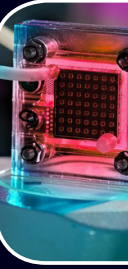
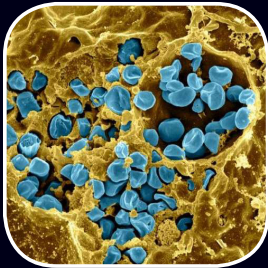
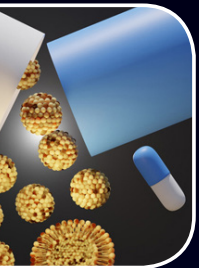
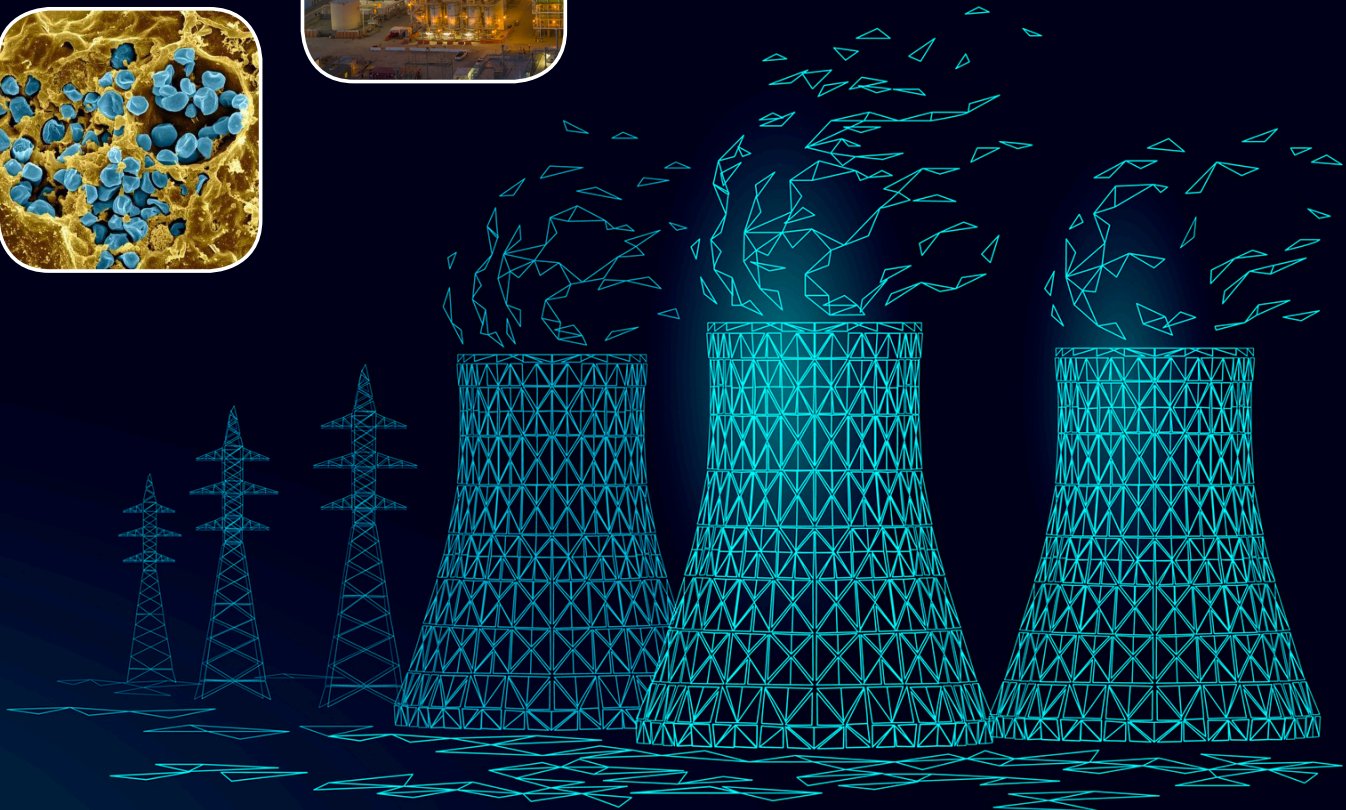




عالم الذرة

١٦٦

مجلة هيئة الطاقة الذرية السورية



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

2026



AECS

عالم الذرة

AECS

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

المدير المسؤول

د. مضر العكلة

المدير العام لهيئة الطاقة الذرية السورية

AECS

مدير التحرير

د. هاني زيدان

AECS

رئيس هيئة التحرير

د. فواز كرد علي

أعضاء هيئة التحرير

د. جمال أصفهاني

AECS

د. محمد عادل باكير

د. دانا جودت

AECS

د. عماد خضير

د. عبد الحميد الرئيس

د. محمد درغام زيدان

د. محمد سوقية

د. رياض شويكاني

د. بسام الصفدي

د. ماهر عبودي

AECS

د. عبد الوهاب علاف

AECS

د. إبراهيم الغريبي

الإخراج الفني

بشار مسعود

أمل قيروط

التدقيق اللغوي

ريما سنديان

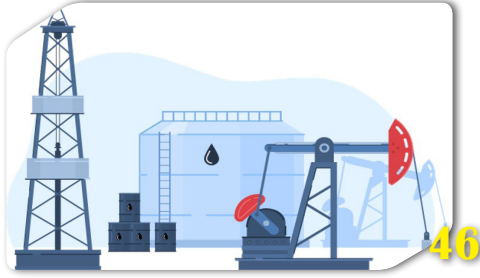
التنضيد

غفران ناووز

AECS

AECS

متقنيات الأثر المشعة في الصناعات البترولية والغاز



46

الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة



60

إطالة علمية على حدث

منصة التعلم والتدريب الإلكتروني للعلوم والتكنولوجيا
النوية في هيئة الطاقة الذرية السورية



74

أخبار علمية

مفاعلات الثوريوم... هل تقود مستقبل الطاقة النووية الآمنة؟

84

إحياء إنزيم عمره 3.2 مليار سنة للكشف عن نشأة الحياة على الأرض

86

محاكاة كرة نارية نووية: ابتكار علمي يكشف مفاجأة في الغبار النووي المتساقط

88

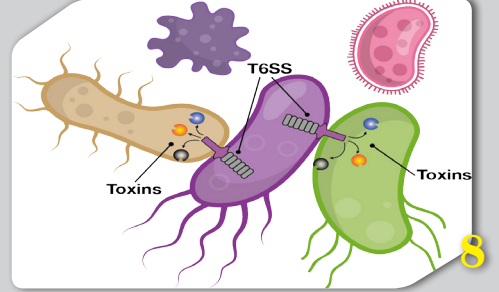
اكتشف العلماء مؤخراً مخزوناً هائلاً غير مستغل من الطاقة، قد يسهم في تزويد مستقبلنا بها

89

نوع جديد من أدوية الزهايمر يحمل بصيص أمل

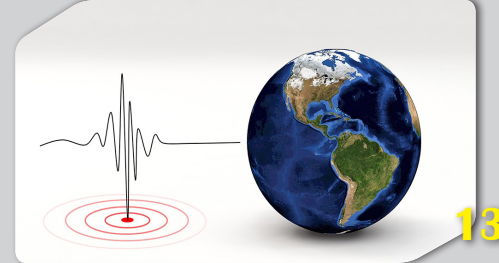
91

البكتريا تسمم وتآكل جيرانها: استراتيجية صيد جديدة في العالم الميكروبي



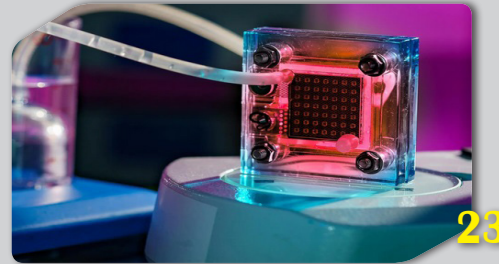
8

استخدام الذكاء الاصطناعي في تحليل وفهم الظواهر الزلزالية
بين التحديات والآفاق المستقبلية



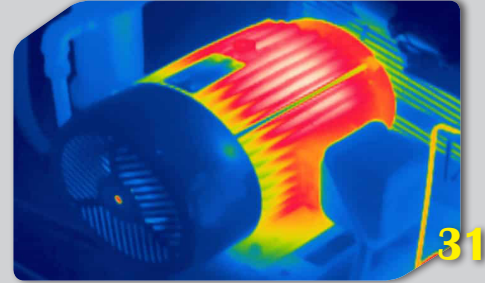
13

خلايا الوقود



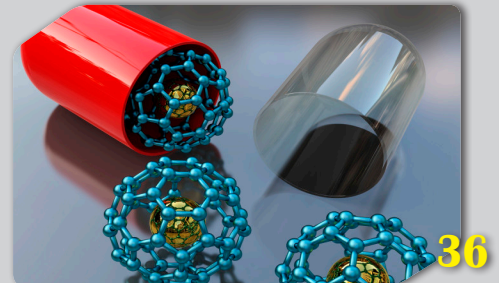
23

التطبيقات الصناعية للتصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء



31

الكبسلة بالبوليميرات وتطبيقاتها



36

قواعد النشر في مجلة عالم الذرة

شروط النشر

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

شروط الإعداد

- يفضل أَنْ يكون عنوان المقال مقتضباً ومعبّراً عن المضمون.
- يلي ذلك ملخص، لا يتجاوز مئة وخمسين كلمة، باللغة العربية وملخص باللغة الإنجليزية، على صفتين 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.
- الجدول: 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-Bruевич 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 29.7×21 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 المحرر أ. د. زياد القطب

تساعد علامات الترقيم الكاتب على تقسيم كلامه وترتيبه وتوضيح مقصوده، كما تساعد القارئ على فهم ما يقرأ ومعرفة أماكن 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 المنضد 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 التقيد بمضمون هذا التعميم تلافاً لكل إشكال قد يواجه كادر التنضيد. وسنورد في طيه مثلاً 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 تجري 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 وتوحيهاً من الإخراج المتناسق والموحد فإننا نأمل التقيد 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 مبين أدناه:

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

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

الفاصلة (،): توضع بين الجمل القصيرة المتعاطفة أو المتصلة 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 المتصلة المعنى، أو بين جملتين تكون إحدهما سبباً في الأخرى.

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

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

- 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 التعجب أو النداء أو ما يدل على الفرح أو الألم أيضاً دون ترك فراغ قبلها.

- مثال: كيف كان الكون بعد الانفجار العظيم!

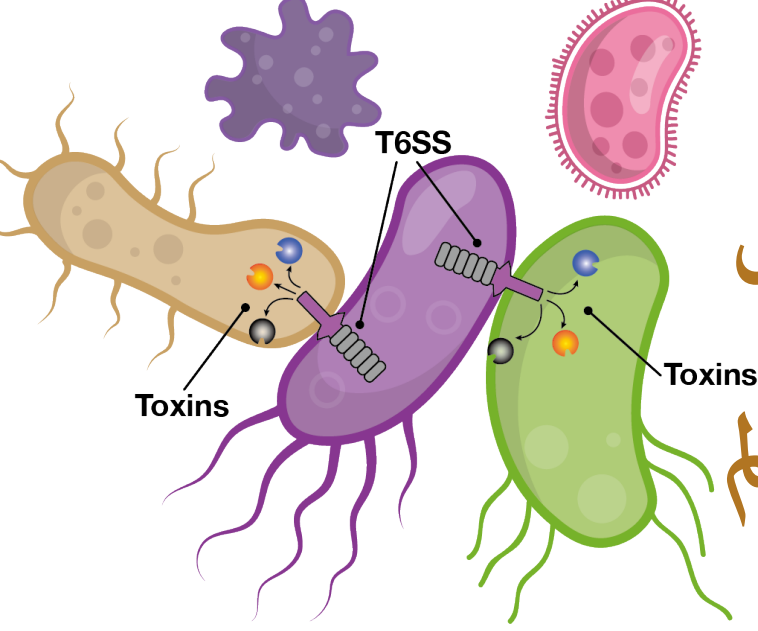
النقاط المتتالية (...): تدل على أن الكلام فيه حذف أو أنه لم ينته ويترك فراغ قبلها وبعدها.

- 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 خطآن صغيران توضع بينهما جملة معترضة داخلية 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 بنصّه دون تغيير.
- مثال: أنجز الباحث مقالاً بعنوان "سوق اليورانيوم ومصادره" وهو في طريقه إلى النشر.
- الواصلة الصغيرة (-):** توضع في أول الجملة وبأول السطر للدلالة على تغير المتكلم 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 154-161.
- الأقواس {...} [...] (...):** عند كتابة أي من هذه الأقواس يُترك 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.
- الشرطة المائلة (/): لا يُترك 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: Syria، superconductivity). 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 إلا 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 ودّعته في المطار).
- أما في حالة الأسماء، نضع حرف الواو (و) منفصلاً بين اسم المؤلف وبين الاسم الذي يليه (مثال: طريف شرجي و زهير أيوبي و فاطر محمد).
- في حالة (أو)، ينبغي ترك فراغ بعدها (مثال: حُدّت المسائل المتوقعة حلّها سواء على المستوى الثقافي أو التنظيمي أو الإداري).
- النسبة المئوية (%):** نجعلها دائماً على يسار الرقم وبدون فراغ بينها وبين الرقم (مثال: 40%).
- الوحدات (ميغاهرتز، سم، كيلوواط، ...):** إذا كانت بالعربية نضعها على يسار الرقم وإذا كانت بالإنكليزية نضعها على يمين الرقم ونترك فراغاً بينها وبين الرقم ونذكر مثلاً: (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.



البكتريا تسمم وتأكل جيرانها: استراتيجية صيد جديدة في العالم الميكروبي

ملخص

في ظروف الجوع، تستخدم بعض البكتريا نظام الإفراز من النوع السادس (T6SS) كأبرة دقيقة لقتل البكتريا المجاورة والتهام محتوياتها كمصدر للغذاء، بدلاً من استخدامه فقط للدفاع أو المنافسة. اعتمد الباحثون في دراستهم على تصوير حيوي لخلية واحدة وواسمات نظائرية لتتبع عملية القتل والأكل. وغالباً ما تمتلك البكتريا التي تعتمد على هذه الاستراتيجية جينوماً مختزلاً، مما يفقدها القدرة على تصنيع مغذياتها بنفسها. هذا الاكتشاف يعيد فهم التفاعلات الميكروبية ليشمل الافتراض الممنهج، وله تطبيقات في دراسة التربة، الأمعاء البشرية، والعدوى، وقد يفتح مجالاً لتطوير مضادات حيوية تستهدف T6SS.

الكلمات المفتاحية: البكتريا، T6SS، الافتراض.

مقدمة

في دراسة حديثة نُشرت في مجلة Science في 12 حزيران 2025، قدم الباحثان Marx وNadell تعليقاً علمياً على اكتشاف غير مألوف في عالم البكتريا؛ ففي ظروف الجوع ونقص المغذيات، تلجأ بعض أنواع البكتريا إلى استخدام نظام يُعرف باسم «نظام الإفراز من النوع السادس» (Type VI Secretion System – T6SS)، لحقن السموم في الخلايا المجاورة. كان هذا النظام يُستخدم للدفاع عن المنطقة أو للتنافس على الموارد، لكن الاكتشاف الجديد الذي علّق عليه الباحثان يكشف أن البكتريا تحت ضغط الجوع تتحول إلى استراتيجية أكثر دهاءً؛ فهي تقتل جيرانها من البكتريا الأخرى باستخدام هذا النظام، ثم تتغذى على محتوياتها الخلوية كمصدر للغذاء. وقد اعتمدت الدراسة الأصلية التي أجراها Stubbusch وزملاؤه على تقنيات متقدمة مثل التصوير الحيوي لخلية واحدة single-cell live imaging لمراقبة عملية القتل والأكل مباشرة، واستخدام واسمات نظائرية isotopic markers لتتبع انتقال المواد العضوية من الخلايا المقتولة إلى الخلايا القاتلة، كما تبين أن البكتريا التي تعتمد على هذه الاستراتيجية غالباً ما تمتلك جينوماً مختزلاً ومجموعة محدودة من المورثات الاستقلابية، مما يعني أنها فقدت القدرة على تصنيع بعض المغذيات الأساسية بنفسها وأصبحت تعتمد على «الصيد» لتأمين حاجتها. يعيد هذا الاكتشاف تشكيل فهمنا للسلوك البكتيري والمجتمعات الميكروبية، حيث لا تقتصر التفاعلات فيها على التنافس والتعاون فحسب، بل تشمل أيضاً افتراضاً ممنهجاً قد يكون له تطبيقات مهمة في فهم ديناميكيات البكتريا في التربة، وفي الأمعاء البشرية، وأثناء العدوى، كما قد يفتح المجال لتطوير مضادات حيوية جديدة تستهدف نظام T6SS لتعطيل قدرة البكتريا المرضية على البقاء في البيئات قليلة المغذيات.

نظام T6SS: الإبرة الجزيئية القاتلة

كان الاعتقاد السائد أن البكتيريا تستخدم هذا النظام للدفاع عن مكانها، أو للقضاء على البكتيريا المنافسة التي تشاركها الموئل نفسه، لكن الاكتشاف الجديد يضيف بعداً آخر لهذه الآلية، حيث تصبح وسيلة للحصول على الغذاء في الظروف القاسية.

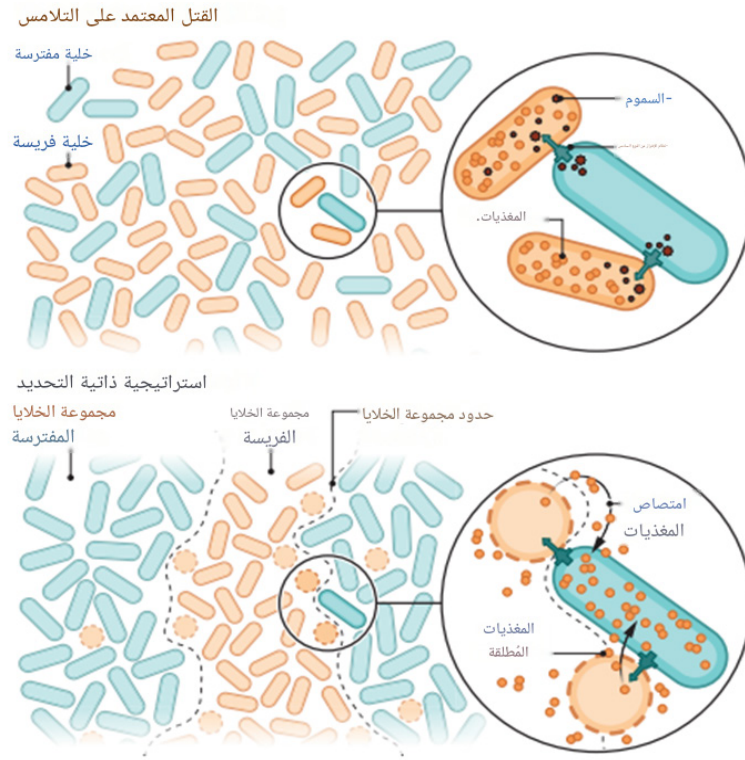
The diagram illustrates the TssM-TssJ-TssBC-VgrG complex embedded in the outer membrane (OM). The complex consists of several components: a yellow TssM protein, a blue TssJ protein, a blue TssBC protein, and an orange VgrG protein. The TssM and TssJ proteins are shown as coiled structures, while the TssBC and VgrG proteins are shown as more structured, elongated proteins. The TssBC protein is shown as a blue cylinder with a blue cap, and the VgrG protein is shown as an orange cylinder with an orange cap. The TssM and TssJ proteins are shown as coiled structures, while the TssBC and VgrG proteins are shown as more structured, elongated proteins. The TssBC protein is shown as a blue cylinder with a blue cap, and the VgrG protein is shown as an orange cylinder with an orange cap. The TssM and TssJ proteins are shown as coiled structures, while the TssBC and VgrG proteins are shown as more structured, elongated proteins. The TssBC protein is shown as a blue cylinder with a blue cap, and the VgrG protein is shown as an orange cylinder with an orange cap.

صورة توضيحية لبنية T6SS

The diagram illustrates the interaction between *Serratia marcescens* (top) and *S. cerevisiae* (bottom). Inside the bacterial cell, flagella are shown with labels for the motor (محرك), hook (مخروط)، filament (خيوط)، and basal body (جسم أساسي). The flagellum is composed of the hook (TasBC) and the filament (المستطولام). The flagellin (البروتين Hcp) is released from the filament. In the yeast cell, Tfe1 is involved in iron uptake (إزالة استقلاب غشاء الزلزاما). Tfe2 inhibits iron uptake and activates the defense response (تفعيل الاستجابة الدفاعية). The defense response leads to cell death (موت الخلية).

مجلة عالم الذرة، العدد 165، أيلول 2026 | 9

بتكرار عالٍ للتلامس بين الخلايا وفقدان محدود للعناصر الغذائية المطلقة عن طريق الانتشار، كما هو الحال في الأغشية الحيوية، وتجمعات التربة، والثلوج البحرية، ومنطقة الجذور، وطبقة المخاط المعوي.



العلوم 12 يونيو 2025

صورة توضيحية للقتل المعتمد على التلامس في المجتمعات الميكروبية

أظهر تحليل جينومات بكتيريا الضمة *Vibrio* الذي أجراه Stubbusch وآخرون أن نظام الـ T6SS واسع الانتشار في هذا الجنس، لكن وجوده متغير حتى بين السلالات التي تجمعها قرابة تطورية قريبة جداً؛ أي أن لها سلفاً مشتركاً وتشارك في معظم الصفات الوراثية، مما يكشف أن سلوك الافتراس ليس سمة ثابتة تطورياً بل صفة يمكن اكتسابها أو فقدانها بسهولة. هذا النمط غير المستقر يطرح تساؤلاً حول العلاقة بين النظام والقدرة الاستقلالية: هل تنهار قدرة البكتيريا على تصنيع غذائها بنفسها (انخفاض الاكتفاء الذاتي الاستقلالي)؛ مما يضطرها لافتراس جيرانها وتعويض عجزها؟ وهل يحدث هذا الانهيار قبل اكتساب نظام الـ T6SS فيصبح النظام حلاً للحاجة، أم بالتزامن معه، أم بعده (أي أن امتلاك السلاح هو ما شجعها على التواكل وفقدان القدرة على الإنتاج الذاتي)؟ وبشكل أعم، يشير عدم الاستقرار التطوري الملحوظ لآلية T6SS في مجموعة الضمة إلى أن الحرب البكتيرية والتضاد ليسا استراتيجيتين تحافظ عليهما قوى الانتقاء الطبيعي بشكل دائم، بل يمكن أن يتخلى عنهما التطور عندما تصبح تكلفة امتلاك السلاح أكبر من فائدته أو عندما تتغير الظروف البيئية لصالح التعايش المسالم.

وتدعم هذه الفكرة دراسات أجريت على البكتيريا الموجودة في الميكروبيوم المعوي للحيوانات، التي وثقت فقدان نظام الـ T6SS، سواء داخل الكائن المضيف طوال حياته أم على مدى فترات زمنية تطورية أطول.

امتلاك سلاح قاتل لا يعني بالضرورة النجاح في الافتراس على المدى الطويل، لأن الاستخدام المفرط للسلاح قد يؤدي إلى «حرمان الصياد من فريسته» بدلا من زيادة موارده.

تشير التحليلات الميتاجينومية التي أجراها Stubbusch وآخرون إلى أن أنظمة الإفراز T6SSs منتشرة على نطاق واسع، ولكنها تبقى بتردد متوسط إلى منخفض في مختلف البيئات. أحد العوامل الأساسية على مستوى المجتمع الميكروبي هو أن استراتيجية الهجوم والاستهلاك غالباً ما تكون محدودة ذاتياً، بمعنى أن البكتيريا التي تقتل جيرانها تستهلكهم ثم تجد نفسها بلا فريسة جديدة بعد أن تقضي على مصدر غذائها المستقبلي، كما أن فعالية التضاد الذي تتوسطه أنظمة الإفراز من النوع السادس تتناقص تلقائياً مع انخفاض الوفرة النسبية للخلايا المستهدفة بمرور الوقت، فكلما مات عدد أكبر من الضحايا، أصبح البحث عن ضحايا جدد أقل جدوى من حيث الطاقة المستهلكة مقابل المغذيات المتحصل عليها. إضافة إلى ذلك،

على الرغم من أهمية البنية المكانية (كالتجمع في مستعمرات أو أغشية حيوية) ومحدودية الانتشار اللتين تعتبران شرطين أساسيين لنجاح القتل المعتمد على التلامس المباشر، إلا أن نفس هذه البنية قد تُشكل أيضاً عوائق مكانية تحول دون وصول الخلايا المهاجمة إلى فرائس جديدة. يميل نشاط أنظمة الإفراز من النوع السادس بطبيعته إلى التسبب في فصل مجموعات الخلايا المهاجمة عن الخلايا المستهدفة، مما يحد من قدرة هذه الأنظمة على جمع المغذيات ضمن حدود مجموعات الخلايا الناتجة.

البكتريا القاتلة تقتل الجيران وتطلق المغذيات، والبكتريا «الكسولة» تستهلك هذه المغذيات دون أن تدفع ثمن القتل (لا تصنع السلاح ولا تخاطر)

يشترك القتل بواسطة الـ T6SS والتعايش التكافلي في "المشكلة الأساسية" نفسها؛ فكلاهما يؤدي إلى إطلاق مغذيات في البيئة الخارجية يستفيد كلا الشريكين منها، وفي الوقت نفسه يسمح "للمستغلين" (الذين لم يساهموا في إنتاج هذه المغذيات) بالاستفادة من المغذيات دون دفع التكلفة. وبالتالي، يُعدّ التوزيع المكاني، عاملاً حاسماً للنجاح من خلال الوصول إلى المغذيات المُطلقة؛ حيث يمكن للأنواع الأخرى التي لا تتحمل تكلفة توليد مخزون المغذيات المُطلقة، أن تستهلك الموارد التي توفرها الخلايا الأخرى وتمنعها من السيطرة على أغلبية المجتمع؛ أي بمرور الوقت يزداد عدد المستغلين ويقل عدد المنتجين، لأن المنتجين ينفقون طاقتهم في الحرب أو الإنتاج في حين يستخدم المستغلون كل طاقتهم للنمو فقط. قد يُساعد هذا أيضاً في تفسير سبب كون الإفراز بواسطة نظام الإفراز من النوع السادس T6SS كاستراتيجية لجمع المغذيات محدوداً ذاتياً.

تؤكد دراسة Stubbusch وآخرون على مبدأ مهم: الخلايا التي تعجز عن الوصول إلى المواد الضرورية للنمو لا تحتاج بالضرورة إلى شريك للتغذية المتبادلة؛ فبدلاً من ذلك، إذا كانت الخلية تمتلك نظام إفراز من النوع السادس T6SS أو آلية أخرى لتحليل الخلايا الأخرى، فبإمكانها ببساطة قتل جيرانها والتهاهمهم. وستكون مجالات البحث المستقبلية استكشاف أوجه التشابه والاختلاف بين الظروف التي تعزز الافتراض الذي يلتهم الخلايا المجاورة مقابل التبادل الاستقلالي التكافلي كأتماط حياة بكتيرية. ويشير انتشار الافتراض القائم على نظام الإفراز من النوع السادس T6SS إلى أن نمط الحياة هذا يؤدي دوراً مهماً في مجموعة متنوعة من البيئات.

الأهمية العلمية

هذا الاكتشاف ليس مجرد ملاحظة علمية مثيرة للاهتمام فحسب، بل له تداعيات عميقة على عدة مستويات، فعلى مستوى السلوك البكتيري كانت المجتمعات البكتيرية تُدرس تقليدياً، من خلال التنافس والتعاون والتكافل، ولكن الافتراض الممنهج يضيف بعداً جديداً لفهم العلاقات البكتيرية، فالبكتريا لا تتنافس فقط على الموارد، بل يمكنها تحويل جيرانها إلى موارد عندما تصبح الموارد شحيحة، فالبكتريا التي كنا نراها ككائنات بسيطة تتنافس بشكل عشوائي، تظهر الآن ككائنات تمتلك استراتيجيات بقاء معقدة تشبه ما نراه في عالم الحيوان: الصيد، الافتراض، والاستفادة من جثث الضحايا.

تعيش البكتريا في مجتمعات معقدة في التربة، والمياه، وداخل الكائنات الحية (مثل الأمعاء البشرية)، ويعتمد بعضها على افتراض جيرانه من أجل البقاء، مما يساعد في تفسير كيفية توزيع الأنواع وتغيرها بمرور الوقت، خاصة في البيئات قليلة المغذيات.

كما أن امتلاك البكتريا لهذا النظام قد يفتح آفاقاً جديدة لفهم آليات الأمراض، وتطوير مضادات حيوية مبتكرة تستهدف نظام T6SS لتعطيل قدرة البكتريا على البقاء داخل الجسم، فإذا كان نظام الـ T6SS يُشكل أداة حيوية لبقاء بعض البكتريا في الظروف القاسية، فإن تعطيل هذا النظام قد يجعل هذه البكتريا غير قادرة على البقاء في بيئة المضيف، مما يسهل القضاء عليها. يتوافق هذا مع اتجاه حديث في تطوير المضادات الحيوية، حيث يبحث العلماء عن "أهداف غير تقليدية" بدلاً من استهداف آليات النمو الأساسية التي تؤدي إلى مقاومة سريعة، ونظراً لكون نظام T6SS متخصصاً في التفاعل مع البكتريا الأخرى وأنه ليس ضرورياً للنمو في الظروف الغنية، فقد يكون هدفاً واعداً لمضادات حيوية جديدة تقلل من فرصة تطور المقاومة.

كما يتوقع الباحثون أن يؤثر تحليل الخلايا بين البكتريا على العمليات البيوجيوكيميائية واسعة النطاق نظراً لوجود نظام الإفراز من النوع السادس (T6SS) في مختلف التصنيفات والبيئات، ويشيرون إلى أنه قد تكون هناك تحويلة بكتيرية bacterial shunt موازية تشارك في الدورة الجيوكيميائية الحيوية البحرية. "بما معناه: يساهم موت البكتريا نتيجة هجوم الفيروسات عليها في خزن الكربون في أعماق المحيطات (التحويل الفيروسي viral shunt)، وكذلك فإن موت البكتريا بواسطة الـ T6SS يجب أن يساهم بالآلية نفسها في خزن الكربون؛ حيث يُطلق تحليل الخلايا مواد عضوية ذائبة سهلة التحلل، إضافة إلى مواد عضوية جسيمية غنية بالكربون. يمكن للبكتريا إعادة استخدام مخزون المواد سهلة التحلل الذي يوفره المحلول بسهولة، في حين قد تغوص المواد العضوية الجسيمية الأكثر مقاومة للتحلل بشكل تفضيلي إلى طبقات المحيط العميقة، وبالتالي تُساهم في تخزين الكربون على المدى الطويل في المحيط.

[1] Nadell, C.D., Marx, C.J. (2025). Bacteria poison and eat their neighbors. *Science*, 388(6748), 1125-1126. DOI: 10.1126/science.ady7008*

[2] Stubbusch, A., et al. (2025). Antagonism as a foraging strategy in microbial communities. *Science*, 388(6748), 1127-1135. DOI: 10.1126/science.adr8286

*رقم وتاريخ اتفاقية ترخيص الترجمة من الجمعية الأمريكية لتقدم العلوم AAAS: OP-00174759، 23 نيسان/أبريل / 2026.

*license translation agreement number of the American Association for the Advancement of Science (AAAS): OP-00174759, 23 April 2026. This translation is not an official translation by AAAS staff, nor is it endorsed by AAAS as accurate. In crucial matters, please refer to the official English-language version originally published by AAAS.

Preparation and translation of this article was done by Marwa Khawajkiah and Ayman Al-mariri, Department of Molecular Biology and Biotechnology, Atomic Energy Commission of Syria

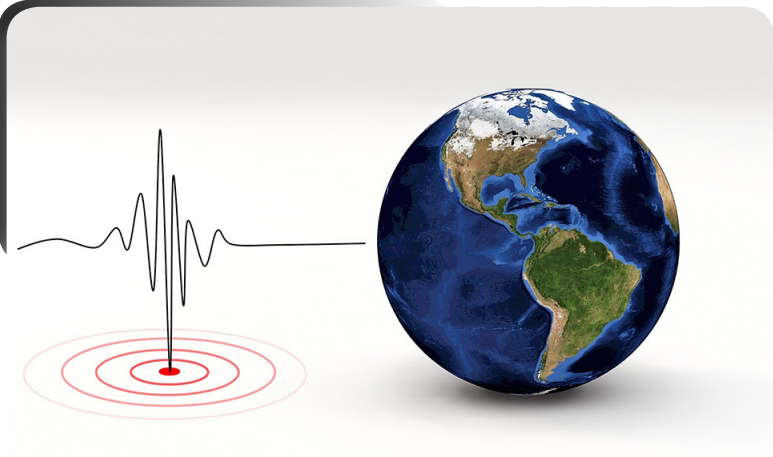
Bacteria poison and eat their neighbors: a new hunting strategy in the microbial world

Abstract: Under starvation conditions, some bacteria use their type 6 secretion system (T6SS) as a fine needle to kill neighboring bacteria and consume their contents as a food source, rather than using it solely for defense or competition. Researchers in their study relied on single-cell bioimaging and isotopic markers to track this killing and consumption process. Bacteria that employ this strategy often have a reduced genome, rendering them incapable of synthesizing their own nutrients. This discovery redefines microbial interactions to include systematic predation and has applications in the study of soil, the human gut, and infections. It may also pave the way for the development of antibiotics that target T6SS.

Keywords: Bacteria, T6SS, Predation

◀ ترجمة وإعداد الدكتور أيمن المريري، ب. مروى خواجكية، قسم البيولوجيا الجزيئية والتقانة الحيوية، هيئة الطاقة الذرية السورية.

استخدام الذكاء الاصطناعي في تحليل وفهم الظواهر الزلزالية بين التحديات والآفاق المستقبلية



ملخص

دخلت أدوات الذكاء الاصطناعي في مختلف نواحي الحياة من طب وهندسة وتقنيات حديثة، وأظهرت نجاحاً باهراً في العديد منها مما أهلها لسبر أغوار الظواهر الطبيعية والتي ما زالت تحجب أسرارها عن الجنس البشري فيتعرض لأخطارها ويكتوي بقسوة كوارثها مثل الزلازل. لقد استفاد علم الزلازل من التطورات العلمية والتقنية الحديثة فدخل هذا العلم بقوة في العالم الرقمي وتطورت أجهزة الرصد إلى الشكل الرقمي فائق الحساسية؛ مما يجعله أرضاً بكرّاً لتطبيق أدوات الذكاء الاصطناعي ومبشراً بالتخفيف من وطأة الكوارث وحتى تجنب جميع التأثيرات المؤذية للزلازل.

الكلمات المفتاحية: الزلازل، الذكاء الاصطناعي، تخفيف الخسائر الزلزالية.

مقدمة

دخلت أدوات الذكاء الاصطناعي في مختلف نواحي الحياة من طب وهندسة وتقنيات حديثة وأظهرت نجاحاً باهراً في العديد منها مما أهلها لسبر أغوار الظواهر الطبيعية والتي ما زالت تحجب أسرارها عن الجنس البشري فيتعرض لأخطارها ويكتوي بقسوة كوارثها مثل الزلازل. يُعد علم الزلازل أحد أهم الفروع الجيوفيزيائية التي تسعى إلى دراسة الاهتزازات الأرضية الناجمة عن الحركات التكتونية، وفهم أسبابها وخصائصها والتنبؤ بآثارها. ورغم التقدم الكبير في تطوير أجهزة الرصد الزلزالي، ما يزال التنبؤ الدقيق بالزلازل واحداً من أكثر التحديات تعقيداً في العلوم الطبيعية [1، 2]. فعلى مدى عقود طويلة، اعتمد علماء الزلازل على النماذج الفيزيائية التقليدية والتحليل اليدوي للإشارات الزلزالية، وهو ما أثبت حدود فعاليته أمام الكم الهائل والمعقد من البيانات والتسجيلات الزلزالية، إضافةً إلى الطبيعة غير الخطية للحركات التكتونية ولاهتزاز سطح الأرض تحت تأثير الموجات الزلزالية. لقد استفاد علم الزلازل من التطورات العلمية والتقنية الحديثة فدخل هذا العلم بقوة في العالم الرقمي، كما تطورت

أجهزة الرصد من الشكل الميكانيكي ذي التسجيل التشابهي الذي استخدمه واداتي وريختر في كاليفورنيا في ثلاثينات القرن الماضي إلى الشكل الرقمي فائق الحساسية، كما تحسن أداء أجهزة الرصد بشكل مذهل حتى تجاوز مجالها الديناميكي عتبة (140 dB)؛ أي أن الفرق بين أصغر سعة للحركة الزلزالية يستطيع جهاز الرصد تحسسها وتسجيلها وأكبر سعة يمكن استيعابها يعادل عشرة ملايين مرة.

تحدث الزلازل على كوكبنا بشكل أساسي بسبب الحركة المستمرة للصفيحة التكتونية ونتيجة الاحتكاك على طول حدودها؛ لذلك يتم تسجيلها يومياً في مراكز الرصد وطبقاً لإحصائيات هيئة المسح الجيولوجي الأمريكي فإن أكثر من ثلاثة ملايين زلزال/هزة يحدث كل سنة وذلك يعني حوالي 8000 زلزال في اليوم أو زلزال كل 11 ثانية. ولحسن الحظ فإن أغلب هذه ثلاثة ملايين زلزال ضعيف جداً ولا يشعر الناس بها، كما يحدث أحياناً زلازل قوية في المناطق غير المأهولة؛ لذلك لا نشعر بها إنما يسترعي اهتمامنا فقط الزلازل الكبيرة التي تحدث في المناطق الأهلة بالسكان والتي تسبب خسائر بشرية ومادية فادحة. لقد أودت الزلازل بحياة الكثير من البشر، حيث وصلت ضحايا الزلازل إلى 1.5 مليون ضحية في السنوات المئة الأخيرة لوحدها حسب تقديرات منظمة اليونسكو. من هنا ظهرت الحاجة لإقامة شبكات الرصد الزلزالي في معظم دول العالم. وتتكون هذه الشبكات من عشرات وحتى الآلاف من محطات الرصد، وهكذا ومع مرور الوقت تراكمت كمية هائلة من التسجيلات الزلزالية الرقمية.

وإضافة إلى رصد الزلازل التكتونية المنشأ يؤدي علم الزلازل دوراً أساسياً في التخفيف من مخاطر البراكين. فخلال فترات نشاط البراكين، يمكن أن تحدث آلاف الزلازل يومياً، مما ينتج عنه مجموعة متنوعة من الإشارات الزلزالية؛ أي الأشكال الموجية التي تعكس العديد من العمليات البركانية المترابطة معها مثل: هجرة الصهارة، حركة الصدوع، الانفجارات، وتساقط الكتل المنصهرة وغيرها. تُسجل هذه الزلازل عادةً بواسطة أجهزة رصد الزلازل عريضة الحزمة، وهي حساسة للغاية لحركة الأرض عبر نطاق واسع من الترددات، وتسجل الإشارات بمعدلات عالية لأخذ العينات (حوالي 100 عينة في الثانية). ويؤدي ذلك إلى تسجيل كميات هائلة من البيانات، كما أن شبكات رصد الزلازل البركانية تستخدم عشرات أو حتى مئات أجهزة الرصد التي تسجل الهزات معاً وفي الوقت نفسه، مما يجعل الفحص اليدوي الفوري لهذه الكميات الهائلة من السلاسل الزمنية أمراً غير ممكن عملياً؛ لذا، يتمثل التحدي الرئيسي في تحديد الزلازل البركانية وتوصيفها بدقة وفي الوقت المناسب، لتوفير أدلة حيوية حول حالة البركان واحتمالية ثورانه أو خطره، إضافة إلى القدرة على معالجة مجموعات ضخمة من البيانات المتراكمة بدقة وكفاءة لإجراء المزيد من التحليلات ضمن هامش زمني معقول دون أي تأخير.

ومع دخول علم الزلازل العالم الرقمي تطورت طرق وتقنيات المعالجة الرقمية بشكل سريع مستفيدةً من تطور أداء الحواسيب وأنظمة التسجيل والأرشفة. وبما أن الزلازل تحدث بشكل يومي فإنه يتم تسجيل مئات أو آلاف الهزات يومياً؛ لذلك فقد برزت الحاجة إلى خوارزميات المعالجة الآلية لتلك الكميات الهائلة من التسجيلات الزلزالية. تهدف هذه الخوارزميات إلى تخفيف أعباء المعالجة اليدوية الشاقة في مراكز الرصد الزلزالي من خلال التعرف على الأحداث الزلزالية وتصنيفها وتحديد أزمته وصول الموجات الزلزالية في كل محطة رصد. يُشكل تحديد وصولات أطوار الموجات الزلزالية، وخاصةً وصولات الموجة الأولية (P) والموجة الثانوية (القصية) (S)، أساس معظم مهام المعالجة الزلزالية (مثل تحديد مواقع البؤر، والقدرة، ومعاملات المنبع). يُعطي التحديد اليدوي لهذه الأطوار دقةً أكبر في زمن الوصول مقارنةً بالطرق الآلية، ولكنه يستغرق وقتاً طويلاً للغاية. في المقابل، تُعدّ معظم الطرق الآلية أسرع بكثير، ولكنها تتطلب عادةً وصولات واضحة للأطوار، وتوفر «قوالب مسبقة» للزلازل المُفهرسة سابقاً في قاعدة البيانات، كما تحتاج لخطوات معالجة مسبقة مثل استخراج خصائص مُعايرة لمجموعة صغيرة من خصائص الزلازل، مثل: خوارزميات الإقلاع القائمة على نسبة متوسط سعة الإشارة قصيرة المدى إلى متوسط سعة الإشارة طويلة المدى (STA/LTA). ومن التحديات التي تواجه تطبيق علم الزلازل في رصد نشاط البراكين أن الزلازل البركانية قد تُظهر خصائص زمنية وترددية متغيرة على نطاق واسع، وغالباً ما تكون بسعات منخفضة أو تتضمن أطوار وصول غامضة، كما أن مراحل الاضطرابات البركانية الجديدة قد تُنتج إشارات زلزالية غير معروفة مسبقاً وتختلف عن نماذج الزلازل المتوافرة في قاعدة البيانات. إضافة إلى ذلك، فإن أساليب المعالجة القائمة على كتالوجات الزلازل الحالية قد تكون غير مناسبة لعمليات نشر شبكات الرصد الجديدة في مناطق لا يتوافر فيها أي كتالوج زلزالي.

وفي السنوات الأخيرة، برز الذكاء الاصطناعي -وخاصة التعلم الآلي والتعلم العميق- كأدوات قوية قادرة على التعامل مع البيانات الضخمة مثل البيانات الزلزالية واستخلاص الأنماط الخفية التي تعجز الأساليب التقليدية عن التعرف عليها. وقد شكّل ظهور هذه التقنيات نقطة تحول في علم الزلازل، حيث مكّنت النماذج الجديدة من الكشف المبكر عن الاهتزازات، ومن تحليل بيانات الموجات بدقة أعلى، ومن تقدير احتمالية حدوث الزلازل، بل حتى سمحت بتحسين خرائط المخاطر الزلزالية [3، 4، 5، 6، 7]. يهدف هذا المقال إلى استعراض أهم تطبيقات الذكاء الاصطناعي في علم الزلازل، وبيان الأسس النظرية التي تعتمد عليها هذه التطبيقات، إضافة إلى تناول نماذج بحثية حديثة أظهرت نتائج واعدة، كما يناقش المقال التحديات الراهنة والفرص المستقبلية، مسلطاً الضوء على الدور المتنامي للذكاء الاصطناعي في بناء منظومات إنذار مبكر وتطوير معرفتنا بهذه الظاهرة الجيولوجية الطبيعية المعقدة.

الخلفية النظرية

أولاً: علم الزلازل وتحدياته

يدرس علم الزلازل نشوء وانتشار الموجات الزلزالية وخصائصها الديناميكية التي تنبعث نتيجة تحرير الطاقة المخزنة في طبقات الأرض والتي تراكمت بفعل حركات الصفائح التكتونية. وتنقسم الموجات الزلزالية عادة إلى نوعين رئيسيين: موجات جسيمية تشمل موجات أولية P-waves، وهي الأسرع لذلك تصل قبل الموجات الأخرى؛ وموجات ثانوية S-waves وهي أبطأ لكنها أكثر تدميراً، والنوع الثاني هو الموجات السطحية وتشمل موجتي: لوف Love وريلي Rayleigh، وهي موجات بطيئة وذات أدوار طويلة وأفقية التوجه ما يجعلها خطيرة جداً على الأبنية والمنشآت. ويتطلب تحليل هذه الموجات قراءة إشارات بالغة التعقيد، يجري تسجيلها عبر شبكات تضم مئات وحتى آلاف محطات الرصد الزلزالية. لكن الحجم الضخم للبيانات الزلزالية المسجلة، والضجيج المصاحب للتسجيلات، وصعوبة التمييز بين النشاط الزلزالي الطبيعي والهزات المتحرضة عن الأنشطة البشرية، كلها عوامل تصعب المهمة على الباحثين، كما أن التنبؤ بالزلازل يظل محدوداً بسبب عوامل جيولوجية متداخلة لا يمكن نمذجتها بسهولة بالطرق التقليدية.

