ToMV Tomato mosaic virus و Potato virus Y PVY مقارنة بغير المعالج عند رشها بـجسيمات الفضة النانوية Ag NPs. وفي الوقت نفسه، زاد محتوى البروتين الكلي القابل للذوبان (TSP) ونشاط أوكسيديز البوليفينول Polyphenol oxidase (PPO) في الطماطم المصابة بفيروس ToMV بشكل ملحوظ مقارنة مع غير المعاملة.

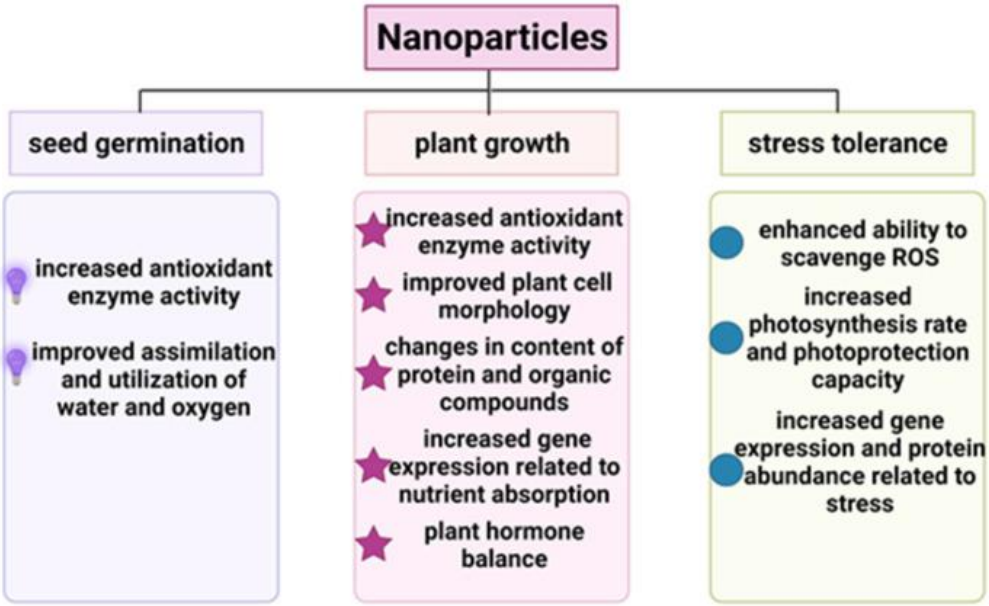
تقنية النانو في تنظيم إنبات البذور ونمو النباتات

Nanotechnology in Regulating Seed Germination, and Plant Growth

استخدمت تكنولوجيا النانو في جوانب مختلفة من الإنتاج الزراعي، مثل إنبات البذور ونمو النباتات، لزيادة إنتاجية المحاصيل وجودتها (شكل 3، 4). إن إنبات البذور هو عملية بيولوجية أساسية ومكررة ترتبط بالعوامل البيئية والصفات الوراثية ومعايير التربة. في الآونة الأخيرة، أظهرت بعض الدراسات أن الجسيمات النانوية NPs مثل الأنابيب النانوية الكربونية، وثاني أكسيد السيليكون NPs (SiO_2)، وأكسيد الزنك NPs، وثاني أكسيد التيتانيوم NPs (TiO_2) وحتى الذهب (Au) لها تأثيرات إيجابية على إنبات البذور في نباتات المحاصيل، بما في ذلك الطماطم والقمح والذرة و الأرز والدخن وفول الصويا والشعير والذرة (Haghighi and Teireira, 2014).



شكل 3. تطبيقات الجسيمات النانوية (NPs) في تحمل الإجهاد. بما في ذلك الأنابيب النانوية الكربونية متعددة الجدران (MWCNTs)، والجسيمات النانوية NPs متوسطة المسام، والجسيمات النانوية NPs السيليكون، والجسيمات النانوية NPs البوليمرية، وأكاسيد الجرافين، وأكسيد الزنك (ZnO) NPs، بنجاح لمساعدة على التكيف مع الاجهادات المختلفة. عن (Liu, *et al*. 2021)



شكل 4. آلية الجسيمات النانوية المستحثة لتعزيز إنبات البذور ونمو النبات وتحمل الإجهاد. (Liu, *et al.* 2021)

فضلا عن ذلك، يمكن لعناصر الجسيمات النانوية NPs مثل Ag NPs وZnO NPs وTiO$_2$ NPs وSilica NPs وMWCNTs تعزيز النمو والتمثيل الضوئي وإنتاج العديد من أنواع المحاصيل، مثل السبانخ والقطن والذرة وفول الصويا والشعير (Iqbal, *et al.* 2017). تعمل الجسيمات النانوية NPs في المقام الأول على تسريع نمو النبات عن طريق التوسط في نشاط إنزيم مضادات الأكسدة في المحاصيل. على سبيل المثال، أدى رش اوكسيد الزنك النانوي ZnO NPs على الخيار إلى تحسين محتوى الكلوروفيل النباتي ووزن الأوراق الطازجة/الجافة. زادت أنشطة الإنزيمات المرتبطة بمضادات الأكسدة، مثل أنشطة Superoxide dismutase (SOD) و Catalase (CAT)، في أوراق الخيار المعالجة بشكل ملحوظ مقارنة مع المجموعة غير المعالجة. بالإضافة إلى ذلك، تؤثر الجسيمات النانوية NPs على مورفولوجيا الخلايا النباتية وتحسن محتوى البروتين والمركبات العضوية في الخلية. عززت التربة المعدلة بسيليكا الجسيمات النانوية NPs نمو الذرة، خاصة من حيث ارتفاع النبات

وطول الجذر. فضلا عن ذلك، قد تكون الاختلافات في مورفولوجيا النبات مرتبطة بسمك جدار الخلية. أظهرت النباتات المعالجة بالسيليكا-NP جدرانًا خلوية أكثر سمكًا وأجسام سيليكا أكثر في الخلايا الجذرية مقارنة بنباتات المقارنة غير المعاملة. وفي الوقت نفسه، كان محتوى البروتين في النباتات المعالجة بالسيليكا النانوية-NP أعلى من نظيره في النباتات المعالجة بالسيليكا. ومع ذلك، كانت المركبات العضوية مثل الفينولات والألدهيدات والكيتونات أقل وفرة في النباتات المعالجة بالسيليكا NP. تميل الجسيمات النانوية NPs إلى تحفيز التعبير الجيني المتعلق باستيعاب العناصر الغذائية وتنظيم النمو.

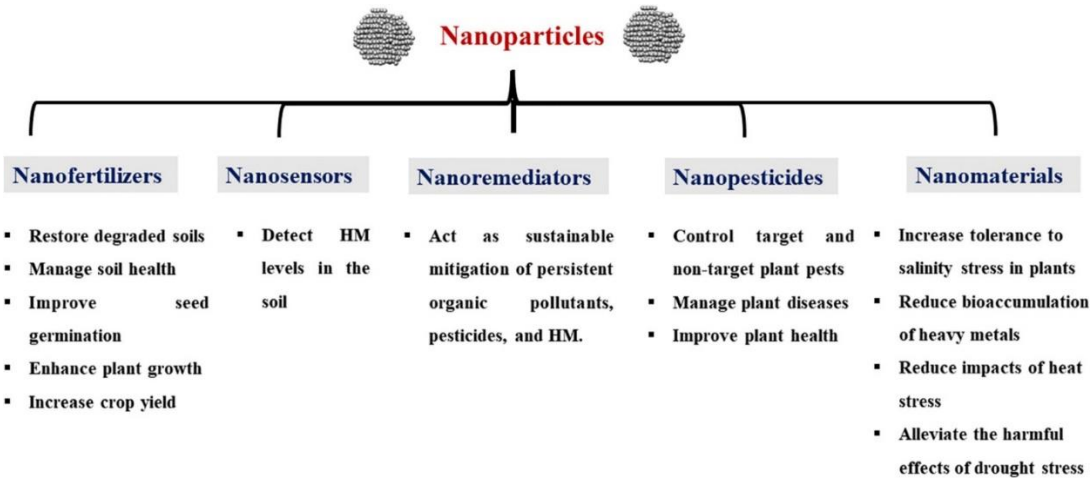
نظرًا لخصائص التفاعل الهيكلي والسطحي، يمكن أن تحفز الجسيمات النانوية NPs الإجهاد التأكسدي داخل الخلايا والضرر الوراثي، مما قد يؤدي إلى انخفاض إنتاجية المحاصيل والاضطرابات الفسيولوجية عند تطبيق تركيزات عالية منها. مما ذكر أعلاه، فإن العناصر المعدنية النانوية NPs لها دائمًا آثار جانبية على الكائنات الحية بسبب سمية العناصر المعدنية. اعتمادًا على هذه الخاصية، ومن ذلك يمكن أن تكون مصدرًا مناسبًا للمبيدات النانوية، ولكنها من المحتمل أيضًا أن تمنع نمو النبات وتطوره. أدت العناصر المعدنية النانوية NPs عند 500 ملغم / لتر إلى انخفاض ملحوظ في الكتلة الحيوية للقرع بنسبة 74٪ مقارنةً بالتحكم غير المعالج. بالإضافة إلى ذلك، أظهر القرع المزروع في محلول هوغلاند المعدل بـ 100 ملغم/لتر من النحاس النانوي NPs انخفاضًا بنسبة 93% في الكتلة الحيوية مقارنةً بغير المعالج (Musante, *et al.* 2012). لذلك، يجب علينا تحديد الجرعات الأكثر أمانا من الجسيمات المعدنية النانوية NPs المختلفة لأنواع المحاصيل المختلفة.

الاجهادات اللاحيائية في النباتات Abiotic Stress

تشمل عوامل الإجهاد اللاأحيائي Abiotic Stress التي يمكن أن تؤثر في الإنتاجية الزراعية الحديثة في جميع أنحاء العالم: درجات الحرارة المرتفعة أو

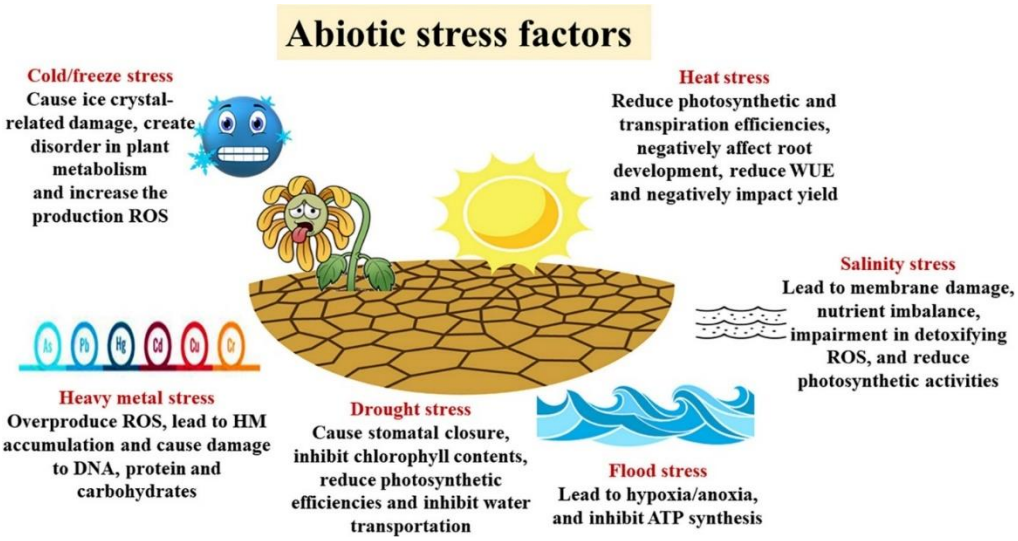
المنخفضة، والتشبع بالمياه Waterlogging، والجفافDrought، والملوحة Salinity، والمعادن الثقيلة Heavy metals (HMs)، والأشعة فوق البنفسجية Ultraviolet (UV). تتضمن استجابة النبات للإجهاد اللاأحيائي تغييرات في العمليات المورفولوجية والفسيولوجية والكيميائية الحيوية المختلفة اعتمادًا على نوع المحصول ونوع الإجهاد ووقت التعرض. على هذا النحو، يمكن للزراعة المستدامة وإنتاجية الغلة تحسين نوعية التربة والمياه والموارد الأخرى التي تحتاجها النباتات. ولتلبية الطلب العالمي المتزايد على الغذاء، يسعى الباحثون جاهدين إلى تخفيف الآثار الضارة للضغوط غير الحيوية، وتعزيز إنتاج المحاصيل وإنتاج الغذاء، وتحقيق الاستدامة والأمن الغذائي. وفي الواقع، لمعالجة هذه المخاوف العالمية الملحة، يجب على الباحثين الاستمرار في تطوير تقنيات أو حلول مبتكرة (Seleiman *et al*., 2020a).

تعد تكنولوجيا النانو فرعًا بحثيًا رائعًا وسريع التطور أدى إلى ابتكارات مختلفة (El-Saadony, *et al*. 2020; 2021) وعلى وجه الخصوص، يمكن أن تساعد تكنولوجيا النانو في توفير حلول فعالة للمشاكل المتعلقة بالزراعة وتحقيق مستقبل مستدام وآمن للزراعة. في الزراعة، تُستخدم تكنولوجيا النانو بشكل أساسي في تطبيق الأسمدة النانوية والمبيدات النانوية لتتبع المنتجات ومستويات المغذيات لتعزيز النمو والإنتاجية وزيادة مقاومة النبات للآفات الحشرية والأمراض الميكروبية. وهكذا، تم دمج الجسيمات النانوية NPs في استراتيجيات إدارة الأمراض كمبيدات للجراثيم/مبيدات الفطريات/مبيدات الآفات لتعزيز صحة النبات. يمكن أن تعمل الجسيمات النانوية NPs أيضًا كأسمدة نانوية كلية وجزئية في النباتات للتخفيف من أعراض نقص المغذيات وتكملة العناصر الأساسية (شكل 5). يمكن استخدام تقنيات بيولوجية وفيزيائية وكيميائية مختلفة لتخليق الجسيمات النانوية NPs. ومع ذلك، لم يتم توضيح الآليات الأساسية لكيفية تفاعل NPs مع النباتات بشكل كامل.



شكل 5. التطبيقات المحتملة لتكنولوجيا النانو في الزراعة. عن (Elsakhawy, *et al*. 2018)

مع تزايد عدد سكان العالم، تؤثر ظروف الإجهاد اللاأحيائي بشكل متزايد على إنتاج المحاصيل (الشكل 6). أثناء الإجهاد، تحدث تغيرات فسيولوجية وكيميائية حيوية في الخلايا النباتية التي يمكن أن تؤثر سلبًا في نمو النبات وتطوره وإنتاجيته. يمكن أن تكون الأنواع والأصناف التي يتم تربيتها لتحمل هذه التحديات إلى جانب تكنولوجيا النانو وغيرها من التقنيات الزراعية الحساسة للمناخ هي استراتيجية التكيف الأكثر كفاءة للتعامل مع عوامل الإجهاد المناخية وغير الحيوية، وبالتالي تحقيق الإنتاج المستدام.



شكل 6. عوامل الإجهاد اللاأحيائي وتأثيراتها السلبية على النباتات، أنواع الأكسجين التفاعلية ROS؛ كفاءة استخدام المياه WUE ، المعادن الثقيلة HM. عن (El-Saadony, *et al*, 2022)

تشمل الاجهادات اللاأحيائية الرئيسة التي تحد من عائدات المحاصيل على مستوى العالم: الإجهاد الحراري Heat stress والجفاف Drought stress حيث يؤدي الجفاف إلى حدوث العديد من التغيرات المورفولوجية والفسيولوجية والجزيئية والتمثيل الغذائي في النباتات والتي تعد مهمة نسبيًا. تنظم النباتات موصليتها في الثغور للتحكم في كمية الماء المفقودة، وتحسين استيعاب ثاني أكسيد الكربون لتجنب تثبيط التمثيل الضوئي، مما يسمح لها بمقاومة الإجهاد المائي. في ظل الظروف القاحلة، تتأثر الفينولات والفلافونويد والإنزيمات المضادة للأكسدة إلى حد كبير في هذه الظروف. يتم نقل الإشارات الجذرية عبر نسيج الخشب إلى الأوراق، مما يؤثر على الحالة الخلوية في النباتات التي تعاني من الجفاف. ويمكن أيضًا ملاحظة فقدان التورم في النباتات تحت ضغط الجفاف. إذا كان الجفاف شديدًا، قد يصبح البروتوبلازم جامدا، وبالتالي تغيير التمثيل الغذائي الخلوي وتثبيط نمو النبات. يمكن للجفاف أن يعطل بشدة عملية التمثيل الغذائي الخلوي، وتراكم الأيونات، وسلامة بنية الغشاء الخلوي، وهياكل البروتين في النباتات. ولذلك، يتم تقليل نمو الأوراق ومعدلات التمثيل الضوئي

والأنشطة الأنزيمية. يمكن للجفاف أيضًا أن يحفز التوليد المفرط لأنواع الأكسجين التفاعلية Reactive Oxygen Species (ROS) في النباتات وبالتالي يؤدي إلى الإجهاد التأكسدي. فضلا عن ذلك، تعتبر الملوحة والإجهاد والعناصر الثقيلة (HMs) Heavy metals أيضًا من بين العوامل البيئية التي تحد من إنتاجية المحاصيل في العديد من البلدان.

الملوحة Salinity هي نوع من الإجهاد اللاأحيائي منتشر على نطاق واسع ومسؤول عن انخفاض كبير في نمو النبات. تمنع ملوحة التربة إنبات البذور بسبب انخفاض القدرة الأسموزية المتولدة حول البذور، مما يمنع امتصاص الماء. يؤدي الإجهاد التأكسدي الناجم عن كلوريد الصوديوم (NaCl) في البقوليات إلى تثبيط النمو بشكل كبير، ويقلل من جودة مغذيات البذور، يمكن للنباتات استخدام آليات دفاع مختلفة مضادة للأكسدة إنزيمية وغير إنزيمية، لتقليل تأثير الإجهاد التأكسدي المرتبط بالملوحة. تعتبر الأسكوربات والكاروتينات من آليات الدفاع غير الأنزيمية المهمة ضد الملوحة، في حين أن البرولين (Pro) هو مركب معروف مرتبط بالإجهاد التناضحي. يستفيد نمو النبات وتطوره من العناصر الأساسية، مثل الكوبالت (Co)، والنحاس (Cu)، والحديد (Fe)، والمنغنيز (Mn)، والموليبدينوم (Mo)، والنيكل (Ni)، والزنك (Zn)، والعناصر غير الأساسية مثل الكادميوم (Cd) والكروم (Cr) والرصاص (Pb) والزئبق (Hg). ومع ذلك، فإن جميع العناصر الثقيلة HMs شديدة السمية للنباتات بتركيزات عالية. تؤثر المستويات السامة للعناصر الثقيلة HMs سلبًا على عمليات التمثيل الغذائي المختلفة. قد يشمل ذلك، على سبيل المثال لا الحصر، تدهور أو إزاحة هياكل البروتين الناتجة عن تطور الروابط بين العناصر الثقيلة HMs ومجموعات السلفهيدريل Sulfhydryl واضطراب سلامة الغشاء السيتوبلازمي، وكبح عملية التمثيل الضوئي، والتنفس، والإجراءات الأنزيمية Khan, *et al.* (2021).

تكنولوجيا النانو كوسيط في تحمل الإجهاد اللاأحيائي

Nanotechnology in Mediating Abiotic Stress Tolerance

باعتبار النباتات كائنات لاطئة (مرتكزة على محور) فهي تتعرض بسهولة للضغوط غير الحيوية مثل البرد والحرارة والجفاف والملوحة وقلونة التربة والتلوث بالمعادن الثقيلة، مما يؤثر بشدة في إنتاج الغذاء وسلامته. أشارت العديد من الدراسات إلى أن المواد النانوية المختلفة، بما في ذلك ZnO NPs وTiO_2 NPs وFe_2O_3 NPs والسيليكون Nanoceria, graphene Oxides (Si) NPs الجرافين وMWCNTs، فتقلل من الآثار الضارة للإجهاد اللاأحيائي على أنواع نباتات المحاصيل مثل البطاطا والشعير والبرسيم الحجازي والبنجر السكري والكتان والذرة والأرز. تعمل الجسيمات النانوية NPs على تعزيز تحمل النبات للإجهاد اللاأحيائي في الغالب عن طريق التخلص من انواع الاوكسجين التفاعلية (ROS) Reactive Oxygen species وزيادة أنشطة الإنزيمات المضادة للأكسدة Antioxidant Enzyme activities. أظهرت الأبحاث الحديثة أن الجرافين النانوي NPs يزيد من تحمل البرسيم للظروف القلوية، وتحديدًا عن طريق تحسين أنشطة الإنزيم المضاد للأكسدة وزيادة الوزن الطازج والوزن الجاف وطول جذر الشتلات. يمكن أن تتفاعل أيونات السيريوم Ce مع جذور الهيدروكسيل وأنيونات الأكسيد الفائق وبيروكسيد الهيدروجين لتوليد مواد غير ضارة مثل الأوكسجين والماء وأيونات الهيدروكسيد. Polyacrylic acid Nanoceria (PNCs) مع نسبة منخفضة من مستويات ROS Ce3+/Ce4+ المخفضة في أوراق نبات *Arabidopsis thaliana*. كشفت أحدى الدراسات أن اوكسيد المغنيسيوم النانوي MgO NPs خفف من إجهاد الرصاص (Pb) في نبات *Daucus carota* عن طريق زيادة أنشطة SOD وCAT. على وجه التحديد، أدى اضافة MgO NPs إلى زيادة أنشطة SOD وCAT بنسبة 29% و32% على التوالي، تحت ضغط الرصاص مقارنة بغير المعالج. أدى اضافة MgO NPs أيضًا إلى زيادة مستوى البولي امينات، التي تلعب أدوارًا مهمة في نمو

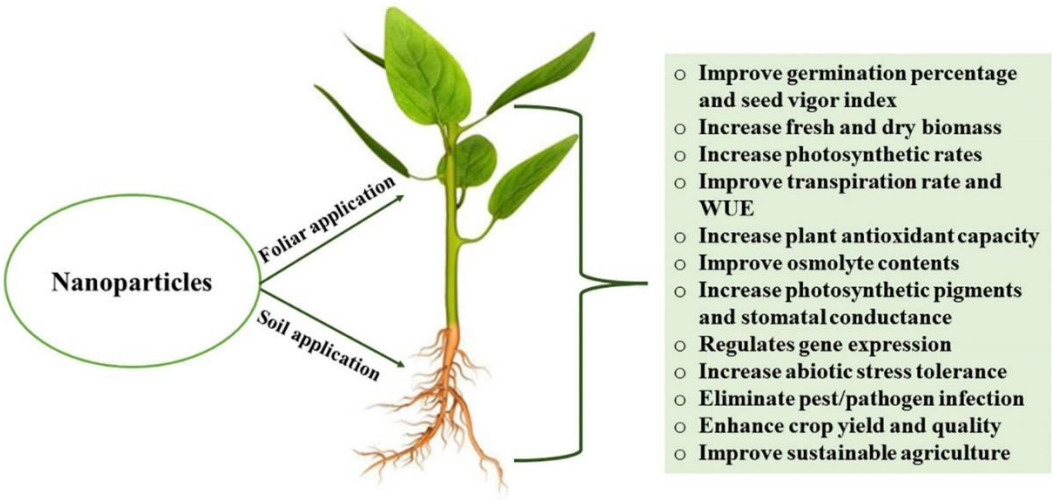
النبات وتطوره. زادت الهلاميات المائية من كحول الكيتوسانن-بولي فينيل (Cs-PVA) والمعالجة المشتركة لـ Cu NPs من التعبير عن SOD مقارنةً في الطماطمة تحت ظروف الشد الملحي(Hernández, *et al*. 2018). فضلا عن ذلك، يمكن للجسيمات النانوية NPs رفع قدرة النبات على تحمل الإجهاد عن طريق زيادة معدل التمثيل الضوئي والحماية الضوئية. على سبيل المثال، تم تخفيف الانخفاض الناجم عن الإجهاد في معدل التمثيل الضوئي في قصب السكر من خلال الجسيمات النانوية NPs المتعددة، بما في ذلك SiO_2 NPs، ZnO NPs، NPs السيلينيوم (Se) وأشرطة الجرافين النانوية (GNRs). بالمقارنة مع غير المضاف اليه (المقارنة)، أدى التطبيق الورقي لـ SiO_2 NPs إلى زيادة الكفاءة الكيميائية الضوئية القصوى لـ PSII (Fv/Fm)، والحد الأقصى للأكسدة الضوئية P700 (Pm) ومعدل التمثيل الضوئي (Pn) بنسبة 16.7% و21.3% و74.5% على التوالي. كما رفعت NPs الثلاثة الأخرى المذكورة أعلاه هذه المعلمات، وخاصة Pn، والتي زادت بنسبة 47.2٪ على الأقل مقارنة بمجموعة المقارنة. تم نقع بذور الدخن اللؤلؤي Pearl millet في محلول Ag NPs قبل التحضير، تم اكتشاف المعلمات المتعلقة بعملية التمثيل الضوئي في الشتلات تحت ضغط الملح، كشفت النتائج أن معدل التمثيل الضوئي، ومعدل النتح، وموصلية الثغور في النباتات المعالجة زاد بنسبة 148%، و109%، و62% مقارنة بالنباتات غير المعاملة على التوالي (Khan, *et al*. 2021). فضلا عن ذلك، تحفز الجسيمات النانوية NPs التعبير الجيني المرتبط بالإجهاد وتزيد من وفرة البروتينات المتعددة في النباتات تحت الضغط اللاأحيائي. على سبيل المثال، أدت العديد من الجسيمات النانوية NPs القائمة على المعادن إلى زيادة تحمل فول الصويا للجفاف. كان التعبير عن ثلاثة عوامل نسخ مرتبطة بالإجهاد، GmWRKY27 وGmMYB117 وGmMYB174، في الأوراق المعاملة بجسيمات الحديد النانوية Fe NPs 8 أضعاف و6 أضعاف و4 أضعاف في المجموعة غير المعاملة تحت ضغط الجفاف. تم استعمال البروتينات الخالية من الملصقات للكشف عن

الاختلافات في وفرة البروتين في جذور القمح المعالجة بـجسيمات الحديد النانوية Fe NPs في ظل ظروف الجفاف. كانت وفرة بروتين Rubisco protein في النباتات المعرضة لـ Fe NPs ثلاثة أضعاف تلك الموجودة في النباتات غير المعاملة. تم استخدام عدد قليل من الجسيمات النانوية NPs المعدنية، مثل Al_2O_3 NPs و ZnO NPs وAg NPs، على فول الصويا لتخفيف إجهاد الفيضانات. من بين هذه الجسيمات NPs، كان أداء جسيمات اوكسيد الالمنيوم النانوية Al_2O_3 NPs أفضل من الآخرى في تعزيز نمو النبات وتقليل الحساسية للإجهاد. كشفت بروتينات شتلات فول الصويا تحت الفيضانات أن وفرة البروتين المرتبطة بتخليق البروتين وتحلل السكر وتطور الدهون زادت عند التعرض لـ Al_2O_3 NPs. كما ان استعمال المواد النانوية يشكل طريقة فعالة وصديقة للبيئة لتعزيز قدرة النبات على تحمل الإجهاد اللاأحيائي. ومع ذلك، فإن سمية الجسيمات النانوية NPs للنباتات أو البيئة لا تزال بحاجة إلى النظر فيها قبل استخدامها.

أن الجسيمات النانوية NPs عبارة عن جزيئات مجهرية يمكنها دخول الخلية من خلال الأعضاء النباتية الموجودة فوق سطح التربة (البشرة أو الثغور أو الفتحات الأخرى) أو الأعضاء الموجودة تحت سطح التربة (أطراف الجذر أو القشرة أو الجذر الجانبي أو الجروح أو الفتحات الأخرى). تختلف التأثيرات الفسيولوجية والمورفولوجية للجسيمات النانوية NPs وفقًا لأنواع النباتات وفترة التطوير وعوامل التطوير وطريقة التطبيق والجرعة ووقت التعرض. وفقًا لفرضية تدفق الكتلة / تدفق الضغط، يتم نقل الجسيمات النانوية NPs التي تدخل عبر الثغور داخل النبات بواساطة اللحاء ويتم نقلها عبر اختلافات الضغط بين الأوراق والجذور. يغير المسار الذي تدخل من خلاله الجسيمات النانوية NPs إلى النباتات العديد من العمليات النباتية، بما في ذلك الإنبات، ونشاط مضادات الأكسدة، والمغذيات الكبيرة والصغرى، ومحتوى الكلوروفيل، وعدد البلاستيدات الخضراء، والتمثيل الضوئي. ففي نبات الأرابيدوبسيس، غيّر تطبيق الجسيمات النانوية NPs الإشارات داخل الجذر من خلال

التأثير على إنتاج الإيثيلين. يمكن أن تخترق الجسيمات النانوية NPs غشاء الخلية وجدار الخلية ليتم نقلها إلى البشرة والنسيج والأوراق قبل الوصول إلى الأسطوانة المركزية، يتم نقل هذه الجسيمات عبر المسار النشط من خلال الضغط الأسموزي، والقوى الشعرية، ومسام جدار الخلية، والبلازموديماتا في جذور النباتات أو عبر المسار المتشابك.

بشكل عام، يمكن أن ترتبط الجسيمات النانوية بالبروتينات الحاملة عبر القنوات الأيونية، والأكوابورين، والالتقام الخلوي، بالإضافة إلى تعطيل غشاء البلازما للحث على تكوين المسام للعبور إلى الخلايا. يعتمد مرور الجسيمات النانوية عبر جدار الخلية على حجم المسام. تمر هذه الجسيمات الصغيرة الحجم ببساطة عبر جدار الخلية، بينما تمر الجسيمات الاكبر عبر وسائل اخرى مثل الثغور. يتم نقل الجسيمات النانوية عبر الثغور عندما تكون أبعادها أقل من (15-40 نانومتر). يمكن أن تعمل هذه الجسيمات كبديل للكامبيوم الوعائي في الثغور ويتم نقلها إلى حجرات نباتية مختلفة من خلال اللحاء. يتم تلخيص عناصر الجسيمات النانوية المستخدمة على نطاق واسع في الزراعة ودورها في تعزيز تحمل المحاصيل للإجهاد اللاأحيائي كما موضح في (شكل 7). في تغليف البذور، تدخل الجسيمات النانوية من خلال المساحات بين الخلايا في غلاف البذور الذي تلعب فيه الأكوابورين دورًا مهمًا في التحكم في دخول هذه الجسيمات (Abu-Hamdah, *et al*. 2004).



شكل 7. تأثير استعمال الجسيمات النانوية على: صحة النبات، معايير النمو، المعايير الفسيولوجية وكفاءة استخدام المياه. عن (Abu-Hamdah, *et al*. 2004)

مع ظهور تطبيقات جديدة لتكنولوجيا النانو، زاد استخدام المواد النانوية ذات معدل مساحة السطح إلى الحجم المرتفع. تختلف وظائف واستخدامات المواد النانوية وفقًا للحجم والبنية. عندما يتم استعمال المواد النانوية كأسمدة حيوية، يتم تزويد النباتات بالعناصر الغذائية ببطء، وتكون كميات صغيرة كافية (على عكس الأسمدة الكيمائية التقليدية)، ومن ذلك يتم تقليل المخاطر البيئية الناجمة عن الأسمدة الكيماوية. تؤثر المبيدات والأسمدة الكيميائية التقليدية سلبًا في النظم البيئية وصحة الإنسان، خاصة عند استعمال جرعات كبيرة لزيادة إنتاجية النباتات. لذلك، أصبح من المرغوب فيه استبدال المبيدات والأسمدة التقليدية بالمبيدات النانوية والأسمدة النانوية، لتقليل استخدام الأسمدة الكيمائية، وزيادة إنتاجية النباتات، ودعم التنمية الزراعية. وبالتالي، فإن هذه المبيدات النانوية والأسمدة النانوية تحظى الآن باهتمام بحثي متزايد. تختلف الأسمدة النانوية في الحجم (30-40 نانومتر)، وتمر عبر الثغور، وترتبط بأيونات مختلفة، وتطلق العناصر الغذائية.

بشكل عام، تؤثر الأسمدة النانوية في نمو النبات والتمثيل الغذائي من خلال تحسين جودة التربة وأداء نمو النبات، وزيادة إنتاج هرمون النمو وتعزيز مقاومة الضغوط

الحيوية وغير الحيوية. يمكن إنتاج المبيدات النانوية باستخدام الطرائق الفيزيائية أو الكيميائية أو البيولوجية. تظهر المبيدات النانوية والتركيبات النانوية، بما في ذلك تلك التي تحتوي على الفضة (Ag)، والنحاس (Cu)، والسيليكا (SiO_2)، وأكسيد الزنك (ZnO)، نطاقًا محسنًا من فعالية مبيدات الآفات مقارنة بالمبيدات الحشرية التقليدية وبالتالي، فإن المبيدات النانوية تؤثر بشكل إيجابي على مكافحة الآفات والأمراض النباتية. لقد استخدمت الجسيمات النانويةNPs لأكسيد معدن الكيتوسان لضمان تناول الأسمدة المطبقة على النباتات بشكل أكثر فعالية. يزيد تطبيق الكيتوسان من نشاط إنزيم اختزال النترات وسينسيتاز الجلوتامين Nitrate reductase, glutamine synthetase والبروتياز Protease أثناء استقلاب النيتروجين، ما يؤثر على نمو النبات وتطوره). في نباتات الفول السوداني والذرة، تزيد جسيمات اوكسيد الزنك النانوية ZnO NPs من نسبة الإنبات وتحسن تطور البادرات. فضلا عن ذلك، فإن العلاج بـ 2000 ملغرام لتر من 1 - 60 نانومتر من الألومنيوم النانوي Al) NPs) (mg L^{-1} of 60-nm aluminum) لمدة 5 أيام قلل من طول جذر شتلات الذرة ولم يحدث أي آثار ضارة على نباتات *Lolium perenne*، *Raphanus sativus*، *Cucumis sativus*، *Brassica napus* (Yang and Watts,2005). أدى تطبيق 2000 ملغم من جسيمات الزنك النانوية Zn NPs of L^{-1} 2000 mg إلى إعاقة نمو الجذر بشكل كبير في الذرة وأوقف نمو جذور نباتات *Brassica oleracea* و*C. sativus* و*Daucus carota* و *Glycine max*. لقد تناولت تجارب قليلة تأثير الجسيمات النانوية NPs على إنبات البذور ونمو الشتلات. ومع ذلك، فإن تطبيق هذه الجسيماتNPs على البذور يزيد بشكل عام من إنبات البذور، وتطور البادرات، وصلاحية البادرات، ومعدل بزوغها. تأثر إنبات البذور وطول الجذور والبراعم والوزن الطازج (FW) والوزن الجاف (DW) Dry Weight بشكل إيجابي باستخدام جسيمات اوكسيد السليكون النانوية SiO_2 NPs كما ثبت أن جسيمات الفضة النانوية Ag NPs تزيد من مستوى الإنبات، وطول الجذور والبراعم، والوزن الرطب

FWوالوزن الجافDW، ومتوسط وقت الإنبات، والمؤشرات الحيوية في نبات *Thymus kotschyanus* . وكذلك، تبين ان جسيمات الفضة النانوية Ag NPs تزيد معدل الإنبات لنبات *Pennisetum glaucum*، و *Festuca ovina*،كما يمكن لجسيمات الفضة النانوية Ag NPs أن تؤثر سلبًا على إنبات نبات *Brassica nigra* بالإضافة إلى طول البراعم في نبات *Medicago sativa*، وطول الجذر وطول البراعم لنبات *Ocimum basilicum*، وطول البراعم والجذر لنبات *Hordeum vulgare*. و *Linum usitatissimum* و *L. perenne*. وفي نبات *Onobrychis sativa*، زادت جسيمات اوكسيد السليكون النانوية SiO_2 NPs من طول البراعم، في حين زادت جسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2) من وقت الإنبات ونسبته المئوية. أما أكسيد الحديد النانوي (Fe_2O_3) NPs فقد زاد من إنبات بذور *L. perenne*. فضلا عن ذلك، قللت جسيمات اوكسيد الحديد النانوية FeO NPs من الكتلة الحيوية الفطرية وطول البراعم والجذر لنباتات *Trifolium Repens*، و*Satureja hortensis*، و*H. vulgare*، و*L.* perenne. أظهرت الدراسات أن جسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2 NPs يمكن أن يؤثر بشكل إيجابي في إنبات بذور *Foeniculum vulgare* و *Petroselinum Crispum*. أما جسيمات الفضة النانوية Ag NPs فقد زادت من طول البادرة ومحتوى الكلوروفيل في نباتات *Brassica juncea* و *Sorghum bicolor*، تأثر التطور الجذري لـنبات *T. kotschyanus* و*Alopecurus textilis* بشكل إيجابي باستعمال جسيمات ثنائي اوكسيد السليكون النانوي SiO_2 NPs. وبالمثل، أدى تطبيق SiO_2 على نبات *M. sativa* إلى زيادة ارتفاع النبات، وعدد الحراثة، والإنتاج، والوزن الطازج FW، والوزن الجافDW، ومحتوى الكلوروفيل، ومستويات الكاروتينويد أن SiO_2 NPs تزيد من محتوى الأوراق من الوزن الجاف والوزن الرطب فضلا عن محتوى الكلوروفيل في نبات *O. basilicum*، ويؤثر أيضًا سلبًا على نمو البراعم والجذور في نباتات *S. bicolor* و*Stipa hohenackeriana* و*Secule montanum*. اما جسيمات اوكسيد الزنك النانوية ZnO NPs فتزيد من

الكتلة الحيوية وطول الجذور والبراعم ومحتوى الكلوروفيل في العديد من الأنواع النباتية. فضلا عن ذلك، أدى استخدام TiO_2 NPs إلى زيادة محتوى الزيت العطري وإنتاجية النباتات الطبية (Ahmad *et al*, 2018). يؤثر تطبيق أكسيد النحاس النانوي (CuO) NPs سلبًا على التشكل وعلم وظائف الأعضاء والكيمياء الحيوية لـنباتات *H. vulgare*، و*L. perenne*، و*M. sativa*، و*Triticum aestivum*.

بعض تطبيقات الجسيمات النانوية في زيادة انتاج المحاصيل الزراعية تحت ظروف الاجهادات

❖ التطبيقات تحت الظروف الملحية Application of NPs Under Salinity Conditions

يعد تطبيق تقنية الجسيمات النانوية NPs مهمًا للتخفيف من آثار الإجهاد اللاأحيائي للملوحة على النباتات. في مرحلة الإنبات، يؤدي استخدام جسيمات الفضة النانوية Ag NPs في نبات *Lathyrus sativus* تحت ضغط الملح إلى تحسين نسبة الإنبات، وطول البراعم والجذر، والشتلات والوزن الطري والوزن الجاف وبالتالي، أدى هذا إلى تعزيز التنظيم الأسموزي وتقليل الآثار السلبية المرتبطة بالملوحة كما وجد أن تطبيق جسيمات النحاس النانوية Cu NPs على التربة يقلل من الإجهاد التأكسدي في القمح ويزيد بشكل كبير من نمو النبات وإنتاجيته. إن استخدام تقنية النانو في القمح لا يعزز نمو النبات فحسب، بل يحسن أيضًا أداء الإنبات في ظل ظروف الإجهاد الملحي. يؤدي التطبيق المسبق لـجسيمات الفضة النانوية Ag NPs على بذور القمح إلى تغيير أنشطة الإنزيمات المضادة للأكسدة، ويقلل من الضرر التأكسدي، ويزيد من تحمل الإجهاد الملحي في مثل هذه النباتات فضلا عن ذلك، أن جسيمات اوكسيد الزنك النانوية ZnO NPs تزيد من الوزن الجاف DW لعباد الشمس تحت ضغط الملح. تم العثور على جسيمـــــات CeO NPs ($100 - 200$ mg kg^{-1}) لتعزيز الاستجابات الفسيولوجية لـنبات *B. napus* تحت ضغط الملح (100 ملي كلوريد الصوديوم). ومن

المعروف أيضًا أن جسيمات CeO NPs يعزز الكتلة الحيوية النباتية في نبات الكانولا Canola المجهدة بالملح. يؤدي تطبيق جسيمات الفضة النانوية Ag NPs على بذور الريحان تحت ظروف الإجهاد الملحي إلى زيادة إنبات البذور وتعمل هذه الجسيمات المطبقة على نبات S. *hortensis* على زيادة مقاومة النبات للإجهاد الملحي مع تقليل التأثيرات الناجمة عن الإجهاد الملحي على نسبة الإنبات وطول براعم النبات. فضلا عن ذلك، فإن استخدام هذه الجسيمات في نباتات الكمون المجهدة بالملح يحسن بشكل كبير مقاومة النبات للملح. كما تبين ان جسيمات اوكسيد الحديد النانوي Fe_3O_4 NPs يحمي نباتات النعناع من الإجهاد التأكسدي الناجم عن زيادة محتوى كلوريد الصوديوم (Nejatzadeh, 2021).

❖ التطبيقات تحت ظروف الجفاف Application of NPs Under Drought Conditions

يعتبر الجفاف من الضغوط غير الحيوية الرئيسية التي يمكن أن تحد بشكل كبير من إنتاج المحاصيل. يعد تطبيق تكنولوجيا النانو طريقة فعالة للتخفيف من تأثير الجفاف على النباتات عن طريق زيادة نشاط الإنزيم المضاد للأكسدة، وتحسين مستويات الهرمونات النباتية، والتأثير على الخصائص الفسيولوجية (Al-Shkar, *et al*.2021). تبين أن استخدام الأنالسيت النانوي Analcite NPs في التربة في ظل الظروف الحارة والجافة يعزز إنبات ونمو نباتات القمح. فضلا عن ذلك، فإن استخدام اوكسيد الزنك النانوي ZnO NPs في بذور فول الصويا في الظروف القاحلة يزيد من نسبة إنبات البذور. تحت ضغط الجفاف، يؤدي استخدام النحاس والزنك النانوي في نباتات القمح إلى زيادة نشاط الإنزيم المضاد للأكسدة ومحتوى الرطوبة النسبي، ويقلل مستويات حمض الثيوباربيتوريك Thiobarbituric acid ، affects reagent precipitation, stabilizes photosynthetic pigment levels in leaves ويقلل من آثار الإجهاد. استجابةً لإجهاد الجفاف، يمكن أن يؤدي استخدام ثنائي اوكسيد

السليكون النانوي SiO_2 NPs إلى زيادة طول البراعم ومحتوى الماء النسبي Relative Water Content (RWC) في الشعير، مع تقليل تكوين جذري الأوكسيد الفائق وتلف الأغشية. لقد وجد أن الاستخدام الورقي لـجسيمات ثنائي اوكسيد التيتانيوم النانوي TiO_2 NPs في القمح فعال للتغلب على انخفاض الإنتاج الناجم عن إجهاد الجفاف. علاوة على ذلك، أدى تطبيق النحاس النانوي Cu NPs على الذرة إلى زيادة محتوى الماء في الأوراق، والكتلة الحيوية النباتية، ومحتويات الأنثوسيانين، والكلوروفيل، والكاروتينويد في ظل الظروف القاحلة. كما ان تطبيق ثنائي اوكسيد السليكون النانوي SiO_2 NPs على الزعرور المزروع تحت ضغط الجفاف يقلل من عملية التمثيل الضوئي والتوصيل الاروائي. ومع ذلك، تم ملاحظة أن السيليكون النانوي Si) NPs) يخفف من آثار إجهاد الجفاف في الموز في ظل ظروف الجفاف المعتدلة، أدى التطبيق الورقي للسيليكون النانوي Si NPs على الكزبرة إلى زيادة القدرة المضادة للأكسدة وإنتاجية الزيت العطري. كما تبين أن التطبيق الورقي لـ SiO_2 و TiO_2 NPs يمكن أن يقلل من الآثار السلبية لإجهاد الجفاف على نباتات القطن في ظل الظروف القاحلة. اما في نباتات الحمص، يؤدي تطبيق Si NPs على التربة إلى تقليل الآثار السلبية للجفاف عن طريق زيادة محتوى الرطوبة النسبية في النباتات. يقال إن السليكون انانوي Si-NPs والسيلينيوم النانوي Se -NPs يمكن أن يساعدا في تعزيز النمو، وتحسين انتقائية الأيونات في الجذور، وزيادة إنتاجية الأرز في ظل الظروف المالحة. على الرغم من أن إجهاد الجفاف يزيد من الآثار الضارة للكادميوم في القمح، فإن تطبيق ZnO NPs يمكن أن يقلل من إجهاد الكادميوم والجفاف .(Khan, *et al*. 2019)

❖ التطبيقات تحت ظروف اجهاد العناصر الثقيلة Application of NPs Under Heavy Metal Stress Conditions

في ظل ظروف الإجهاد للعناصر الثقيلة Heavy Metal Stress HMs، يمكن لتطبيقات جسيمات النانو في التربة أو الأوراق من القضاء على الآثار الضارة للإجهاد، وتحسين نمو النبات والتمثيل الضوئي، وتقليل السمية الناجمة عن الإجهاد التأكسدي. ولذلك، فإن تطبيق تكنولوجيا النانو يمكن ان يساهم في معالجة البيئات الملوثة بـالعناصر الثقيلة HMs. في ظل ظروف الإجهاد بالعناصر الثقيلة HMs، فإن تطبيق تكنولوجيا النانو على النباتات يقلل من تركيز العناصر الثقيلة HMs في التربة، وينظم التعبير عن جينات نقلها HMs في النباتات، ويزيد من نشاط أنظمة مضادات الأكسدة النباتية، ويحسن الوظائف الفسيولوجية، ويحفز إنتاج المواد الواقية كإفرازات الجذور، والفيتوشيلاتين Phytochelatin ، والأحماض العضوية. أدى تطبيق جسيمات السليكون النانوية Si NPs على نباتات الذرة تحت ضغط الزرنيخ (As) إلى تقليل إجمالي الكلوروفيل ومحتوى الكاروتينات ومحتوى البروتين الكلي فضلا عن التخفيف من الآثار الضارة للضغط على أقصى قدر من الكفاءة الكمية للتبريد الكيميائي الضوئي والتبريد غير الكيميائي الضوئي. يمكن أن يؤدي تطبيق جسيمات التيتانيوم النانوية TiO_2 NPs في التربة إلى الحد بشكل فعال من سمية الكادميوم من خلال تعزيز المعلمات الفسيولوجية ومعدل التمثيل الضوئي في نباتات فول الصويا، لذلك، تعتبر جسيمات التيتانيوم النانوية TiO_2 NPs حيوية للتخفيف من آثار الإجهاد التأكسدي الناجم عن العناصر الثقيلة. عند المعالجة بـ SiO_2 NPs، زادت أنشطة الإنزيمات، مثل بيروكسيداز الأسكوربات Ascorbate peroxidase (APX) وديسموتاز الفائق ألاوكسيد Superoxide dismutase (SOD) في حين تم تقليل تأثيرات الإجهاد التأكسدي في شتلات البازلاء تحت ضغط الكروم. وفضلا عن ذلك، تم كشف أن جسيمات Si NPs يمكن أن يقلل من سمية الالمنيوم عن طريق تنشيط آلية الدفاع المضادة للأكسدة في نباتات الذرة. لقد وجد أن جسيمات الحديد النانوية Fe_3O_4 NPs تحمي القمح من الإجهاد التأكسدي الناجم عن الكادميوم Cd-induced oxidative stress. أدت التطبيقات الورقية لـ Se NPs على الملفوف الصيني تحت إجهاد

الكادميوم إلى زيادة الكتلة الحيوية، وارتفاع النبات، ومحتوى الكلوروفيل في الأوراق، ومستويات SOD، ومحتوى بيروكسيداز الجلوتاثيون Plasma glutathione peroxidase في البلازما، في حين تم تقليل محتويات الأوراق من الكادميوم والمالونديالدهيد Cd and malondialdehyde (MDA (MDA) وبالمثل، فإن Si NPs يخفف من تأثير إجهاد القرص المضغوط Cd stress في الأرز. وجد أن الاستخدام المشترك لأكسيد الزنك الورقي والفحم الحيوي للتربة في النباتات أكثر فعالية ضد إجهاد الكادميوم. وبالمثل، فإن التطبيق المشترك لـ Fe NPs والفحم الحيوي قلل من آثار إجهاد الكادميوم في الأرز. أدى استخدام FeO NPs في القمح المجهد بالقرص المضغوط Cd stress إلى تقليل نسبة تسرب إلكتروليت الأوراق ومحتوى الكادميوم في الحبوب، مع تحسين عمل الإنزيم المضاد للأكسدة والوزن الجاف DW للنباتات. يفضل التطبيق الورقي لـ Fe NPs على استخدام التربة وجد أيضًا أن 20 mg L^{-1} من Fe_3O_4 NPs يقلل من تراكم الكادميوم ويحسن سمية الكادميوم عن طريق زيادة امتصاص العناصر الغذائية في نباتات الطماطم Rahmatizadeh *et al.* (2019).

بعض الامثلة على تطبيقات الجسيمات النانوية والأدوار التي تلعبها في تخفيف الاجهاد في النباتات:

❖ جسيمات السليكون النانوية Si NPs

وجد ان المواد القائمة على السليكون Si وأكاسيدها بكثرة في التربة تؤدي الى احتواء النباتات بشكل طبيعي على مستويات عالية من السليكون Si (1-10٪) أيضًا. يوجد السيليكون في النباتات على شكل سيليكا غير متبلورة ($SiO_2 \cdot nH_2O$) في جدار الخلية، مما يزودها بالقوة والصلابة، باضلفة مادة البوليفينول والبكتين كمواد متفاعلة. تنشط هذه المواد أيضًا أثناء الدفاع عن النبات وتطوره. نظرًا لتطبيقها في مجالات زراعية متعددة، فوجد أن الجسيمات المستندة إلى السليكون Si يمكنها تخفيف الضغوط

اللاأحيائية. ومع ذلك، لا يُعرف سوى القليل عن الآليات التي من خلالها يخفف السليكون الضغوط في النباتات. يمكن لجزيئات السليكون والسليكون النانوية أن تزيد من تحمل الإجهاد اللاأحيائي، وتوازن العناصر الغذائية، وتحفيز الإنزيمات المضادة للأكسدة، وتحسين الامتصاص، والتثبيت، وتقسيم الأيونات المعدنية. كما تعمل جسيمات ثنائي اوكسيد السليكون النانوية على تحسين الإنبات والتطور والإنتاجية بشكل كبير في النباتات تحت الضغط اللاأحيائي.

يمكن لجزيئات السليكون وجسيمات السليكون النانوية Si NPs أن تزيد من تحمل الإجهاد اللاأحيائي، وتوازن العناصر الغذائية، وتحفيز الإنزيمات المضادة للأكسدة، وتحسين الامتصاص، والتثبيت، وتقسيم الأيونات المعدنية. تعمل جسيمات السليكون النانوية SiO_2 NPs على تحسين الإنبات والتطور والإنتاجية بشكل كبير في النباتات تحت الضغط. يمكن أن يعزى ذلك إلى امتصاص هذه العناصر للجسيمات النانوية عبر الجذور مما يؤدي إلى تطور طبقة رقيقة في جدار الخلية ما يساعد النباتات على تحمل الضغوط المختلفة. تعمل جسيمات السليكون النانوية SiO_2 NPs أيضًا على زيادة كفاءة نقل المياه وزيادة ضغط التورم وتعزيز وجود الماء النسبي في الأوراق وفعالية استخدام المياه في النباتات. كما وجد أن تركيزات مختلفة من جسيمات SiO_2 NPs عززت بشكل كبير نمو الذرة وأثرت على مراحل نموها المختلفة. يمكن أيضًا أن تشارك SiO_2 NPs في تنظيم البروتين والفينولات، والتي تعتبر مهمة لنمو وتطور النبات. فضلا عن ذلك، وجد أن وجود مستوى مرتفع نسبيًا من السليكون Si المتراكم في الجذور من شأنه أن يعزز قدرة الذرة على تحمل الجفاف. تؤثر المعالجة المسبقة باستخدام جسيمات ثنائي اوكسيد السليكون النانوية SiO_2 NPs بشكل إيجابي على معدلات التمثيل الضوئي، والتوصيل الاروائي، وزيادة إمكانات الماء في نسيج الخشب في شتلات الزعرور تحت ضغط الجفاف. إن الجرعات الكبيرة من SiO_2 NPs التي يتم توفيرها بمياه الري قبل معالجات الجفاف تخفف من آثار إجهاد الجفاف على النمو والمعلمات الكيميائية الحيوية والفسيولوجية لـنبات *Prunus mahleb*، كما وجد

تحسن في تحمل الجفاف، والذي يتضح من خلال التحسن في نمو الجذور والاحتفاظ بنسبة التمثيل الضوئي، في صنفين من النباتات مع حساسيات متفاوتة للجفاف بعد تطبيق جسيمات السليكون النانويةSi NPs. وحصلت زيادة في مقاومة الجفاف بغض النظر عن حساسية الصنف لإجهاد الجفاف.

وجد أن الرش الورقي لـجسيمات ثنائي اوكسيد التيتانيوم النانوي TiO_2 NPs (50 mg L^{-1})أو جسيمات ثنائي اوكسيد السليكون النانوية SiO_2 NPs (3200 mg L^{-} [1] يزيد من تحمل نباتات القطن للجفاف. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يساعد السليكون النباتات على التأقلم مع الضغوط البيئية المختلفة. يحد إجهاد الملوحة من إنتاجية المحاصيل بسبب سمية أيونات الصوديوم في حوالي 23% من المناطق المزروعة في جميع أنحاء العالم ومع ذلك، فإن تطبيق جسيمات السيلكون النانوية Si NPs والأسمدة السليكونية Si تحت ضغط الملوحة له تأثيرات إيجابية على المؤشرات الفسيولوجية والمورفولوجية للخصائص النباتية في نبات الريحان (الحبق) ***Ocilmum basilicum***. ويتجلى ذلك من خلال التحسن الملحوظ في مؤشر النمو ومحتوى الكلوروفيل، قد يكون هذا بسبب مشاركة الأسمدة النانوية NPs والسيليكون Si مع زيادة تحمل إجهاد الملوحة في النباتات. ثبت أيضًا أن استخدام SiO_2 NPs يعزز المعلمات التنموية ومحتوى الكلوروفيل والتراكم وتنظيم نشاط إنزيمات مضادات الأكسدة في نباتات الطماطم والقرع تحت ضغط الملوحة. إن تطبيقات جسيمات السليكون النانوية SiO_2 NPs لا يحسن فقط إنبات البذور وتطور البادرات المبكرة فحسب ولكن أيضًا الخصائص الأخرى ذات الصلة في الأنماط الجينية للعدس تحت ضغط الملوحة. وبالتالي، فإن SiO_2 NPs يعزز الحماية من سمية الملح في النباتات. يمكن أيضًا أن تخفف SiO_2 NPs من الإجهاد عن طريق تقليل تركيز أيون الصوديوم، ما يؤدي إلى تحسين نمو المحاصيل والإنتاج والبقاء على قيد الحياة تحت ضغط الملوحة. يؤدي استخدام SiO_2 NPs أيضًا إلى زيادة تدفق المياه في الذرة استجابةً لإجهاد الملوحة. يمكن لـ Si NPs تحسين نمو النبات عن طريق تقليل الحال الأسموزي

وسمية ايون الصوديوم Na+ المرتبطة بالإجهاد الملحي العالي. كما وجد أن SiO_2 NPs يشكل طبقة في جدار الخلية الجذرية تمكن النباتات من تحمل العديد من الضغوط (مثل الملوحة). كما تبين قدرة السليكون والسليكون النانوي Si وSiO_2 NPs في تقليل الآثار الضارة للملح على نمو النبات. نظرًا لصغر حجمها، يمكن إجراء امتصاص SiO_2 NPs بكفاءة أكبر من امتصاص micro-SiO_2 أو Na_2SiO_3- أو H_4SiO_4- عند إضافتها إلى جذور وبذور الذرة. تم استخدام الجسيمات لاحقًا بواسطة النباتات لتحسين النمو من خلال التأثير على رطوبة الخشب، وانتقال الماء، وزيادة ضغط التورم والذي بدوره يعمل على تحسين (RWC) وكفاءة استعمال المياه (WUE). قد يرتبط تعزيز إنبات النباتات والسمات التنموية بوساطة SiO_2 NPs بزيادة نسبة K / Na، مما يقلل من امتصاص Na^+، ويزيد من التعبير عن الإنزيمات المضادة للأكسدة، فقد وجدت تفاعلات قوية بين تعزيز إنبات البذور والنمو في النباتات المجهدة بالطماطم ذات الملوحة العالية وزيادة التعبير عن جينات تحمل الملوحة عند تطبيق Si NPs. على النقيض من عدم المعالجة ب Si NPs، أظهرت نباتات الفليفلة الحولية نموًا متزايدًا عند ريها بالمياه المالحة عند تطبيق معاملات Si (Tripathi, *et al.* 2017b).

❖ جسيمات الفضة النانوية AgNPs

تستخدم جسيمات الفضة النانوية Ag NPs على نطاق واسع في القطاع الزراعي، وخاصة في تعزيز المحاصيل، وتغليف المواد الغذائية، وطلاء المنتوجات المحلية، والمبيدات الحشرية. كما أن استخدامها في الإلكترونيات وتوصيل الأدوية والطب ووضع العلامات البيولوجية شائع نسبيًا. يعتبر عنصر الفضة Ag سامًا عند استخدامه بتركيزات عالية. ومع ذلك، عند تقليله إلى حجم نانوي يتراوح بين 25-50 نانومتر، فإنه يتمتع بخصائص فريدة مقارنةً بالحجم السائب لها. ونظرًا لهذه الميزات الفريدة، يمكن تطبيق جسيمات الفضة النانوية Ag NPs لتعزيز قوة النباتات وتعزيز تطورها

الإجمالي وإنتاجيتها ومعدل التمثيل الضوئي. يمكن أيضًا استخدام Ag NPs كمواد مضادة للميكروبات لإدارة الأمراض التي تصيب النباتات. كما تم دراسة تأثير تراكيز مختلفة من Ag NPs المنتجة كيميائياً في شتلات الخردل الهندي *Brassica juncea*، وتحديداً على تطور النباتات وحالتها المضادة للأكسدة. ما أدى إلى خفض مستويات ROS، وتحسين الحالة العامة لمضادات الأكسدة، وتقليل مستويات Pro وMDA. يعتمد تأثير تحسين النمو لـ Ag NPs في النباتات تحت الضغط على التركيز، حيث كانت جرعة 50 جزء في المليون مثالية لتحسين النمو كما وجد ان الطماطم، أنبتت البذور المعالجة بـ Ag NPs في وقت أبكر من تلك المعالجة بالماء منزوع الأيونات ومع ذلك، تم تثبيط إنبات البذور عند تطبيق تركيزات أعلى من Ag NPs (Karami , *et al*., 2016).

قد تلعب جسيمات الفضة النانوية Ag NPs أيضًا دورًا في التعبير عن جينات الإجهاد. على سبيل المثال، لوحظ التنظيم التصاعدي والتنازلي لبعض الجينات بواسطة Ag NPs في تحليل المصفوفات الدقيقة: ارتبطت الجينات المنتظمة في الغالب بالاستجابات لسمية المعادن والإجهاد التأكسدي، في حين ارتبطت الجينات المنتظمة بالاستجابات للميكروبات والمحفزات الهرمونية. قد تكون مثل هذه الاستجابات مرتبطة بآليات دفاع النبات في ظل ظروف معاكسة، ومع ذلك، هناك حاجة إلى دراسات إضافية لتوضيح سلسلة الإشارات والجينات التي يتحكم فيها Ag NPs وغيرها من من الجسيمات النانوية NPs في الأنواع النباتية المختلفة.

درست تأثيرات Ag NPs على التوصيل الهيدروليكي لساق النبات أثناء إجهاد الجفاف ومع ذلك، قد تكون هذه الجسيمات النانوية NPs أيضًا قادرة على دخول الخلايا والأنسجة النباتية وإضعاف الأنشطة الخلوية المنتظمة، أن Ag NPs يمكن أن يخفف من تأثير آثار إجهاد الجفاف في العدس (*Lens culinaris*). ويمكن أن تقلل من مستويات الإنزيمات المضادة للأكسدة في النباتات تحت ضغط الجفاف وبالتالي، يمكن أن يعزى هذا الانخفاض إلى انخفاض التمثيل الغذائي للأكسدة. قد تشارك الجسيمات

النانوية NPs بشكل مباشر في القضاء على ROS، مما يقلل من مستويات الإنزيمات المضادة للأكسدة. يعد تطبيق جسيمات الفضة النانوية Ag NPs مفيدًا لتقليل تأثير السمية الناجمة عن إجهاد الملوحة. وقد ثبت ذلك في الدراسات التي أجريت على إنبات نباتات الطماطم والشمر والكمون المعالجة بـ Ag NPs وبالتالي تعزيز الإنبات وتحسين الأداء التنموي والتخفيف من الآثار السلبية للإجهاد الملحي. كما وجدت تأثيرات إيجابية لتركيزات مختلفة من معلق Ag NPs على إنبات وتطور نبات الطماطة *Solanum lycopersicum* تحت ضغط الملوحة. تم تقييم دور Ag NPs في تخفيف الإجهاد الملحي في القمح ونبات الخردل الهندي *B. juncea*، وتبين أن جسيمات الفضة النانويةAg NPs تخفف بشكل فعال من آثار إجهاد الملوحة ويمكن لـها بتركيزات $mg\ L^{-1}$ 75 -50 حماية النباتات من الإجهاد الحراري وتحسين نموها.

❖ جسيمات التيتانيوم النانوية TiO_2 NPs

ثنائي أوكسيد التيتانيوم TiO_2 هو أوكسيد أنموذجي من التيتانيوم. كمعدن، يتواجد التيتانيوم بكثرة في القشرة الأرضية وكذلك يوجد في الأنسجة النباتية والحيوانية. يعمل TiO_2 و$nano\text{-}TiO_2$ النانوي كحاصرات للأشعة فوق البنفسجية في واقيات الشمس لأنها تقلل من الآثار الضارة للأشعة فوق البنفسجية. بالإضافة إلى ذلك، تتمتع جسيمات التيتانيوم النانوية TiO_2 NPs بخصائص تعقيم تحفيزية ضوئية ويمكن أن تخضع لتفاعلات الأكسدة والاختزال عند تعرضها للضوء، مما يؤدي إلى تكوين جذور أنيون الأوكسيد والهيدروكسيد، يمكن أن يؤدي التعقيم الضوئي بوساطة TiO_2 NPs إلى تعزيز عملية التمثيل الضوئي وتحسين نمو النبات. تم تقييم التأثيرات المحتملة لـ TiO_2 NPs على الاستجابات الكيميائية الضوئية للبلاستيدات الخضراء في السبانخ. تم العثور على معالجة باستخدام TiO_2 NPs لتحسين أنشطة SOD، والكاتاليز (CAT)، والبيروكسيديز (POD)، وتقليل تراكم الجذور الحرة للأكسجين التفاعلية ومستويات MDA، والحفاظ على استقرار بنية غشاء البلاستيدات الخضراء تحت

الضوء. تلعب TiO_2 NPs أيضًا دورًا في العمليات الكيميائية الحيوية للنبات، والخصائص المورفولوجية، وردود الفعل تجاه الضغوط المختلفة. في نبات السبانخ *Spinacia oleracea* يمكن لـجسيمات التيتانيوم النانوية TiO_2 NPs زيادة تحمل الإجهاد المضاد للأكسدة من خلال تقليل هطول جذري للأوكسيد الفائق، وتقليل مستويات مؤشر الإجهاد (H_2O_2 وMDA)، وتحفيز أنشطة إنزيم مضادات الأكسدة داخل النباتات أثناء التفاعلات الكيميائية الضوئية في البلاستيدات الخضراء. في نباتات السبانخ، أدى العلاج بجسيمات التيتانيوم النانوية Nano-anatase TiO_2 إلى زيادة ملحوظة في عملية التمثيل الضوئي، ونقل الإلكترون، ونشاط الاختزال الضوئي للنظام الضوئي II، وتطور الأوكسجين، والفسفرة الضوئية للبلاستيدات الخضراء تحت إضاءة الضوء المرئي والأشعة فوق البنفسجية. بالإضافة إلى ذلك، ارتبطت تأثيرات TiO_2 NPs على نمو النبات مع تعزيز معدل التمثيل الضوئي واستقلاب النيتروجين. لقد تم إثبات التحلل الضوئي للمبيدات الحشرية بواسطة TiO_2 كعملية محتملة لمعالجة المياه. فضلا عن ذلك، فإن TiO_2 NPs يزيد من امتصاص الماء في النبات واستخدام النيتروجين ويحفز نشاط مضادات الأكسدة في الكانولا والقمح.

أكدت العديد من الدراسات تحسن نمو النبات باستعمال جسيمات التيتانيوم النانويةTiO2 NPs. على سبيل المثال، وجد أن TiO_2 وSiO_2 NPs يؤثران بشكل إيجابي على إنبات البذور ونمو نبات الجنكة *Ginkgo max* فضلا عن ذلك، زادت شتلات البصل المعالجة بـ TiO2 NPs من النشاط الأنزيمي لـ SOD، الأميليز، CAT، واستكشفت التأثيرات المحتملة لتركيزات مختلفة من TiO_2 NPs ضد إجهاد الجفاف في نبات البيقران *Dracocephalum generatoravica*. يمكن للتطبيق الورقي لهذه الجسيمات النانوية NPs بتركيزات أعلى (40 جزء في المليون) أن يخفف من الآثار الضارة لإجهاد الجفاف عن طريق ضبط مستوى الإنزيمات المضادة للأكسدة ومؤشرات الإجهاد التأكسدي. كما وجد أن TiO_2 NPs يزيد من نشاط Rubisco activase وتكوين الكلوروفيل ونسبة التمثيل الضوئي والكتلة الجافة لنبات اللوبياء

Vigna unguiculata، يزداد إنتاج البذور مع التطبيق الورقي لـ NPs وTiO_2. وبالتالي، يمكن أن يعزى ذلك إلى الزيادة في معدلات التمثيل الضوئي. يزداد نشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة (POD وCAT) استجابةً لـ TiO_2 NPs وبالتالي، ينخفض MDA أيضًا. ودرس بعض الباحثين قدرة TiO_2 NPs على التخفيف من الآثار الضارة لإجهاد الجفاف. على سبيل المثال، يمكن أن يؤدي التطبيق الورقي لـ TiO_2 NPs إلى تعزيز النمو وزيادة إنتاجية القمح تحت ضغط الجفاف عند استخدام TiO_2 NPs (0.02٪). كما حسنت TiO_2 NPs من قدرة النباتات على التقاط ضوء الشمس في نباتات الذرة. تحت ضغط الجفاف، يمكن أن تؤثر TiO_2 NPs على تكوين الاصباغ، وتحويل الطاقة الضوئية إلى الإلكترون النشط، والنشاط الكيميائي، وبالتالي تعزيز فعالية التمثيل الضوئي في الذرة. تم ايضا اختبار تأثيرات nano-TiO_2 و-SiO_2 على المكونات البيوكيميائية والإنتاجية لنباتات القطن المجهدة بالجفاف. كما اشارت بعض الدراسات باستخدام Nano-TiO_2 أو -SiO_2 تحسين محتوى الاصباغ ونشاط الإنزيم المضاد للأكسدة وقدرة مضادات الأكسدة وزيادة إنتاجية هذه النباتات. وكانت التركيزات المثلى المطلوبة لتقليل التأثيرات المدمرة لإجهاد الجفاف في نباتات القطن هي 50 و3200 جزء في المليون لكل من nano-TiO_2 و-SiO_2 على التوالي. أدى التطبيق الورقي لهذه الجسيمات النانوية أيضًا إلى زيادة تحمل الجفاف في نباتات القطن. تم الحصول على نتائج مماثلة في نبات *L. usitatissimum* المجهدة بالجفاف والمعالجة بـ TiO_2 NPs. لقد أظهرت نباتات *D. generatoravica* التي تعاني من الجفاف والمعالجة بـ TiO_2 مستويات متزايدة من Pro ومستويات منخفضة بشكل كبير من H_2O_2 وMDA مقارنة بالنباتات غير المعالجة. وبالتالي، أن TiO_2 NPs يمكن أن يخفف الضرر الناجم عن الإجهاد. حفزت TiO_2 NPs بشكل كبير نشاط الإنزيم المضاد للأكسدة، ومحتوى Pro والسكر القابل للذوبان، مما أدى بدوره إلى تعزيز التوازن الأسموزي في الخلايا النباتية واستعادة النمو في النباتات. يمكن لـنبات *O. basilicum* أن يتحمل إجهاد الجفاف بسبب التأثيرات المشتركة للجبريلين

وTiO_2 بشكل عام، يمكن أن يؤدي تطبيق nano-TiO_2 إلى تخفيف ضغوط HMs والضوء والبرودة والحرارة. أظهرت الابحاث أن تطبيق TiO_2 NPs يمكن أن يقلل من سمية الكادميوم ويعزز معدل التمثيل الضوئي في فول الصويا. تلعب جسيمات التيتانيوم النانويةTiO2 NPs أيضًا دورًا مهمًا في تخفيف الإجهاد الخفيف. عندما تعرضت للضوء، حفزت هذه الجسيمات النانوية تفاعل الأكسدة والاختزال، وبالتالي توليد جذور أنيون الأكسيد والهيدروكسيد. أدت إضافة TiO_2 NPs إلى تقليل تأثير الإجهاد الحراري من خلال التحكم في فتح الثغور. تؤثر TiO_2 NPs أيضًا بشكل إيجابي على نمو النبات وتطوره. تشمل التأثيرات الإيجابية للـ NPs، بما في ذلك -TiO_2 NPs، تعزيز Carboxylation of Rubisco ، وقدرات امتصاص الضوء للبلاستيدات الخضراء، ومعدلات نقل الإلكترون، ومنع تكوين ROS. يزيد استخدام nano-TiO_2 من مستوى التعبير عن الجينات التي تشفر البروتينات المرتبطة ب Rubisco والكلوروفيل II بالإضافة إلى نشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة وبالتالي الحفاظ على محتويات ثابتة من الكلوروفيل والكاروتينات، وتحسين القدرة على تحمل الظروف الباردة. فضلا عن ذلك، تؤثر TiO_2 NPs بشكل إيجابي على الأنماط الجينية الحساسة (ILC 533) والمقاومة (Sel 11439) للحمص تحت ضغط الاجهاد البارد.

❖ جسيمات الزنك النانوية ZnNPs

يعد الزنك في النباتات من المغذيات الدقيقة المهمة التي تنظم عمليات التمثيل الغذائي وتسهل النمو. يلعب الزنك أيضًا دورًا مهمًا في بقاء النباتات في ظل الظروف المعاكسة. تستخدم النباتات الزنك بكميات صغيرة وبالتالي، فإن إمكانية الوصول إلى الزنك على مستوى النانو تضمن نقل كميات مناسبة إلى النبات مع تجنب سمية الزنك في النباتات والتربة. أوكسيد الزنك ZnO هو مركب صديق للبيئة يمكن استخدامه كعنصر "أخضر". نظرًا لوظائفه في الحفاظ على سلامة الغشاء الخلوي والحفاظ على محتوى البوتاسيوم في الخلايا، والعلاقة بين النبات والماء، يلعب ZnO دورًا رئيسيًا

في تنظيم الثغور. وفي دراسة أجريت على الحمص، أدى نقص الزنك إلى انخفاض قدرته على تعديل الضغط الأسموزي تحت ضغط الجفاف. يمكن أيضًا أن يتأثر إنتاج الأوكسينAuxin بالزنك عن طريق تحفيز تخليق التربتوفان كمقدمة لإنتاج حمض الإندول أسيتيك Indole acetic acid ، مما يساعد في نمو الجذور وتحمل الجفاف في النباتات. يمكن تحسين امتصاص الزنك عندما يكون بحجم النانو وبالتالي، يمكن تحقيق وظائف Zn بشكل أكثر كفاءة عند استخدام جسيمات الزنك النانوية Zn NPs. يؤدي تطبيق Zn NPs إلى تعزيز تطور الجذور في البذور النابتة، وزيادة محتوى الزنك في الحبوب وبالتالي تحسين بقاء البذور وتحملها للضغوط البيئية، خاصة في المناطق التي تعاني من نقص الزنك.

وصفت العديد من الدراسات آثار الجسيمات النانوية NPs المستندة إلى الزنك على نمو النبات وإنتاجيته. يؤدي استخدام ZnO NPs، بتركيزات مناسبة، إلى تعزيز إنتاج الكتلة الحيوية، وإنبات البذور، وتطوير الشتلات في الحمص، على عكس استخدام $ZnSO_4$ بكميات كبيرة. يمكن لـ ZnO NPs رفع مستويات الأوكسين، وبالتالي تعزيز نمو النبات. في دراسة أخرى، تم تقييم التأثير المحفز لكبريتيد الزنك النانوي (ZnS) NPs على نمو نبات *B. juncea* فتبين أن محتوى الكلوروفيل، ومحتوى السكر، والكتلة الحيوية النباتية، زاد بشكل ملحوظ بعد تطبيق هذه الجسيمات النانوية NPs، وأن التأثيرات المحفزة للنمو ربما كانت مرتبطة بالتحسينات في نظام مضادات الأكسدة النباتية بعد معالجة ZnS NPs. علاوة على ذلك، كانت التركيزات المنخفضة من ZnS NPs أكثر فعالية من التركيزات الأعلى في تحسين نمو النبات. كما تبين في نباتات القمح المعالجة بـ ZnO NPs عند تركيز $66\ mg\ L^{-1}$. يمكن أن تتوسط ZnO NPs في الزيادات في أصباغ التمثيل الضوئي وما يصاحب ذلك من انخفاض في اكسدة الدهون lipid peroxidation في نباتات *Coriandrum sativum* المزروعة في التربة. وبالتالي، فإن الجسيمات النانوية NPs التي تتوسط ZnO تزيد من أصباغ التمثيل الضوئي التي قد تساعد النباتات على التعامل مع الظروف العصيبة

عن طريق تثبيت توليد ROS. أن نسبة الإنبات في فول الصويا من المحتمل أن تزيد بوساطة ZnO NPs في ظل ظروف نقص المياه. في ظل إجهاد الجفاف، تسهل ZnO NPs المطبقة الاستخدام السريع لخزانات البذور لتطوير الشتلات وتقلل من آثار هذا الإجهاد. كما تم تحسين القدرة على تحمل الجفاف من خلال تعزيز نشاط إنزيم مضادات الأكسدة في نباتات القمح عبر تطبيق ZnO NPs. يمكن لكل من جسيمات النحاس النانوية CuNPs وجسيمات الزنك النانويةZn NPs تحسين قدرة نبات القمح على تحمل إجهاد الجفاف من خلال تعزيز عمل الإنزيمات المضادة للأكسدة وتثبيت محتوى أصباغ التمثيل الضوئي . أن الكتلة الحيوية وWUE قد تم تحسينهما بواسطة ZnO NPs في النباتات التي تعاني من الإجهاد المائي، في حين حققت النباتات المزودة بالري الكامل نموًا قويًا وإنتاجية مع معالجة ZnO بكميات كبيرة. أن مركب ZnO وأكسيد البوريك Boric oxide واوكسيد النحاس النانويCuO NPs يمكن أن يخفف من إجهاد الجفاف في نبات *G. max*. وتحت ضغط الجفاف، تم تعزيز تنمية البراعم وإنتاج الحبوب بنسبة 33 و36% على التوالي، باستخدام هذه العناصر النانوية وبالتالي، يمكن تعزيز إنتاجية المحاصيل واستيعاب الفسفور والنيتروجين عن طريق إضافة المغذيات الدقيقة النانوية NPs (Dimkpa *et al*., 2019)

وجد أن إعادة تشكيل شكل الجذر بوساطة ZnO وCuO NPs يمكن أن يغير تحمل الجفاف في نباتات *T. aestivum* المستعمرة بواسطة *Pseudomonas Chlororaphis* O6 (PcO_6)، وهو نوع بكتيري مفيد. عززت Zn NPs تكوين الجذور الجانبية، في حين حفزت Cu NPs انتشار شعيرات الجذر الممدود بالقرب من طرف الجذر في شتلات القمح. كما أدى استعمالهذه العناصر النانوية NP بشكل عام إلى زيادة التعبير عن الجينات المرتبطة بتحمل الجفاف. وفي البراعم، زاد التعبير عن الجينات الأخرى، مثل تلك المرتبطة بالإجهاد المعدني، أظهرت النباتات التي تعرضت لأكسيد النحاس أو أكسيد الزنك NPs حماية متقاطعة لإجهادات عدة، بما في ذلك المعادن وإجهاد الجفاف. على الرغم من التحسينات في تكوين شعيرات الجذر وإنتاج

الجذور الجانبية الناجمة عن النحاس NPs والزنك NPs، على التوالي، فإن انخفاض طول الجذر قد يكون السبب وراء انخفاض إمكانية الوصول إلى المياه. في نبات الأرابيدوبسيس *Arabidopsis* والخردل *mustard* ، قد يؤدي زيادة الترسيب بسبب CuO إلى تغيير تدفق الماء وتقييد توسع جدار الخلية. إن التحبيب في جدار الخلية هو استجابة نباتية مرتبطة بإجهاد الجفاف وضعف تدفق المياه وبالتالي، قد يحدث هذا أيضًا عن طريق ربط أيونات النحاس مع بكتينات جدار الخلية.

عند تعرض النباتات لـ CuO NPs، زادت مستويات الأنثوسيانين تحت ضغط نقص الماء. عند إضافة CuO NPs، تحسن هبوط ROS في جذور القمح. قد تؤدي المستويات المتزايدة من ROS وحمض الأبسيسيك (ABA) بسبب إجهاد الجفاف إلى حدوث تغييرات نصية، ما يؤدي إلى تحمل الإجهاد، تمت دراسة الاستجابة الأيضية لـنبات *S. lycopersicum* إلى ZnO NPs تحت ضغط الملوحة ووجد أن NPs يمكنها عكس الآثار الضارة لإجهاد الملوحة عن طريق تنظيم البروتينات/الإنزيمات المرتبطة، وذلك بشكل رئيسي من خلال تنظيم التعبير الجيني SOD وGPX. كما وجد أن الرش الورقي لأكسيد الزنك النانوي NPs يخفف من آثار إجهاد الملوحة في الدخن الإصبعي. يمكن أن تؤدي معالجة الذرة الرفيعة بجسيمات الزنك النانوية ZnO NPs إلى تحسين تحمل إجهاد الجفاف من خلال نقل الحبوب للنايتروجين N واستعادة إجمالي محتوى النيتروجين في المقابل، أدت ZnO NPs بتركيزات ≤ 10 ملغم L-1 إلى إجهاد مؤكسد في نباتات الطماطم المزروعة في 2/1 وسط Murashige و Skoog . يمكن أن تعزى الاختلافات في النتائج إلى التباين في ZnO NPs، ومستويات NPs المستخدمة، ووسائط تطوير النبات المستعملة، والتباين المحتمل في مسؤولية المصنع تجاه ZnO NPs. كما قللت ZnO NPs من إجهاد HMs عن طريق تقليل امتصاص النباتات لـ HMs وبالتالي حماية النباتات من سمية العناصر الثقيلة HMs . يمكن تحسين أعراض الإجهاد التأكسدي الناجم عن سمية Cd و Pb عن طريق علاج ZnO NPs. بالإضافة إلى ذلك، يمكن لـ ZnO NPs تحسين مستويات البروتين

الذائب الكلي ومستويات الصباغ الضوئي، مع تقليل بيروكسيد الدهون في تطوير شتلات نبات *Leucaena leucocephala*، عندما تم تطبيق رش ورقي من ZnO NPs على أوراق الذرة، انخفض امتصاص الكادميوم والضغط التأكسدي الناجم عن الكادميوم. وجد ان زيادة في نمو النبات ومؤشر التمثيل الضوئي ومحتوى الكلوروفيل وانخفاض في محتوى الصوديوم في أوراق عباد الشمس المزودة بـ ZnO NPs. وبالمثل، أظهرت نباتات القمح المعالجة بـ CuO/ZnO NPs تحسنًا في النمو، والذي قد يكون بسبب انخفاض قابلية ذوبان CuO NPs. مجتمعة، أشارت تطبيقات NPs المستندة على الزنك الى تعزيز تحمل الإجهاد النباتي.

تكنولوجيا النانو الحيوية في تعديل الجينوم Nanobiotechnology in Genome Modification

فضلا عن أجهزة الاستشعار النانوية المستخدمة على نطاق واسع، تعد التكنولوجيا الحيوية النانوية، وخاصة نقل الجزيئات الحيوية المدعومة بالمواد النانوية (مثل DNA وRNA)، مجالًا بحثيًا واعدًا. ويشارك نقل الجزيئات الحيوية بمساعدة المواد النانوية في التعبير عن الجينات، وتحرير الجينوم، وإسكات الجينات. تعيق الخصائص الفيزيائية والكيميائية لجدار الخلية النباتية تحول الجزيئات الحيوية إلى خلايا نباتية. تعتبر حبوب اللقاح، باعتبارها أنسجة نباتية أنموذجية ذات جدار خلوي خامل كيميائيًا، هدفًا مثاليًا للتعبير الجيني العابر. تم استخدام SWCNTs المغلفة بالإيميدازوليوم Imidazolium-coated SWCNTs للمساعدة في نقل DNA البلازميد الذي يشفر بروتين الفلورسنت الأخضر Green fluorescent protein (GFP) (GFP) الى حبوب لقاح نخيل الزيت. كانت كفاءة كل من تسليم ونشاط GFP عالية (Zhang, *et al.* 2021). علاوة على ذلك، باستخدام الأنابيب النانوية الكربونية الأحادية المغطاة بالكيتوسان Chitosan-coated SWCNTs، تم تحويل بلازميد الحمض النووي إلى البلاستيدات الخضراء. تضمنت هذه التجربة العديد من أنواع

النباتات بما في ذلك *Eruca sativa*، و*Nasturtium officinale*، و*Nicotiana tabacum*، و*Spinacia oleracea*، وأظهرت الناقلات مستويات عالية من التعبير العابر. بالإضافة إلى تعبير الجينات المحورة، زادت الدراسات المرتبطة بإسكات الجينات وتحرير الجينوم القائم على المواد النانوية بشكل كبير في السنوات الأخيرة. يوفر التسليم المحدد القائم على المواد النانوية للبلازميدات المهندسة وراثيا أساليب مبتكرة لتعديل جينومات النباتات بسرعة. على سبيل المثال، أظهرت دراسة حديثة أن اتحادات الحمض النووي والأنابيب النانوية الكربونية قد تم نقلها بنجاح إلى أنواع نباتية عدة بما في ذلك التبغ والجرجير والقطن والقمح. أظهرت منصة توصيل siRNA بوساطة الأنابيب النانوية الكربونية كفاءة عالية في إسكات الخلايا النباتية، وأظهرت منصة التوصيل المعتمدة على NP قدرة فعالة قابلة للتحويل داخل الخلايا.

