عالم الذرّة

165

مجلة هيئة الطاقة الذرّية السورية

الثورة السورية
أصل الحكاية

http://aec.org.sy/atomicmag.php

2026

عـالـم الـذرّة

مجلة دورية تصدر عن هيئة الطاقة الذرّية السورية. وتهدف إلى الإسهام في نشر المعرفة العلمية باللغة العربية في الميدانين الذرّي والنووي وفي كل ما يتعلق بهما من تطبيقات.

المديـر المسـؤول

د. مضر العكلة

المدير العام لهيئة الطاقة الذرّية السورية

رئيس هيئـة التحريـر

د. فواز كرد علي

أعضاء هيئـة التحريـر

د. رامي جرجور

د. دانا جودت

د. عماد خضير

د. محمد بهاء الصوص

د. سعدو الظواهرة

د. عبد القادر عبادي

د. بشار عبد الغني

د. ماهر عبودي

د. عبد الوهاب علاف

د. وليد الفارس

د. عبد الغفار اللافي

د. يحيى لحفي

التدقيق اللغوي

ريما سنديان

التنضيد

غفران ناوروز

الإخـراج الفنـي

أمل قيروط

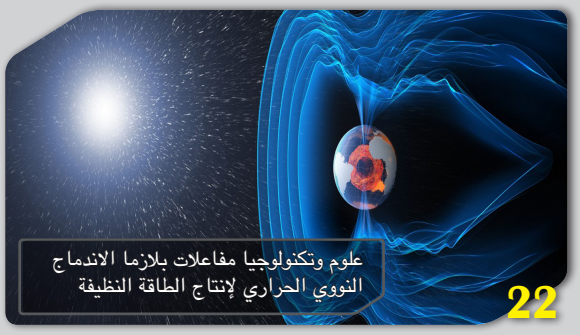
بشار مسعود

راما الكاج

المحتويات

مقـــــالات

التقانة النانوية في العلوم الزراعية 8


علوم وتكنولوجيا مفاعلات بلازما الاندماج النووي الحراري لإنتاج الطاقة النظيفة 22

البوليميرات الحيوية ليست خياراً.. بل ضرورة 32

الآفاق الفيزيائية والبيولوجية للعلاج الإشعاعي الوميضي (FLASH-RT): تحول جذري في علاج الأورام بالإشعاع 44

الأزمة المائية في سوريا بين الإدارة والتغيرات المناخية 54

الاستعداد لمرض X في عالم متغير 62

أخبار علمية

69 طريقة أكثر ذكاءً للكشف عن سرطان الثدي آخذة في الظهور

70 «الشمس الاصطناعية» الصينية حطّمت مؤخراً حد الاندماج النووي الذي كان العلماء يعتقدون أنه لا يمكن تجاوزه

72 خدعة قديمة من عالم صياغة المجوهرات قد تغيّر مجال ضبط التوقيت نووياً

74 حقنة تحوّل الخلايا المناعية الخاملة في الأورام إلى خلايا مناعية مضادة للسرطان

قواعد النشر في مجلة عالم الذرّة

شروط النشر

- *أن يتوجه المقال لأكبر شريحة علمية ولم يسبق نشره أو إرساله للنشر في مجلة أخرى.*
- *أن يكتب المقال بمنهجية علمية صحيحة وبلغة سليمة.*

شروط الإعداد

- *يفضل أن يكون عنوان المقال مقتضباً ومعبّراً عن المضمون.*
- *يلي ذلك ملخص، لا يتجاوز مئة وخمسين كلمة، باللغة العربية وملخص باللغة الإنجليزية، على صفحتين منفصلتين، يتضمن كل منهما عنوان المقال، واسم مقدم العمل وصفته العلمية، والمؤسسة العلمية التي يعمل بها وعنوان المراسلة باللغتين العربية والأجنبية tapo@aec.org.sy. يتبع كل ملخص الكلمات المفتاحية على الصفحة نفسها.*
- *الجداول: يكتب عنوان الجدول فوق الجدول ويعطى رقماً متسلسلاً. تشرح الرموز الواردة في الجدول إذا لم يرد ذلك في متن النص.*
- *الأشكال: يكتب عنوان الشكل تحت الشكل ويعطى رقماً متسلسلاً. تشرح الرموز الواردة في الشكل إذا لم يرد ذلك في متن النص. وتوضع الأشكال في ملف منفصل وتوضع التسميات في الشكل باللغة العربية أو توضع تحت الشكل ترجمة باللغة العربية للكلمات في الشكل.*
- *يُشار إلى الحواشي، إن وجدت، بإشارات دالة (*،+، x،..) في الصفحة ذاتها.*
- *المراجع: توضع المراجع إذا كانت موجودة آخر النص وترتب أبجدياً. ويتم إعدادها في قائمة على النحو التالي:*

الأوراق العلمية:

- Murad H, Ali B, Twair A, Baghdadi K, Alhalabi M and Abbady A (2023). "In House" assays for the quantification of Annexin V and its autoantibodies in patients with recurrent pregnancy loss and in vitro fertilisation failures. Science Report 13, 22322. https://doi.org/10.1038/s4159849768--023-w.

الكتب:

- Zaman M, Heng L, Müller C (2021). Measuring Emission of Agricultural Greenhouse Gases and Developing Mitigation Options Using Nuclear and Related Techniques .377 pages. Springer. ISBN 9781-55395-030-3-, https://doi.org/10.10078-55396 030--3-978/.

فصل في كتاب:

- Mettam G R and Adams L B (2020). How to prepare an electronic version of your article, in: B S Jones, R Z Smith (Eds.), Introduction to the Electronic Age, E-Publishing Inc., New York, pp. 281 - 304.

أطروحات:

- Khoder H (2020). Research and development of multi-aspect modeling method for bus-modular radio-electronic systems. The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT).152 pages, Saint-Petersburg/Russia.

مراجع الانترنت:

- University of Liège (2024). Advanced artificial intelligence: A revolution for sustainable agriculture. Available at: www.sciencedaily.com/releases/2024240618115419/06/.htm. Science Daily (accessed 18 June 2024).

تقارير:

- International Atomic Energy Agency, Enhancement of Modelling Approaches for the Assessment of Radionuclide Transfer in the Marine Environment, IAEA-TECDOC-2060, IAEA, Vienna (2024), https://doi.org/10.61092/iaea.pjuc-aha9.

نشرات إخبارية:

- International Atomic Energy Agency, Food and Environmental Protection Newsletter Vol. 25 No. 1, January 2022, Food and Environmental Protection Newsletter No. 2501, IAEA, Vienna.

- *تراعى في كتابة النص على الحاسوب إرشادات التنضيد حول علامات الترقيم والحالات الأخرى الواردة في المجلة والموجودة على موقع مجلة عالم الذرة.*
- *يذكر مرة واحدة في المقال، المقابل الأجنبي للمصطلح العربي.*
- *تستخدم وحدات قياس الجملة الدولية (SI) في القياس.*
- *عدم تأطير الأشكال والخطوط البيانية بأي إطار.*
- *كتابة الرموز الأجنبية على شكل نص أو إدراج الرموز المعقدة والمعادلات على شكل صورة، وعدم استعمال محرر المعادلات.*
- *استخراج وتصدير المنحنيات البيانية على شكل صور بدقة عالية (أكبر من 300dpi).*
- *إرفاق الصور والأشكال البيانية المدرجة في النص بصيغة صورة بدقة عالية (أكبر من 300dpi)، كملفات منفصلة إضافة لوجودها في سياق النص.*
- *اختيار الورق بقياس 21×29.7 سم (A4)، واختيار نوع الخط Simplified Arabic وحجم 14 للنص العربي، وخط نوع Times New Roman وحجم 12 للنص الأجنبي، واختيار فراغ مضاعف بين السطور.*
- *يجب ألا يتجاوز عدد صفحات المقال 20 صفحة.*

شروط الإيداع والتحكيم

- *تقدم نسخة ورقية من مادة النشر منضدة بالحاسوب ومطبوعة على ورق بقياس A4. يرافق ذلك نسخة إلكترونية بصيغة Word، (ويفضل إرسال نسخة إلكترونية إضافية بصيغة pdf).*
- *يحق لإدارة المجلة إعادة البحث لتحقيق المنهجية العلمية وشروط النشر.*
- *تخضع مادة النشر للتحكيم ولا ترد إلى أصحابها نشرت أم لم تنشر، و تلتزم هيئة التحرير بإشعار معد المقال بنتيجة التحكيم و يعطى الباحث مدة شهر كحد أقصى للأخذ بملاحظات المحكمين أو الرد على ما تطلبه رئاسة التحرير وتسليم المقال بشكله النهائي للنشر.*

إرشادات منشودة إلى المشاركين في المجلة

حول علامات الترقيم وبعض الحالات الأخرى عند كتابة النصوص باستخدام الحاسوب

بقلم المرحوم أ. د. زياد القطب

تساعد علامات الترقيم الكاتب على تقسيم كلامه وترتيبه وتوضيح مقصوده، كما تساعد القارئ على فهم ما يقرأ ومعرفة أماكنِ التوقف وأداء النبرة المناسبة.

غير أن المقصود من استعراض علامات الترقيم هنا هو كيفية توظيفها وتلافي الأخطاء عندما نستخدم الحاسوب في كتابة النصوص، الأمر الذي يواجه المنضّد لدى التحكم في مكان الفراغات بين الكلمات وعلامات الترقيم، ولطالما انعكس ذلك سلباً على كادر التنضيد في مكتب الترجمة بالهيئة عند عدم مراعاة الإرشادات المدرجة أدناه.

لذا فإننا نهيب بالعاملين في أقسام الهيئة ودوائرها ومكاتبها المختلفة التقيّد بمضمون هذا التعميم تلافياً لكل إشكال قد يواجه كادر التنضيد. وسنورد في طيّه مثالاً عن كل واحدة من علامات الترقيم لبيان القاعدة التي ينبغي اتباعها، ذاكرين في هذا السياق الإشكالية التي قد تحصل في حالة عدم التقيد بالقواعد المدونة أدناه. فمثلاً عندما نترك فراغاً بين القوس والكلمة التي تلي قوس البداية أو تسبق قوس النهاية في المثال التالي: "في الواقع قلبت المعالجة بسلفيد الهدروجين الفئران التي نجري عليها تجاربنا من حيوانات ذات دم حار إلى حيوانات ذات دم بارد [3m]"، يتضح الإرباك الذي قد يقع فيه القارئ نتيجة ترك فراغ مفروض من الحاسوب بين الرقم 3 والقوس النهائي دونما قصد من جانب المنضد.

وبهدف تجنب مثل هذه الحالات وتوخّياً منّا للإخراج المتناسق والموحّد فإننا نأمل التقيّد بالملاحظات التالية المتعلقة بقواعد كتابة العلامات المدرجة أدناه:

البند الأول

علامات الترقيم: النقطة (.)، الفاصلة (،)، الفاصلة المنقوطة (؛)، النقطتان (:)، علامة الاستفهام (؟)، علامة التعجب (!)، النقاط المتتالية (...)، علامة الاعتراض (-...-)، علامة الاقتباس ("...")، الواصلة الصغيرة (-)، الأقواس ({}، []، ())، الشرطة المائلة (/).

وذلك مع التنبيه إلى ترك فراغ واحد بعد علامة الترقيم وليس قبلها، كما هو مبيّن أدناه:

النقطة (.): توضع في نهاية الجملة لتدلَّ على تمام المعنى، وفي نهاية الكلام.

- مثال: صدر اليوم العدد الجديد من مجلة عالم الذرّة. نأمل أن يحوز هذا العدد رضاء القارئ الكريم.

الفاصلة (،): توضع بين الجمل القصيرة المتعاطفة أو المتّصلة المعنى.

- مثال: ولذلك فإن علماء المناعة لديهم اهتمام شديد، ليس فقط باكتشافات ماهية الجزيئات المشتركة في هذه الحوارات، ولكن أيضاً بكيفية تفاعلها لتتمكن من اتخاذ مثل تلك القرارات الحاسمة.

الفاصلة المنقوطة (؛): توضع بين الجمل الطويلة المتّصلة المعنى، أو بين جملتين تكون إحداهما سبباً في الأخرى.

- مثال: من أهدافنا نشر المعرفة العلمية؛ بمعنى إتاحتها لجميع الراغبين بالمعرفة.

النقطتان (:): توضعان بعد كلمة قال أو ما في معناها وعند الشّرح والتفسير دون ترك فراغ قبلهما.

- مثال: الهدفان المهمان هما: إنتاج عمل مهم وإيصاله إلى القارئ الكريم.

علامة الاستفهام (؟): توضع بعد الجملة الاستفهامية مباشرة دون ترك فراغ قبلها.

- مثال: أين ذهبت المادة المضادة بكاملها؟

علامة التعجب (!): توضع بعد التَّعجب أو النداء أو ما يدلُّ على الفرح أو الألم أيضاً دون ترك فراغ قبلها.

- مثال: كيف كان الكون بعد الانفجار العظيم!

النقاط المتتالية (...): تدلُّ على أنَّ الكلام فيه حذف أو أنَّه لم ينته ويترك فراغ قبلها وبعدها.

- مثال: يرى هولستون وأبادوراي "أن في بعض الأماكن، لا تكون الأمة وسيطاً ناجحاً للمواطنة ... وأن مشروع المجتمع القومي للمواطنين، خاصة الليبرالي ... يبدو، أكثر فأكثر، كأنه استنفد أغراضه وفقد مصداقيته".

علامة الاعتراض (-...-): وهي خطَّان صغيران توضع بينهما جملة معترضة داخلة بين شيئين متلازمين من الجملة كالفعل والفاعل أو الفعل والمفعول به، أو المبتدأ والخبر، أو المتعاطفين.

- مثال: إن المؤتمر الدولي -للجيل الرابع من المفاعلات- مبادرة مهمة.

علامة الاقتباس ("..."): وهي قوسان صغيران يوضع بينهما ما ننقله من كلام بنصِّه دون تغيير.

- مثال: أنجز الباحث مقالاً بعنوان "سوق اليورانيوم ومصادره" وهو في طريقه إلى النشر.

الواصلة الصغيرة (-): توضع في أوَّل الجملة وبأوَّل السَّطر للدَّلالة على تغير المتكلِّم اختصاراً لكلمة (قال أو أجاب) أو للإشارة إلى بند جديد. ونشير هنا إلى ضرورة وضع فراغ بعدها.

- مثال: - المقدمة.

وتوضع للوصل بين كلمتين أو للوصل بين رقمين وذلك بدون ترك فراغ قبلها أو بعدها.

- مثال: مركبات عضوية-معدنية.

وكذلك توضع بين رقمين.

- مثال: انظر المراجع 161-154.

الأقواس {...} [...] (...): عند كتابة أي من هذه الأقواس يُترَك فراغ قبلها وآخر بعدها وليس بينها وبين ما بداخلها.

- مثال على واحد من هذه الأقواس: يجب أن يشمل مفهوم الإنتاجية كلاً من القيمة (الأسعار) والكفاءة.

الشَّرطَةُ المائلة (/): لا يُترَك فراغ قبلها ولا بعدها.

- مثال: نيسان/أبريل.

البند الثاني (حالات أخرى):

الأرقام: يجب التقيد بكتابة الأرقام العربية (0، 1، 2، ...، 9) وليس الهندية (٠، ١، ٢، ...، ٩) وعدم ترك فراغ بين الرقم والفاصلة في حين يترك الفراغ بالضرورة بعد الفاصلة والرقم الذي يليها.

الأرقام التي نكتبها داخل الأقواس لا يترك فراغ قبل الأول منها ولا بعد الأخير منها (مثال: [1، 4، 7]، أما إذا كانت متتابعة فتكتب على النحو التالي [1-5]).

الكلمات الأجنبية في النص العربي: داخل النص العربي لا تبدأ الكلمات الأجنبية بحرف كبير إلا إذا كانت اسم علم أو بلد (مثال: superconductivity، Syria). ولطالما خلقت لنا هذه الإشكالية متاعب جمّة.

الكلمات المفتاحية: نضع الفاصلة بين الكلمة المفتاحية والتي تليها، وإذا كانت الكلمات المفتاحية مترجمة إلى الإنكليزية أو الفرنسية فنبدؤها بالحروف الصغيرة إلاّ إذا كانت الكلمة اسم علم أو بلد عندها نكتب الحرف الأول من الكلمة كبيراً (مثال: Alfred.)

حرفا العطف (و) و (أو): لا يترك فراغ بعد حرف العطف (و)، مثال: إن التنافسية الاقتصادية هي ضرورة للسوق، وهي أساسية لمنظومات الجيل الرابع، أمّا إذا بدأت الكلمة التالية لحرف العطف (و) بحرف الواو أيضاً فإنه يُفضّل ترك فراغ بين الواو والكلمة التي تليه (مثال: تركت أهلي صباح اليوم و ودّعتهم في المطار).

أما في حالة الأسماء، نضع حرف الواو (و) منفصلاً بين اسم المؤلف وبين الاسم الذي يليه (مثال: طريف شربجي و زهير أيوبي و فاطر محمد).

في حالة (أو)، ينبغي ترك فراغ بعدها (مثال: حُدِّدت المسائل المتوقع حلّها سواء على المستوى الثقافي أو التنظيمي أو الإداري).

النسبة المئوية (%): نجعلها دائماً على يسار الرقم وبدون فراغ بينها وبين الرقم (مثال: 40%).

الواحدات (ميغاهرتز، سم، كيلوواط، ...): إذا كانت بالعربية نضعها على يسار الرقم وإذا كانت بالإنكليزية نضعها على يمين الرقم ونترك فراغاً بينها وبين الرقم ونذكر مثالاً: (15 كيلوغراماً (15 kg)).

أشهر السنة الميلادية: نكتبها كما يلي دون ترك فراغات بينها وبين الشرطة المائلة:

كانون الثاني/يناير، شباط/فبراير، آذار/مارس، نيسان/أبريل، أيار/مايو، حزيران/يونيو، تموز/يوليو، آب/أغسطس، أيلول/سبتمبر، تشرين الأول/أكتوبر، تشرين الثاني/نوفمبر، كانون الأول/ديسمبر.

التقانة النانوية في العلوم الزراعية

ملخص

يواجه العالم حالياً تحديات عديدة، مثل: زيادة عدد السكان وتغير المناخ وتدهور التربة والأمن الغذائي؛ مما يتطلب حلولاً مبتكرة لزيادة الإنتاج الزراعي للحصول على منتجات غذائية عالية الجودة. يعد دمج التقانة النانوية في الزراعة أحد هذه الحلول. يستعرض هذا المقال التطبيقات الحديثة لتقانة النانو في العلوم الزراعية كالتسميد ومكافحة الآفات الزراعية، وفي تصنيع مستلزمات حفظ الأغذية كمواد التعبئة والتغليف، وكذلك في التطبيقات المتعلقة بالإنتاج الحيواني وتربية الأحياء المائية، إضافة إلى التحديات التي تواجهها وآفاقها المستقبلية ودورها في تعزيز الأمن الغذائي.

الكلمات المفتاحية: تقانة نانوية، مبيدات نانوية، أسمدة نانوية، سلامة الأغذية، تطبيقات زراعية.

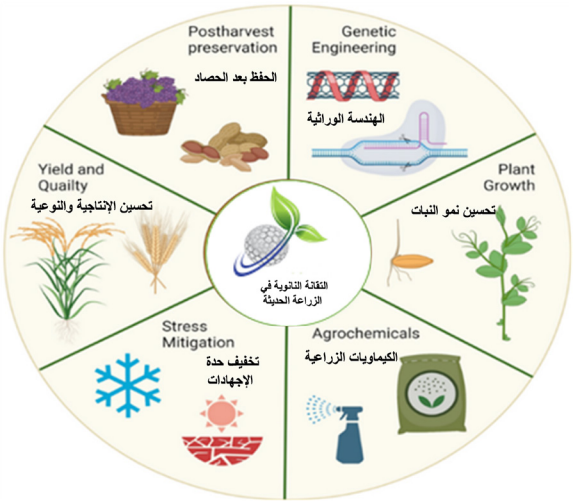
مقدمة

يواجه الإنتاج الزراعي في العالم تحديات كبيرة بسبب الزيادة السكانية وتغير المناخ والتلوث البيئي والطلب المتزايد على المياه والطاقة. ويعدّ القضاء على الجوع أحد أهداف التنمية المستدامة للأمم المتحدة. تستخدم الزراعة الحالية كمية هائلة من الموارد؛ إذ يتجاوز الإنتاج العالمي السنوي للمحاصيل ثلاثة مليارات طن؛ مما يتطلب 187 مليون طن من الأسمدة و4 ملايين طن من المبيدات الحشرية و2.7 تريليون متر مكعب من المياه؛ أي قرابة 70% من إجمالي استهلاك المياه العذبة على مستوى العالم. فوفقاً لمنظمة الأغذية والزراعة، من المتوقع أن يصل عدد سكان العالم إلى نحو 10 مليارات بحلول عام 2050. ومع هذه الزيادة، برزت الحاجة إلى طرائق أكثر تطوراً للإنتاج الزراعي لتلبية الأمن الغذائي العالمي، تؤدي التقنيات الحديثة فيها دوراً مهماً في تعزيز القدرة على إنتاج الغذاء وتسهيل الاستخدام الفعّال للموارد الطبيعية، مما يساعد على تحسين إنتاجية المحاصيل الزراعية وتوفير الوقت وتكاليف العمالة وغيرها. ومن هنا، اتجه العالم إلى ما يسمى بالتقانة النانوية لما تمتلكه من إمكانات واعدة لتحسين إنتاجية الغذاء والأمن الغذائي. لقد اكتسبت الأبحاث المتعلقة بتطبيقات تقانة النانو في الزراعة اهتماماً كبيراً خلال العقود الأخيرة الماضية [1,2]؛ فالتقانة النانوية تؤثر في كل مرحلة من مراحل الزراعة، بما في ذلك إنبات البذور والنمو والحصاد والمعالجة والتخزين. وتعدّ الأسمدة ومبيدات الأعشاب والفطريات والمستشعرات الحيوية وحاملات الجينات والمعالجة الحيوية ومواد التغليف النانوية من التطبيقات الجديدة لهذه التقانة لتحسين إنتاجية المحاصيل الزراعية وجودتها. تتناول هذه المقالة أهمية استخدام التقانة النانوية في الزراعة، وتقييم تطبيقاتها المختلفة، مثل: الأسمدة والمبيدات النانوية والمستشعرات الحيوية النانوية ودور المواد النانوية في معالجة التربة ومصيرها في نظام التربة والنبات وتقييم فعالياتها (الشكل 1). من ناحية أخرى، يتضمن هذا المقال معلومات مهمة للباحثين العاملين في الزراعة المعتمدة على النانو وتحدياتها والتوجهات المستقبلية لهذه التقانة ودورها في تعزيز الأمن الغذائي العالمي.

ميزات استخدام الجسيمات النانوية في القطاع الزراعي

يتمتع استخدام الجسيمات النانوية في القطاع الزراعي بالعديد من المزايا التي تشمل:

- زيادة إنتاجية المحاصيل وتحسين جودتها: يمكن للجسيمات النانوية أن تحسن من نمو المحاصيل من خلال تعزيز النمو وتحسين امتصاص العناصر الغذائية وعملية التمثيل الضوئي، وهذا يؤدي إلى زيادة إنتاجية المحاصيل وتحسين جودتها.
- تحسين تغذية المحاصيل: يمكن هندسة الجسيمات النانوية بتحميلها بالعناصر الغذائية الأساسية وتوصيلها مباشرة إلى خلايا النبات، مما يضمن امتصاصها واستخدامها بكفاءة أفضل، بحيث يمكّن ذلك من معالجة نقص العناصر الغذائية ويحسن من المحتوى الغذائي للمحاصيل.
- مكافحة الآفات الزراعية: يمكن استخدام الجسيمات النانوية كوسيلة فعالة لمكافحة الآفات ومسببات الأمراض التي تصيب المحاصيل الزراعية.



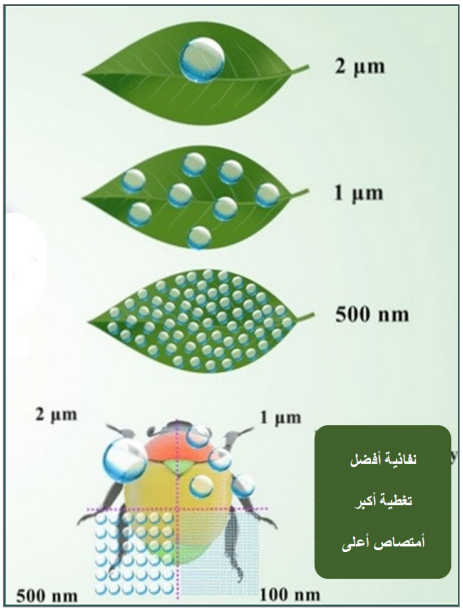
الشكل 1. أهم تطبيقات التقانة النانوية في العلوم الزراعية.

- تعمل الجسيمات النانوية كناقلات لتوصيل المبيدات الحشرية أو العوامل المضادة للميكروبات بشكل مستهدف، مما يقلل من كمية المواد الكيميائية المطلوبة ويقلل من التأثير البيئي.
- تخفيف الإجهادات الناجمة عن الأشعة فوق البنفسجية من النوع B والأوزون: يمكن للجسيمات النانوية أن توفر الحماية للمحاصيل ضد الأشعة فوق البنفسجية الضارة ونقص الأوزون؛ إذ يمكنها أن تعمل كدرع منع تلف خلايا النبات وتقلل من الآثار السلبية لهذه العوامل المسببة للإجهادات.
- تقليل التراكم البيولوجي للمعادن: يمكن للجسيمات النانوية أن تساعد في تقليل امتصاص النباتات للمعادن الثقيلة السامة وتراكمها البيولوجي؛ إذ يمكنها الارتباط بهذه المعادن في التربة ومنع امتصاصها بواسطة جذور النباتات وتقليل خطر التلوث في السلسلة الغذائية.
- التخفيف من الإجهادات اللاحيوية: يمكن للجسيمات النانوية أن تخفف من التأثيرات الضارة للإجهادات غير الحيوية مثل الجفاف والملوحة ودرجات الحرارة العالية، كما تعزز قدرة التربة على الاحتفاظ بالمياه والحفاظ على مستويات الرطوبة وتحسين تحمل النبات للظروف البيئية غير المناسبة.

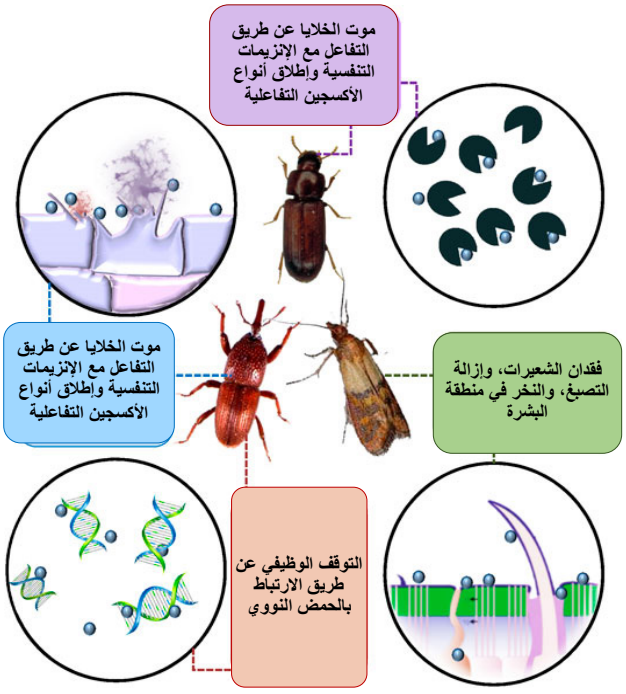
- تعزيز نمو النبات: يمكن لبعض الجسيمات النانوية أن تنشط نمو النبات من خلال تحفيز نمو الجذور وامتصاص العناصر الغذائية وتنظيم الهرمونات، مما يحسن من صحة النباتات وزيادة الكتلة الحيوية وتحسين النمو الكلي.
- حماية النباتات من العدوى والإصابة المرضية: يمكن للجسيمات النانوية أن تعمل كعوامل مضادة للميكروبات حيث تساعد على التحكم في نمو الكائنات الحية الدقيقة الضارة، مثل: البكتيريا والفطريات في التربة أو على سطوح النباتات، وهذا يحمي النباتات من العدوى والإصابة المرضية، ومن ثَمَّ تقليل الحاجة إلى استخدام طرائق المكافحة الكيميائية التقليدية.
- الحفاظ على جودة المياه والتربة: يمكن استخدام الجسيمات النانوية لمعالجة المياه والتربة الملوثة عن طريق إزالة الملوثات أو تسهيل تحللها، كما يمكنها تعزيز خصوبة التربة من خلال تحسين إتاحة العناصر الغذائية والنشاط الميكروبي، مما يجعل التربة أكثر خصوبة وإنتاجية.
- تحسين معدل الإنبات وإنتاجية الكتلة الحيوية: يمكن للجسيمات النانوية أن تعزز من معدل إنبات البذور وتحسين نمو الشتلات، إضافة إلى تحسين إنتاجية الكتلة الحيوية للمحاصيل ومن ثَمَّ زيادة الغلة.

التقانة النانوية في مكافحة الأمراض والآفات الزراعية

ازداد الاهتمام مؤخراً باستخدام المواد الكيميائية الزراعية النانوية لمكافحة الأمراض والآفات الزراعية لتمتعها بمواصفات تتفوق بها على المبيدات التقليدية تتمثل في زيادة سطح التغطية والالتصاق بالهدف وتسهم في تحسين فعالية المبيد في مكافحة الآفة (الشكل 2). وتُستخدم المواد النانوية لمكافحة الآفات الزراعية، سواء كمبيدات نانوية تُنقل مباشرةً إلى الآفات، أم كوسائل توصيل للمبيدات التقليدية والحيوية. وتوفر هذه المواد مزايا مثل انخفاض الجرعة والتحكم في إطلاق المكونات الفعالة وتقليل السمية البيئية من خلال تحسين قابلية ذوبان المبيدات وثباتها وقدرتها على الالتصاق بالآفات الزراعية. ومن الأمثلة على ذلك: الجسيمات النانوية المعدنية (الفضة والذهب والنحاس)، وجسيمات السيليكا النانوية التي قد تُسبب اضطراباً في الجهاز الهضمي للحشرات أو تزيد من مقاومة النبات لها. ويبين الشكل 3 بعض آليات تأثير الجسيمات النانوية في مكافحة حشرات المخازن [3].



الشكل **2.** أهمية الجسيمات النانوية –ذات الأحجام فائقة الصغر– في زيادة سطح التغطية والالتصاق بالهدف وفي تحسين فعالية المبيد في مكافحة الآفات الزراعية.



الشكل **3.** بعض آليات تأثير الجسيمات النانوية في مكافحة حشرات المخازن.

المبيدات النانوية Nano pesticides

تتنوع المبيدات النانوية حسب طبيعة إضافتها، ومن أنواعها: المستحلبات النانوية nano emulsions والمعلقات النانوية nano suspensions والكبسولات النانوية nano encapsulation.

تعد المبيدات النانوية مهمة في الإدارة الفعالة والمستدامة للآفات المختلفة ولديها القدرة على تقليل استخدام المواد الكيميائية الاصطناعية والمخاطر البيئية ذات الصلة. تسلك المبيدات النانوية سلوكاً مختلفاً عن المبيدات الحشرية التقليدية من حيث زيادة فعاليتها؛ إذ يتم نقل الجسيمات النانوية في حالة ذوابة وغروية، وهذا النوع من الآليات يكمن وراء سلوكها المختلف عن سلوك المواد الذوابة التقليدية من الجسيمات نفسها. قد تزيد قابلية ذوبان المكونات النشطة من قابلية الحركة والتحلل بواسطة الكائنات الحية الدقيقة التي تعيش في التربة. وبما أن المبيدات الحشرية القائمة على الجسيمات النانوية تزيد من قابلية ذوبان المادة الفعالة، فإنها تعدّ أيضاً أقل ضرراً للبيئة مقارنة بالمبيدات الحشرية التقليدية.

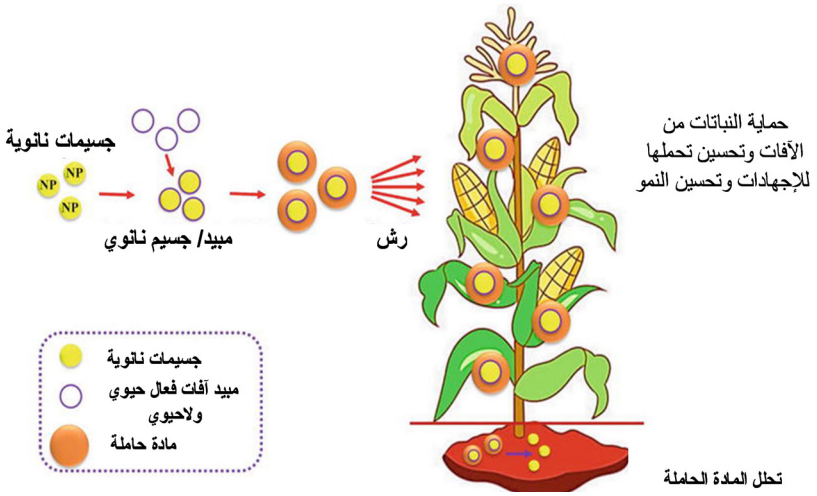
إن استخدام التقانة النانوية يؤمن الحماية اللازمة للنباتات من الآفات الزراعية المختلفة (الشكل 4)، بما فيها الأعشاب الضارة والأمراض والحشرات وغيرها، دون أضرار تذكر على الإنسان والبيئة؛ لذلك تم اللجوء إلى استخدام مستحضرات بحجم النانومتر تتكون من مواد فعّالة عضوية مثل البوليميرات ومواد غير عضوية مثل أكاسيد المعادن، وهي تتميز بالقدرة العالية على الذوبان والتحلل وسرعة النفاذية داخل النبات والاستقرار والثبات داخل المنطقة المعاملة، وذلك نتيجة لصغر حجمها وسرعة انتشارها. كما أنها تستخدم كميات أقل من المواد الكيميائية بالفعالية نفسها، وتقلل من عمليات تكرار عمليات المكافحة، وبالتالي تخفض من التكلفة. إضافة إلى ذلك جرى استخدام تلك التقنية لتعزيز دفاعات النباتات من خلال التعديل الجيني داخل الخلية النباتية أو التعديل في أشكال المبيدات لجعلها مركبات أكثر فاعلية وأقل ضرراً وأوسع انتشاراً، كما أمكن اصطناع المواد النانوية من بعض النباتات؛ مما يقلل من أضرارها على الإنسان، ويقلل من تكلفة استخلاصها.

لقد قدمت تكنولوجيا النانو حلاً لمشكلة مبيدات الآفات تضمن الاستفادة من فوائدها وتمنع وصول أضرارها للإنسان، وذلك من خلال:

1- تغليف هذه المبيدات في كبسولات نانومترية يمكن التحكم بمعدل إفراز المبيدات منها بدقة.

2- صنيع المبيدات الحشرية بالحجم النانومتري والاستفادة من زيادة كفاءتها بأقل التركيزات الممكنة.

3- تطوير جيل جديد من المبيدات النوعية عالية التخصص تجاه آفة معينة دون غيرها.



الشكل 4. استخدام الجسيمات النانوية لحماية النباتات من الآفات الزراعية.

تعد التقانة النانوية من الطرائق الواعدة في مكافحة آفات النبات المختلفة وقد استعملت المواد النانوية كمؤشرات بيولوجية biomarkers للكشف عن المسببات الممرضة من فطريات وبكتريا، وقد أمكن حل الكثير من المشكلات الزراعية باستخدام تقنية النانو، من حيث مكافحة العديد من الآفات الزراعية، منها:

- استخدام الجسيمات النانوية في مكافحة العديد من الآفات الحشرية [4].

- استخدام جزيئات الفضة النانومترية AgNPs للقضاء على الأمراض التي تسببها الفطريات كالتعفنات في محاصيل الخضر المختلفة، واستطاعت تلك المركبات اختراق جدر الخلايا الفطرية والمشيجات المرضة للأنسجة النباتية، كما نجحت في تقليل نمو الكونيدات وتثبيط النمو الميكروبي. كما وجد أن استعمال جسيمات الفضة النانوية بتركيز 10 ppm كان فعّالاً في مكافحة مرض البياض الدقيقي المتسبب من الفطر *Sphaerotheca panrosa* الذي يصيب نباتات الزينة ومنها الورد في البيوت المحمية؛ إذ تم القضاء على 95% من الإصابة بعد يومين من المعاملة، فضلاً عن تثبيط نمو الفطريات وإنبات أبواغ الفطريات *Rhizoctonia solani* و *Sclerotinia sclerotiorum*. كما استعملت جسيمات الذهب النانوية AuNPs في الكشف عن أمراض القمح الذي يسببه الفطر *Tilletia indica*.

- استعمال جسيمات الزنك النانوية لمنع نمو وتكوين الحوامل الكونيدية والكونيديا للفطريات *Botrytus cinerea* وPencillium expansum.

- مكافحة مرض الصدأ المخطط الناتج عن الإصابة بالفطر *Puccinia striiformis f. sp. tritici* الذي يسبب خسارة كبيرة في محصول القمح. جرى تحفيز مقاومة المرض عن طريق التنشيط المسبق للجينات المرتبطة بالمرض (PR) باستخدام صيغتين نانويتين مختلفتين (NFs) هما: الكيتوزان مع حمض الصفصاف (CH–NF) وكبريتات الزنك (Zn–NFs). يؤدي المركب النانوي المكون من الكيتوزان وحمض الصفصاف (CH–NF) إلى تحفيز مقاومة الصدأ في القمح، كما تمكنت كبريتات الزنك (Zn–NF) من تقليل حدوث المرض. كانت درجة الإصابة بالمرض disease score مهملة في CH–NF ومنخفضة في النباتات المعالجة بـ Zn–NF، كما زادت أنشطة إنزيمات المقاومة بسبب استخدام NFs؛ لذلك فإن التنشيط المسبق لنظام الدفاع النباتي باستخدام المواد النانوية هو طريقة موثوقة يمكن أن تساعد في السيطرة على هذا العامل المرض وتقليل خسائر المحصول.

- مكافحة الديدان الخيطية الطفيلية (النيماتودا) من خلال توصيل المبيدات إليها باستخدام فيروس فسيفساء التبغ كناقل نانوي. طور باحثون في جامعة كاليفورنيا في سان دييغو مؤخراً [5] جسيمات نانوية تعتمد على فيروسات نباتية لتوصيل المبيدات الحشرية إلى عمق التربة، مما يوفر نهجاً جديداً لمكافحة النيماتودا الضارة بالمحاصيل. يستهدف هذا الابتكار النيماتودا الطفيلية في مناطق جذور المحاصيل باستخدام جسيمات نانوية محملة بالمبيدات الحشرية مشتقة من فيروس الفسيفساء الأخضر الخفيف للتبغ «كناقل نانوي». إنه يقلل من استخدام المبيدات الحشرية والتأثير البيئي من خلال توصيل المبيدات الحشرية بفعالية لمسافة 10 سنتيمترات في التربة مع الحفاظ على التركيب الكيميائي للمبيد الحشري، وقد ثبت أن هذا النهج يؤدي إلى تقليل أعداد النيماتودا بنسبة 50% على الأقل.

على الرغم من المزايا العديدة للمبيدات النانوية، فإنها تشكل العديد من التحديات مثل: انخفاض السمية الانتقائية وانخفاض قابلية التحلل البيولوجي للجسيمات النانوية غير العضوية، وتطور مقاومة المبيدات الحشرية في الكائنات غير المستهدفة، إذا تم استخدامها بطريقة عشوائية. إضافة إلى ذلك، تعد البيانات المتعلقة بالمصير البيئي لهذه الجسيمات النانوية وتأثيرها السلبي المحتمل على الكائنات غير المستهدفة نادرة، وهناك نقص في المعرفة بهذا الشأن؛ مما يستدعي إيلاء اهتمام أكبر للتأثير والانعكاسات المحتملة للمواد النانوية على البيئة والكائنات غير المستهدفة، وتطوير مبيدات نانوية أكثر أماناً للبيئة. وبناء على ما سبق، ينبغي أن تُركز البحوث المستقبلية في مجال تقنية النانو على: 1– تطوير مبيدات نانوية ذكية لمواجهة تحديات المركبات التقليدية، 2– التطوير الكيميائي لمبيدات نانوية خضراء مستدامة بيئياً، 3– تطوير تقنيات لإنتاج مبيدات نانوية رخيصة وتجارية، 4– مقارنة فعالية التركيبات النانوية مع نظائرها التقليدية حقلياً لتحديد فائدتها العملية، 5– التقييم البيئي السمي للمبيدات النانوية، 6– وضع إطار تشريعي وتنظيمي للإدخال الآمن لمبيدات النانو في الزراعة [3].

الكشف عن متبقيات المبيدات

لقد توصلت الدراسات والأبحاث إلى تطوير طرائق جديدة تعتمد على التقانة النانوية في الكشف عن متبقيات المبيدات؛ إذ استعملت المستشعرات النانوية nanobiosenceres وهي إحدى المستشعرات التي تستخدم الآلية الحيوية (تفاعلات كيميائية حيوية نوعية) للكشف عن وجود مكون ما وتحديده في عينة حيوية باستعمال عنصر تعرف حيوي، وتحويل ذلك إلى إشارة كهربائية قابلة للقياس. وتتميز هذه المستشعرات بالسرعة والدقة العالية في الكشف عن متبقيات المبيدات، ومن الأمثلة على ذلك:

- تم تطوير تقنيات كشف مختلفة مثل أجهزة الاستشعار الحيوية باستخدام رنين البلازمون السطحي وأجهزة الاستشعار الأنزيمية المجهزة بأستيل كولينستريز باستخدام أنابيب نانوية كربونية متعددة الجدران و/أو أنابيب نانوية كربونية أحادية الجدار للكشف عن مبيدات

حشرية مختلفة مثل: ميثيل باراثيون والباراثيون والفينيتروثيون والباراوكسون.

- جرى تصنيع أجهزة استشعار نانوية تعتمد على الأسيتيل كولين استريز تحتوي على جسيمات نانوية من الحديد باستخدام الكيتوزان، وجرى الكشف عن مبيد المالاثيون في المياه وعينات من نبات البندورة /الطماطم/ مع حد كشف قدره 0.3 مليمول/لتر.
- تطوير متحسس نانوي يتحسس المبيدات الفسفورية العضوية عندما تكون بتركيز 5 نانو غرام وتعتمد الطريقة على ارتباط أنزيم الكولين استريز مع فيلم محور من أنابيب الكربون النانوية.
- استعمال جسيمات الكادميوم النانوية في الكشف عن متبقيات المبيد 2–4–D وبتحسس يصل إلى أكثر من 250 نانوغرام.
- تعدّ جسيمات الذهب النانوية ذات حجم 30 نانومتراً من بين المتحسسات النانوية التي طورت للكشف عن متبقيات مبيدات الكلور العضوية بحساسية تصل إلى 27 نانوغرام، كما أن هذا المتحسس النانوي يعد تقنية مناسبة للكشف عن العديد من متبقيات المبيدات في العينات الغذائية والبيئية وذلك لكفاءته وسرعته في الكشف عنها.

الأسمدة النانوية nano-fertilizers

تتنوع الأسمدة النانوية حسب نوع الجسيمات النانوية المستخدمة والعناصر الغذائية التي تحملها. ومن أشهر أنواع الأسمدة النانوية عموماً:

- أكاسيد النانو: تستخدم جسيمات الأكاسيد النانوية، مثل: أكسيد الزنك والحديد والتيتانيوم والزنك وغيرها لتحسين امتصاص العناصر الغذائية.
- الأنابيب النانوية الكربونية: تستخدم الأنابيب النانوية الكربونية لتحسين امتصاص الماء والعناصر الغذائية وتوصيلها إلى أجزاء مختلفة من النبات.
- البوليميرات النانوية: تستخدم البوليميرات النانوية لإطلاق العناصر الغذائية ببطء على مدار فترة زمنية طويلة.

خلال العقود الخمسة الماضية، أدّت الزيادة الهائلة في إنتاجية المحاصيل الزراعية، خاصةً الحبوب، دوراً مهماً في تلبية متطلبات العالم الغذائية. وتعد الزيادة في استخدام الأسمدة الكيميائية من بين العوامل الرئيسية التي ساهمت في تعزيز الغلة. ومع ذلك، فإن الاستفادة من هذه الأسمدة تبقى محدودة نظراً لضعف كفاءة استخدامها بسبب فقدانها عن طريق التطاير أو تسربها في التربة مما يؤدي إلى تلوث البيئة، إضافة إلى زيادة في تكاليف الإنتاج. فوفقاً لمنظمة الأغذية والزراعة، يتم فقدان كميات كبيرة من الآزوت المضاف إلى التربة من خلال استعمال الأسمدة التقليدية، مما يقتضي تطوير استراتيجيات بديلة للتسميد لضمان الاستخدام المستدام للمغذيات وتحقيق كفاءة استعمال عالية منها. في هذا السياق، تُستخدم تقنية النانو لتقليل خسائر العناصر الغذائية المتحركة، وتطوير أسمدة بطيئة التحرر وتحسين إتاحتها للنباتات؛ فالأسمدة النانوية هي عبارة عن مواد نانوية إما أن تكون مغذيات بحد ذاتها (عناصر كبرى أو أثر)، أو مادة حاملة أو مضافة إلى المغذيات كجزءٍ من المعدن، أو من خلال تغليف العناصر الغذائية داخل المواد النانوية.

