التسميد بتقنية النانو

د. عبدالرحمن الحبيب

مقدمة

هناك مجموعة من التقنيات والاستراتيجيات التي يمكن، على الأقل من الناحية النظرية، تطبيقها بنجاح لتحسين الأمن الغذائي بطريقة مستدامة. وتعد تقنية النانو إحدى هذه الاستراتيجيات التي يتم الاعتراف بها بشكل متزايد باعتبارها ذات إمكانات كبيرة.

تقنية النانو هو العلم الذي يهتم بدراسة خواص المواد بمقياس النانو. وهو متعدد التخصصات، يتضمن المعرفة من علم الأحياء والكيمياء والفيزياء وتخصصات أخرى. الاستثمار في العلوم البيولوجية بما في ذلك الزراعة لا يزال قليلاً فهناك الكثير من المجالات المتاحة لعلماء الزراعة لاستغلال التكنولوجيا الرائعة. في مجال العلوم الزراعية، لا يزال تطبيق تكنولوجيا النانو فيما يتعلق بالتربة وإدارة المحاصيل في مرحلته الأولى.

تُعرَّف تقنية النانو بأنها معالجة أو تجميع ذاتي للذرات الفردية أو الجزيئات أو المجموعات الجزيئية في هياكل لإنشاء أجهزة مواد ذات خصائص جديدة أو مختلفة إلى حد كبير. تم تعريف مصطلح "تقنية النانو" لأول مرة في عام 1974 من قبل نوريو تانيجوتشي من جامعة طوكيو للعلوم. يتضمن علم النانو والتكنولوجيا الدراسة والعمل على المادة في نطاق صغير للغاية يسمح لنا بالعمل والتعامل مع وإنشاء الأدوات والمواد والهياكل على المستوى الجزيئي، وغالبًا ما يتم ذلك على مستوى ذرات إلى هياكل وظيفية ذات أبعاد نانومترية (1).

هناك فرص كبيرة لاستغلال تقنية النانو في الزراعة، ولكن في نفس الوقت ثمة تحديات رئيسية في تطبيقاتها، سواء في طريقة التصنيع أو طريقة التسميد وتأثيرها على أهمها كفاءة السماد ومن ثم على الإنتاجية. كما أن القبول العام سواء من المنتج (الشركة، المزارع) أو المستهلك، وإصدار التشريعات والقوانين المنظمة للاستخدام والمتعلقة بالسلامة ومعايير الجودة يعد من التحديات التي ينبغي أخذها في الاعتبار.

بدايات استخدام تقنية النانو

استخدام المواد النانوية في إنتاج الأغذية أبطأ منه في القطاعات الأخرى. على سبيل المثال، بدأت الأبحاث في مجال أدوية النانو منذ أكثر من ثلاثة عقود. في عام 1995، كان دوكسيل أول دواء نانو معتمد من هيئة الغذاء والدواء الأمريكية، وتلاه العديد من الأدوية الأخرى. لم تبدأ الأبحاث حول تطبيقات تكنولوجيا النانو في الزراعة إلا في منتصف العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، وعلى الرغم تنامي الأبحاث التي تم إجراؤها كما يتضح من عدد المنشورات وبراءات الاختراع، فلا يزال هناك عدد قليل فقط من المنتجات في السوق (17).

تقنية النانو في الزراعة

تشمل تقنية النانو في الزراعة من حيث المواد الكيميائية النانوية: الأسمدة النانوية، ومبيدات الحشائش النانوية، ومبيدات الآفات النانوية، ومبيدات الفطريات النانوية (1). نظرًا لحجمها الفريد (واحد من المليون من المليمتر)، تُظهر هذه الجسيمات خصائص مختلفة عن نظيراتها الأكبر حجمًا، وتصبح التفاعلات الميكانيكية الكمية مختلفة عن القوى الميكانيكية التقليدية، مما يسمح بانتشار خصائص فيزيائية وكيميائية فريدة نظرًا لارتفاع مساحة سطح الجسم ولوجود نسبة عالية من الذرات على السطح. بهذه التفاعلات يتم تحسين خصائص مثل قدرة التبادل الكاتيوني، والانتشار، وامتصاص الأيونات .

تطوير تكنولوجيا النانو في الزراعة يركز حالياً على الأسمدة النانوية لتوفير أيونات فعالة، وإيصال المغذيات للخلايا النباتية، وتحولات الجينات النباتية لإنتاج نباتات ذات صفات مرغوبة كمقاومة الجفاف وسرعة النمو. تُستخدم التقنيات الفيزيائية (من أعلى إلى أسفل) وكذلك التقنيات الكيميائية (من أسفل إلى أعلى) لإنشاء مواد نانوية أولية. تتضمن الجسيمات النانوية التي يتم إنشاؤها من خلال النهج التنازلي تفكيك الكتلة إلى وحدات بحجم النانو. تتكون الجسيمات النانوية التي يتم إنشاؤها من خلال نهج من أسفل إلى أعلى من الذرات والجزيئات والمونومرات الأصغر (جزيء يمكن ربطه بجزيئات أخرى مماثلة لتكوين بوليمر) (2). استنادًا إلى المواد الخام، يتم تقسيم سوق الأسمدة النانوية العالمية إلى أسمدة نانو قائمة على الكربون وأسمدة نانو قائمة على النيتروجين.

