Journal of Agricultural, Environmental and Veterinary Sciences (JAEVS) • Vol 9, Issue 4 (2025) • P: 63 - 56
https://journals.ajsrp.com/index.php/jaevs
ISSN: 2522-3364 (Online) • ISSN: 2522-3364 (Print)

Nanotechnology and its Role in the Advancement of Horticultural Crops: A Scientific Article

Asst-Prof. Fatin H. Al-Dulaimi*[1] , Prof. Mohammed A. H. Al-Najjar[2] , Prof. Sukeyna. A. Aliwy[1], Prof. Wasen F. Fadel[2]

[1] College of Science | University of Baghdad | Iraq

[2] College of Agriculture | University of Basrah | Iraq

Received: 04/09/2025

Revised: 24/09/2025

Accepted: 20/10/2025

Published: 15/12/2025

* Corresponding author: fatin.aldulaimi@sc.uobaghdad.edu.iq

Citation: Al-Dulaimi, F. H., Al-Najjar, M. A., Aliwy, S. A., & Fadel, W. F. (2025). Nanotechnology and its Role in the Advancement of Horticultural Crops: A Scientific Article. *Journal of Agricultural, Environmental and Veterinary Sciences, 9*(4), 56 – 63. https://doi.org/10.26389/AJSRP.N060925

2025 © AISRP • Arab Institute for Sciences & Research Publishing (AISRP), United States, all rights reserved.

• **Open Access**

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY-NC) license

Abstract: Nitrogen fertilizers, particularly urea, are among the most widely used agricultural inputs due to their high nitrogen content and easy availability. However, one of their major drawbacks is their rapid hydrolysis in moist soils, leading to ammonia volatilization and nitrogen loss. This process results in serious environmental consequences, including eutrophication of water bodies and the emission of nitrous oxide a major greenhouse gas associated with agricultural activities. Similarly, conventional phosphate and potassium fertilizers suffer from issues such as nutrient fixation in the soil and reduced bioavailability to plants, which lower nutrient use efficiency and compel farmers to increase fertilizer application rates to maintain productivity. In low-income regions, where pollution levels are rising and food security remains fragile, the high cost and repeated application of these fertilizers pose a substantial economic burden, negatively affecting the sustainability of agricultural production.

In response to these challenges, recent studies have focused on developing advanced agricultural technologies, notably the application of nanotechnology in fertilization. This includes the development of slow-release nano-fertilizers such as nano-urea, nano-phosphate, nano-zinc, and nano-iron, which offer higher nutrient use efficiency, reduced nutrient losses, improved soil fertility, and minimized environmental impacts. Such innovations represent a promising approach toward achieving sustainable and environmentally friendly agriculture.

Keywords: Nanotechnology, Nano crops, Agro-Nanotechnology, Nano fertilizers, Nitrogen use efficiency, Sustainable production.

تقنية النانو ودورها في تطوير الحاصلات البستانية: مقال علمي

الأستاذ المساعد / فاتن حسين الدليمي*[1]، الأستاذ الدكتور/ محمد عبدالامير حسن النجار[2]، الأستاذ الدكتور/ سكينة عباس عليوي[1] ، الأستاذ الدكتور/ وسن فوزي فاضل[2]

[1] كلية العلوم | جامعة بغداد | العراق

[2] كلية الزراعة | جامعة البصرة | العراق

المستخلص: تُعدّ الأسمدة النيتروجينية، ولا سيّما اليوريا، من أكثر المدخلات استخدامًا في الممارسات الزراعية نظرًا لاحتوائها العالي على النيتروجين وسهولة توفرها، إلا أنّ من أبرز سلبياتها قابليتها السريعة للتحلل في التربة الرطبة، مما يؤدي إلى تطاير الأمونيا وفقدانها، وما ينجم عن ذلك من آثار بيئية خطيرة تشمل زيادة ظاهرة الإثراء الغذائي للمجاري المائية وانبعاث أكسيد النيتروز إلى الغلاف الجوي بوصفه أحد الغازات الدفيئة الرئيسة المرتبطة بالأنشطة الزراعية وهذا النوع من الغازات يساهم في الاحتباس الحراري واستنزاف طبقة الأوزون. كما تعاني الأسمدة الفوسفاتية والبوتاسية التقليدية من مشكلات مشابهة تتمثل في تثبيت العناصر في التربة وانخفاض جاهزيتها للنبات، مما يحد من كفاءة امتصاص المغذيات ويُجبر المزارعين على زيادة معدلات التسميد لضمان الإنتاجية. وفي البيئات ذات الدخل المنخفض، حيث يتصاعد مستوى التلوث ويظل الأمن الغذائي هشًا، تمثل كلفة هذه الأسمدة وتكرار استخدامها عبئًا اقتصاديًا كبيرًا، ينعكس سلبًا على استدامة الإنتاج الزراعي.

وانطلاقًا من هذه التحديات، ركزت الدراسات الحديثة على استحداث تقنيات زراعية متقدمة، من أبرزها تطبيقات تقنية النانو في مجال التسميد، والتي تشمل تطوير أسمدة نانوية بطيئة الإطلاق مثل نانو-يوريا، نانو-فوسفات، نانو-زنك، ونانو-حديد، لما توفره من كفاءة أعلى في امتصاص العناصر وتقليل الفاقد منها وتحسين خصوبة التربة مع خفض الأثر البيئي، مما يجعلها أحد الحلول الواعدة لتحقيق زراعة مستدامة وأكثر صداقة للبيئة.