تعمل الأسمدة النانوية على تحسين إنتاجية المحاصيل وجودتها وعلى زيادة في كفاءة استخدام المغذيات وتقليل تكاليف الإنتاج وبالتالي المساهمة في الزراعة المستدامة. وبيّن الباحثون أن فعالية استخدام الأسمدة النانوية أكثر بنسب تتراوح بين 18–29% مقارنة بالأسمدة التقليدية. من ناحية أخرى، أدى استخدام الأسمدة النانوية الفوسفاتية إلى زيادة معدل نمو نبات فول الصويا بمعدل 32% وتحسين إنتاجية البذور بنسبة 20% مقارنة بالأسمدة التقليدية. كما تعمل الأسمدة النانوية أيضاً على تحسين عملية التمثيل الغذائي للنبات وامتصاص العناصر الغذائية من خلال سهولة انتقالها عبر مسام البشرة.

يساعد إدخال تقانة النانو في مجال تغذية النبات من تطوير أسمدةٍ بطيئة التحرر، مما يسهم في تحسين كفاءة استعمال الأسمدة والحد من فقدانها في البيئة مما يجعلها صديقة للبيئة. تتراوح كفاءة استخدام الأسمدة الآزوتية التقليدية بين 30 و60%. كما يتم فقدان 8 إلى 90% من الأسمدة الفوسفاتية التقليدية بسبب ارتباطها الكيميائي في التربة مما يقلل من إتاحتها للنباتات. من ناحية أخرى، تفيد إضافة المركبات النانوية من اليوريا والهيدروكسيباتيت hydroxyapatite على تحرر محكم لعنصر الآزوت وتطاير أقل للأمونيا مع المحافظة على إتاحة الفسفور وذلك بعد مضي اربعة أسابيع من المعاملة. عموماً، تسهم إضافة المنتجات بطيئة التحرر في التقليل من كميات الأسمدة الواجب إضافتها.

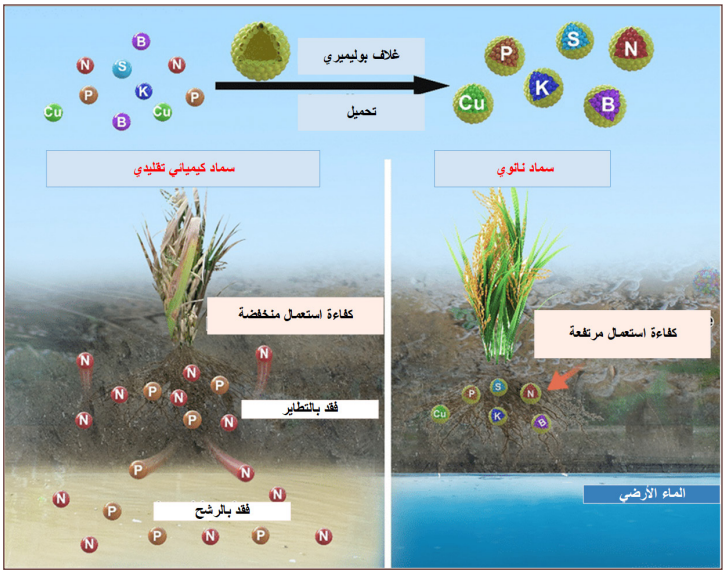
تُستخدم المواد النانوية مثل المعادن الطينية وهيدروكسي أباتيت والكيتوزان وحمض البولي أكريليك والزيوليت وغيرها لتطوير الأسمدة

التي تضاف إلى التربة و/أو في الرش الورقي. تؤدي المساحة السطحية الكبيرة لهيدروكسي أباتيت وتفاعلاتها القوية مع اليوريا إلى بطء تحرر الآزوت من اليوريا. يتحرر الآزوت من اليوريا المعدلة بجسيمات نانوية من مادة الهيدروكسي أباتيت لمدة تصل إلى 60 يوماً من نمو النبات، مقارنة بالأسمدة التقليدية الأخرى كاليوريا أو نترات الأمونيوم؛ إذ يتحرر الآزوت منها لمدة تصل إلى 30 يوماً. حصل باحثون على زيادة في محتوى الكلوروفيل في فول الصويا باستخدام أكسيد الحديد فائق المغناطيسية superparamagnetic iron oxide. كما ازداد محتوى الكلوروفيل في اللوبياء بنسبة 10% عن طريق رش الأوراق بجسيمات نانوية من الحديد على شكل محلول 0.5 غ/لتر. وأدى تطبيق 1 و20 مغ/ لتر من رذاذ ZnO–NP على اللوبياء والحمص إلى تحسين نمو النبات مقارنة بالأسمدة التقليدية. وبين باحثون آخرون أن الأسمدة البوتاسية المغطاة ببوليمير بولي أكريلاميد تساهم في إبطاء تحرر عنصر البوتاسيوم؛ إذ تعد الأسمدة البوتاسية بطيئة التحرر مهمة في التربة الرملية للتقليل من رشح البوتاسيوم وتثبيته في التربة. تعمل المواد الدبالية (HS) على تثبيت Fe الغروي عن طريق ربط أكاسيد الحديد، وتمنع تبلور هيدروكسيدات الحديد؛ لذلك استخدمت مركبات Fe–HS كأسمدة نانوية يتم خلطها مع الأسمدة المركبة الصناعية التي تحتوي على الآزوت والفسفور.

من ناحية أخرى، تعمل البكتريا المحفزة لنمو النبات (PGPB) والسليكون (Si) بشكل مستقل على تحسين مقاومة الجفاف من خلال آليات مختلفة، ولكن آثارهما مجتمعة تتم دراستها بشكل كافٍ. درس [6] التأثيرات المشتركة لجسيمات ثاني أكسيد السليكون النانوية (SiO2 NPs) وPGPB في الاستجابات المورفولوجية والفيزيولوجية والغذائية في نبات القمح المعرض لإجهاد نقص الماء، وأكدت هذه الدراسة أن الجمع بين ثاني أكسيد السليكون النانوية مع PGPB يعزز بشكل فعال تحمل القمح للجفاف. ويقدم هذا النهج التشاركي استراتيجية مستدامة بيئياً لتعزيز تحمل المحاصيل لنقص المياه، مما يضمن إنتاجية أفضل للقمح في الظروف المعرضة للجفاف. وفي الظروف الملحية بيّن [7] أن استخدام الأسمدة الحيوية كالبكتريا المحفزة لنمو النبات أوالميكوريزا، منفردةً أو مجتمعةً، مع إضافة جسيمات السليكون النانوية إلى نباتات القمح المعرضة لإجهاد ملحي أدى إلى تعزيز النمو من خلال تحسين السمات الفسيولوجية والكيميائية الحيوية.

أهمية استخدام الأسمدة ذات التحرر البطيء أو المتحكم بها

من الناحية الزراعية والبيئية، تتمتع الأسمدة ذات التحرر البطيء slow–release fertilizer (SRF) أو المتحكم بها controlled–release fertilizers (CRF) بالعديد من الفوائد التي تتفوق على الأسمدة التقليدية (الشكل 5) منها:



الشكل 5. مقارنة بين الأسمدة النانوية والتقليدية.

- **زيادة كفاءة استخدام المغذيات:** تعمل الأسمدة بطيئة التحرر على إطلاق أو تحرر المغذيات ببطء وبشكل تدريجي وفقاً لمتطلبات النباتات وحسب مراحل نموها مما يحسن من قدرة المحاصيل على امتصاصها وزيادة فعالية استخدامها.
- **تقليل فقدان المغذيات:** تتصف الأسمدة التقليدية بإطلاق المغذيات بسرعة، مما قد يتسبب في فقدانها عبر الجريان السطحي

أو تسربها، وهذا بدوره يؤدي إلى تلوث المياه. أما الأسمدة ذات التحرر البطيء فهي تعمل على التقليل من خطر التلوث البيئي من خلال الإطلاق المتحكم فيه للمغذيات.

- **تأثير طويل الأمد:** تتمتع هذه الأسمدة بفترة أطول لتحرر المغذيات، يمكن أن تستمر لأسابيع وأشهر. ونتيجة لذلك، قد يتمكن المزارعون من استخدام الأسمدة بتكرارية أقل، مما يوفر الوقت والجهد والمال.
- **تحسين النمو:** تشجع هذه الأسمدة على نمو النبات وتطوره من خلال توفير إمداد تدريجي وثابت من العناصر الغذائية.
- **تحسين جودة المحاصيل:** نظراً لأن العناصر الغذائية تكون متاحة عند حاجة النباتات لها، فإن توصيل العناصر الغذائية بشكل متحكم به، يمكن أن يساعد في زيادة جودة المحاصيل من حيث النكهة واللون وقيمته الغذائية.
- **قابلية التكيف:** تتميز الأسمدة ذات الإطلاق المنظم والبطيء بقابليتها للتكيف مع أنواع مختلفة من الترب والمحاصيل.

الأسمدة الذكية smart fertilizers

تعمل الأسمدة النانوية كنظم ذكية لتوصيل المواد وهي تُعرف باسم «الأسمدة الذكية»؛ إذ يتم تغليف المغذيات المراد نقلها، داخل أنابيب أو مستحلبات نانوية. ويتم إنتاج هذه الأسمدة صناعياً بطرائق كيميائية أو فيزيائية أو بيولوجية أو يمكن تصنيعها بعد إجراء تعديلات على الأسمدة التقليدية. ومن المعروف أنه عند استخدام الأسمدة الكيميائية في الأنظمة الزراعية التقليدية، فإن كفاءة استعمالها من قبل النباتات منخفضة؛ إذ يتم فقدان 50–70% منها في البيئة بسبب الرشح أو هطول الأمطار أو الجريان وغيرها، مما يتسبب في آثار ضارة للبيئة وزيادة في تكاليف الإنتاج. فوفقاً للدراسات، فإن 40–70% من الآزوت و50–70% من البوتاسيوم و80–90% من الفسفور وحوالي 95% من العناصر الغذائية النذرة كالزنك والحديد والنحاس والموليبدينوم، تُفقد في البيئة في حالة الأسمدة الاصطناعية التقليدية. أما الأسمدة النانوية، فقد اعتبرت بديلاً أفضل من الأسمدة التقليدية؛ نظراً لأن العناصر الغذائية فيه تتحرر تدريجياً بشكل متحكم به، مما يزيد من إتاحة العناصر الغذائية وكفاءة استعمالها. على سبيل المثال، تم تغليف الكيتوزان مع جزيئات نانوية من حمض الميثاكريليك باليوريا $CO_2(NH_2)_2$ وفوسفات الكالسيوم $Ca_3(PO_4)_2$ وكلوريد البوتاسيوم KCl كمصادر للآزوت والفسفور والبوتاسيوم (NPK)، حيث أظهر هذا السماد الذكي القائم على النانو تحرراً متحكماً وبطيئاً لهذه العناصر الغذائية المهمة.

يعد استخدام الهلام المائي النانوي «الهيدروجيل» hydrogel من المركبات المفيدة في زيادة احتفاظ التربة من المياه؛ إذ بإمكانه تخزين ما بين 130 و190 مرة من وزنه من مياه الأمطار أو مياه الري، ويمنع من تسرب الماء وجريانه، مما يستفاد منه في المناطق الجافة. إضافة إلى ذلك، وجد مؤخراً أن تحميل اليوريا بمركبات من ألياف نانوية من السللوز والكربوكسيل ميثيل مع هلام مائي للسلليوز يعد سماداً مهماً للنباتات قابلاً للتحلل الحيوي، حيث يستفاد منه في الحفاظ على رطوبة التربة مع ضمان تحرر بطيء للماء والآزوت معاً [8].

آلية عمل الأسمدة النانوية:

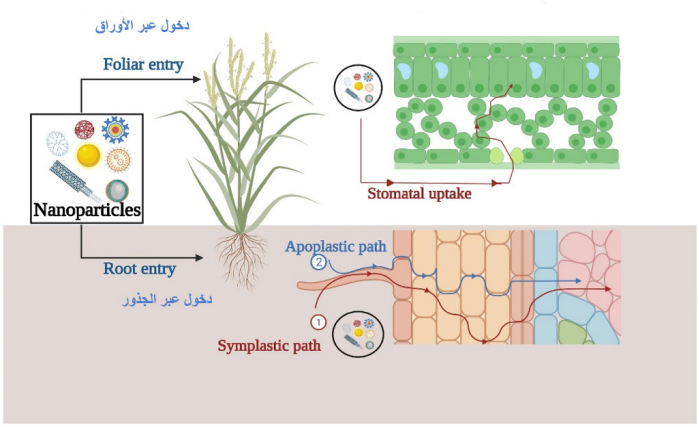
تعتمد آلية عمل الأسمدة النانوية على عوامل عديدة، منها:

- **زيادة مساحة السطح:** تمتلك الجسيمات النانوية مساحة سطح كبيرة مقارنة بحجمها، مما يسمح لها بحمل كميات أكبر من العناصر الغذائية.
- **تحسين الذوبان:** يمكن للجسيمات النانوية أن تزيد من ذوبان العناصر الغذائية في الماء، مما يسهل امتصاصها من قبل النباتات.
- **التوصيل المستهدف:** يمكن تصميم الجسيمات النانوية لتوصيل العناصر الغذائية إلى أجزاء محددة من النبات، مثل الجذور أو الأوراق.
- **الإطلاق أو التحرر المُتحكم فيه:** يمكن تصميم الجسيمات النانوية لإطلاق وتحرر العناصر الغذائية ببطء على مدار فترة زمنية طويلة، مما يقلل من الحاجة إلى التسميد المتكرر.

امتصاص الجسيمات النانوية وانتقالها وتراكمها

بمجرد معاملة النبات بجسيمات النانو، يحدث الامتصاص من خلال فتحات النبات الطبيعية كالثغور واللحاء والعدسات أوعن طريق الجروح. تتأثر ديناميكيات تفاعلات الجسيمات النانوية مع النبات بالعديد من العوامل مثل التركيب: الكيميائي وبنية الجذور وطبيعة التربة. يعتمد امتصاص الجسيمات النانوية ونقلها وتراكمها أيضاً على حجم الجسيمات النانوية؛ إذ تدخل الجسيمات ذات الحجم الأصغر من أبعاد المسام الخلوية بسهولة أكبر، كما تتراكم الجسيمات النانوية التي تتراوح أبعادها من 4 إلى 100 نانومتر في المنطقة التي تقع في أسفل الثغور من خلال تخريب الطبقة الشمعية والبشرة. تنتقل الجسيمات النانوية بمجرد وصولها عبر مسارين، يسمى المسار الأول بالأبوبلاستيك

apoplast (بين الفراغات عبر الجدر الخلوية والأغشية البلازمية خارج الغشاء الخلوي)، أما المسار الثاني فيدعى بالسيمبلاستيك symplastic pathway (الانتقال من خلية لأخرى عبر الغشاء البلازمي). يتصف المسار الأول بحركة شعاعية للجسيمات، والتي تتم وفق الخاصية الشعرية والضغط الأسموزي، وتصل إلى الأدمة الباطنة بعد تجاوز القشرة والبشرة، ومن ثم، تدخل إلى الجزء المركزي والأنسجة الوعائية. في حين تتحرك الجسيمات وفق المسار الثاني داخل الخلايا وذلك عبر القنوات البلازمية plasmodesma متجاوزةً الجدر الخلوية. ومن خلال هذين المسارين، تتحرك الجسيمات النانوية إلى الأجزاء المختلفة للنباتات وتتراكم فيها (الشكل 6)، [9].



الشكل 6. امتصاص المواد النانوية في النبات وانتقالها.

مزايا الأسمدة النانوية ومستقبلها وتحديات استخدامها:

تمثل الأسمدة النانوية ثورة حقيقية في عالم الزراعة، فهي تحمل الكثير من الأمل لمستقبل أكثر استدامة ووفرة. ومع استمرار الأبحاث والتطوير، من المتوقع أن تؤدي الأسمدة النانوية دوراً رئيسياً في تحقيق الأمن الغذائي وحماية البيئة. وعلى عكس الأسمدة التقليدية، فإن الأسمدة النانوية بطيئة الإطلاق مصممة لتوفير تحرر منظم وتدريجي للمغذيات، على مدى فترة زمنية ممتدة. ورغم أن هذه الأسمدة قد تكون أكثر تكلفة في البداية، إلاّ أن تأثيراتها طويلة الأمد وتأثيراتها الإيجابية على البيئة تجعلها خياراً مرغوباً للعديد من المحاصيل [10].

مزايا الأسمدة النانوية:

- **تقليل التلوث البيئي:** تقلل الأسمدة النانوية من التلوث البيئي الناتج عن استخدام الأسمدة التقليدية، حيث إنها تقلل من كمية الأسمدة المطلوبة وتمنع تسربها إلى المياه الجوفية.
- **زيادة كفاءة استخدام المغذيات:** تقلل الأسمدة النانوية من فقدان العناصر الغذائية بسبب التطاير أو الغسل، نظراً لتحررها التدريجي مما يزيد من كفاءة استخدامها من قبل النباتات وتقليل الحاجة للتسميد المتكرر. كما تعمل على زيادة خصوبة التربة من خلال تحسين النشاط الميكروبي فيها.
- **تحسين نمو النباتات:** تساهم الأسمدة النانوية في تحسين نمو النباتات وزيادة إنتاجيتها من خلال توفير العناصر الغذائية بشكل أكثر كفاءة.
- **تحسين جودة التربة والمحاصيل:** تساهم الأسمدة النانوية في تحسين جودة المحاصيل من حيث الحجم واللون والمحتوى الغذائي، وتقليل تكاليف الإنتاج.

مستقبل الأسمدة النانوية:

تعدّ الأسمدة النانوية تقنية واعدة حاملةً الكثير من الأمل لمستقبل الزراعة. ومع استمرار الأبحاث والتطوير، من المتوقع أن تؤدي الأسمدة النانوية دوراً مهماً في:

- **زيادة الإنتاج الزراعي:** تساهم الأسمدة النانوية في زيادة الإنتاج الزراعي لتلبية احتياجات السكان المتزايدة.
- **تحسين الأمن الغذائي:** تساهم الأسمدة النانوية في تحسين الأمن الغذائي من خلال زيادة إنتاجية المحاصيل وتقليل الاعتماد على الأسمدة التقليدية.

- **الزراعة المستدامة:** تساهم الأسمدة النانوية في تحقيق الزراعة المستدامة من خلال تقليل التلوث البيئي وتحسين كفاءة استخدام الموارد.

يكمن مستقبل الزراعة في استعمال أسمدة فعّالة ذات تأثير ضئيل على البيئة. إن دمج الأسمدة الذكية مع الأسمدة الحيوية من البكتريا المثبتة للآزوت الجوي والأحياء الدقيقة المذيبة للفسفور والبوتاسيوم والزنك، يمكن أن تكون جزءاً من زراعة جديدة مستدامة وذكية وصديقة للبيئة والتي تعد بمنزلة بدائل فعّالة عن الأسمدة التقليدية التي تسبب أضراراً بيئيةً مع مرور الزمن.

تحديات استخدام الأسمدة النانوية

على الرغم من الفوائد العديدة للأسمدة النانوية، إلا أنها تواجه بعض التحديات، منها:

- **التكلفة العالية:** تعدّ الأسمدة النانوية أغلى من الأسمدة التقليدية، مما قد يحد من استخدامها على نطاق واسع.
- **السلامة البيئية:** لا تزال هناك مخاوف بشأن تأثير الجسيمات النانوية على البيئة والكائنات الحية.
- **نقص الأبحاث:** لا تزال الأبحاث حول الأسمدة النانوية في مراحلها المبكرة، وهناك حاجة إلى مزيد من الدراسات لتقييم فوائدها ومخاطرها على المدى الطويل.

تحضير البذور للزراعة ومعالجتها باستخدام التقانة النانوية

تعد عملية تحضير البذور باستخدام التقانة النانوية seed nano-priming في علم النبات والزراعة نهجاً زراعياً ذكياً سهل الاستخدام لتحسين النمو وزيادة القيمة الغذائية للحبوب بطريقة صديقة للبيئة؛ إذ يتم نقع البذور مسبقاً في محلول الجسيمات النانوية. فمن خلال معالجة البذور بالجسيمات النانوية، يمكن أن تنبت بشكل أسرع مع زيادة قدرتها على مواجهة الإجهادات البيئية. تعمل الجسيمات النانوية على زيادة قوة الشتلات ونموها وطول عمر البذور، وقد أظهرت الدراسات أن المحاصيل المزروعة من بذور مطلية بمواد نانوية مثل الفضة النانوية كانت أعلى قدرة على امتصاص الماء. كما وجد أن البذور المعالجة بالجسيمات النانوية أدت إلى زيادة في الوزن الجاف للخضروات، وكان محتواها من الفيتامينات أعلى بثلاث مرات من البذور غير المعالجة. إضافة إلى ذلك، أشارت الدراسات إلى أن البذور التي خضعت للمعالجة بالجسيمات النانوية كانت أكثر تحملاً للجفاف مقارنة بغير المعالجة.

استخدام تقنية النانو في مجالات إنتاج الغذاء ومعالجته وسلامته وتغليفه

تستخدم تقنية النانو في إجراءات تصنيع المنتجات الغذائية بهدف تحسين نكهة الأطعمة ومنع نمو البكتريا وزيادة صلاحية المنتجات الغذائية وإطالة مدة حفظها. واستخدمت أيضاً في تصنيع مستلزمات حفظ الأغذية كمواد التعبئة والتغليف والمواد الحافظة والتخزين...إلخ. إن تطبيق التقانة النانوية في تغليف المواد الغذائية يسمح بقدر أكبر من الحماية للمواد الغذائية من خلال زيادة القدرات الميكانيكية والحرارية والخصائص المضادة للبكتريا وتقويتها، ويوفر الحماية ضد التسرب ويمنع دخول الأحياء الدقيقة إلى الأغذية؛ فعنصر الفضة، على سبيل المثال، يعد عاملاً مضاداً للميكروبات، وقد استخدم نانوياً لتغليف المواد الغذائية، وتبين من نتائج إحدى الدراسات حول تأثير الفضة النانوية على نمو البكتريا بعد فترة احتضان لمدة 24 ساعة انخفاض في نمو الميكروبات بنسبة 98%. إضافة إلى ذلك، قامت الشركات المعنية في الصناعات الغذائية بوضع علامات نانوية ذكية (لصاقات) على منتجاتها الغذائية للاستدلال على جودته، ففي منتجات لحوم الدواجن المجمدة مثلاً، تشير العلامة الخضراء عليها أنها طازجة، وعندما تتحول إلى اللون البرتقالي يعني أن المادة المحفوظة لاتزال آمنة ولكنها تعد بمثابة تحذير للمستهلك. أما عندما يتحول اللون إلى الأحمر فإن المواد المحفوظة تصبح غير آمنة ويجب إتلافها فوراً. أما في الثمار المغلّفة فتتدرج الألوان من الأحمر (المقرمش) إلى البرتقالي (القاسي) فالأصفر (العصيري) والتي تشير إلى درجة نضجها (الشكل 7).

الشكل 7. لصاقات ذكية تشير إلى طبيعة المنتج وصلاحية المادة للاستهلاك.

التوجهات الحديثة لاستخدام التقانة النانوية في مجال التعبئة والتغليف

أحدثت تقنية النانو ثورة في صناعة التعبئة والتغليف من خلال توفير إمكانيات جديدة لتعزيز جودة مواد ومنتجات التعبئة والتغليف وسلامتها ووظيفتها واستدامتها. تعتمد حلول التعبئة والتغليف بتقنية النانو على معالجة المادة على مقياس النانو، والذي يتراوح من 1 إلى 100 نانومتر تقريباً. وضمن هذا النطاق، تُظهر المواد خصائص وسلوكيات جديدة يمكن توظيفها في تطبيقات مختلفة. وفيما يلي بعض التوجهات الحديثة في مجال التعبئة والتغليف بتقنية النانو:

- **التغليف الذكي للمواد الغذائية:** جرى إنتاج عبوات ذكية تعمل على مراقبة جودة الغذاء داخل العبوة من خلال أجهزة مدمجة في العبوة أو ملحقة لها. ويمكن أن تسجل مستشعرات النانو المتوافرة فيها كلاً من درجة الحرارة ونضارة الغذاء ونضجه وقياس الملوثات التي قد توجد فيها، والكشف عن وجود مسببات الأمراض أو التلف وتنبيه المستهلكين أو الشركات المصنعة.

- **التغليف القابل للتحلل الحيوي وإعادة التدوير:** يمكن أن تساهم تقنية النانو في الاستدامة البيئية للتغليف عن طريق تقليل كمية المواد المستخدمة، وتعزيز قابلية التحلل الحيوي وإعادة التدوير لمواد التغليف، وتسهيل استعادة المكونات القيمة وإعادة استخدامها. على سبيل المثال، يمكن استخدام السليلوز النانوي لإنتاج مواد تعبئة خفيفة الوزن وقوية وقابلة للتحلل من مصادر متجددة، كما يمكن دمج الجسيمات النانوية في العبوات البلاستيكية لتحسين خصائصها الميكانيكية والحرارية والبصرية وتسهيل إعادة تدويرها، ويمكن استخدام الأغشية النانوية لفصل المواد القيمة من نفايات التعبئة والتغليف واستعادتها.

- **التغليف ذو الطبيعة الخاصة:** يمكن لتقنية النانو أن تمكن من إنشاء حلول تغليف مخصصة بحيث تلبي الاحتياجات والتفضيلات المحددة للمستهلكين الأفراد أو قطاعات السوق. على سبيل المثال، يمكن للطبقات النانوية تعديل الخصائص السطحية لمواد التعبئة والتغليف وتوفير ألوان أو أنسجة أو أنماط مختلفة. يمكن للطباعة النانوية إنتاج ملصقات أو شعارات أو صور عالية الدقة وعالية الجودة ومنخفضة التكلفة على مواد التعبئة والتغليف.

- يمتلك أكسيد الغرافين المصنع من الكربون قدرة فائقة في سرعة إزالة المواد المشعة من المياه الملوثة بها...

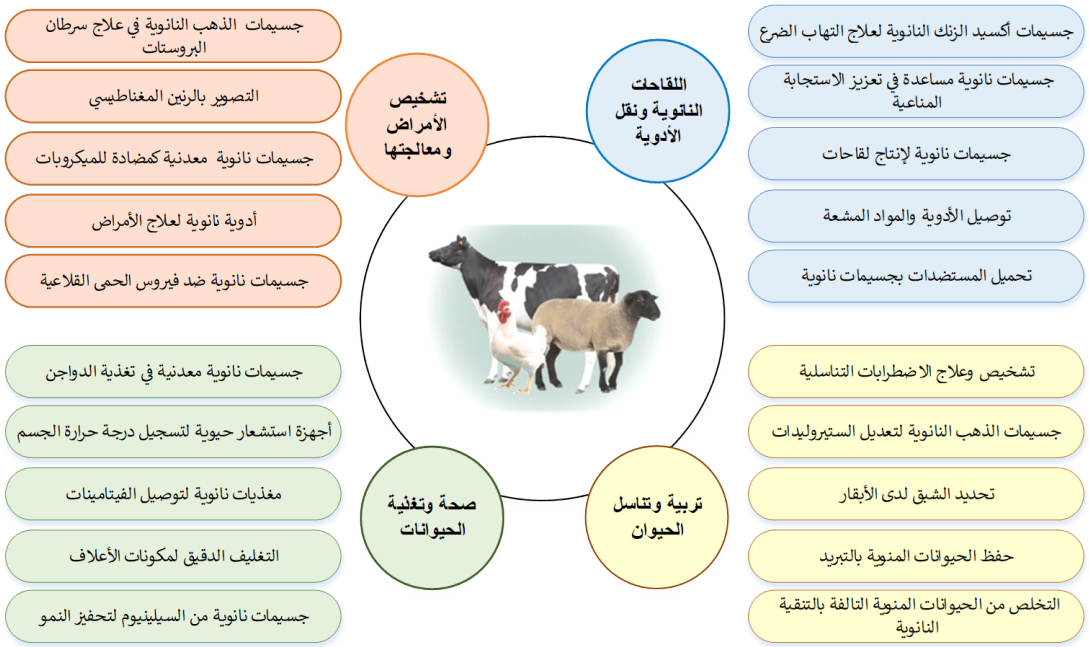
- استخدم الكالسيوم والفسفور في إزالة العناصر الثقيلة من المياه كالرصاص والزرنيخ والنحاس لنسبة تصل إلى 99% دون أي تأثير سام على النبات أو البيئة أو الإنسان.

- صنع أغشية نانوية بإمكانها تنقية المياه من الأملاح والمواد السامة والبكتريا بكفاءة وسرعة عاليتين.

تطبيقات التقانة النانوية في الإنتاج الحيواني

تستخدم التقانة النانوية في العديد من التطبيقات المتعلقة بالإنتاج الحيواني (الشكل 8)؛ إذ يمكن توظيفها في إنتاج اللقاحات والمضادات الحيوية والمعززات الحيوية، وفي تشخيص الأمراض التي تصيب الحيوانات الزراعية وعلاجها، إضافة إلى دورها المهمّ في التغذية. تستخدم المعادن والمستحلبات النانوية في عمليات تصنيع أعلاف الدواجن والماشية؛ مما يعزز من خصائص نموها وتحصين مناعتها تجاه العديد من الأمراض بتكاليف أقل نسبياً. ويمكن للمعادن النانوية تثبيط مسببات الأمراض الضارة في الأعلاف، وتنظيم عملية التخمر في الكرش، ومعالجة المشاكل التناسلية في قطعان الماشية والأغنام؛ إذ يمكن لأكسيد الزنك النانوي أن يزيد من معدل النمو والمناعة وتحسين الأداء التناسلي للحيوانات الزراعية، فضلاً عن خفض معدل الإصابة بالإسهامات وتعزيز إنتاج الحليب. وأشار العديد من الباحثين إلى إمكانية استخدام الفيتامينات السائلة المحضرة بتقنية النانو في أعلاف الدواجن في عملية نقل الفيتامينات والمغذيات الأخرى مباشرة إلى مجرى الدم عبر الجهاز الهضمي. كما يمكن للجسيمات النانوية أيضاً تقليل الحاجة إلى المواد الحافظة والقضاء على روائح الأعلاف المزعجة للحيوانات، وكذلك في تغليف مكونات الأعلاف للحفاظ على جودتها وحمايتها من الضوء والأكسدة، ومنعها من التدهور بواسطة إنزيم البروتياز والإنزيمات الهضمية الأخرى.

في الطب البيطري، تعمل المواد النانوية على نقل المستحضرات الصيدلانية مباشرة إلى الخلايا المستهدفة، مما يقلل من عدد جرعات الأدوية ومتبقياتها، كما يمكن أيضاً استخدام تقنية النانو في تربية الحيوانات لتشخيص أمراض الجهاز التناسلي المعدية والاضطرابات الهرمونية، وكذلك في حفظ الحيوانات المنوية أو البويضات أو الأجنة بالتبريد. من ناحية أخرى، يؤدي استعمال الكبسولات النانوية للأدوية، كالفضة، في الحصول على نتائج علاجية سريعة وفعالة وعالية في مواجهة العديد من المسببات المرضة التي تصيب الدواجن وحيوانات المزرعة، كما يمكن استعمال الجسيمات النانوية في تحطيم الخلايا السرطانية في الحيوانات [11].



الشكل 8. تطبيقات التقانة النانوية في علوم الحيوان.

التقانة النانوية في الاستزراع السمكي

تؤدي تربية الأحياء المائية دوراً مهماً في تلبية الطلب المتزايد على البروتين الحيواني. ومع ذلك، فإن انتشار الأمراض والتلوث الكيميائي والتدهور البيئي والاستخدام غير الفعال للأعلاف من التحديات التي تواجهها تربية الأحياء المائية والتي تهدد الثروة السمكية. تعد التقانة النانوية بما تحويها من تطبيقات عديدة من التقانات الواعدة التي تسهم في وقاية الثروة السمكية من الأمراض؛ مما يقلل من الاستهلاك المفرط من الصادات الحيوية، إضافة إلى دورها في تنقية المياه وتوصيل العناصر الغذائية. وفيما يلي بعض من هذه التطبيقات:

1- تستخدم الجسيمات النانوية للكشف عن الالتهابات البكتيرية والفطرية والفيروسية، كالجسيمات النانوية القائمة على النحاس والجسيمات النانوية الفضية والجسيمات النانوية لأكاسيد المعادن مثل: ZnO NPs وTiO_2، كما استخدمت الجسيمات النانوية المحملة على الكيتوزان في حماية الأسماك والقشريات ضد الأمراض البكتيرية والفيروسية. إضافة إلى ذلك، يمكن إنتاج مواد تستخدم في القضاء على الطحالب والبكتريا وغيرها من الملوثات بأحواض السمك وخزاناتها وشباك الصيد.

2- استخدام الجسيمات النانوية كناقلات لتوصيل الأدوية واللقاحات.

3- استخدام التقانة النانوية في أعلاف الأحياء المائية وتغليف الأغذية، وبالتالي توفير مواد علفية أكثر فعالية لتربيتها. ووفقاً لبعض الأبحاث، فإن إضافة جزيئات نانوية من عناصر مثل: السيلينيوم والحديد والزنك وغيرها إلى النظام الغذائي للأسماك تعمل على زيادة معدل النمو وتحسين التحمل للإجهادات ورفع مستويات مضادات الأكسدة وتحسين الاستجابة المناعية وزيادة نشاط الإنزيمات وزيادة التأثيرات المضادة للسموم.

4- معاملة مكونات العلف بتقنية النانو؛ مما يؤدي إلى رفع القيمة الغذائية لحبيبات الأعلاف بما يضمن كفاءة استعمال أفضل من الغذاء

5- تغليف حبيبات الأعلاف بطبقة من مواد غير ضارة معاملة بتقنية النانو لزيادة بقاء حبيبات الأعلاف في الماء لفترة طويلة، التقليل من الفقد.

تحديات استخدام التقانة النانوية في العلوم الزراعية

على الرغم من الفوائد العديدة للمواد النانوية في الزراعة، إلا أنها تواجه العديد من التحديات والمخاوف التي تقيّد استخدامها الواسع، ومن أهم هذه التحديات:

1- **تكلفة الإنتاج:** يعد تصنيع المواد على نطاق نانوي تكلفته أعلى من التصنيع التقليدي، وهذا قد يؤثر على قدرة الشركات على الاستثمار في هذا المجال.

2- **المخاوف المتعلقة بالسلامة والبيئة:** في الآونة الأخيرة، شهد إنتاج وتطبيق الجسيمات النانوية والمواد التي تحتوي عليها زيادة

ملحوظة، مما أدى إلى زيادة المخاطر لكل من المنتجين والمستهلكين. كما أن هناك العديد من المخاطر نتيجة استخدام الجسيمات النانوية في نمو النباتات؛ إذ يمكن أن يكون للجسيمات النانوية تأثير سلبي وسام على البيئة والنظام البيئي عموماً، وعلى جودة التربة والمياه خصوصاً، حيث تتمتع هذه الجسيمات بالقدرة على التجمع في التربة والمياه، مما قد يؤدي إلى أضرار طويلة الأمد للنظام البيئي. ووفقاً لتقرير حديث، فقد وجد أن الجسيمات النانوية البيئية ذات تأثير سمي، حيث تسبب إجهاداً تأكسدياً وتلفاً للأغشية الخلوية في مختلف الكائنات الحية مثل البكتريا والأسماك والنباتات والطحالب والقشريات وخلايا الثدييات.

3- **القدرة على التصنيع:** يتطلب تصنيع المواد النانوية وتشخيصها معدات متطورة وخبرة كبيرة في المختبرات العلمية، وهذا يجعلها غير متاحة على نطاق واسع للشركات الصغيرة والمتوسطة. إضافة إلى ذلك، غالباً ما تتطلب أبحاث تقانة النانو التعاون عبر تخصصات متعددة، مثل البيولوجيا والكيمياء والهندسة، الأمر الذي قد يكون من الصعب تنسيقه.

4- **الاعتبارات الأخلاقية:** تشمل تقنية النانو مجموعة من الإجراءات الخطيرة والمثيرة للجدل مثل التقنيات المتعلقة بالتلاعب بالجينات والتصحيح الجيني للعيوب الجسدية. كما تثير تقانة النانو أسئلة أخلاقية مهمة، مثل: الخصوصية والأمن واحتمال إساءة الاستخدام، تجب معالجتها في البحث والتطوير.

5- **التحديات القانونية:** يخضع استخدام التقانة النانوية في الأغذية للتشريعات الحكومية، ويتعين على المنتجين الالتزام بالمعايير القانونية لضمان سلامة المستهلكين. كما يجب على الشركات والمنظمات التزامها بمعايير السلامة والجودة لتجنب الأخطار والمخاطر المحتملة.

6- **التأثير على الاقتصاد والمجتمع:** قد تؤثر تقنية النانو على الاقتصاد والمجتمع بشكل مفاجئ، مثل: تسريح الموظفين وتغيير الصناعات التقليدية، وهذا يقتضي توفير الدعم اللازم للتحول السلس إلى هذه التكنولوجيا الجديدة. ويلخص الشكل 9 أهم التحديات التي تواجه استخدام التقانة النانوية [12].

الشكل 9. تحديات استخدام التقانة النانوية في الزراعة.

الاستنتاجات والآفاق المستقبلية

رغم أن الأبحاث عن تطبيقات التقانة النانوية في العلوم الزراعية تعود إلى عقدين من الزمن، حيث تعد هذه التقانة من التقانات الحديثة الناشئة، فإنها تتوسع توسعاً كبيراً في العديد من المجالات المتعلقة بالأنشطة البشرية في العالم. تتميز هذه التقانة بأهميتها البالغة في تحقيق الأمن الغذائي، خاصة في قطاع الزراعة؛ إذ تمكننا من تحقيق أهداف التنمية المستدامة من خلال معالجة المشاكل الرئيسية في دول العالم مثل: الفقر وسوء التغذية وندرة الغذاء. يمكن للتقانة النانوية الإسهام في تحسين إنتاج المحاصيل الزراعية وجودتها من خلال تيسير إتاحة المغذيات للنباتات وفي مكافحة الآفات والأعشاب الضارة وغيرها. كما تؤدي دوراً رئيسياً في معالجة الأغذية وسلامة المنتجات الغذائية. ورغم الفوائد العديدة للمواد النانوية في الزراعة، إلا أنها تواجه العديد من التحديات والمخاوف التي تحول دون استخدامها بشكل واسع. فقد تسبب الجسيمات النانوية مخاطر صحية فيما يتعلق بالتعرض المحتمل للمستهلكين وحماية البيئة والحياة البرية؛ إذ يمكن أن تكون الجسيمات النانوية سامة للكائنات الحية وقد تشكل مخاطر على صحة الإنسان والبيئة. ويمكن حل المشكلات المتعلقة بالسمية عن طريق التوسع في تصنيع المواد النانوية من مصادر بيولوجية مستقبلاً، والبحث عن بروتوكولات سهلة وأرخص لإزالة متبقيات المواد النانوية. ومع ذلك، فإن مصير التقانة النانوية في المستقبل يعتمد على قدرتها على التكيف ضمن إطار النظام الزراعي المستدام؛ لذا، فإن التقييم الشامل وتحليل إيجابيات تطبيقات التقانة النانوية وسلبياتها سيكون خطوة مناسبة للمضي قدماً لتعظيم التأثيرات الإيجابية وتخفيف التأثيرات السلبية لهذه التقانة، وهذا يتطلب تعاوناً بين العلماء وصناع السياسات الزراعية والصناعية والمستهلكين لضمان الاستخدام الآمن والفعّال للتقانة النانوية في الزراعة.

المراجع

[1] Kah ,M ,.Tufenkji ,N ,.White ,J.C .2019 ,.Nano-enabled strategies to enhance crop nutrition and protection .Nat. Nanotechnol. 14, 532–540

[2] Parisi, C., Vigani, M., Rodríguez-Cerezo, E., 2015. Agricultural nanotechnologies: what are the current possibilities? Nano Today 10, 124–127.

[3] Jasrotia P, Nagpal M, Mishra CN, Sharma AK, Kumar S, Kamble U, Bhardwaj AK, Kashyap PL, Kumar S and Singh GP (2022) Nanomaterials for Postharvest Management of Insect Pests: Current State and Future Perspectives. Front. Nanotechnol. 3:811056. doi: 10.3389/fnano.2021.811056

[4] Zannat R, Rahman MM & Afroz M 2022. Application of Nanotechnology in Insect Pest Management: A Review. SAARC Journal of Agriculture 19(2):1-11. 10.3329/sja.v19i2.57668

[5] Adam A. Caparco, Ivonne González-Gamboa, Samuel S. Hays, Jonathan K. Pokorski, and Nicole F. Steinmetz. (2023). Delivery of Nematicides Using TMGMV-Derived Spherical Nanoparticles. Nano Letters 23 (12), 5785-5793. DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c01684

[6] Davoudi, F., Jalali, M., Valizadeh-Rad, K. et al. 2024., Enhancing Water Deficit Stress Tolerance in Wheat: Synergistic Effects of Silicon Nanoparticles and Plant Growth-Promoting Bacteria. Silicon 16, 6525–6540 . https://doi.org/10.1007/s12633-024-03164-9

[7] Ahmadi-Nouraldinvand, F., sharifi, R.S., Siadat, S.A. et al. Reduction of Salinity Stress in Wheat through Seed Bio-Priming with Mycorrhiza and Growth-Promoting Bacteria and its Effect on Physiological Traits and Plant Antioxidant Activity with Silicon Nanoparticles Application. Silicon 15, 6813–6824 (2023). https://doi.org/10.1007/s12633-023-02552-x

[8] Priya E, Akash Jha, Sudipta Sarkar, Pradip K. Maji, 2024. A urea-loaded hydrogel comprising of cellulose nanofibers and carboxymethyl cellulose: An effective slow-release fertilizer, Journal of Cleaner Production, Volume 434, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140215.

[9] Saritha GNG, Anju T, Kumar A. 2022. Nanotechnology – Big impact: How nanotechnology is changing the future of agriculture, Journal of Agriculture and Food Research, Volume 10, 100457. ISSN 2666-1543, https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100457.

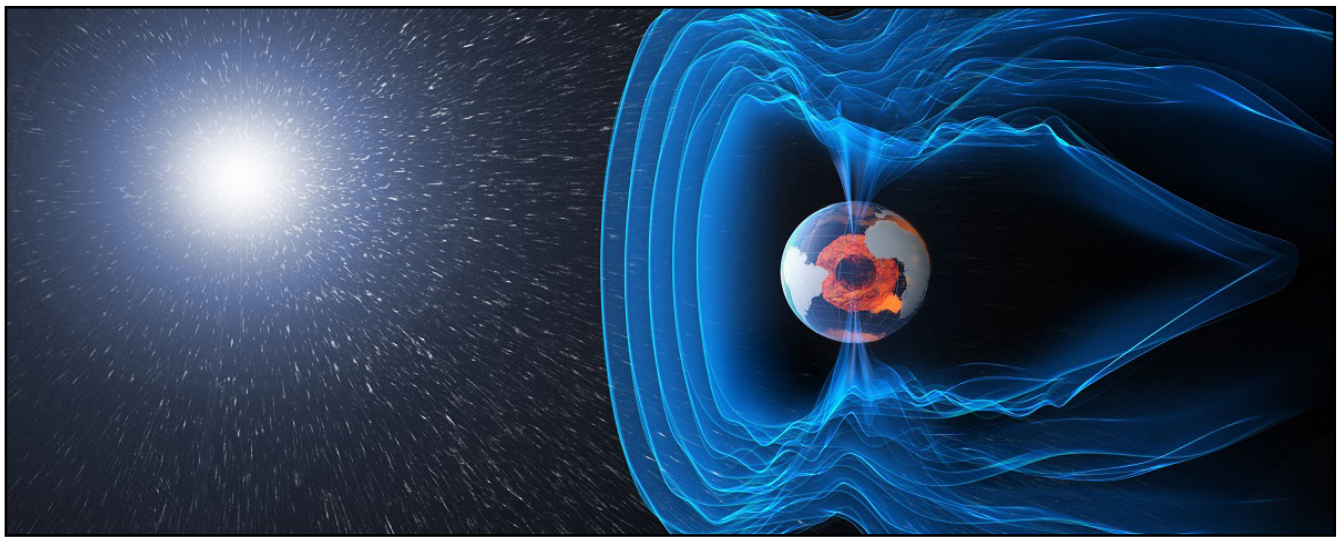
[10] Shanmugavel D, Rusyn I, Solorza-Feria O, Kamaraj S, 2023. Sustainable SMART fertilizers in agriculture systems: A review on fundamentals to in-field applications, Science of The Total Environment, Volume 904, 166729, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166729.

[11] Zhou Y, Guo L, Dai G, Li B, Bai Y, Wang W, Chen S, Zhang J. 2024. An Overview of Polymeric Nanoplatforms to Deliver Veterinary Antimicrobials. Nanomaterials (Basel). 14(4):341. doi: 10.3390/nano14040341. PMID: 38392714; PMCID: PMC10893358.

[12] Shukla K, Mishra V, Singh J, Varshney V, Verma R, Srivastava S ., 2024. Nanotechnology in sustainable agriculture: A double-edged sword. Journal of The Science of Food and Agriculture 104(10) DOI: 10.1002/jsfa.13342. https://doi.org/10.1002/jsfa.13342

< إعداد الدكتور: فواز كرد علي، مكتب الترجمة والتأليف والنشر، هيئة الطاقة الذرّية السورية.