بداية الأسمدة النانوية العالمية

تمت صياغة أول خارطة طريق في العالم لتطبيق تقنية النانو في الزراعة من قبل وزارة الزراعة الأمريكية (USDA) في عام 2002 (15). بعدها أطلقت الحكومات في جميع أنحاء العالم العديد من المبادرات والبرامج الخاصة بتكنولوجيا النانو للاستفادة من إمكاناتها لتحقيق مكاسب صحية واجتماعية واقتصادية. في عام 2005، أطلقت أكثر من 62 دولة أنشطة وطنية خاصة بتكنولوجيا النانو في جميع أنحاء العالم. تم الترويج لجهود البحث والتطوير (R&D) بشكل كبير في جميع أنحاء العالم مع الإعلان عن المبادرة الوطنية لتقنية النانو (NNI) في عام 2001 من قبل الولايات المتحدة الأمريكية. NNI هو برنامج البحث والتطوير الأكثر شمولاً في علم وتكنولوجيا النانو في العالم (16).

الأسمدة النانوية

الأسمدة النانوية هي مزيج من تكنولوجيا النانو والزراعة، تستخدم في الغالب لتحسين كفاءة الأسمدة. تحمل الأسمدة النانوية مغذيات ذات أبعاد نانوية تتراوح من 1 إلى 100 نانومتر ولكن أبعادها عادة ما تقع في النطاق بين 30 و 40 نانومتر. نظرًا لارتفاع مساحة سطح الأسمدة النانوية فهي قادرة على الاحتفاظ بكمية كبيرة من أيونات المغذيات التي يتم إطلاقها بطريقة بطيئة مماثلة لمتطلبات المحاصيل (4). تضاف الأسمدة النانونية إلى التربة أو يتم رشها على النباتات أو حقنها مع مياه الري (2).

على الرغم من وجود عدد قليل من الدراسات التي تقارن تأثيرات التسميد النانوي مقابل التقليدي على إنتاج المحاصيل، فقد وجدت العديد من الآثار الإيجابية لاستخدام الأسمدة النانوية مقارنة بالأسمدة التقليدية بالإضافة إلى زيادة كفاءة استهلاك السماد ورفع جودة المحاصيل مما يقلل من الآثار الضارة لكثرة استخدام الأسمدة التقليدية (25).

وحسب دراسة استعراضية (24) أدى الرش الورقي للنباتات الغضة إلى زيادة إنتاجية المحاصيل بنسبة 37.7٪ في الدخن اللؤلؤي (Tarafdar et al. 2014) و18-23٪ في القطن (E. and Baburai Nagesh، 2019) مقارنةً بالأسمدة التقليدية. لاحظ Afshar و Rahimihaghigh (2014) ارتفاع محتوى الزنك والبروتين في الحبوب دون التأثير على الإنتاجية عندما تم تزويد المغذيات بنانو ZnO مقارنة مع ZnO التقليدي. عند مقارنتها بالنباتات المزروعة بالأسمدة الاصطناعية، أفاد شريفي (2016) أن الاستخدام الورقي للزنك والحديد باستخدام السماد النانوي أدى إلى زيادة محتوى البروتين الخام، والفوسفور، والكربوهيدرات، وكذلك المحصول البيولوجي مقارنةً بالتسميد التقليدي.

عادة بالطريقة التقليدية يُفقد حوالي نصف كمية السماد المضاف، مما له آثار سلبية اقتصادياً وبيئياً. أما الأسمدة النانوية فلديها كفاءة عالية في امتصاصها من قبل النبات بسبب ارتفاع مساحة سطحها نسبة إلى حجمها. في دراسة أجريت على استخدام الأسمدة الفوسفورية النانوية، تم تحقيق كفاءات امتصاص تصل إلى 90.6٪ (3). نتج عن المعاملة باستخدام 50٪ من الجرعة الموصى بها من الفوسفور من nano-KH2PO4 معدل بناء ضوئي أعلى مقارنة بالمعالجة باستخدام 100٪ من الفوسفور من السماد التقليدي. لذلك، قد يسمح استخدام nano-KH2PO4 بتقليل كمية الأسمدة المضافة، وخفض تكاليف الإنتاج ومخاطر التلوث.

تلعب الأسمدة دورًا محوريًا في الإنتاج الزراعي، فحوالي 35-40٪ من إنتاجية المحصول تعتمد على الأسمدة. تشير التقديرات إلى فقدان حوالي 40-70٪ من النتروجين و80-90٪ من الفسفور و50-90٪

البوتسيوم من الأسمدة المطبقة في البيئة والتي لا تصل إلى النبات مما يتسبب في خسائر مستدامة واقتصادية. أما الأسمدة النانوية فتعمل على زيادة كفاءة استخدام العناصر الغذائية بمقدار 3 مرات كما أنها توفر القدرة على تحمل الإجهاد. نظرًا لأن هذه الأسمدة النانوية تحتوي على مغذيات ومحفزات النمو مغلفة في بوليمرات النانو، سيكون لها أيضًا إطلاق بطيء وفعال. عند المقارنة بمتطلبات الأسمدة الكيماوية والتكلفة، فإن الأسمدة النانوية أرخص اقتصاديًا ومطلوبة بكميات أقل (3).

تم عرض 15 دراسة نانونية باستخدام الذرة كنظام نموذجي وقد كشفت أن كفاءة استهلاك النيتروجين من الأسمدة النانوية بلغت 82٪ بينما الأسمدة التقليدية (اليوريا) سجلت 42٪ مع كفاءة استهلاك صافية أعلى للنيتروجين بنسبة 40٪ والتي بالكاد يمكن تحقيقه في النظام التقليدي (4، 5).