ثانياً: الذكاء الاصطناعي والتعلم العميق

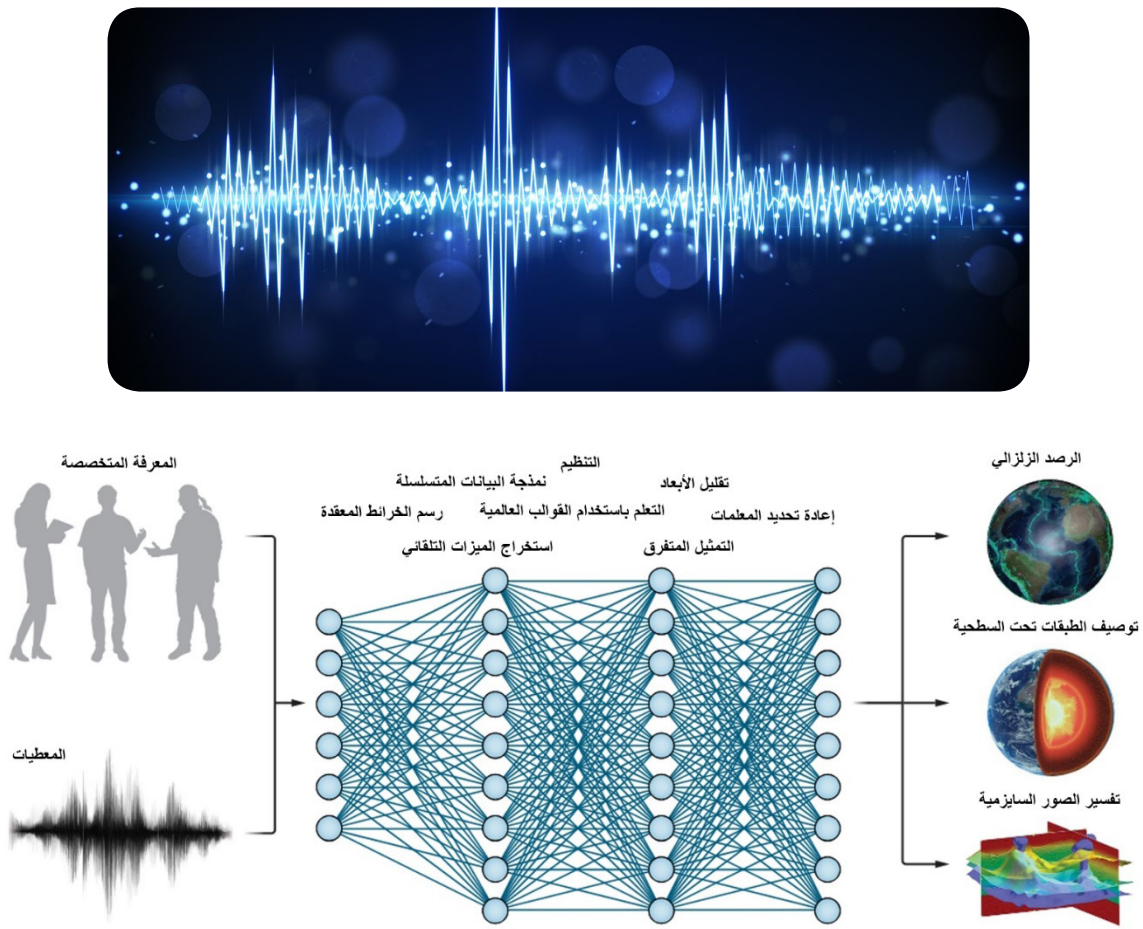
يعتمد الذكاء الاصطناعي على التعلم الآلي machine learning الذي يهدف إلى جعل الحاسوب قادراً على التعلم من البيانات دون أن تتم برمجته بشكل صريح لأداء كل خطوة وذلك من خلال خوارزميات قادرة على «التعلم»؛ أي تدريب نموذج model من البيانات data واكتشاف الأنماط patterns وتحديدها واتخاذ القرارات أو إجراء تنبؤات بشكل تلقائي دون برمجة صريحة. ومن بين الأدوات التي تم استخدامها في علم الزلازل:

● **خوارزميات التعلم الآلي** مثل: شجرات القرار، آلة المتجهات الداعمة، والانحدار؛ فشجرة القرار decision Tree هي أحد أشهر نماذج تعلم الآلة المستخدمة في التصنيف classification والتنبؤ regression، وهي سهلة الفهم لأنها تشبه طريقة اتخاذ القرار عند البشر حيث إنها نموذج على شكل هيكل يشبه الشجرة يبدأ من جذر ثم يتفرع إلى عُقد وأغصان، بحيث يتم تقسيم البيانات خطوة بعد خطوة حتى نصل إلى قرار نهائي. أما آلة المتجهات الداعمة SVM: support vector machine، فهي نموذج يقوم بالبحث عن أفضل خط فاصل hyperplane يمكنه فصل الفئات المختلفة داخل البيانات بأكبر هامش ممكن. أما الانحدار regression فهو أحد أساليب تعلم الآلة والإحصاء المستخدمة للتنبؤ بقيمة رقمية اعتماداً على مجموعة من المدخلات، وهو نموذج يحاول إيجاد العلاقة الرياضية بين المتغيرات، وقد تم استخدام الانحدار في علم الزلازل منذ بدايات الرصد الزلزالي وتعد علاقة التكرارية الزلزالية التي أوجدها غوتنبرغ وريختر في خمسينيات القرن الماضي لحساب زمن العودة من أشهر تطبيقاته.

● **التعلم العميق** خاصة الشبكات العصبية الالتفافية CNN: convolutional neural networks، فهي نوع من الشبكات العصبية العميقة ومصممة بطريقة خاصة لمعالجة البيانات ذات البنية الشبكية، مثل: الصور ومقاطع الفيديو والإشارات الصوتية وحتى بعض أنواع البيانات النصية، فهي ممتازة في التعرف على الأنماط داخل الصور، مثل: الخطوط، الحواف، الأشكال، والوجوه. كما يمكن استخدام شبكات الذاكرة طويلة وقصيرة المدى LSTM: long short-term memory، وهي نوع من الشبكات العصبية المتكررة recurrent neural networks – RNN، تم تصميمها خصيصاً لمعالجة البيانات المتسلسلة التي تعتمد على الزمن أو الترتيب مثل الصوت واللغة وتحويل النصوص إلى صوت. تتميز هذه النماذج بقدرتها على التعامل مع بيانات متتابعة ومعقدة، وهو ما يجعلها مناسبة للتعامل مع الإشارات الزلزالية والسلاسل الزمنية المرتبطة بها.

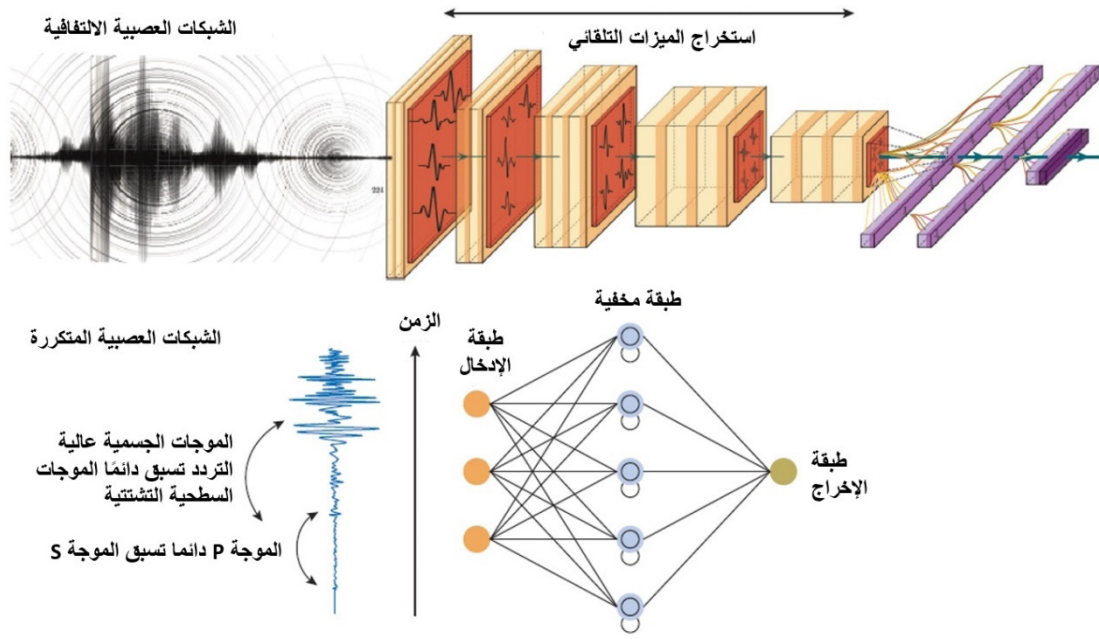


يُعدّ كشف الإشارات الموجية المتولدة عن الزلازل وتحديد أطوار الموجات الزلزالية مهمتين صعبتين في معالجة تسجيلات مراكز الرصد التي عادة ما تكون مترافقة مع ضجيج ضوضائي قوي، وكذلك في رصد ومراقبة الهزات المكروية الدقيقة. وقد قدم [7] نموذجاً شاملاً للتعلم العميق من أجل الكشف المتزامن عن الزلازل وتحديد الأطوار الموجية. يُحسن تنفيذ هاتين المهمتين المترابطتين معاً أداء النموذج في كل مهمة على حدة من خلال الجمع بين المعلومات في الطور وفي الشكل الموجي الكامل لإشارات الزلازل باستخدام آلية الانتباه الهرمي. أظهرت النتائج أن هذا النموذج يتفوق في الأداء على خوارزميات التعلم العميق السابقة وخوارزميات تحديد الطور والكشف التقليدية. بتطبيق هذا النموذج على 5 أسابيع من البيانات المستمرة والمسجلة خلال زلازل توتوري Tottori عام 2000 في اليابان، أمكن اكتشاف وتحديد موقع البؤرة لضعف عدد الزلازل باستخدام جزء فقط (أقل من ثلث) من محطات الرصد الزلزالي. يلتقط هذا النموذج الطورين P و S بدقة تقترب من عمليات التحديد اليدوية التي يقوم بها المحللون البشريون؛ ومع ذلك، فإن كفاءته وحساسيته العاليتين يمكن أن تؤديان إلى اكتشاف وتوصيف هزات أرضية أكثر عدداً وأصغر قوة. إن هذا النموذج للتعليم العميق يكتشف إشارات الزلازل ويحدد في الوقت نفسه أزمنا وصول أطوار الموجات الزلزالية. لقد أظهر هذا النموذج أداءً ممتازاً بشكل خاص في الحالات ذات الضوضاء العالية والمهام الصعبة المتمثلة في التقاط وصول الموجة S.



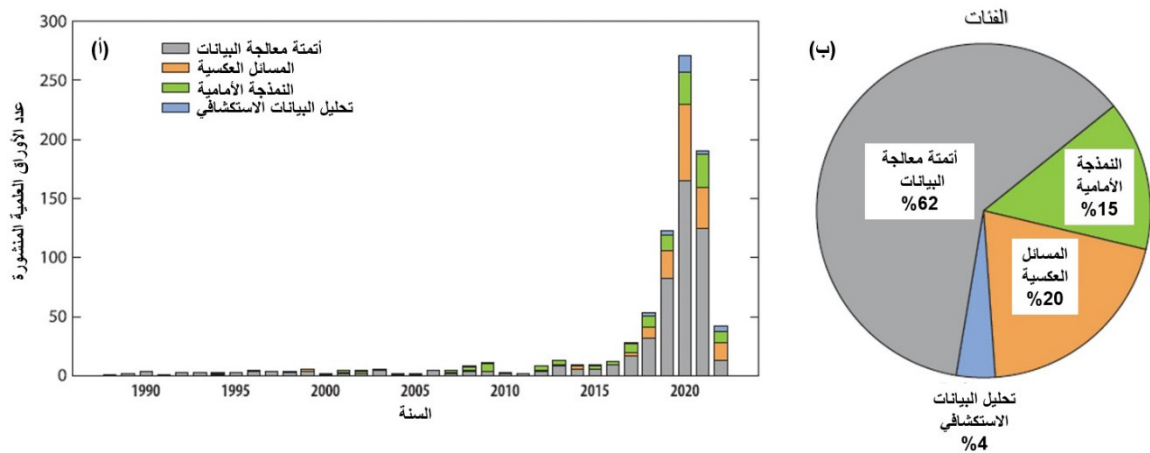
الشكل 1. يمكن أن يقود التعليم العميق للبيانات الزلزالية إلى إمكانيات جديدة في علم الزلازل [7].

تم نشر العديد من الدراسات العلمية التي استخدمت الشبكات العصبية لتحليل النشاط الزلزالي، مثل: نماذج تعتمد الشبكات العصبية الالتفافية CNN للكشف الدقيق عن الموجات الأولية، كما تم استخدام الشبكة LSTM لتحليل السلاسل الزمنية للهزات الأرضية، واستخدمت نماذج تصنف الاهتزازات البركانية بناءً على أنماط فريدة من الإشارات. وقد أظهرت هذه الأبحاث قدرة الذكاء الاصطناعي على تحسين دقة التحليل وتقصير الزمن اللازم لاكتشاف الأحداث الزلزالية، كما تعمل بعض المؤسسات البحثية على تطوير أنظمة إنذار مبكر تعتمد على خوارزميات الذكاء الاصطناعي مثل التعلم العميق لتسريع تحليل المعلومات الواردة من آلاف المجسات الزلزالية. تُظهر هذه المشاريع قدرة الذكاء الاصطناعي على اكتشاف الزلازل بشكل أسرع وأكثر موثوقية مقارنة بالأنظمة التقليدية. وعندما طُبِّقت الشبكات العصبية للمرة الأولى في علم الزلازل في أواخر ثمانينيات القرن الماضي، كان التركيز منصباً على مهام التصنيف في المعالجة الآلية للبيانات باستخدام أساليب خاضعة للإشراف، وعلى الرغم من



الشكل 2. تمثيل تخطيطي للشبكات العصبية التلافيفية والشبكات العصبية المتكررة المكونة من طبقات متعددة. يُمكن تكوين الوصلات بين الخلايا العصبية والعمليات المُنفَّذة لكل طبقة ضمن هذه الشبكات من تحقيق قدرات مُحددة، مثل: استخراج السمات تلقائياً ونمذجة التبعية الزمنية للإشارات الزلزالية [7].

أن مهام معالجة البيانات لا تزال تُشكّل جزءاً كبيراً من أحدث موجة من تطبيقات التعلم الآلي في علم الزلازل، إلا أن المشكلات العكسية تتزايد بسرعة. يُظهر الشكل 3 انخفاضاً واضحاً في إجمالي عدد المنشورات العلمية التي تُطور أساليب التعلم الآلي في مجال الزلازل في العامين الأخيرين. يُمثّل إحصاء عام 2022 جزءاً فقط من العام. كما يشمل الشكل المنشورات المتعلقة بتطوير نماذج التعلم الآلي الزلزالية، وليس تطبيقات التعلم الآلي. ويبدو أن الانخفاض في عدد نماذج التعلم الآلي المنشورة في علم الزلازل في عام 2021 حقيقي، ويمكن ملاحظته أيضاً في عدد العروض التقديمية في المؤتمرات [7].



الشكل 3. (أ) تزايد عدد المنشورات العلمية التي تُطور أساليب التعلم الآلي في مجال الزلازل والتي نُشرت بين يناير 1988 ومايو 2022. الأشرطة مُمَرَّزة بالألوان بناءً على فئة المهام الزلزالية المنجزة. (ب) يُظهر الرسم البياني الدائري حصة المهام الزلزالية لتطبيقات التعلم الآلي [7].

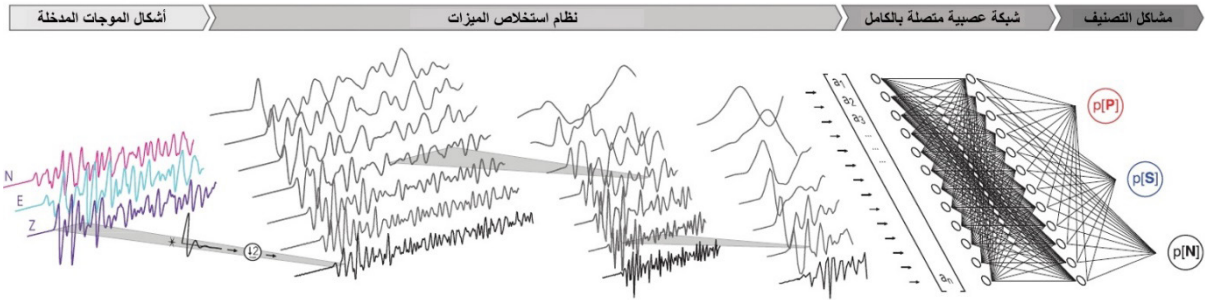
التطبيقات العملية للذكاء الاصطناعي في علم الزلازل

1. التنبؤ بالزلازل باستخدام النماذج الذكية: يُعد التنبؤ الدقيق بوقت ومكان وشدة الزلازل بمثابة «الحلم» العلمي الذي يسعى الباحثون لتحقيقه. وقد أسهم الذكاء الاصطناعي في تطوير نماذج تحليلية تتعلم من بيانات تاريخية ضخمة تشمل: نشاط الصفائح التكتونية، تسجيلات الهزات المكروية الصغيرة microseismicity، تغيرات الإجهاد في طبقات القشرة الأرضية، تسجيلات الزلازل السابقة [8، 9، 10]. تعتمد النماذج العميقة على تحليل السلاسل الزمنية لاكتشاف الأنماط التي تسبق النشاط الزلزالي الكبير، وقد نجحت بعض الدراسات التجريبية في رصد إشارات ضعيفة لم تكن مرئية بوضوح سابقاً. ومع ذلك، لا يزال التنبؤ بالزلازل بدقة عالية أمراً بعيد المنال، لكن التحسن مستمر مع زيادة حجم البيانات ونماذج الذكاء المتقدمة.

2. اكتشاف الأحداث الزلزالية تلقائياً **event detection**: تقوم شبكات رصد الزلازل بتسجيل آلاف الإشارات يومياً، وقد يكون معظمها ناتجاً عن ضوضاء غير زلزالية مثل النشاط البشري أو الرياح أو حركة المركبات. وهنا يؤدي الذكاء الاصطناعي دوراً محورياً، حيث يمكن لنماذج مثل CNN و LSTM التمييز بين الإشارات الزلزالية الحقيقية والضوضاء بدقة أعلى من التقنيات التقليدية. وقد ساعدت هذه التطبيقات في اكتشاف الهزات الصغيرة جداً التي قد لا تُلتقط بالطرق العادية وساهمت في تقليل الوقت اللازم لتحليل البيانات [11، 12]، كما أنها قامت بتنبيه الباحثين فور حدوث نشاط غير طبيعي.

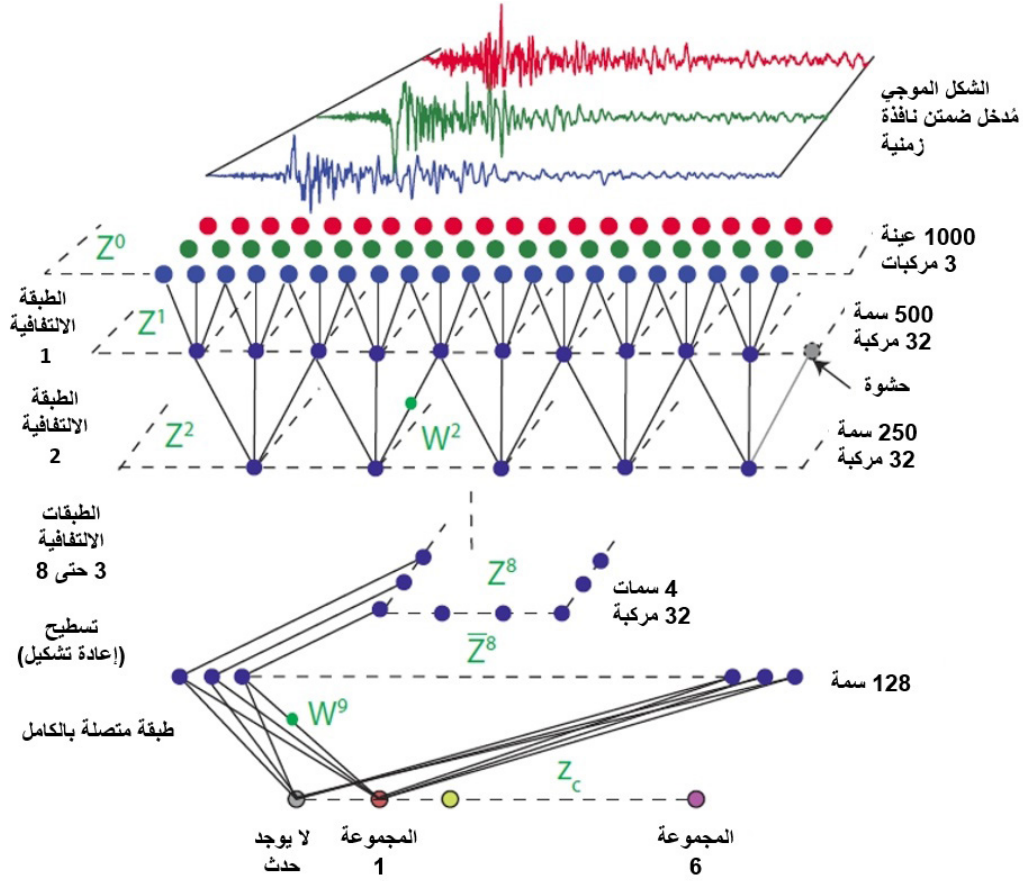
3. تحليل الموجات الزلزالية وتصنيفها: تعد الموجات الزلزالية مصدراً ثرياً للمعلومات، لكن تحليلها يتطلب معالجة معقدة للبيانات، وقد أثبتت خوارزميات التعلم العميق قدرتها على:

- تحديد نوع الموجة طولية P أم عرضية S أم سطحية Rayleigh؟
- قياس زمن الوصول بدقة.
- استخراج السمات المهمة من الإشارة دون تدخل بشري.



الشكل 4. رسم تخطيطي لشبكة عصبية تلافيفية CNN للكشف الطوري المعمم. يتم دمج نظام استخلاص الميزات الالتفافية مع شبكة عصبية متصلة بالكامل (NN) لإنتاج احتمالات الفئات لموجات P، وموجات S، والضوضاء [4].

وتُستخدم الشبكات الالتفافية بشكل خاص في تحديد ملامح الإشارات عبر تحويلها إلى تمثيلات طيفية، ما يساعد في فهم آليات حدوث الزلازل. فعلى مدار العقود الماضية، ازداد حجم البيانات الزلزالية بشكل كبير، مما استدعى خوارزميات فعالة للكشف عن الزلازل وتحديد مواقعها بشكل موثوق. وتعتمد أحدث الطرق المتطورة حالياً على مسح الكم الهائل من التسجيلات الزلزالية المستمرة، بحثاً عن إشارات زلزالية متكررة. وفي هذا المجال، يمكن الاستفادة من أحدث التطورات في الذكاء الاصطناعي، مثل الشبكة الالتفافية السريعة ConvNetQuake، وهي شبكة عصبية تلافيفية عالية التوسع للكشف عن الزلازل وتحديد مواقعها من شكل موجي واحد. وقد تم تطبيق هذه التقنية في دراسة النشاط الزلزالي المُتحرّض في أوكلاهوما (الولايات المتحدة الأمريكية) في العام 2018، حيث تم اكتشاف زلازل أكثر بعشرين ضعفاً مما سبق أن صنفته هيئة المسح الجيولوجي في أوكلاهوما وبشكل أسرع بكثير من الطرق المُستخدمة في تلك الهيئة [5].



الشكل 5. كيفية تعلم الشبكة العصبية التعرف على أكثر الأنماط تكراراً من المدخلات المكونة من 1000 شكل موجي مسجلة بثلاث قنوات. تتكون كل طبقة الالتفافية من 32 وحدة، تعمل على تقليل حجم البيانات بمقدار النصف. بعد الالتفاف الثامن، تُدمج السمات في متجه أحادي البعد مكون من 128 سمة [5].

ومع تزايد عدد أجهزة الرصد الزلزالي، تزداد الصعوبة على المحللين في تحديد أطوار الأمواج الزلزالية بشكل يدوي ليشمل جميع التسجيلات، وتعد هذه الجهود أساسية في عملية رصد الزلازل. وعلى الرغم من السنوات الطويلة من التحسينات في التحديد التلقائي لأطوار الأمواج الزلزالية، إلا أنه ما يزال يصعب مضاهاة أداء المحللين ذوي الخبرة. وهناك مشكلة أكثر دقة تتمثل في أن محلي الزلازل المختلفين قد يختارون أطوار الأمواج الزلزالية بشكل مختلف، مما قد يدخل انحرافاً في مواقع الزلازل، وقد قدم [6] طريقة لتحديد أزمدة الوصول تعتمد على الشبكات العصبية العميقة، وتُسمى "PhaseNet"، والتي تلتقط أزمدة وصول كلٍّ من الموجتين P و S. لقد أحرزت الشبكات العصبية العميقة مؤخراً تقدماً سريعاً في تعلم سمات الموجات الزلزالية، ومع التدريب الكافي، حققت أداءً خارقاً في العديد من التطبيقات. تستخدم طريقة PhaseNet أشكال الموجات الزلزالية ثلاثية المركبات كمدخلات، وتُولد توزيعات احتمالية لوصولات P و S والضوضاء كمخرجات. تقوم طريقة PhaseNet بتصميم نموذج بحيث توفر ذروة الاحتمال أزمدة وصول دقيقة لكلٍّ من الموجتين P و S، ولديه القدرة على زيادة عدد عمليات رصد الموجة S بشكل كبير. سيمكّن هذا النموذج من تحسين تحديد موقع البؤرة وسرعة موجة القص. يتم تدريب PhaseNet على مجموعة هائلة من البيانات المتاحة التي وفرها محللون من مركز بيانات الزلازل في شمال كاليفورنيا، والتي تُحدد أزمدة وصول P و S. وقد احتوت مجموعة البيانات على أكثر من سبعة ملايين عينة من الموجات المستخرجة من أكثر من ثلاثين عاماً من تسجيلات الزلازل. لقد حقق PhaseNet دقة التقاط ومعدل استرجاع أعلى بكثير من الطرق الأخرى.

4. **مراقبة البراكين والنشاط الزلزالي المصاحب لها:** أثبتت تقنيات الذكاء الاصطناعي فعاليتها في تحليل الاهتزازات الدقيقة (المكروية) والتي تُسجل بشكل مستمر حول البراكين، والتي قد تشير إلى قرب حدوث نشاط انفجاري وثوران للبركان. ومن خلال تحليل التغيرات الطفيفة في المحتوى الطيفي، يمكن للنماذج الذكية أن تقوم بالكشف عن الصعود التدريجي للصهارة مما يساعد في التنبؤ بالنشاط البركاني بدقة أعلى، كما أنها تساعد في تصنيف الهزات المسجلة إلى الأنواع: بركانية، تكتونية، حرارية وغيرها.

5. **تحسين خرائط المخاطر الزلزالية:** يُستخدم الذكاء الاصطناعي بشكل واسع في تحسين خرائط المخاطر الزلزالية لأنه قادر على تحليل كميات ضخمة من البيانات الجيولوجية big data والهزات الأرضية واستخلاص أنماط يصعب على التحليلات التقليدية اكتشافها. تستخدم خرائط

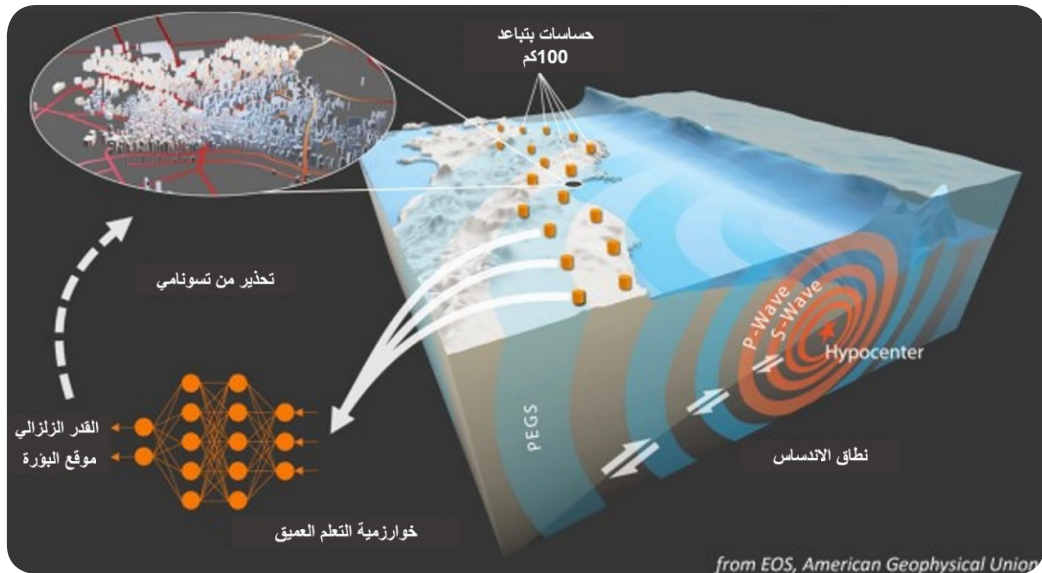
المخاطر الزلزالية لتحديد أكثر المناطق تعرضاً للهزات الأرضية، وقد أصبح الذكاء الاصطناعي جزءاً مهماً في تحديثها وتطويرها اعتماداً على البيانات الجيولوجية المتوفرة وسجل الزلازل التاريخية وكثافة السكان، ونوع التربة والصخور. يمكن للنماذج الذكية تحليل هذه العوامل المتداخلة لتوفير خرائط أكثر دقة تساعد في التخطيط الحضري وتطوير البنية التحتية. وهذه الخرائط أسرع في التحديث وأقرب للواقع، وهي متعددة المصادر وقابلة للتنبؤ في مستويات الخطورة.

6. **أنظمة الإنذار المبكر الزلزالي:** تقوم أنظمة الإنذار المبكر على مبدأ اكتشاف الموجة الأولية (P) قبل وصول أكثر الموجات تدميراً؛ أي الموجة العرضية (S) أو الموجات السطحية، ومع اعتماد الذكاء الاصطناعي على تحليل سريع وذكي للإشارات، أصبح بإمكان هذه الأنظمة أن تقوم بما يلي:

- التعرف على بداية الهزة خلال أجزاء من الثانية.
- إرسال إنذار فوري للمدن والمرافق الحيوية والمنشآت الحساسة مثل المفاعلات النووية، حيث تبدأ بناء على هذا الإنذار إجراءات التوقف الآمن لهذه المفاعلات بشكل آلي.
- تقليل زمن الاستجابة وإنقاذ الأرواح من خلال إجراءات السلامة والأمان على مستوى الأفراد والمؤسسات.

وقد بدأت العديد من الدول في إدماج تقنيات الذكاء الاصطناعي في شبكات الإنذار المبكر لتحسين دقتها وتقليل الأخطاء [13].

7. **إدارة الكوارث الزلزالية:** يؤدي الذكاء الاصطناعي دوراً مهماً في إدارة الكوارث عموماً من خلال القدرة على تحليل كمية كبيرة من البيانات بشكل سريع ودقيق، وتقديم توجيهات دقيقة لاتخاذ القرارات، واقتراح الحلول الفعالة لتقليل الخسائر، وزيادة الكفاءة في إدارة الحالات المعقدة الناجمة عن الكوارث؛ لذا فمن الممكن استخدام أدواته مثل تعلم الآلة والشبكات العصبية، لتحليل المعلومات والبيانات لكونها أدوات فعالة تتعلق بالمخاطر والكوارث، وتوقع السيناريوهات المحتملة، إضافة إلى ذلك، يمكن استخدام الذكاء الاصطناعي لتطوير نماذج تنبؤية لتقدير المخاطر المحتملة، وتحسين استجابة المجتمعات والمؤسسات للمخاطر الزلزالية المحتملة بفضل هذه القدرات. كما يمكن للذكاء الاصطناعي أن يؤدي دوراً حيوياً في تحسين إدارة الكوارث لتقليل التأثيرات السلبية المحتملة لهذه الكوارث [9, 10].



الشكل 6. الذكاء الاصطناعي، والكشف عن الزلازل، والتحذير من التسونامي.

التحديات والقيود

رغم التطور الملحوظ في تطبيقات الذكاء الاصطناعي في علم الزلازل، إلا أنه ما تزال هذه التطبيقات تواجه عدداً من العقبات:

1. **نقص البيانات عالية الجودة:** تحتاج النماذج العميقة إلى توفر كميات ضخمة من البيانات المدققة، وهو أمر يعتمد على جودة شبكات الرصد الزلزالي مثل استخدام محطات الرصد عريضة الحزمة، وأن تؤمن هذه الشبكات تغطية جغرافية واسعة وهذا قد لا يتوافر في العديد من مناطق العالم.

2. **التعقيد الجيولوجي والتكتوني للزلازل:** لا تتبع الزلازل نمطاً بسيطاً يمكن التنبؤ به بسهولة، وذلك لأنها تتولد في ظروف تكتونية واسعة الاختلاف، فزلازل اليابان مثلاً تولد نتيجة تصادم الصفائح التي تسبب تكتونيك الانضغاط أما زلازل كاليفورنيا، فمعظمها يتولد نتيجة تكتونيك الانزلاق الأفقي لصدع سان أندرياس. كما أن النشاط البركاني يولد هزات أرضية ذات أشكال موجية أكثر تعقيداً وتختلف عن نماذج الهزات التكتونية؛ لذلك فإن هذا التعقيد الجيولوجي والتكتوني يحد من دقة النماذج الذكية المستخدمة.

3. **التفسير العلمي للنتائج:** تعتمد معظم نماذج التعلم العميق على "الصندوق الأسود"، ما يجعل تفسير قراراتها أمراً معقداً.

4. **الحاجة إلى دمج النماذج الفيزيائية:** يرى العديد من العلماء أنه لا يمكن الاعتماد حصرياً على الذكاء الاصطناعي، بل يجب دمجه مع نماذج جيولوجية وفيزيائية كلاسيكية.

الآفاق المستقبلية

يُتوقع أن يؤدي الذكاء الاصطناعي دوراً أكبر في علم الزلازل خلال العقد القادم نتيجة التطور المستمر في أجهزة الرصد وأجهزة الاستشعار الذكية واستخدام تقنيات الاستشعار عن بُعد التي توفرها الأقمار الصناعية بشكل متزايد وبتغطية كافية لمناطق واسعة من دول العالم ما يسمح برصد وتحليل أية تشوهات تحدث على سطح الأرض ومرتبطة بالنشاط الزلزالي. وإضافة إلى ذلك فإن الذكاء الاصطناعي يقدم أدوات وتقنيات فعالة في معالجة البيانات الضخمة التي تراكمتها شبكات الرصد الزلزالي كاستخدام النماذج المتقدمة مثل نموذج transformers [7] للتعامل مع الإشارات الزلزالية. كما يُرجح أن تصبح أنظمة الإنذار المبكر أكثر ذكاءً وقدرة على التكيف مع أنواع مختلفة من النشاط الزلزالي، إضافة إلى توسيع استخدام الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بما بعد الزلازل وتحليل الأضرار المحتملة وإدارة الكوارث الزلزالية.

الخاتمة



يمثل استخدام الذكاء الاصطناعي في علم الزلازل نقطة تحول كمية ونوعية، حيث إنه وفر أدوات قوية لتحليل كميات كبيرة من البيانات الزلزالية المعقدة؛ مما يساهم في الكشف المبكر عن الزلازل المدمرة وتجنب أضرارها. ورغم أن التنبؤ الدقيق بوقت ومكان حدوث الزلازل ما يزال بعيد المنال، إلا أن الذكاء الاصطناعي أثبت فعاليته في تحسين أنظمة الرصد وتحليل الموجات الزلزالية وتطوير نماذج الإنذار المبكر وغيرها. وفي الحين الذي تستمر فيه الأبحاث العلمية في هذا المجال، فمن المتوقع أن تتعمق الشراكة بين علوم الأرض وعموماً وعلم الزلازل خصوصاً مع تقنيات الذكاء الاصطناعي؛ مما يفتح آفاقاً جديدة لفهم الظواهر الجيولوجية والتكتونية ويساهم بفاعلية أكبر في حماية الأرواح والممتلكات من المخاطر الزلزالية.

المراجع

- [1] Shearer, P. (2019). Introduction to Seismology. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316877111>.
- [2] Zhang, Ying & Congcong, Wen & Didier, Sornette & Chengxiang, Zhan. (2025). Integrating Artificial Intelligence and Geophysical Insights for Earthquake Forecasting: A Review. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.12161>.
- [3] Rouet-Leduc, Bertrand et al. (2017). Machine Learning Predicts Laboratory Earthquakes. Geophysical Research Letters. 44. <https://doi.org/10.1002/2017gl074677>.
- [4] Ross, Zachary & Meier, Men-Andrin & Hauksson, Egill & Heaton, Thomas. (2018). Generalized Seismic Phase Detection with Deep Learning. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1805.01075>.
- [5] Perol, T., et al. (2018). Convolutional Neural Network for Earthquake Detection and Location. Science Advances, 4(2), <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700578>

- [6] Zhu, W., & Beroza, G. C. (2019). PhaseNet: A Deep-Neural-Network-based Seismic Arrival-time Picking Method. *Geophysical Journal International*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.03211>
- [7] Mousavi, S. Mostafa & Beroza, Gregory. (2022). Machine Learning in Earthquake Seismology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 51. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071822-100323>.
- [8] Kong, Qingkai et al. (2016). MyShake: A smartphone seismic network for earthquake early warning and beyond. *Science Advances*. 2. e1501055-e1501055. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501055>.
- [9] Abid S. K. et al. (2021). "Toward an Integrated Disaster Management Approach: How Artificial Intelligence Can Boost Disaster Management," *Sustainability*, vol. 13, no. 22, p. 12560, Nov. 2021, <https://doi.org/10.3390/su132212560>.
- [10] Bari L. et al. (2023). "Potential Use of Artificial Intelligence (AI) in Disaster Risk and Emergency Health Management: A Critical Appraisal on Environmental Health," *Environmental Health Insights*, vol. 17, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1177/11786302231217808>
- [11] Yoon, C. E., et al. (2019). Earthquake Detection through Locally Learned Matching Filters. *Science Advances*.
- [12] Arrowsmith, Stephen et al. (2022). Big Data Seismology. *Reviews of Geophysics*. 60. <https://doi.org/10.1029/2021RG000769>.
- [13] M. Saad, Omar et al. (2020). Deep Learning Approach for Earthquake Parameters Classification in Earthquake Early Warning System. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. PP. 1-5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.2998580>.

Using Artificial Intelligence to Analyze and Understand Seismic Phenomena: Challenges and Future Prospects

Abstract: Artificial intelligence (AI) has permeated all aspects of life, from medicine and engineering to modern technologies, achieving remarkable success in numerous fields. This has enabled AI to delve into the depths of natural phenomena that still conceal their secrets from humanity, leaving us vulnerable to their dangers and suffering the devastating consequences of disasters like earthquakes. Seismology has benefited from modern scientific and technological advancements, making significant strides in the digital world. Monitoring equipment has evolved into highly sensitive digital forms, creating fertile ground for the application of AI tools and promising immense potential for mitigating the impact of disasters and even preventing all the harmful effects of earthquakes

Keywords: Earthquakes, Artificial Intelligence, Seismic Loss Mitigation



خلايا الوقود

ملخص

على الرغم من طابعها الحديث، إلا أن خلايا الوقود معروفة بالفعل منذ أكثر من 150 عاماً. تُعدّ خلايا الوقود التقنية الوحيدة المتاحة لتحويل الطاقة الكيميائية الموجودة في الهيدروجين إلى طاقة كهربائية مباشرةً دون إنتاج غازات دفيئة في موقع التحويل داخل المركبة. ومن أهم ما شجع الحكومات العالمية على دعم الأبحاث في هذا المجال هو بساطة تصميم خلايا الوقود وسهولة صيانتها، فضلاً عن توليدها لطاقة نظيفة غير ملوثة للبيئة، والأهم من ذلك أنها تعد إحدى التقنيات الرئيسية لتمكين اقتصاد الهيدروجين في المستقبل. ولكن من جهة أخرى تعاني من غلاء ثمن المواد الداخلة في تركيبها وخاصة الأغشية البوليميرية والحفازات المستعملة، كما تعاني من وجوب استعمال وقود عالي النقاوة لزيادة عمر الحفاز. سنلقي الضوء في هذه المقالة على خلايا الوقود من حيث التطور التاريخي والأنواع، والتحديات، والتطبيقات ومستقبل هذه الخلايا وإعادة تدويرها.

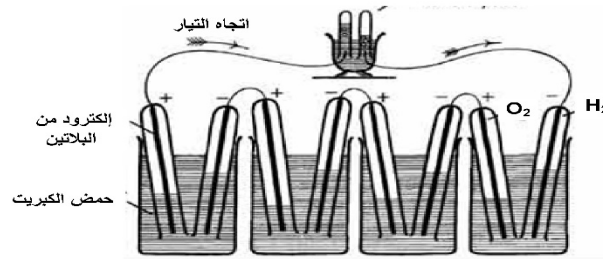
الكلمات المفتاحية: خلية الوقود؛ طاقة؛ هيدروجين؛ أكسجين؛ أغشية تبادل البروتون؛ خلية الوقود الحمضية؛ المحفزات؛ الأقطاب الكهربائية.

مقدمة

يمكن تعريف خلية الوقود بأنها جهاز يقوم بتحويل الطاقة الكيميائية لأكسدة الوقود (هيدروجين) بالموكسد (الأكسجين) إلى طاقة كهربائية وحرارة دون أي نواتج ملوثة للبيئة. وتعد خلايا الوقود أجهزة تحويل للطاقة لا تخزين لها، وبالتالي لا داعي لإعادة شحن الخلية، كما يخزن الوقود بشكل مستقل عن الخلية، وهذا ما يميزها عن البطاريات أو المدخرات، إذ يكمن الاختلاف في أن المواد الكيميائية الداخلة في التفاعل لتوليد الكهرباء هي جزء من تركيب البطارية وتوجد في داخلها، وبانتهاء المواد الكيميائية هذه فلا بد من استبدالها أو إعادة شحنها مرة أخرى، في حين أن خلايا الوقود لا يمكن أن تنتهي فهي تعمل باستمرار لأن مصدر المواد الكيميائية خارجي. وتختلف خلايا الوقود عن محرك الاحتراق الداخلي الذي يستعمل الوقود الأحفوري أو ذاك الذي يستعمل الهيدروجين كوقود، بأنه لا يوجد ملوثات ناتجة عن احتراق الوقود، فضلاً عن هدوء تشغيل خلية الوقود وقلة عدد مرات الصيانة التي تحتاجها.

تاريخ خلايا الوقود

ثمّة بعض الجدل حول من اكتشف مبدأ خلايا الوقود. وفقاً لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة الأمريكية، كان الكيميائي الألماني كريستيان فريدريش شونباين Christian Friedrich Schönbein هو الذي أجرى في عام 1838 أول بحث علمي حول ظاهرة خلية الوقود، في حين تؤكد معظم المراجع العلمية أن السير ويليام روبرت جروف Sir William Robert Grove هو الذي قدم مفهوم خلية وقود الهيدروجين؛ إذ اكتشف جروف أنه بغمر قطبين من البلاتين من أحد الطرفين في محلول حمض الكبريت والطرفان الآخران موجودان في خزانين مغلقين ومنفصلين من الأكسجين والهيدروجين، يتدفق تيار ثابت بين الأقطاب الكهربائية (الشكل 1)، وقد لاحظ جروف أن مستوى الماء يرتفع في كلا الخزانين مع تدفق التيار.



الشكل 1. بطارية الغاز للسير ويليام روبرت جروف: أول خلية وقود.

كانت الخطوة التالية هي إدراك أن الجمع بين أزواج من الأقطاب الكهربائية الموصولة على التسلسل ينتج عنه انخفاض أعلى في الجهد، وبالتالي اختراع ما أسماه بطارية الغاز؛ أي خلية الوقود الأولى. وفي عام 1893، حدد فريدريش فيلهلم أوستوالد تجريبياً الترابط بين المكونات المختلفة لخلية الوقود: الأقطاب الكهربائية، والإلكتروليت، والعوامل المؤكسدة والمراجعة، والأنيونات والكاتيونات. قام أوستوالد، بعمله الرائد المتعلق بالتفاعلات الفيزيائية والكيميائية في خلايا الوقود، بحل لغز بطارية غاز جروف، وكان بحثه أساساً لمزيد من التطوير في هذا المجال. وفي عام 1896، طور ويليام دبليو جاك William W. Jacques أول خلية وقود ذات تطبيقات عملية، وبعدها في عام 1900، استعمل والتر نيرنست Walther Nernst الزركونيوم للمرة الأولى كمحلول إلكتروليت صلب، ثم بدأت أنواع مختلفة لخلايا الوقود بالظهور في عام 1921 عندما بنى إميل بور (Emil Baur) أول خلية وقود كربونية منصهرة، وأجرى تجارب على إلكتروليتات أكسيد صلب في درجة حرارة عالية خلال الثلاثينيات. وفي أوائل عام 1933، طور فرانسيس بيكون Thomas Francis Bacon أول خلية وقود مشغلة بالهيدروجين والأكسجين وذات تطبيق عملي، ثم بدأ ببيكون عمله بفحص خلايا الوقود القلوية، وقام في عام 1939 ببناء خلية بها أقطاب من النيكل تعمل بضغط عالٍ (200 ضغط جوي) لمنع الإلكتروليت من سد مسام الأقطاب الكهربائية، كما طور بيكون خلال الحرب العالمية الثانية، خلية وقود لاستعمالها في غواصات البحرية الملكية. وقدم في عام 1958 إلى المؤسسة الوطنية البريطانية لتطوير الأبحاث خلية وقود قلووية بقطر 25.4 مم. وعلى الرغم من تكلفتها الباهظة، أثبتت خلايا وقود بيكون أنها موثوقة بدرجة كافية لجذب انتباه شركة برات آند ويتني (Pratt & Whitney)، الشركة التي حصلت على براءة اختراع عمل بيكون فيما يتعلق بخلية الوقود المستعملة في مركبة أبولو الفضائية. تركزت أبحاث بيكون على استعمال معادن شائعة (معادن غير ثمينة)، وزيادة العمر الافتراضي للخلية والحصول على كفاءة أعلى، وتكامل عمله بالنجاح في عام 1959، وبدعم من شركة مارشال الفضائية (Marshall Aerospace)، حيث صنع

خلية وقود مكونة من 40 خلية بقدرة 5 كيلو واط وكفاءة 60%. وفي عام 1950، بدأت تتوافر مادة تسمى تفلون (بولي تترافلورو إيثيلين أو PTFE) واستعملت للمرة الأولى مرة في تكوين مختلف أنواع خلايا الوقود، مما ساعد في تطوير خلايا الوقود إلى شكلها الحالي. وفي عام 1955 قام توماس جروب Thomas Grubb، الكيميائي الذي عمل في شركة جنرال إلكتريك General Electric، بتعديل التصميم الأصلي لخلية الوقود، فاستعمل غشاء تبادل أيوني مصنوعاً من بوليسترين المسلفن كإلكتروليت. وبعد ثلاث سنوات، ابتكر كيميائي آخر من شركة جنرال إلكتريك، ليونارد نيدرناش Leonard Niedrach، طريقة لترسيب البلاتين على الغشاء، ليعمل كمحفز لتفاعلات أكسدة الهيدروجين وإرجاع الأكسجين. وفي عام 1959، قام فريق بقيادة هاري إيريج Harry Ihrig ببناء خلية وقود بقدرة 15 كيلو واط لجرار من شركة أليس تشالمرز Allis-Chalmers. تركزت الجهود في أوائل الستينيات على خلية الوقود ذات الإلكتروليت الحمضي وحفاز البلاتين لتشغيلها في درجات حرارة عالية 150-200 سلزيوس، واستعملت الأملاح المنصهرة في خلايا أخرى وصلت درجة حرارة التشغيل فيها إلى 650 سلزيوس. وبعدها في عام 1961 ابتكر إلمور G.V. Elmore وتانر H.A. Tanner خلية وقود حمض الفوسفور التي يتكون المحلول الكهربائي فيها من خليط من 35% من حمض الفوسفور و65% من غبار السليكون الملتصق بالتفلون. وفي عام 1962، عمل ويزبارت J. Weissbart وروكا R. Ruka في خلية وقود عند درجة حرارة تشغيل تبلغ 1000 سلزيوس. وفي عام 1965، اختبر مختبر الأبحاث والتطوير الأمريكي العديد من خلايا وقود الكربونات المنصهرة المصنعة من قبل شركة تكساس Instruments. وقد تركز الاهتمام منذ عام 1970 على تطوير خلايا الوقود من حيث تخفيض قيود الانتشار في الأقطاب الكهربائية للحصول على مساحة أكبر من العمل، وتخفيض تكاليف المحفزات، وزيادة الأداء وإطالة العمر الخدمي. وقد جعلت الكفاءة العالية، مع الانبعاثات المنخفضة للغازات الضارة في الغلاف الجوي، خلايا الوقود مرشحة بقوة لثورة في مجال توليد الطاقة الكهربائية.

مكونات خلية الوقود ومبدأ عملها وأنواعها

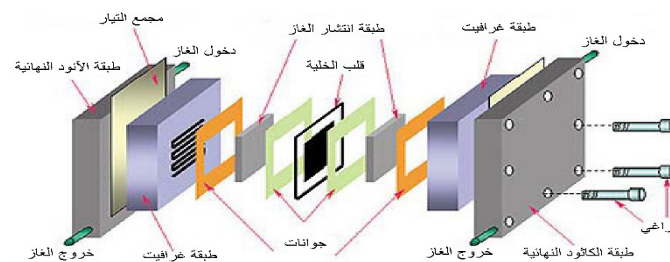
نظراً لأن خلية الوقود تعمل بجهد منخفض؛ أي أقل من 1 فولط، فمن المعتاد رفع الجهد إلى المستوى المطلوب بتوصيل الخلايا كهربائياً على التسلسل لتشكيل «كدسة» كما في الشكل 2.



الشكل 2. كدسة خلايا الوقود من شركة h2planet باستطاعة 220 واط.