علوم وتكنولوجيا مفاعلات بلازما الاندماج النووي الحراري لإنتاج الطاقة النظيفة



ملخص

إن الشمس عبارة عن مفاعل اندماج نووي مستدام طبيعي للطاقة، ومن هنا بدأت الفرق العلمية البحثية الدولية جهودها في السعي للتعمق في فهم آليات توليد بلازما الاندماج النووي الحراري المتحكم فيه في مفاعلات الاندماج النووي التوكاماك tokamak بغية إنتاج الطاقة الكهربائية. سوف تقدم هذه المقالة العلمية لمحة تاريخية موجزة عن تطور علوم وتقنيات بلازما الاندماج النووي عالمياً، وتشرح بإيجاز بعض طرائق إنتاج طاقة الاندماج النووي مع التركيز على الاتجاه التجاري المتنامي بسرعة لجهود البحث والتطوير في مجال بلازما الاندماج النووي الحراري وإنتاج طاقة اندماجية وافرة وآمنة ونظيفة.

الكلمات المفتاحية: البلازما، تفاعل الدوتريوم-التريتيوم (D-T)، مفاعلات الاندماج النووي الحراري، تآثر البلازما مع المادة، إنتاج الطاقة.

مقدمة

تشكل حالة البلازما حوالي 99.9% من الكون المرئي وفقاً لأبحاث وكالة ناسا الأمريكية [1]. وهذا يقودنا إلى سؤال ما هي حالة البلازما وكيف يمكن توليدها؟ إن البلازما (وتسمى أيضاً بالحالة الرابعة للمادة) هي حالة غازية متأينة معتدلة الشحنة (عدد الشحنات السالبة يساوي عدد الشحنات الموجبة)، وتتولد البلازما عند تطبيق طاقة خارجية معينة على غاز ما وينتج عن ذلك أيونات وإلكترونات وجسيمات معتدلة وفوتونات. وتصنف البلازما حسب درجة حرارتها الإلكترونية (T_e) إلى بلازما باردة (حوالي T_e~10 eV مع كثافة إلكترونية أقل من 10^{18} cm^{-3}) وبلازما حارة اندماجية (T_e~10 keV مع كثافة إلكترونية أكبر من 10^{18} cm^{-3}) [2, 3]. إن قلب الشمس والنجوم عبارة عن مفاعلات اندماج نووية مستدامة طبيعية (الشكل 1)، والاندماج النووي الحراري المتحكم فيه، أو«الاندماج» اختصاراً، هو عبارة عن صنع شمس اصطناعية على الأرض، طبعاً هذا ليس بالأمر السهل؛ لكننا نأمل بالمستقبل القريب أن يثبت العلماء أنه ليس ممكناً فحسب، بل ضرورياً أيضاً لتوفير مصدر نظيف للطاقة.

الشكل 1. الشمس والنجوم المصادر الطبيعية للطاقة المستدامة.

إن تفاعلات طاقة الاندماج النووي الحراري هي عبارة عن تفاعلات اندماج عناصر خفيفة للحصول على عناصر أثقل مع تحويل فرق الكتلة إلى كمية كبيرة من الطاقة [4]. لقد شهدت خمسينيات القرن الماضي بداية إنتاج طاقة الاندماج النووي الحراري، حيث تم تقديم مفاهيم فيزيائية للتفاعل النووي المسيطر عليه لطاقة الاندماج [5] من خلال منظومتين (جهازين) هما ستيلاريتور (stellarator) [6] وتوكاماك (Tokamak) [7] من قبل علماء في الولايات المتحدة والاتحاد السوفيتي على التوالي. على التوازي مع السعي لإنتاج الطاقة الاندماجية، ظهرت العديد من التطبيقات التكنولوجية الأخرى الناجحة في مجالات البحث الداعمة للاندماج. ولقد ساهمت تحديات تقنية في تأخير تحقيق إنتاج الطاقة الاندماجية النووية، بما في ذلك التسرع في تشجيع التجارب على مفاهيم مفاعلات متنوعة دون إجراء تحليلات تصميمية كافية لهذه المفاهيم. إضافة إلى ذلك، كانت المعرفة العلمية والخبرة في بعض تجارب الاندماج النووي لا تزال في طور البحث والنمو. ولكن من الملاحظ أنه خلال العقود الأخيرة من القرن العشرين وأوائل القرن الحادي والعشرين، تم إنفاق مادي هائل في مجال البحث العلمي والتطوير في معظم فروع العلوم والتكنولوجيا وخاصة في مجال طاقة الاندماج، وخلال السنوات القليلة الماضية ظهر منهج علمي يعتمد على البيانات والمعطيات الحاسوبية وذلك لمساعدة العلماء على تحليل نتائج العلوم والتكنولوجيا المعقدة بما يتماشى مع مخصصات الموارد المتوافرة، وقد تبنته بسرعة مراكز الأبحاث الأكاديمية والحكومية والصناعية السائدة حول العالم. وقد ساهم ذلك في زيادة كبيرة في توفير الرؤى والمعرفة قبل الشروع في العمليات التجريبية أو الصناعية الأكبر. لم تكن علوم فيزياء البلازما وأبحاث الاندماج النووي الحراري خصوصاً، استثناءً، حيث تم اعتماد المنهج القائم على البيانات تحديداً لتدريب الآلات (الحواسب العملاقة والذكاء الاصطناعي) على مساعدة البشر في تقييم البيانات العلمية المطلوبة الهائلة التي تُجمع عادةً في تجارب الاندماج النووي الحراري، وذلك على سبيل المثال لتحليلها قبل إنفاق المزيد من الموارد البشرية والمادية والمضي قدماً في الأبحاث. إضافة إلى ذلك، كانت هذه فرصة لأبحاث طاقة الاندماج النووي للانتقال تدريجياً من المخابر والمراكز البحثية الحكومية إلى الشركات والمراكز البحثية الخاصة والتجارية، مع حزمة جديدة من معايير وإجراءات الأبحاث العلمية، وفهم أعمق لكيفية إجراء الباحثين في مجال الاندماج النووي الحراري لأبحاثهم [8–10].

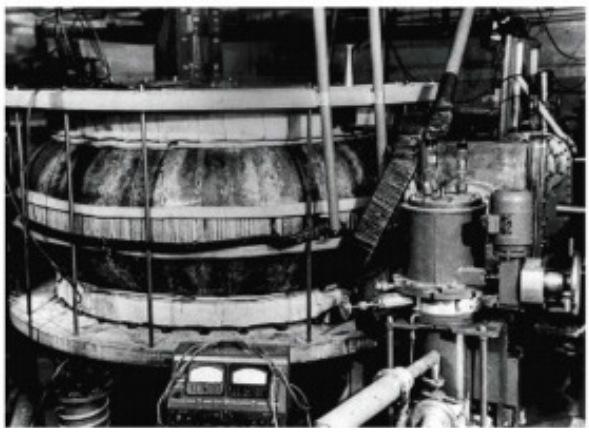
وفي الآونة الأخيرة، برز اهتمام متجدد بجميع مواضيع طاقة الاندماج النووي الحراري من قبل الوكالة الدولية للطاقة الذرية في إشارة واضحة إلى أن إنتاج طاقة الاندماج النووي يكتسب هوية جديدة بشكل متزايد مع دعم مناهج علمية مختلفة، حيث تلتزم المؤسسات العامة والخاصة العالمية بإحياء جهود البحث والتطوير في مجال طاقة الاندماج النووي النظيفة كمصدر واعد لتوليد الطاقة الكهربائية [11].

سوف نناقش في هذه المقالة العلمية بعض المفاهيم الرئيسية للاندماج النووي الحراري التي طُوّرت في العقود القليلة الماضية، ونسلط الضوء على التحول الكبير في هذه الجهود؛ إذ من الواضح أننا نشهد نقطة تحول في أبحاث الاندماج النووي، ويدعم هذا الرأي الزيادة الهائلة في التمويل الخاص لأنشطة البحث والتطوير في مجال الاندماج النووي، والعدد المتزايد من الشركات الناشئة التجارية في مجال الاندماج النووي في جميع أنحاء العالم، مع إمكانية حقيقية، أكثر من أي وقت مضى، أنه في المستقبل القريب، ستوفر طاقة الاندماج النووي الحراري مصدراً اقتصادياً للطاقة المستدامة والنظيفة في جميع أنحاء العالم.

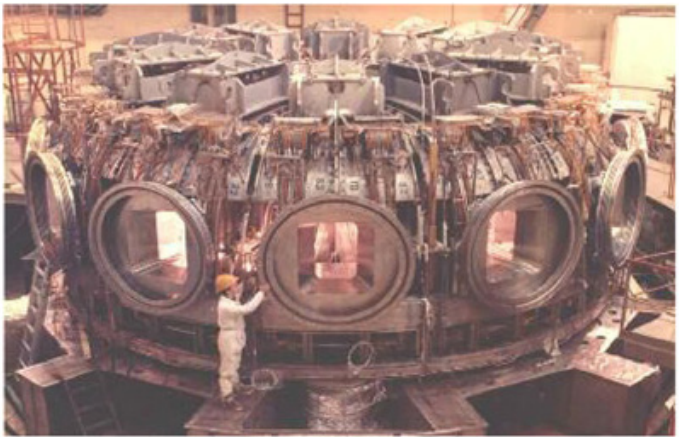
مفاعلات الاندماج النووي الحراري Tokamak

في مفاعل الاندماج النووي الطبيعي (الشمس)، تعمل قوة الجاذبية الكبيرة الناتجة عن كتلة الشمس الهائلة على حصر البلازما plasma confinement، وهذه الشروط الطبيعية غير متوافرة على كوكب الأرض، لذلك ابتكر العلماء تقنيات وطرقاً مختلفة لحصر البلازما بواسطة الحقول المغناطيسية من أجل الوصول إلى درجة الحرارة العالية (10 keV أو ما يعادل 10^8 K) اللازمة لحدوث تفاعل الاندماج والحفاظ على توازنها واستقرارها، ومنها مفاعلات التوكاماك والستيلاريتور والحصر الاندماجي بالقصور الذاتي inertial confinement fusion (ICF) والبلازما المحرقية الحارة الكثيفة الاندماجية fusion dense hot plasma focus [8، 3]. إذاً ما هو مفاعل الاندماج التوكاماك ومن أين أتت هذه التسمية؟ كلمة **التوكاماك** TOKAMAK هي اختصار لعبارة روسية TOroidal'naya KAmera s MAgnitnymi Katushkami تعني الحجرة الحلقية مع الملفات المغناطيسية [12].

اقترح العالم الأمريكي ليمان سبيتزر Lyman Spitzer في عام 1953 جهاز ستيلاريتور stellarator كأول أداة لإنتاج الطاقة النووية الاندماجية [6]، ولاحقاً، في عام 1958، ظهر جهاز التوكاماك (T-1) في الاتحاد السوفيتي (معهد كورتشاتف Kurchatov institute) كجهاز منافس لإنتاج الطاقة الاندماجية نتيجة لأعمال العالمين إيغور تام و أندريه ساخاروف (Igor Tamm and Andrei Sakharov). ويبين الشكل 2 صورة لأول توكاماك T-1، والشكل 3 للتوكاماك T-15 الموجودين في معهد كورتشاتف [7].

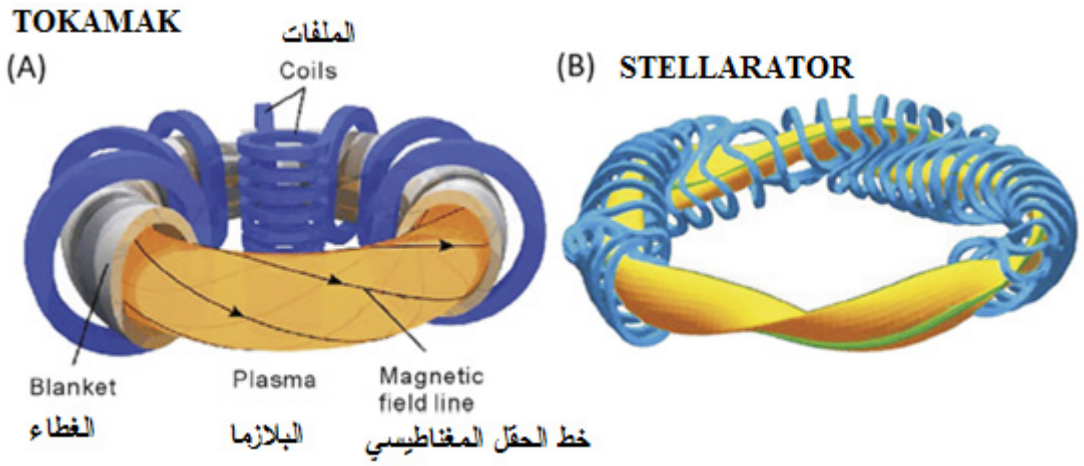


الشكل 2. صورة لأول مفاعل التوكاماك T-1 في معهد كورتشاتف.



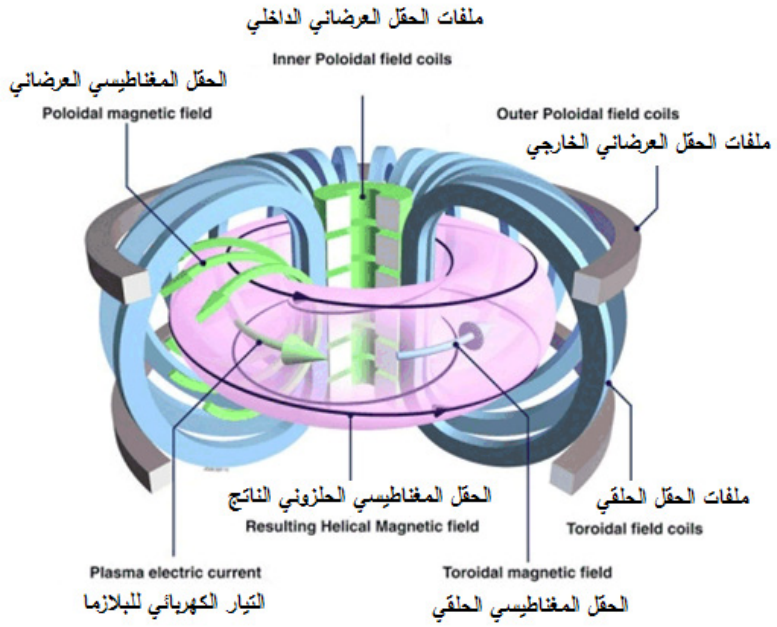
الشكل 3. صورة لمفاعل التوكاماك T-15 في معهد كورتشاتف.

ونظراً لصعوبة تطوير ستيلاريتور في ذلك الوقت، والتنافس الشديد الذي بدأ لتطوير مفهوم التوكاماك، تبنت مراكز الأبحاث العالمية مفاعل التوكاماك لفترة من الزمن، واستخدمه بشكل أكبر لدراسة تكنولوجيا فيزياء البلازما الاندماجية. ومع ذلك، حقق لاحقاً ستيلاريتور عودة ملحوظة، وأُعيد إحياؤه مؤخراً لاختبار مفاهيم أكثر صلة لم تكن قابلة للتطبيق من الناحية التكنولوجية وقت اختراعه. يوضح الشكل 4 مقارنة بين تصميم ستيلاريتور ومفاعلات توكاماك الاندماجية [13]، وخاصة في طريقة الحصر المغناطيسي. حيث يتشكل في التوكاماك التحويل الدوراني للمجال المغناطيسي الحلزوني من خلال مجال حلقي تولده ملفات خارجية، إضافة إلى مجال مغناطيسي بولوئيدي (عرضاني) يولده تيار البلازما. أما في الستيلاريتور، فينتج المجال اللولبي بالكامل عن ملفات خارجية غير متماثلة المحور.



الشكل **4.** مخططات البلازما المحصورة مغناطيسياً في: (A) التوكاماك (TOKAMAK) و(B) الستيلاريتور (STELLARATOR).

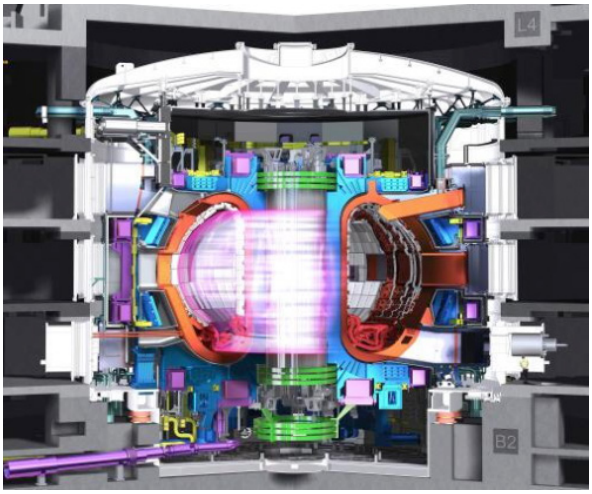
ويبين الشكل 5 هندسة الملفات للتوكاماك مع الحقول المغناطيسية الموافقة؛ حيث تُحفِّز ملفات المجال الحلقي الزرقاء وملفات المجال البولوئيدي الداخلية الخضراء المجالات المغناطيسية الملونة المقابلة، والموضحة بالأسهم. كما يُحفّز المجال البولوئيدي زيادة في تيار البلازما. تُشكّل المجالات المغناطيسية المُجتمعة خطوط مجال حلزونية، موضحة بالأسهم السوداء.



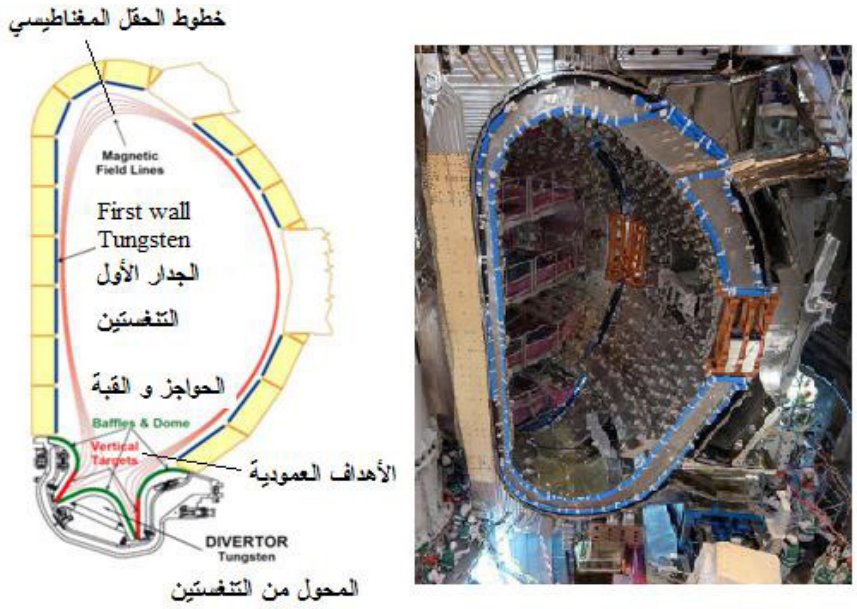
الشكل **5.** هندسة الملفات للتوكاماك مع الحقول المغناطيسية الموافقة [14].

ويجري العمل حالياً نتيجة لتضافر الجهود الدولية على بناء مفاعل تجريبي توكاماك دولي International Tokamak Experimental Reactor (ITER) في فرنسا لإنتاج طاقة الاندماج التي سوف تستخدم لتوليد الطاقة الكهربائية. ويبين الشكل 6 رسماً تخطيطياً لجهاز توكاماك (ITER) حيث يوضح المكونات الأساسية مثل ملفات الحقل، والملف اللولبي المركزي، وحجرة الانفراغ، ووحدة الغطاء، والمحوّل [15].

ويستخدم التصميم الحالي (الأحدث) للمفاعل ITER مادة التنغستين في تصنيع كل من الجدار الداخلي لحجرة البلازما الرئيسية، والمُحوّل المؤلف من كاسيتات قابلة للاستبدال؛ حيث الخطوط المتداخلة هي خطوط المجال المغناطيسي والبلازما المحصورة مُحاطة بالفاصل الذي يمثل آخر خط حقل مغناطيسي مغلق (أي لا يتقاطع مع سطح مادة الجدار الداخلي للمفاعل المواجه للبلازما). ويبين الشكل 7 مقطعاً عرضياً لحجرة البلازما الرئيسية في مفاعل التوكاماك وبعض مكوناتها.

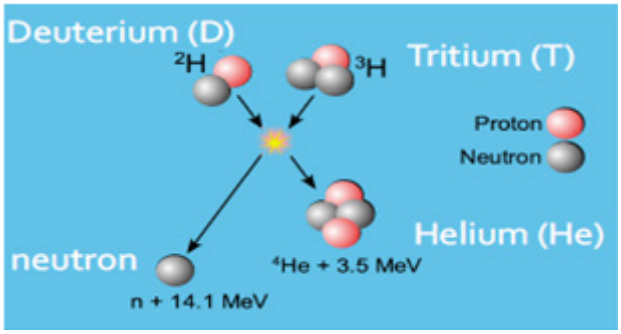


الشكل **6.** رسم تخطيطي لجهاز توكاماك (ITER) مع بعض المكونات الأساسية.



الشكل **7.** المقطع العرضي لحجرة البلازما الرئيسية في مفاعل التوكاماك [8, 15].

يعد تفاعل الدوتريوم (D) deuterium مع التريتيوم (T) tritium هو التفاعل الأساسي في مفاعلات الاندماج النووي الحراري، حيث تكون نواتج هذا التفاعل هي الهليوم (He) (مع تحرير طاقة 3.5 MeV) والنترونات (neutron) (مع تحرير طاقة عالية 14.1 MeV) [8]، كما هو مبين بالشكل 8. وينتج عن تفاعل الاندماج تدفقات عالية مختلفة من الجسيمات المشحونة (الأيونات والإلكترونات) والإشعاعات (النترونات) والتسخين.



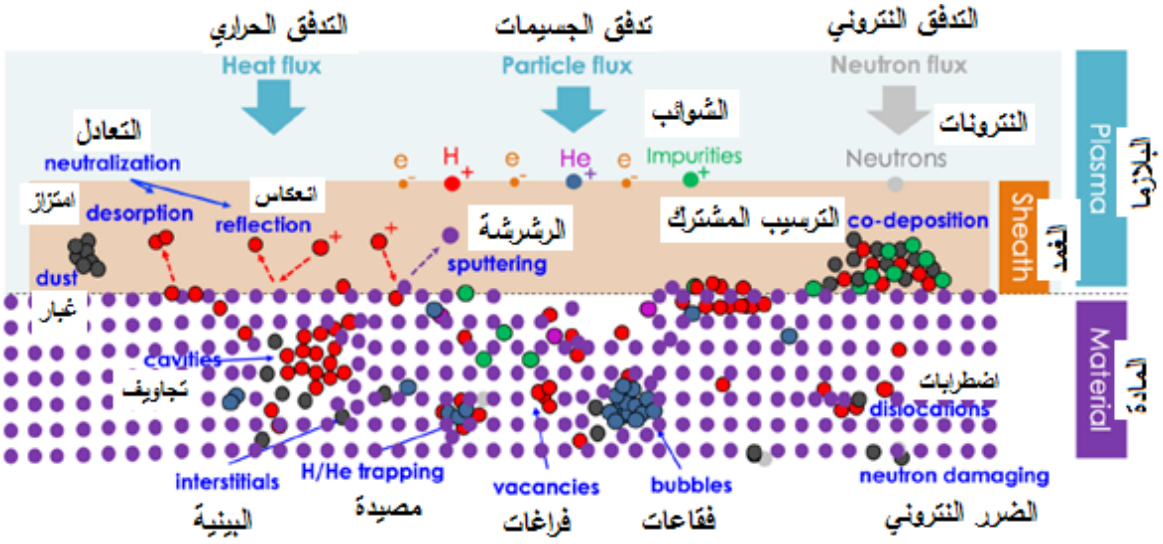
الشكل **8.** تفاعل الدوتريوم (D) مع التريتيوم (T) السائد في مفاعلات الاندماج النووي الحراري.

إن المهمة الرئيسية للحصر المغناطيسي magnetic confinement داخل حجرة البلازما هي توفير جميع الخصائص والظروف اللازمة للحفاظ على توازن واستقرار البلازما وعلى درجة حرارة البلازما اللازمة لحدوث تفاعلات الاندماج. وهنا من المهم جداً أيضاً اختيار مواد قادرة على تحمل الظروف القاسية، مثل درجات الحرارة العالية جداً والقذف النيوتروني عند بناء مفاعلات الاندماج النووي. واستجابةً للعدد المتزايد من التصاميم النموذجية لمفاعلات الطاقة الاندماجية، يجري العمل على اختيار المواد المستخدمة في مفاعل الاندماج (توكاماك)، وفق معايير محددة منها: استخدام مواد جديدة لتقليل التنشيط في مكونات مفاعل الطاقة الاندماجية، وتطوير مركبات تُستخدم داخل مفاعل الاندماج لتحسين إنتاج نظير التريتيوم المشع الذي يُعدّ وقوداً اندماجياً، واستخدام عناصر مغناطيسية مقاومة للإشعاع في مفاعلات الاندماج، واستخدام مواد قادرة على الاحتفاظ بقوتها في درجات حرارة عالية جداً. إضافة إلى ذلك يتم العمل على إنتاج مواد مفاعلات الطاقة النووية الاندماجية، والتي توفر بيانات عينات مُشعة وتنبؤات تحليلية تُتيح اختياراً أكثر موثوقية لمواد الاندماج لتصميم المفاعل وتشغيله، وخاصةً للتطبيقات التجارية. وفي حالة البلازما الممغنطة، يتناسب معدل الاندماج طردياً مع شدة المجال المغناطيسي، ولهذا السبب، تُقدم بعض الشركات العاملة في صناعة الاندماج حلولاً للتحكم في المجالات المغناطيسية من خلال ابتكار مواد فائقة التوصيل مقاومة لدرجات الحرارة العالية [16].

التآثر المتبادل بين البلازما والسطح الداخلي لمفاعل الاندماج النووي

كما ذكرنا، إن درجة حرارة بلازما الاندماج في مفاعل التوكاماك التجريبي الدولي (ITER) ومحطات الطاقة المستقبلية المتوقعة هي ما يعادل متوسط طاقة حركية لنظائر الهدروجين يبلغ حوالي 10 keV؛ ولذا، تلتقي الجسيمات الخارجة من البلازما مع مواد الجدار الداخلي لحجرة البلازما، حيث يتم انتقال طاقتها الحركية إلى السطح الداخلي للمفاعل على شكل إزاحات ذرية وطاقة حرارية. إضافة إلى ذلك، تُنتج تفاعلات الدوتريوم مع التريتيوم نوى الهليوم والنترونات مع طاقات إجمالية تصل إلى 17.6 MeV. نظرياً، في مفاعل التوكاماك ونتيجة للحصر المغناطيسي المطبق يجب أن تكون البلازما محصورة بالكامل وبعيدة عن السطوح الداخلية لمكونات حجرة التوكاماك، ولكن لسوء الحظ عملياً في الواقع، يحدث هروب لمكونات البلازما في منطقة المحول divertor الموجود في أسفل حجرة المفاعل وكذلك في بعض المناطق المحيطية (الحواف). وتتكون هذه المناطق المحيطية من الطبقة الحدودية للبلازما التي تكون فيها خطوط الحقل المغناطيسي مفتوحة scrape off layer (SOL)، والمادة القريبة من السطح المعرضة للتدفقات الحرارية والجسيمية الشديدة تحت تأثير غمد البلازما والعمليات الفيزيائية والكيميائية التي تجري ضمنه، والمواد الهيكلية المعرضة للطيف النيوتروني الكثيف، والذي ينتج تراكيز عالية جداً من العناصر المتحولة داخل كتلة المادة من خلال التفاعلات النووية، حيث يتم امتصاص النيوترونات وتنبعث جسيمات البروتونات أو جسيمات ألفا من النواة، مما يحول النواة إلى عنصر آخر مختلف. ومن ناحية أخرى، تعدّ التفاعلات المتبادلة بين البلازما ومواد سطح حجرة الانفراغ مهمة جداً لإنتاج طاقة الاندماج واستدامتها، وتؤثر على زمن حياة المواد المواجهة للبلازما نتيجةً لعمليات التآكل أثناء عملية التشغيل المستقر والآني، وعلى أداء بلازما الاندماج نتيجةً لتلوث البلازما بالمواد المتآكلة، وعلى ترتيبات التريتيوم (إكثار التريتيوم tritium breeding)، بما في ذلك الترسيب المشترك لعنصري التريتيوم والدوتريوم في المواد المتآكلة/المعاد ترسيبها، والأهم من ذلك، تؤثر على أداء الاندماج في قلب البلازما. وبالمثل، يؤثر أداء المواد البنيوية الحجمية والمواد السطحية الموجودة في بيئة التحلل الصعبة، مع إجهادات كبيرة متغيرة بمرور الوقت، وبيئات كيميائية تآكلية، وتدفقات كبيرة من نيوترونات الاندماج، على الترتيبات الحرارية واستطاعة مفاعل الاندماج، وعلى توازن التريتيوم الكلي، ويتحكم في عمر تشغيل/استبدال حجرة الانفراغ [17]. يتطلب اكتساب فهم الظواهر المتعددة التي تمثل آليات التآثر المتبادل بين البلازما والمادة والقدرة على التنبؤ في هذا المجال الحيوي معالجة متزامنة ودقيقة لفيزياء معقدة ومتعددة الأوجه لبلازما الاندماج كما هو موضح في الشكل 9 [18].

تعدّ هذه التفاعلات من المشكلات الرئيسية في أبحاث الاندماج النووي، حيث لا توجد مواد قادرة على تحمل درجة الحرارة العالية للبلازما المستخدمة في تفاعلات الاندماج؛ لذلك، من المهم مراعاة تأثيرات الأنواع التالية عند تفاعلات البلازما مع الجدران في تصاميم مفاعلات الاندماج المستقبلية: دورة تسخين وتبريد مناسبة للحمل، والتنشيط الإشعاعي والهشاشة بسبب إشعاع النيوترونات بمرور الوقت، وانطلاق الإلكترونات والأيونات مع طاقات عالية، وأشعة ألفا، وإصدار الإشعاع الطيفي (الأشعة تحت الحمراء، والمرئية، والأشعة فوق البنفسجية، والأشعة السينية) [8]. عموماً، وفي معظم تصاميم مفاعلات الاندماج، تستخدم مواد وخلائط مختلفة وفقاً لمكون حجرة



الشكل **9.** مخطط توضيحي لبعض التفاعلات السطحية المعقدة والتآزرية ومتعددة المقاييس بطبيعتها، التي تحدث على سطح المادة في مفاعلات بلازما الاندماج النووي الحراري.

البلازما في مفاعل الاندماج النووي الحراري، ومن هذه المواد: التنغستين، الفولاذ، التيتانيوم، الكربون، البيريليوم، الليتيوم، القصدير وخلائطها. وحالياً هناك اهتمام وأبحاث علمية حول جدوى استخدام مواد ذات درجات انصهار منخفضة مثل القصدير والليتيوم وخلائطها لتكون أحد مكونات السطح الداخلي في مفاعل الاندماج؛ حيث يأمل العلماء أن تشكل هذه المواد بعد تلقيها الجرعة الأولى من تدفق الجسيمات الطاقية وتبخرها منطقة من التدريع البخاري المتوازن أمام مادة السطح الأساسية، حيث تتم فيها عمليات التآثر بين البلازما وبخار المادة مما يخفف من تأثير البلازما على السطح الداخلي للمفاعل (وكان لهيئة الطاقة الذرية السورية مساهمة في هذا المشروع مع الوكالة الدولية للطاقة الذرية من خلال مشروع بحث تنسيقي لدراسة تأثير البلازما المحرقية الحارة الكثيفة الاندماجية على مادة القصدير وخلائطها) [19–21].

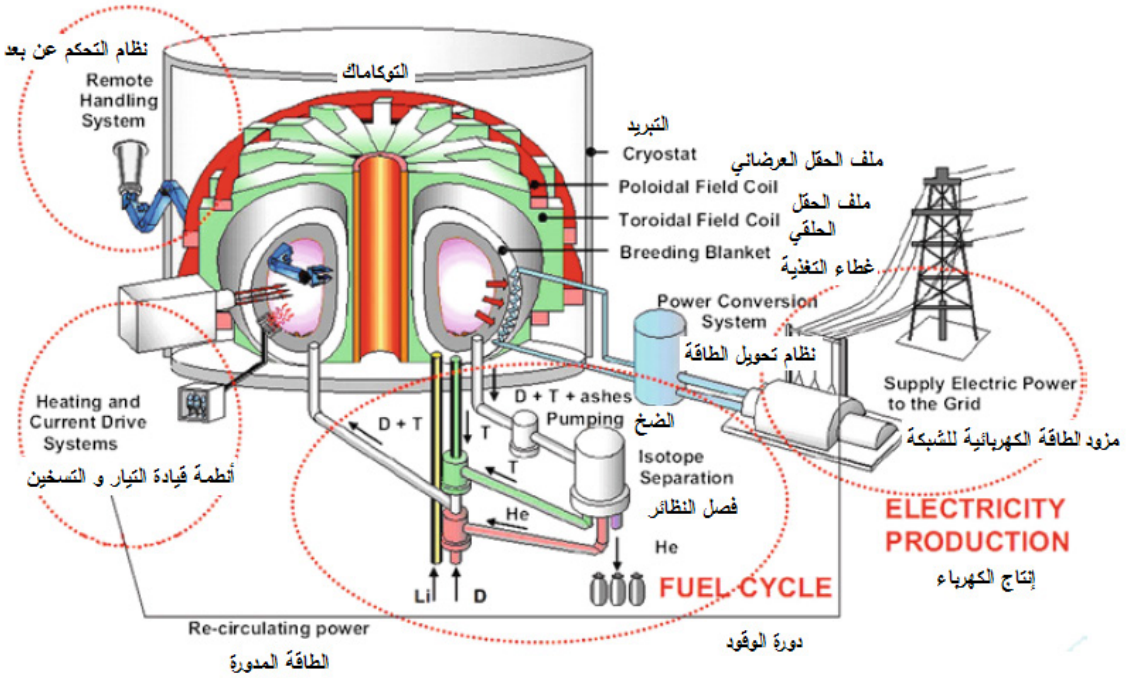
بعد إنتاج البلازما وتسخينها إلى درجات حرارة الاندماج، من المهم إجراء تشخيصات روتينية لمتابعة سلوكها ومعرفة معاملاتها (كثافة ودرجة حرارة وإصدارتها الإشعاعية وغيرها)، ومن أهم أدوات تشخيص بلازما الاندماج: مسبر لانغمور، وحلقة التدفق، وتشتت طومسون، وكواشف النيوترونات، وأجهزة الكشف عن الأشعة المرئية والأشعة تحت الحمراء والأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية، وغيرها [2، 3، 8، 16].

طاقة الاندماج النووي الحراري لتوليد الطاقة الكهربائية

يمكن توليد الطاقة الكهربائية من مفاعل طاقة الاندماج النووي الحراري عن طريق إحاطة بلازما الاندماج بطبقات عازلة تمتص النيوترونات عالية الطاقة الناتجة عن التفاعل، ويمكن بعد ذلك استخلاص الطاقة من هذه الطبقات بطرق مختلفة منها [8، 16]: التوربينات البخارية، والتحويل المباشر، وأنابيب الموجة الناقلة. ويوضح الشكل 10 الأجزاء الرئيسية لمحطة توليد الطاقة الكهربائية بواسطة مفاعلات الطاقة الاندماجية [8].

في الآونة الأخيرة تجاوز مجموع استثمارات القطاع الخاص والمنح العامة ضعف الاستثمارات في تاريخ الصناعة بأكمله في مجال مفاعلات الاندماج النووي الحراري وطاقة الاندماج، ويلخص الجدول 1 بعض الشركات الرئيسية في مجال البحث والتطوير التجاري للاندماج النووي لإنتاج الطاقة الكهربائية كهدف رئيسي، مع إضافة بعضها تخصصات لخدمة أنشطة الدفع الفضائي والبحري.

من الجدير بالذكر، إن انضمام كبرى الشركات العالمية الخاصة التجارية للاستثمار في مجال مفاعلات بلازما الاندماج النووي وطاقة الاندماج يُعطي شعوراً بالتفاؤل بأن الطاقة الكهربائية من إنتاج طاقة الاندماج النووي قد تصبح ممكنة في المستقبل القريب. في هيئة الطاقة الذرية السورية، انطلقت العديد من المشاريع الاستراتيجية في مجال فيزياء البلازما وتطبيقاتها المتعددة ومنها البلازما الحارة المحرقية الاندماجية التي تحاكي ما يحصل من عمليات فيزيائية وتفاعلات بين البلازما والمواد المكونة للسطح الداخلي لحجرة البلازما الرئيسية في التوكاماك. وحالياً على المستوى العربي يتم طرح البرنامج العربي لطاقة الاندماج الذي سوف يركز على التعمق في فهم



الشكل **10.** الأجزاء الرئيسية لمحطة توليد الطاقة الكهربائية العاملة على طاقة الاندماج النووي الحراري.

الجدول **1.** بعض الشركات التجارية التي تهتم بأبحاث طاقة الاندماج النووي الحراري وتطويرها [16].

Company	Website
Avalanche energy	/https://www.avalanche.energy
Commonwealth fusion systems	/https://cfs.energy
Crossfield fusion LTD	/http://crossfieldfusion.com
.CTFusion, Inc	/https://ctfusion.net
DEUTELIO	/https://www.deutelio.com
.ELECTRIC FUSION SYSTEMS, Inc	/https://electricfusionsystems.com
EX-FUSION	/https://www.ex-fusion.com
FIRST LIGHT FUSION	/https://firstlightfusion.com
FOCUSED ENERGY	/https://focused-energy.world
GENERAL FUSION	/https://generalfusion.com
Helical Fusion	/https://www.helicalfusion.com
HELION ENERGY	/https://www.helionenergy.com
HYPERJET FUSION CORPORATION	/http://hyperjetfusion.com
LPPFUSION, INC	/https://www.lppfusion.com
PRINCETON FUSION SYSTEMS	/https://www.princetonfusionsystems.com
RENIASSANCE FUSION	/https://stellarator.energy
TOKAMAK ENERGY	/https://www.tokamakenergy.co.uk
TYPE ONE ENERGY GROUP	/https://www.typeoneenergy.com
ZAP ENERGY	/https://www.zapenergyinc.com

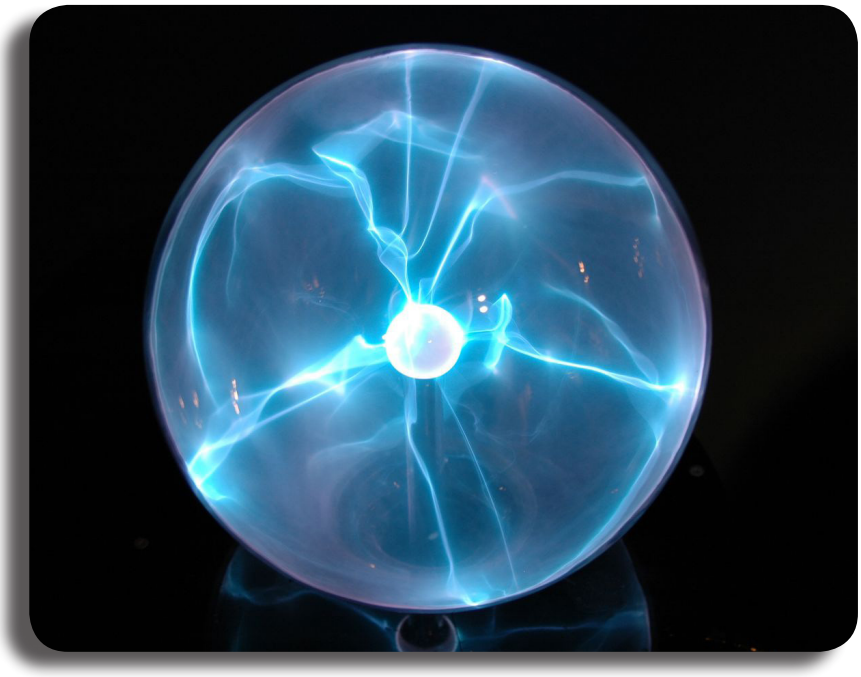
فيزياء مفاعلات الاندماج النووي الحراري وتطبيقاتها في إنتاج طاقة اندماج نظيفة تستخدم فيما بعد لتوليد الطاقة الكهربائية. وبشكل عام، يبقى مشروع إنتاج طاقة الاندماج النووي الرئيسي هو المفاعل التجريبي التوكاماك الدولي (ITER) في فرنسا. ويمثل هذا المشروع نموذجاً لكيفية توسيع نطاق البحث والتطوير في صناعة الاندماج النووي في المستقبل.

السلامة والأمان في مفاعلات الاندماج النووي

إن احتمالية حصول حوادث إشعاعية كارثية ناتجة عن مفاعلات الاندماج النووي الحراري ضئيل جداً فهي تعدّ آمنة، وذلك لأن عمل أجهزة الاندماج النووي يتطلب التحكم بمعاملات عديدة، مثل درجة الحرارة الإلكترونية، وضغط الغاز داخل حجرة الانفراغ، وشدة الحقل المغناطيسي من أجل إنتاج الطاقة الاندماجية. ونظراً لأن الوقود الأساسي في مفاعلات الاندماج يكون على شكل بلازما حارة اندماجية، تتلاشى بسرعة إذا لم يتم تحقق الشروط اللازمة لتوليدها وتوازنها واستمرارها. ومع ذلك، قد تقع حوادث صغيرة في أجهزة مفاعلات الاندماج، ومنها إصدار موضعي للإشعاع أو إصابة العاملين، وخاصة حول مجالات الحقول المغناطيسية القوية. وفيما يتعلق بالنشاط الإشعاعي، تشمل المخاطر الإصدار الإشعاعي لنظائر الليثيوم أو التريتيوم، أو الإهمال في اتباع إجراءات السلامة المهنية والإشعاعية أثناء التعامل مع مكونات المفاعل المشعة، حيث تُنتج مفاعلات الاندماج النووي مواد مشعة أقل بكثير من مفاعلات الانشطار. ومنه تتمثل المزايا الرئيسية لطاقة الاندماج النووي الحراري في توفير طاقة وفيرة وآمنة ونظيفة مع وقود غير محدود، وإنتاج الحد الأدنى من النفايات المشعة طويلة الأمد، وعدم انبعاث غازات دفيئة، مما يوفر مصدر طاقة أساسياً قوياً ومستداماً بكثافة طاقة عالية لتحقيق أهداف أمن الطاقة والمناخ في المستقبل.

الخاتمة

نظراً للتحديات الهندسية والتقنية والتصميمية التي واجهت المفاعل النووي الحراري التجريبي الدولي (ITER)، أصبح المجال أكثر انفتاحاً اليوم لاحتضان إنتاج طاقة الاندماج النووي في الإطار التجاري. ولذلك، أصبح من الأجدى المضي قدماً في أبحاث الاندماج تحت المظلة التجارية. وتشير التقارير الأخيرة الصادرة عن مؤسسات صناعة الاندماج إلى أن جهود البحث والتطوير في مجال طاقة الاندماج النووي بأكملها تسير بخطى متسارعة لمنافسة أشكال أخرى من أساليب توليد الطاقة قريباً. ومع تزايد زخم أبحاث الاندماج النووي في مجال البحث والتطوير التجاري، تستكشف المزيد من الدول النامية إمكانيات توسيع قاعدة معارفها في علوم وتقنيات البلازما، إضافة إلى أبحاث الاندماج. ففي الجمهورية العربية السورية (هيئة الطاقة الذرية السورية)، على سبيل المثال، تجري أبحاث علمية نشطة في مجال فيزياء البلازما وتطبيقاتها في المجالات الطبية والصناعية وإنتاج طاقة الاندماج التي تعدّ مصدراً واعداً لتوفير طاقة آمنة ونظيفة ومستدامة بما يهدف إلى تحقيق أمن الطاقة والمناخ في المستقبل.



المراجع

[1] https://svs.gsfc.nasa.gov/14299 (2025).

[2] Saloum, S., Naddaf, M., Akel, M. Plasma Physics and its applications, Book, AECS, 2010.

[3] Auluck, S., Kubes, P., et al., (2021). Update on the Scientific Status of the Plasma Focus Plasma, 4, p. 450–669.

[4] Freidberg, J. P. (2007) Plasma physics and fusion energy. Cambridge university press, www.cambridge.org/9780521851077.

[5] Parisi, J., Ball, J. (2019). The future of fusion energy. World Scientific.

[6] Spitzer, Jr. L. (1958). The Stellarator Concept. AIP The Physics of Fluids.1(4), p.253- 264.

[7] Smirnov, V.P. (2009). Tokamak foundation in USSR/Russia 1950–1990. Nuclear Fusion. 50(1). P. 014003.

[8] Chen, F.F. (2011) An indispensable truth: how fusion power can save the planet. New York: Springer.

[9] Mazzucato, M. (2018). Mission-oriented innovation policies: challenges and opportunities. Industrial and Corporate Change. 27(5). P.803–815.

[10] Anirudh, R., et al. (2022). Review of Data-Driven Plasma Science. arXiv:2205.15832 physics.plasm-ph.

[11] https://www.iaea.org/resources/databases/fusion-portal

[12] https://suli.pppl.gov. (2025). course/IntroToPlasmaII_Dominguez.pdf

[13] Xu, Y. (2016). A general comparison between tokamak and stellarator plasmas. Matter and Radiation at Extremes.1(4). P.192–200.

[14] Francesco, R. (2020). Fusion energy. EPJ Web of Conferences 246, p. 00013.

[15] https://www.iter.org/ (2025).

[16] Hala, A. M., (2022), Status of nuclear fusion energy science & technology for power production: progress & prospects, 1, p. 7-18.