ومن الفوائد الأخرى لاستخدام الأسمدة النانوية القدرة على توفير إطلاق بطيء للعناصر المغذية مقارنة بالأسمدة التقليدية، مما يمنح النبات فترة أطول للاستفادة من السماد. قدمت تقنية النانو جدوى لاستكشاف المواد النانوية أو ذات البنية النانوية كحامل للأسمدة أو ناقلات تطلق العناصر بتحكم لبناء ما يسمى بالأسمدة الذكية كمرافق جديدة لتعزيز كفاءة استخدام المغذيات وتقليل تكلفة التلوث البيئي. يمكن طلاء جزيئات الأسمدة بأغشية نانوية تسهل إطلاق المغذيات بشكل بطيء وثابت (6) كما هو متوقع مع زيادة القدرة على امتصاص العناصر المغذية، وجد أن المحاصيل تظهر صحة أفضل عند استخدام الأسمدة النانوية مقارنة بالتقليدية (7، 8، 9).

في بحث يهدف إلى دراسة تأثير الرش الورقي بسماد النانو NPK على أشجار التين بعمر سنة واحدة (cv. Black Mission) من حيث أداء نمو الأشجار وكذلك على النشاط الميكروبي للتربة. وكانت التراكيز المدروسة من النانو NPK هي 100، 200، 300، 400 و500 جزء في المليون بالإضافة إلى معاملة المقارنة المطبقة لمدة موسمين. أشارت النتائج المتحصل عليها لكلا الموسمين إلى أن جميع تراكيز الأسمدة النانوية أدت إلى تحسن معنوي في مؤشرات النمو الخضري وصحة التربة مقارنة بمجموعة السيطرة. ومع ذلك، تم تسجيل أعلى القيم للوزن الرطب والجاف للأوراق، ومساحة الورقة، والمحتوى المائي للورقة نتيجة التسميد الورقي بتركيز 300 جزء في المليون. بينما أعطت التراكيز 400 و500 جزء في المليون nano-NPK أعلى القيم لمحتوى N، P، K، Ca، Mg، والكلوروفيل في الأوراق. من ناحية أخرى، تم العثور على أعلى نشاط بكتيري في جذور التين هنا عند رشها ورقياً باستخدام النانو NPK بتركيزات 300 و400 و500 جزء في المليون. بالإضافة إلى ذلك، تم تسجيل أعلى نشاط لإيزوزيم POX وPPO في 200 و300 جزء في المليون. بشكل عام، يمكن التوصية بالتسميد الورقي باستخدام النانو NPK لأنه يعزز النمو الخضري وكلوروفيل الأوراق والمحتويات المعدنية دون تأثير سلبي على النشاط الميكروبي للتربة (10).

في أطروحة دكتوراه (11) وجدت أن استعمال الأسمدة النانوية لهُ دوراً ايجابي في تحسين الصفات الخضرية والثمرية مما انعكس على تحسين نوعية الثمار وزيادة كمية الحاصل لنخيل التمر صنف خستاوي فضلاً عن ان تأثير الاسمدة النانوية في كل من الوزن الطري للثمرة وكمية الحاصل ومحتوى الثمار من الاحماض الأمينية وزيادة المواد الصلبة الذاتية.

يمكن للأسمدة النانوية زيادة كفاءة استخدام الأسمدة من خلال السماح بتوصيل العناصر الغذائية بشكل ثابت ومتسق، مما يساعد النبات على امتصاص العناصر الغذائية. وقد اقترح أن استخدام الأسمدة النانوية يمكن أن يزيد إنتاجية المحاصيل بنسبة تصل إلى 30% بالمقارنة مع الأسمدة الكيماوية العادية؛ كما وجدت دراسة (12) أن استخدام النانو بوتاسيوم سواء تسميد التربة أو الرش الورقي وكذلك الرش الورقي بالفيناس أو البوتاسين أدى إلى زيادة معنوية في احتباس الثمار ووزن العذق والمحصول مقارنة بالتسميد بكبريتات البوتاسيوم (فحص المعاملة).). كما أدت هذه المعاملات إلى تحسين جودة التمور بشكل ملحوظ من حيث زيادة وزن الثمرة ونسبة اللب والمواد الصلبة الذائبة الصلبة ونسبة السكر ومحتويات الأنثوسيانين بالإضافة إلى تقليل الحموضة الكلية والعفص الكلي مقارنة بالتسميد بجرعات البوتاسيوم الموصى بها بواسطة كبريتات البوتاسيوم.

بالمقابل، فقد أظهرت بعض الأبحاث أن استخدام الأسمدة النانوية ليس له أي فائدة أكثر من الأسمدة التقليدية (13). كذلك وجدت دراسة عدم وجود فروق معنوية بين الأسمدة التقليدية والأسمدة النانوية للعناصر الكبرى، ولكنها تقترح الاستعاضة عن الأسمدة التقليدية لتقليل التكاليف (14). كما أن هناك شكوك في فعالية التسميد النانوي عند النظر في الممارسات الزراعية الحالية واختلافها بين الدول

والمناطق والمجتمعات، مع الأخذ في الاعتبار التقلب البيئي المستجد، والقضايا المتعلقة بقابلية التوسع والتكلفة (17).