ثمة عدد من التصميمات المختلفة لكدس خلية الوقود، ولكن في كل حالة تتكون الخلية الأساسية من مكونات محددة مشتركة. ترد المكونات الفردية لخلية الوقود ذات الغشاء البوليميري على سبيل المثال في الشكل 3. يتكون قلب خلية الوقود MEA والجزء المسؤول عن أكثر من 70% من التكلفة الإجمالية لها من غشاء بوليميري إلكتروليتي وقطبين موجب وسالب (أنود وكاثود) مطليين بطبقة الحفاز، وطبقات مساعدة لانتشار الغازات في كل من الأنود والكاثود. تتحدد نسبة تحميل المعادن الثمينة بكمية الحفاز في وحدة المساحة للغشاء ويمكن أن تختلف بين 5-20% وزناً،

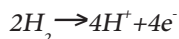
اعتماداً على متطلبات التطبيق. توفر الجوانات على جانبي قلب الخلية سكرّاً غازياً محكماً بين قنوات التدفق والغشاء البوليميري عند الضغط. يمنع هذا السكر الغازات المتفاعلة من التسرب من الخلية أو العبور من قطب إلى آخر. غالباً ما تصنع هذه الجوانات من بولي تترافلورو إيثيلين. توصل قنوات تدفق الغازات المتفاعلة إلى طبقة انتشار الغاز، ويجب أن تكون موصلة حرارياً وكهربائياً ولذلك تصنع من الغرافيت. يصنع مجمع التيار من النحاس المطلي بالذهب لمنع التآكل، ويتوضع قبل قنوات التدفق المصنوعة من الغرافيت، ويوصل مجمع التيار إلى الجهاز المطلوب لاختبار خلية الوقود أو لأخذ الخرج الكهربائي من الخلية. أخيراً، تجمع المكونات السابقة بطبقة نهائية تحتوي على مداخل ومخارج للغازات وتمنع تسرب الغازات من الخلية وتقلل من مقاومة الاتصال.



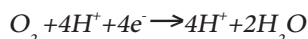
الشكل 3. مكونات خلية وقود أحادية.

من الضروري مراعاة التفاعل الذي يحدث عند كل قطب كهربائي في خلية الوقود لفهم كيف ينتج التفاعل بين الهيدروجين والأكسجين تياراً كهربائياً. تختلف هذه التفاعلات باختلاف نوع خلايا الوقود، ولكن من الملائم البدء بخلية قائمة على إلكتروليت حمضي (الشكل 4)، ليس لأن هذا النظام استعمله جروف فحسب بل لأنه الأبسط، وما زال أكثر التطبيقات التجارية اختياراً.

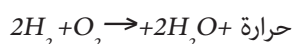
يتأكسد الهيدروجين عند الأنود ويطلق الإلكترونات وينتج أيونات H^+ وطاقة، حسب التفاعل:



يتفاعل الأكسجين عند الكاثود مع الإلكترونات المأخوذة من القطب، وأيونات H^+ من الإلكتروليت، لتكوين الماء حسب التفاعل:

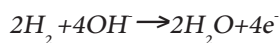


ويكون التفاعل الإجمالي للخلية:

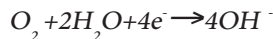
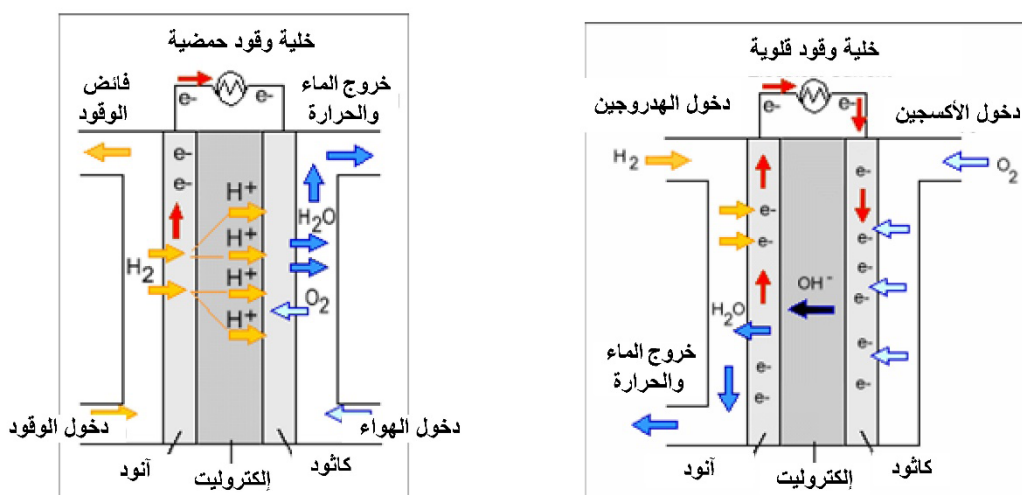


من الواضح، لكي تستمر تفاعلات القطب الكهربائي بشكل متواصل، يجب أن تمر الإلكترونات المنتجة عند القطب السالب عبر دائرة كهربائية إلى القطب الموجب. كما يجب أن تمر أيونات H^+ عبر محلول الإلكتروليت. يمكن تصنيع بعض البوليميرات والمواد الخزفية لتحتوي على أيونات H^+ متحركة. تسمى هذه المواد عموماً «أغشية تبادل البروتون» (PEM)، إذ يُعرف أيون H^+ أيضاً بالبروتون.

في خلية وقود قائمة على إلكتروليت قلوي، يكون التفاعل الكلي لأكسدة الهيدروجين هو نفسه، لكن التفاعلات عند كل قطب كهربائي مختلفة. يتوافر في المحلول القلوي أيونات الهيدروكسيل (OH^-) بشكل حر. تتفاعل هذه الأيونات عند الأنود مع الهيدروجين لتحرير الإلكترونات والطاقة (الحرارة) مع إنتاج الماء:



يتفاعل الأكسجين عند الكاثود (القطب السالب) مع الإلكترونات المأخوذة من القطب، والماء في الإلكتروليت، ليشكل أيونات OH^- جديدة:



الشكل 4. مبدأ عمل كل من خلية الوقود الحمضية والقلوية.

تتوفر في الوقت الحالي ستة أنواع أساسية لخلايا الوقود (الجدول 1)، تختلف فيما بينها بنوع الإلكتروليت والتفاعلات الكيميائية التي تحدث في أقطابها، ولكل منها مزايا ومساوئ، ولم يصل بعضها إلى مرحلة التطبيق التجاري بعد.

الجدول (1): الأنواع الأساسية لخلايا الوقود

الخلية	الإلكترولييت / درجة حرارة التشغيل (سليزيوس)	الوقود/المؤكسد/ الأيون المتحرك	مزايا	مساوي
خلية الكربونات المنصهرة (MCFC)	كربونات الليثيوم والصوديوم والبوتاسيوم المشربة في أكسيد المغنيسيوم/650~	$\text{CO}_3^{2-}/\text{O}_2/\text{H}_2 + \text{CO}_2$	تولد الكثير من الحرارة، كفاءة عالية، لا حاجة لمحفز معدني نبيل (تخفيض التكلفة).	التآكل، تسمم بالكبريت، مشاكل في المناولة بسبب استعمال إلكترولييت سائل، تتطلب التسخين المسبق قبل بدء العمل.
خلية الأكسيد الصلب (SOFC)	أكسيد صلب (الزركونيوم) 1000-500	$\text{O}^{2-}/\text{O}_2 / \text{H}_2 + \text{CO}$	تستعمل أي غاز قابل للاحتراق، تولد الكثير من الحرارة، كفاءة عالية، لا حاجة لمحفزات معدنية نبيلة.	تحتاج إلى تطوير مواد ذات موصلية كافية، تظل صلبة في درجات حرارة التشغيل، حساسية معتدلة للكبريت
الخلية القلوية (AFC)	خليط قلوي منصهر من هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH) 200-50	$\text{OH}^-/\text{O}_2/\text{H}_2$	يمكن العمل في درجات حرارة منخفضة، تشغيل سريع، كفاءة عالية، منخفضة التكاليف، لا يوجد مشاكل تآكل، ووزن وحجم منخفضان.	شديدة الحساسية تجاه ثنائي أكسيد الكربون. يجب أن يكون المؤكسد والوقود نقيين، عمرها قصير، مشاكل في المناولة (إلكترولييت سائل)
خلية غشاء التبادل البروتوني (PEMFC)	غشاء بوليميري 100-30	$\text{H}^+/\text{H}_2/\text{O}_2$ أو الهواء / H^+	تعمل في درجات حرارة منخفضة نسبياً، أكثر أماناً، تنتج جهداً عالياً وكثافة تيار وقوة، ذات تصميم ميكانيكي بسيط.	حساسة لشوائب الهيدروجين، تحتاج إلى وحدات ترطيب للغازات المتفاعلة، تستعمل حفازاً (بلاتينا) وغشاءً (بوليميراً صلباً) باهظي الثمن
خلية حمض الفوسفور (PAFC)	35% حمض و65% غبار سيليكون عالق على لوح تفلون. ~220	H^+/H_2 / الهواء	يمكن استعمال الحرارة المهدرة للتوليد المشترك، تستعمل إلكتروليتاً بخصائص ثابتة، وتطايير منخفض.	تآكل، كبيرة وثقيلة، مشاكل في المناولة (إلكترولييت سائل)، تتطلب التسخين المسبق قبل بدء العمل.
خلية الميثانول المباشر (DMFC)	غشاء بوليميري 90-20	الميثانول/ O_2 / H^+	تستعمل الوقود السائل بشكل مباشر، وإلكتروليتاً صلباً.	كفاءة منخفضة، وتحتاج إلى كميات كبيرة من المحفز (معدن نبيل) للأكسدة الكهربية للميثانول عند الأنود.

التطورات الحديثة في مجال خلايا الوقود

لقد ظهرت أنواع أخرى من خلايا الوقود نتيجة للبحث والتطوير. وحتى الآن، أثبتت PEMFC أنها أكثر خلايا الوقود نجاحاً تجارياً، ولعل أهم التطورات في هذا المجال هو تصنيع خلايا وقود مشتقة منها مثل: خلية وقود حمض الفورميك المباشر (DFAFC) وخلية وقود الإيثانول المباشر (DEFC). تستعمل الخليتان كلاهما من حمض الفورميك أو الإيثانول مباشرة دون الحاجة إلى إعادة التشكيل. وتتميز هذه الخلايا ببساطة وأمان تخزين الوقود مقارنة مع الهيدروجين والميثانول. ويعد الإيثانول وقوداً بديلاً جذاباً لأنه أقل سمية من الميثانول وأسهل تزويده. كما أنه أكثر ثراءً بالهيدروجين وله كثافة طاقة أعلى (8 كيلو واط/كغ) من الميثانول (6.1 كيلو واط/كغ). كما يمكن الحصول عليه بكميات كبيرة من الكتلة الحيوية بتخمير الموارد المتجددة مثل: قصب السكر أو القمح أو الذرة. فضلاً عن ذلك، لا تحتاج DEFC إلى معادن نبيلة كمحفزات، وقد وصلت طاقتها لحوالي 140 ميلي واط/سم² باستعمال الحديد أو النيكل أو الكوبالت. ومن بين تطبيقاتها: الأجهزة الإلكترونية المحمولة مثل الهواتف أو أجهزة الكمبيوتر المحمولة.

كما ابتكر الباحثون خلية وقود الأمونيا المباشر (DAFC)، التي تستعمل الأمونيا، وهو وقود سائل خال من الكربون، يتميز بسهولة التخزين والنقل والتوزيع مقارنة بالهيدروجين. ولا تزال هناك حاجة إلى مزيد من التحسينات المهمة في إنتاج الطاقة وكفاءتها، مما يتطلب محفزات كهربائية أكثر نشاطاً، وتصاميم للخلايا تمكن من تقليل معدل انتقال الأمونيا مما يحول دون فقدان في أداء الطاقة.

كما ظهرت خلية الوقود الخزفية البروتونية (PCFC) وتستعمل كإلكتروليت مادة خزفية تُظهر موصلية عالية للبروتون في درجات حرارة عالية. ولهذه الخلايا القدرة على أكسدة الوقود الأحفوري مباشرة دون الحاجة إلى إعادة التشكيل؛ إذ تُمتص الجزيئات الغازية للهيدروكربونات (الوقود الأحفوري) على سطح الأنود بوجود بخار الماء، مما يؤدي إلى إطلاق ذرات الهيدروجين لتنتقل عبر الإلكتروليت.

كما صنع الباحثون خلية وقود هيدريد البور المباشر (DBFC) التي تستعمل محلول هيدريد الصوديوم والبور كوقود، وتعد فئة فرعية من خلايا الوقود القلوية. إن استعمال وقود عالي القلوية يحمي خلية الوقود من التسمم المحتمل بثنائي أكسيد الكربون، ويجعلها أكثر تحملاً لوجوده في الهواء.

وأخيراً، تجدر الإشارة إلى خلية الوقود الميكروبية MFC التي تستعمل البكتيريا لتحويل النفايات العضوية إلى كهرباء، مما يوفر وسيلة مستدامة ومنخفضة التكلفة لمعالجة مياه الصرف الصحي مع توليد الطاقة من مصدر وفير.

تطبيقات خلايا الوقود وتحدياتها وأبرز الحلول المقترحة

نظراً لقدرتها على العمل مع أنواع مختلفة من الوقود، فإن لـ MCFC أهمية كبيرة في بناء محطات طاقة ثابتة مجدية اقتصادياً وذات خرج طاقة كبير نسبياً. وتكمن المشكلة الوحيدة حتى الآن بعدم كفاية فترة التشغيل الخالية من الصيانة؛ بحيث يجب أن تعمل محطة الطاقة الكبيرة قبل الاستبدال لمدة 4.5-5 سنوات كحد أدنى. وقد مكّن البحث المكثف والجهود الهندسية من بناء وحدات فردية عملت عدة مئات وآلاف من الساعات، إلا أن الطريق إلى فترة تشغيل مضمونة مدتها 5 سنوات لا يزال طويلاً.

إن استعمال AFC في التطبيقات الثابتة معروف على نطاق واسع، وفي الوقت الحاضر، تستعمل وكالة ناسا الفضائية هذا النوع في برنامج Shuttle. وقد أدت الشكوك حول العمر المحتمل لهذه الخلايا إلى مجموعة مخفضة بشدة من التطبيقات المرشحة لمحطات الطاقة القائمة على AFC. وقد تقلص حجم العمل البحثي والهندسي وفقاً لذلك.

أما خلية وقود غشاء التبادل البروتوني PEMFC فمن بين تطبيقاتها أنظمة السيارات أو المبابي أو التطبيقات المحمولة لاستبدال البطاريات القابلة لإعادة الشحن؛ إذ تتراوح الطاقة القصوى التي توفرها هذه الخلايا من 50 واط إلى 75 كيلو واط. وقد وصلت هذه الخلايا في الوقت الحاضر إلى درجة عالية من الكمال، إذ تعمل بشكل موثوق، وتبدي خصائص كهربائية جيدة إلى حد ما، كما أنها مريحة في التعامل معها. ولكي يصبح تطبيقها ممكناً على الصعيد التجاري في المركبات الكهربائية الخفيفة والمعدات الإلكترونية المحمولة، لابد أولاً من تجاوز عدد من العقبات المهمة والمعقدة إلى حد ما فيما يتعلق بعمر أطول لمحطات الطاقة واستقرار أفضل للمحفزات والأغشية، وانخفاض تكلفة الإنتاج، وتطوير المحفزات دون البلاتين والأغشية الرخيصة، وتحمل أعلى لشوائب ثنائي أكسيد الكربون، خاصة ببناء إصدارات من خلايا الوقود تعمل في درجات حرارة أعلى.

وقد حققت خلية وقود حمض الفوسفور (PAFC) نجاحاً كبيراً في نهاية التسعينيات تجسد بالعدد الكبير نسبياً من محطات الطاقة الوسيطة وتركيب عدة محطات طاقة بحجم ميغا واط. وقد ساعد البحث في هذا المجال من العثور على حلول تقنية اعتمدت بنجاح في تطوير أنواع خلايا الوقود الأخرى، وبشكل خاص استعمال التحفيز البلاتيني على شكل رواسب على دعامة الكربون، مما أدى إلى انخفاض كبير في كمية البلاتين اللازمة لتصنيع خلايا الوقود. وتعاني هذه الخلايا كغيرها من عدم كفاية موثوقية التشغيل على المدى الطويل.

وعلى عكس PEMFC، ورغم الحجم الكبير للبحوث التي أجريت، لم تدخل خلايا وقود DMFC في الإنتاج التجاري أو الاستعمال العملي على نطاق واسع؛ حيث يُطبق هذا النوع من الخلايا كمصادر طاقة في المعدات الإلكترونية مثل أجهزة الكمبيوتر المحمولة والكاميرات وكاميرات الفيديو ومشغلات DVD وبعض الأجهزة الطبية، أما تطبيقها في السيارات الكهربائية فهو بعيد جداً، بسبب الحاجة لتحقيق عمر أطول، وكفاءة أكبر.

وتشمل أبرز التطورات المتوقعة في الفترة 2025-2026 في خلايا الوقود الميكروبية أجهزة استشعار تعمل بالطاقة من التربة للزراعة الدقيقة، وأنظمة تحويل مياه الصرف الصحي إلى طاقة باستعمال البول والحماة البكتيرية، وأجهزة استشعار بحرية تعمل بالطاقة البكتيرية. تُبشر هذه الأنظمة، التي تستعمل البكتيريا لإطلاق الإلكترونات أثناء تحليل المواد العضوية، بإمكانية توفير طاقة مستدامة ومنخفضة التكلفة، مع أن رفع كفاءة هذه الأنظمة لا يزال يمثل تحدياً رئيسياً.

إعادة تدوير خلايا الوقود

انتشرت مركبات خلايا الوقود في السوق الاستهلاكية خلال العقد الماضي، وبدأت المركبات الأصلية تقترب من نهاية دورة حياتها، مما يزيد الطلب على إعادة تدوير خلايا الوقود. وتُشكل طرق إعادة تدوير خلايا الوقود الحالية تحديات تتعلق بالاستدامة. يستعمل متخصصو إعادة التدوير طريقة المعالجة الحرارية لخلايا الوقود، وتنتج هذه العملية مركبات غازية سامة مثل الفلور وفلوريد الهيدروجين وتلوث الغلاف الجوي والنظم البيئية المحلية. يمكن أن يساعد فصل المعادن باستعمال التفتيت الكهروهيدروليكي على استعادة المواد القابلة للاستعمال وتقليل النفايات الصلبة البلدية، كما يمكن لمراقب إعادة التدوير أن تقلل من التلوث الناتج عن معالجة خلايا الوقود من خلال تشغيل آلاتها بالطاقة المتجددة، مما يُسهم بشكل كبير في خفض انبعاثات التصنيع وتقليل النفايات. تُعرف الأغشية المطلية بالمحفزات (CCMs)، المستعملة في خلايا وقود الهيدروجين والمحللات الكهربائية للمركبات مثل الحافلات والقطارات، بصعوبة إعادة تدويرها نظراً للالتصاق الشديد بين معادن مجموعة البلاتين الثمينة وأغشية البوليميرات المفلورة PFAS. وحديثاً، قام فريق من الباحثين في جامعة ليستر بالتعاون مع شركة جونسون ماثي بتطوير تقنية جديدة ثورية تستعمل الموجات الصوتية لاستخلاص 92% من البلاتين من خلايا وقود الهيدروجين، مما يُحسن بشكل كبير من إمكانية إعادة تدوير هذه الأنظمة الأساسية للطاقة النظيفة. لا تُحسن هذه العملية استخلاص المواد فحسب، بل تُعالج أيضاً المخاطر البيئية لـ PFAS، وذلك بتوفير طريقة قابلة للتطوير لفصل مواد التحفيز بأمان عن أغشية البوليمير المفلورة. قدمت الدراسة اللاحقة عملية فصل مستمرة باستعمال شفرة سونترود مصممة خصيصاً، تُطبق موجات فوق صوتية عالية التردد لفصل الأغشية في ثوان. وأكد روس جوردون، كبير علماء الأبحاث في شركة جونسون ماثي، على أهمية هذا الإنجاز قائلاً: "يُعدّ تطوير الموجات فوق الصوتية عالية الكثافة لفصل الأغشية المحملة بالمحفزات نقلة نوعية في كيفية تعاملنا مع إعادة تدوير خلايا الوقود". يدعم هذا الابتكار منظومة الهيدروجين الأوسع نطاقاً من خلال جعل خلايا الوقود أكثر استدامة وفعالية من حيث التكلفة مع تسارع الطلب عالمياً. كما يُمثل نقطة تحول في معالجة أزمة تلوث مركبات PFAS المعروفة بتلوث مصادر المياه ومقاومتها للتحلل في البيئة.

التوقعات المستقبلية

من المتوقع أن تصبح خلايا وقود الهيدروجين حجر الزاوية في جهود إزالة الكربون عالمياً بحلول عام 2050، لا سيما في القطاعات التي يصعب فيها خفض الانبعاثات، لتكون بذلك تقنية حيوية لتحقيق أهداف صافي الانبعاثات الصفرية. ويشهد هذا القطاع تحولاً من المشاريع التجريبية المبكرة نحو نشر واسع النطاق، إذ يُتوقع أن تُشغل خلايا الوقود أجزاءً كبيرة من النقل الثقيل، والشحن البحري، وتوليد الطاقة الثابتة. من المرجح أن تهيمن خلايا الوقود على النقل بالشاحنات لمسافات طويلة والنقل الثقيل، متجاوزة قيود البطاريات المتعلقة بالوزن والمدى. ومن المتوقع أن تُقلل خلايا وقود غشاء تبادل البروتونات (PEMFC) التي تعمل بالهيدروجين السائل (LH₂) وخلايا وقود الأكسيد الصلب (SOFC) انبعاثات غازات الاحتباس الحراري من قطاع الشحن بنسبة تتراوح بين 65 و75%. كما يمكن لأنظمة خلايا الوقود المدمجة مع تخزين الهيدروجين أن تحقق أقل بصمة إجمالية لغازات الاحتباس الحراري للطائرات، مما يُزيل انبعاثات ثنائي أكسيد الكربون المباشرة ويُقلل من التأثيرات غير المباشرة.

من المتوقع أن يدعم اقتصاد الهيدروجين ملايين الوظائف؛ إذ يقدر محللو الصناعة أن الطلب على الهيدروجين في الولايات المتحدة وحدها سيصل إلى ما بين 35 و106 مليون طن سنوياً بحلول عام 2050. ولتحقيق أهداف الهيدروجين، يجب أن يتجاوز الإنتاج العالمي للهيدروجين 500 مليون طن بحلول عام 2050، ويُستمد معظمه من التحليل الكهربائي منخفض الكربون، ولذلك سيشهد العالم توسعاً هائلاً في محطات التزود بالهيدروجين، إذ تشير بعض التوقعات إلى وصول عددها إلى 90 ألف محطة على مستوى العالم.

ومع ذلك، فثمة بعض التحديات الحرجة التي يجب التغلب عليها، يشمل ذلك تطوير البنية التحتية لإنتاج الهيدروجين والنقل، وتوافر البلاتين، الذي ستكون زيادة الطلب عليه بمقدار 21.7 ضعفاً، مما يستلزم معدلات إعادة تدوير عالية (تصل إلى 90%) لتجنب النقص. وعلى الرغم من كفاءة خلايا الوقود، إلا أن عملية إنتاج الهيدروجين من المصدر إلى العجلة يجب أن تتنافس مع المركبات الكهربائية التي تعمل بالبطاريات من حيث استعمال الأراضي ومدخلات الطاقة. ولتحقيق هذه الأهداف لعام 2050، يلزم دعم سياسي كبير، بما في ذلك تسعير الكربون، والإعانات، والشهادات الموحدة للهيدروجين منخفض الكربون.

مراجع للاستزادة

- Dicks A. L., Rand D. A. J. (2018). Fuel Cell Systems Explained, Third Edition, Wiley and Sons, USA.
- Jiang S. P., Li Q. (2022). Introduction to Fuel Cells: Electrochemistry and Materials, Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- Hacker V., Mitsushima S. (Edts) (2018). Fuel Cells and Hydrogen: From Fundamentals to Applied Research, Elsevier Inc. Cambridge, United States.
- Kumar R., Sebe M., Yao F., Laura R. V., Salo K., Al-Hajjaji S., Booge D., Marandino C., Matz-Lück N., Rutgersson A. (2025). Shipping fuel pathways in a changing climate: A prospective foresight study for 2050. Marine Policy 182:106868. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2025.106868>

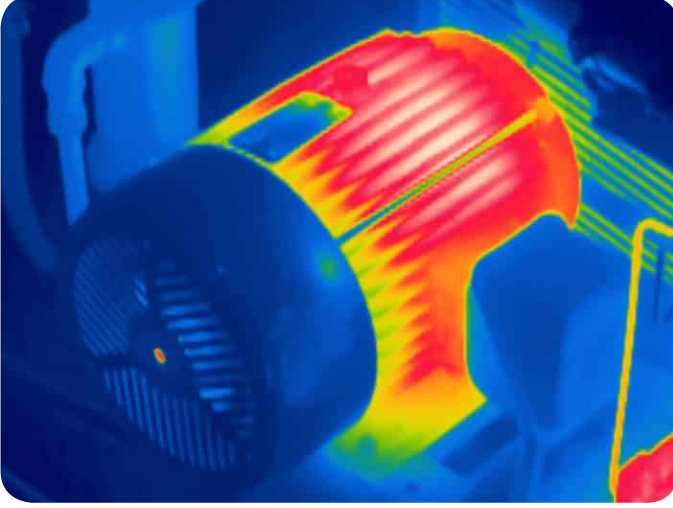
- Nayak S., Bhadra S., Raghavan V., Ghangrekar M. M., Sevda S. (2025). Investigating microbial interactions in dual chamber microbial fuel cells using a hybrid substrate of synthetic wastewater and human urine. *Results in Chemistry* 18:102887. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102887>
- Yingnakorn T., Gordon R., Florido D. M., Elgar C. E., Jacobson B. , Li S., Prentice P., Abbott A. P., Yang J. M. (2025). Fast Delamination of Fuel Cell Catalyst-Coated Membranes Using High-Intensity Ultrasonication. *Ultrasonics Sonochemistry* 116:107330. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107330>
- Yingnakorn T., Hartley J., Keal M. E., Gordon R., Florido D. M., Abbott A. P., Yang J. M. (2025). Catalyst coated membranes for fuel cell and water electrolyser delamination induced by organic solution soaking and water ultrasonication. *RSC Sustainability* 3: 1900-1908. <https://doi.org/10.1039/D4SU00795F>

Fule Cells

Abstract: Despite their modern character, fuel cells have actually been known for more than 150 years. Fuel cells are the only technology available to convert the chemical energy contained in hydrogen directly into electricity without producing greenhouse gases at the conversion site inside the vehicle. One of the main reasons governments worldwide support research in this field is the simplicity of fuel cell designs and ease of maintenance, as well as their ability to generate clean, non-polluting energy. Most importantly, they are considered a key technology for enabling a future hydrogen economy. However, they also suffer from the high cost of the materials used in their construction, particularly polymer membranes and catalysts, and the need to use high-purity fuel to extend catalyst life. This article will shed light on fuel cells in terms of their historical development, types, challenges, applications, future, and recycling.

Keywords: energy; hydrogen; oxygen; proton exchange membrane; acidic fuel cell; catalysts; electrodes.

◀ إعداد د. عبد الغفار اللافي- قسم الكيمياء، هيئة الطاقة الذرية السورية.



التطبيقات الصناعية للتصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء

ملخص

دخل التصوير الحراري في عمليات التفتيش الفني في الصناعة بقوة من حيث إمكانيته في كشف الانقطاعات المختبة في الجزء الهندسي قبل أن تتحول إلى سبب خطير في توقف عمل الجزء المختبر أو القطعة، ومن ثم توقف الإنتاج أو حدوث كارثة ما على الصعيد البشري أو المالي. ستتناول هذه المقالة لمحة تاريخية عن التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء، وستلقي الضوء على ماهيتها، وعن تقنية التصوير بها، وكيف تجري تقنية التصوير هذه، وعن تطبيقات للتصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء، وبصورة خاصة عن تطبيقاتها في الصناعة، وعن أضرار التعرض للأشعة تحت الحمراء، وأضرار التصوير الحراري بها.

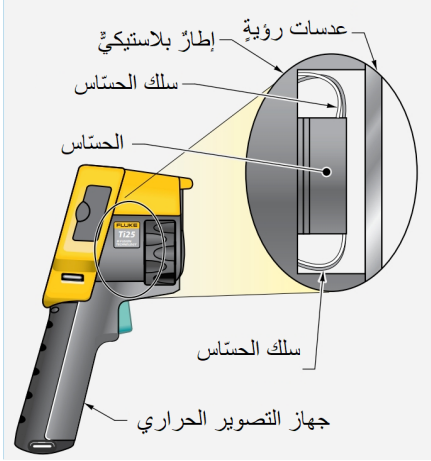
الكلمات المفتاحية: الأشعة تحت الحمراء، التصوير الحراري، كاميرا.

لمحة عن التطور التاريخي للتصوير الحراري

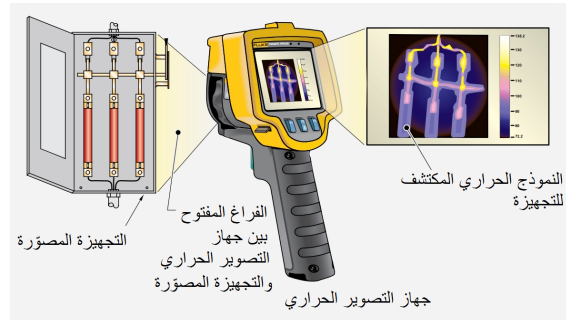
اكتشف الفلكي ويليام هرشل William Herschel الأشعة تحت الحمراء عام 1800. وقد بنى مناظيره المقرّبة telescopes الخاصة به؛ ولذلك كان ملماً لدرجة كبيرة بالعدسات والمرايا، وعلى دراية بأن أشعة الشمس مكونة من جميع ألوان الطيف وأنها كانت مصدراً للحرارة. وقد أراد هرشل أن يكتشف أي الألوان كان مسؤولاً عن تسخين الأجسام؛ فجهّز تجربة، أدواتها: موشور - لوح ورقي - موازين حرارة ببصيلات مُسوّدة، وقام بقياس درجات حرارة الألوان المختلفة، فلاحظ ازدياد الحرارة عندما حرك ميزان الحرارة من اللون البنفسجي إلى اللون الأحمر في ألوان الطيف المتشكل من ضوء الشمس العابر للموشور، واكتشف أن درجة الحرارة الأعلى كانت فعلياً بعد اللون الأحمر، وكانت الأشعة المسببة لهذا التسخين غير مرئية، فسماها بالأشعة المولدة للحرارة calorific rays، وهي تُعرف اليوم بالأشعة تحت الحمراء [1].

جاءت التسمية بـ(تحت الحمراء) من عبارة (ما بعد الأحمر)؛ بسبب موقع طولها الموجي في طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي. أمّا مصطلح (التصوير الحراري)؛ فهو مشتق من كلمات جذرها يعني (صورة درجة الحرارة). بعد ذلك اكتشف التأثير الكهروحراري الذي أدى إلى اختراع المضاعف الحراري -وهو نسخة مبكرة من المزدوجة الحرارية-، وهو يعتمد على فرضية أن فرق الجهد بين معدنين مختلفين يتغير بتغير درجة الحرارة، ثم طُوّر المضاعف الحراري إلى المكّدس الحراري، وهو مجموعة من المضاعفات الحرارية المتصلة على التوالي. ومن الجدير بالذكر: إن أول صورة بالأشعة تحت الحمراء أنتجت من قبل John Herschel عام 1840.

يعد جهاز التصوير الحراري جهازاً يكشف أنماط الحرارة في نطاق الأشعة تحت الحمراء دون ملامسة مباشرة للمعدات، وقد عُرفت النسخ الأولى من أجهزة التصوير الحراري باسم كواشف التوصيل الضوئي، الشكل (1).



الشكل 1. كواشف التوصيل الضوئي.



الشكل 2. كاشفات استشعار الأشعة تحت الحمراء في المستوى البؤري لعدسة.

توسّع استخدام التصوير الحراري فيما بعد فدخل في التطبيقات العسكرية، والصناعية، كفحص أنظمة نقل الطاقة الكهربائية الكبيرة وغيرها... لقد كانت أنظمة التصوير المبكرة معقدة منخفضة الدقة بطيئة، ثم أنتجت أنظمة محمولة استخدمت في تشخيص المباني والاختبارات اللاإتلافية والطب... إلخ.

تمت معايرة أنظمة التصوير الحراري إشعاعياً لإنتاج صور شعاعية كاملة؛ حيث يمكن قياس درجات الحرارة في أي نقطة في الصورة. والصورة المقاسة شعاعياً هي صورة حرارية تحتوي على حسابات قياس درجة الحرارة لنقاط مختلفة داخل الصورة، بعد ذلك طوّرت أنظمة تصوير أقل كلفة تعتمد على الأنابيب، وهي أنظمة الفيديو الكهحرارية PEV، وكانت خفيفة الوزن محمولة وقابلة للتشغيل دون تبريد. بعد ذلك، طرح جهاز مصفوفة المستوى البؤري FPA، وهو جهاز استشعار صور يتكوّن من مصفوفة -عادةً ما تكون مستطيلة- من كاشفات استشعار الأشعة تحت الحمراء في المستوى البؤري لعدسة (الشكل 2).

تضمّ المصفوفات النموذجية في أجهزة التصوير الحديثة بكسلات من 16×16 إلى 640×480. والبكسل، بهذا المعنى، هو أصغر عنصر مستقل في مصفوفة المستوى البؤري يمكنه اكتشاف طاقة الأشعة تحت الحمراء. تتوفر مصفوفات تضم وحدات بكسل تتجاوز 1000×1000 للتطبيقات المتخصصة. ويمثل الرقم الأول عدد الأعمدة الرأسية، ويمثل الرقم الثاني عدد الصفوف الأفقية المعروضة على الشاشة، ثم تطوّرت تقنية مصفوفة المستوى البؤري FPA لتستخدم كواشف متنوعة. وتوفّر اليوم أنظمة تصوير ذات موجة طويلة ومتوسطة.

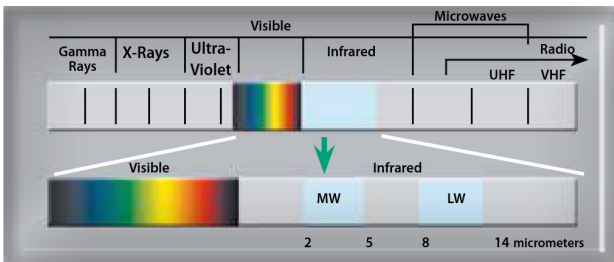
إن جهاز التصوير الحراري ذا الموجة الطويلة هو جهاز تصوير حراري يكشف طاقة الأشعة تحت الحمراء في نطاق طول موجي يقع بين 8 و 15 μm ميكرومتر؛ بينما جهاز التصوير الحراري ذو الموجة المتوسطة فهو جهاز تصوير حراري يكشف طاقة الأشعة تحت الحمراء في نطاق طول موجي يقع بين 2.5 و 6 μm ميكرومتر.

انخفضت تكلفة هذه الأنظمة أكثر من عشرة أضعاف أثناء العقد الماضي، وتحسّنت جودتها وازداد استخدام برامج الحاسوب لمعالجة الصور بشكل هائل، واستخدمت برامج لتسهيل التحليل وكتابة التقارير التي يمكن إنشاؤها بسرعة وإرسالها إلكترونياً عبر الإنترنت أو حفظها بتنسيق شائع كملف PDF مثلاً، وتسجيلها على أنواع مختلفة من أجهزة التخزين الرقمية [2].

ماهية الأشعة تحت الحمراء

الأشعة تحت الحمراء IR هي أشعة كهرومغناطيسية غير مرئية ذات أطوال موجية أكبر من الأطوال الموجية للضوء المرئي واقعة في المجال 0.7-300 μm ميكرومتر [3].

تقع الأشعة تحت الحمراء بين نطاقي الضوء المرئي والميكروويف من الطيف الكهرومغناطيسي، والمصدر الرئيس لها هو الحرارة أو الإشعاع الحراري. إن أي جسم تزيد درجة حرارته عن الصفر المطلق -273.15 °C - ويصاوي درجة مئوية - يُصدر إشعاعاً في نطاق الأشعة تحت الحمراء، حتى الأجسام شديدة البرودة كمكعبات الثلج تُصدر أشعة تحت حمراء. ونحن نتعرّض لهذه الأشعة يومياً، فالحرارة التي نشعر بها من ضوء الشمس أو النار أو المدفأة هي أشعة تحت حمراء، ومع أن أعيننا لا تستطيع رؤيتها؛ إلا أن أعصاب جلدنا تشعر بها كحرارة. وكلما زادت حرارة الجسم، زادت كمية الأشعة تحت الحمراء التي تنبعث منه. يبيّن الشكل (3) الطيف الكهرومغناطيسي وموقع الأشعة تحت الحمراء فيه [4].



الشكل 3. الطيف الكهرومغناطيسي وموقع الأشعة تحت الحمراء.

كيف يجري التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء؟

تعتمد طريقة الاختبار بالتصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء - ويمكن أن تسمى فقط التصوير الحراري- على قياس التدفق الحراري أو قياس الأشعة تحت الحمراء التي تصدرها المكونات والأجسام والتي تنتج

عن النشاطات والأعمال الصناعية، ويجري هذا القياس بواسطة أنواع مختلفة من تجهيزات قياس التدفق الحراري أو ما يسمّى بكاميرات التصوير الحراري، حيث تدلّ صور درجات الحرارة غير العادية إلى المواضع التي ستسبّب أعطالاً وحوادث [3].

تطبيقات التصوير الحراري

يُستعمل التصوير الحراري في تطبيقات عديدة في مختلف القطاعات الصناعية. أبرزها:

1. مراقبة الحالة والصيانة التنبؤية؛ حيث يؤدي التصوير الحراري دوراً حاسماً في تحديد المشكلات المحتملة قبل أن تتفاقم إلى أعطال مكلفة، مثل:

- كشف النقاط الساخنة، والتوصيلات المعيبة، والأحمال الزائدة في الأنظمة الكهربائية.
- فحص الأجزاء الميكانيكية، كالمحركات، والمحامل، والسيور للكشف عن علامات التآكل.
- التحقق من العزل في الأفران والمراجل.
- تحديد مواقع التسريب في الأنابيب والصمامات.

● تشخيص المباني؛ حيث يساعد التصوير الحراري في تقييم هياكل المباني من أجل: كشف مشكلات العزل وتسريبات الهواء، وتحرّي الرطوبة، ورصد الفقد الحراري عبر الغلاف الخارجي للمباني.

2. التصوير الطبي؛ حيث يُستخدم التصوير الحراري في قطاع الرعاية الصحية لمراقبة حالات، مثل: أمراض الأوعية الدموية المحيطية، واضطرابات الغدة الدرقية، والحالات الالتهابية.

3. تطبيقات أخرى، وفيما يلي بعضها:

- مكافحة الحرائق، وذلك بالرؤية عبر الدخان لتحديد مواقع الأشخاص المحاصرين.
- كشف الغازات، وذلك بتحديد تسريبات الغازات الخطرة.
- الأمن والمراقبة، وذلك مثل رصد التغيرات غير العادية في درجات الحرارة.
- البحث والتطوير، ومنه: تحليل توزيع الحرارة في المنتجات.
- مراقبة الجودة، ومنها: ضمان ثبات درجات الحرارة أثناء عمليات التصنيع.
- التطبيقات البحرية، ومنها: كشف التسريبات في هياكل القوارب.
- مراقبة التآكل، وذلك بتحديد مناطق التآكل والصدأ في المنشآت.
- مراقبة صحة الحيوان، وذلك بتقييم تغيرات درجات الحرارة لدى الماشية.

يُعدّ التصوير الحراري أداةً متعدّدة الاستخدامات لتحديد المشكلات المحتملة في تطبيقات متنوعة، حيث يوفر طريقةً غير مؤذية لمراقبة المعدات، وكشف الأعطال، وضمان السلامة [5].

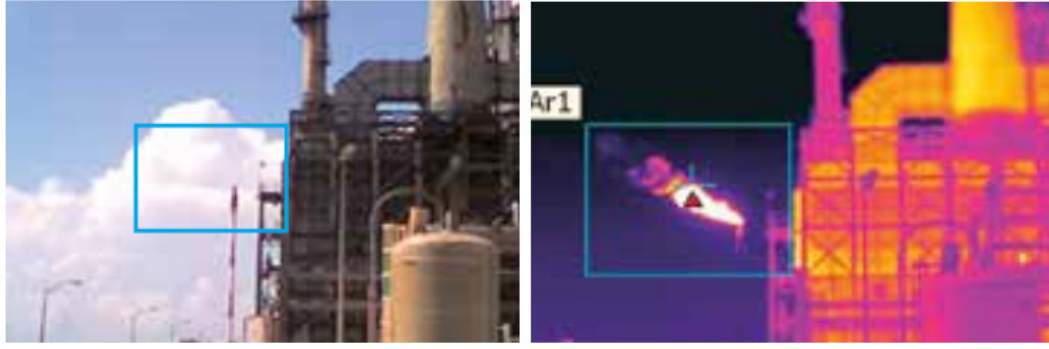
تطبيقات التصوير الحراري في الصناعة

يطبّق التصوير الحراري بشكل واسع في الصناعة؛ ففي صناعة الإلكترونيات يُستخدم التصوير الحراري في تصميم لوحات الدارات المتكاملة وتصنيعها، إضافةً إلى بعض حالات إصلاحها، وفي الصناعة الفضائية يُستخدم في تمييز أمكنة وجود الفصل والترفقات والمضخّات من المواد الغريبة الداخلة في صناعة المركبات الفضائية، كما أنّه يطبّق أيضاً في فحص سلامة الأنظمة الكهربائية؛ نظراً لسرعة تنفيذه وعدم الحاجة إلى تماس معها [6].

ومن التطبيقات المهمة للتصوير الحراري في الصناعة أيضاً الكشف عن مستوى كمية السوائل في الخزانات المغلقة؛ وذلك بسبب فرق درجتي الحرارة بين معدن الخزّان والسائل الذي يحويه وبين معدن الخزّان والهواء المحصور في الخزّان فوق السائل، الشكل 4 [2].

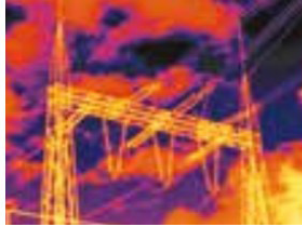


الشكل 4. الكشف عن مستوى السائل في خزّان مغلق باستخدام التصوير الحراري.



الشكل 5. الكشف عن لهب غازٍ محترقٍ باستخدام التصوير الحراري.

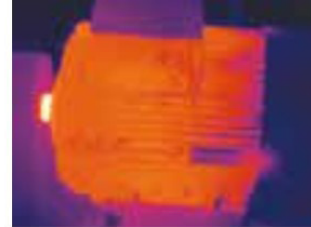
ويمكن بالتصوير الحراري كشف اللهب الذي تصعب ملاحظته أثناء خروجه في بعض العمليات التشغيلية في صناعة النفط والغاز وغيرها، الشكل 5. ومن تطبيقاته في الصناعة أيضاً كشف عدم المحاذاة بين بعض النقط في الأنظمة الميكانيكية كما إذا اهترأت وتآكلت أسطوانة سيرٍ نقالٍ، وكشف زيادة سخونة المحامل والمحركات، وكشف زيادة حمولة المضخات، يبين الشكل 6 بعض تطبيقات التصوير الحراري [4].



ج- فحص خطوط القدرة عالية الجهد



ب- عازلٌ تالفٌ



أ- محرك زائد السخونة



و- اتصالٌ سيءٌ وضررٌ داخليٌ



هـ- تضررٌ داخليٌ في فاصمةٍ منصهرةٍ



د- دحرجٌ مشتبهٌ بتعطّله

الشكل 6. بعض تطبيقات التصوير الحراري.

أخيراً قد يسأل سائلٌ: هل الأشعة تحت الحمراء مضرّة للإنسان؟ وهل التصوير الحراري يسبب أضراراً للقائم به أو لعموم الناس؟ أو ما هي أخطار التصوير الحراري؟

إن الكاميرات الحرارية ليست خطيرةً بيولوجياً أو إشعاعياً بذاتها؛ وإنما تأتي المخاطر العملية من ليزر التوجيه المضاف إليها، ومن إساءة استخدام الجهاز، ومن إساءة تفسير القراءات في المواقف الحرجة للسلامة، ومخاطر البطاريات والمعدّات، وقضايا الخصوصية أو القضايا القانونية. ويمكن تقليل هذه المخاطر أو التخلص منها باتّباع توجيهات الشركة المصنّعة، والتحقّق من القياسات الحرجة، ومراعاة قيود الخصوصية والقيود التنظيمية [7].

إن الكاميرات الحرارية ليست خطيرةً؛ لأنها لا تصدر أشعّةً فحسب، بل تقوم -فقط- بكشف الأشعّة تحت الحمراء التي هي نوعٌ من الأشعّة الكهرومغناطيسية تقع خارج طيف الضوء المرئي كما ذكر سالفاً، وعلى عكس الأشعّة فوق البنفسجية وأشعّة إكس؛ فالأشعّة تحت الحمراء هي أشعّة غير مؤيّنّة، وهذا يعني أنّها لا تملك القدرة على نزع الإلكترونات من الذرّات أو الجزيئات؛ ولذلك فهي لا تستطيع أن تسبّب أذيةً لخلايا الجسم كما تفعل الأشعّة المؤيّنّة، لذا فهي غير ضارّة [8].

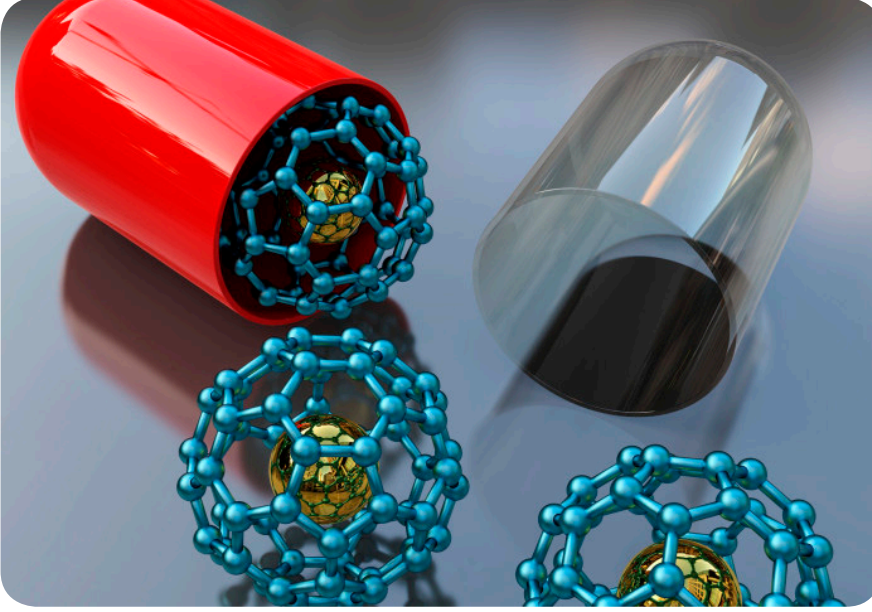
- [1] Asnt Level 1thermography Course Manual (2009). 45 pages. PITI, USA. Library of Congress Card Catalog Number ISBN TXU1-196-173.
- <https://pdfcoffee.com/asnt-level-1-thermography-course-manual-piti-all-rights-reserved-pdf-free.html> (accessed 13/05/2026).
- [2] John Snell and Michael Stuart. Introduction to Thermography Principles (2009). 73 pages. (PDF). ISBN 978-0-8269-1535-1. <https://s3-eu-west1.amazonaws.com/approvedproducts/manufacture/FLUKEthermographyprinciples.pdf> .
- [3] وفيق عبد الله حراره أ. د. الاختبارات اللاإتلافية في الصناعة، سلسلة الهندسة النووية، منشورات هيئة الطاقة الذرية السورية، دمشق، د. ط.، 1436 هـ- 2015 م، (272 صفحة).
- [4] Thermal imaging guidebook for industrial applications. 48 pages. http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264_EN.pdf
- [5] <https://www.inframatrix.com.my/post/infrared-thermography> .
- [6] وفيق حراره أ. د. وآخرون... التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء، دراسة علمية مخبرية، ه ط ذ س- خ ع/ت د ع 1113، آب 2015.
- [7] <https://www.quora.com/Are-infrared-thermographic-cameras-in-any-way-dangerous>.
- [8] Are Thermal Cameras Dangerous? [https://teslong.com/blogs/news/are-thermal-cameras dangerous?](https://teslong.com/blogs/news/are-thermal-cameras-dangerous?)