[17] Wirth,B. D. et al., (2011). Fusion materials modeling: Challenges and opportunities. MRS BULLETIN. 36, p. 216-222.

[18] https://suli.pppl.gov/2021/course/PMI_intro_SULI_Guterl.pdf

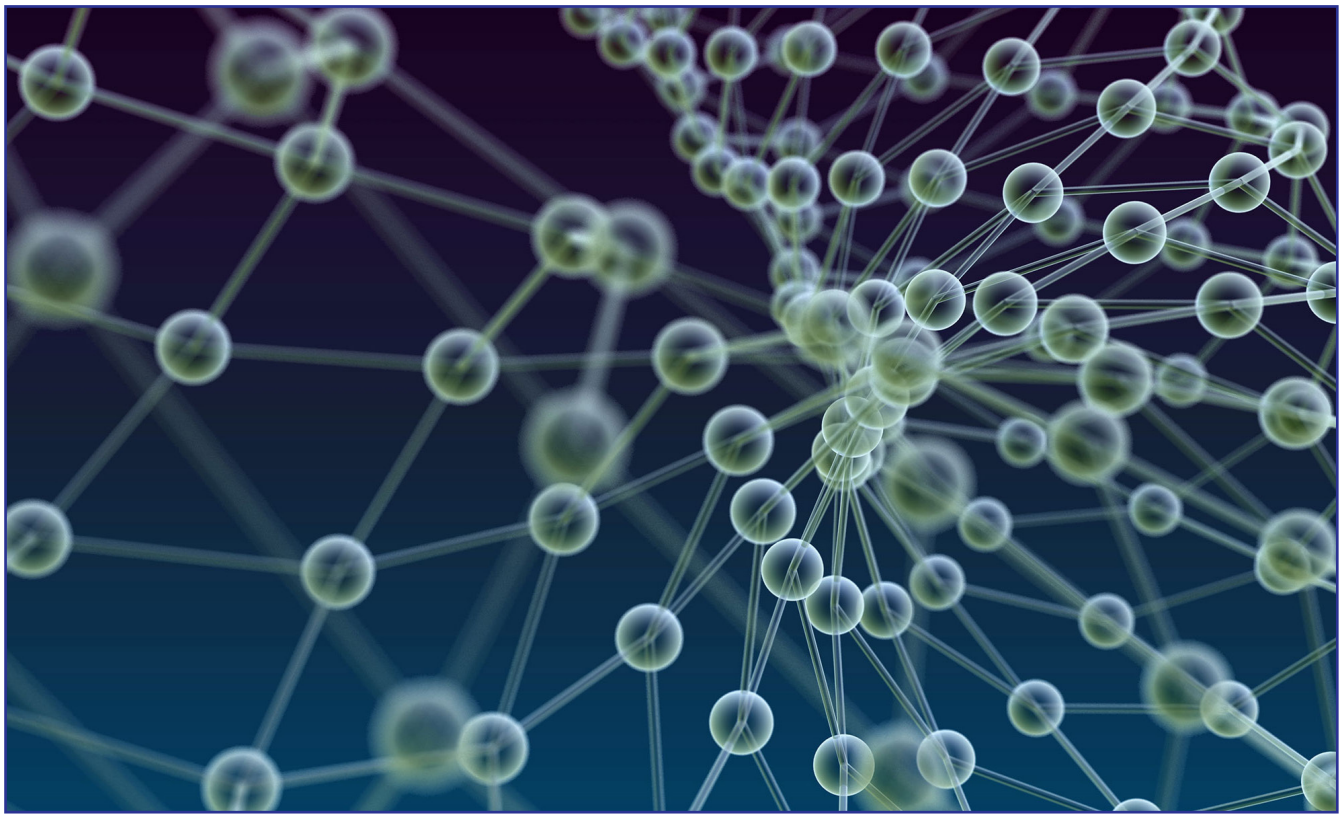
[19] Kajita, S., et al., (2014). Thermal response of nanostructured tungsten. Nuclear Fusion.54(3), p. 033005.

[20] Nemanic, V. (2019). Hydrogen permeation barriers: Basic requirements, materials selection, deposition methods, and quality evaluation. Nuclear Materials and Energy. 19. P.451–457.

[21] https://amdis.iaea.org/CRP/vapour-shielding (2025)

< إعداد الدكتور: محمد عاقل، دائرة البلازما – قسم الفيزياء ، هيئة الطاقة الذرّية السورية.

البوليميرات الحيوية ليست خياراً.. بل ضرورة



ملخص

ينتج العالم حوالي 400 مليون طن من البلاستيك سنوياً، وأكثر من 50% منه يُستعمل مرة واحدة فقط ثم يرمى. فعلياً، يعاد تدوير 9% من نفايات البلاستيك عالمياً، في حين يُحرَق نحو 19%، ويترك الباقي في الطبيعة أو يُطمر في مكبّات النفايات. ومن جهة أخرى، تستغرق بعض أشهر أنواع البلاستيك أكثر من 400 سنة لتتحلل بالكامل، مما يعني أن معظم البلاستيك الذي استُعمل منذ منتصف القرن العشرين ما زال موجوداً في مكان ما على الكوكب. تكشف هذه الأرقام أن البلاستيك ليس مجرد مادة نستعملها، بل أزمة بيئية متراكمة تهدد الكوكب بأكمله، وتحتاج إلى حلول ذكية مثل البلاستيك الحيوي. سنلقي الضوء في هذه المقالة على البلاستيك الحيوي من حيث طرائق الاصطناع والأنواع والمصادر والتحديات والتطبيقات والاتجاهات المستقبلية والاستعمالات المبتكرة في مختلف الصناعات.

الكلمات المفتاحية: بلاستيك حيوي؛ سليلوز؛ لغنين؛ بولي إيثلين حيوي؛ تلوث بيئي؛ بولي هيدروكسي ألكانوات.

مقدمة

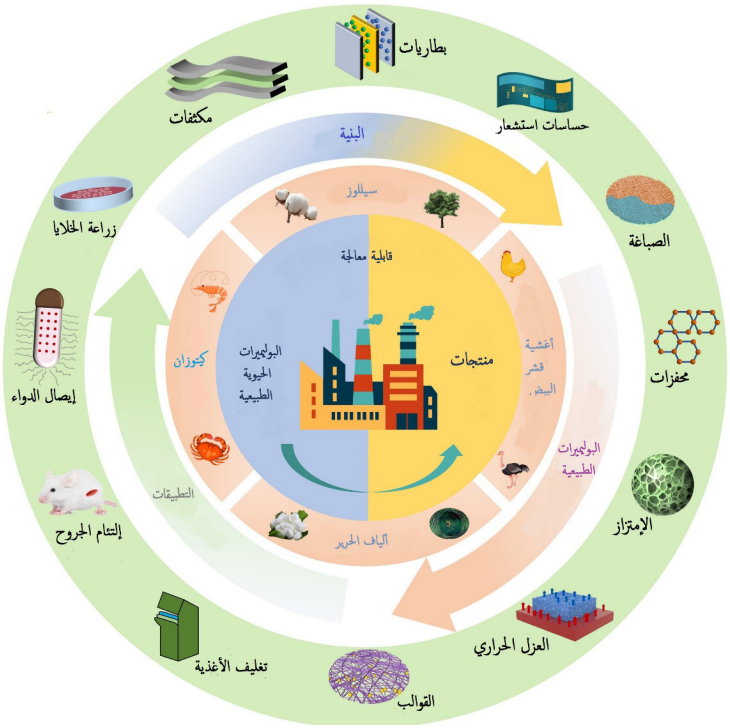
تسبب الاستعمال الواسع للبوليميرات (المواد البلاستيكية) التقليدية المشتقة من النفط في مختلف القطاعات والتطبيقات بتحديات كبيرة ومخاطر على البيئة والحياة البشرية والحيوانية. يستعمل 6% من النفط العالمي في تصنيع اللدائن مما يسرع في استنفاذ الموارد البترولية فضلاً عن الانبعاثات الكربونية الضخمة الناتجة عن هذه الصناعات. وتؤدي البوليميرات إلى تلوث بيئي كبير في الغلاف المائي من بحار ومحيطات وأنهار وبحيرات؛ إذ يلقى ما يقارب 7 مليون طن من البلاستيك سنوياً في البحار، وتتحول إلى جسيمات دقيقة (ميكرو ونانو بلاستيك) تدخل في السلسلة الغذائية للحيوانات البحرية مما يهدد وجودها. كما يتسبب البلاستيك المدفون في المطامر بإطلاق مواد سامة للتربة والنبات مثل الفتالات والبيسفينول. وقد أثبتت الأبحاث الحديثة وجود جسيمات بلاستيكية دقيقة في المياه المعدنية والملح ودم الإنسان؛ مما يسبب إصابات مناعية وأمراض هرمونية فضلاً عن السرطان، كما تعد مواد مثل دي إيتيل هكسيل فتالات (DEHP) وبيسفينول A (BPA) ذات تأثير كبير على الغدد الصم في جسم الإنسان.

تعد التكلفة المنخفضة من إحدى ميزات البوليميرات، إلا أن هناك تكلفة اقتصادية ضخمة خفية يجب أن تؤخذ بالاعتبار، وهي تلك المصروفة سنوياً على تنظيف البيئة من اللدائن (2.5 ترليون دولار سنوياً)، فضلاً عن خسائر قطاع السياحة نتيجة الشواطئ الملوثة. أما الحلول المتوافرة لمعالجة نفايات البوليميرات فهي أكثر كارثيةً مثل التحلل الذي يأخذ عشرات بل مئات السنين، أو الحرق الذي يبعث الديوكسينات السامة والمسرطنة جداً، مما يسهم في تغيير المناخ وتلوثه. ومن هنا بدأ البحث عن بدائل مستدامة مستمدة من أصول بيولوجية للبوليميرات التقليدية، وظهرت البوليميرات الحيوية محدثة ثورة كبيرة في واقع علم المواد. لا تعد هذه البوليميرات صديقة للبيئة فحسب، بل تقدم أيضاً حلولاً مذهلة في القطاع الصحي ومجالات التغليف المختلفة والأواني الغذائية والمواد الحيوية الاستشعارية فضلاً عن المواد عالية الأداء وفائقة المتانة كبدائل للمنتجات القائمة على النفط الخام. جذبت مؤخراً، البوليميرات الحيوية المشتقة من النباتات مثل: الليغنين والسليلوز، إلى جانب تلك المنتجة بالبكتريا مثل: بولي هيدروكسي ألكانوات (PHAs) الاهتمام بشكل كبير لتطبيقاتها الصناعية والصديقة للبيئة. وقد أدى ذلك إلى تحول جذري من الاقتصاد الخطي القائم على الوقود الأحفوري إلى اقتصاد دائري قائم على الموارد الحيوية، مما قدم حلولاً مادية أكثر استدامة ومراعاة للبيئة، وتتماشى مع إطار أهداف الأمم المتحدة للتنمية المستدامة sustainable development goals, SDGs المتضمنة تأمين المياه النظيفة والصحة العامة والاهتمام بالصناعة والابتكار. فضلاً عن التحسن في الوضع البيئي والمناخي العالمي نتيجة الحصول على طاقة نظيفة بأسعار معقولة وإنشاء مدن ومجتمعات واعية بضرورة إنتاج هذه المواد واستهلاكها. تعد البوليميرات الحيوية فرعاً أساسياً في تطبيقات متنوعة نظراً لدورها الهيكلي والوظيفي في الكائنات الحية. وتشمل مزاياها الرئيسية القابلية العالية للتحلل الحيوي والتوافق الحيوي، إذ تساهم بشكل رائد في المجالات الغذائية والمستحلبات والتعبئة والتغليف، وفي مجال الطب تعمل البوليميرات الحيوية كنظم لإيصال الدواء وكزرعات طبية وفي مجال الأطراف الصناعية ومواد التئام الجروح، كما تؤدي دوراً في إنشاء ترميم الأنسجة والأنسجة الذكية ولها تطبيقات في أبحاث الفضاء ومعدات الطيران. تؤدي البوليميرات الحيوية دوراً محورياً في تعزيز التكنولوجيا والاستدامة البيئية؛ فهي تعمل كناقلات نانوية فعالة للعلاجات المستهدفة للسرطان ولها تطبيقات في إطلاق الأدوية والجينات وهندسة الأنسجة. أما حديثاً فالتركيز على اصطناع بوليميرات حيوية متنوعة تشمل السليلوز والليغنين وبولي هيدروكسي ألكانوات PHAs والجيلاتين والكيتوزان والأغاروز والبكتين والألجينات، والتي يمكن الحصول عليها من مصادر نباتية. وتشمل مجالاتها المتنوعة صناعة مستحضرات التجميل والأغذية والأدوية والطب الحيوي. ومن الجدير بالذكر أن الكيتين والكيتوزان يأتيان من مصادر فطرية وهياكل القشريات الخارجية، أما الألجينات فتستخرج من الطحالب البحرية كواحدة من أكثر السكريات المتعددة انتشاراً إلى جانب السليلوز، إذ يلاحظ احتواؤها على سكريات متعددة متوافقة حيوياً وقابلة للتحلل الحيوي إلى جانب ثباتها ووفرتها في الطبيعة. فضلاً عن هذه الخصائص فهي مواد ناقلة للتيار الكهربائي، ولها خصائص مغناطيسية نشطة حيوياً، ومقاومة للاحتراق فضلاً عن إمكانية تشكيلها دون استعمال مذيبات عضوية ضارة.

ما هي البوليميرات الحيوية وما هي مصادرها وأنواعها؟

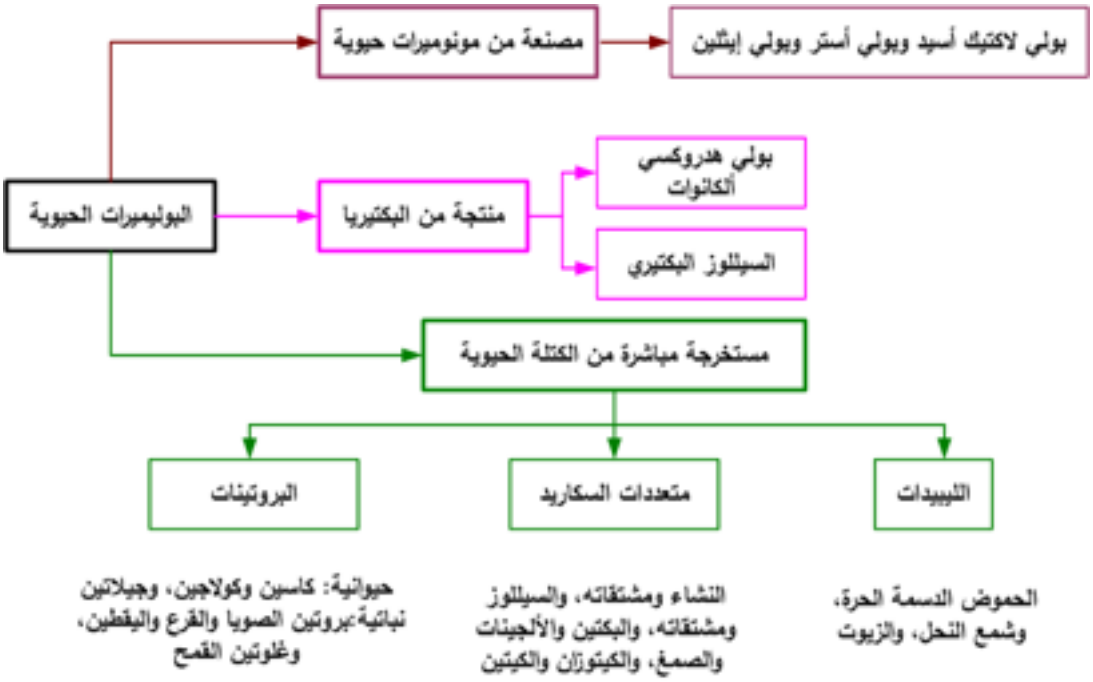
تعرف البوليميرات الحيوية biopolymers بأنها البوليميرات المنتجة من مصادر حيوية، ومنها ما هو قابل للتحلل الحيوي ومنها ما هو غير قابل للتحلل. وتعد النباتات والنشويات والزيوت النباتية والطحالب والكائنات الدقيقة، والمخلفات العضوية والزراعية والمنتجات الثانوية للصناعات الغذائية من أهم المصادر المتجددة في صناعة البوليميرات الحيوية، ويلخص الشكل 1 هذه المصادر؛ فمثلاً، يستعمل نشاء الذرة في صناعة بولي لاكتيك أسيد وهو بلاستيك حيوي قابل للتحلل ضمن شروط خاصة، في حين يستعمل قصب السكر للحصول

على الإيثانول الحيوي لصناعة البولي إيثلين الحيوي وهو بوليمير غير قابل للتحلل، كما يستعمل زيت الخروع في إنتاج البولي أميد الحيوي (غير قابل للتحلل)، ويدخل زيت فول الصويا في تصنيع بولي هيدروكسي ألكانوات PHAs (قابل للتحلل).



الشكل 1. مصادر البوليميرات الحيوية وتطبيقاتها.

تصطنع البوليميرات الحيوية بطرائق كيميائية وبيولوجية مختلفة تبعاً لنوع البوليمير والمصدر المتوفر، ويمكن تصنيفها بشكل عام حسب الشكل 2، وسنستعرض بعض الأمثلة عن طرائق التصنيع ومزايا كل منها وعيوبها.



الشكل 2. تصنيف البوليميرات الحيوية

بولي لاكتيك أسيد polylactic acid, PLA

يمر اصطناع بولي لاكتيك أسيد بخطوات بيولوجية وكيميائية عديدة تبدأ بالحصول على الجلوكوز من الذرة أو قصب السكر عبر عملية التخمير باستعمال بكتريا مثل: lactobacillus، ثم تحويل الكربوهيدرات الناتجة إلى حمض اللاكتيك عبر التخمير اللاهوائي، وبعدها يشكل مونومير اللاكتيد بتكثيف حمض اللاكتيك لإنتاج oligomers الذي يخضع بدوره لعملية نزع الماء لإنتاج حلقة ثنائية من حمض اللاكتيك. تجرى عملية البلمرة النهائية بفتح الحلقة (ring–opening polymerization ROP) بوجود حفازات معدنية كالقصدير أو الزنك لإنتاج PLA عالي الوزن الجزيئي بسلاسل طويلة من حمض اللاكتيك. يمتلك PLA مزايا التحلل الحيوي وهو متوسط الصلابة وذو درجة حرارة انصهار متوسطة تصل للدرجة 160 سلزيوس، مما يجعله ملائماً للاستعمال في الطباعة ثلاثية الأبعاد، كما يستعمل في تغليف المواد الغذائية وصناعة الأطباق والأكواب وحيدة الاستعمال، وفي المجالات الطبية كخيوط جراحية وغرسات مؤقتة. أما أهم عيوب PLA فهي ضعف مقاومته الحرارية وتحلله الحيوي يتطلب ظروفاً خاصة، فضلاً عن تكلفة إنتاج عالية مقارنة بإنتاج البلاستيك التقليدي.

البولي الإيثلين الحيوي bio-poly ethylene, Bio-PE

يصنع البولي إيثلين من مصادر حيوية عوضاً عن النفط الخام؛ إذ يعد هذا المنتج صديقاً للبيئة لأنه ينتج من مواد مستدامة بانبعاثات كربون أقل. يعتمد إنتاج **Bio-PE** على الإيثانول الحيوي الناتج من تخمير مخلفات الذرة وقصب السكر بخمائر أو بكتريا خاصة، ثم يحول الإيثانول الناتج إلى إيثلين حيوي عبر عملية نزع ماء لجزيئة إيثانول، وبوجود حفاز مناسب تحدث بلمرة الإيثلين الحيوي للحصول على **Bio-PE**. يحمل خواص البولي إيثلين العادي الميكانيكية والفيزيائية والكيميائية مع قابليته لإعادة التدوير، ويستعمل في تغليف المواد الغذائية وصناعة الأكياس القابلة للتحلل. أما عيوب **Bio-PE** فهي تكلفة تصنيع عالية مقارنة مع البولي إيثلين التقليدي، كما أن استعمال المحاصيل الغذائية في الصناعة قد يؤثر على الأمن الغذائي العالمي، وتتطلب العملية طاقة كبيرة لتحويل الكتلة الحيوية إلى بلاستيك. وعلى الرغم من ذلك، يعد إنتاج PE-Bio خطوة مهمّة نحو الاقتصاد المستدام، إلا أنه بحاجة للمزيد من الدعم والبحث والتطوير لتعزيز انتشاره.

بولي بوتيلين سكينات poly butylene succinate, PBS

يعد البولي بوتيلين سكينات PBS من البوليميرات الحيوية القابلة للتحلل الحيوي، وينتج من النشاء أو السكر أو من المشتقات البتروكيمياوية. يصطنع بتفاعل بلمرة تكاثف حمض السكسونيك الناتج من تخمير الكتلة الحيوية مع 1–4 بوتان ديول (مشتق بتروكيميائي)، كما يمكن إنتاجه بطرائق حيوية بتفاعل نزع الماء. تجري هذه التفاعلات في مفاعلات كيميائية تحت تفريغ بوجود محفزات من التيتانيوم كما يمكن استعمال إنزيمات حيوية لزيادة المردود. تتلخص مزايا PBS باستعماله في عمليات التغليف وهو ضروري في التطبيقات الطبية كخيوط جراحية وفي مجال الزراعة لتغطية التربة كونه قابلاً للتحلل في التربة ومتوافقاً حيوياً غير سام، وهو يمتلك خصائص ميكانيكية جيدة مشابهة للبولي إيثلين التقليدي. أما عيوب PBS فهي التكلفة العالية مقارنة بالبلاستيك التقليدي والحاجة إلى تطوير مصادر مستدامة لـ 1–4 بوتان ديول.

بولي هيدروكسي ألكانوات Poly hydroxyl alkanoates, PHA

يعدّ البولي هيدروكسي ألكانوات من البوليميرات الطبيعية التي تنتجها البكتريا ولها تطبيقات مهمة في مجال التكنولوجيا الحيوية والطب والمواد المستدامة. كان موريس ليموان أول من وصف بولي هيدروكسي ألكانوات (PHAs) كفئة من البولي إسترات القابلة للتحلل الحيوي في عام 1926. توجد هذه البوليميرات الحيوية بشكل طبيعي وتخزنها مجموعة متنوعة من البكتريا عند وجود فائض من مصدر الكربون كمواد احتياطية على شكل حبيبات داخل الخلية، غالباً في ظل ظروف بيئية قاسية مثل درجات الحرارة المرتفعة أو البيئات ذات الملوحة أو الأكسجة العالية. تنتج البكتريا بولي هيدروكسي بيوتيرات (PHB) وهو نوع من بولي هيدروكسي ألكانوات (PHA) كبوليمير داخلي لتخزين الكربون والطاقة؛ إذ يمكنها تخزين ما يصل إلى 90% من وزنها الجاف على شكل PHAs؛ لذلك تعد العمليات البيولوجية الوسيلة الأساسية ولكن ليست الوحيدة للإنتاج الصناعي لهذه المجموعة من البوليميرات. تستعمل مجموعة واسعة من الكائنات الحية الدقيقة في عمليات التخمير، ومع ذلك بسبب ارتفاع تكاليف الإنتاج لا يزال سوق PHA محدوداً بشكل كبير؛ إذ إن التكلفة العالية لإنتاج المواد الخام يستدعي ابتكار طرائق أخرى أقل تكلفة تؤمن حاجة السوق، ولهذا توجهت الأبحاث لاستعمال النفايات لإنشاء ركائز جديدة منخفضة التكلفة وتحسين سلالات البكتريا من خلال الهندسة الوراثية. تتكون PHA من مونوميرات حمض هيدروكسي ألكيل (HA) مرتبطة ببعضها بروابط إستيرية، مشكلةً بولي إسترات خطية، ويتراوح طول سلسلة أحماض HA الدهنية من ثلاث إلى أربع عشرة

ذرة كربون أو أكثر. تحوي مونوميرات السلسلة القصيرة (SCL) ما بين ثلاث إلى خمس ذرات كربون، ومونوميرات السلسلة المتوسطة (MCL) ما بين ست إلى أربع عشرة ذرة كربون، ومونوميرات السلسلة الطويلة (LCL) أكثر من 14 ذرة كربون. تصطنع هذه البوليميرات باستعمال بكتريا منتجة لـ PHA مثل cupriavidus necator وأنواعاً أخرى؛ إذ يتم التخمير بزرع البكتريا في أوساط كربونية (جلوكوز–زيوت نباتية–نفايات نباتية)، وبوجود نقص بالفوسفور والنتروجين تخزن البكتريا الكربون على شكل PHA داخل خلاياها. يستخلص PHA لاحقاً بطرائق فيزيائية وكيميائية وينقى بمذيبات عضوية أو بطرائق خضراء. على الرغم من كون بولي هيدروكسي بوتيرات ذا صفات جيدة بالتحلل والتوافق الحيوي إلا أنه ذو استطالة منخفضة واستقرار حراري منخفض وهشاشة، وللتغلب على هذه التحديات اقترحت البلمرة المشتركة بإضافة مونوميرات أخرى كما يشير الجدول (1). وتتميز هذه البوليميرات المشتركة copolymer بخواصها الحرارية والميكانيكية الفريدة.

الجدول **1.** أهم أنواع بولي هيدروكسي ألكانوات المتجانس والمشترك

الاسم الكيميائي	الاختصار	الزمرة الألكيلية	نوع البوليمير
Poly(3-hydroxybutyrate)	P3HB	Methyl	Homopolymer
Poly(4-hydroxybutyrate)	P4HB	Hydrogen	Homopolymer
Poly(3-hydroxyvalerate)	P3HV	Ethyl	Homopolymer
Poly(3-hydroxyheptanoate)	P3HHp	Butyl	Homopolymer
Poly(3-hydroxyoctanoate)	P3HO	Pentyl	Homopolymer
Poly(3-hydroxynonanoate)	P3HN	Hexyl	Homopolymer
Poly(3-hydroxydecanoate)	P3HD	Heptyl	Homopolymer
Poly(3-hydroxybutyrate-*co*-3-hydroxyvalerate)	PHBV	Methyl/ethyl	Copolymer
Poly(3-hydroxybutyrate-*co*-4-hydroxybutyrate)	P3HB4HB	Methyl/hydrogen	Copolymer
Poly(3-hydroxybutyrate-*co*-3-hydroxyhexanoate)	PHBHHx	Methyl/propyl	Copolymer
Poly(3-hydroxybutyrate-*co*-3-hydroxyoctanoate)	PHBO	Methyl/heptyl	Copolymer
Poly(3-hydroxybutyrate-*co*-3-hydroxydecanoate)	PHBD	Methyl/pentyl	Copolymer
Poly(3-hydroxybutyrate-*co*-3-hydroxypropionate)	PHBP	Methyl	Copolymer

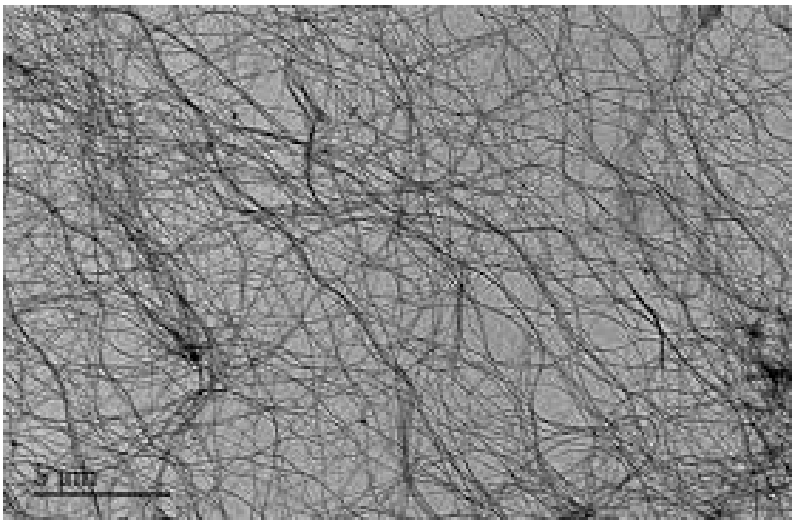
يعد تصنيع PHA منخفض التكلفة نسبياً، إذ يعتمد على المخلفات الصناعية والزراعية مثل جفت ونوى وأوراق الزيتون ومصل اللبن وزيت الطهي المستعمل ونفايات صناعة السكر، مصدر كربون رخيص في عمليات التخمير، كما يملك PHA خصائص مميزة للتحلل الحيوي المباشر في التربة والماء وحتى جسم الإنسان، وهو متوافق حيوياً للاستعمال في الغرسات الطبية، ويمتلك خصائص ميكانيكية واسعة حسب نوعه من مرونة المطاط إلى صلابة البلاستيك فضلاً عن مقاومته الحرارية العالية حتى الدرجة 180 سلزيوس؛ فمثلاً يكون PHB هشاً، ويتميز PHBV بالمرونة العالية، في حين يكون P3HB4HB الأكثر مرونة وقوة وصلابة.

يستعمل PHA في التغليف وصناعة الأكياس والأطباق وأغطية الطعام، وفي الطب والتطبيقات الحيوية (خيوط جراحية وغرسات طبية)، وفي الزراعة كأغشية تحكم في إطلاق الأسمدة، وفي صناعة السيارات. أما عيوب PHA فأهمها الحاجة لمزيد من التحسينات والأبحاث على طرائق الاستخلاص. ومع ذلك، يعد PHA أفضل الخيارات الواعدة المتاحة حالياً كمنافس للبلاستيك التقليدي خاصة مع زيادة الوعي البيئي وفرض قيود على البلاستيك التقليدي وتبني العديد من الشركات العالمية العمل على إنتاجه بأسعار منافسة.

النانو سليلوز البكتيري bacterial nano-cellulose, BNC

يُعرف النانو سليلوز البكتيري BNC بأنه أنقى أشكال السليلوز، وينتج من السكريات عبر عملية «من القاعدة إلى القمة»، وله قيمة خاصة في التكنولوجيا الصيدلانية. مع أن BNC لديه درجة أقل من التبلور والبلمرة مقارنة بالسليلوز المستخرج من النباتات، إلا أن له تركيبة فريدة بنسبة أعلى من المتماكب ألفا، تمنحه خصائص مذهلة وتتيح تطبيقه في مجالات متنوعة تشمل ضمادات الجروح، والمنسوجات، وتغليف الأغذية، ومستحضرات التجميل، والطب الترميمي، والهندسة النسيجية، وحلول الطاقة، والإلكترونيات البصرية، والطباعة الحيوية، والمعالجة البيئية. يمكن للمعالجات الكيميائية للنانو سليلوز أن تمنحه خصائص محسنة مثل الالتصاق الأفضل والثباتية والنشاط المضاد للميكروبات، مما يجعل له أهمية خاصة في سياق الطلب المتزايد على المنتجات النسيجية؛ إذ يتطلب إنتاج المواد الخام للأنسجة مثل القطن كميات هائلة من المياه والمواد الكيميائية من الأسمدة والمبيدات اللازمة للزراعة والغزل والنسيج والصباغة. فضلاً عن الأثر البيئي المستمر في المراحل اللاحقة؛ إذ يسهم المستهلكون بشكل كبير في استنزاف الموارد مثل الماء والطاقة أثناء الغسيل والتجفيف والكي.

يشكل BNC بديلاً مثيراً للاهتمام عن السليلوز الخشبي والنباتي التقليدي؛ فهو متعدد سكريات متجانس تنتجه أنواع بكتيرية محددة ذات قدرة فريدة على تصنيع السليلوز. وتختلف الخصائص الشكلية والبنيوية والميكانيكية وكذلك إنتاجية السليلوز حسب نوع البكتريا المستعملة مما يوسع مجالات تطبيقاته في أطر مختلفة. ويتميز BNC ببنيته الفريدة التي تتكون من ألياف ذات شكل شريطي يقل عرضها عن 100 نانومتر. تتجمع هذه الألياف النانوية التي يبلغ عرضها عادة حوالي 7 إلى 8 نانومتر بشكل عشوائي في حزم مكونة شبكة معقدة للغاية، انظر الشكل 3. ومن الجدير بالذكر أن BNC يخلو من الليغنين والهيميسليلوز اللذين يوجدان عادة في مصادر السليلوز النباتية، مما يعزز من درجة نقاوته وملاءمته للتطبيقات المختلفة. تمنح هذه التركيبة والبنية المميزة BNC خصائص فريدة، مما يجعله مادة مثيرة للبحث بهدف التطبيقات الصناعية الواعدة والمثيرة للاهتمام خاصة في مجالات الطب الحيوي وتكنولوجيا الأغذية والاستدامة البيئية فضلاً عن الصناعة النسيجية.

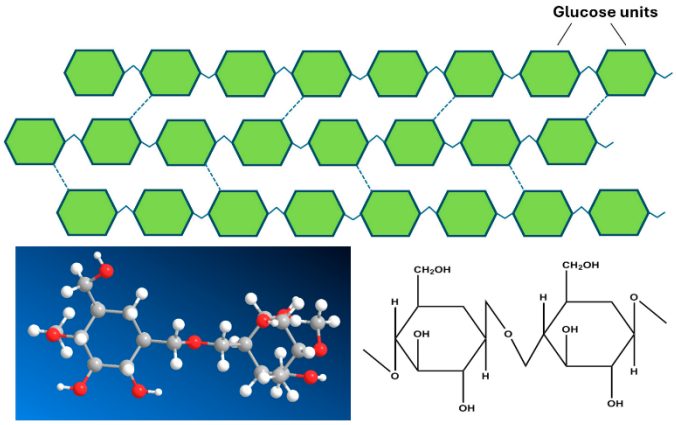


الشكل 3. النانو سليلوز البكتيري.

يُظهر الهيكل الكيميائي لـBNC تشابهاً مع هيكل السليلوز النباتي، ويتميز بأنه بوليمير متجانس خطي من وحدات الجلوكوز المرتبطة ببعضها عبر روابط غليكوسيدية β-(1,4)، ويمثل بالصيغة الكيميائية $(C_6H_{10}O_5)n$. ومع ذلك، يختلف في بنيته الجزيئية الكبيرة وخصائصه المرتبطة بها. وجد BNC بسبب هذه الصفات تطبيقات واسعة في القطاع الطبي الحيوي، لا سيما في ضمادات الجروح، وهندسة الأنسجة، وأنظمة إيصال الأدوية، والكواشف الحيوية، وكذلك في تشخيص السرطان. وتمتد فائدته إلى صناعات الورق والمنسوجات لاستعماله في المركبات الليفية والطلاءات، وفي صناعات الأغذية ومستحضرات التجميل كمستحلب ومكثف. ويبقى التطبيق الرئيسي لـBNC استعماله في «ناتا دي كوكو»، وهو منتج غذائي شعبي يُستهلك بشكل أساسي في البلدان الآسيوية. ومع ذلك، تعد تكاليف إنتاج BNC مرتفعة نسبياً مما يحد من القدرة على زيادة الإنتاج إلى المستويات الصناعية. ولعل أحد الحلول المحتملة لهذه المشكلة هو استعمال المنتجات الثانوية لصناعة الأغذية كوسط تخمير أكثر جدوى اقتصادياً. وهذا الفكر لا يساعد في خفض تكاليف الإنتاج فحسب، بل يساعد أيضاً على تبديد المخاوف البيئية المتعلقة بالتخلص من النفايات الصناعية.

السليلوز cellulose

إن المصادر الأساسية للسليلوز هي القطن والخشب، وكلاهما مواد وفيرة وذات أهمية اقتصادية. فضلاً عن هذه المصادر النباتية، كما يمكن أيضاً الحصول على السليلوز من مصادر حيوانية محددة إلا أن هذا غير شائع عملياً. يتكون هيكل السليلوز الجزيئي من سلاسل طويلة من وحدات الغلوكوز المرتبطة مشكّلة بوليمير خطي. يعزز وجود العديد من مجموعات الهيدروكسيل (–OH) النشطة على طول سلسلة السليلوز فاعلية هذا البوليمير حيث تسهم في تكوين روابط هيدروجينية قوية. تحتوي كل جزيئة غلوكوز على ست مجموعات هيدروكسيل حرة تشارك في تكوين الروابط الهيدروجينية، ليس ضمن السلاسل السليلوزية الفردية فحسب، بل أيضاً بين السلاسل، مما يسهل تكوين شبكات قوية ثلاثية الأبعاد. فضلاً عن ذلك، تتفاعل السلاسل السليلوزية من خلال قوى فاندرفالس، والتي تؤدي دوراً مهماً في تماسك السلاسل البوليميرية المتجاورة داخل الهياكل النباتية. يُظهر السليلوز بسبب هذه التفاعلات المعقدة، خصائص ميكانيكية مذهلة تشمل الصلابة العالية، والثبات ومتانة الشد، مما يجعله مادة لا تقدر بثمن في تطبيقات متنوعة، كذلك فإن هذه الخصائص الفريدة للسليلوز ومشتقاته تجعله من أكثر المواد فعالية في مجال الاستشعار باستعماله في أجهزة الاستشعار عن بعد، ويعزى ذلك إلى وفرة زمر الهيدروكسيل السطحية التي تؤمن آليات الاتصال والتفاعل فضلاً عن السطح النوعي الكبير والأبعاد العالية ودرجة التبلور الفائقة والخصائص الميكانيكية الاستثنائية والفريدة والمقاومة الجيدة للحرارة. تقدم هذه الميزات مجتمعة السليلوز كمادة مستدامة ومتعددة الاستعمالات للابتكارات في التكنولوجيا وعلوم المواد.



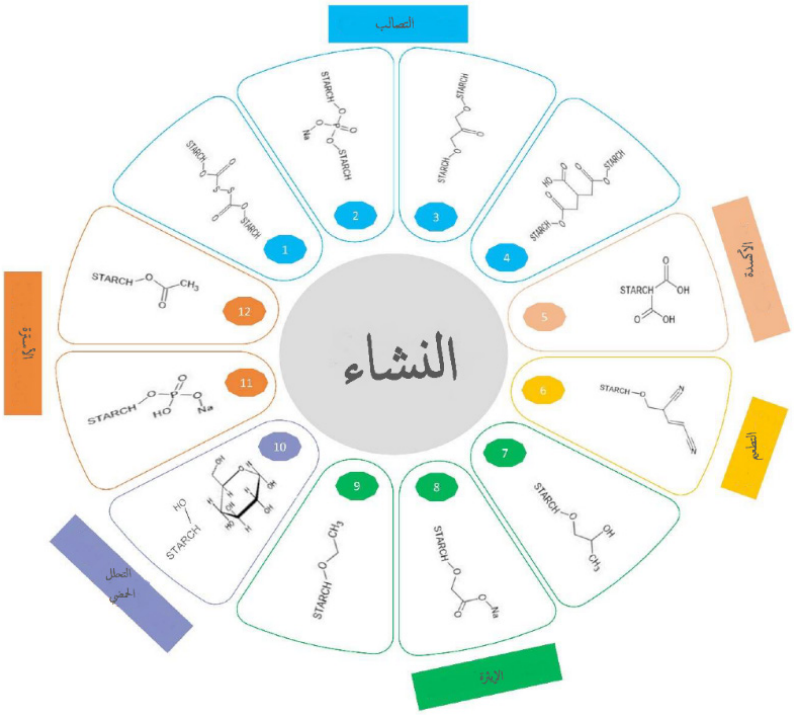
الشكل 4. البنية الكيميائية للسليلوز.

تستعمل تقانات متنوعة، بما في ذلك الطحن عالي السرعة والأكسدة بمركب TEMPO (2,2,6,6–tetramethylpiperidin–1–yl oxyl) لإنتاج ألياف السليلوز النانوية التي تتميز بقوة ميكانيكية استثنائية، ويتراوح قطرها بشكل نموذجي من 5 إلى 100 نانومتر، وتمتد لعدة ميكرونات في الطول. ترتبط الخصائص الكيميائية والفيزيائية النهائية للسليلوز النانوي ارتباطاً وثيقاً بكل من المادة المصدر وظروف المعالجة المستعملة في إنتاجه؛ إذ يظهر السليلوز النانوي قوة وصلابة عاليتين وكثافة منخفضة وقابلية للتحلل الحيوي ومساحة سطحية كبيرة وتوسعاً حرارياً ضئيلاً، وهي سمات جذبت اهتماماً بحثياً وتطويرياً كبيراً خلال العقدين الماضيين. استكشفت مواد أولية مختلفة مناسبة لإنتاج السليلوز النانوي، بما في ذلك ليف قشرة جوز الهند والقطن ومخلفات الشعير وقشر الطماطم وقشر الثوم ونفايات الغابات الثانوية ومخلفات الذرة وسيقان الخيزران ومخلفات القطن الصناعي وغيرها. تتضمن الخطوة الأولى عمليات المعالجة المسبقة مثل الطحن، والتصنيع إلى عجينة، والتبييض لإزالة الليغنين والهيميسليولوز بشكل فعال. تنتج بلورات السليلوز النانوية، التي يشار إليها أيضاً باسم شعيرات السليلوز النانوية أو القضبان النانوية باستعمال أحماض قوية مثل حمض الكبريت وحمض كلور الماء تحت ظروف مضبوطة الحرارة والتحريك والزمن. يتضمن إنتاج بلورات السليلوز النانوية عمليات غسل لاحقة، وترشيح أو طرد مركزي. تتميز هذه البلورات بأبعادها النانوية، ويتراوح قطرها من 4 إلى 55 نانومتراً وأطوالها بين 90 و400 نانومتر.

النشاء المعدل modified starch

يعد من أهم البوليميرات الحيوية، ويستخلص من مصادر طبيعية ويجرى عليه عمليات تعديل لتحسين خواصه الفيزيائية والكيميائية مما يفتح آفاق استعمالاته في الصناعات الغذائية والطبية والصناعة الخضراء. يستخرج النشاء من مصادر عديدة مثل: الذرة والبطاطا

والقمح والأرز، وذلك بغسل الحبيبات أو الدرنات وطحنها وفصل النشاء عن المواد المنحلة. يعدل النشاء بطرائق متعددة إما كيميائياً عبر مجموعة من التفاعلات مثل الأسترة مع/دون ماء حمض الخل acetic acid anhydrous للحصول على النشاء المؤستل acetylated starch المستعمل في صناعة الأغذية المعلبة أو بتحويله إلى مركب إيثيري بالتفاعل مع أكسيد البروبلين لإنتاج هدروكسي بروبيل النشاء hydroxy propyl starch HPS المادة المحسنة للذوبان في صناعة الأيس كريم وصناعات أخرى، كما يمكن إجراء تفاعل تشابكي مع فوسفات الصوديوم أو حمض الأديبيك لتشكيل سلاسل متصالبة من النشاء تستعمل مادة مثبتة للجل في الصلصات الغذائية. ويمكن إجراء هذه التعديلات بتفاعلات إنزيمية بإنزيم الأميلاز amylase أو الغلوكو أميلاز glucoamylase لتحطيم النشاء جزئياً فينتج مالتودكسترين maltodextrin وهو نشاء مقاوم للهضم يستعمل في الأطعمة الصحية.



الشكل **5**. تفاعلات تعديل النشاء ومنتجاتها

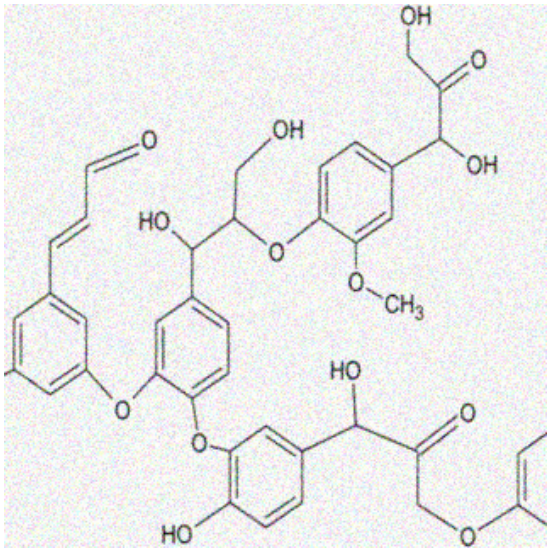
ويستعمل التعديل الفيزيائي بالتعرض للأشعة فوق البنفسجية في التسخين الجاف لتحسين الخواص الميكانيكية. تتلخص مزايا النشاء المعدل باستعماله في المجالات الغذائية كبدائل للدهون ومحسن للكثافة والقوام ومواد رابطة. ويستعمل في المجال الطبي كحوامل للأدوية ذات التحرر المديد لقابليته للتحلل الحيوي وفي الضمادات كمادة ماصة للإفرازات. ويعد استعماله الأهم في مجالات التغليف الصديق للبيئة كبديل للبلاستيك وفي صناعة الورق والكرتون، وفي صناعة النسيج لتدعيم الأقمشة وفي الطباعة ثلاثية الأبعاد. إن النشاء المعدل قابل للتحلل الحيوي لا يسبب تلوثاً بيئياً كما أنه قابل للتعديل ليكون متعدد الوظائف. كما يعد مادة اقتصادية إذا ما قورن بالبوليميرات الحيوية الأخرى، وهو آمن صحياً ومعتمد من المنظمات الدولية مثل: منظمة الغذاء والدواء food and drug administration (FDA) ومنظمة الأمن الغذائي الأوروبي EFSA european food safety authority.

تتلخص عيوب النشاء المعدل في حساسيته العالية للرطوبة، وضعف المقاومة الميكانيكية مقارنة مع البوليميرات الحيوية الأخرى، مما يدعو للحاجة إلى معالجات إضافية لتحسين كفاءته في التطبيقات المختلفة. يعد النشاء المعدل كمادة اقتصادية من الخيارات المثالية الواعدة للكثير من التطبيقات الصناعية والطبية مع تزايد الطلب على البوليميرات الحيوية كما أن بعض التعديلات تمنحه مرونة كبيرة وخواص عالية. توجد أبحاث مستقبلية لتهجينه مع بوليميرات أخرى مثل: بولي فينيل الكحول PVA أو PLA لتحسين المتانة وتطبيقه في هندسة الأنسجة في الجراحات الترميمية ودراسات أخرى لتحسين المقاومة الحرارية.