الكلمات المفتاحية: نانوتكنولوجي، محاصيل نانوية، النانو الزراعي، الاسمدة النانوية، كفاءة استخدام النيتروجين، الإنتاج المستدام.

المقدمة

تُعد تقنية النانو من الموضوعات الحيوية التي تمس مختلف مجالات الحياة المعاصرة دون استثناء. وعلى الرغم من أن جزيئات النانو الطبيعية، مثل حبيبات الطين ذات البنية النانوية، وُجدت منذ نشأة الكون، فإن المستجد في هذا المجال يتمثل في تطوير الجسيمات النانوية المصنعة وتوسيع تطبيقاتها لتشمل قطاعات متعددة، بما في ذلك الزراعة (الرمادي وآخرون، 2016).

شهد العالم خلال ستينيات وسبعينيات القرن الماضي ثورة زراعية كان هدفها الأساسي إطعام المليارات من البشر عبر الاعتماد على الأسمدة الكيميائية كأحد أهم العوامل المحركة لزيادة الإنتاج الزراعي. غير أنّ ارتفاع تكلفة الأسمدة في البلدان النامية ما زال يشكّل عائقًا أمام تحقيق الأمن الغذائي. وفي هذا السياق، نُشر تقرير في مجلة ACS Nano حول تطوير طريقة مبتكرة لتعزيز فعالية الأسمدة التقليدية، مما قد يسهم في إطلاق ثورة غذائية ثانية.

إقترح Kottegoda et. al. (2017) استراتيجية لإبطاء تحلل اليوريا في التربة، وذلك من خلال تغليف جسيمات الهيدروكسي أباتيت (HA) النانوية لجزيئات اليوريا. يُعد الهيدروكسي أباتيت معدنًا طبيعيًا صديقًا للبيئة يتواجد في أنسجة الإنسان والحيوان. وقد أظهرت نتائج التهجين بين جسيمات الهيدروكسي أباتيت واليوريا في الوسط المائي قدرة على تحرير النيتروجين ببطء بمعدل أبطأ بإثنى عشر مرةً مقارنة باليوريا التقليدية. كما بيّنت التجارب الحقلية الأولية على محصول الأرز أنّ استخدام هذا النظام النانوي ساعد على خفض الحاجة إلى الأسمدة بمقدار النصف، مما يعزز فرص حدوث ثورة زراعية جديدة تلبي متطلبات الأمن الغذائي العالمي مع تحسين الاستدامة البيئية.

فيما يُعرف بعصر النانو، ازدادت الأبحاث الرامية إلى توظيف التقنية النانوية الزراعية Agro-Nanotechnology لمعالجة تحديات القطاع الزراعي. ومع تفاقم مشكلات التلوث الناتج عن متبقيات المبيدات والأسمدة الكيميائية، وما يترتب عليها من خسائر اقتصادية بسبب رفض الصادرات الزراعية، برزت تطبيقات النانو كحل واعد لتقليل هذه الأضرار وتعظيم العائد الزراعي (Phogat et al., 2016).

أستخدمت تقنية النانو في مجالات متعددة، منها: تحسين كفاءة التسميد وتقليل كميات الأسمدة المضافة إلى التربة، الحد من تلوثها بالمتبقيات الكيميائية، الحفاظ على البيئة، تطوير طرق حفظ الأغذية، مكافحة الآفات والأكاروسات، ورصد بؤر الإصابة الحشرية داخل الحقول (Khattak et al. 2024). كما تسهم التطبيقات النانوية في تقليل الفاقد من المحاصيل، وتنقية التربة من العناصر الثقيلة التي تحد من امتصاص العناصر الغذائية. وبذلك، فإن إدخال تقنية النانو في الزراعة يمثل وسيلة فعالة لتحسين منظومة إنتاج الغذاء بأكملها، ابتداءً من عمليات الزراعة وحتى التعبئة والتسويق، إضافة إلى دورها في رفع الكفاءة الإنتاجية للمساحات المزروعة (Bardhiya et al. 2025).

الجزيئات والمركبات النانوية وتطبيقاتها.

يُعرَّف النانو بأنه 1 × 10^{-9} متر، وتتعامل تقنياته مع البنى الذرية والجزيئية التي يتراوح حجمها بين 1–100 نانومتر، معتمدة على شكلها الفراغي وتماسك بنيتها. وتُظهر المواد على هذا المستوى خصائص فيزيائية وكيميائية فريدة، مثل زيادة القوة، وقابلية الذوبان، والقدرة على النفاذ في الأوساط المختلفة. ومن خلال التدخل في البنى الذرية، تتيح التقانة النانوية تطوير مركبات ومواد جديدة بخصائص مميزة. وقد اتسعت تطبيقاتها لتشمل مجالات متعددة كالصيدلة والطب والإلكترونيات وإنتاج الطاقة والزراعة وحماية البيئة. ففي المجال الطبي، على سبيل المثال، استُخدمت لتوجيه عمليات الترميم البيولوجي، والتعديل الوراثي، والتحكم في الأنظمة الحيوية، بالإضافة إلى تحسين إيصال الأدوية إلى مناطق يصعب الوصول إليها نتيجة وجود حواجز طبيعية (Levard et. al., 2012).