The Industrial Applications of Infrared Thermography

Abstract: Infrared thermography has strongly entered the field of technical industrial inspection due to its high capability in detecting hidden defects within engineering components before they escalate into serious failures. Such failures could lead to production halts or result in human and financial disasters. This article provides a historical overview of infrared imaging technology, explains the nature of these rays, and details how the technology works. It also discusses the applications of infrared thermography in general, and specifically in industry. Furthermore, it explores the potential hazards of exposure to infrared radiation and the risks associated with infrared thermal imaging itself.

Keywords: Infra-red rays, thermography, Camera.

◀ إعداد م. محمد أفغاني، قسم الخدمات العلمية، هيئة الطاقة الذرية السورية.



الكبسلة بالبوليميرات وتطبيقاتها

ملخص

الكبسلة هي عملية تغطية وتغليف مواد صلبة أو سائلة أو غازية ضمن حاضنة بوليميرية بسماكات مختلفة مشكلة دقائق صغيرة، وتبعاً لأبعادها تصنف إما كبسلة مكروية (0.2-5000) ميكرون، أو نانوية ($0.2 >$) ميكرون. يتصرف البوليمير كغشاء عازل للنواة يحميها من أثر التعرض لعوامل خارجية، ويستطيع هذا الغشاء أن يذوب أو يخرب ذاته بمحفزات محددة محرراً المادة الفعالة المحتجزة داخله في المكان المطلوب أو الزمن الأمثل، كما تساعد الكبسلة في تحويل السوائل إلى مواد صلبة مما يجعل التعامل معها أسهل. تحمي الكبسلة المواد الحساسة من عوامل الوسط المحيط من حرارة، ورطوبة، وتغير درجة حموضة الوسط إلى أن تتحرر في المنطقة المطلوبة، كما تحسن من الثباتية وفترة الصلاحية، وتقدم حلاً ناجحة للعديد من المشاكل التي تواجهها الصناعات الدوائية والغذائية. سنستعرض في المقال الحالي تقانة الكبسلة وطرائقها الكيميائية وأهم تطبيقاتها ومستقبلها والتحديات التي تواجهها.

الكلمات المفتاحية: الكبسلة؛ الكيتوزان؛ الألبينات؛ بوليمير حيوي؛ تحرر؛ مادة فعالة.

مقدمة

يشق مصطلح التغليف الدقيق/الكبسلة من اليونانية mikros (صغير)، و en-capsula (في صندوق صغير). وتشير هذه التقنية إلى تكوين جزيئات بوليميرية (الغلاف أو الحامل أو مادة الجدار) بأقطار تتراوح من النانومترات إلى الملمترات، تحوي مادة فعالة (اللب (core) أو الطور الداخلي) بغض النظر عن حالتها الفيزيائية؛ أي الصلبة أو السائلة أو الغازية والتي تظهر أنواعاً متعددة من الأشكال، يتصرف البوليمير كغشاء عازل للنواة يحميها من أثر التعرض للجائر لعوامل خارجية مثل: الضوء والتركيز العالي للأكسجين، والحرارة، والرطوبة ومنع تبخر المركبات المتطايرة وإخفاء العيوب، ويستطيع هذا الغشاء أن يذوب أو يخرب ذاته من خلال محفزات محددة محرراً المادة الفعالة المحتجزة داخله في المكان المطلوب أو الزمن الأمثل. كما تساعد الكبسلة في تحويل السوائل إلى مواد صلبة؛ مما يجعل التعامل معها أسهل. تصنف الكبسلة تبعاً لأبعادها إما كبسلة مكروية microencapsulation (0.2-5000) ميكرون، أو كبسلة نانوية nanoencapsulation ($0.2 >$) ميكرون، كما تحسن الكبسلة من الثباتية بالعمر الافتراضي shelf life stability، وتقدم حلاً ناجحة للعديد من المشاكل التي تواجهها الصناعات الدوائية والغذائية.

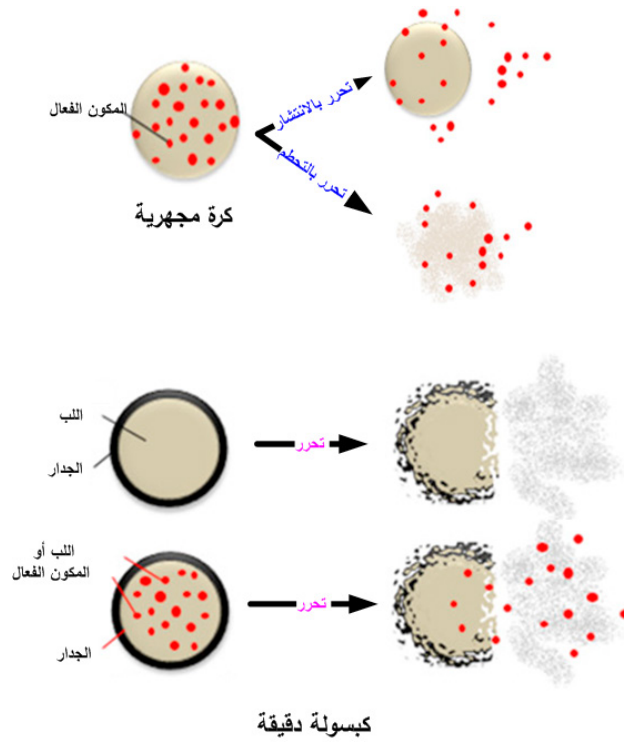
ظهر مفهوم التغليف الدقيق/الكبسلة على الصعيد النظري للمرة الأولى مرة في القرن التاسع عشر مع التقدم في علوم الفيزياء والكيمياء والرياضيات، وفهم أسباب الخصائص المختلفة لكل مادة عن الأخرى. وبدأ البحث الفعلي في التغليف الدقيق في ثلاثينيات القرن التاسع عشر؛ إذ اعتمدت في البداية على طرق فيزيائية بسيطة كتغليف زيت كبد سمك القد داخل جدار من الجيلاتين. أنت الطفرة الأولى (وأخر الأربعينيات) عندما حققت التقنية تطوراً كبيراً، وبدأ استعمالها الفعلي في التطبيقات الصناعية، إذ قام غرين عام 1954 وهو كيميائي باحث في شركة ناشيونال كاش ريجستر NCR في دايتون بتطوير ورق النسيج الخالي من الكربون carbonless copy paper، وحصل على براءة اختراع للتغليف الدقيق في عام 1955، تبعها إدخال التغليف الدقيق في المجالين الصيدلاني والكيميائي، ومنذ ذلك الحين شهدت تقانة التغليف الدقيق تحسينات وتعديلات مستمرة تحقق تكييفاً مع الأغراض والاستعمالات المنشودة لها متوافقة مع التقدم والتطور الكبير في علم البوليمرات. وبعد تأسيس مفاهيم الجزيئات الكبيرة macromolecules، أصبح من الممكن بفضل علم هندسة المواد تحضير وتصميم مواد عالية الأداء لها خصائص متفردة تحتاجها تقنيات وصناعات حديثة، وقد نشأ مصطلح جديد في علم المواد لم يعرف من قبل هو المواد المتقدمة أو الخارقة metamaterial؛ وهي مواد جديدة طورت بوظائف تتجاوز تلك الموجودة في المواد الطبيعية، وقد أحدثت ثورة حولت العالم من مستهلك يعتمد على المواد الخام الطبيعية إلى عالم منتج لمواد جديدة لها صفات رائعة كتلك التي يتمتع بها البوليمير. اعتمدت البوليمرات الصناعية والطبيعية الأكثر تطوراً في تطبيقات التغليف الدقيق لما لها من ميزات مهمة، مما يسمح بتطوير أساليب جديدة ومجموعة متنوعة من المواد البوليمرية الجديدة المناسبة لتقانات الاحتجاز المختلفة، وابتكار منتجات وتطبيقات جديدة وفقاً لعرض العملاء وطلبهم، أو في بعض الأحيان ما يخدم المشاريع المدمجة. حدث تطور واسع في الستينيات والسبعينيات من القرن التاسع عشر في طرائق التغليف الكيميائية مثل البلمرة بين الأطوار والتصلب الشبكي لسلاسل البوليمير، مما أتاح السيطرة على مواصفات الكبسولات المنتجة من حيث السماكة والنفاذية عبر الغلاف. استعمل مفهوم التكتل الطوري لتحضير كبسولات جيلاتينية دقيقة، واستغرق فيه تطوير هذه التقنية من النطاق المخبري إلى النطاق الصناعي تسع سنوات طويلة.

انتقلت الكبسلة في العصر الحديث لتكون تقنية ذكية؛ إذ استعمل البوليمير في أنظمة الإطلاق المسيطر عليه للأدوية والمنسوجات الذكية والمواد الغذائية ومستحضرات التجميل ومعالجة النفايات والإلكترونيات. ومن الأمثلة على الكبسلة نجد تغليف بذور الكتان بالتجفيف بالرش واستعماله في صناعة الخبز، وتغليف أوميغا3- وأوميغا6-، وتوكوفيرول باستعمال الليبوسومات ودمجها في عصير البرتقال كغذاء وظيفي جديد، واستبدال مركب توكوفيرول بفيتامين هـ ضمن المنظومة السابقة نفسها ودمجها في حليب الشوكولاتة لينتج عن ذلك منتج غذائي وظيفي. وصل التطور في أيامنا إلى ابتكار كبسولات تعتمد على هياكل طبيعية معدلة (مثل فولتس) المطورة ككبسولات زمنية لتسجيل الأحداث الخلوية، وتطوير الكبسولات الذكية القابلة للبلع التي تشغل حيزاً في المعدة، وتغليف الخلايا الجذعية لحمايتها وحفظها لفترات زمنية طويلة في بنوك الأنسجة الحية.

التغليف الوظيفي والتغليف الدقيق

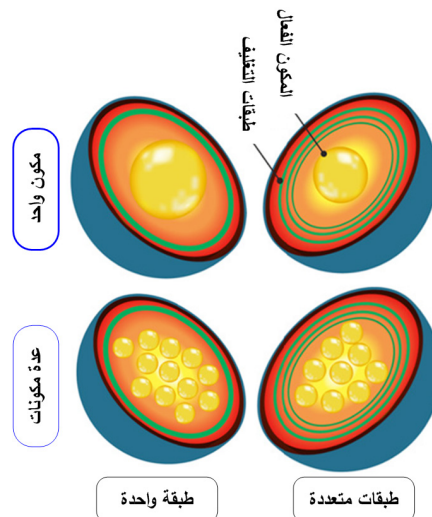
يعد الغلاف الوظيفي نظاماً بخصائص كلاسيكية للغلاف (أي الزخرفة والحماية) ووظائف إضافية يمكن تحقيقها، على سبيل المثال، بالعزل الحراري وإدارة الرطوبة وإزالة النفايات والتنعيم والتنظيف الذاتي وطرده الحشرات ومضادات الميكروبات أو خصائص مثبطات اللهب إذا اقتصرنا على الجانب النسيجي البنيوي فقط؛ لذا، يمكن أن يكون الغلاف الوظيفي حساساً للتغيرات البيئية. ومن ناحية أخرى، فإن الغلاف الذي هو غلاف قادر على استشعار البيئة المحيطة والاستجابة بشكل مناسب لهذا المؤثر بتغيير خصائصه الفيزيائية أو الكيميائية، ويفضل أن يكون ذلك بطريقة قابلة للعكس. لذا، يمكن تصنيف الأغلفة الوظيفية أو الذكية إلى أنواع مختلفة بناءً على خصائصها الوظيفية؛ أي إلى الخصائص البصرية والحرارية والفيزيائية والكيميائية والبنوية والميكانيكية والكهربائية أو المغناطيسية، فضلاً عن الخصائص الصحية والحيوية. ووفقاً للخاصية المطلوبة، يمكن أن يحدث تأثير الغلاف الوظيفي عند سطح التلامس بين طبقة الغلاف والركيزة، أو في كتلة الغلاف، أو عند سطوح التلامس بين الهواء والغلاف. ازداد على مدى العقدين الماضيين عدد تطبيقات الكبسولات المدمجة مع الأغلفة لخلق خصائص وظيفية جديدة للركيزة، ولم يكن تحقيق ذلك ممكناً باستعمال أي تقنية أخرى موجودة.

لا يقتصر دور طبقة الغلاف على تعزيز الالتصاق بين جميع المكونات ومتانتها، وتعديل خصائصها الداخلية مثل: الشفافية واللون والانتشار، بل يشمل أيضاً تحسين المقاومة الميكانيكية وحالة السطح؛ لذلك وبناءً على موقع الجسيمات الدقيقة في طبقة الغلاف ووظائفها يمكن دمجها كلياً أو تركها جزئياً على السطح. يمكن أن تظهر الجسيمات المنتجة بطرق التغليف الدقيقة نطاقاً واسعاً من الأشكال الهندسية والهياكل. وتعتمد مورفولوجيتها بشكل أساسي على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمادة الأساسية وعملية الترسيب أو تكوين الغشاء المحيط بها. وبالتالي قد تتخذ الجسيمات الدقيقة أشكالاً منتظمة أو غير منتظمة، وبناءً على شكلها يمكن تصنيفها إلى عدة تصنيفات: منها الكبسولات الدقيقة أحادية اللب أو متعددة النوى من جهة أو الكريات المجهرية، كما هو موضح بالشكل 1.



الشكل 1. الكبسولات الدقيقة والكريات المجهرية.

كلا البنيتين الكبسولات الدقيقة بنوعيهما والكريات المجهرية مهمتان للغاية في التطبيقات العملية، ويمكن أن يكون لهما استعمالات ووظائف متشابهة أو مختلفة. فعلى سبيل المثال، يعتمد الإطلاق المتحكم به للمادة الفعالة على موقع هذا المركب داخل الكبسولة الدقيقة و/أو الكرية المجهرية. كما يعتمد الحصول على الكبسولات الدقيقة أو الكريات المجهرية بشكل أساسي على تقانة التغليف المستعملة. الكبسولات الدقيقة هي جسيمات من نوع الخزان، حيث تحاط النواة بغلاف. إضافة إلى ذلك فإن عدد الطبقات واللب لا يقتصر على واحد فقط كما في الشكل 2. يوجد في الأدبيات العلمية غلاف كبسولات دقيقة مزدوج الطبقات أو كبسولات دقيقة متعددة الطبقات أو جسيمات ثنائية اللب، ويمكن الحصول على الجسيمات الدقيقة من تجمعات من الكبسولات الدقيقة. تحدد هذه الخصائص المختلفة، فضلاً عن الخصائص الوظيفية، من خلال اختيار العملية التركيبية المستعملة، كما تعتمد مورفولوجياً الجسيمات الدقيقة بشكل أساسي على نظام المذيب البوليميري. ومن الأمثلة على تقانات التغليف الدقيق والكبسولات الدقيقة نجد الليبوسومات، والتخثر المعقد، والأجهزة الميكروفلويدية، والطلاء بالرش والإدراج الجزيئي. الكريات المجهرية هي جسيمات ذات بنية شبكية بوليميرية أي هياكل ينتشر فيها المركب النشط بشكل متجانس في كامل حجم الجسيم، وأحياناً على سطحه، ويعد التجفيف بالرش والتبريد بالرش مثاليين على طرق التغليف الدقيق التي تنتج الكريات المجهرية.



الشكل 2. أشكال الكبسولات تبعاً لعدد الطبقات واللب.

البوليميرات المستعملة في الكبسلة

لقد تطورت تقنية الكبسلة باستعمال البوليميرات من مجرد وسيلة فيزيائية بسيطة لحماية المواد إلى علم متكامل يعتمد على هندسة الجزيئات. تُختار البوليميرات المستعملة في عملية الكبسلة بناءً على طبيعة المادة الأساسية للنواة (core) وطريقة الإطلاق المطلوبة. وتصنف البوليميرات المستعملة (المواد الجدارية) إلى:

1. **البوليميرات الطبيعية:** تتميز بكونها قابلة للتحلل الحيوي وصديقة للبيئة. وهي بوليميرات متوفرة ومتجددة تستعمل في التطبيقات المتعددة نظراً لما تتميز به من ثبات وأمان على الصحة واحتوائها على عدد كبير من الزمر الفعالة ووفرتها في الطبيعة، فضلاً عن خواصها الفريدة مثل: مجال واسع من الكتل المولية، والتركيب الكيميائي المتنوع، وقابليتها للتعديل الجزيئي. تستعمل البوليميرات الطبيعية مثل: البروتينات، متعددات السكريات الأيونية واللاأيونية خصوصاً الألجينات، والكيروزان، وكربوكسي ميثيل السللوز، والبكتين، والنشاء كموصلات بتشكيلها لمواد الهيدروجيل المحبة للماء، والتي تستطيع امتصاص حجم كبير من الماء من مصدر طبيعي أو صناعي. كما يوجد المطاط أو اللاتكس وهو بوليمير طبيعي هيدروكربوني موجود في عصارة بعض النباتات. استحوذت متعددات السكريات على اهتمام كبير في تطبيقات الكبسلة بسبب الخصائص الفيزيائية المميزة مثل: الذوبانية والثبات العالي، كما أنها غير سامة ومحبة للماء، وتستطيع تشكيل الهيدروجيل بالتصالب الشبكي للسلاسل البوليميرية عبر تشكيل روابط مشتركة، وروابط هيدروجينية وقوى فاندرالس والتشابك الفيزيائي. وقد ألهمت هذه البوليميرات الطبيعية الباحثين والعلماء في عملية تحضيرها وتقليد أشكالها البنائية كمحاولة لتصنيعها وإنتاجها بشكل أكبر وتقديمها للسوق.

2. **البوليميرات شبه الصناعية:** وهي بوليميرات طبيعية معدلة كيميائياً لتحسين خصائصها مثل: إيثيل السللوز، وميثيل السللوز، والألجينات ثنائية الألدهيد.

3. **البوليميرات الصناعية الكاملة:** وهي المواد البلاستيكية مثل: البولي إيثيلين والنايلون والبوليسترين والبولي يوريتان والبولي أميدات، والتي توفر متانة عالية وتحكماً دقيقاً في نفاذية الكبسولة مثل: البولي إيثيلين، والبوليسترين، والبولي فينيل الكحول PVA. كما أصبحت البوليميرات الصناعية المحضرة من أحماض الجليكوليك واللاكتيك وغيرها من المواد القابلة للتحلل الحيوي شائعة الاستعمال بشكل متزايد في التطبيقات الطبية الحيوية. فضلاً عن ذلك، يوجد في الوقت الحاضر مواد بلاستيكية قابلة للتحلل يمكن استعمالها كبديل. وتعرف البوليميرات التي يصنعها الإنسان والتي تتفاعل مع محيطها بالبوليميرات الذكية أو البوليميرات المستجيبة للظروف المحيطة بها مثل درجة الحرارة والحموضة، ويمكن استعمالها لمجموعة متنوعة من الأغراض في تكنولوجيا الطب الحيوي والكبسلة الدقيقة. وأدت البوليميرات الصناعية دوراً مهماً في العالم؛ إذ توجد على سبيل المثال لا الحصر في الزراعة والطب والتكنولوجيا والرياضة والصناعة وغير ذلك. تمتاز المواد البوليميرية بأنها ذات خواص كيميائية وفيزيائية متعددة ويمكن تعديلها لتكون مجدية وتفي بالطلب اليومي مقابل رخص ثمنها مقارنة مع المواد البديلة الطبيعية مثل: الخشب والزجاج والجلد وغيرها.

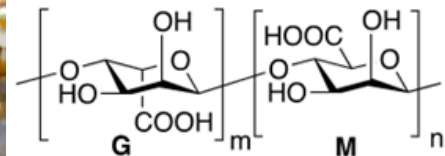
أمثلة عن البوليميرات المستعملة في التغليف الدقيق

ألجينات الصوديوم sodium alginate

الألجينات عبارة عن سكاريد بحري متعدد الأنيونات مشتق من الطحالب البنية، وتعد بوليميراً خطياً مشتركاً (copolymer) ثنائياً مؤلفاً من β -D-mannuronic acid و L- α -guluronic acid المرتبطين بروابط غليكوزيدية 1,4. تأخذ هذه الوحدات تماكبات مختلفة مثل: الثنائي الاستوائي (MM)، والثنائي المحوري (GG)، والاستوائي المحوري (MG)، والمحوري الاستوائي (GM). تتخذ وحدات M-block شريطاً عريضاً على شكل سلسلة، في حين يكون وحدات G-block بنية منشية وأكثر صلابة rigid. في حين يكون لوحات MG-blocks بنية أكثر مرونة. يعتمد تسلسل هذه الجزيئات (كتل MM و GG و GM) ونسب الجزيئات M/G إضافة إلى الوزن الجزيئي للبوليمير بشكل صارم على المنشأ وعملية الإنتاج، وينتج الألجينات تجارياً على شكل ملح الصوديوم من جدار خلية الطحالب البنية brown seaweed. وتعتمد الخواص الفيزيائية للألجينات مثل الذوبانية واللزوجة على كل من التركيب الكيميائي والبنية المتعاقبة.

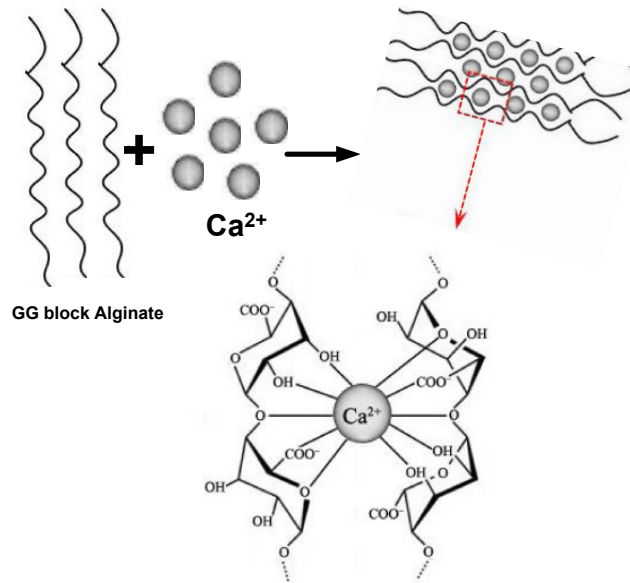


الشكل 3. البنية الكيميائية للألجينات وأحد مصادرها الطبيعية.



مثل غيرها من السكريات المتعددة، فإن الألبينات متوافقة حيوياً، ومع ذلك فهي تتفاعل بشكل سيئ مع الأنظمة البيولوجية. عند إجراء التعديلات المناسبة أو بالاشتراك مع جزيئات (حيوية) أخرى، تصبح الألبينات جزيئات كبيرة مثيرة للاهتمام لإعداد الهيدروجيل لتطبيقات هندسة الأنسجة. استعملت الألبينات للمرة الأولى في ميدان الكبسلة في التسعينيات، ثم طورت طرائق عديدة لإنتاج حبيبات الهيدروجيل من الألبينات وبأحجام وبنى وأشكال مختلفة. وتتميز الألبينات بنباتها الحراري الكبير، وتشكيل الجيل بشكل سريع، وإمكانية التحكم بخاصيتها الميكانيكية وتحرر المواد الفعالة، وقابليتها للتحلل الحيوي.

تشكل الألبينات مواد هيدروجيل بالربط الأيونية Ionic Binding مع أيونات ثنائية التكافؤ (Ca^{2+}) مثلاً، وباستعمال أدوات بسيطة (ببشر ومحقق طبي). إن الربط الأيوني ذو انتقائية عالية ويزداد بازدياد عدد الوحدات G-block، ويعود ذلك للارتباط الكهربائي الساكن، والتمخبل chelation الذي تسببه الصفات البنوية لوحات G-blocks. توصف هذه الخاصية المميزة بنموذج صندوق البيض (egg-box model)، وذلك لكون أيونات الكالسيوم تشبه البيض المنضد داخل الصندوق المصنوع من سلاسل الألبينات، فعندما تحصل محاذاة لاثنتين أو أكثر من وحدات G-blocks فإن الفجوات بينهما تتشكل نتيجة تموضع مونوميرات G بشكل متعامد مع محور السلسلة بسبب الروابط الغليكوزيدية. تسلك هذه التجاويف كموضع ربط (binding site) للأيونات ثنائية التكافؤ، إذ يتفاعل كل كاتيون مع وحدتي G متجاورتين في سلسلة واحدة، ومع وحدتي G متجاورتين في سلسلة مقابلة للسلسلة السابقة، وتتشكل نقاط اتصال junction zones. يحتاج أيون Ca^{+2} على الأقل لثماني وحدات G متجاورة لتشكيل اتصال ثابت stable junction، واقترحت الدراسات أن وحدات MG تساهم أيضاً في تشكيل اتصال مع الكالسيوم. إن استعمال Ba^{+2} و Sr^{+2} كأيون مصلب شبكي أفضل بسبب الألفة الكبيرة لكل منهما لوحات G-block والانتقائية العالية للربط الأيوني، ويعطي خصائص أفضل للجيل، إلا أن سميّة هذين الأيونين تحدّ من استعمالهما في التطبيقات الحيوية الطبية ويقتصر استعمالهما في التطبيقات الزراعية والصناعية.



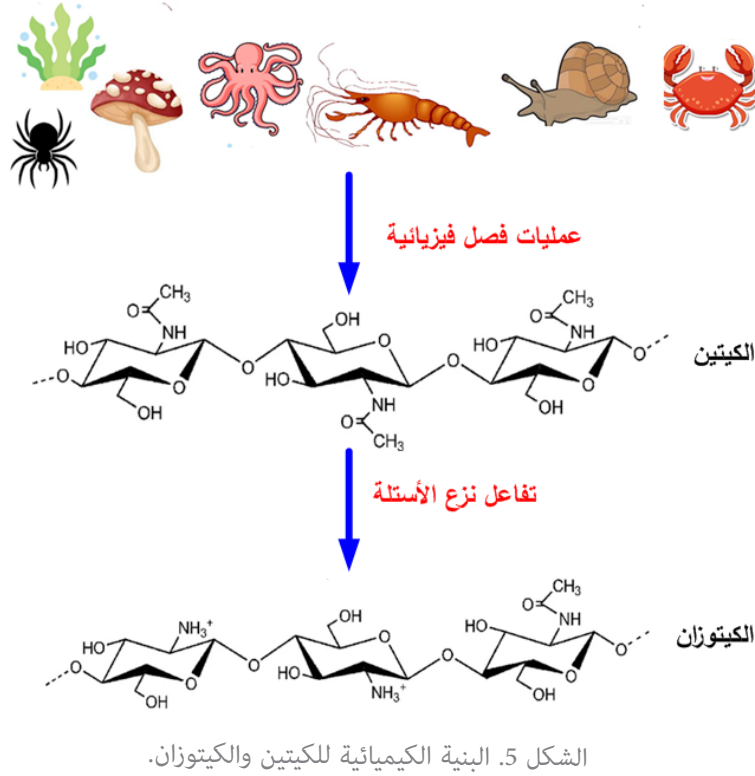
الشكل 4. نموذج صندوق البيض للكاتيونات الثنائية (Ca^{2+}) ضمن كتل G في الألبينات.

الكيتوزان Chitosan

يعد الكيتوزان، وهو عديد سكاريد خطي يتكوّن من وحدات β -(1→4)-linked D-glucosamine and N-acetyl-D-glucosamine من بين أكثر البوليميرات الحيوية biopolymers تنوعاً واستعمالاً في علم المواد materials science الحديث. يحضّر الكيتوزان بعملية إزالة الأسيتيل deacetylation القلوية للكيتين chitin، وهو ثاني أكثر البوليميرات الطبيعية وفرة بعد السليلوز. يتميز الكيتوزان بمزيج فريد من الخصائص المرغوبة، بما في ذلك قابليته للتحلل الحيوي biodegradability، وتوافقه الحيوي biocompatibility، وعدم سميّته non-toxicity، ونشاطه المضاد للميكروبات antimicrobial activity. وقد أتاحَت هذه الخواص طيفاً واسعاً من التطبيقات في مجالات التكنولوجيا الحيوية biotechnology، والطب التجديدي regenerative medicine، وتوصيل الأدوية drug delivery، وتنقية مياه الصرف الصحي wastewater purification، وتغليف الأغذية food packaging.

إنّ المادة الخام لإنتاج الكيتوزان التجاري هي الكيتين الذي يدخل في تركيب الهيكل الخارجي للقرش crustaceans وبشكل خاص الجمبري والسرطانات البحرية والحشرات، كما أنّه مكون للجدار الخلوي لبعض الطحالب والفطور. لا يذوب الكيتوزان بالماء ومعظم المذيبات العضوية مما

يحدّ من استعماله، وبالمقابل يكون ذوّاباً في المحاليل الحمضية الممددة بسبب برتنة الزمر الأمينية. وبسبب احتوائه على الزمر الأمينية يستطيع تشكيل معقدات مع الكثير من أيونات المعادن مما يسهل استعماله في معالجة المياه. يستعمل الكيتوزان في الأغذية الصحية بسبب تأثيره كخافض كولسترول وخافض للوزن. كما يستعمل في التطبيقات الخاصة بجسم الإنسان لأنه يتحلل بإنزيم الليزوزيم Lysozym الموجود في سوائل الجسم كافة، وله تطبيق حيوي في أنظمة تحرر الدواء وشفاء الجروح وهندسة النسيج.



تقانات الكبسلة

تنوعت طرائق الكبسلة لتناسب مختلف التطبيقات الصناعية والطبية. ومن الضروري لاختيار التقانة المناسبة في التغليف الدقيق تحليل المنتج النهائي، وحجم الجسيمات المطلوبة وآليات الإطلاق والخصائص الفيزيائية والكيميائية للمادة المستعملة كعامل تغليف ولب، كما تجب مراعاة تكلفة الطريقة وسلامتها ومادة التغليف في حال المكونات الغذائية أو الدوائية والطبية. ومن أهم التقانات المستعملة ما يلي:

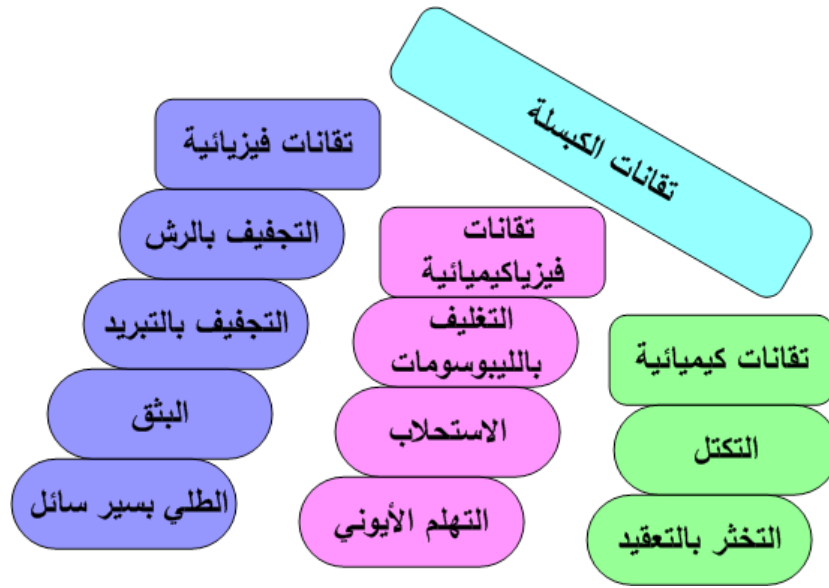
● **التكتل coacervation:** من أقدم الطرق، وتعتمد على فصل الطور البوليميري وترسيبه حول المادة الأساسية (اللب) عن طريق تغيير درجة حموضة الوسط أو درجة الحرارة.

● **التجفيف بالرش spray drying:** تقنية شائعة جداً في الصناعات الغذائية والدوائية؛ إذ يُرش محلول أو معلق أو مستحلب يتكون من المكون الفعال ومادة التغليف (الحامل-البوليمير) في حجرة تجفيف، حيث يتلامس مع وسط تسخين (عادة تيار هواء ساخن) ويجف بشكل فوري مشكلاً جزيئات جافة. وعلى الرغم من ضرورة استعمال درجات الحرارة العالية في هذه العملية، إلا أن مدة التلامس القصيرة جداً (بضع ثوان) تجعل الطاقة تستعمل للتبخير فقط، وليس لرفع درجة حرارة جزيئات المسحوق أو المحلول، مما يتيح تطبيق هذه التقنية لتغليف المواد الحساسة للحرارة مع انخفاض التحلل الحراري. تنتج هذه التقنية جسيمات دقيقة من نوع الكريات المجهرية، وهي عبارة عن هياكل مجوفة يتراوح حجمها بين 10-120 ملم.

● **البلمرة في الموقع in situ polymerization:** وتعد من الطرائق الكيميائية، ويتكون الجدار البوليميري مباشرة حول المادة المراد تغليفها بتفاعلات كيميائية، مثل استعمال راتنجات اليوريا فورمالدهيد في صناعة ورق النسخ.

● **عمليات البثق أو التجليد الأيوني:** وهي طرق تضمن حماية المركبات الحساسة. إن البوليميرات المستعملة بوصفها مادة جدارية لعملية التجليد الأيوني مثل: الألبينات والكيتوزان والكارجين، لا تمتلك خصائص سطحية وهي مركبات محبة للماء. لذا، لتغليف المواد الكارهة للماء من الضروري إضافة مستحلب وتحضير مستحلب قبل عملية التجليد. لذلك، تعد هذه الفكرة مبتكرة توفر مجالاً واعداً للبحوث المستقبلية والتطبيقات ذات الأهمية في صناعات مهمّة كالأغذية والأدوية ومستحضرات التجميل.

- تقنية التخرر المعقد: هي إحدى أكثر الطرائق الفيزيائية الكيميائية شيوعاً وأكثرها كفاءة تستعمل في الكبسولة الدقيقة، وخاصة لتغليف المواد الزيتية والنكهات والعمود والمواد الصيدلانية. تعتمد على الانفصال الطوري phase separation لمحاليل البوليمرات، مما يؤدي إلى تشكيل غشاء كبسولة حول المادة المراد تغليفها. يحدث ذلك اعتماداً على التفاعل الكهروستاتيكي (تجاذب الشحنات) بين نوعين من البوليمرات ذات الشحنات المتعاكسة في محلول مائي (بوليمير ذي شحنة موجبة/بوليمير ذي شحنة سالبة) وبضبط درجة حموضة الوسط تنجذب البوليمرات لبعضها بعضاً، وتنفصل عن المحلول المائي لتشكل طبقة كثيفة غنية بالبوليمير تحيط بقطرات المادة الأساسية (اللب).
- ثمة طرائق فيزيائية أخرى كالتبريد بالرش، والتجميد، وعمليات التغليف بالسوائل فوق الحرجة، والعمليات باستعمال الأجهزة الميكروفلويدية، والطلاء بالرش. ونذكر من الطرق الفيزيائية الكيميائية الأخرى: الجسيمات الشحمية والمذيلات والمستحلبات والعمليات باستعمال ركازات دهنية نانوية التركيب وتبخير المذيب والإدراج الجزيئي كما في الشكل 6.



الشكل 6. تقانات الكبسولة.

كفاءة الكبسولة

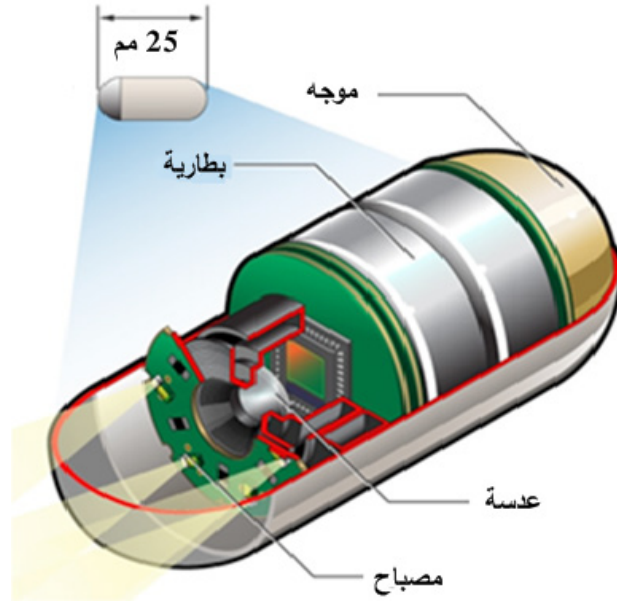
تعتمد كمية المادة المغلفة على عدد من العوامل بما في ذلك تقنية التغليف المستخدمة والمركبات المستعملة بوصفها عوامل تغليف وقلب وظروف العملية (الزمن، ودرجة الحرارة، ودرجة الحموضة). تعد كفاءة التغليف ضرورية لمعرفة كمية المادة الفعالة الموجودة داخل الكبسولة الدقيقة (المركب) وخارجها. وبالتالي معرفة كمية العينة اللازمة لإضافتها إلى المنتج الغذائي مثلاً، كلما قلت كمية الكبسولة ارتفعت كفاءة التغليف، وكان قوام الطعام ونكهته أفضل. بمعنى آخر، كلما قل عدد الكبسولات المستعملة في الطعام، صعب على المستهلك إدراكه دون التأثير على الخصائص الحسية للمنتج. لا يمكن تحدي حد أقصى لعدد الكبسولات الدقيقة المستعملة في المنتج النهائي لأي تطبيق مراد الاستفادة فيه من الكبسولات لأنه يعتمد على تركيز المادة الفعالة المغلفة واللوائح التنظيمية لكل دولة ولكل نوع من المركبات في التطبيقات الصناعية والطبية كافة. يمكن قياس كفاءة التغليف بعدة طرق: بحسب المادة المغلفة (الكروموتوغرافيا السائلة عالية الأداء)-الكروموتوغرافيا الغازية المقترنة بقياس الطيف الكتلي-التحليل الطيفي أو المعايرة).

تطبيقات الكبسولة وتوجهاتها المستقبلية

تركز الأبحاث العلمية مؤخراً على تطوير كبسولات ذكية مستجيبة للمؤثرات الحيوية، ومستدامة بالكامل، تهدف إلى تقليل استعمال المذيبات العضوية والاعتماد على البوليميرات الحيوية المتجددة لتقليل الأثر البيئي واللدائن الدقيقة microplastics. ولعل أهم الأمثلة على ذلك ما يلي:

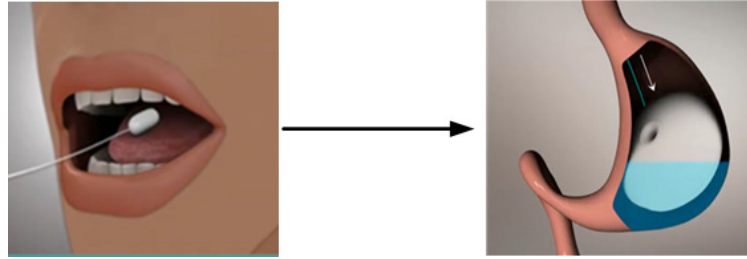
1. الطب الذكي وتوصيل الأدوية المستهدف advanced drug delivery: أصبحت بعض النماذج جاهزة للاستعمال ضمن القطاعات الطبية، ومنها:

- الكبسولات الروبوتية الموجهة مغناطيسياً كما في الشكل 7، لتقوم بعملية التنظير المتحكم بحركتها ومسارها داخل الجهاز الهضمي عبر مغناطيس خارجي، مع قدرتها على أخذ خزعات مجهرية وحقن الأدوية في مواضع النزيف بدقة.



الشكل 7. الكبسولة الذكية

كما توجد الكبسولات الخاصة بتخفيف الوزن الزائد والمصنعة من المواد البوليميرية الطبيعية المتوافقة حيوياً والتي تتحول إلى بالون يملأ بسائل فيزيولوجي ويتحطم خلال مدة زمنية معينة (3-6 أشهر)، كما في الشكل 8.



الشكل 8. كبسولة التنحيف

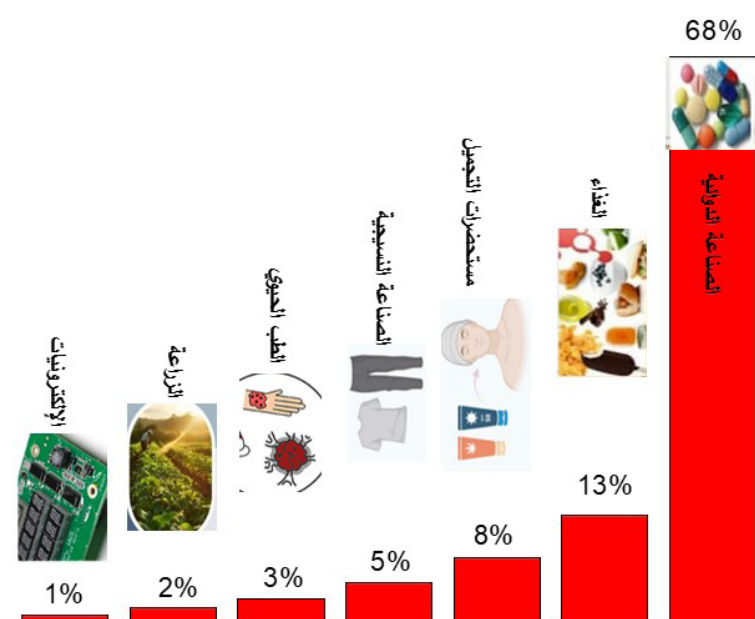
- تحضير أنظمة التحرر المستجيب للمحفزات: تكون على شكل كبسولات نانوية مصممة لتنفجر أو تحرر محتواها الدوائي فقط عند استشعار محفز محدد كتغير حيوي يتمثل بدرجة حموضة خلايا الأورام الفوسفاتية أو إنزيمات معينة في الأمعاء أو حموضة الدم عند اختلاف معدل سكر الدم.
- كبسولات الميكروبيوم microbiome capsules: وهي كبسولات ذكية مبرمجة لجمع عينات سائلة من عمق الأمعاء الدقيقة الحاضنة للبكتريا النافعة بهدف تحليلها بدلاً من الطرق الجراحية المعقدة.
- تحميل وتحرير مواد فعالة دوائياً والكبسلة الخلوية cell encapsulation: حماية الخلايا الحية مثل خلايا الأنسولين داخل كبسولات شبه نفوذة تسمح بمرور المغذيات والأكسجين وتمنع وصول الأجسام المضادة للجهاز المناعي إلى هذه الخلايا المزروعة.

2. الأغذية الوظيفية والكبسلة النانوية nano-encapsulation: شهد قطاع الصناعات الغذائية الوظيفية استعمالاً كبيراً للكبسلة الدقيقة التي وفرت إمكانيات هائلة لحماية المحتوى الغذائي من التغير في البنية؛ إذ ثبتت هذه التقنية المغذيات الحساسة للحرارة، مما سمح برفع معدل استبقاء الفيتامينات والمعادن الحساسة بنسبة تصل إلى 92% أثناء عمليات التصنيع الحراري للأغذية والمشروبات. كما تم التوجه إلى تحقيق التحول للمواد الجدارية النباتية clean-label باستبدال الجيلاتين الحيواني والمواد الصناعية بعوامل طبيعية مشتقة من الكيتين، والألجينات، والإينولين لحماية البروبيوتيك وتحسين صحة القولون. ولا ننسى الميزة المهمة التي قدمتها تقنية الكبسلة الدقيقة بحجب الطعم والرائحة الفائق، فقد عزل طعم الفيتامينات والمعادن الحادة (مثل الحديد، والزيت العطرية، ومستخلصات الأسماك مثل أوميغا-3) كيميائياً لضمان عدم تأثيرها على نكهة المنتج الغذائي حتى استهلاكها بعد فترة زمنية قد تطول أحياناً.

3. لم تستثن مستحضرات التجميل المستدامة green cosmetic من تطبيق هذه التقنية لديها، وتماشياً مع القيود الدولية الصارمة لعام 2026 تحول مصنعو مستحضرات التجميل إلى استعمال كبسولات جدارية مصنوعة من الدهون الحيوية القابلة للتحلل biodegradable lipids لحفظ الفيتامينات النشطة مثل الريتينول وفيتامين C ومواد الترطيب ومضادات الأكسدة المتنوعة التي تطلق من داخل الكبسولات بشكل تدريجي مستمر وبطيء عند ملامستها للبشرة بفعل ضغط التدليك أو حرارة الجسم الطبيعية بهدف توفير حماية تدوم 24 ساعة.

4. أما في مجال الزراعة الذكية المستدامة smart agriculture، فقد تم كبسلة المواد الكيميائية الزراعية كالمبيدات والأسمدة وتقييد تحررها بهدف تقليل هدرها وحمايتها من الغسيل بفعل مياه الأمطار. وطبق مفهوم تغذية التربة المستهدفة باستعمال الكبسولات التي تطلق المغذيات النباتية تدريجياً على مدار الموسم الزراعي بناء على رطوبة التربة مما يمنع تلوث المياه الجوفية بالتروجين الفائض.

5. مواد الإصلاح الذاتي: كبسولات مجهرية تحتوي على مواد لاصقة تدمج داخل الطلاءات، وعند حدوث خدش، تتكسر الكبسولة وتطلق المادة لملء الفراغ وإصلاح السطح تلقائياً.



الشكل 9. التوزيع الإحصائي لتطبيقات الكبسولة.

المراجع

- [1] Hassen, B., Ben Salah, R. (2026). A literature review on the encapsulation process: advances, materials, and applications in modern industry. Polymer Bulletin 83: 72. <https://doi.org/10.1007/s00289-025-06151-1>
- [2] Cruz-Barrios, E., Lak, S.N., Taylor, C. and Pentzer, E.B. (2025). Encapsulation of Liquids via Polymer Precipitation in Emulsions. Journal of Polymer Science 63: 146-163. <https://doi.org/10.1002/pol.20240607>.
- [3] Gao H., Li Z., Bai C., Xiao J. (2026). Key challenges and novel encapsulation technologies for probiotics stability improvement: A review. Food Chemistry 517: 149453. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2026.149453>
- [4] Jo D-M., Bae S. S., Chung D., Jung Y-H., Jin H., Hyeon Gyeong Jeong H. G., Tabassum N., Kim Y-M., Khan F. (2026). Hydrocolloid-based encapsulation systems for probiotics in foods: Structure–rheology–release relationships and rational design principles. Trends in Food Science & Technology 173: 105747. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2026.105747>
- [5] Zhao Z., Wei P., Ye X., Zhao Y., Zhang Q., Liu X. (2026). Single-cell droplet encapsulation for drug exploration: A review of principles, methodologies, and future directions. Materials and Design 266: 116165. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2026.116165>

Encapsulation with polymers and its applications

Abstract: Encapsulation is the process of coating and encapsulating solid, liquid, or gaseous materials within a polymer substrate of varying thicknesses, forming tiny particles. Depending on their dimensions, these particles are classified as either micro-encapsulated (0.2–5000 microns) or nano-encapsulated (>0.2 microns). The polymer acts as an insulating membrane for the core, protecting it from external factors. This membrane can dissolve or self-destruct through specific catalysts, releasing the encapsulated active ingredient at the desired location or optimal time. Encapsulation also facilitates the conversion of liquids into solids, making them easier to handle. It protects sensitive materials from environmental factors such as heat, humidity, and pH changes until release at the required location. Furthermore, it improves shelf stability and offers effective solutions to many problems faced by the pharmaceutical and food industries. This article will explore encapsulation technology, its chemical processes, its most important applications, its future prospects, and the challenges it faces.