الليغنين lignin

تمثل الكتلة الحيوية الليغنينية السليلوزية lignin–cellulose biomass, LCB واحدة من أكثر المواد الخام المتاحة عالمياً من حيث الوفرة والاستدامة، وذلك لتعدد مصادرها في الطبيعة؛ إذ تتضمن البوليميرات الكربوهيدراتية الرئيسية السليلوز (40–45%

وزن/وزن) الهيميسليلوز (25–35% وزن/وزن) واللغنين (15–30% وزن/وزن). تشمل مصادر LCB المخلفات الزراعية وأعشاب المناطق المعتدلة ومخلفات الأخشاب المتنوعة. نظراً لانتشارها ووفرتها فإن لـ LCB القدرة على معالجة التحديات التي تفرضها موارد الوقود الأحفوري المستنفدة، خاصة إذا وظفت كمادة متجددة لإنتاج مواد ذات قيمة مضافة. تمثل هذه الكتلة الحيوية الحصة الأكبر من المواد المتجددة الأرضية المتاحة لإنتاج الطاقة حيث من المتوقع أن يرتفع الطلب العالمي على الوقود الحيوي بمقدار 41 مليار لتر ما بين عامي 2021 و2026. تقوم منشآت الوقود الحيوي بشكل أساسي بتحويل LCB إلى الإيثانول والديزل والميثان وأنواع أخرى من الوقود.



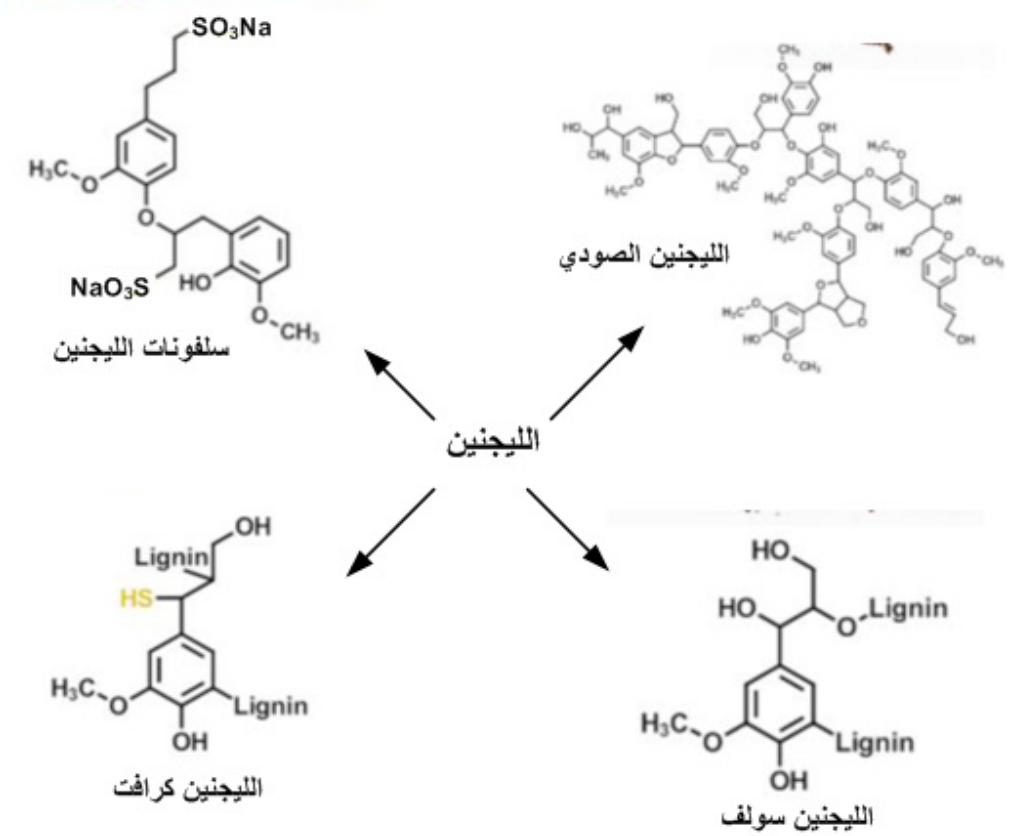
الشكل 6. البنية الكيميائية للغنين.

يصنع اللغنين بشكل أساسي من المونوميرات الكحولية بسلسلة من العمليات المحفزة بالإنزيمات مثل: نزع الهدروجين، والتكاثف. يؤدي هذا التصنيع إلى تكوين بنية ثلاثية الأبعاد غير متبلورة تتسم بشبكة معقدة من روابط الإيثر والروابط الكربون–كربون. يستعمل اللغنين يشكل تقليدي كمصدر للطاقة المتجددة في قطاع إنتاج الورق ومشتقاته. ومع ذلك، مع تجاوز إنتاج اللغنين للطلب على استعماله كوقود ونمو الاهتمام بالكيماويات المتجددة، ثمة تركيز متزايد على تعزيز قيمة اللغنين وتحويله إلى مادة كيميائية مفيدة نظراً لوفرة الحلقات العطرية في بنيته. تملك هذه المركبات أهمية كبيرة في الصناعات الكيميائية الرئيسية مثل: العطور، والنكهات، والبوليميرات، والطلاءات، والراتنجات. يعد اللغنين البديل المفضل للكثير من المواد الكيميائية نظراً لسميته المنخفضة، وتوافقه البيئي والحيوي الممتاز، ويجري البحث بشكل مكثف لإيجاد تطبيقات عالية القيمة بدلاً من حرقه، كما أن خصائصه العطرية تتيح استعماله بديلاً للفينول في إنتاج المواد اللاصقة الفينولية.

تتعدد الطرائق الكيميائية الفعالة لتعديل الكتلة الحيوية للغنين كيميائياً، ويشمل ذلك التحلل المائي الحمضي (اللغنين سلفونات)، والقلوي (اللغنين الصودي) وتفاعل كرافت (اللغنين كرافت) والمعالجة بالمحلات العضوية (اللغنين سولف). ويُقدّر أن طناً واحداً من الكتلة الحيوية الجافة يمكن أن ينتج حوالي 355 لتراً من الإيثانول الحيوي، ويعالج حوالي 223 مليون طن من الكتلة الحيوية الجافة سنوياً، مما يؤدي إلى إنتاج 62 مليون طن من الإيثانول.

اللغنين هو بوليمير عضوي يتمتع بإمكانات كبيرة للاستعمال كمادة خام في كل من العلوم الكيميائية والبيولوجية، وهو ثاني أكثر البوليميرات الحيوية المتجددة وفرة على الأرض، يعد اللغنين مصدراً متجدداً مهماً للكربون، وتعادل قيمته الحرارية قيمة الكربون نفسه. فضلاً عن ذلك، يعد اللغنين مصدراً طبيعياً كبيراً للهياكل الأروماتية التي تمتلك العديد من الخصائص الكيميائية الفريدة والتأثيرات البيولوجية المهمة، مما يفتح فرصاً مثيرة للابتكار والتطبيق في مختلف الصناعات. يشير البحث في ديناميكيات الطاقة لإنتاج الإيثانول الحيوي إلى أن اللغنين يمتلك عائد طاقة أعلى من الكمية المطلوبة لتصنيع الإيثانول. وهذا يضمن فائضاً طاقياً ثابتاً يمكن تسخيره لتطبيقات مختلفة تتجاوز إنتاج الإيثانول.

تُعزى الخصائص اللدائنية الحرارية الفريدة للغنين في درجات الحرارة المنخفضة إلى الروابط الهيدروجينية ضمن الجزيئية وبينها، مما يجعله مكوناً قيماً للبوليمرات والأفلام القائمة على المواد الحيوية. في المقابل، يؤدي تصالب سلاسله الكبير إلى سلوك تصلب



الشكل 7. طرائق التعديل الكيميائي لليغنين

بالحرارة. يقدم الليغنين إمكانات كبيرة لتطوير مجموعة متنوعة من المنتجات نظراً لمحتواه العالي من الكربون، وفعاليته من حيث التكلفة المنخفضة وطبيعته المتجددة حيوياً نظراً لخصائصه الكيميائية المميزة فإن منتجات الكربون المشتقة من الليغنين تستعمل على نطاق واسع في تطبيقات متنوعة مثل حوامل المحفزات، والمواد الماصة، وأنظمة تخزين الطاقة. يرتبط الهيكل الكيميائي لليغنين بشكل معقد بمصدره النباتي والطرائق المستعملة لاستخلاصه. ساهمت التطورات الحديثة في التقنيات التحليلية بشكل كبير في تبسيط تحليل الروابط الكيميائية لليغنين. تسهل المعالجات الحرارية الكيميائية إزالة بلمرة الليغنين المستخلص من ألياف السليلوز، مما يعزز ذوبانيته مع توليد روابط «مكثفة» غير أصلية في المواقع التفاعلية في الوقت نفسه. تشمل أنواع الليغنين التقني الرئيسية ذات الصلة بالتطبيقات الصناعية الليغنين سلفونات والليغنين الكرافت (KL)، والليغنين المنحل عضوياً (OSL)، والليغنين الصودا (SL)، ومن المهم ملاحظة أن اختيار نوع الليغنين يرتبط ارتباطاً وثيقاً بالتطبيق المقصود. على سبيل المثال، يمكن استعمال مستحضرات الليغنين الأقل نقاوة بسهولة في تصنيع البلاستيك والمركبات المشتقة من الليغنين، في حين يفضل استعمال الليغنين عالي النقاوة أو المجزأ للتطبيقات المتقدمة، خاصة في المجالات الطبية الحيوية. يضمن هذا النهج المخصص الأداء الأمثل والكفاءة في كل تطبيق محدد.

يُعترف بشكل متزايد بالتعديل الكيميائي لليغنين كاستراتيجية محورية لتعزيز خصائصه لتطبيقات إنتاج المواد المتنوعة. ترفع عمليات التعديل هذه من تفاعلية الليغنين باستهداف مجموعاته الوظيفية وخاصة الهيدروكسيل، والميثوكسيل، والكربونيل، والكربوكسيل. تستعمل تقانات مثل إدخال زمر الهيدروكسي أو زمر الألكيل الأسترة وزمر الأمين لتسهيل هذه التحولات. والأهم من ذلك، تهدف هذه التعديلات الكيميائية إلى تحويل الجزيئات الكبيرة المعقدة لليغنين إلى مونوميرات كبيرة أكثر تنوعاً. يسمح هذا التحول بالتطعيم اللاحق للمونوميرات أو البوليميرات التقليدية؛ مما يؤدي في النهاية إلى ابتكار بوليميرات وظيفية ذات خواص فريدة أساسها الليغنين. ومن خلال هذه العمليات المتقدمة يعاد تشكيل الليغنين البوليمير الطبيعي ليفتح ثروة من الاحتمالات للمواد المستدامة ذات الخصائص المحسنة.

يمتلك الليغنين بنية عطرية معقدة تتميز بحلقات فينولية متعددة، مما يشكل تحديات كبيرة في إنتاج جسيمات الليغنين النانوية. (LNPs) سهلت التطورات الحديثة إنتاج أشكال نانوية متنوعة من الليغنين، بما في ذلك الجسيمات النانوية غير المنتظمة، والأنابيب النانوية المجوفة، والكريات النانوية المجوفة، والألياف النانوية. يمكّن إنتاج جسيمات الليغنين النانوية من تحويل الليغنين غير المتجانس والمعقد هيكلياً إلى جسيمات نانوية موحدة ذات حجم وشكل متناسق؛ إذ تظهر هذه الجسيمات النانوية المصممة خصائص مفيدة مثل

خصائص هيكلية مصممة بشكل خاص وتوافق محسن مع السلاسل البوليميرية مع خواص مضاد أكسدة فائقة مما يجعلها مرشحة واعدة لتطبيقات متنوعة في علوم المواد وتقنية النانو. يمكن إنتاج جسيمات الليغنين النانوية بتقنيات مختلفة تتضمن: التجميع الذاتي، وتبادل المذيبات، والترسيب الحمضي، والبلمرة، والتشعيع فوق الصوتي والغزل الكهربائي. وقد أظهرت جسيمات الليغنين النانوية الناتجة في القطاع الدوائي نجاحاً في تغليف دواء مضاداً للسرطان وإطلاقه تحت ظروف مضبوطة بدقة. يتميز الليغنين بين الحوامل المحتملة للأدوية بتوافقه الحيوي الممتاز وطبيعته غير السامة للخلايا. قبل تكوين الكريات النانوية، تم ربط السايكلودكسترين بالليغنين لتسهيل تغليف العامل المضاد للسرطان وإيصاله. يمكن استخدام أنواع مختلفة من الليغنين لتحضير جسيمات الليغنين النانوية، بما في ذلك الليغنين المحلل مائياً، وليغنين الكرافت والليغنين سلفونات، والليغنين المحلل إنزيمياً، وليغنين OSL.

البوليميرات الحيوية والعالم

تسعى العديد من الدول في العالم للتوجه إلى إنتاج البلاستيك الحيوي للحصول على مصادر مستدامة، والتخلص من الكميات الهائلة من النفايات الناتجة عن الزراعة والصناعات الغذائية، والتي ثبتت صلاحيتها لتكون المادة الأساسية لاستخلاص المواد الخام اللازمة لصناعة البوليميرات الحيوية. ففي البرازيل، تحول السكريات النباتية في محصول قصب السكر إلى الإيثانول الحيوي الذي بدوره يستعمل لتصنيع Bio-PE، وتنتج سنوياً حوالي 200000 طن من البلاستيك الحيوي المستعمل في صناعة العبوات والأكياس القابلة للتحلل. كما دعمت دول الاتحاد الأوربي الاستراتيجيات المتجهة نحو الاقتصاد الدائري، فقد أنتجت ألمانيا وهولندا مواد تغليف قابلة للتحلل باستعمال النشاء المستخلص من البطاطا والذرة، وتمكنت إيطاليا من تطوير بلاستيك حيوي من مخلفات الطماطم لصناعة الأواني والقطع البلاستيكية، فضلاً عن قيام الحكومات الأوربية بوضع قيود ضريبية على إنتاج البلاستيك التقليدي ودعم البدائل الحيوية. وبالتزامن مع دول العالم سعت الولايات المتحدة الأمريكية إلى تطوير أنواع جديدة من البوليميرات الحيوية فأنتجت بولي لاكتيد قابلاً للتحلل من الذرة وطورت بلاستيكاً حيوياً قابلاً للامتصاص الحيوي من قشور الجمبري الذي يستعمل في التطبيقات الطبية لصناعة مواد طبية قابلة للامتصاص الحيوي. وقد ساهمت الدول الآسيوية الكبرى في التوسع في إنتاج البوليميرات الحيوية واستهلاكها؛ إذ تملك تايلاند تجربة فعّالة في اصطناع البلاستيك من النشاء، وسارعت الصين، وهي المنتج الأكبر للبلاستيك التقليدي في العالم، إلى الاستثمار في مجال البلاستيك الحيوي لمواجهة التلوث، كما أن للهند تجربة تعتمد على قشور الموز وجوز الهند لإنتاج بلاستيك صديق للبيئة.

البوليميرات الحيوية وسوريا

فيما يتعلق بإمكانية إنتاج البوليميرات الحيوية في سورية، فإن شجرة الزيتون وما ينتج عنها من مخلفات، تعد مرشحة لذلك؛ إذ تعد سوريا من البلدان المصنفة في المرتبة السادسة عالمياً والثانية عربياً في إنتاج الزيتون؛ فالبوليميرات الحيوية الناتجة عن مخلفات الزيتون تعد مستقبلاً واعداً للبحث والتطوير في مجال الصناعة الخضراء. تحتوي مخلفات الزيتون (جفت الزيتون، النوى، نفايات التقليم، مياه عصر الزيتون) على مركبات عضوية قابلة للتحويل إلى بوليميرات حيوية أو مادة خام لاصطناع منتجات بلاستيكية صديقة للبيئة. يحوي جفت الزيتون على الليغنين والسليلوز والهيماسليلوز التي يمكن معالجتها كيميائياً وبيولوجياً لاستخلاص البوليميرات الحيوية مثل PHA وPLA، كما تحتوي أوراق الزيتون على نسب كبيرة من الألياف الطبيعية والفينولات التي يمكن استعمالها لاحقاً كمعزز ومحسن للخواص الميكانيكية للبوليمير الحيوي، كما يمكن إنتاج السليلوز الثانوي منه والمستعمل في عمليات التغليف خصوصاً في مجالات الأغذية. فضلاً عن إنتاج السكريات من المعالجة البيولوجية لنوى الزيتون، واستعمالها في إنتاج البوليميرات الحيوية، أو كفحم حيوي، كما تعطي معالجة المياه الناتجة عن عصر الزيتون تراكيز عالية من مركبات عضوية يمكن معالجتها البيولوجية للحصول على متعددات السكر وأغشية حيوية. ومع من توافر المصادر بشكل كبير ومتنوع إلا أن الطريق في مجال الاقتصاد الدائري والبوليميرات الحيوية مازال في بدايته، مما يفتح فرصاً كبيرة للبحث والتطوير في هذا المجال. وببعض الدراسات التي تهدف إلى إعادة تدوير المذيبات والإنزيمات المستخدمة واستخدام المخلفات الناتجة كوقود وفرض الحكومة شروطاً ضريبية على منتجي البلاستيك التقليدي ندعم استراتيجيات خفض التكاليف الخاصة بمشروع اصطناع البوليميرات الحيوية. تؤمن صناعة البلاستيك الحيوي جدوى اقتصادية عالية بتحويل النفايات الزراعية ونفايات الصناعات الغذائية ونفايات الأخشاب وغيرها التي تشكل عبئاً بيئياً إلى منتجات عالية القيمة تساهم في دعم الاستدامة البيئية والصناعة الخضراء وتقليل استهلاك الوقود الأحفوري.

التطلعات المستقبلية

تشير الأبحاث والتوقعات الحديثة بالاستناد على الاتجاهات البحثية خلال عام 2025 إلى أن العالم يسير قدماً باتجاه استعمالات فائقة لا عدد لها للبوليميرات الحيوية تقلب مفهوم استعمالها بديلاً واعداً للبلاستيك التقليدي إلى اعتبارها نواة ثورة لنظام صناعي طبي حيوي

زراعي إلكتروني جديد ومتكامل وقائم على الاستدامة؛ إذ ستركز جل الأبحاث على تطوير بوليميرات خاصة لحل مشكلات خاصة، ففي القطاع الطبي الحيوي طورت بوليميرات حيوية يمكن استعمالها كأحبار أساسها جينات بيوبوليميرية تقوم بطباعة الأعضاء وأنسجة غضروفية ذات خواص ميكانيكية فائقة. كما تتمتع البوليميرات الحيوية التي أساسها الفطريات بإمكانات هائلة كمواد فائقة الخواص في البناء والتغليف والتعبئة والطب والمنسوجات. أما الأفق الأكثر تطوراً وحداثةً فهو استعمال البوليميرات الحيوية في اصطناع مكثفات حديثة قابلة للارتداء وقابلة لتخزين الطاقة بشكل واسع. كما أن الأبحاث المعتمدة على تصنيع الأجزاء القابلة للتحلل في الأجهزة ستؤدي إلى عصر نهاية النفايات الإلكترونية؛ إذ جرى تطوير رقائق ومكثفات وأجهزة استشعار من السليلوز النانوي وعند انتهاء عمرها الافتراضي تتحلل بشكل آمن في التربة. ويزيد على ذلك التصنيع الحيوي المتقدم بهندسة كائنات دقيقة لإنتاج بوليميرات حيوية جديدة لا توجد في الطبيعة عن طريق التعديل الوراثي. والأجمل هو خطوة جديدة نحو المستقبل؛ إذ أعلن فريق من جامعة واشنطن تطوير مادة بلاستيكية حيوية مبتكرة سميت «ليف» LEAF وهي مستوحاة من الورقة النباتية تتميز بقدرتها على التحلل الكامل في درجة حرارة الغرفة مؤلفة من ثلاث طبقات من مواد مبتكرة تجمع بين الصلابة والمتانة وقابلية التحلل وهي أكثر مقاومة للشد وأكثر مقاومة للرطوبة وتسرب الغازات، وهذا نهج جديد يعتمد على محاكاة الطبيعة لاختراع حلول صناعية. كل هذا والكثير من التطبيقات المتوقعة لعام 2026 ترسم صورة جلية عما ستركز عليه الأبحاث والتقارير المحتملة في هذا المجال الحيوي المتسارع النماء، والذي سيكون نقلةً نوعية في الحياة البشرية وفي علم المواد.

المراجع

[1] Anjana K, Arunkumar K. Brown (2024). Brown Algae Biomass for Fucoxanthin, Fucoidan and Alginate: Update Review on Structure, Biosynthesis, Biological Activities and Extraction Valorisation. International Journal of Biological Macromolecules 280: 135632.

[2] Arif ZU (2025). The Role of Polysaccharide-Based Biodegradable Soft Polymers in the Healthcare Sector. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research 8: 132–156.

[3] Benalaya I, Alves G, Lopes J, et al. (2024). A Review of Natural Polysaccharides: Sources, Characteristics, Properties, Food, and Pharmaceutical Applications. International Journal of Molecular Sciences 25: 1322.

[4] Camilleri E, Narayan S, Lingam D (2025). Mycelium-based composites: An updated comprehensive overview. Biotechnology Advances 79:108517.

[5] Dhatt PS, Hu A, Hu Ch, et al. (2025). Biomimetic layered ecological, advanced multi-functional film for sustainable packaging. Nature Communications 16: 6649.

[6] Kalpana MR, Sharma N, Kumar V, et al. (2024). Comprehensive Review on Natural Macromolecular Biopolymers for Biomedical Applications: Recent Advancements, Current Challenges, and Future Outlooks. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications 8: 100536.

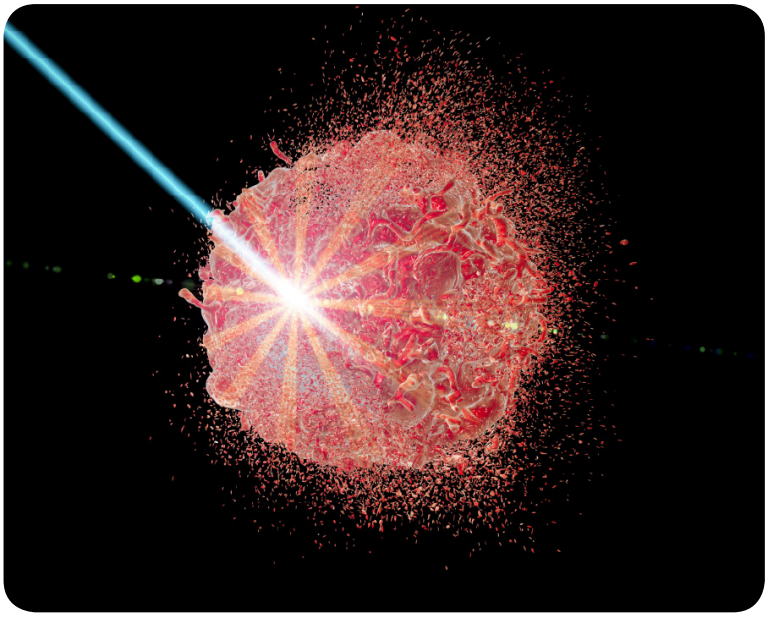
[7] Kumar P, Sephra P, Gupta M, et al. (2026). Flexible and sustainable energy storage: Recent progress and prospects in wearable supercapacitors. Journal of Energy Storage 141: 119173.

[8] Mai J, Kockler K, Parisi E, (2024). Synthesis and Physical Properties of Polyhydroxyalkanoate (PHA)-Based Block Copolymers: A Review. International Journal of Biological Macromolecules 263: 130204.

[9] Singh G, Gauba P, Mathur G (2024). Bacterial Cellulose-Based Composites: Recent Trends in Production Methods and Applications. Cellulose Chemistry and Technology 58: 799–818.

< إعداد: ك. دلال الناعمة، د. عبد الغفار اللافي، د. عبد الوهاب علاف- قسم الكيمياء ، هيئة الطاقة الذرّية السورية.

الآفاق الفيزيائية والبيولوجية للعلاج الإشعاعي الوميضي (FLASH-RT): تحول جذري في علاج الأورام بالإشعاع



ملخص

يُعدّ العلاج الإشعاعي حجر الزاوية في مكافحة السرطان، غير أن فعاليته غالباً ما تُقيد بالتوازن الدقيق بين القضاء على الورم والحفاظ على الأنسجة السليمة المحيطة. يمثل ظهور الطاقة اللازمة الوميضي (FLASH-RT) flash radiotherapy، والذي يتميز بإيداع الطاقة اللازمة لتدمير الورم عند معدلات جرعة مرتفعة للغاية (UHDR) ultra-high dose rate، تحولاً جوهرياً في هذا المجال. يتناول هذا المقال المبادئ الفيزيائية الأساسية التي تحكم كلاً من العلاج الإشعاعي التقليدي وتقنية الوميض FLASH، موضحاً الآليات الفيزيائية والكيماحيوية والبيولوجية المعقدة التي تكمن وراء هذه الظاهرة اللافتة والمسماة «تأثير الوميض FLASH»، كما يستعرض الاستطبابات السريرية الحالية وموانع الاستعمال، والتحديات الكبيرة في قياس الجرعات الإشعاعية فيها. إضافة إلى تسليط الضوء على آفاق المستقبل والإمكانات التحولية لتقنية FLASH-RT في إحداث ثورة في رعاية مرضى السرطان. تقدم هذه النظرة الشاملة التأثير العميق لفيزياء الإشعاع على الابتكار الطبي.

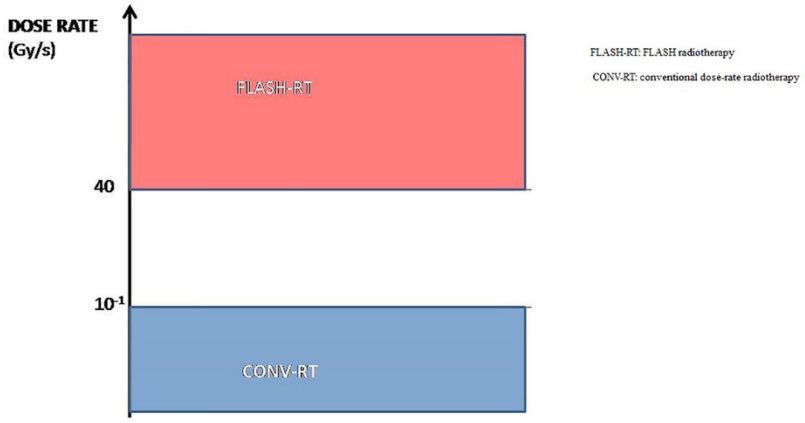
الكلمات المفتاحية: المعالجة الإشعاعية للأورام – معدل الجرعة الإشعاعية الفائقة للغاية – المعالجة الإشعاعية الوميضية

مقدمة

تطور العلاج الإشعاعي

لأكثر من قرن، كان الإشعاع المؤين سلاحاً قوياً في مكافحة السرطان. يُطبق العلاج الإشعاعي التقليدي conventional radio-therapy (CONV-RT) جرعات محددة بدقة على مدى دقائق معدودة، ومقسمة إلى جلسات متعددة بغرض تعظيم تدمير الخلايا السرطانية مع السماح للأنسجة السليمة التي مر خلالها الإشعاع بالتعافي. وعلى الرغم من فعاليته الكبيرة، إلا أن هذه الطريقة تبقى محدودة جوهرياً بتحمل أنسجة الأعضاء الطبيعية للإشعاع؛ مما يؤدي في كثير من الأحيان إلى حدوث أذيات تحد من الجرعة وتقيد من نتائج العلاج [1]. وقد أدى السعي نحو إيجاد مؤشر علاجي أكثر ملاءمة من حيث نسبة احتمال السيطرة على الورم إلى احتمال حدوث المضاعفات في الأنسجة الطبيعية إلى الابتكار المستمر في المعالجة الورمية الإشعاعية، بدءاً من تقنيات العلاج المطابق ثلاثي الأبعاد 3D conformal radiation therapy (3D-CRT) مروراً بالعلاج الإشعاعي المعدل الشدة intensity-modulated radiation therapy (IMRT) وصولاً إلى العلاج الإشعاعي الموجه بالصور image guided radio therapy (IGRT).

في هذا المسعى، برز مفهوم ثوري من جديد: العلاج الإشعاعي الوميضي FLASH، الذي جرى رصده للمرة الأولى في منتصف القرن العشرين، واكتسب «تأثير الوميض» أهمية كبيرة بعد عام 2014، عندما أظهرت الدراسات قبل السريرية بوضوح أن إيداع الإشعاع بمعدلات جرعة مرتفعة للغاية UHDRs تكون غالباً أكبر من 40 غراي في الثانية، يمكنه من توفير وقاية ملحوظة للأنسجة السليمة مع المحافظة على إمكانية السيطرة على الورم بمستوى مماثل للعلاج الإشعاعي التقليدي [2، 3]. هذا التأثير التفريقي اللافت الذي يتحقق بإيصال الجرعة الإشعاعية بشكل كامل خلال أجزاء من الألف من الثانية (ميلي ثانية)، يعد اليوم بإعادة تعريف حدود العلاج الإشعاعي، ومقدماً آفاقاً جديدة في معالجة السرطان بدقة متناهية. سنستعرض في هذه المقالة الأسس العلمية، والتبعات السريرية، والمسار المستقبلي لهذه التقنية الثورية.



الشكل 1. مقارنة بين معدل الجرعة الإشعاعية المستخدمة في العلاج الإشعاعي الوميضي والتقليدي.

الأسس الفيزيائية للعلاج الإشعاعي

يعتمد العلاج الإشعاعي في جوهره على استخدام الأشعة المؤينة – فوتونات (أشعة سينية، أشعة غاما)، إلكترونات، أو جسيمات مشحونة (بروتونات، أيونات الكربون) – من أجل توليد تلف في الخلايا المستهدفة، مع التركيز بشكل رئيسي على الحمض النووي DNA في الخلية، وبالتالي حدوث موت للخلايا السرطانية. يستند هذا المبدأ الأساسي على إيداع الطاقة داخل الأنسجة البيولوجية، مما يؤدي إلى تكوين أنواع تفاعلية تشل آليات عمل الخلية.

في العلاج الإشعاعي التقليدي CONV-RT، يتم توصيل الإشعاع بمعدلات جرعة تتراوح عادةً بين 0.01 إلى 0.4 غراي في الثانية. يحدث إيداع الطاقة خلال فترة زمنية طويلة نسبياً، مما يسمح بحدوث عمليات بيوفيزيائية إشعاعية معقدة. ويعدّ النموذج الخطّي-التربيعي linear-quadratic LQ إطاراً معتمداً على نطاق واسع لتوصيف استجابة الخلايا للإشعاع، حيث يفترض أن قتل الخلايا ينتج عن تلف في الحمض النووي بنمط ضربة واحدة على شكل خطّي α، وضربتين على شكل تربيعي β . يهدف تقسيم الجرعة الإشعاعية المستعملة في العلاج الإشعاعي التقليدي CONV-RT إلى الاستفادة من الفروقات في قدرات الترميم الخلوي بين الخلايا السليمة والسرطانية؛

إذ يمكن للخلايا السليمة، بفضل آلياتها الأكثر كفاءة في الترميم، التعافي من الضرر الذي يكون تحت الحد القاتل بين الفواصل الزمنية بين تسليط الجرعات الإشعاعية، في حين تتراكم الأضرار في الخلايا السرطانية التي غالباً ما تعاني من نقص في آليات الترميم، مما يؤدي في النهاية إلى موتها.

تتضمن مصادر الإشعاع في CONV–RT كلاً من المسرعات الخطية linacs والتي تولد فوتونات من الأشعة السينية أو إلكترونات عالية الطاقة، وكذلك النظائر المشعة المخصصة للمعالجة الإشعاعية بالتماس brachytherapy. تُضبط الخصائص الفيزيائية للحزم الإشعاعية المستخدمة، مثل: عمق الاختراق وتوزع الجرعة وخصائص التشتت، بدقة من أجل ضبط مقدار الجرعة الإشعاعية لتتناسب مع حجم الورم مع تخفيض احتمالية تعرض الأنسجة السليمة المحيطة للإشعاع. وتعكس دقة العلاج الإشعاعي الحديث سنوات من التقدم في الفيزياء والهندسة وعلم الأحياء الإشعاعي.

الأسس الفيزيائية للعلاج الإشعاعي الوميضي FLASH

يتميّز العلاج الإشعاعي الوميضي FLASH–RT عن العلاج الإشعاعي التقليدي CONV–RT بشكل رئيسي من خلال استخدام معدل جرعة إشعاعية مرتفع للغاية في تطبيق الجرعة. ففي حين يعمل العلاج التقليدي بمعدلات جرعة تقاس بالغراي في الدقيقة Gy/min، تحقّق تقنية العلاج الإشعاعي الوميضي معدلات جرعة تتجاوز 40 غراي في الثانية Gy/s، وغالباً ما تصل إلى مئات أو حتى آلاف غراي في الثانية، مع إمكانية تحقيق معدلات جرعة لحظية تصل حتى 10^6 Gy/s [4]. والأهم من ذلك، يتم إنجاز جلسة العلاج بالكامل في فترة زمنية قصيرة جداً، عادة تكون أقل من 200 ملّي ثانية، ويفضل أن تكون في نطاق الميكروثانية. يؤدّي هذا الإيصال السريع للطاقة إلى تغيير جوهري في البيئة الفيزيائية والكيميائية داخل النسيج المعرض للإشعاع، مما يؤدي إلى تأثير الوميض الملحوظ.

وتتضمن الوسائط الإشعاعية الأساسية التي يجري استكشافها حالياً من أجل تطبيق تقنية العلاج الإشعاعي الوميضي FLASH–RT على ما يلي:

- الإلكترونات: حيث تُستخدم الإلكترونات عالية الطاقة (على سبيل المثال من 6–20 ميغا إلكترون فولت) والناتجة عن مسرعات خطية معدلة سريرياً أو مسرعات بحثية متخصصة كمصدر للإشعاع متداول في الدراسات التحضيرية لتقنية الوميض، ونظراً لانخفاض عمق اختراقها في الجسم (عادة حتى نحو 5 سم تقريباً)، فهي مناسبة لعلاج الأورام السطحية والنماذج ما قبل السريرية. ويجري حالياً استكشاف قدرة الإلكترونات فائقة الطاقة للغاية المحتملة very high energy electrons (VHEE) في نطاق 50–250 ميغا إلكترون فولت على علاج الأورام الأعمق مع توزع جيد للجرعة الإشعاعية.

- البروتونات: تقدم حزم البروتونات، بفضل ذروتها المعروفة باسم قمة براغ، توزيعاً للجرعة الإشعاعية متوافقاً بشكل كبير مع حجم الورم. يجري تطوير أنظمة العلاج بالبروتونات المعدّلة من أجل تمكين تحقيق معدلات جرعة مرتفعة للغاية، مما يوسّع من إمكانيات تطبيق المعالجة بالوميض على الأورام العميقة مع الحفاظ على حماية الأنسجة السليمة. وتُعد التجارب السريرية FAST–01 وFAST–02 من المبادرات الرائدة في تطبيق المعالجة بوميض البروتونات عند البشر [5، 6].

- فوتونات الأشعة السينية: على الرغم من صعوبة تحقيق معدلات جرعة مرتفعة للغاية باستخدام مولدات الأشعة السينية التقليدية، فقد مهد التقدّم في تصميم المسرعات الخطية المدمجة وتقنيات توليد الأشعة السينية الجديدة الطريق أمام وميض الإشعاع الفوتوني، مما قد يتيح نطاقاً أوسع من الوصول التطبيق السريري مستقبلاً.

إن التوصيل الفائق السرعة للجرعة في تقنية العلاج الإشعاعي الوميضي يعني أن المراحل الفيزيائية والكيميائية لتفاعل الإشعاع مع المادة الحية ستحدث في ظروف فريدة؛ حيث يُعتقد أن الكثافة العالية من أحداث التأين وإنتاج الشوارد الحرة خلال فترة زمنية قصيرة تؤدي دوراً محورياً في ظاهرة الوميض التي تعطي استجابات بيولوجية لاحقة بطريقة تختلف عن تلك التي تحدث في العلاج الإشعاعي التقليدي.

آليات تأثير الوميض FLASH

يرجع التفاوت الملحوظ في المحافظة على الأنسجة السليمة في العلاج بالوميض FLASH–RT، مع السيطرة على الورم، إلى تداخل معقد بين آليات فيزيوكيميائية وحيوية. وقد جرى اقتراح فرضيات عديدة لتوضيح هذه الظاهرة التي غالباً ما تعمل بتناسق فيما بينها.

- **الآليات الفيزيائية الكيميائية**
  - فرضية استنفاد الأكسجين

تُعد واحدة من الفرضيات البارزة حيث يؤدي توصيل الجرعة عند معدل مرتفع للغاية UHDR في المعالجة بالوميض FLASH–RT إلى الاستنفاد السريع والعابر للأكسجين داخل الأنسجة السليمة [7]. ويعدّ الأكسجين محفزاً قوياً للحساسية الإشعاعية؛ حيث يعزز وجوده تكوين جزيئات الأكسجين المتفاعلة reactive oxygen species (ROS) الشديدة الضرر ويُثبت تلف الحمض النووي. ففي العلاج الإشعاعي التقليدي CONV–RT، تكون مستويات الأكسجين في الأنسجة السليمة عادةً كافية لتعزيز هذه الحساسية الإشعاعية. ومع ذلك، يؤدي معدل الجرعة العالي جداً في العلاج الوميضي FLASH–RT إلى استهلاك الأكسجين المحلي بسرعة كبيرة بحيث تتشكل حالة مؤقتة من نقص التأكسج hypoxia في الأنسجة السليمة أثناء التعرض للإشعاع. هذا الاستنفاد المؤقت للأكسجين يجعل الخلايا السليمة أقل عرضة للتلف الناجم عن الإشعاع. وعلى العكس، فإن العديد من الأورام تكون بالفعل ناقصة التأكسج بشكل جوهري؛ بمعنى أن مستويات الأكسجين فيها منخفضة بالفعل فيكون للاستنفاد الإضافي للأكسجين الناجم عن العلاج الوميضي FLASH–RT تأثير ضئيل على تلك الخلايا، مما يحافظ على حساسيتها الإشعاعية ويضمن السيطرة الفعالة عليها. ويشكل هذا التأثير التفاضلي لتوافر الأكسجين بين الأنسجة السليمة والسرطانية عنصراً رئيسياً في تأثير الوميض FLASH[8].

- فرضية تفاعل بعض الجذور الحرة مع بعضها

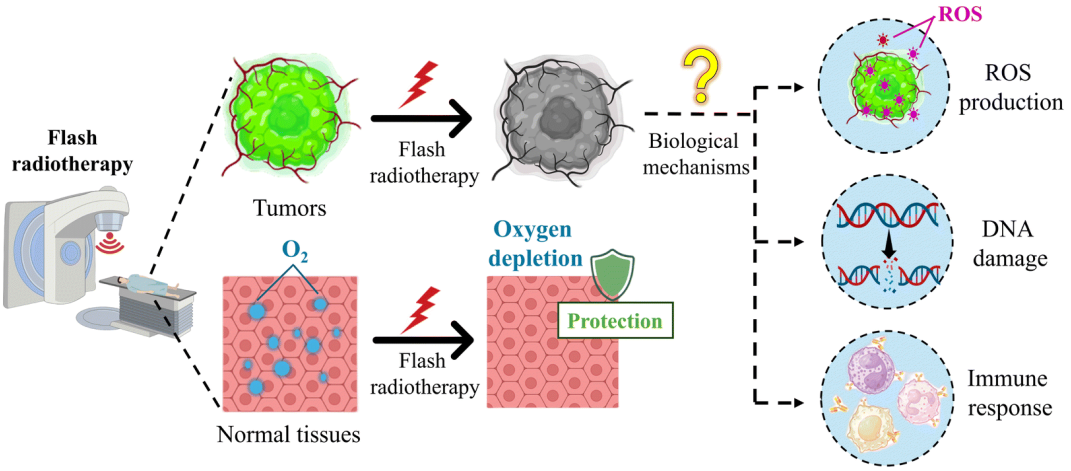
تعد هذه الفرضية آلية فيزيائية كيميائية مهمة أيضاً وتتعلق بحركية تفاعلات الجذور الحرة في الخلايا الحية. يتفاعل الإشعاع المؤين مع جزيئات الماء، وهو المكون الأكثر وفرة في الأنسجة البيولوجية، والذي يؤدي لإنتاج سلسلة من الجزيئات شديدة التفاعل، بما في ذلك جذور الهيدروكسيل (•OH)، والإلكترونات المائية (e_aq–)، وذرات الهدروجين (•H). تعد الجذور الحرة مسؤولة بشكل أساسي عن التلف غير المباشر للحمض النووي والمكونات الخلوية الأخرى. ففي العلاج الإشعاعي التقليدي CONV–RT، يتم إنتاج هذه الجذور بمعدل منخفض نسبياً، مما يسمح لها بالانتشار والتفاعل مع الجزيئات البيولوجية الضخمة والتسبب بإتلافها. بالمقابل، ينتج عن العلاج بالوميض FLASH–RT تركيزاً عالياً جداً من هذه الجذور ضمن حيز زمني ومكاني محدود جداً [9]. يزيد هذا التركيز العالي من احتمالية تزاوج بعض الجذور الحرة مع بعضها محلياً مثل:

$$\bullet OH + \bullet OH \rightarrow H_2O_2, \text{ or } e_aq^- + e_aq^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$$

حيث تتفاعل الجذور مع بعضها بعضاً بدلاً من التفاعل مع الأهداف البيولوجية الحرجة مثل الحمض النووي. ويخفض هذا التزاوج بفعالية من عدد الجذور الضارة المتاحة للتفاعل مع الخلايا الطبيعية، مما يحفظها من الضرر. أما الخلايا الورمية، فقد تمتلك بيئات دقيقة أو قدرات ترميمية مختلفة تجعلها أقل استجابة لهذا التأثير المحافظ [10].

- جزيئات الأكسجين المتفاعلة ROS والحالة التأكسدية

تؤدي الحالة التأكسدية العامة للخلية وإنتاج أنواع معينة من جزيئات الأكسجين المتفاعلة (ROS) دوراً مهماً، في حين تشير فرضية استنفاد الأكسجين إلى تخفيض مقدار التلف الناجم عن ROS في الأنسجة السليمة، قد يختلف التوازن الدقيق وأنواع ROS المتكونة تحت ظروف العلاج الإشعاعي بالوميض .وتقترح بعض النظريات أن يؤدي هذا النوع من العلاج إلى تعديل تفاضلي لأنظمة ROS وأنظمة الدفاع المضادة للأكسدة بين الخلايا السليمة وتلك السرطانية، مما يسهم في النافذة العلاجية [11] .



الشكل 2. آليات تأثير الوميض المختلفة.

- **الآليات البيولوجية**

إلى جانب الأحداث الفيزيائية الكيميائية الفورية، يتضمن تأثير العلاج الإشعاعي بالوميض FLASH أيضاً على استجابات حيوية لاحقة تسهم في حفظ الأنسجة السليمة، وهي:

- المحافظة على الجهاز المناعي

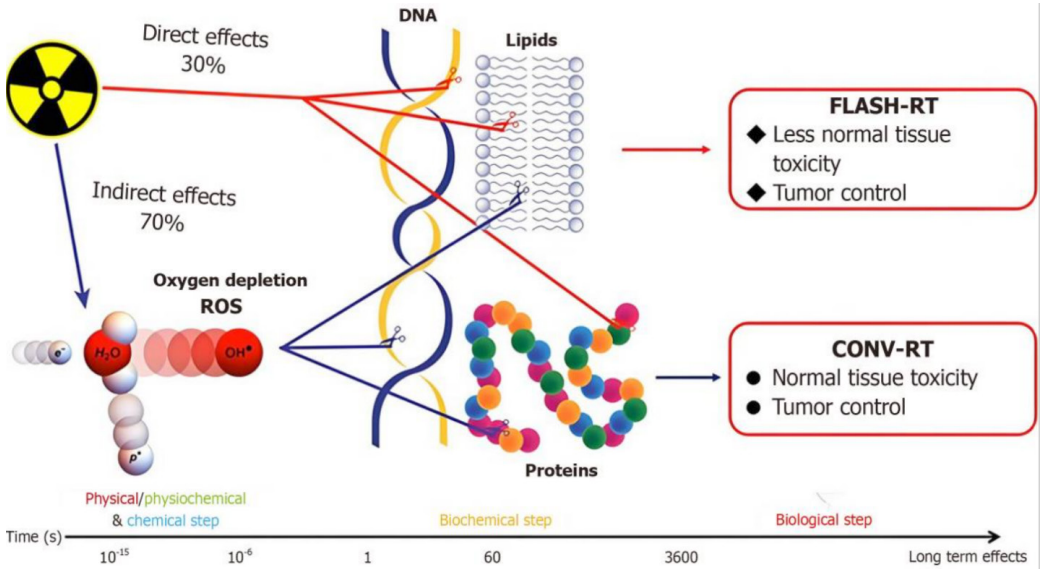
يمكن للعلاج الإشعاعي التقليدي أن يؤدي إلى حالة نقص اللمفاويات lymphopenia؛ أي انخفاض في عدد اللمفاويات المتداولة التي تُعد مكونات حاسمة للجهاز المناعي. قد يؤدي ذلك إلى إحداث ضرر في استجابة المريض المناعية، ويؤثر على السيطرة الورمية ويزيد من احتمالية الإصابة بالعدوى. يُفترض أن زمن التوصيل القصير جداً في العلاج الإشعاعي بالوميض FLASH–RT يحافظ على خلايا الجهاز المناعي المتداولة، وخاصة اللمفاويات، لأنها تقضي وقتاً أقل في الحقل الإشعاعي مقارنة بالتعرض المطول في العلاج الإشعاعي التقليدي CONV–RT [12]، وقد يؤدي ذلك إلى المحافظة على الجهاز المناعي وتوليد استجابة مناعية مضادة للأورام أكثر قوة ونتائج محسنة إجمالاً للمرضى.