تُعد المغذيات الصغرى عنصرًا أساسيًا في الإنتاج الزراعي لما لها من دورٍ مباشرٍ في الكمية والنوعية، فضلًا عن انعكاسها على صحة الإنسان. وتشير تقارير عدة إلى أنّ أكثر من ثلاثة مليارات شخص حول العالم يعانون من نقص المغذيات الصغرى، ولاسيما الزنك والحديد، وأن الاعتماد على المكملات أو الأملاح لا يمثل الحل الأمثل، خاصة في الدول الفقيرة. ولهذا طُوّر نهج الإغناء الحيوي Bio-fortification الذي يتضمن إضافة هذه المغذيات إلى التربة كأسمدة. وعلى الرغم من أن المحاصيل تحتاجها بكميات ضئيلة مقارنة بالعناصر الكبرى، فإنها تبقى محددة للنمو وجودة المنتج. ورغم توافر الأسمدة المعدنية والمخلبية التركيبية والعضوية وطرق الإضافة المختلفة إلى التربة أو رشًا على الأوراق أو كلاهما، فإن كفاءة الاستفادة من هذه الأسمدة لا تتجاوز 5% من الكمية المضافة. وفي السنوات الأخيرة، اتجهت الأبحاث نحو تطوير أسمدة نانوية للمغذيات الصغرى بهدف زيادة كفاءتها وتقليل الفاقد، إلا أن هذه التطبيقات ما تزال في بداياتها وتحتاج إلى المزيد من الدراسة والتمويل لفهم إمكاناتها بصورة شاملة (علي والجوذري، 2017)، (هاشم وآخرون، 2023).

التقنية النانوية والزراعة.

يكمن جوهر التقنية النانوية في القدرة على العمل على المستوى الجزيئي، أي التحكم بالذرة، لبناء بنى أكبر من خلال تنظيم جزيئي دقيق. وتهدف هذه التقنية إلى استغلال الخصائص الفريدة للمواد عن طريق السيطرة على البنى والوسائل على المستويات الذرية والجزيئية وفوق الجزيئية Supramolecular، بما يتيح تصنيعًا كفؤًا واستخدامًا دقيقًا لهذه الوسائل. وباختصار، تُمكّن التقنية النانوية من بناء مواد مرئية Macro ومجهريّة Micro ونواتج بدقة ذرية Atomic precision (الخزرجي وآخرون، 2011).

تلعب الأنظمة الزراعية دورًا محوريًا في توفير الغذاء وتحسين مستويات المعيشة والدخل، لا سيما في المناطق القروية حيث يصل نسبة العاملين في القطاع الزراعي النباتي والحيواني إلى حوالي 80% من الرجال والنساء (Pinstrup, 2011). ومع الزيادة السكانية المتوقعة لتتجاوز 9 مليارات نسمة بحلول عام 2050، سيزداد الطلب على الغذاء من حيث الكمية والجودة، ما يستلزم توفير جميع المتطلبات الغذائية للمحاصيل، بما في ذلك المغذيات الصغرى. من خلال ما وَرد في FAO (2012) أن استهلاك منتجات غذائية منخفضة المحتوى من المغذيات الصغرى يعرض البشر، وخصوصًا الأطفال، لمخاطر الإصابة بأمراض نقص التغذية. وبالتالي، فإن تحسين المحتوى التغذوي للمحاصيل يمكن أن يقلل من هذه المخاطر. ويعتمد إنتاج محاصيل زراعية، بما في ذلك الخضر والفواكه والعلف الحيواني، بكميات كبيرة ونوعية عالية، على توافر جميع المغذيات الكبرى والصغرى بنسب متوازنة، بما يتناسب مع احتياجات نمو المحصول وصنفه والظروف البيئية والتربة وأساليب إدارة الأسمدة (Ali et al., 2015)، (نصيف وآخرون، 2023). وتظل التربة المصدر الرئيس للمغذيات الصغرى، حيث تتأثر جاهزيتها الحيوية بالعوامل المناخية وخصائص التربة.

الأسمدة النانوية وتطبيقاتها في الزراعة.

تُعرف التقنية النانوية بأنها معالجة المواد على المستوى الجزيئي أو الذري، عادة في نطاق أقل من 100 نانومتر. وتُعد هذه التقنية واعدة في تحسين العمليات الزراعية من خلال إدارة أفضل للموارد وضمان استدامة المدخلات في الإنتاج الزراعي الحقلي والحيواني والسمكي. وقد ركزت الأبحاث خلال العقدين الأخيرين على دراسة الجسيمات المعدنية النانوية Metal Nanoparticles مثل أوكسيد الزنك وأوكسيد النحاس والمخلبيات المعدنية، بالإضافة إلى المغذيات الصغرى بطيئة أو مسيطَر على تحررها. ورغم النتائج الواعدة، فإن بعض الدراسات أظهرت نتائج متباينة وأحيانًا متعاكسة، ما يشير إلى أن هذا المجال لا يزال يحتاج إلى المزيد من البحث والتقصي (Monreal et. al., 2015).