نجحت جسيمات الذهب النانوية Au NPs المطلية بالبولي إيثيلين أمين (PEI-AuNPs) Polyethylenimine-coated Au NPs (PEI-AuNPs) في توصيل siRNA إلى خلايا نباتية سليمة، وانخفض التعبير الجيني المستهدف بنسبة 76% على الأقل. يوفر مجال التكنولوجيا الحيوية النانوية الذي يحظى بشعبية متزايدة فرصًا هائلة للعلماء لتحسين أنظمة تحويل النبات. ومع ذلك، فإن استقرار تعديل الجينوم بمساعدة التكنولوجيا الحيوية النانوية يحتاج إلى مزيد من الدراسة. فضلا عن ذلك، فإن هذا النوع من تعديل الجينوم من شأنه أن يسبب مشاكل للأنواع الأخرى

طرائق التطبيقات المختلفة لتكنولوجيا النانو في الزراعة

Different methods for the application of NPs in agriculture

يوضح (الشكل 8) طرائقًا مختلفة لتطبيق تكنولوجيا الجسيمات النانوية NPs في الزراعة. يتيح تطبيق المواد النانوية تحويل النبات بكفاءة لتحسين المحاصيل. نظرًا لخصائصها الفريدة من حيث الحجم الصغير ومواقع الارتباط المتعددة ومساحة السطح

الكبيرة، تعد المواد النانوية ناقلات نانوية ممتازة للجزيئات النشطة بيولوجيًا (على سبيل المثال، DNA البلازميد والحمض النووي الريبي المزدوج) يمكن أيضًا استخدام الجسيمات النانوية NPs المهندسة لزيادة سلامة المحاصيل والكشف عن بقايا المبيدات الحشرية (Kim *et al.*, 2018). علاوة على ذلك، أصبحت تقنية النانو وسيلة شائعة يستخدمها المهندسون والمصممون لتعزيز وتحسين خصائص التربة. يمكن استخدام مركبات البوليمر الطيني النانوي Nano clay–polymer والزيوليت النانوي Nano-zeolites في التربة لتحسين محتواها من الرطوبة، وزيادة قدرتها على الاحتفاظ بالمياه، وإبطاء إطلاق الماء خلال موسم الزراعة، كما تم استخدام المغناطيسات النانوية Nanomagnets لطرد ملوثات التربة.

شكل. 8 تطبيقات الجسيمات النانوية في حقول الزراعة. عن (Anderson, et al. 2016)

آليات عمل الجسيمات النانوية في النباتات Mechanisms of Action of NPs in Plants

على الرغم من أن الجسيمات النانوية NPs لديها مجموعة واسعة من التطبيقات في الزراعة، فإن غالبية NPs تشكل خطراً على النباتات عندما تكون موجودة بتركيزات عالية. قد يكون لامتصاص وتراكم وتداخل NPs مع عمليات التمثيل الغذائي

الرئيسية في الأنسجة النباتية المختلفة آثار إيجابية أو سلبية على النباتات، اعتمادًا على جرعتها وحركتها وخصائصها وتفاعلها.

امتصاص الجسيمات النانوية Uptake Nanoparticles

يمكن لتركيزات عالية من الجسيمات النانوية NPs اختراق الخلايا النباتية وعبور غشاء البلازما. وبالتالي قد يتداخل هذا مع الأنشطة الخلوية الرئيسة. يمكن أن تصل NPs إلى الأنسجة النباتية من خلال نظام الجذر أو الأجزاء الموجودة فوق سطح الأرض مثل تقاطعات الجذر والجروح. باعتبارها حاملة، يجب أن تمر NPs عبر العديد من الحواجز الفسيولوجية حتى يتم امتصاصها بواسطة النبات ونقلها. تسمح جدران الخلايا النباتية، التي تتكون من السليلوز، للجزيئات النانوية NP الصغيرة، التي يتراوح حجمها بين 5 و20 نانومتر، بالمرور إلى الخلايا النباتية. لقد ثبت أن بعض الجسيمات النانوية NPs تطور مسامًا أكبر في جدار الخلية لدخول الخلية. يمكن نقل NPs إلى أنسجة نباتية أخرى عبر المسارات الأبوبلاستيك apoplastic و Symplastic. اقترحت آلية تبادل الدهون لنقل NPs إلى الخلايا النباتية. يعد الحجم وmagnitude وإمكانات زيتا zeta potentials للجسيمات النانوية NPs مهمة لتحديد توصيلها إلى الخلايا النباتية.

مسارات التفاعل بين الجسيمات النانوية والنباتات NPs-Plant Interaction Pathways

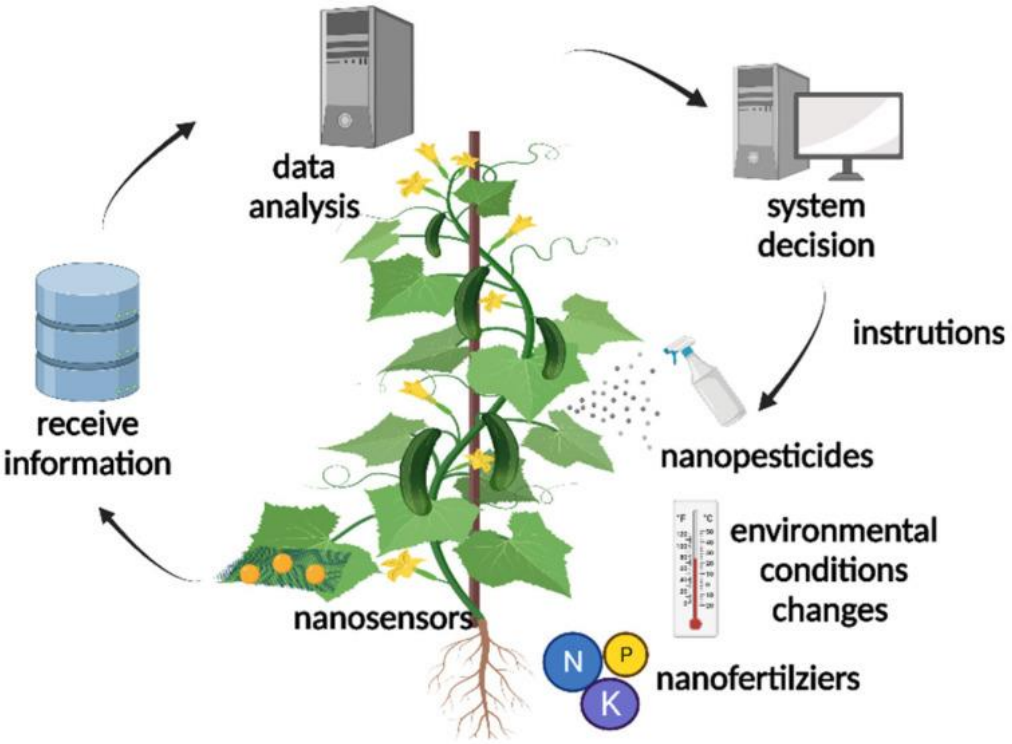
قد تؤثر الجسيمات النانوية NPs على استقلاب النبات عن طريق توصيل المغذيات الدقيقة، وتنظيم الجينات، والتدخل في العديد من عمليات الأكسدة في النباتات. يمكن للمحتويات الزائدة من NPs توليد ROS وبالتالي التدخل في آلية الأكسدة. بينما لم يتم بعد فك رموز المسارات الأخرى. يمكن للجسيمات النانوية NPs تعطيل سلسلة نقل الإلكترون في الميتوكوندريا والبلاستيدات الخضراء، ما يتسبب في انفجار مؤكسد وزيادة في مستويات ROS. يتم تقليل معدل تثبيت الكربون استجابة للظروف العصيبة

وبالتالي، فإن هذا يزيد من التثبيط الضوئي، ما قد يؤدي إلى الإفراط في إنتاج جذور أنيون الأكسيد الفائق و H_2O_2 في النظام الضوئي، عندما يتم إنشاء أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS) نتيجة لـ NPs، تتأثر جميع المكونات البيولوجية مما يسبب تغيرات في البروتين، وبيروكسيد الدهون، وتلف الحمض النووي. وجدت العديد من الدراسات زيادة في بيروكسيد الدهون وتلف الحمض النووي في النباتات أثناء التفاعل مع الجسيمات النانوية NPs. يمكن أن تؤدي الزيادة في مستويات ROS إلى موت الخلايا المبرمج أو النخر، ما يؤدي إلى موت الخلايا النباتية. على الرغم من طبيعتها المدمرة، تلعب ROS دورًا في الأنشطة البيولوجية، بما في ذلك تحمل الإجهاد. يحدد التوازن بين إنشاء ROS ما إذا كان ROS له وظيفة مدمرة أو إشارة. طورت الخلايا آلية قوية مضادة للأكسدة للتحكم بدقة في كمية أنواع الأوكسجين التفاعلية. تُعزى مضادات الأكسدة الأنزيمية (SOD، CAT، و guaiacol بيروكسيديز) وغير الأنزيمية (أسكوربات، الجلوتاثيون، الكاروتينات، التوكوفيرول، والفينولات) إلى آليات الدفاع في النباتات. أثبتت العديد من الدراسات أن النباتات المعرضة للـجسيمات النانوية NPs تنتج المزيد من جزيئات مضادات الأكسدة. يمكن أيضًا أن تتأثر إشارات استجابة الإجهاد النباتي بالهرمونات النباتية. الهرمونات النباتية هي جزيئات داخلية تشارك في تنظيم نمو النبات وتحمل الإجهاد. استجابة للضغوط اللاأحيائية، يمكن تنشيط أو قمع مسارات هرمونية مختلفة. في الفلفل الأحمر (*Capsicum annuum*)، زادت مستويات السيتوكينين استجابةً لإجهاد AgNPs؛ بينما في القطن (*Gossypium sp)*، تم اكتشاف انخفاض في مستويات الأوكسينات وABA استجابةً لـ CuO NPs. هذا يشير إلى أن الجسيمات النانوية NPs تؤثر على التوازن الهرموني النباتي والتمثيل الغذائي للنبات. أظهرت العديد من الدراسات أن الجسيمات النانوية NPs يمكن أن تؤثر أيضًا على محتوى ونشاط أصباغ التمثيل الضوئي في النباتات. التركيزات العالية من الجسيمات النانوية NPs لها تأثير سلبي على عملية التمثيل الضوئي، مما يؤدي إلى تأخر النمو أو الموت في النباتات.

أجهزة الاستشعار النانوية المستخدمة لمراقبة النباتات الحية

Nanosensors Used to Monitor Living Plants Agricultural

تتضمن التطبيقات الزراعية لأجهزة الاستشعار النانوية: إدارة المغذيات، مراقبة النمو، تقييم الآفات والأمراض، الكشف عن ظروف التربة، إنتاج الغذاء، والكشف عن الهرمونات النباتية. تشكل أجهزة الاستشعار النانوية منصة جديدة لرصد نمو النبات وتطوره، مما يحقق مراقبة دقيقة وغير مدمرة، ويمكن تطبيقها على النباتات الفردية في الوقت الفعلي (شكل 9). تشمل تقنيات الكشف عن مستشعرات النانو الشائعة Nanosensor detection techniques نقل طاقة الرنين الفلوري (FRET) Fluorescence resonance energy transfer، وتشتت رامان المعزز على السطح (SERS)(SERS) Surface enhanced Raman scattering ، والتعرف الجزيئي في طور الإكليلCorona-phase molecular recognition ، وتشمل مستشعرات النانو الشائعة نفسها مستشعرات نانوية كهروكيميائية Electrochemical nanosensors ومستشعرات نانوية كهروضغطية Piezoelectric nanosensors (Wujcik, *et al*. 2014).



شكل 9. تطبيقات أجهزة الاستشعار النانوية في المحاصيل. تشتمل أجهزة الاستشعار النانوية المستخدمة في مراقبة النباتات على عدة جوانب. أولاً، تتم مراقبة المعلمات الفسيولوجية أو البيئية للنباتات بوساطة أجهزة الاستشعار النانوية. ويتم تسليم هذه البيانات إلى المعدات الإلكترونية، بما في ذلك الهاتف الذكي أو الكمبيوتر المحمول، على الفور. ثانيا، يقوم نظام الكمبيوتر بتحليل البيانات وتوفير التعليمات. وأخيرا، يقوم نظام الزراعة أو المسؤولون بضبط ظروف البيئة واتخاذ التدابير وفقا للتعليمات. عن (Shang, *et al*. 2019)

يمكن تقسيم أجهزة الاستشعار النانوية المستخدمة في النباتات الحية إلى عدة أنواع، بما في ذلك أجهزة استشعار إشارة النبات والنمو والإجهاد. أولاً، يمكن اكتشاف جزيئات الإشارات النباتية عدة، بما في ذلك الإشارات الغازية والكهربائية والهرمونات النباتية والإشارات الكيميائية، بوساطة مستشعرات النانو. تعد إشارات الغاز مثل الأوكسجين وأكسيد النيتريك Oxygen and nitric oxide (NO)إشارات نباتية داخلية مهمة استجابة للإجهاد اللاأحيائي أو الحيوي. إن مستشعر أنابيب الكربون النانوية أحادية الجدار A fluorescent ratiometric single-walled (SWCNTs)

carbon nanotubes (SWCNTs) sensor للكشف عن NO هو مستشعر نانوي يعتمد على تقنية الكشف عن جزيء واحد A single-molecule detection technique. كانت استجابة أجهزة استشعار SWCNT في الأوراق مماثلة لتلك الموجودة في الاختبارات المختبرية، مما يشير إلى أن جهاز الاستشعار النانوي هذا لديه القدرة على التعامل مع البيئات المعقدة.

ترتبط الإشارات الكيميائية في النباتات، مثل المركبات العضوية المتطايرة (VOCs)، دائمًا بجودة الغذاء أو الضغوطات اللاأحيائية/الحيوية للنبات. يعد استشعار هذه الإشارات الكيميائية مفيدًا للتنبؤ بمدة الصلاحية وتقليل الخسارة وتعزيز تحمل الإجهاد. كمؤشر أساسي لنضج الفاكهة، يتمتع حمض الماليك بإمكانية كبيرة كهدف لأجهزة الاستشعار النانوية. بالإضافة إلى ذلك، فإن الأنابيب النانوية الكربونية الفلورية القريبة من الأشعة تحت الحمراء هي أجهزة استشعار انتقائية لبيروكسيد الهيدروجين، وهو جزيء أساسي للإشارة إلى النبات مرتبط بالإجهاد وبالتالي، يمكن أن تساعد مستشعرات بيروكسيد الهيدروجين النانوية في مراقبة حالات النباتات البعيدة والقريبة. يعد السكروز والجلوكوز من موارد الطاقة الأساسية لنمو النبات، وقد تم تحديث طرق الكشف عن هذه المواد الكيميائية في العقود الأخيرة. تُستخدم تقنية FRET بشكل متكرر في مراقبة تدفق السكروز والجلوكوز (Chaudhuri, *et al*. 2011). فضلا عن ذلك، فقد تطورت أجهزة الاستشعار النانوية القابلة للارتداء لاستخدامها في حياة الناس اليومية بسرعة وبوفرة. ظهرت أيضًا أجهزة استشعار نانوية يمكن وضعها في النبات لمراقبة معايير نمو النبات. يعد نقل المياه وتوزيعها بمنزلة تقدم بيولوجي كبير في نمو النبات وتطوره. تم تطوير جهاز استشعار إلكتروني مرن للمراقبة المستمرة لنقل المياه وتدفق النسغ وتوزيع العناصر الغذائية. كشف تطبيق مستشعر النانو هذا على البطيخ عن تحول نهاري/ليلي في توزيع الماء بين الفواكه والأوراق. قبل الإعلان عن مستشعر النانو هذا، كانت أجهزة الاستشعار النانوية القابلة للاستعمال والمصنوعة من أقطاب البوليمر المطبوعة بالبخار تكتشف بشكل موثوق تلف الأنسجة العميقة

الناجم عن الجفاف والأشعة فوق البنفسجية Ultraviolet A radiation. هناك جهاز استشعار نانوي Wearable nanosenor مهم آخر يمكن استعماله وهو مستشعر الأمونيا MWCNT المطلي بالبولي انيلين (PANI) A polyaniline (PANI)-coated MWCNTs ammonia sensor والذي يتميز بحساسية عالية وموثوقية ووقت استجابة سريع في اكتشاف الأمونيا (Maity and Kumar, 2018).

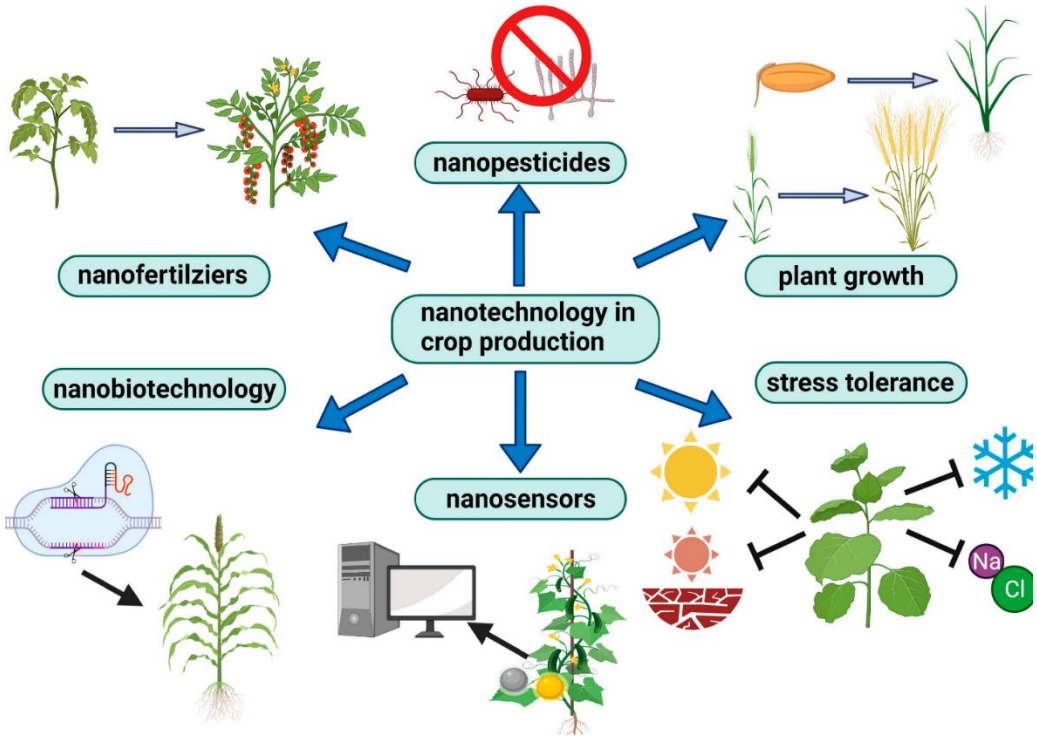
تعد أجهزة الاستشعار النانوية لتشخيص أمراض النبات مهمة لمراقبة صحة النبات واتخاذ إجراءات دفاعية فورية. إن الدقة والراحة وظروف الكشف الخاصة بأدوات الكشف التقليدية تحد من تطورها. تساعد أجهزة الاستشعار النانوية المحمولة والاقتصادية والدقيقة الباحثين في التعرف على مسببات الأمراض النباتية في الوقت المناسب. تشمل أهداف الأمراض النباتية التي تتعرف عليها أجهزة الاستشعار النانوية الحمض النووي والبروتين والمركبات العضوية المتطايرة. على سبيل المثال، بالمقارنة مع طريقة تفاعل البوليميراز المتسلسل العادية Normal polymerase chain reaction method، كانت طريقة تضخيم البوليميراز -SERS (RPA) Recombinase polymerase amplification (RPA) recombinase أكثر حساسية ولها حد أدنى للكشف في التعرف على ثلاثة مسببات أمراض نباتية مهمة، وهي *Botrytis cinerea* و*Pseudomonas syringae* و *Fusarium oxysporum* (Lau, *et al.* 2016) .

تساعد أجهزة الاستشعار النانوية المسؤولين على مراقبة صحة النبات على المستوى الجزيئي، ما يزيد بشكل كبير من كفاءة إدارة النبات. ومع ذلك، فإن استقرار أجهزة الاستشعار النانوية هذه لا يزال بحاجة إلى مزيد من الدراسة عند الاستفادة منها في الأنظمة الزراعية. علاوة على ذلك، هل حساسية وموثوقية أجهزة الاستشعار النانوية كافية للاستخدام في الإنتاج الزراعي؟ ولدينا ثقة في أن هذه المشاكل سيتم حلها في المستقبل.

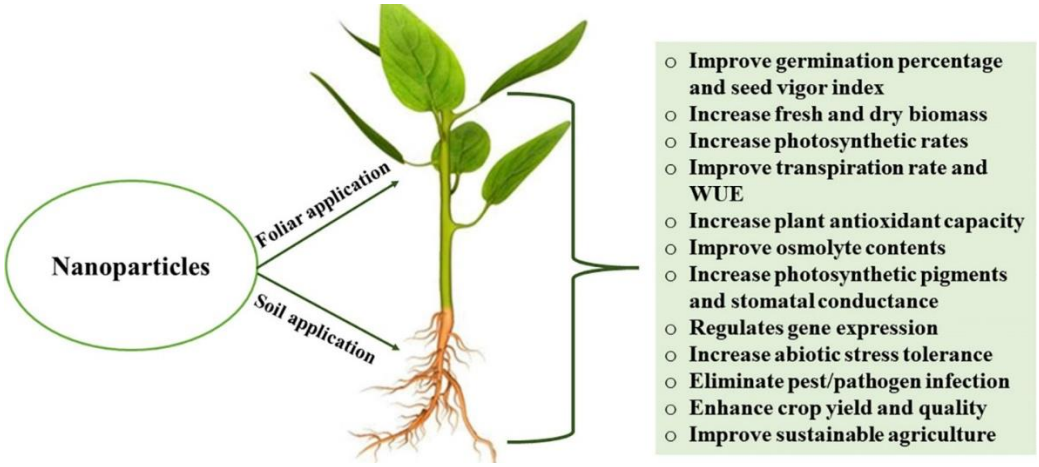
الاستنتاجات Conclusions

تُظهر تطبيقات تكنولوجيا النانو في الزراعة إمكانات كبيرة لتحسين البيئة وزيادة إنتاج وجودة نباتات المحاصيل (شكل 10). أن الأبحاث المتعلقة بتكنولوجيا النانو المطبقة على إنتاج المحاصيل، والتي تشمل الأسمدة النانوية والمبيدات النانوية والمواد النانوية المستخدمة في تعزيز نمو النبات وإنبات البذور وتحمل الإجهاد وأجهزة الاستشعار النانوية والتكنولوجيا الحيوية النانوية. ومع ذلك، بالإضافة إلى الجوانب الإيجابية لتكنولوجيا النانو، لا تزال هناك العديد من الفجوات بين البحوث المختبرية والإنتاج الزراعي. على سبيل المثال، تعتبر الجسيمات النانوية NPs سامة ولكنها مفيدة أيضًا عند تطبيقها على المحاصيل، وتحتاج تركيزات الجسيمات NPs المختلفة إلى مزيد من الدراسة في أنواع المحاصيل المتميزة. فضلا عن ذلك، يجب أيضًا إيجاد نقطة اقتصادية لتطبيق المواد النانوية التي توازن بين إنتاج المحاصيل وحماية البيئة. فضلا عن ذلك، كيف يمكن الاستفادة من أجهزة الاستشعار النانوية هذه في الأنظمة الزراعية؟ هل حساسية وموثوقية أجهزة الاستشعار النانوية كافية للاستخدام في الإنتاج الزراعي؟ فضلا عن ذلك، هل هناك أي اختلافات بين النباتات المحولة عبر NPs والنباتات المحورة عبر الطرق التقليدية؟ ومع ذلك، فإن الآفاق المتزايدة لتكنولوجيا النانو لا تزال تزيد من الثقة في القدرة على تلبية الاحتياجات الغذائية للبشر. ولتحقيق الزراعة المستدامة، يجب على مجتمع البحث تحديد الحلول الصديقة للبيئة المناسبة التي تعالج فقدان المحاصيل الناجم عن الإجهاد اللاأحيائي (شكل 11). تعد تكنولوجيا النانو وسيلة مبتكرة وفعالة لتعزيز إنتاجية المحاصيل وجودتها، وتعزيز القطاع الزراعي، وإدارة الطلب العالمي على الغذاء. إن الدور المحتمل الذي تلعبه العديد من الجسيمات النانوية NPs في تخفيف الأضرار الناجمة عن الإجهاد اللاأحيائي وتحسين نمو النبات وإنتاجية المحاصيل يخضع لتحقيق مكثف. يمكن للجسيمات النانوية NPs، مثل TiO_2 وSiO_2 وAg NPs، أن تقلل من الآثار السلبية للإجهاد اللاأحيائي عن طريق تنشيط آليات الدفاع النباتي عن طريق تحريض

إنتاج ROS والسمية النباتية. يمكن أيضًا للجسيمات النانوية NPs، نظرًا لصغر حجمها، أن تخترق الأنسجة النباتية بسهولة، وبعد ذلك تؤثر بشكل إيجابي في العمليات المورفولوجية والفسيولوجية والكيميائية الحيوية للنبات، وتعزز نمو النبات، وتحسن إنتاجية المحاصيل في النباتات تحت ضغوط غير حيوية مختلفة. علاوة على ذلك، تتمتع NPs بمساحة سطحية كبيرة تعمل على تحسين امتصاص وتوصيل مختلف العناصر الغذائية المستهدفة. ومع ذلك، فإن تطبيقات NPs في تحسين المحاصيل والزراعة المستدامة لا تزال في مرحلة مبكرة من التطوير، والأبحاث الحالية في هذا المجال غير كافية وغير متسقة إلى حد ما. ولذلك، يجب أن تستكشف التحقيقات الإضافية القضايا التالية، والتي ستساعد في الحد من الآثار غير المرغوب فيها للجسيمات النانوية NPs على النظم الإيكولوجية والمحاصيل: (أ) تفاعل NPs مع النباتات وعملية التمثيل الغذائي على المستويين الجزيئي والخلوي، وتحسين حجم ومستوى NPs قبل التطبيق العملي في الحقل. (ب) آثار NPs وسمياتها المحتملة في الأنواع النباتية المختلفة. (ج) تأثير NPs على تنظيم الجينات والتعبير عنها في النباتات تحت الضغوط اللاأحيائية المختلفة. (د) سلوك ومصير NPs في النباتات والبيئة. (هـ) آثار خصائص التربة وأنواع النباتات المختلفة على كفاءة NPs. (و) تصنيف NPs كمحفز للإجهاد أو للضغط في المنشطات. و (ز) التأثيرات المجمعة لـ NPs مع المكونات النشطة الأخرى والضغوط الحيوية في النباتات.



شكل 10. تطبيقات النانوتكنولوجي في انتاج المحاصيل



شكل 11. تأثير استخدام الجسيمات النانوية على: صحة النبات، معايير النمو، المعايير الفسيولوجية وكفاءة استخدام المياه. El-Saadony, *et al*, 2022

المصادر

Abu-Hamdah, R., Cho, W. J., Cho, S. J., Jeremic, A., Kelly, M., Ilie, A. E., et al. (2004). Regulation of the water channel aquaporin-1: isolation and reconstitution of the regulatory complex. *Cell Biol. Int.* 28, 7–17. doi: 10.1016/j.cellbi.2003.11.003.

Adeel, M., Farooq T., White, J.C., Hao Y., He Z., Rui Y. Carbon-based nanomaterials suppress tobacco mosaic virus (TMV) infection and induce resistance in Nicotiana benthamiana. J. Hazard. Mater. 2021;404:124167. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124167. [DOI] [PubMed] [Google Scholar]

Ahmad, B., Shabbir, A., Jaleel, H., Khan, M. M., and Sadiq, Y. (2018). Efficacy of titanium dioxide nanoparticles in modulating photosynthesis, peltate glandular trichomes and essential oil production and quality in *Mentha piperita* L. *Curr Plant Biol.* 13, 6–15. doi: 10.1016/j.cpb.2018.04.002.

Al-Ashkar, I., Al-Suhaibani, N., Abdella, K., Sallam, M., Alotaibi, M., and Seleiman, M. F. (2021). Combining genetic and multidimensional analyses to identify interpretive traits related to water shortage tolerance as an indirect selection tool for detecting genotypes of drought tolerance in wheat breeding. *Plants* 10:931. doi: 10.3390/plants10050931.

Anderson, J. A., Gipmans, M., Hurst, S., Layton, R., Nehra, N., Pickett, J., et al. (2016). Emerging agricultural biotechnologies for sustainable agriculture and food security. *J. Agric. Food Chem.* 64, 383–393. doi: 10.1021/acs.jafc.5b04543.

Bayda S., Adeel M., Tuccinardi T., Cordani M., Rizzolio F. 2020. The History of Nanoscience and Nanotechnology: From Chem-ical–Physical Applications to Nanomedicine. Molecules. 2020;25:112. doi:

10.3390/molecules25010112. [DOI] [PMC free article] [PubMed] [Google Scholar].

Bhagat D., Samanta S.K., Bhattacharya S. 2013. Efficient Management of Fruit Pests by Pheromone Nanogels. Sci. Rep. 2013;3:1294. doi: 10.1038/srep01294. [DOI] [PMC free article] [PubMed] [Google Scholar]

Chaudhuri B., Hörmann F., Frommer W.B. 2011. Dynamic imaging of glucose flux impedance using FRET sensors in wild-type Arabidopsis plants. J. Exp. Bot. 2011;62:2411–2417. doi: 10.1093/jxb/erq444. [DOI] [PubMed] [Google Scholar]

Demirer G.S., Silva T.N., Jackson C.T., Thomas J.B., Ehrhardt D.W., Rhee S.Y., Mortimer J.C., Landry M.P. 2021. Nano-technology to advance CRISPR–Cas genetic engineering of plants. Nat. Nanotechnol. 2021;16:243–250. doi: 10.1038/s41565-021-00854-y. [DOI] [PMC free article] [PubMed] [Google Scholar].

Dimkpa, C. O., Singh, U., Bindraban, P. S., Elmer, W. H., Gardea-Torresdey, J. L., and White, J. C. (2019). Zinc oxide nanoparticles alleviate drought-induced alterations in sorghum performance, nutrient acquisition, and grain fortification. *Sci. Total Environ.* 688, 926–934. doi: 10.3389/fpls.2022.946717

El-Naggar M.E., Abdelsalam N.R., Fouda M.M., Mackled M.I., Al-Jaddadi M.A., Ali H.M., Siddiqui M.H., Kandil E.E. 2020. Soil Application of Nano Silica on Maize Yield and Its Insecticidal Activity against Some Stored Insects after the Post-Harvest. Nanomaterials. 2020;10:739. doi: 10.3390/nano10040739. [DOI] [PMC free article] [PubMed] [Google Scholar]

El-Saadony, M. T., ALmoshadak, A. S., Shafi, M. E., Albaqami, N. M., Saad, A. M., El-Tahan, A. M., et al. (2021b). Vital roles of sustainable nano-fertilizers in improving plant quality and quantity-an updated review *Saudi J. Biol. Sci.* 28, 7349–7359. doi: 10.1016/j.sjbs.2021.08.032

El-Saadony, M., Saad, A., Soliman, M., Soliman, H. M. El-Sayed, M., El-Sayed,D., Babalghith, A., El-Tahan M., El-Tahan,O. et al. 2022. Role of Nanoparticles in Enhancing Crop Tolerance to Abiotic Stress: A Comprehensive Review. Front. Plant Sci. 13:946717.

Elsakhawy, T., Omara, A. E. D., Alshaal, T., and El-Ramady, H. (2018). Nanomaterials and plant abiotic stress in agroecosystems. *EBSS* 2, 73–94. doi: 10.21608/jenvbs.2018.3897.1030

Esyanti R.R., Farah N., Bajra B.D., Nofitasari D., Martien R., Sunardi S., Safitri R. 2020. Comparative Study of Nano-chitosan and Synthetic Bactericide Application on Chili Pepper (Capsicum annuum L.) Infected by Xanthomonas campestris. AGRIVITA J. Agric. Sci. 2020;42:11. doi: 10.17503/agrivita.v42i1.1283. [DOI] [Google Scholar]

Guo H., White J.C., Wang Z., Xing B. Nano-enabled fertilizers to control the release and use efficiency of nutrients. Curr. Opin. Environ. Sci. Health. 2018;6:77–83. doi: 10.1016/j.coesh.2018.07.009. [DOI] [Google Scholar]

Haghighi M., Teixeira da Silva J.A. 2014. The effect of N-TiO2 on tomato, onion, and radish seed germination. J. Crop. Sci. Biotechnol. 2014;17:221–227. doi: 10.1007/s12892-014-0056-7. [DOI] [Google Scholar]

Hernández-Hernández H., Juárez-Maldonado A., Benavides-Mendoza A., Ortega-Ortiz H., Cadenas-Pliego G., Sánchez-Aspeytia D., González-

Morales S. 2018. Chitosan-PVA and Copper Nanoparticles Improve Growth and Overexpress the SOD and JA Genes in Tomato Plants under Salt Stress. Agronomy. 2018;8:175. doi: 10.3390/agronomy8090175. [DOI] [Google Scholar]

Iqbal M., Raja N.I., Mashwani Z.-U.-R., Hussain M., Ejaz M. 2019. Yasmeen F. Effect of Silver Nanoparticles on Growth of Wheat Under Heat Stress. Iran. J. Sci. Technol. Trans. A Sci. 2019;43:387–395. doi: 10.1007/s40995-017-0417-4. [DOI] [Google Scholar]

Karami Mehrian, S., Heidari, R., Rahmani, F., and Najafi, S. (2016). Effect of chemical synthesis silver nanoparticles on germination indices and seedlings growth in seven varieties of *Lycopersicon esculentum* Mill (tomato) plants. *J. Clust. Sci.* 27, 327–340. doi: 10.1007/s10876-015-0932-4

Khan I., Awan S.A., Raza M.A., Rizwan M., Tariq R., Ali S., Huang L. 2021. Silver nanoparticles improved the plant growth and reduced the sodium and chlorine accumulation in pearl millet: A life cycle study. Environ. Sci. Pollut. Res. 2021;28:13712–13724. doi: 10.1007/s11356-020-11612-3. [DOI] [PubMed] [Google Scholar]

Khan, I., Seleiman, M. F., Chattha, M. U., Jalal, R. S., Mahmood, F., Hassan, F. A., et al. (2021). Enhancing antioxidant defense system of mung bean with a salicylic acid exogenous application to mitigate cadmium toxicity. *Not. Bot. Horti. Agrobot. Cluj Napoca* 49:12303.

Khan, Z., and Upadhyaya, H. (2019). "Impact of nanoparticles on abiotic stress responses in plants: an overview," in *Nanomaterials in Plants, Algae and Microorganisms*, eds D. K. Tripathi, P. Ahmad, S. Sharma, D. K. Chauhan, and N. K. Dubey (Cambridge, MA: Academic Press), 305–322.

Kim, D.-Y., Kadam, A., Shinde, S., Saratale, R. G., Patra, J., and Ghodake, G. (2018). Recent developments in nanotechnology transforming the agricultural sector: a transition replete with opportunities. *J. Sci. Food Agric.* 98, 849–864. doi: 10.1002/jsfa.8749

Kottegoda N., Sandaruwan C., Priyadarshana G., Siriwardhana A., Rathnayake U.A., Berugoda Arachchige D.M., Ku-marasinghe A.R., Dahanayake D., Karunaratne V., Amaratunga G.A.J. 2017. Urea-Hydroxyapatite Nanohybrids for Slow Release of Nitrogen. ACS Nano. 2017;11:1214–1221. doi: 10.1021/acsnano.6b07781. [DOI] [PubMed] [Google Scholar].

Lau H.Y., Wang Y., Wee E.J.H., Botella J.R., Trau M. 2016. Field Demonstration of a Multiplexed Point-of-Care Diagnostic Platform for Plant Pathogens. Anal. Chem. 2016;88:8074–8081. doi: 10.1021/acs.analchem.6b01551. [DOI] [PubMed] [Google Scholar]

Liu, C., Zhou, H. and Zhou, J. 2021. The Applications of Nanotechnology in Crop Production. Molecules 2021, 26, 7070. https://doi.org/10.3390/ molecules26237070

Maity D., Kumar R.T.R. 2018. Polyaniline Anchored MWCNTs on Fabric for High Performance Wearable Ammonia Sensor. ACS Sens. 2018;3:1822–1830. doi: 10.1021/acssensors.8b00589. [DOI] [PubMed] [Google Scholar]

Meier S., Moore F., Morales A., González M.-E., Seguel A., Meriño-Gergichevich C., Rubilar O., Cumming J., Aponte H., Alarcón D., et al. 2020. Synthesis of calcium borate nanoparticles and its use as a potential foliar fertilizer in lettuce (Lactuca sativa) and zucchini (Cucurbita pepo)

Plant. Physiol. Biochem. 2020;151:673–680. doi: 10.1016/j.plaphy.2020.04.025. [DOI] [PubMed] [Google Scholar].

Musante C., White J.C. 2012. Toxicity of silver and copper to Cucurbita pepo: Differential effects of nano and bulk-size particles. Environ. Toxicol. 2012;27:510–517. doi: 10.1002/tox.20667. [DOI] [PubMed] [Google Scholar]

Nejatzadeh, F. (2021). Effect of silver nanoparticles on salt tolerance of *Satureja hortensis* L. during *in vitro* and *in vivo* germination tests. *Heliyon* 7:e05981. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e05981

Rahmatizadeh, R., Javad Arvin, S. M., Jamei, R., Mozaffari, H., and Nejhad, F. R. (2019). Response of tomato plants to interaction effects of magnetic (Fe3O4) nanoparticles and cadmium stress. *J. Plant Interact.* 14, 474–481. doi: 10.1080/17429145.2019.1626922

Rajput, V., Minkina, T., Fedorenko, A., Sushkova, S., Mandzhieva, S., Lysenko, V., et al. (2018). Toxicity of copper oxide nanoparticles on spring barley (*Hordeum sativum* distichum). *Sci. Total Environ.* 645, 1103–1113

Shang Y., Hasan M.K., Ahammed G.J., Li M., Yin H., Zhou J. 2019. Applications of Nanotechnology in Plant Growth and Crop Protection: A Review. Molecules. 2019;24:2558. doi: 10.3390/molecules24142558. [DOI] [PMC free article] [PubMed] [Google Scholar].

Singh H., Sharma A., Bhardwaj S.K., Arya S.K., Bhardwaj N., Khatri M. 2021. Recent advances in the applications of nano-agrochemicals for sustainable agricultural development. Environ. Sci. Process. Impacts. 2021;23:213–239. doi: 10.1039/D0EM00404A. [DOI] [PubMed] [Google Scholar].

Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, V. P., Prasad, S. M., Dubey, N. K., and Chauhan, D. K. (2017). Silicon nanoparticles more effectively alleviated UV-B stress than silicon in wheat (*Triticum aestivum*) seedlings. *Plant Physiol. Biochem.* 110, 70–81. doi: 10.1016/j.plaphy.2016.06.026

Wujcik E.K., Wei H., Zhang X., Guo J., Yan X., Sutrave N., Wei S., Guo Z. 2014. Antibody nanosensors: A detailed review. RSC Adv. 2014;4:43725–43745. doi: 10.1039/C4RA07119K. [DOI] [Google Scholar]

Yang, L., and Watts, D. J. (2005). Particle surface characteristics may play an important role in phytotoxicity of alumina nanoparticles. *Toxicol Lett.* 158, 122–132. doi: 10.1016/j.toxlet.2005.03.003

Zhang H., Cao Y., Xu D., Goh N.S., Demirer G.S., Cestellos-Blanco S., Chen Y., Landry M.P., Yang P. 2021. Gold-Nanocluster-Mediated Delivery of siRNA to Intact Plant Cells for Efficient Gene Knockdown. Nano Lett. 2021;21:5859–5866. doi: 10.1021/acs.nanolett.1c01792. [DOI] [PMC free article] [PubMed] [Google Scholar]

Zulfiqar F., Navarro M., Ashraf M., Akram N.A., Munné-Bosch S. 2019. Nanofertilizer use for sustainable agriculture: Advantages and limitations. Plant. Sci. 2019;289:110270. doi: 10.1016/j.plantsci.2019.110270. [DOI] [PubMed] [Google Scholar].

الفصل الثاني

تقنية النانو في قطاع البذور Nanotechnology in Seed Sector

مقدمة

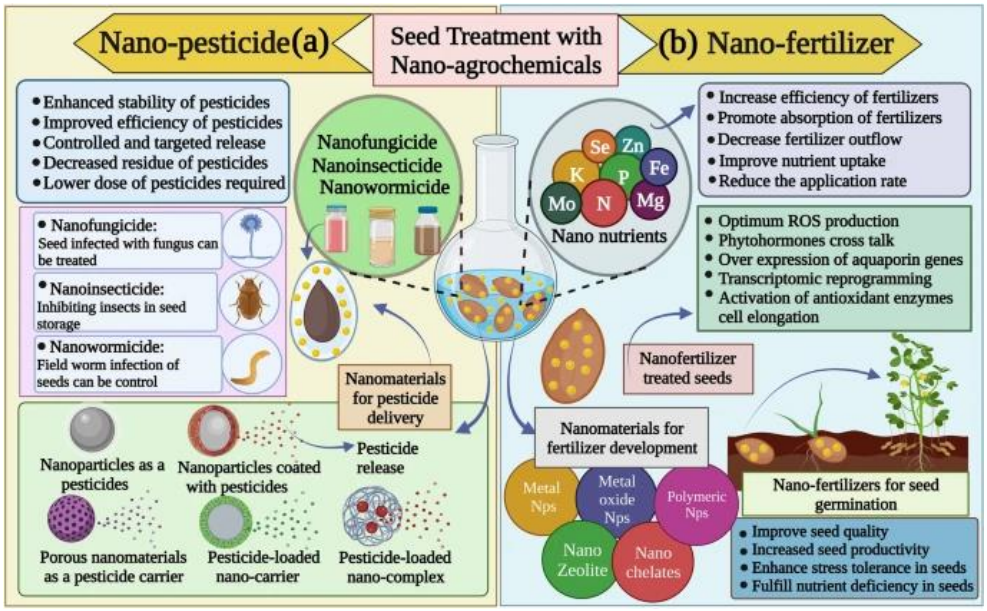
تتمتع تقنية النانو بالقدرة على تعزيز الإنتاجية الزراعية من خلال التحسين الوراثي للنباتات، وتوصيل الجينات وجزيئات الأدوية إلى مواقع محددة على المستويات الخلوية، وتقنيات الجينات القائمة على مصفوفات النانو للتعبير الجيني في النباتات والحيوانات تحت ظروف الإجهاد. مع اكتشاف أساليب وأجهزة استشعار فعالة للزراعة الدقيقة، وإدارة الموارد، والكشف المبكر عن الأمراض والملوثات في المنتوجات الغذائية، وأنظمة التوصيل الذكية للكيماويات الزراعية مثل الأسمدة والمبيدات الحشرية، وتكامل الأنظمة الذكية لتجهيز الأغذية والتعبئة والتغليف، وغيرها من المجالات مثل مراقبة الأمن الزراعي وأمن النظام الغذائي، فإن الإمكانات آخذة في النمو. ومن المتوقع أن يكون النمو الاقتصادي طويل الأجل في هذه الصناعة مدفوعًا بشكل أساسي بمزيد من التطورات في تقنية النانو، والتي ستعود بالنفع أيضًا على المستهلكين والمنتجين والمزارعين والنظم البيئية والمجتمع ككل (Singh, *et al.* 2022).

تقنية النانو نحو معالجات مستدامة للبذور
Nanotechnology Toward Sustainable Seed Treatments

لضمان مستقبل مستدام للزراعة، ثمة حاجة ملحة لممارسات معالجة مستدامة للبذور. تضمن هذه الممارسات الربحية، والصحة البيئية، والعدالة الاجتماعية، وربحية الأجيال الحالية والمستقبلية. وفي إطار ممارسات معالجة البذور المستدامة، يجب الحد من استخدام الكيماويات الزراعية، إذ قد تلوث التربة والمياه والعشب وغيرها من النباتات، فضلا عن الإضرار بالكائنات الحية غير المستهدفة مثل النباتات والطيور والحيوانات والأسماك. تمتص الأراضي والمسطحات المائية المحيطة الكيماويات الزراعية المستخدمة في معالجة البذور، وتدخل في السلسلة الغذائية

وتتراكم في الجسم. وفيما يتعلق بتأثيراتها على المحاصيل، فإن الإفراط في استخدامها يُنتج مخلفات كبيرة، تُسهم في اختلال توازن العناصر الغذائية وانخفاض جودة المنتوجات الزراعية. علاوة على ذلك، فإن الإفراط في استخدام الكيماويات الزراعية قد يؤثر سلبًا على البيئة، إذ يُسبب تغيرًا مناخيًا غير طبيعي، ويضر بالتنوع البيولوجي، ويلوث المياه الجوفية والتربة، ويدمر الموارد الطبيعية، ويخالف قوانين إدارة النفايات، ويسبب تلوثًا ضوضائيًا وتلوثًا جويًا. لذلك، من الضروري تطوير ممارسات زراعية مستدامة للتغلب على مشكلات الكيماويات الزراعية. نحن بحاجة إلى مواد كيميائية زراعية ذكية لمعالجة البذور بشكل مستدام لتحقيق ذلك. يقترح هذا النهج تركيبات ومنتجات تلبي احتياجات المواد الكيميائية التي توفر أنظمة مستدامة لتوصيل المغذيات، مما يزيد من إنتاجية المحاصيل الزراعية ويقلل من التأثير البيئي. أدى استخدام المواد الكيميائية الزراعية النانوية كمواد كيميائية ذكية لمعالجة البذور، مثل الأسمدة النانوية والمبيدات النانوية والمبيدات النانوية للفطريات، إلى تحول الممارسات الزراعية التقليدية لتصبح أكثر استدامة وكفاءة (الشكل 1). يتغلب استخدام المواد النانوية وتكنولوجيا النانو في المواد الكيميائية الزراعية على العديد من عيوب المواد الكيميائية الزراعية التقليدية، بما في ذلك ضعف الذوبان، وانخفاض التوافر البيولوجي، وسهولة التحلل الضوئي، وتلوث المذيبات العضوية، والسمية الزائدة. وقد استُخدمت المواد النانوية بنجاح في تطوير معالجة البذور على مدى السنوات القليلة الماضية. يمكن تصنيف التطبيقات المحتملة للمواد النانوية لمعالجة البذور إلى جسيمات نانوية نشطة وأنظمة حاملات نانوية ذات إطلاق مستدام. الجسيمات النانوية النشطة هي جسيمات نانوية يمكنها إحداث تأثير بيولوجي. يمكن للجسيمات النانوية النشطة أن تعمل كمحفزات، أو مضادة لمسببات الأمراض أو كليهما. تشمل الجسيمات النانوية النشطة أنابيب نانوية كربونية متعددة الجدران تعمل كناقل كيميائي زراعي فعال، وجسيمات نانوية قائمة على أوكسيد معدني لتشجيع الإنبات، وفضة نانوية كعوامل مضادة للميكروبات، وأكسيد التيتانيوم النانوي للنشاط التحفيزي الضوئي،

والسيليكا النانوية لتوصيل المبيدات والأسمدة نظرًا لمساحاتها السطحية الكبيرة . كما هو موضح في (الشكل 1)، تُعد العديد من الجسيمات النانوية المعدنية، بما في ذلك الحديد والزنك والمنغنيز والسيلينيوم، وغيرها، عناصر غذائية أساسية لإنبات البذور ونموها. وقد استخدمت دراسات أخرى البوليمرات النانوية والليبوزومات كناقلات متجددة وقابلة للتحلل الحيوي وصديقة للبيئة لتغليف الزيوت العطرية والمبيدات الحشرية والمغذيات والأسمدة. يقوم حامل النانو ذو الإطلاق المستدام بتغليف مكون نشط (بيولوجي أو صناعي) ويقوم بتوصيل هذا المركب بشكل مستمر بمرور الوقت بدلاً من إطلاقه بالكامل مرة واحدة(Nongbet, *et al*. 2022) .



شكل 1. دور المواد الكيميائية الزراعية النانوية والأسمدة النانوية في معالجة البذور. أ- تساعد خصائص المبيدات النانوية، مثل تعزيز الاستقرار والتحكم والتوصيل المستهدف للمواد الكيميائية الزراعية، البذور على حماية نفسها بشكل فعال من مسببات الأمراض والآفات أثناء الإنبات. ب- تركيبات الأسمدة النانوية (السلينيوم، الزنك، النيتروجين، الفوسفور، البوتاسيوم، الموليبدينوم، إلخ) توفر العناصر الغنية بالمغذيات لتعزيز حماية البذور، وتحسين تحمل الإجهاد، وتلبية نقص العناصر الغذائية في التربة من أجل إنبات البذور بشكل فعال. عن Shelar, et al. 2023

لماذا نحتاج إلى النانو في قطاع البذور؟ Why We Need Nano in seed sector?

تمتاز الجسيمات النانوية (NPs) بخصائص متفوقة على المواد السائبة:

يمكن ترتيب الجسيمات النانوية في طبقات على الأسطح، مما يوفر مساحة سطح كبيرة تؤدي إلى نشاط معزز ويمكن أن تغير قوة المواد أو خصائصها الكهربائية، مما يجعلها أكثر تفاعلًا كيميائيًا (Singh, *et al*. 2022).

- ❖ على نطاق النانو، تختلف الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية للمواد عن خصائص جزيئاتها أو المادة السائبة.
- ❖ زادت نفاذية الجسيمات النانوية من خلال الحواجز البيولوجية (الأغشية).
- ❖ تتميز الجسيمات النانوية بخاصية مضادة للميكروبات - تتفاعل بشكل فريد مع الأنواع المستهدفة.
- ❖ تلتصق بالغشاء عن طريق التفاعل الكهروستاتيكي وتعطل سلامة الغشاء.
- ❖ شديدة الصلابة: انخفاض احتمالية العيوب.

التطبيقات Applications

الكشف عن التلوث في حقل البذور Detecting contamination in seed field:

في المحاصيل الملقحة بالرياح، يعد إنتاج البذور عملية شاقة. يمكن ضمان النقاء الجيني بيقين من خلال تحديد أحمال حبوب اللقاح التي ستؤدي إلى التلوث. تؤثر درجة حرارة الهواء والرطوبة وسرعة الرياح وإنتاج حبوب لقاح المحاصيل على حبوب اللقاح أثناء الطيران. يُمكن أن يُساعد استخدام مُستشعرات نانوية حيوية مُصممة خصيصًا لحبوب اللقاح المُلوثة في الكشف عن التلوث المُحتمل والحد منه. كما يُمكن تجنب تلويث حبوب لقاح المحاصيل المُعدلة وراثيًا

للمحاصيل الحقلية باستخدام التقنية نفسها. يُساعد توفير مُستشعرات نانوية مُخصصة لحبوب لقاح محصول البذور على تنبيه مُزارع البذور - تفعيل الضوء/الصوت وهذا ما تم العمل عليه في جامعة ولاية ميشيغان، الولايات المتحدة الأمريكية (Singh, *et al*. 2022).

المزايا Advantages

1. تحديد مسافة العزل
2. . تحديد كمية الملوثات

تقنية النانو في إدارة صحة البذور Nanotechnology in seed health management

تحمي الطلاءات النانوية باستخدام الأشكال الأولية من الزنك والمنغنيز والذهب والفضة وما إلى ذلك البذور من مسببات الأمراض. تعمل البذور المغلفة بجسيمات نانوية مغلفة بعوامل حيوية محددة على تقليل معدل تلوث البذور وضمان أفضل حالة حقلية وتحسين أداء المحصول من خلال إدارة مسببات الأمراض التي تحملها البذور والتربة. يمكن استخدام أجهزة الاستشعار الحيوية ذات الغلاف النانوي مع البروتين-الربيط (المستضد) protein-ligand (antigen) والجسيمات النانوية البروتينية للكشف عن مسببات الأمراض المرتبطة بالبذور. يمكن أيضًا دمج أجهزة الاستشعار الحيوية النانوية في عبوات البذور للكشف عن نشاط الحشرات من خلال استشعار المستقلبات التي تطلقها الحشرات في المرحلة المبكرة. يمكن معالجة النوى النانوية المحملة بالمبيدات الحشرية بالبذور لإدارة فعالة للإصابة. يمكن أيضًا ترقية هذه النوى النانوية إلى منتوجات مبرمجة تُعرف باسم قاطعات الامعاء "gut busters" والتي تطلق المبيدات الحشرية فقط في البيئات القلوية مثل معدة الحشرات.

بذور النانو الذكية Nano smart seeds

تسمح التقنيات التجارية الحالية تغليف البذور بالأسمدة والمبيدات الحشرية ومبيدات الأعشاب وهرمونات النمو، وغيرها، بالإضافة إلى مادة خاملة كحامل، مع قيود على الجريان السطحي والرشح، وثبات محدود ضد التحلل والانطلاق غير المنضبط. في أنظمة التوصيل الذكية، يمكن استخدام العديد من الناقلات النانوية، مثل الزيوليت وكبريتات المغنيسيوم وكربونات الكالسيوم وأغلفة السيليكا المسامية لتخزين وحماية وتوصيل والتحكم في إطلاق الحمولات المقصودة في عمليات إنتاج المحاصيل. يمكن استخدام المواد الليغنوسليولوزية النانوية Nanolignocellulosic، مثل البوليمرات العضوية Organic polymers والدندريمرات Dendrimers والبوليسترين Polystyrene، وغيرها، في أشكالها النقية أو في أشكالها الحيوية المركبة، لتغليف الناقلات النانوية في أنظمة توصيل تركيبة الإطلاق المتحكم بها. من مزايا ناقلات توصيل تركيبة الإطلاق المتحكم بها النانوية في تطبيقات البذور تحسين استقرار الحمولات، مما يزيد من فعاليتها.

الأسمدة النانوية لإنبات البذور Nanofertilizer for Seed Germination

تُعتبر الأسمدة النانوية من الحلول الواعدة في صناعة الأسمدة، إذ تُبشر بتحسين الاحتفاظ بالعناصر الغذائية في نمو البذور والمحاصيل. تحتوي البذور على احتياطيات غذائية وفيرة تدعم إنبات البذور ونمو الشتلات. ولإنبات البذور وتكوين الشتلات، يُعدّ النسيج النشوي السويداء النسيج الرئيس الذي يُجمّع المواد الغذائية الاحتياطية للبذور. وقد أظهرت نتائج العديد من الدراسات أن الأسمدة النانوية تُساعد البذور على الإنبات بطريقة لا تستطيع الأسمدة التقليدية تحقيقها. وفي ضوء هذه الدراسات، يتضح أن الأسمدة النانوية تخترق أغلفة البذور بفضل

حجمها النانوي، وتزيد من امتصاص الماء عن طريق زيادة تنظيم جينات الأكوابورين، مما يُعزز إنبات البذور ويُقلل من الآثار الضارة للملوحة والجفاف وإجهاد المعادن الثقيلة. والأهم من ذلك، أن العديد من الدراسات أثبتت أن الأسمدة النانوية لا تُوضع مباشرةً على البذور مع التربة، وأن المعالجة قبل الزراعة مفيدة باستخدام الأسمدة النانوية، حيث تكون البذور على اتصال مباشر بالجسيمات النانوية في الوسط المائي، مما يُحفّز إنبات البذور. هنا، تعمل الأسمدة النانوية كمحفز نانوي لتعزيز نشاط إنزيم تحلل النشا، ويعمل كمحفز إجهاد خفيف أو مولد لأنواع الأكسجين التفاعلية، ويخلق مسام نانوية في غلاف البذور. كما أن الأسمدة النانوية تحقق تأثيرًا إيجابيًا في المجتمعات الميكروبية المحيطة بالبذور، وبالتالي تساهم بشكل غير مباشر في إنبات البذور. وبالمقارنة مع الأسمدة التقليدية، فإن الأسمدة النانوية هي وسيلة أكثر فعالية لامتصاص العناصر الغذائية والاستفادة منها. ويرجع ذلك إلى انخفاض كبير في خسائر الترشيح والتطاير. وعلى عكس الأسمدة الكيميائية، تنتشر الأسمدة النانوية بحرية عبر هياكل التربة. ونظرًا لأن خسائر الأسمدة النانوية أقل بكثير، فيمكن تطبيقها بكميات أقل. وهذا على النقيض من الأسمدة الاصطناعية، التي تتطلب كميات أكبر من أجل تعويض خسارتها الكبيرة من خلال الترشيح والانبعاث. وتتجنب الأسمدة النانوية ذات الأغلفة البوليمرية التلامس المبكر مع التربة والمياه. وبالتالي، تصبح الخسارة ضئيلة، وتصبح محتويات العناصر الغذائية في الأسمدة النانوية متاحة عندما تكون النباتات في وضع يسمح لها باستيعاب العناصر الغذائية المنبعثة. كما وجد ان السماد النانوي يزيد من تحمل البذور للإجهادات الحيوية وغير الحيوية من خلال تحفيز العديد من الآليات الجزيئية.

التكنولوجيا الحيوية للبذور النانوية Nano seed biotechnology:

باستخدام الجسيمات النانوية والألياف النانوية والكبسولات النانوية، توفر التكنولوجيا النانوية مجموعة جديدة من الأدوات للتحكم في الجينات ونقلها. عند استغلال المواد النانوية بشكل صحيح، يمكنها أن تعمل كناقلات للعديد من الجينات، فضلا عن مواد كيميائية تُنشّط التعبير الجيني أو تُنظّم انتشار المادة الوراثية في النباتات. يمكن استغلال هذا النقل المُستهدف للجينات إلى البذور للتعبير الجيني المؤقت لجيل واحد فقط في الموقع المعني. يعتقد علماء التكنولوجيا النانوية أنهم قادرون على تطوير الهندسة الوراثية وصولاً إلى المستوى الذري. يمكن للهندسة الذرية أن تُمكّن من إعادة ترتيب الحمض النووي للبذور لإنتاج أنماط نباتية متنوعة، مثل اللون، وموسم النمو، والغلة. في تايلاند طورت جامعة تشيانك ماي صنفًا من الأرز الأبيض من صنف تقليدي بنفسجي الحبيبات، وذلك من خلال عملية طفرة تعتمد على تقنية النانو، حيث تُحفر حفرة نانوية في الأجنة، وتُقذف بأيونات النيتروجين (N^{+2}) التي تُحفز إعادة ترتيب الجينوم، ما يُؤدي إلى تغيير في النمط الظاهري لصنف الأرز. يمكن فصل البذور المعدلة وراثيًا عن البذور التقليدية عن طريق وسم الحدث المتضمن في الكائنات المعدلة وراثيًا بعلامات ترددات نانوية لاسلكية، والتي تُكتشف بدورها بواسطة وحدة معالجة مُعدّلة خصيصًا بواسطة أجهزة استشعار تُنبّه إلى وجود الكائنات المعدلة وراثيًا، وتسمح بإزالتها من دفعات البذور.

تكنولوجيا النانو في تعبئة البذور ومعالجتها
Nanotechnology in seed packaging and handling

فتحت مواد الليغنوسليلوز النانوية Ligno-cellulosic nanomaterials مجالًا جديدًا للمواد والمنتجات الحيوية النانوية الجديدة ذات القيمة المضافة. على سبيل المثال، يمكن استخدام بلورات السليلوز النانوية كتعزيزات خفيفة الوزن في المصفوفة البوليمرية كمركب نانوي، ما يُمكّن من تطوير مواد تغليف خفيفة

الوزن وعالية المتانة واقتصادية للبذور. في المستقبل، قد تكتسب أجهزة الاستشعار الحيوية والغازية أهمية متزايدة، حيث يُمكنها عند دمجها مع مواد التغليف رصد التغيرات في البيئة المحيطة.

تقنية الباركود النانوية Nano barcode technology:

في الوقت الحاضر، تُدمج الجينات الجديدة في البذور وتُوزّع للبيع. الباركودات النانوية (Nicewarner Pena, *et al*., 2001)، وهي متينة، يمكن استخدام علامات قابلة للقراءة آليًا، وقابلة للترميز، وبحجم أقل من الميكرون، لتتبع البذور المباعة. يُستخدم الباركود حاليًا على نطاق واسع في تسويق السلع في الأسواق الوطنية والدولية. يحمل الباركود توقيعات رقمية على شكل شريط أفقي أبيض وأسود، يمكن فك رموز تفاصيل المنتوج عليه باستخدام قارئ رموز إلكتروني. مع التقدم في تكنولوجيا النانو، تُصنع الباركودات النانوية عن طريق الطلاء الكهربائي النانوي للمعدن بالنمط المطلوب، مما يؤدي نفس وظائف الباركود التقليدي في تتبع ومراقبة جودة البذور المتداولة في السوق. في عصر حقوق الملكية، يمكن لقطاع البذور الافادة من نظام الباركود النانوي، حيث تُدمج جينات جديدة في البذور وتُباع في السوق. كما يمكن إرفاق الباركودات النانوية بعبوات البذور لتتبع بذور المربي، والمؤسسة، والبذور المعتمدة، مع جميع المعلومات ذات الصلة، مثل رقم الدفعة، واسم المنتوج، وتفاصيل الصنف، ونسب البذور، وتاريخ اختبار البذور، ونتائجها الكاملة، إلخ.

مستشعرات نانوية لتخزين البذور Nano sensors for seed storage

اثناء تخزين البذور تعرض الى غازات متعددة تُحدد حسب درجة نضجها. يرصد الأنف الإلكتروني (E-nose) مجموعة من الغازات، ويُقدر تركيز الرائحة. يمكن الكشف عن هذه الألدهيدات المتطايرة، ويمكن فصل البذور التي تظهر عليها

علامات التلف وتنشيطها قبل استخدامها. يخطط العلماء الآن لتطوير كيس تخزين بلاستيكي مُبطّن بجسيمات نانوية.

طلاء نانوي بوليمري Nano polymer coating:

تغلَّف البذور بغشاء نانوي بوليمري حساس للرطوبة، يستشعر توافر الماء، ويسمح للبذور بالامتصاص فقط عند توفر الرطوبة بنسبة 45-50% (Korishettar, *et al.* 2016).

مبيدات الجسيمات النانوية Nanoparticle pesticides:

تُطوِّر شركات مونسانتو وسينجينتا وباسف مبيدات حشرية مُغلَّفة بكبسولات نانوية أو مُكوَّنة من جسيمات نانوية. تمتص البذور المبيدات بسهولة أكبر إذا كانت على شكل جسيمات نانوية؛ كما يُمكن برمجتها لتكون "مُطلقة في الوقت المناسب".

الجسيمات النانوية غير العضوية المستخدمة في تكنولوجيا البذور Inorganic Nanoparticles

1. Iron Oxide Nanoparticles
2. Zinc Oxide Nanoparticles
3. Copper Oxide Nanoparticles
4. Manganese Oxide Nanoparticles
5. Cobalt Nanoparticles
6. Carbon Nanoparticles
7. Graphene Oxide Nanoparticle
8. Silicon Nanoparticles
9. Silver Nanoparticles
10. Gold Nanoparticles

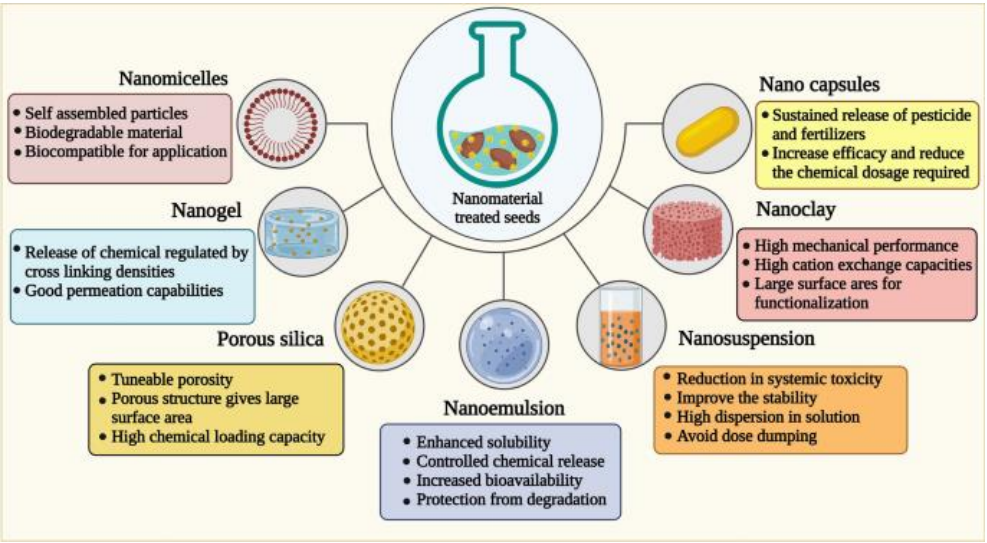
الجسيمات النانوية العضوية المستخدمة في تكنولوجيا البذور Organic Nanoparticles

1. Chitosan Nanoparticles
2. Cellulose Nanofibers
3. Lignin Nanoparticles

تركيبات هياكل نانوية محتملة من الجيل القادم لمعالجة البذور المستقبلية

Possible Next-generation Nanoscale Architectures for Future Seed Treatment Formulations

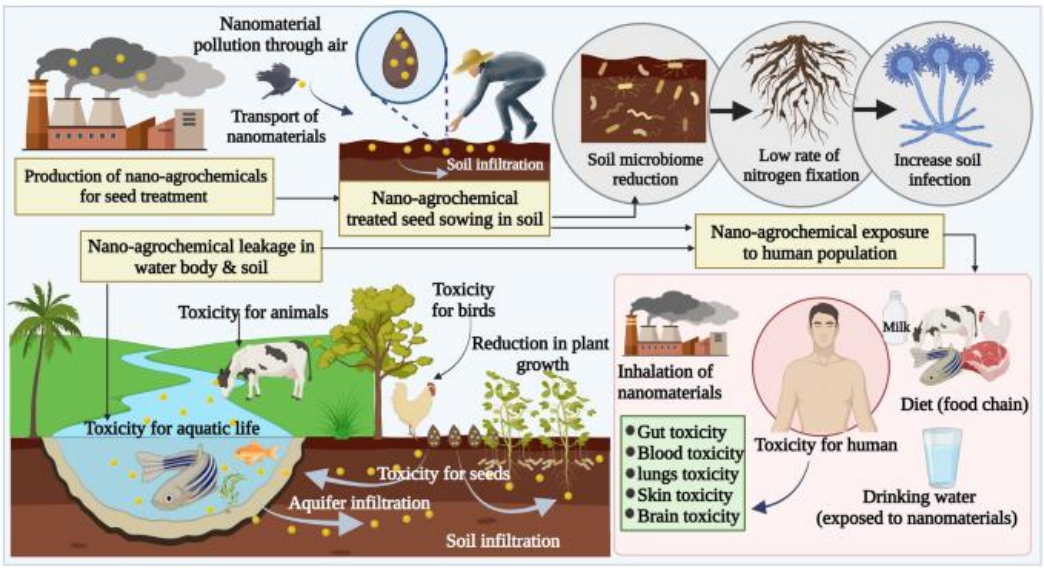
تستطيع أنظمة النانو من الجيل التالي التحكم في الاستقرار والذوبان والتوافر البيولوجي، وتوفير إطلاق مُتحكم فيه للمواد النشطة بيولوجيًا لمعالجة البذور. تُعدّ أنظمة النانو السائلة والصلبة النوعين الرئيسين لتصميم تركيبات نانوية من الجيل التالي. باستخدام هذه الأنظمة، كما هو موضح في (شكل 2)، يُمكن تطوير تركيبات معالجة بذور من الجيل التالي لتحقيق فعالية عالية في معالجة البذور.



شكل 2. المواد الكيميائية الزراعية النانوية من الجيل القادم لتعزيز إنبات البذور (المواد الكيميائية الزراعية النانوية ذات مجموعة واسعة من الأشكال والهياكل مثل النانوميسيلات، والنانوجيلات، ومستحلب السيليكا المسامي النانوي، والمعلق النانوي، والطين النانوي، مما يوفر استقرارًا متحكمًا وقابلية ذوبان وتوافرًا حيويًا وإطلاقًا متحكمًا للمواد الكيميائية الزراعية لتعزيز إنبات البذور).

مجالات دخول المواد النانوية المستخدمة في تكنولوجيا البذور الى البيئة

المخاطر المحتملة المرتبطة بمعالجات البذور القائمة على المواد الكيميائية الزراعية النانوية (المواد النانوية التي تتسرب إلى مياه الصرف الصحي والتربة قد تلوث موارد المياه وتزيد من تلوث التربة. قد تتأثر مجموعة واسعة من ميكروبات التربة وعمليات تثبيت النيتروجين والمعادن وتعزيز نمو النباتات سلبًا بالمواد النانوية. يمكن أن تدخل المادة النانوية جسم الكائن المائي، ويمكن أن تتسرب الى الماشية عن طريق المسطحات المائية وتدخل في السلسلة الغذائية، مما يؤثر في النهاية على صحة الإنسان (شكل 3).

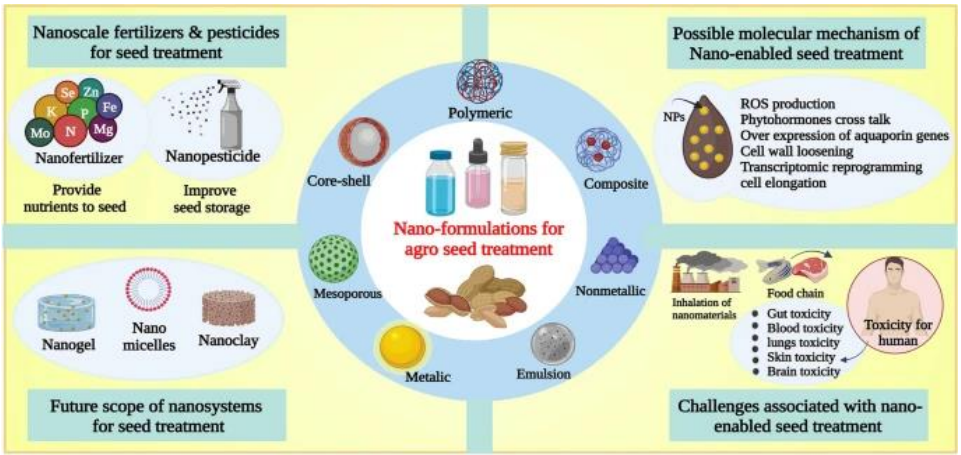


شكل 3. مجالات دخول المواد النانوية الى البيئة وأنظمة التربة من خلال استراتيجيات معالجة البذور

الاستنتاجات Conclusion:

بفضل الخصائص المميزة للجسيمات النانوية، تلعب تقنية النانو دورًا متزايدًا في صناعة البذور. ومن بين التوجهات المحتملة: نثر البذور المُزودة بجسيمات

نانوية مغناطيسية جوًا، وكشف نسبة الرطوبة أثناء التخزين لاتخاذ الإجراءات المناسبة للحد من التلف، واستخدام أجهزة استشعار نانوية تحليلية حيوية لتحديد عمر البذور، وتغليف البذور بأغشية نانوية تستشعر توافر الماء وتسمح لها بالامتصاص فقط عند حلول الوقت المناسب للإنبات، وأجهزة استشعار نانوية قادرة على كشف مسببات الأمراض بمستويات منخفضة تصل إلى أجزاء في المليار. ولا يزال الباحثون يبحثون عن استخدامات جديدة لتقنية النانو في صناعة البذور (شكل 4). وفي الواقع، ستشهد الصناعات الزراعية والبذور تطورات كبيرة في السنوات القادمة.



شكل 4. التقنيات النانوية المستخدمة في تكنولوجيا البذور . عن Shelar, et al 2023

المصادر

Korishettar, P., Vasudevan, S. N., Shakuntala, N. M., Doddagoudar, S. R., Hiregoudar, S. and Kisan, B. 2016, Seed polymer coating with Zn and Fe nanoparticles: An innovative seed quality enhancement technique in pigeonpea. J. Appl. Nat. Sci., 8(1): 445-450.

Nicewarner-Pena, S. R., Freeman, R. G., Reiss, B. D., He, L., Peña, D. J., Walton, I. D., Cromer, R., Keating, C. D. and Natan, M. J.

2001, Submicrometer metallic barcodes. Science, 294(5540): 137-141.

Singh, R., Jakhwal, R., Tomar, S., Tomar, H. and Kumar, R. 2022. Nanotechnology in Seed Sector. Agriculture Magazin, V 2 (1): 127 – 130.

Shelar, A., Nile, S., Singh, A., Rothenstein, D., Bill, J., Xiao, J., Chaskar, M., Kai, G. and Patil, R. 2023. Recent Advances in Nano-Enabled Seed Treatment Strategies for Sustainable Agriculture: Challenges, Risk Assessment, and Future Perspectives. Springer nature link, V5 (54): 1- 37.

Nongbet, A., Mishra, A.K., Mohanta, Y.K. Mahanta, S. and Ray, M.K. 2022. Nanofertilizers: a smart and sustainable attribute to modern agriculture. Plants 11(19), 2587 (2022). https://doi.org/10.3390/plants11192587

الفصل الثالث

تطبيقات تقنية النانو في صناعة الغذاء

مقدمة

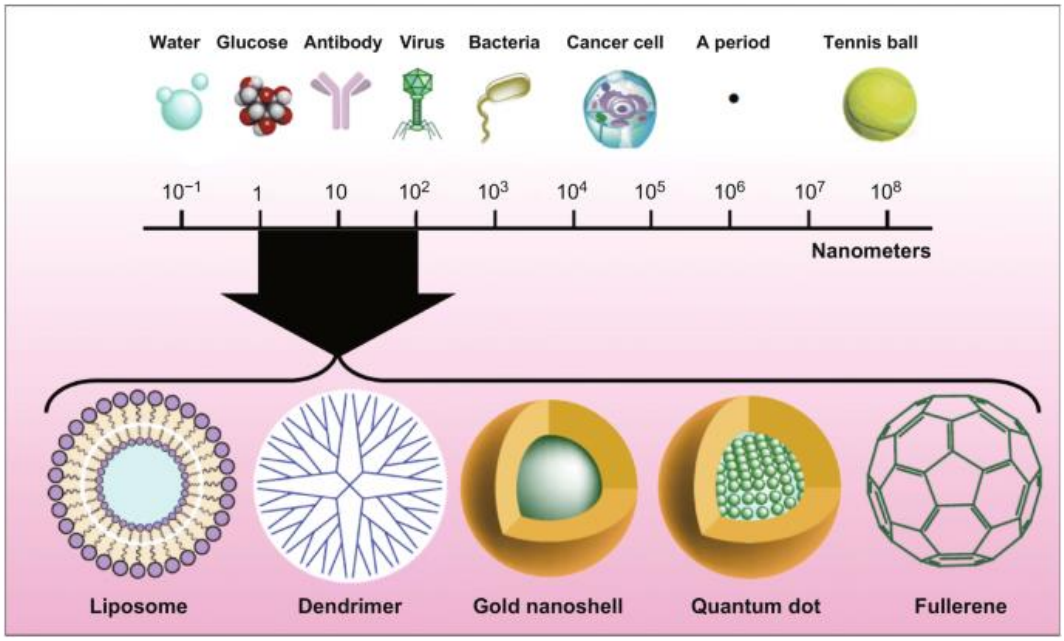
ان فوائد تكنولوجيا النانو لصناعة المواد الغذائية كثيرة ومن المتوقع أن تنمو مع مرور الوقت. تؤثر هذه التكنولوجيا الجديدة والسريعة التطور في كل جانب من جوانب النظام الغذائي بدءًا من الزراعة وحتى إنتاج الغذاء وحتى المعالجة والتعبئة والنقل ومدة الصلاحية والتوافر الحيوي للعناصر الغذائية. سوف تستمر التطبيقات التجارية للمواد النانوية في التأثير على صناعة الأغذية بسبب خصائصها الفريدة والجديدة. ونتيجة لذلك، فإن تعرض الإنسان للمواد النانوية يتزايد وسيستمر في الزيادة مع مرور الوقت. ولذلك فإن التأثير الصحي للمواد النانوية في الغذاء هو موضع اهتمام واهتمام عام. إن القبول العام للأغذية والمنتجات ذات الصلة بالأغذية التي تحتوي على مواد متناهية الصغر سوف يعتمد على سلامتها. وبالتالي، من الضروري وجود إطار تنظيمي دولي موحد لتكنولوجيا النانو في الأغذية.

على الرغم من أن تقنية الجسيمات النانوية تُطبق على نطاق واسع في الزراعة والكيمياء الحيوية والطب والعديد من القطاعات الأخرى، إلا أنها مجال يتطور ويتوافق مع تطبيقات جديدة وأكثر تعقيدًا في أنظمة الأغذية مقارنة بالتقنيات الأخرى (شكل 1). إنها تقدم استراتيجية قابلة للتطبيق لدمج التكنولوجيا المتطورة في مجموعة واسعة من العمليات المتعلقة بتكنولوجيا الغذاء مثل الانتاج وتطوير وتصنيع وتعبئة وتخزين وتوزيع الأغذية (شكل 1). تعد الجسيمات النانوية أكثر التقنيات تطورًا في علم الأغذية القائم على النانو، حيث تتعامل مع مجموعة واسعة من المواد النانوية وطرائقها المستخدمة، بما في ذلك الأغذية النانوية والأنابيب النانوية والمركبات النانوية والتغليف النانوي والكبسولات النانوية والمستشعرات النانوية والليبوزومات والمستحلبات النانوية والجسيمات النانوية البوليمرية والتغليف النانوي ، وبهذا المجال طورت العديد من الطرائق لزيادة قابلية ذوبان الأغذية ومدة صلاحيتها وتوافر

المواد الكيميائية النشطة بيولوجيًا وحماية مكونات الأغذية والمكملات الغذائية والتحصين وتوصيل الأغذية أو المكونات الاخرى. بالإضافة إلى ذلك، تعمل قسم منها كعامل مضاد للبكتيريا عن طريق توليد أنواع الأوكسجين التفاعلية (ROS) التي تسبب تلف الحمض النووي للبكتيريا وتشويه البروتين وتلف الخلايا (شكل 2). على الرغم من التقدم الذي يشهده استخدام تكنولوجيا النانو في تطبيقات الأغذية، إلا أن هناك بعض التأثيرات السلبية أو الخطيرة على الصحة فيما يتعلق بالسمية ومخاطر تناول الجسيمات النانوية في الأغذية.

في الأغذية، تستخدم جسيمات النانو كمواد مضافة مثل المواد الحافظة، وعوامل النكهة، وأجهزة الاستشعار المضادة للميكروبات وما إلى ذلك ومواد التعبئة والتغليف. توفر تكنولوجيا النانو مجموعة واسعة من الفرص لتطوير منتجات وتطبيقات جديدة في النظام الغذائي. ومن الأمثلة الحديثة جدًا على ذلك الأطعمة الوظيفية، والمغذيات، والمواد النشطة بيولوجيًا، والأغذية الصيدلانية، وما إلى ذلك. وتستخدم جزيئات النانو من ثاني أكسيد التيتانيوم، والفضة، والزنك، وأكسيد الزنك، وثاني أكسيد السيليكون، والبلاتين، والذهب على نطاق واسع في صناعة الأغذية بأشكال مختلفة Alfadul (& Elneshwy, 2010) في معالجة الأغذية البشرية، تم استخدام كبسولات النانو كمكونات وإضافات ومكملات غذائية وأغذية غير وظيفية بحجم النانو. تم التوصل الى أن التغليف النانوي للمكونات الغذائية والمواد المضافة قد تم تنفيذه لتوفير حواجز وقائية، وإخفاء النكهة والطعم، وتحسين إمكانية الاستغناء عن المواد غير القابلة للذوبان في الماء. كما تهدف أيضًا إلى تحسين المذاق وتقليل كمية الملح والسكر والدهون والمواد الحافظة، ومعالجة الأمراض المرتبطة بالغذاء (مثل السمنة والسكري)، وتطوير التغذية المستهدفة لمختلف أنماط الحياة والسكان المسنين، والحفاظ على استدامة إنتاج الأغذية وتصنيعها وسلامة الأغذية (Chaudhry, *et al.* 2008). الجسيمات النانوية وكبسولات النانو التي تحتوي على العديد من الأطعمة

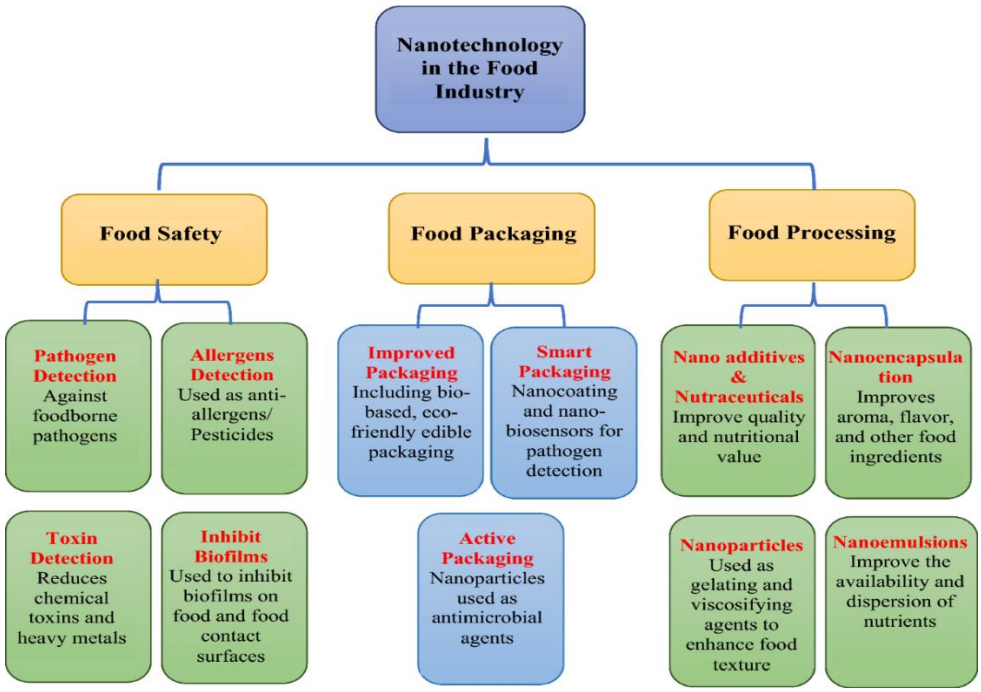
متاحة حاليًا للشراء، على الرغم من عدم مطالبتها بالإشارة إلى وجود هذه المواد النانوية على عبواتها (Paul & Dewangan, 2016).



شكل 1. الجسيمات النانوية ذات الأحجام المختلفة المستخدمة في تقنيات النانو لعلوم الأغذية.