هل الأسمدة النانونية مفيدة أكثر من الأسمدة التقليدية؟

توفر المزايا التالية على الأسمدة التقليدية:

- صديقة للبيئة لكونها غير سامة.
- تعمل على تحسين خصوبة التربة وإنتاجية المحاصيل وجودتها.
- تقلل من تكلفة الإنتاج.
- تتميز بكفاءة أعلى في استخدام المغذيات.
- يوفر إطلاقًا مستهدفًا ومتوازنًا وبطيئًا للعناصر الغذائية.
- يمكن أن يقلل استخدام الأسمدة النانوية من استهلاك الأسمدة الكيماوية بنسبة كبيرة.

سوق الأسمدة النانوية العالمية

تم الوصول إلى حجم سوق الأسمدة النانوية العالمية عند 401.8 مليون دولار أمريكي في عام 2022، ومن المتوقع أن يصل إلى حوالي 1,675.61 مليون دولار أمريكي بحلول عام 2032، بمعدل نمو سنوي مركب قدره 15.4٪ خلال الفترة المتوقعة من 2023 إلى 2032، حسب تقييم Precedence Research وهي شركة مقرها كندا/الهند وواحدة من الشركات الرائدة في تقديم رؤى السوق الاستراتيجية (13).

عوامل النمو

يمكن أن يقلل استخدام الأسمدة النانوية من استهلاك الأسمدة الكيماوية بنسبة كبيرة، مما يقلل من واردات الأسمدة الكيماوية غير الضرورية. يتزايد الطلب على يوريا النانو بشكل كبير في جميع أنحاء العالم لأنه يمكن أن يحل محل اليوريا العادي مع تقليل تكلفة المدخلات وزيادة إنتاجية المحاصيل مع جودة أفضل. من المتوقع أن تحل يوريا النانو محل 13.7 مليون لتر من استخدام اليوريا العادي على مدى السنوات الخمس المقبلة، فيما بدأت IFFCO (تعاونية المزارعين الهنود للأسمدة المحدودة) أيضًا في اختبار نسخة نانوية من أسمدة فوسفات ثنائي الأمونيوم (داب DAP). نانو اليوريا هو مصدر للنيتروجين يعد العنصر الأساسي اللازم لنمو النبات وتطوره بشكل سليم. في النبات، يعتبر النيتروجين العنصر الأكثر وفرة في أصباغ التمثيل الضوئي، والأحماض الأمينية، والإنزيمات، والمواد الكيميائية لمفتاح الطاقة. يتراوح تركيز النيتروجين في النبات السليم عادةً من 1.5 إلى 4%. كما أن التسميد النانوي يوفر الكثير من المزايا من حيث تكاليف النقل والتخزين، ويمكن للمزارعين ببساطة رفع زجاجات يوريا النانو جسديًا بدلاً من أكياس اليوريا المرهقة. يوريا النانو هو بديل قابل للتطبيق وطويل الأمد للأسمدة النيتروجينية السائبة النموذجية مثل اليوريا (13).

سوق الأسمدة العالمية

حسب موقع سكايكوست (skyquest) ، فإن حجم سوق الأسمدة النانونية العالمي بلغ 2.7 مليار دولار سنة 2021، وارتفع إلى 3.1 مليار دولار سنة 2022. ومن المتوقع أن يصل إلى 9.35 مليار دولار سنة 2030، بمعدل نمو سنوي قدره 14.8.% (25، 26). ذلك يرجع إلى الطلب المتزايد على المحاصيل عالية الإنتاجية في دول مثل الولايات المتحدة وكندا. كما أن الاقتصادات الناشئة في آسيا ذات الإنتاج الزراعي الضخم مثل الهند والصين وإندونيسيا. وكذلك زيادة الطلب على الغذاء والسياسات الحكومية الداعمة (13، 25، 26).

التحديات الرئيسية الحالية

قد يكون أهم تحدي يواجه تطبيقات تقنية النانو في الزراعة على المستوى العالمي هو التأكد من كفاءة السماد النانوي وتأثيره على الإنتاج من الناحية الكمية والنوعية. رداءة جودة المنتجات أو الجودة المنخفضة لأصناف أسمدة النانو تحد من التوسع في السوق. في بعض الظروف، يكون المنتج المعطى أقل من التوقعات، ويكون المنتج اللازم للتخصيب غير قادر على إتمام عملية تثبيت النيتروجين. ونتيجة لذلك، فإنه يحد من نمو السوق العالمية للأسمدة النانوية (25).

انخفاض جودة منتجات الأسمدة النانوية يحد من التوسع في السوق. في بعض الأحيان، يكون المحصول المقدم أقل من المتوقع، ويكون المحصول المطلوب للتخصيب غير قادر على إكمال عملية تثبيت النيتروجين. لذلك، فإن هذا العامل يعيق نمو السوق العالمية للأسمدة النانوية.

وينقسم السوق أيضًا حسب تصنيف الأسمدة: أسمدة نانوية، وأسمدة مضافة نانوية، وأسمدة مغلفة بطبقة نانوية (13). التغليف هو وضع الأسمدة داخل غلاف أو غطاء مثل الكبسولة يحيط بالأسمدة داخل جسيمات متناهية الصغر أحد هذه الأساليب الجديدة تتم بثلاث طرق: أ) يمكن تغليف المغذيات داخل مواد ذات مسام نانوية ؛ ب) مغلفة بطبقة رقيقة من البوليمر؛ ج) يتم تسليمها كجسيمات أو مستحلبات ذات أبعاد نانوية. يقلل التغليف من قابلية الذوبان ويقلل من معدلات الجريان السطحي ويقلل من تلامس المكونات النشطة مع العمال الزراعيين (13).