تلعب الأسمدة النانوية دورًا مهمًا في تغذية النبات، سواء عند رشها على المجموع الخضري أو إضافتها عبر التربة. ومن أبرز فوائدها:

1- تعزيز عمليات التخليق الضوئي من خلال زيادة محتوى الأوراق من الكلوروفيل.
2- تحسين قدرة المحاصيل على تحمل ظروف الإجهاد المختلفة.
3- زيادة مقاومة النباتات للأمراض.
4- المحافظة على الصفات الجينية المرغوبة للمحاصيل الزراعية.
5- رفع كمية المواد الفعالة في النبات، حيث يوجد حاليًا أكثر من 800 منتج سمادي على مستوى العالم ومنها النانو يوريا يعتمد على الأكسيدات الصغرى في الصورة النانوية، مع توقع زيادة هذه المنتجات في السنوات المقبلة.
6- تغطية حوالي 15% من المنتجات السمادية بالعناصر الصغرى النانوية لتلبية احتياجات النباتات.
7- استخدام المواد النانوية لتغطية الأسمدة التقليدية بهدف تسهيل امتصاصها وزيادة كفاءتها.

يمكن القول إن استخدام المواد النانوية كبديل للأسمدة التقليدية أو كحوامل لمكوناتها يوفر مزايا متعددة، مثل زيادة التحكم في عملية التوجيه، وتحسين الاستجابة النباتية للأسمدة بسبب سهولة دخولها إلى الخلايا، بالإضافة إلى كونها وسيلة فعالة لنقل المركبات إلى المواقع المستهدفة داخل النبات، سواء في الأوراق أو الجذور أو الثمار أو باقي الأجزاء النباتية.

أهم مميزات الأسمدة النانوية.

يُعد استخدام تكنولوجيا النانو في الأسمدة واعدًا لتحسين تركيبات الأسمدة وكفاءتها، غير أن التقدم في هذا المجال يبقى محدودًا بسبب انخفاض تمويل الأبحاث وغياب اللوائح الواضحة وسياسات الابتكار. وتشير مراجعة براءات الاختراع إلى أن استخدام النانو في تطوير الأسمدة ظل منخفضًا نسبيًا، إذ سُجِّلت حوالي 100 براءة اختراع وطلبات براءات بين عامي 1998 و2008، مقارنة بأكثر من 6000 براءة اختراع في مجال الأدوية خلال نفس الفترة.

تُعد المواد النانوية في برامج التسميد بديلاً فعالًا للأسمدة التقليدية، حيث تتميز بالعديد من المزايا، بما في ذلك:

- صغر حجمها، مما يقلل الحاجة إلى مساحات كبيرة للتطبيق.
- إمكانية استخدامها عن طريق الرش على المجموع الخضري، ما يتيح استفادة النبات بصورة أسرع.
- سرعة الامتصاص، مما يسمح بتطبيقها في الأوقات المناسبة حسب احتياجات النبات الفعلية.
- الحاجة إلى كميات أقل مقارنة بالأسمدة التقليدية؛ فعلى سبيل المثال، 1 كجم من سماد النانوفوسفات يمكن أن يغني عن 150–200 كجم من سماد سوبر فوسفات في مزارع الموالح (Iyabo, 2020).
- حماية البيئة وصحة الإنسان مقارنة بالأسمدة الكيميائية التقليدية.
- زيادة ربحية المزارع نتيجة تقليل تكاليف التسميد والرش.

- تقليل استهلاك الموارد والطاقة، مما يدعم التوسع الاقتصادي الصديق للبيئة.
- المساهمة في الحد من تلوث التربة والمياه وتقليل الانبعاثات الكربونية الناتجة عن مصانع الأسمدة التقليدية.
- تقليل إجهاد النباتات عند استخدام الأسمدة النانوية في ظروف بيئية غير ملائمة.
- تحسين إنبات البذور وزيادة قوة البادرات على تحمل الظروف المختلفة عند نقعها في الأسمدة النانوية.

باختصار، توفر الأسمدة النانوية حلاً فعالًا يدمج بين زيادة كفاءة الإنتاج الزراعي والحفاظ على البيئة والصحة العامة، مما يجعلها خيارًا مستقبليًا واعدًا في الزراعة المستدامة.

بعض الدراسات المنفذة باستخدام المركبات النانوية فى الانتاج النباتى

1. في دراسة للمقارنة بين تاثير الرش بنانو الحديد المخلبي واضافة السماد العضوي لنبات المورينكا في محتوى الاوراق من العناصر الغذائية الكبرى N , P , K , Ca, Mg اظهرت النتائج ان الحديد النانوي بالتركيز (2غم/ لتر^{1}) حقق اعلى نسبة مئوية من العناصر الغذائية المدروسة مقارنة بإضافة السماد العضوي الذي سجل اقل المعدلات لتلك العناصر(ياسين وكاظم، 2017 a). جدول (1).

جدول (1): تأثير تراكيز نانو الحديد المخلبي والجبرلين والسماد العضوي Acadian وتداخلاتها في النسبة المئوية للنيتروجين في اوراق نبات *Moringa oleifera*

السماد العضوي غم/ لتر$^{-1}$	تراكيز الجبرلين GA3 ملغم/ لتر$^{-1}$	تأثير تراكيز نانو الحديد المخلبي غم.لتر'					التداخل العضوي بين الجبرلين والسماد العضوي
		0	1	2	3	4	
0	0	3.13	3.20	3.70	3.80	3.40	3.45
	200	2.87	3.69	4.41	3.52	3.59	3.61
	400	3.33	4.86	4.02	3.66	3.15	3.80
1	0	3.84	3.76	4.51	4.11	4.03	4.05
	200	3.18	4.98	5.10	4.78	2.94	4.20
	400	2.84	2.67	3.14	2.94	3.08	2.93
متوسط تأثير نانو الحديد المخلبي		3.20	3.86	4.15	3.80	3.36	
L.S.D 0.05		0.08					0.09
التداخل الثلاثي		0.20					