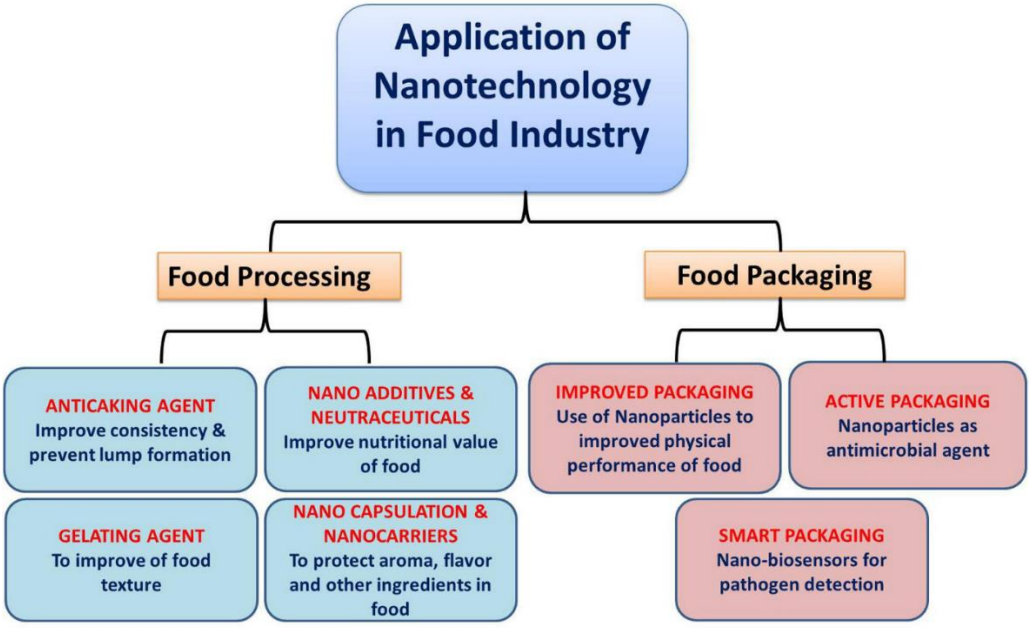
اسهمت تقنية النانو في تقديم بدائل لمعالجة الأغذية من حيث تحسين الصفات الفيزيائية والكيميائية والمحافظة على العناصر الغذائية والتوافر البيولوجي. تتماز الجسيمات النانوية بخصائص ذات حجم استثنائي، بما في ذلك مساحة سطح أكبر، وتفاعلية عالية، وحجم جسيم صغير، وقوة عالية، وتأثيرات كمية، وقابلية للسحب، ولهذا السبب يتم استعمالها في مجموعة واسعة من الصناعات. إن تحديث صناعات الأغذية والزراعة متطابق تقريبًا مع تحديث صناعة وانتاج الأدوية والمستحضرات الصيدلانية، وذلك بسبب سماتها المميزة التي تختلف عن موادها السائبة، مثل الخصائص الفيزيائية والكيميائية والاحيائية، فإن الابتكارات في تصنيع وتصنيف وتطبيقات وتقييمات المواد النانوية قد سهلت الابتكار العلمي لتطوير وتعديل قطاع الأغذية الزراعية بأكمله. في السنوات الأخيرة أدى تطبيق تقنية النانو في أنظمة الأغذية إلى مجموعة كبيرة ومتنوعة من المنتجات الجديدة ذات صفات جودة للغذاء الأفضل مثل الملمس والطعم

والخصائص الحسية والاستقرار وما إلى ذلك. لقد تم تسليط الضوء على تقنية النانو كاستخدام ممكن في كل مجالات قطاع الأغذية من قبل العلماء ومجموعات الصناعة بما في ذلك من الزراعة إلى معالجة الأغذية والسلامة والتعبئة والتغليف وتوصيل العناصر الغذائية لقد اجريت العديد من الأبحاث للتحقيق في جدوى استخدام الجسيمات النانوية في ضمان جودة الأغذية وتطوير مستلزمات تغليفها وسلامة الأغذية والمنتوجات الغذائية ذات الالية والتغذية المتغيرة. فضلا عن ذلك، تتضمن تقنية النانو الكشف عن الأمراض المرتبطة بالأغذية وتصميم أنظمة غذائية مناسبة لمجموعة واسعة من التركيبة السكانية المستهدفة وكبار السن والظروف المختلفة فضلا عن ضمان انتاج مستدام للغذاء من خلال التغليف بالجسيمات النانوية. إلى جانب ذلك، يمكن ان تستخدم تقنية النانو للعلاج بالتغذية النانوية من بناء أنظمة ذكية/ذكية لتوصيل العناصر الغذائية بشكل منظم مع تطوير منتجات جديدة من خلال تحصين الأغذية.



شكل 2. تطبيقات تكنولوجيا النانو في جوانب مختلفة من الصناعات الغذائية

لقد أسهمت تقنية الجسيمات النانوية في تطوير المكونات الغذائية ذات البنية النانوية مع الادعاءات بأنها توفر طعمًا وملمسًا واتساقًا محسّنًا. تعمل تقنية النانو على زيادة العمر الافتراضي لأنواع مختلفة من المواد الغذائية وتساعد أيضًا في تقليل حجم الفاقد من الطعام بسبب الإصابة الميكروبية. يتم استخدام ناقلات النانو في الوقت الحاضر كنظم توصيل لنقل المضافات الغذائية في المنتجات الغذائية دون الإخلال بمورفولوجيتها الأساسية. قد يؤثر حجم الجسيمات بشكل مباشر في توصيل أي مركب نشط بيولوجيًا إلى مواقع مختلفة داخل الجسم حيث لوحظ أنه في بعض خطوط الخلايا، يمكن فقط امتصاص الجسيمات النانوية دون الميكرون بكفاءة ولكن ليس الجسيمات الدقيقة ذات الحجم الأكبر (Ezhilarasi *et al*. 2013) . من المفترض أن يحتوي النظام الغذائي المثالي على الخصائص التالية: (1) قادر على توصيل المركب النشط بدقة في المكان المستهدف (2) ضمان التوافر في وقت مستهدف ومعدل محدد، و (3) فعال للحفاظ على المركبات النشطة عند مستويات مناسبة لفترات طويلة (في حالة التخزين). تقدم تقنية النانو التي يتم تطبيقها في تشكيل التغليف، والمستحلبات، ومصفوفات البوليمر الحيوي، والحلول البسيطة، والغرويات الرابطة أنظمة توصيل فعالة مع جميع الصفات المذكورة أعلاه (شكل 3). تحاول البوليمرات النانوية استبدال المواد التقليدية في تغليف المواد الغذائية. يمكن استخدام مستشعرات النانو لإثبات وجود الملوثات والسموم الفطرية والكائنات الحية الدقيقة في الطعام (Bratovčić, 2015).



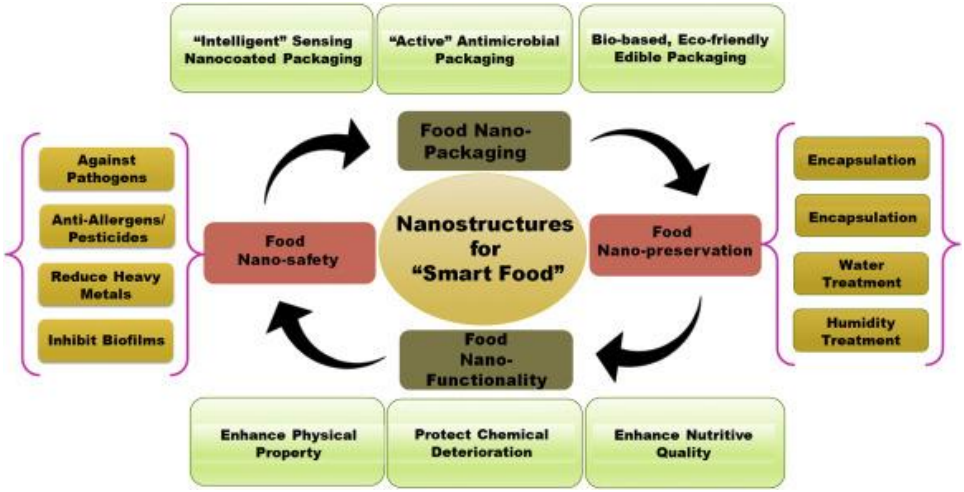
شكل 3. تطبيقات تقنية الجسيمات النانوية في صناعة الأغذية. عن Singh, *et al*. 2017

ساهمت تقنية النانو في تطوير مواد التعبئة والتغليف المبتكرة التي يمكنها تحسين سلامة المنتوجات ومدة صلاحيتها من خلال توفير مواد عازلة أو الكشف عن مسببات الأمراض المنقولة بالغذاء. على سبيل المثال، يتم استخدام السيليكا غير المتبلورة الاصطناعية (SAS) لطلاء سطح مواد التعبئة والتغليف، للتطهير في المشروبات، وفي الغالب كعامل حر للتدفق ومضاد للتكتل في العديد من المواد الغذائية المجففة (E551) (Aschberger, et al. 2015) . جهزت بعض عبوات المواد الغذائية بأجهزة استشعار نانوية مصممة لتتبع الظروف الداخلية أو الخارجية للمنتوجات الغذائية والكريات والحاويات في جميع أنحاء سلسلة التصدير والاستيراد. يمكن لمثل هذه العبوات مراقبة درجة الحرارة أو الرطوبة بمرور الوقت ومن ثم توفير المعلومات ذات الصلة بهذه الظروف (Prasanna&Shanmuganathan, 2011). كما تُستخدم تقنية النانو لزيادة التوافر الحيوي للعديد من الفيتامينات بالإضافة إلى مشتقاتها. يمكن إذابة الفيتامينات والمشتقات غير القابلة للذوبان في الماء عن طريق

تركيب الجسيمات النانوية (Prakash, *et al*. 2013). إن الخصائص الفريدة لهذه الهياكل النانوية والمواد النانوية بما في ذلك الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية تختلف اختلافًا كبيرًا عن نظيراتها السائبة مما يغير فهم الظواهر البيولوجية والفيزيائية في النظم الغذائية. حددت العديد من التقارير والبحوث الحديثة التطبيقات المحتملة لتكنولوجيا النانو في قطاع الأغذية لتحسين سلامة الأغذية، وتعزيز التعبئة والتغليف، ما يؤدي إلى تحسين المعالجة والتغذية (Pathakoti, *et al*. 2017).

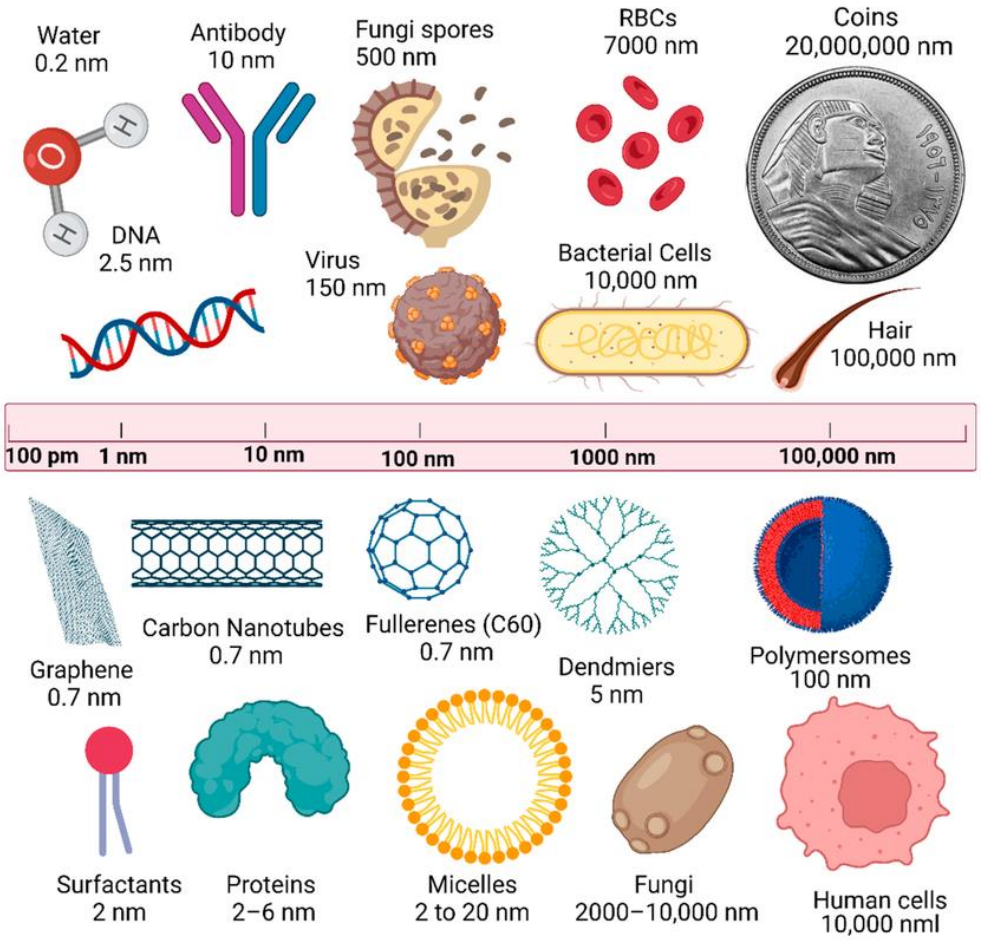
تطبيقات تقنية الجسيمات النانوية في معالجة الغذاء Nanotechnology in food processing

تجهيز الأغذية هي ممارسة للحفاظ على المواد الغذائية من خلال طرائق وتقنيات مختلفة لتحويل الغذاء إلى الحالة الاستهلاكية وهذه التقنيات مصممة على هذا النحو بطريقة تحافظ على نكهة وجودة الطعام سليمة ولكنها أيضًا محمية من الكائنات الحية الدقيقة يتطلب السوق هذه التقنيات، والتي تعتبر ضرورية للحفاظ عليها لغرض الريادة في السوق في صناعة تجهيز الأغذية وإنتاج أطعمة طازجة أصيلة ومريحة ولذيذة لهذه المنتجات وان تكنولوجيا النانو هي الحل لها. تستخدم طرائق معالجة الأغذية، مثل دمج المغذيات، وإغناء المعادن والفيتامينات، وعوامل الجل واللزوجة، وتوصيل المغذيات، وكبسلة النكهات النانوية، مواد نانوية في محتوياتها (Pradhan, *et al*. 2015) (شكل 4). تتم إضافة الجسيمات النانوية إلى العديد من الأطعمة لتحسين خصائص التدفق واللون والثبات أثناء المعالجة، أو لزيادة مدة الصلاحية. على سبيل المثال، تُستخدم مواد سيليكات الألومنيوم بشكل شائع كعوامل مضادة للتكتل في الأطعمة المصنعة الحبيبية أو المسحوقة، في حين أن ثاني أكسيد التيتانيوم Anatase titanium dioxide هو مبيض شائع للأطعمة ومضافات أكثر إشراقًا، وتستخدم في الحلويات وبعض أنواع الجبن والصلصات(Alfadul and Elneshwy, 2010) .



شكل 4. التطبيقات المنهجية للجسيمات النانوية في مختلف مجالات صناعة الأغذية.

يستند تطوير المكونات الغذائية ذات البنية النانوية على انها تقدم طعمًا وملمسًا واتساقًا محسّنًا. تعمل تقنية النانو على زيادة العمر الافتراضي لأنواع مختلفة من المواد الغذائية وتساعد أيضًا في استيرادها وتقليل مدى هدر الطعام بسبب الإصابة الميكروبية. في الوقت الحاضر يتم استخدام الناقلات النانوية كأنظمة توصيل لحمل المضافات الغذائية في المنتجات الغذائية دون الإخلال بمورفولوجيتها الأساسية. أن حجم الجسيمات قد تؤثر بشكل مباشر على توصيل أي مركب نشط بيولوجيًا إلى مختلف المواقع داخل الجسم حيث لوحظ وجوده في بعض خطوط الخلايا كما يمكن فقط امتصاص الجسيمات النانوية دون الميكرونية بكفاءة وليس الجسيمات الدقيقة ذات الحجم الأكبر (شكل 5). ويجب ان يتصف الجسيم النانوي بالخصائص التالية :القدرة على إيصال المركب النشط بدقة إلى الهدف او المكان المطلوب، ضمان توافره في الوقت المناسب وبسعر محدد وكفائته في الحفاظ على المركبات النشطة عند مستويات مناسبة لفترات طويلة من الزمن (في حالة التخزين).



شكل 5. مخطط يوضح مقياس حجم الكائنات مقارنة بنظام الحجم النانوي

تكنولوجيا النانو يتم تطبيقها في: تشكيل التغليف والمستحلبات، مصفوفات البوليمر الحيوي، المحاليل البسيطة، والمواد الغروية المترابطة تقدم أنظمة توصيل فعالة مع كل ما سبق ذكره من الصفات. هناك محاولات لجعل البوليمرات النانوية أن تحل محل التقليدية ضمن المواد المستخدمة في تغليف المواد الغذائية. كما يمكن استخدام أجهزة الاستشعار النانوية لإثبات ذلك في وجود الملوثات والسموم الفطرية والكائنات الحية الدقيقة في الغذاء (Ezhilarasi *et al*., 2013; Bratovci, 2015). ان التحلل الكيميائي أو البيولوجي أثناء المعالجة واثناء التخزين والاستخدام، وكذلك إظهار التوافق مع مركبات أخرى في انظمة معالجة الغذاء تبين قابلية هذه التقنية على

الاختراق بعمق في الأنسجة بسبب صغر حجمها وبالتالي تسمح بكفاءة توصيل المركبات النشطة إلى المواقع المستهدفة في الجسم. لقد طورت أنظمة جسيمات نانوية تغليفيه مختلفة تعتمد على البوليمر الاصطناعي والطبيعي لتحسين الصفات البيولوجية والحفاظ على المكونات الغذائية النشطة. علاوة على اهمية ذلك، يمكن تقييم استخدام تكنولوجيا النانو في تصنيع الأغذية نظرا لدورها في تحسين المنتجات الغذائية في صفات :نسجه الطعام، مظهر الطعام، مذاق الطعام القيمة الغذائية للطعام ومدة صلاحية الطعام. ولو ان حقيقة تكنولوجيا النانو لا تمس كل الجوانب المذكورة أعلاه ولكنها أحدثت أيضًا أهمية كبيرة في تغييرات صفات المنتجات الغذائية مما يمنحها صفات جديدة.

تقنية الجسيمات النانوية في قوام وطعم ومظهر الطعام Texture, Taste, and Appearance of Food

بدأت صناعة المواد الغذائية في استخدام تكنولوجيا النانو لتطوير المكونات النانوية لتحسين اللون والملمس والنكهة الغذائية. وتستخدم الجسيمات النانوية TiO_2 وSiO_2 والسيليكا غير المتبلورة كمضافات غذائية. يستخدم TiO_2 كملون في طلاء السكر البودرة على الكعك. توفر تقنية النانو مجموعة من الخيارات لتحسين جودة الطعام ويساعد أيضًا في تحسين مذاق الطعام. تم استخدام تقنيات التغليف النانوية على نطاق واسع لتحسين صفات النكهة والاحتفاظ بها وجودة توازن الطهي واستعمل التغليف النانوي شديد التفاعل وغير المستقر لصبغة الأنثوسيانين النباتية التي لها خصائص بيولوجية وانشطة مختلفة. من خلال تغليف السيانيد-3-كلوكوساید -Cyanidin-3-O-Glucoside (C3G) بجزيئات داخل التجويف الداخلي لفول الصويا على تحسين الثبات الحراري والثبات الضوئي. هذا التصميم والتصنيع متعدد الوظائف لناقلات نانوية لحماية الجزيئات النشطة بيولوجيا وتسليمها وهذا يعد امرا جوهريا هو فلافونويد غذائي شائع ذو أهمية كبيرة في مجال الأنشطة الدوائية ولكنه يسبب ضعف الذوبان، ولكن هذا التطبيق في صناعة المواد الغذائية محدود. يعد استخدام

المستحلبات النانوية لتوصيل المركبات النشطة بيولوجيًا القابلة للذوبان في الدهون أمرًا شائعًا للغاية (Yang, *et al.* 2015) والتي يمكن إنتاجها باستخدام مكونات غذائية طبيعية بطرائق سهلة.

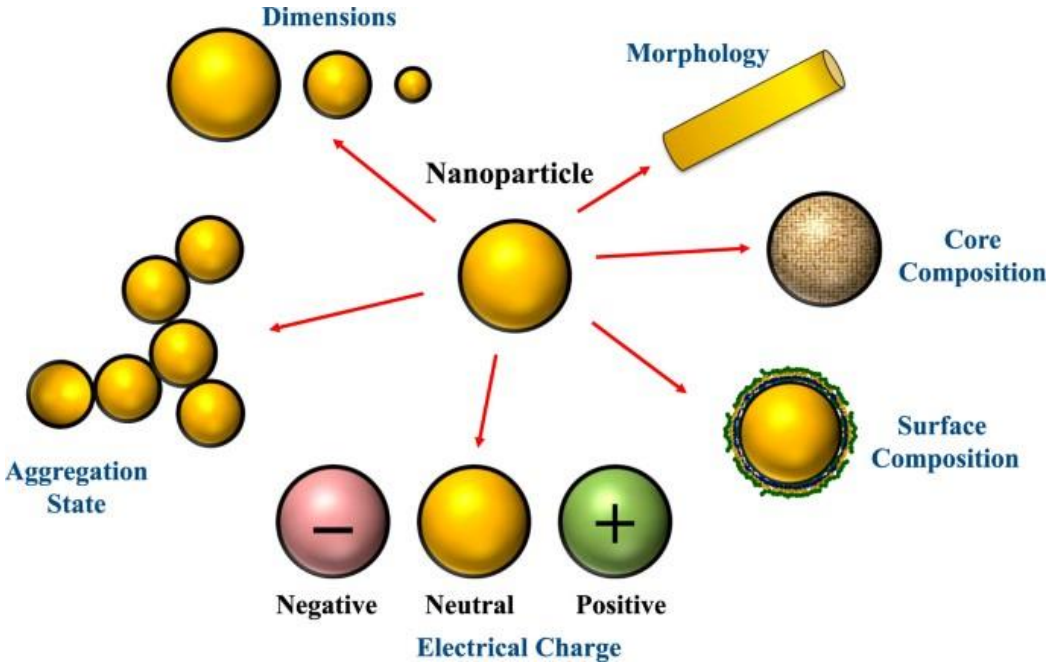
المستحلبات النانوية Nanoemulsions

يعد إنتاج المستحلبات النانوية لتوصيل المركبات الوظيفية أحد المجالات الناشئة في تكنولوجيا النانو المطبقة على صناعة الأغذية. تتكون المستحلبات النانوية من قطرات زيت بأحجام نانوية يتراوح حجمها بين 10 و100 نانومتر منتشرة داخل طور مائي مستمر، مع كل قطرة زيت محاطة بجزيئات خافضة للتوتر السطحي. يمكن للمستحلبات النانوية حماية مركبات النكهة من ظروف التصنيع وطوال فترة صلاحية المشروبات. تعمل شركة NutraLease، وهي شركة تكنولوجيا ناشئة أنشأها فريق علمي، على تحسين التوافر البيولوجي للمركبات الوظيفية. يُزعم أن مستحلبات النانو يمكنها التقاط النكهة وحمايتها من درجات الحرارة والأكسدة والتفاعلات الأنزيمية والتحلل المائي، كما أنها مستقرة ديناميكيًا حراريًا عند نطاق واسع من قيم الأس الهيدروجيني. ومن هذا تم انتاج أيس كريم أكثر صحة دون المساس بالطعم من خلال التطبيق. الهدف هو إنتاج آيس كريم بمحتوى دهون أقل، مما يؤدي إلى خفض نسبة الدهون من 16% فعليًا إلى 1%. وهذا يساهم في ذوبان الأطعمة المجمدة بشكل موحد في الميكروويف [Silva, *et al.* 2012]

الجسيمات النانوية والقيمة الغذائية Nutritional Value

غالبية المركبات النشطة بيولوجيا مثل الدهون والبروتينات، الكربوهيدرات، والفيتامينات تكون حساسة للحموضة العالية في بيئة المعدة والاثنى عشري ونشاطهما الانزيمي. إن تغليف هذه المركبات النشطة بيولوجيًا لا يتيح فقط لها مقاومة مثل هذه الظروف المعاكسة ولكن يسمح لهم أيضا لاستيعاب المنتوجات الغذائية بسهولة، وهو أمر صعب للغاية يمكن تحقيقه ان كان بشكل غير مغلف بالجسيمات النانوية بسبب

انخفاض ذوبانه في الماء. تعد الجسيمات النانوية الصغيرة الصالحة للأكل ككبسولات بهدف تحسين توصيل الأدوية والفيتامينات الى أماكن فعلها المستهدفة أو يتم إنشاء المغذيات الدقيقة الهشة في الأطعمة اليومية لتوفير فوائد صحية كبيرة. أن مركب النانو، مستحلب النانو، والبنية النانوية هي التقنيات المختلفة التي يتم استخدامها في تطبيقات تغليف المواد في أشكال مصغرة لتوصيل العناصر الغذائية بشكل أكثر فعالية مثل البروتين ومضادات الأكسدة للحصول على فوائد غذائية وصحية مستهدفة بدقة عالية. وقد استخدمت بوليميرات الجسيمات النانوية لتكون مناسبة لتغليف المركبات النشطة بيولوجيا (مثل الفلافونويد والفيتامينات) وذلك بهدف حمايتها ونقلها الى أماكن وظائفها المستهدفة ونقل المركبات النشطة بيولوجيا إلى الوظائف المستهدفة (Langer and Peppas, 2003)(شكل 6)



شكل 6. الجسيمات النانوية ذات الأحجام المختلفة المستخدمة في تقنيات النانو لعلوم الأغذية.

الجسيمات النانوية وحفظ الغذاء او مدة صلاحيته Preservation or Shelf-Life

في الأطعمة الوظيفية غالبا ما يحصل للعنصر النشط بيولوجيا تدهور وفي النهاية يتعطل فعله البيولوجي بسبب البيئة التي يتواجد فيها، لذلك تكمن أهمية عملية التغليف النانوي لهذه المكونات النشطة بيولوجيا والتي من شائنها إطالة العمر الافتراضي للمنتوجات الغذائية عن طريق إبطاء عملية التمثيل الغذائي وعمليات التدهور أو منع التدهور حتى للمنتج نفسه لحين وصولها الى المستهلك، فضلا عن ذلك، فإن الطلاء النانوي الصالح للأكل على المواد الغذائية المختلفة يمكن أن توفر حاجزا أمام الرطوبة وتبادل الغازات والمحافظة على الألوان والنكهات ومضادات الأكسدة والإنزيمات، والعوامل المضادة للتسمير (الاسوداد) ويمكن أن تزيد أيضًا من مدة صلاحية الأطعمة المصنعة، حتى بعد فتح العبوة. ان لتغليف المنتوجات الغذائية بالجسيمات النانوية يعد وظيفية غالبًا ما تتيح للمكونات التباطؤ في عمليات التحلل الكيميائي عن طريق هندسة خصائص الطبقة البينية المحيطة بها. على سبيل المثال، الكركمين العنصر النشط بيولوجيًا الأكثر نشاطًا والأقل استقرارًا في الكركم (كركم لونغا) أظهر انخفاض نشاط مضادات الأكسدة ووجد أنها تكون مستقرة للبسترة عند أي قوى ايونية في التغليف .(Sari, *et al*. 2015).

الكبسلة (التغليف) النانوية Nanoencapsulation

توفر الكبسلة النانوية العديد من الفوائد مثل تعزيز الاستقرار، وسهولة التعامل، والاحتفاظ بالمكونات المتطايرة، والحماية ضد الأكسدة، ودرجة الحموضة والرطوبة التي يتم إطلاقها بشكل متحكم فيه، وصنع المذاق، والتوصيل المتتالي للمكونات النشطة المتعددة، والتغيير في طابع النكهة، والإدراك الحسي طويل الأمد وتعزيز التوافر البيولوجي والفعالية. يتم تحضير الكبسولات النانوية بشكل أساسي بست طرائق تسمى الترسيب النانوي، ونشر المستحلب، والاستحلاب المزدوج، وتكثف المستحلب، وطلاء البوليمر وطبقة تلو الأخرى. تُستخدم الكبسولات النانوية لتوصيل المكملات الصحية المحبة للدهون مثل الفيتامينات والمعادن الموجودة في الطعام، والأحماض الدهنية

وهرمونات النمو، مما يزيد من محتوى العناصر الغذائية في الطعام (Dreher, 2004). أنظمة توصيل "Nano Drop" الحاصلة على براءة اختراع هي في شكل مواد مغلفة، مثل الفيتامينات. يتم إعطاؤه عبر الغشاء المخاطي، وليس من خلال أنظمة التوصيل التقليدية مثل الحبوب أو السوائل أو الكبسولات. التي تحتوي على بوليمر حيوي طبيعي a Natural biopolymer من جدران خلايا الخميرة والذي يهدف إلى ربط السموم الفطرية Mycotoxins لحماية الحيوانات من التسمم الفطري Mycotoxicosis هو مثال على المضافات الغذائية. كما تم اقتراح الاستعمال المحتمل لمادة نانوية مضافة مرتبطة بالأفلاتوكسين aflatoxin-binding nano- additive في علف الحيوانات، وهي مشتقة من طين النانو Nano clay المعدل. قام العلماء بتطوير NP يلتصق ببكتيريا *E. coli*، ويتكون من قاعدة من البوليسترين a polystyrene base ، ورابط من البولي إيثيلين جلايكول polyethylene glycol وجزيء حيوي يستهدف mannose-targeting biomolecule. تم تصميم هذه العناصر غير القابلة للتحلل ليتم إعطاؤها من خلال العلف لإزالة مسببات الأمراض التي تنتقل عن طريق الأغذية في الجهاز الهضمي للماشية. الجسيمات النانوية من السيليكا ليس لها قيمة غذائية. في التطبيقات الغذائية، يتم استخدامه بشكل رئيسي كمادة مضافة تقنية عن طريق التغليف لتجهيز الأغذية. تُستخدم السيليكا بشكل خاص كعوامل متدفقة بحرية (مثل مسحوق الطماطم وملح الطعام والتوابل). كما يستخدم أيضًا كمساعدات في المدخلات والتشتت في إضافات الفيتامينات، على سبيل المثال. في الأطعمة ذات النوع المسحوق، تمنع السيليكا الاصطناعية غير المتبلورة من التكتل وتحافظ على خصائصها. بعض تقنيات التغليف النانوية الرئيسية المستخدمة في تصنيع الأغذية:

1. إدخال تقنيات تغليف جديدة تعتمد على الجيل البارد لتوصيل المواد الحيوية الحساسة للحرارة بما في ذلك البروبيوتيك probiotics

2. تسخير مذيل الكازين Casein micelle ، وهو ناقلة نانوية طبيعية من العناصر الغذائية، لتوصيل المواد النشطة الحيوية الكارهة للماء.

3. تطوير واستخدام اتحادات بروتينات الحليب والسكريات القائمة على تفاعل ميلارد Maillard reaction based conjugates of milk proteins and polysaccharides
لتغليف المواد النشطة بيولوجيًا

4. اكتشاف أنابيب نانوية فريدة تعتمد على التحلل المائي الأنزيمي للألفا لاكتالبومين Enzymatic

hydrolysis of α-lactalbumin

5. إدخال مركبات بيتا لاكتوغلوبولين-بكتين النانوية β-lactoglobulin–pectin

nanocomplexes لتوصيل المغذيات الكارهة للماء في المشروبات الحمضية الصافية.

6. جسيمات نانوية من الألبومين المصلي البقري المغطى بالأحماض الدهنية للتوصيل المعوي، وتقارنات ميلارد من الكازين Maillard conjugates of casein والنشا المقاوم لاستهداف القولون.

7. تطوير جسيمات نانوية ذات قشرة أساسية مصنوعة من لاكتوغلوبولين مجمّع حراريًا core-shell nanoparticles ، ومغطاة بطبقة نانوية من البكتين البنجر lactoglobulin, nanocoated ، لتوصيلها بشكل نشط بيولوجيًا .

تقنية الجسيمات النانوية وتغليف الأغذية Nanotechnology in food packaging

يجب أن تحتوي مادة التغليف النانوية المرغوبة على غاز ورطوبة ونفاذية جنبا إلى جنب مع القوة والتحلل البيولوجي. الغذاء "الذكي" و"النشط" المعتمد على تقنية النانو يجب ان تمنح العبوات العديد من المزايا مقارنة بالعبوات التقليدية في طرائق التعبئة والتغليف من توفير تغليف أفضل من مواد ذات قوة ميكانيكية محسنة وحاجز الخصائص والأغشية المضادة للميكروبات وللاستشعار النانوي لمسببات الأمراض وكشف وتنبيه المستهلكين لحالة سلامة الأغذية. ان تطبيق المركبات النانوية كمادة فعالة في التغليف وطلاء المواد لتحسين الطعام وتحسين تعبئته وتغليفه. أهتم العديد من الباحثين في دراسة الخصائص المضادة للميكروبات للمركبات العضوية مثل الزيوت العطرية، والأحماض العضوية، والبكتيريا واستخدامها في المصفوفات البوليمرية كتغليف مضاد للميكروبات. ومع ذلك، فإن هذه المركبات لا تتناسب مع العديد من خطوات تجهيز الأغذية التي تتطلب مستويات عالية من درجات الحرارة والضغوط لأنها حساسة للغاية لهذه الظروف المادية. باستخدام الجسيمات النانوية غير العضوية القوية يمكن تحقيق النشاط المضاد للبكتيريا بتركيزات منخفضة ومزيد من الاستقرار في الظروف القاسية. وفي السنوات الأخيرة كان هناك اهتمام كبير من قبل الباحثين باستخدام هذه الجسيمات النانوية في تغليف المواد الغذائية المضادة للميكروبات عن طريق استعمال عبوات مضادة للميكروبات .

أن العديد من الجسيمات النانوية مثل الفضة والنحاس والكيتوسان والمعادن صنعت منها جسيمات أوكسيد النانو مثل أوكسيد التيتانيوم أو أوكسيد الزنك يُقال أن لها خاصية مضادة للبكتيريا. لا يقتصر تطبيق الجسيمات النانوية على تغليف المواد الغذائية المضادة للميكروبات ولكن من الممكن ان تستخدم في تغليف المواد الغذائية لتوفير حاجز من الاجهادات الحرارية والميكانيكية الشديدة التي تخفض من إطالة العمر الافتراضي للطعام. وبهذه الطريقة يتم دمج الجسيمات النانوية في مواد التعبئة

والتغليف لتصنيع أغذية ذات جودة عالية بمدة صلاحية أطول. ان الغرض من إنشاء مركبات البوليمر النانوي هو للحصول على المزيد من مواد التعبئة الميكانيكية المقاومة للحرارة. وقد استخدمت العديد من الحشوات غير العضوية أو العضوية من أجل انتاج مركبات البوليمر المحسنة. ان دمج الجسيمات النانوية في البوليمرات ساهم بتطوير المزيد من المقاومة

لمواد التعبئة وخفض تكاليفها. كما ان استخدام الحشوات النانوية الخاملة مثل الطين والسيليكات في الصفائح النانوية مثل جسيمات السيليكا (SiO_2) النانوية، الكيتين أو الكيتوسان جعلتها مصفوفة نانوية أخف وأقوى ومقاومة للحريق، وخواص حرارية أفضل (Sorrentino, *et al*. 2007).

يستمر تغليف المواد الغذائية في التطور استجابة لتقدم علوم وتكنولوجيا المواد، فضلاً عن نمط حياة المستهلكين المتغير. في الاقتصاد العالمي اليوم، لا تعد التعبئة والتغليف ضرورية لتمكين التوزيع الفعال والحفاظ على المواد الغذائية والمنتوجات الاستهلاكية الأخرى فحسب، بل تعد أيضًا ضرورية لتسهيل الاستخدام النهائي والتواصل على مستويات المستهلك. وبفضل هذه الوظائف الهامة، أصبحت التعبئة والتغليف ثالث أكبر صناعة في العالم وتمثل حوالي 2٪ من الناتج القومي الإجمالي في البلدان المتقدمة. توفر التعبئة والتغليف الاحتواء وتحمي المنتجات الغذائية أثناء التوزيع والتخزين من الظروف الخارجية والداخلية غير المواتية، مثل بخار الماء والكائنات الحية الدقيقة والغازات والأوامر والغبار والصدمات والاهتزازات الميكانيكية. نظرًا لنمط حياة المستهلكين المعقد والمزدحم في المجتمع الحديث، يسعى منتجو الأغذية جاهدين لتطوير أنظمة تعبئة وظيفية مع ميزات راحة محسنة للاستخدام النهائي. إلى جانب كل هذه الوظائف، فإنه يوفر معلومات المنتج الأساسية للمستهلك لتسهيل الترويج والإعلان عن المنتوج. وفي أنظمة التعبئة والتغليف المتقدمة، يتم تعزيز هذه الوظائف من خلال آليات تفاعلية مدفوعة بعمليات فيزيائية و/أو كيميائية و/أو بيولوجية. هنا، أنظمة التعبئة والتغليف الذكية هي تلك التي تمتلك وظيفة محسنة

فيما يتعلق بوظائف الاتصال والتسويق، مثل تقديم ردود فعل ديناميكية للمستهلك حول الجودة الفعلية للمنتوج. من ناحية أخرى، يركز التغليف النشط على توفير الحماية والحفاظ على الغذاء من خلال بعض الآليات التي يتم تفعيلها بواسطة عوامل داخلية و/أو خارجية. تعد تقنية النانو أداة قوية متعددة التخصصات لتطوير 47 منتجًا مبتكرًا. ومن المتوقع أن تؤثر تكنولوجيا النانو على ما لا يقل عن 3 تريليون دولار في الاقتصاد العالمي في السنوات المقبلة، مما يخلق طلبًا لـ 6 ملايين صاحب عمل في مختلف الصناعات (Duncan, 2011). في عام 2008، بلغت قيمة تغليف المواد الغذائية العالمية المرتبطة بتكنولوجيا النانو 4.13 مليار دولار أمريكي، ومن المتوقع أن يصل معدل النمو السنوي المركب إلى حوالي 12٪ "التكنولوجيا النانوية الممكنة"

التعبئة والتغليف لصناعة الأغذية والمشروبات - تحليل عالمي للتكنولوجيا والصناعة والسوق 2009، "2009). مع هذا الاتجاه العالمي، من المتوقع أن توفر تكنولوجيا النانو دفعة تكنولوجية مهمة في صناعة تغليف المواد الغذائية لتطوير تطبيقات التعبئة والتغليف المتقدمة لتلبية احتياجات المستهلك. تعد تكنولوجيا النانو متعددة التخصصات إلى حد كبير، حيث تتضمن استغلال المواد ذات أبعاد واحدة أو أكثر والتي يقل حجمها عن 100 نانومتر، ويمكن تصنيف المواد النانوية النموذجية إلى ثلاث فئات رئيسية: 1) الجسيمات؛ 2) الصفائح الدموية؛ و3) الألياف. نظرًا لأبعادها النانوية، تمتلك هذه المواد نسبة سطح إلى حجم كبيرة جدًا ونشاط سطحي عند إضافتها إلى البوليمرات المتوافقة، يمكن للمواد النانوية أن تعزز بشكل كبير خصائص المواد للمركبات النانوية الناتجة، مثل تحسين القوة الميكانيكية، وتعزيز الاستقرار الحراري، وزيادة التوصيل الكهربائي، وما إلى ذلك. وبالتالي، تعد المواد النانوية واعدة لتحسين الخواص الميكانيكية والحاجزية للعبوات الغذائية، فضلاً عن تطوير هياكل متقدمة للتطبيقات النشطة والذكية.

ان الهدف من سلامة وتنظيم تقنيات النانو في تغليف المواد الغذائية هو:

اولا. تحديد أنواع التقنيات النانوية المستخدمة حاليًا في التعبئة والتغليف الملامسة للأغذية بهدف تحديد تلك التي قد تؤدي إلى هجرة المواد النانوية من العبوة إلى طعام.

ثانيا. حيثما أمكن، تحدد الأدلة المتاحة للعامة على أن تقنيات النانو المحددة في المهمة السابقة مطبقة في أستراليا و/أو نيوزيلندا، إما في المنتجات المنتجة محليًا أو المستوردة.

ثالثا. التأكد مما إذا كان هناك دليل علمي معقول على أن تطبيق تقنيات النانو على مواد تغليف المواد الغذائية قد يشكل خطراً على الصحة والسلامة العامة، بسبب هجرة المواد النانوية إلى الغذاء وتناولها لاحقاً.

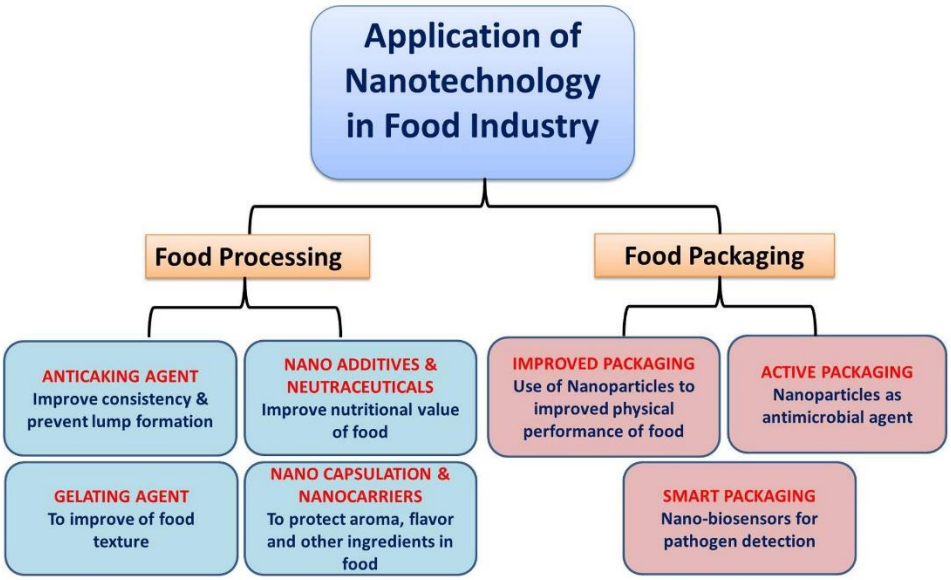
رابعا. تضمين ملخص موجز للأنظمة الدولية المعمول بها حاليًا، أو قيد التطوير، والتي تتناول استخدام تقنيات النانو في التعبئة والتغليف الملامس للأغذية.

خامسا. استخدم دراسات الحالة، بناءً على البيانات، لوضع المهام المذكورة أعلاه في السياق والمساعدة في تحديد فجوات البيانات التي قد تعيق التقييم الرسمي للمخاطر الخاصة بالمواد النانوية الجديدة المخصصة لتغليف المواد الغذائية

أن الجسيمات النانوية هي شكل هندسي للمادة له بعد واحد على الأقل في مقياس النانومتر (أقل من 100 نانومتر). وبالمثل، فإن المواد النانوية هي مواد لها أي بعد خارجي في المقياس النانوي أو لها بنية داخلية أو بنية سطحية في المقياس النانوي. تم اقتراح العديد من التطبيقات للمواد النانوية في تغليف المواد الغذائية. ويشمل الغرض منها نقل خصائص مضادة للميكروبات وخصائص حاجزة لمنع تلف الطعام، أو تعزيز الخواص الميكانيكية للفيلم مثل الاستحلاب، أو الرغوة والقدرة على ربط الماء، أو تعزيز الخواص الكيميائية الفيزيائية الأخرى للبوليمرات المستعملة في تغليف المواد الغذائية مثل الاستقرار الحراري والبلورية (Aresta, *et al*. 2013). على الرغم من أن العديد من المواد النانوية قد تم اقتراح استخدامها في تغليف المواد

الغذائية، إلا أن هذا التقرير يركز على تلك المستعملة حاليًا في الأطعمة. وينصب التركيز أيضًا على تغليف المواد الغذائية في حد ذاتها (مثل حاويات المواد الغذائية، وأغلفة المواد الغذائية والأغشية)، بدلاً من المواد الملامسة للأغذية (مثل الثلاجات، وألواح التقطيع، وأدوات المائدة). يحدد وظائف وأنواع المواد النانوية المقترحة للاستخدام في تغليف المواد الغذائية، ويحدد تلك التي يوجد دليل على استخدامها في العالم. يمكن تقسيم تغليف المواد الغذائية المدعمة بتقنية النانو بشكل عام إلى ثلاث فئات رئيسية التاليـــة (Duncan, 2011).

- **تحسين التغليف: حيث يتم خلط المواد النانوية في مصفوفة البوليمر لتحسين خصائص حاجز الغاز، وكذلك مقاومة درجة الحرارة والرطوبة للعبوة.**
- **التغليف النشط: يتضح من خلال استخدام المواد النانوية للتفاعل مباشرة مع الطعام أو البيئة للسماح بحماية أفضل للمنتج. على سبيل المثال، يمكن للجسيمات النانوية الفضية والطلاءات الفضية توفير خصائص مضادة للميكروبات، مع استخدام مواد أخرى كالاوكسجين أو كاسحات للأشعة فوق البنفسجية**
- **التغليف الذكي/الذكي: مصمم لاستشعار التغيرات البيوكيميائية أو الميكروبية في الأغذية، على سبيل المثال. الكشف عن مسببات الأمراض المحددة التي تتطور في الطعام، أو الغازات المحددة الناتجة عن فساد الطعام. كما تم تطوير بعض العبوات "الذكية" لاستخدامها كجهاز تتبع لسلامة الأغذية أو لتجنب المنتجات المقلدة (شكل 7).**



شكل 7. تطبيقات النانوتكنولوجي في مجالات علم الغذاء

تقنيات النانو المستخدمة في تغليف المواد الغذائية

تشير المعلومات إلى أن تطبيقات تكنولوجيا النانو في قطاع الأغذية تتزايد في جميع أنحاء العالم، وتقوم العديد من شركات الأغذية العالمية باستكشافها تطبيقات قطاع الأغذية، تشكل المواد الملامسة للأغذية المشتقة من تكنولوجيا النانو الحصة الأكبر من السوق الحالية والمتوقعة على المدى القصير، وتتوفر مجموعة من هذه العناصر بالفعل في بعض البلدان، ومن المتوقع على نطاق واسع أنها ستصبح متاحة بشكل متزايد في جميع أنحاء العالم في السنوات القليلة المقبلة. في عام 2008، بلغت قيمة السوق العالمية لتغليف الأطعمة والمشروبات المعتمدة على تكنولوجيا النانو 4.13 مليار دولار أمريكي، وفي 2014 إلى 7.3 مليار دولار أمريكي (Duncan, 2011).

أجهزة الاستشعار النانوية في كشف مسببات الامراض Nanosensors for pathogen detection

أن الخصائص المضادة للميكروبات للمواد النانوية تمكنها من الحفاظ على المواد الغذائية أثناء التخزين والنقل. يمكن استخدام أجهزة الاستشعار النانوية لمجموعة متنوعة من التطبيقات. تم الاستخدام التجاري لأجهزة الاستشعار النانوية للتحقق من ظروف التخزين وأثناء نقل الأغذية في الشاحنات المبردة للتحكم في درجة الحرارة. أن المستوى العالي من الحساسية والسمات الجديدة الأخرى لتقنية الجسيمات النانوية. لذلك استخدمت في علم الأحياء الدقيقة أو أجهزة الاستشعار النانوية أو أجهزة الاستشعار الحيوية النانوية في الكشف عن مسببات الأمراض في مصانع المعالجة في انتاج المواد الغذائية،

ان تحديد كمية المكونات الغذائية المتاحة، وتنبيه المستهلكين والموزعين بشأن حالة سلامة الأغذية اتاحت لأجهزة استشعار النانو كمؤشر يستجيب للتغيرات الظروف البيئية مثل الرطوبة أو درجة الحرارة في غرف التخزين، التلوث الميكروبي، أو تدهور المنتوجات. ان الهياكل النانوية المختلفة مثل الأغشية الرقيقة، والأقطاب النانوية، الجسيمات النانوية والألياف النانوية والتطبيقات الاخرى الممكنة تم الكشف عنها باستخدام أجهزة الاستشعار الحيوية. في المستشعرات المناعية، يتم إنتاج أجسام مضادة محددة، يتم تجميد المستضدات أو جزيئات البروتين على أفلام نانوية رقيقة أو شرائح استشعار تنبعث منها إشارات عند اكتشاف هذه الجزيئات. من هذه الاجهزة A dimethylsiloxane microfluidic immunosensor جهاز استشعار مناعي مدمج مع جسم مضاد محدد على غشاء الألومينا النانوي تم تطويره من أجل سرعة الكشف عن مسببات الأمراض المنقولة بالغذاء والمكورات العنقودية الذهبية ذات المعاوقة الكهروكيميائية الطيف. يمكن أن تساعد تقنية النانو أيضًا في الكشف عن المبيدات الحشرية الملوثة للغذاء. ان اجهزة الاستشعار النانوية يمكنها ان تتتبع مسببات الأمراض والسموم ومراقبة جودة الأغذية. كما حققت أجهزة الاستشعار

الحيوية المعتمدة على أنابيب الكربون النانوية الكثير الاهتمام بسبب الكشف السريع والبساطة والتكلفة والفعالية العالية وتم تطبيقها بنجاح أيضًا الكشف عن الكائنات الحية الدقيقة والسموم وغيرها التي تسبب تدهور المنتجات الغذائية والمشروبات. ان الأجسام النانوية المضادة للسموم تتسبب في حدوث تغيير ملحوظ في الموصلية عندما ترتبط بالسموم المنقولة بالماء وبالتالي فهي تستخدم للكشف عن السموم المنقولة بالماء. كما يمكن استخدام اللسان أو الأنف الإلكتروني والذي يتكون من مجموعة من أجهزة الاستشعار النانوية بمراقبة حالة الطعام عن طريق إعطاء إشارات على الرائحة أو الغازات المنبعثة من المواد الغذائية (Garcia, *et al*. 2006). يمكن للأنف الكهربائي المعتمد على كريستال الكوارتز Quartz Crystal (QCM) Microbalance. الكشف عن التفاعل بين الروائح المختلفة والمواد الكيميائية التي تم طلاؤها على السطح البلوري لـ QCM.

الاستخدامات الحالية Current uses

من بين العديد من اللدائن الحرارية، يعد البولي أوليفين أكثر المواد البلاستيكية استخدامًا في قطاع تغليف المواد الغذائية. غالبًا ما يتم استخدام أفلام البولي بروبيلين (نوع من البولي أوليفين) بسبب شفافيتها وتألقها ووزنها النوعي المنخفض وخمولها الكيميائي. ومع ذلك، فإن البولي بروبيلين (PP) (مثل البولي أوليفينات الأخرى والبوليمرات الأخرى يتميز أيضًا بخصائص حاجز منخفضة) أي نفاذية متأصلة للغازات والجزيئات الصغيرة الأخرى)، مما يؤدي إلى ضعف حماية الأطعمة المعبأة. إحدى طرائق تحسين البولي بروبلين وغيرها تتمثل أوجه القصور في حاجز البلاستيك في إضافة مكون ثانٍ مثل مزيج البوليمر أو متعدد الطبقات، أو الحشو، وما إلى ذلك عن أن المركبات النانوية القائمة على البوليمر تحقق نفس خصائص الحاجز مقارنة بنظيراتها المركبة التقليدية (Avella, *et al*. 2005).

ويتم تعزيز هذه المركبات النانوية بكميات صغيرة (تصل عادةً إلى 5% من الوزن) من الجسيمات النانوية، والتي لها نسب أبعاد عالية جدًا (لتر/ساعة> 300) ، يتم

دمجها فضلا عن الحشوات والمواد المضافة التقليدية. تتميز المواد النانوية بنسب أبعاد كبيرة والتي عند دمجها كمواد مالئة في جدران التغليف، تخلق عائقًا أمام مرور الغاز والرطوبة عبر جدران التغليف عن طريق زيادة المسار الذي يجب أن يسلكه الغاز/الرطوبة . وبصرف النظر عن منح خصائص حاجز لإطالة العمر الافتراضي للأغذية (على سبيل المثال من خلال وظيفة مضادة للميكروبات أو حاجز نفاذية الأكسجين أو بخار الماء)، فإن المركبات النانوية الأخرى تمنح خصائص فيزيائية مختلفة لجعل العبوة أكثر شدًا أو متانة أو مستقرة حرارياً. ومن أمثلة المركبات النانوية الأخرى الأشعة فوق البنفسجية مواد ماصة (مثل ثاني أكسيد التيتانيوم النانوي، وأكاسيد الحديد، والسيليكا، والألومينا) لمنع تحلل البوليمرات البلاستيكية بالأشعة فوق البنفسجية، ونيتريد التيتانيوم (TiN) المستخدم لتحسين قوة مواد التعبئة والتغليف، ومركبات كربونات بوليمر نانو الكالسيوم، ومركبات نانو شيتوسان بوليمر. ، مركبات الطين النانوي القابلة للتحلل الحيوي من النشا وحمض البوليلاكتيك وشعيرات النانو السليلوز القابلة للتحلل الحيوي، وغيرها من حواجز الغاز الطلاءات (مثل النانو سيليكا). ومن الأمثلة المعروفة على واحدة من أولى المركبات النانوية التي تم استكشافها لاستخدامها في تغليف المواد الغذائية لتعزيز خصائص الحاجز، الطين النانوي، الذي تم دمجه مع النايلون، والبولي أوليفينات، والبوليمرات المشتركة، وراتنجات الإيبوكسي، والبولي يوريثين، والبولي إيثيلين تيريفثاليت، وما إلى ذلك من المواد المتاحة تجاريًا بالفعل، وتستخدمها شركات المشروبات في بعض البلدان.

تمت أيضًا دراسة صياغة المركبات الحيوية النانوية التي تجمع بين الفضة النانوية والطين النانوي أو المواد النانوية الأخرى (مثل ثاني أكسيد التيتانيوم) لتعزيز كل من الخصائص العازلة والمضادة للميكروبات للتطبيق المستقبلي المحتمل في تغليف المواد الغذائية. تشمل الأمثلة الأخرى للمواد النانوية التي يحتمل استخدامها في تغليف المواد الغذائية الألومينا (على سبيل المثال، صفائح الألومينا على شكل العجلة المستخدمة كمواد حشو للمواد البلاستيكية)، وكربونات الكالسيوم المترسبة النانوية (لتحسين

الخواص الميكانيكية، ومقاومة الحرارة وجودة الطباعة للبولي إيثيلين)، وأوليجوميريك سيلسيكويكسان متعدد السطوح (POSS).) الطين النانوي (لتحسين خصائص الحاجز)، والأغشية النانوية ألجينات الكالسيوم وأكسيد الزنك (تُستخدم كمادة حافظة للأغذية)، وهجينة السيليكا/البوليمر (لتحسين حواجز انتشار الأكسجين للمواد البلاستيكية)

قضايا السلامة Safety issues

يتعرض المستهلكون للمواد النانوية عن طريق استهلاك الأطعمة والمشروبات التي تحتوي على هذه الجزيئات الصغيرة للغاية ذات مساحة سطح تفاعلية كبيرة غير معروفة السلامة. بمجرد امتصاصها في الجهاز الهضمي، فإنها قد تتراكم بيولوجيًا في أعضاء مختلفة من الجسم، مما يؤدي إلى تأثيرات ضارة محتملة. ومن ثم، فإن تطبيق تكنولوجيا النانو في صناعة الأغذية يشكل اهتمامًا عامًا. ويعتمد القبول العام للأغذية والمنتجات الغذائية التي تحتوي على مواد نانوية على سلامتها المتصورة. واشارت بعض المصادر الى: لن تجني صناعة الأغذية فوائد تكنولوجيا النانو إلا إذا تمت معالجة القضايا المتعلقة بالسلامة .

إلى جانب الكثير من المزايا التي تقدمها تقنية النانو للأغذية المصنعة، الى ان قضايا السلامة المرتبطة بالمواد النانوية لا يمكن إهمالها. لقد ناقش العديد من الباحثين المخاوف المتعلقة بالسلامة المرتبطة بالمواد النانوية مع التركيز على الاحتمال ان تهاجر الجسيمات النانوية من مواد التغليف إلى داخل الغذاء وتأثيرها على صحة المستهلك. على الرغم من أن هذه المواد قيد النظر باعتبارها مادة GRAS (تعتبر آمنة بشكل عام)، يجب إجراء دراسات لفحص خطورة النانو ونظائرها بسبب الخواص الفيزيائية والكيميائية. علاوة على ذلك، إن الحجم الصغير لهذه المواد النانوية قد يزيد من خطر الإصابة بالسرطان والتراكم الحيوي داخل أعضاء وأنسجة الجسم. على سبيل

المثال، أن استخدام جزيئات السيليكا النانوية يمكن أن تكون العوامل المضادة للتكتل سامة للخلايا في خلايا الرئة البشرية (Athinarayanan, *et al*. 2014).

في مارس 2009، نشرت اللجنة العلمية التابعة للوكالة الأوروبية لسلامة الأغذية European Food Safety Agency رأيًا حول علم النانو وتكنولوجيا النانو فيما يتعلق بسلامة الأغذية والأعلاف الحيوانية. تم إصدار وثيقة توجيهية حول كيفية تقييم المخاطر المحتملة المرتبطة ببعض استخدامات تكنولوجيا النانو المتعلقة بالأغذية في مايو 2011، حيث قدمت توصيات عملية إلى الهيئات التنظيمية حول كيفية تقييم التطبيقات من الصناعة لاستخدام المواد النانوية الهندسية في المضافات الغذائية والإنزيمات والمنكهات والمواد الملامسة للأغذية. والأغذية الجديدة والمكملات الغذائية والمضافات العلفية والمبيدات الحشرية. أصدرت إدارة الغذاء والدواء الأمريكية The U.S. Food and Drug Administration (FDA) مسودة توجيهات بشأن استخدام المواد النانوية في أعلاف الحيوانات في الصناعة. ومع ذلك، هناك حاجة إلى مزيد من الأبحاث لتحديد تأثير المواد النانوية الموجودة في الغذاء على صحة الإنسان لضمان السلامة العامة وتحسين التواصل العام حول الاستخدام الآمن لهذه المواد في إمداداتنا الغذائية. وقد تم الإبلاغ عن بعض طرائق الاختبار لتقييم سلامة المواد النانوية. ومع ذلك، لا توجد بروتوكولات قياسية مقبولة دولياً لاختبار سمية المواد النانوية في الأغذية أو الأعلاف متاحة حالياً. مثل هذه البروتوكولات هي في مرحلة التطوير من قبل منظمات مثل التحالف الدولي للبيئة النانوية International Alliance for Nano Environment ، وتنسيق صحة الإنسان وسلامته Human Health and Safety Harmonization والمجلس الوطني للبحوث في الولايات المتحدة The U.S. National Research Council. يعد وجود إطار تنظيمي دولي موحد لتقييم تكنولوجيا النانو International regulatory framework for the evaluation of nanotechnology أمرًا ضروريًا لكل من الأغذية والأعلاف الحيوانية.

الاستنتاجات Conclusion

في الختام، ستكون تكنولوجيا النانو بمنزلة أداة هامة للتغلب على التحديات القائمة المرتبطة بمواد التعبئة والتغليف. سيؤثر هذا التقدم بشكل إيجابي على مدة صلاحية الأطعمة وجودتها وسلامتها وأمنها، الأمر الذي سيعود بالنفع في النهاية على المنتجين والمستهلكين. ومع ذلك، ينبغي تطبيق المبادئ الاحترازية وهناك حاجة إلى مزيد من البحوث، خاصة فيما يتعلق بسلوكيات هجرة المواد النانوية في الغذاء وتأثيراتها المحتملة على الصحة/السلامة، وكذلك على البيئة. ولا يمكن تحقيق حل التغليف المستدام إلا إذا كان مقبولا اجتماعياً وقابلاً للتطبيق اقتصادياً وسليماً بيئياً. إن فوائد استخدام تكنولوجيا النانو في صناعة الأغذية عديدة ومن المتوقع أن تنمو. تؤثر هذه التكنولوجيا الجديدة سريعة التطور على كل جانب من جوانب النظام الغذائي بدءًا من الإنتاج وحتى المعالجة والتعبئة والنقل ومدة الصلاحية والتوافر البيولوجي. سوف تنمو التطبيقات التجارية للمواد النانوية في صناعة الأغذية بسبب خصائصها الفريدة والجديدة. وسوف يستمر تعرض الإنسان للمواد النانوية في التزايد. ولذلك، فإن التأثير الصحي للمواد النانوية في الغذاء هو مصدر قلق عام رئيسي. تعد القدرة على قياس كمية المواد النانوية طوال دورة حياة الغذاء أمرًا بالغ الأهمية لتحقيق اتساق التصنيع والسلامة والفوائد المحتملة للمنتج الاستهلاكي. إن القبول العام للأغذية والمنتوجات ذات الصلة بالأغذية التي تحتوي على مواد متناهية الصغر سوف يعتمد على سلامتها. ومن الضروري وجود إطار تنظيمي دولي موحد لاستخدام تكنولوجيا النانو في الأغذية.

المصادر

Alfadul, S.M. &Elneshwy, A.A. (2010), Use of nanotechnology in food processing, packaging and safety – review, African Journal Of Food Agriculture Nutrition And Development vol. 10, no.6, 2719-39.

Aschberger, K., Gottardo, S., Amenta, V., Arena, M., Botelho Moniz F., Bouwmeester H., Brandhoff, P.,Mech, A.,QuirosPesudo, L., Rauscher,

H.,Schoonjans, R.,VittoriaVettori, M., Peters, R. (2015) Nanomaterials in Food – Current and Future Applications andRegulatory Aspects, Journal of Physics: Conference Series 617, 012032.

Athinarayanan, J., Periasamy, V. S., Alsaif, M. A., Al-Warthan, A. A., and Alshatwi, A. A. 2014. Presence of nanosilica (E551) in commercial food products: TNF-mediated oxidative stress and altered cell cycle progression in human lung fibroblast cells. Cell Biol. Toxicol. 30, 89–100. doi: 10.1007/s10565-014- 9271-8

Avella, M., De Vlieger, J. J., Errico, M. E., Fischer, S., Vacca, P. and Volpe, M. G. (2005). Biodegradable starch/clay nanocomposite films for food packaging applications. Food Chemistry. 93: 467-474.

bionanotechnology. AIChE J. 49, 2990–3006. doi: 10.1002/aic.690491202

Bratovci ˇ c, A., Odobaši ´ c, A., ´ Cati ´ c, S., and Šestan, I. 2015. Application of polymer ´

Chaudhry, Q., Castle, L., Bradley, E., Blackburn, J., Aitken, R. and Boxall, A. (2008). Assessment of current and projected applications of nanotechnology for food contact materials in relation to consumer safety and regulatory implications. Final report Project A03063. Food Standards Agency. http://www.food.gov.uk/sites/default/files/a03063.pdf.

Dreher K.L. (2004) Health and Environmental Impact of Nanotechnology: Toxicological Assessment of Manufactured Nanoparticles, Toxicological Sciences 77, 3–5.

Duncan, T. V. (2011). Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: Barrier materials, antimicrobials and sensors. Journal of colloid and interface science, 363, 1-24.

Ezhilarasi, P. N., Karthik, P., Chhanwal, N., and Anandharamakrishnan, C. (2013). Nanoencapsulation techniques for food bioactive components: a review. Food Bioprocess Technol. 6, 628–647. doi: 10.1007/s11947-012-0944-0

Garcia, M., Aleixandre, M., Gutiérrez, J., and Horrillo, M. C. 2006. Electronic nose for wine discrimination. Sensors Actuat. B 113, 911–916. doi: 10.1016/j. snb.2005.03.078

Langer, R., and Peppas, N. A. 2003. Advances in biomaterials, drug delivery, and nanocomposite materials in food packaging. Croat. J. Food Sci. Technol. 7, 86–94. doi: 10.17508/CJFST.2015.7.2.06

Pathakoti,K., Manubolu,M. & Hwang, HM. (2017) Nanostructures: Current uses and future applications in food science, Journal of Food and Drug Analysis Xxx; 1-9.

Paul, S.D. &Dewangan D. (2016) Nanotechnology and Neutraceuticals. Int J NanomaterNanotechnolNanomed 2(1): 009-012.

Pradhan, N., Singh, S.,Ojha, N.,Shrivastava, A.,Barla, A.,Rai, V.,&Bose, S. (2015) Facets of Nanotechnology as Seen in Food Processing, Packaging, and Preservation Industry, BioMed Research International; 1-17.

Prakash, A., Sen S.& Dixit R. (2013) The Emerging Usage and Applications of Nanotechnology in Food Processing Industries: The new age of Nanofood, Int. J. Pharm. Sci. Rev. Res., 22(1), no 21, 107-111.

Samal. D. 2017. Use of Nanotechnology in Food Industry: A review. International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology (IJEAB) V l-2 (4): 2270- 2278. http://dx.doi.org/10.22161/ijeab/2.4.90

Sari, P., Mann, B., Kumar, R., Singh, R. R. B., Sharma, R., Bhardwaj, M. 2015. Preparation and characterization of nanoemulsion encapsulating curcumin. Food Hydrocol. 43, 540–546. doi: 10.1016/j.foodhyd.2014. 07.011

Silva, H.D., Cerqueira M.A. & Vicente, A.A. (2012) Nanoemulsions for Food Applications: Development and Characterization, Food Bioprocess Technol 5:854–867.

Singh, T., Shukla, S., Kummar, P. Wahla,V. Vivek, B. and Rather, I. 2017. Application of Nanotechnology in Food Science: Perception and Overview Updated. Front. Microbiol., Sec. Food Microbiology, Volume 8 - 2017 . https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01501

Sorrentino, A., Gorrasi, G., and Vittoria, V. 2007. Potential perspectives of bionanocomposites for food packaging applications. Trends Food Sci. Technol. 18, 84–95. doi: 10.1021/acsami.7b04297

Yang, R., Zhou, Z., Sun, G., Gao, Y., Xu, J., Strappe, P. 2015. Synthesis of homogeneous protein-stabilized rutin nanodispersions by reversible assembly of soybean (Glycine max) seed ferritin. RSC Adv. 5, 31533–31540. doi: 10.1039/C5RA03542B

الفصل الرابع

تطبيقات تقنية النانو في الإنتاج الحيواني

مقدمة

إن طرائق استخدام تكنولوجيا النانو لديها القدرة على إحداث ثورة في صحة الحيوان والإنتاج الحيواني. ويمكن أن تكون هناك تطبيقات عدة لهذه التكنولوجيا في تشخيص الأمراض، وعلاجها، وتوصيل الأدوية، وتغذية الحيوانات، وتربية الحيوانات، والتكاثر، وهندسة الأنسجة، وإضافة قيمة اعلى إلى المنتوجات الحيوانية. في الآونة الأخيرة، كانت هناك بعض المخاوف بشأن الآثار السامة المحتملة للجسيمات النانوية في كل من الإنسان والحيوان. لذلك لابد من الاهتمام بالسلامة وغيرها من القضايا الاجتماعية التي من المحتمل أن تنشأ من هذه التطبيقات. استخدمت الجسيمات النانوية في مجالات متنوعة ضمن تطبيقات تخص صحة الحيوان مثل ادوية النانو واستخدمت تركيبات عدة ضد الكائنات الحية داخل الخلية ولعلاج اورام الدماغ بسبب صغر حجمها وقدرتها على عبور حاجز الدم في الدماغ. يجري أيضًا تطوير المواد النانوية للتطبيقات الطبية ويتم اختبارها والتحقق من صحتها على حيوانات المختبر ولذلك، فإن هذه الأدوية لديها إمكانية الاستخدام في الحيوانات الأليفة ضد العديد من الأمراض ذات الأهمية الاقتصادية(Manuj, *et al*. 2012).

توصيل المغذيات Nutrient delivery

مذيلات الكازين هي جسيمات نانوية موجودة بشكل طبيعي في الحليب، حيث تشكل بروتينات الكازئين الفوسفورية ما يقرب من 80٪ من البروتين في حليب البقر. تتجمع بعض أشكال الكازئين حول الكالسيوم والبروتينات والمواد المغذية الأخرى للسماح بالانتقال من الأم إلى الصغار. أدى التلاعب بهذه المذيلات إلى دمج العناصر الغذائية الكارهة للماء وتوزيع فيتامين D داخل جزيئات الكازئين النانوية، مما زاد من التوافر البيولوجي لفيتامين D في الجسم الحي، حيث تخضع جزيئات الكازئين للانقسام

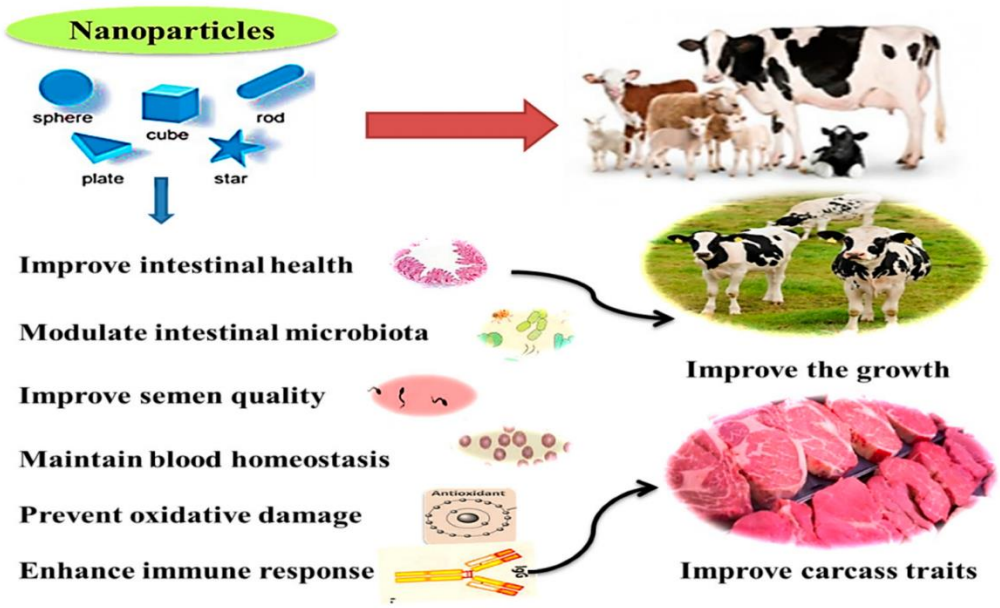
البروتيني في المعدة، مما يؤدي إلى إطلاق الفيتامينات المغلفة، وهذا يمكن المنتجين على مساعدة حديثي الولادة خلال فترة الفطام، وهي فترة حساسة بالنسبة لصغار الحيوانات لان اجهزتها الهضمية والمناعية لا تزال في مرحلة النضج. في حالة عدم وجود حليب من الأم، يجب على صغار الفطام التكيف مع نظام غذائي معقد من الكربوهيدرات وقليل من الدعم المناعي. وهذه مرحلة مهمة ليس فقط لأسباب تتعلق برعاية الحيوان، ولكن أيضًا من الناحية الإنتاجية حيث أن صغار الفطام التي تحافظ على معدلات نموها من خلال عملية الفطام تكون أكثر صحة وأكثر وزنا عند الذبح. أن فوائد المكملات الغذائية قد تساعد الحيوانات المفطومة والدواجن على زيادة حجم الجسم أيضًا، ويمكن للجسيمات النانوية المصممة لتوصيل المغذيات أن تسهل هذه المكملات وتعزز معدلات نمو الماشية عن طريق زيادة التوافر البيولوجي لشحنات المغذيات (Hill and Li, 2017: Haham, *et al*. 2012) (شكل 1).

إن إعطاء عناصر غذائية إضافية للماشية عن طريق العلف من الفم يولد تحديات جادة يجب أخذها في الاعتبار عند تصميم جسيمات نانوية حاملة. تتمتع كل حجرة من أجزاء الجهاز الهضمي ببيئة فريدة تحتوي مجموعة خاصة من الإنزيمات ومستوى الرقم الهيدروجيني المحدد. ويجب أن تكون الجسيمات النانوية قادرة على التغلب على هذه العقبات لتوصيل حمولتها الغذائية إلى الموقع المناسب في الأمعاء الدقيقة. وفي هذا المجال أنجزت دراسة للتحقيق في جسيم نانوي مصنوع من بروتين الكانولا كروسيفيرين Canola protein cruciferin، وأثبتت الدراسة أن هذه الجسيمات النانوية يمكن أن تغلف كلاً من المركبات النشطة بيولوجيًا الكارهة والمحبة للماء، وتحميها من بيئة المعدة، وتطلقها في بيئة معوية مناسبة. بمجرد إطلاق العناصر الغذائية من الجسيمات النانوية فسوف تصل إلى بطانة الأمعاء وتؤدي وظيفتها كما لو كانت قد نشأت من العلف. لا يمكن للجسيمات النانوية أن تبقى في الأمعاء لأن تراكمها قد يمنع امتصاص العناصر الغذائية الأخرى في تجويف الامعاء ويجب أن يحدث لها امتصاص من الخلايا أو تدهورها أو إزالتها من الجسم اعتمادًا على نوع الجسيمات

النانوية، وقد لا يكون الامتصاص الخلوي مفضلاً في صناعة الإنتاج الحيواني حيث يجب مراعاة سلامة الأغذية. تكون جسيمات كروسيفيرين النانوية Cruciferin nanoparticles قابلة للهضم في الأمعاء الدقيقة بواسطة إنزيم البنكرياس، ومع ذلك، قد تفرز مركبات الجسيمات النانوية غير القابلة للهضم بشكل طبيعي. وهذا يتطلب إجراء دراسة شاملة لعمل الجسيمات النانوية لاختبار فعاليتها وأي عواقب بيولوجية غير مرغوب فيها، مثل السمية الخلوية وذلك قبل تداولها من قبل المنتجين (Nieto, *et al*. 2016)، في حين أن توصيل المغذيات على المستوى النانوي يمكن أن يحدث بشكل طبيعي أو صناعي، فإن الجسيمات النانوية يمكنها تثبيت المركبات النشطة بيولوجيًا والمساعدة في الامتصاص الخلوي. إن إضافة مكون نشط بيولوجيًا مباشرة إلى العلف ينطوي على خطر التدهور وعدم إمكانيته من الوصول الى المكان المستهدف وهذا ما يمكن مواجهته من خلال وسائل تكنولوجيا النانو. يوفر الحجم الصغير للجسيمات النانوية مستوى عالٍ من التوافر البيولوجي Bioavailability مقارنةً بالجسيمات الدقيقة، خاصة في الجهاز الهضمي، حيث يمكن للجسيمات النانوية المرور بسهولة أكبر عبر الغشاء المخاطي المعوي. لقد استخدمت كربونات الكالسيوم Calcium carbonate وسيترات الكالسيوم Calcium citrate بحجم المقياس النانوي والميكروي Nano- and microscales لاختبار اختلافات التوافر البيولوجي Bioavailability عن طريق قياس كثافة المعادن في عظام الفئران. كانت الفئران التي تم إعطاؤها مركبات الكالسيوم على المستوى النانوي تحتوي على عظام مكثفة مقارنة بالفئران التي أعطيت الكالسيوم الدقيق. سيكون من المثير للاهتمام التحقق مما إذا كان توصيل الكالسيوم في شكل نانوي قد يساعد في تقوية عظام حيوانات الإنتاج مثل الديوك الرومية، حيث يتم اختيار كتلة الجسم بشكل كبير لقوة الساق الزائدة، مما يجعل من الصعب على الديوك الرومية إعالة نفسها (Ban, *et al*. 2015; Emmarson, *et al*. 1991)

المبيدات الحيوية والمضادات الحيوية Biocides

قد تقدم الجسيمات النانوية بديلاً ممكنًا للمضادات الحيوية وقد تساعد في منع مسببات الأمراض من دخول مواقع الإنتاج الحيواني. إن الاستخدام غير المنظم للمضادات الحيوية، وهو ممارسة شائعة في العديد من البلدان، يوفر قوة دافعة للبكتيريا لتصبح مقاومة للأدوية. يكتسب التشريع الجديد لتقييد استخدام المضادات الحيوية الوقائية في الزراعة كوسيلة لمكافحة هذه المشكلة المتنامية. يتطلب الحد من استخدام المضادات الحيوية تطوير بدائل بسبب الطبيعة عالية الكثافة لمرافق الإنتاج الحيواني الحديثة التي تدعو وتسرع انتقال المرض. تنجذب الجسيمات النانوية المعدنية ذات الشحنات الموجبة الصافية إلى الأغشية البكتيرية سالبة الشحنة، مما يؤدي إلى التسرب والتحلل البكتيري (شكل 1). لقد وجد أن الجسيمات النانوية الفضية يمكن أن تمنع نمو البكتريا القولونية Hemorrhagic enteritis-inciting *E. coli* المسببة لالتهاب الأمعاء النزفي والخميرة المعزولة من حالة التهاب الضرع البقري Yeast isolated from a case of bovine mastitis. في الوقت الحاضر، تُستخدم الفضة في الطب وطب الأسنان لمنع التهابات الجروح وتكوين الأغشية الحيوية، يمكن للجسيمات النانوية البوليمرية المشحونة بشكل إيجابي و/أو الرباعي أن تحد من نمو الميكروبات. اختبر بعض الباحثين نشاط الكيتوسان المضاد للميكروبات وهو بوليمر حيوي ذو شحنة سطحية موجبة، ضد مجموعة متنوعة من مسببات الأمراض البكتيرية. يمكن لتدابير الأمن البيولوجي الحالية أن تعيق دخول مسببات الأمراض ولكن الأعلاف والمياه والهواء والأفراد قد تظل بمثابة نقاط دخول لهذه المسببات. إن استخدام الجسيمات النانوية المضادة للميكروبات في هذه النقاط قد يخلق عقبات إضافية أمام مسببات الأمراض المحتملة التي تسعى إلى الدخول (Huljskens, *et al*. 2016).



شكل 1. الفوائد الصحية والتطبيق المفيد للمعادن النانوية في المجترات.

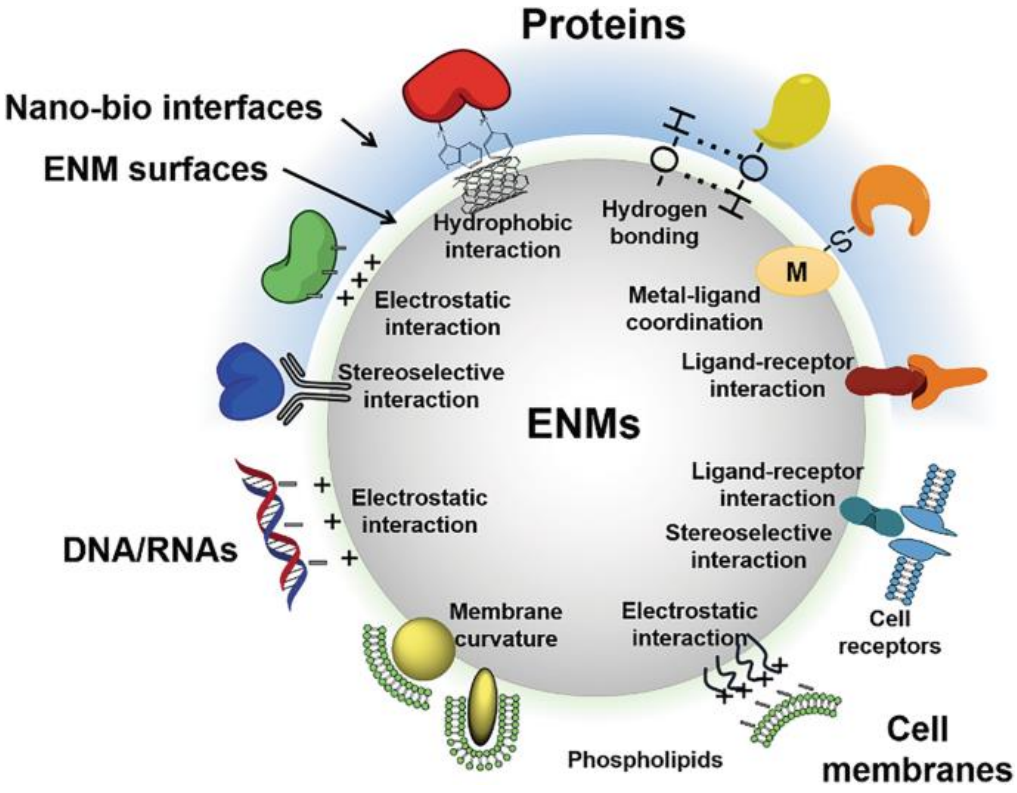
يضاف النحاس بانتظام إلى الأعلاف لقدرته على تعزيز نمو الحيوان وأدائه فضلا عن خصائصه المضادة للميكروبات. وبما أن النحاس يتم توصيله إلى الحيوانات عن طريق الفم في العلف، فيمكن تطبيق نفسها التي تظهر في توصيل المغذيات في هذا الجانب. أن جزيئات النحاس النانوية تمر عبر الغشاء المخاطي المعوي بسهولة أكبر من الأشكال الدقيقة، ما يساعد على الامتصاص. لقد أثبتت التجارب أن النحاس النانوي يمكن أن يحسن طاقة الخنازير وهضم الدهون الخام بشكل أفضل من خلال زيادة نشاط انزيم الليبيز Lipase والفوسفوليباز Phospholipase A في الأمعاء الدقيقة مقارنة بالنظام الغذائي الأساسي المكمل بـ $CuSO_4$. شهدت هذه الخنازير زيادة في زيادة الوزن اليومي، ومعدلات الأيض، والقدرة المناعية. أظهر تحليل تأثير النحاس النانوي على الجهاز المناعي زيادة ملحوظة في تركيزات الجلوبيولين الكلي Globulin وديسموتاز الفائق أوكسيد Superoxide dismutase في مصل الدم، على الرغم من أن أمراض الدم لم تتغير بين المجموعات التجريبية. هذا يوضح إلى أنه يمكن تعزيز القيمة الغذائية للأعلاف من خلال إضافة المكملات المعدنية المضادة

للميكروبات في شكل نانوي. ومع ذلك، هناك حاجة إلى مزيد من البحث قبل تحديد ما إذا كان من الممكن استبدال المضادات الحيوية الموجودة في العلف بالكامل بمضادات الميكروبات النانوية (Colls, *et al*. 2015). على الرغم من تزايد مقاومة البكتيريا للمضادات الحيوية، إلا أن المضادات الحيوية لم تصبح بعد غير فعالة تمامًا ضدها. ويمكن تعزيز توصيلها وفعاليتها عن طريق حاملات الجسيمات النانوية، مما قد يقلل من جرعة المضادات الحيوية اللازمة للعلاج. تفتقر البكتيريا الحساسة إلى آلية واحدة على الأقل للمقاومة حيث تمتلك البكتيريا المقاومة، على الأقل، إحدى آليات المقاومة العديدة المعروفة. إنزيمات بيتا لاكتاماز β-lactamases هي إنزيمات مقاومة تشق حلقة بيتا لاكتام β-lactam ring في أدوية بيتا لاكتام β-lactam drugs مثل البنسلين Penicillin والميثيسيلين Methicillin، مما يؤدي إلى تدمير النشاط الدوائي. تم التعرف على تحميل البنسلين Penicillinعلى جسيمات بولي أكريلات بوليمرية نانوية Polymeric polyacrylate nanoparticlesكوسيلة فعالة لجعل حلقة β-lactam غير حساسة لربط β-lactamase وانقسامها، واستعادة وظيفة البنسلين ضد المكورات العنقودية الذهبية المقاومة للميثيسيلين Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA)، وهي بكتيريا مقاومة للبنسلين والميثيسيلين. في تجارب اخرى تم فحص مستحضرات البنسلين-بولي أكريلات النانوية المختلفة Ppenicillin-polyacrylate nanoparticle وجد أن اثنين منها يمكن أن يثبطا المكورات العنقودية الذهبية MRSA تمامًا مثل فعل البنسلين G، ولم يلاحظ أي دليل على السمية أثناء التطبيق الجهازي أو الموضعي لهذه الجسيمات النانوية في أنموذج الفئران، وعندما تم تطبيقها موضعيًا على كشط جلدي، تم تقصير وقت الشفاء بمقدار 3-5 أيام. كما اجريت تجارب مماثلة باستخدام جسيمات الكيتوسان النانوية البوليمرية Tetracycline-bound polymeric chitosan nanoparticles المرتبطة بالتتراسيكلين ضد سلالة االبكتريا القولونية المقاومة للتتراسيكلين-Tetracycline

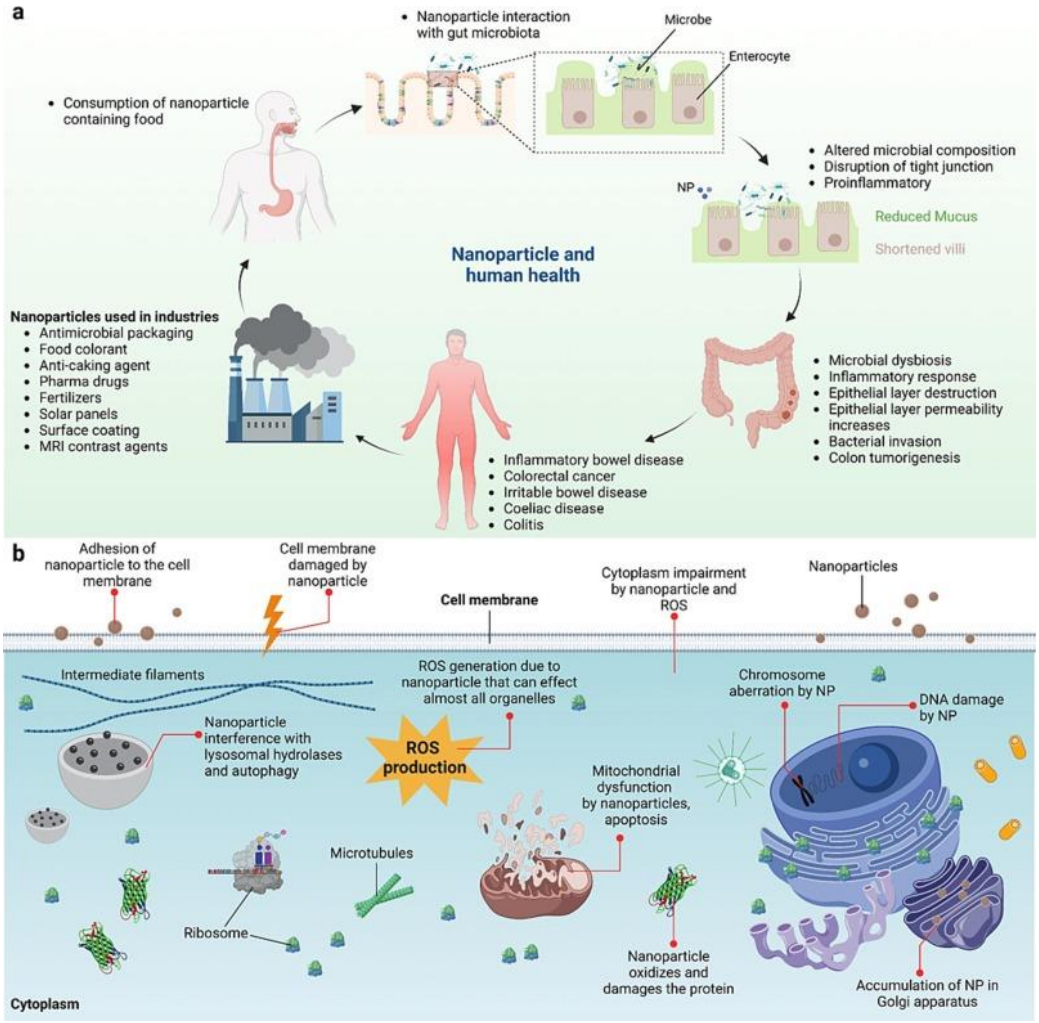
resistant *Escherichia coli* strain، والتي تتطلب تركيزًا لا يقل عن 700 ميكروغرام / مل لتثبيط نمو البكتيريا (Chosh, *et al*. 2010).