Keywords: Encapsulation; Chitosan; Alginate; Biopolymer; Release; Active material.

◀ إعداد ك. هبة دادة، د. عبد الوهاب علاف، د. عبد الغفار الافي-قسم الكيمياء، هيئة الطاقة الذرية السورية.

متقنيات الأثر المشعة في الصناعات البترولية والغاز



ملخص

يُعدُّ قطاع النفط والغاز في سوريا جاذباً لشركات الطاقة العالمية بهدف إعادة التأهيل والتنقيب. سوف يؤدي التطوير والاستثمار الواسع والمتوقع لحقول النفط والغاز في البر وتحت سطح البحر إلى تحديات جديدة، تتطلب مواكبة لتقانات لائتلافية نوعيّة ومتقدمة والعمل على توطيئها. تعدّ تقانة متقنيات الأثر المشعة من الطرائق اللائلافية النوعيّة والمفضّلة للكشف المبكر عن التسربات والانسدادات في المبادلات الحرارية وخطوط أنابيب النقل المدفونة تحت الأرض، إضافة إلى اختبار التسرب في الأنظمة تحت سطح البحر. كما تستخدم هذه التقانة لتحسين أداء العمليات الصناعية (معدلات التدفق، أوقات الخلط، أمثلة بارامترات العمليات الصناعية... إلخ) ومراقبة الجودة (تجانس المنتجات). تشمل فوائد استخدام هذه التقانة على: تقليل وقت التوقف عن العمل؛ ضمان التشغيل الآمن؛ حماية البيئة من التلوث؛ توفير المال. إن الهدف من هذه المقالة هو عرض أهمية وكيفية استخدام متقنيات الأثر المشعة في كشف وتحديد مشاكل الأنظمة الصناعية وخاصة في الصناعات البترولية والغاز. كما سوف يتم تسليط الضوء على أهمية التقنيات الداعمة للثورة الصناعية الرابعة 4.0 في تعزيز الاختبارات اللائلافية (NDT 4.0).

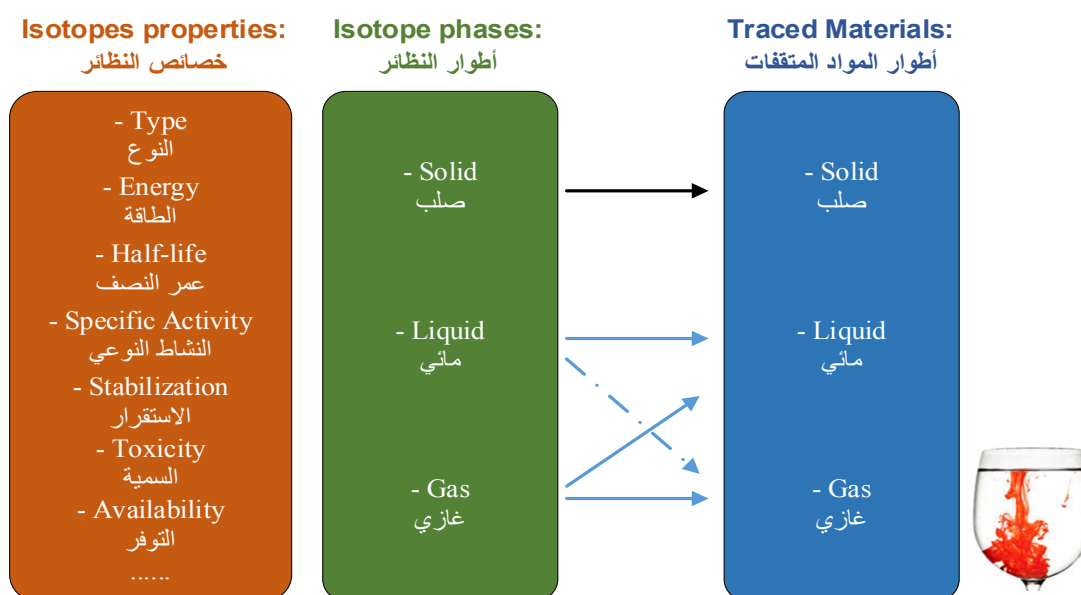
الكلمات المفتاحية: الاختبارات اللائلافية النوعيّة، NDT 4.0، متقنيات الأثر المشعة، صناعة النفط والغاز، كشف العيوب، توزيع زمن البقاء RTD.

مقدمة

متقنيات الأثر المشعة radiotracers هي مركبات كيميائية تتم الاستعاضة عن ذرة أو أكثر منها بنظير مشع [1, 2, 5]. تستخدم متقنيات الأثر المشعة على نطاق واسع من التطبيقات في الصناعات المختلفة، وبالتحديد في صناعات النفط ومشتقاته والغاز والبتروكيماويات والفوسفات والصناعات التحويلية. تساعد هذه التطبيقات في تطوير الصناعة وجعلها أكثر إنتاجية واستدامة بالاعتماد على تكنولوجيا الطاقة النووية وأجهزة القياس النووية الإلكترونية الحديثة. تؤدي تقنية متقنيات الأثر المشعة دوراً مهماً في تحديد عيوب المنشآت والمحطات الصناعية مثل: المناطق الراكدة/الميتة stagnant/dead zones، والتوجيه channelling، والتسربات leakages... إلخ [6]. سيؤدي استكشاف الأعطال وتحديد أوجه القصور في مصانع المعالجة ومصانع المواد الكيميائية وفي صناعات النفط والغاز إلى إغلاق المحطة أو المصنع، مما يؤدي إلى زيادة التكاليف التشغيلية للمصانع. لقد أثبتت تقنية متقنيات الأثر المشعة أنها تساهم في فهم هذه العمليات، مما يساعد على تحسين الأداء والتصميم. يرجع نجاح متقنيات الأثر المشعة بشكل أساسي إلى الإمكانية التي توفرها الخصائص الفريدة للمواد المشعة لجمع البيانات دون إغلاق مصنع المعالجة، والتي لا يمكن الحصول عليها من خلال تقنيات التحقيق الأخرى.

يتم استخدام متقنيات الأثر المشعة كتقنية اختبار لائتلافية نوعية specific NDT في الصناعة [4] من أجل كشف وتحديد التسرب في خطوط أنابيب النفط والغاز المدفونة تحت الأرض والتسرب في المبادلات الحرارية في مصانع البتروكيماويات وفي مصافي النفط [7]، كما تستخدم في قياس معدل التدفق في أنابيب النقل وقياس كفاءة وجودة خلط المركبات في مصانع المعالجة. لابد من تلبية عدة متطلبات قبل تنفيذ الاستقصاء بالاستعانة بمتقنيات الأثر المشعة ومن بينها اختيار النظير المشع المناسب (الشكل 1). تشمل العوامل المهمة في اختيار المتقنيات الإشعاعية على: نوع وطاقة الإشعاع المنبعث؛ عمر النصف للمتقنيات؛ التوافق الفيزيائي/الكيميائي مع المواد التي يُراد اقتفاؤها (الاستقرار الفيزيائي والكيميائي)؛ مُعاملات العملية (درجة الحرارة، الضغط، الحجم، متوسط زمن الإقامة المتوقع)؛ السمية الإشعاعية الكيميائية؛ سهولة الإنتاج وتكلفته؛ طريقة القياس (أخذ العينات أو القياس في الموقع) وغيرها [8]. أكثر المواد المشعة استخداماً لاختبار المتقنيات الإشعاعية في التطبيقات الصناعية هي باعثة أشعة غاما gamma emitter، ومن أشهر المتقنيات الإشعاعية: البروم 82- (Br-82)، اليود 131- (I-131)، التكنيشيوم 99- (Tc-99m)، الأرجون 41- (Ar-41)، الكريبتون 79- (Kr79) وغيرها [1, 2].

يمكن أن تكشف التسربات في المنشآت وفي خطوط الأنابيب باستخدام المتقنيات الإشعاعية من خلال معرفة الفترة الزمنية التي يستغرقها قفاء الأثر ليظهر على الكاشف وهو ما يعرف بقياس توزيع زمن البقاء residence time distribution (RTD). في هذه المقالة سوف يتم عرض تقنية متقنيات الأثر المشعة التي تطبق مبدأ قياس توزيع زمن البقاء RTD. إضافة إلى ذلك، سوف يتم تبيان خطوات معالجة الإشارة الرقمية لمنحني RTD. كما سيتم عرض طرائق كشف التسربات في خطوط الأنابيب المدفونة تحت الأرض وفي المبادلات الحرارية. إضافة إلى ذلك، سوف يتم تسليط الضوء على أهمية التقنيات الداعمة للثورة الصناعية الرابعة 4.0 (الذكاء الصناعي، إنترنت الأشياء الصناعية، الأنظمة الفيزيائية السيبرانية، الروبوتات وغيرها) في تعزيز الاختبارات اللائلافية للجيل الرابع (NDT 4.0).



الشكل 1. اختيار النظائر كمتقنيات إشعاعية.

توزيع زمن البقاء RTD في الأنظمة والعمليات

يعرف زمن بقاء عينة من سائل ما بأنه إجمالي الوقت الذي تقضيه هذه العينة داخل حجم معين متحكم به (مثل: مفاعل كيميائي، بحيرة، جسم الإنسان). يُقاس زمن بقاء عينة من سائل ما إما بتوزيع زمن البقاء RTD

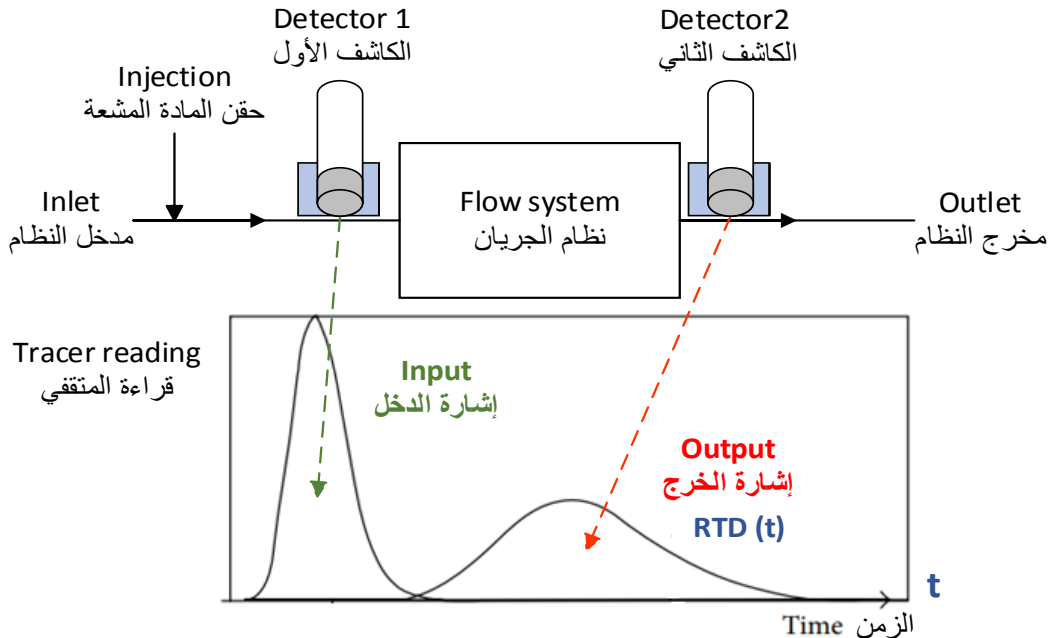
أو بمتوسطه (MRT) mean residence time [9]. يُعدّ توزيع زمن البقاء RTD أحد أهمّ المعايير في الهندسة الكيميائية وعملياتها. يُستخدم RTD لتقييم ديناميكيات الموائع في العمليات الصناعية وسلوك مجال التدفق، إضافة إلى رصد أيّ خلل في محطة المعالجة. تم تطوير مفهوم تقنية RTD بواسطة العالم الإنكليزي Danckwerts وذلك في عام 1953 وتم تنفيذها من قبل العديد من الباحثين لتحديد الأعطال المحتملة، وتسربات الأنابيب، والمنطقة الميتة، والانسدادات في خطوط الأنابيب وكذلك لتقدير تجانس وكفاءة عملية الخلط.

RTD أو (t) هي دالة توزيع احتمالي تصف مقدار الوقت الذي يقضيه عنصر سائل داخل مفاعل (نظام). إذا تم حقن دفعة من قفاء مشع عند مدخل نظام عند الزمن t يساوي 0، وقيس تركيزها كدالة للزمن عند المخرج (الشكل 6)، فإن $E(t)$ تمثل احتمال أن يكون للقفاء المشع زمن إقامة بين الفترة الزمنية $(t, t + dt)$ وتُعرف كما يلي:

$$E_{out}(t) = \frac{C_{out}(t)}{\int_0^{\infty} C_{out}(t) dt} \quad \text{such that} \quad \int_0^{\infty} E_{out}(t) dt = 1, \quad (1)$$

حيث: $C_{out}(t)$ - إشارة الخرج المكتشفة، وهي تركيز المادة المشعة التي ترصدها الكواشف الومضية NaI بالعدد في الثانية counts per second (cps).

عندما تكون مدة دفعة قفاء الأثر الداخلة إلى النظام قصيرة جداً (بضع ثوان) فيعرف منحنى الاستجابة الناتج من كاشف المخرج بأنه منحنى توزيع زمن البقاء RTD. يظهر الشكل 2 الوضع التجريبي لتقنية متقفيات الأثر المشعة التي تطبق مبدأ توزيع زمن البقاء: تحقن دفعة صغيرة من عنصر أثر مشع مناسب في تيار العمل وتراقب حركته عبر النظام بكواشف أشعة مثبتة خارجياً [10, 11]. يظهر الكاشف الأول نشاط قفاء الأثر المشع الداخل إلى النظام، ويسجل الكاشف الثاني النشاط المغادر للنظام. فالاستجابة الناجمة عن الكاشف الثاني ليست إلا منحنى توزيع زمن البقاء RTD الذي يفيد في حساب زمن البقاء الوسطي.



الشكل 2. نموذج قياس توزيع زمن البقاء.

يعتمد تحليل منحنى توزيع زمن البقاء المقاس RTD على الغرض المحدد من إجراء التجربة [12]. تُستخدم العزوم moments لوصف توزيع توزيع زمن البقاء بدلالة معايير إحصائية مثل متوسط زمن البقاء MRT، والتباين variance وغيرها. تُعرف العزوم كما يلي:

$$M_i = \int_0^{\infty} t^i E(t) dt \quad \text{such that} \quad E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt}, \quad (2)$$

حيث: $C(t)$ تمثل تركيز المادة المشعة التي تم رصدها بواسطة كاشف وميض من يوديد الصوديوم، ويُقاس بالعدّات في الثانية (cps) في البسط، بينما يُمثل المقام المساحة تحت منحنى $C(t)$. وقد تم تقييس الإشارة المكتشفة بقسمتها على المساحة تحت المنحنى.

يمكن تحليل بعض العزوم لتمثيل ما يلي:

- المساحة area: ويمثلها العزم الصفري وهو توزيع زمن البقاء المعياري الذي يعطي المساحة تحت المنحنى:

$$M_0 = \int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad (3)$$

- متوسط زمن البقاء mean residence time: هو متوسط الوقت الذي تقضيه الجسيمات في النظام ويتم حسابه عددياً ويمثله العزم الأول (first moment) الذي يحدد موقع "مركز الثقل - center of gravity" في الزمن عندما يمر منحنى التتبع بنقطة القياس.

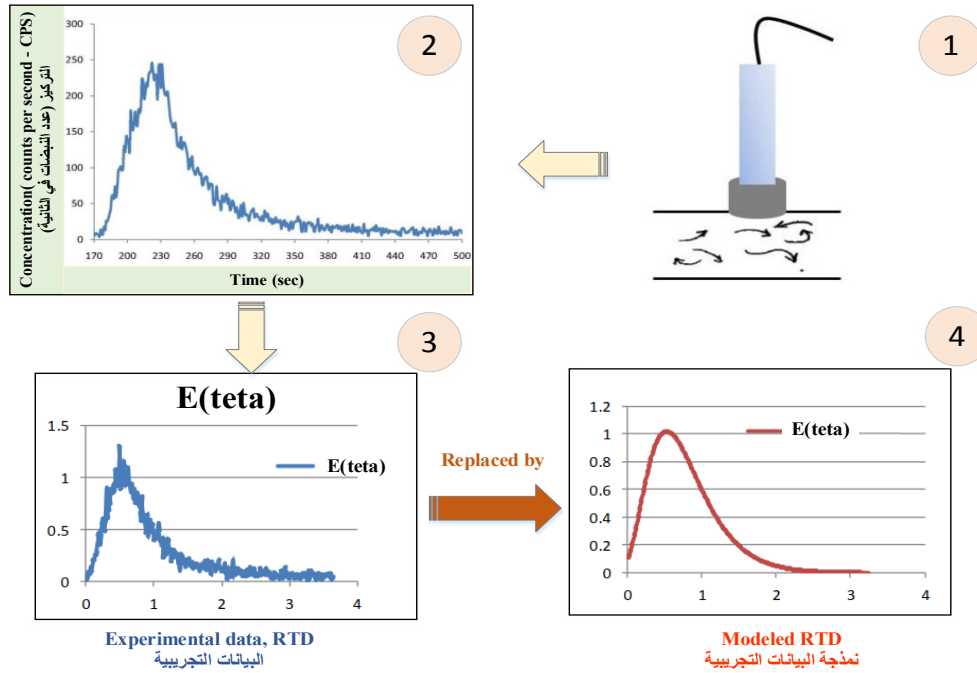
$$M_1 = \text{MRT} = \bar{t} = \int_0^{\infty} t E(t) dt = \frac{\int_0^{\infty} t C_i(t) dt}{\int_0^{\infty} C_i(t) dt} = \frac{\sum_i t_i C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} \quad (4)$$

تعدّ عملية الحقن لحظية عندما تكون مدتها أقل من 3% من متوسط زمن الإقامة الإجمالي داخل النظام. يتم حساب متوسط زمن البقاء التجريبي للنظام على أنه الفرق بين اللحظات الأولى لمنحنيات استجابة المخرج والمدخل:

$$\text{MRT} = M_{1\text{outlet}} - M_{1\text{inlet}}, \quad (5)$$

حيث $M_{1\text{inlet}}$ اللحظة الأولى لمنحنى الاستجابة عند المدخل، و $M_{1\text{outlet}}$ اللحظة الأولى لمنحنى الاستجابة عند المخرج.

يبين الشكل 3 خطوات نمذجة البيانات التجريبية لمنحنى توزيع زمن البقاء RTD المستخدم في تقنية متقنيات الأثر المشعة لاستكشاف الأعطال وتحسين العمليات الصناعية. ولكن قبل ذلك تجب معالجة إشارة RTD وإزالة التشويش والحصول على التمثيل الإشعاعي الفعلي.



الشكل 3. نمذجة البيانات التجريبية لمنحنى توزيع زمن البقاء.

معالجة إشارة توزيع زمن البقاء RTD

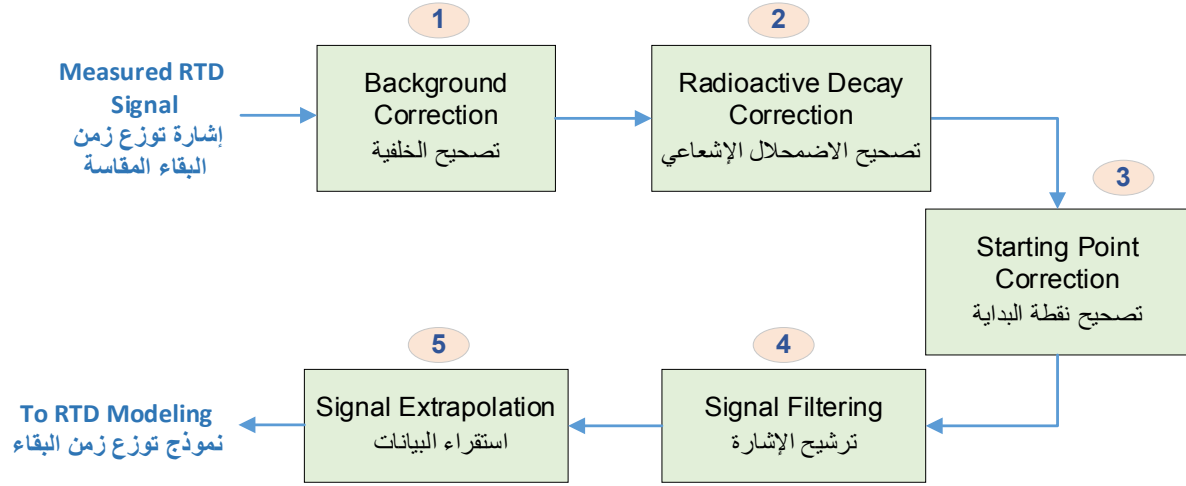
تعاين إشارة RTD من التشويش الناتج عن الإشعاع الخلفي، والاضمحلال الإشعاعي الطبيعي للنظائر المشعة مع مرور الوقت، والتقلبات الإحصائية، وغيرها من التأثيرات الطفيلية. لذا، تُعدّ إجراءات معالجة الإشارة ضرورية لضمان تمثيل الإشارة للمادة المشعة داخل النظام دون تأثير التشويش. بمعنى آخر، الهدف هو إزالة التشويش والحصول على التمثيل الإشعاعي الفعلي. يجب إجراء جميع هذه المعالجات قبل تحديد توزيع

زمن البقاء. تستخدم لتطوير معالجة بيانات القفاء المشع وتحليلها تطبيقات مثل: LabView و [13] Mathlab. تتضمن المعالجة سلسلة من الخطوات المتعلقة بمعالجة الإشارة الرقمية (الشكلان 4، 5):

1- تصحيح الخلفية background correction: تُستخدم هذه الخطوة لإزالة الإشعاع الخلفي الموجود وفقاً للمعادلة التالية:

$$C_c = C_m - B_r, \quad (6)$$

حيث: C_c تركيز متقفي الأثر المشع المصحح؛ C_m - تركيز متقفي الأثر المشع المقاس؛ B_r - مستوى الإشعاع الخلفي.



الشكل 4. مخطط صندوقي يبين خطوات معالجة إشارة توزع زمن البقاء المقاسة.

2- تصحيح الاضمحلال الإشعاعي radioactive decay correction: تُستخدم المعادلة التالية للتعويض عن هذا الاضمحلال:

$$C_r(t) = C_m(t)e^{\lambda t}, \quad (7)$$

حيث: $C_m(t)$ التركيز المقاس كدالة للزمن، و $C_r(t)$ التركيز الحقيقي كدالة للزمن، و λ ثابت الاضمحلال (التفكك الإشعاعي لنظير مشع)، ويتم تمثيله بالمعادلة التالية:

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{t_{1/2}}, \quad (8)$$

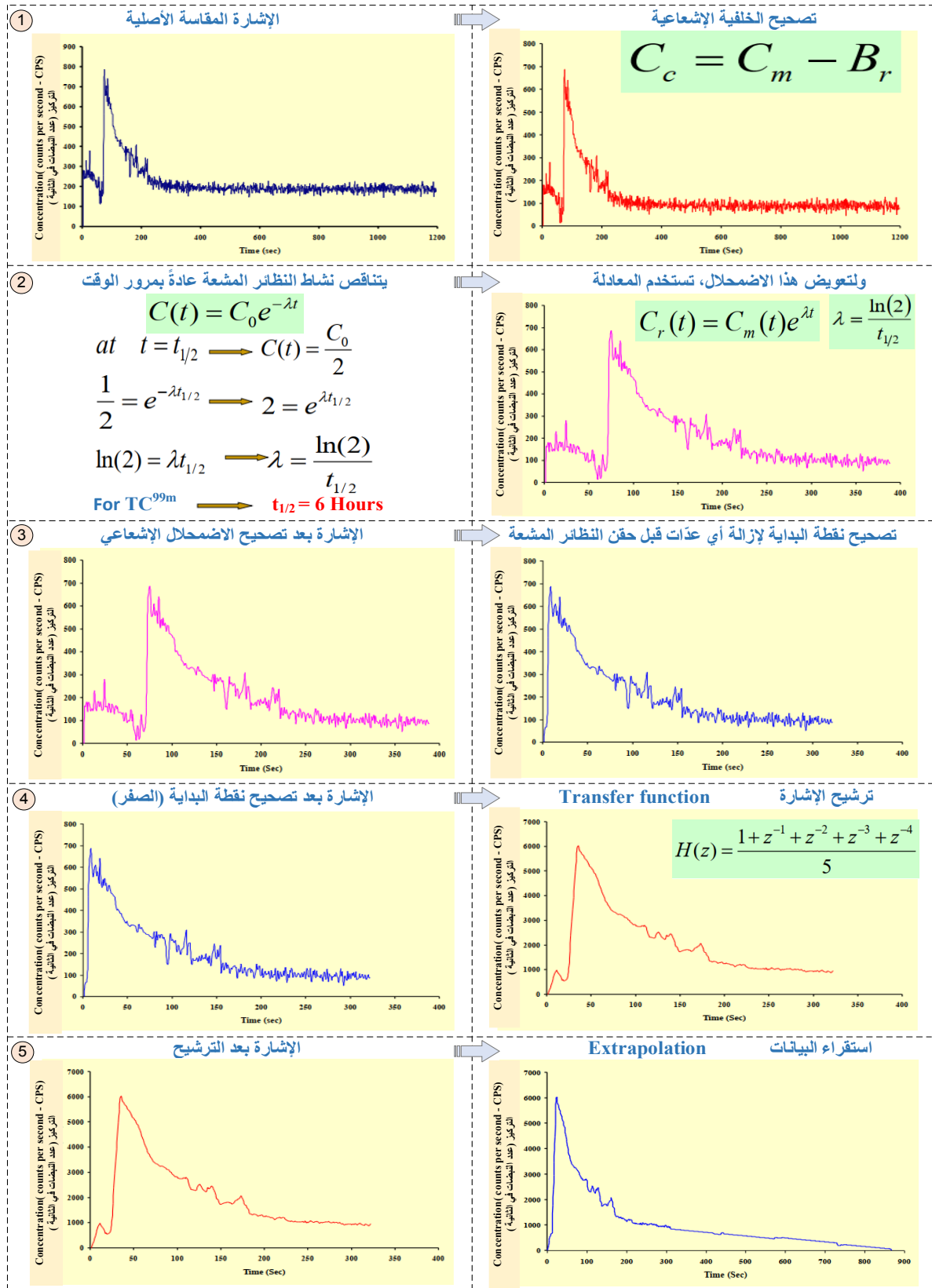
حيث: $t_{1/2}$ عمر النصف لنظير ما.

3- تصحيح نقطة البداية starting point correction: تُستخدم هذه الخطوة لجعل نقطة البداية تساوي صفراً لإزالة أي عدّات قبل الحقن.

4- ترشيح الإشارة filtering: تُستخدم هذه الخطوة لإزالة التقلبات الناتجة عن ضوضاء العد الإحصائية أو الضوضاء الإلكترونية. تُستخدم أداة Cftool من برنامج Matlab لأغراض ترشيح وتنعيم الإشارة.

5- استقراء البيانات extrapolation: الاستقراء هو عملية إنشاء نقاط بيانات جديدة خارج نطاق مجموعة البيانات المعروفة والتي تم تحصيلها خلال التجربة. هذه الخطوة ضرورية لإعادة معدلات تركيز متقفي الأثر المشع إلى الصفر بعد انتهاء عملية جمع البيانات. ويمكن تنفيذ هذه الخطوة باستخدام المعادلة التالية:

$$C_e(t) = C(t)e^{-t} \quad (9)$$



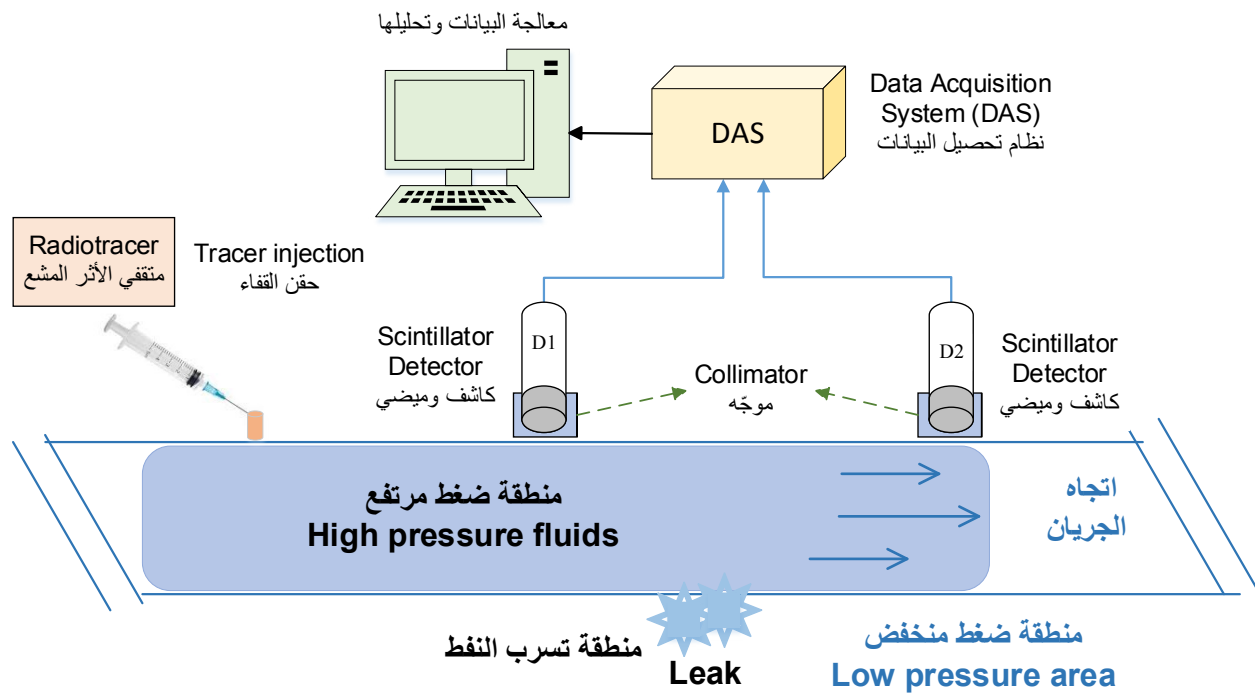
الشكل 5. معالجة الإشارة الرقمية لمنحني RTD.

كشف التسربات في خطوط الأنابيب المدفونة تحت الأرض

يُشبه في حدوث تسريب في خطوط النفط أو الغاز نتيجةً لشق أو ثقب أو مسامية غير مقصودة في جدار أو وصلة محيطية، إذا لوحظ أي سلوك غير طبيعي للنظام مثل: انخفاض الضغط؛ تلوث المنتج؛ انخفاض كفاءة العملية. تُسبب التسريبات مشاكل خطيرة في المصانع أو خطوط

الأنابيب، مثل تدهور جودة المنتج النهائي أو انخفاض قدرة نقل المياه والنفط والغاز. كما ترتبط التسريبات بمشاكل تتعلق بالسلامة، إذ قد يحدث تلوث للمياه السطحية والجوفية والتربة في حالة تسرب النفط أو السوائل السامة. يُعدّ الكشف عن التسريبات في خطوط الأنابيب المدفونة تحت الأرض مهمة بالغة الصعوبة نظراً لصعوبة الوصول إليها. تتيح متقنيات الأثر المشعة الكشف المبكر عن التسريبات الصغيرة قبل أن تتطور إلى حوادث تلوث كبير. وقد استُخدمت تقنية متقنيات الأثر المشعة بنجاح في البحث عن هذه التسريبات بسبب حساسيتها المنافسة مقارنة بتقنيات الاختبارات اللاإتلافية الأخرى [14]. ويمكن لأساليب الكشف عن التسريبات باستخدام المتقنيات في المبادلات الحرارية وخطوط الأنابيب تحت الأرض أن تصل إلى حدود كشف تصل إلى 0.1% من تدفق الموائع.

تعتمد طريقة قفاء الأثر المشع المستخدمة في كشف التسريبات في خطوط الأنابيب المدفونة تحت الأرض على مبدأ تدفق الموائع من منطقة الضغط المرتفع إلى منطقة الضغط المنخفض (الشكل 6). حيث يتم حقن قفاء الأثر المشع في مدخل خط الأنابيب، فيمتزج مع السائل/الغاز الجاري في الأنبوب ويتحرك باتجاه موضع التسرب ومنه إلى خارج الأنبوب. يُحقق طول الخلط المطلوب لتجانس المادة المشعة مع السائل المراد اقتفاؤه عند نقطة تساوي 100 ضعف للقطر الخارجي للأنبوب من نقطة الحقن. يكشف موضع التسرب بقياس النشاط الإشعاعي مع الاختلاف في طريقة الكشف ويمكن تمييز أربع طرائق شائعة للكشف وهي: طريقة رصد الإشعاع في الطبقة العليا من الأرض؛ طريقة سرعة التدفق؛ طريقة البحث عن اتجاه تدفق المادة المشعة؛ طريقة الكشف بجهاز فحص خطوط الأنابيب (pig).



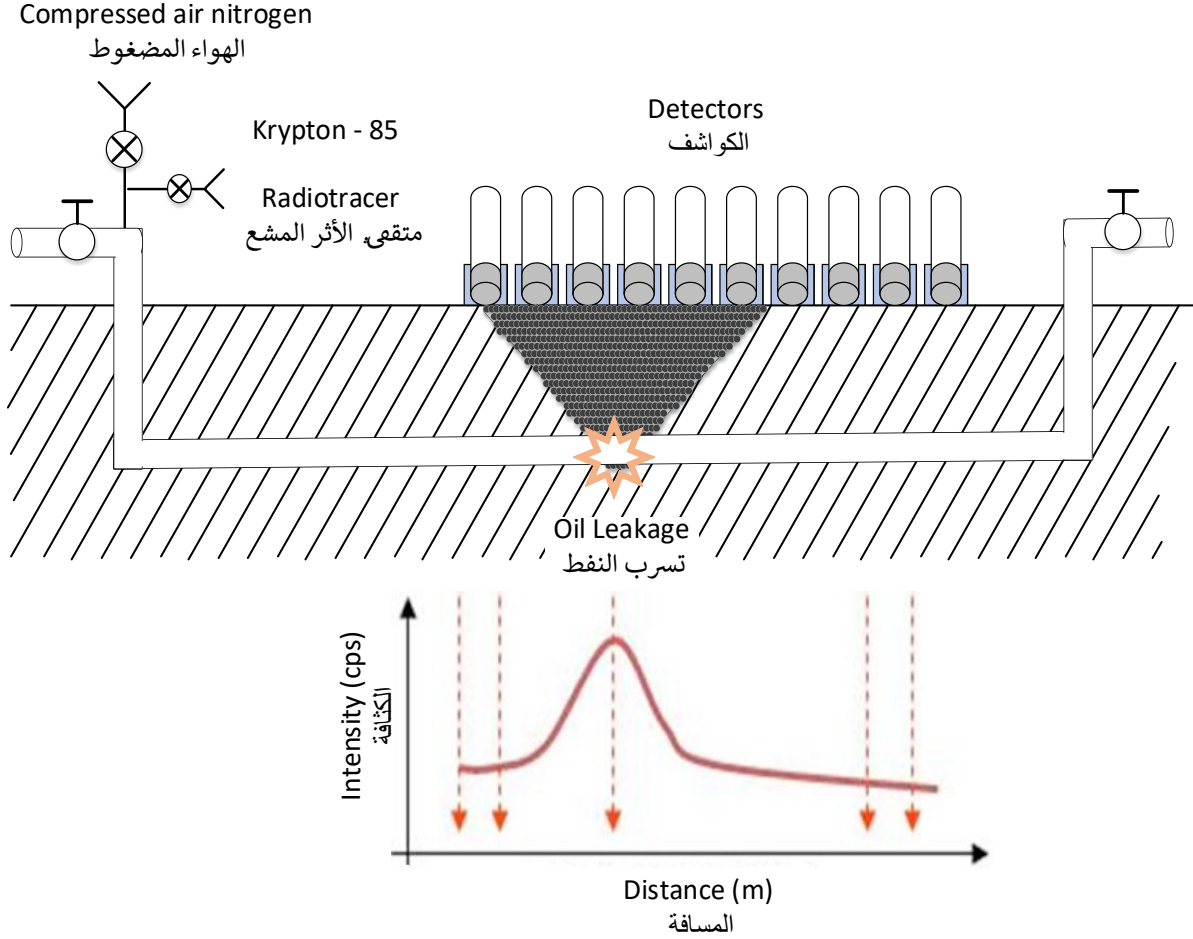
الشكل 6. مبدأ كشف التسرب باستخدام تقنية القفاء الإشعاعي.

1- طريقة رصد الإشعاع في الطبقة العليا من الأرض

يستند مبدأ هذه الطريقة upper ground radiation monitoring إلى رصد وكشف الإشعاع الذي عبر من مكان التسرب إلى خارج خط الأنابيب والمرحلة باتجاه السطح، وذلك عندما يكون خط الأنابيب مدفوناً على عمق أقل من 1 متر من سطح الأرض. يشترط في تطبيق هذه الطريقة أن يتمكن إشعاع غاما عالي الطاقة للمتقني المستخدم من اختراق طبقة التربة فوق خط الأنابيب. يعتمد كشف التسرب على حجم التسرب وموضعه على خط الأنابيب، إضافة إلى طول وقطر خط الأنابيب. تشمل الإجراءات المتبعة لتطبيق هذه الطريقة (الشكل 7) على الخطوات التالية:

- إيقاف خط الأنابيب المدفون تحت الأرض الذي يشك بوجود تسربات فيه.
- إغلاق الصمامات عند طرفي خط الأنابيب.
- حقن غاز النتروجين المضغوط ومادة مشعة غازية، مثل الكريبتون-85، في خط الأنابيب.

- يتحرك غاز النروجين ونظير الكريبتون-85 الغازي باتجاه نقطة/نقاط التسرب.
- تسرب النظير المشع من خط الأنابيب تحت الأرض.
- تحريك الكاشف وقياس شدة الإشعاع على سطح الأرض على طول خط الأنابيب المدفونة.
- يُظهر الكريبتون-85 المطلق من نقطة التسرب أعلى شدة إشعاع.



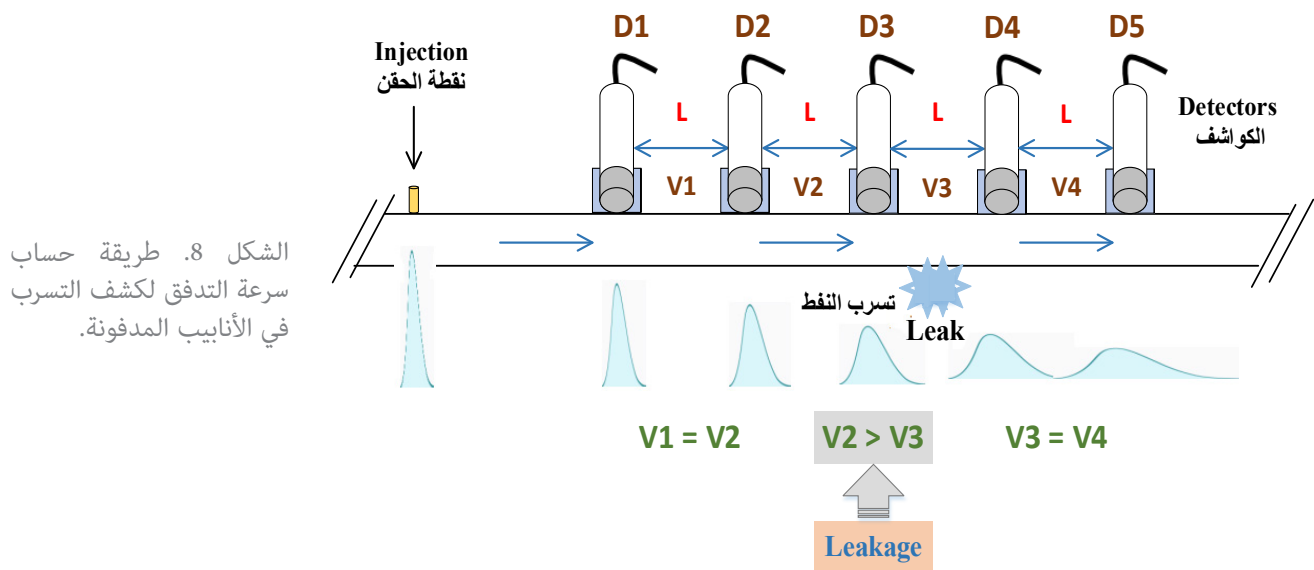
الشكل 7. طريقة رصد الإشعاع في الطبقة العليا من الأرض.

2- طريقة سرعة التدفق

تستخدم طريقة سرعة التدفق flow velocity في كشف التسرب في خطوط الأنابيب المدفونة تحت الأرض فقط في حالة كان التسرب بنسبة $\leq 10\%$. تشمل الإجراءات المتبعة لتطبيق هذه الطريقة (الشكل 8) على الخطوات التالية:

- وضع الكواشف على خط الأنابيب.
- تحديد المسافة بين الكواشف المتجاورة L.
- حقن نبضي للقفاء المشع داخل الأنابيب.
- تسجيل زمن الانتقال من كاشف إلى آخر t.
- حساب السرعة الخطية وفقاً للمعادلة التالية:

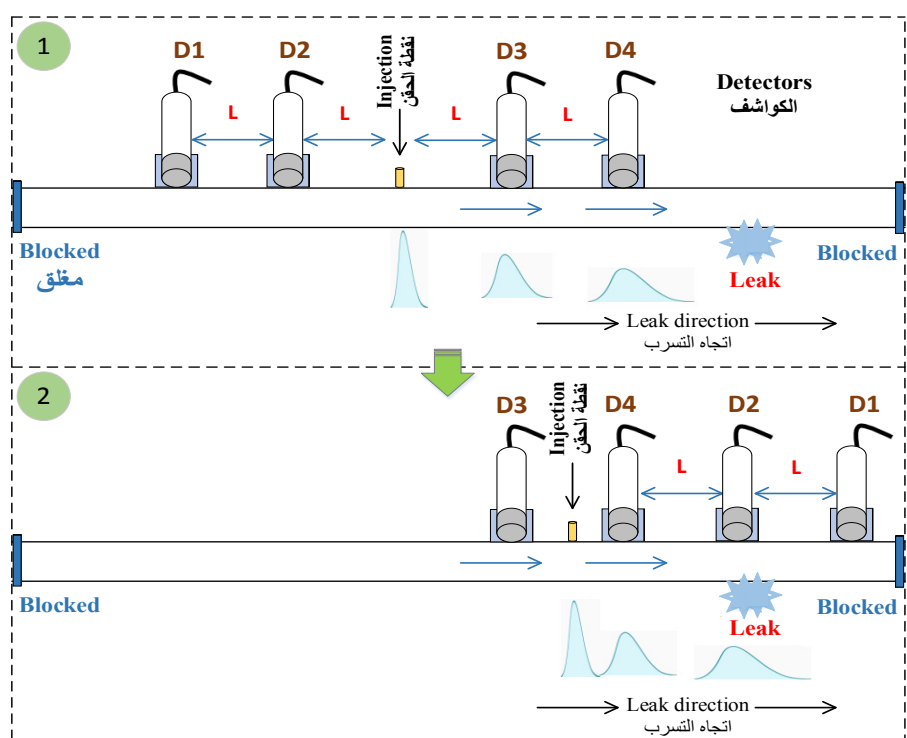
$$\text{Velocity} = V = \frac{\text{Distance}}{\text{MRT}} = \frac{L}{\bar{t}} \quad (10)$$



3- طريقة البحث عن اتجاه تدفق المادة المشعة

تستخدم طريقة البحث عن اتجاه تدفق المادة المشعة tracer flow direction في كشف التسرب في خطوط الأنابيب المدفونة تحت الأرض، كما تم استخدامها بنجاح في الكشف عن تسرب الزيت في كابلات الكهرباء الأرضية ذات الجهد العالي في إندونيسيا. يعتمد مبدأ هذه الطريقة على حقن المادة المشعة من منتصف الأنبوب وتستخدم أجهزة الكشف على يمين ويسار نقطة الحقن حيث تُظهر لنا تدفق المادة المشعة. تشمل الإجراءات المتبعة لتطبيق هذه الطريقة (الشكل 9) على الخطوات التالية:

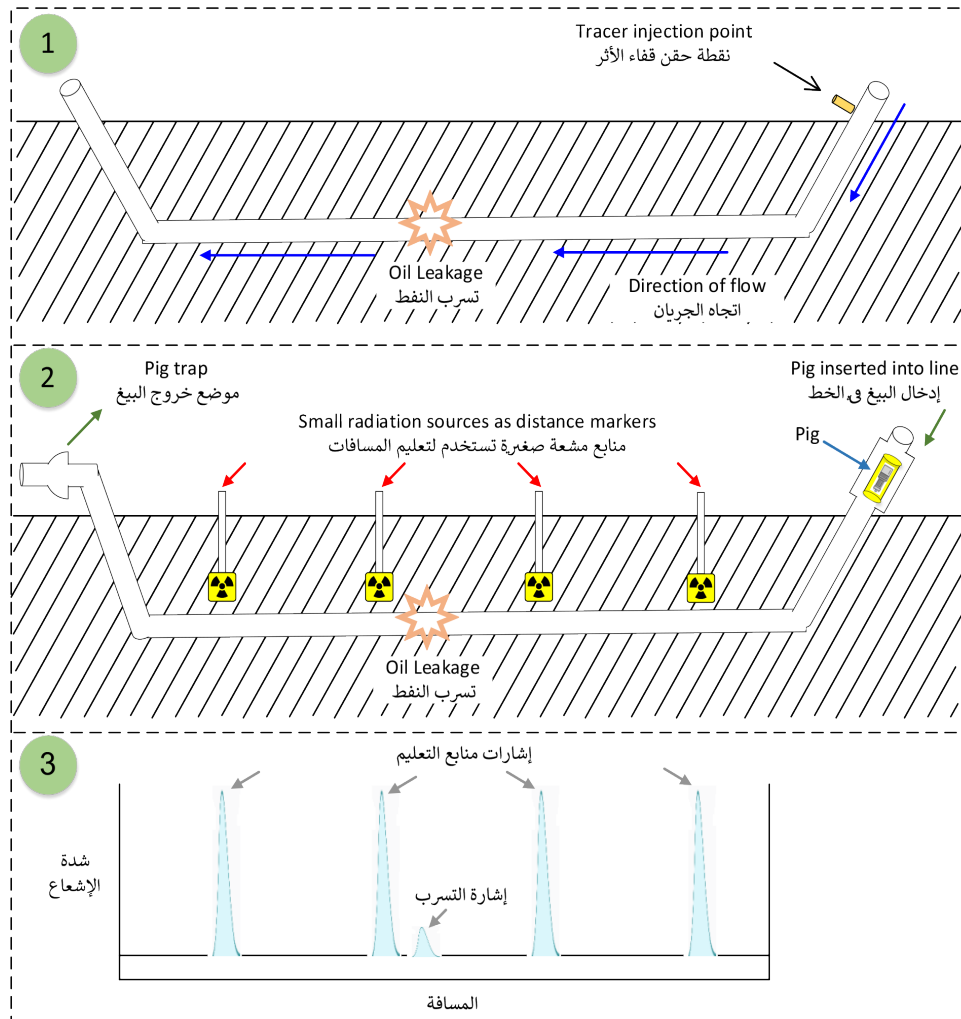
- استخدام أربعة كواشف، كاشفين على يمين نقطة الحقن والكاشفان الآخران على يسار نقطة الحقن.
- حقن المادة المشعة في نقطة الحقن الموجودة عند منتصف الأنبوب.
- مراقبة شدة الإشعاع على كل كاشف.
- تحديد اتجاه تدفق المادة المشعة.
- تكرار الخطوات السابقة على الجهة التي تم تحديدها لتدفق المادة المشعة.