- المحافظة على الأوعية الدموية وحماية الخلايا البطانية

يساهم تلف الأوعية الدموية، لا سيما الخلايا البطانية في الأوعية الدموية، في أذية الأنسجة السليمة في العلاج الإشعاعي التقليدي CONV–RT، مما يؤدي إلى حدوث التهابات وتليف واضطراب في وظيفة الأنسجة. تشير الدراسات إلى قدرة العلاج الإشعاعي بالوميض FLASH–RT على تأمين حماية للأوعية الدقيقة، مما يقلل من الالتهاب وتلف تلك الأوعية داخل بيئة الورم والأنسجة السليمة المحيطة [13]. وقد يرتبط هذا بالتأثير الناتج من استنفاد الأكسجين، حيث تعتمد الخلايا البطانية اعتماداً كبيراً على الأكسجين، أو بآليات أخرى تحمي هذه الخلايا الحيوية من الأذى الناجم عن الإشعاع.

- الاختلافات في تلف الحمض النووي وترميمه

في حين يهدف كل من العلاج الإشعاعي التقليدي CONV–RT والعلاج بالوميض FLASH–RT إلى إحداث تلف في الحمض النووي داخل الخلايا السرطانية، قد توجد اختلافات دقيقة في نوع أو تعقيد الإصابات في الحمض النووي أو في استجابة الخلية لهذه الإصابات تسهم في تأثير الوميض FLASH. تشير بعض الأبحاث إلى أن العلاج الوميضي FLASH–RT قد يسبب تلفاً أقل تعقيداً أو أكثر قابلية للترميم في الحمض النووي داخل الخلايا السليمة مقارنة بالعلاج التقليدي CONV–RT، مع استمرار إحداث تلف لا يمكن إصلاحه في الخلايا الورمية. بديلاً عن ذلك، قد تبدي الخلايا السليمة استجابة لترميم حمضها النووي بشكل أكثر كفاءة أو سرعة ضمن ظروف العلاج الوميضي FLASH مما يساهم في المحافظة عليها [14]. على سبيل المثال، تقترح فرضية السلامة الجينية أن التوصيل السريع للطاقة في العلاج الوميضي FLASH–RT يسمح لجزيئات الحمض النووي في الخلايا السليمة بالمحافظة على سلامتها النسبية، مما يخفض من إنتاج شظايا الحمض النووي التي تحفز مسارات التهابية، في حين يؤدي التلف المستمر من العلاج التقليدي CONV–RT إلى إحداث تجزئة والتهاب أكثر حدة [15].

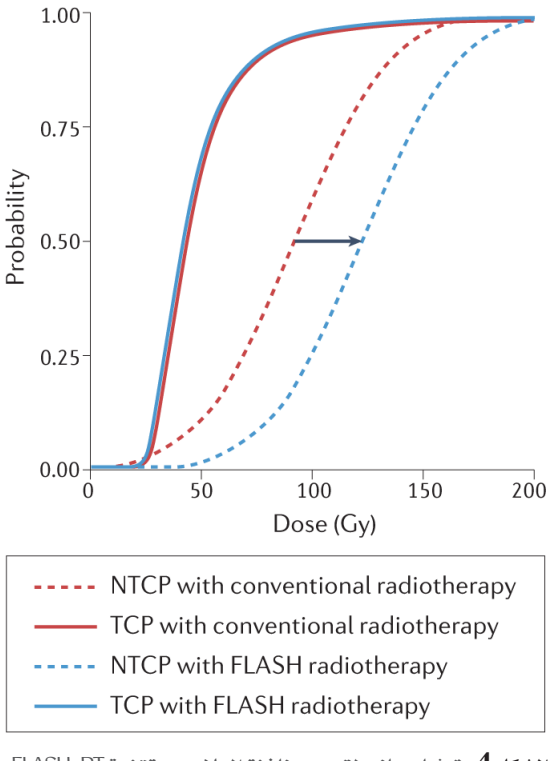


الشكل 3. مخطط يوضح الآليات المقترحة لتأثير العلاج الوميضي FLASH والذي يقوم بالمحافظة على الأنسجة الطبيعية بشكل تفضيلي عبر آليات مثل استنفاد الأكسجين، وتزاوج الجذور الحرة، والمحافظة على خلايا الجهاز المناعي، مع الحفاظ على الفعالية ضد الأورام منقوصة التأكسج[8].

المؤشرات السريرية الحالية وموانع الاستخدام

ما يزال الانتقال من النماذج قبل السريرية إلى الممارسة السريرية في تقنية العلاج الإشعاعي الوميضي FLASH-RT في مراحله الأولى، إلا أن النتائج الأولية واعدة. ويعد اختيار الاستطبابات السريرية المناسبة أساساً من أجل تحقيق توفير كبير في الضرر المحتمل للأنسجة السليمة، إضافة إلى الجدوى الفنية من إيصال الإشعاع ذي معدل الجرعة الفائق للغاية UHDR إلى حجم الهدف.

- **الاستطبابات السريرية:**
  - الأورام السطحية وسرطانات الجلد: كان أول تطبيق للعلاج الوميضي FLASH-RT على الإنسان لمريض يعاني من لمفوما جلدية T-cell متعددة المقاومة، حيث تم توجيه شعاع إلكتروني بطاقة 6 ميغا إلكترون فولت لإيصال جرعة مقدارها 15 غراي خلال 90 ملّي ثانية فقط. وأدى هذا العلاج إلى استجابة كاملة مع أذية جلدية طفيفة جداً، مما يظهر الإمكانات السريرية للعلاج الوميضي في الأورام السطحية [16].
  - العلاج الإشعاعي التلطيفي لنقائل العظام: كانت تجربة FAST-01 السريرية (دراسة جدوى العلاج الإشعاعي الوميضي في معالجة نقائل العظام العرضية) أول تجربة لاستعمال العلاج الإشعاعي الوميضي بالبروتونات، حيث جرت معالجة 10 مرضى يعانون من نقائل عظمية في الأطراف، مما برهن على جدوى التقنية وسلامتها وحقق تخفيفاً للألم مشابهاً للعلاج الإشعاعي التقليدي CONV-RT [5]. والآن، تمتد تجربة FAST-02 لتشمل مواقع أكثر تعقيداً مثل نقائل العظام الصدرية من أجل تقييم السلامة والفعالية لها بشكل أوسع [6].
  - أورام الدماغ: أظهرت الدراسات قبل السريرية أن تقنية العلاج الإشعاعي الوميضي FLASH-RT يمكن أن يحد بشكل ملحوظ من تدهور الوظائف الإدراكية الناجمة عن الإشعاع، وذلك من خلال توفير الوقاية للهياكل الدماغية الحساسة كالحصين hip-pocampus. وهذا يجعل من هذه التقنية خياراً جذاباً لعلاج أورام الدماغ، سواء كانت أصلية أم نقيلية، حيث يكون للمحافظة على الوظائف العصبية الإدراكية أهمية قصوى [17].
  - أورام الأطفال: يكون الأطفال عرضة بشكل خاص للآثار الجانبية طويلة الأمد للعلاج الإشعاعي، بما في ذلك التأثيرات المحتملة على النمو والتطور وكذلك إمكانية تشكل سرطانات ثانوية. إن القدرة الكبيرة لتقنية العلاج الإشعاعي الوميضي في الحفاظ على الأنسجة السليمة تعد ذات إمكانيات هائلة للتخفيض من هذه الأذيات اللاحقة، مما يجعلها واحدة من أهم المجالات الواعدة في علاج سرطانات الأطفال [18].



الشكل 4. تمثيل بياني لتحسن نافذة العلاج مع تقنية FLASH-RT؛ حيث تنخفض احتمالية المضاعفات في الأنسجة السليمة (NTCP، الخطوط المتقطعة) بشكل ملحوظ مقارنة بالعلاج التقليدي CONV-RT، في حين تبقى احتمالية السيطرة على الورم (TCP، الخطوط المتصلة) مرتفعة، مما يوسع مؤشر العلاج. (صورة مقتبسة من [19])

- **موانع الاستخدام والقيود**

بالرغم من أهمية تقنية العلاج الإشعاعي الوميضي إلا أن التطبيق السريري لها ما يزال مقيداً بعدة عوامل:

- عمق وموقع الورم: كما هو معروف فإن اختراق الإلكترونات يكون محدوداً، مما يقيد استخدامها فقط في حالة الأورام السطحية فقط. وبالرغم من قدرة البروتونات والإلكترونات فائقة الطاقة VHEE على معالجة الأورام الأعمق، فلا تزال تكنولوجيا توصيل معدلات جرعة فائقة للغاية UHDR إلى الأهداف العميقة بالدقة المطلوبة قيد التطوير.
- حجم الحقل والتوصيل المطابق: يمثل تحقيق حقول إشعاعية كبيرة ومطابقة الشكل بسرعة معدلات الجرعة الفائقة للغاية UHDR تحدياً تقنياً كبيراً، فالأنظمة الحالية غالباً ما تقتصر على حقول صغيرة وبسيطة الشكل، مما يقيد من نطاق الأورام القابلة للعلاج.
- نقص البيانات طويلة الأمد: يفتقر العلاج الإشعاعي الوميضي إلى البيانات السريرية طويلة الأمد كتلك المتوافرة في العلاج الإشعاعي التقليدي نظراً لحداثة هذه التقنية؛ لذلك هناك حاجة إلى مزيد من الدراسات لفهم مدى فعاليته على المدى البعيد وآثاره الجانبية المحتملة والمتأخرة.

التحديات والحلول التقنية في قياس الجرعة الإشعاعية في العلاج الإشعاعي الوميضي FLASH

يُعد القياس الدقيق للجرعة الإشعاعية الركيزة الأساسية من أجل علاج إشعاعي آمن وفعّال. تمثل معدلات الجرعة الفائقة للغاية والمستخدمة في تقنية العلاج الإشعاعي الوميضي FLASH–RT تحديات غير مسبوقة لأنظمة القياس التقليدية والمصممة لمعدلات الجرعة المنخفضة بكثير والمستخدمة في العلاج الإشعاعي التقليدي CONV–RT [02]. وفيما يلي أهم التحديات الراهنة في قياس الجرعات الإشعاعية فيها:

- محدودية القياس باستخدام حجيرات التأين ionization chambers: تُعد أكثر أجهزة القياس شيوعاً في الممارسة السريرية، لكنها تعاني من تأثيرات إعادة ارتباط الأيونات الشديد عند معدلات الجرعة الفائقة للغاية؛ إذ تؤدي الكثافة العالية للأيونات المنتجة ضمن غاز الحجيرة خلال نبضة الوميض FLASH إلى إعادة ارتباط نسبة كبيرة منها قبل جمعها، مما يتسبب في تقدير أخفض للجرعة الفعلية من قبل الكاشف. وعلى الرغم من إمكانية تطبيق عوامل تصحيح، فإن دقتها في ظل ظروف الوميض FLASH لا تزال موضوعاً قابلاً للنقاش.

- محدودية استعمال كواشف أنصاف النواقل الثنائيات/ diodes: بالرغم من كونها ذات حساسية مرتفعة ودقة مكانية ممتازة، إلا أنها قد تُظهر هذه الكواشف اعتمادية على معدل الجرعة، كما يمكن أن تتأثر بالتلف الناتج عن الإشعاع مع مرور الوقت، مما يؤثر على استقرارها ودقة قياسها.

وبالتالي يعمل مجتمع الفيزياء الطبية، لمواجهة هذه التحديات، على تطوير وتقييم تقنيات وبروتوكولات قياس جرعة جديدة ومناسبة لمعدلات الجرعة الفائقة للغاية ومنها:

- أفلام الأشعة الملونة radiochromic films: مثل فيلم gafchromic EBT3 الذي يظهر اعتماداً منخفضاً نسبياً على معدل الجرعة، ويُستخدم على نطاق واسع لرسم خرائط الجرعة الإشعاعية ثنائية الأبعاد في أبحاث الوميض FLASH. وتوفر هذه الأفلام دقة مكانية عالية لكنها تتطلب معالجة ومعايرة دقيقة.

- قياس الجرعة باستخدام الألانين alanine dosimetry: يعد الألانين، وهو حمض أميني، مستقر يقوم بتشكيل جذور حرة مستقرة عند تعرضه للإشعاع. يُقاس تركيز هذه الجذور عبر تقنيات الرنين المغناطيسي الإلكتروني electron paramagnetic resonance EPR، وهو يتناسب طرداً مع الجرعة الممتصة. يتميز الألانين بخصائص تماثلية مع الماء واعتمادية منخفضة جداً على معدل الجرعة، مما يجعله مقياساً مرجعياً موثوقاً لأشعة الوميض FLASH.

- المقاييس الحرارية calorimetry: يُعد «المعيار الذهبي» لقياس الجرعة المطلقة، حيث يقيس مباشرةً ارتفاع درجة الحرارة الناتج عن الطاقة الإشعاعية الممتصة. ويعد هذا الأسلوب مقياساً أساسياً للجرعة الممتصة وبشكل مستقل عن معدل الجرعة، غير أن تطبيقه معقد ويتطلب بيئات حرارية محكمة، مما يجعله أكثر ملاءمة للقياسات المرجعية الأساسية بدلاً من الاستخدامات السريرية الروتينية [21].

- الكواشف التألقية scintillation detectors: تنتج الكواشف العضوية، كالكواشف البلاستيكية، ضوءاً نتيجة الاستجابة للإشعاع. يسمح وقت استجابتها السريع بقياس معدلات الجرعة فائقة الارتفاع، ولكنها تتطلب معايرة دقيقة وتصحيحاً نظراً لاعتمادها على الطاقة.

- الكواشف الألماسية diamond detectors: توفر كواشف الألماس الصناعي دقة مكانية عالية، ومقاومة ممتازة للإشعاع، وسرعة استجابة، مما يجعلها مرشحة من أجل قياس جرعة تقنية العلاج بالوميض FLASH. ومع ذلك، قد تتأثر استجابتها بتأثيرات الجرعة لكل نبضة، مما يستلزم عوامل تصحيح محددة [22].

يُعد تطوير بروتوكولات قياس جرعة موحدة وأجهزة قياس دقيقة ومتاحة تجارياً لقياس الأشعة ذات معدلات الجرعة الفائقة للغاية أمراً حيوياً للترجمة السريرية الآمنة والفعّالة لتقنية العلاج الإشعاعي الوميضي FLASH–RT.

الآفاق المستقبلية والطريق إلى الأمام

لقد أدى ظهور تقنية العلاج الإشعاعي بالوميض FLASH–RT إلى فتح فصلٍ جديدٍ في علم معالجة الأورام، وأتاح فرصاً غير مسبوقة لتعزيز النتائج العلاجية وتقليل الأذيات المرتبطة به. إن المسار المستقبلي لأبحاث وتطبيقات هذه التقنية السريرية متعدد الأوجه، ويضم كلاً من التقدم التكنولوجي، والفهم الأعمق للآليات، والتحقق السريري الدقيق.

- **التقدم التكنولوجي**

  - تطوير المسرعات: يبقى التطوير المستمر للمسرعات عالية الطاقة من أجل توليد حزم إشعاعية بمعدل جرعة فائقة للغاية UHDR ولأنواع مختلفة من الإشعاع (إلكترونات، بروتونات، فوتونات أشعة سينية) أمراً بالغ الأهمية. ويشمل ذلك استكشاف تصاميم مسرعات جديدة، مثل المسرعات الحائطية العازلة dielectric wall accelerators والمسرعات الليزر–بلازمية laser–plasma accelerators، والتي يمكن أن توفر مصادر للوميض FLASH أكثر تنوعاً ويسراً في الاستخدام.

  - توصيل الحزمة وتشكيلها: تعد الابتكارات في تقنيات المسح الإشعاعي، وتشكيل الحزمة، وأنظمة المراقبة في الزمن الحقيقي ضرورية لتمكين إيصال ومضة دقيقة ومتوافقة مع أشكال الأورام المعقدة، بما في ذلك الآفات العميقة. وسيتطلب ذلك دمج تقنيات التصوير المتقدمة لتتبع الورم في الزمن الحقيقي وتطبيق نهج العلاج الإشعاعي التكيفي.

  - أنظمة تخطيط العلاج: يجب تعديل خوارزميات تخطيط العلاج الحالية لاستيعاب التأثيرات الإشعاعية البيولوجية الفريدة للعلاج الإشعاعي الوميضي FLASH–RT، ويتضمن ذلك دمج نماذج تعتمد على معدل الجرعة وتحسين خطط العلاج لاستغلال كامل تأثير حماية الأنسجة الطبيعية.

- **الفهم الأعمق للآليات**

لا يزال الفهم الكامل لآليات تأثير الومضة FLASH غامضاً على الرغم من التقدم الكبير المنجز حتى الآن. ومع ذلك ستتركز الأبحاث المستقبلية على:

  - النهج متعدد الأوميكس multi–omics؛ أي دمج علم الجينوم، وعلم البروتيوم، وعلم الأيض لتوصيف استجابات الخلايا والجزيئات للإشعاع الوميضي في الأنسجة السليمة والورمية بشكل شامل. سيساعد هذا في تحديد المؤشرات الحيوية والمسارات الرئيسية المشاركة في تأثير الوميض FLASH.

  - استخدام تقنيات تصوير متطورة مثل: الرنين المغناطيسي الوظيفي fMRI والتصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني PET لتقييم ديناميكيات الأكسجين والتغيرات الأيضية والاستجابات المناعية بشكل غير تدخلي وفي الزمن الحقيقي أثناء التعريض بالإشعاع الوميضي وبعده.

  - تطوير نماذج حاسوبية معقدة يمكنها محاكاة العمليات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية المعقدة التي تحدث عند معدلات الجرعة الفائقة للغاية، من أجل توفير رؤى تنبؤية حول تأثير الوميض FLASH ويقدم الإرشاد عند تصميم التجارب.

- **الترجمة السريرية والتحقق**

الهدف النهائي هو نقل تقنية العلاج الإشعاعي بالوميض FLASH–RT إلى الممارسة السريرية الروتينية، والذي يتطلب كلاً من:

  - القيام بتجارب سريرية مصممة جيداً وعلى نطاق مؤسسات متعددة عبر مجموعة أوسع من مواقع الأورام وفئات المرضى لتقييم سلامة وفعالية العلاج بالإشعاع الوميضي FLASH–RT بدقة. وستحتاج هذه التجارب إلى تحديد جداول الجرعات المثلى والمجموعات السكانية المحددة التي تستفيد بشكل أكبر من الوميض FLASH.

  - وضع معايير دولية لتطبيق العلاج الإشعاعي بالوميض FLASH–RT، والجرعات الإشعاعية المرافقة، وضمان الجودة، والتقارير، وبالتالي يجب على الهيئات التنظيمية تطوير إرشادات لضمان تنفيذ هذه التقنية الجديدة بأمان وفعالية.

  - استكشاف الإمكانيات التآزرية لدمج العلاج الإشعاعي بالوميض FLASH–RT مع علاجات أخرى للسرطان، مثل: العلاج المناعي، والعلاج الكيميائي، والعلاجات الموجهة؛ إذ يمكن للخصائص المحافظة للمناعة في تقنية العلاج الإشعاعي بالوميض FLASH–RT، على سبيل المثال، أن تعزز من فعالية الأساليب المناعية العلاجية.

وبالنتيجة

تشكل تقنية العلاج الإشعاعي بالوميض FLASH radiotherapy نقلة نوعية في مجال علاج السرطان، حيث تقدم إمكانية تحقيق علاج إشعاعي فعال بدرجة عالية مع تخفيض ملحوظ في الآثار الجانبية. تستند المبادئ الفيزيائية الأساسية لهذه التقنية إلى توصيل الجرعة بمعدل فائق للغاية،

مما يحفز سلسلة من الاستجابات الفيزيائية والكيميائية الحيوية الفريدة التي تتوج بتأثير الوميض المميز. ورغم استمرار التحديات المتعلقة بقياسات الجرعة، وتطوير التكنولوجيا، والفهم الشامل للآليات، فإن وتيرة البحث السريعة والنتائج السريرية المبكرة الواعدة تؤكد الإمكانات الهائلة لهذه التقنية. ومع استمرار فك طلاسم التفاعلات بين العالم الذري والأنظمة البيولوجية عند معدلات جرعة قصوى، يبرز العلاج الإشعاعي الوميضي كثورة في مجال معالجة الأورام الإشعاعية، مانحاً آفاقاً جديدة وأملاً متجدداً لمرضى السرطان حول العالم.

المراجع

[1] Baskar, R., et al. (2012). Biological effects of radiation on normal cells: mechanisms and implications. Future Oncology, 8(7), 817–832.

[2] Favaudon, V., et al. (2014). The 'FLASH' effect: ultra-high dose-rate irradiation increases the differential response between normal and tumor tissue in mice. Science Translational Medicine, 6(245), 245ra93.

[3] Vozenin, M. C., et al. (2019). The FLASH effect: a paradigm shift in radiation oncology. Clinical Oncology, 31(11), 779–787.

[4] Bourhis, J., et al. (2019). Treatment of a first patient with FLASH-radiotherapy. Radiotherapy and Oncology, 139, 18–22.

[5] Mascia, A. E., et al. (2023). Proton FLASH Radiotherapy for the Treatment of Symptomatic Bone Metastases: The FAST-01 Trial. JAMA Oncology, 9(1), 101–108.

[6] Daugherty, E. C., et al. (2024). FLASH radiotherapy for the treatment of symptomatic bone metastases in the thorax (FAST-02): protocol for a prospective study of a novel radiotherapy approach. Radiation Oncology, 19(1), 1–10.

[7] Spitz, D. R., et al. (2019). The oxygen depletion hypothesis for the FLASH effect. Radiotherapy and Oncology, 139, 3–7.

[8] Yang, X. X., et al. (2025). Clinical translation of ultra-high dose rate flash radiotherapy: Opportunities, challenges, and prospects. World Journal of Radiology, 17(4), 105722. (Image adapted from this source for Figure 1)

[9] Montay-Gruel, P., et al. (2019). The FLASH effect: a new paradigm in radiation oncology. Cancer Radiotherapy, 23(6), 543–549.

[10] Wilson, J. D., et al. (2020). The FLASH effect: a review of current understanding and future directions. Physics in Medicine & Biology, 65(23), 23TR01.

[11] Buonanno, M., et al. (2020). The FLASH effect: a review of the mechanisms and clinical implications. International Journal of Radiation Oncology Biology Physics, 108(3), 611–620.

[12] Wang, P., et al. (2025). FLASH radiotherapy at a crossroads. Journal of Radiation Research, 66(1), 1–10.

[13] Yang, X. X., et al. (2025). Clinical translation of ultra-high dose rate flash radiotherapy: Opportunities, challenges, and prospects. World Journal of Radiology, 17(4), 105722.

[14] Luo, H., et al. (2025). Consensus statement on the exploration of clinical translation of FLASH-RT. Radiation Medicine and Protection, 6(1), 100083.

[15] Liu, J., et al. (2023). The clinical prospect of FLASH radiotherapy. Radiation Medicine and Protection, 4(4), 100057.

[16] Bourhis, J., et al. (2019). Treatment of a first patient with FLASH-radiotherapy. Radiotherapy and Oncology, 139, 18–22.

[17] Vozenin, M. C., et al. (2019). The FLASH effect: a paradigm shift in radiation oncology. Clinical Oncology, 31(11), 779–787.

[18] Cao, Y., et al. (2022). The potential and risks of FLASH radiotherapy in pediatric patients. Neuro-Oncology Pediatric, 4(wuaf014).

[19] Klaver, Y. L. B., et al. (2025). Requirements and study design for the next proton FLASH clinical trials: an international multidisciplinary Delphi consensus. International Journal of Radiation Oncology Biology Physics, 110(2), 306–315. (Image adapted from this source for Figure 2)

[20] Romano, F., et al. (2022). Ultra-high dose rate dosimetry: challenges and opportunities for FLASH radiation therapy. Medical Physics, 49(6), 3907–3923.

[21] Ashraf, M. R., et al. (2020). Dosimetry for FLASH Radiotherapy: A Review of Tools and Techniques. Frontiers in Physics, 8, 328.

[22] Siddique, S., et al. (2023). FLASH radiotherapy and the use of radiation dosimeters. Cancers, 15(15), 3883.

إعداد: الدكتور المهندس يحيى لحفي- قسم الوقاية والأمان ، هيئة الطاقة الذرّية السورية.

الأزمة المائية في سوريا بين الإدارة والتغيرات المناخية

ملخص

يواجه الأمن المائي في سوريا تحديات جسمية ناتجة عن سوء التخطيط والإدارة السلبية لموارد المياه (خاصة المياه الجوفية) خلال العقود الماضية. إن الضخ الجائر من طبقات المياه الجوفية تجاوز أضعاف عتبة التغذية السنوية التي أدت إلى نقص في مناسيب المياه الجوفية وجفاف عشرات الينابيع وتحول جزء من مجاري الأنهار الدائمة إلى موسمية أو جفافها. بينت دراسات الموازنات المائية وجود عجز في تأمين الطلب على الموارد المائية ليس في فترات الشح فحسب، بل على مستوى السنة الهيدرولوجية في معظم الأحواض المائية. أضافت التغيرات المناخية وتواتر سنوات الجفاف بعداً جديداً في تعميق الأزمة المائية في سوريا، فالاتجاه العام لهذه التغيرات هو تناقص مستمر في كميات الهطول المطري وتناقص حجوم المتجدد المائي من جهة، وارتفاع مستمر لدرجات الحرارة والذي يعني فقدان المزيد من المياه عبر التبخر من جهة أخرى. بظل هذه الأزمة لا بد من إيجاد حلول نوعية تقضي بتفعيل التشريعات بوقف الاستنزاف الجائر لموارد المياه الجوفية للوصول إلى سحب مستدام والحد من كمية المياه المستخرجة والذي يتم عن طريق المراقبة الحكومية المتشددة. وبما أن الزراعة هي المستثمر الأكبر لموارد المياه فلا بد من اعتماد نظم مستدامة وتحسين الإنتاج بمحاصيل ذات مردودية عالية وترشيد استعمال مياه الري الزراعي ونشر طرق الري الحديثة كالري الرذاذي والضبابي والتنقيط وتحت سطح التربة.

الكلمات المفتاحية: إدارة الموارد المائية، التغيرات المناخية، سوريا.

تنبع قداسة الماء من قداسة الحياة، فمن ملك الماء ملك الحياة ومبدأ الوجود، وهو ما تعبّر عنه الآية القرآنية العظيمة: ﴿وخلقنا من الماء كل شيءٍ حي﴾

توصيف الازمة المائية في سوريا

لا يمكن ربط جذور الأزمة المائية الحالية في سوريا فقط بالتغيرات المناخية وسنوات الجفاف المتتالية التي مرت على سوريا ودول الجوار؛ فقبل أقل من ربع قرن من الآن، لم يكن لمحور التغيرات المناخية وسنوات الجفاف المتعاقبة دور أساسي بالتأثير الكمي والنوعي على موارد المياه في سوريا، فإذا استثنينا الظروف الناجمة عن التغيرات المناخية، فإنَّ السياسات المتصلة بموارد المياه واستثمارها في البلاد على مدار نصف قرن، أدت دوراً أساسياً في الأزمة المائية الحالية في سوريا والتي ارتبطت في جزء كبير منها بسوء إدارة مزمن يقوم على التهوين والمجانية والفساد في إدارة موارد المياه واستنزافها عبر استغلال جائر وغير مدروس قائم على مفهوم شعبي يعدّ بها الناس أن المياه ثروة شخصية يمكن التصرف بها دون ضوابط محددة [1].

كانت النتائج المترتبة على ذلك كارثية، بانهيار الوضع المائي في معظم أحواض الأنهار، بينها الخابور بالجزيرة، والعاصي في المنطقة الوسطى، وبردى في دمشق ونهر اليرموك في الجنوب. ويشكل نبع رأس العين الكارستي في الجزيرة العليا، شمال سوريا، أحد أهم الأمثلة على الصورة المأساوية التي وصلت إليها الأمور، حيث انخفض تصريف النبع إلى أدنى مستوياته وجفافه تماماً عام 2001 بعد أن كان من أكبر ينابيع العالم الكارستية والذي وصل تصريفه الوسطي ما يعادل 45 م^3/ثا في العقدين الخامس والسادس من القرن الماضي (الشكل1).

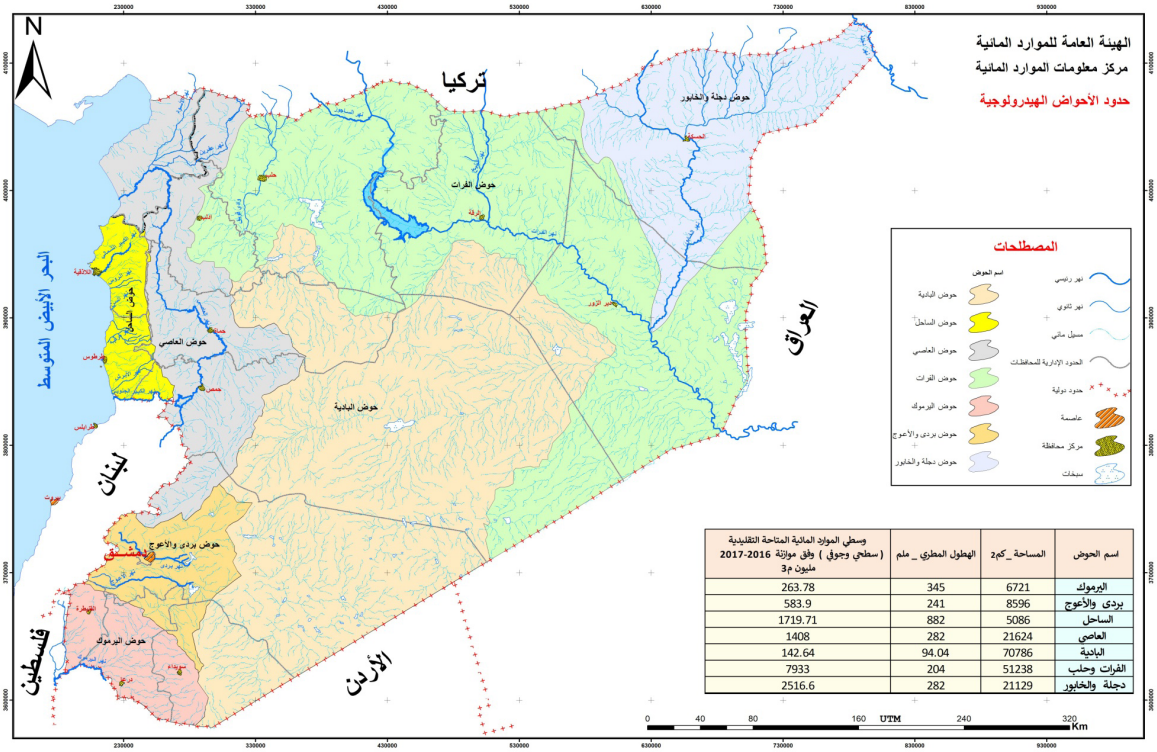
كما أدَّت السياسات المتبعة إلى تلوث المصادر المائية في مجاريها وصولاً إلى أحواضها الجوفية. كما أن عمليات التلوث الناتجة عن الاستخدام السيئ للمياه، مثل تسليط مياه الصرف الصحي ومثيلتها المستخدمة في بعض الصناعات والحرف إلى مجاري الأنهار والبحيرات. وساهمت الحرب بين عامي 2011–2024 بما تركته من انتهاكات على مجاري المياه وأحواضها، ولا سيما التكرير البدائي للنفط، في خراب وتدمير محطات معالجة مياه الصرف الصحي في حواضر المدن الكبرى (دمشق وحلب واللاذقية)، وهي من جملة الأسباب المهمة لتدهور نوعية المياه السطحية والجوفية في سوريا. وفي سياق توصيف أزمة المياه، فهي حاضرة بقوة في قطاع الزراعة الذي يمثل النشاط الاقتصادي الرئيسي في البلاد والمستهلك الأكبر للمياه. ولا يقتصر حضورها في هذا القطاع على الزراعات البعلية التي تواجه تراجعاً في الهطولات المطرية في عموم المناطق، بل هي حاضرة في مناطق الزراعات المروية في أحواض الأنهار مثل: الفرات وروافده، ونهري العاصي وبردى، ونهر اليرموك، وقد تناقصت إمداداتها من الينابيع والأمطار، وتراجعت مستويات مخزوناتها الجوفية، وكلها أدَّت إلى عجوزات واضحة في كميات الإنتاج الزراعي ونوعيته، وامتد أثرها إلى الإنتاج الحيواني، بالتوازي مع تراجع إنتاج الأعلاف. ودون شك فإن تواتر سنوات الجفاف الشديد في السنوات الأخيرة أدى إلى تأثر أكثر من نصف الأراضي الزراعية في سوريا وانخفاض كبير في إنتاج المحاصيل وخاصة محصول القمح، وبالتالي تفاقم انعدام الأمن الغذائي. وحسب

الشكل 1. التحول الكبير الذي طرأ على التدفق الطبيعي لنبع رأس العين (الذي يغذي نهر الخابور) بعد أن كان من أكبر الينابيع الكارستية في العالم في منتصف القرن الماضي وبتصريف يتجاوز 43 م^3/ثا (UNDP-FAO 1966)، ليصبح منسوب النبع في مطلع القرن الحالي دون سطح الأرض وبتصريف يتم تحت الضخ حالياً لا يتجاوز 6 م^3/ثا لتدعيم نهر الخابور. هذه الصورة الدراماتيكية لموارد المياه الجوفية الكارستية هي نتيجة طبيعية للضخ الجائر ولفترة طويلة من الآبار الجوفية على جانبي الحدود السورية – التركية وبقيمة إجمالية في الجانب السوري تتجاوز $4*10^9$ م^3/سنة.

منظمة الأغذية والزراعة (FAO) فإن إنتاج الحبوب في عام 2024 قُدّر بنحو 3.4 ملايين طن في سوريا؛ أي أقل بنحو 13% عن متوسط السنوات الخمس السابقة، وأقل بنحو 33% عن متوسط سنوات ما قبل الحرب، ويعزى ذلك أساساً إلى سوء توزيع الأمطار طوال الموسم وارتفاع درجات الحرارة خلال موسم الزراعة. وبدا من الطبيعي امتداد الأزمة إلى مياه الشرب التي تتركز احتياجاتها الرئيسية في حواضر المدن ذات الكثافات السكانية العالية؛ مثل: دمشق، وحلب، وأغلب مدن الجنوب والشمال، وتسبب ازدياد الكثافات السكانية وعوامل أخرى في استنزاف المياه السطحية من أنهار وينابيع، وأغلبية مخزونات المياه الجوفية، وباتت أغلب المناطق في الوقت الحالي عرضة لأنظمة تقنين مياه الشرب لفترات زمنية متفاوتة. يمثّل النقص الخطير في المياه واحداً من تعبيرات أزمة المياه في سوريا التي تعرّضت لطيف واسع من تدخلات واختلاطات على مدار العقود الماضية، سببت التردي، وجعلت جزءاً من المياه خارج مواصفات مياه الشرب، وبعضها خارج شروط استخدامها في الزراعة دون الدخول في دورات تنقية وإعادة تأهيل. إن تدهور حالة المياه وصولاً إلى عدم صلاحيتها ناتجة عن أسباب مختلفة ومتداخلة، وإذا استثنينا الظروف الناجمة عن التغيرات المناخية؛ فإنَّ السياسات المتصلة بالمياه واستثمارها في البلاد، أدّت دوراً أساسياً في الأزمة وتردي أوضاع المياه واستنزافها، وكان بين أهم نتائجها انهيار الوضع المائي في أحواض الأنهار على مساحة الجغرافيا السوريا.

الموارد المائية المتاحة في سوريا

بلغ مجموع الموارد المائية المتجددة (السطحية والجوفية) حسب الهيئة العامة للموارد المائية للعام 2016–2017 (تسع سنوات قبل الآن) ما يعادل 14.5 مليار م^3، منها ما يقارب 10 مليار م^3 للمياه السطحية و4.5 مليار م^3 للمياه الجوفية موزعة في الأحواض المائية على الشكل التالي: حوض اليرموك 260 م.م3، حوض بردى والأعوج 580 م.م3، حوض الساحل 1700 م.م^3، حوض العاصي 1400 م.م^3 حوض البادية 140 م.م^3، حوض الفرات وحلب 7900 م.م^3، ودجلة والخابور 2500 م.م^3 (الشكل 2). تتمايز هذه الأحواض عن بعضها من حيث كميات الهطول المطري، طبيعة الخزانات المائية الجوفية وإمكانيات تجددها السنوي وعدد الآبار وطبيعة الاستثمار من حيث احتياجات مياه الشرب، والصناعة، والزراعة التي تستهلك ما يقارب 88% من موارد المياه في سوريا [2].



الشكل 2. خارطة الأحواض المائية في سوريا والموارد المائية السطحية والجوفية المتاحة.

يوجد في سوريا 161 سداً موزعاً على الأحواض المائية بحجم تخزيني مقداره 19 مليار م^3، منها 16 مليار م^3 على نهر الفرات و3 مليار م^3 تقريباً للسدود في بقية الأحواض المائية. تبلغ القيمة التخزينية الحالية لهذه السدود (باستثناء سدود الفرات) التي قيست في نيسان من عام 2025 حوالي 21% فقط (وبعضها جاف تماماً) و76% من القيمة التخزينية للسدود على نهر الفرات حسب الهيئة العامة للموارد المائية.

بلغ عدد الآبار المرخصة وغير المرخصة حالياً أكثر من 300000 بئر موزعة بتباين كبير على جميع الأحواض المائية. وبضوء توفر الطاقة الشمسية المجانية، فإن مجموع كميات الضخ التقريبية من هذه الآبار يصل إلى ما يقارب 17 مليار م^3/سنة، أي ما يعادل 4 أضعاف كمية المياه المتجددة للمياه الجوفية على مستوى سوريا.

بظل غياب القياسات لمناسيب المياه الجوفية في خزانات المياه، فإن هذا الاستثمار غير المستدام وغير المدروس أدى إلى تغيير خارطة المياه السوريا من خلال جفاف معظم الينابيع التي تساهم في التدفق الرئيس لمجاري الأنهار والبحيرات والأراضي الرطبة؛ فعلى سبيل المثال تشكل المياه الجوفية المنبثقة من نبع رأس العين في شمال شرق سوريا شريان الحياة لنهر الخابور، كذلك الحال تشكل المياه الجوفية المنبثقة في كل من نبع عين الزرقاء ونبع بردى والفيجة في جنوب غرب سوريا (لبنان الشرقية) شريان الحياة لكل من نهري العاصي وبردى على التوالي. فضلاً عن جفاف ينابيع المزيريب في سهل حوران. إن 70% من إمدادات المياه لمختلف الاستخدامات تأتي من المياه الجوفية من الخزانات الرئيسية ويحصل أكثر من 17 مليون شخص، في حواضر المدن الكبرى ومعظم سكان الأرياف، على مياه الشرب من المياه الجوفية (سواء من الآبار أم الينابيع) في مختلف المحافظات السوريا.

الاستخدام غير الفعال للمياه في الزراعة

إن سوء إدارة المياه واستخدامها غير الفعال يعني هدر موارد المياه الجوفية والسطحية واستنزافها، وتلوث المصادر وتهديد الأمن الغذائي والبيئي وزيادة التوترات الاجتماعية والاقتصادية. لقد هيمنت الأهداف الوطنية للأمن الغذائي على السياسيات الزراعية في سوريا. تشكل مساحة الأراضي المروية 27% من مجمل الأراضي المستثمرة التي تساهم بشكل كبير في تكوين الإنتاج الزراعي، فالزراعة المروية تنتج 100% من المحاصيل الصيفية مثل: القطن والمحاصيل الصناعية الأخرى، أما بالنسبة للمحاصيل الشتوية وخاصة الرئيسية كالقمح، فقد تراوحت بين 60–70% في السنوات الجافة و45–50% في السنوات الماطرة [3]. وفي هذا المجال لابد من القول بأن تزايد الطلب على المياه وخاصة للأغراض الزراعية أدى إلى تفاقم الأوضاع فيما يخص استنزاف الموارد المائية، حيث أدت زيادة المساحات المروية إلى زيادة الطلب على الموارد المائية على اختلاف مصادرها، وازدادت الاحتياجات المائية الفعلية للخطة الزراعية من 8.3 مليار م^3/سنة عام 1990 لتصل إلى حدها الأقصى 14.6 مليار م^3/سنة عام 2004 والذي يعني زيادة الطلب على الموارد المائية للأغراض الزراعية من المصادر السطحية والجوفية بمقدار 6.3 مليار م^3 خلال الفترة (1990–2004).

إن انخفاض إنتاجية المياه في الزراعة يمثل تحدياً كبيراً يواجه إدارة المياه في سوريا، وعموماً، فإن صافي العائد للمحاصيل الأساسية منخفض جداً. أما صافي العائدات للقطن والسكر اللذين يزرعان على مساحة أكثر من 221,000 هكتار، فهو سلبي. ويتم استغلال جميع موارد المياه الجوفية تقريباً استغلالاً مفرطاً، مما يؤدي إلى انخفاضٍ مستمر في مستويات المياه الجوفية. وإن هذا غير مستدام ويؤدي إلى زيادة العجز في توازن المياه. لقد اتجهت استراتيجية مختلف مؤسسات الدولة وخاصة وزارة الزراعة في السنوات الأخيرة نحو مفهوم ديمومة الموارد المائية وحمايتها، وذلك باتباع سياسات تعتمد على الاستغلال الأمثل للموارد المائية في الزراعة ووضع المعايير والضوابط اللازمة لهذا الاستغلال، وذلك بإدخال طرق الري الحديثة (مثل: الري بالرش والتنقيط وتحت السطحي والسطحي المطور) في ظل هذه المحدودية للمياه وبما يتناسب مع الظروف المناخية والسوية التقنية للمزارع السوري، إضافة إلى وضع الآليات والسياسات والإجراءات لتحقيق ذلك وفق خطة مبرمجة زمنياً ومادياً.

التداعيات المتوقعة لتغير المناخ

ينذر التغير المناخي بتداعيات قد تغيّر شكل كوكب الأرض، وتؤثر سلباً على حياة سكانه، في حال عدم التزام الدول حول العالم، بخطوات إنقاذية، من بينها خفض انبعاثات ثاني أو كسيد الكربون. تقول الأمم المتحدة إن هذا التغير في المناخ، طويل المدى، نتج عن النشاط البشري، وبشكل رئيسي بسبب الاستخدام الكبير للوقود الأحفوري – الفحم والنفط والغاز، حيث ارتفعت كمية ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي بنحو 50%، منذ بداية الثورة الصناعية.

تختلف الأبحاث العلمية قليلاً حول مدى ارتفاع درجات الحرارة على وجه التحديد، ولكن الجميع يتفقون على أن العالم يمر الآن بـأدفأ

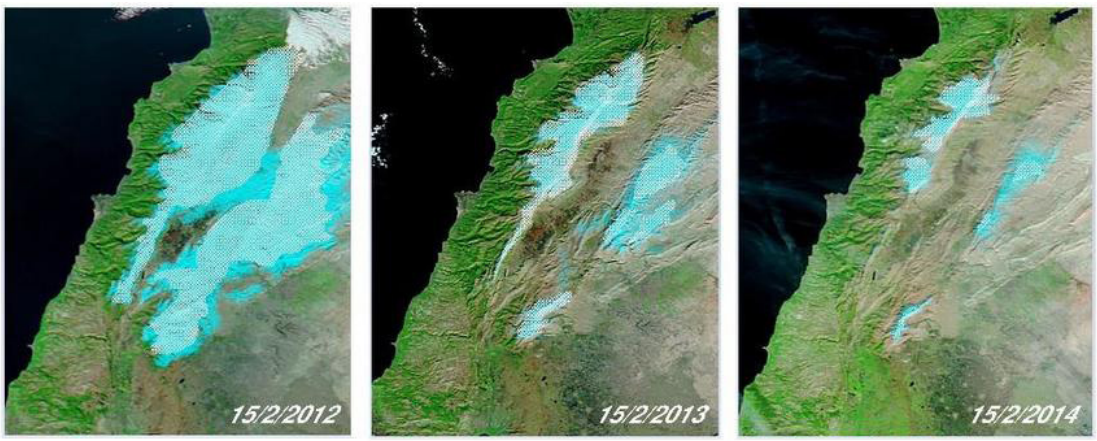
فترة له منذ بدء السجلات الحديثة، ومن المرجح أن تستمر لفترة أطول بكثير. وأصبح الحد من ارتفاع درجات الحرارة على المدى الطويل بحيث لا يتجاوز 1.5 درجة مئوية فوق مستويات ما قبل الثورة الصناعة جهداً دولياً لمعالجة تغير المناخ. ويشير العلماء إلى أن اتخاذ إجراءات عاجلة لخفض انبعاثات الكربون، لا يزال بإمكانه إبطاء ظاهرة الاحتباس الحراري. تتمثل المخاطر الملموسة والناجمة عن تغير المناخ، بموجات الحر الشديدة وارتفاع منسوب مياه البحر وفقدان الحياة البرية والبحرية، وتهديد الأمن المائي والغذائي عبر اختفاء مساحات زراعية كبرى ومزيد من الفقر والبطالة والنزوح وانتشار الأوبئة.