أفادت دراسات علمية (19، 18، 17) عن متوسط مكاسب في فعالية أداء تقنية النانو يبلغ حوالي 20% إلى 30% في ظل ظروف خاضعة للتحكم بشكل جيد نسبيًا، ولكن لا تزال هناك شكوك عند النظر في الممارسات الزراعية الحالية، والتقلب البيئي المستجد، والقضايا المتعلقة بقابلية التوسع وكفاءة التكلفة (19، 18). تعتبر الكيماويات الزراعية الحالية باهظة الثمن، وسوف تحتاج المنتجات الناجحة إلى إظهار ميزة واضحة من حيث التكلفة والفائدة للمزارعين. وينبغي لنا أن ندرك أن هناك مناطق يمكن فيها تحسين إنتاجية المحاصيل بشكل كبير من خلال تكنولوجيات يسهل الوصول إليها (مثل الري)، وقد يكون تأثير التكنولوجيا محدودا عندما تكون الأسباب الرئيسية لانعدام الأمن الغذائي سياسية و/أو اقتصادية في المقام الأول (17).

كما أن من أهم أسباب الانتشار البطيء لتقنية التسميد بالنانو على المستوى العالمي هو ضعف الإرشاد الزراعي في إظهار الأداء المتفوق لهذه التقنية مقارنة بالحلول التقليدية الحالية، والتوعية بطرق إضافة الأسمدة وطرق التعامل معها.

ويرتبط تحدي آخر يواجه طرح منتجات جديدة تعتمد تقنية النانو في السوق باللوائح المحددة للمواد الكيميائية المستخدمة في إنتاج الغذاء. لم يتم تصميم إجراءات تطبيقية لتقييم المخاطر المرتبطة بالجسيمات النانوية. هناك حاجة إلى التعديلات والتحسينات في جميع مراحل التقييم لضمان سلامة البيئة وصحة الإنسان (20، 21). لا يوجد حاليًا أي نهج منسق لتقييم المخاطر بالنسبة للمنتجات التي تدعم تكنولوجيا النانو على المستوى الدولي. على سبيل المثال، يمكن اعتبار المنتج الجديد "نانو" في ظل أنظمة قضائية معينة، ولكن ليس في أنظمة قضائية أخرى. تتناول أحدث الإرشادات الأوروبية بشأن تقييم المواد النانوية في الأغذية والأعلاف تعريفًا واسعًا إلى حد ما للمواد النانوية، على سبيل المثال، استخدام 250 نانومتر كحدَ، بدلاً من 100 نانومتر (22)، مع عواقب محتملة على المنتجات الموجودة بالفعل في السوق ولكنها لم تظهر بعد تم تصنيفها على أنها نانو حتى الآن. وتظل هناك أسئلة حول مدى كفاية استخدام البيانات والنماذج غير المصممة خصيصًا للمواد النانوية. حالات عدم اليقين والشكوك الحالية في تقييمات المخاطر تؤدي إلى افتراضات متحفظة، والتي تشكل حاليًا عوائق مهمة أمام طرحها في السوق.

هناك أيضًا تحديات محتملة تتعلق بإدراك ومقبولية تكنولوجيا النانو، وهو اعتبار حيوي في محاولات طرح المنتجات التي تدعم تكنولوجيا النانو في السوق. من المرجح أن يختلف قبول السوق عبر القطاعات والجغرافيا والتركيبة السكانية كالمذاق مثلاً، والتي قد لا تكون متوافقة تمامًا مع تصورات تطور تكنولوجيا النانو. كما أن قبول المستهلك أمر ضروري ويجب معالجته بشكل استباقي. مع أنشطة الاتصال والمشاركة لتجنب خطر الرفض بسبب الارتباط والخلط بين تكنولوجيا النانو والتقنيات المثيرة للجدل مثل تحرير الجينات والتعديل الوراثي (17).

مستقبل الأسمدة النانوية

من المتوقع أن تكون الأسمدة النانوية أداة لتلبية متطلبات التكثيف المستدام في الأنشطة الزراعية على مدار الثلاثين عامًا القادمة نظرًا لجدوى مزامنة آليات إطلاق المغذيات مع الزيادات في غلات المحاصيل وإنتاج الأعلاف مع تقليل مدخلات التسميد (13).

هناك الكثير من العمل الذي يتعين القيام به في المستقبل لجعل الأسمدة النانوية قابلة للتطبيق وبديلاً عن الأسمدة التقليدية. هناك حاجة إلى صياغة تشريعات فعالة تنظم استخدام الأسمدة النانوية، وصياغة معايير الجودة ومستوى إطلاق العناصر المغذية. كما يجب إجراء المزيد من الدراسات لفهم الفوائد الكاملة والسلبيات المحتملة للأسمدة النانوية، للحصول على الصورة الكاملة في نهج استخدام تقنية النانو لفائدة الزراعة في عالم دائم التغير.