4- طريقة الكشف بجهاز فحص خطوط الأنابيب (pig)

يستند مبدأ هذه الطريقة إلى استخدام جهاز الفحص البيغ pig-radiotracer للكشف عن تسربات خطوط الأنابيب المدفونة تحت الأرض. يتضمن جهاز البيغ على كاشف وذاكرة لتخزين البيانات موضوعين ضمن أسطوانة كتيمة للماء وبتصميم ميكانيكي انسيابي مناسب. تتميز هذه الطريقة بحساسية أعلى لكشف التسربات؛ إذ يتحرك البيغ بالقرب من المناطق التي يحدث فيها التسرب. يمكن بهذه الطريقة تحديد موقع تسرب من مرتبة 0.1 لتر في الدقيقة بدقة عالية. تشمل الإجراءات المتبعة لتطبيق هذه الطريقة (الشكل 10) على الخطوات التالية:

- حقن محلول قفاء الأثر المشع في الأنبوب دفعة واحدة دون انقطاع بحيث يملأ مقطع الأنبوب.
- تتسرب كمية من المادة المشعة إلى خارج الأنبوب عندما تواجه ثقباً أو كسراً وتحبس في المنطقة المجاورة.
- يقوم المائع المتدفق في الأنبوب (سائل/غاز) والذي يتم ضخه بعد المادة المشعة بتنظيف الجدران الداخلية للأنبوب من بقايا المادة المشعة.
- بعد فترة زمنية محددة من دفعة المادة المشعة يتم إطلاق جهاز البيغ الذي يحوي كاشفاً وذاكرة تخزين البيانات في الأنبوب لتأدية مهمة كشف التسرب.
- تُثبت مصادر مشعة مغلقة خارجية مثل الكوبالت (Co-60) في عدة مواقع على طول الأنبوب لتعليم المسافات.
- يسجل الكاشف شدة الإشعاع أثناء تحركه داخل الأنبوب، بما في ذلك الإشعاع من نقطة التسريب.



الشكل 10. طريقة الكشف بجهاز فحص خطوط الأنابيب pig-radiotracer.

كشف التسربات في المبادلات الحرارية

المبادل الحراري heat exchanger هو جهاز مصمم لنقل الحرارة بكفاءة من سائل إلى آخر. يتم استخدام المبادلات الحرارية على نطاق واسع في مصافي النفط ومصانع الكيماويات والبتروكيماويات ومعالجة الغاز الطبيعي والتبريد ومحطات توليد الطاقة وتكييف الهواء وتدفئة الأماكن. يمكن تصنيف المبادلات الحرارية وفقاً لترتيب التدفق الخاص بها إلى نوعين: نوع التدفق المتزامن flow concurrent ونوع التدفق المعاكس flow countercurrent. في المبادلات الحرارية ذات التدفق المتزامن، يدخل السائلان إلى المبادل من الطرف نفسه، ويتحركان بالتوازي إلى الطرف الآخر. أما في المبادلات الحرارية ذات التدفق المعاكس، فيدخل السائلان إلى المبادل من طرفين متقابلين. ويُعدّ تصميم التدفق المعاكس الأكثر كفاءة، إذ ينقل أكبر قدر من الحرارة.

يُعدّ كشف التسربات في المبادلات الحرارية أمراً بالغ الأهمية لأداء خطوط الإنتاج وجودة المنتجات النهائية. توجد تقنيات تقليدية لإتلافية متعددة للكشف عن التسربات في أوعية المعالجة والمحطات، ويمكن استخدام بعضها للكشف عن التسربات في المبادلات الحرارية أثناء التوقف عن العمل من أجل الصيانة. يُعدّ الكشف عن التسربات في المبادلات الحرارية أثناء التشغيل On-line detection مهمة بالغة الصعوبة نظراً لتعقيدها وظروف تشغيلها القاسية. لا تُناسب تقنيات NDT التقليدية الكشف عن التسربات أثناء التشغيل (دون إيقاف العملية) في المبادلات الحرارية الصناعية.

تُستخدم تقنية متقفيات الأثر المشعة للكشف عن التسربات في المبادلات الحرارية في الصيانة الروتينية التجارية للصناعات البتروكيماوية والكيميائية في العديد من الدول المتقدمة والنامية [15]. يتم حقن المادة المشعة في منطقة الضغط العالي في المبادلات الحرارية وفي حال حدوث تسريب، يتدفق كمية من المادة المشعة إلى منطقة الضغط المنخفض (عن طريق التجاوز by passing, short circuit)، أما باقي المادة المشعة فتتدفق في منطقة الضغط العالي للمبادل الحراري. ويمكن تمييز نوعين:

1- حالة ضغط السائل في جانب الغلاف shell side أعلى منه في جانب الأنبوب tube side.

2- حالة ضغط السائل في جانب الأنبوب tube side أعلى منه في جانب الغلاف shell side.

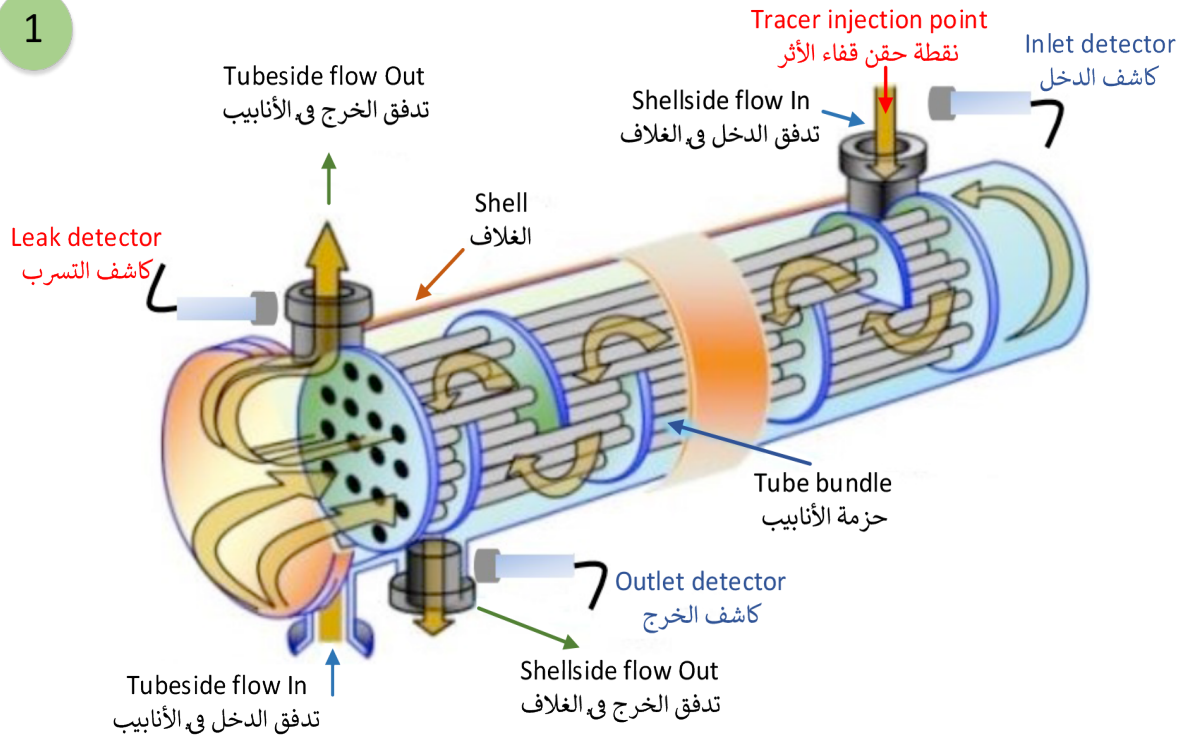
يوضح الشكل 11 مبدأ طريقة متقفيا الأثر المشع للكشف عن التسرب في المبادلات الحرارية الأنبوبية (shell and tube type heat exchanger)، وهي أكثر الأنواع الأكثر شيوعاً في الصناعة. يتم حقن كمية ضئيلة جداً من نظير مشع متوافق على شكل نبضة حادة في تيار العملية ذي الضغط العالي الداخل إلى المبادل الحراري. يتم استخدام كاشفين إشعاعيين على الأقل لمراقبة حركة النظير المشع عبر المبادلات الحرارية.

الاختبارات الإتلافية في الصناعة 4.0

دخلت الصناعة طورها الرابع "Industry 4.0" في عام 2011 في معرض هانوفر (في ألمانيا)، أكبر معرض تجاري في العالم. يُعبر مصطلح الصناعة 4.0 (الثورة الصناعية الرابعة) عن التحول الرقمي في التصنيع، حيث تم دمج التكنولوجيا الرقمية في عملية التصنيع بأكملها [3]. تتميز الصناعة 4.0 بدمج التقنيات التي تلمس الخطوط الفاصلة بين المجالات المادية والرقمية والبيولوجية. تشكل تقانة المعلومات والاتصالات information and communication technology (ICT) عماد الثورة الصناعية الرابعة، ويتم وصفها من خلال الاتجاهات الحديثة في الأتمتة الصناعية، مثل: الأنظمة الفيزيائية السيبرانية cyber-physical systems وإنترنت الأشياء والحوسبة السحابية. تعتمد المصانع الذكية في إطار الصناعة 4.0 على الآلات وأجهزة الاستشعار المؤتمتة المتصلة بأنظمة الحاسوب، مما يُمكنها من جمع البيانات، والتعلم منها، واتخاذ قرارات الإنتاج. تُحدث التقنيات الداعمة للثورة الصناعية الرابعة 4.0 (الذكاء الصناعي، إنترنت الأشياء الصناعية، الأنظمة الفيزيائية السيبرانية، التوائم الرقمية، الروبوتات وغيرها) ثورة في الاختبارات الإتلافية.

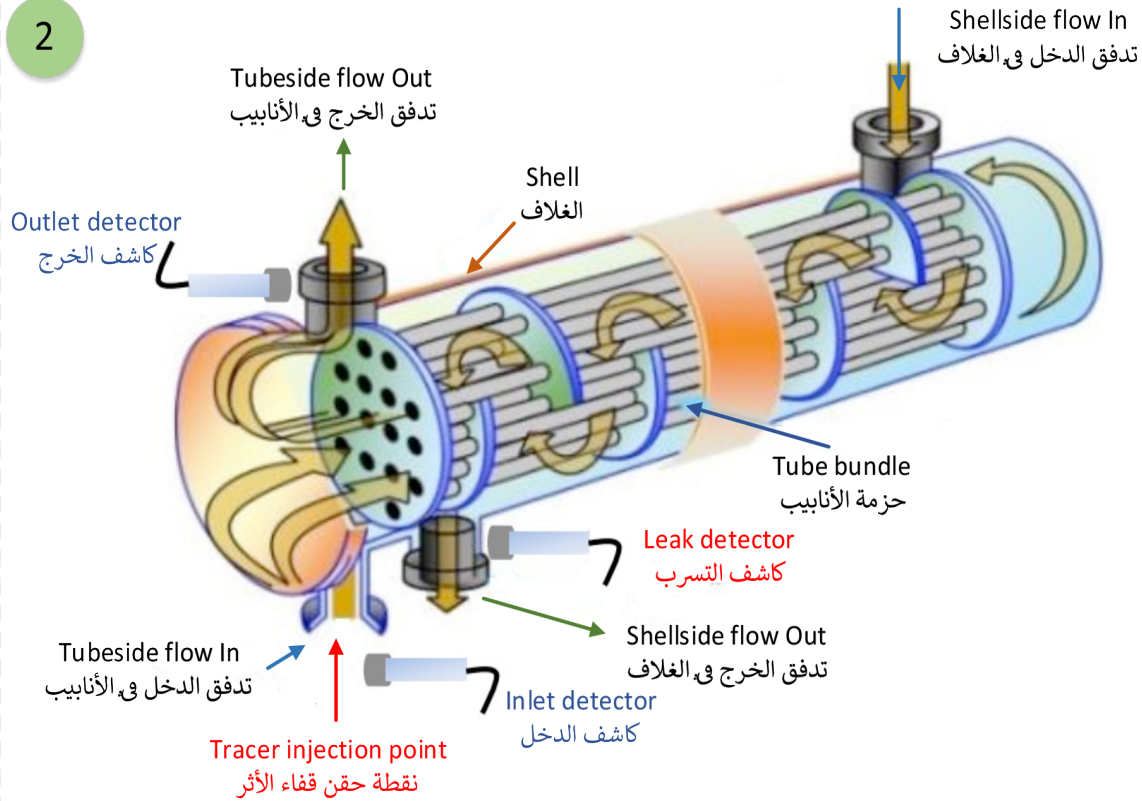
يُطلق مفهوم NDT 4.0 (الجيل الرابع للاختبارات الإتلافية) للتعبير عن الاختبارات والفحوصات السيبرانية الفيزيائية الناشئة عن التقنيات الرقمية للصناعة 4.0 [16]. بينما ركزت الأجيال السابقة للاختبارات الإتلافية على تحسين الاختبار والتقييم بالاستفادة من الأدوات والأساليب والتطورات المتاحة في كل فترة، تتميز ثورة الاختبارات الإتلافية الرابعة بالتكامل بين الأدوات وأساليب الاختبار والتقنيات الرقمية والاتصالات في أنظمة متكاملة ذات حلقة مغلقة، مما يسمح بتغذية راجعة وتوقعات للتصنيع (الشكل 12). يتمثل الهدف الرئيسي NDT 4.0 في تحسين أداء الفحص وهندسة السلامة واتخاذ القرارات من أجل السلامة والاستدامة، وضمان الجودة، فضلاً عن توفير بيانات مناسبة في الوقت المناسب لتحسين

1



Assume: fluid pressure in shell side is higher than that in tube side
حالة ضغط السائل في جانب الغلاف أعلى منه في جانب الأنبوب.

2

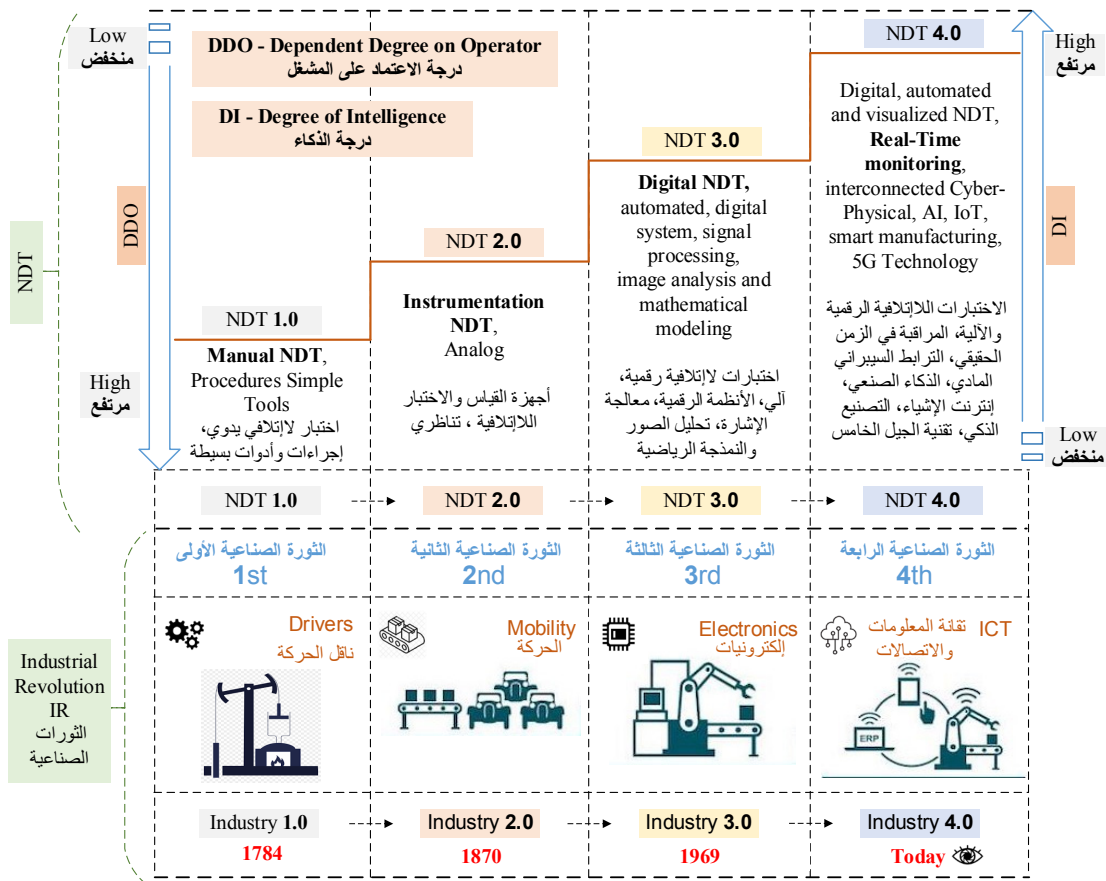


Assume: fluid pressure in tube side is higher than that in shell side
حالة ضغط السائل في جانب الأنبوب أعلى منه في جانب الغلاف.

الشكل 11. كشف التسرب في المبادلات الحرارية.

خصائص التصميم والإنتاج والصيانة. ويتم ذلك من خلال تطوير أنظمة قادرة على جمع البيانات من أجهزة الاستشعار التقليدية والذكية، وإجراء دمج البيانات اللازم، وتحديد مناطق العيوب تلقائياً بدقة عالية؛ مما يوفر في النهاية تمثيلات بصرية مفصلة مثل الصور ثنائية أو ثلاثية الأبعاد.

لا يُمثل نظام NDT 4.0 مجموعة ثابتة من القواعد والمفاهيم، بل نهجاً ثورياً لفحص المواد، من خلال دمج تقنيات ذكية متطورة والاستفادة من أجهزة الاستشعار الذكية والذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي والاتصالات اللاسلكية. يُحسن NDT 4.0 بشكل ملحوظ موثوقية ودقة عمليات الفحص عبر تقنيات دمج البيانات المتطورة. يتجاوز هذا النهج المبتكر مجرد زيادة حجم البيانات أو استحداث أساليب جديدة للتقييم الإلزامي، ويركز بدلاً من ذلك على التكامل الشامل للبيانات والتحليل الذي.



الشكل 12. تطور الاختبارات اللاإلزامية مع الثورات الصناعية.

التوصيات

ختاماً، وفي ظل التطور المتسارع الذي يشهده قطاع التصنيع عالمياً، والمتمثل بدخوله طور الصناعة 4.0 والبدء بالتنظير للصناعة 5.0 (يُطلق على التغيير من الصناعة 4.0 إلى التعزيز الصناعي المبتكر التالي)؛ وما يرافق ذلك من تطورات في مجال الاختبارات اللاإلزامية يمكننا أن نوصي بما يلي:

- العمل على توطین طرائق الاختبارات اللاإلزامية النوعية بما فيها متقنيات الأثر المشعة والسعي إلى تطبيقها في الصناعات البترولية والغاز في سوريا.
- ضرورة مواكبة التطور الكبير الحاصل في مجال الاختبارات اللاإلزامية (NDT 4.0) والمتمثل بدمج تقنيات الثورة الصناعية الرابعة في عمليات الفحص والاختبار، وذلك بهدف الحفاظ على القدرة التنافسية وتقديم خدمات فحص أفضل.

المراجع

- [1] د. حبيب خضر (2025)، "التقنيات النووية اللاإلزامية النوعية في الصناعة"، مجلة عالم الذرة - 21 - 8، No. 164.
- [2] د. وفيق حرارة، م. محمد أفغاني، "كشف التسربات همتقنيات الأثر المشعة"، قسم الخدمات العلمية - هيئة الطاقة الذرية السورية، 2009.
- [3] د. حبيب خضر (2024)، "التحول الرقمي في الصناعة والخدمات في سورية"، مجلة عالم الذرة - 66 - 58، No. 164.

- [4] <https://www.iaea.org/topics/other-non-destructive-testing>
- [5] <https://www.iaea.org/topics/radiotracers>
- [6] IAEA Technical Reports Series No. 423, Radiotracer Applications in Industry: A Guidebook, Vienna, 2004.
- [7] PANT, H.J., Applications of the radiotracers in the industry: A review, Applied Radiation and Isotopes, vol. 182, April 2022.
- [8] Kasban H., Zahran O., Abd El-Samie F.E. New Trends for On-Line Troubleshooting in Industrial Problems Using Radioisotopes, The Online Journal on Electronics and Electrical Engineering (OJEEE), vol. 2, no. 3, 2010.
- [9] IAEA TECDOC Series No.31, Radiotracer Residence Time Distribution Method for Industrial and Environmental Applications, Vienna, 2008.
- [10] Stegowski Z., Furman L. Radioisotope tracer investigation and modeling of copper concentrate dewatering process, Inter. J. Min. Proc. vol. 73, no. 1, pp. 37–43, 2004.
- [11] Kasban H., Zahran O., Arafa H. EL-Kordy M., Elaraby S. M. S., Abd EL-Samie, F.E. Laboratory experiments and modeling for industrial radiotracer applications, Applied Radiation and Isotopes, vol. 68, no. 6, pp. 1049–1056, 2010.
- Kasban H., Elsayed H. Ali, Mohamed S. EL-Tokhy, Arafa H. Improvement of Radiotracer Residence Time Distribution Analysis in [12] Industrial Applications, International Journal of Systems Signal Control and Engineering Application, vol. 14, no. 1, pp. 1–17, 2021.
- [13] Othman N, Ibrahim M, Yussup N, Yussof NH., Syafiq Yunos MA. Application of Smart Radiotracer Data Analysis (SRDA) Software for Industrial Application, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. doi:10.1088/1757-899X/458/1/012083.
- [14] IAEA (2009), Leak detection in heat exchangers and underground pipelines using radiotracers. IAEA-TCS-38
- [15] Pant H.J., Sharma V.K., Singh G. Radiotracer Investigation for Leak Detection in A High Pressure Heat Exchanger System in a Petroleum Refinery. India: N. p., 2009. Web. International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy - 2009, New Delhi (India), 29 Sep - 1 Oct 2009.
- [16] Sophian A. Non-destructive testing (NDT) in industry 4.0: A brief review, Proceeding ICST Vol. 2, June 2021. e-ISSN: 2722-7375.

Radiotracers Technology in the Petroleum and Gas Industries

Abstract: The oil and gas sector in Syria is attractive to global energy companies for the purpose of rehabilitation and exploration. The extensive and anticipated development and investment in onshore and subsea oil and gas fields will lead to new challenges, requiring the adoption and localization of high-quality, advanced non-destructive technologies. Radiotracer technology is a preferred, non-destructive method for the early detection of leaks and blockages in underground heat exchangers and transmission pipelines, as well as for leak testing in subsea systems. This technology is also used to improve the performance of industrial processes (flow rates, mixing times, optimizing of industrial process parameters, etc.) and quality control (product homogeneity). The benefits of using this technology include: reducing downtime; ensuring safe operation; protecting the environment from pollution; and saving money. The aim of this article is to demonstrate the importance and methods of using radiotracers in detecting and identifying problems in industrial systems, particularly in the petroleum and gas industries. The importance of technologies supporting the Fourth Industrial Revolution 4.0 in promoting non-destructive testing (NDT 4.0) will also be highlighted.

Keywords: Specific NDT Techniques; NDT 4.0; Radiotracers; Petroleum and gas industry; Defect detection; Residence time distribution.

◀ تأليف: د. حبيب خضر، قسم الخدمات العلمية، هيئة الطاقة الذرية السورية.

الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة



ملخص

يعد الانتقال من المراقبة البيئية التقليدية إلى الإدارة الفاعلة نقلة نوعية في فهم المخاطر الإشعاعية وإدارتها، حيث يتحول التركيز من رصد الوضع الحالي إلى التنبؤ بالمخاطر والتحكم بها بفعالية قبل وقوعها.

تعتمد الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة على مزيج متكامل من الركائز النظرية والتطبيقية، بدءاً من الرصد الذكي والتحليل المستمر، مروراً بتقييم المخاطر واتخاذ القرار الاستباقي، وصولاً إلى إدارة النفايات المشعة، ونظم الإنذار المبكر، واستخدام الذكاء الاصطناعي والتقنيات الحديثة في التنبؤ بالسيناريوهات البيئية المحتملة. يتيح هذا التكامل تعزيز القدرة على حماية الإنسان والنظم البيئية، وتحقيق الاستخدام الآمن والمستدام للتقانات والمواد المشعة. كما أنها تتيح اتخاذ قرارات قائمة على بيانات دقيقة وتحليلات علمية، ما يعزز فعالية استراتيجيات الوقاية الإشعاعية ويقلل من الأضرار الصحية والبيئية والاقتصادية المحتملة.

الكلمات المفتاحية: الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة، الوقاية الإشعاعية، حماية البيئة، النفايات المشعة، المراقبة الإشعاعية البيئية.

مقدمة

تتسارع وتيرة التقدم التكنولوجي وتزداد استخدامات الطاقة النووية والمواد المشعة في المجالات الصناعية والطبية والزراعية؛ لذا أصبح التعرض للإشعاع جزءاً لا يمكن تجاهله من حياتنا اليومية، سواء بشكل مباشر أم غير مباشر. على الرغم من أن الإشعاع الطبيعي يعد جزءاً من النظام البيئي منذ نشأة الأرض، إلا أن النشاط البشري ساهم في وجود بيئة إشعاعية معقدة، تتطلب أدوات أكثر تطوراً ليس فقط لرصدها، بل لإدارتها بشكل يضمن حماية الإنسان والنظم البيئية من المخاطر المحتملة.

تعد حماية البيئة الإشعاعية إحدى الركائز الأساسية لضمان الاستخدام الآمن والمستدام للتقنيات النووية والإشعاعية، حيث تهدف إلى حماية الإنسان ومكونات البيئة من الآثار الضارة للإشعاع المؤين، مع الاستفادة من التطبيقات السلمية للطاقة النووية في مجالات الطب والصناعة والزراعة والبحث العلمي. تعتمد الإدارة البيئية الإشعاعية الحديثة على منظومة متكاملة تشمل التشريعات والرقابة والرصد البيئي وتقييم الجرعات الإشعاعية وإدارة النفايات المشعة والاستعداد للطوارئ الإشعاعية، بما ينسجم مع معايير الأمان الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية.

أظهرت الحوادث النووية الكبرى، مثل حادثة تشيرنوبل في عام 1986 وحادثة فوكوشيما في عام 2011، خطورة أن تتحول الملوثات الإشعاعية إلى تهديد طويل الأمد على الصحة العامة والبيئة. هذه الحوادث وغيرها كشفت بوضوح حدود الأنظمة التقليدية للمراقبة البيئية التي كانت تركز غالباً على القياس بعد حدوث الانبعاثات، بدلاً من التركيز على التنبؤ بالمخاطر ومنعها قبل وقوعها. في هذا السياق، نشأت الحاجة إلى الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة باعتبارها إطاراً استباقياً متكاملًا يربط بين الرصد والتحليل واتخاذ القرار وتنفيذ التدابير الوقائية، بما يضمن حماية الإنسان والبيئة على المدى الطويل [1].

على الرغم من أهمية المراقبة البيئية التقليدية، لكنها تبقى مجرد رد فعل على الحوادث الإشعاعية، فهي توفر بيانات عن الوضع الحالي أو الماضي، لكنها لا تقدم حلولاً استباقية أو أدوات للتخطيط المستقبلي. من هنا تكمن أهمية الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة التي تتجاوز المراقبة لتصبح نظاماً متكاملًا يشمل التنبؤ والتقييم والتحكم والتحسين المستمر والمشاركة المجتمعية.

الإشعاع في البيئة ومفهوم البيئة الإشعاعية

لفهم الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة، سيكون من الضروري أولاً تحديد مفهوم البيئة الإشعاعية. يمكن تعريف البيئة الإشعاعية ببساطة أنها المحيط الذي يحتوي على مكونات طبيعية وبشرية تتعرض للإشعاع، سواء كان من مصادر طبيعية، مثل سلاسل تفكك اليورانيوم والثوريوم الموجودة في التربة والصخور، أم من مصادر بشرية المنشأ مثل: المنشآت النووية والمفاعلات البحثية والمستشفيات التي تستخدم الطب النووي، وصناعات التعدين التي تتعامل مع مواد مشعة طبيعية (NORM: naturally occurring radioactive material) و(TENORM: technologically enhanced naturally occurring Radioactive Material) [2-4].

تتضمن البيئة الإشعاعية عدة عناصر، منها: الهواء والماء والتربة والغذاء والمكونات الحيوية التي تتعرض بشكل مستمر للإشعاع؛ على سبيل المثال: الهباء الجوي يمكن أن يحمل جزيئات مشعة تنتقل لمسافات طويلة، والمياه يمكن أن تنقل النكليدات المشعة من مكان إلى آخر عبر الأنهار والبحيرات والمياه الجوفية، في حين تتوضع التربة والرسوبيات في مناطق محددة، مما يشكل مصدراً طويلاً الأمد للتعرض الإشعاعي.

إن فهم هذه المكونات والتفاعلات بينها يشكل قاعدة علمية أساسية لتصميم نظم الإدارة الفاعلة، حيث لا يكفي جمع البيانات عن مستويات الإشعاع الحالية، بل يجب تحليلها ضمن سياق بيئي متكامل، يأخذ في الاعتبار انتقال الملوثات وتراكمها في السلسلة الغذائية وتأثيراتها المحتملة على الإنسان والكائنات الحية الأخرى [1, 2, 5].

أهمية الانتقال من المراقبة التقليدية إلى الإدارة الفاعلة

تاريخياً، اعتمدت معظم برامج الوقاية الإشعاعية على المراقبة البيئية التقليدية، والتي تشمل قياس معدلات الجرعة الإشعاعية، وأخذ عينات الهواء والماء والتربة وتحليل هذه العينات في المختبرات. رغم فعالية هذه البرامج في الكشف عن الانبعاثات الإشعاعية بعد وقوعها، إلا أنها تبقى محدودة من ناحية الاستجابة الاستباقية.

المراقبة التقليدية تصف الوضع الحالي أو السابق للإشعاع في البيئة، لكنها لا تعالج المشكلة الأساسية المتمثلة في إدارة المخاطر المستقبلية والوقاية منها. على سبيل المثال، إذا تم اكتشاف زيادة في مستويات الرادون في الهواء أو الراديوم في التربة، فإن التدخل يكون غالباً بعد حدوث التلوث، مما يزيد من تكلفة المعالجة والآثار الصحية والبيئية المحتملة. من هنا نشأت الحاجة إلى نموذج الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة، الذي يقوم على مجموعة من المبادئ الأساسية:

1. الاستباقية: التنبؤ بالمخاطر قبل وقوعها باستخدام نماذج علمية وتحليل البيانات.
 2. التكامل: ربط جميع عناصر البيئة الإشعاعية معاً لتقييم التأثيرات بشكل شامل.
 3. التحكم: وضع استراتيجيات للحد من الانبعاثات والتعرض الإشعاعي.
 4. التحسين المستمر: مراجعة الأداء وتحسين الإجراءات بناءً على البيانات والتقنيات الحديثة.
 5. الشفافية والمشاركة المجتمعية: إشراك المجتمع المحلي وأصحاب المصلحة في عمليات الرصد واتخاذ القرار من أجل بناء الثقة والوعي البيئي.
- إن تطبيق هذه المبادئ يكشف أن الإدارة لا تقتصر على جمع البيانات وتحليلها، بل تشمل إصدار توصيات عملية واتخاذ قرارات سياسية وتصميم خطط للطوارئ والتحكم في مصادر التلوث الإشعاعي والنفايات المشعة. هذا النهج يحول الإدارة البيئية الإشعاعية من كونها مجرد نشاط تقني إلى أداة استراتيجية لحماية الإنسان والبيئة، ويتيح للجهات المختصة الاستجابة بسرعة وفعالية لأي تغييرات في الوضع الإشعاعي.

الأسس النظرية والمبادئ العامة للإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة

تقوم الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة على فلسفة علمية تجمع بين المعرفة الدقيقة للبيئة الإشعاعية، والأسس النظرية للوقاية الإشعاعية، ومبادئ الإدارة الحديثة. تعتمد هذه الإدارة على أن الإشعاع لا يتوقف عند حدود المختبر أو المنشأة النووية، بل يمتد تأثيره إلى البيئات الطبيعية والأنشطة البشرية اليومية. بناءً على ما سبق، لا تركز الإدارة الفاعلة على قياس الجرعة الإشعاعية فحسب، بل تهتم بمسار الانتقال البيئي للنويدات المشعة وتراكمها في الغذاء والماء والتربة وتأثيرها طويل الأمد على الإنسان والكائنات الحية. كما أنها تبني مبدأً ألارا (ALARA as low as reasonably achievable) أي الحد من التعرض الإشعاعي إلى أدنى مستوى ممكن مع مراعاة الجدوى الاقتصادية والتقنية، وتوسع هذا المفهوم ليشمل إدارة المخاطر البيئية بشكل استباقي.

المراقبة البيئية التقليدية: الخطوة الأولى نحو الإدارة الفاعلة

يمكن النظر إلى المراقبة البيئية التقليدية على أنها المرحلة الأولى والأساسية في بناء الإدارة الفاعلة؛ إذ لا يمكن تصميم خطط استباقية فعالة دون وجود بيانات دقيقة عن الوضع الحالي والمستقبلي للبيئة الإشعاعية. المراقبة توفر الأساس العلمي لتقدير المخاطر وتحديد الأولويات ووضع استراتيجيات التحكم.

الإدارة البيئية الفاعلة تضيف إلى المراقبة التقليدية عدة عناصر جديدة، منها:

- الرصد المستمر والمتعدد الأبعاد: استخدام محطات قياس معدلات الجرعة الإشعاعية، أجهزة المسح المحمولة، ونظم الإنذار المبكر.
- النمذجة والتحليل البيئي: تقييم حركية الملوثات المشعة في الهواء والماء والتربة، وتقييم الجرعات الإشعاعية المتوقعة للجمهور.
- التخطيط الوقائي: وضع خطط الطوارئ وإدارة النفايات المشعة والتحكم في مصادر الانبعاثات وتدريب فرق الاستجابة.
- التقييم الدوري والتحسين المستمر: مراجعة الأداء وتحديث النماذج وتطوير السياسات والإجراءات بما يتوافق مع أحدث المعايير العلمية الدولية.

الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة تمثل نقلة نوعية في الفكر الإشعاعي البيئي، لأنها تحول الأمر من مجرد قياس ومراقبة مستويات الإشعاع إلى إدارة استباقية للمخاطر وحماية شاملة للإنسان والبيئة وتحقيق الاستدامة البيئية على المدى الطويل.

شهدت العقود الأخيرة تطوراً ملحوظاً في فهم العلاقة بين الأنشطة البشرية والبيئة، وأصبح من الواضح أن الإدارة البيئية الحديثة لم تعد تقتصر على معالجة المشكلات بعد ظهورها، بل أصبحت تعتمد على استراتيجيات استباقية تهدف إلى منع حدوث المشكلات أساساً. ينطبق هذا التوجه بصورة أكثر إلحاحاً على المجال الإشعاعي، نظراً للطبيعة الخاصة للملوثات المشعة التي تتميز غالباً بعدم إمكانية اكتشافها بالحواس البشرية، وقدرتها على الانتشار عبر مكونات البيئة المختلفة، واستمرار تأثيراتها لفترات زمنية طويلة قد تمتد لعقود أو قرون.

لقد ارتبطت الوقاية الإشعاعية التقليدية تاريخياً بمفاهيم الرقابة والقياس والتقييم، حيث كان التركيز منصباً على تحديد مستويات النشاط الإشعاعي في الهواء والمياه والتربة والأغذية، ومقارنتها بالحدود المرجعية المعتمدة وطنياً ودولياً. على الرغم من الأهمية الكبيرة لهذه الإجراءات، فإنها تمثل جزءاً فقط من منظومة أكثر شمولاً تتطلب القدرة على التنبؤ بالمخاطر والتحكم بمصادرها وإدارة آثارها المحتملة قبل أن تتحول إلى مشكلات بيئية أو صحية حقيقية.

من هنا برزت الحاجة إلى تطوير مفهوم جديد يمكن تسميته بـ "الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة"، وهو مفهوم يسعى إلى دمج علوم البيئة والإشعاع والإدارة الحديثة في إطار واحد قادر على التعامل مع التحديات الإشعاعية المعاصرة بطريقة ديناميكية ومستدامة.

التكامل بين الإنسان والبيئة

إن أحد أهم الأسس الفكرية التي تقوم عليها الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة هو النظر إلى الإنسان والبيئة باعتبارهما نظاماً واحداً مترابطاً، وليساً عنصرين منفصلين؛ إذ لا يؤثر التلوث الإشعاعي على الإنسان بصورة مباشرة فحسب، بل ينتقل عبر الهواء والمياه والتربة والكائنات الحية ضمن سلسلة معقدة من العلاقات البيئية؛ لذلك فإن أي تقييم للمخاطر الإشعاعية يجب أن يأخذ في الاعتبار التأثيرات المتبادلة بين مختلف مكونات النظام البيئي.

لقد ركزت أنظمة الحماية الإشعاعية التقليدية لفترات طويلة على حماية الإنسان باعتباره الهدف الأساسي، إلا أن الاتجاهات الحديثة بدأت تمنح النظم البيئية ذاتها أهمية متزايدة، إدراكاً لحقيقة أن تدهور البيئة يؤدي في النهاية إلى الإضرار بصحة الإنسان ورفاهيته. وفي هذا السياق، فإن الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة تبني رؤية شمولية تعتبر أن حماية الإنسان تبدأ بحماية البيئة، وأن استدامة الموارد الطبيعية تشكل شرطاً أساسياً لتحقيق التنمية المستدامة.

مبدأ الوقاية أحد المراكز الأساسية

تستند الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة إلى مبدأ الوقاية الذي يعد من أهم المبادئ المعترف بها في الإدارة البيئية الحديثة. ويقضي هذا المبدأ بأن منع التلوث أكثر فاعلية وأقل تكلفة من معالجة آثاره بعد حدوثها.

تزداد أهمية هذا المبدأ في المجال الإشعاعي بسبب صعوبة إزالة بعض الملوثات المشعة من البيئة، وارتفاع تكاليف عمليات المعالجة وإعادة التأهيل البيئي، فضلاً عن الآثار الصحية والاجتماعية والاقتصادية طويلة الأمد التي قد تنتج عن الحوادث الإشعاعية؛ لذلك فإن الإدارة الفاعلة تركز على التحكم بالمخاطر عند مصدرها، وتحسين تصميم العمليات والمنشآت، وتعزيز إجراءات السلامة والأمان، وتطوير أنظمة الإنذار المبكر، والتأكد من جاهزية خطط الطوارئ. يؤدي تطبيق هذا المبدأ إلى تقليل احتمالية وقوع الحوادث وتقليل حجم الخسائر المحتملة في حال وقوعها.

الإدارة المبينة على المخاطر

تعتمد الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة على مفهوم الإدارة المبينة على المخاطر، والذي يقوم على تحديد المخاطر وتحليلها وتقييمها وترتيبها حسب أولوياتها قبل اتخاذ القرارات المناسبة. لا تتساوى جميع مصادر الإشعاع من حيث مستوى الخطورة، كما لا تتساوى جميع البيئات من حيث درجة الحساسية للتلوث الإشعاعي. تركز الإدارة الفاعلة جهودها ومواردها على المناطق والأنشطة التي تمثل أعلى مستويات المخاطر المحتملة. يتيح هذا النهج تحقيق استخدام أكثر كفاءة للموارد البشرية والمالية والتقنية، كما يساعد في تحسين فعالية برامج الحماية الإشعاعية والرقابة البيئية. كما أن تبني منهجية إدارة المخاطر يساهم في تعزيز الشفافية والموضوعية في اتخاذ القرارات، حيث تستند الإجراءات إلى تقييمات علمية واضحة بدلاً من الاعتماد على التقديرات الشخصية أو ردود الفعل المؤقتة [6].

مبدأ التحسين المستمر

من المبادئ الأساسية الأخرى للإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة مبدأ التحسين المستمر، الذي يستند إلى فكرة أن أنظمة الإدارة يجب أن تكون قادرة على التطور والتكيف مع المعارف والتقنيات والظروف الجديدة.

البيئة الإشعاعية ليست نظاماً ثابتاً، بل تتغير باستمرار نتيجة التطورات الصناعية والتكنولوجية والتغيرات البيئية والمناخية. وبالتالي فإن برامج الإدارة البيئية يجب أن تخضع للمراجعة الدورية والتقييم المستمر لضمان فعاليتها واستجابتها للمتغيرات.

يشمل التحسين المستمر تحديث برامج الرصد، وتطوير قواعد البيانات، وتحسين أساليب تحليل المخاطر، وتعزيز قدرات العاملين، والاستفادة من التقنيات الحديثة في مجالات الاستشعار عن بعد والذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات الضخمة.

نحو تعريف متكامل للإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة

في ضوء ما سبق، يمكن تعريف الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة بأنها:

"منظومة متكاملة من السياسات والإجراءات والآليات الفنية والتنظيمية التي تهدف إلى التنبؤ بالمخاطر الإشعاعية وتقييمها والتحكم بها ومتابعتها بصورة مستمرة، من خلال توظيف أدوات الرصد والتحليل والنمذجة وإدارة المخاطر واتخاذ القرار، بما يضمن حماية الإنسان والنظم البيئية وتحقيق الاستخدام الآمن والمستدام للتقنيات والمواد الإشعاعية".

يمثل هذا التعريف انتقالاً نوعياً من المفهوم التقليدي القائم على المراقبة إلى مفهوم أكثر شمولاً يعتمد على الإدارة الاستباقية والتكامل بين العلوم البيئية والإشعاعية والإدارية. وبذلك تصبح الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة إطاراً فكرياً وعملياً جديداً يمكن أن يشكل أساساً لتطوير برامج الحماية الإشعاعية في المستقبل، وأن يساهم في بناء منظومات أكثر قدرة على مواجهة التحديات البيئية والإشعاعية المتزايدة التي يشهدها العالم في القرن الحادي والعشرين.

الركائز العملية للإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة

إذا كانت الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة تمثل إطاراً فكرياً جديداً للحماية الإشعاعية البيئية، فإن نجاح هذا الإطار يعتمد على مجموعة من الركائز العملية التي تحول المبادئ النظرية إلى إجراءات تنفيذية قابلة للتطبيق؛ فالإدارة الفاعلة لا تقوم على جمع البيانات فقط، ولا تقتصر على تقييم مستويات النشاط الإشعاعي في البيئة، بل تعتمد على منظومة متكاملة من الرصد والتحليل والتنبؤ واتخاذ القرار والتحسين المستمر. تتميز هذه المنظومة بقدرتها على التعامل مع البيئة الإشعاعية باعتبارها نظاماً ديناميكياً متغيراً، يتأثر بعوامل طبيعية وبشرية متعددة، ويتطلب استجابة مرنة وسريعة قائمة على المعرفة العلمية والتقنيات الحديثة.

1. الرصد الإشعاعي الذكي: من القياس إلى المعرفة

يمثل الرصد الإشعاعي الخطوة الأولى في أي برنامج للوقاية الإشعاعية، إلا أن الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة تتجاوز مفهوم الرصد التقليدي لتتبنى مفهوم "الرصد الذكي".

في النظم التقليدية يتم جمع البيانات من محطات الرصد أو العينات البيئية بشكل دوري، ثم تخضع للتحليل وإعداد التقارير. أما في نظم الرصد الذكي فإن البيانات تُجمع بصورة مستمرة وتُرسل مباشرة إلى قواعد بيانات مركزية، حيث يتم تحليلها بشكل آلي باستخدام خوارزميات متقدمة قادرة على اكتشاف التغيرات غير الطبيعية فور حدوثها. يشمل الرصد الذكي:

- محطات قياس الجرعات الإشعاعية المرتبطة بشبكات الاتصال الحديثة.
- أنظمة مراقبة جودة الهواء الإشعاعية.
- أنظمة مراقبة المياه السطحية والجوفية.
- أجهزة الاستشعار الميدانية المتصلة بالإنترنت.
- تقنيات الاستشعار عن بعد والأقمار الصناعية.
- الطائرات المسيرة (Drones) المزودة بكواشف إشعاعية.

إن القيمة الحقيقية للرصد الذكي لا تكمن في كمية البيانات التي يتم جمعها، بل في القدرة على تحويل هذه البيانات إلى معرفة تساعد متخذي القرار على فهم الواقع البيئي والتنبؤ بمسارات تطوره [7].

2. تقييم المخاطر الإشعاعية كأداة لاتخاذ القرار

لا يمكن تحقيق إدارة فاعلة دون فهم واضح لطبيعة المخاطر ومستوياتها؛ لذلك يُعد تقييم المخاطر الإشعاعية أحد الأعمدة الرئيسية للإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة.

ويهدف تقييم المخاطر إلى الإجابة عن ثلاثة أسئلة أساسية:

- ما هو الخطر المحتمل؟
 - ما احتمال حدوثه؟
 - ما حجم تأثيره في حال وقوعه؟
- وتشمل عملية التقييم:

أ- تحديد مصادر الخطر: أهمها المنشآت النووية، والمفاعلات البحثية، والمرافق الطبية، وصناعات التعدين، ومواقع تخزين النفايات المشعة.

ب- تحديد مسارات الانتقال: وتشمل الانتقال عبر الهواء أو الماء أو الترسب في التربة أو الانتقال عبر السلسلة الغذائية.

ج- تقدير الجرعات الإشعاعية: يتم حساب الجرعات المحتملة للجمهور والعاملين باستخدام نماذج رياضية تأخذ بعين الاعتبار خصائص النكليات المشعة والظروف البيئية وأنماط التعرض المختلفة.

د- توصيف المخاطر: في هذه المرحلة يتم تصنيف المخاطر وفق مستويات محددة تساعد صناع القرار على تحديد أولويات التدخل.

إن الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة لا تنظر إلى تقييم المخاطر باعتباره نشاطاً منفصلاً، بل تعتبره عملية مستمرة تتطور بتطور البيانات والمعطيات البيئية.

3. إدارة البيانات الإشعاعية والمعرفة البيئية

في العصر الرقمي أصبحت البيانات مورداً استراتيجياً لا يقل أهمية عن الموارد الطبيعية. وتنتج برامج المراقبة البيئية الإشعاعية الحديثة كميات هائلة من البيانات المتعلقة بالجرعات الإشعاعية، وتركيز النكليات المشعة، ونتائج العينات البيئية، وبيانات الأرصاد الجوية والهيدرولوجية. ومن هنا تظهر الحاجة إلى نظم متقدمة لإدارة البيانات البيئية الإشعاعية تعتمد على:

- قواعد بيانات مركزية.

- نظم معلومات جغرافية (GIS).

- منصات تحليل البيانات الضخمة.

- تقنيات الحوسبة السحابية.

تسمح هذه الأنظمة بدمج المعلومات الواردة من مصادر متعددة وتحويلها إلى خرائط ومؤشرات وتقارير تساعد في فهم الوضع البيئي واتخاذ القرارات المناسبة. كما تسهم إدارة المعرفة في الحفاظ على الخبرات المؤسسية ونقلها بين الأجيال المختلفة من المتخصصين، وهو أمر بالغ الأهمية في المجالات الإشعاعية التي تعتمد على تراكم الخبرات والمعارف طويلة الأمد.



الشكل 2. منظومة مراقبة إشعاعية تستعمل في محطات الإنذار المبكر.

4. نظم الإنذار المبكر والاستجابة الاستباقية

تمثل نظم الإنذار المبكر أحد أهم مكونات الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة، لأن كل دقيقة يتم كسبها في اكتشاف حادث إشعاعي يمكن أن تسهم في تقليل حجم الخسائر البشرية والبيئية والاقتصادية. تعتمد نظم الإنذار المبكر على:

- شبكات الرصد المستمر.
- التحليل الآني للبيانات.
- النماذج التنبؤية.
- أنظمة الاتصال السريع.