سيكون لتغير المناخ آثار شديدة على موارد المياه في منطقة الشرق الأوسط [4]، فعلى سبيل المثال، سيواجه الشرق الأوسط انخفاضاً في كمية الهطول بنسبة 20 الى 25% حتى منتصف القرن الحالي، مما سيقلل من الجريان السطحي بحوالي 23%، وقد ينخفض تدفق نهر الفرات بنسبة 29% إلى 73%. إضافة إلى ذلك، قد يزداد متوسط درجة الحرارة في الشرق الأوسط بحوالي 2.5 درجة مئوية حتى عام 2050، مما سيؤثر على كميات الماء المتبخرة. يتناقص المخزون المائي في الطبقات الجوفية بشكل كبير تزامناً مع النقص المتوقع في كميات هطول الأمطار نتيجة تغير المناخ، ففي عام 2013، نُشرت دراسة استخدمت بيانات من وكالة الفضاء الأمريكية ناسا كشفت فيها أن 144 مليار م3 من المياه خلال سبع سنوات فقط، في الفترة بين 2003–2010، فقدتها خزانات المياه الجوفية في المنطقة التي تضم أجزاء من جنوب تركيا مع سوريا والعراق وهي المنطقة التي يمر فيها نهري دجلة والفرات. هذه الكمية من المياه تعادل حجم مياه البحر الميت تقريباً. وذكرت الدراسة التي استخدمت فيها تحليلات الصور الفضائية أن الفقد حدث بشكل كبير بعد موجة الجفاف التي ضربت المنطقة سنة 2007، وأن 60% منها كان نتيجة الاستجرار الكبير من مخزون المياه الجوفية [5].

التغيرات المناخية والجفاف في سوريا

يشير برنامج الأمم المتحدة للبيئة إلى أن الدول النامية هي الأكثر تضرراً من آثار التغير المناخي. ونشر موقع مجموعة «إيبردرولا» للطاقة العام الماضي قائمة الدول العشر الأكثر تأثراً بتداعيات التغير المناخي ومن ضمنها سوريا. تعدّ التغيرات المناخية والجفاف في سوريا أحد أهم التحديات الرئيسية على موارد المياه السطحية والجوفية. وتعتمد هذه الآثار في التغيرات المناخية على مدة العجز في هطول الأمطار وشدته وتوزعه المكاني، وارتفاع معدلات درجة الحرارة وحساسية الوضع البيئي والاجتماعي والاقتصادي للمناطق المتضررة. وشهدت سوريا اتجاهاً متزايداً نحو الجفاف على مدار العقود الماضية، مع تسجيل أحداث جفاف كبيرة في سنوات 2006–2009 و2014–2017 و2021، وكان عام 2025 من أكثر الأعوام جفافاً؛ مما يشير إلى أن الجفاف يتحول من ظاهرة موسمية متقطعة إلى حالة ممتدة ومتزايدة الحدة تساهم في ارتفاع نسبة التبخر وتلوث الموارد المائية.

أظهرت نتائج دراسة المنحى العام للسلاسل الزمنية المناخية لكل من درجة الحرارة والهطول المطري أن المناخ في حوض دمشق وعلى مدار الفترة الممتدة من عام 1969/1970–2017/2018 (خمسين عاماً) قد تعرض لارتفاع درجات الحرارة قدرت بـ 1.4 درجة مئوية في محطة سرغايا و3.4 درجة مئوية في محطة المزة. ترافقت هذه الفترة الزمنية ليس فقط بتناقص في كميات الهطول المطري بمقدار –11% إلى–13% على التوالي، بل أيضاً بانزياحات مهمة في التوقيت ومعدلات الشدة وتغيرات كبيرة في سُمْك الغطاء الثلجي في مناطق التغذية (الشكل 3). هذه التطورات السلبية للمناخ وباتجاه واحد من زيادة الحرارة وتناقص الأمطار والمترافقة بفعاليات بشرية أدت إلى تغيرات جذرية على توافر موارد المياه الجوفية واستدامتها في حوض دمشق.



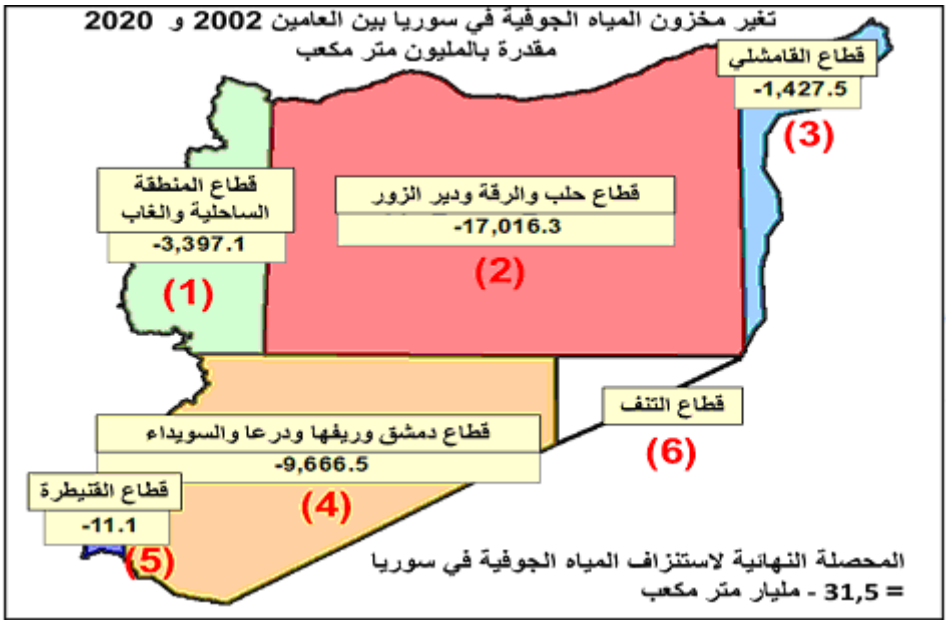
الشكل 3. مقارنة للتغيرات الحاصلة على كميات وامتدادات وسماكات الهطول الثلجي في سلسلتي لبنان الشرقية والغربية للتاريخ نفسه على مدار ثلاث سنوات حسب وكالة ناسا الأمريكية.

إن العلاقة بين التغيرات المناخية وموارد المياه الجوفية ليست بالضرورة خطية، فعلى الرغم من أن تأثيرات تغير المناخ من حيث تناقص كمية الهطول وارتفاع درجة الحرارة، فقد أثبتت نتائج البحث أن تغذية موارد المياه الجوفية المتجددة في حوض الفيجة قد تناقصت بمقدار -37 %، وغياب شبه كلي لتغذية موارد المياه المتجددة في غوطة دمشق نتيجة جفاف نهر بردى [6].

الذكاء الصنعي في مواجهة تحديات تغير المناخ وإدارة الموارد المائية

الذكاء الصنعي هو مجال من مجالات علوم الحاسوب مخصص لإنشاء أنظمة قادرة على أداء المهام التي تتطلب عادةً الذكاء البشري. ويتضمن إنشاء خوارزميات تمكن الأنظمة من تحليل وتفسير كميات هائلة من البيانات، ثم تسمح هذه الخوارزميات لأنظمة الحاسوب بتقليد جوانب الفكر البشري، مما يمكن الآلات من تكرار مهام مثل التعلم والتخطيط وحل المشكلات واتخاذ القرار [7]. تتمثل التطبيقات الرئيسية للذكاء الصنعي في إدارة المياه بالتنبؤ عن احتياجات الطلب على المياه من خلال تحليل البيانات التاريخية والأنماط الحالية للتنبؤ بالطلب المستقبلي على المياه مما يمكن من إدارة العرض والطلب ويساعد في توزيع المياه بشكل أكثر كفاءة بناءً على الاحتياجات المتوقعة. إضافة إلى مراقبة جودة المياه، حيث يمكن استخدام أجهزة استشعار متصلة بالذكاء الصنعي لمراقبة جودة المياه في الوقت الفعلي وتحليل البيانات لاكتشاف أي تغير في جودة المياه والتنبؤ بمصادر التلوث المحتملة وإدارة شبكات توزيع المياه خاصة ما يتعلق بتحليل بيانات شبكات توزيع المياه للكشف عن التسريبات وتقليل الفاقد، وتحسين عمليات الضخ وتقليل استهلاك الطاقة.

وفي محاولة لرصد تأثير التغيرات المناخية على مخزون المياه الجوفية في سوريا، فقد تم استخدام بيانات القمر الصناعي GRACE لمراقبة تغيرات مخزون المياه الجوفية من الفضاء، حيث إن التغيرات في مجال الجاذبية تشير إلى التغيرات في مخزون المياه الجوفية، علماً أن الكثير من الدول وخاصة أمريكا وأستراليا والهند تعتمد على بيانات هذا القمر في تقدير تغيرات مخزون المياه الجوفية [7]. تشير النتائج المبدئية لاستخدام بيانات القمر الصناعي أن مقدار الاستنزاف في مخزون المياه الجوفية على مستوى سوريا وللفترة الزمنية 2002– 2020 يصل إلى 31.5 مليار م^3 وبمعدل 1.7 مليار متر مكعب في السنة، ويعزى هذا الاستنزاف بشكل رئيسي إلى أن كميات الضخ من المياه الجوفية تتجاوز كميات المتجدد السنوي والذي يتناقص بشكل كبير في سنوات الجفاف المترافقة مع التغيرات المناخية التي تشهدها المنطقة (الشكل 4).



الشكل 4. نتائج استخدام بيانات القمر الصناعي GRACE لمراقبة تغيرات مخزون المياه الجوفية في سوريا للفترة 2002-2020 حيث وصلت المحصلة النهائية لاستنزاف المياه الجوفية 31.5 مليار م^3.

سباق مع الزمن وحلول مكلفة لتحلية مياه البحر

لا شك أن أزمة المياه ستتفاقم من سنة لأخرى في ظل التراكمات في العجوزات المائية لمعظم الأحواض المائية نتيجة التغيرات المناخية وازدياد الطلب على المياه وارتهان الموارد المائية الرئيسة في سوريا للمناخ السياسي. وتأتي عملية تأمين مياه الشرب والاستهلاك المنزلي على سلم الأولويات في ظل عودة المهجرين وإعادة الإعمار والبنية التحتية وتنشيط السياحة وزيادة المساحات

الخضراء. إن ما جرى تداوله سابقاً من مشاريع مائية ضخمة كاستجرار مياه نهر الفرات أو الفائض من مياه حوض الساحل لم يعد مجدياً كون هذه المصادر لا تتمتع بالديمومة؛ لذلك لا بد من وضع حلول مستدامة للتغلب على تلك التحديات تجنباً لحدوث أزمات يصعب جداً التكيف معها، لذلك جاء مشروع دراسة تحلية مياه البحر.

إن حل مشكلة العجز المائي على المدى البعيد لا يمكن أن يكون إلا من خلال تأمين مصدر مستدام احتياطي وداعم للمصادر المائية لسد هذا العجز مستقبلاً، فمشكلاتنا القادمة ليست تلك التي تُحلُّ بحسن الإدارة فحسب، بل تتطلب توفير المصدر المائي الكافي والمستدام لمواجهة العجز، ومن ثم حسن إدارة هذا المصدر. بناءً على ما سبق قامت لجنة فنية مشتركة من وزارات الموارد المائية والكهرباء والتعليم العالي (معهد التخطيط الإقليمي – المعهد العالي لإدارة المياه) وهيئة التخطيط الإقليمي بوضع الأسس العامة للدراسات اللازمة للمشروع، ومحددات شروطه المرجعية ومراحل التنفيذ [8]. تنطلق رؤية المشروع من التحديات الأساسية والتي تهدد عدداً من أهم المصادر المائية الرئيسية للقطر مما ينعكس سلباً على تلبية احتياج الاستخدامات المائية الاستراتيجية التالية، ومن هذه المصادر: مياه الشرب والاستخدامات المنزلية، منشآت الطاقة، الصناعات الاستراتيجية، مما يتطلب تأمين مصدر مائي داعم موثوق لتأمين الاحتياجات اللازمة لهذه الاستخدامات الاستراتيجية، ونتيجة لذلك جاءت دراسة مشروع تحلية مياه البحر كمصدر مستقر وموثوق لا يتأثر بالتغيرات المناخية، كأساس للتخطيط بعيد المدى. إضافة إلى ذلك فإن مياه الينابيع تحت البحرية والمياه السطحية الفائضة في حوض الساحل من المصادر محدودة الموثوقية على المدى التخطيطي البعيد وتتأثر بالتغير المناخي وتشكل في المدى المتوسط مصدراً يمكن استثماره لتلبية الغرض. لقد أجريت المحاكاة لهذه الدراسة بناء على المعطيات التنموية والسكانية لمرحلتين من مراحل التطور، 2030–2040 و2050–2075، حيث تكون الحاجة ماسّة للطاقة وقت الأزمات، وبالتالي على المشروع أن يؤمن الحاجة الكاملة لعمل محطات توليد الطاقة الكهربائية ومصافي النفط لرفع ضغطها عن الموارد المائية المخصصة لمياه الشرب، واعتمادها الحد الأدنى المطلوب من المشروع لحصة الفرد اليومية من مياه الشرب والاستخدامات المنزلية ضمن شبكات التزويد في حال الطوارئ ولمدة محدودة 40 (لتر/فرد/يوم) على أن يشمل المنطقة الساحلية، المنطقة الوسطى، محافظتي دمشق وريفها الممتد من القلمون إلى أقصى الجنوب، ومحافظتي درعا والسويداء.

يعدّ المشروع قفزة تقنية تتمثل في إدخال مفهوم تخطيطي وتقني وإداري جديد ومهم في بنية المنظومة المائية في الجمهورية العربية السورية؛ حيث يتميز هذا المشروع بكونه: استراتيجياً وحيوياً للغاية اجتماعياً واقتصادياً وتنموياً ومتسعاً في نطاقه الجغرافي ليشمل مساحة تتسم بالكثافة السكانية والثقل الاقتصادي وبكلفة مالية تأسيسية وتشغيلية كبيرة ومشروعاً ذا تقنيات مركّبة وغير مطبقة سابقاً في سوريا. ومن المؤمل أن ينتج المشروع ما يعادل 1 مليون م^3/ يومياً بمطلع 2040 وبكلفة تقديرية بين 3.5 إلى 4.4 مليار يورو.

مساهمة التقنيات النووية في إدارة موارد المياه

تؤدي النظائر البيئية دوراً مهماً في حل جزء من المشكلات المترتبة على التغيرات المناخية واستنزاف المياه الجوفية؛ فأحد أهم الأسئلة المطروحة في هذا المجال هو معرفة تجدد المياه الجوفية من عدمه من خلال تقييم أعمار المياه الجوفية سواء كان ذلك بعنصر التريتيوم للأعمار القصيرة أو الكربون–14 لتقدير أعمار المياه الجوفية القديمة، كذلك تساهم النظائر المستقرة للأوكسجين–18 والديتيريوم دوراً مهماً في تقييم التغيرات المناخية كون تركيز هذه العناصر يتأثر بشكل مباشر بدرجة الحرارة وكمية الهطول والرطوبة النسبية للهواء.

سيكون لتغيُّر المناخ تأثير كبير على تربية الحيوانات وعلى إنتاج الأغذية الحيوانية المصدر. وبغية التصدي لذلك، هناك حاجة لمواصلة إجراء البحوث من أجل وضع الأدوات اللازمة التي يمكن أن تساعد على تنسيق الممارسات الزراعية والارتقاء بها إلى المستوى الأمثل. وتنطوي إحدى التقنيات المستخدمة في تقييم أثر تغيُّر المناخ في تدهور التربة وإعادة توزيع الرسوبات على استخدام النويدات المشعة المتساقطة، وهناك تقنية أخرى قائمة على تحليل النظائر المستقرة بمركبات معيَّنة، تمكِّن الباحثين من تحديد مصادر تدهور الأراضي ووضع تدابير فعالة للمحافظة عليها.

وتُستخدم التقنية النظيرية القائمة على الكربون–13 في التقدير الكمي لمعدل دوران المواد العضوية في التربة في ظل سيناريوهات مختلفة لتغيُّر المناخ. وباستخدام تقنية النتروجين–15، يمكن تحديد مصادر إنتاج أكسيد النيتروز من الأراضي الزراعية، وهو ما يمثِّل خطوة مهمة صوب تصميم استراتيجيات تخفيف ملائمة تساعد على التقليل إلى أدنى حدٍّ من انبعاثات غازات الدفيئة. وبغية تحديد نسبة ما تفقده ممارسات الإدارة الزراعية من المياه نتيجة للتبخُّر من التربة ونتح النباتات، يمكن استخدام البصمة النظيرية للأكسجين–18 في بخار الماء.

المراجع

[1] د.م. معن داوود (2025) تأثير آليات تخطيط الموارد المائية مكانياً على أمثلة استخدام الموارد الطبيعية المخففة لتأثيرات تغيرات المناخ وشذوذاته (ورشة العمل حول أزمة المياه وأهم الحلول الممكنة ايلول 2025 هيئة الطاقة الذرية).

[2] د. باسل كمال الدين (2025): الحالة الراهنة والتحديات التي تواجه الموارد المائية في سوريا (ورشة العمل حول أزمة المياه وأهم الحلول الممكنة أيلول 2025 هيئة الطاقة الذرية).

[3] م. عبير حسن (2007) كفاءة استخدام الموارد المائية في الزراعة السوريا. وزارة الزراعة، المركز الوطني للسياسات الزراعية.

[4] **Arnell NW** (**1999**) Climate change and global water resources. ***Glob. Env. Change***, 9: S31–S49.

[5] **Voss AK, Famiglietti JS, Lo MH, Linage C, Rodell M, Swenson SC** (**2013**) Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management in the Tigris–Euphrates–western Iran region. *Water Resources Research, 49:904–914.*

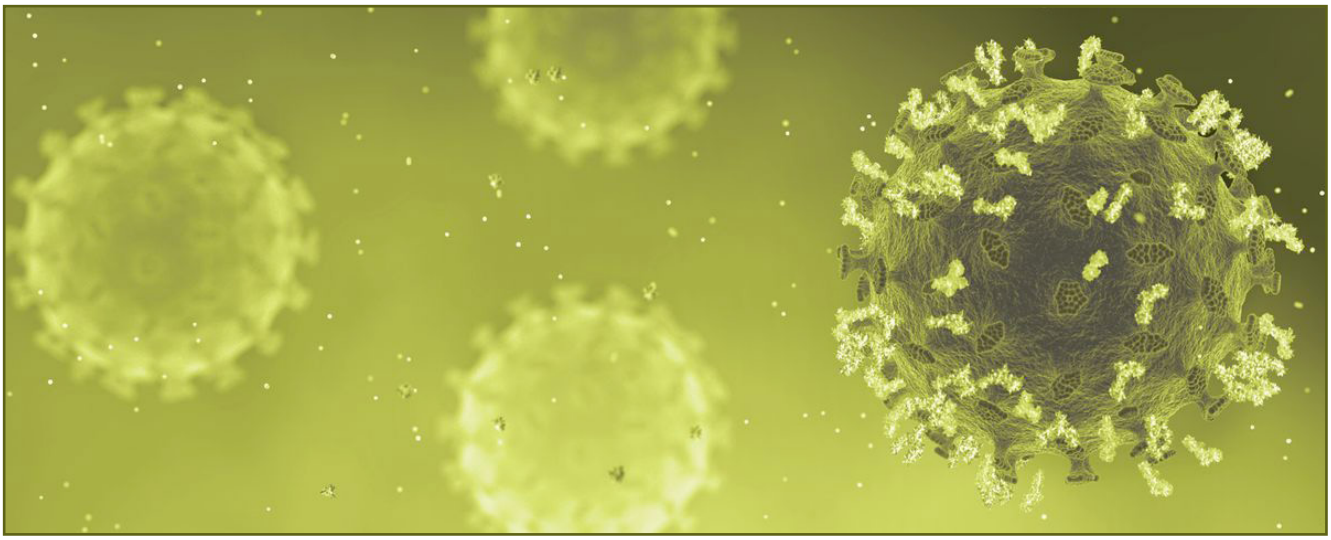
[6] د. عبدالرحمن شريدة وآخرون (2021) تأثير التغيرات المناخية والفعاليات البشرية على الموارد المائية الجوفية في حوض دمشق – سوريا (هيئة الطاقة الذرية).

[7] د. سعاد عبيد (2025) تحديات تأثير التغيرات المناخية على الموارد المائية في سوريا. (ورشة العمل حول أزمة المياه وأهم الحلول الممكنة أيلول 2025 هيئة الطاقة الذرية).

[8] م. أسامة الأخرس (2025): تأمين مصدر مائي احتياطي وداعم لمياه الشرب ومنشآت الطاقة والصناعة الأساسية. (ورشة العمل حول أزمة المياه وأهم الحلول الممكنة أيلول 2025 هيئة الطاقة الذرية).

› *إعداد: د. عبدالرحمن شريدة -قسم الجيولوجيا ، هيئة الطاقة الذرّية السورية.*

الاستعداد لمرض X في عالم متغير



قد يتسبب أيّ كائن مجهري، سواء كان معروفاً أم جديداً، في تفشّي عدوى في أيّ وقت. ويستعدّ الباحثون لمواجهة هذا المُمْرِض المحتمل "X" بشكل استباقي

ملخص

يتناول هذا المقال الاستعداد العالمي لمواجهة مرض "X"؛ وهو وباء محتمل ناتج عن مُمْرِض غير معروف بعد. يعمل الباحثون على دراسة فيروسات معروفَة مثل ميرس وإيبولا، وهم يراقبون الحياة البرية بحثاً عن تهديدات جديدة، ويطورون منصات لقاحات مرنة. ويسلط المقال الضوء على تأثير تغير المناخ وتغير استخدام الأراضي والتفاعل بين الإنسان والحيوان في زيادة خطر انتقال الأمراض، كما تؤكد على أهمية الكشف المبكر والمراقبة الجينية والتعاون الدولي للحد من تفشي الأوبئة المستقبلية والوقاية منها والاستجابة لها بفعالية للحد من مخاطرها.

الكلمات المفتاحية: فيروسات، مرض *X*، التغير المناخي، الصحة العامة، تطوير اللقاحات.

مقدمة

اجتاح فيروس كوفيد-19 العالم في مطلع عام 2020، وأُعلن جائحة عالمية في شهر آذار من ذلك العام. وعلى الرغم من كونه أحدث الأمراض المعدية الناشئة، يتوقع الخبراء أنه لن يكون الأخير؛ فمنذ ما قبل ظهور كوفيد-19، كان العلماء يستعدّون لاحتمال ظهور جائحة غير متوقعة تُعرف باسم «المرض X» أو «المُمْرِض X». وقد طرحت منظمة الصحة العالمية هذا المصطلح للمرة الأولى عام 2018، وعرّفته بأنه: «مُمْرِض مجهول قد يتسبب في وباء عالمي خطير».

فالمرض X هو مصطلح يُشير إلى مُمْرِض مجهول قد يتسبّب في جائحة عالمية، وقد أصبح محوراً لجهود علمية استباقية تهدف إلى فهمه قبل أن يظهر.

قد يكون المُمْرِض X أيّ شيء، بما في ذلك مُمْرِض نعرفه بالفعل لكنه يتحوّر بطريقة غير متوقعة، فيتحوّل فجأة إلى وحش، أو قد يكون شيئاً لم نره من قبل، مثل فيروس SARS-CoV-2. السؤال المطروح: حين يظهر هذا المُمْرِض، هل سيكون الباحثون -والعالم بأسره- على استعداد؟

المُمْرِضات المعروفة تقدّم دلائل لفهم المرض X

بعد عقود من العمل في مجال الأمراض المعدية الناشئة وجدنا في الآونة الأخيرة عدداً أكبر بكثير من المرضات الناشئة مقارنة بما كنا نراه سابقاً.

ومن الأساليب التي يتّبعها العلماء في التعامل مع مسألة الاستعداد للجائحات، دراسة المُمْرِضات المعروفة. فهذه التهديدات الميكروبية المألوفة قد تتحوّر لتصبح أكثر قدرة على الانتقال، أو تكتسب خصائص جديدة تزيد من شدّتها، كما يمكن أن تُستخدم كنماذج لفهم مُمْرِضات مستقبلية مشابهة لكنها جديدة.

يُجري العلماء أبحاثاً حول انتقال فيروس MERS وديناميكية المرض الذي يسببه، وهو أحد فيروسات كورونا الذي ظهر عام 2012، وقد اكتشف الباحثون أن الجِمال تُعدّ الخزان الرئيسي لهذا الفيروس، في حين يحدث انتقاله إلى البشر غالباً في بيئات المستشفيات فقط. لكن حالات الإصابة بـ MERS في الشرق الأوسط وآسيا كانت ذات معدل وفاة بلغ 35%، وعلى النقيض من ذلك، فإن السلالة المنتشرة في إفريقيا لم تُسبب حتى الآن أمراضاً شديدة لدى البشر، رغم الانتشار الواسع للفيروس بين الجِمال المحلية في المنطقة.

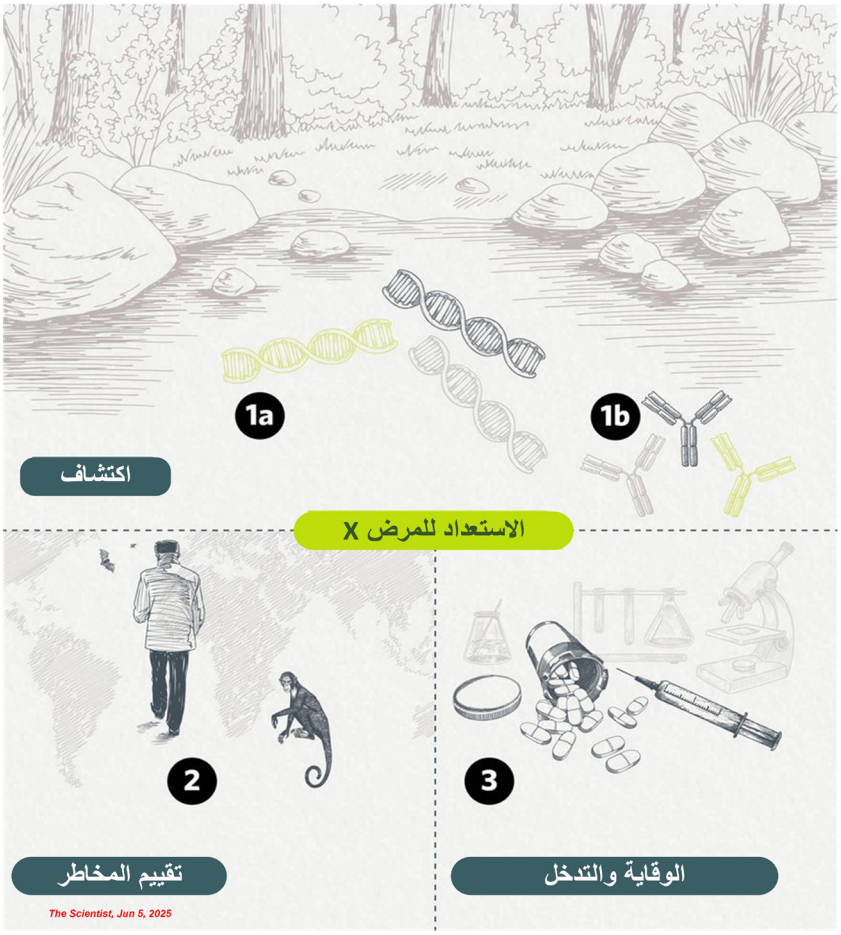
الحالات النادرة التي تم الإبلاغ عنها في إفريقيا كانت لأشخاص دون أعراض، لكن نظراً لأن دراسات سابقة أظهرت تطوراً في سلالات أخرى من فيروس MERS، فإن فريق العلماء يُجري مراقبة نشطة للتركيب الجيني للفيروس، لتتبّع أي تغيّرات قد تُعزز انتقاله من الجِمال إلى البشر أو بين البشر أنفسهم. ويتساءلون: «هل يمكن أن يكون هذا الفيروس قد بدأ يتغيّر جينياً، وفي يوم ما، نُفاجأ بمرض شبيه بكوفيد ناتج عن هذا الفيروس تحديداً؟»، كما يعملون على دراسة الفروقات الجينية بين سلالات MERS لفهم أسباب التباين في شدة المرض بين المناطق.

ويبحثون أيضاً في العوامل التي تؤثر على تفاوت شدة المرض ومعدلات النجاة لدى المصابين بعدوى الإيبولا. وعلى الرغم من أن هذا الفيروس يُعدّ غير مرجّح للوصول إلى مستوى الجائحة، إلا أنهم يرون أن فهم الاستجابات المناعية المختلفة يمكن أن يوفّر رؤى مهمة لتطوير علاجات جديدة.

الاستعداد للمرض X يتطلب نهجاً متعدد المسارات

من المهم اكتشاف المُمْرِضات وتقييم المخاطر وتطوير علاجات مبتكرة تُسهم في تجهيز الباحثين لمواجهة التهديد الميكروبي القادم. فمع استمرار البشر في تغيير البيئات الطبيعية وتزايد التفاعل مع الحياة البرية، تزداد احتمالية ظهور مرض معدٍ جديد. واستعداداً للمرض المجهول"X"، يعمل الباحثون على دراسة تركيبة المُمْرِضات المنتشرة بين الحيوانات البرية، ويراقبون التغيرات في الأنشطة والبيئات التي قد تُسهم في انتقال المُمْرِضات إلى البشر، كما يطوّرون تدخلات علاجية يمكن نشرها بسرعة عند الحاجة.

كان الباحثون يكتشفون تقليدياً المُمْرِضات الجديدة بعد أن تنتقل وتُسبب المرض لدى البشر أو الحيوانات الأخرى. ومن الخطط الاستباقية لمواجهة هذه الأمراض الناشئة فهم الميكروبات الموجودة بالفعل في الطبيعة. لكن توصيف هذه الأعباء المُمْرِضة يُعدّ أمراً معقداً بسبب القيود المادية في جمع العينات. ومع ذلك، فإن التقدّم في تقنيات التشخيص والأساليب الحديثة يُوسّع من قدرة الباحثين على تحليل المُمْرِضات المعروفة والمجهولة في الحياة البرية، وللتغلب على صعوبات جمع العينات من الحيوانات الكبيرة، طوّر العلماء تقنيات غير تداخلية تعتمد على اللعاب الموجود في بقايا الطعام، وذلك للكشف عن المُمْرِضات المعروفة وربما المجهولة باستخدام تقنية التفاعل التسلسلي



رحلة الاستعداد لمرض X من الاكتشاف إلى الوقاية: تُجسّد هذه الصورة مراحل الاستجابة لمرض X، بدءاً من اكتشاف العوامل الممرضة عبر تحليل الجينات والبروتينات، مروراً بالتقييم من خلال فهم التفاعل بين الإنسان والحيوان في البيئات الطبيعية، وصولاً إلى الوقاية والتدخل عبر تطوير اللقاحات والعلاجات ووسائل الحماية. في خلفية المشهد، تشير الغابة والجداول إلى أن أصل الخطر قد يكون كامناً في البرية، حيث تبدأ الحكاية وتُكتب أولى فصولها.

للبوليميراز PCR. وفي الوقت نفسه، أسهمت التحسينات في تقنيات التحليل المتعدد multiplex assays في توسيع استخدام الفحوصات المصلية serology لدى الحيوانات الكبيرة والصغيرة، خاصةً عندما تكون بعض العينات محدودة مثل الدم، وذلك لمعرفة ما إذا كانت هذه الحيوانات قد تعرضت سابقاً لمُمْرِضات معينة.

تؤدي عوامل مثل: تغيّر المناخ، وتحوّلات استخدام الأراضي، وهجرة البشر إلى تغيّر أنواع الحيوانات التي يتفاعل معها الناس، لكن تأثير هذه التغيّرات لا يزال غير واضح تماماً. ويستخدم العلماء النمذجة والاستبيانات المنزلية والبرية لدراسة كيفية تأثير التغيّرات البيئية والسلوكية على وجود الحيوانات في النُظم البيئية، وكيف يتفاعل البشر معها، ويمكنهم استخدام هذه البيانات لتحديد الممارسات التي تُشكّل أعلى خطر للتعرّض للأمراض، ثم يأمل الباحثون في توظيف هذه المعلومات لتحديد سُبل الحدّ من هذا الخطر.

لا يعرف العلماء على وجه التحديد ما هو الفيروس الذي قد يتسبب في الوباء أو الجائحة القادمة. ومع ذلك، فإن تطوير اللقاحات والعلاجات مثل: مضادات الفيروسات والأجسام المضادة وحيدة النسيلة ضد العناصر المشتركة على نطاق واسع بين المُمْرِضات المعروفة، يُتيح للباحثين إنشاء منصات جاهزة لتصميم تدخلات سريعة ضد فيروس مشابه قد يتسبب في تفشٍ مفاجئ.

اهتم العلماء بدراسة فيروس الإيبولا في أوائل العقد الأول من القرن 2000. وفي عام 2005، طوّروا لقاحاً ضد الإيبولا باستخدام ناقل فيروسي مؤتلف، وقد وفّر حماية كاملة للقرود. ومع ذلك، فإن المُمْرِضات مثل الإيبولا التي تُسبب تفشّيات متفرقة دون أن تصل إلى مستوى الجائحة تُواجه صعوبات في الحصول على التمويل والدعم التجاري اللازم لتطوير العلاجات؛ مما يجعل الأمر محبطاً جداً، إذ تظل مثل تلك اللقاحات مهملة لسنوات وسنوات وللأسف يتطلب الأمر حدوث وباء كي يصل اللقاح إلى خط النهاية ويبدي أحدهم اهتماماً به.

واستجابة لهذا القصور، أنشأت الحكومات الدولية والمؤسسات الخيرية «التحالف من أجل ابتكارات التأهب للأوبئة (CEPI)» لدعم تطوير اللقاحات واختبارها والتدخلات الأخرى لمواجهة الأمراض المعدية الناشئة.

وتعدّ هذه الاستجابة خطوة إيجابية يمكن أن تُسهم في دفع العلاجات قدماً، حتى للأمراض التي تُصيب مجموعات سكانية صغيرة، لكن أي تفشٍ قد تكون له تداعيات واسعة النطاق، فمن كان يتوقّع أن ينتشر كوفيد بهذا الشكل؟

تتبع أثر الطعام: أساليب جديدة لاكتشاف المُمْرِضات تُسهم في الاستعداد للمرض X

قد لا يتمكّن العلماء من التنبؤ بموعد حدوث انتقال المُمْرِضات من الحيوانات إلى البشر، أو تحديد أيّ منها قد يتحوّل إلى المرض X، لكن امتلاك فهم أفضل للمرشّحين المحتملين يُمكن أن يُساعد الباحثين على توقّع ما قد يحدث والاستعداد له.

يُجري بعض العلماء أبحاثاً حول الفيروسات التي تنتشر بين أنواع الحيوانات البرية، وخاصة الغوريلا الجبلية والخفافيش وأبحاثاً تهدف إلى تعزيز صحة الحيوانات، فالرئيسيات غير البشرية تعد جزءاً بالغ الأهمية من النظام البيئي وهذه الحيوانات عرضة للإصابة بنفس العدوى التي تُصيب البشر؛ مما يُشكّل خطراً في أن تنتقل الفاشيات من نوع إلى آخر، ورغم أن الرئيسيات ليست هي الخزانات الفيروسية، إلا أنها قد تعمل كجسور بين الحيوانات البرية التي تحتضن هذه المُمْرِضات وبين البشر.

ومن المهم جداً دراسة هذه الفيروسات عند الحد الفاصل، حيث يقترب البشر من مواطن الحياة البرية التي لم يسبق لهم التفاعل معها ويمكن رصد الأمور قبل أن تتجاوز حدودها وتتحوّل إلى مشكلة كبرى.

لكن تخدير الحيوانات البرية الكبيرة لجمع العينات يُعدّ أمراً صعباً وخطيراً، وقد يكون غير مسموح به بالنسبة للأنواع المُهددة بالانقراض مثل الغوريلا الجبلية. ولأجل الفحوصات غير التداخلية، طوّر العلماء طريقة للكشف عن الحمض النووي الفيروسي من اللعاب الموجود على بقايا النباتات التي تناولتها هذه الحيوانات، وهي طريقة أسهل بكثير من تتبّع الفضلات؛ إذ إن هذه الحيوانات، مثل بعض أقاربها من البشر، تُحب تناول الوجبات الخفيفة باستمرار. ومن خلال التركيز على المناطق المحفوظة في الجينوم الفيروسي، يمكن استخدام تقنية الـ PCR للكشف عن الفيروسات المعروفة وربما الجديدة لدى هذه الحيوانات، ومع ذلك، فإن الكشف عن عينة موجبة لـ PCR في الرئيسيات غير البشرية يُشبه البحث عن إبرة في كومة قش، وذلك لأن معظم هذه الحيوانات تكون بصحة جيدة؛ لذلك كان التحدي باستكشاف إمكانية استخدام هذه الطريقة للكشف عن الأجسام المضادة في لعاب الحيوانات، مما يُتيح معرفة ما إذا كانت قد تعرّضت سابقاً لمُمْرِضات معينة. وبالاقتران مع تقنيات التحليل المتعدد (multiplex assays)، يمكن للباحثين اختبار وجود عدة مُمْرِضات في العينة نفسها؛ إذ يُتيح هذا النظر إلى تجمعات الرئيسيات بطريقة مختلفة تماماً، ويربطها بشكل مباشر بالبيئة التي تعيش فيها، وهذا بدوره يُساعد الباحثين على فهم ما تعرّضت له هذه الحيوانات من مُمْرِضات.

يُسهم التحليل المَصلي المتعدد multiplex serology في تعزيز القدرة على دراسة التعرض الفيروسي لدى أنواع الخفافيش، والتي تُعرف بأنها تحتضن العديد من الفيروسات، وتتطلب الفحوصات التقليدية المرتبطة بالمناعة (ELISA) كميات كبيرة من عينات الدم، لكن في حالة الخفافيش التي يدرسها الباحثون، لم يكن بالإمكان جمع سوى قطرة أو اثنتين فقط. ومع استخدام التحليل المَصلي المتعدد، أصبح بالإمكان اختبار وجود 20 إلى 30 مُمْرِضاً باستخدام خمسة ميكروليتر فقط من الدم، مما يُعزّز القدرة على توصيف الحمولة الفيروسية لدى هذه الحيوانات.

تُتيح هذه التقنيات التعرف على أي مُمْرِضات جديدة تنتشر داخل مجتمعات الحيوانات؛ مما يعطي ميزة في الاستعداد لاحتمالات انتقال العدوى إلى البشر. إضافة إلى ذلك، فإن دراسة المجتمعات البشرية التي تتعامل بشكل وثيق مع الحيوانات مثل الخفافيش، تُظهر الفيروسات التي أصبحت قادرة بالفعل على إصابة البشر.

ومع ذلك، فإن مواقع العمل الميداني تؤدي إلى صعوبات في التعامل مع العينات، فمن الصعب الحفاظ على سلسلة التبريد أثناء جمع العينات وضمان أن العينات التي استغرقت الكثير من الوقت والجهد في جمعها محفوظة بشكل سليم، كما أن هناك مشاكل أخرى، فأحياناً لا يكون الحصول على جميع الكواشف المطلوبة للاختبار بسيطاً وسهلاً. إضافة إلى ذلك، لا تزال العديد من هذه التقنيات بعيدة المنال بالنسبة للعديد من الدول ذات الدخل المنخفض والمتوسط؛ حيث أن هناك معاناة حقيقية في الحصول على ما يكفي من أدوات التشخيص والجينوم في تلك المناطق.

إن تحسين الوصول إلى هذه الأدوات والموارد الجينومية لا يمكن أن يُعزز جهود اكتشاف المُمْرِضات فحسب، بل يعزز الاستجابة للمُمْرِضات المعروفة، مثل تقييم ما إذا كان ينبغي عزل المريض.

كيف يمكن للأنشطة البشرية أن تُسهم في اندلاع المرض X

إلى جانب تتبّع المُمْرِضات، يهتمّ الباحثون أيضاً بكيفية تعرّض البشر لها، وما هي السلوكيات التي قد تُسهم في زيادة هذه المخاطر. ويُجري الباحثون دراسات حول تأثير تغيّرات استخدام الأراضي على التفاعلات بين البشر والحيوانات، وكيف تؤثر هذه التفاعلات على خطر انتقال المُمْرِضات.

وأحد الدروس التي اتّضحت بعد جائحة كوفيد-19 هو أن العلماء غير مستعدّين بما يكفي لمواجهة التفشي الكبير التالي؛ فنحن ببساطة لا نعرف بما فيه الكفاية عن أصول هذه المُمْرِضات، ولا نعرف بما فيه الكفاية عن البيئة التي تنتقل فيها من مضيفيها إلى البشر.

تُؤثر الأنشطة البشرية على خطر انتقال المُمْرِضات من الحيوانات إلى البشر، من خلال تقريب الناس من الحياة البرية وموائلها، وزيادة تعرّضهم لمُمْرِضات جديدة؛ فعلى سبيل المثال: أدت إزالة الغابات لأغراض الزراعة إلى زيادة خطر الإصابة بالملاريا في منطقة صحراء جنوب إفريقيا. كما بيّنت الأبحاث أن هذه الاضطرابات غيّرت تنوّع أنواع الخفافيش؛ مما أدّى إلى زيادة وفرة الفيروسات لدى الحيوانات التي بقيت في تلك المناطق.

ومع ذلك، هناك فجوة في هذا الجانب تحديداً المتعلق بتواصل البشر مع الحيوانات، فمعظم أنظمة المراقبة الحالية تكتشف المُمْرِضات إما في الحيوانات أو في البشر، لكن الجزء المفقود في هذا كله، هو تلك العملية المحورية: «تواصل الإنسان مع الحيوان، وما إذا كان هذا التواصل بحد ذاته يُمكن أن يُنبئ بأنماط العدوى البشرية التي نراها».

لمعالجة هذه الفجوة، يجري البحث لفهم كيفية تفاعل الناس مع الحيوانات في حياتهم اليومية، لكشف الأنماط التي قد تُسهم في انتقال المُمْرِضات من الحيوانات إلى البشر.

يأمل الباحثون في هذه الدراسات في مقارنة كيف تؤثر الفروق الثقافية على مخاطر التعرّض للمُمْرِضات، حيث أن فهم طبيعة هذه التفاعلات والأنشطة التي تؤدي إليها تساعد العلماء والمجتمعات على الاستعداد للفاشيات أو الحدّ منها، كما إن دراسة العوامل الاجتماعية والثقافية التي تُعيق أو تؤثر على انتقال الأمراض أو السيطرة عليها يجعل الأمر أسهل بكثير.

تغيّر المناخ يُغيّر من مخاطر المرض X

يُسهم عامل آخر في تغيّر خطر المُمْرِضات الناشئة والمرض X، وهو تأثير تغيّر المناخ فلا شك أن تغيّر المناخ يؤثر على انتشار الأمراض المعدية وعلى تجمعات الحياة البرية وعلى الأماكن التي يمكنها العيش فيها أو التنقّل إليها؛ فمع ارتفاع درجات الحرارة وتغيّر أنماط الأمطار، تتحوّل مواطن الحيوانات والناقلات مثل البعوض والقراد، مما يُعيد رسم خريطة الأمراض ويزيد من احتمالات ظهور مُمْرِضات جديدة في مناطق لم تكن معرضة لها من قبل، فلم تكن هناك حاجة مثلاً قبل 15 عاماً إلى شبكات الوقاية من البعوض أو أدوية مكافحة الملاريا، لأن درجات الحرارة كانت منخفضة جداً، أما الآن فالأمر تغيّر بشكل لافت للغاية. لدراسة هذه التغيّرات، قام العلماء بتحليل الملف الفيروسي للبعوض باستخدام تقنية الـ PCR لتقييم عدد البعوض وكذلك تنوّع الأنواع الموجودة.

وفي مشروع آخر، تمت المقارنة بين عينات مصل مأخوذة من الحياة البرية قبل عقود، وبين عينات من الحيوانات نفسها في نفس المناطق الجغرافية اليوم، وذلك لرصد كيف تغيّرت الملفات الفيروسية مع مرور الزمن؛ إذ سيكون من المثير للاهتمام مشاهدة ما سيحدث مع تسارع تغيّر المناخ في العقود القادمة.

ومع ذلك، فإن تغيّر المناخ يُسبّب تحوّلات في هجرة البعوض وحيوانات أخرى، مما يُغيّر بالفعل من خطر الإصابة بمُمْرِضات معروفة.

فالتغيّرات المناخية المدفوعة بتقلّبات الطقس تزيد من التنوع الجيني وديناميكيات العدوى وتساهم في تفشي الأوبئة وتؤثر في عوامل نقل الأمراض في مناطق جغرافية مختلفة، وتُعد هذه التنبؤات أدوات مهمة في توقّع خطر الأمراض في مناطق جديدة.