إن الجسيمات النانوية المصنوعة من مواد طبيعية التي تستهدف البكتيريا سالبة الجرام هي الأكثر رغبة في التغذية، حيث أن مسببات الأمراض البكتيرية تكون في الغالب سالبة الجرام. ويرجع ذلك إلى الاندوتوكسين الداخلي سالب الجرام Gram-Negative endotoxin، عديد السكاريد الدهني (LPS) Lipopolysaccharide ، الذي لا يوجد في البكتيريا موجبة الجرام. من المهم مراقبة المواد المقدمة للحيوانات الغذائية لأن تراكم السموم في الجسم يمكن أن يشكل تهديدًا للمستهلكين (شكل 2، 3) وربما يثبط الرأي العام تجاه إدراج تكنولوجيا النانو في الإنتاج الحيواني، ما يسلط الضوء على أهمية اختيار الجسيمات النانوية المتوافقة حيويًا فقط لاستخدامها في الأعلاف. ومع ذلك، فإن إضافة الجسيمات النانوية في العلف ليس هو الحل الوحيد للحد من تعرض الماشية لمسببات الأمراض، وانما يمكن أن يساعد التطبيق الخارجي للهيدروجيلات Hydrogels في منع مسببات الأمراض من دخول مرافق الإنتاج، الذي يعطي مجموعات الأمين شحنة موجبة دائمة، من الجسيمات النانوية البوليمرية Polymer nanoparticles مثل بولي (2- (ثنائي ميثيل أمينو) إيثيل ميثاكريلات) (Poly(2-(dimethylamino)ethyl methacrylate) (qPDMAEMA) وهذا يسمح بنشاط المبيدات الحيوية من خلال الجذب الكهروستاتيكي Electrostatic attraction بين البوليمر والميكروب، مما يؤدي إلى تشويه جدار الخلية (Zhang, *et al.* 2008). عندما يتم تطعيم qPDMAEMA على بلورات الاكاروز أو السليلوز النانوية، يمكن تحويلها إلى الهلاميات المائية Hydrogels واستخدامها لتغطية الأسطح لمنع التصاق البكتيريا، وتكوين الأغشية الحيوية. كما تبين عن قدرتها على ربط الفيروسات والجزيئات الشبيهة بالفيروسات لعدد قليل من البوليمرات الكاتيونية في المختبر وفي الجسم الحي وهذا يبين أن السمية تعتمد على الكتلة المولية للبوليمر ونوعه وتعدده. إن نشر

الهلاميات المائية للمبيدات الحيوية ومحاليل النانو عبر حاويات الأعلاف يمثل استخدامًا آخر لهذه التكنولوجيا.



شكل 2. سمية الجسيمات النانوية



شكل 3. سمية الجسيمات النانوية: (a) الجسيمات النانوية المنبعثة من مصادر مختلفة وتأثيرها الضار على صحة الإنسان (b) آلية السمية المستحثة بالجسيمات النانوية

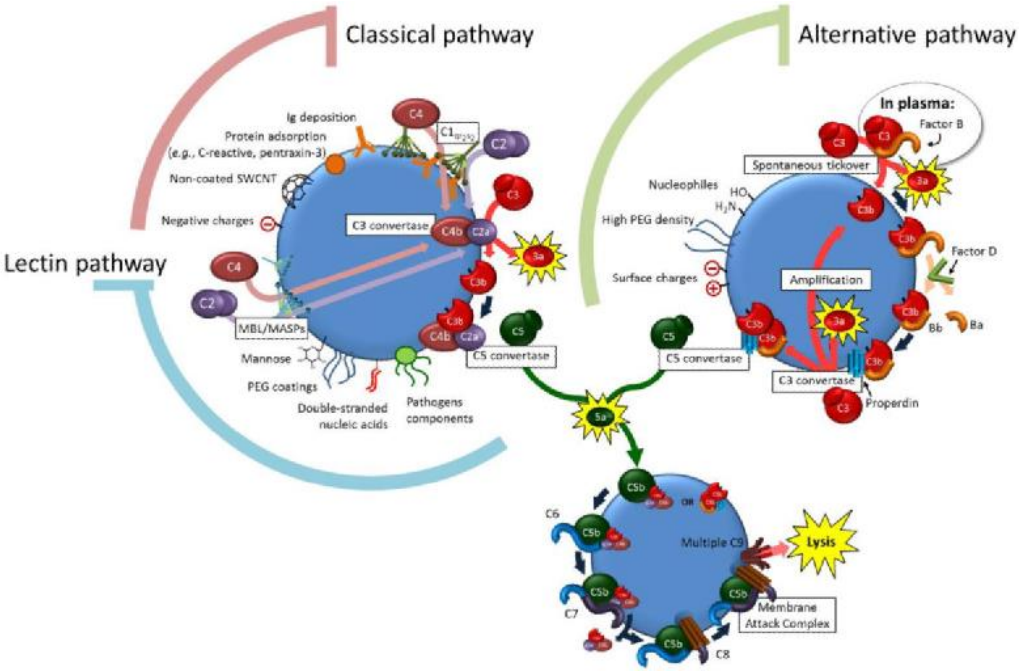
جودة اللحوم والبيض Meat and egg quality

في مجال تكنولوجيا الجسيمات النانوية درست إمكانية استخدام الجسيمات النانوية لتحسين جودة اللحوم والبيض. على سبيل المثال، تم إعطاء الخنازير الجاهزة للسوق جسيمات الكروم النانوية (200 ميكروغرام / كغم) في العلف، كانت أصغر حجمًا بنسبة 14.06٪ عند الذبح مقارنة بالخنازير المراقبة التي تغذت على نظام غذائي أساسي من

وجبة الذرة وفول الصويا. تم تحقيق زيادة في كتلة العضلات الهيكلية وتحسين جودة لحم الخنزير، مع وجود تأثيرات مماثلة عندما تم تغذية الخنازير النهائية بمكملات جسيمات الكيتوسان النانوية المحملة بالكروم. أدت هذه الجسيمات النانوية للكيتوسان المحملة بالكروم إلى رفع نشاط الليبيز الحساس للهرمونات Hormone-sensitive lipase في الأنسجة الدهنية مع تقليل نشاط تخليق الأحماض الدهنية Decreasing fatty acid synthase وتعزيز المكونات المناعية في مصل الدم. هذا يعطي فكرة مقنعة عن آلية عمل هذه الجسيمات النانوية في الخنازير، وكيف تؤثر في جودة اللحوم. وما يثير الاهتمام أيضًا ارتفاع محتوى الكروم في أنسجة مختارة، مثل العضلة الطويلة Longissimus muscleمقارنة بغير المعاملة، حيث تم العثور على بعض الجسيمات النانوية، مثل Ag+ وCu_2+، والتي تعتبر حاجز الدم في الدماغ (Wang and Zr. 2004).

إن إدراج المواد النانوية في علف الماشية أو المياه يمكن أن يفيد من رفع جودة المنتج الذي يتم الحصول عليه، فضلاً عن دورة الإنتاج. لم تؤثر جزيئات الكروم النانوية المضافة إلى علف الدواجن بشكل إيجابي على محتوى بروتين عضلات الثدي والفخذ فحسب، بل أدت إلى خفض نسبة الكوليسترول في الوقت نفسه، ولكنها رفعت متوسط النفع اليومي وكفاءة التغذية لدجاج اللحم في التي تم تغذيتها بـ 500 ميكروجرام/كجم من الكروم 3^+. وتتمثل الآثار المترتبة على هذه في دورات إنتاج أقصر للحصول على لحوم ذات جودة أفضل مع كمية أقل من العلف المطلوب لوصول الدجاج اللاحم إلى وزن السوق. على العكس من ذلك، عندما تم توفير جسيمات الكروم النانوية، لم يكن هناك تأثير كبير على وزن الجسم أو إنتاج البيض. ومع ذلك، وجد أن جودة البيض تحسنت من ارتفاع مستويات الكروم والكالسيوم في الصفار والقشرة، على التوالي. وقد لوحظ التراكم الحيوي للجسيمات النانوية في الكبد بالنسبة للمجموعة التجريبية، في دراسة تم فيها استبدال المضاد الحيوي ضد الكوكسيديا بجزيئات الفضة النانوية في الماء (0.083 ملغم/كغم من الفضة مقارنة بـ 0.001 ملغم/كغم في مجموعة

المقارنة). حصل مزيد من التفاعل بين تركيز الجسيمات النانوية وجودة اللحوم وهذا سيكون مفيدًا لضمان عدم التضحية بالجودة بعد التعرض طويل الأمد. إن إدراج المكملات الغذائية في علف الماشية، بغض النظر عن حجم الجسيمات، سيفيد المنتوج إذا كان لا يزال هناك طلب من جانب المستهلكين على المنتج النهائي. إذا تم تعزيز اللحوم والبيض التي يتم الحصول عليها من مكملات الجسيمات النانوية التي يتم تغذية الحيوانات عليها، أو لا يمكن تمييزها عن المنتوج الأصلي، فمن المرجح أن تظل مفضلة للمستهلكين. ومع ذلك، من المهم فهم دور مادة الجسيمات النانوية المضافة في نظام بيولوجي معين والمنتجات الثانوية من هذا النظام للتأكد من أنها آمنة للاستهلاك قبل تطبيقها في الإنتاج الحيواني (شكل 4).



شكل 4. تفاعلات المواد النانوية والأنظمة البيولوجية

الجسيمات النانوية وجودة الحليب

التهاب الضرع Mastitis هو مثال على مرض شائع بين أبقار الألبان مع مجموعة متنوعة من العوامل المسببة، غالبًا ما تكون بكتيرية، والتي يمكن أن تتطلب استخدام المضادات الحيوية للتخلص منها. تيلميكوسين Tilmicosin هو مثال على دواء يستخدم في حالات التهاب الضرع وله آثار جانبية سلبية إذا تم إعطاؤه بتركيز عالٍ جدًا. لذلك تم السعي للسيطرة على إطلاق التيلميكوسين باستخدام ناقلات الجسيمات النانوية الدهنية الصلبة بزيت الخروع المهدرجة Hydrogenated castor oil-solid lipid nanoparticle. كان من المثير للقلق اطالة نصف العمر الممتد للعلاج بالنسبة لأوقات التخلص منه في الحليب، حيث كان التيلميكوسين Tilmicosin موجودًا في مصل دم الفأر لمدة 5 ساعات دون وجود حامل نانوي، و8 أيام مع وجود حامل نانوي. ومع ذلك، كانت هناك حاجة لجرعة أقل للعلاج في التهاب الضرع في الفئران الناجم عن المكورات العنقودية الذهبية. إن التلاعب الدقيق بالناقلات النانوية العلاجية لإيجاد توازن بين الجرعة ونصف العمر يمكن أن يفيد المنتجين من خلال تقليل أوقات التخلص منه في الحليب وكمية الهدر في الحليب. يمكن أن تساعد تقنية النانو أيضًا في ضمان أن تكون جودة الحليب آمنة للاستهلاك البشري من خلال تقنيات جديدة للكشف عن مسببات الأمراض المنقولة بالغذاء. لقد تم تطوير مركبات نانوية تحتوي على مضادات Anti-S. aureus antibodies S S مثل الأجسام المضادة للمكورات العنقودية الذهبية، والجسيمات النانوية الذهبية Gold nanoparticles، والجسيمات النانوية المغناطيسية Magnetic nanoparticles لتوفير اختبار لوني مدته 40 دقيقة لوجود المكورات العنقودية الذهبية في الحليب. ومن السمات المثيرة للاهتمام لهذه المركبات النانوية في الجسم المضاد، الذي يمكن تعديل خصوصيته وانتقائيته لالتقاط مجموعة متنوعة من مسببات الأمراض. لقد أظهرت تقنية مماثلة، يستخدم فيها الأجسام المضادة متعددة النسيلة والشرائط المناعية للجسيمات النانوية الذهبية للكشف عن السموم الموجودة في الحليب خلال 10 دقائق، باستخدام

الأفلاتوكسين M1 المسرطن، في حين تم التركيز بشكل كبير على إزالة الملوثات الضارة المحتملة من الحليب، كان هناك أيضًا بعض الاهتمام بخلط مكملات الجسيمات النانوية مباشرة في حليب البقر للاستهلاك البشري. وتم دمج قشرة المحار ذات مسحوق النانو في الحليب بهدف زيادة محتوى الكالسيوم من 100 إلى 120 ملغم / مل إلى مستوى أكثر ملائمة للأطفال المتناميين والنساء بعد انقطاع الطمث. إن مكملات الحليب بالكالسيوم من قشرة المحار ذات المسحوق النانوي لم تغير سلبًا من صفاته الحسية أو الفيزيائية والكيميائية بعد 16 يومًا من التخزين عند 4 درجات مئوية (Sung, *et al*. 2013)

الطب البيطريVeterinary medicine

التشخيص في الوقت المناسب هو مفتاح أي مرض كاستراتيجية للسيطرة عليه. الاختبارات التشخيصية التقليدية يمكن أن يستغرق من ساعات إلى أيام لتقديم النتائج. هذه الاختبارات تحتاج الى العمالة الكثيرة وأحيانا تنطوي على تضخيم مسببات الأمراض. يمكن التغلب على مثل هذه الاختناقات من خلال التطوير العالي لتشخيصات محددة وحساسة وسريعة وقوية، وهي استخدام الجسيمات النانوية المصنعة من أجسام مضادة محددة، والببتيدات، والأحماض النووية، وما إلى ذلك. تكنولوجيا النانو تحمل إمكانات للغاية في الكشف المبكر بدقة عالية حتى قبل ذلك ظهور أعراض المرض .(Manuj, *et al*. 2012)

يعد طب النانو Nanomedicine مجالًا مثيرًا للاهتمام في مجال تكنولوجيا النانو ويظهر تقدمًا في كل من التشخيص Diagnostics والعلاج Therapeutics. تعد الجسيمات المعدنية Metallic والجزيئات ذات البنية النانوية Nanostructured particles أدوات تشخيصية مفيدة في أبحاث الطب الحيوي Biomedical والتي يمكن استخدامها لتصور حالة الخلية أو توزيع الدواء في الجسم. يمكن للخلايا أن تمتص المعادن النانوية المغناطيسية Magnetic Nanoform metals، مثل أكسيد الحديد Iron oxide، وتصويرها في الجسم الحي بتركيزات عالية باستخدام التصوير

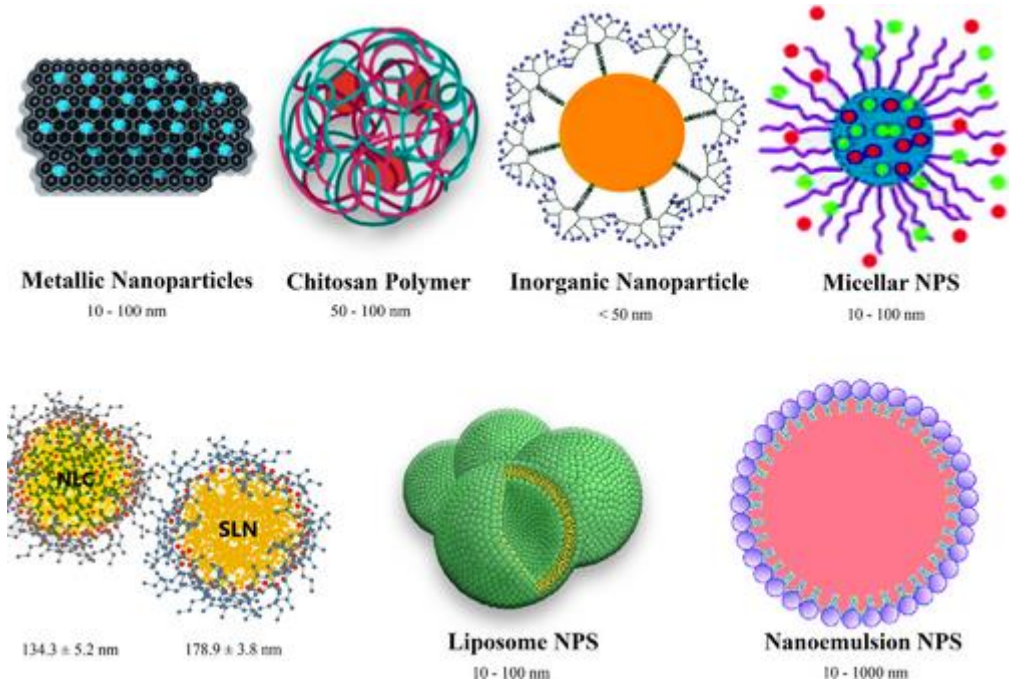
بالرنين المغناطيسي Magnetic Resonance Imaging (MRI). يمكن جعل الجسيمات ذات البنية النانوية تتألق Fluoresce من خلال تنشيط الضوء أو الإثارة ثنائية الفوتونTwo-photon excitation . فضلا عن هذه الجسيمات النانوية التشخيصية، حصلت تطورات مثيرة في تقنيات المختبر على الرقاقة القائمة على الجزيئات Molecular-based lab-on-a-chip technologies لإجراء التحليلات البيولوجية النوعية والكمية. إن الحاجة إلى كميات صغيرة من التحليلات والكواشف، وإنتاج القليل من النفايات، وتقصير أوقات الانتظار، تجعل من تقنيات المختبر على الرقاقة هذه خيارًا جذابًا. يوجد حاليًا عدد من المنتوجات التي تعمل على المستوى المجهري والمتوفرة في السوق، وقد ظهرت مؤخرا منتجات على المستوى النانوي. يمكن مراقبة توصيل الدواء من خلال حاملات النانو الفلورية. Fluorescent nano-carriers على سبيل المثال، يمكن استخدام الجسيمات النانوية المشتقة من الجلوكوز والسكروز ذات البنية النانوية المنشّطة بالضوء Fluorescent nanostructured glucose- and sucrose-derived nanoparticles لمراقبة توطين الادوية والعلاجات الكيميائية المرتبطة. وقد تم إثبات التوافق الحيوي للجسيمات النانوية المشتقة من الكربوهيدرات في خط خلايا سرطان الرئة البشري. ومع ذلك، فإن ميزة توصيل هذا الدواء باستخدام جسيمات متناهية الصغر متألقة Fluoresce بعد تنشيط الضوء لها القدرة على تتبع الدواء. للحصول على تتبع أفضل، فإن استخدام جسيم نانوي حامل يمكن تنشيطه عبر إثارة ثنائي الفوتون Two-photon excitation يمكن أن يوفر صورة مكانية ثلاثية الأبعاد على عمق نسيج أكبر من الجسيم المنشط باستخدام ضوء الأشعة فوق البنفسجية المرئي (Craighead, H. 2006). نظرًا لأن العلاج الكيميائي Chemotherapies يتم تقديمه عادةً في نظام جرعات عالية، فإن القدرة على مراقبة توزيعها في الجسم من خلال التألق يمكن أن تساعد في تقليل الآثار الجانبية غير المستهدفة من خلال استهدافها بشكل أفضل للمناطق المرغوبة. لا يعد التألق سمة

مشتركة بين جميع حاملي أدوية الجسيمات النانوية، ويمكن أن تتنوع آليات ربط الدواء وإطلاقه بشكل كبير، خاصة بين الجسيمات ذات البنية النانوية. يمكن للأنابيب النانوية الأسطوانية Cylindrical nanotubes احتجاز العوامل الصيدلانية داخل مصفوفة داخلية محاطة بطبقة خارجية من البولي – ال-لاكتيد (L-lactide) أو البولي دي لاكتيد (D-lactide). عندما تجتمع هذه المتصاوغات الضوئية Enantiomers معًا في محلول، فإنها تتفاعل مع بعضها البعض لإعادة تشكيل بنياتها من الأسطوانات إلى الكرات، مما يؤدي إلى إطلاق المواد المحاصرة في هذه العملية. ليست هناك حاجة لمحفزات خارجية لإطلاق الدواء كما هو الحال في بعض الجسيمات النانوية المنشطة بالضوء، فقط مجرد تفاعل الأنبوبان النانويان. يمكن أن تكون الجسيمات النانوية الأخرى ذاتية التحميل مثل جسيمات الألبومين-ديكستران النانوية Albumin-dextran nanoparticles مع الأدوية الكارهة للماء. يمكن تثبيت الألبومين الموجود في مصل الأبقار باستخدام الدكستران Dextran في المحاليل المائية ويمكنه ربط الدواء من خلال تفاعلات كارهة للماء والكهروستاتيكية. عند اختبارها باستخدام الإيبوبروفين Ibuprofen، يمكن أن تستوعب جسيمات الألبومين-ديكستران النانوية Albumin-dextran nanoparticles 0.7 وحدة من وزن الإيبوبروفين Ibuprofen لكل وحدة وزن من الجسيم المترافق. تقدم هذه المواد ذات البنية النانوية آليات جديدة لاستيعاب الأدوية وإطلاقها في الطب النانوي، ومن المحتمل أن تكون بمنزلة طرائق لزيادة خصوصية الإطلاق وتقليل فترات التأخر بين توصيل الدواء وتأثيره في المستقبل.

اللقاحات واللقاحات النانوية المساعدة Nanovaccines and Vaccine Adjuvants

أن زيادة معدلات الإصابة بالأمراض، على الرغم من التحصين الشامل، وعدم وجود منتوجات من اللقاحات الفعالة في كثير من الحالات نجد الحاجة إلى تطوير لقاحات جديدة وفعالة على أساس التقنيات الجديدة. اللقاحات المستخدمة في السيناريو الحالي

لها سلسلة قيود خاصة في الحفاظ عليها كالبرودة حتى التسليم للحيوان. وترجع القيود الأخرى إلى العمر المحدود للقاح. وبالتالي متانة اللقاحات قد توفر حلاً لهذه المشكلة عند خزنها تحت درجة حرارة الغرفة. تكنولوجيا النانو قد تستغل هياكل الكائنات الحية الدقيقة التي لديها خصائص وقائية. على سبيل المثال، تم استخدام الجراثيم العصوية الرقيقة مقارنة باللقاحات التقليدية من حيث التخزين في أشكال مجففة بالتجميد، وسهولة الإنتاج والسلامة. ان اللقاحات النانوية المعتمدة على الجراثيم ضد الكزاز المنتجة من مستضدات غير متجانسة كانت تستخدم بنجاح في البشر ويمكن تطبيق نفس التكنولوجيا لإنتاج لقاحات مستقرة وآمنة ضد العديد من الأمراض في الحيوانات. ترتبط الجسيمات النانوية مثل اللاتكس Latex والبولي ستايرين Poly styrene والذهب والسيليكا تساهميًا وقد تم استخدام المستضد لتحضير منتوجات خاصة بالاستجابات المناعية (CMIRs) وكذلك الأجسام المضادة مع الحد الأدنى من الآثار الجانبية. ومن ذلك يمكن تصميم لقاح ضد العديد من الأمراض في وقت واحد باستخدام جرعة واحدة وتطويرها باستخدام أساليب تكنولوجيا النانو (Manuj, *et al*. 2012) (شكل 6).



شكل 6. التطبيقات المستخدمة في مجال الطب البيطري لتطوير لقاح النانو.

يقوم الباحثون أيضًا بتطوير المواد المساعدة فتمت صياغتها باستخدام جسيمات من البوليسترين مترافقة مع الألبومين البيضاوي لزيادة فعالية اللقاح دون الاستجابات الالتهابية، أما بالنسبة لبدء المناعة في اللقاحات البيطرية ضد الكثير الأمراض الفيروسية تم استخدام عامل إطلاق الغدد التناسلية باستخدام المادة المساعدة المعتمدة على ISCOM كلقاح مضاد للحمل للخيول. ان اللقاحات التقليدية عادة ما تكون أنظمة توصيل متعددة الحقن ومتعددة الجرعات. لازالت هذه التقنية في المراحل التجريبية التنموية ولكن قد يكون لها مستقبل عظيم في التطعيم باستخدام مستحلب النانو، وهو عبارة عن تركيبة مائية في زيت مثبتة بكميات صغيرة من المواد الخافضة للتوتر السطحي على الجسم النانوي. وان تغليف المستضدات إلى جسيمات نانوية نشطة بيولوجيا نهج واعد لإيصال اللقاح عن طريق الأنف. لقد تم التوصل الى لقاح مغلف بالنانو بشكل أقراص مصممة لتوصيل اللقاح عن طريق الفم ضد مرض نيوكاسل في

الدواجن وهذا قد يؤدي الى تقديم اللقاح على شكل أقراص للتغلب على المشكلة في الحاجة إلى سلسلة التبريد أثناء نقل اللقاحات (Manuj, *et al*. 2012).

التكاثر Reproduction

يتمحور الإنتاج الحيواني حول الحيوانات المعدة للذبح. الماشية النهائية هي نسل الأفراد المخصصين للتربية التي تمتلك أنماط وراثية وأنماط ظاهرية عالية التصنيف. السمات والقدرات الإنجابية للمربين تمنحهم قيمة عالية. لقد ثبت أن بعض الجسيمات النانوية تعزز الخصوبة وتحمي الحيوانات المنوية من خلال المجموعات الوظيفية التي تحملها. يُفضل التلقيح الاصطناعي على نطاق واسع في الإنتاج الحيواني كبديل لاستراتيجيات التلقيح التقليدي نظرًا لانخفاض المخاطر على الحيوانات والمنتجين. يتم إجراء التلقيح الاصطناعي بشكل شائع لتنويع الخلفيات الوراثية وتعزيز اختيار سمات الماشية، ومن الممكن تعزيزه من خلال دمج تقنيات النانو مثل التصوير الحيوي غير الجراحي للأمشاج Non-invasive bioimaging of gametes ، والتنقية النانوية Nanopurification ، والمواد الحافظة في الحفظ بالتبريد Protectants in cryopreservation. cryopreservation. من أجل تحسين كفاءة التلقيح الاصطناعي Artificial insemination، يجب أولاً توضيح بيولوجيا الأمشاج الحيوانية Livestock gamete biology والعقبات الإنجابية Reproductive obstacles التي تعترض الإخصاب. في الآونة الأخيرة، تم استكشاف النقاط الكمومية Quantum كوسيلة بحث لتحسين فهم حركة الحيوانات المنوية والبويضة في الثدييات وتفاعلاتها في البيئة الفسيولوجية. تعتبر هذه الجسيمات النانوية غير العضوية ذاتية الإضاءة Self-illuminating, inorganic nanoparticles ذات أهمية في مجال علم التوالد Theriogenology لأنها متوافقة حيويًا ومستقرة ضوئيًا ولها كثافة إشارة أكبر من جزيئات الفلورسنت العضوية المستخدمة سابقًا لتصوير الأمشاج وأنواع الخلايا الأخرى في الجسم الحي.

أثبتت قدرة التتبع في الوقت الحقيقي للجسيمات النانوية ذات النقطة الكمومية المرتبطة بنقل طاقة الرنين الحيوي Bioluminescent resonance energy transfer-conjugated quantum dot (BRET-QD) في المختبر، وفي الموقع، وخارج الجسم الحي باستخدام الأمشاج الذكورية Big male gametes. يمكن أن توفر النقاط الكمومية Quantum تصويرًا مستهدفًا أو غير مستهدف كدالة لحجمها، والأطوال الموجية المنبعثة، وإمكانيات الاقتران. يوفر هذا الجسيم النانوي المصمم هندسيًا وسيلة جديدة لتصور الأحداث الجزيئية والخلوية أثناء الإخصاب، بطريقة مشابهة للبروتينات الفلورية، ولكن على أعماق أكبر في الأنسجة. تعتمد قوة إشارة النقاط الكمومية Quantum على الجرعة وقد تكون هناك حاجة إلى تركيز أعلى للتصوير في الجسم الحي على الحيوانات الكبيرة. وبالتالي، ينبغي تحسين تكوين النقاط الكمومية بشكل أكبر من أجل التوافق الحيوي حيث أن العديد من النقاط الكمومية الحالية تشمل معادن ثقيلة، مثل الكادميوم والرصاص، والتي قد تكون سامة للخلايا عند مستويات عالية. ومع ذلك، إذا تم اختيار تركيزات النقاط الكمومية وكيمياء السطح بعناية، فقد يتم تقليل السمية الخلوية أو القضاء عليها (Fengang, *et al*. 2015).

يمكن استخدام التنقية النانوية Nanopurification للسائل المنوي لفصل الحيوانات المنوية التالفة عن الحيوانات المنوية السليمة وغير التالفة. تتمثل إحدى الطرق في تغطية الجسيمات النانوية المغناطيسية بأجسام مضادة ضد اليوبيكويتين Ubiquitin، وهو علامة سطحية للحيوانات المنوية التالفة، من أجل استراتيجية إزالة تعتمد على البروتين على سطح الحيوان المنوي من خلال تلف الجسيم الطرفي. حققت الحيوانات المنوية للثور المنقى بتقنية النانو Nanopurified bull (Bos taurus) spermatozoa معدلات حمل مساوية لتلك الموجودة في السائل المنوي غير المنقى بنصف التركيز مع عدم وجود آثار سلبية مسجلة على الأبقار أو العجول الملقحة. وبالتالي، يمكن تلقيح عدد أكبر من الإناث من عينة واحدة من القذف المخفف المنقى بالنانو. إن المزيد من تحديد المؤشرات الحيوية للحيوانات المنوية سيسمح بزيادة

القدرة على الاختيار وتحسين الخصوبة، على النحو المستهدف من خلال استراتيجيات الأجسام المضادة أو الليكتين The antibody or lectin strategies (Agaral, *et al*. 2007)

يمكن تعزيز حفظ الحيوانات المنويةCryopreservation of sperm بالتبريد عن طريق التحول إلى إضافات حماية النانو في الموسعات Extenders. تُستخدم الموسعات لتخفيف الحيوانات المنوية، وهي عوامل تخزين مؤقتة وتزود الحيوانات المنوية بالعناصر الغذائية اللازمة للتخزين لمدة طويلة. إنها تعمل على حماية واحتواء المضادات الحيوية، لمنع نمو البكتيريا من التأثير على جودة الحيوانات المنوية وإصابة الإناث الملقحة. قد تعمل الجسيمات النانوية المضادة للميكروبات على استبدال المضادات الحيوية الموسعة في المستقبل حيث ثبت أن بعض المضادات الحيوية تمنع حركة الحيوانات المنوية وحيويتها بطريقة تعتمد على الجرعة. قد تسهل الجسيمات النانوية أيضًا إضافة المنتوجات الطبيعية في الموسعات لزيادة حركة الحيوانات المنوية. أفادت مجموعات بحثية أن إضافة العسل وعصير قصب السكر وعصير الطماطم وعصير الأناناس يمكن أن يزيد من بقاء الحيوانات المنوية المخزنة في درجة حرارة الغرفة. سيكون من المثير للاهتمام معرفة كيف ستتأثر جودة الحيوانات المنوية إذا تم تسليم المجموعات الوظيفية لكل منتج عبر الجسيمات النانوية. نظرًا لأنه يمكن شحن الحيوانات المنوية دوليًا على مدار عدة أيام، فإن الموسعات ذات القدرة الأعلى على حفظ العينات الخاضعة لدورات التجميد والذوبان ستكون مفيدة.

قد يكون من الممكن تحقيق المزيد من التقدم في التكنولوجيا الحيوية الإنجابية مع زيادة إدراج الجسيمات النانوية في تقنيات البيولوجيا الجزيئية. يعد نقل الجينات بوساطة الحيوانات المنوية أحد هذه الأساليب حيث يمكن تحميل جسيمات السيليكا النانوية متوسطة المسام بالأحماض النووية والبروتينات. يمكن لهذه الجسيمات النانوية أن تشكل ارتباطات قوية مع الحيوانات المنوية في المختبر، وليس لها أي تأثيرات ضئيلة على وظيفة الحيوانات المنوية أو جودتها. أن التحويلات باستخدام

الجسيمات النانوية البوليمرية، مثل PDMAEMA، والكيتوسان، والبولي إيثيلين أمين، مفيدة على الطرائق الفيروسية التقليدية بشرط استخدام تركيزات منخفضة من البوليمرات. إن الوزن الجزيئي للبوليمر النانوي له تأثير كبير على فعاليته وسميته، أي أن الوزن الجزيئي الأمثل لل Transfection مع PDMAEMA قد تم تحديده ليكون 60 كيلو دالتون KDa . ومع استمرار الاستكشاف والتحسين، يمكن للجسيمات النانوية أن تلعب دورًا مهمًا في تكاثر الحيوانات. ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أن بعض الجسيمات النانوية سامة للحيوانات المنوية ما قد يكون له عواقب وخيمة إذا تأثر تكاثر المربي. تعد جزيئات أوكسيد الزنك وأكسيد التيتانيوم النانوية مثالين على تقليل صلاحية الحيوانات المنوية في المختبر بطريقة تعتمد على الجرعة والوقت عن طريق إضعاف الغشاء وتفتيت الحمض النووي. وبهذا الصدد تم احتضان الحيوانات المنوية البشرية بجسيمات نانوية من أوكسيد الزنك ووجدت أن تركيز 500 ميكروغرام / مل من شأنه أن يزيد بشكل كبير من موت الخلايا بعد 45 دقيقة، في حين أن تركيز 100 ميكروغرام / مل من شأنه أن يزيد بشكل كبير من موت الخلايا بعد 180 دقيقة. كما وجد أن الحيوانات المنوية الجاموسية (Bubalus bubalis) المحتضنة بـ 100 ميكروغرام/مل من جزيئات أكسيد التيتانيوم النانوية من شأنها أن تقلل من قابليتها للحياة. عند 10 ميكروغرام/مل، وجد أن أوكسيد التيتانيوم يزيد من قدرة الحيوانات المنوية قبل الأوان، وهي الخطوة النهائية المطلوبة في نضوج الحيوانات المنوية لاختراق البويضات والتخصيب. في حين أن الجسيمات النانوية قد تكون نقاط تقدم في صناعة الإنتاج الحيواني، إلا أنه ينبغي أيضًا اتخاذ الاحتياطات اللازمة عند النظر في استخدام الجسيمات النانوية للمساعدة في التكاثر.

الآفاق المستقبلية Future prospects

مع استمرار تطور تكنولوجيا النانو وجذب المزيد من الاهتمام، ستصبح تطبيقاتها في صناعة الإنتاج الحيواني أكثر توسعًا. من المحتمل أن يكون من الممكن في المستقبل القريب الإدراج المنتظم لمكملات النانو لتحصين علف الماشية، ومع ذلك، سيستغرق

الأمر وقتًا أطول حتى تحل الجسيمات النانوية محل المضادات الحيوية في الأعلاف بشكل كامل، حيث لا يزال يتعين اختبار العديد من مرشحي المبيدات الحيوية في الجسم الحي قبل الخضوع للتجارب السريرية واختبارات سلامة الأغذية وفقًا للوائح الحكومية. لقد تم بالفعل دمج الاستخدامات الخارجية للجسيمات النانوية في بعض جوانب الإنتاج الحيواني، مثل ضمادات الجروح المطهرة، وسيتبع ذلك المزيد. بالنسبة للدراسات المهتمة بالجسيمات النانوية ذات الخصائص المضادة للسرطان، من المهم دراسة السمية الخلوية للجسيمات النانوية في كل من خطوط الخلايا السرطانية وخطوط الخلايا الطبيعية والصحية. إن استخدام الخلايا السرطانية فقط والادعاء بأن الجسيمات النانوية قيد التحقيق لها خصائص مضادة للسرطان قد يكون أمرًا مضللاً، حيث أن الجسيمات النانوية قد تكون سامة لجميع أنواع الخلايا. هناك حاجة لدراسات في الجسم الحي للتحقق من وظائف الجسيمات النانوية التي تظهر في الأبحاث المختبرية. أن تجارب الجسيمات النانوية ذات الصلة بصناعة الإنتاج الحيواني ووجود ثغرات في المعرفة التي تتطلب إجراء أبحاث مستقبلية (Hu and Hsien. 2015).

المصادر

Agarwal S, Zhang Y, Maji S, Greiner A. 2007. PDMAEMA based gene delivery materials. Pharmaceut Res. 2007;24:1590–8.

Ban C, Park SJ, Lim S, Choi SJ, Choi YJ. 2015. Improving flavonoid bioaccessibility using an edible oil-based lipid nanoparticle for oral delivery. J Agric Food Chem. 2015;63:5266–72.

Colles FM, Cain RJ, Nickson T, Smith AL, Roberts SJ, Maiden MCJ. 2015. Monitoring chicken flock behaviour provides early warning of infection by human pathogen *Campylobacter*. Proc R Soc B. 2015;283:20152323.

Craighead H. 2006. Future lab-on-a-chip technologies for interrogating individual molecules. Nature. 2006;442:387–93

Emmerson DA, Anthony NB, Nestor KE, Saif YM. 1991. Genetic association of selection for increased leg muscle and increased shank diameter with body composition and walking ability. Poult Sci. 1991;70:739–45.

Feugang JM, Youngblood RC, Greene JM, Willard ST, Ryan PL. 2015. Self-illuminating quantum dots for non-invasive bioluminescence imaging of mammalian gametes. J Nanobiotechnol. 2015;13:1–16.

Ghosh D, Pramanik A, Sikdar N, Ghosh SK, Pramanik P. 2010. Amelioration studies on optimization of low molecular weight chitosan nanoparticle preparation, characterization with potassium per sulfate and silver nitrate combined action with aid of drug delivery to tetracycline resistant bacteria. Int J Pharm Sci Drug Res. 2010;2:247–53

Haham M, Ish-Shalom S, Nodelman M, Duek I, Segal E, Kustanovich M. 2012. Stability and bioavailability of vitamin D nanoencapsulated in casein micelles. Food Funct. 2012;3:737–44.

Hill, E. and Li, J. 2017. Current and future prospects for nanotechnology in animal production. Journal of Animal Science and Biotechnology volume 8: 1-13.

Hu S, Hsieh Y. 2015. Synthesis of surface bound silver nanoparticles on cellulose fibers using lignin as multi-functional agent. Carbohydr Polym. 2015;131:134–41.

Huijskens EGW, Smit LAM, Rossen JWA, Heederik D, Koopmans M. 2016. Evaluation of patients with community-acquired pneumonia caused

by zoonotic pathogens in an area with a high density of animal farms. Zoonoses Public Health. 2016;63:160–6.

Nieto CAR, Meza-Herrera CA, Cedillo FDJM, Najera MDJF, Vazquez HGG, Perez FDJV. 2016. Vitamin E supplementation of undernourished ewes pre- and post-lambing reduces weight loss of ewes and increases weight of lambs. Trop Anim Health Prod. 2016;48:613–8.

Sung YJ, Suk HJ, Sung HY, Li T, Poo H, Kim MG. 2013. Novel antibody/gold nanoparticle/magnetic nanoparticle nanocomposites for immunomagnetic separation and rapid colorimetric detection of *Staphylococcus aureus* in milk. Biosens Bioelectron. 2013;43:432–9.

Wang MQ, Xu ZR. 2004. Effect of chromium nanoparticle on growth performance, carcass characteristics, pork quality and tissue chromium in finishing pigs. J Anim Sci. 2004;17:1118–22.

Zhang H, Wang D, Butler R, Campbell NL, Long J, Tan B. 2008. Formation and enhanced biocidal activity of water-dispersable organic nanoparticles. Nat Nanotechnol. 2008;3:506–11.

Manuja, A., Kumar, B. and Singh, R. G. 2012. Nanotechnology developments: opportunities for animal health and production. Nanotechnology Development 2012; volume 2:e4. doi:10.4081/nd.2012.e4

الفصل الخامس

أولا: تطبيقات تقنية النانو في مجال التربة والمياه

1- المقدمة

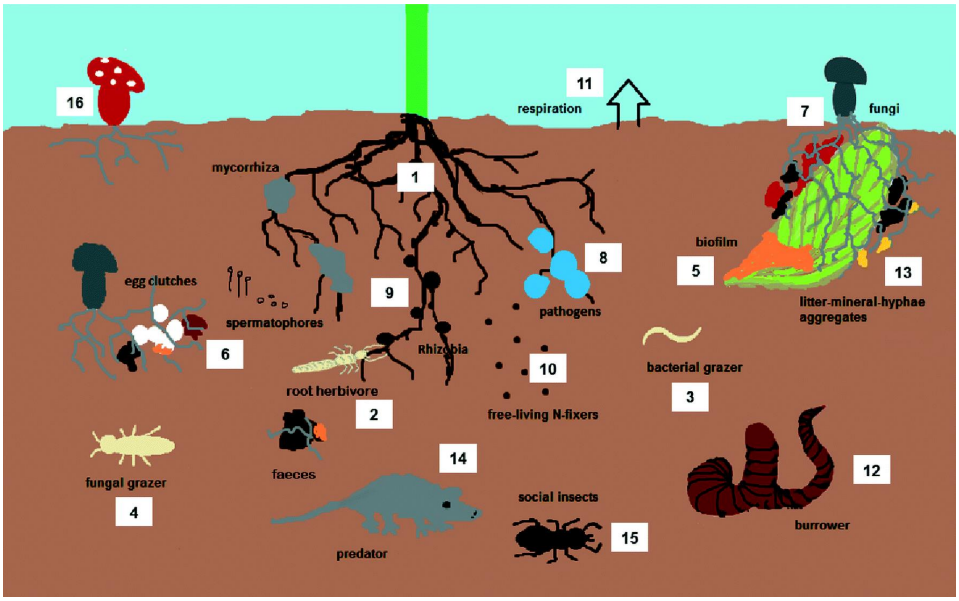
لقد تطورت أحدث التطبيقات للجسيمات النانوية بتقنية النانو، والتي كانت مفتاحًا لأنجح الإنجازات في مجال معالجة تلوث التربة والمياه. الجسيمات النانوية NPs المستخدمة هي مواد ماصة نانوية، وأجهزة استشعار نانوية، وأغشية نانوية، ومطهرات، وتعد أنشطة تحفيزية عالية، وتفاعل كيميائي عالي، ما يمنحها درجة عالية من الأداء الوظيفي إلى جانب خواص بصرية وحرارية وكهرومغناطيسية وميكانيكية غير عادية وخصائص هيكلية ومورفولوجية. توفر جميع خصائص الجسيمات النانوية NPs هذه فضلا عن توفرها على نطاق واسع ميزات مناسبة لمعالجة مياه الصرف الصحي وتنقية المياه وعمليات معالجة التربة والرواسب (Cloete, *et al*. 2013).

تتمتع المواد النانوية بالقدرة على تحسين جودة التربة والمياه وإزالة التلوث من الكائنات الحية الدقيقة غير المرغوب فيها والمعادن الثقيلة وغيرها. وفي هذا المجال تجري العديد من الدراسات حول تحسين نوعية التربة الزراعية، وبالتالي زيادة الممارسات الزراعية المستدامة. نظرًا لصغر حجم ومساحة سطح كبيرة للجسيمات النانوية، فهي شديدة التفاعل ولها العديد من الخصائص الفريدة (على سبيل المثال، قدرة تبادل الكاتيونات المحسنة، وإطلاق المغذيات على المدى الطويل، وتوصيل المغذيات) التي يحتمل أن تكون مجدية للاستخدام في مشاكل ترميم التربة. فيما يتعلق بإدارة جودة المياه، تمنع الجسيمات النانوية NMs نمو الأغشية الحيوية وتزيل الكائنات الحية الدقيقة غير المرغوب فيها من المياه الملوثة. يتم استخدام الجسيمات النانوية NMs مثل الجسيمات النانوية الفضية (NPs) وغيرها من الأكاسيد المعدنية النانوية، مثل أكسيد التيتانيوم وأكسيد المغنيسيوم والنحاس وأكسيد النحاس وأكسيد الزنك وسيلينيوم والكادميوم كعوامل مضادة للميكروبات. يعد تحضير المركبات النانوية المضادة للميكروبات ذات القدرة العالية على التثبيت، مما يقلل من المخاطر المحتملة

لتسرب الجسيمات النانوية NPs، ذا أهمية قصوى لخصائصها المضادة للميكروبات المتفوقة. أصبح نقص المياه النظيفة الآن مصدر قلق عالمي، وهو ما ينعكس في "خطة التنمية المستدامة في المستقبل" Sustainable development goals (SDG) واحتلت المركز السادس تحت عنوان "ضمان توافر المياه والصرف الصحي وإدارتها المستدامة للجميع" من بين أهداف التنمية المستدامة الـ 17، المعتمدة من قبل جميع الدول الأعضاء في الأمم المتحدة في عام 2015. هناك حاجة إلى عمليات معالجة التربة وتنقية المياه المستدامة من أجل بيئة مستدامة على الأرض، ومع ذلك، فإن الهدف يمثل تحديًا حاليًا بسبب النمو السكاني المتزايد، وانتشار التحضر، و التصنيع الذي يعطل النظم البيئية الطبيعية، ويستنزف الموارد الطبيعية، ويتسبب في نقص مياه الشرب ، وينتج كميات هائلة من النفايات الخطرة في البيئة بطرق مختلفة وتلوث الهواء والماء والتربة، وهذه الملوثات لديها القدرة على التأثير سلبًا على صحة الإنسان وتعريض نوعية البيئة للخطر لأنها تدخل الجسم عن طريق البلع أو الاستنشاق أو الامتصاص. قد تشمل ملوثات التربة والمياه مواد عضوية مثل المبيدات الحشرية (Azizul,*et al*. 2023).

المبيدات الحشرية والهيدروكربونات والفينولات والمعادن الثقيلة مثل الكاديوم والرصاص والزئبق والزرنيخ والكائنات الحية الدقيقة المسببة للأمراض عادةً ما تتراكم الملوثات العضوية الثابتة Persistent organic pollutants (POPs) والمعادن الثقيلة بيولوجيًا من خلال سلاسل الغذاء ما يشكل مخاطر كبيرة على البشر والحياة البرية (شكل 1). ولذلك، هناك حاجة ملحة لمعالجة الملوثات البيئية الخطرة. يرجع الاهتمام المتزايد بتكنولوجيا النانو على التقنيات التقليدية (Fan, *et al*. 2013) إلى تهديدات التلوث الثانوي وارتفاع تكلفة الأساليب التقليدية للمعالجة مثل الكلورة والأوزون. توفر تكنولوجيا النانو أساليب واعدة ومستدامة وفعالة من حيث التكلفة وفعالة لتحقيق المعالجة البيئية. ومع ذلك، لا تزال هناك بعض القيود على كيفية استخدام الجسيمات النانوية NPs لمعالجة التربة والمياه. إن سهولة التجميع، والميل

السريع للتخميل، والحساسية للعوامل الجيوكيميائية، والمخاوف المتعلقة بصحة الإنسان والبيئة لمختلف الجسيمات النانوية NPs هي بعض القيود المؤكدة على تطبيقها. شهدت الأبحاث حتى الآن العديد من المحاولات لتصنيع مواد نانوية مختلفة، والتي تشمل، في جملة أمور، الألياف النانوية، والقضبان النانوية، والأسلاك النانوية، والأحزمة النانوية، وما إلى ذلك باستخدام الترسيب الضوئي (PD) photocatalytic deposition، والترسيب (DP) deposition-precipitation، وتحلل البخار الكيميائي (CVD) chemical vapour decomposition، وتحلل المحاليل الكيميائية. (CSD) chemical solution decomposition، والتشعيع بالموجات فوق الصوتية ultrasonic irradiation، والطرائق الكيميائية الرطبة wet chemical، والسول جل، sol-gel والطرق الحرارية، والحرارية المائية (Khajeh, *et al.* 2013)، وما إلى ذلك. تعمل الجسيمات النانوية NPs التي تستخدم الميكروبات والمركبات المنتجة ميكروبيًا والعوامل التي تتوسط المستخلصات النباتية على توسيع نطاق NPs ويُعتقد أنها ميسورة التكلفة وحميدة بيئيًا من استخدام الطرائق التقليدية. يمكن أيضًا الحصول على مواد جديدة بوساطة التعديل الكيميائي والفيزيائي لأسطح الجسيمات النانوية NPs، وبالتالي يمكن لتقنية النانو التغلب على العديد من التحديات المعقدة التي تعيق تطبيق الجسيمات النانوية NPs أثناء العمليات العلاجية.



شكل 1. آثار المواد النانوية الهندسية القائمة على المعادن على مجتمعات التربة

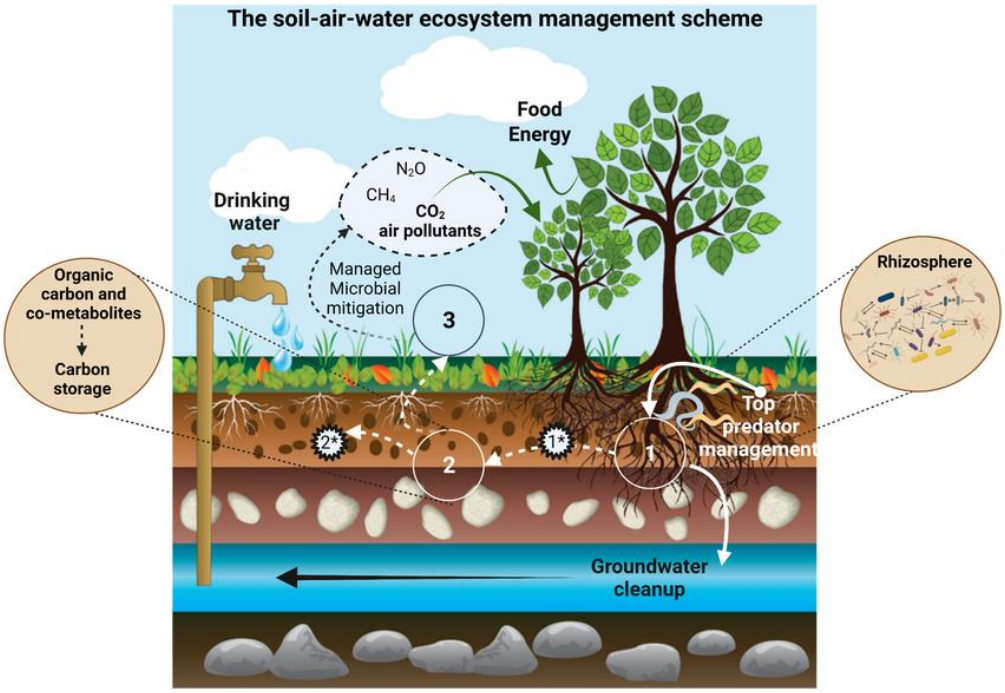
2. الجسيمات النانوية في بيئة التربة والمياه Nanoparticles in soil and water

يتزايد باستمرار تطبيق الجسيمات النانوية في تقنيات معالجة المياه والتربة ويتطور إلى طرق جديدة. إن المشكلة الأكثر انتشارًا والتي لا يمكن تجنبها في بعض الحالات في عالم اليوم هي التلوث البيئي. أثناء عملية التعدين، يتم ترشيح كميات كبيرة من المعادن الثقيلة السامة مثل الرصاص والزرنيخ والكروم والكادميوم والحديد والنحاس والزنك والزئبق. يتم إطلاق هذه النفايات السائلة بشكل متكرر في الأنهار المتحركة دون معالجة مناسبة(Ma, *et al.* 2019) ونتيجة لذلك، يتم نقل المعادن الثقيلة القابلة للذوبان بسهولة إلى المياه الجوفية والرواسب والتربة وتشكل تهديدًا طويل المدى كمواد ملوثة. فضلا عن ذلك، يمكن لصناعة النفط ووحدات التصنيع والصناعات الأخرى وصهاريج التخزين تحت الأرض أن تساهم جميعها في تلوث التربة والمياه الجوفية عن طريق إطلاق المذيبات والمواد العضوية من خلال التسرب والتعامل غير المسؤول مع المواد الكيميائية الاصطناعية. يمكّن علم النانو الباحثين

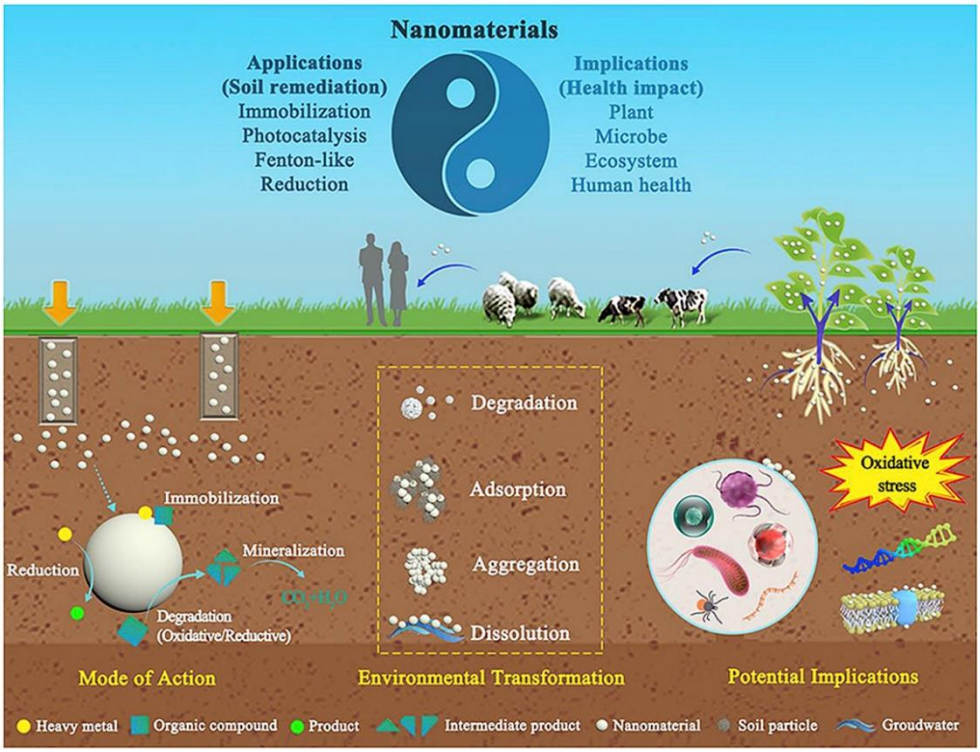
من دراسة مواد جديدة على مقياس النانو، مما يوفر لتكنولوجيا النانو إجابة محتملة وصديقة للبيئة للمشكلات التي تشكلها مياه الصرف الصحي والنفايات الصلبة والمواقع الملوثة على البيئة. يتضمن استخدام تكنولوجيا النانو في مجال البيئة تطوير منتجات صديقة للبيئة، وإزالة الملوثات الخطرة من المواد الملوثة وتطوير أجهزة استشعار العوامل البيئية. نظرًا للخصائص المفيدة للجسيمات النانوية NPs، فقد اكتسب تطوير بدائل لتقنيات العلاج التقليدية، مثل استخدام الجسيمات النانوية بسبب تفاعلها الجوهري المتزايد يمكنها تحويل و/أو إزالة السموم من الملوثات طويلة المدى بسرعة وإزالة النفايات الخطرة. على سبيل المثال، أكدت الجسيمات النانوية NPs مثل الحديد الصفري التكافؤ النانوي (Nanoscale zerovalent Iron (nZVI ، الذي يتفوق في الأداء على أنواع الحديد النموذجية من حيث التفاعل السريع، والانقطاع المحدود، وعدم السمية، وقلة التكلفة، استخدامات كبيرة في معالجة التربة والمياه. ومن الأمثلة على تطبيق تكنولوجيا النانو في الموقع للعلاج هو حقن الجسيمات النانوية (المتنقلة) التفاعلية أو الممتصة في نظام مائي للمناطق الملوثة.

بشكل عام، أثبت ان الجسيمات النانوية NPs المختلفة لها فائدة في تنظيف البيئة، والتي تعتمد على: المعدن، وأكسيد المعدن، والكربون، والسيليكا، والبوليمر. يمكن إزالة المعادن الثقيلة والملوثات العضوية المكلورة من المياه والتربة الملوثة باستخدام مجموعة متنوعة من المعادن والملوثات العضوية الثابتة بناءً على أكاسيدها. يمكن لأوكسيد التيتانيوم TiO_2 القضاء على البكتيريا والروائح والأوساخ والملوثات الأخرى (شكل 2، 3). كما يمكن لـ TiO_2 أن يمتص فوتونات الأشعة فوق البنفسجية ما يساعد في إنتاج الجذور المؤكسدة O H و O-/H O على سطح أشباه الموصلات بسبب نشاط التحفيز الضوئي الخاص به. تتمتع هذه الجذور بالقدرة على أكسدة الملوثات العضوية وتحويلها إلى ثاني أكسيد الكربون والماءH_2O من خلال التمعدن. يمكن لـ TiO_2 أن يقتل البكتيريا والفطريات بسبب الفوتونات فوق البنفسجية. يبقى الزجاج المطلي بـ TiO_2 واضحًا ونظيفًا بسبب خاصيته المحبة للماء. ويجري أيضًا تطوير

المفاعلات المعتمدة على TiO_2 لمعالجة تلوث الهواء والقضاء على الروائح. يعد استخدام TiO_2 لتنقية المياه حاليًا محط اهتمام الباحثين في جميع أنحاء العالم. ونظرًا لمرونته الكبيرة، وامتصاصه، وتحفيزه في عمليات المعالجة البيئية، فإن الجسيمات النانوية NPs القائمة على السيليكا لديها مجموعة واسعة من التطبيقات. تعمل الجدران السطحية والمسامية لمواد السيليكا كمواد ماصة ومحفزة جيدة بسبب وجود مجموعات وظيفية مختلفة. وهكذا، أدت أسطح مواد السيليكا مع مجموعات الهيدروكسيل إلى تحسين تعديل السطح والترطيب وامتصاص الغاز (Guessa, *et al*.2018)، في حين تناولت الألومينوسيليكات Aluminosilicates مع تعديلات الأمين ومركبات الكربونيل من إزالة الأصباغ العضوية والأيونات المعدنية والملوثات من سطح المسطحات المائية ومياه الصرف الصحي عن طريق تشغيل السيليكا متوسطة المسام مع مجموعات COOH. يعد تفعيل مواد السيليكا باستخدام مجموعات الأمينو والأمينوبروبيل والثيول amino, aminopropyl, and thiol groups مفيدًا في معالجة أيونات المعادن مثل Cd^{2+}، وCo^{2+}، وCu^{2+}، وZn^{2+}، وNi^{2+}، وAl^{2+}، وCr^{3+}، وPb^{2+} وHg^{2+}، وU^{6+}. على الرغم من أن جميع المعادن والسيليكا والمصادر المعدنية القائمة على الكربون لها مساحات سطحية كبيرة للغاية وتفاعلية كبيرة، إلا أن استخداماتها في المعالجة البيئية محدودة بشكل عام بسبب انخفاض استقرارها وتراكمها.



شكل 2. خدمات النظام البيئي للتربة المرتبطة بشكل مباشر بالمجتمعات الميكروبية والتي يمكن تحفيزها وهندستها للوصول إلى أهداف التنمية المستدامة. (1) منطقة الجذور التي تتفاعل فيها الكائنات الحية الدقيقة النباتية الحميمة، على سبيل المثال. يمكن أن يؤدي ذلك، مدفوعًا بإدارة الكائنات المفترسة العليا للكائنات الحية الدقيقة، إلى تحسين نمو النباتات لأغراض مثل الغذاء والأعلاف ومحاصيل الطاقة وإنتاج المياه الجوفية. (2) المواد العضوية وغير العضوية التي تنتجها النباتات (المشار إليها بالرقم 1*) والكائنات الحية الدقيقة، على سبيل المثال. في الأراضي العشبية، وبالتالي تساهم في تكوين الكتلة النخرية وتخزين الكربون (يشار إليه بـ 2*). (3) الإدارة السليمة لميكروبات التربة يمكن أن تقلل من تركيزات غازات الدفيئة في الغلاف الجوي عن طريق إزالة ثاني أكسيد الكربون والميثان وأكسيد النيتروز والملوثات الأخرى من الهواء



شكل 3. دور الجسيمات النانوية في معالجة تلوث التربة.

أصبح استخدام الجسيمات النانوية NPs في المعالجة ممكنًا أيضًا بفضل خصائصها التحفيزية والتحفيزية الضوئية والامتزازية حتى في درجة الحرارة المحيطة، يمكن لتركيز متواضع نسبيًا من جسيمات الذهب النانوية NPs (قطر 5 نانومتر) أن يحفز تحويل ثاني أكسيد الكربون الخطر إلى ثاني أكسيد الكربون الاعتيادي. ولذلك تحتوي أقنعة وأجهزة التنفس الخاصة برجال الإطفاء على جسيمات الذهب النانوية NPs التي تعمل على أكسدة ثاني أكسيد الكربون. ولإزالة الزرنيخ من طبقات المياه الجوفية، يتم استخدام جسيمات اوكسيد الحديد النانوية NPs التي يمكنها امتصاص كل من As_3+ وAs_5+ بشكل فعال جدًا بوساطة أكاسيد الحديد. أصبحت مرشحات المياه الزرنيخية متاحة الآن تجاريًا وتستخدم راتنجات أساسها أكسيد الحديد. في السنوات القليلة الماضية، كانت هناك العديد من التطورات الرائعة في مجالات الصناعات الزراعية والغذائية والأسمدة باستخدام الجسيمات النانوية NPs. على سبيل المثال، يتم استخدام

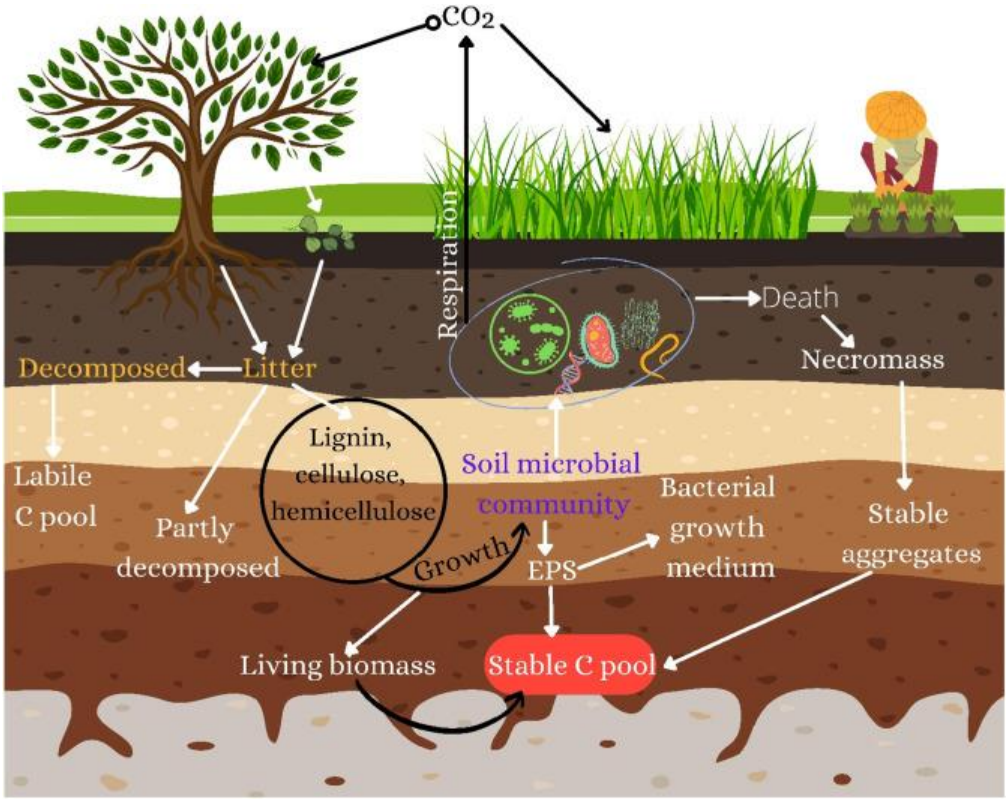
الأدوات الذكية لتوزيع الأسمدة، ويتم استخدام الزيوليت النانوي Nanoporous zeolites لزيادة فعالية الأسمدة، ويتم استخدام أجهزة الاستشعار النانوية لقياس جودة التربة. اجريت دراسات أخرى حول استخدام الجسيمات النانوية NPs الفضية والطين النانوي لتعزيز ترشيح المياه فضلا عن استخدام أجهزة الاستشعار النانوية للعثور على الفيروسات في الطعام. أصبح الكشف عن الاحياء المجهرية الفيروسية والبكتيرية والفطرية في التربة والمياه ممكنا من خلال استخدام أجهزة الاستشعار النانوية.

أثناء عمليات التصنيع والتطبيق، يتم تفريغ الجسيمات النانوية المهندسة في البيئة ما يؤدي إلى تلويث الأرض والمياه وإمدادات الغذاء، مما قد يعرض صحة الإنسان وجودة البيئة للخطر وهذا يحصل بشكل طبيعي في الماء والتربة. ونتيجة لذلك، أثار التعرض البشري للمصادر الطبيعية البيئية مخاوف بشأن آثارها الضارة. يحدد استخدام الجسيمات النانوية NPs المعدلة كيفية انتقالها إلى البيئة، يمكن العثور على الجسيمات النانوية من TiO_2 وZnO وFe_2O_3 وAg والفوليرين Fullerene من منتوجات العناية الشخصية ومستحضرات التجميل وفي المياه السطحية ومياه الصرف الصحي، بينما قد تحتوي التربة والمياه السطحية والمياه الجوفية ومياه الصرف الصحي على الحديد والرصاص والبولي يوريثين Polyurethane المتولد أثناء معالجة المياه وإجراءات المعالجة البيئية. يمكن العثور على SiO_2 المسامي في التربة، والمياه السطحية، والهواء، والذي يستخدم في الكيماويات الزراعية. يمكن أيضًا العثور على الفضة والطين النانوي وأكسيد التيتانيوم من صناعة تعبئة المواد الغذائية في التربة والنفايات الصلبة، فضلا عن الأدوية النانوية والناقلات من قطاعي الأدوية والطب. ومع ذلك، فإن استخدام المبيدات الحشرية من المرجح أن يؤدي إلى تلوث التربة والمياه السطحية، ومن المرجح أن يحدث التصريف المباشر للجسيمات النانوية في المياه السطحية والجوفية عند استخدام الجسيمات النانوية NPs في عمليات تنقية المياه(Boxal, *et al*. 2009) .

قد تؤثر درجة التجميع، ونطاق حجم الركام، وأنواع التجميع، والخصائص السطحية للجزيئات على كيفية تصرف الجسيمات النانوية NPs وكيفية تفككها في أنظمة التربة والمياه. تعد المتغيرات البيئية بما في ذلك الرقم الهيدروجيني والقوة الأيونية وكمية الكربون العضوي المذاب بعض الأمثلة على الظواهر التي قد يكون لها أيضًا تأثير على التجميع والخصائص السطحية للجسيمات النانوية NPs الطبيعية والاصطناعية. قد تترسب الجسيمات النانوية NPs بالاشتراك مع رواسب اخرى بعد تجميعها، وفقًا لبعض التحقيقات قد تتحلل أيضًا بعض الجسيمات القائمة على البوليمر بشكل طبيعي. تذهب الجسيمات النانوية NPs إلى المسطحات المائية من خلال الجريان السطحي والترشيح وتدفق الصرف بعد خضوعها لآليات الامتصاص والتجميع والتحلل الحيوي و/أو اللاأحيائي بمجرد إطلاقها في بيئة المياه والتربة. يمكن استخدام المواد الخافضة للتوتر السطحي لتغيير حركة ونقل الجسيمات النانوية NPs اعتمادًا على سلوك تشتت التجميع للجسيمات، والتي تتأثر بالعوامل البيئية مثل الرقم الهيدروجيني وتركيزات الأيونات. لفهم التفاعلات المعقدة للجسيمات النانوية المجمعة مع الرواسب والمواد الصلبة العائمة مثل المواد العضوية الطبيعية natural organic (NOM) matter، فضلاً عن ثباتها في التربة والبيئة المائية، يلزم إجراء المزيد من الأبحاث.

يعد التراكم الحيوي Bioaccumulation والتركيز الحيوي Bioconcentration للجسيمات النانوية NPs في الكائنات المائية والبرية وكذلك في الغذاء مصدر قلق حاليًا، كما هو الحال مع وجود الجسيمات النانوية NPs في الطبيعة. تعد اللافقاريات والأسماك والطحالب والبكتيريا من أهم الأنواع البيئية التي تتأثر بامتصاص الجسيمات النانوية (شكل 4). في حين كان من المتوقع أن تكون تركيزات Ag وC_{60} و Al_2O_3 NPs في الماء في نطاق نانوغرام/لتر، فقد شوهدت تأثيرات شبه مميتة على هذه الأنواع من الجسيمات النانوية NPs المهندسة مثل TiO_2 وSiO_2 وZnO في نطاق ميكروغرام/لتر في الدراسات المختبرية. ومع ذلك، في ظل الظروف البيئية الواقعية كانت التأثيرات على المجتمعات الميكروبية مختلفة عن تلك الموجودة في المختبر. تعد

انواع الجسيمات النانوية NPs المركبة والاختلافات في التوافر البيولوجي مسؤولة عن هذه التناقضات بين الدراسات المختبرية والميدانية. على الرغم من أن البيانات السابقة عن السمية للكائنات المائية أظهرت أن تركيزات الجسيمات النانوية NPs الموجودة حاليًا في البيئة أقل من تلك اللازمة لإحداث تأثيرات مميتة وشبه مميتة، إلا أنه لم يتم إجراء سوى القليل من الأبحاث حول المخاطر الصحية المحتملة للتعرض للملوثات العضوية الثابتة. على الرغم من أن بعض الكائنات المائية لديها القدرة على امتصاص والاحتفاظ بجزيئات معينة من الجسيمات النانوية NPs، إلا أنه لا يزال من غير الواضح كيف يمكن لهذه الجزيئات أن تدخل النباتات وربما تنتقل إلى السلسلة الغذائية. ومن الواضح أنه عندما يتم استخدام الجسيمات النانوية NPs المهندسة في كثير من الأحيان في الحياة اليومية فهناك خطر أكبر للتلوث البيئي والتعرض البشري. ولذلك، هناك حاجة إلى مزيد من الأبحاث لتحديد طرائق التعرض الرئيسة للإنسان فضلا عن طرائق التعرض الحالية والمستقبلية.



شكل 4.عزل الكربون في التربة - التفاعل بين مجتمع ميكروبات التربة وديناميكيات المواد العضوية في التربة

4. استعمال الجسيمات النانوية في معالجة التربة

Application of nanoparticles for the treatment of soil

تعد أيونات المعادن الثقيلة من أكثر ملوثات التربة شيوعًا، ولكن نادرًا ما توجد مستويات سامة. تعتبر عمليات التصنيع والتعدين ومدافن النفايات التي تستقبل النفايات الصناعية مثل بقايا الطلاء والبطاريات والنفايات الكهربائية وغيرها، والمخلفات البلدية أو الصناعية هي المصادر الرئيسة للمعادن الثقيلة في التربة. وتبقى هذه المواد المعدنية غير القابلة للتحلل في المواقع الملوثة لفترة طويلة. ومع ذلك، فإن الكائنات الحية الدقيقة لديها القدرة على تحويل وتبخير الزئبق والسيلينيوم. أفضل طريقة لحماية مساحات كبيرة من التربة الملوثة هي استخدامها تقنيات التثبيت لمنع التلوث بالمعادن

الثقيلة أو إبطاء انتشار المعادن الثقيلة في التربة. يتم تفاعل المعادن الثقيلة السامة مع مكونات التربة عن طريق الامتصاص، التبادل الأيوني، الترسيب السطحي، والامتزاز على الأسطح المعدنية، والحث على تكوين مجمعات مستقرة مع بعضها بروابط عضوية هي بعض من عمليات الامتصاص. في معالجة التربة، وخاصة في التربة الملوثة بالمعادن الثقيلة، يتم استخدام كل من عوامل التعبئة والتثبيت (Robianson, *et al*. 2009). من خلال زيادة قابلية الحركة والتوافر الحيوي للمعادن الثقيلة، يمكن لعوامل التعبئة إزالتها بشكل أفضل من خلال امتصاص النباتات وغسل التربة (استخراج النباتات). من ناحية أخرى، تعمل عوامل التثبيت على تقليل التوافر الحيوي وتنقل المعادن الثقيلة، مما يمنع تسربها إلى المياه الجوفية ويقلل من انتقالها إلى السلسلة الغذائية (الاستقرار النباتي).

من أجل تثبيت المعادن الثقيلة في التربة، اجتذبت الجسيمات النانوية NPs الكثير من الاهتمام. يجب توفر متطلبين رئيسيين أثناء استخدام الجسيمات النانوية NPs. أحد المتطلبات هو أنه يمكن تحويلها إلى المناطق الملوثة ويجب أن تبقى هناك حتى بعد إزالة المصدر، في حين أن الآخر هو أن الجسيمات النانوية NPs المحولة في المناطق الملوثة تعمل كمغسلة غير متحركة لإزالة أيونات المعادن القابلة للذوبان. نظرًا لميلها إلى التجميع، تفقد الجسيمات النانوية NPs بعضًا من مساحة سطحها المحددة العالية. لحل هذه المشكلة، عادة ما يتم دمج المثبتات في الجسيمات النانوية NPs، مثل النشا وكربوكسي ميثيل السليلوز carboxymethyl cellulose (CMC). من خلال آليات التثبيت الاستاتيكية و/أو الكهروستاتيكية Steric and/or electrostatic stabilizing mechanisms ، يمكن للجسيمات النانوية NPs المغلفة ذات مساحة السطح الأعلى أن تمنع التكتل وتحسن استقرار بنية التربة. على سبيل المثال، تم تثبيت الزرنيخ As والامتصاص المعزز في الموقع باستخدام الجسيمات النانوية NPs للمغنتيت المستقر بوسطاة النشا magnetite NPs stabilized by starch ويمكن ملاحظة انخفاض كبير في قابلية ترشيح الماء للزرنيخ As. من أجل تثبيت

المعادن الثقيلة بشكل فعال في الموقع يمكن تطبيق مركبات الفوسفات بما في ذلك حمض الفوسفوريك، والأباتيت المركب، وصخور الفوسفات الموجودة بشكل طبيعي. في التربة الملوثة يمكن أيضًا استخدام الفوسفات لعزل الرصاص. ونتيجة لذلك، أدت جسيمات الاباتيت النانوية NPs إلى تسريع تحلل الفوسفات والرصاص المرتبط به مثل البيرومورفيت pyromorphite، وهو مركب فوسفات الرصاص المستقر، في التربة يُستخدم Nanoscale Zerovalent Iron nZVI بشكل شائع لتثبيت المعادن الثقيلة في التربة من خلال التخفيض في الموقع. عند استخدام nZVI له عيب أنه قد يتجمع أو يتفاعل بسرعة مع الأكسجين المذاب أو الماء، مما يقلل من تفاعله وقابليته للذوبان في التربة. هناك تأثيرات لأوكسيد الجرافين NPs (nGOx) graphene oxide NPs (nGOx) وnZVI على توافر أيونات المعادن الثقيلة المختلفة في التربة الملوثة بمعادن الزرنيخ. نظرًا لنطاق الميكرون الخاص بها، لا يمكن نقل جزيئات ZVI المتكتلة عبر التربة أو تسليمها هناك، كما أنها غير مناسبة للمعالجات الموقعية. تتبين ان عددا من أساليب تثبيت الجسيمات ZVI والتي يمكن أن تقلل من التكتل. لتعديل nZVI ، يمكن استخدام النشا والبولي فينيل بيروليدون polyvinylpyrrolidone وكلوريد سيتيلبيريدينيوم cetylpyridinium chloride والصوديوم CMC في الطلاءات العضوية. إن التكلفة العالية للمركبات الكيميائية التي تحتوي على كميات كبيرة من كبريتات الحديدوز وكلوريد الحديدوز تزيد من تقييد استخدام الجسيمات النانوية NPs القائمة على الحديد.