عند اكتشاف تغير غير طبيعي في مستويات الإشعاع يتم إصدار تنبيهات فورية للجهات المختصة، مع توفير معلومات حول الموقع المحتمل للمصدر، ومسار الانتشار المتوقع، والمناطق التي قد تتأثر بالتلوث. تكمن أهمية هذه النظم في أنها تسمح بالانتقال من مرحلة الاستجابة بعد وقوع الحادث إلى مرحلة التدخل المبكر للحد من آثاره.

5. الإدارة المتكاملة للنفايات المشعة

تشكل النفايات المشعة أحد أهم التحديات البيئية في العصر الحديث، وتقوم الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة على مبدأ أن النفايات ليست مجرد مشكلة تخزين، بل قضية بيئية واستراتيجية تتطلب إدارة شاملة تبدأ منذ لحظة توليد النفايات وحتى التخلص النهائي منها. تشمل الإدارة المتكاملة للنفايات المشعة:

- التقليل من إنتاج النفايات عند المصدر.
- الفرز والتصنيف.
- المعالجة والتوظيف.
- التخزين المؤقت.
- النقل الآمن.
- التخلص النهائي.

كما تتطلب الإدارة المتكاملة للنفايات المشعة مراقبة مستمرة للمرافق المخصصة للتخزين أو التخلص النهائي لضمان عدم انتقال الملوثات المشعة إلى البيئة المحيطة. وتزداد أهمية هذا الجانب في الدول التي تشهد توسعاً في استخدام التقنيات النووية والطبية والصناعية.

6. الذكاء الاصطناعي ومستقبل الإدارة البيئية الإشعاعية

مع تزايد حجم البيانات وتعدد النظم البيئية أصبح من الصعب على الخبراء تحليل جميع المعلومات المتاحة بالطرائق التقليدية؛ لذلك يشكل الذكاء الاصطناعي أحد أكثر التقنيات الواعدة في مجال الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة. يمكن للذكاء الاصطناعي أن يسهم في:

- تحليل البيانات الضخمة.
- اكتشاف الأنماط غير الطبيعية.
- التنبؤ بالحوادث المحتملة.
- دعم اتخاذ القرار.
- تحسين توزيع الموارد.
- تطوير أنظمة الإنذار المبكر.

كما يمكن استخدام تقنيات التعلم الآلي لتطوير نماذج قادرة على التنبؤ بانتقال الملوثات المشعة في البيئات المختلفة، وتقدير الجرعات الإشعاعية المستقبلية بدقة أكبر من النماذج التقليدية. من المتوقع أن يصبح الذكاء الاصطناعي خلال السنوات القادمة جزءاً أساسياً من أي نظام متطور للإدارة البيئية الإشعاعية [8].

نموذج عملي للإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة

استناداً إلى جميع الركائز السابقة يمكن اقتراح نموذج عملي متكامل للإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة، ويقوم على دورة مستمرة تتألف من ثماني مراحل مترابطة:

1. التوقع anticipation.
2. الرصد monitoring.
3. التحليل analysis.
4. تقييم المخاطر risk Assessment.
5. اتخاذ القرار decision making.
6. التدخل والمعالجة response and mitigation.
7. المراجعة والتقييم review.
8. التحسين المستمر continuous Improvement.



الشكل 3. مخطط توضيحي لدورة العمل في نموذج الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة.

تشكل هذه الدورة نظاماً ديناميكياً يسمح بالتعلم المستمر والتكيف مع المتغيرات البيئية والتكنولوجية. يجعل نموذج AREM من كل دورة تشغيلية نقطة انطلاق لدورة جديدة أكثر كفاءة وفعالية، وذلك على عكس النظم التقليدية التي تنتهي عند مرحلة إعداد التقارير. لذلك يتحول الرصد البيئي من نشاط وصفي محدود إلى منظومة معرفية متكاملة تدعم الإدارة الاستراتيجية للمخاطر الإشعاعية، وتوفر أساساً علمياً لتحقيق الحماية المستدامة للإنسان والبيئة.

الفوائد الاستراتيجية لتطبيق نموذج AREM

إن تطبيق نموذج AREM في القطاعات المختلفة يوفر مجموعة من الفوائد الاستراتيجية، أهمها:

1. تعزيز الحماية الصحية والبيئية: من خلال تقليل التعرض الإشعاعي للجمهور والعاملين في المجال الإشعاعي والأنظمة البيئية.
2. الاستجابة الاستباقية: القدرة على التنبؤ بالمخاطر واتخاذ إجراءات وقائية قبل وقوع الحوادث.
3. تقليل التكاليف: عن طريق تجنب الأضرار البيئية والصحية المكلفة ومعالجة التلوث بعد حدوثه.
4. تحسين إدارة الموارد: توجيه الموارد البشرية والتقنية نحو أكثر المناطق حاجة.
5. بناء الثقة المجتمعية: من خلال الشفافية، إشراك المجتمع المحلي، ونشر المعلومات الدقيقة عن المخاطر وكيفية التعامل معها.
6. دعم التنمية المستدامة: بتوفير بيئة آمنة للنشاط الصناعي والطبي والتكنولوجي دون الإضرار بالنظم البيئية أو الموارد الطبيعية.

دور الوكالة الدولية للطاقة الذرية في دعم الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة

تؤدي الوكالة الدولية للطاقة الذرية دوراً محورياً في تطوير الإدارة البيئية الإشعاعية على المستوى العالمي من خلال وضع معايير الأمان، وإصدار الأدلة الفنية، وتطوير نماذج تقييم انتقال الملوثات المشعة في البيئة، كما تساهم الوكالة في تعزيز قدرات الدول الأعضاء على تنفيذ برامج الرصد البيئي وتقييم الجرعات الإشعاعية.

أصدرت الوكالة خلال العقود الماضية عشرات الأدلة والتقارير الفنية التي أصبحت المرجع الأساسي للجهات الرقابية والباحثين والمؤسسات العاملة في مجالات الوقاية الإشعاعية، وإدارة النفايات المشعة، والتأهب للطوارئ النووية، وإعادة تأهيل المواقع الملوثة إشعاعياً. كما يمتد دور الوكالة إلى إنشاء برامج دولية للمقارنة بين النماذج الرياضية وتبادل البيانات العلمية وتوحيد منهجيات التقييم، مما يساهم بصورة كبيرة في رفع موثوقية تقييم المخاطر الإشعاعية وتقليل عدم اليقين في نتائج النمذجة [9-11].

من أهم مساهمات الوكالة إطلاق سلسلة من البرامج الدولية المتخصصة في نمذجة انتقال النكليدات المشعة، وأهمها:

بيوموفس (BIOMOVs (BIOSpheric Model Validation Study)

فامب (VAMP (Validation of environmental Model Predictions)

بيوماس (BIOMASS (BIOSphere Modelling and ASSESSmen)

إمراس (EMRAS (Environmental Modelling for Radiation Safety)

موداريا (MODARIA (MOdelling and DAta for Radiological Impact Assessments)

ميريا (MEREIA (MEthods for Radiological and Environmental Impact Assessment)

تهدف هذه البرامج إلى اختبار النماذج الرياضية، ومقارنة نتائجها باستخدام بيانات حقيقية، وتقييم معاملات الانتقال البيئي، وتطوير قواعد بيانات موحدة يمكن استخدامها عالمياً في تقييم الآثار الإشعاعية. شكلت هذه البرامج تطوراً متدرجاً في فهم العمليات البيئية وتحسين دقة النماذج المستخدمة في تقدير الجرعات الإشعاعية.

يعد برنامج MEREIA أحدث مبادرات الوكالة في مجال تقييم الأثر الإشعاعي البيئي؛ حيث يهدف إلى دمج الخبرات العالمية ضمن إطار موحد لتقييم التأثيرات البيئية الناتجة عن التطبيقات الطبية والصناعية والبحثية والطاقة النووية. يركز البرنامج على تطوير الكفاءات الوطنية، وتبادل الخبرات، واختيار أكثر النماذج ملاءمة لكل سيناريو بيئي، مع توفير منصة دولية للتعاون العلمي بين الخبراء والهيئات الرقابية.

من جهة أخرى، ساعدت الوكالة في تطوير منهجيات المراقبة البيئية الإشعاعية، حيث أصدرت العديد من الأدلة التي تحدد كيفية تصميم برامج الرصد البيئي، واختيار مواقع أخذ العينات، وتحديد أنواع العينات المطلوبة، وطرائق القياس والتحليل، وضبط الجودة، وضمان جودة النتائج المخبرية.



الشكل 4. بعض منشورات ومشاريع الوكالة الدولية للطاقة الذرية في مجال حماية البيئة الإشعاعية.

تولي الوكالة اهتماماً خاصاً بتقييم الجرعات الإشعاعية التي يتعرض لها الجمهور؛ ولذلك دعمت تطوير نماذج حساب الجرعات الخارجية والداخلية الناتجة عن استنشاق أو ابتلاع المواد المشعة أو التعرض للإشعاع الخارجي من التربة والمياه والرسوبيات. تستخدم هذه النماذج بيانات انتقال النكليدات المشعة بين الهواء والتربة والنباتات والحيوانات والإنسان، إضافة إلى عوامل التحويل الإشعاعي ومعاملات الاستهلاك الغذائي والخصائص البيئية المحلية، للحصول على تقديرات أكثر واقعية للجرعات السنوية المتوقعة.

في مجال البرمجيات، دعمت الوكالة استخدام العديد من البرامج المتخصصة في حساب الجرعة الإشعاعية وانتقال الملوثات، سواء بصورة مباشرة أم من خلال برامج المقارنة الدولية. من أكثر الأدوات استخداماً في هذا المجال ERICA tool لتقييم الجرعات التي تتعرض لها الكائنات الحية غير البشرية، وRESRAD-BIOTA وRESRAD لتقييم الجرعات الناتجة عن المواقع الملوثة وإعادة استخدامها.

تمثل الوكالة الدولية للطاقة الذرية المرجعية العلمية العالمية في مجال الإدارة البيئية الإشعاعية من خلال نجاحها في إنشاء منظومة متكاملة تشمل معايير الأمان، وبرامج الرصد البيئي، ونماذج انتقال النكليدات المشعة، وأدوات حساب الجرعات، وبرامج المقارنة الدولية، وبناء القدرات البشرية؛ الأمر الذي ساهم في توحيد منهجيات تقييم المخاطر الإشعاعية ورفع موثوقية نتائجها على المستوى الدولي، مما يجعل مساهمة الوكالة أحد أهم العوامل الداعمة لتحقيق إدارة بيئية إشعاعية فاعلة ومستدامة.

حماية البيئة الإشعاعية في الجمهورية العربية السورية

حظيت حماية البيئة الإشعاعية باهتمام كبير منذ إنشاء هيئة الطاقة الذرية السورية في عام 1976، حيث عملت الهيئة على بناء البنية التحتية اللازمة للرصد الإشعاعي، وتأهيل الكوادر العلمية، وإنشاء المختبرات المتخصصة، وإعداد البرامج الوطنية لمراقبة النشاط الإشعاعي في البيئة، وذلك بهدف الحفاظ على سلامة الإنسان والبيئة وضمان الاستخدام الآمن للمصادر المشعة. تعمل الهيئة بالتعاون مع الجهات الرقابية والوزارات المعنية، ولاسيما وزارات الصحة والبيئة والزراعة والتعليم العالي، على تطبيق المتطلبات الوطنية المتعلقة بالوقاية من الإشعاع. كما تعتمد سوريا بصورة واسعة على معايير الأمان الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية عند تطوير الأنظمة الوطنية الخاصة بالحماية الإشعاعية.

تعتمد حماية البيئة الإشعاعية في سوريا على تنفيذ برامج للرصد البيئي تهدف إلى تحديد مستويات النشاط الإشعاعي في مكونات البيئة المختلفة، وإنشاء قاعدة بيانات وطنية للخلفية الإشعاعية الطبيعية، والكشف المبكر عن أي تغيرات قد تنتج عن الأنشطة البشرية أو الحوادث الإشعاعية. وتشمل برامج المراقبة البيئية ما يلي:

- قياس النشاط الإشعاعي في الهواء والغبار الجوي.
- مراقبة النشاط الإشعاعي في مياه الشرب والمياه السطحية والجوفية.
- تحليل النكليدات المشعة في التربة والرسوبيات.
- قياس النشاط الإشعاعي في النباتات والمحاصيل الزراعية.
- مراقبة الأغذية المحلية والمستوردة.
- دراسة النشاط الإشعاعي في مواد البناء.
- قياس الإشعاع الطبيعي والخلفية الإشعاعية في مختلف المناطق.

كما تعتمد منظومة الوقاية الإشعاعية في سوريا على مجموعة من الإجراءات الوقائية التي تهدف إلى تقليل التعرض للإشعاع، وتشمل:

- استخدام مقاييس الجرعات الشخصية للعاملين.
- الفحوص الطبية الدورية للعاملين بالإشعاع.
- التدريب المستمر على إجراءات السلامة.
- تطبيق متطلبات الوقاية داخل المختبرات والمنشآت.
- مراقبة أماكن العمل إشعاعياً بصورة دورية.
- توفير معدات الوقاية الشخصية.
- مراقبة تلوث السطوح والهواء.

كما يتم تدريب العاملين على إجراءات الاستجابة للطوارئ والتعامل مع الحوادث الإشعاعية. إضافة إلى إجراءات الإدارة الآمنة للمصادر المشعة والنفايات الناتجة عنها، والتي تشمل:

- ترخيص حيازة المصادر المشعة.
- تسجيل وتتبع جميع المصادر.
- التفتيش الدوري على الجهات المستخدمة.
- التخزين الآمن للمصادر غير المستخدمة.
- جمع النفايات المشعة وفرزها.
- معالجة النفايات وفق خصائصها.
- التخزين المرحلي للنفايات.
- مراقبة أماكن التخزين.
- حماية العاملين أثناء عمليات النقل والتخزين.

يتم تطبيق هذه الإجراءات بما يحقق حماية الإنسان والبيئة خلال جميع مراحل دورة حياة المصدر المشع. من الناحية البحثية، شهدت السنوات الأخيرة تنفيذ العديد من الدراسات البحثية المتعلقة بسلوك النكليدات المشعة في البيئة السورية، وذلك بهدف فهم العوامل المؤثرة في انتقالها بين مكونات البيئة المختلفة. وقد تناولت هذه الدراسات:

- انتقال النكليدات المشعة داخل التربة.
- تأثير الخواص الفيزيائية والكيميائية للتربة على تثبيت النكليدات المشعة.
- انتقال النكليدات المشعة إلى النباتات.

- تقييم انتقالها إلى السلسلة الغذائية.
- دراسة المياه الجوفية والسطحية.
- تقدير معاملات الانتقال البيئي.
- تقييم المخاطر البيئية طويلة الأمد.

ساعدت هذه الدراسات في بناء قاعدة بيانات وطنية حول السلوك البيئي للمواد المشعة في الظروف السورية. كما تعتمد الإدارة البيئية الإشعاعية على الجاهزية المسبقة لمواجهة الحوادث الإشعاعية من خلال إعداد خطط الطوارئ، وفرق التدخل السريع، وتأمين أجهزة الرصد الميداني ومختبرات القياس، مما يساعد في تقليل الآثار الصحية والبيئية في حال وقوع حادث إشعاعي.

تشارك سوريا منذ سنوات في برامج التعاون التقني مع الوكالة الدولية للطاقة الذرية؛ الأمر الذي ساهم في تطوير المختبرات الإشعاعية، وتحديث أجهزة القياس، وتدريب الكوادر الوطنية من خلال تنفيذ مشاريع بحثية مشتركة. كما استفادت المؤسسات الوطنية من الأدلة الفنية والبرامج التدريبية التي أصدرتها الوكالة في مجالات الرصد البيئي وتقييم الجرعات وإدارة النفايات.

التحديات المستقبلية

على الرغم من التقدم الذي تحقق في سوريا في مجال المراقبة الإشعاعية البيئية وإدارتها، ما زالت هناك تحديات تستدعي العمل عليها، وأهمها: تحديث شبكات الرصد البيئي، وخاصة نظم الرصد الآني والمستمر، وإنشاء قواعد بيانات رقمية متكاملة مع توسيع استخدام نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد. كما تحتاج إلى تعزيز التعاون البحثي الدولي وتطوير برامج تقييم الجرعات البيئية للكائنات الحية، وتحديث البنية التشريعية بما يتوافق مع أحدث معايير الوكالة الدولية للطاقة الذرية.

الخاتمة

تعد الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة تحولاً نوعياً في فهم وإدارة المخاطر الإشعاعية من خلال الانتقال من المراقبة البيئية التقليدية إلى الإدارة الفاعلة؛ حيث تنتقل المراقبة الإشعاعية البيئية من كونها مجرد أداة حماية لتكون ركيزة أساسية للتنمية المستدامة والابتكار العلمي والتكنولوجي، مع تحقيق التوازن بين الإنسان والبيئة.

يطرح المقال الحالي ضرورة اعتماد مبدأ الإدارة البيئية الإشعاعية الفاعلة في مجال الوقاية الإشعاعية البيئية، والتي تجمع بين الرصد الذي وتقييم المخاطر والتنبؤ الاستباقي وإدارة البيانات ونظم الإنذار المبكر وإدارة النفايات المشعة والتقنيات الحديثة مثل الذكاء الاصطناعي، لتوفر إطاراً متكاملًا لحماية الإنسان والبيئة على المدى الطويل، كما يتيح للجهات المعنية اتخاذ قرارات مستندة إلى بيانات دقيقة وتحليلات متقدمة، ويوفر قاعدة صلبة لتطوير السياسات الوطنية والدولية، ويعزز ثقافة السلامة والإدارة المستدامة.

المراجع

- [1]. Alabdullah J, Michel H, Barci V, Féraud G, Barci-Funel G. Spatial and vertical distributions of natural and anthropogenic radionuclides and cesium fractionation in sediments of the Var river and its tributaries (southeast France). Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2013;298(1):25-32.
- [2]. Al Abdullah J, Al-Masri MS, Amin Y, Awad I, Shealb Z. Chemical fractionation of radium-226 in NORM contaminated soil from oilfields. Journal of environmental radioactivity. 2016;165:47-53.
- [3]. Al Abdullah J, Al-Masri MS, Amin Y, Khalily H, Ammar M, Nassour S. An innovative procedure for NORM scales treatment and radionuclides separation. Applied Radiation and Isotopes. 2017;125:139-43.
- [4]. Nedkova S, Atanasova P, Naydenova S, Panaitescu M, Panaitescu F-V. Background Radiation Monitoring. Selected Papers from AToMS 2024: Applications in Environment Engineering, Material Science, Mechanical Engineering, and Social Impact of the Technology: Springer; 2026. p. 3-11.
- [5]. Solutions SRN. Savannah River Site, Environmental report. Savannah River Nuclear Solutions, LLC; 2022. Contract No.: Savannah River Nuclear Solutions, LLC.

- [6]. Wang X, Bouzembrak Y, Oude Lansink A, van der Fels-Klerx H. Weighted Bayesian network for the classification of unbalanced food safety data: Case study of risk-based monitoring of heavy metals. *Risk Analysis*. 2023;43(12):2549-61.
- [7]. Gohari A, Ahmad AB, Rahim RBA, Supa'at ASM, Abd Razak S, Gismalla MSM. Involvement of surveillance drones in smart cities: A systematic review. *IEEE Access*. 2022;10:56611-28.
- [8]. Kamyab H, Khademi T, Chelliapan S, SaberiKamarposhti M, Rezania S, Yusuf M, et al. The latest innovative avenues for the utilization of artificial Intelligence and big data analytics in water resource management. *Results in Engineering*. 2023;20:101566.
- [9]. IAEA. Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection. Vienna: IAEA; 2005.
- [10]. IAEA. Monitoring for Protection of the Public and the Environment. Vienna: IAEA; 2025.
- [11]. IAEA. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Vienna: IAEA; 2014.

Active Radiological Environmental Management (AREM)

Abstract: The transition from traditional environmental monitoring to active management represents a qualitative leap in understanding and managing radiological risks, as the focus moves from monitoring the current situation to predicting and effectively controlling risks before they occur.

AREM relies on an integrated combination of theoretical and applied pillars, from intelligent monitoring and continuous analysis, through risk assessment and proactive decision-making, to radioactive waste management, early warning systems, and the use of artificial intelligence and modern technologies to predict potential environmental scenarios. This integration enhances the ability to protect people and ecosystems and achieve the safe and sustainable use of radioactive materials and technologies. It also enables decisions based on accurate data and scientific analysis, which strengthens the effectiveness of radiation protection strategies and reduces potential health, environmental, and economic damage.

Keywords: Active Radiological Environmental Management, Radiation Protection, Environmental Protection, Radionuclides, Environmental radiation monitoring.

◀ إعداد: د. جمال العبدالله، قسم الوقاية والأمان، هيئة الطاقة الذرية السورية.



منصة التعلم والتدريب الإلكتروني للعلوم والتكنولوجيا النووية في هيئة الطاقة الذرية السورية

ملخص

أصبح اكتساب المهارات الجديدة وإعادة تأهيل الكوادر البشرية في المؤسسات والهيئات أمراً بالغ الأهمية للحفاظ على القدرة التنافسية. تعدّ منصة التعليم والتدريب الإلكتروني (TMS) التابعة لهيئة الطاقة الذرية السورية حلاً برمجياً شاملاً مصمماً لتبسيط عمليات تخطيط برامج التعليم العالي للدارسين والتدريب التخصصي للعاملين في مجال العلوم النووية وتقاناتها التطبيقية السلمية. وتساهم المنصة المبنية على بيئة Moodle بأحدث إصداراتها في توحيد المحتوى التعليمي والتدريبي وجدولة مساقاتها وإتاحتها بصورة دائمة ومستقلة عن الزمان والمكان عبر المنصة tms.aec.org.sy. وتعزز أنظمة إدارة التدريب والتعليم الإلكتروني كفاءة التعلم والتدريب وتضمن الامتثال للمتطلبات التدريبية التنظيمية ودعم التطوير المستمر للقوى العاملة في مجال العلوم النووية وتقاناتها. ويمكن نظام إدارة التدريب الإلكتروني الفعال فرق تنمية الموارد البشرية وفرق التدريب والتطوير من تقديم تجارب تعليمية وتدريبية ومدعومة بالبيانات والاختبارات التي تتماشى مع الأهداف الاستراتيجية للهيئة في التحول الرقمي.

الكلمات المفتاحية: تعليم إلكتروني، مساق تدريبي، منصة مودل، تعليم عالٍ، علوم نووية وتقاناتها، اختبارات مؤتمتة.

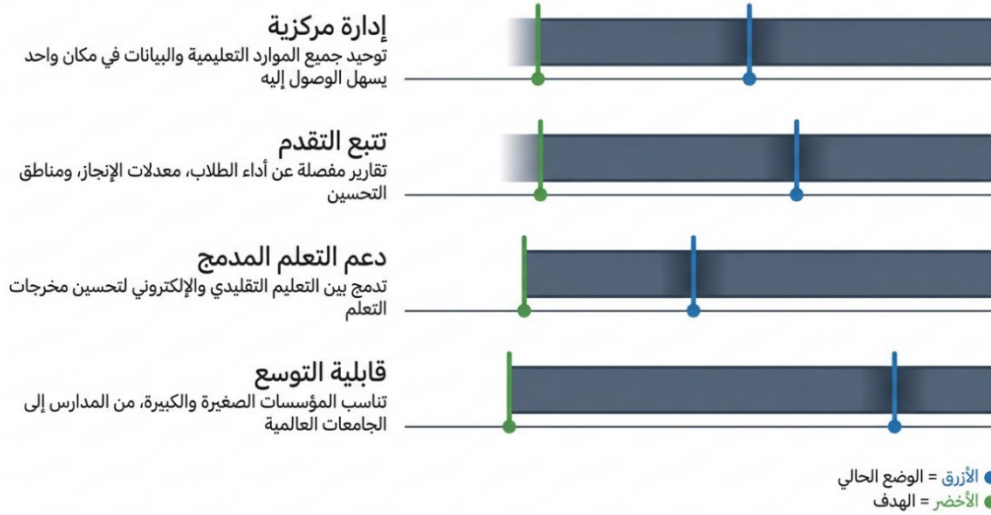
يشكّل التعليم والتدريب الإلكتروني اليوم أحد أبرز التحولات المعرفية في العصر الرقمي؛ إذ لم يعد مجرد بديل للتعليم التقليدي، بل أصبح منظومة متكاملة تعيد تعريف طرق التعلم وتفتح آفاقاً واسعة للوصول إلى المعرفة دون قيود المكان أو الزمن. ومع التطور المتسارع في التقنيات الرقمية، بات بإمكان المتعلم أن ينتقل من دور المتلقي إلى شريك فعال في بناء تجربته التعليمية، مستفيداً من بيئات تفاعلية غنية وموارد متعددة الوسائط ومسارات تعلم مرنة تراعي الفروق الفردية.

ويمثل التعليم والتدريب الإلكتروني اليوم ركيزة أساسية في تطوير المؤسسات العلمية والبحثية، لما يوفره من كفاءة في التدريب، وموثوقية في التقييم، وقدرة على توسيع نطاق المستفيدين. كما يساهم في تعزيز ثقافة التعلم المستمر، ويمنح المؤسسات القدرة على مواكبة التطورات العالمية في مجالات المعرفة والمهارات.

والتعليم أو التدريب الإلكتروني ليس مجرد منصة أو بوتقة محتوى رقمي، بل فلسفة تعليمية جديدة تقوم على الابتكار والتفاعل والتحسين المستمر ويمنح المتعلم فرصة لبناء مستقبل أكثر مرونة وثراء بالمعرفة.

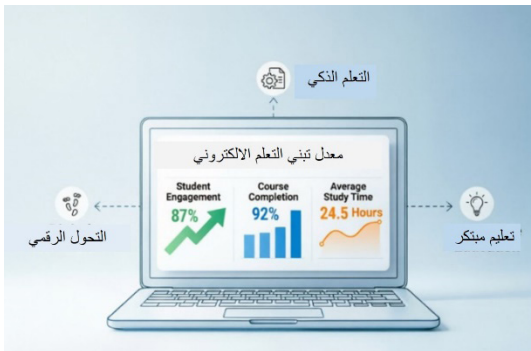
وانطلاقاً من هذه الرؤية، تتضح أهمية التعليم والتدريب الإلكتروني في تطوير المنظومات في المؤسسات التعليمية والبحثية حيث أصبح التعليم الإلكتروني اليوم أحد الأعمدة الأساسية في تطوير هذه المنظومات، لما يقدمه من حلول مبتكرة تتجاوز حدود الزمان والمكان؛ فهو يتيح للمتعليم الوصول إلى المعرفة في أي وقت، وبأساليب تفاعلية تعزز الفهم وتدعم الاستقلالية في التعلم. وتكمن أهميته في قدرته على توفير بيئة تعليمية مرنة تستجيب لاحتياجات المتعلمين المختلفة، وتراعي الفروق الفردية، وتمنح كل متعلم المسار الذي يناسبه.

كما يساهم التعليم والتدريب الإلكتروني في رفع كفاءة المؤسسات من خلال تقليل التكاليف التشغيلية وتسهيل إدارة المحتوى وتوفير أدوات دقيقة لقياس الأداء والتقييم. وتبرز أهميته بشكل خاص في المؤسسات العلمية والبحثية، حيث يتيح نشر المعرفة بسرعة وتدريب الكوادر بفعالية وتوسيع نطاق المستفيدين دون الحاجة إلى بنى تحتية ضخمة



وامتداداً لهذا الدور المتنامي، يبرز التعليم والتدريب الإلكتروني كأداة محورية في تطوير برامج التدريب ونقل المعرفة داخل المؤسسات العلمية الأكاديمية والبحثية، بفضل مرونته وقدرته على الوصول إلى المتعلمين في أي مكان، أصبح التدريب الإلكتروني وسيلة فعالة لنشر الخبرات المتخصصة وتوثيق المعرفة المؤسسية وتمكين الكوادر من اكتساب المهارات المطلوبة دون الحاجة إلى حضور فعلي أو موارد لوجستية كبيرة. ولا يقتصر دوره على نقل المحتوى فحسب، بل يمتد ليصبح منصة للتفاعل والابتكار وتنمية المهارات الرقمية التي أصبحت ضرورة في سوق العمل الحديث. ويعدّ التعليم والتدريب الإلكتروني نموذجاً تعليمياً يعزز التعلم المستمر، ويمكّن الأفراد من مواكبة التطورات المتسارعة في مختلف المجالات.

ويتيح هذا النوع من التدريب إمكانية تصميم مسارات تعلّم موجهة تتناسب مع طبيعة كل وظيفة أو اختصاص، مما يعزز جودة التدريب ويرفع كفاءته، كما يوفر أدوات تفاعلية مثل المحاضرات المصوّرة، الاختبارات الإلكترونية، المحاكاة، والأنشطة العملية التي تجعل عملية نقل المعرفة أكثر وضوحاً وعمقاً واستمرارية.



وتبرز أهميته بشكل خاص في المؤسسات التي تعتمد على الخبرات المتراكمة- مثل الهيئات العلمية والبحثية- حيث يساهم التعليم والتدريب الإلكتروني في حفظ المعرفة ونقلها للأجيال الجديدة، وتوثيق التجارب والخبرات، وتسهيل مشاركة نتائج الدورات الخارجية والبرامج الدولية مع جميع العاملين.

وانطلاقاً من هذه الأدوار الجوهرية، تكشف الإحصاءات العالمية عن عوائد ملموسة يحققها التعليم والتدريب الإلكتروني في مختلف القطاعات، أبرزها: رفع الإنتاجية وتقليل التكاليف وزيادة معدلات الاحتفاظ بالمعلومة. ومن أهم الإحصاءات العالمية الموثقة حول عوائد النفع وفوائد التعليم والتدريب الإلكتروني:

1. عائد الاستثمار في التدريب الإلكتروني

- وفقاً لتقارير IBM كل 1 دولار يُستثمر في التدريب الإلكتروني يحقق 30 دولاراً من الإنتاجية وذلك بسبب سرعة اكتساب المهارات وتقليل وقت التدريب.
- تؤكد 42% من الشركات أن اعتماد التعليم والتدريب الإلكتروني زاد من إيراداتها نتيجة تحسين أداء الموظفين ورفع الإنتاجية.
- تحقق الشركات التي تعتمد التدريب الإلكتروني عائداً أعلى بنسبة 23% مقارنة بالشركات التي لا تستخدمه.

2. تقليل التكاليف التشغيلية

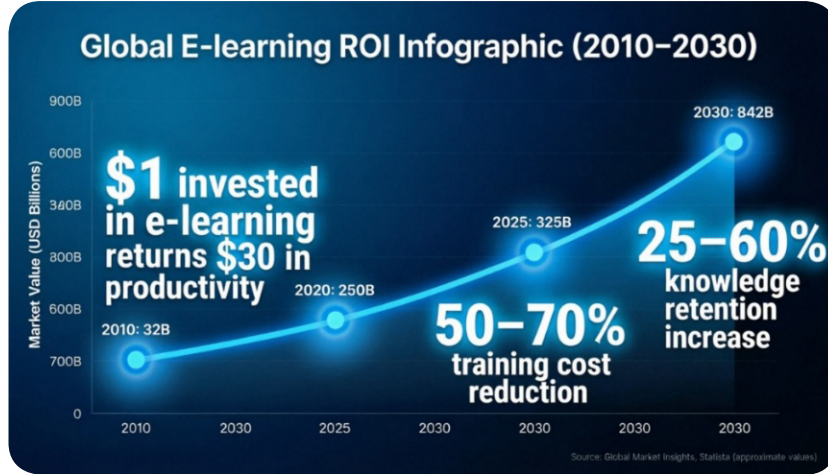
- تقلل المؤسسات التي تنتقل إلى أنظمة التعلم والتدريب الإلكتروني 50-70% من تكاليف التدريب مقارنة بالتدريب التقليدي.
- يقلل التدريب الإلكتروني الحاجة للسفر والقاعات والطباعة والموارد اللوجستية، مما ينعكس مباشرة على خفض النفقات.

3. تحسين الاحتفاظ بالمعلومة وفعالية التعلم

- ترتفع معدلات الاحتفاظ بالمعلومة من 8-10% في التعليم التقليدي إلى 25-60% في التعليم الإلكتروني.
- وفقاً لتحليل وزارة التعليم الأمريكية يمكن أن يكون التعلم الإلكتروني أكثر فعالية بنسبة 25-60% من التعليم الوجيه.

4. رفع الإنتاجية والأداء

- يحقق الموظفون الذين يكملون دورات إلكترونية زيادة 23% في الإنتاجية خلال 3 أشهر.
- تستخدم 90% من الشركات أدوات التدريب الإلكتروني، مما أدى إلى زيادة 42% في الإيرادات لكل موظف.

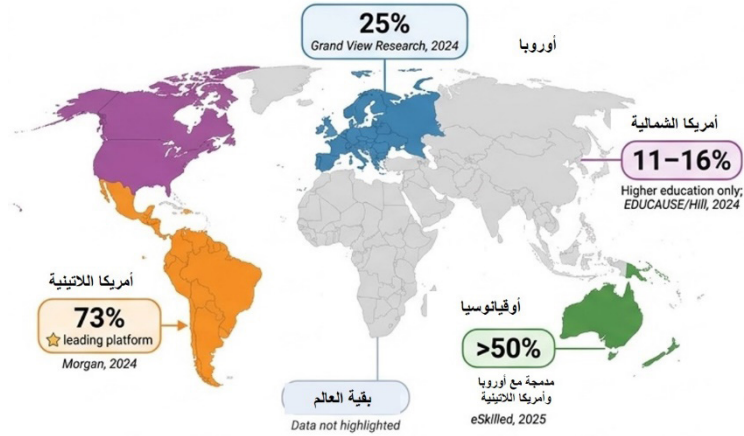


هو السوق العالمي للتعليم والتدريب الإلكتروني

وصل حجم سوق التعليم والتدريب الإلكتروني إلى 325 مليار دولار في 2025، ويتجه إلى 842 مليار دولار بحلول 2030. ومن المتوقع نمو سوق التدريب الإلكتروني في قطاع الشركات فقط إلى 462 مليار دولار في 2027. تخطط 98% من الشركات لاستخدام التعليم والتدريب الإلكتروني في تدريب موظفيها، ما يجعله معياراً أساسياً في نقل المعرفة. يحقق التعلم المصغر microlearning معدل إكمال 70% مقارنة بـ 23% فقط في الدورات التقليدية، مما يعزز استدامة المعرفة.

لم يعد التعليم والتدريب الإلكتروني خياراً إضافياً، بل أصبح قوة معرفية تعيد تشكيل مستقبل التدريب والبحث العلمي. ومن خلال المنصات المتقدمة والتقارير الذكية والاختبارات التفاعلية وإسهامات المنظمات الدولية مثل الوكالة الدولية للطاقة الذرية، باتت المؤسسات قادرة على بناء قدرات وطنية راسخة، وتحويل المعرفة إلى قوة إنتاجية مستدامة. وينضوي الاستثمار في التعليم الإلكتروني على استثمار في العقل والمهارات الرقمية التي تؤمن مستقبلاً تُصنع فيه الكفاءات وتُبنى فيه الخبرات وتُصاغ فيه نهضة علمية تليق بطموحات الوطن.

حصة السوق الإقليمية لمنصة مودل (2024-2025)



REGION	MOODLE SHARE (%)
Europe	25%
Latin America	73%
Oceania	>50%
North America (HE)	11-16%
Global (HE)	~24%

منصة التعلم والتدريب في هيئة الطاقة الذرية

تُعد منصة التعليم والتدريب في هيئة الطاقة الذرية منظومة رقمية متكاملة تهدف إلى نقل المعرفة العلمية المتخصصة وبناء قدرات الكوادر الوطنية في مجالات الطاقة النووية، والأمان الإشعاعي، والتقنيات المخبرية، والبحث العلمي. وجرى تطوير المنصة وفق معايير تقنية حديثة تضمن سهولة الاستخدام، وأمان البيانات، ومرونة الوصول إلى المحتوى من أي مكان وفي أي وقت، مما يجعلها أداة استراتيجية في دعم التحول الرقمي داخل الهيئة.



AECS E-Training Management System

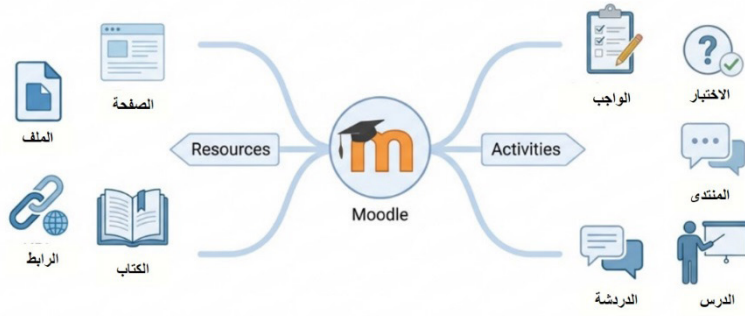
وتوفر المنصة بيئة تعليمية وتدريبية تفاعلية تشمل:

- مسارات تدريبية منظمة تغطي التخصصات العلمية الدقيقة.
- محتوى تعليمي متعدد الوسائط يشمل محاضرات وعروضاً وفيديوهات ومواد علمية وتدريبية.
- اختبارات إلكترونية موثوقة لقياس مستوى التقدم والتحقق من اكتساب المهارات.
- نظام تتبع وتوثيق يتيح للإدارات مراقبة أداء المتدربين وإدارة البرامج التدريبية بكفاءة.
- مكتبة رقمية متنامية تضم خبرات الهيئة، تقاريرها، وموادها العلمية المتخصصة.

وتبرز أهمية المنصة في قدرتها على تحويل الخبرات الفردية إلى معرفة مؤسسية قابلة للنقل والاستدامة، حيث تتيح توثيق المكتسبات العلمية من اتباع الدورات التدريبية الخارجية ومشاركة الخبرات المكتسبة من البرامج الدولية وتعميم الفائدة على جميع العاملين في الهيئة. ومنصة التعليم الإلكتروني في هيئة الطاقة الذرية ليست مجرد أداة تدريب، بل هي بنية معرفية وطنية تساهم في رفع كفاءة الكوادر ودعم البحث العلمي وتعزيز جاهزية الهيئة لمواكبة التطورات العالمية في العلوم النووية وتطبيقاتها السلمية.



هيكلية المودل: الموارد والأنشطة Activities Resources



ويُعد نظام "مودل" moodle بيئة تعلم إلكتروني متقدمة تتيح للمعلمين والمدرسين تصميم اختبارات متنوعة وفعالة لتقييم الفهم العميق وقياس نواتج التعلم بدقة، حيث يدعم مجموعة واسعة من أنواع الأسئلة التي تتجاوز التلقين إلى تعزيز التفكير النقدي والمهارات التطبيقية. ومن أبرز هذه الأسئلة: أسئلة الاختيار من خيارات MC الذي يختبر المعرفة الدقيقة والقدرة على التمييز بسرعة، وأسئلة الصواب والخطأ T/F التي تكشف المفاهيم البديلة الشائعة بفعالية، كجملته "تساوى كتلة البروتون وكتلة الإلكترون" لاستثارة التفكير التصحيحي، وأسئلة المطابقة التي تعزز الربط المعرفي المنظم، كمطابقة نظريات الذرة التاريخية مع أصحابها أو ربط أنواع التحلل الإشعاعي بجسيماتها المنبعثة، إضافة إلى أسئلة الإجابة القصيرة التي تقيس القدرة على الصياغة العلمية الدقيقة، مثل كتابة معادلة نووية موزونة أو تفسير سبب استقرار نظير معين؛ كما تتفوق منصة مودل في دعم الأسئلة العددية والحسابية التي تتطلب إدخال قيم رقمية مع تحديد هامش خطأ مقبولة، مما يعزز الدقة في حسابات الكتلة المولية أو طاقة الفوتون، فضلاً عن أسئلة السحب والإفلات التي تنمي المهارات التطبيقية والمكانية، مثل ترتيب مدارات الذرة حسب زيادة الطاقة أو تجميع مكونات النموذج الذري الحديث في أماكنها الصحيحة. تتيح هذه الأنواع تنوعاً تقييمياً يتناسب مع أنماط التعلم المختلفة، ويوفر تغذية راجعة فورية ومفصلة تعزز التعلم الذاتي وتصحيح المسار المعرفي، مما يجعلها أدوات قوية وفعالة لا غنى عنها في قياس الكفاءة العلمية بدقة وعمق، خاصة في المجالات التي تتطلب دقة مفاهيمية ومهارات حسابية متقدمة كعلم الذرة والفيزياء النووية.

أنواع الأسئلة الأساسية في Moodle

أسئلة الاختيار من متعدد يختار الطالب إجابة واحدة أو أكثر من قائمة خيارات محددة. تدعم إضافة صور أو وسائط.	صحيح / خطأ يختار الطالب بين "صحيح" أو "خطأ".	الإجابة القصيرة يكتب الطالب كلمة أو عبارة قصيرة كإجابة.	سؤال مقالي يسمح للطلاب بالكتابة بحرية حول موضوع معين.
المطابقة يطابق الطالب بين عناصر من عمودين.	الأسئلة العددية للإجابات الرقمية مع هامش خطأ مقبول.	الأسئلة المحسوبة أسئلة رقمية بمتغيرات عشوائية لكل محاولة.	أسئلة السحب والإفلات يجر الطالب عناصر _____ في النص. الكلمة المناسبة: النواة. يجر الطالب عناصر لإكمال فراغات في النص أو على صورة.
الأسئلة المضمنة نص مع فراغات لإكمال إجابات الذي سئلت والنسب (إجابات) النص من في رص النبي الأخير 0 سول فراغات لإجابات الحملة. نص مع فراغات لأنواع إجابات متعددة.	الترتيب يرتب الطالب عناصر في تسلسل صحيح.	اختيار الكلمات الناقصة يختار الطالب كلمة لإكمال الفراغ من قائمة.	الوصف لعرض معلومات أو تعليمات قبل مجموعة الأسئلة.

ملخص: كل نوع يدعم أسلوب تقييم مختلفاً لتحقيق أهداف التعلم.

تصنيف الاختبارات الإلكترونية

تُعد الاختبارات المؤتمتة automated assessments أحد أهم ركائز التحول الرقمي في التعليم. وتضمن الاختبارات للمدرسين تغذية راجعة فورية وتخصيص المساق التدريبي ومرونة الوقت والمكان وتفاعل وتحفيز أكبر من الاختبارات الورقية. أما بالنسبة للمدرسين والمعلمين فتوفر

الاختبارات المؤتمتة الكثير من الوقت والجهد وبيانات دقيقة قابلة للتحليل عن الاختبارات والأسئلة وتنوع في استخدامات الأسئلة وضمان نزاهة الاختبارات. ويؤخذ عن تصميم وتنفيذ الاختبارات الغاية المرجوة منها. وتوجد عدة تصنيفات للاختبارات الرقمية المؤتمتة، نذكر منها:

1. الاختبارات الموضوعية **objective Tests** وتعد الأكثر استخداماً في المنصات التعليمية لأنها سريعة ودقيقة وتوفر تقارير تحليلية.
2. الاختبارات العملية **performance-based assessments** وتقيس قدرة المتدرب على تطبيق المعرفة وليس حفظها فقط.
3. الاختبارات الكتابية **constructed response** وتستخدم لقياس الفهم العميق والتحليل.
4. الاختبارات العملية الميدانية **practical checklists** وهي مناسبة للمهام التي تتطلب خطوات دقيقة.
5. الاختبارات التراكمية **cumulative assessments** وتستخدم لقياس التقدم على مدى فترة تدريبية.
6. الاختبارات التفاعلية الحديثة **H5P assessments** وتضيف عنصر المتعة والاندماج من خلال إيقاف فيديو تدريبي وطرح سؤال حول خطوة معينة قبل إمكانية متابعة الفيديو مما يزيد معدل التفاعل والتركيز والاحتفاظ بالمعلومة.

تقارير تتبّع التعليم الإلكتروني

تعد تقارير تتبّع التعليم والتدريب الإلكتروني حجر الأساس في نجاح أي منصة تدريبية حديثة، فهي الأداة التي تمنح المؤسسات رؤية دقيقة وشاملة حول أداء المتدربين وفعالية البرامج التعليمية. ومن خلال هذه التقارير يمكن قياس التقدم الحقيقي، وتحليل جودة المحتوى، وتحديد نقاط القوة والضعف في العملية التدريبية. وتشمل هذه التقارير بيانات تفصيلية حول نسبة إكمال الوحدات، ومحاولات الاختبارات، الوقت المستغرق في الأنشطة، ومستوى التفاعل مع المحتوى التفاعلي. كما توفر تحليلات متقدمة لجودة الأسئلة، وتوثق المسارات التدريبية، وتعرض مؤشرات الأداء العامة للمنصة. وبفضل هذه المنظومة التحليلية، يصبح اتخاذ القرار مبنياً على بيانات دقيقة، مما يعزز كفاءة التدريب، ويرفع مستوى نقل المعرفة، ويضمن استدامة تطوير الكوادر داخل المؤسسات العلمية والبحثية.



الخدمات المتقدمة في منصة التعليم الإلكتروني

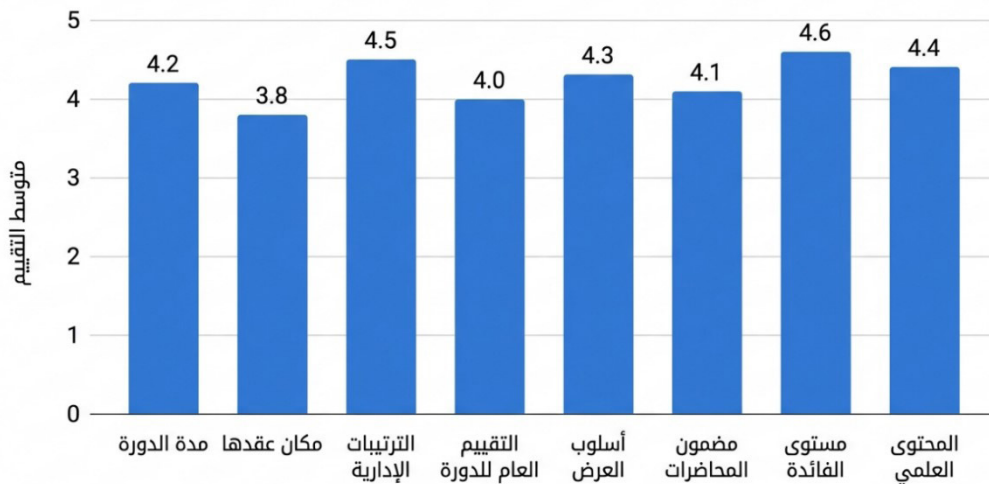
تعد منصة التدريب والتعليم الإلكتروني من أكثر أنظمة إدارة التعلم تطوراً في مجال التعليم الإلكتروني؛ إذ لا تقتصر على تقديم المحتوى والاختبارات، بل توفر منظومة متكاملة من الأدوات الرقمية والتفاعلية التي تدعم التواصل العلمي وتُعزز التعلم التعاوني وتساهم في بناء مجتمع معرفي داخل المؤسسة؛ فمثلاً يُعد المنتدى Forum أحد أهم أدوات التواصل العلمي داخل المنصة، فهو مساحة مفتوحة للنقاش وتبادل الخبرات بين المتدربين والمدرّبين. وتتيح المنصة إنشاء منتديات متعددة بحسب الموضوع أو الوحدة التدريبية مع إمكانية ضبط إعدادات المشاركة وتفعيل التقييم التفاعلي للمشاركات. يمكن استخدام المنتدى لتشجيع النقاش العلمي حول الأفكار العلمية والعملية ومتابعة استفسارات المتدربين وتوثيق الإجابات بحيث تصبح مرجعاً معرفياً متاحاً للجميع، كما يمكن للمدرّب تحليل مستوى التفاعل من خلال تقارير النشاط، مما يساعد على قياس

مؤشرات المشاركة الفكرية وتحديد المتدربين الأكثر تفاعلاً. وتُعد ورشات العمل workshops من الأدوات المتقدمة؛ إذ تجمع بين التقييم الذاتي والتقييم بين الأقران ضمن إطار منظم، حيث يقدم كل متدرب عمله ثم يقوم بتقييم أعمال زملائه وفق معايير محددة مسبقاً من قبل المدرب، وتتيح هذه الأداة تطوير مهارات التحليل النقدي والتفكير المنهجي، وتُعزز ثقافة التعاون العلمي كما يمكن لمدير التدريب استخراج تقارير دقيقة حول أداء كل متدرب في مرحلتي التقديم والتقييم؛ مما يجعلها أداة مثالية لتدريب الكوادر البحثية على التحكيم العلمي وتبادل الخبرات. وتُعد خدمة الجلسات التدريبية المتزامنة عبر خدمة "BigBlueButton" على سبيل المثال من أبرز أدوات التواصل المباشر في منصات التدريب الإلكتروني؛ إذ تتيح عقد صفوف افتراضية متكاملة بالصوت والصورة داخل المنصة دون الحاجة إلى تطبيقات خارجية. يمكن من خلالها مشاركة الشاشة وعرض الشرائح وتسجيل الجلسات وإدارة الحوار بين المدرب والمتدربين في الوقت الحقيقي.