فعلى سبيل المثال، استخدم فريق من العلماء نماذج محاكاة وبيانات وبائية ليُظهر أن تغيّر المناخ وتقلّبات الطقس في إفريقيا أدّت إلى وصول فيروس حمى الوادي المتصدّع (RVF) إلى مناطق جديدة تماماً، فربما يُشير ذلك إلى أنه إذا توفّرت الظروف البيئية أو المناخية المناسبة، فإن الفيروس قد يكون موجوداً في كل مكان، وقد نشهد تفشّياً انفجارياً. كما أنهم يستكشفون ما إذا كان فيروس حمى الوادي المتصدّع RVF نفسه يتطوّر مع تغيّر درجات الحرارة، وذلك لفهم كيف يمكن أن تؤثر الظروف المناخية المتغيرة على سلوك الفيروس وانتشاره.

نماذج المُمْرِضات تُساعد في الاستعداد للمرض X

يُعدّ توصيف المُمْرِضات في الحياة البرية وتحديد السلوكيات الخطرة ذراعين من نهج ثلاثي للاستعداد، فحتى مع كل المعرفة عن تنوّع الفيروسات ومخاطر انتقالها من الحيوانات إلى البشر، ستظلّ الفاشيات تحدث؛ لذلك فإن امتلاك لقاحات وتدخّلات جاهزة للإنتاج والتوزيع يمكن أن يُقلّل من تأثير ظهور المُمْرِض التالي.

أطلقت المعاهد الوطنية للصحة (NIH) بعد جائحة كوفيد-19 شبكة البحث وتطوير اللقاحات والأجسام المضادة وحيدة النسيلة من أجل الاستعداد للأوبئة المعروفة باسم ReVAMPP، وتهدف هذه المبادرة إلى تمويل أبحاث تُركّز على تطوير لقاحات وأجسام مضادة موجهة ضد عائلات فيروسية محددة، وذلك من خلال استخدام مُمْرِض معروف كنموذج أولي prototype يُبنى عليه التطوير. يُتيح هذا النهج للعلماء تصميم أدوات وقائية يمكن تكييفها بسرعة عند ظهور مُمْرِض جديد من العائلة نفسها، مما يُسرّع الاستجابة ويُقلّل من أثر الفاشيات المستقبلية، وهو نوع من تطوير استراتيجيات تستند إلى عائلة فيروسية معينة، على أمل أن تكون قابلة للتطبيق إذا ظهر شيء جديد.

على مدى عقود من تطوير اللقاحات والعلاجات لهذه الفيروسات، يواجه العلماء العديد من الإخفاقات لكنّ تعلّم ما لا يُجدي نفعاً قد يقود إلى استراتيجيات ناجحة. من الأمثلة على ذلك: اللقاح المعتمد على النواقل الفيروسية الذي طوّروه في البداية ضد فيروس إيبولا، وبعد نجاحه، استخدموا الطريقة نفسها لتطوير لقاحات ضد فيروسات أخرى، بما في ذلك فيروس نيباه.

حتى لو تم التوصل إلى علاج أو لقاح يُنقذ حياة شخص واحد فقط، فهو أمر يستحق العناء.

وإلى جانب اللقاحات الوقائية، يُجري العلماء أبحاثاً على علاجات مضادة للفيروسات تُؤخذ عن طريق الفم، وتهدف إلى تحسين استراتيجيات الاحتواء في المراحل المبكرة من الفاشية. وأحد هذه الأدوية هو obeldesivir، وقد أثبت فعاليته في حماية القرود المصابة بفيروس إيبولا عندما تم إعطاؤه بعد يوم واحد فقط من التعرّض للفيروس. وفي كثير من الأحيان، يمكن القضاء على الفاشية بهذه الطريقة، لأنها تكسر سلسلة الانتقال.

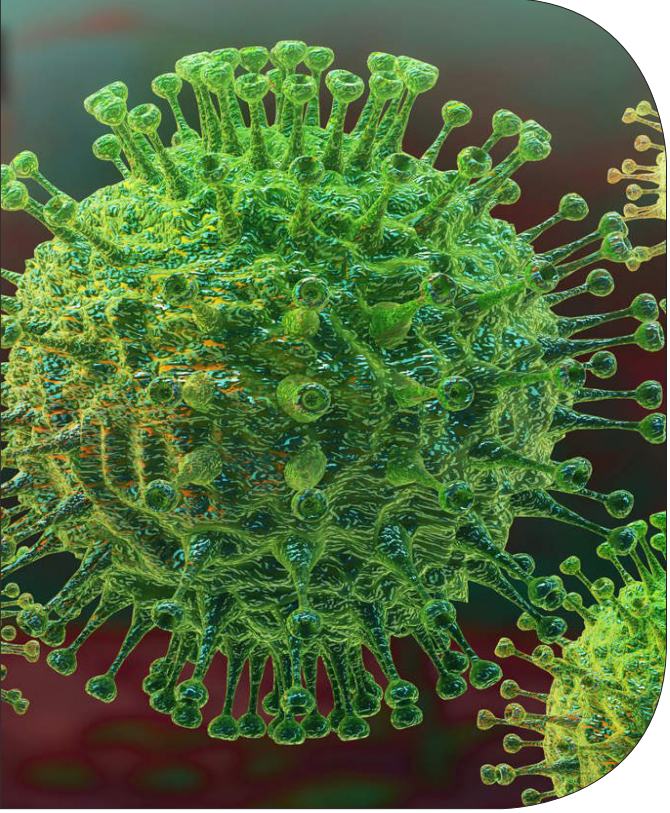
الدفاع ضد المرض: X هل نحن مستعدّون؟

السؤال الذي يطرح نفسه: هل نحن أكثر استعداداً الآن بعد أن مررنا بجائحة كوفيد؟

أظهرت سرعة تحليل فيروس SARS-CoV-2 ونشر معلوماته ثم التطوير السريع للقاحات قدرة المجتمع البحثي على الاستجابة الفورية، وقد أعادت هذه الإنجازات تنشيط اهتمام الجهات المموّلة بدعم تطوير لقاحات وعلاجات شاملة. فمن هذه الزاوية، أعتقد أننا أصبحنا أكثر استعداداً للاستجابة.

ومع ذلك، فإن القلق من أبحاث اكتشاف المُمْرِضات، والخوف من أن يؤدي استكشاف العلماء لمُمْرِضات الحياة البرية إلى إدخال عوامل جديدة إلى السكان، يُعيق جهود الاستعداد. فمع تزايد توغّل البشر في مناطق كانت في السابق موائل للحياة البرية وتنامي التفاعل العالمي مثل السياحة، سيكون من الحتمي أن يتعرّض الناس لمُمْرِضات جديدة، وإذا لم نذهب لدراستها، فستجدنا غير مستعدّين، لأن الناس سيذهبون إلى هناك، ويُصابون بها، ويجلبونها معهم.

وبدلاً من ذلك، فإن فهم ما يدور في العالم الطبيعي على أطراف المجتمعات البشرية ودراسة كيف يمكن لتفاعلاتنا وأنشطتنا أن تُعرّضنا لهذه المُمْرِضات، يُتيح للباحثين أن يكونوا مستعدّين لمواجهة هذا التهديد متى ما ظهر على مدى العقد الماضي، أظهر نشوء العديد من الفيروسات حيوانية المصدر أن المُمْرِضات غير المعروفة أو المُهملة سابقاً تمتلك القدرة على التسبّب في أوبئة، ومن ثَمَّ تُشكّل تهديداً للصحة العامة العالمية. وما يُثير القلق أكثر هو وجود ما يُقدّر بـ1.7 مليون فيروس غير مكتشف بعد في البيئة الطبيعية، أو ما يُعرف بـ «المجموعة الفيروسية العالمية global virome»، ويُتوقّع أن العديد من هذه الفيروسات غير المُوصّفة حتى الآن قد تكون مُمرِضة للبشر. لذلك، ومن أجل الحدّ من ظهور الأمراض ومنع الأوبئة المستقبلية، من الضروري تحديد النطاق العالمي للتهديدات الفيروسية التي قد يتعرّض لها البشر؛ إذ يتطلّب ذلك توثيق الفيروسات الموجودة في البيئة ضمن أنواعها المضيفة المختلفة والمتنوّعة، وفهم العوامل الفيروسية والبيئية ونوع المضيف، وهي تُحدّد الظروف التي تؤدي إلى انتقال الفيروسات إلى البشر.



يُقدَّر أن هناك أكثر من 1.5 مليون فيروس غير مكتشف في العالم، ويُتوقّع أن يكون ما يصل إلى 827,000 منها قادراً على الانتقال إلى البشر. يمثّل هذا التوقع عدداً هائلاً من الفيروسات حيوانية المنشأ وذات القدرة الإمراضية العالية، ومن الصعب تحديد أيٍّ منها يُشكّل تهديداً فعلياً؛ إذ إن الفيروسات غير المعروفة غالباً ما تبقى غير مرصودة حتى تُسبّب المرض لدى البشر.

ومن المهم أيضاً أن نُدرك أن الفيروسات المعروفة سابقاً، والتي تنتشر بين كائنات غير بشرية، قد تنتقل إلى البشر نتيجة تغيّرات في الظروف، مثل تغيّر المواطن البيئية أو الأنظمة البيئية للكائنات المضيفة، أو بسبب زيادة وتيرة التفاعل بين البشر وهذه الكائنات.

وقد حدث ذلك بالفعل مع فيروسات مثل نيباه Nipah (NiV)، إيبولا (EBOV)، متلازمة الشرق الأوسط التنفسية (MERS)، وحديثاً فيروس كورونا المستجد (SARS-CoV-2)؛ لذا، فإن غياب الاستعداد يُعرّض البشر لخطر كبير من الفيروسات الناشئة.

من أجل تقييم احتمالية انتقال فيروس حيواني المصدر من نوع مضيف في البيئة إلى البشر (أو إلى نوع وسيط)، ومن ثم تسبّبه في وباء أو جائحة–وهي سلسلة من الأحداث يُشار إليها باسم «القدرة الجائحية»، يجب النظر في تأثير العوامل المرتبطة بالمضيف والفيروس والبيئة، إلى جانب المعرفة المكتسبة من أحداث انتقال سابقة لفيروسات حيوانية المصدر معروفة إلى البشر.

هذا النهج يُساعد في فهم الظروف التي تُمهّد لانتقال الفيروسات، ويُسهم في تطوير استراتيجيات استباقية للحدّ من خطر ظهور أمراض جديدة.

› ***ترجمة وإعداد الدكتور: أيمن المريري، قسم البيولوجيا الجزيئية والتقانة الحيوية، هيئة الطاقة الذرّية السورية.***

Shelby Bradford, Preparing for Disease X in a Changing World. The Scientist, Jun 5, 2025

طريقة أكثر ذكاءً للكشف عن سرطان الثدي آخذة في الظهور

تشير دراسة جديدة واسعة النطاق إلى أن تكييف فحوصات الكشف عن سرطان الثدي screening مع المخاطر الفردية لكل امرأة قد يكون أكثر أماناً وفعالية من الاعتماد على الفحوصات السنوية الروتينية للثدي بالأشعة السينية للجميع، فمن خلال مطابقة تواتر الفحوصات المجراة مع مستويات المخاطر الشخصية، وجد الباحثون أنه من الممكن تخفيض الاشتباه بتشخيص حالات سرطان أكثر تقدماً مع ضمان حصول الأشخاص على مستوى الفحوصات الذي يحتاجونه.

تستند النتائج إلى بيانات من 46000 امرأة في جميع أنحاء الولايات المتحدة شاركن في المرحلة الأولى من دراسة WISDOM. تشير هذه النتائج إلى تغيير كبير في كيفية التعامل مع فحص سرطان الثدي، وذلك بالابتعاد عن القواعد القائمة على العمر فقط والتوجه نحو نظام مبني على تقييم شامل للمخاطر. قامت جامعة كاليفورنيا في سان فرانسيسكو (UCSF) بدور مركز التنسيق للدراسة.

لماذا قد لا يكون العمر وحده كافياً

صرحت الدكتورة لورا ج. إسرمان Laura J. Esserman, MD, MBA، مديرة مركز رعاية الثدي في جامعة كاليفورنيا سان فرانسيسكو والمؤلفة الأولى للدراسة: «ينبغي لهذه النتائج أن تُحدث تحولاً في الإرشادات السريرية لفحص سرطان الثدي وأن تغير الممارسة السريرية». وقد نُشر هذا البحث في 12 ديسمبر في دورية JAMA وتم تقديمه في ندوة سان أنطونيو لسرطان الثدي. وأضافت: «يبدأ النهج الشخصي بتقييم المخاطر، ودمج العوامل الجينية والبيولوجية ونمط الحياة، والتي يمكن أن توجه استراتيجيات الوقاية الفعالة».

لا يزال سرطان الثدي هو أكثر أنواع السرطان شيوعاً بين النساء في الولايات المتحدة، باستثناء سرطانات الجلد. لعقود من الزمن، افترضت إرشادات الفحص أن معظم النساء يواجهن مخاطر مماثلة واعتماداً كبيراً على العمر كعامل حاسم، مع أن الأبحاث أظهرت منذ فترة طويلة أن مخاطر الإصابة بسرطان الثدي يمكن أن تختلف اختلافاً كبيراً من شخص لآخر.

كيف عملت دراسة WISDOM

قارنت دراسة WISDOM بشكل مباشر بين التصوير الشعاعي السنوي التقليدي للثدي mammography واستراتيجية الفحص القائمة على المخاطر الفردية. باستخدام نماذج مخاطر تم التحقق من صحتها بشكل جيد، فقد قسم الباحثون المشاركات إلى أربع فئات بناءً على العمر والمعلومات الجينية وعوامل نمط الحياة والتاريخ الصحي وكثافة الثدي (Breast Density).

نُصحت النساء في المجموعة الأقل عرضة للخطر، والتي تمثل 26% من المشاركات، بتأجيل الفحص حتى سن 50 عاماً أو حتى تشير الخوارزمية إلى أن مخاطرهن قد وصلت إلى مستوى مخاطر النساء في سن الخمسين، في حين نُصحت النساء في المجموعة المتوسطة المخاطر، والتي تمثل حوالي 62% من المجموعة، بإجراء الفحص كل عامين. وأوصي بإجراء فحوصات الماموغرام السنوية لـ 8% من المشاركات المصنفات على أنهن معرضات لخطر مرتفع. ونُصحت المجموعة الأكثر عرضة للخطر، والتي تمثل 2% من المشاركات، بإجراء الفحص مرتين في السنة، بالتناوب بين الماموغرام والتصوير بالرنين المغناطيسي، بغض النظر عن العمر.

الوقاية الشخصية للنساء المعرضات لخطر أعلى

حصلت المشاركات اللواتي تم تحديدهن على أنهن معرضات لخطر مرتفع على إرشادات مخصصة حول كيفية تقليل فرص إصابتهن بسرطان الثدي. وشمل الدعم الوصول إلى أداة اتخاذ قرار عبر الإنترنت تركز على صحة الثدي والتواصل المباشر مع مختصٍّ بصحة الثدي. وشملت التوصيات إحداث تغييرات في نمط الحياة مثل تحسين النظام الغذائي وزيادة النشاط البدني، إلى جانب مناقشات حول الأدوية التي يمكن أن تساعد في تخفيض المخاطر.

ومن المهم الإشارة إلى أن نهج الفحص الشخصي لم يؤدِ إلى ارتفاع معدل تشخيص السرطان في مراحله المتأخرة. وتمكنت النساء اللاتي اخترن عدم الخضوع للتوزيع العشوائي من الانضمام إلى مجموعة قائمة على الملاحظة واختيار استراتيجية الفحص المفضلة لديهن. ومن بينهن، اختارت 89% الفحص القائم على المخاطر، مما يشير إلى قبول قوي للنهج الشخصي.

وقال المؤلف المشارك الدكتور جيفري أ. تايس (Jeffrey A. Tice, MD)، أستاذ الطب في جامعة كاليفورنيا سان فرانسيسكو (UCSF) والمتخصص في تطوير وتقييم أدوات تقييم مخاطر سرطان الثدي: «إن تحويل الموارد من النساء الأقل عرضة للخطر إلى النساء الأكثر عرضة للخطر هو نهج كفؤ وفعال لفحص سرطان الثدي والوقاية منه».

توسيع نطاق الاختبارات الجينية إلى ما وراء التاريخ العائلي

منذ إطلاقها في عام 2016، تضمنت دراسة WISDOM أكثر من 80,000 امرأة. وفي الآونة الأخيرة، أدرج الباحثون نساء في سن 30 عاماً في محاولة لتحديد أولئك اللواتي قد يواجهن خطراً متزايداً للإصابة بسرطانات مبكرة عدوانية بسبب المتغيرات الجينية الموروثة. وكان أحد أبرز نتائج الدراسة أن 30% من النساء اللواتي ثبتت إصابتهن بمتغير جيني مرتبط بارتفاع خطر الإصابة بسرطان الثدي لم يبلغن عن أي تاريخ عائلي للإصابة بالمرض. وبموجب الإرشادات السريرية الحالية، فإن العديد من هؤلاء النساء لن يكن مؤهلات عادةً لإجراء الاختبارات الجينية.

قيّمت الدراسة أيضاً، إضافةً إلى المتغيرات المسببة للأمراض المعروفة مثل BRCA1 وBRCA2، التغيرات الصغيرة في الحمض النووي (DNA) والتي يمكن دمجها في ما يسمى «درجة المخاطر الجينية المتعددة» polygenic risk score. وقد أدى هذا النهج إلى تحسين دقة تنبؤات المخاطر وأسفر عن إعادة تصنيف 12% إلى 14% من المشاركات إلى فئة مخاطر مختلفة.

قالت المؤلفة المشاركة أليسون س. فيسكاليني، MPH، من UCSF، مديرة شبكة أثينا لصحة الثدي ودراسة WISDOM: «تعد هذه واحدة من أولى الدراسات التي تقدم الاختبارات الجينية لجميع النساء، بغض النظر عن تاريخهن العائلي وعند استخدامها كجزء من تقييم شامل للمخاطر، يمكن أن يكون لهذه النتائج تأثير حقيقي على تحسين سلامة وفعالية الفحص والوقاية».

ما هو المستقبل بالنسبة للفحص القائم على المخاطر

يواصل الباحثون تحسين تقييم المخاطر من خلال دراسة WISDOM 2.0 التي تجري الآن عملية تسجيل المشاركين فيها. والهدف هو تحديد أكثر النساء عرضة للإصابة بسرطان الثدي العدواني بشكل أفضل وتزويدهن باستراتيجيات الفحص والوقاية المصممة خصيصاً لتلبية احتياجاتهن الصحية على المدى الطويل.

ترجمة د. يحيى لحفي، قسم الوقاية والأمان، هيئة الطاقة الذرّية السورية.

University of California - San Francisco. "A smarter way to screen for breast cancer is emerging". ScienceDaily, 4 January 2026. <www.sciencedaily.com/releases/2026/01/260103155036.htm>.

«الشمس الاصطناعية» الصينية حطّمت مؤخراً حد الاندماج النووي الذي كان العلماء يعتقدون أنه لا يمكن تجاوزه

نجح الباحثون، باستخدام مفاعل الاندماج النووي الصيني «الشمس الاصطناعية»، في تجاوز حاجز الكثافة الثابت على مدى فترة طويلة long-standing density barrier في بلازما الاندماج. ولقد أكدت التجربة أن البلازما يمكن أن تبقى مستقرة حتى عند الكثافات العالية الحدية إذا تم التحكم بدقة في تفاعلها مع جدران (سطوح) المفاعل. ويزيل هذا الاكتشاف العلمي العقبة الرئيسية التي أبطأت التقدم نحو قدح الاندماج النووي fusion ignition. وقد يُساعد هذا التطور على إنتاج طاقة أكبر من مفاعلات الاندماج النووي المستقبلية.

القصة الكاملة

تجاوز مفاعل الاندماج النووي الصيني «الشمس الاصطناعية» "China's "artificial sun العتبة الحرجة لكثافة البلازما، التي كان العلماء سابقاً يعتقدون أنها مستحيلة المنال. وتقرّب هذه النتيجة عملية قدح الاندماج النووي أكثر من أي وقت مضى.

لقد نجح العلماء العاملون على التوكاماك فائق الناقلية المتقدم التجريبي Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST) الصيني بالوصول إلى «النظام الخالي من الكثافة* density-free regime»، الذي تم التنبؤ به نظرياً في تجارب بلازما الاندماج. في هذه الحالة، تبقى البلازما مستقرة حتى عندما تتخطى كثافتها الحدود التقليدية بكثير. وتُلقي هذه النتائج المنشورة في مجلة «Science Advances» في الأول من كانون الثاني 2026 ضوءاً جديداً على كيفية التغلب أخيراً على أحد أكثر المشكلات الفيزيائية عناداً في مجال طاقة الاندماج، في الطريق نحو القدح ignition.

قاد البحث كلٌ من الأستاذ بينغ تشو من جامعة هوا تشونغ للعلوم والتكنولوجيا، والأستاذ المساعد نينغ يان من معاهد هيفي للعلوم الفيزيائية التابعة للأكاديمية الصينية للعلوم، وذلك من خلال تطوير منهجية تشغيل عالية الكثافة للتوكاماك (EAST)، لقد بيّن الفريق أنه يمكن دفع كثافة البلازما بشكل جيد متجاوزةً الحدود التجريبية الراسخة لفترة طويلة دون التسبب في نشوء اللاستقراريات التخريبية (المدمرة) التي عادةً ما تُنهي التجارب (تؤدي إلى انهيار بلازما الاندماج وزوالها). ويُشكّل هذا الاكتشاف العلمي تحدياً لعقود من الافتراضات حول سلوك بلازما التوكاماك عند الكثافة العالية.

لماذا أعاقت حدود الكثافة تقدم الاندماج النووي؟

يُنظر على نطاق واسع إلى الاندماج النووي كمصدر واعد للطاقة النظيفة والمستدامة. في اندماج الدوتريوم والتريتيوم (D–T)، يجب تسخين الوقود إلى حوالي 13 keV (أي ما يقارب 150 مليون كلفن) للوصول إلى الشروط المثلى للاندماج. عند درجات الحرارة هذه، تزداد كمية طاقة الاندماج المنتجة طرداً مع مربع كثافة البلازما. على الرغم من هذه الميزة، فقد ظلت تجارب التوكاماك مقيدة لفترة طويلة بحد أعلى للكثافة. عند تجاوز هذا الحد، غالباً ما تصبح البلازما غير مستقرة، ويتعطل الحصر المغناطيسي ويتهدد عمل مفاعل التوكاماك، وقد شكلت هذه اللاستقراريات (الاضطرابات) عقبة رئيسية أمام تحسين أداء الاندماج.

يقدم إطار العمل النظري الأحدث المعروف باسم التنظيم الذاتي للبلازما–الجدار plasma–wall self–organization (PWSO) تفسيراً مختلفاً لسبب نشوء محدوديات (حدود) الكثافة. وقد اُقترح هذا المفهوم للمرة الأولى من قِبل D.F. Escande وآخرين من المركز الوطني الفرنسي للبحث العلمي وجامعة إيكس مارسيليا. ووفقاً لنظرية التنظيم الذاتي للبلازما–الجدار PWSO يمكن أن يظهر نظام خالٍ من الكثافة density–free regime عندما يصل التفاعل بين البلازما والجدران المعدنية للمفاعل إلى حالة متوازنة بدقة. في هذا النظام، تؤدي الرشرشة الفيزيائية physical sputtering دوراً مسيطراً في تشكيل سلوك البلازما.

قدمت التجارب على التوكاماك EAST أول إثبات تجريبي لهذه الفكرة النظرية. تحكم الباحثون بدقة في ضغط غاز الوقود الأولي، وطبقوا التسخين بواسطة رنين السيكلوترون الإلكتروني electron cyclotron resonance خلال مرحلة بدء كل انفراغ للبلازما. وسمحت هذه الاستراتيجية (المنهجية) باستمثال التفاعلات بين البلازما والجدار منذ البداية. وكنتيجة لذلك، انخفض تراكم الشوائب وضياعات الطاقة انخفاضاً كبيراً، مما سمح لكثافة البلازما بالزيادة المطردة حتى نهاية مرحلة بدء التشغيل. في ظل هذه الشروط، دخل التوكاماك EAST بنجاح في نظام خالي الكثافة المتوقع وفقاً للنموذج PWSO(PWSO–predicted density–free regime)، حيث تم الحفاظ على التشغيل المستقر حتى عند كثافات أعلى بكثير من الحدود التجريبية.

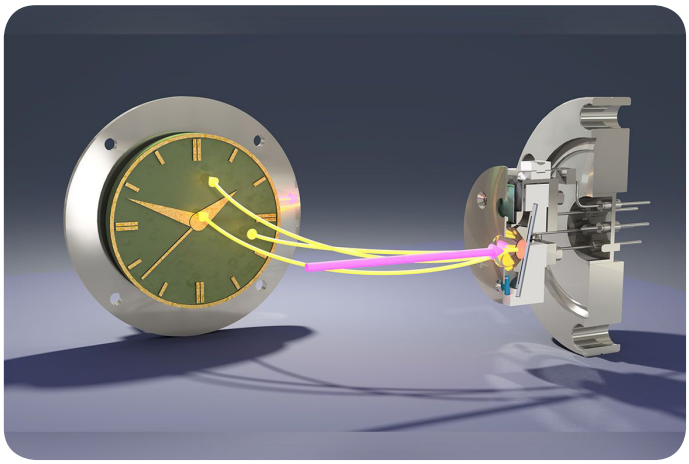
الآثار المترتبة على قدح الاندماج النووي

تقدم هذه النتائج التجريبية رؤى فيزيائية جديدة حول كيفية تجاوز حاجز الكثافة السائد منذ زمن طويل في تشغيل التوكاماك، سعياً لتحقيق قدح الاندماج النووي. وقال الأستاذ تشو (Prof. Zhu): «تقترح الاكتشافات مساراً عملياً وقابلاً للتطبيق على نطاق واسع لتوسيع حدود الكثافة في أجهزة التوكاماك وأجهزة اشتعال بلازما الاندماج النووي من الجيل التالي». وأضاف الأستاذ المساعد يان Associate Pro. Yan أن الفريق يخطط لتطبيق المنهجية نفسها خلال التشغيل مع الحصر المغناطيسي العالي على جهاز التوكاماك EAST في المستقبل القريب، وذلك بغية الوصول إلى نظام خالي الكثافة density–free regime من أجل شروط البلازما عالية الأداء.

*إن مصطلح «خالي من الكثافة density-free regime لا يعني انعدام الكثافة، بل يعني أن حدود الكثافة المعتادة والصارمة يتم تجاوزها، مما يسمح بكثافات بلازما عالية ومستقرة للغاية.

ترجمة د. محمد عاقل، قسم الفيزياء، هيئة الطاقة الذرّية السورية.

Chinese Academy of Sciences Headquarters. "China's "artificial sun" just broke a fusion limit scientists thought was unbreakable". ScienceDaily, 4 January 2026. <www.sciencedaily.com/releases/2026/01/260101160855.htm>.



خدعة قديمة من عالم صياغة المجوهرات قد تغيّر مجال ضبط التوقيت نووياً

«قد تُطلق خدعة قديمة يعود تاريخها لقرون في مجال طلاء المعادن العنانَ للساعات النووية فائقة الدقة التي تعمل دون الحاجة إلى نظام تحديد المواقع العالمي»

حقق فريق بحثي بقيادة باحثين من جامعة كاليفورنيا في لوس أنجلوس إنجازاً بالغ الأهمية سعى إليه الفيزيائيون على مدى نصف قرن، فقد نجحوا في جعل نوى الثوريوم المشعة تمتص الفوتونات وتنبعث منها بطريقة خاضعة للتحكم بطريقة مشابهة لسلوك الإلكترونات داخل الذرات. وكان الفريق قد اقترح هذه الفكرة لأول مرة في عام 2008 ومن المتوقع أن يفتح تحقيقها المجال أمام جيل جديد من الساعات فائقة الدقة؛ الأمر الذي سيؤدي ليس لتحسين أنظمة الملاحة تحسناً جذريّاً فحسب، بل سيساعد العلماء في اختبار ما إذا كانت بعض الثوابت الأساسية في الطبيعة تتغير بمرور الزمن. ورغم هذا الاختراق العلمي إلا أنه لايزال هناك قيد جوهري؛ فالعنصر النووي الثوريوم-229 المطلوب لصناعة الساعات النووية لا يوجد إلا في اليورانيوم المستخدم في الأسلحة النووية. ونتيجة لذلك، يقدّر العلماء أن كمية هذه المادة المتاحة عالميّاً لأبحاث الساعات لا تتجاوز 40 غراماً، مما يجعل كفاءة الطريقة عقبة بالغة الأهمية.

تمكّن تعاون دولي بقيادة الفيزيائي إيريك هدسون من جامعة كاليفورنيا في لوس أنجلوس من إيجاد مخرج لهذه العقبة، فقد اكتشف الفريق كيفية إعادة إنتاج نتائجهم السابقة باستخدام جزء ضئيل جدّاً من كمية الثوريوم التي كانت مطلوبة سابقاً، وتتميز طريقتهم الجديدة التي نُشرت في مجلة «نايتشر»، بأنها بسيطة ومنخفضة التكلفة، ما يفتح المجال أمام احتمال أن تصبح الساعات النووية يوماً ما صغيرة الحجم وبأسعار معقولة بما يكفي للاستخدام الواسع الانتشار.

وإذا تحقق ذلك، فقد تخرج هذه الساعات من المختبرات لتحل محل أنظمة التوقيت المستخدمة في شبكات الطاقة وأبراج الهواتف المحمولة والأقمار الاصطناعية التي تستخدم في أنظمة الملاحة GPS، وقد تصبح صغيرة جداً لدرجة تسمح بدمجها في الهواتف أو الساعات اليدوية، كما يمكن لهذه التقانة أن تمكّن من الملاحة في الأماكن التي لا تصل إليها إشارات أنظمة الملاحة كالفضاء العميق والبيئات تحت الماء مثل تلك التي تعمل فيها الغواصات.

وقضى فريق هدسون 15 عاماً في تطوير بلورات فلوريد مشوبة بالثوريوم التي مكّنتهم من تحقيق نجاحهم الأولي؛ حيث جرى في تلك التجارب ربط ذرات الثوريوم-229 بالفلور في بنية هندسية دقيقة، وأدت هذه العملية إلى تشكيل بلورات استقرت فيها ذرات الثوريوم مع بقائها شفافة أمام ضوء الليزر اللازم لإثارة النواة الذرية، واتضح أن هذه العملية بالغة الصعوبة، وتتطلّب إنتاج البلورات بكميات كبيرة نسبياً من الثوريوم.

وقال الباحث «ريكي إلويل» الحاصل على جائزة ديبرا جين لعام 2025 لأفضل أطروحة دكتوراه في مجال الفيزياء الذرية أو الجزيئية أو البصرية تقديراً لأعماله في العام الماضي: «قمنا بكل العمل المتعلق بصنع البلورات لأننا كنا نعتقد أن البلورة يجب أن تكون شفافة لكي يصل ضوء الليزر إلى نوى الثوريوم. والبلورات صعبة التصنيع للغاية حيث تستغرق عملية التصنيع وقتاً طويلاً كما أن أقل كمية من الثوريوم يمكننا استخدامها هي ميليغرام واحد، وهي كمية كبيرة عندما لا يتوفر في العالم سوى حوالي 40 غراماً.

أما في الدراسة الجديدة، فقد اتبع الباحثون نهجاً مختلفاً تماماً؛ حيث قاموا بترسيب طبقة رقيقة جدّاً من الثوريوم على سطح من الفولاذ المقاوم للصدأ باستخدام عملية الطلاء الكهربائي، وهي تقنية شائعة الاستخدام في صناعة المجوهرات، وتعتمد عملية الطلاء الكهربائي التي طُوّرت في أوائل القرن التاسع عشر، على التيار الكهربائي لتحريك ذرات المعدن عبر محلول موصل ومن ثم طلاء سطح معدني بطبقة من معدن آخر كالذهب أو الفضة.

وقال هدسون: «استغرقنا خمس سنوات لمعرفة كيفية زراعة بلورات الفلوريد، وقد اكتشفنا كيفية الحصول على النتائج نفسها باستخدام واحدة من أقدم التقنيات الصناعية وباستخدام كمية من الثوريوم تقل بألف مرة، إضافة إلى ذلك فإن المنتج النهائي يكاد يكون قطعة صغيرة من الفولاذ، وهو بالتالي أكثر متانة بكثير من البلورات الهشة».

وقد جاء نجاح الفكرة الجديدة من إدراك العلماء أن افتراضاً راسخاً منذ فترة طويلة كان خاطئاً، فقد كانوا يعتقدون أن الثوريوم يجب أن يُدمج في مادة شفافة لكي يصل ضوء الليزر إلى النواة ويثيرها، لكن الفريق اكتشف أن إثارة النواة بما يكفي لملاحظة انتقالها الطاقي كان أسهل بكثير مما كان يُعتقد سابقاً.

وقال هدسون: «لطالما افترض الجميع أنه لكي تتم إثارة النواة ثم ملاحظة انتقالها النووي، يجب أن يُدمج الثوريوم في مادة شفافة أمام الضوء المستخدم لإثارة النواة. وقد أوضحنا هذا العمل أن هذا الافتراض غير صحيح، فما زلنا نستطيع دفع كمية كافية من كميات الضوء إلى هذه المواد المعتمة لإثارة النوى القريبة من السطح، ثم بدلاً من انبعاث الفوتونات كما يحدث في المواد الشفافة مثل البلورات، تنبعث إلكترونات يمكن كشفها ببساطة من خلال مراقبة التيار الكهربائي — وهي تقريباً أبسط عملية يمكن القيام بها في المختبر»!

يمكن للساعات فائقة الدقة، إضافةً إلى تحسين شبكات الاتصالات وأنظمة الرادار ومزامنة شبكات الطاقة، أن تُسهم في حل قضية أمنية وطنية بالغة الأهمية، ألا وهي الملاحة دون الاعتماد على نظام تحديد المواقع العالمي (GPS)؛ فحين يعيق طرف معادٍ أو حتى عاصفة كهرومغنطيسية عدداً كافياً من الأقمار الصناعية، فإن الملاحة المعتمدة على نظام GPS ستفشل، وتعتمد الغواصات حاليّاً على الساعات الذرية أثناء الغوص، لكن الساعات الحالية تفقد دقتها تدريجيّاً مع مرور الوقت، مما يضطرها إلى الصعود إلى السطح بعد أسابيع للتثبت من مواقعها. أما الساعات النووية، فهي أقل تأثراً بالاضطرابات البيئية، ما يجعلها ذات قيمة خاصة في المواقف التي يجب فيها الحفاظ على الدقة لفترات طويلة دون الحاجة إلى إشارات خارجية.

وقال «ماكان موهاغ» رئيس فريق الساعات الضوئية في شركة بوينغ للتكنولوجيا والابتكار: «يمكن أن يساعد التوجه الذي اتبعه فريق جامعة كاليفورنيا في لوس أنجلوس في خفض تكلفة وتعقيد الساعات النووية المستقبلية المعتمدة على الثوريوم. وقد تسهم ابتكارات كهذه في تحقيق توقيت أكثر إحكاماً واستقراراً عالياً، وهو أمر له صلة بعدة تطبيقات فضائية»، وتكتسب الساعات فائقة الدقة أهمية كبيرة في سياق السفر الفضائي لمسافات طويلة، حيث يُعَد التوقيت الدقيق أساساً للملاحة والاتصالات.

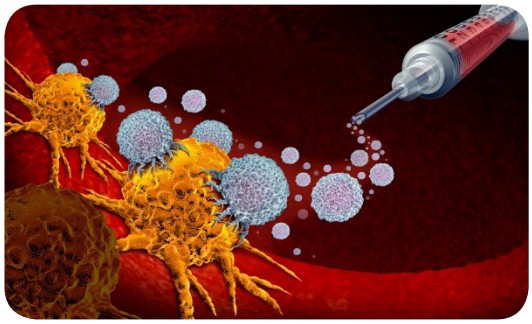
وعلق «إريك بيرت» الذي يقود مشروع الساعات الذرية عالية الأداء في مختبر الدفع النفاث التابع لوكالة ناسا، والذي لم يشارك في هذا البحث: «لقد قام فريق جامعة كاليفورنيا في لوس أنجلوس بقيادة إيريك هدسون بعمل مذهل في استخلاص طريقة عملية لاستكشاف الانتقال النووي في الثوريوم — وهو عمل امتد لأكثر من عقد من الزمن. ويفتح هذا العمل الطريق أمام ساعة ثوريوم عملية». وأضاف بيرت: «في رأيي، يمكن أن تُحدث الساعات النووية المعتمدة على الثوريوم ثورةً في القياسات الفيزيائية الأساسية التي يمكن إجراؤها

باستخدام الساعات، مثل اختبارات نظرية أينشتاين للنسبية. ونظراً لعدم تأثرها بالاضطرابات البيئية، فقد تكون الساعات المستقبلية المعتمدة على الثوريوم مفيدة أيضاً في إنشاء مقياس زمني يشمل النظام الشمسي بأكمله، وهو أمر أساسي لتأسيس وجود بشري دائم على كواكب أخرى».

ترجمة د. عماد خضير، قسم الخدمات العلمية، هيئة الطاقة الذرّية السورية.

University of California - Los Angeles. "An old jeweler's trick could change nuclear timekeeping". ScienceDaily, 8 January 2026. <www.sciencedaily.com/releases/2026/01/260107225542.htm>.

حقنة تحوّل الخلايا المناعية الخاملة في الأورام إلى خلايا مناعية مضادة للسرطان



طوّر باحثون في المعهد الكوري المتقدم للعلوم والتكنولوجيا (KAIST) طريقةً لإعادة برمجة الخلايا المناعية الموجودة داخل الأورام وتحويلها إلى خلايا مناعية قاتلة للسرطان؛ حيث يُحقن الدواء مباشرة في الورم لتمتصه البلعميات macrophages مما يحفزها على التعرف على الخلايا السرطانية ومهاجمتها مع تنشيط الدفاعات المناعية المجاورة. تغني هذه الطريقة عن الحاجة إلى استخلاص الخلايا وتعديلها في المختبر. في النماذج الحيوانية، أدت هذه الاستراتيجية إلى إبطاء نمو الورم بشكل ملحوظ، وحفّزت استجابات مناعية قوية مضادة للسرطان.

تحتوي الأورام الموجودة داخل جسم الإنسان على خلايا مناعية تدعى البلعميات التي تمتلك القدرة على مهاجمة السرطان بشكل طبيعي، إلا أن بيئة الورم تثبط هذه الخلايا وتمنعها من أداء عملها، ووجد باحثون في المعهد طريقة للتغلب على هذا الحاجز عن طريق التحويل المباشر للخلايا المناعية المتمركزة داخل الأورام إلى علاجات فعّالة قاتلة للسرطان.

أعلن رئيس معهد KAIST كوانغ هيونغ لي، في الثلاثين من الشهر الجاري، أن فريقاً من الباحثين يرأسهم البرفيسور جي هو بارك من قسم الهندسة الحيوية وهندسة الدماغ قام بتطوير طريقة علاج حديثة، فعند حقن الدواء داخل الورم مباشرة تمتص البالعات المتمركزة في جسم الورم العقار لتبدأ بإنتاج بروتينات CAR (جهاز التعرف على السرطان). تحول هذه العملية الخلايا المناعية إلى خلايا مناعية مضادة للسرطان تعرف بالبلعميات – CAR.

لماذا تعدّ الأورام صعبة العلاج

تعدّ الأورام الصلبة بما فيها سرطانات المعدة والرئة والكبد بنىً كثيفة تمنع الخلايا المناعية من الدخول أو العمل بشكل فعّال. وبسبب ذلك الحاجز البيولوجي والفيزيائي فإن علاجات الخلايا المناعية الموجودة حالياً تواجه صعوبة في العمل بشكل جيد ضد هذه الأنماط من السرطانات. ظهرت الخلايا المناعية البلعمية المحورة وراثياً CAR–Macrophage كعلاجات مناعية واعدة من الجيل الثاني. وبخلاف بعض الخلايا المناعية تقوم البلعميات ببلعمة وتخريب الخلايا السرطانية بشكل مباشر، كما أنها تقوم بتحريض الخلايا المناعية القريبة؛ الأمر الذي يؤدي إلى تضخيم الاستجابة المضادة للسرطان في كامل الجسم. ورغم إمكانياتها فإن علاجات البلعميات — CAR الحالية تعتمد على استخلاص الخلايا المناعية من دم المريض وتنميتها في المختبر ثم تحويرها جينياً قبل إعادة حقنها. تعدّ هذه الطريقة بطيئة ومكلفة وصعبة التقييم مما يحد من التطبيق العملي عند الكثير من المرضى.

إعادة برمجة الخلايا المناعية بشكل مباشر داخل الجسم

لتحقيق هذا التحدي قام فريق معهد KAIST بالتركيز على «البلعميات المرافقة للورم» والتي تتجمع بشكل طبيعي حول الأورام. طوّر الباحثون طريقة لإعادة برمجة هذه الخلايا المناعية بشكل مباشر داخل الجسم بدلاً من تحويرها خارجه.

تستعمل هذه الطريقة جسيمات نانوية ليبيدية صُممت لتكون سهلة الالتقاط من قبل البلعميات وتكون محمّلة بجزيئات mRNA تحمل معلومات التعرّف على السرطان وبمركب منشط للجهاز المناعي.

ذكر الباحثون أن هذه الطريقة ابتكرت البلعميات – CAR عن طريق «تحويل البلعميات الموجودة في جسم المريض بشكل مباشر إلى علاجات خلوية مضادة للسرطان ضمن الجسم».

الكبح القوي للأورام في الدراسات على الحيوانات

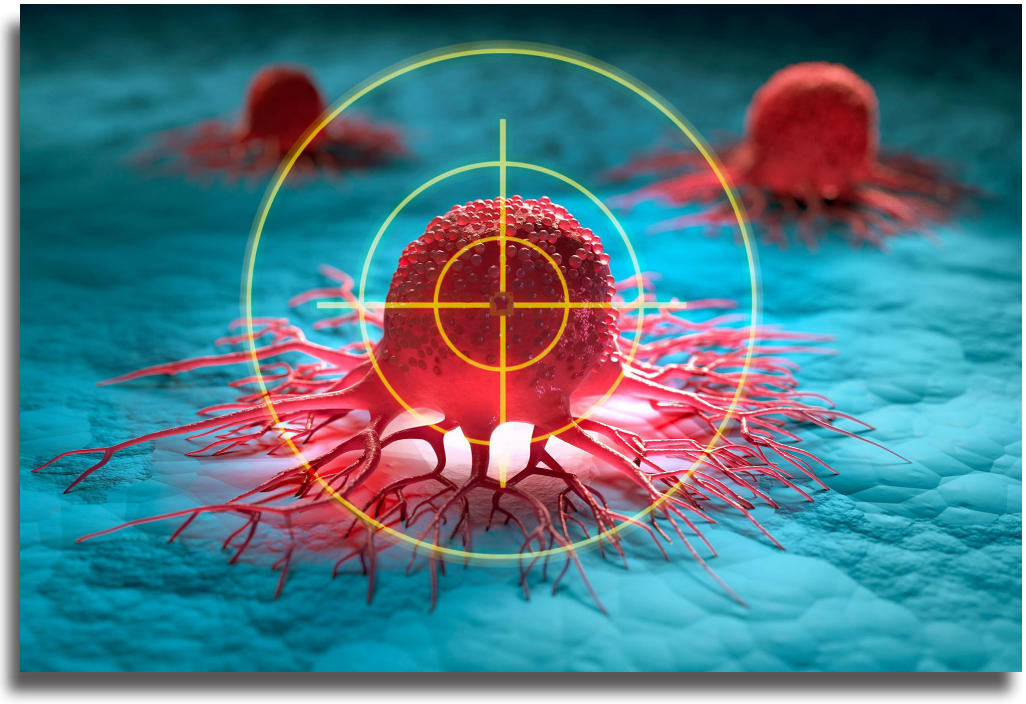
عندما حُقن العلاج ضمن الورم امتصت البلعميات الجسيمات النانوية بسرعة وبدأت بإنتاج بروتينات لها القدرة على التعرف على الخلايا السرطانية كما تفعّلت الاستجابات المناعية بالوقت نفسه. أظهرت «البلعميات – CAR المفعّلة» الناتجة قدرة كبيرة على قتل الخلايا السرطانية وعلى تحريض الخلايا المناعية المحيطة مما أدى إلى استجابة مضادة للسرطان فعّالة. وفي النماذج الحيوانية لسرطان الجلد الميلانيني Melanoma (النموذج الأكثر خطورة من سرطان الجلد) لوحظ انخفاض واضح لنمو الورم، ووجد الباحثون دليلاً على أن الاستجابة المناعية يمكن أن تمتد خارج نطاق الورم المعالج مما يفترض توفير حماية مناعية تمتد لتشمل الجسم بأكمله.

توجهات جديدة نحو العلاج المناعي للسرطان

صرح البروفيسر جي هو بارك قائلاً: «تقدم هذه الدراسة أساساً جديداً للعلاج بالخلايا المناعية التي تولد خلايا مناعية مضادة للسرطان بشكل مباشر ضمن جسم المريض»، وأضاف أن «للدراسة أهمية خاصة لأنها أظهرت القيود الرئيسية لكفاءة انتشار العلاجات الحالية بالبلعميات – CAR وبيئة الورم المثبطة للمناعة».

ترجمة ب. بتول جزائري، قسم البيولوجيا الجزيئية والتقانة الحيوية، هيئة الطاقة الذرّية السورية.

The Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST). "Injection turns sleeping tumor immune cells into cancer fighters". ScienceDaily, 11 January 2026. <www.sciencedaily.com/releases/2026/01/260110211207.htm>.



Online ISSN 2790-8100

No. 165
Print ISSN 1607-985X

Atomic Energy Commission of Syria