هناك العديد من المشكلات المتعلقة باستراتيجية التثبيت لمعالجة التربة الملوثة، بما في ذلك المشكلات المتعلقة بالتكلفة والتلوث الثانوي. على سبيل المثال، إن تكلفة المواد والتلوث البيئي اللاحق يجعل من الصعب إضافة كميات كبيرة من حمض الفوسفوريك عالي الذوبان أو أملاح الفوسفات إلى باطن الأرض. وبما أن الفوسفات قابل للذوبان بدرجة عالية، فإن الإفراط في تناول العناصر الغذائية يمكن أن يلوث المياه الجوفية والمياه السطحية علاوة على ذلك، فإن CMC عرضة للتحلل المائي، وبمجرد تفككه،

فإنه يفقد قدرته على الحفاظ على استقرار الجزيئات. تم العثور على الرواسب الدقيقة المتبقية من CMC في لتربة. كشفت دراسات السمية البيئية على الكروم المثبت عبر nZVI المثبت بـ CMC أن هذا العلاج كان له تأثير رادع على نمو النبات. قد يزيد nZVI من امتصاص الحديد في النباتات من خلال عدد من العمليات المختلفة، إحداها أنه قد يدخل البذور ويتم تناوله بواسطة أجنة البذور. يعد الالتقام الخلوي Endocytosis في خلايا البشرة الجذرية root epidermal cells طريقًا متوقعًا آخر لدخول nZVI

4. تطبيق الجسيمات النانوية لمعالجة المياه

Application of nanoparticles for the treatment of water

توفر تقنية النانو طرائق فعالة وقابلة للتكيف ومتعددة الاستخدامات بشكل لا يصدق للتغلب على التحديات الكبيرة الناجمة عن ندرة المياه النقية الحالية. تعمل أكاسيد الفلزات النانوية بشكل جيد كمواد ماصة، كما أن كيفية استخدامها لتنظيف المياه هي الآن قيد البحث المكثف. نظرًا لخصائصها المغناطيسية غير العادية Extraordinary magnetic Properties، مثل البارامغناطيسية الفائقة Super paramagnetism والاستجابة المغناطيسية الكبيرة Significant magnetic responsiveness في ظل المجالات المغناطيسية المطبقة المنخفضة، فقد تم اقتراح الجسيمات النانوية NPs المغناطيسية للاستخدام بين أكاسيد المعادن النانوية. ومع ذلك، فإن العديد من المركبات العضوية، مثل حمض الفولفيك (FA) Fulvic acid، وحمض الهيومك Humic acid (HA)، والفوليرينات الهيدروكسيلية والكربوكسيلية Hydroxylated and carboxylated fullerenes، من بين أشياء أخرى، قد يكون لها تأثير كبير على امتصاص النحاس (Wang, *et al*. 2013)

تعد تقنية الغشاء Membrane technique طريقة عملية مختلفة لتنظيف المياه بسبب كفاءتها الأفضل في الإزالة، وبساطة الاستخدام، وقلة التلوث الثانوي. هذه العملية ممكنة أيضًا لأنها لا تتطلب استخدام مواد كيميائية أو حرارة ولا تتطلب تجديد الوسط المستخدم. تقوم مادة الغشاء بشكل طبيعي بتبادل النفاذية من أجل الانتقائية لتحديد أداء مادة الغشاء. تستخدم أغشية تنقية المياه في الغالب البوليمرات مثل البولي أميد Polyamide (PA)، والبولي أكريلونيتريل Polyacrylonitrile (PAN)، وأسيتات السليلوز Cellulose acetate (CA). يمكن تطبيق طريقة الغشاء على عدد من الأنشطة اعتمادًا على حجم المسام وتطبيق الترشيح. تُستخدم عمليات الغشاء بشكل متكرر لإزالة الجسيمات العالقة والبكتيريا والبروتوزوا، وإزالة الفيروسات والغرويات، وإزالة الصلابة والمعادن السامة والمواد العضوية الذائبة، وتحلية المياه، وتنقيتها (Balamurugn, *et al.* 2011). تعد إزالة البكتيريا والبروتوزوا والجسيمات العالقة من الماء تطبيقًا شائعًا آخر لعمليات الغشاء. يمكن إزالة الجسيمات بحجم الميكرون بشكل فعال من المحاليل المائية باستخدام مركبات البوليمر النانوية أو أغشية الألياف النانوية المركبة، والتي تتميز بمعدل رفض مرتفع وأقل تلوث. إنها طرق قابلة للتكيف وفعالة لبناء ألياف فائقة الدقة من البوليمرات أو السيراميك أو حتى المعادن وذلك لزيادة المساحة السطحية وحجم المسام الذي يمكن التحكم فيه، وتدفق الماء العالي لأغشية المركبة النانوية من قابلية تطبيقها كمرشحات دقيقة ومرشحات فائقة الدقة. يمكن أيضًا تعديل الجسيمات النانوية NPs بسهولة لتطبيق معين. على سبيل المثال، يتم استخدامها في الترشيح لإزالة المعادن السامة والمواد الكيميائية العضوية والملوثات. إن الجزيئات المرتبطة تساهميًا على سطح المواد النانوية تجعلها فعالة وعملية. يتم استخدام التركيب الكيميائي للمواد لتفعيل الجسيمات النانويةNPs السطحية وزيادة الانتقائية لأيونات المعادن الثقيلة في المحلول كما هو موضح في الشكل 4. تم تقييم انتقائية Pd^{2+}، Pb^{2+}، Cd^{2+}، Zn^{2+}، Cu^{2+}، Co^{2+}+، وMn^{2+} بواسطة التساهمية ربط dendrimer، L-cysteine methyl ester على سطح

NPs ، من أجل تحسين التفضيلية امتزاز Hg_2+ على أكسيد SiO_2-Al_2O_3 المختلط. يمكن جعل الأغشية المصنوعة من ألياف السليلوز النانوية مفيدة لتنقية الألبومين باستخدام Cibacron Blue. يمكن إزالة أيونات المعادن السامة من خلال عمليات الامتزاز والامتصاص الكيميائي والجذب الكهروستاتيكي Electrostatic attractionعن طريقة معالجة أغشية ألياف البوليمر النانوية باستخدام الجسيمات النانوية الخزفية NPs بما في ذلك أكسيد الحديد وهيدروكسيد الألومينا وجسيمات الالومينا المائيةNPs. من أجل زيادة ألفة الغشاء لإزالة النفايات العضوية، تتم إضافة سيكلودكسترين Cyclodextrin إلى غشاء ألياف نانوية بولي (ميثيل ميثاكريلات) a Poly(methyl methacrylate). أن أكبر مشكلة في أغشية المركبات النانوية هي تلوث الأغشية، ما يزيد أيضًا من استخدام الطاقة، والنفقات التشغيلية، وتعقيد العملية. ان المخلفات البيولوجية والعضوية فئتان للتلوث الغشائي. يحدث انخفاض التدفق في عملية الغشاء بسبب التلوث العضوي والبيولوجي(Meng, *et al*. 2008) . أن كمية المواد العضوية الطبيعية في الماء هي المسؤولة في المقام الأول عن التلوث العضوي فتتسبب المواد العضوية التي تم ترسيبها وامتصاصها على سطح الغشاء في انسداد المسام. يؤدي ارتباط البكتيريا بأسطح الغشاء إلى تكوين غشاء حيوي لزج من السكريات والمركبات العضوية ومجتمع معقد من الخلايا الميكروبية ويسبب تلوثًا بيولوجيًا. لقد أجريت العديد من الدراسات على تقنيات التعديل المختلفة لتعزيز المحبة للماء وتقليل تلوث الأغشية. وتشمل عمليات هذا الطلاء والتطعيم والمزج مع جسيمات اكاسيد المعدن المحبة للماء NPs وقد ثبت أنها وسيلة فعالة لإعداد أغشية المركبات النانوية دون إجراء تصنيع صعب، تعمل إضافة الجسيمات النانوية لأوكسيد المعدن على تحسين أداء الغشاء والاستقرار الحراري دون تغيير السلامة الهيكلية. فضلا عن ذلك، في معالجة المياه المستهلكة، تم استخدام جسيمات الفضة النانوية لوقف تطور البكتيريا والفيروسات عن طريق عمليات الطلاء والتطعيم وتصنيع الأغشية. اما بخصوص الملوثات البيولوجية الشائعة في المسطحات المائية فيمكن إزالة بكتريا

القولون *Escherichia coli* وإلغاء تنشيطها بوساطة أغشية الفضة النانوية المركبة Silver-nanocomposite membranes. لقد استخدمت الجسيمات النانوية NPs المحفزة ضوئيًا Photocatalytic وتحديدًا TiO_2 لتحسين الاستقرار الحراري ومقاومة التلوث. تُستخدم الأغشية التي تحتوي على nZVI لإزالة الكلور من الملوثات بشكل اختزالي. بشكل عام، تعد الجسيمات النانوية NPs فعالة جدًا في تنقية المياه وتحسين أداء عملية الغشاء، مع وجود بعض العيوب في التأثيرات الثانوية على المسطحات المائية القريبة(Ibrahim, *et al*. 2016) .

الاستنتاجات

في السنوات الأخيرة، حظيت المواد المستدامة التي يمكن استخدامها لتنظيف البيئة بالكثير من الاهتمام. تتميز الجسيمات النانوية بأنها فعالة من حيث التكلفة وصديقة للبيئة، ويمكن تطبيقها في معالجة التربة والمياه. واستخدمت التطبيقات المحتملة لمختلف مصادر الطاقة النووية في معالجة التربة والمياه. هناك الآن زيادة في الاهتمام بدراسة سمية الجسيمات النانوية NPs لمثل هذه التطبيقات لمعالجة القلق المتزايد بشأن المخاطر التي تشكلها هذه الجسيمات على صحة الإنسان والبيئة. هناك حاجة إلى تحسينات محددة في تكنولوجيا النانو والأساليب القائمة على استخدام الجسيمات النانوية لمعالجة التربة والمياه باستخدام الجسيمات المعتمدة على المعادن وأكاسيد المعادن والكربون والسيليكا والبوليمر مقارنة بالطرائق التقليدية. هناك حاجة إلى مزيد من البحث لاستغلال الإمكانات الكاملة لمختلف الجسيمات النانوية من خلال تحسين طرائق المعلمات المختلفة وضبط حجم وشكل الجسيمات النانوية من أجل المعالجة الفعالة للتربة والمياه بتكلفة منخفضة.

المصادر

Azizul Hakim, A., Tanu, F., Haque, H., and Susan,A. 2023. Application of Nanoparticles in Soil and Water Treatment. Applications of Emerging Nanomaterials and Nanotechnology Materials Research Forum LLC,

Materials Research Foundations 148 (2023) 229-251 , https://doi.org/10.21741/9781644902554-8

Boxall, A. B. C., K. Tiede, Q. Chaudhry. 2007. Engineered nanomaterials in soils and water: how do they behave and could they pose a risk to human health?, Nanomedicine. 2(6), (2007), 919-927. https://doi.org/10.2217/17435889.2.6.919

Cloete, T. E., M. De Kwaadsteniet, M. Botes. 2010. Nanotechnology in water treatment
electrokinetic transport of xanthan gum stabilized nanoPd/Fe for the remediation of

El-Sayed Belal, El., and El-Ramady, H. 2016. Nanoparticles in Water, Soils and Agriculture. In book: Nanoscience in Food and Agriculture 2 (pp.311-315), Edition: 2

Guerra, F., M. Attia, D. Whitehead, F. Alexis. 2018. Nanotechnology for environmental remediation: materials and applications, Molecules 23(7), (2018), 1760. https://doi.org/10.3390/molecules23071760

Ibrahim, R.K., M. Hayyan, M.A. AlSaadi, A. Hayyan, S. Ibrahim, Environmental Application of nanotechnology: Air, soil and water, Environ Sci Pollut Res. 23 (2016), 13754–13788. https://doi.org/10.1007/s11356-016-6457-z

Khajeh, M., S. Laurent, K. Dastafkan. 2013. Nanoadsorbents: classification, preparation, and applications (with emphasis on aqueous me- dia), Chem Rev. 113 (2013), 7728–
applications, Caister Academic Press, Poole, U. K. (2010). https://doi.org/10.21775/9781910190098

Ma, T., Y. Sheng, Y. Meng, J. Sun. 2019. Multistage remediation of heavy metal contaminated river sediments in a mining region based on particle size, Chemosphere. 225 (2019), 83–92. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.018

Meng, F., S.R. Chae, A. Drews, M. Kraume, H.S. Shin, F. Yang, Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material, Water Res. 43 (2009), 1489–1512. https://doi.org/10.1016/ j.watres.2008.12.044

Fan, G., L. Cang, W. Qin, C. Zhou, H. Gomes, D. Zhou. 2013. Surfactants-enhanced PCBs contaminated soils, Separation and Purification Technology. Publisher: Springer, Editors: Ranjan, Shivendu, Dasgupta, Nandita, Lichtfouse.

Robinson, B. H., G. Bañuelos, H.M. Conesa, M.W.H. Evangelou, R. Schulin. 2009. The phytomanagement of trace elements in soil, Crit. Rev. Plant Sci. 28 (2009), 240– 266. https://doi.org/10.1080/07352680903035424

Wang, J., Z. Li, S. Li, W. Qi, P. Liu, F. Liu, Y. Ye, L. Wu, L. Wang, W. Wu, Adsorption of Cu(II) on oxidized multi-walled carbon nanotubes in the presence of hydroxylated and carboxylated fullerenes, PLoS ONE. 8:8 (2013), e72475. https://doi.org/10.1371/journal.pone.

Balamurugan, R., Sundarrajan, S. and Ramakrishna, S. 2011. Recent trends in nanofibrous membranes and their suitability for air and water filtrations, Membranes. 1 (2011), 232–248. https://doi.org/10.3390/membranes1030232

ثانيا: الجسيمات النانوية في التربة Nanoparticles in Soils

من المعروف أن الجسيمات النانوية ليست اختراعًا بشريًا، وهي موجودة بشكل طبيعي منذ بداية تاريخ الأرض. التربة باعتبارها جسيمات نانوية طبيعية، عبارة عن مصفوفة معقدة تحتوي على جزيئات معدنية وغرويات في المياه المسامية، وهناك مخاوف بشأن امتزاز الملوثات وارتباطها داخل هذه المصفوفة فضلا عن ذلك، فمن الواضح أن التعرض للجسيمات النانوية الطبيعية يفوق إلى حد كبير أي إنتاج بشري. وفيما يتعلق بطرائق تكوين الجسيمات النانوية، هناك عدة آليات يمكن أن تخلق الجسيمات النانوية في البيئة بما في ذلك الطرائق الجيولوجية أو البيولوجية. تشمل الآليات الجيولوجية التجوية الفيزيائية والكيميائية، والتكوين الجديد/التكوين الجديد والنشاط البركاني. يمكن لهذه العمليات الجيولوجية عادة أن تنتج جزيئات غير عضوية. وفيما يتعلق بالآليات البيولوجية، فإنها يمكن أن تنتج جزيئات نانوية عضوية، كما أن بعض الكائنات الحية يمكن أن تنتج حبيبات معدنية في الخلايا. لا تتأثر حركة الجسيمات النانوية في التربة بالترسيب والجاذبية ولكنها تسترشد بالحركة البراونية في مسام التربة. تتكون التربة من مسام دقيقة أي شبكة من المواد الدبالية وجزيئات التربة والمسام الكبيرة (Mura *et al.* 2013). لذلك، يمكن للجسيمات النانوية المفردة الدخول إلى المسام الصغيرة ويتم امتصاصها على الغرويات المتحركة ويتم تعزيز حركتها بشكل كبير في حين تبقى بوابات الجسيمات النانوية في المسام الكبيرة، بينما إذا تم امتصاصها على جزيئات غير متحركة، يتم تثبيط حركتها. ويعتمد الارتباط بين جزيئات التربة والجسيمات النانوية على شكل الجسيمات النانوية وعلى الخصائص المختلفة التي تغير البيئة المحيطة بالجزيئات. لذلك، يمكن لظروف التربة أن تعزز أو تمنع حركة الجسيمات النانوية في التربة. أثبتت الدراسات أن الأحماض الدبالية في التربة والمياه الجوفية والقوة الأيونية للمياه الموجودة فيها التي يمكنها أن تؤثر بشكل كبير على حركة

الجسيمات النانوية لأنواع مختلفة من جسيمات أكاسيد المعادن النانوية (مثل Fe_3O_4 وTiO_2 وCuO وZnO)، والحصول على أعلى قدرة من الحركة لـ Nano-TiO_2. وقد يؤثر هذا في مراقبة تكوين الجسيمات النانوية وكذلك مصير مغذيات التربة والملوثات العضوية والملوثات الاخرى (Mura et al. 2013).

هناك اهتمام متزايد قوي باستخدام الجسيمات النانوية في التربة لتطبيقات مختلفة ومع ذلك، لا تزال هناك حاجة للباحثين لتطوير طرائق جديدة لرصد سمية الجسيمات النانوية المحتملة ولتقييم الفوائد أو المخاطر التي تتعرض لها الكائنات الحية ذات الأهمية في علوم التربة بما في ذلك النباتات والبكتيريا والفطريات والكائنات الحية الأخرى. لقد ثبت أيضًا أن التأثيرات السلبية للجسيمات النانوية على المجتمعات البكتيرية في التربة، والتي تم تغييرها بوساطة أكسيد الزنك النانوي ما أدى إلى تقليل الكتلة الحيوية الميكروبية وتنوعها (Ge *et al*. 2011)، علاوة على ذلك تأثرت أنشطة إنزيمات التربة باستخدام أكسيد الزنك النانوي. بسبب تجميد وتجميع الجسيمات النانوية في التربة مما يظهر السمية النباتية، فقد تم الكشف أيضًا عن انخفاض الكتلة الحيوية وطول الجذر للنباتات. تم أيضًا إثبات سمية أكسيد الزنك النانوي على عشبة الريجراس Ryegrass وفي الذرة Maizeحيث يتم تثبيط الإنبات. وأظهرت تجارب أخرى أجريت على النباتات أن الجسيمات النانوية لأوكسيد الألومنيوم والجسيمات النانوية لأوكسيد الأرض النادرة Rare earth oxide nanoparticles يمكن أن تكون سامة لمجموعة متنوعة من المحاصيل (الذرة وفول الصويا والجزر والملفوف والخيار) كمثبطات لاستطالة الجذور. يهتم علم التربة بعلم كل تلك المواد التي نجدها في التربة. بالنسبة للكائنات الحية، يمكن لهذه المصفوفة توفير التغذية. بالإضافة إلى ذلك فهي تهتم بتلك الكائنات الحية الدقيقة والحيوانات التي تساعد في هذه العملية وهذا مزيج معقد من المواد الكيميائية والكائنات الحية، بعضها منظم على المستوى النانوي وبعضها الآخر ليس كذلك. لقد توسع تعريف تكنولوجيا النانو من

الاكتشافات الأولية للقدرة على تحريك الذرات وتحديد موقعها بشكل فردي إلى شيء أكبر بكثير. التربة عبارة عن خليط معقد من المواد الصلبة (أو الجزيئات) التي تتراوح من ملليمتر (مم) إلى نانومتر (نانومتر) في حجم الجسيمات. وباستخدام بعض التقنيات المتقدمة في تكنولوجيا النانو مثل المجهر الإلكتروني النافذ Transmission Electron Microscopy (TEM) ومجهر القوة الذرية Atomic Force Microscopy (AFM)، قد يكون من الممكن فهم هذه الهياكل للتربة. ويمكن لهذه التقنيات السابقة أن توضح تنظيم المواد الغروية في التربة مثل السيليكات الورقية والأحماض الدبالية فضلا عن اكتشاف جزيئات جديدة مثل الجسيمات النانوية لأكاسيد الحديد. ولذلك، يمكن أن توفر تكنولوجيا النانو إمكانات إضافية في تحديد الخلايا المنفردة والجينات وجزيئات الحمض النووي الفردية والبروتينات والهياكل البيولوجية الأخرى في التربة. فيما يتعلق بعلوم التربة، فإن علم النانو له أهمية حاسمة لهذه العلوم لأن العديد من المركبات الطبيعية للتربة هي جسيمات نانوية أو لها خصائص نانوية (Mura *et al.* 2013). بينما في المقياس النانوي فإن التفاعلات بين الجسيمات والجسيمات الأخرى إما أن تهيمن عليها قوى فان دير فال الضعيفة Weak Van der Waals forces، أو التفاعلات القطبية Stronger polar والكهروستاتيكية الأقوى Electrostatic interactions، أو التفاعلات التساهمية Covalent interactions. تعتبر تفاصيل قوى التفاعل بين الجسيمات والسوائل ذات أهمية أساسية لوصف العمليات الفيزيائية والكيميائية، والتطور الزمني للجسيمات النانوية الحرة. ومن ناحية أخرى، يمكن العثور على مواد نانوية مختلفة في التربة مثل المعادن النانوية التي تتراوح من الجسيمات النانوية إلى الجسيمات النانوية المعدنية في حجم النانو ولكنها توجد أيضًا بأحجام أكبر، علاوة على ذلك، توجد أيضًا مواد نانوية مختلفة في التربة بما في ذلك الركام النانوي من المواد العضوية الطبيعية، والزوائد البكتيرية bacterial appendages، والجزيئات العضوية

وغير العضوية، والمعادن الطينية، والمواد غير البلورية والمعادن النانوية الأخرى (معادن الحديدFe-minerals : الهيماتيت hematite، الجيوثيت goethite، المغنسيوم -Tite magne ؛ معادن المنغنيز والطين المنتفخ: المونتموريلونيت montmorillonite) . يمكن أيضًا العثور على الجسيمات النانوية المصنعة أو الهندسية في التربة، في حين يمكن إطلاق هذه الجسيمات النانوية في البيئة إما عمدًا في أشكال مختلفة بما في ذلك الجسيمات النانوية ذات الأساس المعدني مثل أكاسيد المعادن (على سبيل المثال، nano-ZnO، TiO_2-، CeO_2-) والمعادن (مثل الجسيمات النانوية Au وAg وFe) والأملاح المعدنية (مثل سيليكات النانو والسيراميك) والكربون والمواد النانوية المشتقة (أنابيب الكربون النانوية)، والنقاط الكمومية quantum dots أو المواد شبه الموصلة (مثل CdSe وCdTe) وجزيئات النانوبوليمر nanopoly-mers (مثل البوليسترين polystyrene واللاتكس latex) أو عن غير قصد عن طريق التآكل أو احتراق المنتجات .

بسبب تشتت الجسيمات النانوية المصنعة في التربة، يمكن ملاحظة تغير في حجم مجاميعها، واستقرارها، والنقل والتوافر البيولوجي لذلك، فإن الدراسات حول العمليات الغروية للجسيمات النانوية المصنعة ضرورية لفهم مصيرها ومخاطرها، يمكن أن يتأثر تعليق هذه الجسيمات النانوية بظروف التربة بما في ذلك القوة الأيونية وكمية المواد العضوية الذائبة والتفاعلات الكيميائية والبيولوجية. تغطي المادة العضوية الذائبة هذه الجسيمات النانوية وتغير خصائص سطحها، مثل توزيع حجم المسام ومساحة السطح المحددة وخصائص امتصاص الملوثات العضوية وحالة التجميع، فضلا عن آليات التأثيرات السامة، لقد ثبت بشكل واضح ومقنع أن المواد العضوية الذائبة زادت من ثبات الجسيمات النانوية المصنعة ذات الأساس المعدني في المعلق المائي. في البيئات الأرضية تحتوي الإفرازات البيولوجية مثل الإفرازات من الجذور في منطقة الجذور والكائنات الحية الدقيقة

على جزيئات كبيرة مماثلة لتلك الموجودة في المواد العضوية الذائبة وقد تشكل هذه الجزيئات الكبيرة معقدا وتواجد الركام على نطاق واسع في الأنظمة المائية ويُطلق عليها اسم الأغشية الحيوية، قد تؤدي التفاعلات بين هذه الجزيئات الكبيرة والجسيمات النانوية أيضًا إلى تغيير تجميعها وكذلك نقلها. ونظرًا لتعقيد وعدم تجانس أنظمة التربة والرواسب، فكانت سببا بتنفيذ الابحاث المتعلقة بها ونقل الجسيمات النانوية المصنعة. يمكن اعتبار عدم التجانس على مقياسين بما في ذلك الجسيمات والأنظمة، فيما يتعلق بمقياس الجسيمات، فإن مجاميع التربة لديها تباين كبير في حجمها وخشونتها، وشكلها، وتكوينها والنسبة النسبية للمعادن، وخصائص الشحنة السطحية وتوزيع الحجم والترابط بين المسام. بينما على نطاق الانظمة فتحتوي أعمدة التربة الطبيعية عادةً على هياكل تربة مفتوحة، على سبيل المثال، الشقوق والجحور الدودية وغيرها من الميزات المفتوحة. ونظرًا للتعقيد، لا يمكن تطبيق خاصية واحدة كتنبؤ عام بنقل وترسيب الجسيمات النانوية المصنعة. لذلك، من المهم وصف نقل الجسيمات النانوية المصنعة في أعمدة التربة كميًا (Pan and Xing 2012). لذلك يمكن الاستنتاج أن التطبيق البيئي وتقييم مخاطر الجسيمات النانوية المصنعة في التربة يعتمد بشكل كبير على فهمنا للتفاعلات بين هذه الجسيمات النانوية ومكونات التربة المختلفة. يمكن تطبيق هذه الجسيمات النانوية المهندسة لمعالجة التربة ثم يتم إطلاقها عن غير قصد من خلال مسارات أخرى مختلفة إلى التربة. ونظرًا لتعقيد نظام التربة والجسيمات النانوية في التربة، فإن فهم سلوك الجسيمات النانوية في هذا النظام محدود للغاية. يمكن أن تتشكل الجسيمات النانوية بشكل طبيعي في بيئات مختلفة بما في ذلك التربة، والخامات الطبيعية، والأنظمة الميكروبية، والهباء الجوي، والمياه، والفتحات الحرارية المائية في أعماق البحار. هناك حاجة إلى مزيد من الدراسات لتقييم آليات السمية المختلفة للجسيمات النانوية المتكونة بشكل طبيعي.

الجسيمات النانوية والمجتمع الميكروبي للتربة Nanoparticles and Soil Microbial

من وقت لآخر، يجذب مجال كبير من العلوم الاهتمام خاصة عندما تحدث تطورات جديدة بين المجالات وتولد مجالات موضوعية جديدة. مثل هذه العمليات مهمة لأنها تسمح بتركيز التخصصات المختلفة على مجال واحد وهذا في حد ذاته يؤدي إلى تقدم جديد. على مدار العشرين عامًا الماضية، وخاصة خلال العشر سنوات الماضية، تطورت تكنولوجيا النانو باعتبارها مجالًا متعدد التخصصات، الأمر الذي اجتذب اهتمامًا كبيرًا (Wilson *et al*. 2008). ومن الواضح أن مجال علوم المواد النانوية له صلة بتحليل بنية التربة وتكوينها. ومع ذلك، فإن علم الأحياء النانوي المرتبط ببيولوجيا التربة وأدوات الكشف عن الكميات النانوية من المواد ذات الصلة بعمليات التربة مهمة أيضًا مثل الجوانب المختلفة لتطبيقات تكنولوجيا النانو في العلوم البيئية. يُذكر أنه يمكن تصنيع الجسيمات النانوية الهندسية من عناصر مفردة مثل الكربون أو الفضة أو خليط من العناصر/الجزيئات. يمكن تصنيف هذه الجسيمات النانوية بناءً على تركيبها الكيميائي أو حجمها أو خصائصها المورفولوجية. يمكن أيضًا وصف هذه الجسيمات النانوية في المجموعات التالية بما في ذلك الفوليرينات Fullerenes والجسيمات النانوية المعدنية المهندسة (عنصر Ag، Au، Fe، Se)، الأكاسيد (TiO_2، CuO، FeO_2، ZnO، Al_2O_3، SiO_2، CeO_2) والمركبات المعقدة مثل أكسيد Co-Zn-Fe، والنقاط الكمومية Quantum dots في كثير من الأحيان، مغلفة ببوليمر مثل سيلينيد الكادميوم Cadmium–selenide (CdSe) والبوليمرات العضوية مثل البوليسترين؛ Polystyrene . يمكن اعتبار الكائنات الحية الدقيقة هي المحرك للدورات البيوجيوكيميائية العالمية Global biogeochemical cycles. ووجد أن هذه الكائنات الحية الدقيقة تشارك في تدوير C وN وS بالإضافة إلى P. ونظرًا لحساسيتها الخاصة للتغيرات البيئية، فقد يتحول هيكل

ووفرة مجتمع الكائنات الحية الدقيقة استجابةً للمواد النانوية الغريبة (Rials(Ge -foreign nanomate نظرًا لأن الكائنات الحية الدقيقة تساعد في تنظيم والحفاظ على صحة ووظيفة النظام البيئي بشكل عام، ان التغييرات في المجتمع الميكروبي سيكون لها تأثير كبير على النظام البيئي بأكمله. ولذلك، فإن الفهم الأفضل لكيفية استجابة الكائنات الحية الدقيقة للجسيمات النانوية و/أو المواد النانوية يمكن أن يساعد في معالجة المخاوف البيئية والصحية الناجمة عن تصنيع واستخدام هذه المواد النانوية ومن ناحية أخرى، من الموثق جيدًا أن العديد من الجسيمات النانوية لها خصائص مضادة للميكروبات وبالتالي تؤثر بشكل مباشر على الكائنات الحية الدقيقة (Shah and Belozerova 2009). لا توجد طرق قياسية ومثبتة لتقييم سمية الجسيمات النانوية على المجتمعات الميكروبية المختلفة في التربة. لتقييم تأثير الملوثات على مجتمع الميكروبات في التربة، يمكن استعمال طرائق مختلفة بما في ذلك عدد الصلاحية والأساليب الجزيئية وأنماط استخدام الكربون وتحليل إستر ميثيل الأحماض الدهنية. أن التفاعل بين الجسيمات النانوية والخلية البكتيرية يؤدي إلى السمية الخلوية وهذا يتضمن خطوتين فيما يتعلق بالخطوة الأولى، يتم إلحاق الضرر التأكسدي بوساطة الجسيمات النانوية بغشاء الخلية، ما يؤدي إلى فقدان سلامة الغشاء دون انخفاض كبير في قدرة الخلية على البقاء. اما الخطوة الثانية تتضمن تسرب المكونات داخل الخلايا، وهو السبب الرئيسي لانخفاض قابلية الحياة واستيعاب الجسيمات النانوية، مما يتسبب في تلف عضيات الخلية بما في ذلك النواة .

لقد طورت معظم الكائنات الحية الدقيقة آليات جزيئية فعالة وشغّلت مسارات كيميائية حيوية محددة لتدفق الأيونات المعدنية وإزالة السموم منها وتراكمها قبل وقت طويل من معرفتها في النباتات. فضلا عن ذلك فإن الكائنات الحية الدقيقة قادرة أيضًا على تطاير بعض أيونات المعادن للتخلص من سميتها الحادة. على الرغم من أن الميكروبات قد طورت آليات المقاومة والتجنب، إلا أن هناك حاجة

إلى مزيد من الدراسات المستهدفة فيما يتعلق بميكروبات التربة المفيدة مثل تثبيت النيتروجين، ومذيبات الفوسفات، والفطريات الشجيرية لتحديد آليات الامتصاص في التربة والميكروبات. ويلاحظ أنه لم يتم ملاحظة حجم الجسيمات النانوية فحسب، بل أيضًا انخفاض طول براعم وجذور القمح بطريقة تعتمد على الجرعة، كما تبين ان امتصاص أكسيد الزنك النانوي يؤدي إلى تلف الخلايا القشرية والانتقال من خلية إلى أخرى من خلال البلازمودات-ماتا Pasmodes-mata. وسجل انحباس النانو-Ag بواسطة البشرة، والاختراق في أنسجة الورقة من خلال الثغور، وأكسدة النانو-Ag وتعقيد Ag^{+} + بواسطة الجزيئات المحتوية على الثيول. كما تبين التأثيرات السامة للخلايا والسمية الجينية للنانو-Ag في أطراف جذور البصل. ولوحظت أيضًا تأثيرات مماثلة لل TiO_2 للانحرافات الصبغية وتلف الحمض النووي.

في الآونة الأخيرة تم الإبلاغ عن أن جزيئات النانو- TiO_2 تؤثر على ملامح التعبير الجزيئي للـRNA الدقيقة ، واشارت مجموعة من الدراسات المتعلقة بالتفاعلات بين الجسيمات النانوية والكائنات الحية الدقيقة لربط الخواص الفيزيائية والكيميائية للجسيمات النانوية المعدنية وأكسيد المعادن الهندسية باستجابتها البيولوجية علاوة على ذلك، فقد تم التوصل إلى أن السمية الخاصة بالأنواع يمكن أن تعزى إلى حجم الجسيمات النانوية وشكلها. ومع ذلك، فإن الطلاء السطحي للمادة، والذي يمكن تغييره بشكل كبير حسب الظروف البيئية، يمكن أن يخفف أو يعزز السمية الميكروبية (Thul, *et al*. 2013). يمكن الاستنتاج أن هناك العديد من تأثيرات الجسيمات النانوية على الكائنات الحية الدقيقة في التربة بما في ذلك دورة النيتروجين، وأنشطة إنزيمات التربة، والعمليات المرتبطة باستقلاب الحديد، والهورمونات النباتية، وإنتاج المضادات الحيوية (Dimkpa, 2014). تكون هذه التأثيرات سلبية أو إيجابية وتعتمد النتيجة على جسيمات نانوية محددة (النوع والحجم والشحنة السطحية والجرعة التي تم اختبارها ونوع النبات

أو الميكروب الذي تم فحصه ووسائط الاختبار سواء كانت سائلة أم تربة أم أجار أم وسائط صلبة أخرى). يمكن الإشارة إلى أن تكنولوجيا النانو تنذر بآثار سلبية كبيرة على ميكروبات التربة، وبالتالي على العمليات الزراعية التي تحركها الميكروبات. ومع ذلك، يمكن ملاحظة أن إمكانات ميكروبات النبات والتربة تعمل أيضًا على التخفيف من النشاط الحيوي للجسيمات النانوية. على الرغم من أن جذور معظم النباتات الأرضية مرتبطة بالميكروبات، إلا أن العديد من الدراسات حول تفاعلات الجسيمات النانوية مع النباتات والميكروبات تُجرى عمومًا بشكل منفصل. ووجدت بعض الدراسات القليلة التي أجريت على أنظمة ميكروبية/نباتية فعلية تأثيرات الجسيمات النانوية على عمل الفطريات المفصلية، وتثبيت النيتروجين، وكذلك على إنتاج حاملات الحديد الميكروبية في محيط جذور النبات. ولذلك، يمكن اقتراح أن الفهم الأفضل للتداعيات الزراعية البيئية للجسيمات النانوية سيتطلب المزيد من الدراسات التفاعلية المتعمقة في أنظمة النبات / الميكروبات / الجسيمات النانوية المدمجة (Dimkpa, 2014).

وفيما يتعلق بالكائنات الحية الدقيقة في التربة، هناك تأثير واضح ومحدد للجسيمات المعدنية النانوية على البكتيريا الدقيقة في التربة. على سبيل المثال، لوحظ تأثير $Nano\text{-}TiO_2$ على تكافل بكتريا الرازوبيم للبقوليات *Rhizobium –legume* باستخدام رايزوبيوم البازلاء (*R. Leguminosa-rum bv. viciae 3 841*) *Rhizobium*. كما وجد أن $Nano\text{-}TiO_2$ يحدث تغيرات شكلية في الخلايا البكتيرية. فضلا عن ذلك، لوحظ أن التفاعل بين هذين الكائنين قد تعطل في شكل تطور العقد الجذرية والتأخير اللاحق في بداية تثبيت النيتروجين (Fan, *et al.* 2014). إن التطبيق المباشر للجسيمات النانوية في التربة أو المواد الصلبة الحيوية المعالجة التي تحتوي على جسيمات نانوية متنقلة قد يتلامس مع الكائنات الحية الدقيقة في التربة. كما أن هذه الكائنات الحية الدقيقة فعالة أيضًا في امتصاص وتراكم شكل أو آخر من المواد النانوية، والتي بدورها تبدأ تعبئة المواد النانوية

من خلال سلاسل الغذاء ويمكنه تغيير المجتمعات التي تضم مجموعات سكانية متعددة (مثل النباتات والأسماك والبكتيريا) داخل الشبكات الغذائية. ومن ناحية أخرى، تعتمد النباتات بشكل عام على بكتيريا وفطريات التربة للحصول على مغذياتها من التربة. توصلت إحدى الدراسات إلى أن مبيد الميكروبات الشائع Nano-Ag negatively يؤثر سلبًا على نمو النباتات ويقتل ميكروبات التربة التي تدعمها. لم يقتصر الأمر على الميكروبات فحسب، بل وُجد أن نشاط العديد من إنزيمات التربة مثل بروتياز Protease التربة والكاتلاز Catalase والبيروكسيديز Peroxidase قد انخفض بشكل كبير بواسطة $Nano\text{-}TiO_2$. علاوة على ذلك، وجد أن المواد غير العضوية SiO_2 و ZnO و TiO_2 لها تأثير سام على البكتيريا. وتتعزز سمية هذه العناصر بشكل كبير في وجود الضوء. ركزت مجموعة من الدراسات على التفاعلات بين الجسيمات النانوية والميكروبات لربط الخواص الفيزيائية والكيميائية للجسيمات النانوية المعدنية وأكسيد المعادن الهندسية بالإضافة إلى استجابتها البيولوجية. علاوة على ذلك، فقد تم التوصل إلى أن السمية الخاصة بالأنواع يمكن أن تعزى إلى حجم الجسيمات النانوية وشكلها. ومع ذلك، فإن الطلاء السطحي للمادة، والذي يمكن تغييره بشكل كبير حسب الظروف البيئية، يمكن أن يخفف أو يعزز السمية الميكروبية. وقد أشارت الدراسات التي أجريت على الأنواع البكتيرية ذات الصلة بالبيئة مثل *Escherichia coli* و*Bacillus subtilis* و*Pseudomonas putida* وغيرها بوضوح إلى أن الكائنات الحية الدقيقة يمكن أن تمتص الجسيمات النانوية. تعد البكتيريا عناصر أساسية في النظم البيئية الأرضية والمائية كمحلل للمواد العضوية والقاعدة الأولية للعديد من الشبكات الغذائية (Thul, *et al*. 2013). كما أن هذه الكائنات الحية الدقيقة فعالة أيضًا في امتصاص وتراكم شكل أو آخر من المواد النانوية، مما يؤدي بدوره إلى بدء تعبئة المواد النانوية من خلال سلاسل الغذاء ويمكن أن يغير المجتمعات التي تضم مجموعات سكانية متعددة مثل النباتات والبكتيريا وغيرها

داخل الشبكات الغذائية. نظرًا لاعتماد النباتات على الكائنات الحية الدقيقة في التربة بما في ذلك البكتيريا والفطريات للحصول على مغذياتها من الهواء والتربة فإن التأثيرات السمية الخلوية ومضادات الميكروبات للجسيمات النانوية (مثل الفضة وثاني أكسيد التيتانيوم والجسيمات النانوية الذهبية والمستحلبات النانوية) يمكن أن يكون لها تأثيرات على مستوى النظام البيئي.

أشارت بعض الدراسات الى خصائص البكتريا المضادة للجسيمات النانوية فقد وجد أن مادة الفضة النانوية المبيدة للميكروبات الشائعة تؤثر سلبًا على نمو النباتات كما تقتل الكائنات الحية الدقيقة في التربة التي تدعمها (Zeliadt, 2010). أدت جزيئات أوكسيد الزنك وأوكسيد التيتانيوم النانوية إلى تقليل نشاط العديد من إنزيمات التربة بشكل كبير بما في ذلك بروتياز التربة والكاتلاز والبيروكسيديز، بالإضافة إلى المجتمعات الميكروبية في التربة بشكل كبير، كما أن الكائنات الحية الدقيقة في التربة، والتي تعتبر محفزات وفيرة ومتعددة الاستخدامات، يمكنها أن تمتص وتشتت تكتلات المواد النانوية الهندسية. وقد لوحظ أن إضافة الحديد الصفري التكافؤ على المستوى النانوي يؤدي إلى اضطراب في تكوين مجتمع البكتيريا في التربة، ويقلل من نشاط الكائنات الحية الدقيقة التي تمعدن الكلوروروماتية Chloroaromatic mineralizing microorganisms. فضلا عن ذلك، وجد أن العناصر غير العضوية TiO_2 وSiO_2 وZnO لها تأثير سام على البكتيريا، وتتعزز سمية هذه العناصر بشكل ملحوظ في وجود الضوء (Adams, *et al*. 2006). كما وجد أن الجسيمات النانوية المهندسة تغير بشكل كبير المجتمعات البكتيرية بطريقة تعتمد على الجرعة، مع زيادة بعض الأصناف كنسبة من المجتمع، ولكن المزيد من الأصناف تتناقص، مما يشير إلى أن التأثيرات أدت في الغالب إلى تقليل التنوع الاحيائي. كما وجد أن امتصاص المواد النانوية المصنعة من مادة Nano- CeO في الجذور والعقيدات الجذرية يؤدي إلى القضاء على إمكانات تثبيت النيتروجين وإعاقة نمو فول الصويا . وبالمثل، فإن معظم

دراسات السمية على الأنواع البكتيرية ذات الصلة بيئيًا مثل *E. coli* و *Bacillus subtilis* و *Pseudomonas putida* وغيرها قد أجريت لتثبيط النمو وبقاء الخلية مما يشير بوضوح إلى أن الجسيمات النانوية يمكن أن تكون تتناولها الميكروبات، ولكن هناك حاجة إلى مزيد من الدراسات فيما يتعلق بميكروبات التربة المفيدة مثل تثبيت النيتروجين، ومذيبات الفوسفات، وفطريات AM لتحديد آليات الامتصاص وعواقب تراكمها في التربة والميكروبات.

تعتمد حركة الجسيمات النانوية المهندسة في التربة على حجمها، على الرغم من أن حجم التكتل، وليس الحجم الأساسي، هو الذي يرتبط بإمكانية النقل. تتحكم العديد من العوامل في حركة هذه الجسيمات النانوية في التربة، لكن الحجم والشحنة ومعدل التكتل في وسط النقل تنبئ بحركة هذه الجسيمات النانوية في التربة. يعد وجود وأنواع الجسيمات النانوية المعدنية في محلول التربة ومعرفة التفاعل بين مواقعها النشطة ومحلول التربة أو الأيونات الأخرى أمرًا ضروريًا لفهم أفضل للتفاعلات بين الجسيمات النانوية المعدنية والكائنات الحية الدقيقة في التربة. ومع ذلك، فإن كيمياء الحل للجسيمات النانوية المعدنية محدودة للغاية ولا تتوفر بيانات ديناميكية حرارية مثل قابلية الذوبان وثوابت التفاعل للجسيمات النانوية. على المدى الطويل، هناك حاجة إلى بيانات لمعرفة تأثيرات الجسيمات النانوية المهندسة على مجموعات ميكروبات التربة في مجموعة من التربة ذات الخصائص الفيزيائية والكيميائية المختلفة والتربة من النظم البيئية المختلفة .

يمكن أن نستنتج أن العديد من الجسيمات النانوية الجديدة المهندسة باعتبارها مواد غريبة حيوية من التطبيقات الصناعية والبيئية على حد سواء نتجت عن أنشطة بشرية مختلفة كمنتجات ثانوية، والتي تجد طريقها بالفعل إلى التربة. لذلك، تعد حماية الكتلة الحيوية الميكروبية للتربة وتنوعها أحد التحديات الرئيسة للاستخدام المستدام للموارد لأن المستويات الأكبر من الكتلة الحيوية الميكروبية والتنوع تعني زيادة معدل دوران المغذيات. وقد اجريت بعض الدراسات حول سمية

الجسيمات النانوية المهندسة لكائنات التربة بسبب التعقيد الذي تتعرض به الكائنات لهذه الجسيمات النانوية في مراحل التربة المختلفة. هناك حاجة إلى مزيد من الدراسات لفهم التأثيرات الكاملة للجسيمات النانوية على الكائنات الحية المختلفة في التربة في ظل ظروف بيئية مختلفة من خلال تحديد عوامل التربة التي تتحكم في التوافر البيولوجي وسمية هذه الجسيمات النانوية.

السمية النباتية للجسيمات النانوية Phytotoxicity of Nanoparticles

تناولت العديد من الدراسات الامتصاص والانتقال والتراكم الحيوي والسمية النباتية للجسيمات النانوية بواسطة الأنظمة النباتية فوجدت تأثيرات سلبية وإيجابية وغير هامة في النباتات التي تتعرض للجسيمات النانوية. بشكل عام، وجدت بعض التغيرات المرتبطة بالجسيمات النانوية في السمات المورفولوجية للنبات بما في ذلك الجذور والأوراق وإنبات البذور. لسوء الحظ، تم إجراء عدد قليل جدًا من الدراسات حول الاستجابة الوراثية للنباتات التي تتعرض للجسيمات النانوية (Yadav, *et al.* 2014) وتم عرض الخطوط العريضة للمسارات المحتملة الرئيسة التي يمكن من خلالها دخول الجسيمات النانوية المهندسة إلى النظم البيئية الزراعية لتسبب سمية للنباتات. ظهر علم السموم النانوية في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين (Donaldson, *et al.* 2004) ومنذ ذلك الوقت حدثت زيادة هائلة في عدد دراسات المخاطر والتعرض المعنية بتقييم سلامة المواد النانوية. علاوة على ذلك، لم يكن هناك سوى القليل من الفهم أو المعرفة عن مخاطر تكنولوجيا النانو، بما في ذلك أيضًا القضايا التالية: علم السموم الأساسي للمواد النانوية المهندسة، والمصير البيئي والنقل، واستراتيجيات التوصيف الموثوقة، والمخاطر المهنية، وقابلية تطبيق خطط الإدارة الحالية، والعديد من المجالات الأخرى كانت في مهدها أو لم يتم استكشافها إلى حد كبير. ومع ذلك، على الرغم من هذا التقدم، لا تزال هناك العديد من التحديات عند تقييم مخاطر المواد النانوية على صحة الإنسان والبيئة، وبالتالي عدم اليقين المحيط

بالمخاطر التي تشكلها المواد النانوية. ظلت العديد من الأسئلة الرئيسة دون إجابة، مما يجعل من الصعب على المجتمع العلمي، وصانعي السياسات والصناعة بشكل عام اتخاذ قرارات مبنية على الأدلة التي ظهرت. لا يزال من السابق لأوانه معرفة أي إجراء/إجراءات محددة (أو في الواقع عدم اتخاذ إجراء/إجراءات) سيتم اتخاذها، ومن سيتخذها، ومتى، وما إذا كانت ستحقق النتائج المرجوة أم لا.

تتمتع التفاعلات بين النباتات والمواد النانوية الهندسية بأهمية خاصة، حيث تتفاعل النباتات بشكل مباشر مع التربة والمياه والغلاف الجوي، وتعمل كمسار محتمل لتعرض هذه الجسيمات النانوية للأنواع الأعلى من خلال السلسلة الغذائية ومن الجدير بالذكر أن تكنولوجيا النانو يمكن أن تدعم العديد من التطبيقات في علوم التربة. علاوة على ذلك، فإن استخدام الأسمدة النانوية يمكن أن يسهل نقل المغذيات إلى مجال الجذور عند الحاجة وبكميات أكثر ملائمة، وبالتالي تحسين كفاءة الاستخدام. يمكن للجسيمات النانوية المقفلة على الجذور أيضًا أن تعزز امتصاص العناصر. قد يتم تصميم مركبات التوصيل النانوية لإصلاح جزيئات التربة المحيطة أو المواد العضوية، مما يسمح بآليات إطلاق أكثر كفاءة. يمكن لهذه الميزات أن تعزز تناول المواد الفعالة بمعدل أبطأ خلال نمو المحاصيل، وتجنب الجرعات الزائدة المؤقتة، وتقليل المدخلات والنفايات. يمكن تحقيق الإطلاق البطيء للعناصر الغذائية في البيئة باستخدام الزيوليت Zeolites، وهي مجموعة من المعادن الموجودة بشكل طبيعي ولها بنية بلورية ذات طبقات تشبه قرص العسل (Mura, *et al*. 2013). وجانبًا من السمية النباتية، فإن السمية النانوية هي مصدر قلق آخر لاستخدام المواد النانوية كأسمدة. وينبغي إجراء أبحاث إضافية حول سمية الأسمدة النانوية المطورة حديثًا للتخفيف من المخاوف العامة بشأن السمية النانوية المرتبطة بها. لقد أدرجت نقطتان مهمتان فيما يتعلق بأبحاث السمية النانوية، بما في ذلك أن النباتات يجب أن يكون لديها آليات محددة لتهدئة هذه الجزيئات الصغيرة وأن المحاصيل تحتاج فقط إلى كميات ضئيلة من العناصر

الغذائية للحفاظ على الأنشطة الفسيولوجية الطبيعية في حين أن التركيزات العالية للغاية من أي عنصر غذائي قد تسبب السمية النباتية. لا توجد أبحاث كافية حول تأثير الجسيمات النانوية على البيئات الأرضية والسمية النباتية. وحيث أنه بصرف النظر عن التأثير الضار عند الاتصال المباشر بهذه الجسيمات النانوية، فيمكن أن تنتشر أيضًا في الفضاء بين الخلايا، والأبوبلاست Apoplast، ويتم امتصاصها أو تم دمجها في الأغشية. بسبب الشحن السطحي السلبي للخلايا النباتية، تسمح هذه الخلايا بالنقل Apoplastic للمركبات سالبة الشحنة إلى النباتات. نظرًا لوجود شريط كاسباريان Casparian strip، فإنه يشكل حاجزًا أمام التدفق والنقل apoplastic flow، ولا يمكن إلا النقل المتشابك symplastic transportإلى نسيج الخشب. ومع ذلك، فإن هذا الحاجز ليس مثاليًا ويمكن أن تدخل المركبات إلى نسيج الخشب من خلال الثقوب أو الخلايا التالفة دون عبور غشاء الخلية على الإطلاق ويتم نقلها إلى البراعم. ولذلك وجد أن هذه العملية هي العملية السائدة لاستيعاب المجمعات المعدنية مع المخلبيات مثل EDTA وانتقالها إلى البراعم، وهذا يشير إلى أن الجسيمات النانوية المشحونة سالبًا يمكن أن تدخل إلى الطبقة الخلوية لقشرة الجذر وفي النهاية أيضًا إلى نسيج الخشب، ولكن لا يتم امتصاصها بوساطة الخلايا. ومن الجدير بالذكر أيضًا أن السمية النباتية Phytotoxicity الناجمة عن التضخيم الحيوي Biomagnifi cation والتراكم الحيوي Bioaccumulation والتحول الحيوي Biotransformation للجسيمات النانوية المهندسة في المحاصيل الغذائية لا تزال غير مفهومة جيدًا. واشارت القليل من الدراسات حول تراكم المواد النانوية المهندسة في نباتات المحاصيل مثل اللفت والفجل والخس والذرة والخيار. تم الإبلاغ عن الفوليرينات fullerenes C 70 والفلورولس ذات الأساس الكربوني fullerols C 60 (OH) 20 ومعظم المواد النانوية ذات الأساس المعدني (أكسيد الزنك، وثاني أكسيد التيتانيوم، وأكسيد السيريوم، والمغنتيت، والذهب، والفضة، والحديد،

والنحاس) يتم تراكمها في النباتات. علاوة على ذلك، فإن المواد النانوية المتراكمة في النباتات يمكن أن تكون جزءًا من السلسلة الغذائية البيولوجية. وكجزء من ذلك، تم تشجيع الآثار الإيجابية للمواد النانوية ذات الأساس المعدني على النباتات بالنسبة لبعض المحاصيل، ومن ناحية أخرى، لوحظت أيضًا آثار سلبية كبيرة، مثل انخفاض نمو الجذور وطول البراعم والإنبات ولذلك، يمكن للجسيمات النانوية أن تشارك في العمليات الطبيعية بما في ذلك تطوير التربة وتدوير العناصر الغذائية، ولكنها يمكن أن تعمل أيضًا كوسائل لنقل الملوثات، وتغير التوافر البيولوجي للمواد وبالتالي سميتها. تتواجد الجسيمات ذات الشكل النانوي أو الغرواني بكثرة في جميع الأجزاء البيئية. تتكون هذه الأطوار النانوية من مادة عضوية طبيعية بما في ذلك المواد الدبالية، والكائنات الحية نفسها (الفيروسات والبكتيريا بما في ذلك مسببات الأمراض)، والجسيمات غير العضوية (الطين، والأكاسيد أو الكربونات) والجسيمات النانوية الهندسية ولذلك، لا يزال هناك سؤال آخر حول ما إذا كانت الجسيمات النانوية التي يتم تناولها في النباتات ذات التأثيرات السامة سوف تستهلكها الحيوانات والبشر؟ ومن ثم، فإن تقييم المخاطر البيئية يتطلب فهمًا واضحًا فيما يتعلق بالسمية البيئية للجسيمات النانوية، والتنقل الحيوي، والتوافر البيولوجي، والتفاعلية والثبات في النظم البيئية الزراعية. يمكن للمواد النانوية أن تتسبب بشكل غير مباشر في تلف الأغشية عن طريق توليد أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS)، والتي يمكنها أكسدة الروابط المزدوجة على ذيول الأحماض الدهنية من الدهون الفوسفاتية الغشائية في عملية تعرف باسم بيروكسيد الدهون. قد تؤدي هذه العملية أيضًا إلى نفاذية وسيولة الغشاء، مما يجعل الخلايا أكثر عرضة للضغط الأسموزي والفشل في امتصاص العناصر الغذائية، يمكن للأحماض الدهنية البيروكسيدية أن تؤدي إلى تفاعلات تولد جذور حرة أخرى، مما يؤدي إلى المزيد من تلف أغشية الخلايا والحمض النووي (Thul, *et al*. 2013). واجريت العديد من التجارب حول فحص العديد من الجسيمات النانوية لأوكسيد الفلز والمواد

المعتمدة على الكربون بحثًا عن السمية النباتية وكذلك السمية البيئية لعدة جسيمات نانوية في المياه والتربة والزراعة ترتبط سميتها النباتية بما يلي:

1. أكسيد الألومنيوم $Al_2 O_3$ Aluminum oxide.
2. ثاني أكسيد السيريوم CeO_2 Cerium dioxide.
3. أكسيد النحاس CuO Copper oxide .
4. الذهب Gold, Au.
5. أكسيد الحديد Iron oxide, Fe x O y or FeOOH
6. موليبدينوم Molybdenum, Mo
7. أكسيد النيكل Nickel oxide, NiO
8. السيلينيوم Selenium Se
9. السيليكون Silicon, SiO_2
10. الفضة Silver, Ag
11. ثاني أكسيد التيتانيوم Titanium dioxide TiO_2
12. اوكسيد الزنك Zinc oxide ZnO

يمكن أن يشمل التأثير السام للجسيمات النانوية المعدنية وأكسيد المعادن ثلاث آليات متميزة على الأقل. تتضمن هذه الآليات ما يلي: (1) قد تطلق الجسيمات مواد سامة في وسط التعرض، على سبيل المثال، أيونات Ag الحرة من جزيئات الفضة. (2) قد تنتج التفاعلات السطحية مع الوسائط مواد سامة، مثل الجذور الكيميائية أو أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS). (3) قد تتفاعل الجسيمات أو أسطحها بشكل مباشر مع الأهداف البيولوجية وتعطلها، مثل تفاعل أنابيب الكربون النانوية مع الأغشية أو الإقحام مع الحمض النووي (Ma, *et al.* 2013). ومع ذلك، هناك العديد من الفجوات المعرفية التي يجب سدها للحصول على فهم شامل للسمية البيئية للجسيمات النانوية لتقييم المخاطر وإدارتها للعديد من المواد. فيما يتعلق بجسيمات أوكسيد الزنك النانوية، فقد وردت ثلاثة أسباب: أولاً، هناك نقص كبير

في توصيف جسيمات أوكسيد الزنك النانوية ونظام التعرض في دراسات السمية البيئية التي أجريت حتى الآن. ثانيًا، هناك حاجة إلى أدوات وتقنيات للتمييز بين السمية الناجمة عن الجسيمات وتأثيرات Zn^{+2} الذائبة. ثالثاً، لا توجد بيانات كافية عن التأثيرات المزمنة الناجمة عن التعرض طويل الأجل ومنخفض التركيز، وهو ما قد يكون أكثر تمثيلاً للتعرض البيئي الحقيقي. واستنادًا إلى هذه الفجوات المعرفية، يجب أن تركز دراسة السمية البيئية المستقبلية لجسيمات أكسيد الزنك النانوية على التأثيرات طويلة المدى لجسيمات أكسيد الزنك النانوية عند مستويات التعرض المنخفضة فضلا عن التراكم الحيوي والنقل الغذائي لهذه الجسيمات النانوية في البيئات المائية والبرية.

فيما يتعلق بالعوامل التي تؤثر على السمية النباتية للجسيمات النانوية، فقد ورد في العديد من الأدبيات أن امتصاص الجسيمات النانوية وانتقالها وتراكمها يعتمد على نوع النبات وحجمه ونوعه وتركيبه الكيميائي والتصورات الخيالية واستقراره وهذا يعني أن هناك عوامل تتعلق بالجسيمات النانوية والنباتات والبيئة على حد سواء، في حين يتضمن العامل الأول حجم الجسيمات وشكلها وخصائص السطح والتركيز (السطح التفاعلي، طلاء السطح، التركيز، الذوبان)، وسط التشتت، والمثبتات. أما العوامل المتعلقة بالنباتات فتشمل فتح الثغور، والناقلات الغشائية، والمستقبلات السطحية للجذور، والحالة الفيزيائية للنبات، وأخيراً العوامل البيئية وتشمل الإشعاع أو ضوء الشمس، والرطوبة، والكائنات الحية، ومكونات التربة/الماء/الهواء

درس العديد من الباحثين تفاعلات الجسيمات النانوية مع النباتات فبينوا درجات مختلفة من السمية الظاهرية والسمية الجينية فضلا عن السمية النباتية. ومن الواضح أن معظم المواد النانوية المدروسة تؤثر على النباتات في مراحل نمو مختلفة. على سبيل المثال، تمنع جسيمات السيليكون النانوية تمامًا إنبات بذور قرع الكوسا، في حين وجد اخرون أن الجسيمات النانوية للسليكون SiO_2 يمكن

استخدامها كسماد لتحسين محصول الطماطة (up up to 8 g L −1 nanoparticles-SiO 2 for tomato) وقد لوحظ نفس الاتجاه بالنسبة للذرة والريحان (*Ocimum basilicum*) تحت ضغط الملوحة. تقلل جسيمات السيريوم النانوية CeO_2 من إنبات البذور في الذرة والطماطم والخيار والسبانخ. يتأثر نمو الجذور أيضًا بالمواد النانوية المهندسة. على سبيل المثال، تعمل جسيمات التيتانيوم النانوية TiO_2 على تقليل نمو الجذور في البصل والقمح والتبغ، كما تقلل جسيمات النحاس النانوية من نمو الجذور في الكوسا والبصل.
تمنع الجسيمات النانوية الأخرى من العناصر الأرضية النادرة مثل La_2O_3 وGd_2O_3 وYb_2O_3 نمو الجذور في الملفوف والخيار والخس والفجل واللفت والطماطم والقمح، في حين أنها أكثر فسيولوجية. وقد لوحظت تأثيرات جسيمات CeO_2 النانوية المطبقة على الخيار والأرز والشعير تمنع جزيئات ثاني أكسيد الكربون والزنك نمو الجذور في البصل والطماطم وتمنع جزيئات أكسيد الزنك النانوية نمو الجذور في الثوم تمامًا. تعمل المواد النانوية الهندسية الأخرى مثل جسيمات ZnO النانوية على تقليل إنتاج الكتلة الحيوية في قرع الكوسا، حيث تزيد السمية النباتية لجسيمات الزنك النانوية ZnO على محاصيل مختلفة بما في ذلك بذور اللفت الزيتية، البصل والفول السوداني ودوار الشمس، وفول الصويا والقمح. قد تختلف هذه التأثيرات باختلاف خصائص التربة. تقلل الجسيمات النانوية للفضة والنحاس Ag وCu من إنتاج الكتلة الحيوية في القرع بينما تعمل الجسيمات النانوية للتيتانيوم والزنك TiO_2 وZnO على تقليل إنتاج الكتلة الحيوية في القمح.

تشير التقارير أيضًا إلى أن الجسيمات النانوية يمكن أن تظهر تأثيرات سامة للجينات. أظهرت الجسيمات النانوية للتيتانيوم TiO_2 قدرتها على إحداث تلف في الحمض النووي في البصل والتبغ والذرة والفاصوليا كما أن الجسيمات النانوية ل CeO_2 و ZnO تسبب ظهور نطاقات جديدة في الحمض النووي الجينومي

لفول الصويا. أن امتصاص الجسيمات النانوية، والتراكم الحيوي، والتحول الحيوي، ومخاطر الجسيمات النانوية بالنسبة للمحاصيل الغذائية لا تزال غير مفهومة جيدًا. في الوقت الحاضر، يقوم العديد من الباحثين في جميع أنحاء العالم بإجراء أبحاث للإجابة على أسئلة حول تفاعل المواد النانوية الهندسية مع النباتات الزراعية (Hong, *et al.* 2013) عبر الأجزاء الرئيسة من المياه (المياه السطحية ومحطات معالجة مياه الصرف الصحي) والوسائط الصلبة (بما في ذلك التربة والرواسب والمواد الصلبة الحيوية)، وعبر المستقبلات الرئيسة للكائنات المائية، والكائنات الحية الدقيقة، والمجتمعات المعقدة (في التربة، الرواسب أو مياه الصرف الصحي) والنباتات الأرضية، هناك بعض التداخلات في تركيزات الجسيمات النانوية الهندسية النموذجية والمقيسة مقابل تلك التي يتم تناولها في دراسات السمية. علاوة على ذلك، هناك شكوك كبيرة فيما يتعلق بالتوافر الحيوي للجسيمات النانوية المهندسة والتركيزات الفعالة التي تسبب السمية من خلال طريقة معينة من العمل داخل المستقبل. ولتحقيق أقصى قدر من الواقعية البيئية، ينبغي إجراء تقييم المخاطر بأكبر قدر ممكن ليشمل المستقبلات ذات الصلة بيئيا وظروف التعرض. لذلك، يمكن إعطاء تركيزات منخفضة للغاية إلى عالية إلى حد ما من الجسيمات النانوية المهندسة بشكل روتيني في تقييمات السمية. لذلك، يمكن أن نستنتج أنه لا تزال هناك أسئلة أخرى بحاجة إلى إجابة، بما في ذلك تقييم المخاطر البيئية الناتجة عن السمية البيئية للجسيمات النانوية، والتنقل الحيوي، والتوافر الحيوي، والتفاعلية والثبات في النظم الإيكولوجية الزراعية.

الجسيمات النانوية في الماء Nanoparticles in Water

يمكن تصنيف الجسيمات النانوية في الماء إلى طبيعية Natural وعرضية Incidental وملفقة Fabricated. كانت الجسيمات النانوية موجودة في الطبيعة منذ بداية تاريخ الأرض، ولا تزال موجودة في البيئة على شكل غبار بركاني، وغبار قمري، ومركبات معدنية للتربة، وغرويات التربة، وما إلى ذلك.

وفيما يتعلق بالجسيمات النانوية العرضية، فيمكن أيضًا تعريفها بأنها نفايات الجسيمات النانوية البشرية المنشأ، والتي يتم إنتاجها نتيجة للأنشطة البشرية مثل العمليات الصناعية، وأبخرة اللحام، واحتراق الفحم، وعوادم المركبات، وما إلى ذلك. على النقيض من ذلك، تم تصميم وإنتاج الجسيمات النانوية المصنعة لتحقيق خصائص فيزيائية وكيميائية محددة تستهدف تطبيقات فريدة من نوعها، وتتكون هذه الجسيمات النانوية من أربعة أنواع رئيسة بما في ذلك المواد النانوية القائمة على الكربون، والمواد النانوية القائمة على المعادن، والمركبات النانوية (Yadav, *et al*. 2014).

تظهر الجسيمات المصنعة أو الهندسية بعض الكيمياء الغروانية والتجميعية المعقدة، والتي من المحتمل أن تتأثر ببعض العوامل بما في ذلك حجم الجسيمات وشكلها ومساحة سطحها وشحنتها السطحية، فضلا عن خصائص امتصاص المواد. وإلى جانب هذه الجسيمات النانوية المهندسة، يمكن اعتبار المياه العذبة الطبيعية والمياه الطبيعية الأخرى مصدرًا للجسيمات النانوية الطبيعية. أما بالنسبة للمياه العذبة الطبيعية فهي تحتوي على مواد غروانية معقدة للغاية منها معادن غير عضوية ومواد عضوية مثل المواد الدبالية. بينما في المياه الطبيعية الأخرى، تم العثور على الجسيمات النانوية في العديد من أنواع هذه المياه الطبيعية بما في ذلك المحيطات، والمياه الجوفية، والمياه السطحية، والمياه الجوية، وحتى مياه الشرب المعالجة. في الأنظمة المائية، الغروانية هو المصطلح العام المطبق على الجزيئات التي يتراوح حجمها بين 1 نانومتر و1 ميكرومتر. وقد تم تحديد جزء المواد النانوية الطبيعية باعتباره مصدر قلق خاص بسبب التغيرات التي تحدث في نطاق الحجم هذا، على الرغم من أن نطاق الحجم الأكثر أهمية من حيث العمليات البيئية لم يتم تحديده بشكل جيد. تشتمل الغرويات المائية على مواد عضوية جزيئية كبيرة، مثل الأحماض الدبالية والفولفيك، والبروتينات، والببتيدات، فضلا عن الأنواع غير العضوية الغروية، عادةً الحديد المائي وأكاسيد المنغنيز إن حجمها

الصغير ومساحة سطحها الكبيرة لكل وحدة كتلة تجعلها مراحل ربط مهمة لكل من الملوثات العضوية وغير العضوية. تلعب المواد النانوية العرضية التي تحدث بشكل طبيعي والبشرية دورًا مهمًا وغالبًا ما يتم تجاهله تمامًا في تنظيم سلوك الملوثات في الأنظمة المائية المعقدة. ينطبق هذا على كل من الأنظمة المائية التي يصنعها الإنسان، مثل المواد النانوية في محطات معالجة المياه وأنظمة التوزيع والأنظمة المائية الطبيعية، مثل الأنهار والمياه الجوفية. ما كان مفقودًا بشكل عام هو مثال على انسكاب ملوث مائي كبير وحاد حيث تم تحديد الدور المركزي للمواد النانوية التي تحدث بشكل طبيعي والعرضي بوضوح (Yang, *et al*. 2015). بسبب الاستخدام المكثف للأسمدة النانوية، يتم نقل كميات كبيرة من العديد من العناصر الغذائية (أساسًا N وP) إلى المسطحات المائية السطحية والجوفية، مما يعطل النظم البيئية المائية ويهدد صحة الإنسان وكذلك الحياة المائية. لذلك، فإن الاتجاه البحثي العاجل والضروري عمليًا هو تطوير تقنيات عالية الكفاءة والفعالية.

الأسمدة النانوية الصديقة للبيئة (بما في ذلك المغذيات الكبيرة والمغذيات الدقيقة) لتحل محل الأسمدة التقليدية ولضمان إنتاج الغذاء المستدام مع حماية البيئة. وبالتالي، فإن تطوير الأسمدة النانوية يمثل أولوية عالية في أبحاث الأسمدة، في حين يمكن اعتبار هذه الأسمدة النانوية واعدة بالمغذيات النانوية النباتية. وفيما يتعلق بالسلوك البيئي وتأثير الجسيمات النانوية في البيئات المائية، فمن الأهمية بمكان أن ندرك أن الجسيمات النانوية قد تخضع لتغييرات كبيرة في الطور السائل. هناك العديد من المراجعات حول سلوك وتأثيرات الجسيمات النانوية في الأنظمة المائية تركز بشكل أساسي على الجسيمات النانوية المصممة صناعيًا، والتي تسمى في الغالب بالجسيمات النانوية المصنعة أو الهندسية. نظرًا لخصائصها المتميزة، تُستخدم هذه الجسيمات النانوية على نطاق واسع وبشكل مفيد في التطبيقات الصناعية والتقنية والطبية والصيدلانية والتجميلية وعلوم الحياة. على وجه الخصوص، تعد الجسيمات النانوية الهندسية واعدة لتحسين الجودة البيئية

عند استخدامها، على سبيل المثال، في عمليات معالجة المياه. ومع ذلك، فقد كانت هناك تحذيرات مبكرة بشأن المخاطر البيئية المرتبطة باستخدام وإنتاج هذه الجسيمات على نطاق واسع فمن المحتمل أن تنبعث الجسيمات النانوية الهندسية إلى النظم البيئية وقد ثبت أنها ذات أهمية في مجال السمية البيئية. يبدو أن المجتمع العلمي في هذا المجال من البحث، إلى حد كبير، يسير في أرض مجهولة، في حين أن هذه الأرض المجهولة ليست مجهولة تمامًا.

يعد فهم سلوك ودور هذه الجسيمات النانوية في الأنظمة المائية مهمة معقدة للغاية، بما في ذلك فهم الخصائص الفيزيائية والكيميائية المتعددة ومراعاة وجود مجموعة كبيرة من هذه الجسيمات النانوية الجيولوجية والبيولوجية والبشرية. تشير التقارير إلى أن الجسيمات النانوية في الأنظمة المائية يمكن أن تتشكل عن طريق:

(1) العمليات الطبيعية اللاأحيائية أو الحيوية.

(2) ذات الأصل الطبيعي ولكنها ناجمة عن النشاط البشري مثل التعدين.

(3) الجسيمات النانوية المهندسة التي دخول الأنظمة المائية بالصدفة.

(4) جسيمات نانوية تمت هندستها والتي تمت إضافتها عمدًا إلى هذه الأنظمة، على سبيل المثال، جسيمات الحديد النانوية Fe Nanoparticles لمعالجة المياه الجوفية وجسيمات التيتانيوم النانوية TiO_2 في معالجة المياه. من ناحية أخرى، تم الإبلاغ عن وجود الجسيمات النانوية في الأنظمة المائية، في حين من المرجح أن تكون الجسيمات النانوية الهندسية جزءًا لا متناهٍ من الجسيمات النانوية في البيئة مقارنة بالجسيمات النانوية الطبيعية.

تلعب كل من المواد النانوية العرضية التي تحدث بشكل طبيعي والبشرية دورًا مهمًا وغالبًا ما يتم تجاهله تمامًا في تنظيم سلوك الملوثات في الأنظمة المائية المعقدة. ينطبق هذا على كل من الأنظمة المائية التي من صنع الإنسان (المواد النانوية في محطات معالجة المياه وأنظمة التوزيع) والأنظمة المائية الطبيعية (الأنهار والمياه

الجوفية). ومن خلال تطبيق منظورات علم النانو، يمكن إثبات أن الجسيمات النانوية تشكل عنصرًا مهمًا في خليط الملوثات داخل الأنظمة المائية. نظرًا لانتقالها وسميتها وتوافرها البيولوجي وتأثيرها البيئي، فإن الجسيمات النانوية باعتبارها مادة سامة لا تعتمد فقط على تركيزها ولكن أيضًا على شكلها. لذلك، تجدر الإشارة إلى أهمية دراسة دور الملوثات النانوية كعنصر مهم في سيناريوهات تلوث النظام البيئي المائي الحالي والمستقبلي. استخدمت الجسيمات النانوية لتحسين جودة التربة والهواء والماء باستخدام المعالجة النانوية التي هي العملية التي يمكن أن يؤدي فيها تطبيق المواد النانوية التفاعلية إلى تعزيز كل من التحفيز والتخفيض الكيميائي للملوثات مما يؤدي إلى إزالة سموم الملوثات وتحويلها. لقد أصبحت هذه العملية أحد المحاور الرئيسة للبحث والتطوير مع إمكانات كبيرة لحماية البيئة من التلوث باستخدام مواد نانوية مختلفة مثل الزيوليت وأكاسيد المعادن وأنابيب الكربون النانوية والمعادن النبيلة وثاني أكسيد التيتانيوم. يمكن أن نستنتج أن حركة وانتقال الجسيمات النانوية داخل المياه هي قضية ناشئة. وبخلاف ذلك، تم تناول التأثيرات المختلفة للجسيمات النانوية وكذلك استخدام المعالجة النانوية في مياه الصرف الصحي والمياه الجوفية والمياه الملوثة. وقد لوحظت تأثيرات مختلفة للجسيمات النانوية على المياه، وفي الوقت نفسه تم بنجاح إثبات استخدام بعض الجسيمات النانوية (مثل الحديد النانوي الصفري) أو المواد النانوية لتحويل وتحلل الملوثات في التربة والمياه.

الأسمدة النانوية Nanofertilizers

أدى الطلب المتزايد على الغذاء من جانب الإنسان إلى تعريض الموارد الطبيعية للخطر وتفاقم تدهور التربة والبيئة. ونظراً لأن الطبيعة لا تعترف بالنفايات، حيث تظهر من كل موت حياة جديدة من خلال إعادة تدوير دقيقة للعناصر الأساسية الموجودة فيما يسمى بالنفايات. ولذلك، فإن أهمية الروابط والترابط الموثقة أيضًا من خلال العلاقة الوثيقة بين أمن التربة والأمن المائي وأمن الطاقة والأمن المناخي

والأمن الاقتصادي والأمن السياسي. وفي الواقع، ترتبط الجوانب الاقتصادية والسياسية ارتباطًا وثيقًا بالأمن الغذائي من ناحية وأمن الموارد الطبيعية من ناحية أخرى ولذلك، يجب تحسين الإنتاجية المشتركة الناتجة عن الاستعمال البشري للموارد الأولية (التربة والمياه والمناخ) والمدخلات الثانوية (الأسمدة والري والحراثة والتعديلات). علاوة على ذلك، فإن فهم العلاقة بين المياه والتربة والنفايات وإدارتها بحكمة لتحقيق الأمن الغذائي أمر ضروري مهم لتحقيق الاستعمال المستدام للموارد الطبيعية، وتحسين البيئة واستدامة وظائف وخدمات النظام البيئي، وتعزيز رفاهية الإنسان (Lal, 2015). يؤدي علم النانو أو تكنولوجيا النانو إلى تطوير مجموعة من تطبيقات تكنولوجيا النانو غير المكلفة لتعزيز نمو النباتات وحمايتها لذلك، توفر الجسيمات النانوية والكبسولات النانوية وسيلة فعالة لتوزيع المبيدات والأسمدة بطريقة خاضعة للرقابة مع تحديد موقع عالي وبالتالي تقليل الأضرار الجانبية. بسبب استخدام المبيدات والأسمدة في تحسين إنتاج الغذاء، فإنه يؤدي إلى إطلاق غير منضبط للمواد غير المرغوب فيها في البيئة. في الوقت الحاضر، تمثل تكنولوجيا النانو نهجا واعدا في تحسين الإنتاج الزراعي ومعالجة التربة والمياه الجوفية الملوثة. وفيما يتعلق بالتطبيقات الحالية لتقنيات النانو في الدراسات البيئية الزراعية، أفاد الباحثون أنه ينبغي الاهتمام بمصير المواد النانوية بمجرد إدخالها في كل من المياه والتربة. وفي إطار تكنولوجيا النانو، أدى استخدام الجسيمات النانوية بالفعل إلى تحسين نوعية البيئة وساعد في اكتشاف المواقع الملوثة ومعالجتها ومع ذلك، تشير التقارير إلى أن عددًا قليلا فقط من المواد النانوية أظهرت تأثيرات سامة محتملة (Mura, *et al.* 2013).

يمكن تعريف الأسمدة النانوية بأنها الجسيمات النانوية أو المواد النانوية التي يمكن أن تزود النباتات بالعناصر الغذائية أو المواد التي تزيد من كفاءة أنشطة الأسمدة التقليدية. يعد تطبيق الأسمدة النانوية بديلا عن ألاسمدة التقليدية مفيدًا

لأن هذه الأسمدة النانوية لديها القدرة على إطلاق العناصر الغذائية في التربة بشكل ثابت وبطريقة خاضعة للرقابة مما يمنع تلوث المياه. نظرًا لأن تطوير وتطبيق الأسمدة النانوية لا يزال في مراحله الأولية، هناك عدد قليل من الأبحاث أو الدراسات النظامية حول تأثيرات ومزايا استعمال الأسمدة النانوية ذات المغذيات الدقيقة في الظروف الميدانية ومع ذلك، من الناحية العملية، تتيح تكنولوجيا النانو مزايا واسعة النطاق في البحوث الزراعية، مثل الوقاية من الأمراض وعلاجها في النباتات باستخدام مختلف المبيدات النانوية وإدارة المغذيات في الحقل الزراعي باستخدام الأسمدة النانوية. أن الأسمدة النانوية لها عدة أدوار في الزراعة المستدامة وبالتالي، يمكن للجسيمات النانوية المحتوية على المغذيات الدقيقة أن تحسن نمو النبات عن طريق توفير العناصر الغذائية وبسبب ندرة موارد المياه ومحدودية الأراضي الصالحة للزراعة الإضافية في العالم، هناك حاجة إلى زيادة كبيرة في استخدام الأسمدة الزراعية لتحقيق الزيادة الهائلة المطلوبة في إنتاج الغذاء العالمي. لذلك، للحفاظ على المستويات الحالية لإنتاج الحبوب، نشأت مشاكل بيئية خطرة على مستوى العالم بسبب استخدامات الأسمدة التقليدية المتنوعة بمعدلات عالية ولمدة طويلة في القطاع الزراعي في الآونة الأخيرة، تم تطوير وتطبيق أنواع جديدة من الأسمدة باستخدام تقنية النانو المبتكرة. يعد هذا الجيل الجديد من الأسمدة النانوية أحد الخيارات الفعالة المحتملة لتعزيز الإنتاج الزراعي العالمي اللازم لتلبية المتطلبات المستقبلية للأعداد المتزايدة من السكان. أن بعض المواد النانوية الهندسية (مثل الأسمدة النانوية)، والتي يمكن أن تعزز نمو النبات في نطاقات تركيز معينة. يمكن استخدام هذه الأسمدة النانوية في الزراعة لزيادة الإنتاج الزراعي للمحاصيل و/أو تقليل التلوث البيئي. نظرًا للعديد من المشكلات المتعلقة باستخدام الأسمدة الكيماوية التقليدية، فإن انخفاض كفاءة الاستخدام هو العامل البارز، الأمر الذي لا يؤدي إلى زيادة تكلفة الإنتاج فحسب، بل يسبب أيضًا العديد من التلوث البيئي. ولذلك، هناك حاجة ماسة للأسمدة النانوية، والتي أثبتت

أنها علامة بارزة أخرى في تاريخ إنتاج المحاصيل من خلال تكنولوجيا النانو. فضلا عن ذلك، يمكن للأسمدة النانوية أن تحل هذه المشكلة نظرًا لحجمها النانوي وكمواد نانوية ذات مساحة سطحية كبيرة. يمكن أيضًا استخدام هذه الأسمدة النانوية كطلاءات نانوية، على سبيل المثال، طبقة نانوية كبريتية (طبقة 100 نانومتر)، ما يضمن إطلاقها بشكل متحكم فيه، وحماية السطح، وفي النهاية تعزيز كفاءة استعمالها ، ومع ذلك، فقد ثبت أن الأسمدة النانوية أكثر كفاءة مقارنة بالأسمدة التقليدية أو العادية لأن هذه الجسيمات النانوية تقلل من فقدان النيتروجين بسبب الانبعاثات والترشيح والدمج على المدى الطويل بوساطة الكائنات الحية الدقيقة في التربة ، فضلا عن ذلك، فإن الأسمدة التي يتم إطلاقها بشكل متحكم قد تعمل أيضًا على تحسين التربة عن طريق تقليل التأثيرات السامة المرتبطة بالإفراط في استخدام الأسمدة الكيماوية التقليدية. وهناك بعض التقارير حول استخدام الأسمدة بطيئة الإطلاق المغلفة بالنانو كما تم استعمال جسيمات الكيتوسان النانوية البوليمرية القابلة للتحلل بيولوجيًا (حوالي 78 نانومتر) للإطلاق المتحكم فيه لمصادر سماد NPK مثل اليوريا وفوسفات الكالسيوم وكلوريد البوتاسيوم. كما استعملت بعض المواد النانوية مثل الكاولين والجسيمات النانوية البوليمرية المتوافقة حيويًا، والتي يمكن استخدامها أيضًا لهذا الغرض.

ونظرًا للاستعمال المفرط للأسمدة النيتروجينية والفوسفورية، فإنها تؤثر في المياه الجوفية وتؤدي أيضًا إلى التخثث Lead to eutrophication في النظم البيئية المائية Aquatic ecosystems. علاوة فضلا عن، ونظرًا لانخفاض كفاءة استخدام الأسمدة للأسمدة التقليدية (30-35%، و18-20%، و35-40% للنيتروجين والفوسفور والبوتاسيوم، على التوالي، فإن إنتاج الغذاء سوف ينخفض ويجب أن تكون أكثر كفاءة من أي وقت مضى. ووفقا لهذا، ومحدودية توافر موارد الأراضي والمياه، لا يمكن تحقيق تنمية الزراعة إلا من خلال زيادة الإنتاجية من خلال الاستعمال الفعال للتكنولوجيات الحديثة. ومن بين هذه

المجالات، تتمتع تكنولوجيا النانو بالقدرة على إحداث ثورة في النظم الزراعية، والطب الحيوي، والهندسة البيئية، والسلامة والأمن، والموارد المائية، وتحويل الطاقة، والعديد من المجالات الأخرى. يعد تغير المناخ والاستعمال المستدام للموارد الطبيعية والعوامل البيئية والتحضر وتراكم المبيدات الحشرية والإفراط في استخدام الأسمدة من أهم مشاكل الزراعة الحديثة. لقد استعملت تقنيات وأساليب جديدة لتجنب الآثار الضارة لهذه العوامل وتعد المواد النانوية إحدى التقنيات الجديدة التي تدخل في جميع مجالات حياتنا تقريبًا ويتم استخدامها في الإنتاج الزراعي. يشير الباحثون إلى العديد من الفوائد المحتملة لتقنية النانو. ولذلك، يُذكر أن من أبرز خصائص المعادن النانوية واكاسيد المعادن هي التوافر المعزز بشكل كبير للنباتات والانتقال داخل هذه النباتات. وبالتالي، فإن استعمال تركيبات المغذيات الدقيقة القائمة على الجسيمات النانوية (تغذية النباتات النانوية) قد يوفر منصة جديدة فعالة للغاية لقمع أمراض المحاصيل وتعزيز الغلة من خلال تعزيز أكثر استهدافًا واستراتيجيًا لمقاومة العائل المضيف. على الرغم من أن الأسمدة مهمة جدًا لنمو النبات وتطوره، إلا أن معظم الأسمدة المستعملة تصبح غير متاحة للنباتات بسبب العديد من العوامل، مثل الترشيح، والتحلل عن طريق التحلل الضوئي، والتحلل المائي، والتحلل الطبيعي فمن الضروري تقليل خسائر المغذيات في التسميد، وزيادة إنتاجية المحاصيل من خلال استغلال تطبيقات جديدة بمساعدة تكنولوجيا النانو والمواد النانوية. وفيما يتعلق بالأسمدة النانوية ودورها في الزراعة المستدامة، فقد كانت ولا تزال من أهم القضايا في القطاع الزراعي. ونظرا لأهمية الأسمدة المشتقة من تكنولوجيا النانو، فقد بدأت تجذب الاهتمام في مجال الزراعة، وحيث أنه لا توجد دراسات كافية حول الأسمدة المنتجة بتقنية النانو وعلى الرغم من أنه من المعروف أن هذه الأسمدة النانوية لها تأثير كبير على الإنتاج الزراعي فقد تحتوي الأسمدة النانوية أو العناصر الغذائية المغلفة بالنانو على خصائص فعالة للمحاصيل، وتطلق العناصر الغذائية عند الطلب،

وتتحكم في إطلاق المواد الكيميائية والأسمدة التي تنظم نمو النبات وتعزز النشاط المستهدف، ومن المعروف أن النباتات العليا لديها قدرة ملحوظة على تطوير آلية لأداء أفضل في ظل الظروف المناسبة وغير المناسبة. وفيما يتعلق بهذه النباتات العليا، يرغب العلماء/الباحثون في تطوير تقنيات جديدة يمكن أن تكون مناسبة للنباتات لدعم وظائفها الأصلية. تتمتع الأسمدة النانوية أو الجسيمات النانوية بخصائص فيزيائية وكيميائية فريدة وإمكانية تعزيز عملية التمثيل الغذائي للنبات، ومن ناحية أخرى تشير التقارير إلى أن الجسيمات النانوية المهندسة لديها القدرة على الدخول في خلايا وأوراق النباتات كما يمكنها أيضًا نقل الحمض النووي والمواد الكيميائية إلى الخلايا النباتية. يقدم هذا المجال من البحث إمكانيات جديدة في التكنولوجيا الحيوية النباتية لاستهداف ومعالجة جينات محددة والتعبير عنها في خلايا معينة من النباتات. يلزم البحث في مجال تكنولوجيا النانو لاكتشاف التطبيقات الجديدة لاستهداف توصيل محدد للمواد الكيميائية والبروتينات والنواة للتحول الوراثي للمحاصيل. تمتلك تقنية النانو إمكانات كبيرة لتوفير فرصة للباحثين في علوم النبات والمجالات الأخرى لتطوير أدوات جديدة لدمج الجسيمات النانوية في النباتات التي يمكن أن تزيد من الوظائف الحالية وتضيف وظائف جديدة. وفي إطار الزراعة المستدامة، يعد تطبيق تكنولوجيا النانو المبتكرة في الزراعة (بما في ذلك تطوير الأسمدة) أحد الأساليب الواعدة لزيادة إنتاج المحاصيل بشكل كبير (Lal, 2008). نظرًا للقلق من انخفاض كفاءة الأسمدة التقليدية (30-50٪ فقط) وقلة خيارات الإدارة لتحسين المعدلات، فقد تم تطبيق تكنولوجيا النانو في أبحاث الأسمدة وتطويرها بالمقارنة مع الأسمدة التقليدية، من المتوقع أن تحقق الأسمدة النانوية الفوائد التالية بما في ذلك تعزيز كفاءة استخدام الأسمدة، وتحسين كبير في نمو المحاصيل وإنتاجيتها، وتقليل فقد المغذيات و/أو تقليل التأثيرات الضارة والآثار البيئية وعلى الرغم من أن العديد من الخبراء الزراعيين كانوا مهتمين بتطوير وتطبيق الأسمدة ذات الصلة بالمواد النانوية إلا أن الأبحاث ذات

الصلة المباشرة غير متوافرة. ومع ذلك، فقد أظهرت بعض الأبحاث الحديثة في مجال تكنولوجيا النانو منظورًا واعدًا لتطوير الأسمدة النانوية وتطبيقها. وبناءً على ذلك فإن الأسمدة النانوية هي إما مواد نانوية يمكنها توفير عنصر غذائي واحد أو أكثر للنباتات وتعزيز نموها وإنتاجيتها، أو تلك التي تسهل تحسين أداء الأسمدة التقليدية، ولكنها لا تزود المحاصيل بالعناصر الغذائية بشكل مباشر. ولذلك فإن الأسمدة النانوية تتمتع بالخصائص التالية:

1. حاملات المغذيات ذات الأبعاد النانوية التي تتراوح من 30 إلى 40 نانومتر وقادرة على الاحتفاظ بوفرة من الأيونات المغذية بسبب مساحة سطحها العالية فضلا عن استغلال الخصائص الفريدة لهذه الجسيمات النانوية.