2. في دراسة لتاثير المخصبات النانوية وطرق الاضافة والسماد العضوي Drin في المحتوى المعدني لأوراق نبات الديباج اظهرت النتائج ان استعمال الحديد النانوي بالتركيز ضعف الموصى به سجل اعلى محتوى من النيتروجين وتفوق نانو الزنك بالتركيز الموصى بتسجيل اعلى محتوى للفسفور في حين استعمال نانو الحديد والزنك معا بالتركيز ضعف الموصى تفوق في محتوى الاوراق من المغنسيوم مقارنة باستعمال السماد العضوي. واظهرت طريقة الرش الورقي للسماد النانوي اعلى نسبة مئوية لمحتوى الاوراق من النايتروجين مقارنة بطريقة الرسمدة (ياسين وكاظم، 2017 b)، (Al-Dulaimi, 2022). جدول (2).

جدول (2): تأثير المخصبات النانوية وطريقة الاضافة والسماد العضوي Drin وتداخلاتها في النسبة المئوية للنتروجين في اوراق نبات الديباج *Calotropis procera*

طريقة الاضافة	تراكيز النانو	السماد العضوي مل/ لتر$^{-1}$		تراكيز النانو x طريقة الاضافة	متوسط طرق الاضافة
		0	5		
رش ورقي	0	0.897	1.317	1.090	1.240
	Fe	1.293	1.290	1.292	
	Fe	1.117	1.040	1.078	
	Zn	1.163	1.880	1.522	
	Zn	1.103	1.220	1.162	
	Zn+fe	0.977	1.643	1.318	
	Zn+fe	1.010	1.460	1.218	

طريقة الاضافة	تراكيز النانو	السماد العضوي مل/ لتر$^{-1}$		تراكيز النانو x طريقة الاضافة	متوسط طرق الاضافة
		0	5		
رسمدة	0	0.793	1.063	0.878	1.125
	Fe	1.117	1.493	1.305	
	Fe	1.073	1.270	1.172	
	Zn	1.050	0.977	1.013	
	Zn	1.183	1.130	1.157	
	Zn+fe	1.073	1.207	1.140	
	Zn+fe	1.043	1.377	1.210	
LSD 0.05	التداخل الثنائي		0.258		0.097
	التداخل الثلاثي		0.365		

3. في دراسة لمعرفة تأثير الأسمدة النانوية وطرائق اضافتها في نمو وحاصل نخيل التمر صنف الخستاوي بعمر عشر سنوات تضمنت التجربة عاملين الاول هو استخدام ثلاث طرائق للتسميد وهي الرش والحقن والتسميد الأرضي والعامل الثاني هو استعمال الأسمدة المكونة من مستخلص الطحالب البحرية سوبر فيفتي المنتج بتقنية النانوتكنولوجي والتسميد بالمركب اوبتيمس – بلص المنتج بتقنية النانوتكنولوجي والتسميد NPK متعادل. أظهرت النتائج تفوق معاملة التسميد بمستخلص الطحالب البحرية سوبر فيفتي المنتج بتقنية النانوتكنولوجي في إعطاء اعلى وزن طري للثمرة وزيادة كمية الحاصل بالنخلة الى 36.57 كغم (Jubeir and Ahmed, 2019). جدول (3).

جدول (3) تأثير الاسمدة وطرق التطبيق وتفاعلها على الخصائص النباتية.

المعاملة	المادة الجافة في الاوراق (%)				تركيز الكلوروفيل ملغرام$^{-1}$100g.				بيروكسيديز 1- غرام			
Treat	A1	A2	A3	Mean	A1	A2	A3	Mean	A1	A2	A3	Mean
F0	33.56	35.55	34.78	34.63	29.46	29.90	30.08	29.81	17.10	17.37	18.10	17.52
F1	35.34	36.98	38.30	36.87	30.39	30.43	30.43	30.42	17.73	22.66	22.31	20.90
F2	35.90	36.45	34.96	35.77	30.47	32.93	53.33	32.24	20.22	23.44	24.35	22.67
F3	35.66	38.11	37.15	36.97	30.42	32.78	30.73	31.31	20.93	23.34	24.49	22.92
F4	36.19	40.56	35.76	37.50	33.08	33.06	33.95	33.36	22.69	23.16	27.30	24.38
F5	37.28	43.95	44.78	42.00	33.64	34.06	34.53	34.08	26.76	27.25	27.83	27.28
Mean	35.66	38.60	37.62		31.24	32.19	32.17		20.91	22.87	24.07	
LSD	F	A	التداخل		F	A	التداخل		F	A	التداخل	
0.05	2.67	1.89	4.63		0.06	0.04	0.11		0.27	0.19	0.47	

4. في دراسة للتأثيرات الضارة للجزيئات النانوية على تركيب التربة وميكروباتها قام الوكيل (2013) بعرض بعض الدراسات حول ذلك، ومنها:

- دراسة جامعة Wageningen، هولندا (2012): تناولت تأثير الجزيئات النانوية من الكربون والمواد العضوية والفضة على حياة ديدان الأرض Earthworms، والتي تعتبر مؤشراً على جودة التربة للزراعة. وأظهرت النتائج تأثيرًا سلبيًا لجزيئات الكربون النانوية على بقاء الديدان وتكاثرها.
- جمعية الكيمياء الأمريكية (American Chemical Society, 2011): أشار باحثون من كاليفورنيا إلى التأثير السلبي لثاني أكسيد التتانيوم النانوي وأكسيد الزنك على المجتمع الميكروبي للتربة. وأظهرت التحليلات الحديثة انخفاض معدل تنفس الكائنات الحية في التربة بشكل كبير، وانخفاض الكتلة الميكروبية، إلى جانب تغيّر تراكيب المجتمع الميكروبي.
- دراسة جامعة RMIT، أستراليا: بحثت تأثير الجزيئات النانوية لمركبات النحاس وأكسيد الزنك على التنوع البيولوجي للتربة. وأظهرت التجارب زيادة حساسية الكائنات الدقيقة لهذه المركبات مع مرور الوقت، مع تأثير سلبي على البكتيريا والبرتوزوا، خاصة البكتيريا سريعة النمو، وهذا ما أشار اليه (Yuan, 2012) وظهور تغييرات وراثية محدودة في تراكيبها.

كذلك حذّر الكثير من الخبراء في المجال الزراعي من التركيز على هذا النوع من المركبات لكونها تمثل خطراً على سلامة الغذاء والصحة العامة للإنسان والإستعاضة بالمواد العضوية (بوركبة وآخرون، 2025).

بعض تطبيقات استخدام المركبات النانوية في الإنتاج النباتي

تُستخدم العناصر الغذائية الكبرى والصغرى في صورة نانوية، مما يتيح تطبيقها في مختلف المحاصيل الحقلية والبستانية، مثل النيتروجين، الفوسفات، البوتاسيوم، الحديد، الزنك، والكالسيوم. كما تُستعمل المواد النانوية في إنتاج مواد تعبئة وتغليف للخضروات والفاكهة لتقليل الفاقد وزيادة عمرها الافتراضي والحفاظ على مواصفاتها. ومن أهم التطبيقات العملية:

1. النيتروجين النانوي: يعد المصدر الغذائي المعدني الرئيسي للكتلة الحيوية والألياف في الزراعة. ومع ذلك، فإن كفاءة استخدام النيتروجين المطبق في التربة منخفضة جدًا عند الأسمدة التقليدية، حيث يفقد ما بين 50–70% نتيجة الذوبان السريع والتسرب في شكل نترات، ملوثًا المجاري المائية ومانحًا غازات الأمونيا وأكاسيد النيتروجين. وقد اقترحت الأبحاث أن تطبيق تكنولوجيا النانو قد يساعد في تحسين كفاءة استخدام النيتروجين. (Ali et al., 2024)
2. أنابيب الكربون النانوية وجسيمات أكسيد الزنك: أظهرت قدرة على اختراق بذور الطماطم والأنسجة الجذرية لأنواع العلف، مما يفتح آفاقًا لتطوير أنظمة توصيل المواد الغذائية للنبات على المستوى النانوي. (Sadaqa & Bagash, 2020)
3. الكالسيوم النانوي: عند رشه على العنب المزروع تحت إجهاد الملوحة، أدى إلى زيادة النمو الخضري وتركيز الكلوروفيل في الأوراق (Sabir et al., 2014).
4. جزيئات السيليكا النانوية: تقلل من إصابة الخضروات والفواكه بعفن البوتريتس أثناء التخزين والشحن، مما يزيد عمر الثمار ويقلل فقد الوزن ومعدل التنفس (Han et al., 2008)، (الغامدي وآخرون، 2024).
5. الأسمدة الفوسفاتية النانوية: استخدام 1 كجم منها يعادل 150–200 كجم من سوبر فوسفات في مزارع الموالح، مما يقلل كمية الأسمدة المضافة للتربة.
6. أكسيد الزنك النانوي Zn NPs: رشه على الفول السوداني بتركيز أقل 15 مرة من التركيز الموصى به لسلفات الزنك أدى إلى زيادة المحصول الكلي بنسبة 30%. (Nooruldeen, 2021)
7. جزيئات الفضة النانوية Ag-NPs: عند تطبيقها على الريحان، حسّنت نمو النباتات وزادت محصول البذور ورفع تركيز المواد الفعالة في الأوراق. كما أظهرت تطبيقات على زهور القطف الجلاديولس والتبروز إطالة عمر الأزهار.
8. الزنك، الحديد، والكالسيوم النانوي: أدى تطبيق هذه العناصر على ثمار الطماطم إلى زيادة محتوى فيتامين C والمواد الصلبة الذائبة، بالإضافة إلى صلابة الثمار (Bandyopadhyay et al., 2014).
9. الأسمدة التقليدية المغلفة بالمواد النانوية: عند استخدامها على نبات القمح، ساهمت في زيادة إنبات البذور إلى 99%، وتحسين النمو الخضري وكمية المحصول (Kumar et al., 2024)، نتيجة قدرة المركبات النانوية على اختراق البذور وتحسين امتصاصها للمواد العضوية والوظائف الحيوية

الإستنتاج

تُظهر تقنيات النانو في الزراعة إمكانات كبيرة لتحسين إنتاجية المحاصيل وجودتها مع تعزيز الاستدامة البيئية والصحة النباتية والإنسانية. فقد بيّنت العديد من الدراسات أن استخدام الأسمدة النانوية، والجزيئات المعدنية النانوية، وأنظمة النقل الذكية للعناصر الغذائية يسهم في رفع كفاءة امتصاص العناصر الكبرى والصغرى، وتحسين إنبات البذور، وزيادة مقاومة النباتات للأمراض والإجهادات البيئية. كما يمكن لهذه التقنيات أن تقلل من الفاقد أثناء عمليات الإنتاج والتخزين، وأن تعزز من كفاءة استخدام الموارد الزراعية المحدودة، خصوصًا المياه والأسمدة.