وبسبب التقدم في الزراعة في دول مثل الولايات المتحدة وكندا، من المتوقع أن تقود منطقة أمريكا الشمالية المنطقة العالمية في السنوات الخمس المقبلة. علاوة على ذلك، يتوسع البحث والتقدم التقني في هذا المجال بسرعة، مما يدعم النمو المستقبلي لسوق أسمدة النانو في جميع أنحاء العالم خلال السنوات الخمس المقبلة. وبسبب اعتمادها على الزراعة، من المتوقع أن تتوسع دول مثل الهند والصين بشكل أسرع في منطقة آسيا والمحيط الهادئ خلال السنوات الخمس المقبلة. علاوة على ذلك، من المرجح أن يؤدي الاعتماد المتزايد لتكنولوجيا النانو في الزراعة إلى دفع عجلة التنمية في سوق أسمدة النانو في جميع أنحاء العالم خلال السنوات الخمس المقبلة. (13)

توصيات للأنشطة المستقبلية

تعد التجارب التطبيقية في ظل ظروف أكثر واقعية وعلى نطاقات أوسع هي الخطوة الطبيعية التالية التي ستوفر معلومات وبيانات أساسية لتقييم المواد الكيميائية الزراعية النانوية والمواد النشطة بيولوجيًا النانوية ومزاياها النسبية مقارنة بالمنتجات التقليدية.

وفي هذا السياق، تعد الفعالية والتكلفة/الفائدة المحتملة للمنتجين والمستهلكين والآثار البيئية أمرًا ضروريًا. ومن المرجح أن يتم تحقيق أداء أعلى عندما يقوم مطورو تقنيات النانو بتحديد ومعالجة المشكلات التي يواجهها الممارسون حاليًا في سياق معين (على سبيل المثال، محصول ومنطقة معينة). إن أزمة الأمن الغذائي في أفريقيا جنوب الصحراء الكبرى يختلف تماماً عما هو عليه في المناطق الحضرية في أمريكا وأوروبا أو المناطق الريفية في الهند أو الصين. بمجرد تطوير حل النانو لمشكلة معينة، يمكن للتحكم تحسين إنتاج المواد النانوية أن يؤدي إلى مواد بتكاليف أقل وبمواصفات أداء أكبر.

كما يمكن أن يكون التواصل مع عامة الناس أكثر فعالية عندما يمكن تسليط الضوء على مزايا محددة وتحديد كميتها (بما في ذلك كمية الغذاء وجودته وسعره وتأثيره على البيئة. ويعد "قبول السوق" من الضروريات لمثل هذه التقنيات، وقد أشارت دراسة استطلاع إلى نتائج بمستوى عالٍ من المقبولية، خاصة إذا تم توضيح فوائد الاستدامة البيئية (23).

هناك حاجة إلى توحيد الجهود من أجل تقارب ضبط المعايير والتعاون متعدد القطاعات خاصة من المنظور الصحي، فضلاً عن الوضوح التنظيمي، لتوجيه البحث والتطوير وتسهيل إدخال المنتجات النانوية الفعالة والمفيدة في السوق. ومن الناحية المثالية، لكي ينجح التبني التجاري لهذه الاستراتيجيات لمعالجة أزمة الأمن الغذائي العالمي، ينبغي أن تكون مستدامة وفعالة وأن يكون لها الحد الأدنى من التأثير السلبي على البيئة، لأن الفشل في الحصول على ما تقدمه تكنولوجيا النانو بشكل كامل سيكون بمثابة فرصة ضائعة للغاية للتخفيف من أزمة الأمن الغذائي (17).

التسميد النانوي للنخيل

وجدت العديد من الدراسات أن الأسمدة النانوية المطبقة في التربة أدت إلى تحسين نمو وإنتاج نخيل التمر مقارنة باستخدام الأسمدة التقليدية (27، 28). في دراسة تأثير التسميد الورقي

بالنانو على نمو الثمار ونضجها والاستجابات البيوكيميائية لنخيل التمر، كان تأثير الأسمدة الورقية النانوية على استجابة النمو ومعدل نضج الثمار إيجابياً، وأدى استخدام الأسمدة النانوية وحدها إلى تسريع نضج الثمار، بينما زاد إنتاج الثمار باستخدام الأسمدة الورقية النانوية مع الأسمدة التقليدية (27).

كما أجريت دراسة تأثير إضافة النتروجين والحديد رشاً على الأوراق في إنتاجية نخلة التمر صنف الحلاوي. استخدمت أربعة معاملات: 1- رشت النخيل باليوريا 1 %قبل التزهير بشهر . 2- رشت باليوريا بالتركيز 1 %مرتين الأولى قبل التزهير بشهر و الثانية بعد العقد الكامل. 3- رشت بكبريتات الحديدوز بتركيز 250 جزء بالمليون قبل التزهير بشهر وبعد العقد إضافةً إلى معاملة المقارنة (بالماء المقطر فقط). وأوضحت النتائج تفوق معاملة الرش باليوريا قبل التزهير وبعد العقد في زيادة كمية الحاصل ومحتوى الأوراق من النتروجين و خفض نسبة الثمار المتساقطة إلا أنها أدت إلى تأخر نضج الثمار مقارنة مع المعاملات الأخرى. تلتها معاملة الرش باليوريا لمرة واحدة قبل شهر من التزهير، أما الرش بكبريتات الحديد فقد أدى الى زيادة كمية الحاصل و تقليل نسبة التساقط مقارنة مع معاملة المقارنة (غير المسمدة) (33).