2. تهدف هذه الأسمدة النانوية إلى تحسين كفاءة استخدام العناصر الغذائية بسبب إطلاق العناصر الغذائية ببطء وثبات لأكثر من 30 يومًا مما قد يساعد في تحسين كفاءة استعمال العناصر الغذائية دون أي آثار سيئة مرتبطة بها.

3. يمكن تصنيع هذه الأسمدة النانوية عن طريق تحصين العناصر الغذائية منفردة أو في مجموعات على الممتزات ذات الأبعاد النانوية والمصممة لتوصيلها ببطء على مدى مدة طويلة من الزمن، فإن فقدان العناصر الغذائية يكون أدى إلى انخفاض كبير في السلامة البيئية. يمكن استعمال الأسمدة النانوية والمركبات النانوية في تحسين كفاءة استخدام العناصر الغذائية عن طريق منع أيونات العناصر الغذائية من التثبيت أو الضياع في البيئة فضلا عن التحكم في إطلاق العناصر الغذائية من حبيبات الأسمدة.

يمكن تصنيف الأسمدة النانوية على أنها أسمدة نانوية ذات مغذيات كبيرة وأسمدة نانوية ذات مغذيات دقيقة. فيما يتعلق بالأسمدة النانوية ذات المغذيات الكبيرة، فهي تتكون كيميائيًا من واحد أو أكثر من عناصر المغذيات الكبيرة مثل N، P، K، Mg، وCa، والتي تكون قادرة على توفير هذه المغذيات الكبيرة الأساسية للنباتات. بشكل عام، تُستخدم أسمدة المغذيات الكبيرة هذه (أسمدة N وP بشكل

أساسي) بكميات كبيرة لزيادة إنتاج الغذاء والألياف والسلع الأساسية الأخرى. من ناحية أخرى، تشمل الأسمدة النانوية ذات المغذيات الدقيقة الحديد والمنغنيز والزنك والنحاس والمولبيدنم من بين الاخرى. تشير التقارير إلى أن الأسمدة النانوية ذات المغذيات الدقيقة قد تعزز التوافر الحيوي للمغذيات السابقة للنباتات حتى في ظل أسوأ الحالات أو الظروف، وإلى جانب الأسمدة النانوية، هناك الأسمدة المعززة بالمواد النانوية فضلا عن ناقلات الأسمدة النانوية الأخرى. ويمكن تعريف هذه الأسمدة المعززة بالمواد النانوية بأنها تلك المواد النانوية التي عند إضافتها إلى المغذيات النباتية يمكن أن تزيد من كفاءة امتصاص النبات للمغذيات (المغذيات) و/أو تقلل من الآثار الضارة للأسمدة التقليدية.

المغذيات (المواد الغذائية) وأهم مثال على هذا النوع هو الزيوليت المعزز بالمغذيات **Nutrient-augmented-zeolites**. ومن الجدير بالذكر أن هناك بعض معززات نمو النباتات الجديدة ذات الجسيمات النانوية ذات آليات غير واضحة. حيث أن هناك العديد من التقارير التي توثق أن تطبيق بعض الأنواع الأخرى من الجسيمات النانوية يمكن أيضًا أن يعزز نمو النبات إلى حد ما (تحت تركيز منخفض) على الرغم من حقيقة أن هذه الجسيمات لا تحتوي على أي مغذيات نباتية أساسية تشمل الأمثلة االانموذجية لهذا النوع الجسيمات النانوية من: SiO_2 ، والسيلينيوم والنحاس، والحديد و الزنك، والفوسفور و أنابيب الكربون النانوية ، لذلك، يمكن أن نستنتج أنه يمكن تصنيف الأسمدة النانوية إلى أربع فئات بما في ذلك:

- الأسمدة النانوية ذات المغذيات الكبيرة.
- الأسمدة النانوية ذات المغذيات الدقيقة.
- الأسمدة النانوية المحملة بالمغذيات.
- المواد النانوية المعززة لنمو النبات.

ويمكن مناقشة كل فئة بالإشارة إلى التركيب الكيميائي للمواد النانوية، وحجم الجسيمات، والتركيزات المطبقة، وأنواع النباتات المستفيدة، وطرائق حضانة النباتات، وجوانب ومعدلات تعزيز نمو النبات. تشير التقارير إلى أن استخدام الأسمدة النانوية (خاصة البيولوجية منها) له بعض الفوائد بما في ذلك كفاءة استعمال العناصر الغذائية العالية، ويقلل من سمية التربة، ويقلل من الآثار السلبية المحتملة المرتبطة بالجرعة الزائدة ويقلل من تكرار التطبيق. ومن ثم يمكن اعتبار تكنولوجيا النانو ذات إمكانات عالية لتحقيق الزراعة المستدامة، وخاصة في البلدان النامية

نحو تكنولوجيا النانو من أجل زراعة مستدامة

Towards Nanotechnology for Sustainable Agriculture

يمكن عد التلوث البيئي قضية ناشئة بما في ذلك التلوث من الهواء والماء والتربة. يمكن توقع هذا التلوث عندما يزيد مستوى المواد الكيميائية أو المعادن (الأيونات) أو الدخان أو البكتيريا أو الفيروسات أو مسببات الأمراض إلى ما هو أبعد من حد التحمل للحيوانات الحية. فضلا عن ذلك، يعد هذا التلوث البيئي مشكلة قديمة العهد، وقد بدأ عندما بدأ الإنسان في قطع الأخشاب للمنازل، وتعلم إشعال النار وغيرها من الأنشطة. كما بدأ التلوث البيئي عندما بدأ الإنسان في إنشاء مستوطناته ثم ازدهار الحضارات المختلفة، وظهرت مشكلات التلوث وأهمها تلوث المياه. ومع ذلك، لم يكن عدد السكان على الأرض كبيرًا حتى القرن التاسع عشر على الأرجح، ولم تكن مشاكلات التلوث حادة. هناك تهديد كبير يتمثل في استنفاد الوقود الأحفوري إلى مستوى ينذر بالخطر، حيث نعتمد عليه في موارد الطاقة لدينا لجميع أنشطتنا. ويجب عدم الاستمرار في استعمال الوقود الأحفوري الذي يلوث الهواء، فهو لا يزال أرخص من أي طاقة بديلة أخرى. وهذا بدوره يؤدي أيضًا إلى ظاهرة الاحتباس الحراري، أي إمكانية زيادة درجة الحرارة الإجمالية للأرض، ما يؤدي إلى ذوبان الجبال الجليدية الكبيرة في القطبين. وقد أدى

الاستعمال المفرط وغير المناسب للأسمدة والمبيدات الحشرية إلى زيادة العناصر الغذائية والسموم في المياه الجوفية والمياه السطحية، ما يؤدي إلى تكبد تكاليف صحية وتكاليف تنقية المياه، وتقليل فرص صيد الأسماك والترفيه (Mukhopadhyay, 2014). فضلا عن ذلك، تساهم الممارسات الزراعية المختلفة، التي تؤدي إلى تدهور جودة التربة، في إغناء الموائل المائية بالمغذيات وقد تتطلب زيادة تكاليف الري والتسميد والطاقة للحفاظ على الإنتاجية في التربة المتدهورة. ويمكن لهذه الممارسات السابقة أيضًا أن تقتل الحشرات المفيدة وغيرها من الحيوانات البرية. فضلا عن ذلك، فإن عمليات الحرث والري المكثفة والتسميد بالأسمدة تسببت أيضًا في أضرار واسعة النطاق لملف الكربون في التربة مقارنة بالممارسات الزراعية المبكرة. ومن المعروف أن تطبيقات تكنولوجيا النانو في الزراعة يمكن أن تكون ناجحة إذا تمت محاكاة العمليات الطبيعية بقدر أكبر من التطور العلمي من أجل التنفيذ الناجح. على سبيل المثال، قد يكون الهدف هو جعل التربة أكثر قدرة على تحسين كفاءة استخدام المغذيات من أجل زيادة الإنتاجية وتحسين الأمن البيئي. ولذلك، فإن إدارة المغذيات في إطار تكنولوجيا النانو يجب أن تعتمد على بعض العوامل الهامة بما في ذلك:

1- يجب أن تكون أيونات المغذيات موجودة في الأشكال النباتية المتاحة في نظام التربة.

2- يعتمد نقل المغذيات في أنظمة التربة النباتية على تبادل الأيونات، والامتزاز / تفاعلات الامتزاز والذوبان/الترسيب.

3- يجب أن تسهل المواد النانوية العمليات التي تضمن توافر العناصر الغذائية للنباتات بالمعدل والطريقة التي تطلبها النباتات.

هناك العديد من الاستراتيجيات أو الأساليب الحديثة لتكنولوجيا النانو التي يمكن استعمالها لإدارة المياه والمبيدات والأسمدة وأجهزة الاستشعار والقيود في مجال الإدارة. ركزت العديد من المنشورات على الزراعة المستدامة تحت مظلة

تكنولوجيا النانو وتأثيرات الجسيمات النانوية على البيئات الأرضية ومن خلال هذه الدراسات، فمن الواضح أن نلاحظ أن تكنولوجيا النانو سوف تلعب دورا متزايد الأهمية في الزراعة. فضلا عن ذلك، أظهرت الدراسات التي أجريت على مدى العقد الماضي أن تكنولوجيا النانو لديها القدرة على إحداث ثورة في الزراعة باستخدام المجالات التالية:

- **أجهزة الاستشعار الحيوية.**
- **منظمات نمو النبات.**
- **المضافات الغذائية.**
- **التحسين الوراثي للنباتات والحيوانات.**
- **أنظمة التوصيل الذكية للأدوية.**
- **المبيدات الحشرية.**
- **الأسمدة والمبيدات النانوية.**

ولمنع الآثار الضارة المحتملة الناجمة عن استخدام تكنولوجيا النانو في الزراعة، هناك حاجة إلى إجراء دراسات حول قضايا مثل مصير المواد النانوية وانتقالها في النظام البيئي، وامتصاصها وتراكمها في النباتات والحيوانات، وتقييم سمية المواد النانوية من أجل منع الآثار الضارة المحتملة الناجمة عن استخدام تكنولوجيا النانو في الزراعة. ويجب أيضًا إجراء دراسات تقييم المخاطر قبل تطبيق المنتوجات النانوية على المجال الزراعي، ويجب مراقبة التأثيرات التي تسببها (Hong, *et al*. 2013).

إن فرصة تطبيق تكنولوجيا النانو في الزراعة هائلة. ومن المسلم به أيضًا أن اعتماد بعض تقنيات النانو الجديدة يعد أمرًا بالغ الأهمية في إطار التنمية المستدامة (Mukhopadhyay, 2014). من المعتقد أن تكنولوجيا النانو الزراعية قد تستغرق بضعة عقود للانتقال من المختبر إلى الأرض، خاصة وأنه يتعين عليها تجنب المخاطر التي تواجهها التكنولوجيا الحيوية. ولكي يحدث هذا، فإن التمويل

المستمر والفهم من جانب مخططي السياسات ومديري العلوم، فضلاً عن أخلاقيات النانو، إلى جانب التوقعات المعقولة سيكون حاسماً لازدهار هذا المجال الناشئ. يعد تطبيق تكنولوجيا النانو أمرًا ضروريًا، نظرًا لوجود ملايين الأشخاص في جميع أنحاء العالم الذين ما زالوا يفتقرون إلى إمكانية الوصول إلى الرعاية الصحية والتعليم والمياه الصالحة للشرب ومصادر الطاقة الموثوقة وغيرها من احتياجات التنمية البشرية الأساسية. لذلك، يمكن أن نستنتج أن التطبيقات المحتملة لتكنولوجيا النانو تحتاج إلى إعادة تقييم في ضوء الاستدامة، مع الأخذ في الاعتبار الجوانب الاقتصادية والاعتماد المتبادل. وهذا يعني أن استدامة احتياجات المنتوجات القائمة على تكنولوجيا النانو لا ينبغي أن تقتصر على مرحلة التصنيع فحسب، بل ينبغي أخذها في الاعتبار على مدار دورة الحياة بأكملها. ولذلك، ينبغي أن تؤخذ في الاعتبار دورة حياة المنتج بأكملها لتقييم التكنولوجيا، ومن المطلوب في مرحلة مبكرة من التطوير تحقيق التوازن الصحيح بين فعالية التكلفة والآثار البيئية، فضلا عن ذلك، من المتوقع أن يوفر تحليل دورة الحياة رؤى قيمة في هذا الصدد. ونظرًا للطرق القياسية لتقييم المخاطر، فقد تكون غير كافية لتحديد المخاطر المحددة المرتبطة بالمواد النانوية، كما ينبغي تطوير أدوات تقييم المخاطر الخاصة بالنانو. استراتيجيات الاسترداد وإعادة التدوير المناسبة في إطار الاستدامة، هناك حاجة أيضًا للحد من تشتت المواد النانوية في البيئة. ويجب أيضًا اعتماد تدابير لتقليل المخاطر الصحية والبيئية الناجمة عن إطلاق المواد النانوية في كل مرحلة من مراحل دورة حياة المنتج بدءًا من مرحلة الإنتاج وأثناء الاستعمال وحتى التخلص النهائي أو إعادة التدوير. ومع ذلك، في غياب البيانات والأخلاقيات الموثوقة، يجب افتراض أسوأ السيناريوهات لإدارة مخاطر تكنولوجيا النانو في إطار الزراعة المستدامة.

الاستنتاجات Conclusions

في الوقت الحاضر، لا يوجد مجال لم تخلو منه تكنولوجيا النانو وابتكاراتها العلمية الرائدة بما في ذلك القطاع الزراعي. ولذلك، فقد تطرق استعمال تكنولوجيا النانو في الزراعة إلى العديد من المجالات بما في ذلك صناعة الأغذية، وتغذية النباتات النانوية، ووقاية النبات، وإنتاجية النبات، والأسمدة النانوية، والمبيدات النانوية. فيما يتعلق بآثار الجسيمات النانوية على النظم البيئية الزراعية، فإن مصير وسلوك هذه الجسيمات النانوية على المحاصيل الزراعية والآثار السامة المحتملة على النباتات والكائنات الحية الدقيقة الموجودة بشكل طبيعي في جذور التربة وتوليد النفايات النانوية في النظام البيئي الزراعي هي قضايا ناشئة. فضلا عن ذلك، يجب عدم التغاضي عن الآثار السلبية للجسيمات النانوية (أو السمية البيئية النانوية، التي تولدها الجذور الحرة التي تؤدي إلى بيروكسيد الدهون وتلف الحمض النووي) على إنتاجية النبات، والكائنات الحية الدقيقة في التربة، وأنشطة إنزيمات التربة، فضلاً عن البيئة بأكملها. ومن ثم فإن هناك حاجة للتنبؤ بالتأثيرات البيئية لهذه الجسيمات النانوية في المستقبل المنظور نحو استدامة الزراعة.

المصادر

Dimkpa, CO. 2014. Can nanotechnology deliver the promised benefi ts without negatively impact-ing soil microbial life? J Basic Microbiol 2014(54):1–16. doi: 10.1002/jobm.201400298

Donaldson, K., Stone, V., Tran, C. L., Kreyling, W. and Borm, P. J. 2004. Nanotoxicology. Occup Environ Med 61:727–728

Fan, R., Huang, Y. C., Grusak, M. A., Huang, C. P. and Sherrier, D. J. 2014. Effects of nano-TiO 2 on the agronomically- relevant Rhizobium –legume symbiosis. Sci Total Environ 466–467:503–512. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.07.032

Ge, Y., Schimel, J. P. and Holden, P. A. 2011 Evidence for negative effects of TiO 2 and ZnO nanoparticles on soil bacterial communities. Environ Sci Technol 45:1659–1664

Hong, J., Peralta-Videa, J. R. and Gardea-Torresdey, J. L. 2013. Nanomaterials in agricultural production: benefi ts and possible threats? In: Shamim N, Sharma VK (eds) Sustainable nanotechnology and the environment: advances and achievements, vol 1124, ACS symposium series. American Chemical Society, Washington, DC, pp 73–90. doi: 10.1021/bk-2013-1124.ch001

Lal, R. 2015. The nexus approach to managing water, soil and waste under changing climate and growing demands on natural resources. In: Kurian M, Ardakanian R (eds) Governing the nexus: water, soil and waste resources considering global change. Springer, Cham, pp 39–61. doi: 10.1007/978-3-319-05747-7_3

Ma, H., Williams, P. L. and Diamond, S. A. 2013. Ecotoxicity of manufactured ZnO nanoparticles: a review. Environ Pollut 172:76–85, http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2012.08.011

Mukhopadhyay, S. S. 2014. Nanotechnology in agriculture: prospects and constraints. Nanotechnology. Sci Appl 7:63–71

Mura, S., Seddaiu, G., Bacchini, F., Roggero, P. P. and Greppi , G. F. 2013. Advances of nanotechnology in agro-environmental studies. Ital J Agron 8:127–140

Pan, B. and Xing, B. 2012. Applications and implications of manufactured nanoparticles in soils: a review. Eur J Soil Sci. doi: 10.1111/j.1365-2389.2012.01475.x

Shah, V. and Belozerova, I. 2009. Infl uence of metal nanoparticles on the soil microbial community and germination of lettuce seeds. Water Air Soil Pollut 197:143–148

Wilson, MA., Tran, N. H., Milev, A. S., Kannangara, GSK., Volk, H. and, Lu, G. 2008. Nanomaterials in soils. Geoderma 146:291–302. doi: 10.1016/j.geoderma.2008.06.004

Yadav, T., Mungray, A. A. and Mungray, A. K. 2014. Fabricated nanoparticles: current status and potential phytotoxic threats. In: Whitacre DM (ed) Reviews of environmental contamination and toxicology, vol 230. Springer International Publishing, Cham, pp 83–110. doi: 10.1007/978-3-319-04411-8_4

Yang, Y., Colman, BP., Bernhardt, ES. and Hochella, M. F. 2015. Importance of a nanoscience approach in the understanding of major aqueous contamination scenarios: case study from a recent coal ash spill. doi: 10.1021/es505662q

Zeliadt, N. 2010. Silver beware: antimicrobial nanoparticles in soil may harm plant life. Sci Am. http://www.scientifi camerican.com/article/silver-beware-antimicrobial-nanoparticles-in-soil-may. Harm-plant-life/3.4.2015.

الفصل السادس
تطبيقات تقنية النانو في إدارة مياه وأنظمة الري
Nanotechnology Applications in Water Management and Irrigation Systems

مقدمة

برزت تقنية النانو كمجال واعد ذي تطبيقات محتملة في قطاعات مختلفة، بما في ذلك إدارة المياه وأنظمة الري. يستكشف هذا الفصل الوضع الراهن والآفاق المستقبلية لتقنية النانو في تعزيز كفاءة واستدامة ومرونة إدارة موارد المياه وممارسات الري الزراعي. توفر الحلول القائمة على تقنية النانو، مثل المواد النانوية وأجهزة الاستشعار النانوية والأغشية النانوية، خصائص ووظائف فريدة يمكنها معالجة التحديات التي تواجه تنقية المياه وتحلية المياه وكشف الملوثات والري الدقيق ومراقبة المحاصيل. سيناقش الموضوع الاعتبارات البيئية المرتبطة بدمج تقنية النانو في أنظمة إدارة المياه والري ودراسات حالة ونتائج أبحاث تُثبت المناهج القائمة على تقنية النانو في مناطق مُختلفة، وتأثيرها في الحفاظ على المياه، وإنتاجية المحاصيل، والزراعة المستدامة. واتجاهات البحث المستقبلية، والحاجة إلى تضافر الجهود بين الباحثين وصانعي السياسات وأصحاب المصلحة للافادة القصوى من إمكانات تقنية النانو في مواجهة التحديات العالمية المتمثلة في ندرة المياه والأمن الغذائي (Pandey, 2024)

.

تُشكّل ندرة المياه والطلب المتزايد على الإنتاج الزراعي تحدياتٍ كبيرةً للأمن الغذائي العالمي والتنمية المستدامة. وتُعدّ ممارسات إدارة المياه والريّ الفعّالة أمرًا بالغ الأهمية لمواجهة هذه التحديات وضمان الاستخدام الأمثل للموارد المائية المحدودة. وتُقدّم تقنية النانو، بفضل قدرتها على معالجة المواد على المستوى النانوي، حلولًا مبتكرةً لتحسين إدارة المياه وأنظمة الري. ويستكشف هذا الفصل تطبيقات تقنية النانو في هذه المجالات، مُسلّطًا الضوء على فوائدها المُحتملة وتحدياتها وآفاقها المستقبلية.

تطبيقات تقنية النانو في إدارة المياه Nanotechnology Applications in Water Management

تنقية ومعالجة المياه: تُقدم تقنية النانو حلولاً متطورة لتنقية ومعالجة المياه، مُعالجةً تحديات إزالة الملوثات، وتثبيط مسببات الأمراض، وتحلية المياه. تمتاز المواد الماصة النانوية، مثل أنابيب الكربون النانوية Carbon Nanotubes (CNTs)والمواد القائمة على الجرافين، بمساحة سطح عالية وخصائص امتصاص انتقائية، ما يجعلها فعالة في إزالة مختلف الملوثات، بما في ذلك المعادن الثقيلة والملوثات العضوية والكائنات الدقيقة. تُعزز الأغشية النانوية، التي تحتوي على مواد نانوية مثل الزيوليت والأطر المعدنية العضوية(MOFs) Metal-organic frameworks ، كفاءة وانتقائية في عمليات ترشيح المياه وتحلية المياه.

مراقبة واستشعار جودة المياه Water Quality Monitoring and Sensing:

تُمكّن تقنية النانو من تطوير مستشعرات نانوية عالية الحساسية والانتقائية لرصد معايير جودة المياه في الوقت الفعلي. تستطيع هذه المستشعرات، القائمة على أنابيب الكربون النانوية والجرافين والجسيمات النانوية المعدنية، الكشف عن مجموعة واسعة من الملوثات، بما في ذلك المعادن الثقيلة والملوثات العضوية ومسببات الأمراض، بتركيزات منخفضة جدًا. تمتاز هذه المستشعرات النانوية بمزايا مثل التصغير وسهولة الحمل والاستجابة السريعة، مما يُسهّل مراقبة جودة المياه في الموقع وأنظمة الإنذار المبكر.

تحلية المياه المُحسّنة بتقنية النانو Nanotechnology-Enhanced Desalination:

تُعدّ تحلية المياه عمليةً بالغة الأهمية للحصول على المياه العذبة من مصادر مالحة، مثل مياه البحر والمياه قليلة الملوحة. تُقدّم تقنية النانو حلولاً مبتكرة لتعزيز كفاءة

عمليات تحلية المياه واستدامتها. تتميز الأغشية النانوية، كتلك المصنوعة من أنابيب الكربون النانوية وأكسيد الجرافين، بنفاذية عالية للماء وقدرة عالية على رفض الأملاح، مما يُقلّل من استهلاك الطاقة والتكاليف المرتبطة بتحلية المياه. المواد الماصة النانوية مثل الزيوليت والأطر المعدنية العضوية (MOFs)، يمكنها إزالة أيونات الملح بشكل انتقائي من الماء، ما يوفر بديلاً لتحلية المياه القائمة على الغشاء (Pandey, 2024).

تطبيقات تقنية النانو في أنظمة الري Nanotechnology Applications in Irrigation Systems

❖ الري الدقيق والزراعة الذكية Precision Irrigation and Smart Agriculture:

تُمكّن تقنية نانو الري الدقيق وممارسات الزراعة الذكية من خلال توفير أدوات للرصد الفوري لرطوبة التربة، ومستويات المغذيات، وصحة المحاصيل. تستطيع أجهزة الاستشعار النانوية المُدمجة في التربة الكشف عن محتوى الرطوبة، ودرجة الحموضة، وتركيزات المغذيات، ما يسمح بالري المُستهدف وتطبيق الأسمدة. تُوفر الأسمدة النانوية، المُغلفة بجسيمات نانوية بوليمرية أو مصفوفات نانوية طينية، إطلاقًا مُتحكمًا للمغذيات، مما يُقلل من هدر الأسمدة والتلوث البيئي. تُحسّن أنظمة الري الذكية القائمة على تقنية النانو استخدام المياه، وتُحسّن إنتاجية المحاصيل، وتُعزز ممارسات الزراعة المستدامة.

❖ تحسين أداء أنظمة الري Enhanced Irrigation System Performance:

تُحسّن تقنية النانو أداء ومتانة مكونات أنظمة الري. فالطلاءات النانوية المُطبقة على أنابيب الري والباعثات تمنع الانسداد، وتُقلل من خسائر الاحتكاك، وتُحسّن خصائص تدفق المياه. تمتاز هذه الطلاءات، مثل تلك المصنوعة من ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2) أو جسيمات السيليكا النانوية، بخصائص مضادة للتراكم والتنظيف الذاتي، مما يُقلل من تراكم الرواسب المعدنية والنمو البيولوجي. كما تُوفر أنظمة الري المُحسّنة بتقنية النانو كفاءةً أعلى، ومتطلبات صيانة أقل، وعمرًا تشغيليًا أطول.

تقنية النانو لإزالة الزرنيخ من مياه الشرب Nanotechnology for Arsenic Removal in Drinking

يُعدّ تلوث مياه الشرب بالزرنيخ مصدر قلق رئيس للصحة العامة في العديد من مناطق العالم، وخاصةً في دول مثل بنغلاديش والهند والصين. وقد أظهرت تقنية النانو نتائج واعدة في إزالة الزرنيخ من مصادر المياه. وقد أظهرت دراسة أجراها باحثون في الهند فعالية جسيمات أكسيد الحديد النانوية (IONPs) Iron oxide nanoparticles في امتصاص الزرنيخ من المياه الجوفية. وقد أظهرت جسيمات أكسيد الحديد النانوية قدرة امتصاص عالية وانتقائية تجاه الزرنيخ، ما يجعلها حلاً محتملاً لمعالجة الزرنيخ في المناطق المتضررة(Pandey, 2024) .

الري الدقيق المُمكّن بتقنية النانو في المناطق القاحلة

Nanotechnology-Enabled Precision Irrigation in Arid Regions

يُعدّ الري الدقيق ذا أهمية خاصة في المناطق القاحلة وشبه القاحلة، حيث تُشكّل ندرة المياه عائقًا رئيسيًا أمام الإنتاج الزراعي. وقد استكشف أحد المشاريع البحثية الى امكانية استعمال أنظمة الري الدقيق المُمكّنة بتقنية النانو لإدارة المياه بكفاءة في الزراعة الصحراوية. وهناك تطوير أجهزة استشعار نانوية لرصد رطوبة التربة واحتياجات المحاصيل من المياه في الوقت الفعلي. وقد دُمجت هذه الأجهزة مع نظام ري آلي يُوزّع المياه بدقة بناءً على احتياجات المحصول. وأظهرت النتائج تحسينات كبيرة في كفاءة استعمال المياه، وزيادة إنتاجية المحاصيل، والحفاظ على المياه مقارنةً بأساليب الري التقليدية. وتُظهر دراسة الحالة هذه إمكانات تقنية النانو في تحسين ممارسات الري وتعزيز الزراعة المستدامة في المناطق التي تُعاني من ندرة المياه.

الاستنتاجات Conclusion

تُتيح تقنية النانو إمكانات هائلة لإحداث ثورة في أنظمة إدارة المياه والري، ومعالجة التحديات المُلحة المتمثلة في ندرة المياه والتلوث والزراعة المستدامة. تُمكّن الخصائص والوظائف الفريدة للمواد النانوية من تطوير حلول مُتقدمة لتنقية المياه وتحليتها وكشف الملوثات والري الدقيق وإدارة المحاصيل. ومع ذلك، يتطلب النشر المسؤول والمستدام لتقنية النانو في هذه المجالات دراسةً متأنية للمخاطر البيئية المُحتملة والأطر التنظيمية والآثار المجتمعية. تُعد جهود البحث التعاوني، وإشراك أصحاب المصلحة، ودمج تقنية النانو مع التقنيات الناشئة الأخرى، عوامل حاسمة لتسخير كامل إمكاناتها في ضمان إدارة مستدامة لموارد المياه والأمن الغذائي للأجيال القادمة.

Pandey, S. 2024. Nanotechnology Applications in Water Management and Irrigation Systems. In book: Nanotechnology for Sustainable Agriculture and Food Security (pp.153-163) Publisher: DvS Scientific Publication. DOI:10.5281/zenodo.14489138

الفصل السابع
أولا- تقنية النانو في وقاية النبات
Nanotechnology in plant protection

مقدمة

تلعب حماية المحاصيل دورًا حيويًا في إنتاج الغذاء حول العالم. وتستعمل تقنيات النانو بشكل متزايد لحماية المحاصيل التقليدية واستنباط محاصيل جديدة ذات سمات ممتازة. ويجري حاليًا تحسين مكافحة الآفات والأعشاب الضارة والأمراض، فضلا عن التعديلات الوراثية للمحاصيل، من خلال تقنيات النانو الحيوية، مثل التنويم المغناطيسي لحبوب اللقاح والناقلات النانوية للجينات. وقد حسّنت المعرفة المتعلقة بتخليق المواد النانوية ذات الخصائص المتميزة بشكل كبير الإدارة التقليدية لآفات المحاصيل والأعشاب الضارة وأمراضها. في هذا الفصل، سيتم مناقشة النتائج والاتجاهات في بعض أكثر الدراسات شمولًا وتطورًا المنشورة حتى الآن. يمكن أن تكون تقنيات النانو وعلومها مفتاحًا لمستقبل مستدام في مجال حماية المحاصيل، إلا أنها تتطلب بحثًا أكثر تعمقًا لضمان ان لأتكون آثارها الإيجابية على نمو المحاصيل ومكافحة الآفات مقرونة بزيادة قدرتها على الإضرار بالبيئة والبشر (Vijayreddy and Chandra, 2024).

تُظهر الجسيمات النانوية القائمة على المعادن والأكاسيد والكربون خصائص مضادة للبكتيريا والفطريات والحشرات ضدّ مختلف أمراض النبات والآفات. تُتيح طرق التوصيل القائمة على تقنية النانو توزيعاً مُخصّصاً للمواد النشطة بيولوجياً مما يزيد من فعاليتها ويُقلّل من التلوث البيئي. تُمكّن تقنية النانو من الكشف المُبكر عن أمراض النبات والحشرات باستخدام أجهزة استشعار حيوية حساسة وطرق تصوير ما يسمح بالتدخل السريع ومكافحة الأمراض. كما استُعملت المواد النانوية لمساعدة النباتات على النجاة من الضغوط الحيوية. ومع ذلك، فإنّ الاستخدام المُكثّف لتقنية النانو في وقاية النبات يواجه عقبات مثل تصنيع الجسيمات النانوية، وتركيبها، والسلامة

البيئية، والمخاوف التنظيمية. ولضمان الاستخدام الأخلاقي والمستدام لتقنية النانو في الزراعة، لا بدّ من تعاون مُتعدد التخصصات بين العلماء وصانعي السياسات وأصحاب المصلحة. تُعدّ تقنية النانو واعدة للغاية لإحداث ثورة في أساليب وقاية النبات من خلال توفير طرائق ثورية لمكافحة الأمراض، والتشخيص المُبكر، وزيادة قدرة النبات على الصمود.

في مجال الزراعة، أظهرت تقنية النانو إمكانات واعدة في توفير مناهج جديدة لمشكلات حماية النبات، مثل الأمراض والإصابة بالحشرات (Fu, *et al*. 2020). هناك حاجة ملحة إلى أساليب فعّالة وصديقة للبيئة لمكافحة أمراض النبات والآفات مع تقليل الآثار السلبية على صحة الإنسان والبيئة، نظرًا للحاجة العالمية المتزايدة إلى الأمن الغذائي والزراعة المستدامة فإن قدرة تقنية النانو على تعديل المواد على المستوى المجهري لديها القدرة على إحداث تحول جذري في أساليب حماية النبات (Kim, *et al*. 2018). من خلال إنشاء تركيبات قائمة على مواد نانوية ذات خصائص مضادة للبكتيريا، بفضل خصائصها المضادة للفطريات والحشرات، تفتح تقنية النانو آفاقًا جديدة لمكافحة مسببات الأمراض النباتية والآفات الحشرية. أظهرت أنواع عديدة من الجسيمات النانوية، مثل تلك المصنوعة من النحاس وأكسيد الزنك والذهب والفضة، فعالية قوية مضادة للميكروبات ضد مجموعة واسعة من أمراض النبات، بما في ذلك البكتيريا والفيروسات والفطريات. ومن خلال تعطيل أغشية الخلايا الميكروبية، وتثبيط وظيفة الإنزيمات والتدخل في تكاثر الميكروبات، يمكن لهذه الجسيمات النانوية السيطرة على الأمراض بكفاءة (De Jesus, *et al*. 2024). علاوة على ذلك، تُمكّن تقنية النانو من التوزيع المستهدف للمواد النشطة بيولوجيًا، مثل مبيدات البكتيريا النانوية ومبيدات الفطريات النانوية، على أنسجة النبات، ما يزيد من فعالية هذه المعالجات ويقلل من الحاجة إلى استعمال مواد كيميائية مفرطة. ومن خلال ابتكار تركيبات تعتمد على مواد نانوية ذات خصائص مبيده للحشرات، تلعب تقنية النانو دورًا حاسمًا في مكافحة الآفات الحشرية. تُعدّ حشرات المن، والتربس، والذباب الأبيض، والخنافس، والعث، واليرقات

أمثلة قليلة على الآفات الحشرية التي أثبتت الجسيمات النانوية، مثل أنابيب الكربون النانوية، وجسيمات الكيتوزان النانوية، وجسيمات السيلينيوم النانوية، وجسيمات السيليكا النانوية، قدرتها على تحفيز فعالية المبيدات الحشرية ضدها (Alvarea, *et al.* 2019). ومن خلال إحداث اضطرابات في فسيولوجيا الحشرات، والتدخل في عادات التغذية، والتسبب في موتها، يمكن لهذه الجسيمات النانوية أن تُقلل بشكل فعال من أعداد الآفات مع أقل قدر من الآثار السلبية على البيئة. فضلا عن ذلك، يُتاح الإطلاق المنظم للمواد الكيميائية المبيدة للحشرات من خلال أنظمة التوصيل القائمة على تقنية النانو، مما يزيد من فعالية المركب ويقلل من آثاره الضارة على الأنواع غير المستهدفة. من خلال ابتكار تركيبات وطرق توصيل تعتمد على المواد النانوية، تُقدم تقنية النانو طريقة فعّالة لتحسين دفاعات النبات ضد الأمراض والآفات الحشرية. ومع ذلك، لكي تُستخدم تقنية النانو على نطاق واسع في الزراعة، لا تزال هناك مشاكل في إنتاج الجسيمات النانوية، يجب إيجاد حلول لمشاكل استقرار التركيبة، والسلامة البيئية، والموافقة التنظيمية. وللاستخدام الأمثل لتكنولوجيا النانو في حماية النباتات بشكل مستدام، وضمان دمجها بشكل مناسب في الممارسات الزراعية، يُعد التعاون بين العلماء وصانعي السياسات وأصحاب المصلحة أمرًا بالغ الأهمية.

تحديات مسببات الأمراض النباتية وحلولها Challenges of insect pests and their solutions:

تُشكل مجموعة واسعة من الكائنات الدقيقة، المعروفة باسم مسببات الأمراض النباتية، تهديدًا عالميًا للأمن الغذائي والإنتاج الزراعي. تُصيب العديد من مسببات الأمراض النباتات، ولكل منها سمات وطرق عدوى مميزة، بما في ذلك البكتيريا والفيروسات والفطريات والبلازما النباتية. يمكن أن تُسبب العدوى الفطرية، التي تُصيب محاصيل تتراوح من الحبوب إلى الخضراوات والفواكه، مجموعة متنوعة من

الأمراض مثل تساقط البادرات وتبقع الأوراق وتعفن الجذور. ومن أمثلة مسببات الأمراض الفطرية: *Fusarium* spp ، *Botrytis cinerea* و *Phytophthora infestans*. تُسبب مسببات الأمراض البكتيرية، مثل الزائفة الزنجارية (*Pseudomonas syringae*) والزناثوم (*Ralstonia solanacearum*) والزانثوموناس (*Xanthomonas* spp.)، أمراضًا تشمل اللفحة البكتيرية والذبول البكتيري وقرحة الحمضيات، ما يُسبب خسائر اقتصادية فادحة في جميع أنحاء العالم. تُصاب أنواع نباتية عديدة بفيروسات، مثل فيروس موزاييك التبغ، وفيروس تجعد أوراق الطماطم الصفراء، وفيروس موزاييك الخيار. تُسبب هذه الفيروسات أعراضًا تشمل أنماط الفسيفساء، وتجعد الأوراق، وتأخر النمو، مما يؤثر سلبًا في الحصاد (Vijayreddy، 2024). يُمكن أن تُؤدي الديدان الخيطية التي تتطفل على جذور النباتات، مثل ديدان تعقد الجذور (*Meloidogyne spp*) وديدان التكيس (*Heterodera* spp)، إلى انخفاض الغلة والجودة من خلال التسبب في أعراض تشمل التقزم، وامراض الجذور، ونقص العناصر الغذائية. تعد الكائنات الحية الشبيهة بالبكتيريا التي تنتقل عن طريق الحشرات، والتي تُسمى البلازما النباتية، مسؤولة عن أمراض مثل مرض مكنسة الساحرة واصفرار النجمة، والتي تضر بالمحاصيل والنباتات الزينة.

إن إنتاج سلالات جديدة من مسببات الأمراض، والمشاكل البيئية المتعلقة بأساليب المكافحة الكيميائية، ومقاومة مسببات الأمراض، ليست سوى أمثلة قليلة من التحديات الرئيسة في إدارة الأمراض، والتي تنبع من تعقيد التفاعلات بين النبات ومسببات الأمراض. وتُعدّ زراعة أصناف مقاومة للأمراض، واستعمال المبيدات الكيميائية مثل مبيدات الفطريات والبكتيريا والنيماتودا، وتطبيق ممارسات زراعية مثل تناوب المحاصيل والنظافة، من بين الطرائق الحالية لإدارة أمراض النبات. إلا أن لهذه التقنيات التقليدية عيوبًا، مثل احتمالية التلوث البيئي، وظهور عدوى مقاومة لهذه المواد الكيميائية، والضرر غير المقصود للأنواع غير المستهدفة (Gill and Garg,

2014). لتقليل استخدام المبيدات الكيميائية وتقليل آثارها السلبية على البيئة، يتزايد التركيز على تقنيات الإدارة المتكاملة للأمراض (IDM). تجمع هذه التقنيات بين تكتيكات عدة، مثل عوامل المكافحة البيولوجية ومقاومة العائل، والممارسات الزراعية، والتطبيقات الكيميائية المستهدفة. فضلا عن ذلك، تُلقي الاكتشافات الحديثة في مجالات البيولوجيا الجزيئية وعلم الجينوم والتكنولوجيا الحيوية الضوء على الأسس الجينية للتفاعلات بين النبات ومسببات الأمراض، وتفتح آفاقًا جديدة للهندسة الوراثية والتربية بمساعدة الواسمات لأنواع جديدة من المحاصيل المقاومة للأمراض. فضلا عن ذلك، فإن تطوير تركيبات قائمة على مواد نانوية ذات خصائص مضادة للميكروبات، والذي أصبح ممكنًا بفضل تطوير تقنيات مثل تقنية النانو، يبشر بتوزيع مُستهدف لعوامل مكافحة الأمراض، وتخفيف المخاطر البيئية المرتبطة بالمواد الكيميائية التقليدية. بشكل عام، يتطلب التصدي للعقبات التي تُمثلها أمراض النبات استراتيجية متعددة التخصصات تجمع بين المعرفة التقليدية وأحدث التقنيات، وتراعي الآثار الاجتماعية والاقتصادية والبيئية الأوسع من أساليب مكافحة الأمراض. ولحماية الأمن الغذائي العالمي في مواجهة الظروف المناخية المتغيرة والتفاعلات الناشئة بين النباتات ومسببات الأمراض، تُعد مبادرات البحث التعاوني، التي تضم العلماء والمزارعين وغيرهم، بالغة الأهمية.

تحديات الآفات الحشرية وحلولها Challenges of insect pests and their solutions

تُشكل الآفات الحشرية خطرًا جسيمًا على المجال الزراعي العالمي، ما يُسبب خسائر مالية واسعة النطاق بسبب تلف المحاصيل، وانخفاض الغلة، وتقويض الأمن الغذائي. تُعتبر حشرات المن، والتربس، واليرقات، والخنافس، والسوس أمثلة قليلة من بين العديد من الأنواع التي تندرج تحت هذه الفئة الواسعة من الآفات. لكل نوع دورة حياة مميزة، وعادات غذائية، وتفضيلات بيئية خاصة به. على سبيل المثال، تتغذى اليرقات

(مرحلة يرقات العث والفراشات) على أوراق النباتات وثمارها، بينما يستعمل المن أجزاء فمه المتخصصة لاختراق أنسجة النبات والتغذي على النسغ. أما التربس، فهي حشرات صغيرة تُلحق الضرر بالنباتات عن طريق التغذي على أنسجة النبات ونشر فيروسات النبات (Alvarez, *et al*. 2019)، تُفاقم أجزاء فمها الماصة الخشنة خسائر في المحاصيل. وتتسبب الخنافس مثل خنفساء البطاطس في كولورادو وخنفساء الفاصوليا المكسيكية في إتلاف مجموعة واسعة من المحاصيل، وذلك لأنها تلتهم أوراق النباتات وسيقانها وثمارها. على النقيض من ذلك، فإن حلم العناكب هو عنكبوتيات مجهرية تتغذى على عصارة النبات، مما يتسبب في تساقط الأوراق وذبولها واصفرارها قبل الأوان. ولأنها تتكاثر بسرعة وتتكيف مع الظروف المناخية المتغيرة وتصبح مقاومة للمبيدات الكيميائية، فإن الحشرات تشكل تهديدًا كبيرًا للإنتاجية الزراعية.

تُستخدم الآن تقنيات زراعية، بما في ذلك تناوب المحاصيل والزراعة البينية واستعمال المصايد المنع الإصابة بالآفات والتدخل في دورات حياتها، كخيارات لإدارة الآفات الحشرية. فضلا عن ذلك، تُقلل تقنيات المكافحة البيولوجية من الحاجة إلى المبيدات الكيميائية من خلال تنظيم أعداد الآفات من خلال إدخال الأعداء الطبيعيين، بما في ذلك الطفيليات والمفترسات والعوامل الميكروبيولوجية (Ballal and Verghese, 2015). بالإضافة إلى ذلك، يُتيح استعمال أنواع المحاصيل المقاومة للحشرات - سواءً أكانت طبيعية أم عن طريق الهندسة الوراثية - طريقة عملية لتقليل أضرار الآفات وتقليل الحاجة إلى المبيدات. ولا تزال تطبيقات المبيدات الحشرية وتقنيات المكافحة الكيميائية الأخرى تُستعمل على نطاق واسع لإدارة آفات الحشرات، على الرغم من المخاوف بشأن عواقبها على صحة الإنسان والبيئة وظهور مقاومة المبيدات في مجموعات الآفات. وتُوفر تقنيات الإدارة المتكاملة للآفات (IPM) استراتيجية شاملة وطويلة الأمد لإدارة آفات الحشرات، والتي تشمل العديد من الأساليب مثل مقاومة النبات المضيف، والمكافحة البيولوجية، والممارسات الزراعية، والطرق الميكانيكية،

والمعالجات الكيميائية المستهدفة. وبالمثل، فإن التطورات الجديدة في التكنولوجيا الحيوية، بما في ذلك تقنية تداخل الحمض النووي الريبوزي (RNAi) (Ortola and Daros, 2024)، لديها القدرة على إنتاج مبيدات حشرية تستهدف أنواع الآفات تحديدًا مع تقليل الآثار الضارة على الأنواع غير المستهدفة والمفيدة. فضلا عن ذلك، تتطلب مكافحة الآفات الحشرية فهمًا شاملًا لبيولوجيا الآفات وبيئتها وسلوكها، فضلا عن وضع وتنفيذ خطط متكاملة لإدارة الآفات مصممة خصيصًا لأنظمة بيئية زراعية محددة وأنظمة إنتاج محاصيل محددة. لحماية الإنتاجية الزراعية وضمان الأمن الغذائي العالمي في مواجهة الظروف البيئية المتغيرة وضغوط الآفات المتغيرة، يُعد التعاون بين الباحثين وغيرهم أمرًا بالغ الأهمية لتطبيق تقنيات فعالة ومستدامة لإدارة الآفات.

ظهور تقنية النانو في وقاية النبات The emergence of nanotechnology in plant protection

أدى استعمال تقنية النانو في وقاية النبات إلى أحدثت نقلة نوعية في العمليات الزراعية من خلال توفير وسائل جديدة لمكافحة الآفات الحشرية وأمراض النبات، وتعزيز الزراعة المستدامة، وباستخدام الخصائص المميزة للمواد النانوية لتحسين صحة المحاصيل وإنتاجيتها، مهدت تقنية النانو ـ أي معالجة المواد على مستوى النانو ـ الطريق لعصر جديد من الزراعة الدقيقة. ومن أهم فوائد المواد النانوية ارتفاع نسبة مساحتها إلى حجمها (Blecher, *et al*. 2011)، ما يُسهّل تفاعلها مع الكائنات الحية ويُحسّن قدرتها على مكافحة الآفات الحشرية وأمراض النبات. قد غيّرت تقنية النانو علم أمراض النبات بشكل كامل، إذ وفّرت أدوات متطورة لمكافحة مجموعة متنوعة من أمراض النبات، مثل الديدان الخيطية والبكتيريا والفيروسات والفطريات والبلازما النباتية. تتسبب الخصائص المضادة للميكروبات القوية للجسيمات النانوية، بما في ذلك تلك الخاصة بالفضة والنحاس والذهب وثاني أكسيد التيتانيوم وأكسيد الزنك، في تمزق أغشية الخلايا الميكروبية، وإعاقة وظيفة الإنزيمات، وعرقلة تكاثر الميكروبات.

وقد أثبتت هذه الجسيمات النانوية فعاليتها ضد أمراض نباتية معروفة، مثل بكتيريا *Xanthomonas* spp ، وفطريات *Fusarium* spp ، وفيروس موزاييك التبغ Tobacco mosaic virus ، وفطريات *Meloidogyne* spp ، ما يوفر خيارات علاجية فعالة محتملة ذات آثار بيئية سلبية أقل (Vijareddy, 2023). فضلا عن ذلك، قد يتم إيصال المواد النشطة بيولوجيًا، مثل مبيدات الفطريات والبكتيريا، إلى أنسجة نباتية معينة بدقة أكبر بفضل تقنية النانو، مما يزيد من فعاليتها ويقلل من اثارها الجانبية. على نحو مماثل، أصبحت تقنية النانو أداة فعّالة لمكافحة الآفات الحشرية من خلال توفير بدائل آمنة للمبيدات الكيميائية التقليدية، والتي تُشكل خطرًا على صحة الإنسان والبيئة. حشرات المن، والتربس، واليرقات ليست سوى أمثلة قليلة على الآفات الحشرية التي تُكافحها المواد النانوية، مثل جسيمات السيليكا النانوية. أظهرت جسيمات أكسيد الزنك النانوية وجسيمات الكيتوزان النانوية خصائص مبيدة للحشرات تُؤثر في وظائفها الفسيولوجية، وتُعيق عاداتها الغذائية، وتُسبب موتها وبأقل قدر من الضرر للكائنات الحية المفيدة وأقل كمية من بقايا المبيدات في البيئة والسلسلة الغذائية، تُوفر هذه الجسيمات النانوية خياراتٍ مُستهدفة وغير ضارة بيئيًا لمكافحة الآفات. علاوةً على ذلك، يُتاح الإطلاق المُنظم لمركبات المبيدات الحشرية من خلال أنظمة التوصيل القائمة على تقنية النانو، ما يزيد من فعالية المركبات ويُقلل من الحاجة إلى العلاجات المُتكررة بالمبيدات. إلى جانب مكافحة الآفات مُباشرةً، تُعدّ تقنية النانو أساسيةً لتحسين مقاومة النبات للإجهادات الحيوية وغير الحيوية من خلال إنتاج مُحفزات تعتمد على مواد نانوية تُحفز أنظمة الدفاع النباتية وتُنشئ مقاومةً جهازيةً مُكتسبة (Fu, *et al*. 2020). يتم توصيل منظمات نمو النبات ومضادات الأكسدة وجزيئات الإشارة بوساطة الجسيمات النانوية، مما يحسن مناعة النبات ومرونته وقدرته على تحمل الإجهاد ويقلل من قابلية النبات للإصابة بالأمراض والآفات الحشرية. فضلا عن ذلك، تُتاح أساليب إدارة دقيقة وتدخل سريع بفضل الكشف السريع والدقيق عن إصابات الآفات وأمراض النباتات، بفضل أجهزة الاستشعار وتقنيات

التصوير القائمة على تقنية النانو. على الرغم من أن تقنية النانو تُبشر بحماية النباتات من الحشرات والفيروسات، إلا أن المشكلات المتعلقة بإنتاج الجسيمات النانوية، واستقرار تركيبها، والسلامة البيئية، والموافقة التنظيمية لا تزال بحاجة إلى حل. يُبشر تطبيق تقنية النانو في حماية النباتات بتحول ثوري نحو الزراعة الدقيقة من خلال توفير حلول شاملة وصديقة للبيئة لحماية صحة المحاصيل، وضمان الأمن الغذائي، وتعزيز الممارسات الزراعية المستدامة في مواجهة التحديات المتغيرة باستمرار من آفات الحشرات وأمراض النباتات.

الجسيمات النانوية: الأنواع، الخصائص، وطرائق التركيب

Nanoparticles: types, properties and synthesis methods

نظرًا لخصائصها المميزة واستخداماتها الواسعة، جذبت الجسيمات النانوية اهتمامًا كبيرًا في بعض المجالات العلمية، بما في ذلك علم الأحياء والكيمياء وعلوم المواد وعلوم النانو. تُعد هذه المواد النانوية، التي تتراوح أحجامها عادةً بين 1 و100 نانومتر، مطلوبة بشدة لمجموعة متنوعة من الاستعمالات، مثل توصيل الأدوية، والتشخيص، والتحفيز الكيميائي، ومعالجة البيئة. تتميز بخصائص فيزيائية وكيميائية وبيولوجية فريدة تُميزها عن نظيراتها السائبة. توجد أنواع مختلفة من الجسيمات النانوية، ولكل منها خصائص وتقنيات إنتاج فريدة تلعب دورًا حاسمًا في اختيار الأنسب لتطبيق معين. من بين أكثر المواد النانوية بحثًا وتطبيقًا على نطاق واسع الجسيمات النانوية المعدنية، بما في ذلك الجسيمات النانوية للنحاس والفضة والزنك والذهب. تُعد هذه الجسيمات النانوية المعدنية مهمة في تطبيقات تتراوح من العلاجات البيولوجية والتحفيز إلى الاستشعار والتصوير نظرًا لقدراتها البصرية والكهربائية والتحفيزية الفريدة. مكن استخدام الكائنات الحية أو المستخلصات النباتية في التخليق الأخضر، والاختزال الكيميائي، والتحلل الحراري، وغيرها من العمليات لإنتاج جسيمات نانوية معدنية (Vijayreddy, *et al*. 2023). ومن الفئات المهمة الأخرى للمواد النانوية

ذات الاستخدامات المتنوعة في التحفيز الضوئي، والمعالجة البيئية، والتصوير الطبي الحيوي، جسيمات أكسيد المعادن النانوية، والتي تشمل ثاني أكسيد التيتانيوم، وأكسيد الزنك، وأكسيد الحديد. تُعد هذه الجسيمات النانوية جذابة لتطبيقات تقنية متنوعة نظرًا لقدراتها البصرية والكهربائية والمغناطيسية المميزة. ومن بين التقنيات التي يمكن استعمالها لإنتاج جسيمات أكسيد المعادن النانوية الترسيب الكيميائي للبخار، وتخليق السول-جيل، والتخليق الحراري المائي (Corr, 2013). ونظرًا لخصائصها الميكانيكية والحرارية المتميزة، بفضل خصائصها الفيزيائية والكهربائية، استقطبت الجسيمات النانوية الكربونية ـ مثل الأنابيب النانوية الكربونية والجرافين والفوليرين ـ اهتمامًا كبيرًا. ونظرًا لمساحتها السطحية الكبيرة، وبنيتها الميكانيكية القوية، وموصليتها الكهربائية، تُعد هذه الجسيمات النانوية خيارات ممتازة للاستعمال في الهندسة الطبية الحيوية، والإلكترونيات، وتخزين الطاقة. ويمكن إنتاج جسيمات نانوية كربونية باستخدام طرق تشمل الترسيب الكيميائي للبخار، والتفريغ القوسي، والاستئصال بالليزر. إلى جانب هذه الأنواع، تُجرى أيضًا أبحاث واستخدامات مكثفة لجسيمات النانو شبه الموصلة والبوليمرية والمركبة لأغراض متنوعة. وتُعتبر جسيمات النانو شبه الموصلة، مثل النقاط الكمومية، مفيدة في تطبيقات مثل الخلايا الشمسية، ومصابيح LED، والتصوير البيولوجي، نظرًا لخصائصها البصرية والكهربائية المميزة. بفضل توافقها الحيوي وخصائصها القابلة للتعديل، تُستخدم جسيمات النانو البوليمرية ـ والتي يمكن استخلاصها من بوليمرات صناعية أو قابلة للتحلل الحيوي ـ في الطلاءات وتوصيل الأدوية وهندسة الأنسجة. تتكون الجسيمات النانوية المركبة من مادتين أو أكثر، وتدمج خصائص أجزائها المكونة، وتُستعمل في توصيل الأدوية، والتحفيز، وتطبيقات الاستشعار. وتُمثل الجسيمات النانوية فئة واسعة من المواد النانوية ذات الصفات المميزة والاستخدامات المتعددة في مجموعة من الصناعات. يُعد فهم الأشكال والخصائص وتقنيات الإنتاج المتعددة للجسيمات النانوية أمرًا بالغ الأهمية لاستخدامها على أكمل وجه في سياقات متنوعة، من الطاقة

والإلكترونيات إلى الصحة والترميم البيئي. في مجال تكنولوجيا النانو وغيرها من المجالات، سيفتح المزيد من البحث والتقدم في تركيب وتوصيف الجسيمات النانوية آفاقًا جديدة للأعمال التجارية ويحل مشكلات جديدة.

تطبيقات تقنية النانو في الكشف عن أمراض النبات والآفات الحشرية

Nanotechnology applications in plant disease and insect pest detection

تُقدم تطبيقات تقنية النانو في الكشف عن الحشرات وأمراض النبات طريقةً مبتكرةً لمعالجة قضايا الاستدامة والإنتاج الزراعي. يُعد الكشف المبكر عن آفات الحشرات وأمراض النبات أمرًا أساسيًا لإدارة الآفات والأمراض بكفاءة، ما يُمكّن من اتخاذ إجراءات سريعة ويُقلل من خسائر المحاصيل. تشهد إجراءات تشخيص أمراض النبات والحشرات التقليدية ثورةً بفضل حلول ثورية لتحسين حساسية وخصوصية وسرعة الكشف التي توفرها أجهزة الاستشعار وتقنيات التصوير القائمة على تقنية النانو (Lucas, 2011). باستخدام مواد نانوية، مثل الجسيمات النانوية والأسلاك النانوية والمركبات النانوية، يمكن للمستشعرات الحيوية المدعومة بتقنية النانو تحديد بعض المؤشرات الحيوية المرتبطة بآفات الحشرات وأمراض النباتات. تكتشف هذه المستشعرات الحيوية المواد المُحلَّلة المستهدفة، مثل الحمض النووي للممرض، والبروتينات، والمستقلبات، وفيرومونات الحشرات، بحساسية وانتقائية فائقتين، وذلك بالاستفادة من الخصائص الفيزيائية والكيميائية الخاصة بالمواد النانوية. عند دمج الجزيئات الحيوية، مثل مجسات الحمض النووي، والأبتامرات، والأجسام المضادة، في مواد نانوية، فإنها قد ترتبط بجزيئات مستهدفة معينة وتتعرف عليها، ما يُضخِّم الإشارة ويُحسِّن حساسية الكشف. لتمكين اتخاذ القرارات الآنية في الإدارة الزراعية، توفر أجهزة الاستشعار الحيوية القائمة على تقنية النانو منصات كشف سريعة ومحمولة وبدون ملصقات، يمكن استخدامها في البيئات الميدانية لمراقبة الأمراض

والآفات في الموقع (Shivashakarappa, *et al*. 2022). أصبح تطوير أساليب تصوير متطورة لتصوير أمراض النبات والآفات الحشرية بدقة عالية ممكنًا بفضل تقنية النانو. ومع تحسين التباين والحساسية، يمكن تحديد الأمراض والآفات في أنسجة النبات. يتم تصويرها خصيصًا باستخدام عوامل تباين تعتمد على الجسيمات النانوية، مثل النقاط المغناطيسية والذهبية والكمية. ومن خلال توظيف الجسيمات النانوية مع ربيطات محددة، يمكن تحديد مواقع مسببات الأمراض والآفات بدقة وتصويرها باستخدام وسائل تصوير مثل المجهر الفلوري، والمجهر متحد البؤر، والتصوير بالرنين المغناطيسي. يسمح هذا بالوصول والتراكم المستهدفين في أنسجة النباتات المصابة أو أجسام الحشرات. ويُمكن التشخيص الدقيق ومراقبة تطور الأمراض وإصابة الآفات من خلال الرؤى المفيدة التي توفرها تقنيات التصوير القائمة على تقنية النانو في التوزيع المكاني، وديناميكيات استعمار، وتفاعلات الأمراض والآفات داخل أنسجة النبات.

لتوفير مكافحة شاملة واستباقية للأمراض والآفات في الزراعة، تُتيح تقنية النانو آفاقًا لتحسين تكامل العديد من وسائل الكشف وتحليل البيانات. يتيح الجمع بين أجهزة الاستشعار الحيوية المدعومة بتقنية النانو والاتصالات اللاسلكية ومنصات إنترنت الأشياء وخوارزميات الذكاء الاصطناعي أنظمة دعم القرار الزراعي الدقيقة، وتحليل البيانات، والمراقبة في الوقت الفعلي. وتُتاح المراقبة عن بُعد لتفشي الأمراض والآفات، وجمع البيانات وتحليلها آليًا، وتقنيات الإدارة التكيفية، وتحسين الموارد، والحد من الأثر البيئي، جميعها بفضل أنظمة الاستشعار الذكية القائمة على تقنية النانو (Vijayreddy, 2023). علاوة على ذلك، تُتيح تحليلات البيانات والنمذجة التنبؤية التي توفرها تقنية النانو أنظمة الإنذار المبكر، وتقييم المخاطر، والتنبؤ بأوبئة الأمراض والآفات. وهذا يسمح بالتدخلات الاستباقية وتدابير التخفيف لحماية صحة المحاصيل وإنتاجيتها. توفر تطبيقات تكنولوجيا النانو في الكشف عن الحشرات وأمراض النبات إجابات ثورية للمشاكل المتعلقة بالنباتات والأمن الغذائي والزراعة

المستدامة. تُوفر أجهزة الاستشعار الحيوية وتقنيات التصوير المُمكّنة بتقنية النانو منصات كشف حساسة ومُستهدفة وسريعة للتشخيص المُبكر لأمراض النبات والآفات الحشرية ورصدها، ما يُمكّن من التدخل الفوري ووضع خطط إدارة فعّالة. وتُصبح تقنيات الزراعة الدقيقة ممكنة بفضل دمج تقنية النانو مع أحدث تقنيات الاستشعار، وتحليلات البيانات، وأنظمة دعم القرار. تُعزز هذه الأساليب المكافحة الاستباقية للأمراض والآفات، وتُحسّن كفاءة الموارد، وتُقلل من الأثر البيئي. لا يزال استخدام تقنيات الكشف القائمة على تقنية النانو في مراحله الأولى من البحث والتطوير، ولكنه يمتلك القدرة على إحداث تحول جذري في الممارسات الزراعية، وزيادة صحة النبات ومقاومة الآفات.

استراتيجيات قائمة على الجسيمات النانوية لإدارة أمراض النبات والآفات الحشرية

Nanoparticle-based strategies for plant disease and insect pest management

تتمتع تقنية النانو بالقدرة على إحداث نقلة نوعية في العديد من الصناعات، بما في ذلك الزراعة، من خلال توفير أساليب جديدة لمكافحة أمراض النبات وزيادة الإنتاج الزراعي مع تقليل الآثار البيئية السلبية. وقد أظهرت الجسيمات النانوية، بخصائصها الفيزيائية والكيميائية المتميزة، فعالية مضادة للميكروبات ضد مجموعة واسعة من أمراض النبات، بما في ذلك الفطريات والبكتيريا والفيروسات (Vijayreddy, 2023). يوضح الجدول 1 قائمة الجسيمات النانوية المختلفة المستعملة ضد مسببات أمراض النبات. تتيح طرائق التوصيل القائمة على تقنية النانو توزيعًا مُصممًا للمواد النشطة بيولوجيًا، ما يزيد من الفعالية مع تقليل التلوث البيئي. كما تُمكّن تقنية النانو من الكشف المبكر عن أمراض النبات من خلال تطوير أجهزة استشعار حيوية حساسة وأدوات تصوير، مما يسمح بتحديد سريع ودقيق لمسببات الأمراض، فضلا عن التدخل الفوري والسيطرة على الأمراض. كما استُخدمت المواد النانوية لتعزيز مقاومة النبات للإجهادات الحيوية من خلال تقوية أنظمة دفاعه وإنتاج مقاومة مكتسبة جهازيًا . ومع

ذلك، يواجه الاستخدام المكثف لتكنولوجيا النانو في وقاية النبات عقبات مثل تصنيع الجسيمات النانوية، وتركيبها، والسلامة البيئية، والمخاوف التنظيمية.

جدول 1. قائمة بمسببات الأمراض النباتية المتأثرة بالعديد من الجسيمات النانوية

اسم الجسيمات النانوية	نوع المرض النباتي	المصدر
Silver NPs	*Alternaria alternata*	Kim et al., 2012
Copper NPs	*Fusarium solani*	Pariona et al., 2019
Silver NPs	*Ralstonia solanacearum*	Khan et al., 2021
Gold NPs	*Sclerotium rolfsii*	Thakur and Prasad, 2022
Chitosan NPs	*Rhizoctonia solani*	El-Mohamedya et al., 2019

تُوفر تقنية النانو طرائق مبتكرة لمكافحة الآفات الحشرية، مثل حشرات المن، والذباب الأبيض، والخنافس، واليرقات، مع تقليل الآثار البيئية. يُظهر الجدول 2 قائمةً بالجسيمات النانوية المختلفة المُستعملة ضد الآفات الحشرية. تتميز الجسيمات النانوية بخصائص مُبيدة للحشرات، تُؤثر على وظائفها الفسيولوجية، وتُغير سلوكها الغذائي، وتُسبب موتها. تُتيح هذه الجسيمات النانوية مكافحةً ممتازةً للآفات، مع تقليل الضرر الذي يُلحق بالأنواع النافعة، وتقليل بقايا المبيدات في البيئة، وإبطاء انتشار مقاومة المبيدات في مجموعات الآفات. تُتيح طرق التوزيع القائمة على تقنية النانو إطلاقًا مُنظمًا للمواد المُبيدة للحشرات، ما يُطيل من فعاليتها، ويُقلل من عدد مرات استخدام المبيدات. تُحسّن تقنية التوزيع المُخصصة هذه استدامة عمليات مكافحة الآفات من خلال تقليل المُدخلات الكيميائية، وتحسين استعمال الموارد (Kashyap, 2015). تُعد الحلول القائمة على الجسيمات النانوية استراتيجية قابلة للتطبيق لتحسين حماية المحاصيل، ضمان الأمن الغذائي وتعزيز الزراعة المستدامة في مواجهة التحديات المتغيرة التي تفرضها أمراض النبات والآفات الحشرية.

جدول 2. اسماء الآفات الحشرية المتأثرة بالجسيمات النانوية

المصدر	الافة الحشرية المتاثرة	اسماء الجسيمات النانوية
Jabbar et al., 2023	*Eurygaster testudinaria*	Silver NPs
Inbaraj et al., 2023	*Sitophilus oryzae*	Calcium oxide NPs
Helmy et al., 2023	*Callosobruchus chinensis* *Callosobruchus maculatus*	Selenium NPs Tita nium dioxide NPs
Wang et al., 2023	*Tuta absoluta*	Chitosan and star polycation nanocarrier with dsRNA
Pittarate et al., 2023	*Spodoptera frugiperda*	Potassium NPs
Miksanek and Tuda, 2023	*Callosobruchus chinensis*	Selenium NPs

الآثار البيئية ومخاوف السلامة لتكنولوجيا النانو في وقاية النبات

Environmental implications and safety concerns of nanotechnology in plant protection

تُقدم تكنولوجيا النانو وعودًا هائلة للزراعة وحماية النبات، ولكنها تُثير أيضًا مشاكل بيئية وأخرى تتعلق بالسلامة. يمكن أن تُعرّض سمية الجسيمات النانوية الكائنات غير المستهدفة للخطر، مثل الحشرات النافعة وميكروبات التربة، إذا اخترقت هذه الأنظمة. ومع انتقال الجسيمات النانوية عبر الأنظمة الغذائية، قد تتراكم وتُسبب آثارًا بيئية طويلة المدى. قد تُؤثر السمية البيئية على العمليات البيئية والتنوع البيولوجي، ما يُعرّض صحة النظام البيئي ومرونته للخطر. معدلات التحلل غير معروفة جيدًا، ما يُثير المخاوف بشأن متانتها على المدى الطويل واحتمالية تراكمها. تشمل المخاوف المتعلقة بصحة الإنسان مخاطر التعرض للجسيمات النانوية أثناء زراعة المحاصيل، أو استعمالها، أو ابتلاعها. وتنشأ مشكلات تنظيمية لأن الجسيمات النانوية

المستعملة في الزراعة قد لا تخضع لقواعد أو معايير محددة. وقد يواجه الأفراد المشاركون في تصنيع واستعمال منتوجات وقاية النباتات القائمة على تقنية النانو مخاطر صحية مهنية في حال عدم اتخاذ احتياطات السلامة المناسبة (maharramov, *et al*. 2019). هناك حاجة إلى منهجيات موحدة لتقييم المصير البيئي، وسمية، وخطورة المواد النانوية المستعملة في وقاية النبات. قد تنشأ مخاطر وتفاعلات ناشئة مع مواد كيميائية أو متغيرات بيئية أخرى، مما يتطلب رصدًا وتقييمًا مستمرين للمخاطر. تشمل أساليب التخفيف والبحث والتطوير، وأطرًا قوية لتقييم المخاطر، والرقابة التنظيمية، والتثقيف والتدريب العام، وبرامج الرصد والمراقبة المستمرة. من خلال معالجة هذه العواقب البيئية وقضايا السلامة، يمكن تحقيق المزايا المحتملة لتكنولوجيا النانو في وقاية النبات مع الحد من المخاطر البيئية ومخاطر صحة الإنسان.

الآفاق المستقبلية Future perspectives

تتمتع تطبيقات تقنية النانو المستقبلية في مجال حماية النبات من مسببات الأمراض والآفات الحشرية بإمكانيات هائلة لإحداث نقلة نوعية في أساليب الزراعة. وتوفر تقنية النانو تقنيات جديدة لمكافحة أمراض النبات والآفات الحشرية، ما يُحسّن الدقة والكفاءة والاستدامة البيئية. يمكن ابتكار مواد نانوية، مثل الجسيمات النانوية والمركبات النانوية، لإيصال المبيدات الحشرية والعوامل المضادة للميكروبات مباشرةً إلى أنواع معينة من العدوى والآفات، ما يُقلل من الآثار الجانبية ويقلّل من الحاجة إلى المعالجات الكيميائية التقليدية (Worrall, *et al*. 2018). فضلا عن ذلك، تُمكّن تقنية النانو من إنشاء أنظمة توصيل ذكية تُطلق مواد حيوية نشطة استجابةً لإشارات بيئية محددة أو لمتطلبات الآفات، ما يزيد من فعاليتها مع تقليل الأثر البيئي. فضلا عن ذلك، من خلال تعديل أسطح النباتات لردع أو منع استعمار الحشرات، أو عن طريق إطلاق جزيئات إشارات في ظل ظروف مُنظّمة، يُمكن استخدام المواد النانوية لتعزيز قدرة النباتات

على مقاومة الأمراض والآفات. يُمكن أن تُؤدي التطورات المستقبلية في تقنية النانو لحماية النباتات إلى ممارسات زراعية مستدامة تدعم صحة المحاصيل، واستقرار الغلة، والأمن الغذائي في مواجهة التحديات البيئية المتغيرة وضغوط الآفات. وستُعزّز هذه الجهود من خلال جهود بحثية متعددة التخصصات في بيولوجيا النبات، وعلوم المواد، والهندسة.

التحديات Challenges

تتمتع تقنية النانو بإمكانيات جيدة لحماية النباتات، إلا أن هناك العديد من العقبات التي يجب التغلب عليها، لا سيما فيما يتعلق بمسببات الأمراض النباتية والآفات الحشرية. ويمثل ضمان استقرار وفعالية التركيبات القائمة على المواد النانوية في ظل ظروف بيئية متنوعة مشكلة رئيسية. ويمكن أن تتضائل فعالية الجسيمات النانوية بمرور الوقت نتيجةً للتكتل أو التحلل في التربة أو الموائل النباتية المعقدة (Abbas, *et al.* 2020). فضلا عن ذلك، هناك قلق بالغ بشأن احتمال أن يكون للجسيمات النانوية آثار بيئية غير متوقعة، مثل إزعاج الملقحات أو ميكروبات التربة المفيدة. ويمثل إجراء تقييمات شاملة للمخاطر لتحديد الآثار المحتملة للجسيمات النانوية المستخدمة في حماية النباتات على البيئة وصحة الإنسان صعوبةً أخرى. من المهم إجراء دراسات حول سمية الجسيمات النانوية ومصيرها على المدى الطويل وحركتها في أنظمة التربة والمياه لإعلام الخيارات التنظيمية وفرض الاستخدام المسؤول للممارسات. فضلا عن ذلك، يُشكل ظهور مقاومة لدى الفيروسات أو الآفات الحشرية للعلاجات القائمة على المواد النانوية مصدر قلق كبير. وهذا يُؤكد أهمية دمج تقنية النانو مع مناهج أخرى لمكافحة الآفات لمنع تطور المقاومة (Rai and Ingle, 2012). علاوة على ذلك، تُعيق قضايا تتعلق بإمكانية التوسع وفعالية التكلفة، ولاسيما في السياقات الزراعية ذات الموارد المحدودة، الاعتماد الواسع للحلول القائمة على

تقنية النانو ولضمان تطبيق آمن ودائم لتقنية النانو في وقاية النبات، تتطلب معالجة هذه القضايا تعاونًا متعدد التخصصات، ومنهجيات بحث مبتكرة، وأطرًا تنظيمية قوية.

الاستنتاجات Conclusion

تتمتع تقنية النانو بإمكانيات هائلة لتطوير آليات دفاع النبات ضد الأمراض والآفات الحشرية. ويمكن ابتكار استراتيجيات جديدة لتحسين دقة وفعالية واستدامة العمليات الزراعية باستعمال الخصائص المميزة للمواد النانوية، مثل الجسيمات النانوية والمركبات النانوية. ومع ذلك، يواجه الاستعمال الواسع لتقنية النانو في وقاية النبات صعوبات جمة. وتشمل هذه الصعوبات التأكد من أن التركيبات القائمة على المواد النانوية مستقرة وفعالة، وإجراء تقييمات شاملة للمخاطر، والتعامل مع الآثار البيئية المحتملة، والسيطرة على ظهور المقاومة، وتجاوز العقبات المتعلقة بقابلية التوسع والفعالية من حيث التكلفة وصحة المحاصيل واستقرار الإنتاج والأمن الغذائي والحد من الآثار البيئية.

المصادر

Abbas, Q., Yousaf, B., Ali, M.U., Munir, M.A.M., El-Naggar, A., Rinklebe, J., and Naushad, M. (2020). Transformation pathways and fate of engineered nanoparticles (ENPs) in distinct interactive environmental compartments: A review. Environment international, 138, 105646.

Alvarez, S.P., Tapia, M.A.M., and Ardisana, E.F.H. (2019). Nanotechnology and entomopathogenic microorganisms in modern agriculture. Nanoscience for Sustainable Agriculture, 171-187.

Ballal, C.R., and Verghese, A. (2015). Role of parasitoids and predators in the management of insect pests. New Horizons in Insect Science: Towards Sustainable Pest Management, 307 326.

Blecher, K., Nasir, A., and Friedman, A. (2011). The growing role of nanotechnology in combating infectious disease. Virulence, 2(5), 395-401. Dr. Akshay, Dr. Abhishek, Dr. Anurag, Arun, Dr. Sushant, Dr. Omendra 21

Corr, S.A. (2013). Metal oxide nanoparticles. Nanoscience, 1, 180-207.

De Jesus, R.A., de Assis, G.C., de Oliveira, R.J., Costa, J.A.S., da Silva, C.M.P., Iqbal, H.M., and Ferreira, L.F.R. (2024). Metal/ metal oxide nanoparticles: A revolution in the biosynthesis and medical applications. Nano-Structures & Nano-Objects, 37, 101071.

Fu, L., Wang, Z., Dhankher, O.P., and Xing, B. (2020). Nanotechnology as a new sustainable approach for controlling crop diseases and increasing agricultural production. Journal of Experimental Botany, 71(2), 507-519.

Gill, H.K., and Garg, H. (2014). Pesticide: environmental impacts and management strategies. Pesticides-toxic aspects, 22 Modern Approaches for Pest Management 8(187), 10-5772.

Kashyap, P.L., Xiang, X., and Heiden, P. (2015). Chitosan nanoparticle based delivery systems for sustainable agriculture. International journal of biological macromolecules, 77, 36-51.

Kim, D.Y., Kadam, A., Shinde, S., Saratale, R.G., Patra, J., and Ghodake, G. (2018). Recent developments in nanotechnology transforming the agricultural sector: a transition replete with opportunities. Journal of the Science of Food and Agriculture, 98(3), 849-864.

Lucas, J.A. (2011). Advances in plant disease and pest management. The Journal of Agricultural Science, 149(S1), 91 114.

Maharramov, A.M., Hasanova, U.A., Suleymanova, I.A., Osmanova, G.E., and Hajiyeva, N.E. (2019). The engineered nanoparticles in food chain: Potential toxicity and effects. SN Applied Sciences, 1, 1-25.

Ortola, B., and Daros, J.A. (2024). RNA Interference in Insects: From a Natural Mechanism of Gene Expression Regulation to a 24 Modern Approaches for Pest Management Biotechnological Crop Protection Promise. Biology, 13(3), 137.

Rai, M., and Ingle, A. (2012). Role of nanotechnology in agriculture with special reference to management of insect pests. Applied microbiology and biotechnology, 94, 287-293.

Shivashakarappa, K., Reddy, V., Tupakula, V.K., Farnian, A., Vuppula, A., and Gunnaiah, R. (2022). Nanotechnology for the detection of plant pathogens. Plant Nano Biology, 100018.

Vijayreddy, D and Chandra, B. 2024. Nanotechnology in plant protection. In book: Modern Approaches for Pest Management (pp.1-25)Publisher: A K International Publication

Vijayreddy, D. (2023). Biological Control of Plant Pathogens: An Eco-Friendly Disease Management. AgriTech Today, 1(special issue), 47-50.

Vijayreddy, D. (2023). Cultivating Crop Health in the Digital Era: Harnessing AI for Plant Pathology. AgriTech Today, 1(9), Dr. Akshay, Dr. Abhishek, Dr. Anurag, Arun, Dr. Sushant, Dr. Omendra 25 33-35.

Vijayreddy, D. (2024). Classification of Plant Diseases, Characteristics and Symptoms on Crop Plants. In Text Book on Practices for Agricultural Sustainability. Golden Leaf Publishers, pp. 171-183.

Worrall, E.A., Hamid, A., Mody, K.T., Mitter, N., and Pappu, H.R. (2018). Nanotechnology for plant disease management. Agronomy, 8(12), 285.

الفصل السابع

ثانيا- تقنية النانو في مكافحة الآفات: المزايا والتطبيقات والتحديات

Nanotechnology in pest management: advantages, applications, and challenges

مقدمة

تُعد الآفات من أكثر المشكلات الحيوية إثارة للقلق في الزراعة والغذاء. ويسعى البشر باستمرار إلى ابتكار استراتيجيات جديدة لمكافحتها. إلا أن الاستراتيجيات التقليدية مثل الإدارة المتكاملة للآفات المستخدمة في الزراعة غير كافية كما أن استخدام المبيدات الكيميائية له آثار سلبية على الحيوانات والبشر، فضلا عن انخفاض خصوبة التربة، ومقاومة الآفات، والقضاء على الأعداء الطبيعيين، والتلوث البيئي، وفقدان التنوع البيولوجي، والمخاطر على صحة الإنسان. ويُمكن أن يكون استخدام تقنية النانو في مكافحة الآفات كاستراتيجية بديلة من أكثر الطرائق الواعدة للتغلب على مشاكل استخدام المبيدات الكيميائية التقليدية. ورغم أنها لا تزال تواجه العديد من العقبات والشكوك، إلا أن هناك حاجة إلى مزيد من البحث لتحسين تطويرها وتقييمها وتنظيمها. وتتمثل ميزة تقنية النانو كبديل لإدارة الآفات الحشرية في زيادة الكفاءة ضد الكائنات المستهدفة، وانخفاض سمية مبيدات النانو للكائنات غير المستهدفة، ما يُبرز عدم كفاية الأضرار البيئية الجانبية التي تم الإبلاغ عنها في هذا المجال. كما أنها توفر إطلاقًا انتقائيًا ومستهدفًا وطويل الأمد للمواد النانوية المُصاغة، وهو أكثر جدوى بيئيًا. لذا فإن استخدام تكنولوجيا النانو في مكافحة الآفات الحشرية يعتبر مستدامًا بيئيًا واستراتيجية ممتازة لمكافحة الحشرات في الزراعة الخضراء (Yousef, *et al.* 2023).

تُعدّ تقنية النانو مجالًا جديدًا واعدًا يُستعمل على نطاق واسع فهي تفتح آفاقًا واسعة في مختلف العلوم التطبيقية، كالطب والأحياء والأدوية والهندسة والزراعة والهندسة

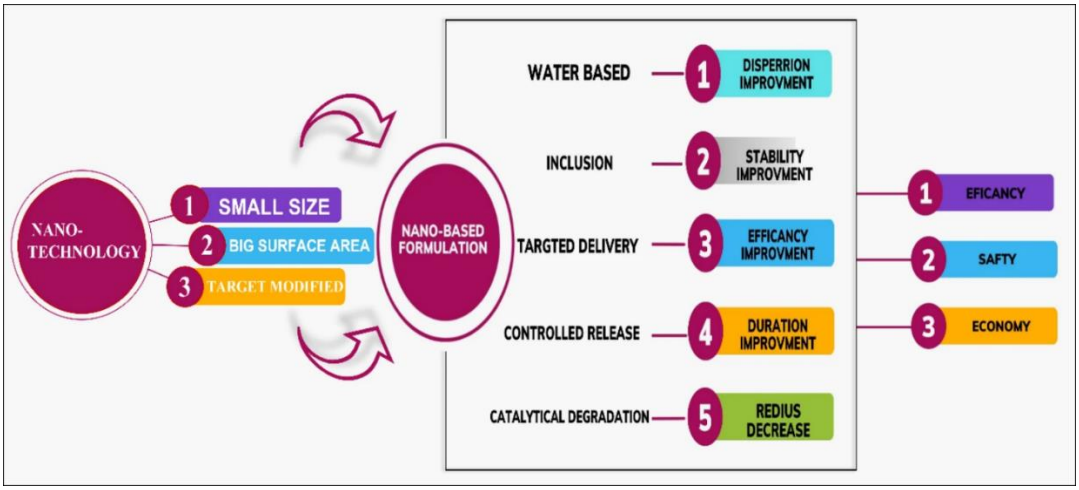
الوراثية، ما يُسهّل الحياة في هذا العصر. من أبرز التحديات التي يواجهها قطاع الزراعة عالميًا لإنتاج غذاء مستدام لسكان العالم المتزايدين بسرعة، والذي سيحتاج إلى زيادة بنسبة 70٪ بحلول عام 2050 لإطعام مليارات البشر الذين يعيشون على هذا الكوكب ونتيجةً لذلك، أصبح الاستخدام المتزايد للأسمدة والمبيدات الحشرية أمرًا بالغ الأهمية لتحسين الإنتاجية الزراعية. وبسبب الافتقار إلى التقنيات البيئية المناسبة لمكافحة الآفات، فإن الحشرات وآفات الأعشاب الضارة ومسببات أمراض النبات تدمر أكثر من 40% من إجمالي الإنتاج الغذائي المحتمل، على الرغم من استخدام ما يقرب من 3 ملايين طن من المبيدات الحشرية سنويًا ومجموعة واسعة من عوامل المكافحة البيولوجية (Srishilam, *et al.* 2022).

ومع ذلك، فإن للمبيدات الحشرية تأثيرًا قاتلًا على الحشرات أو الآفات المستهدفة، الا ان 98% من المبيدات الحشرية و95% من مبيدات الأعشاب على المحاصيل لايصل إلى الأنواع المستهدفة وانما يصل الى الانواع المستهدفة، وعلى الماء والتربة والهواء. في الآونة الأخيرة، أصبح تلوث المبيدات الحشرية مصدر قلق ملحوظ نظرًا للأمراض التي تسببها. يمكن لتكنولوجيا النانو أن تقلل من استعمال هذه المركبات النشطة للحفاظ على البيئة وصحة الإنسان، وخفض تكلفة إنتاج المحاصيل (Srishilam, *et al.* 2022).