إلا أن هذه النتائج الواعدة ما تزال محل نقاش علمي واسع، إذ تشير بعض الأبحاث إلى أن الخصائص الفريدة للجسيمات النانوية قد تؤدي إلى تأثيرات غير متوقعة على بنية التربة وديناميكية المجتمعات الميكروبية والتوازن البيئي على المدى الطويل. كما أن نقص المعايير الموحدة لتقييم السمية النانوية وصعوبة تتبع مصير هذه الجسيمات في الأنظمة البيئية يمثلان تحديًا أمام التبني الآمن لتلك التقنيات.

وعليه، فإن تحقيق الاستفادة القصوى من تقنيات النانو في الزراعة يتطلب توجيه البحث العلمي نحو فهم آليات التأثير المتبادل بين الجسيمات النانوية ومكونات البيئة الزراعية، وتطوير إرشادات تنظيمية واضحة تضمن استخدامها بطريقة مسؤولة ومستدامة. إن الجمع بين التقدم التقني والإدارة البيئية الواعية سيحدد مستقبل تطبيقات النانو الزراعية بوصفها أحد المسارات الرئيسة لتحقيق زراعة ذكية ومستدامة عالميًا.

المراجع العربية

- الخزرجي، خلف قحطان و الزبيدي، أسيل باسم و عناني، رنا عفيف (2011). *العلم النانوي ودوره في حياتنا*. الجامعة التكنولوجية – دار دجلة للطباعة. العلم النانوي ودوره في حياتنا .
- الرمادي، حسن رجب و شحاته، سعيد عبد الله و يوسف، ثروت مختار و فيظى، صلاح الدين أحمد (2016). *دور السيليكون والنانو سيليكون في تغذية النبات*. كلية الزراعة - جامعة كفر الشيخ الطبعة الاولى 271. ص.
- الغامدي، عبدالله مسفر وراشد، حسن محمد والجندبي، موردي محمد (2024). *تأثير جسيمات النانو من السيليكون على مكونات الفوتوكيمياء (النشاط البيولوجي) والخصائص الفسيولوجية لنبات الكزبرة تحت ضغط الماء*. مجلة العلوم الزراعية والبيئية والبيطرية, 8(1), 8-37. https://doi.org/10.26389/AJSRP.A290124
- الوكيل، محمد عبدالرحمن (2013). *تأثير الجزيئات المتناهية الصغر على تركيب التربة وميكروباتها*. مجلة علوم البيئة والتكنولوجيا, 6(2), 35–46.
- بوركبة ف.، و غردي م. (2025). *الزراعة العضوية ودورها في تحقيق الأمن الغذائي المستدام*. مجلة جامعة فزان العلمية, 424–436. https://doi.org/10.64500/.vi.553
- علي، نورالدين شوقي والجوذري، حياوي ويوة (2017). *تطبيقات التقنية النانوية للمغذيات الصغرى في الإنتاج الزراعي*. مجلة العلوم الزراعية العراقية, 48(4), 984–990. https://doi.org/10.36103/ijas.v48i4.355
- هاشم ن. ص.، داود و. م & .،الشهواني ا. و. (2023). دراسة تصنيفية للأنواع البرية من العائلة الصليبية Brassicaceae في محافظة ديالي – العراق .*مجلة العلوم الزراعية والبيئية والبيطرية* https://doi.org/10.26389/AJSRP.B060123 .13-1 ,(2) ,7 ,
- نصيف، انوار حسين و الزبيدي، نجم عبدالله جمعة وعبد، رباب مجيد (2023). *تأثير التسميد العضوي والحيوي في حاصل نبات الحبة السوداء (Nigella sativa L.)*. (2023) مجلة العلوم الزراعية والبيئية والبيطرية ، 7(2)، 114-120.
- https://doi.org/10.26389/AJSRP.R190123.120-114
- ياسين، عبدالامير علي وكاظم، اخلاص ميري (2017 a). *تأثير رش تراكيز مختلفة من نانو الحديد المخلبي والجبرلين والسماد العضوي (أكادين) في محتوى العناصر الكبرى لأوراق نبات المورينكا*. مجلة الفرات للعلوم الزراعية, 9(3), 180–199.
- ياسين، عبدالامير علي وكاظم، ،سعدية مهدي (2017 b). *تأثير المخصبات النانوية وطريقة الإضافة والسماد العضوي Drin في المحتوى المعدني لأوراق نبات الديباج*. مجلة الفرات للعلوم الزراعية, 9(4).