وفي تجربة عن تأثير التسميد بتقنية النانو في نمو واثمار نخيل التمر الزغلول، وجدت أن أفضل المعاملات في تحسين النمو والمحصول وجودة الثمار لنخيل التمر الزغلول عند إضافة NPK كنظام تكنولوجيا النانو مقارنة بالشكل التقليدي. بشكل عام، من هذه النتائج أظهرت أن أسمدة النانو NPK بتراكيز 500 و 250 و 250 جرام / نخلة / سنة، على التوالي أفضل من تطبيق NPK التقليدي عند 1000 و 500 و 500 جم / نخلة / سنة، على التوالي لتعزيز النمو والمحصول وجودة الثمار لنخيل التمر الزغلول المزروع تحت ظروف منطقة المنيا (28).

وفي دراسة عن تأثير الأسمدة النانوية وطرق التطبيق في النمو الخضري وحاصل نخيل التمر، أظهرت النتائج أن استخدام المغذيات والأسمدة بالحقن أدى إلى تحسين النمو الخضري وزيادة إنتاجية نخيل التمر (29). كما أظهرت دراسة أخرى (30) إن استخدام الأسمدة النانوية بشكل منفرد يؤدي إلى تسريع نضج الثمار، بينما استخدام الأسمدة الورقية النانوية مع الأسمدة التقليدية أدى إلى زيادة إنتاج الثمار.

تأثير سماد النتروجين النانوي في النمو والثمر والقيمة الغذائية لثمار نخيل التمر صنف زغلول مقارنة بالتسميد التقليدي، أوصت الدراسة من الناحية الاقتصادية باستخدام السماد النتروجيني في صورة النانو بنسبة 60% من الجرعة الموصى بها عبر سطح التربة في تسميد نخيل التمر الزغلول (31).

وفي دراسة لمجموعة من أشجار الفاكهة، ظهر ان التسميد النانوي للعناصر الكبرى والصغرى حسنت بشكل ملحوظ الصفات الخضرية والتكاثرية لأشجار الفاكهة مثل الرمان والفراولة والمانجو والتمر والقهوة والعنب. وأوصت الدراسة بأن المعرفة حول تأثيرات التسميد النانوي على أشجار الفاكهة والأسباب البيولوجية لتأثيراتها على السمات المختلفة غير كاملة بحاجة ملحة لإجراء أبحاث مكثفة حول هذه المواضيع (32).

المراجع

1- Joseph T, Morrison M. Nanotechnology in agriculture and food institute of nanotechnology. A Nanoforum report, 2006. retrieved from http://www. nanoforum.org/dateien/temp/nanotechnology.

2- Nitesh Kumar a, Shiv Ram Samota a, Karnam Venkatesh b, S.C. Tripathi. 2023. Global trends in use of nano-fertilizers for crop production: Advantages and constraints – A review

3- Miranda-Villagómez, Iris, L., Gómez-Merino, Fernando Carlos, S.-V., Manuel, Sánchez-García, & Ángel, M. (2019, November 18). Nanophosphorus Fertilizer Stimulates Growth and Photosynthetic Activity and Improves P Status in Rice.
4- Subramanian KS, Sharmil Rahale C. Nano-fertilizer formulations for balanced fertilization of crops. Paper presented at the Platinum Jubilee Celebrations of ISSS, New Delhi, 2009.
5- Cited by: Nanotechnology in Crop Production and Protection-Nanoagrochemicals. Jun 2021. P. Chandana, B. Deepak Reddy, Y. Lavanya, Vikram Kannamreddy, K.K.K. Reddy and M. Sharath Chandra
6- Chinnamuthu CR, Boopathi PM. Nanotechnology and Agroecosystem. Madras Agric. J. 2009; 96:17 31.
7- Al-Juthery, H. W. A., Al-Taee, R. A. H. G., Al-Obaidi, Z. H. H., Ali, E. A. H. M., & Nal-Shami, Q. M. (2019). Influence of foliar application of some nano-fertilizers in growth and yield of potato under drip irrigation. Journal of Physics: Conference Series, 1294, 092024. doi: 10.1088/1742-6596/1294/9/0920 اثنان قديما
8- Delfani, M., Firouzabadi, M. B., Farrokhi, N., & Makarian, H. (2014). Some Physiological Responses of Black-Eyed Pea to Iron and Magnesium Nanofertilizers. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 45(4), 530–540. doi: 10.1080/00103624.2013.863911 ثلاثة قديما
9- Silva, S., Garcia, G., Reis, E., & Dalvi, L. (2020). Foliar nutrient content and maize yield with vinasse application during three crops. Revista Brasileira De Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences, 15(1), 1–6. doi: 10.5039/agraria.v15i1a6285 أربعة قديما
10- N. MustafaI. MatterM. El-DahshouriLixin ZhangS. MahfouzeH. ShaarawyI. El-berry. 2022. Impact of Nano-fertilizers on Growth Performance of Fig Crop and Soil Health. Journal of Agriculture and Ecology Research…
11- أطروحة دكتوراه (8) بعنوان "تأثير الاسمدة وطرائق إضافتها في النمو الخضري وحاصل نخيل التمر صنف خستاوي" (2018) للباحثة شيماء محمد جبير من قسم البستنة وهندسة الحدائق، كلية علوم الهندسة الزراعية، جامعة بغداد،
12- El-Salhy A.M.1 , M.M. Al-Wasfy2 , E.F.M. Badawy1 , F.M. Gouda1 and A.A. Shamroukh2 2021 0. Effect of nano-potassium fertilization on fruiting of Zaghloul date palm. SVU-International Journal of Agricultural Science Volume 3 Issue (1) pp.: 1-9, 2021
13- Precedence Research, 2023). https://www.precedenceresearch.com/nano-fertilizers-market
14- د.ينال القدسي)1(، د. أريج الخضر)2(، د.إبراهيم الغريبي) 3(، د. صالح هادي السالم)4(، م. محمد علي)5(و م. عادل المنوفي)6((International Journal of Scientific, Research and Sustainable Development دور تقنية النانو في تحسين إنتاجية المحاصيل الحبية ودعمها الاقتصادي الزراعي في المرحلة الراهنة (القدسي وآخرون، 2021 Accepted: May 2021)
15- Manjunatha SB, Biradar DP, Aladakatti YR. Nanotechnology and its applications in agriculture: A review. J Farm Sci. 2016; 29(1):1-13.
16- Maclurcan DC. Nanotechnology and developing countries Part 2: What Realities? AZoNano-Online. Journal of Nanotechnology, 2005, 1.
17- Melanie Kah 1, Cristina Sabliov 2, Yi Wang 3, Jason C. White. 2023. Nanotechnology as a foundational tool to combat global food insecurity. Science Direct.