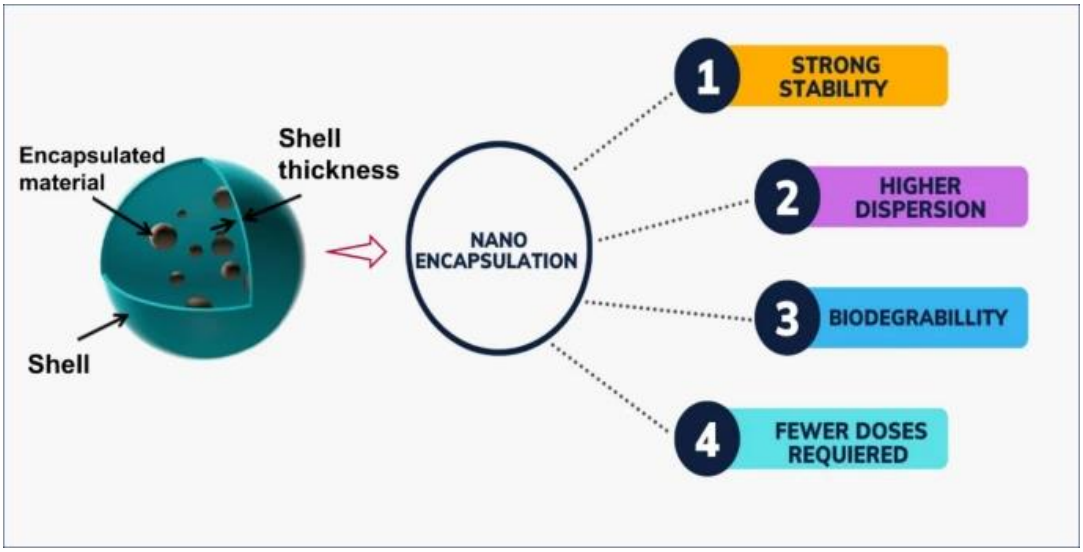
مزايا وعيوب Nanopesticide advantages and disadvantages المبيدات النانوية

تتميز المبيدات الحشرية التقليدية بجسيمات حاملة خشنة، وضعف الاستقرار، وضعف التشتت، وضعف النشاط البيولوجي، ومعدل استخدامها للمحاصيل المستهدفة أقل من 30٪. فضلا عن ذلك، فإن أكثر من 90٪ من المبيدات الحشرية تتسرب إلى البيئة وتسكن المنتوجات الزراعية أثناء عملية التطبيق (Urkude 2019). بدأت المبيدات النانوية في زيادة الاستعمال في الزراعة وإنتاج الغذاء وأظهر التحليل الذي أجراه (Wang, *et al.*2022) أن المبيدات النانوية قد تكون أكثر كفاءة واستدامة

ومرونة مع آثار بيئية ضارة أقل من نظائرها التقليدية، وقد أظهرت مزايا على المبيدات الحشرية التقليدية، مثل زيادة الكفاءة ضد الكائنات الحية المستهدفة بنسبة 31.5٪ و 18.9٪ في التجارب الحقلية. تبلغ سمية المبيدات النانوية المنخفضة للكائنات غير المستهدفة أقل من 43.1%، ما يُبرز عدم كفاية الأضرار البيئية الجانبية. يُسهّل نظام التحكم للمبيدات النانوية في التوصيل والإطلاقَ المُستدام للمكونات الفعالة عند نقطة التمييز المحددة المُستهدفة لفترة طويلة، ما يزيد من فعالية وكفاءة مبيدات الآفات المُستهدفة مثل الحشرات والمحاصيل ومسببات الأمراض وهذا نتاج عن التحسينات المفيدة لتركيبات المبيدات النانوية (شكل 1، 2).



شكل 1. تحسينات مفيدة لتركيبات المبيدات النانوية (عن Urkude 2019)



شكل 2. التغليف النانوي وفوائده (عن Urkude 2019)

لا تُعزز ناقلات المبيدات النانوية استقرار المبيدات وانتشارها فحسب، بل تُسهّل أيضًا وصول المكونات الفعالة للمبيدات إلى الكائنات المستهدفة، مما يعزز توافرها الحيوي ويمكن لهذه المزايا والفوائد أن تُعوّض عن عيوب الجرعات الكبيرة وضعف فعالية المبيدات التقليدية في التطبيقات العملية (شكل 2).

تأثير القضايا البيئية للمبيدات الحشرية التقليدية على التنوع البيولوجي.

Environmental issues of conventional pesticides impact biodiversity

تُبذل جهود كبيرة للقضاء على الحشرات التي تضر بالمحاصيل مع الحد الأدنى من الآثار الجانبية على الكائنات غير المستهدفة، مثل التربة والمياه والبشر (الشكل 3) (Sun, et al. 2019).

شكل 3. تأثير المبيدات الحشرية على الكائنات الحية في البيئة

الكائنات المستهدفة بالمبيدات الحشرية The target organisms of pesticides

يمتاز الإيميداكلوبريد، كمبيد حشري جهازي، بفعاليته العالية، ويمكنه حجب المسار العصبي للحشرات وقد أثبتت العديد من الدراسات أن الإيميداكلوبريد النانوي أكثر فعالية من المبيدات الحشرية التقليدية ضد حشرات: *Myzus persicae nicotianae* ، و*Sitophilus granarius*، *Rhyzopertha Dominica* ، و*Rhopalosiphum Padi*. لقد أظهر نانو-إيميداكلوبريد سمية أقل من نانو-كلوربيريفوس تجاه شغالات النحل ولوحظت التغيرات في خصائص نحل العسل *Apis mellifera* L، وكان لدى نانوإيميداكلوبريد أقل ضرر على الأجنحة وأجزاء الفم بينما سجل نانو-كلوربيريفوس تأثيرًا سلبيًا على طول البطن. كما وجد أن الكلوربيريفوس

ومركباته النانوية أكثر سمية من إيميداكلوبريد، أيضًا، أظهر نانو-كلوربيريفوس سمية أكبر من نانو-إيميداكلوبريد في الجهاز الهضمي لسوسة النخيل الحمراء (RPW) *Rhynchophorus ferrugineus*، والتي تعتبر واحدة من أخطر الحشرات على أنواع النخيل وان تسرب المبيد النانوي إلى الخلايا مما تسبب في تلف نواتها وكانت الأضرار التي لحقت باليرقات أكبر من الأضرار التي لحقت بالبالغات (Abd El-Fattah, *et al*. 2019).

الكائنات الحية غير المستهدفة للمبيدات الحشرية The non-targeted organisms of the pesticides

للمبيدات الحشرية آثار ضارة على البيئة والأنواع غير المستهدفة. وقد تجاوزت المخاطر المرتبطة باستخدامها آثارها المفيدة. وقد أثّرت المبيدات الحشرية سلبًا على الأنواع غير المستهدفة، وأثّرت على التنوع البيولوجي، والنظم البيئية للحيوانات والنباتات، والمياه والأغذية البرية والبشر. وللأعداء الطبيعية دورٌ هام في التحكم في مستوى تعداد الآفات ويمكن أن يؤدي القضاء على هؤلاء الأعداء إلى تفاقم مشكلات الآفات، كما تتأثر الأعداء الطبيعية التي تكافح الآفات عادةً في بعض الحالات، ما يؤدي إلى تفشي آفات ثانوية، مثل الطفيليات والحيوانات المفترسة.

تأثير المبيدات الحشرية على التنوع البيولوجي للتربة Impact of pesticides on the biodiversity of soil

تمثل اللافقاريات أكثر من 22% من أنواع الحيوانات التي تعيش في التربة وعلى سبيل المثال، لديدان الأرض دورٌ هام في تحسين بنية التربة والحفاظ عليها من خلال تكوين قنواتٍ لتهوية التربة وتصريفها مما يؤثر في الكتلة الحيوية الميكروبية، وبشكلٍ غير مباشر على نشاط التربة وهي عُرضةٌ للمبيدات الحشرية كما تُسبب المبيدات الحشرية خسائرَ غير مباشرة في المحاصيل، وخسارةً مباشرة في مُلقحات الحشرات، وذلك بسبب نقص اعداد احياء التربة المجهرية.

تأثير المبيدات الحشرية على التنوع البيولوجي للمياه

Impact of pesticides on biodiversity of water

تُعتبر المبيدات الحشرية سامةً للأسماك والكائنات غير المُستهدفة في النظم البيئية المائية. وهي سامةٌ بحد ذاتها، ولكنها تتفاعل أيضًا مع مُسببات الإجهاد، بما في ذلك الإزهار الضار للطحالب. يشير الإفراط في استخدام المبيدات الحشرية إلى انخفاض في أعداد أنواع الأسماك المختلفة.

تأثير المبيدات الحشرية على صحة الإنسان

Impact of pesticides on human health

يمكن أن تدخل المبيدات الحشرية الجسم عن طريق استنشاق الهباء الجوي المحتوي عليها، والغبار، والأبخرة، والطعام/الماء، والابتلاع، والتلامس المباشر مع الجلد عن طريق الفم. ومع ذلك، أدى الاستخدام طويل الأمد والعشوائي إلى آثار خطرة على الصحة. إن طبيعة المبيدات الحشرية غير المحددة واستخدامها غير الفعال يجعل البشر، وخاصةً الرضع والأطفال، أكثر عرضة للآثار الضارة للمبيدات الحشرية.

القضايا البيئية المتعلقة بتأثير المبيدات النانوية على التنوع البيولوجي

Environmental issues of nano pesticides impact on biodiversity

تتمتع المواد النانوية بإمكانية أن تُصبح مكونًا أساسيًا في معظم المنتوجات الصناعية والأسمدة والأدوية وأبحاث الأدوية نظرًا لخصائصها الفريدة. وحتى الآن، لا تتوفر معلومات كافية حول سمية الجسيمات النانوية وتأثيرها على صحة الإنسان. يمكن للمواد النانوية أن تمر عبر الأغشية البيولوجية وتصل إلى الأعضاء وتدخل مجرى الدم عن طريق الاستنشاق أو الابتلاع. وقد يؤدي ذلك إلى سمية بيوكيميائية وجينية (Forset, 2022). يمكن للمبيدات النانوية تحسين كفاءة المبيدات من خلال إطلاق مُتحكم به إلى العامل المُمرض المُستهدف. ومع ذلك، فأن 0.1٪ فقط من المبيدات النانوية تصل إلى العامل المُمرض المُستهدف. في المقابل، يذهب الباقي، أي 99.9٪

إلى البيئة المحيطة بالعامل المُمرض، ما يؤدي إلى فقدان التنوع البيولوجي، وتلوث المياه والتربة، وزيادة مقاومة مسببات الأمراض والآفات (De Albuquerque, *et al.* 2020). السبب الرئيس لسمية الجسيمات النانوية للمبيدات النانوية هو صغر حجمها وعلى سبيل المثال، يمكن أن تسبب الجسيمات النانوية الفضية سمية خلوية في رئتي الإنسان، ما يؤدي إلى سرطان الرئة بسبب إطلاق الفضة في الوسط كما يمكن أن تسبب الجسيمات النانوية الفضية أيضًا مجموعة واسعة من السمية، بما في ذلك السمية الجينية، والسمية التنموية بناءً على حجم الجسيمات، والسمية الخلوية، والالتهاب (Parveen, *et al.* 2021). كما أن لشكل الجسيمات النانوية دور في محاكاة تأثيرها السام، حيث أظهرت الحسابات القائمة على شكل وشكل الشحنات على الجسيمات النانوية NPS أن من شأنه تسريع عملية انتقالها عبر أغشية الخلايا بما يصل إلى أكثر من 60 مرة. تُعد الجسيمات النانوية من اوكسيد الزنك ZnO على شكل قضبان نانوية أكثر سمية للخلايا الرئوية البشرية من شكلها الكروي وبالمثل، فإن جسيمات النانو الذهبية لها نفس الوظيفة، ولكنها تختلف في شكلها، ما أدى إلى اختلاف السمية بينهما حيث أن جسيمات النانو الذهبية الكروية أكثر سمية من تلك ذات الشكل القضيبي، وقد يكون هذا بسبب الإطلاق السريع للجزيء الوظيفي في الشكل الكروي (Egbuna, *et al.* 2021).

أمثلة على تأثيرات المبيدات النانوية على الكائنات غير المستهدفة

Examples of nano pesticides effects on non-targeted organisms

تحظى المبيدات النانوية القائمة على النحاس CuO ، Cu، $Cu(OH_2)$ باهتمام كبير في الوقت الحاضر. لقد وجد أن تأثيرها على النظام البيئي الزراعي الأرضي المستهدف كان محدودًا، وأن الأراضي الرطبة غير المستهدفة (المجتمع المائي) تأثرت بشكل كبير، ووجد عند تركيز 500 ملغ/كجم من جسيمات اوكسيد النحاس النانوية

CuONPs في التربة يتم تثبيط عملية نزع النتروجين ويزداد تراكم NO_3 وينخفض معدل انبعاثNO_2 . تم تصميم وقياس مزيج من الكلوربيريفوس وأكسيد الزنك (بشكله السائب والجسيمات النانوية) على تربة اصطناعية وطبيعية على مدى جيلين من ديدان الأرض فاختلفت السمية باختلاف نوع التربة، وحجم الجسيمات النانوية المستخدمة، وجيل ديدان الأرض. يستطيع الجيل القادم من ديدان الأرض التكيف مع مادة سامة واحدة أكثر من خليط منها (Comes, *et al.* 2019). وقد وجدوا أن خليط الكلوربيريفوس وجسيمات أكسيد الزنك النانوية له آثار ضارة أكثر من استخدامها منفصلة على نمو وتكاثر ديدان الارض. من جهة أخرى، استحوذت الصياغة النانوية على اهتمام خاص بتركيب ودراسة تأثير هذه المركبات على التربة. كانت الصياغة النانوية للأترازين أقل سمية من الأترازين العادي على التربة.

تأثير المبيدات النانوية على الإنسان Impact of nano-pesticides on the human

تُشكل المبيدات النانوية التي تنتقل إلى البيئة المحيطة بالمُمْرِض المُستهدف خطرًا كبيرًا على صحة الإنسان. يمكن للجسيمات النانوية الموجودة في هذه المبيدات أن تدخل جسم الإنسان عبر الجهاز التنفسي أو الأنف، ثم تصل إلى الرئتين. يمكن لمنطقة البلعوم الأنفي أن تلتقط جسيمات نانوية يتراوح حجمها بين 10 و20 نانومترًا (Gulati, *et al*. 2022). كلما صغر حجم الجسيم زادت سُميته إذا كان له التركيب نفسه والبنية البلورية. يمكن للجسيمات النانوية الصغيرة أن تُسبب التهابًا وتكاثرًا خلويًا، يليه تليف، وبالتالي تُشكل أورامًا. أن تُحسّن العديد من أنواع الجسيمات النانوية من التعبير عن المُستقبلات الفيروسية، مما يؤدي إلى فرط نشاط الخلايا البلعمية، ما يُؤدي إلى التهاب شديد. ومع ذلك في الوقت نفسه تعمل بعض الجسيمات النانوية مثل TiO_2 وSiO_2، على تقليل التعبير عن مستقبلات البكتيريا والفيروسات، مما يقلل من مقاومة جسم الإنسان للبكتيريا والفيروسات (Mahon *et al*. 2020).

تطبيقات تكنولوجيا النانو في علم الحشرات Entomological nanotechnology applications

تُقدم تكنولوجيا النانو مواد كيميائية زراعية وتقنيات توزيع جديدة، وتُعد بتقليل الجرعات الكيميائية لزيادة إنتاج المحاصيل. تُحسّن المواد الكيميائية الزراعية المتاحة من إنتاجية المحاصيل بفعالية وتقضي على الآفات والأمراض إلا أنها تتطلب جرعة عالية من التطبيق العشوائي والفعال. لذلك يهدف تطبيق تكنولوجيا النانو إلى تقليل جرعة المواد الكيميائية الزراعية من خلال التغليف والطلاء، وما إلى ذلك.

تكنولوجيا النانو لمكافحة الآفات الحشرية Nanotechnology for insect pest control

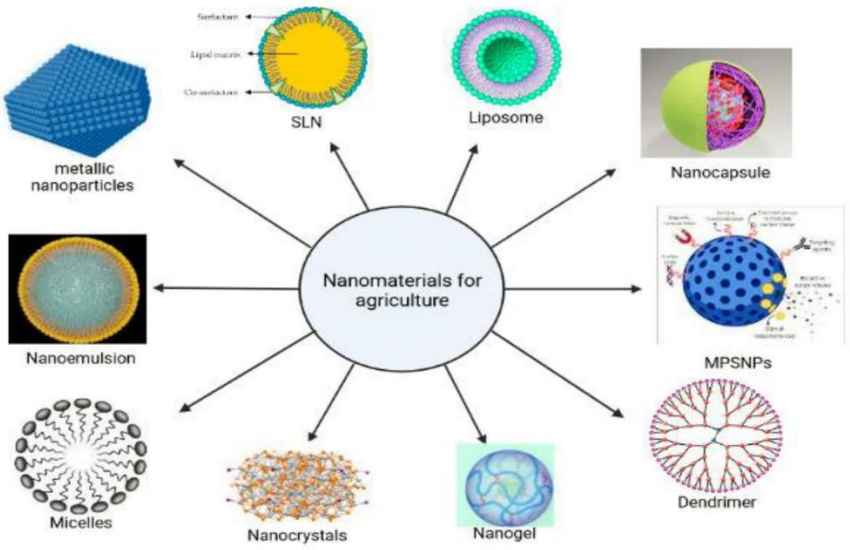
تشير الدراسات الحديثة إلى أن منصات المواد النانوية المُهندَسة (ENM) Engineered NanoMaterials يمكن أن تُوفر استراتيجيات ناجحة لمكافحة الآفات الحشرية وأنواع الأعشاب الضارة وإدارتها. يُمكن للتركيبات النانوية التي تحتوي على ENM في المبيدات الحشرية/مبيدات الأعشاب التقليدية أن تُحسّن قابلية اختراق المكونات النشطة للأنواع المستهدفة، وقابليتها للذوبان، واستقرارها، وخصائص الإطلاق المُتحكم بها، وذلك عن طريق الاستحلاب النانوي والتغليف النانوي (Adesa, *et al.* 2019). إن زيادة دقة توزيع المكونات الفعالة، مثل الأسمدة النانوية ومضادات الميكروبات، يمكن أن تقلل من كمية المواد المُطلقة في النظام، ما يُقلل من الآثار غير المرغوب فيها على الكائنات غير المستهدفة والبيئة. كما يتحكم التركيب الذري في الجسيمات النانوية ويؤثر على حجمها وشكلها واتجاهها للتفاعل مع الأنسجة المستهدفة. تتميز الجسيمات النانوية بخصائص جديدة مثل القوة الاستثنائية، والتفاعل الكيميائي العالي، والتوصيلية العالية. تتوفر المبيدات النانوية بأشكال مختلفة (مثل المذيلات والجسيمات)، وقد تتكون من مكونات عضوية (مثل البوليمرات) و/أو غير عضوية (مثل أكاسيد المعادن).

أنواع الجسيمات النانوية المستعملة كمبيدات حيوية في تركيبات الإطلاق المُتحكم به

Types of nanoparticles used as biopesticides in controlled-release formulations

تُصنف هذه الجسيمات النانوية إلى (شكل 4):

- ❖ **الكرات النانوية Nanospheres:** النوع الأكثر شيوعًا من المواد النانوية المستعملة في تركيبات الإطلاق المُبيدة حيويًا، وهي عبارة عن مواد مُركّبة، حيث تتوزع المادة الفعالة في مصفوفة البوليمر بشكل متجانس.
- ❖ **الكبسولات النانوية Nanocapsules:** مواد مُركّبة تُركّز المركب الفعال المُبطّن ببوليمر مصفوفة بالقرب من النواة.
- ❖ **الهلام النانوي Nano gel:** بوليمرات مُحبّة للماء تمتص كميات كبيرة من الماء (عادةً ما تكون متشابكة).
- ❖ **المُذيّلات Micelles:** مواد مُركّبة تُنتجها جزيئات مُحبّة للماء وأخرى كارهة للماء في محاليل مائية.



شكل 4. أنواع المواد النانوية المستعملة لمكافحة الآفات في الزراعة

تحسينات مفيدة لمبيدات الآفات النانوية في مكافحة الآفات الحشرية

Beneficial enhancements of nano pesticides to control insect pests

تركز الزراعة النانوية على الزراعة التي تستعمل جزيئات نانوية الحجم ذات خصائص فريدة لتعزيز إنتاج المحاصيل. يُعد التغليف النانوي جزءًا آخر من تكنولوجيا النانو إذ يوفر مجموعة متنوعة من الميزات المرغوبة بما في ذلك تقليل تعرض الإنسان للمكونات الفعالة، والتحكم في الإطلاق، وتركيزات متبقية أطول، والتخلص من المذيبات العضوية، وزيادة الفعالية (Hack, *et al*. 2012). وبفضل تطور علوم النانو في مكافحة الآفات الحشرية، ساهمت تركيبات التغليف في تحديث استخدام مبيدات الآفات، إذ إنها تقلل الجرعات مقارنةً بالمبيدات التقليدية، مما يحقق أقصى تأثير مع فعالية مبيد أكثر تركيزًا على الهدف. تُغلف المادة الأساسية (المبيد) في هذه العملية، وتُغلف بمادة تغليف أو غلاف، وينخفض حجم المبيد إلى الحجم النانوي. تتمتع تكنولوجيا النانو بفوائد هائلة في جميع مراحل إنتاج المنتوجات الزراعية وتخزينها وتعبئتها ومعالجتها ونقلها. على وجه الخصوص، يُعدّ التطور الحديث في تركيب المبيدات الحشرية بطيئة الإطلاق أو المُتحكم بها، القائم على تقنية النانو، أكثر فعاليةً من وسائل توصيل المبيدات الأخرى (Harish, *et al*. 2022). ومن الجوانب المهمة للزراعة الدقيقة تطبيق الكيماويات الزراعية على النباتات باستعمال أنظمة توصيل مُتحكم بها.

تهدف تقنيات التوصيل المُنظَّم إلى إطلاق الكمية المُحتسبة والمطلوبة والكافية من الكيماويات الزراعية بمرور الوقت، وتحقيق أقصى كفاءة بيولوجية لتقليل الخسائر والآثار الضارة. تُطلق الجسيمات النانوية الكيماويات الزراعية إلى النباتات باستخدام أنظمة توصيل مُتحكَّم بها، مُقارنةً بتركيبات المبيدات الحشرية التقليدية، حيث يدخل أكثر من ٩٠٪ من المبيدات إلى الغلاف الجوي وتبقى في المنتوجات الزراعية أثناء عملية الاستعمال. يُمكّن التحكم في نظام التوصيل من الإطلاق المستمر للمكون النشط

في الموقع المستهدف لفترة طويلة، مما يُحسّن كفاءة توصيل المبيدات إلى أهداف العمل، مثل النباتات ومسببات الأمراض والحشرات (John, *et al*. 2017)، ويزيد من ذوبان وتشتت المواد الكيميائية القابلة للذوبان في الدهون في المحاليل المائية ويُقلل من استعمال المبيدات وتكرار العلاج من خلال إطالة مدة صلاحيتها ويُعزز الفعالية الحيوية، ويُقلل من المدخلات الكيميائية للنباتات، ويُحل مشكلة السمية غير المستهدفة، ويُحسّن الاستقرار الكيميائي من خلال الحد من التحلل الضوئي للمركبات الحساسة للضوء . ويحمي الإطلاق المستمر للمبيدات التنوع البيولوجي للنظام البيئي. وتشير التقارير إلى أن تعزيز نمو النباتات وإنبات البذور وتحسين المحاصيل في الممارسات التقليدية قد تم استبداله بنجاح بتطبيق أنابيب الكربون النانوية كمنظمات لنمو النباتات وإنبات البذور (Zheng *et al*. 2005؛ Khodakovskaya *et al*. 2013).

الاتجاهات التطورية في مبيدات الآفات النانوية Evolutionary trends in nano pesticides

دفعت التطورات السريعة في علم مبيدات الآفات النانوية العديد من المنظمات الدولية إلى دراسة المخاوف المحتملة المتعلقة باستخدام تقنية النانو لضمان سلامة المحاصيل. وسيلزم وضع بروتوكولات تجريبية لإنتاج خصائص مصيرية موثوقة لدراسة التوافر البيولوجي ومتانة مبيدات الآفات النانوية (wang, *et al*. 2022). وينبغي النظر في تقييم وتحسين نهج تقييم المخاطر البيئية الحالي في الأبحاث الحديثة للحد من الآثار السامة للمبيدات الكيميائية، وإنتاج أنظمة نانوية ذكية للحد من المشكلات الزراعية، مثل اختلال التوازن البيئي، والأمن الغذائي، والإنتاجية. ويمكن لهذه الأنظمة النانوية، ذات قابلية الاستعمال العالية لأنماط الإطلاق المُتحكم بها على مدى فترة طويلة، أن تُساعد في الحد من ظاهرة التخثث (ظاهرة بيئية تحدث عندما تزيد كميات المغذيات وخاصة النيتروجين والفسفور في المسطحات المائية وهذا يؤدي

الى نمو مفرط للطحالب والنباتات المائية) وتراكم بقايا المبيدات. فضلا عن ذلك، زادت المبيدات النانوية من قابلية ذوبان المكونات الفعالة واستقرارها، مما يسمح بمكافحة أكثر فعالية للآفات ومع ذلك، لا يزال هناك مجال للتحسين في مجالات أخرى مثل:

1- تطوير مبيدات نانوية ذكية العديد من الحلول لصناعة الكيماويات الزراعية، مثل قابلية ذوبان المكونات الفعالة، واستقرارها، وإطلاقها المُتحكم به، وتوزيعها المُستهدف، فضلا عن فهم أفضل لمصير مبيدات النانو في الميدان.

2- لتحسين فعالية مبيدات النانو، ينبغي تطويرها باستعمال الكيمياء الخضراء ومبادئ حماية البيئة.

3- تحسين عمليات رفع مستوى مبيدات النانو إلى المستويات التجارية.

4- تقييم الأثر البيئي لمبيدات النانو لتحديد مستوى السمية. ويجري حاليًا تحسين اللوائح الخاصة باستخدام المواد النانوية في الزراعة.

الآلية السامة للمواد النانوية Toxic mechanism of nanomaterials

الآليات الضارة للمواد النانوية في الكائنات الحية غير واضحة. ووفقًا للدراسات، فإن العناصر الأربعة التالية هي المسؤولة بشكل رئيس عن الآثار الضارة لهذه المواد:

أولًا- يمكن لجسيمات المواد النانوية دخول الخلايا بسرعة وعبور غشاء الخلية. ونتيجة لذلك، يمكن أن تتداخل مع العمليات الفسيولوجية المنتظمة للخلية وتثبط عملية التمثيل الضوئي.

ثانيًا- يمكن لبعض المواد النانوية - مثل أيونات الفضة النانوية، والنحاس النانوي، والزنك النانوي - أن تطلق أيونات ضارة من تلقاء نفسها.

ثالثا-الضرر التأكسدي هو العنصر الثالث. أنواع الأكسجين التفاعلية(ROS) ، التي تنتجها المواد النانوية بسرعة، شديدة التفاعل. يمكن لأنواع الأكسجين التفاعلية

(ROS)أن تُلحق الضرر بآلية الدفاع المضادة للأكسدة في الميتوكوندريا، وتُسبب الإجهاد التأكسدي، وتعطيل البروتينات الوظيفية، وحتى موت الخلايا، مما قد يتداخل مع العمليات الفسيولوجية الطبيعية.(Rajput *et al*., 2020)

رابعا- يُمثل تأثير التضخيم البيولوجي العنصر الرابع، فقد تتراكم المواد النانوية في الكائنات الحية عند مستويات غذائية عالية في السلسلة الغذائية، وهي عملية تُعرف باسم التضخيم البيولوجي (de Oliveira *et al*. 2015).

استيعاب الجسيمات النانوية (الالتقام الخلوي والإخراج الخلوي)

Internalization of NPs (endocytosis and exocytosis)

تؤثر عوامل مختلفة، بما في ذلك تركيب الجسيمات النانوية وحجمها وشكلها وصلابتها وكيمياء سطحها، على استيعاب الجسيمات النانوية. تُعد هذه الخصائص أساسية لاستقرار الجسيمات النانوية في الوسط الحيوي، كما أنها قد تؤثر في تفاعلات الخلايا مع الجسيمات النانوية وامتصاصها اللاحق (Sousa, *et al*. 2021). تختار أغشية الخلايا مسار الالتقام الخلوي بناءً على شكل الجسيمات النانوية وحجمها وكيمياء سطحها. يُعد حجم الجسيمات النانوية أساسيًا لتحديد الاستهداف وزمن الدوران وتركيز التشبع وآلية الامتصاص. كما يمكن أن يؤثر نوع الجسيمات النانوية على آلية الامتصاص. في السنوات الاخيرة تم تحسن فهم تفاعلات الخلايا مع الجسيمات النانوية والالتقام الخلوي والانتقال داخل الخلايا بشكل كبير.

يتم امتصاص الجسيمات النانوية الأصغر حجمًا بشكل رئيس عن طريق البلعمة الخلوية بينما يتم امتصاص الجسيمات النانوية الأكبر حجمًا والتكتلات عن طريق البلعمة الخلوية الكبيرة والبلعمة الخلوية. يمكن للجسيمات النانوية الأصغر دخول الخلية ومغادرتها بسهولة أكبر. يتم استيعاب الجسيمات النانوية ذات الأشكال الكروية بشكل أكبر من الجسيمات النانوية الأسطوانية. تتميز الجسيمات النانوية ذات الشحنة

الموجبة بمعدل بلعمة خلوية أعلى من الجسيمات النانوية ذات الشحنة السالبة والمتعادلة.

مبيدات حشرية نانوية نحاسية Nano-copper pesticides

استُخدمت الجسيمات النانوية القائمة على النحاس في العديد من المجالات، مثل الهندسة الصناعية، والبيئة، والطب، والزراعة. ويهدف إنتاج مبيدات نانوية جديدة إلى تصنيع مبيدات نانوية ذات تأثير عالٍ وتلوث بيئي منخفض. ولم تتضح بعد السمية الخلوية لمبيدات النانو النحاسية (Vignardi et al. 2020a, b).

السمية الخلوية لجسيمات النحاس النانوية Cytotoxicity of CuNPs

عادةً ما يُعد النحاس أحد العناصر الغذائية الأساسية للجسم، ولكن إذا تجاوز تناول النحاس المعدل الطبيعي للجسم، فسيؤدي ذلك إلى آثار سامة مثل اليرقان وانحلال الدم وقد يؤدي إلى الوفاة. كما أنه يُسبب آثارًا ضارة على الجهاز الهضمي والجهاز التنفسي (Ingle, *et al.* 2014). يمكن استعمال جسيمات النحاس النانوية كمبيدات نانوية للآفات، ومبيدات أعشاب نانوية، ومنتوجات طبية نانوية تعتمد على جسيمات النحاس النانوية. الدور الحاسم لجميع المبيدات الحشرية القائمة على النحاس هو إطلاق أيونات النحاس السامة. تُعد مبيدات النحاس التقليدية، بما في ذلك $CuCl_2$ أو $CuSO_4$، فعالة للغاية في مكافحة الآفات الزراعية. ولتقليل الآثار البيئية، صُممت المبيدات النانوية القائمة على النحاس لتكون بنفس فعالية المنتوجات التقليدية وأقل سمية بيئيًا، حيث تُطلق أيونات النحاس المؤثرة ببطء شديد، مما يُطرد الآفات مع تعريض الأنواع غير المستهدفة لتركيزات منخفضة نسبيًا من النحاس وعادةً ما تحتوي المبيدات الحشرية القائمة على النحاس على 56% نحاس عضوي، و34% كبريتات النحاس، و6% أكسيد النحاس، و4% أكسيد النحاس وزنا.

مبيدات النانو الفضية Nano-silver pesticides

شهد استخدام جسيمات الفضة النانوية (AgNPs) في مختلف مجالات الحياة زيادةً ملحوظةً في السنوات القليلة الماضية، ويعود ذلك إلى الخصائص الكيميائية والفيزيائية الفريدة للفضة. لجسيمات الفضة النانوية تطبيقات بيولوجية عدة، كمضادات للفطريات والبكتيريا والفيروسات، وغيرها (Yin, *et al*. 2020).

السمية الخلوية لجسيمات الفضة النانوية Cytotoxicity of AgNPs

تُعد سمية جسيمات الفضة النانوية وتأثيرها على صحة الإنسان والحيوان من الخصائص الأساسية لجسيمات الفضة النانوية، حيث أظهرت العديد من الدراسات المنشورة في العقد الماضي أن لجسيمات الفضة النانوية تأثيرًا شديد السمية على العديد من خطوط الخلايا وبعض الكائنات المائية. على سبيل المثال، تتمتع بعض أنواع الطحالب بحساسية أعلى تجاه جسيمات الفضة النانوية مقارنةً بحساسيتها تجاه أيونات الفضة الموجبة. ومع ذلك، فإن إضافة السيستين لتكوين مركب مع أيونات الفضة يقلل من التأثير السام لجسيمات الفضة النانوية وأيونات الفضة الموجبة. واقترحوا أن أيونات الفضة المنبعثة من جسيمات النانو الفضية تصبح أقل ضررًا عند تكوين مركب مع الكبريت والمركب العضوي (Stensberg, *et al*. 2011).

السمية الخلوية للجسيمات النانوية البوليمرية (PNPs)

Cytotoxicity of polymeric nanoparticles (PNPs)

الجسيمات النانوية البوليمرية هي جسيمات دون الميكرون، يتراوح حجمها بين 1 و1000 نانومتر. في الزراعة تُستخدم الجسيمات النانوية البوليمرية لتوصيل المواد الكيميائية إلى المحاصيل لمكافحة الآفات وتحسين إنتاجية المحاصيل. تُحسّن الجسيمات النانوية البوليمرية قدرة الاستهداف مما يُقلل من تلوث البيئة المحيطة وسميتها، ويحمي المادة الفعالة من العوامل البيئية المحيطة، كما أنها شديدة الذوبان في الظروف الفسيولوجية، وتمتاز بإطلاق مُتحكم فيه للمادة الفعالة، وتُحسّن كفاءة المادة

الديناميكية. من أمثلة البوليمرات المستخدمة في نظام التوصيل: بولي (Epsilon-caprolactone)، وبولي (Lac-tide-co-glycolides)، وبولي polyethylene glycol (Acharya and Pal, 2020).

آلية عمل الجسيمات النانوية البوليمرية Mechanism of action of PNPs

تُعدّ أنظمة الإطلاق المُتحكم به تطورات جديدة لفتت انتباه الأوساط التجارية والعلمية حول العالم وفي السنوات الأخيرة يُعدّ الألجينات والكيتوزان Alginate and Chitosanمن أنظمة الناقلات النانوية التقليدية المستجيبة لدرجة الحموضة (Roman, *et al*. 2020). يُستغلّ التفاعل بين هذين البوليمرين الحيويين في عملية التجلط الأيوني Ionic gelation process لإنتاج ناقلات نانوية مصنوعة من الألجينات والكيتوزان. عندما يتكون النظام بالكامل من بوليمر حيوي واحد، فإنّ التغيرات في درجة الحموضة قد تُسبب تنافرًا بين سلاسل البوليمر بسبب الشحنات المتشابهة، مما يؤدي إلى اتساع أو انكماش شبكة البوليمر (الانتفاخ swelling) ، وبالتالي التأثير في إطلاق المادة الفعالة (Ofridam, *et al*.2021)، تصف هذه الآليات كيفية عمل معظم أنظمة الإطلاق المستجيبة لدرجة الحموضة.

الاستنتاجات

تتمتع تقنية النانو بإمكانية إحداث نقلة نوعية في التقنيات الحالية في مختلف المجالات، بما في ذلك مكافحة الآفات، إذ أظهرت قدرةً فائقةً على إدارة نمط إطلاق المكونات النشطة في المبيدات، ما يجعلها أكثر فعاليةً على المدى الطويل، ويساهم في التغلب على مشكلات الجريان الزراعي وتراكم المبيدات المتبقية. ونتيجةً لذلك، يُمكن الاستنتاج أن تقنية النانو تُوفر بدائل خضراء وصديقة للبيئة لإدارة الآفات، دون الإضرار بالبيئة. وبالتالي، تُعتبر تقنية النانو من المجالات الواعدة والناشئة التي يُمكن أن تُغير الوضع الراهن لقطاع الزراعة والأغذية بفضل الأساليب المُطورة حديثًا.

Abd El-Fattah AY, El-Helaly AA, El-Wahab A, A. S (2019) Testing nano-pesticides toxicity against red palm weevil Rhynchophorus ferrugineus (Olivier) in Egypt. Crop Prot 19(1):1559–1568.

Acharya A, Pal PK (2020) Agriculture nanotechnology: translating research outcome to field applications by influencing environmental sustainability. NanoImpact 19:100232

Adisa IO, Pullagurala VLR, Peralta-Videa JR (2019) Different applications of Nanomaterials and their impact on the Environment. Int J Mater Sci Eng 5:1–7

De Albuquerque FP, Preisler AC, Fraceto LF, Oliveira HC, de Castro VLSS (2020) Overview of Nanopesticide Environmental Safety Aspects and Regulatory Issues: the case of Nanoatrazine. In: Fraceto L, de Castro SS, Grillo V, Ávila R, Lima H R. (eds) Nanopesticides. Springer, Cham

de Oliveira JL, Campos EVR, da Silva CMG, Pasquoto T, Lima R, Fraceto LF (2015) Solid lipid nanoparticles co-loaded with simazine and atrazine: Preparation, characterization, and evaluation of Herbicidal Activity. J Agric Food Chem 63:422–432 [CrossRef] [PubMed]

de Oliveira-Filho EC, Lopes RM, Paumgartten FJR (2004) Comparative study on the susceptibility of freshwater species to copper-based pesticides. Chemosphere 56(4):369–374

Egbuna C, Parmar VK, Jeevanandam J, Ezzat SM, Patrick-Iwuanyanwu KC, Adetunji CO, Khan J, Onyeike EN, Uche CZ, Akram M, Ibrahim MS, el Mahdy NM, Awuchi CG, Saravanan K, Tijjani H, Odoh UE, Messaoudi M, Ifemeje JC, Olisah MC, …, Ibeabuchi CG (2021) Toxicity of Nanoparticles in Biomedical Application:

Nanotoxicology. In Journal of Toxicology (Vol. 2021). Hindawi Limited. https://doi.org/10.1155/2021/9954443

Forest V (2022) Experimental and computational nanotoxicology—complementary approaches for Nanomaterial Hazard Assessment. Nanomaterials 12(8):1346. https://doi.org/10.3390/nano12081346

García-Gómez C, Babín M, García S, Almendros P, Pérez RA, Fernández MD (2019) Joint effects of zinc oxide nanoparticles and chlorpyrifos on the reproduction and cellular stress responses of the earthworm Eisenia andrei. Sci Total Environ 688:199–207

Gill HK, Garg H (2014) Pesticide: environmental impacts and management strategies. Pesticides-toxic aspects 8:187

Gomes SI, Scott-Fordsmand JJ, Campos EV, Grillo R, Fraceto LF, Amorim MJ (2019) On the safety of nanoformulations to non-target soil invertebrates–an atrazine case study. Environ Science: Nano 6(6):1950–1958

Grillo R, Fraceto LF, Amorim MJB, Scott-Fordsmand JJ, Schoonjans R, Chaudhry Q (2021) 9780857097026.1.45

Gulati S, Kumar S, Jain S, Radhika, Sharma N, Batra K (2022) Toxicological Perspectives and Environmental Risks of Consumer Nanoproducts. In Handbook of Consumer Nanoproducts (pp. 1253–1275). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8698-6_102

Hack B, Egger H, Uhlemann J, Henriet M, Wirth W, Vermeer AWP, Duff DG (2012) Advanced Agrochemical Formulations through Encapsulation Strategies. Chem Ing Tech 84:223–234

Ingle AP, Duran N, Rai M (2014) Bioactivity, mechanism of action, and cytotoxicity of copper-based nanoparticles: a review. Applied Microbiology and Biotechnology, vol 98. Springer Verlag, pp 1001–1009. 3

John H, Lucas J, Clare W, Dusan L (2017) Nanopesticides: a review of current research and perspectives. New Pestic. Soil Sens., (2017): 193–225

Khodakovskaya MV, Kim BS, Kim JN, Alimohammadi M, Dervishi E, Mustafa T, Cernigla CE (2013) Carbon nanotubes as plant growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community. Small 9(1):115–123

Mahon OR, Browe DC, Gonzalez-Fernandez T, Pitacco P, Whelan IT, von Euw S, Hobbs C, Nicolosi V, Cunningham KT, Mills KHG, Kelly DJ, Dunne A (2020) Nano-particle mediated M2 macrophage polarization enhances bone formation and MSC osteogenesis in an IL-10 dependent manner. Biomaterials 239. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2020.119833

Ofridam F, Tarhini M, Lebaz N, Gagnière É, Mangin D, Elaissari A (2021) pH-sensitive polymers: classification and some fine potential applications. Polymers for Advanced Technologies, vol 32. John Wiley and Sons Ltd, pp 1455–1484. 4 https://doi.org/10.1002/pat.5230

Parveen R, Maiti PK, Murmu N, Datta A (2021) Preparation of serum capped silver nanoparticles for selective killing of microbial cells sparing host cells. Sci Rep 11(1). https://doi.org/10.1038/s41598-021-91031-7

Rajput V, Minkina T, Mazarji M, Shende S, Sushkova S, Mandzhieva S, Burachevskaya M, Chaplygin V, Singh A, Jatav H (2020) Accumulation

of Nanoparticles in the soil-plant Systems and their Effects on Human Health. Ann Agric Sci 65:137–143

Román JV, Rodríguez-Rodríguez JA, del Valle EMM, Galán MA (2016) Synthesis of a new nanoparticle system based on electrostatic alginate-piperazine interactions. Polym Adv Technol 27(5):623–629. https://doi.org/10.1002/pat.3731

Sousa De Almeida M, Susnik E, Drasler B, Taladriz-Blanco P, Petri-Fink A, Rothen-Rutishauser B (2021) Understanding nanoparticle endocytosis to improve targeting strategies in nanomedicine. Chem Soc Reviews (Vol 50:5397–5434. https://doi.org/10.1039/d0cs01127d. Royal Society of Chemistry

Srishailam B, Sailaja V, Nikhitha A, Kiran PK (2022) Promoting start-ups in Agriculture. An Innovative Approach for Transforming Agriculture to Agri-Business

Stensberg MC, Wei Q, McLamore ES, Porterfield DM, Wei A, Sepúlveda MS (2011) Toxicological studies on silver nanoparticles: challenges and opportunities in assessment, monitoring and imaging. Nanomedicine 6(5):879–898

Sun Y, Liang J, Tang L, Li H, Zhu Y, Jiang D, Song B, Chen M, Zeng G (2019) Nano-pesticides: a great challenge for biodiversity? Nano Today. 100757. https://doi.org/10.1016/j.nantod.2019.06.003. 28

Urkude R (2019) Application of Nanotechnology in Insect Pest Management. Int Res J Science & Engineering 7(6):151156

Vignardi CP, Muller EB, Tran K, Couture JL, Means JC, Murray JL, …, Lenihan HS (2020b) Conventional and nano-copper pesticides are

equally toxic to the estuarine amphipod Leptocheirus plumulosus. Aquat Toxicol 224:105481

Vignardi CP, Muller EB, Tran K, Couture JL, Means JC, Murray JLS, Ortiz C, Keller AA, Sanchez S, N., Lenihan HS (2020a) Conventional and nano-copper pesticides are equally toxic to the estuarine amphipod Leptocheirus plumulosus. Aquat Toxicol 224:105481

Wang D, Saleh NB, Byro A, Zepp R, Sahle-Demessie E, Luxton TP, Ho KT, Burgess RM, Flury M, White JC, Su C (2022) Nano-enabled pesticides for sustainable agriculture and global food security. Nat Nanotechnol 17(4):347–360. https://doi.org/10.1038/s41565-022-01082-8

Yin IX, Zhang J, Zhao IS, Mei ML, Li Q, Chu CH (2020) The Antibacterial mechanism of silver nanoparticles and its application in Dentistry. Int J Nanomed 15:2555

Yousef, H. A., Fahmy, H. M., Arafa, F. N., Abd Allah, M. Y., Tawfik, Y. M. El Halwany, K. K., El-Ashmanty, B., Al-anany, F. Sh., Mohamed, M. A. and Bassily, M. E. 2023. Nanotechnology in pest management: advantages, applications, and challenges . International Journal of Tropical Insect ScienceV. 43: 1387–1399.

Zheng L, Hong F, Lu S, Liu C (2005) Effect of nano-TiO_2 on strength of naturally aged seeds and growth of spinach. Biol Trace Elem Res 104:83–91. doi:10.1385/BTER:104:1:08 22 Environ Chem Lett., 15:15–22

الفصل السابع
ثالثا- تركيبات النانو في مكافحة الآفات الحشرية
Nanoformulations in insect pest management

مقدمة

تركيبة النانو تتضمن مكوناتها عمدًا بحجم نانومتر وتتكون من مواد عضوية (بوليمرات) أو غير عضوية (أكاسيد معدنية). طبيعتها الصلبة تجعلها أكثر تفاعلًا مع الحشرات المستهدفة وتقلل من الانجراف والرشح. تُستخدم البوليمرات في إنتاج الجسيمات النانوية والتركيبات المُتحكم في إطلاقها Controlled (CRF) Released Formulations (CRF). على سبيل المثال، البولي إيثيلين في دلتاميثرين، واللجنين - بولي إيثيلين جلايكول - إيثيل سلولوز في إيميداكلوبريد، والبولي إيثيلين جلايكول في سيفلوثرين المستخدم في التغليف. وقد استخدمت العديد من البوليمرات الاصطناعية والطبيعية، مثل بولي إيثيلين جلايكول، وبولي-ε-كابرولاكتون، والهيتوسان، وألجينات الصوديوم، فضلا عن البوليمرات الكتلية، في تغليف مجموعة واسعة من المبيدات الحشرية من خلال تكوين مواد نانوية مختلفة. عادةً ما تُغلَّف المكونات النشطة بالبوليمر حيث تتكون مركبات البوليمر النانوية Plymer NanoComposites (PNC) من بوليمر يحتوي على جسيمات نانوية أو حشوات نانوية موزعة داخل مصفوفة البوليمر (Kango et al. 2013). البوليمرات المُنتَجة من مصادر طبيعية صديقة للبيئة وقابلة للتحلل الحيوي، ولا تُنتج أي نواتج ثانوية للتحلل، وهي منخفضة التكلفة نسبيًا:

1. مستحلب نانوي Nanoemulsion
2. معلق نانوي Nanosuspension
3. كبسولات نانوية Nanocapsules
4. جسيمات نانوية Nanoparticles
5. هلام نانوي Nanogels

التغليف النانوي Nanocapsulation:

يُعد التغليف النانوي الطريقة الأكثر حيويةً وواعدةً لحماية النباتات المضيفة من الآفات الحشرية. يتضمن التغليف النانوي استخدام نوع مختلف من الجسيمات النانوية التي تحتوي على مبيدات حشرية. في هذه العملية، يُطلق مركب، مثل مبيد حشري، تدريجيًا وبفعالية إلى نبات مضيف محدد لمكافحة الآفات الحشرية. يسمح التغليف النانوي بالجسيمات النانوية بدخول المركب إلى النباتات بشكل قانوني، على عكس حالة الجسيمات الأكبر حجمًا. إنها عملية تُصمم فيها الجسيمات لأداء الوظيفة المطلوبة من خلال طلاء السطح الذي يسمح بإطلاق التركيبة بشكل متحكم وفعال في النباتات. تتكون من غشاء بوليمري يغلف المركبات النشطة كنواة سائلة داخلية على مستوى النانو. يتكون هيكل الكبسولة النانوية من ترتيب النواة والقشرة حيث تتكون القشرة من غشاء بوليمري أو طلاء وتذوب المكونات النشطة في النواة السائلة الداخلية. يتكون اللب الداخلي من تركيبة مبيد حشري أو مصفوفة بوليمرية ومكون نشط مأسور بالغلاف البوليمري. وبهذه الطريقة يتم تغليف المواد النشطة بواسطة الكبسولات النانوية تلقائيًا أثناء تكوينها. يبلغ متوسط قطر الكبسولات النانوية التي تحتفظ بالتشتت الجيد <240 نانومتر (Yang et al. 2009). يعتبر البوليمر مثل بولي-ε-caprolactone (PCL) مادة تركيبية ممتازة. تتوفر العديد من العلامات التجارية لمستحضرات المبيدات الحشرية المغلفة (Primo MAXX، Banner MAXX، Subdue MAXX، Apron MAXX، إلخ) تجارياً في السوق، وتصنعها بعض شركات المبيدات الحشرية الرائدة عالمياً مثل BASF، وBayer Crop Science، و Syngenta (Kah *et al*. 2013).

الجسيمات النانوية Nanoparticles

يمكن استخدام الجسيمات النانوية لإعداد تركيبة جديدة من المبيدات الحشرية والفيرومونات والأسمدة ذات الخصائص الكيميائية والبيولوجية والفيزيائية المتميزة.

يمكن لصق الجسيمات النانوية بمادة بوليمرية مضيفة مثل السليلوز والراتنجات المسامية والسيليكا لتقليل مخاطر صحة الإنسان والبيئة. يمكن استخدام الجسيمات النانوية للمعالجة الحيوية للمركبات الضارة ومنعها من الدخول في السلسلة الغذائية. يمكن استخدام نقل الجينات بوساطة الجسيمات النانوية لتوصيل الحمض النووي والمواد الكيميائية الأخرى إلى النبات للحماية من الآفات الحشرية (Urkude and Kochhar, 2015). تُعد النانوفضة من أكثر الجسيمات النانوية فعالية والمعروفة بخصائصها القوية المثبطة ومضادة للميكروبات واسعة النطاق نظرًا لارتفاع نسبة سطحها. تتميز النانوفضة الغروية (1.5 نانومتر) بخصائص مضادة للفطريات ضد البياض الدقيقي للورد الذي يسببه الفطر *Sphaerotheca pannosa*. يتميز التغليف المزدوج للنانوفضة بثباته العالي وتشتته الجيد في المحلول المائي. يقضي على الكائنات الدقيقة الضارة في تربة الزرع وأنظمة الزراعة المائية، كما يُرشّ على الأوراق لمنع الفطريات والعفن والتعفن والعديد من أمراض النباتات الأخرى. علاوة على ذلك، تُعدّ الفضة مُحفّزًا ممتازًا لنمو النباتات.

نانوألومينو-سيليكات Nano alumino-silicate: يُستخدم كتركيبة مبيدات حشرية على نطاق النانو على شكل أنابيب نانوية من ألومينو-سيليكات تحتوي على مكونات فعالة من المواد السامة. بعد تطبيقها على أسطح النباتات، تلتصق أنابيب ألومينو-سيليكات النانوية بسهولة بشعر الحشرات وتستهلكها. تتمتع جسيمات السيليكا النانوية متوسطة المسامية بالقدرة على توصيل الحمض النووي والمواد الكيميائية إلى النباتات، مما يجعلها أداة قوية لتوصيل المواد إلى خلايا النبات (Singh et al. 2015). تشتهر السيليكا النانوية أيضًا بالمبيدات الحشرية النانوية. من خلال دخولها إلى البشرة، تُحدث تآكلًا على دهون البشرة التي تحافظ على الماء داخل جسم الحشرة وتقتلها بالجفاف. هناك جسيمات السيليكا النانوية لها مبيد حشري يستعمل ضد يرقات حشرة *Spodoptera littoralis* بتركيزات تتراوح بين 300 و350 جزءًا في المليون.

يمكن استخدام نانو سيليكا Nano-silica كارهة للماء، مشحونة سطحيًا، بأبعاد 3-5 نانومتر، لمكافحة مجموعة متنوعة من الآفات الحشرية والطفيليات الخارجية ذات الأهمية البيطرية. وقد أظهرت الأبحاث أن الخصائص الحشرية للجسيمات النانوية المغطاة بالبولي إيثيلين جليكول والمحملة بزيت الثوم ضد يرقات حشرة (*Tribolium castaneum*) فعالة بنسبة 80% (Ulrichs, *et al.* 2005; Yang, *et al.* 2009).

ان الفعالية الحيوية للجسيمات النانوية مثل الفضة (SNP)، وأكسيد الألومنيوم (ANP)، وأكسيد الزنك، وثاني أكسيد التيتانيوم، في مكافحة سوسة الأرز *Sitophilus oryzae* و دودة القز (*Bombyx mori*) و مرض الحشائش grasserie infection الناجم عن فيروس العصوية BmNPV (فيروس تعدد التعرق النووي *B. mori*)، على التوالي. لاحقًا، تم اختباره على الأرز على 20 حشرة بالغة من سوسة الارز *S. oryzae*، حيث سُجِّلت أعلى نسبة نفوق في اليوم الأول، تليها نسبة 90% في اليوم الثاني. وأعطى اختبار حيوي آخر أُجري على دودة القز (*B. mori*) نتائج مُرضية عند معالجة الأوراق بمعلق إيثانولي من جسيمات نانوية من سيليكات الألومنيوم الكارهة للماء. وقد أظهر التأثير المُبيد للحشرات باستخدام للألومينا النانوية ضد آفتين حشريتين من آفات التخزين، وهما *S. oryzae* و*Rhyzopertha dominica*، نسبة نفوق كبيرة بعد ثلاثة أيام من التعرض المستمر في القمح. وبهذه الطريقة، عند مقارنتها بالمبيدات الحشرية المتاحة اقتصاديًا، قد تُمهد الألومينا النانوية غير العضوية الطريق للتقدم القائم على الجسيمات النانوية في مكافحة الآفات (Stadler, *et al.* 2010 ؛Scrinis, 2007).

جسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية (TiO_2): تُعد تقنية المحفز الضوئي TiO_2 ذات أهمية كبيرة في وقاية النباتات، نظرًا لأمانها وقدرتها الممتازة على تطهير مسببات الأمراض. وُجد أن جسيمات نانوية من الفضة والكبريت بتركيزات 10 و50 و100 و200 جزء في المليون مفيدة للغاية في جميع مراحل حياة ذبابة الفاكهة. وبلغت قيمة

التركيز المميت لنصف الكيتوزان النانوي على حشرة *Schistocerca gregaria* 231،132 ، 204، 268 جزءًا في المليون. وانخفضت نسبة الذكور والإناث بشكل ملحوظ بنسبة 99% مقارنةً بالمجموعة المقارنة، ويمكن مكافحة بق الفراش والنمل الأبيض باستخدام مصائد الألياف الدقيقة، وذلك من خلال الالتصاق بالهياكل الدقيقة الموجودة على أرجلها، ما يُعيق قدرتها على الحركة والتغذية والتكاثر. الألياف الدقيقة آمنة أيضًا للبشر والحيوانات الأليفة، وعلى عكس المعالجات الكيميائية ووجد أن النحاس من أهم العناصر الغذائية الدقيقة التي تحتاجها المحاصيل، كما أظهر شكله المعدني نتائج ممتازة في مكافحة الفطريات والآفات الحشرية للمحاصيل. تتميز جزيئات النحاس النانوية بخصائص جديدة مثل نانو المبيدات الحشرية، ومبيدات الأعشاب النانوية، والأسمدة النانوية. إنها طريقة مجدية اقتصاديًا وصديقة للبيئة. أظهر السائل الخلوي العلوي لفطر *Photorhabdus luminiscens*، المُحوّل إلى جسيمات نانوية (89 نانومتر)، خصائص مبيدات حشرية فائقة ضد آفات القطن الماصة الخطيرة، وهي *Tetranychus macfarlanei* ومن القطن *Aphis gossypii* (Kulkarni, *et al.* 2017)

النانوجل Nanogels

هي مستحلبات مائية من جزيئات الهيدروجل التي تشكلت من شبكات بوليمر متشابكة فيزيائيًا أو كيميائيًا في حجم النانو. في نظام توصيل الأدوية أظهرت النانوجيل إمكاناتها كحاملات للمركبات النشطة ويعد هذا غير مسبوق بالنسبة لحاملات النانو الصيدلانية الشائعة بسبب قدرتها العالية على التحميل، وثباتها العالي، واستجابتها للعوامل البيئية مثل القوة الأيونية، ودرجة الحموضة، ودرجة الحرارة. يتم تصنيع النانوجيل من خلال التجميع المتحكم فيه للبوليمرات التفاعلية بسبب خصائص التجميع الذاتي في الوسائط المائية. يتم تعديل البوليمرات القابلة للذوبان في الماء أو المحبة للماء لإنشاء خصائص كارهة للماء، والتي تسمح لها بالتفاعل مع بعضها البعض كهروستاتيكيًا و/أو تكوين

روابط هيدروجينية فيما بينها. تظل الهلاميات النانوية في حالة منتفخة بسبب وجود كمية كبيرة من الماء، ما يسهل تحميل المركبات النشطة تلقائيًا من خلال التفاعل الكهروستاتيكي، وتفاعل فان دير فالس، و/أو التفاعل الكاره للماء بين المركبات النشطة ومصفوفة البوليمر.

طورت الفيرمونات القائمة على الهلام نانوي لمكافحة ذباب الفاكهة باستعمال مبادئ الجزيئات الفائقة وتكنولوجيا النانو. يتميز هذا الهلام النانوي بثباته الكيميائي والحراري والميكانيكي أكثر من الفيرومونات الطبيعية. فهو يُقلل من تبخر الفيرومون عالي التطاير، ميثيل يوجينول (ME)، ويحميه من التحلل بفعل العوامل البيئية كالهواء والماء وأشعة الشمس. أظهرت النتائج أن ميثيل يوجينول (ME) وحده يتبخر في أقل من ثلاثة أسابيع، بينما يدوم مع الهلام النانوي حتى 30 أسبوعًا في الظروف المحيطة. ومن مزايا استخدام الهلام النانوي القائم على الفيرومونات سهولة استخدامه وقلة استهلاكه (Herlekar and Ramaseshan, 2014).

المستحلب النانوي Nanoemulsion

يشير مصطلح "مستحلب نانوي" إلى نطاق حجم القطرات النانوي، والذي يتراوح عادةً بين 20 -200 نانومتر. لا توجد فروق في البنية الأساسية للمستحلب الدقيق والمستحلب النانوي، حتى أن حجم القطرات يتداخل مع بعضها البعض، ولكن الاختلافات المهمة تكمن في حالة التوازن وكمية المادة الخافضة للتوتر السطحي المستخدمة (Tamjidi, *et al.* 2013). وباعتبارها مستحلبات دقيقة، فإن المستحلبات النانوية هي أيضًا خليط من طورين سائلين غير قابلين للامتزاج أو أكثر، ولعل أبسط مثال على ذلك هو الزيت والماء، ولكنه يوجد في نظام غرواني غير متوازن (Mason, *et al.* 2006). في المستحلب النانوي، يُشتت السائل على شكل قطرات كروية صغيرة في سائل آخر، ولكنه يتطلب كمية أقل من المواد الخافضة للتوتر السطحي (5-10%) مقارنةً بالمستحلبات الدقيقة.

المعلقات النانوية Nanosuspension

المعلقات النانوية هي تشتت جسيمات نانوية صلبة في سائل. التعليق النانوي هو في الأساس تشتت غرواني لجسيمات الدواء بقطر أقل من الميكرومتر، مثبت بمواد خافضة للتوتر السطحي، أو بوليمر، أو مزيج منهما (Chingunpituk, 2013). على الرغم من أن المعلقات النانوية لا ترتبط ارتباطًا وثيقًا بالتغليف النانوي، إلا أنها تلعب دورًا حيويًا في توصيل المبيدات الحشرية المغلفة بكبسولات نانوية، وخاصةً تلك قليلة الذوبان في الماء. وهي طريقة فعالة لتركيبات المستحلبات الدقيقة والمستحلبات النانوية التي تتمتع كبسولاتها النانوية أو جسيماتها النانوية الجافة المحملة بالمبيدات بثبات أطول.

التركيبات النانوية لإدارة آفات المخازن Nanoformulations for storage pest management

تنتمي الآفات الرئيسة لما بعد الحصاد إلى رتبتين رئيسيتين من الحشرات هما غمديات الأجنحة (الخنافس) وحرشفيات الأجنحة (وخاصة العث). إنها تسبب أضرارًا عن طريق انسكاب الحبوب وفقدان الكمية والجودة فضلا عن انخفاض الإنبات. يستخدم التبخير بشكل شائع لمكافحة آفات الحبوب المخزنة والتي يمكن أن تؤدي إلى مشاكل في صحة الإنسان ومشاكل مقاومة الحشرات. يتميز مزيج جسيمات النانو الفضية مع الملاثيون بنشاط حشري مرتفع على حشرة *Tribolium castaneum* والذي يبلغ 75٪ عند تركيز 50 ملغ . اما في حشرة *Spodoptera litura* أظهرت جسيمات الكادميوم النانوية CdS معدل وفيات في اليرقات أعلى بنسبة 93.79٪ عند 2400 جزء في المليون. حقق اوكسيد التيتانيوم النانوي $Nano\text{-}TiO_2$ أعلى معدل وفيات بنسبة 73.79٪ عند 2400 جزء في المليون. وتسببت الفضة النانوية Nano-Ag في حدوث أقصى معدل وفيات بنسبة 56.89 في المائة عند 2400 جزء في المليون (Chakravarthy, *et al*. 2012).

آلية عمل مبيدات النانو Mode of action of nanopesticides:

تُقلل جسيمات الفضة النانوية نشاط إنزيم الأسيتيل كولين إستريز، بينما تُثبط جسيمات البوليسترين النانوية نظائر إنزيم CYP450 لجسيمات الفضة النانوية وأكسيد الجرافين تأثير كبير على إنزيمات مضادات الأكسدة وإزالة السموم لدى الحشرات، ما يؤدي إلى الإجهاد التأكسدي وموت الخلايا. تُثبط جسيمات الذهب النانوية التربسين، ما يُسبب اضطرابًا في نمو وتكاثر الحشرات. تُؤدي جسيمات المعادن النانوية إلى انخفاض نفاذية الغشاء، ما يؤدي بدوره إلى تمسخ العضيات والإنزيمات، يليه موت الخلايا. تعمل جسيمات الفضة النانوية عن طريق تقليل تخليق البروتين وإطلاق الغدد التناسلية، مما يؤدي إلى أضرار في النمو وفشل في التكاثر. ترجع سمية جسيمات SiO_2 و Al_2O_3النانوية إلى ارتباطها ببشرة الحشرة، يليه الامتصاص الفيزيائي للشموع والدهون، ما يؤدي إلى جفاف الحشرات (Benelli, 2018).

تخليق المواد النانوية Synthesis of nanomaterial

هو إنتاج مادة بخصائص تتراوح بين 1 -100 نانومتر. وتستعمل طرائق تخليق مناسبة للتحكم في الحجم ضمن هذا النطاق لتحقيق خاصية أو أخرى، وتنقسم هذه الطرق إلى نوعين(Shekhawat, et al. 2019) :

1. الطريقة الأولى هي الطريقة "التصاعدية "top-down" التي تعتمد على تفكيك المواد الصلبة إلى قطع صغيرة باستخدام قوة خارجية. وتستخدم في هذه الطريقة العديد من التقنيات الفيزيائية والكيميائية والحرارية لتوفير الطاقة اللازمة لتكوين الجسيمات النانوية.

2. الطريقة الثانية، المعروفة باسم "التنازلية bottom-up "، تعتمد على جمع ودمج ذرات أو جزيئات الغاز أو السائل. ولكل من الطريقتين مزايا وعيوب مقارنة ببعضهما البعض.

التخليق الأخضر للجسيمات النانوية Green synthesis of nanoparticles

يُعد التخليق الأخضر أداةً أساسيةً، ويُستعمل للحد من الآثار الضارة لطرائق التخليق التقليدية للجسيمات النانوية الشائعة الاستخدام في المختبرات والصناعة. تُستخدم المستخلصات الطبيعية في تخليق المعادن وأكاسيدها، مثل الذهب (Au)، والفضة (Ag)، وأكسيد النحاس (CuO)، وأكسيد الزنك (ZnO).

المكونات البيولوجية: المواد الكيميائية النباتية الأساسية (مثل الفلافونويدات، والقلويدات، والتربينويدات، والأميدات، والألدهيدات) تُستخدم كعوامل اختزال وأنظمة مذيبات (Singh, *et al.* 2018) إن التخليق الأخضر للمواد/المواد النانوية، المُنتَوج من خلال عمليات التنظيم والمراقبة والتنظيف والمعالجة، سيساهم بشكل مباشر في تعزيز صداقتها للبيئة. وبالتالي، يمكن تفسير بعض المبادئ الأساسية لـ "التركيب الأخضر" من خلال عدة مكونات مثل منع/تقليل النفايات، والحد من المشتقات/التلوث، واستخدام المذيبات/المواد المساعدة الأكثر أمانًا (أو غير السامة) فضلا عن المواد الخام المتجددة.

المصادر

Benelli, G. Mode of action of nanoparticles against insects. 2018. Environmental Science and Pollution Research. 2018; 25(13):12329-12341.

Chakravarthy, A.K., Kandakoor, S.B., Atanu. B., Dhanabala, K., Gurunatha, K. and Ramesh, P. 2012. Bio efficacy of inorganic nanoparticles CdS, Nano-Ag and Nano-TiO2 against Spodoptera litura (Fabricius) (Lepidoptera: Noctuidae). Current Biotica. 2012; 6(3):271-281.

Chingunpituk J. 2013. Nanosuspension technology for drug delivery. Walailak J Sci. Technol. 2011; 4:139-153.

Kango, S., Kalia, S., Celli, A,. Njuguna, J., Habibi, Y. and Kumar R. 2013. Surface modification of inorganic nanoparticles for development of organic-inorganic nanocomposites-a review. Prog. Polym. Sci. 2013; 38:1232-1261.

Kulkarni, R. A., Prabhuraj, A., Ashoka, J., Hanchinal, S. G. and Hiregoudar , S. 2017. Generation and evaluation of nanoparticles of supernatant of Photorhabdus luminescens (Thomas and Poinar) against mite and aphid pests of cotton for enhanced. Curr Sci. 2017; 112(11):23-12.

Mason, T. G., Wilking, J., Meleson, K., Chang, C. and Graves S. 2006. Nanoemulsions: formation, structure, and physical properties. J Phys.: Condens. Matter. 2006; 2006; 18:R635-R666.

Sanghi, R, and Verma, P. 2009. Biomimetic synthesis and characterisation of protein capped silver nanoparticles. Bio resource Technology. 2009; 100:501-4.

Scrinis, G. 2007. Nanotechnology and the environment. The Nano Atomic reconstruction of Nature Chain Reaction. 2007; 97:23-26.

Singh, J., Dutta, T., Kim, K. H., Rawat, M., Samddar, P. and Kumar, P. 2018. 'Green'synthesis of metals and their oxide nanoparticles: applications for environmental remediation. Journal of nanobiotechnology. 2018; 16(1):84.

Stadler , T., Buteler, M. and Weaver, D. K. 2010. Novel use of nanostructured alumina as an insecticide. Pest Manage Sci. 2010; 66(6):577-579.

Tamjidi, F., Shahedi, M., Varshosaz, J. and Nasirpour A. 2013. Nanostructured lipid carriers (NLC): a potential delivery system for bioactive food molecules. Innovative Food Sci. Emerging Technol. 2013; 19:29-43.

Ulrichs, C., Mewis, I. and Goswami, A. 2005. Crop diversification aiming nutritional security in West Bengal: biotechnology of stinging capsules in nature's water-blooms. Ann Tech Issue State Agri Technol Serv Assoc, 2005, 1-18.

Yang, F. L., Li, X.G., Zhu, F. and Lei, C. L. 2009. Structural characterization of nanoparticles loaded with garlic essential oil and their insecticidal activity against Tribolium castaneum (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). J Agri Food Chem. 2009; 57(21):10156-1016.

Shekhawat, S., Irsad, I., Rizvi, P. and Ansar,M. 2019. Nanotechnology in Insect Pest Management. n book: Recent Trends in Insect Pest Management vol 1 (pp.123-160) Publisher: AkiNik Publications

الفصل الثامن
تطبيق تكنولوجيا النانو في الزراعة وتقليل الخسائر بعد الحصاد وتجهيز الأغذية:
الآثار والتحديات على الأمن الغذائي

مقدمة

التحدي العالمي الأبرز على كوكبنا هو مسألة إرساء الأمن الغذائي لسكان العالم المتزايدين بسرعة. تشير التوقعات إلى أنه من المرجح أن يرتفع الطلب على الغذاء من 59 إلى 98٪ لسكان العالم الذين سيصل عددهم إلى 9 مليارات في السنوات المقبلة. وعلى الرغم من زيادة عدد سكان العالم، ولاسيما في البلدان النامية إلا أن إمدادات الغذاء العالمية قد انقطعت بسبب إنفاق الموارد الحيوية لإنتاج الطاقة، وتصنيع المواد الكيميائية، وارتفاع خسائر ما بعد الزراعة، وانخفاض القيمة المضافة، وأنظمة التوزيع والتسويق غير الفعالة، وعوامل أخرى . سيركز المزارعون في جميع أنحاء العالم على استعمال الابتكارات والتقنيات الجديدة لتحسين إنتاج المحاصيل من خلال الزراعة المكثفة والواسعة النطاق. وقد تعززت الجهود الحالية من خلال استخدام المحفزات المعدلة بالنانو والزراعة الدقيقة. إن كفاءة الزراعة، وتحسين التربة، والاستعمال الآمن للمياه، وتوزيع الغذاء في المخازن، وجودته هي عوامل أساسية لتأمين الغذاء الذي يمكن تحسينه من خلال التقدم في أبحاث تكنولوجيا النانو (Ashraf, *et al*. 2021).

تُعدّ تقنية النانو من المجالات الواعدة لتعزيز توافر الغذاء وتصنيع منتوجات جديدة لأغراض مفيدة في الزراعة، والغذاء، والمياه، والبيئة، والطب، والطاقة، والإلكترونيات. تعد تقنية النانو حالة نامية وسريعة النمو، ذات تطبيقات جديدة وحصرية في الزراعة وبحوث الأغذية. قد يكون الحل الأمثل هو زيادة الإنتاجية وخفض نفقات ما بعد الحصاد من خلال تحسين النتائج بدعم من الأبحاث التقنية الحديثة وبمساعدة تقنية النانو والتكنولوجيا الحيوية في المواد الغذائية. ومن المجالات

المتطورة القليلة المتعلقة بالمواد النانوية في الزراعة، تقليل عدد المواد الكيميائية المنتشرة، وتقليل خسائر المغذيات في التسميد، وزيادة الغلة من خلال إدارة الآفات والمغذيات، يمكن تحسين بعض الموضوعات الناشئة في مجال تكنولوجيا النانو للأغذية بشكل كبير في جوانب التوصيل الذكي للمغذيات، والفصل الحيوي للبروتينات، والأخذ السريع للعينات من الملوثات البيولوجية والكيميائية، وتغليف المستحضرات الغذائية النانوية، والذوبان، والتوصيل (Ravichandran, 2010). تشمل تكنولوجيا النانو للأغذية تطبيق منهجيات الناقلات النانوية لتعزيز المكونات النشطة بيولوجيًا، بهدف تعديل سهولة وصولها البيولوجي، وحاجزها ضد العديد من التغيرات الكيميائية أو البيئية. يُحسّن هذا النظام خصائص حسية مثل اللون والنكهة والملمس، ويعزز موثوقية الطعام. كما حسّن من جاذبية المستحضرات الغذائية العلاجية وراحتها البيولوجية وأنظمة توصيل الأدوية. تُفيد تقنية النانو صناعات الأغذية كمواد تعبئة وتغليف غذائية جديدة ذات خصائص ميكانيكية وتسييجية ومضادة للميكروبات مُعدّلة (Mustafa and Andreescu, 2020)). ومن مزايا هذه التقنية أيضًا أجهزة استشعار قائمة على تقنية النانو للكشف عن آثار الطعام، ومراقبة حالة الطعام من حيث النقل والتخزين، وتغليف المواد المُعدّلة أو المُضافة. لقد أبرزت التطبيقات القائمة على تقنية النانو الحاجة المتزايدة لاستخدام الجسيمات النانوية في التكنولوجيا الحيوية الغذائية، والعلوم، وتجهيز الأغذية، وتغليفها، وتطوير الأغذية الوظيفية، وسلامة الأغذية، والكشف عن مسببات الأمراض فيها، وإطالة مدة صلاحية الأغذية والمواد الغذائية. وتؤدي المواد النانوية دورًا بارزًا في تعزيز الأمن الغذائي، ودعم تطوير صناعة الأغذية. كما تُعدّ ترسيب معدات تصنيع الأغذية (عبر طلاء الأغشية الحيوية)، والمرشحات النانوية، والمناخل والأغشية، والمواد الماصة النانوية المركبة والنانوية، والعوامل المحفزة ومجالات استخدام أخرى للمساعدة في تجهيز الأغذية. ومن المفترض أن تُحسّن إضافة المواد النانوية إلى عبوات الأغذية من العوائق التي تُشعر

بها أثناء تعبئة المواد، ويمكن أن تُساعد في تقليل استعمال المكونات الخام القيّمة وإنتاج النفايات (Neme, *et al*. 2021).

بشكل عام، تتيح تقنية النانو الفرص الأكثر واعدة لتطوير منتوجات جديدة ومحسنة. ومع ذلك، فإن القلق العام بشأن المخاطر الصحية المرتبطة بمنتجات تقنية النانو موضع تساؤل لدى العديد من المجتمعات العلمية التي تحتاج إلى مزيد من التحقيق. من المهم وصف أساسيات تقنية النانو وتطبيقاتها في الزراعة وبحوث الأغذية وما بعد الحصاد وتكنولوجيا تصنيع الأغذية والتعبئة والتغليف ودورها في دعم جهود الأمن الغذائي بالإضافة إلى التحديات في استعمال التكنولوجيا في نظام الأغذية والزراعة. تشير الدراسات المنشورة بين عامي 2016 و2021 ومع ذلك، بناءً على عدد الاستشهادات وأهمية التحقيقات، كما نشرت مقالات في هذا المجال تتضمن تكنولوجيا النانو، علم النانو، الجسيمات النانوية، الزراعة، الأسمدة النانوية، مبيدات الأعشاب النانوية، مبيدات الآفات النانوية، أجهزة الاستشعار النانوية، التركيبات النانوية، تسلسل الجينات أو التشفير النانوي، الطلاءات النانوية، المستحلبات النانوية، المركبات النانوية، المواد النانوية، التسليم، التركيبة، التعبئة والتغليف، الأنابيب النانوية، والسمية النانوية.

الحد من خسائر ما بعد الحصاد Postharvest loss reduction

في الدول المتقدمة، تتجاوز خسائر الغذاء (الحبوب، والجذور والدرنات، والبقوليات والمحاصيل الزيتية، والخضراوات والفواكه، ولحوم الأسماك، ومنتوجات الألبان) 40% في مرحلتي التجارة والاستهلاك، بينما في الدول النامية، تتجاوز خسائر الغذاء 40% في مرحلة ما بعد الحصاد. قد تتدهور المحاصيل غير المحفوظة عالية الرطوبة، المحصودة حديثًا، بسرعة بسبب هجوم الكائنات الدقيقة. يمكن للتقنيات الحديثة والمتقدمة، مثل تقنية النانو، أن تساعد في تقليل خسائر ما بعد الحصاد. يمكن لتطبيق تقنية النانو أن يقلل من خسائر ما بعد الحصاد من خلال تصميم مكونات تعبئة وظيفية بأقل كميات من المكونات النشطة بيولوجيًا، وتحسين خصائص الغازات والخصائص

الميكانيكية مع تقليل التأثير على جودة استشعار الخضراوات والفواكه. تُستخدم الطلاءات الصالحة للأكل كسائل على الطعام، وذلك عادةً بغمس المنتوج في مادة مُوَفِّرة للمحلول مصنوعة من الوسط الهيكلي (كربوهيدرات، دهون، بروتين، أو خليط). تحمي هذه الطلاءات الأطعمة غير المعالجة من التدهور عن طريقة منع الجفاف، وإعاقة التنفس، وتحسين خصائصها التركيبية، والمساعدة في الحفاظ على مركبات النكهة المتطايرة، وتقليل نمو الميكروبات. تُوفر الطلاءات النانوية ذات الجودة الصالحة للأكل، والمُرَسَّبة على مختلف المواد الغذائية، حاجزًا يمنع تبادل الغازات والرطوبة، وتُضيف نكهات وألوانًا وإنزيمات ومضادات أكسدة وعوامل مقاومة للتسمير، مما قد يُحسِّن من مدة صلاحية الأطعمة الصناعية. تُمكِّن هذه التقنية من تكوين طلاءات نانوية يصل سمكها إلى خمس نانومترات. يُعد استخدام الطلاءات والأغشية الرقيقة الصالحة للأكل أمرًا شائعًا في المنتوجات البستانية. يعتمد الاستخدام على خصائص مثل التكلفة والتوافر والصفات الوظيفية والخصائص الميكانيكية (المرونة والتوتر) والخصائص الحساسة للضوء (السطوع والتعتيم) وتأثير السياج مقابل تدفق الغاز والعائق الهيكلي لهجرة المياه والميكروبات والملاءمة الحسية(Ashraf, *et al*. 2021).

تُطبّق أنواع مختلفة من الطلاءات النانوية الصالحة للأكل على الأغذية للتحكم في جودة المنتوجات الجديدة بعد الحصاد. وتحظى جسيمات الفضة النانوية باهتمام متزايد مؤخرًا نظرًا لخصائصها المضادة للميكروبات، وهي ضرورية لمعالجة الأغذية. وقد أدى استعمال جسيمات الفضة النانوية القائمة على بولي فينيل بيروليدون (PVP) على الهليون إلى تأخير نمو الميكروبات بشكل ملحوظ، ما أدى إلى إبطاء فقدان الوزن وتقليل تغيرات لون القشرة. وفي تقرير آخر، حسّنت الطلاءات الصالحة للأكل المشتقة من الجيلاتين مع بلورات السليلوز النانوية من مدة صلاحية الفراولة بشكل ملحوظ. كما حسّن طلاء السيليكا النانوي بمساعدة الكيتوسان القيمة الفيزيائية والكيميائية والفسيولوجية لفاكهة اللونجان في درجة حرارة الغرفة مقارنةً بالمعالجات الأخرى، وذلك من خلال توفير طبقة شبه نفاذة ممتازة بكفاءة. فضلا عن ذلك، أُجريت دراساتٌ

على طلاءات نانوية من أكسيد السيليكون النانوي (SiO2) القائمة على أغشية الكيتوسان وطلاءات نانولاميناتية قائمة على الألجينات أو الليزوزيم للحفاظ على قيمة الأغذية الطازجة أثناء التخزين لفترات طويلة. كما قلل طلاء أكسيد الزنك النانوي من الضرر الميكروبي وحافظ على قيمة بعض الفواكه بعد الحصاد أثناء التخزين (Sogvar, *et al*. 2016). يمكن تطبيق تقنية النانو أيضًا في مراقبة جودة الحبوب باستخدام المستشعرات النانوية. تتميز هذه المستشعرات بقدرتها على الاستجابة للتغيرات البيئية أثناء التخزين (درجة الحرارة، التعرض للأكسجين، والرطوبة النسبية)، أو نواتج التحلل، أو التلوث بالميكروبات. كما تُستخدم أيضًا للكشف عن وجود الفطريات أو الحشرات في الحبوب المخزنة. كما طُوّرت مستشعرات نانوية لمراقبة جودة الحبوب باستخدام جسيمات نانوية بوليمرية تستجيب للعوامل المتطايرة والمحللات الأخرى في بيئة الأغذية المخزنة، وبالتالي تكشف عن سبب ونوع التحلل.

المصادر

Ashraf, S. A., Siddiqui, A.J., Abd Elmoneim, O.E., Khan, M.I., Patel, M., Alreshidi, M., Moin, A., Singh, R., Snoussi, M. and Adnan, M. 2021. Innovations in nanoscience for the sustainable development of food and agriculture with implications on health and environment Sci. Total Environ., 768 (2021), p. 144990

Mustafa, F. and Andreescu, S. 2020. Nanotechnology-based approaches for food sensing and packaging applications RSC Adv., 10 (33) (2020), pp. 19309-19336.

Neme, k., Nafady, A., Yetenayet, U. and. Tola, B. 2021. Application of nanotechnology in agriculture, postharvest loss reduction and food processing: food security implication and challenges. Science Direct (Heliyon), V 7 (12): 200 – 210

Ravichandran, R. 2010. Nanotechnology applications in food and food processing: innovative green approaches, opportunities and uncertainties for global market Int. J. Green Nanotechnol. Phys. Chem., 1 (2010), pp. P72-P96.