References

- Al-Dulaimi, Fatin H. (2022). *Morphological and anatomical studies of Calotropis procera (Asclepiadaceae) in Iraq*. Minar International Journal of Applied Sciences and Technology, 4(4). https://doi.org/10.47832/2717-8234.13.1
- Ali, Nooruldeen. S. and B.H. A. Al- Amery. (2015). *Agronomic efficiency of Zn-DTPA and boric acid fertilizers applied to calcareous Iraqi soil*. The Iraqi Journal of Agricultural Sciences, 46(6), 1117–1122.
- Ali, T., Zaidan, R., Othman, J. (2024). *Effect of some Nano fertilizers on growth and productivity of Broad Bean Vicia faba L* . Latakia University Journal -Biological Sciences Series, 46(2), 61–79. Retrieved from https://journal.latakia-univ.edu.sy/index.php/bioscnc/article/view/16645
- Bardhiya, H.S., Mutyala, P., Verma, P., Gourshettiwar, P. (2025). *A Study on the Present Use of Nanotechnology in Agriculture and Food*. In: Chaki, N., Roy, N.D., Chakraborty, S., Debnath, P., Yang, XS. (eds) Proceedings of International Conference on Data Analytics and Insights. ICDAI 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1233. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3287-9_4
- Bandyopadhyay, S., Ghosh, K., & Varadachari, C. (2014). *Multi-micronutrient slow-release fertilizer of zinc, iron, manganese, and copper*. International Journal of Chemical Engineering, Article ID 327153. http://dx.doi.org/10.1155/2014/327153
- FAO. (2012). *The zinc homeostasis network of land plants*. In S. A. Sinclair & U. Kramer (Eds.), Biochimica et Biophysica Acta, 1823, 1553–1567.
- Han, J., Guenier, A. S., Salmieri, S., & Lacroix, M. (2008). *Alginate and chitosan functionalization for micronutrient encapsulation*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 56, 2528–2535. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf0734019
- Jubeir, S. M., & Ahmed, W. A. (2019). *Effect of nanofertilizers and application methods on vegetative growth and yield of date palm*. Iraqi Journal of Agricultural Sciences, 50(1), 267–274.

- Khattak, W.A., Ullah, M.W., Manan, S., Islam, S.U., Khattak, W.A., Ul-Islam, M. (2024). *Emerging Applications and Future Trends of Agri-nanotechnology*. In: Shahzad, R., Fiaz, S., Qayyum, A., Ul Islam, M., Lee, IJ. (eds) Revolutionizing Agriculture: A Comprehensive Exploration of Agri-Nanotechnology. Nanotechnology in the Life Sciences. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76000-6_19
- Kottegoda, N., Sandaruwan, C., Priyadarshana, G., Siriwardhana, A., Rathnayake, Upendra A. , Arachchige, RD.M.B., Kumarasinghe, A.R., Dahanayake, D., Karunaratne, V. and Gehan A. J. Amaratunga. (2017). *Urea-hydroxyapatite nanohybrids for slow release of nitrogen*. ACS Nano, 11(2), 1214−1221. https://doi.org/10.1021/acsnano.6b07781
- Kumar, A., Sheoran, P., Kumar, N. *et al.*(2024). *Elucidating morphogenic and physiological traits of rice with nitrogen substitution through nano-nitrogen under salt stress conditions*. BMC Plant Biol 24, 908. https://doi.org/10.1186/s12870-024-05569-5
- Levard, C., Hotze, E.M., Lowry, G.V. and Brown Jr., G.E. (2012) *Environmental Transformations of Silver Nanoparticles: Impact on Stability and Toxicity*. Environmental Science & Technology, 46, 6900-6914. https://doi.org/10.1021/es2037405
- Iyabo Christianah Oladipo and Olatayo Shamsudeen Ishola. 2020. Biofortification and Human Health.Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci. 9(7): 247-271. doi: https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.907.028
- Monreal, C. M., DeRosa, M., Mallubhotla, S. C., Bindraban, P. S., & Dimkpa, C. (2015). *The application of nanotechnology for micronutrients in soil-plant systems*. VFRC Report 2015/3. Virtual Fertilizer Research Center, Washington, D.C. https://www.vfrc.org/publications/Report2015/3
- Nooruldeen S. Ali. (2021). *"Zinc Biofortification of Cereal Crops: A Review Article"*. Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition 7 (2):22−28. https://doi.org/10.9734/ajsspn/2021/v7i230108.
- Pinstrup-Andersen, P. (2011). *The food system and its interaction with human health nutrition. Leveraging agriculture for improved nutrition in health*. 2020 Conference, Brief 13. International Food Policy Research Institute, Washington, D.C. https://www.ifpri.org/publication/leveraging-agriculture-improved-nutrition
- Phogat, N., KhanShankar, N. S., Ansary, A., & Uddin, I. (2016). Fate of inorganic nanoparticles in agriculture. Advanced Materials Letters, 7(1), 3−12. https://doi.org/10.5185/amlett.2016.6149
- Sabir, S., Arshad, M., & Chaudhari, S. K. (2014). *Zinc oxide nanoparticles for revolutionizing agriculture: Synthesis and applications*. Scientific World Journal, 8(7), 187−199. https://doi.org/10.1155/2014/187199
- Sadaqa E. A. A., & Bagash M. M. Y. (2020). Effect of Garlic extract and zinc on germination and growth of Tomato seeds. *University of Aden Journal of Natural and Applied Sciences*, *24*(1), 11−18. https://doi.org/10.47372/uajnas.2020.n1.a02
- Wageningen Alterra UR. (2013). *Nanoparticles effects on soil exposed*. Retrieved from https://www.wur.nl/en/Research-Results/Research-Institutes/alterra.htm
- Yuan, G., Schimel, J. P., & Holden, P. A. (2012). *Identification of soil bacteria susceptible to TiO_2 and ZnO nanoparticles*. Applied and Environmental Microbiology, 78(18), 6749−6758. https://doi.org/10.1128/AEM.01208-12