18- M. Kah, R.S. Kookana, A. Gogos, T.D. Bucheli. 2018. A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. https://www.nature.com/articles/s41565-018-0131-1
19- Wang D; Saleh N.B.; Byro A.; Zepp R.; Sahle-Demessie E.; Luxton T.P.; Ho K.T.; Burgess R.M.; Flury M.; White J.C.; Su C. 2022. Nano-enabled pesticides for sustainable agriculture and global food security. https://www.nature.com/articles/s41565-022-01082-8
20- Kookana R.S.; Boxall A.B.A.; Reeves P.T.; Ashauer R.; Beulke S.; Chaudhry Q.; Cornelis G.; Fernandes T.F.; Gan J.; Kah M. (2014). Nanopesticides: Guiding Principles for Regulatory Evaluation of Environmental Risks. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf500232f
21- Kah M.; Johnston L.J.; Kookana R.S.; Bruce W.; Haase A.; Ritz V.; Dinglasan J.; Doak S.; Garelick H.; Gubala V. (2021). Comprehensive framework for human health risk assessment of nanopesticides. https://www.nature.com/articles/s41565-021-00964-7
22- More S.; Bampidis V.; Benford D.; Bragard C.; Halldorsson T.; Hernández-Jerez A.; Hougaard Bennekou S.; Koutsoumanis K.; Lambré C. (2021). Guidance on risk assessment of nanomaterials to be applied in the food and feed chain: human and animal health. EFSA Journal.
23- Nikolai Siimes, Emma L. Sharp, Nicolas Lewis, Melanie Kah. (2022). Determining acceptance and rejection of nano-enabled agriculture: A case study of the New Zealand wine industry. Science Direct.
24- Mohamed T. El-Saadony a, Ameina S. ALmoshadak b, Manal E. Shafi c, Najah M. Albaqami c, Ahmed M. Saad d, Amira M. El-Tahan e, El-Sayed M. Desoky f, Ahmed S.M. Elnahal g, Aisha Almakas h, Taia A. Abd El-Mageed i, Ayman E. Taha j, Ahmed S. Elrys. (2021). Vital roles of sustainable nano-fertilizers in improving plant quality and quantity-an updated review. Saudi Journal of Biological Sciences.
25- Skyquest. (2023) Global Nano Fertilizers Market Insights.
26- Social networking service. 2023. Nano Fertilizer Market to Surpass.
27- Hussein J. Shareef, Rashid A. Al-Yahyai, Alaa El-Din K. Omar, and Wan Arfiani Barus (2022). Foliar nano-fertilization enhances fruit growth, maturity, and biochemical responses of date palm. Canadian Journal of Plant Science.
28- Roshdy, Kh.A.* and M.M. Refaa (2016.). EFFECT OF NANOTECHNOLOGY FERTILIZATION ON GROWTH AND FRUITING OF ZAGHLOUL DATE PALMS. J. Plant Production, Mansoura Univ., Vol. 7(1).
29- Jubeir S.M. and Ahmed W.A. (2019a). Effect of nanofertilizers and application methods on vegetative growth and yield of date palm. The Iraqi Journal of Agricultural Sciences.
30- Alaa El-Din K. Omar (2020) Nano-fertilizer of date palm Foliar nano-fertilization enhances fruit growth, maturity and biochemical responses of date palm Shareef et al. nanofertilizer of date palm 2. Canadian Journal of Plant Science.
31- Abd EL-Rahman, M.M.A. and Naglaa A.A. Abd-Elkarim. (2022). Effect of Nano-N fertilizer on growth, fruiting and the fruits nutritive value of zaghloul date palm. International Journal of Agricultural Sciences.

32- Seyed Morteza Zahedi, Mahdieh Karimi, Jaime A Teixeira da Silva (2019). The use of nanotechnology to increase quality and yield of fruit crops. Journal of science of food and Agriculture

33- كاظم إبراهيم عباس، ضياء أحمد طعين، أحمد ماضي وحيد (2077). دراسة تأثير إضافة النتروجين والحديد في إنتاجية نخيل التمر صنف الحلاويPhoenix dactylifera L. CV. Hellaw . مجلة أبحاث البصرة (العلميات) العدد الثالث والثلاثون