Sogvar, O.B., Saba, M.K., Emamifar, A., Hallaj, R. 2016. Influence of nano-ZnO on microbial growth, bioactive content and postharvest quality of strawberries during storage Innovat. Food Sci. Emerg. Technol., 35 (2016), pp. 168-176

الفصل التاسع

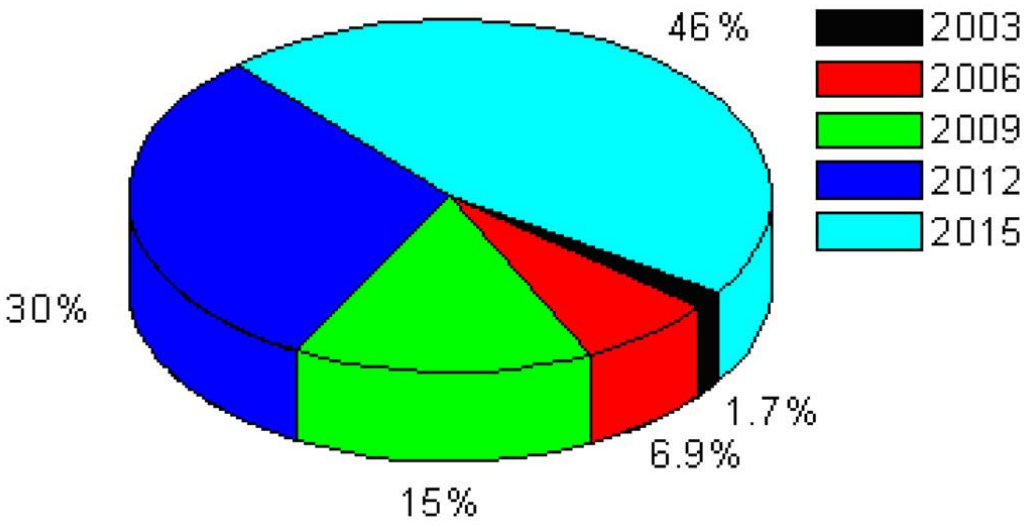
السمية والمخاطر البيئية للمواد النانوية: التحديات والاحتياجات المستقبلية

Toxicity and Environmental Risks of Nanomaterials: Challenges and Future Needs

مقدمة

حظيت تقنية النانو باهتمام عام واسع النطاق نظرًا لاحتياجات وتطبيقات المواد النانوية في العديد من مجالات الحياة البشرية، بما في ذلك الصناعة والزراعة والأعمال والطب والصحة العامة. يُعدّ التعرض البيئي للمواد النانوية أمرًا حتميًا مع دخولها إلى حياتنا اليومية، ونتيجةً لذلك، تحظى أبحاث السمية النانوية باهتمام متزايد. وهنا ملخصًا للجهود البحثية الحديثة حول مصير وسلوك وسمية فئات مختلفة من المواد النانوية في البيئة. سيضمن الفصل مناقشة لتقييم نقدي للتحديات والاحتياجات المستقبلية لتقنية النانو البيئية الآمنة. يعتبر العديد من العلماء تقنية النانو هي الخطوة المنطقية التالية في العلوم، حيث تدمج الهندسة مع علم الأحياء والكيمياء والطب والفيزياء. عندما تصبح أبعاد المادة صغيرة جدًا، يمكن أن تصبح خصائصها الفيزيائية والكيميائية مختلفة تمامًا عن خصائص المادة نفسها في شكلها السائب. تعمل تقنية النانو الحالية على بناء أجهزة ذات حجم مجهري أو حتى جزيئي، والتي من المحتمل أن تفيد الطب وحماية البيئة والطاقة واستكشاف الفضاء (Geddes, 2005; Aslan and).مع معرفتنا المتزايدة بعلم النانو والقدرة على هندسة منتجات وخدمات جديدة، لن يمر وقت طويل قبل أن نتمكن من ضغط التاريخ بأكمله أو توسيع النظام من خلال جزيئات مصممة خصيصًا تحاكي الأنظمة الحية. في الاعوام التي مضت، تم تضخيم مصطلح "تقنية النانو" وأصبح مرادفًا تقريبًا للأشياء المبتكرة والواعدة للغاية (Hatchett, *et al*. 2008). تُمكّننا تقنية النانو من ابتكار مواد وأجهزة وأنظمة وظيفية من خلال التحكم في المواد على المستويين الذري والجزيئي، واستغلال

خصائص وظواهر جديدة. إن الحجم الأصغر بكثير، والوزن الأقل، ومتطلبات الطاقة الأقل، والحساسية الأكبر، والنوعية الأفضل، ليست سوى أمثلة قليلة على التحسينات التي سنشهدها في تصميم المستشعرات. لطالما كان تصنيع ترانزستورات أصغر وأسرع قوة دافعة لصناعة الحاسوب. ومع تناقص أحجام الترانزستورات إلى نظام النانومتر، نقترب من النقطة التي ستحقق فيها تقنية الطباعة النانوية الدقة المطلوبة لإنشاء هذه الأجهزة النانومترية. إن الطريق الواضح عند التفكير في الأشياء الصغيرة جدًا هو تقليص حجم وتكلفة أجهزة الحاسوب، وتسريع تشغيلها بشكل هائل. تعتمد تقنية اليوم على أنماط النقش على السيليكون بحيث يمكن تشغيل وإيقاف المفاتيح الإلكترونية الدقيقة، وهو أساس الشيفرة الثنائية التي تمثل كل ما يفهمه الحاسوب. ستُزوَّد حواسيب النانو المستقبلية بمفاتيح جزيئية، أو قضبان منطقية، لوضع الميكروبات النانوية الحالية، التي تُحقن في الكائن الحي لمكافحة البكتيريا والفيروسات المسببة للأمراض، أو إزالة الخلايا السرطانية، أو توزيع الأدوية. وقد تُصلح الروبوتات المجهرية، أو حتى تُجمِّع، أجهزة معقدة، أو تُزيل المواد الضارة من البيئة. لا شك أن علم النانو وتكنولوجيا النانو من أسرع مجالات البحث والتكنولوجيا نموًا. وقد حظيت تكنولوجيا النانو باهتمام عام كبير نظرًا لاحتياجات وتطبيقات المواد النانوية في العديد من مجالات المساعي البشرية، بما في ذلك الصناعة والزراعة والأعمال والطب والصحة العامة (Borm, *et al*.2006). بين عامي 1997 و2005، ارتفعت استثمارات الحكومات حول العالم في البحث والتطوير في مجال تكنولوجيا النانو ارتفاعًا حادًا من 432 مليون دولار أمريكي إلى حوالي 4.1 مليار دولار أمريكي، وتجاوزت استثمارات الصناعة المماثلة استثمارات الحكومات بحلول عام 2005. وبحلول عام 2015، ستساهم المنتجات التي تتضمن تكنولوجيا النانو بنحو تريليون دولار أمريكي في الاقتصاد العالمي (الشكل 1). وسيعمل حوالي مليوني عامل في صناعات تكنولوجيا النانو، وسيشغل ثلاثة أضعاف هذا العدد وظائف داعمة، وفقًا لتوقعات شركة لوكس للأبحاث.



شكل 1. توقعات سوق تكنولوجيا النانو بناءً على أبحاث Lux.

أصبحت المواد النانوية المُهندسة جزءًا لا يتجزأ من حياتنا اليومية، ولاسيما في مستحضرات التجميل، وتغليف الأغذية، وأنظمة توصيل الأدوية، والعلاجات، وأجهزة الاستشعار الحيوية، وغيرها. ونظرًا لتشابه حجمها مع الجزيئات الحيوية الكبيرة، وخصائصها المضادة للبكتيريا والمضادة للروائح، تُستخدم المواد النانوية على نطاق واسع في عدد من المنتجات التجارية، مثل ضمادات الجروح، والمنظفات، والطلاءات المضادة للميكروبات. وتُطرح منتوجات استهلاكية جديدة من تكنولوجيا النانو في السوق بمعدل 3-4 منتجات أسبوعيًا، وهو ما استند إلى آخر تحديث لمخزون منتجات استهلاكية من تكنولوجيا النانو، الذي يُجريه مشروع تكنولوجيا النانو الناشئة (Ray, *et al.* 2009). ووفقًا للمبادرة الوطنية لتكنولوجيا النانو (الولايات المتحدة الأمريكية)، تُستخدم آلاف الأطنان من السيليكا والألومينا والسيريوم، على شكل مخاليط من جزيئات كاشطة فائقة الدقة، بما في ذلك الجسيمات النانوية، سنويًا في مواد تلميع دقيقة لرقائق السيليكون. قد يضاهي تصنيع الفوليرينات قريبًا جسيمات أكسيد المعادن النانوية المُهندسة من حيث الكميات الإنتاجية، حيث يُقدّر مصنع كيتاكيوشو (ميتسوبيشي، اليابان) إنتاجًا سنويًا بـ 1500 طن (Donaldson, *et al.* 2002).

ويخطط معهد أبحاث تكنولوجيا الكربون النانوية (اليابان) لتوسيع إنتاجه إلى 120 طنًا سنويًا خلال السنوات المقبلة. وبلغت الطاقة الإنتاجية العالمية لأنابيب الكربون النانوية أحادية الجدار single-wall carbon nanotubes (SWCNT) وأنابيب الكربون النانوية متعددة الجدران multi-wall carbon nanotubes (MWCNT) بحوالي 500 طن في عام 2008. وخلال دورة الألعاب الأولمبية الصيفية الأخيرة في بكين، استُخدم 803 منتجات تحتوي على مواد نانوية، وفقًا لتحليل أجراه مشروع مركز وودرو ويلسون الدولي للعلماء حول تقنيات النانو الناشئة Project on (PEN) Emerging Nanotechnologies، وهي مجموعة غير حكومية. وبالتالي، يستمر عدد السكان المعرضين للمواد النانوية في التزايد مع توسع تطبيقاتها. وعلى الرغم من الفوائد الواضحة لقوة المواد الصغيرة، إلا أن هناك أسئلة مفتوحة حول كيفية تأثير الجسيمات النانوية المستخدمة في الحياة اليومية على البيئة. ومن القضايا الحاسمة التي يجب معالجتها في المستقبل القريب قبل التصنيع الضخم للمواد النانوية هي سميتها للإنسان وتأثيرها على البيئة. وهناك نقاشات مستفيضة حول كيفية تأثير الخصائص الجديدة للمواد النانوية سلبًا على الآثار البيولوجية، مع إمكانية التسبب في السمية. ويحتاج المرء إلى فهم الاستجابات الخلوية عند خضوع الجسيمات النانوية للتحلل البيولوجي في البيئة الخلوية. على سبيل المثال قد تتراكم الجسيمات النانوية المتحللة بيولوجيًا داخل الخلايا وتؤدي إلى تغيرات داخل الخلايا مثل اختلال سلامة العضيات أو التناوب الجيني. ومن بين الأسئلة الحاسمة:

1- هل المواد النانوية أكثر سمية من نظيراتها غير النانوية؟

2- هل تتحول الجسيمات النانوية في البيئة إلى أشكال أكثر سمية؟

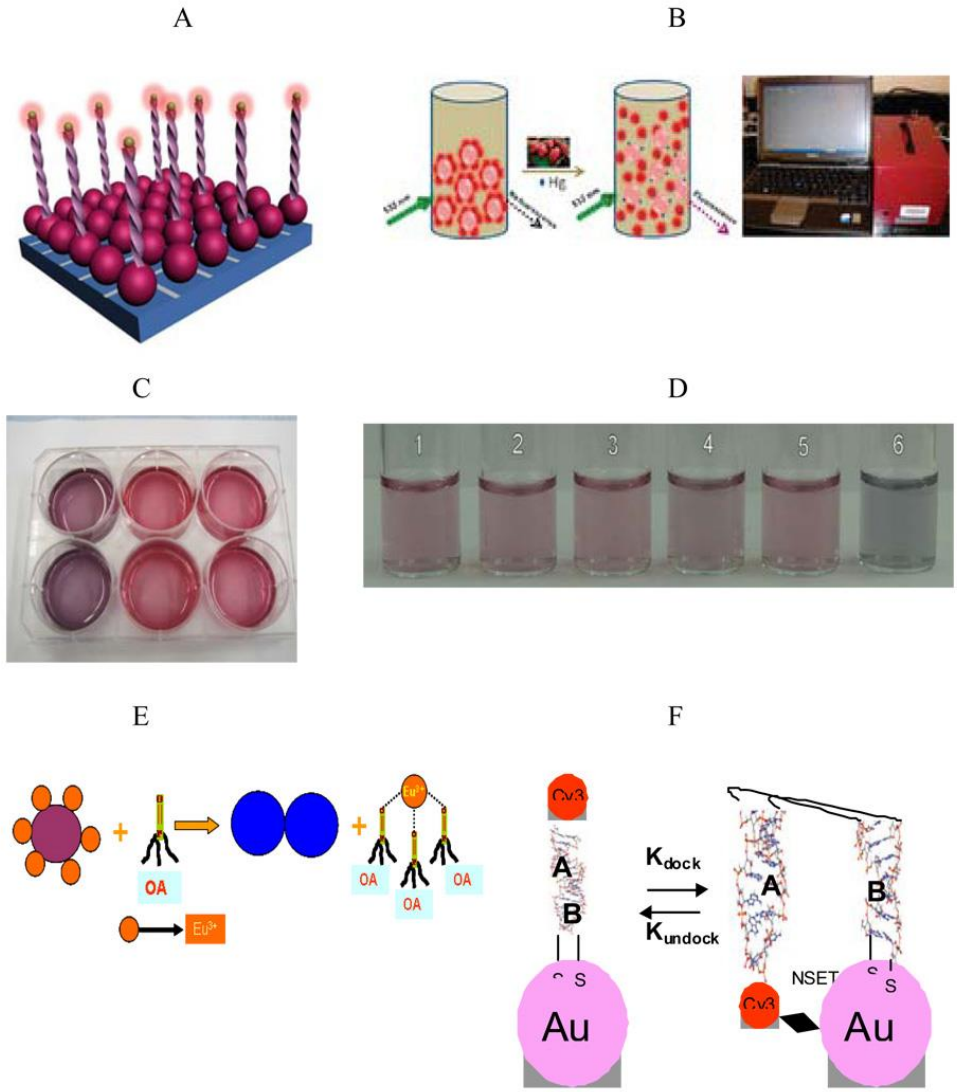
قبل السماح باستعمال المواد النانوية في أنشطة الحياة اليومية، من المهم لأبحاث علم السموم النانوية كشف وفهم كيفية تأثيرها على البيئة لتجنب خصائصها

الضارة ومعالجة القضايا المتعلقة بالآثار المحتملة لتقنيات النانو الناشئة على البيئة.

وعود تقنية النانو Nanotechnology Promises

في عام 1959، قدّم ريتشارد فاينمان، في محاضرته الرائدة حول تقنية النانو، بعنوان "هناك مساحة واسعة في القاع"، ما كان ممكنًا نظريًا من خلال معالجة المادة على المستويين الذري والجزيئي. واليوم، تُعدّ تقنية النانو علمًا تطبيقيًا، وصناعة سريعة النمو تُنتج مجموعة متنوعة من المواد والعمليات النانوية. يفتح التعامل مع المواد والعمليات على نطاق النانو آفاقًا جديدة من الإبداع، ومن المتوقع أن تُحدث فوائد تقنيات النانو تأثيرات كبيرة على جميع الصناعات تقريبًا وجميع مجالات المجتمع. تُعد تقنية النانو تقنية ناشئة لا تحمل وعودًا للمجتمع فحسب، بل قادرة أيضًا على إحداث ثورة في مناهجنا لحل المشكلات الشائعة. ومن المتوقع أن تُحدث تقنية النانو تأثيرًا كبيرًا على العلوم، وأنظمة الغذاء، والزراعة، والطب، والبيئة.

تُعد الجسيمات النانوية مفيدةً بشكل خاص نظرًا لحجمها (من 1 إلى 100 نانومتر). فحجمها الصغير للغاية يُمكّنها من الوصول إلى بيئات بيولوجية متنوعة؛ كما يمنحها حجمها خصائص قيّمة تعتمد على الحجم، ويمكن استغلالها في التطبيقات. وتجعل فوائد تقنية النانو مثاليةً لتطوير أجهزة الاستشعار، والرصد البيئي (الشكل 2). وأخيرًا، تُمثل مساحاتها السطحية الكبيرة منصاتٍ لتصميم أنظمة استشعار متعددة الوظائف.



شكل 2. A تمثيل تخطيطي لمسبار نقل الطاقة السطحية القائم على جسيمات الذهب النانوية للكشف عن الحمض النووي للممرض .B تمثيل تخطيطي للكشف عن الزئبق القائم على جسيمات الذهب النانوية ومسبار الشرب. C اختبار قياس اللون للكشف عن الحمض النووي الريبي للممرض. D اختبار قياس اللون للكشف عن الزئبق من عينة بيئية. E تمثيل تخطيطي للكشف عن عامل الفوسفور العضوي القائم على جسيمات الذهب النانوية. F تمثيل تخطيطي للاختبار القائم على جسيمات الذهب النانوية لطي الحمض النووي الريبي

هناك العديد من نقاط التقاطع بين علم النانو وتكنولوجيا النانو والعلوم البيولوجية (Borisov, *et al*. 2008). في الواقع، تتكون الوحدات الوظيفية الأولية للأنظمة البيولوجية من مكونات نانوية معقدة. تطمح تكنولوجيا النانو إلى بناء آلات إصلاح بحجم البكتيريا يمكنها دخول الخلايا والخروج منها، وتدمير الكائنات الدخيلة في الأوعية الدموية، وحتى فحص الحمض النووي بحثًا عن أخطاء. ستتيح لنا التكنولوجيا الحيوية الناشئة مع علم النانو ليس فقط الافاده من المكونات البيولوجية التطورية المُحسّنة لإنتاج مستشعرات ذكية جديدة، ولكن أيضًا تطبيق تقنيات التوصيف والتصنيع المتقدمة اليوم لحل المشكلات البيئية والبيولوجية. يمكن أيضًا استخدام المستشعرات المصغرة المُطورة من خلال تكنولوجيا النانو للكشف عن عوامل بيولوجية محددة يتم إطلاقها عن طريق الخطأ أو عن عمد في البيئة. لن تكون هناك حاجة لأي نظام توجيه لأن المستشعرات الموجودة في مقدمة الغواصة ستسمح لها بتجربة مسار مختلف إذا اصطدمت بأجسام مختلفة. سيقوم بتفكيك أي شيء مُبرمج له حاسوبه النانوي، بما في ذلك رواسب الدهون غير المرغوب فيها. أسطول من هذه الغواصات النانوية قادرٌ بلا شك على تطهير الجسم من الشوائب غير المرغوب فيها.

تقنية النانو للسرطان مجال بحثي متعدد التخصصات في العلوم والهندسة والطب، وله تطبيقات واسعة في التصوير الجزيئي والتشخيص الجزيئي والعلاج الموجه (Bagalkot, *et al*.2007). يكمن الأساس المنطقي في أن الجسيمات النانوية، مثل النقاط الكمومية شبه الموصلة وبلورات أكسيد الحديد النانوية، تتمتع بخصائص بصرية ومغناطيسية وبنيوية لا تتوفر في الجزيئات أو المواد الصلبة السائبة. عند ربطها بروابط استهداف الأورام، مثل الأجسام المضادة وحيدة النسيلة أو الببتيدات أو الجزيئات الصغيرة، يمكن استخدام هذه الجسيمات النانوية لاستهداف مستضدات الأورام والأوعية الدموية فيها بألفة وخصوصية عاليتين. في نطاق الحجم المتوسط (5-100 نانومتر)، تتميز الجسيمات النانوية أيضًا بمساحات سطحية كبيرة ومجموعات وظيفية لربط عوامل تشخيصية وعلاجية متعددة. وقد أدت التطورات

الأخيرة إلى ابتكار مجسات نانوية حيوية للتصوير الجزيئي والخلوي، وأدوية نانوية مستهدفة لعلاج السرطان، وأجهزة نانوية متكاملة للكشف المبكر عن السرطان وفحصه (Thoumine, *et al.* 2008). تُتيح هذه التطورات فرصًا واعدة لعلم الأورام الشخصي، حيث تُستخدم المؤشرات الحيوية الجينية والبروتينية لتشخيص السرطان وعلاجه بناءً على السمات الجزيئية لكل مريض. على الرغم من الوعد بأن تُحسّن تقنية النانو حياتنا اليومية، إلا أن المخاطر المحتملة لهذه التقنية لا تزال غير مؤكدة إلى حد كبير. هل تُشكل المواد النانوية المُصنّعة مخاطر على البيئة؟ أحد المخاوف بشأن الجسيمات الصغيرة التي يقل حجمها عن 10 ميكرومتر هو أنها قابلة للاستنشاق ويمكن أن تصل إلى الحويصلات الهوائية في الرئتين. بينما يسعى الباحثون إلى سد فجوة البيانات لمساعدة مُقيّمي المخاطر، يُشدد الخبراء حول العالم على ضرورة تنظيم المُصنّعين والإشراف عليهم لتقليل المخاطر المحتملة الناجمة عن التعرض للمواد النانوية على العمال والمستهلكين والحياة البرية.

نقل ومصير المواد النانوية Transport and Fate of Nanomaterials

من المتوقع أن تُشكّل تقنية النانو أساسًا للعديد من الابتكارات التكنولوجية الرئيسية في القرن الحادي والعشرين. ونظرًا لتزايد معدلات إنتاج المواد النانوية، فإن احتمالية إطلاقها في البيئة وما يترتب على ذلك من آثار على صحة النظام البيئي تُصبح مصدر قلق متزايد يتطلب معالجة (Lee, *et al.* 2007). ولهذا الغرض، من الضروري أولًا فهم مصير وسلوك المواد النانوية المُصنّعة في البيئة. علينا تحديد:

1- ما إذا كانت المواد النانوية تحتفظ بحجمها النانوي الاسمي، وبنيتها الأصلية، وتفاعليتها في الأنظمة البيئية؟

3- هل يختلف تأثيرها على النظام البيئي عن تأثير الجسيمات الأكبر من نفس المادة؟

ستُرشد الإجابات على هذه الأسئلة وغيرها وضعَ المبادئ التوجيهية التنظيمية التي ستوفر حماية كافية للأنظمة البيئية، مع السماح بتطوير المزايا التي تُقدمها تقنية النانو بشكل كامل.

تدخل المواد النانوية المصنعة إلى البيئة من خلال إطلاقات مقصودة وغير مقصودة، مثل الانبعاثات الجوية وتدفقات النفايات الصلبة أو السائلة من منشآت الإنتاج. فضلا عن ذلك، تدخل المواد النانوية في الدهانات والأقمشة ومنتوجات العناية الشخصية والصحية، بما في ذلك واقيات الشمس ومستحضرات التجميل، إلى البيئة بنسبة تتناسب مع استخدامها. تترسب المواد النانوية المنبعثة في النهاية على سطح الأرض والمياه. المواد النانوية التي تصل إلى الأرض لديها القدرة على تلويث التربة، والهجرة إلى المياه السطحية والجوفية. يمكن أن تنتقل الجسيمات الموجودة في النفايات الصلبة، ومياه الصرف الصحي، والتصريفات المباشرة، أو الانسكابات العرضية إلى الأنظمة المائية عن طريق الرياح أو جريان مياه الأمطار. يمكن أن يأتي أكبر إطلاق في البيئة من الانسكابات المرتبطة بنقل المواد النانوية المصنعة من منشآت الإنتاج إلى مواقع تصنيع أخرى، والإطلاقات المتعمدة للتطبيقات البيئية، والإطلاقات المنتشرة المرتبطة بالتآكل والتآكل الناتج عن الاستخدام العام. نظرًا لصغر حجم المواد النانوية المُهندَسة، يُمكن أن يحدث استنشاقٌ محتملٌ لجسيماتٍ محمولةٍ في الهواء، مُكوّنةٍ من مواد نانوية تغطي نطاقًا حجميًا يتراوح بين بضع نانومترات وعدة ميكرو مترات في القطر. قد تتكتل المواد النانوية لتُشكّل جزيئاتٍ أكبر أو سلاسل أليافٍ أطول، ما قد يُغيّر خصائصها ويؤثر على سلوكها في البيئات الداخلية والخارجية، بالإضافة إلى احتمالية تعرضها ودخولها إلى جسم الإنسان (Stahlhofen, *et al*.2006). يُمكن أن تترسب في الجهاز التنفسي، وتُسبب سميةً مُتأثرةً بالبنية النانوية بسبب مساحة سطحها الكبيرة، ونشاطها السطحي العالي، وشكلها غير الطبيعي، وأقطارها الصغيرة، أو تحللها إلى جزيئاتٍ أصغر بعد الترسيب. كما قد تُشكّل الجسيمات المُتكونة من تحلل أو تفتيت المواد النانوية خطرًا مُحتملًا إذا أظهرت نشاطًا بيولوجيًا يعتمد على البنية النانوية. تتمتّع

الجسيمات النانوية بكفاءة ترسيب عالية في رئات الأفراد الأصحاء، وكفاءاتٍ أعلى لدى الأفراد المُصابين بالربو أو أمراض الانسداد الرئوي المزمن. عند استنشاقها، تترسب الجسيمات النانوية بشكل متفرق على سطح الحويصلات الهوائية، مما يؤدي على الأرجح إلى تشتت إشارة الجذب الكيميائي، ما يؤدي إلى انخفاض التعرف واستجابات البلاعم السنخية. أن ترسب الجسيمات التي يبلغ حجمها 20 نانومترًا أكبر بمقدار 2.7 مرة من الجسيمات التي يبلغ حجمها 100 نانومتر، وأكبر بمقدار 4.3 مرة من الجسيمات التي يبلغ حجمها 200 نانومتر. أن كفاءة الترسيب أعلى لدى مرضى الربو أو مرض الانسداد الرئوي المزمن مقارنةً بالأصحاء، ربما بسبب انخفاض قدرة التصفية. ووجدوا أن تصفية الجسيمات التي يبلغ حجمها 50 و100 نانومتر كانت أقل من 25% خلال أول 24 ساعة بعد الاستنشاق.

يمكن أن يتعرض الجلد للجسيمات النانوية الصلبة من خلال وسائل مقصودة أو غير مقصودة (Zhang, *et al*. 2008). يتكون الجلد الخارجي من طبقة صلبة بسمك 10 ميكرومتر من الخلايا الميتة المتقرنة (الطبقة القرنية)، يصعب على الجسيمات والمركبات الأيونية والمركبات القابلة للذوبان في الماء اختراقها. قد يشمل التعرض الجلدي المتعمد للمواد النانوية استخدام المستحضرات والكريمات وضمادات الجروح والمنظفات والجوارب التي تحتوي على مواد نانوية فضية. يمكن تعريض مواد ثاني أكسيد التيتانيوم وأكسيد الزنك النانوية كمكون واقي من الشمس، أو كمواد ليفية مطلية بمواد نانوية لخصائص طاردة للماء أو البقع. قد يشمل التعرض غير المقصود ملامسة الجلد لمواد مجسمة ناتجة عن تصنيع المواد النانوية أو احتراقها. لا يزال من غير الواضح ما إذا كانت أنواع مختلفة من المواد النانوية تخترق الجلد وتُحدث آثارًا سمية، بما في ذلك السمية الخلوية للجلد أو أعضاء أخرى، من خلال التراكم في الجلد أو استقلاب جزيئات أصغر، أو بسبب الجسيمات النانوية المنشطة ضوئيًا. قد تؤثر ظروف الاستخدام أيضًا في شكل المركب. أثناء الاستخدام النموذجي للمستهلك، قد تنطلق الجزيئات في شكل محدد، ولكن في ظل ظروف أكثر إجهادًا، قد يتغير الشكل. على سبيل

المثال، تخضع المنسوجات للغسيل والتجفيف والكي. أثناء الغسيل، قد يزيد الماء الدافئ أو الساخن مع المنظفات من إطلاق المواد النانوية. يُعرّض تجفيف المنسوجات الألياف النانوية للحرارة والتحريك. يتطلب الكي قدرًا كبيرًا من الحرارة والضغط والتآكل. يتطلب التطوير المسؤول لأي مواد جديدة معالجة المخاطر الصحية والبيئية المرتبطة بتطوير هذه المواد وإنتاجها واستخدامها والتخلص منها. وهذا ضروري لحماية العاملين في إنتاج هذه المواد واستخدامها، والبشر، والنظام البيئي. كما يُسهم في توعية الناس بتطوير هذه المواد الجديدة ذات الفوائد المحتملة.

سمية المواد النانوية Toxicity of Nanomaterials

في حين أن أي شيء تقريبًا قد يكون سامًا عند جرعة عالية بما يكفي، فإن السؤال الأكثر أهمية هو: **ما مدى سمية المواد النانوية عند التركيزات المحتملة التي قد تُستعمل بها؟** تختلف أي آثار سامة للمواد النانوية باختلاف نوع المادة الأساسية وحجمها وشكلها وطبقاتها. ومع ذلك، لتحديد وفهم الآثار السامة للمواد النانوية، يجب اتباع استراتيجيات وتفسير البيانات بشكل صحيح مع مراعاة الافتراضات. في دراسات سمية الجسيمات النانوية، استخدمت مجموعات بحثية مختلفة سلالات خلوية وظروف زراعة وأوقات حضانة مختلفة. ومع فهمنا لطبيعة الجسيمات النانوية أثناء اختبار السمية، يصعب مقارنة نتائج مجموعات بحثية مختلفة وتحديد ما إذا كانت السمية الخلوية الملحوظة ذات صلة فسيولوجية. تُستخدم حاليًا العديد من النماذج البيولوجية، بما في ذلك الخلايا في المزارع، والكائنات المائية، بما في ذلك جنين سمك الزرد، واختبارات الحيوانات الكاملة مثل القوارض، لتحديد التأثيرات السمية المحتملة للمواد الكيميائية. في الأجواء الحضرية، ساهمت المركبات التي تعمل بالديزل والبنزين ومصادر الاحتراق الثابتة لسنوات عدةفي إنتاج جسيمات بأحجام متنوعة، بما في ذلك المواد النانوية. لا تزال الآثار السامة لهذه الجسيمات قيد البحث، مع تحول المخاوف التنظيمية من الجسيمات التقليدية التي يقل قطرها الديناميكي الهوائي عن 10 ميكرومتر أو أقل.

تشير النتائج التجريبية إلى زيادة سمية الجسيمات ذات الأحجام الدقيقة. ومع ذلك، لتحديد وفهم الآثار السامة للمواد النانوية، يجب وضع استراتيجيات وتفسير البيانات بشكل صحيح، مع مراعاة الافتراضات. تتنوع منتجات تقنية النانو بشكل كبير، ويمكن تقسيمها إلى عدد من فئات المركبات المختلفة، بما في ذلك المعادن، وأكاسيد المعادن، والكربون، والمواد النانوية شبه الموصلة.

المواد النانوية المعدنية Metal Nanomaterials

تُعد الجسيمات النانوية المعدنية من أكثر أنواع المواد النانوية المُهندسة استعمالا، ومع ذلك، لا يُعرف الكثير عن مصيرها وتأثيراتها البيئية. في حين يُعرف الذهب الخام بأنه آمن، نظرًا لخصائصه الاستثنائية، قامت عدة مجموعات بفحص الامتصاص الخلوي والسمية الخلوية لجسيمات الذهب النانوية (Shukla, *et al*. 2005). وقد وجد ان الامتصاص الخلوي لجسيمات الذهب النانوية الغروانية ذات الأحجام والأشكال المختلفة إلى أن حركية الجسيمات وتركيزات التشبع تعتمد بشكل كبير على الأبعاد الفيزيائية للجسيمات النانوية، حيث يبلغ عمر النصف لامتصاص لجسيمات الذهب النانوية ذات الأطوال 14 و50 و74 نانومتر 2.10 و1.90 و2.24 ساعة على التوالي، وان تركيزات الذهب المطلقة في الخلايا عن طريق الهضم ودراسات مطيافية الانبعاث الذري البلازمي المقترن بالحث فوجد أن الخلايا تمتص الكرات التي يبلغ قطرها 50 نانومترًا بسرعة أكبر مقارنةً بالكرات الأصغر والأكبر في نطاق 10-100 نانومتر، وأن الكرات تمتص بكفاءة أكبر من قضبان النانو التي تتراوح أبعادها بين 10 و100 نانومتر. ووجد ان امتصاص وسمية سلسلة من جسيمات الذهب النانوية الكروية في خلايا سرطان الدم البشري ذات مجموعة متنوعة من مُعدِّلات السطح ليست سامة بطبيعتها للخلايا البشرية.

اكاسيد المعادن النانوية Metal Oxide Nanomaterials

تُعد جسيمات أكاسيد المعادن النانوية مواد صناعية مهمة تُستخدم على نطاق واسع كمواد مضافة في مستحضرات التجميل والأدوية وملونات الطعام. عادةً ما يتعرض الجلد بشدة للجسيمات النانوية الصلبة من خلال استخدام المستحضرات أو الكريمات التي تحتوي على ثاني أكسيد التيتانيوم النانوي أو أكسيد الزنك كمكون واقي من الشمس، أو من خلال المواد الليفية المطلية بمواد نانوية لخصائص طاردة للماء أو البقع. ومع تزايد تصنيع واستخدام الجسيمات النانوية، يزداد احتمال تعرض البشر لها في العمل أو من خلال المنتجات الاستهلاكية والبيئة. وقد درست عدة مجموعات امتصاص وسمية جسيمات أكسيد المعادن النانوية. فقد وجد (Grassian, *et al.* 2007) أن التعرض عن طريق الاستنشاق باستخدام جسيمات نانوية من ثاني أكسيد التيتانيوم بأحجام تتراوح بين 2 و5 نانومتر أن هذه الجسيمات النانوية تتجمع لتكوين جسيمات رذاذ في حجرة التعرض بمتوسط هندسي لقطر الحركة يتراوح بين 120 و130 نانومتر. أظهر تحليل استجابات الرئة لدى الفئران بعد التعرض شبه الحاد لهذه التجمعات استجابة التهابية ملحوظة، وإن كانت متواضعة، لدى الحيوانات التي خضعت للتشريح في الأسبوع 0 أو 1 أو 2 بعد آخر تعرض، مع تعافيها في الأسبوع 3 بعد التعرض. كما وجد من الفئران المتعرضة للسمية الخلوية لتركيزات مختلفة من جسيمات نانوية من ثاني أكسيد التيتانيوم متجانسة وضعيفة التكتل في محلول مائي. واظهرت نتائج التقييم أن هناك زيادة كبيرة في الإجهاد التأكسدي عند تركيزات أعلى من جسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية (<60 ميكروغرام / مل). مع زيادة تركيز جسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية في الوسط الغذائي زادت مستويات أنواع الأكسجين التفاعلية وثنائي هيدروجين اللاكتات. أن السمية الخلوية لجسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية مع تحريض ROS في خلايا BEAS-2B المزروعة اظهرت الجسيمات النانوية التي اخترقت الغشاء البلازمي الواقعة في المنطقة المحيطة بالأغشية النووية قد يكون لها تفاعلات مباشرة مع الجزيئات الخلوية لتسبب استجابات

بيولوجية ضارة في الخلايا كما اظهرت الدراسات أنه مع تحريض ROS، زاد التعبير عن الجينات المرتبطة بالإجهاد التأكسدي. أفادت دراسات السمية النباتية المحدودة عن تأثيرات إيجابية وسلبية للجسيمات النانوية على النباتات العليا. وأفادت التقارير أن جسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية تعزز عملية التمثيل الضوئي واستقلاب النيتروجين، ومن ثم تعمل على تحسين نمو نبات السبانخ عند التركيز الأمثل (Yang, *et al.* 2007). ولم تُظهر جسيمات الألومينا النانوية أي تأثير ضار على نمو الفاصوليا الحمراء او نبات الوز بري (الجاودار) ومع ذلك، فقد أفادت التقارير أنها تمنع استطالة جذور الذرة والخيار وفول الصويا والملفوف والجزر. كما أدت التركيزات العالية من جسيمات الطور الحديدي النانوية إلى تثبيط نمو الذرة الشامية. ومع ذلك، لا تزال آلية السمية النباتية غير معروفة حتى الآن، ولا تتوفر معلومات عن الامتصاص المحتمل للجسيمات النانوية بواسطة النباتات ومصيرها اللاحق داخل السلاسل الغذائية. وقد انجزت دراسات حول الاستيعاب الخلوي والانتقال الصاعد لجسيمات أكسيد الزنك النانوية بوساطة نبات لوز بيري (نبات الجاودار) وتم تصوير امتصاص الجذور والسمية النباتية باستخدام مجهر الضوء، ومجهر الإلكترون الماسح، ومجهر الإلكترون النافذ وتبين أنه في وجود جسيمات أكسيد الزنك النانوية، انخفضت الكتلة الحيوية لعشبة الجاودار بشكل ملحوظ، وتقلصت أطراف الجذور، وتعرضت خلايا البشرة والقشرة الجذرية لتجويفات أو انهيارات شديدة. ومع ذلك، ظلت عوامل انتقال الزنك من الجذر إلى الساق منخفضة للغاية عند استخدام جسيمات أكسيد الزنك النانوية وعند مقارنة سمية أكسيد الزنك النانوي، وأكسيد الزنك السائب، وكلوريد الزنك للطحالب الدقيقة في المياه العذبة باستخدام طحلب المياه العذبة *Pseudokirchneriella subcapitata* تبين ان سمية مماثلة لأكسيد الزنك النانوي، وأكسيد الزنك السائب، وكلوريد الزنك، مع قيمة LC_{50} لمدة 72 ساعة تقترب من 60 ميكروغرام زنك/لتر.

المواد النانوية الكربونية Carbon Nanomaterials

تبرز الأنابيب النانوية الكربونية (CNTs)، ببنيتها النانوية المجوفة أحادية البعد الفريدة وخصائصها غير العادية، كفئة جديدة مهمة من اللبنات الأساسية متعددة الوظائف لتطوير تقنية النانو. وقد أدى التطور السريع الأخير في تقنية النانو إلى تجديد الطلب المُلح على إنتاج هذه الأنابيب على نطاق واسع لتطبيقاتها في المنتجات التجارية. ويستمر عدد المرافق الصناعية لإنتاج الأنابيب النانوية الكربونية متعددة الجدران Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) بتكلفة منخفضة نسبيًا في النمو، وبالتالي، من المتوقع أن يزداد التعرض المهني والعام لهذه الأنابيب بشكل ملحوظ في السنوات القادمة. وقد درست العديد من المجموعات البحثية امتصاص الأنابيب النانوية الكربونية، وخاصةً الأنابيب النانوية متعددة الجدران، ومخاطرها المحتملة على البشر والأنظمة البيولوجية الأخرى. فعلى سبيل المثال، ثبت أن الأنابيب النانوية الكربونية يمكن أن تُحفز استجابات التهابية وموتًا للخلايا في الخلايا التائية البشرية (Ding, *et a*l. 20057). كما اشارت الدراسات إلى أن أنابيب الكربون النانوية متعددة الجدران تُنشّط الجينات المسؤولة عن النقل الخلوي، والأيض، وتنظيم دورة الخلية، والاستجابة للإجهاد في الخلايا الليفية الجلدية البشرية. وجدت أدلة على سمية المواد النانوية الكربونية، على الرغم من أن أنابيب الكربون النانوية متعددة الجدران كانت الأقل سمية بين أنابيب الكربون النانوية، وألياف الكربون النانوية، وجسيمات الكربون النانوية المختبرة. واشارت إحدى الدراسات الى أن أنابيب الكربون النانوية القابلة للذوبان في الماء والمُفعّلة بسلاسل البولي إيثيلين جليكول لم تُسبب آثارًا سامة عند اختبارها على مجموعة واسعة من خلايا الجهاز المناعي.

وجد (Lam, *et al*. 2004) أن جزيئات الكربون فائقة الدقة تُظهر اختراقًا للرئة أكبر من الجزيئات الأكبر حجمًا، وأنها قادرة على عبور حاجز الدم الدماغي والتأثير على الجهاز العصبي المركزي. وأن التأثيرات السامة تظهر بسرعة بعد التعرض كما أن جسيمات الكربون النانوية تنتقل من الرئتين إلى مجرى الدم بدلاً من إطلاق عوامل

التخثر من الرئتين. ونظرًا لأن استنشاق ألياف الأسبستوس معروف بأنه يسبب داء الأسبستوس وسرطان الرئة وورم المتوسطة الخبيث في غشاء الجنب، فيبدو أن هناك احتمالًا كبيرًا أن يكون للأنابيب النانوية الكربونية أيضًا آثار سامة كبيرة على صحة الإنسان نظرًا لتشابهها الهيكلي مع الأسبستوس (Jia, *et al*. 2005). أشارت العديد من الدراسات إلى أن الأنابيب النانوية الكربونية تُظهر سمية خلوية كبيرة في المختبر، بما في ذلك إحداث الإجهاد التأكسدي، وتثبيط تكاثر الخلايا، وإثارة موت الخلايا المبرمج/النخر وان تأثير الأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار (SWCNT) على أنسجة الرئة عن طريق غرس معلق من الأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار في رئات الفئران اشارت النتائج إلى أن الأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار تتكتل معًا في حزم وتسبب التهابًا رئويًا معًا. كما ان نتائج السمية الخلوية للأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار والأنابيب النانوية متعددة الجدران والفوليرينات (C60) في المختبر تُظهر أن السمية الخلوية تزداد بنسبة تصل إلى ~35٪ عندما تزيد جرعة الأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار بمقدار 11.30 ميكروغرام/سم². لم تُلاحظ أي سمية كبيرة للأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار حتى جرعة 226.00 ميكروغرام/سم². يبدو أن السمية الخلوية تتبع تسلسلًا على أساس الكتلة: الأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار > الأنابيب النانوية متعددة الجدران > الكوارتز > C60.

النقاط الكمومية Quantum Dots

النقاط الكمومية (QDs) هي بلورات نانوية تحتوي على ما بين 1000 و100,000 ذرة، وتُظهر "تأثيرات كمية" غير عادية، مثل الفلورسنت المُطوّل. بفضل خصائصها البصرية والكهربائية الفريدة، تُستخدم النقاط الكمومية حاليًا في صناعات التصوير الطبي الحيوي والإلكترونيات. ومن أهم خصائص النقاط الكمومية طيف الفلورسنت، ما يجعلها جسيمات فلورية مثالية للتصوير الطبي الحيوي، على سبيل المثال، يمكن

دمج النقاط الكمومية الفلورية مع وحدات نشطة بيولوجيًا لاستهداف أحداث بيولوجية محددة وهياكل خلوية، مثل وسم الخلايا السرطانية، والحمض النووي، ومستقبلات غشاء الخلية (Alivisatos, *et al.* 2004). يمتلك كل نوع فردي من النقاط الكمومية QD خصائص فيزيائية كيميائية فريدة من نوعها، والتي بدورها تحدد سميتها المحتملة، ونتيجة لذلك، هناك تناقضات في الأدبيات الحالية فيما يتعلق بسمية QDs ويمكن أن تُعزى إلى عدة عوامل: عدم وجود دراسات قائمة على علم السموم، وتنوع جرعات QD/تركيزات التعرض المذكورة في الأدبيات، والتنوع الواسع في الخصائص الفيزيائية الكيميائية للـ QDs الفردية. من المهم، وهو مصدر محتمل للالتباس في تقييم سمية النقاط الكمومية، أن سمية النقاط الكمومية تعتمد على عوامل متعددة مستمدة من كل من الخصائص الفيزيائية والكيميائية الفردية للنقاط الكمومية والظروف البيئية: الحجم، والشحنة، والتركيز، والنشاط الحيوي للطبقة الخارجية، والاستقرار التأكسدي والضوئي والميكانيكي، وقد ثبت أن جميعها عوامل محددة لسمية النقاط الكمومية(Zhang, *et al.* 2008) . أن اختراق الجلد هو أحد الطرق الرئيسية لتعرض النقاط الكمومية للوصول إلى النظام البيولوجي.

لوحظ أيضًا سمية خلوية ناتجة عن النقاط الكمومية حيث أن النقاط الكمومية المُغلفة بـ MUA والمُكوّنة من CdSe/ZnS سامة لخلايا الكبد البشرية الأولية عند تركيزات 100 ميكروغرام/مل . كما وجد أن النقاط الكمومية ذات النواة المُكوّنة من CdSe كانت بالفعل سامة بشكل حاد في ظل ظروف معينة وتبين امكانية تعديل سمية النقاط الكمومية من خلال معاملات المعالجة أثناء التخليق، والتعرض للأشعة فوق البنفسجية، وطلاء السطح.

التوقعات والاحتياجات المستقبلية Outlook and Future Needs

على الرغم من أن العديد من المجموعات البحثية قد وجدت آثارًا سامة للمواد النانوية، إلا أن أسباب السمية غير معروفة في الغالب. لا تزال هناك فجوات هائلة في

المعرفة حول طبيعة تفاعل الجسيمات النانوية مع النظام البيئي. هناك حاجة إلى مزيد من الدراسات لتقييم استقرار هذه المصفوفات في مجموعة متنوعة من أنظمة الاختبار لتحديد احتمالية تعرض الإنسان للمكونات النانوية للمنتجات المتاحة تجاريًا، وكذلك المنتجات المستقبلية، بشكل كامل. تُنشر دراسات سمية الجسيمات النانوية باستخدام سلالات خلوية مختلفة وأوقات حضانة مختلفة بشكل متزايد، ولكن نظرًا للتنوع الواسع في تركيزات الجسيمات النانوية، وتنوع سلالات الخلايا، فضلا عن ظروف الزراعة، وعدم فهم آلية عملها، يصعب للغاية تحديد ما إذا كانت السمية المرصودة ذات صلة فسيولوجية. والأهم من ذلك، هناك حاجة إلى تقنيات تحليلية تتيح المراقبة الفورية في الموقع لتحسين عمليات الإنتاج، وبالتالي تقليل النفايات وتكاليف الطاقة، فضلا عن توفير معلومات آلية. على الرغم من التقدم، لا تزال هناك تحديات بحثية كبيرة في هذا المجال تحتاج إلى معالجة. لا نعرف بعدُ جوانب المواد النانوية التي يجب قياسها، مثل العدد أو مساحة السطح أو تركيز الكتلة وهو مزيج من هذه، أو شيء مختلف تمامًا. هل تعلمنا أي شيء جديد في آلية السمية البيولوجية بفضل هذه الدراسات السمية؟ الإجابة، مع استثناءات قليلة، ليست كذلك. بمجرد أن يتبنى المجتمع الطبي الحيوي الجسيمات النانوية كأدوات جديدة للتصوير الحيوي، وعلى مدى فترات زمنية أطول، نتوقع اكتساب معرفة جديدة حول كيفية عمل الخلايا والأعضاء، داخليًا وخارجيًا مع الآخرين.

يُعدّ توافر أساليب تحليلية روتينية تُعالج هذه القضايا عاملاً أساسياً لفهم آليات تكوين الجسيمات النانوية وتفاعليتها بشكل أفضل. فضلا عن ذلك، ونظرًا لتأثير النقاء على مجموعة واسعة من خصائص الجسيمات النانوية، فإن التقنيات التحليلية القادرة على كشف الشوائب وتحديد كميتها ستكون مهمةً لاتباع مناهج أكثر مراعاةً للبيئة. في الواقع، الجسيمات النانوية صغيرة جدًا بحيث لا يمكن اكتشافها بالمجاهر الضوئية. بالإضافة إلى ذلك، كان التحليل الكيميائي للجسيمات النانوية الفردية في الغازات والسوائل مستحيلاً لفترة طويلة بسبب كتلتها المنخفضة. إن التنوع الهائل للمواد

النانوية المُهندسة ذات الأحجام والأشكال والتركيبات والطلاءات المختلفة يُضاهي، وربما يتجاوز، التنوع الكيميائي التقليدي. ينبغي أن تؤدي التطورات في تكنولوجيا المعلومات وتصميم المستشعرات إلى تطوير مستشعرات ذكية تكشف عن تركيزات الجسيمات النانوية وتُحدد سُميتها المحتملة، مما قد يُوفر مؤشرات مبكرة على الضرر. يتمثل التحدي في التوصل إلى اتفاق دولي بشأن مجموعة من اختبارات الفحص المختبرية للسمية البشرية والبيئية. يُعدّ التوافر العالمي الواسع النطاق لعينات الجسيمات النانوية القياسية أمرًا أساسيًا لمواجهة هذا التحدي، ما يتيح مقارنة وتحسين الأساليب المتبعة في مختلف المختبرات الحكومية والصناعية والأكاديمية. ونظرًا لتشابه الأهداف المرتبطة بأبحاث الصحة البشرية والبيئة الجارية في الولايات المتحدة وأوروبا واليابان، فإن تطوير التعاون الرسمي والهيئات الحكومية في هذه البلدان من شأنه أن يشجع هذا التعاون بطريقة شفافة.

أن العديد من المواد الخافضة للتوتر السطحي المستخدمة للتحكم في حجم وشكل المواد النانوية سامة. لذلك، يجب إيجاد بدائل لاستخدام المواد الخافضة للتوتر السطحي أو القوالب أو غيرها من المواد لتثبيت شكل الجسيمات النانوية والتحكم فيه أثناء عملية التخليق، ومن بعض الأمثلة الواردة هو استخدام المواد الخافضة للتوتر السطحي في المواد النانوية المعتمدة على الشكل. غالبًا ما تكون المواد الخافضة للتوتر السطحي سامة، لذا يجب استبدالها لإضافة وظائف جديدة على سطح الجسيمات. تُعد مناهج المحاكاة الحيوية الجديدة، التي يُستخدم فيها الجزيء للتحكم في الشكل، بالغة الأهمية، ويمكن أن تُظهر نتائج واعدة في إنتاج الجسيمات النانوية المشتقة بيولوجيًا. هناك حاجة إلى مزيد من البحث لتطوير هذه الأساليب. هناك نتائج مشجعة تشير إلى أن إطار علم النانو الأخضر يمكن أن يُرشد تصميم وإنتاج وتطبيق مواد نانوية أكثر خضرة عبر مجموعة من التركيبات والأحجام والأشكال والوظائف. سيوفر المزيد من تطوير وتطبيق هذا الإطار فرصًا بحثية وتحديات لهذا المجتمع في المستقبل المنظور.

لتقييم سلامة المواد النانوية المعقدة متعددة المكونات والوظائف، سيحتاج العلماء إلى تطوير انموذجات معتمدة قادرة على التنبؤ بإطلاق المواد النانوية المُهندَسة ونقلها وتحويلها وتراكمها وامتصاصها في البيئة. ينبغي أن تربط هذه النماذج الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد النانوية بسلوكها، وأن تتيح نهجًا متكاملًا للتنبؤ بالتأثير المحتمل للمواد النانوية المُهندَسة ومنتوجاتها النانوية، وتقدير التأثيرات على الفئات السكانية المعرضة للخطر. ويلزم تطوير علاقات بين البنية والنشاط للتنبؤ بالآثار البيولوجية والبيئية والتدهور في نهاية العمر الافتراضي. ويُعد كل أنموذج من هذه النماذج ضروريًا لتصميم جسيمات نانوية تتمتع بالأداء المطلوب لصحة الإنسان والبيئة، بما يُكمل خصائصها الفيزيائية. إن نشر الأبحاث المتعلقة بمخاطر وفوائد تكنولوجيا النانو خارج المجتمع العلمي أمرٌ صعب، ولكنه ضروريٌّ لإجراء حواراتٍ قائمة على أسس علمية سليمة. وهذا يعني تطوير أنشطة تواصل تُمكّن من تلخيص المعلومات التقنية ونقدها، وفي نهاية المطاف، تجميعها لمختلف الأطراف المهتمة، بما في ذلك صناع القرار والمستهلكون. وأخيرًا، يُعدّ الفهم العالمي للمخاطر المتعلقة بتكنولوجيا النانو أمرًا أساسيًا لضمان تكافؤ الفرص بين الصناعات الكبيرة والصغيرة، وضمان عدم حرمان الاقتصادات النامية من المعلومات الأساسية اللازمة لتصميم تكنولوجيا نانوية آمنة. وإذا استطاع المجتمع البحثي العالمي الاستفادة من هذه الظروف، فسنتمكن بالتأكيد من التطلع إلى ظهور تكنولوجيا نانوية آمنة.

المصادر

Alivisatos, P. 2004. The use of nanocrystals in biological detection. Nat. Biotechnol. 2004;22:47–52. doi: 10.1038/nbt927. [DOI] [PubMed] [Google Scholar]

Aslan, K. and Geddes, C.D. 2005. Metal-enhanced fluorescence: An emerging tool in biotechnology. Curr. Opn. Biotech. 2005;16:55–62. doi:

10.1016/j.copbio.2005.01.001. [DOI] [PMC free article] [PubMed] [Google Scholar]

Bagalkot, V., Zhang, L., Levy-Nissenbaum, E., Jon, S., Kantoff, P.W., Langer, R. and Farokhzad ,O.C. 2007. Quantum dot-aptamer conjugates for synchronous cancer imaging, therapy, and sensing of drug delivery based on bi-fluorescence resonance energy transfer. Nano Lett. 2007;7:3065–3070. doi: 10.1021/nl071546n. [DOI] [PubMed] [Google Scholar]

Borisov, S.M. and Wolfbeis, O.S. 2008. Optical biosensors. Chem. Rev. 2008;108:423–461. doi: 10.1021/cr068105t. [DOI] [PubMed] [Google Scholar]

Borm, P.J.A., Robbins, D. and Haubold, S. 2006. The potential risks of nanomaterials: A review carried out for ECETOC. Particle Fibre Toxicol. 2006;3:11–35. doi: 10.1186/1743-8977-3-11. [DOI] [PMC free article] [PubMed] [Google Scholar]

Ding, L., Stilwell, J., Zhang, T., Elboundwarej ,O., Jiang, H., Selegue, J.P., Cooke, P.A., Gray, J.W. and Chen, F. F. 2005. Molecular characterization of the cytotoxic mechanism of multiwall carbon nanotubes and nano-onions on human skin fibroblast. Nano Lett. 2005;5:2448–2464. doi: 10.1021/nl051748o. [DOI] [PMC free article] [PubMed] [Google Scholar]

Donaldson, K., Tran, C. and MacNee ,W. 2007. Deposition and effects of fine and ultrafine particles in the respiratory tract. The European Respiratory Monograph. 2002;7:77–92. [Google Scholar]

Grassian, V. H., O'Shaughnessy. P. T., Adamcakova-Dodd, A. Pettibone, J. M. and Thorne ,P. S. 2007. Inhalation exposure study of titanium

dioxide nanoparticles with a primary particle size of 2 to 5 nm. Environ. Health Perspect. 2007;115:397–402. doi: 10.1289/ehp.9469. [DOI] [PMC free article] [PubMed] [Google Scholar]

Hatchett, D.W. and , Josowicz, M. 2008. Composites of intrinsically conducting polymers as sensing nanomaterials. Chem. Rev. 2008;108:746–769. doi: 10.1021/cr068112h. [DOI] [PubMed] [Google Scholar]

Jia, G., Wang, H., Yan, L., Wang, X., Pei, R., Yan, T., Zhao, Y. and Guo, X. 2005. Cytotoxicity of carbon nanomaterials: Single-wall nanotube, multi-wall nanotube, and fullerene. Environ. Sci. Technol. 2005;39:1378–1383. doi: 10.1021/es048729l. [DOI] [PubMed] [Google Scholar]

Lam, C.W., James, J. T., McCluskey, R. and Hunter, R.L. 2004. Pulmonary toxicity of single-wall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intractracheal instillation. Toxicol. Sci. 2004;77:126–134. doi: 10.1093/toxsci/kfg243. [DOI] [PubMed] [Google Scholar]

Lee, K.J., Nallathamby, P.D., Browning, L.M., Osgood, C. J. and Xu, X-HN. 2007. In vivo imaging of transport and biocompatibility of single silver nanoparticles in early development of zebrafish embryos. ACS Nano. 2007;1:133–143. doi: 10.1021/nn700048y. [DOI] [PMC free article] [PubMed] [Google Scholar]

Ray, P. C., Yu,H. and Fu P.P. 2009. Toxicity and Environmental Risks of Nanomaterials: Challenges and Future Needs. J Environ Sci Health. 27(1): 1–35

Shukla, R., Bansal, V., Chaudhary, M., Basu, A., Bhonde, R. and Sastry, M. 2005. Biocompatibility of gold nanoparticles and their endocytotic

fate inside the cellular compartment: A microscopic overview. Langmuir. 2005;21:10644–10654. doi: 10.1021/la0513712. [DOI] [PubMed] [Google Scholar]

Stahlhofen, W., Rudolf, G. and James, A.C. 1989. Intercomparison of experimental regional aerosol deposition data. J. Aerosol Med. 1989;2:285–308. [Google Scholar]

Thoumine, O., Ewers, H., Heine, M., Groc, L., Frischknecht. R., Giannone, G., Poujol. C., Legros, P., Lounis, B., Cognet, L. and Choquet, D. 2008. Probing the dynamics of protein-protein interactions at neuronal contacts by optical imaging. Chem. Rev. 2008;108:1565–1587. doi: 10.1021/cr078204m. [DOI] [PubMed] [Google Scholar]

Yang, F,. Hong, F.S., You, W. J., Liu, C., Gao, F. Q., Wu, C. and Yang, P. 2006. Influences of nano-anatase TiO2 on the nitrogen metabolism of growing spinach. Biol. Trace Elem. Res. 2006;110:179–190. doi: 10.1385/bter:110:2:179. [DOI] [PubMed] [Google Scholar]

Zhang, L.W. and Monteiro-Riviere, N.A. 2008. Assessment of quantum dot penetration into intact, tape-stripped, abraded and flexed rat skin. Skin Pharm. Physiol. 2008;21:166–180. doi: 10.1159/000131080. [DOI] [PubMed] [Google Scholar]

Zhang, L.W., Yu, W.W., Colvin, V.L. and Monteiro-Riviere, N.A. 2007. Biological interactions of quantum dot nanoparticles in skin and in human epidermal keratinocytes. Toxicol. Appl. Pharmacol. 2008;228:200–211. doi: 10.1016/j.taap.2007.12.022. [DOI] [PubMed] [Google Scholar]

الفصل العاشر

الأثر البيئي لتطبيقات تقنية النانو

مقدمة

تختلف الخواص الفيزيائية والكيميائية للجسيمات النانوية اختلافًا كبيرًا عن تلك الموجودة في المواد السائبة. ونظرًا لزيادة تفاعلها، فإنها تتفاعل مع مكونات البيئة بدرجة كبيرة. ويتجلى تأثير الجسيمات النانوية على البيئة في طريقتين. فبعضها يُستخدم لمعالجة الملوثات البيئية، بينما قد تُسبب الجسيمات النانوية أيضًا سمية بيئية. ويعتمد تأثير الجسيمات النانوية على البيئة على مسار وعملية تكوينها، بالإضافة إلى ثباتها في البيئة. كما يعتمد على الخواص الفيزيائية والكيميائية للجسيمات النانوية وقدرتها على التراكم في البيئة. ولفهم تأثير الجسيمات النانوية على مكونات البيئات، لذلك لابد من وصف أنواع الجسيمات النانوية واستقرارها وتأثيرها على مختلف مكونات البيئات (Roy and adak, 2024) .

برزت الجسيمات النانوية (NPs) كمكونات محورية في مجالات متنوعة، مدفوعة بخصائصها الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية المتميزة. وتُستخدم في الاستكشاف العلمي والهندسة والرعاية الصحية وحماية البيئة. على سبيل المثال، يتكون الصبغ الأزرق الشهير في مصر القديمة، "الكوبروريفايت"، في الغالب من الكوارتز والزجاج النانوي. يُبشر عالم تكنولوجيا النانو بعصر جديد من خلال توفير تحكم دقيق في المواد على المستوى النانوي، والذي يتراوح عادةً بين 1 الى100 نانومتر. وقد أصبح هذا المجال المزدهر محوريًا في البحث العلمي، إذ أثار فضولًا كبيرًا وكشف عن تطبيقات جديدة في قطاعات لا حصر لها. لتوسع تكنولوجيا النانو تداعيات بعيدة المدى على كل من البيئة والكائنات الحية. تقدم الجسيمات النانوية مزايا، ولكنها تنطوي أيضًا على مخاطر محتملة. يُحدد حجم الجسيمات النانوية

خصائصها، حيث تُظهر الجسيمات الأصغر خصائص أكثر تميزًا مقارنةً بنظيراتها الأكبر (Strambeanu, *et al.* 2015).

تتجلى المواد النانوية في البيئة من خلال مسارات عدة، بما في ذلك:

1- المواد النانوية المصنعة عمدًا من صنع الإنسان، والتي توفر تحكمًا دقيقًا في الحجم والخصائص.

2- المواد النانوية غير المقصودة الناتجة عن العمليات الصناعية مثل الاحتراق في المحركات الحرارية، والظواهر الطبيعية مثل الحرائق.

3- المواد النانوية التي تحدث بشكل طبيعي، بما في ذلك الفيروسات. شهدت السنوات الأخيرة زيادة كبيرة في إنتاج الجسيمات النانوية، ويتجلى ذلك في استخدامها كعوامل مضادة للبكتيريا، حيث تخفف من تكاثر البكتيريا وتعزز فعالية العلاجات المضادة للبكتيريا. في أنظمة توصيل الأدوية، توفر الجسيمات النانوية خصائص فيزيائية كيميائية تستهدف الخلايا السرطانية بشكل انتقائي مع تقليل الآثار الجانبية على الرغم من أن التركيزات العالية منها قد تسبب السمية. تعمل الجسيمات النانوية أيضًا كدروع واقية في حفظ الأغذية، وتظهر في واقيات الشمس للحماية من الأشعة فوق البنفسجية، وتساهم في الإجراءات التشخيصية، وتساعد في القضاء على مسببات الأمراض. علاوةً على ذلك، تمتد تطبيقاتها لتشمل تنقية مصادر المياه، وإزالة المعادن الثقيلة منها، وزيادة الأسمدة للأغراض الزراعية. كما تستغل صناعة الإلكترونيات إمكانات الجسيمات النانوية. مع استمرار تزايد إنتاج الجسيمات النانوية في مختلف القطاعات، يُحدث تأثيرًا لا يُنكر على البيئة والكائنات الحية، مما يؤثر على الصحة والرفاهية. تُمثل الجسيمات النانوية سلاحًا ذا حدين، ما يستلزم اتخاذ احتياطات للتخفيف من آثارها السلبية (sengul, *et al.* 2016).

التكنولوجيا الخضراء Green Technology: التكنولوجيا النانوية الخضراء هي تقنية تُستخدم لتصنيع الجسيمات النانوية (NPs) بطريقة مستدامة وصديقة للبيئة.

يستخدم التخليق الأخضر الطرق التقليدية بدلاً من استخدام المواد الكيميائية وتستخدم هذه العملية أنواعًا طبيعية مثل الحمض النووي والبكتيريا وإنزيمات الفطريات ومستخلصات النباتات، مما يساعد على الحفاظ على سمية منخفضة، إنها عملية صديقة للبيئة يسهل التعامل معها وفعالة من حيث التكلفة. ومع ذلك، في عملية التخليق الأخضر، يكون فيها الحجم هو الأكثر أهمية. تعمل المستخلصات النباتية أو المستخلصات النباتية كعوامل اختزال يتم إنتاجها بشكل طبيعي من النباتات والفواكه والزهور والأوراق، من بين تركيبات أخرى. على سبيل المثال، تُستخدم أوراق الريحان كمنشط للأمراض والسعال، من بين أغراض أخرى (Song, *et al.* 2020).

انبعاث الجسيمات النانوية إلى البيئة Nanoparticle emission to the environment:

تتميز الجسيمات النانوية بخصائص فريدة. يمكن إطلاق هذه الجسيمات النانوية في البيئة في مراحل مختلفة وبطرق مختلفة. للتحكم في انبعاثات المواد النانوية إلى البيئة، يعد تقييم دورة حياة الجسيمات النانوية من إنتاجها إلى إجراءات التخلص منها أمرًا بالغ الأهمية وقد يكون لدورة الحياة هذه تأثير على البيئة (Dong, *et al.* 2020).

مراحل دورة المواد النانوية

- **تصنيع المنتج والتوظيف Product manufacture and employment**: أثناء التصنيع، قد تنبعث الجسيمات النانوية بسهولة إذا لم يتم اتباع الإجراء بدقة. يمكن أن يحدث هذا الانبعاث عن غير قصد، مما يؤدي إلى انبعاثات غير مباشرة. يمكن أن تنتج الانبعاثات غير المقصودة عن الاحتراق وانسكاب الجسيمات النانوية ومصادر مختلفة مثل الألعاب النارية. تتضمن الانبعاثات المتعمدة للجسيمات النانوية، والمعروفة بالإجراءات التي صنعها الإنسان، معايير مختارة مستخدمة

في العملية، والتي يمكن أن تؤدي إلى انبعاثات في البيئة. يختلف الانبعاث والخصائص وفقًا لنوع المنتج. يتم استخدام الجسيمات النانوية في مراحل مختلفة للمنتجات الصلبة والسائلة والرش، مع إطلاق الجسيمات النانوية على الفور.

- **التخلص Disposal**: عادةً ما يتم التخلص من المواد النانوية في مكبات النفايات، وهي ممارسة تنطوي على خطر التحلل واحتمال إطلاق الجسيمات النانوية في البيئة. في حالة الحرق، هناك قلق من أن جزيئات الرماد قد تتسرب إلى البيئة. لذلك، تستخدم محطات الحرق مرشحات متخصصة للتحكم الفعال في انبعاث الرماد وتقليله.
- **عملية إعادة التدوير Recycling process**: تعتمد عملية إعادة التدوير على المنتوج، ونتيجةً لذلك، تحدث انبعاثات ومقاومة. يجب ان تنفيذ هذه العملية مع مراعاة معايير السلامة المحددة.

الانموذجات المستعملة لتقييم انبعاث الجسيمات النانوية

Models used to evaluate nanoparticle emission:

تم تصميم انموذجات التعرض البيئي لتقييم الملوثات في البيئة، وخاصة المواد النانوية. في السنوات الأخيرة، قامت هذه النماذج بتقييم تركيزات الانبعاثات في البيئة على نطاق واسع وهناك أنواع مختلفة من انموذجات التعرض.

- **تحليل تدفق المواد Material Flow Analysis (MFA)** : يعد تحليل تدفق المواد (MFA) أحد الطرق المستخدمة لقياس المواد النانوية في البيئة. يعمل نموذج MFA كنظام تقني يتنبأ بتدفق المواد من المرحلة الأولى إلى المرحلة الأخيرة من عملية دورة الحياة. تدخل المادة النانوية المنبعثة في المقام الأول إلى الماء والهواء والتربة وغيرها من المقصورات. يتنبأ MFA بالانبعاثات في مقصورات مختلفة مثل مدافن النفايات ومحطات إعادة التدوير ومعالجة المياه وتأثيرها اللاحق على البيئة. في حين يركز MFA بشكل

أساسي على الوجهة النهائية للمواد النانوية، إلا أنه لا يوفر معلومات حول التركيز المحدد للجسيمات النانوية في البيئة (Nowack, *et al*. 2017). يصف نموذج MFA الحجم والشكل، وهو ما يميز الجسيمات النانوية. فيما يتعلق بالجسيمات النانوية المنبعثة في البيئة.

- **أنموذج المصير البيئي Environmental Fate Model (EFM)**

EFM): تتنبأ نماذج EFM بالسلوك داخل الأجزاء البيئية، بما في ذلك الهواء والماء والتربة. ويُقدّر EFM أن نموذج MFA هو نسخة مُوسّعة. يتضمن أنموذج EFM نماذج مصير مُختلفة، أحدها أنموذجات التوازن. يتعلق هذا المفهوم بنظام ثنائي الطور يتكون من مواد كيميائية عضوية وجسيمات نانوية مُهندَسة (ENP) في طوري السائل-السائل والصلب-السائل. يوجد حاجز بين الجزيئات المُذابة وترسيب الجسيمات. يتضمن توزيع التوازن عمليتين: الانتشار الجزيئي والتفاعل بين الجزيئات. يتكون التفاعل بين الجزيئات من طورين، الطور أ والطور ب، يُظهران انتقالًا تلقائيًا بين الطورين عند التوازن. ومن أمثلة هذه الطريقة توزيع الماء، وهي أكثر ملائمة للجسيمات الصغيرة مقارنةً بالجسيمات الغروانية، إذ تذوب بسهولة في المذيب، وفقًا للمذيبات المختارة للجسيمات النانوية. تتميز الجسيمات النانوية بثباتها الحركي، لكنها غير مستقرة ترموديناميكيًا. وتتصرف بشكل مختلف مقارنةً بالجزيئات العضوية، ولكن من الممكن تثبيتها عن طريق تقليل طاقة السطح من خلال تكوين العناقيد (التجمع). يتضمن انموذج EFM عناقيد لا يمكن حسابها بواسطة أنموذج التوازن. تحسب الحالة المستقرة مدخلات ومخرجات تدفق المياه، مما يضمن التوازن. ومن أمثلة هذه الطريقة الترسيب. في الأنهار، يُستخدم أنموذج مصير مُحلّل مكانيًا لحساب التغيرات في تدفقات المجاري المائية. ويعتمد نموذج المصير كليًا على سلوك الغرويات. توفر نماذج المصير بيانات حول حجم ENP، كما تتناول خصائص وظروفًا

بيئية متنوعة. مع ذلك، تجدر الإشارة إلى أن انموذجات EFM توفر معلومات محدودة، ويعمل العلماء بنشاط على الحد من هذه القيود. يطور الباحثون انموذجات مختلفة لتقليل الانبعاثات في البيئة. يمكن أن تُشكل هذه الانموذجات أساسًا متينًا لاتخاذ قرارات تهدف إلى تقليل الانبعاثات في المستقبل القريب (Praetorius, *et al*. 2014).

تأثير الجسيمات النانوية على البيئة الخارجية Impact of nanoparticles on outdoor: تؤدي العمليات الصناعية المختلفة في الوقت الحاضر إلى انبعاث جسيمات نانوية في البيئة، مما يُسبب تلوثًا لعناصر مثل التربة والهواء والماء. وتنتج الانبعاثات في البيئة من مصادر مختلفة، بما في ذلك حرق نفايات المواد النانوية غير المرغوب فيها، والتي تُطلق على شكل رماد. كما تُساهم مواقع البناء، وكذلك أنابيب الغاز والبترول والمياه، في الانبعاثات البيئية. وتُطلق صناعات الأسمنت جسيمات صغيرة في البيئة أثناء عملياتها، وحتى في مجالات مختلفة مثل الزراعة وحركة المرور على الطرق وصناعة البوليمر، تُعاني من انبعاثات سامة من الجسيمات النانوية. ويُعتبر العمال أكثر عُرضة للتعرض لهذه الجسيمات النانوية، ما قد يزيد من خطر الإصابة بمشاكل صحية مثل مشاكل الجلد، وتلف الجهاز التنفسي، وتضرر خلايا معينة في الجسم. ويستكشف العديد من الباحثين طرقًا مختلفة لتحديد تركيز الجسيمات النانوية وتقييم تعرض العمال لها (Taghavi, *et al*. 2013).

- **التأثير السلبي Negative impact :** بمجرد انبعاث الجسيمات النانوية في حجرات البيئة، فإنها يمكن أن تضر الكائنات الحية اعتمادًا على الظروف. يمكن أن يؤدي امتصاص وتوزيع الجسيمات النانوية بواسطة الكائنات الحية من خلال الجهاز التنفسي إلى تلف الجهاز الهضمي أو الجلد. عندما تدخل الجسيمات النانوية أغشية الخلايا، يمكن أن تسبب تلفًا وسمية لحجرات الخلايا المختلفة، اعتمادًا على نوع الجسيمات النانوية. يمكن أن تؤدي أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS)

الموجودة في العضيات المؤكسدة مثل الميتوكوندريا إلى تفاقم تفاعل الجسيمات النانوية. يمكن أن تلحق أنواع الأكسجين التفاعلية الضرر بالبروتينات والدهون والأحماض النووية والحمض النووي وما إلى ذلك الموجودة في الخلية مما يؤدي في النهاية إلى موت الخلية. يمكن أن تدخل الأنابيب النانوية الكربونية الجسم مباشرة وتسبب السمية، بينما يمكن للجسيمات النانوية الكربونية، مثل الفوليرينات، أن تسبب السمية أيضًا. تؤثر الأنابيب النانوية الكربونية بشكل أساسي على الميتوكوندريا. في البرمائيات، ثبت أن الأنابيب النانوية الكربونية تسبب سمية جينية، ما يؤدي إلى تلف الحمض النووي والإجهاد التأكسدي بعد التعرض قصير المدى (Motteir, *et al*. 2017). يمكن للمنتوجات الاستهلاكية التي تحتوي على جسيمات النانو الفضية (AgNP) أن تلوث البيئات المائية كما يمكن أن يسبب تحلل جسيمات النانو الفضية سمية للكائنات المائية مثل الأسماك والطحالب. تعتمد سمية جسيمات النانو الفضية بشكل كبير على خصائص الجسيمات بما في ذلك التركيز ودرجة الحموضة والحجم والشكل، والتي تؤثر على تفاعل الجسيمات النانوية. وقد وجد أن جسيمات أوكسيد النحاس والحديد النانوية CuO و Fe_3O_4 بتركيزات مختلفة في نوعين مختلفين من التربة الرملية، أظهرت مستويات متفاوتة من السمية، حيث أظهر CuO سمية أكبر بينهما (Lapied, *et al*. 2010). يمكن أن تؤثر الجسيمات النانوية على الكائنات الحية التي تحفر التربة مثل ديدان الأرض التي تشكل جزءًا كبيرًا من الكتلة الحيوية للتربة. كما ان للجسيمات النانوية تأثيرات كبيرة على حياة الحيوانات لان تأثير جسيمات النانو على التربة والمياه والهواء ضروري للسلسلة الغذائية. يمكن للنباتات امتصاص الجسيمات النانوية من خلال الأوراق والجذور والمناطق المتضررة والأزهار ومن مصادر المياه. وقد وجد أن تأثير جسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية أظهر ميلًا إلى انخفاض السمية مع زيادة حجم الجسيمات، حيث يمكن لجسيمات التيتانيوم النانوية أن تسبب تلفًا في الحمض النووي (Xia, *et*

(*al.* 2015). يمكن لجسيمات الزنك النانوية أن تُسبب سمية خلوية في النباتات، مما يؤدي إلى تأخر النمو، وانخفاض عملية التمثيل الضوئي، وتغير التعبير الجيني في جميع النباتات المصابة. تُعد تركيزات الجسيمات النانوية العالية مسؤولة بشكل أساسي عن انخفاض عملية التمثيل الضوئي. كما يمكن لجسيمات الزنك النانوية أن تُثبط نمو النبات. تتغير خصائص الجسيمات النانوية تبعًا لطبيعة المعدن الذي تحتويه. يمكن للجسيمات النانوية أن تُعطل هياكل بيولوجية مختلفة، بما في ذلك الكلى والقلب والكبد والأحماض الأمينية والأحماض الدهنية. مع زيادة إنتاج الجسيمات النانوية، تزداد الانبعاثات في البيئة أيضًا. يمكن أن يكون لنقص المهندسين والعمال المُدربين تأثير سلبي على البيئة. خلال دورة حياة الجسيمات النانوية، تحدث انبعاثات الجسيمات النانوية عند إجراء دفعات أو تجارب وعند تحللها، وقد أظهرت الدراسات أن جسيمات النانو الفضية (Ag-NPs) وجسيمات نانو ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2-NPs) وجسيمات نانو أكسيد الزنك (ZnO-NPs) هي عناصر سامة للحيوانات المائية. يتغير سلوك الجسيمات النانوية اعتمادًا على حجمها وشكلها وعوامل أخرى، مما يؤدي إلى تغييرات في خصائصها الكيميائية والفيزيائية. الأسمدة النانوية مسؤولة عن سمية التربة وتغيرات المناخ ونقص التربة وقضايا أخرى. وقد أظهرت احدى الدراسات على الفئران أن تراكم الجسيمات النانوية في الليزوزومات في الخلايا المعقمة قد يسبب موت الخلايا كما وُجد أن جسيمات الحديد النانوية فائقة المغناطيسية Fe_3O_4 تعطل أنشطة الكلى والكبد والقلب لدى الفئران، مما يؤدي إلى أعراض مثل القيء والغثيان. قد تُصاب الأسماك التي تستهلك أنابيب الكربون النانوية بتركيزات أعلى من تلك التي يستهلكها البشر بتلف في الأنسجة، وفي سمك الزرد، يرتبط تركيز الجسيمات النانوية بالتهاب الكبد وتراكم الأحماض الدهنية (Lehner, *et al*. 2019). ونظرًا لأن النمو السكاني والنمو الاقتصادي يؤديان إلى زيادة الصناعات وإنتاج المحاصيل، فقد يؤدي ذلك إلى تلوث المياه بملوثات عضوية مثل الكوبالت والنحاس

والرصاص والزنك والزرنيخ والكادميوم والزئبق. ويمكن أن يؤدي تلوث المياه إلى انتشار أمراض ضارة مثل التيفوئيد والكوليرا والإسهال.

- **التأثير الإيجابي Positive impact:** تُستعمل الجسيمات النانوية ذات التأثير الإيجابي في مجموعة واسعة من المجالات، بما في ذلك المكونات النانوية، وتغليف الأغذية، والطلاء النانوي (لجعل الأسطح مقاومة للخدش)، والترشيح النانوي، وأنظمة التوصيل النانوية للزراعة لتحسين تغذية المحاصيل، وتُستخدم في العديد من الصناعات الزراعية (Zhang, *et al*. 2020). تلعب الجسيمات النانوية دورًا حيويًا في علوم الأغذية وعلم الأحياء الدقيقة الغذائية، إذ تساعد في الكشف عن الأمراض المنقولة بالغذاء وإطالة مدة صلاحية الأغذية. كما تحظى الجسيمات النانوية باهتمام كبير في إنبات البذور واستطالة الجذور. وتُستخدم في مستحضرات التجميل، مثل كريمات البشرة التي تستخدم بروتينات مشتقة من الخلايا الجذعية لمكافحة شيخوخة الجلد. وتُستخدم الجسيمات النانوية في معالجة مياه الصرف الصحي، وهي تقنية مستخدمة عالميًا. فهي تقلل من المعادن الثقيلة والأسمدة والمبيدات الحشرية لتوفير مياه نظيفة للشرب والري. تُثبط الجسيمات النانوية بعض الكائنات الدقيقة المسببة للأمراض، ويمكنها أيضًا إزالة الأصباغ، مثل أزرق الميثيلين، كما تعمل الجسيمات النانوية كمحفزات لتعزيز تفاعلات مختلفة. في الزراعة، يستحيل الحفاظ على نمو المحاصيل دون استعمال الأسمدة والمبيدات الحشرية ومبيدات الأعشاب لحماية المحاصيل حيث تُسبب الآفات الحشرية وأمراض النباتات خسائر اقتصادية وغذائية كبيرة، مما يجعل من الضروري تطوير أسمدة نانوية ومبيدات حشرية ومبيدات أعشاب نانوية مستدامة (Chaudhry, *et al*. 2018). تُساعد الأسمدة النانوية في الحفاظ على خصوبة التربة، بينما تحمي المبيدات الحشرية ومبيدات الأعشاب النانوية النباتات من التدهور المبكر، وتُكافح الآفات لفترات أطول، وتُعزز قابليتها للذوبان. يُمكن رش المبيدات الحشرية مباشرةً على البذور والحبوب، ما يُثبط مسببات الأمراض

النباتية. أثارت جسيمات النانو الفضية (AgNPs) اهتمام العلماء نظرًا لخصائصها وتطبيقاتها الواسعة. تُستخدم على نطاق واسع في معالجة مياه الصرف الصحي، حيث تؤثر على الكائنات الدقيقة لتعزيز نمو النباتات ودورة العناصر الغذائية في التربة، وزيادة غلة المحاصيل، ومكافحة مسببات الأمراض، وفي صناعة النسيج. تُظهر جسيمات النانو المغنتيت (MNPs) سلوكًا بارامغناطيسيًا، وتُستخدم في تنقية مياه الصرف الصحي ومعالجتها وكذلك المعالجة الضوئية لإزالة المعادن الثقيلة من الأرض (Ansari, *et al*. 2019). لا تُظهر جسيمات النانو المغنتيت أي آثار سامة للخلايا، وتوفر نهجًا أكثر مراعاة للبيئة وأكثر فعالية من حيث التكلفة. تُستخدم مواد ماصة مختلفة، بما في ذلك الكربون المنشط، وقشر الأرز، وأنابيب الكربون النانوية، والسيليكا، لمعالجة مياه الصرف الصحي. تنتشر تقنية النانو في مختلف المجالات، بما في ذلك الطب، والأقمشة، ومستحضرات التجميل، وتغليف المواد الغذائية، والدهانات، وطلاء السيارات، ومستحضرات التسمير. تُعد المستشعرات أدوات فعّالة لمراقبة الملوثات البيئية، مثل المبيدات الحشرية والكائنات الدقيقة. تعمل مُحسِّنات الطاقة الجديدة (NPS) كمحفزات لتعزيز التفاعلات، وتُستخدم في التطبيقات الشمسية والكهربائية والبيولوجية والحرارية الأرضية.

الاستنتاجات Conclusion:

تتمتع تقنية النانو بإمكانيات هائلة لتطوير آليات دفاع النبات ضد الأمراض والآفات الحشرية. ويمكن ابتكار استراتيجيات جديدة لتحسين دقة وفعالية واستدامة العمليات الزراعية باستخدام الخصائص المميزة للمواد النانوية، مثل الجسيمات النانوية والمركبات النانوية. ومع ذلك، يواجه الاستخدام الواسع لتقنية النانو في وقاية النبات صعوبات جمة. وتشمل هذه الصعوبات ضمان استقرار وفعالية التركيبات القائمة على المواد النانوية، وإجراء تقييمات شاملة للمخاطر، والتعامل مع الآثار البيئية المحتملة، والسيطرة على ظهور المقاومة، وتجاوز

العقبات المتعلقة بإمكانية التوسع والفعالية من حيث التكلفة. ولمعالجة هذه القضايا بنجاح وضمان التطبيق المسؤول والآمن لتقنية النانو في السياقات الزراعية، ستكون هناك حاجة إلى أطر تنظيمية قوية، وتعاون متعدد التخصصات، وجهود بحثية مكثفة. وعلى الرغم من هذه الصعوبات، فإن التطوير المستمر لتكنولوجيا النانو يُقدم فرصًا مُشجعة لمعالجة القضايا الزراعية المُتغيرة مع تعزيز صحة المحاصيل واستقرار الإنتاج والأمن الغذائي والحد من الآثار البيئية.

المصادر

Ansari, S.; Ficiarà, E.; Ruffinatti, F.; Stura, I.; Argenziano, M.; Abollino, O.; Cavalli, R.; Guiot, C.; D'Agata, F. 2019. Magnetic Iron Oxide Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and Functionalization for Biomedical Applications in the Central Nervous System. Materials 2019, 12, 465.

Chaudhry, N.; Dwivedi, S.; Chaudhry, V.; Singh, A.; Saquib, Q.; Azam, A.; Musarrat, J. 2018. Bio-inspired nanomaterials in agriculture and food: Current status, foreseen applications and challenges. Microb. Pathog. 2018, 123, 196–200.

Dong, H.; Li, L.; Wang, Y.; Ning, Q.; Wang, B.; Zeng, G. 2020. Aging of zero-valent iron-based nanoparticles in an aqueous environment and the consequent effects on their reactivity and toxicity. Water Environ. Res. 2020, 92, 646–661

Lapied, E., Moudilou, E., Exbrayat, J.-M., Oughton, D. H. and Joner, E. J. .2010. Silver nanoparticle exposure causes apoptotic response in the earthworm Lumbricus terrestris (Oligochaeta), Nanomedicine, vol. 5, no. 6, pp. 975- 984, 2010.

Mottier, A.; Mouchet, F.; Pinelli, É.; Gauthier, L.; Flahaut, E. 2017. Environmental impact of engineered carbon nanoparticles: From releases to effects on the aquatic biota. Curr. Opin. Biotechnol. 2017, 46, 1–6

Nowack, B. 2017. Evaluation of environmental exposure models for engineered nanomaterials in a regulatory context. NanoImpact 2017, 8, 38–47.

Prabhakar, P. K. 2020. Formulation and evaluation of polyherbal anti-acne combination by using in-vitro model. Biointerface Res. Appl. Chem 10.1 (2020): 4747-4751.

Roy, T. and Adak, P. 2024. A Review of The Impact of Nanoparticles on Environmental Processes Rupali Arora, BIO Web of Conferences RTBS-2023 .

Sengul, A.B.; Asmatulu, E. 2020. Toxicity of metal and metal oxide nanoparticles: A review. Environ. Chem. Lett. 2020.

Song, Y.; Zhou, T.; Liu, Q.; Liu, Z.; Li, D. 2020. Nanoparticle and microorganism detection with a side-micron- orificebased resistive pulse sensor. Analyst 2020.

Strambeanu, N.; Demetrovici, L.; Dragos, D.; Lungu, M. Nanoparticles. 2015. Definition, Classification, and General Physical Properties. In Nanoparticles' Promises and Risks: Characterization, Manipulation, and Potential Hazards to Humanity and the Environment; Lungu, M., Neculae, A., Bunoiu, M., Biris, C., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2015; pp. 3–8.

Xia, B.; Chen, B.; Sun, X.; Qu, K.; Ma, F.; Du, M. 2015. Interaction of TiO_2 nanoparticles with the marine microalga Nitzschia closterium: Growth inhibition, oxidative stress and internalization. Sci. Total Environ. 2015, 508, 525–533

Zhang, L.; Mazouzi, Y.; Salmain, M.; Liedberg, B.; Boujday, S. 2020. Antibody-Gold Nanoparticle Bioconjugates for Biosensors: Synthesis, Characterization and Selected Applications. Biosens. Bioelectron. 2020, 112370.

University of Kut

Nanotechnology Applications in Modern Agriculture