وتُعد استبيانات تقييم questionnaire الدورات التدريبية أداة استراتيجية حيوية لقياس فعالية برامج التعلم والتدريب وتحسينها. وتساهم استبيانات ما بعد التدريب في قياس العائد من التدريب وقياس جودة التعليم والتدريب وتطوير الاحتياجات التدريبية وتعزيز السمعة التنافسية ودعم اتخاذ القرار لعقد دورات مستقبلية. ويجدر بالذكر بأن نموذج كيرباتريك المعروف بالإطار الذهبي للتقييم يسعى لتحويل الرأي الذاتي لبيانات قابلة للقياس من خلال تصميم استبانة تتضمن فقرات حول أربعة مستويات هي: ردة الفعل والتقييم والسلوكيات والنتائج.

متوسط تقييم المشاركين لكل محور في الاستبيان



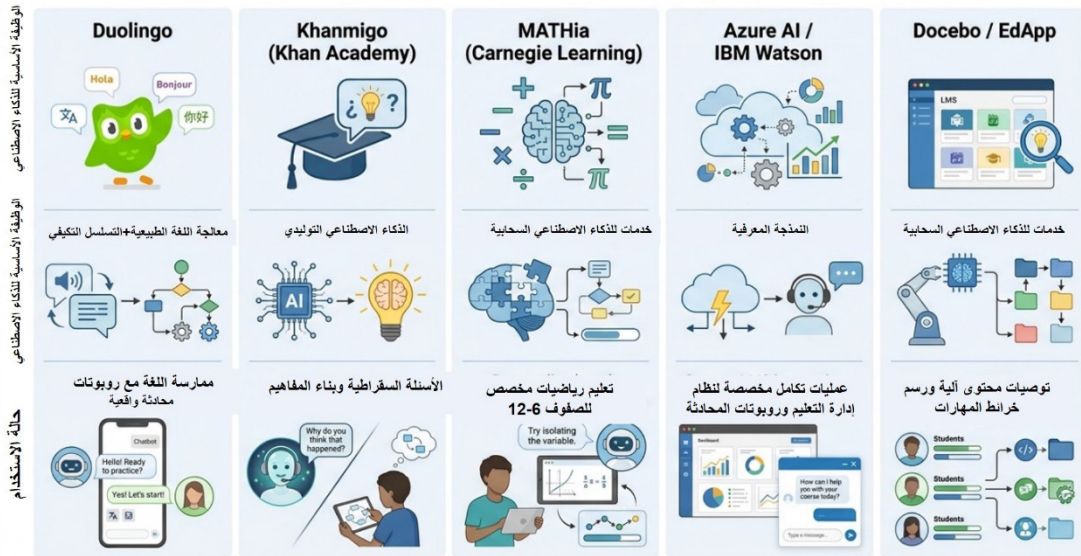
توظيف الذكاء الاصطناعي في التعليم الإلكتروني

يشكّل توظيف الذكاء الاصطناعي في التعليم الإلكتروني تحولاً جذرياً في بنية العملية التعليمية؛ إذ لم يعد دوره مقتصرًا على دعم المحتوى الرقمي، بل أصبح جزءاً محورياً في تصميم التجارب التعليمية وإدارتها وتقييمها. تعتمد المنصات الحديثة على خوارزميات التعلم الآلي ومعالجة اللغة الطبيعية لتحليل بيانات المتعلمين وفهم أنماط التفاعل وتقديم مسارات تعليمية مخصصة تتكيف مع احتياجات كل متعلم، مما يرفع من جودة التعلم ويعزز العدالة التعليمية. وتتيح تقنيات التحليل التنبؤي وأنظمة التعلم التكيفي رصد مؤشرات الضعف والقوة لدى المتدربين وتقديم تدخلات فورية تساهم في تحسين الأداء وتقليل معدلات التعثر، في حين توفر أنظمة التقييم الذكي تصحيحاً آلياً دقيقاً وتغذية راجعة فورية وتقارير تحليلية تدعم اتخاذ القرار الأكاديمي. ويمتد تأثير الذكاء الاصطناعي ليشمل دعم المعلم نفسه، عبر أدوات مساعدة ذكية تساهم في تصميم المحتوى، وإدارة الصفوف الافتراضية، وبناء موارد تفاعلية، وتوليد أنشطة تعليمية متقدمة، مما يعيد تشكيل دور المعلم ليصبح موجهاً ومصمماً للتجارب التعليمية بدلاً من الاكتفاء على نقل المعرفة. كما أسهمت تقنيات الصفوف الذكية في تعزيز التفاعل الرقمي، عبر محتوى ديناميكي، وشاشات تعليمية متقدمة، وروبوتات تعليمية قادرة على الإجابة والتفاعل، وهو ما يرفع من مستوى المشاركة ويجعل العملية التعليمية أكثر حيوية وواقعية. وتبرز أهمية تقنيات الذكاء الاصطناعي بشكل خاص في التخصصات العلمية الدقيقة، مثل برامج الطاقة النووية والعلوم التطبيقية، حيث تتطلب هذه المجالات دقة عالية في التقييم ومحاكاة واقعية للعمليات، وقدرة على تحليل البيانات المعقدة. وتتيح الأنظمة الذكية إنشاء بيئات محاكاة افتراضية وتوليد سيناريوهات تدريبية، وتقديم محتوى متخصص يتناسب مع طبيعة هذه العلوم، مما يدعم المؤسسات البحثية والعلمية في تطوير كوادرات قادرة على التعامل مع التقنيات المتقدمة.

وتستند عملية دمج أدوات الذكاء الاصطناعي في التعليم والتدريب الإلكتروني إلى أطر ومعايير دولية واضحة، مثل الأطر التي طوّرها المركز الوطني للتعليم الإلكتروني والتي تشمل أبعاداً تتعلق بالقيادة وتصميم المناهج والتقييم ودعم الطلاب والأمن والخصوصية والأخلاقيات والتطوير المهني. وتؤكد هذه الأطر على ضرورة الاستخدام المسؤول للذكاء الاصطناعي، وضمان حماية البيانات، ومعالجة التحيز الخوارزمي، وتوفير بيئة تعليمية آمنة وشفافة.

ورغم الفوائد الكبيرة، ما تزال هناك تحديات تتعلق بالبنية التحتية وتكلفة الأنظمة المتقدمة ونقص الكفاءات البشرية القادرة على إدارة هذه التقنيات، إضافة إلى الحاجة إلى تشريعات واضحة تنظم استخدامها. ومع ذلك، تشير التوجهات المستقبلية إلى أن الذكاء الاصطناعي سيصبح جزءاً أساسياً من منظومات التعليم وسيعيد تشكيل دور المؤسسات التعليمية ويعزز قدرتها على تقديم تعليم مرّن تفاعلي وعالي الجودة، قادر على مواكبة التطور العلمي المتسارع، خاصة في المجالات البحثية المتقدمة مثل الطاقة الذرية.

أدوات الذكاء الاصطناعي التي تدعم التعليم الإلكتروني اليوم



اهتمامات الوكالة الدولية للطاقة الذرية في التعليم الإلكتروني

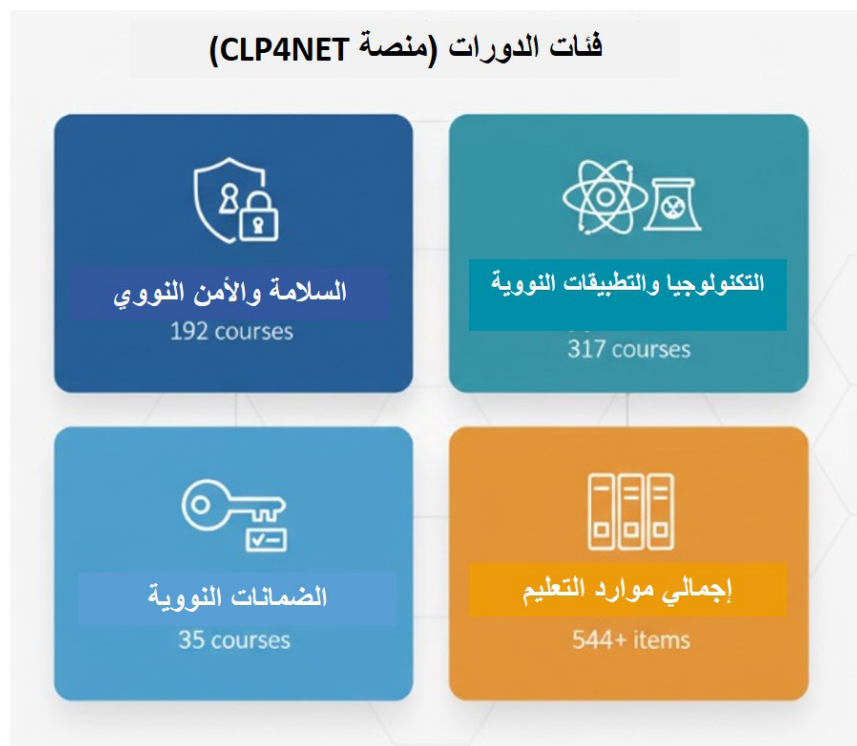
قدّمت الوكالة الدولية للطاقة الذرية إسهامات محورية في تطوير التعليم الإلكتروني المتخصص في العلوم النووية وعبر عدة لغات، عبر إنشاء منظومات رقمية متقدمة تُسهم في بناء القدرات وتعزيز المعرفة في الدول الأعضاء؛ إذ توفر وصولاً مفتوحاً إلى موارد تعليمية عالية الجودة تشمل

دورات ذاتية التعلم، ودورات يقودها مدربون ومواد تدريبية متعددة الوسائط تغطي مجالات الطاقة النووية والأمان الإشعاعي والتقنيات المخبرية والعلوم والتطبيقات النووية المتقدمة من خلال منصة (CLP4NET) cyber learning

تمكن الوكالة مبادرات التعليم المستدام في القطاع النووي من خلال تطوير ونشر موارد تعليمية رقمية عالية الجودة بطريقة فعّالة وقابلة للتوسع، مما يتيح للمهنيين والطلاب حول العالم تعزيز مهاراتهم ومعارفهم دون قيود جغرافية، كما تدعم الوكالة عبر هذه المنظومة مشاريع بناء القدرات في الدول الأعضاء وتسهّل الوصول إلى مساقات تدريبية متخصصة تُسهم في تطوير البنية التحتية النووية وتعزيز الكفاءات الوطنية. وتعتمد الوكالة أيضاً على شبكات التعليم النووي الإقليمية والدولية لتعزيز التعاون وتبادل الخبرات، مما يتيح مشاركة أفضل الممارسات وتطوير مناهج تعليمية موحدة على مستوى عالمي. وتؤكد الوثائق الرسمية للوكالة أن التعليم والتدريب الإلكتروني أصبح "اتجاهاً مستقبلياً" في التدريب النووي، لما يوفره من فرص واسعة للتعلم وتقصير الزمن اللازم لتنفيذ المشاريع وتحسين الوصول إلى الموارد التعليمية المتخصصة.



وبفضل هذه الجهود، أصبحت الوكالة نموذجاً عالمياً في دمج التكنولوجيا الرقمية بالتعليم الإلكتروني في المجال النووي، وتوفير بيئات تعلم رقمية تدعم نقل المعرفة وتطوير الكفاءات وتعزيز ثقافة الأمان النووي في الدول الأعضاء.



AECS Nuclear Science & Technology E-learning and E-training platform

Abstract: Acquiring new skills and retraining human resources in institutions and organizations has become crucial for maintaining competitiveness. The Syrian Atomic Energy Commission's e-learning and e-training platform (TMS) is a designated platform to streamline the e-content materials of higher education programs for university students and specialized training content for employees in the field of nuclear science and technology. Built on the latest version of the Moodle platform, the platform unifies educational and training content, schedules courses, and makes them permanently available, regardless of time or location, via the tms.aec.org.sy platform. E-learning and E-training management system enhances the efficiency of learning and training, ensure compliance with training requirement, and support the continuous development of the workforce in the field of nuclear science and associated technologies and applications. The effective e-learning and training management system enables human resources development and training teams to deliver data-driven and experiential learning and training experiences that align with the AECS strategic objectives for digital transformation.

Keywords: E-Learning, E-Training, Moodle platform, Higher Education, NST, Automated quizzes and tests.

◀ إعداد م. أسماء غبجوقة و د. عماد خضير، قسم الخدمات العلمية، هيئة الطاقة الذرية السورية.

مفاعلات الثوريوم... هل تقود مستقبل الطاقة النووية الآمنة؟



مع تزايد الضغوط العالمية للحد من الانبعاثات الكربونية وتحقيق أمن الطاقة، عاد الاهتمام بالطاقة النووية باعتبارها أحد أهم مصادر الكهرباء منخفضة الانبعاثات. غير أن الحوادث النووية الكبرى، مثل تشيرنوبيل وفوكوشيما، دفعت الباحثين إلى إعادة التفكير في تصميم المفاعلات النووية والبحث عن وقود أكثر أماناً واستدامة. وفي هذا السياق، برزت مفاعلات الثوريوم كأحد أكثر الخيارات الواعدة، حتى بات كثير من الخبراء يصفونها بأنها مرشحة لقيادة الجيل القادم من التكنولوجيا النووية.

الثوريوم... عنصر وفير بقدرات استثنائية

الثوريوم (Thorium-232) عنصر فلزي مشع يوجد طبيعياً في القشرة الأرضية، وتقدر وفرة احتياطياته بما يعادل ثلاثة إلى أربعة أضعاف احتياطيات اليورانيوم، وتنتشر رواسبه في الهند وأستراليا والبرازيل والصين والنرويج وتركيا وغيرها من الدول؛ الأمر الذي يمنحه ميزة استراتيجية تتعلق بأمن إمدادات الوقود النووي.

ورغم أنه عنصر مشع، فإن الثوريوم لا يعد وقوداً انشطاريًا بذاته، وإنما يصنف ضمن المواد الخصبة (fertile materials)، إذ يتحول داخل المفاعل النووي إلى اليورانيوم-233، وهو نظير قابل للانشطار ينتج كميات كبيرة من الطاقة.

كيف تعمل مفاعلات الثوريوم؟

تعتمد دورة وقود الثوريوم على سلسلة من التحولات النووية تبدأ عندما يمتص الثوريوم-232 نيوترونًا، فيتحول إلى الثوريوم-233، ثم إلى البروتكتينيوم-233، وأخيراً إلى اليورانيوم-233 القابل للانشطار.

وعند انشطار اليورانيوم-233 تنطلق طاقة حرارية هائلة تستخدم لإنتاج البخار الذي يدير التوربينات ويولد الكهرباء، كما تتحرر نيوترونات جديدة تستمر في تحويل المزيد من الثوريوم إلى وقود نووي، لتنشأ دورة إنتاج مستمرة للطاقة.



وتعد مفاعلات الأملاح المنصهرة (molten salt reactors) أكثر التصاميم ملاءمة لهذه الدورة، حيث يذاب الوقود النووي داخل أملاح فلورية منصهرة تعمل في الوقت نفسه وسيطاً لنقل الحرارة، وهو ما يمنح المفاعل خصائص تشغيلية تختلف جذرياً عن مفاعلات الماء المضغوط التقليدية.

لماذا ينظر إلى الثوريوم بوصفه أكثر أماناً؟

لا تعود مزايا الثوريوم إلى طبيعة العنصر نفسه فحسب، بل إلى تصميم المفاعلات التي تستخدمه؛ فمفاعلات الأملاح المنصهرة تعمل

عند ضغوط منخفضة جداً مقارنة بالمفاعلات التقليدية، مما يقلل احتمالات الانفجارات الناتجة عن ارتفاع الضغط، كما تعتمد العديد من هذه التصميمات على أنظمة أمان سلبية، بحيث يؤدي ارتفاع درجة الحرارة تلقائياً إلى إذابة سداة تبريد أسفل المفاعل، فينسب الوقود إلى خزانات مخصصة تتوقف فيها التفاعلات النووية بصورة طبيعية دون الحاجة إلى تدخل بشري أو مصادر طاقة خارجية. ويعد هذا المفهوم أحد أهم التطورات في فلسفة السلامة النووية الحديثة، لأنه يعتمد على قوانين الفيزياء بدلاً من الأنظمة الميكانيكية المعقدة.

كفاءة أعلى ونفايات أقل

تشير الدراسات إلى أن دورة وقود الثوريوم تحقق استغلالاً أفضل للوقود مقارنة بدورة اليورانيوم التقليدية، كما ينتج عنها حجم أقل من النفايات المشعة طويلة العمر.

وتتميز هذه الدورة أيضاً بانخفاض إنتاج البلوتونيوم والعناصر الثقيلة العابرة لليورانيوم، وهي المكونات التي تمثل التحدي الأكبر في إدارة النفايات النووية على مدى آلاف السنين. ورغم أن النفايات لا تختفي بالكامل، فإن تقليل كميتها وسميتها الإشعاعية يمثل ميزة مهمة في تعزيز استدامة الطاقة النووية.

هل يمنع الثوريوم الانتشار النووي؟

من المزايا التي كثيراً ما تذكر عند الحديث عن الثوريوم انخفاض قابليته للاستخدام في تصنيع الأسلحة النووية مقارنة ببعض دورات الوقود التقليدية.

ومع ذلك، فإن هذه الميزة لا تعني استحالة إساءة استخدامه؛ إذ إن اليورانيوم-233 الناتج عن دورة الوقود مادة انشطارية يمكن استخدامها نظرياً في التطبيقات العسكرية، إلا أن وجود شوائب من اليورانيوم-232 ذات الإشعاع العالي يجعل التعامل معه شديد الصعوبة ويزيد متطلبات الحماية والإجراءات الرقابية؛ لذلك يرى المختصون أن الثوريوم يقلل مخاطر الانتشار النووي، لكنه لا يلغيها بالكامل.

التحديات التقنية

رغم مزايا الثوريوم الكبيرة، لا تزال هذه التكنولوجيا تواجه تحديات معقدة، فالثوريوم لا يستطيع بدء التفاعل النووي بمفرده، بل يحتاج إلى مصدر أولي للنيوترونات مثل اليورانيوم-235 أو البلوتونيوم. كما أن الأملاح المنصهرة تعمل في درجات حرارة مرتفعة قد تتجاوز 700 درجة مئوية؛ الأمر الذي يفرض تحديات كبيرة فيما يتعلق بمقاومة التآكل وتطوير المواد الهندسية المناسبة. إضافة إلى ذلك، فإن إعادة معالجة الوقود السائل أثناء التشغيل تتطلب تقنيات كيميائية متقدمة لم تصل بعد إلى مرحلة النضج التجاري الكامل.

أما من الناحية الاقتصادية، فما زالت معظم مفاعلات الثوريوم في مرحلة التطوير أو التجارب، وهو ما يجعل تكاليفها الاستثمارية مرتفعة مقارنة بالمفاعلات التقليدية التي تمتلك خبرة تشغيلية تمتد لأكثر من ستين عاماً.

من يقود سباق الثوريوم؟

تعد الهند صاحبة أقدم برنامج استراتيجي لتطوير دورة وقود الثوريوم، مستفيدة من امتلاكها أحد أكبر الاحتياطيات العالمية لهذا العنصر. وفي المقابل، أصبحت الصين خلال السنوات الأخيرة الدولة الأكثر نشاطاً في تطوير مفاعلات الأملاح المنصهرة، حيث نجحت في تشغيل أول مفاعل تجريبي يعمل بهذه التقنية، وحقت تقدماً ملحوظاً في تحويل الثوريوم إلى يورانيوم-233 داخل المفاعل، وهو إنجاز قد يمهّد الطريق أمام إنشاء محطات تجارية خلال العقد المقبل. كما تواصل الولايات المتحدة وكندا وعدد من الدول الأوروبية تطوير برامج بحثية وشركات مع شركات ناشئة تعمل على تصميم مفاعلات الجيل الرابع القائمة على الثوريوم.

هل يصبح الثوريوم وقود المستقبل؟

لا يتوقع الخبراء أن يحل الثوريوم محل اليورانيوم خلال السنوات القليلة القادمة، فالبنية التحتية العالمية للطاقة النووية بُنيت أساساً على دورة وقود اليورانيوم، كما أن التشريعات وسلاسل الإمداد والخبرات التشغيلية جميعها تعتمد على هذه التكنولوجيا، لكن المؤشرات العلمية الحالية تؤكد أن الثوريوم سيكون أحد أهم الخيارات المستقبلية، خاصة إذا نجحت مفاعلات الجيل الرابع في إثبات جدواها الاقتصادية والتشغيلية.

وفي ظل التوجه العالمي نحو الحياد الكربوني، قد يشكل الثوريوم عنصراً أساسياً في مزيج الطاقة العالمي، إلى جانب الطاقة المتجددة والهيدروجين والطاقة النووية التقليدية.

رؤية مستقبلية



إن مفاعلات الثوريوم ليست مجرد فكرة بحثية فحسب، بل هي مشروع علمي يتطور بخطوات متسارعة نحو التطبيق الصناعي، وإذا تمكن الباحثون من تجاوز العقبات التقنية والاقتصادية، فقد تشهد العقود المقبلة تحولاً جذرياً في مفهوم الطاقة النووية، يقوم على مفاعلات أكثر أماناً وكفاءة واستدامة.

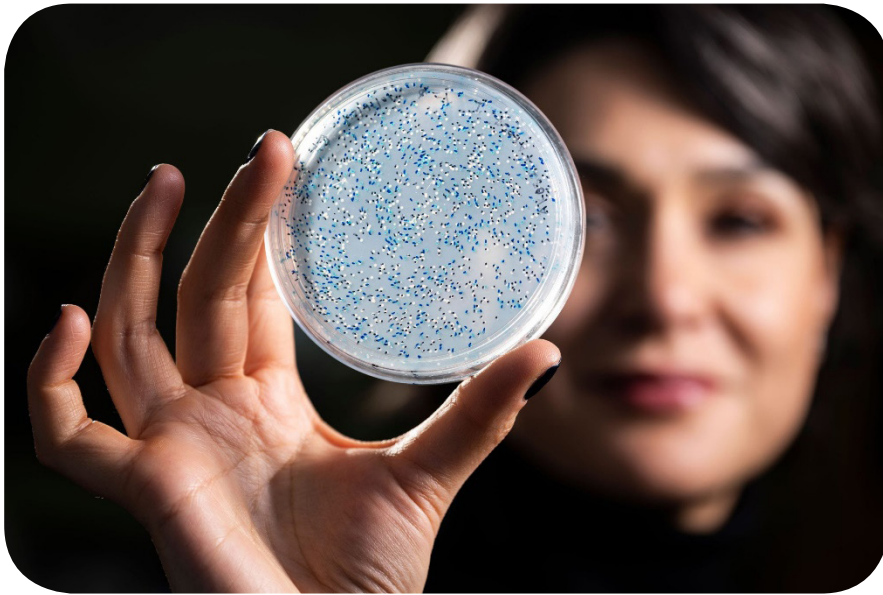
وفيما يتعلق بالدول النامية، فإن متابعة هذا التطور والمشاركة في أبحاثه وبناء الكفاءات العلمية في مجالات هندسة المفاعلات وعلوم المواد والكيمياء النووية ستكون استثماراً استراتيجياً في مستقبل الطاقة، حتى وإن لم تبدأ هذه الدول ببناء مفاعلات ثوريوم في المستقبل القريب.

لقد أثبت التاريخ أن الابتكار هو المحرك الحقيقي لتطور التكنولوجيا النووية، وربما يكون الثوريوم أحد أهم مفاتيح هذا التطور في القرن الحادي والعشرين، ليمنح العالم مصدراً للطاقة يجمع بين الكفاءة العالية والسلامة والاستدامة البيئية.

إعداد: د. هاني زيدان، أ. أحمد الخضر، د. مضر العكلة، هيئة الطاقة الذرية السورية.

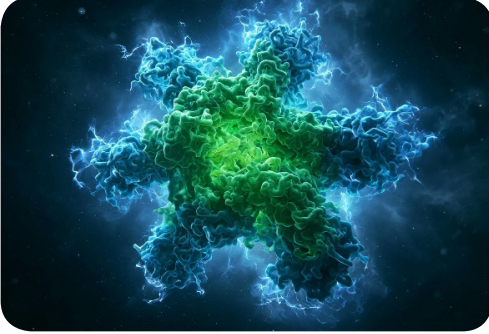
إحياء إنزيم عمره 3.2 مليار سنة للكشف عن نشأة الحياة على الأرض

نجح العلماء في إعادة إحياء إنزيمات قديمة كانت تدعم الحياة، كاشفين بذلك عن أدلة حول أصول الحياة على الأرض، وربما عن وجود حياة في أماكن أخرى من الكون.



أعاد الباحثون بناء نسخ قديمة من إنزيم بالغ الأهمية يُساعد في توفير عنصر الآزوت اللازم لجميع أشكال الحياة على الأرض؛ مما فتح الباب أمام فهم الحياة المبكرة عن ماضي الأرض البعيد. قد يُساعد هذا الاكتشاف في البحث عن حياة خارج كوكب الأرض، كما يُساعد العلماء في مواجهة تحديات إنتاج الغذاء المستقبلية على كوكب الأرض وخارجه.

يعدّ الآزوت عنصراً أساسياً لجميع أشكال الحياة المعروفة على الأرض. ويقول العلماء: إن هذا العنصر الشائع قد يساعد أيضاً في تفسير كيفية تطور الحياة الأولى على كوكبنا، وكيف يمكن أن تتطور الحياة في أماكن أخرى من الكون.



يقول لانس سيفيلدت، عالم الكيمياء الحيوية في جامعة ولاية يوتا: تحتاج جميع الكائنات الحية إلى عنصر الآزوت للبقاء على قيد الحياة، وعلى الرغم من وجوده في كل مكان حولنا، إلا أننا لا نستطيع الاستفادة منه مباشرة؛ في حين يعمل الإنزيم الذي يدعى بالنيتروجيناز Nitrogenase بتثبيت الآزوت الجوي N_2 -Fixation، والذي يحوله إلى شكل يمكن للنباتات والحيوانات والبشر وأشكال الحياة الأخرى الوصول إليه، والاستفادة منه. وقد بدأنا للتو في فهم مدى تطور هذا الإنزيم على مدار تاريخ الأرض الممتد لأربعة مليارات سنة.

في دراسة نُشرت في مجلة Nature Communications، استخدم سيفيلدت وزملاؤه العاملون ضمن مشروع استخدام المعادن واختيارها عبر العصور (MUSE) والممول من وكالة ناسا في جامعة ويسكونسن-ماديسون، تقنيات علم الأحياء التركيبي synthetic biology (أو البيولوجيا الاصطناعية) للعمل على نحو عكسي، انطلاقاً من إنزيمات النيتروجيناز الحديثة، لإعادة بناء نسخ محتملة لأسلاف هذه الإنزيمات.

إعادة بناء إنزيمات تثبيت النيتروجين القديمة

يقول هاريس: كان دورنا في الدراسة هو توصيف مكتبة من جينات لإنزيم نيتروجيناز الأجداد المُعاد بناؤها صناعياً. وفي ظل ظروف مخبرية مضبوطة، قمنا بقياس التجزئة النظائرية للآزوت nitrogen isotope fractionation في الكتلة الحيوية لخلايا السلالات المُهندسة. وقد أتاح هذا البحث للعلماء دراسة كيفية عمل إنزيمات النيتروجيناز القديمة قبل مليارات السنين.

يقول سيفيلدت، الأستاذ ورئيس قسم الكيمياء والكيمياء الحيوية في جامعة ولاية يوتا، الذي أمضى أكثر من ثلاثين عاماً في دراسة بنية ووظيفة إنزيمات النيتروجيناز: إن القدرة على إعادة إنتاج الأشكال القديمة لهذه الإنزيمات تمثل تقدماً مهماً في الجهود المبذولة لفهم أصول الحياة على الأرض، وربما على عوالم أخرى.

ويضيف قائلاً: حتى الآن، اعتمد العلم على الصخور القديمة والأحافير لدراسة الحياة المبكرة. لقد كان كوكبنا مختلفاً تماماً قبل مليارات السنين. وتستمد الأحياء الدقيقة الحديثة الآزوت من الغلاف الجوي عبر إنزيمات النيتروجيناز، وهي مجرد عائلة واحدة من الإنزيمات؛ حيث تفترض دراسة الإنزيمات المتحجرة أن الإنزيمات القديمة كانت تنتج البصمات النظرية نفسها التي تنتجها الإنزيمات الحديثة.

أدلة جديدة حول الأرض في بداياتها

بحسب سيفيلدت، توفر إعادة بناء إنزيمات النيتروجيناز وسيلة جديدة لمعرفة واستكشاف الظروف التي ربما كانت سائدة على الأرض وفي غلافها الجوي في الماضي البعيد. إن فهم إنزيمات النيتروجيناز القديمة والحديثة على حد سواء، يعد أمراً بالغ الأهمية لمساعدتنا في مواجهة التحديات الزراعية الحالية في ظل التغير المناخي، بما في ذلك المناطق المعرضة لخطر المجاعة بسبب الجفاف وعدم القدرة في الحصول على الأسمدة التجارية. إضافة إلى ذلك، قد يكون لهذه النتائج أيضاً تطبيقات عملية خارج الأرض؛ إذ يشير سيفيلدت، الذي كان قد شارك في مشاريع أخرى ممولة من وكالة ناسا الأمريكية، إلى أن هذا العمل يساهم في الجهود المستمرة لتحديد كيفية زراعة الغذاء في الفضاء وعلى كوكب المريخ.

الآثار المترتبة في البحث عن الحياة خارج الأرض

تقول بيتول كاكار، أستاذة علم البكتيريا في جامعة ويسكونسن ماديسون، ومديرة مشروع MUSE، والباحثة الرئيسية المراسلة للدراسة: إن النتائج توفر رؤية أوضح عن كيفية بقاء الحياة وتطورها قبل أن تحدث الكائنات الحية المعتمدة على الأكسجين تحولاً في الكوكب. ونضيف قائلة: يبدأ البحث عن الحياة هنا في موطننا، الذي يبلغ عمره أربع مليارات سنة؛ فإذا أردنا فهم الحياة التي تنتظرنا والحياة في أماكن أخرى، فنحن بحاجة إلى فهم ماضيها وفهم أشكال الحياة التي سبقتها.

◀ ترجمة الدكتور فواز كردعلي، مكتب الترجمة والتأليف والنشر، هيئة الطاقة الذرية السورية.

Utah State University. "Scientists resurrect 3.2-billion-year-old enzyme to reveal how life began on Earth." ScienceDaily. ScienceDaily, 7 July 2026. <www.sciencedaily.com/releases/2026/06/260623014024.htm>.

محاكاة كرة نارية نووية: ابتكار علمي يكشف مفاجأة في الغبار النووي المتساقط

قام فريق من العلماء في مخبر لورانس ليفرمور الوطني في الولايات المتحدة الأمريكية بمحاكاة جزء من الفوضى العارمة داخل كرة نارية نووية لفهم كيفية تشكل التساقط (الغبار) الإشعاعي بشكل أفضل. وكشفت تجاربهم أن طريقة تبريد المواد المتبخرة يمكن أن تُغير بشكل كبير الجسيمات التي تتشكل في النهاية وخاصة بالنسبة للعناصر المتطايرة مثل السيزيوم.



رسم تخطيطي لجهاز تدفق البلازما الذي يُستخدم لفحص الجسيمات أثناء انتقالها من بلازما ساخنة (يسار) إلى حالة مكثفة أكثر برودة (يمين). المصدر: مختبر لورانس ليفرمور الوطني (LLNL).

عند انفجار سلاح نووي أو وقوع حادث خطير في مفاعل نووي، تنطلق طاقة هائلة في أقل من جزء من المليون في الثانية. تعمل الحرارة الشديدة على تبخير الهواء والمواد المحيطة على الفور مُكوِّنةً سحابةً متوهجةً ومتوسعةً من الغاز والبلازما. ومع نمو كرة اللهب النووية هذه تختلط بالغلاف الجوي المحيط وتبرد وتتكثف في النهاية إلى جزيئات صلبة دقيقة مشكلةً غباراً نووياً.

يدرس العلماء كيفية تشكل التساقط النووي لأنه قد يوفر أدلة قيمة حول نتائج وقوع حادث نووي، ويساعد في تحسين النماذج المستخدمة في تقييمات الأمان. درس باحثون في دراسة جديدة نُشرت في مجلة الكيمياء التحليلية في مختبر لورانس ليفرمور الوطني (LLNL) سلوك اليورانيوم والسيريوم والسيزيوم أثناء تبخرها وتفاعلها الكيميائي وتكثفها في ظل ظروف حرارية مضبوطة بدقة. تشير النتائج إلى أن بعض نماذج التساقط النووي شائعة الاستخدام قد تغفل تفاعلات كيميائية مهمة تحدث أثناء تشكل الجسيمات.

محاكاة الظروف داخل الكرة النارية النووية

قالت الباحثة Rakia Dhaoui ومؤلفة مشروع LLNL: إن تغيير المدة التي تبقى فيها المواد في درجة حرارة عالية يمكن أن يغير من التفاعلات الكيميائية وكيفية دمج العناصر المتطايرة مثل السيزيوم في الجزيئات. تحتفظ هذه الجسيمات بسجل لكيفية تشكلها. ومن خلال دراسة هذه العمليات في نظام متحكم به يمكننا استبدال الافتراضات بالقياسات وتحسين النماذج المستخدمة لتفسير الحطام النووي، ودعم اتخاذ القرار عندما يكون الأمر أكثر أهمية.

لدراسة هذه العمليات، استخدم الفريق جهاز تدفق البلازما المصمم لمحاكاة جزء من التفاعل داخل كرة اللهب النووية. تم إدخال تركيبات محددة من المواد في بلازما عالية الحرارة حيث تبخرت، ثم انتقل البخار الناتج عبر أنبوب يمكن التحكم في درجة حرارته بدقة أثناء تبريد المادة. أتاح هذا الإعداد للباحثين تعريض المواد لحالاتي تبريد مختلفتين يُعرفان بالسجلات الحرارية. ففي إحدى الحالتين، انخفضت درجات الحرارة تدريجياً في جميع أنحاء الأنبوب. أما في الحالة الثانية فقد ظلت المواد ساخنة لفترة أطول قبل أن تبرد بسرعة. ولأن الجهاز يعمل باستمرار أمكن جمع العينات من مواقع متعددة؛ مما سمح للعلماء بمراقبة كيفية تغير الجسيمات أثناء تشكلها.

لماذا يُعدّ سجل التبريد مهماً؟

تشير الدراسات التاريخية للتساقط الإشعاعي إلى أهمية المسار الذي تسلكه المواد أثناء تبريدها، فمعدل تبريد المواد ومدة بقائها عند درجات حرارة مرتفعة يُمكن أن يُغيّر كلا من التركيب الكيميائي وتكوين الجسيمات. اختار الباحثون اليورانيوم والسيريوم والسييزيوم لأنّ كلاً منها يتصرف بشكل مختلف أثناء التكاثر؛ فاليورانيوم أقل تطاير نسبياً ويتكثف في المراحل الأولى من العملية مما يجعله معياراً مفيداً. أما السيريوم الذي يُستخدم غالباً كبديل للبلوتونيوم فقد تكثف بطريقة مشابهة لليورانيوم. ومع ذلك، أظهر كلا العنصرين تغيرات في تركيبهما الكيميائي تبعاً لسجلهم الحراري. أظهر السيريوم سلوكاً مختلفاً تماماً فقد تكثف في وقت متأخر جداً مقارنةً بالعناصر الأخرى، وعندما بقي في درجات حرارة عالية لفترات أطول اختلط بشكل كبير مع اليورانيوم والسيريوم.

تحسين نماذج التساقط النووي

تشير النتائج إلى أنّ تكون التساقط النووي لا يعتمد على وقت تكثف العناصر المختلفة فحسب، بل يعتمد أيضاً على كيفية تفاعلها الكيميائي مع بعضها عند انخفاض درجات الحرارة. تتعامل العديد من نماذج التساقط النووي الحالية مع المواد كما لو كانت تتصرف بشكل مستقل مما يعني أنّ بعض هذه التفاعلات الكيميائية ممثلة جزئياً فقط.

تمكّن الباحثون من خلال عزل تأثيرات التاريخ الحراري في نظام تجريبي مضبوط من توليد بيانات يمكن استخدامها لتقييم وتحسين نماذج التساقط النووي التي اعتمدت لفترة طويلة على افتراضات مبسطة.

يخطط الفريق لتوسيع نطاق العمل من خلال دراسة خلائط أكثر واقعية من المواد بهدف فهم أفضل للعمليات المعقدة التي تحكم تكون التساقط النووي أثناء الحوادث النووية في الواقع.

◀ ترجمة الدكتور سعدو الظواهره، قسم الهندسة النووية، هيئة الطاقة الذرية السورية.

Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). "Scientists simulated a nuclear fireball and found a surprise in the fallout." ScienceDaily. ScienceDaily, 3 June 2026. <www.sciencedaily.com/releases/2026/06/260603023104.htm>.

اكتشف العلماء مؤخراً مخزوناً هائلاً غير مستغل من الطاقة، قد يُسهم في تزويد مستقبلنا بها

يُشير التدقيق في العمليات الطبيعية التي تُنتج الهيدروجين بمصدر للطاقة نظيف وواعد.



- يُعتقد أنّ الأرض تحتوي على تراكيز كافية من الهيدروجين الأبيض (الشكل الطبيعي للغاز) قادرة على تلبية الاحتياجات البشرية من الطاقة لمدة 170 ألف عام.

● قامت دراسة حديثة مؤخراً بقياس كمية الهيدروجين المتسرب من آبار حُفرت في الدرع الكندي، وتتبعَت كيفية وآلية تراكم الغاز والمواقع التي يتركز فيها.

● لا يقتصر الأمر على استغلال الاحتياطيات الطبيعية للهيدروجين على إطلاق شكل جديد وموثوق من الطاقة النظيفة فحسب، بل يُمكنه أيضاً من تحسين كفاءة الصناعات التي تعتمد على هذا الغاز.

الهيدروجين بألوانٍ متعددة

وعلى الرغم من أن الغاز نفسه عديم الرائحة واللون، فقد طوّر خبراء العلوم والصناعة مقياساً لونياً من أجل تحديد كيفية إنتاج الهيدروجين بسرعة؛ فعلى سبيل المثال، يشكّل الهيدروجين البني والرمادي الغالبية العظمى من الهيدروجين الذي يتم إنتاجه على كوكب الأرض، ولسوء الحظ، فهذا ليس الأمر ليس جيداً؛ إذ تتطلب عمليات إنتاج هذين النوعين من الهيدروجين استخدام الفحم والميثان على التوالي، مما يجعل الهيدروجين الناتج بعيداً كل البعد عن كونه مصدراً نظيفاً للطاقة. في حين يكون الهيدروجين الأزرق أنظف، ويعمل على تخزين انبعاثات غازات الاحتباس الحراري تحت الأرض. أما الهيدروجين الأخضر المُنتج حصرياً باستخدام الطاقة المتجددة فيعد الأفضل، ووفقاً لمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، فإن أقل من واحد بالمئة من إنتاج الهيدروجين في الولايات المتحدة هو هيدروجين أخضر.

ومع ذلك، يوجد نوع خامس من الهيدروجين (الهيدروجين الأبيض)، والذي ربما يكون أفضل من إنتاجه باستخدام طاقة الرياح والطاقة الشمسية. يُشار إلى هذا الهيدروجين أحياناً باسم الهيدروجين "الذهبي" أو "الجيولوجي"، الذي يتم إنتاجه مباشرة في باطن الأرض، دون أن يتطلب الأمر أي تدخل بشري. ووفقاً لدراسة نُشرت في مايو 2025، فقد يحتوي كوكب الأرض على احتياطيات كافية من الهيدروجين الأبيض قادرة على تلبية الاحتياجات البشرية من الطاقة لمدة 170 ألف عام، لكن العثور على هذا الهيدروجين وفهم كيفية وآلية إنتاجه تحت الأرض مازالت ليست بمتناول اليد بعد، وهي ليست بالأمر السهل.

كشفت دراسة جديدة نُشرت في مجلة وقائع الأكاديمية الوطنية للعلوم، بقيادة علماء من جامعتي تورنتو وأوتاوا، عن تفاصيل فحص واختبار تشكيلة جيولوجية تعرف باسم الدرع الكندي، وهو عبارة عن قشرة قارية متكشّفة على سطح الأرض، تتكون من صخور ما قبل الكمبري، وهي تُشكل ما يقارب نصف مساحة اليابسة في كندا، وتحتوي على بعض أقدم الصخور على كوكب الأرض. وقد قام العلماء، للمرة الأولى، بالقياس وبشكل مباشر كمية الهيدروجين المتسرب من آبار في هذه الصخور، والتي قدرت بمعدل 0.008 طن (حوالي 8 كيلوغرامات) من الهيدروجين سنوياً. وقد تتبعت هذه الدراسة إضافة إلى تقدير استمرار تدفق الهيدروجين من هذه الآبار لعقد من الزمان تقريباً، كيفية تراكمه، كما رسمت خريطة لمواقع تراكيزه.

تشير معطيات هذه الدراسة إلى وجود فرص وإمكانات هائلة غير مستغلة للوصول إلى مصدر محلي للطاقة منخفض التكلفة، ومُستخرج من باطن الأرض، وفق ما أوضحته في بيان صحفي باربرا شيروود لولار، المؤلفة الرئيسة للدراسة الجديدة والمشاركة في تأليف دراسة عام 2025، إضافة إلى أن هذا المصدر يوفر دعماً للمراكز الصناعية المحلية والإقليمية، ويقلل من اعتمادها على استيراد الوقود الهيدروكربوني.

وكثيراً ما يُنظر إلى الهيدروجين على أنه تقانة المستقبل التي سَتُشغّل السيارات وربما المجتمعات بأكملها في نهاية المطاف (إذا سارت الأمور كما تتمنى دول مثل اليابان). ومع ذلك، يُعدّ الهيدروجين حالياً العنصر الأساسي في إنتاج الأمونيا (المستخدمة في الأسمدة)، وتكرير البترول، وصناعة الصلب. لذا، فمن الممكن أن يُساهم إيجاد مصادر نظيفة للهيدروجين بشكل كبير وكاف من تنظيف هذه الصناعات الملوثة أصلاً، في الوقت الذي نسعى فيه جاهدين نحو مستقبل أكثر استدامة. ومن أهم مزايا الهيدروجين الأبيض مقارنةً بالهيدروجين الأخضر أنه لا يتطلب طاقة لإنتاجه، سواء كانت نظيفة أم غير نظيفة، وبالتالي فهو أرخص بكثير، وتتمثل أكبر التحديات حتى الآن في إيجاد مواقع وأماكن غنية بالهيدروجين، وإنشاء البنية التحتية اللازمة لاستخراجه بتكلفة معقولة.

قال شيروود لولار: "إن كندا محظوظة لأن مساحات شاسعة من أراضيها، وخاصة الدرع الكندي منها، تحتوي على الصخور والمعادن المناسبة لإنتاج هذا الهيدروجين الطبيعي"، ولكن يشير المؤلفون إلى أنه يمكن العثور على صخور مماثلة منتجة للهيدروجين في جميع أنحاء العالم. ومن أهم مزايا الهيدروجين الأبيض وجوده الطبيعي بالقرب من مواقع التعدين القائمة، حيث تُعدّ الصخور التي تُنتجها ضرورية أيضاً لتكوين راسب النيكل والنحاس والماس، وهذا من شأنه أن يُسهّم نظرياً في خفض تكلفة البنية التحتية لإنتاج الهيدروجين وتخزينه ونقله. وقال شيروود لولار: "هناك سباق عالمي لزيادة وفرة الهيدروجين وذلك بهدف خفض انبعاثات الكربون وتقليل تكاليف اقتصاد الهيدروجين الحالي. لدينا الآن فهم أفضل للجدوى

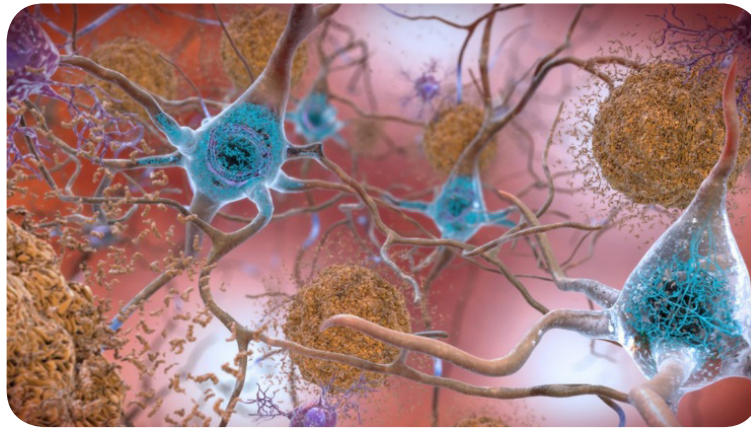
الاقتصادية لهذا المورد، والذي يمكن ترجمته على أرض الواقع وربطه برواسب الهيدروجين حول العالم، سواء المعروفة منها أم التي لم تُكتشف بعد". وقد ساهمت الطرائق والأساليب الملوثة التي يستخدمها البشر لإنتاج الهيدروجين من الحد بشكل كبير من إمكانات هذا الغاز كمصدر نظيف للطاقة. ومع ذلك، إذا تمكن العلماء والمهندسون من إيجاد طريقة لاستغلال الاحتياطيات الطبيعية للأرض من هذا الغاز عديم اللون، ولكنه في الوقت نفسه زاهي الألوان، فقد تحصل البشرية على حليف قوي في معركتها ضد تغير المناخ.

◀ ترجمة الدكتور جمال أصفهاني، قسم الجيولوجيا، هيئة الطاقة الذرية السورية.

<https://www.popularmechanics.com/science/energy/a71368883/untapped-reserves-of-hydrogen/>

نوع جديد من أدوية الزهايمر يحمل بصيص أمل

نجح الدواء التجريبي في خفض مستويات تاو وأظهر تحسناً طفيفاً في فقدان الذاكرة



يستهدف دواء تجريبي بروتين تاو (الذي يظهر باللون الأزرق في هذا الرسم التوضيحي)، وهو بروتين يشكل تشابكات سامة في مرض الزهايمر، وتستهدف أدوية أخرى تمت الموافقة عليها مؤخراً تراكم لويحات الأميلويد (البنية).

أظهرت بيانات التجارب السريرية الصادرة في 14 تموز أن دواء تجريبياً يثير الآمال في علاج مرضى الزهايمر بقدرته على إزالة تشابكات تاو من الدماغ، فقد أدى المركب، المسمى ديرانيرسن والمطور من قبل شركة الأدوية العملاقة بيوجين، إلى خفض مستويات تاو في السائل النخاعي للمرضى بنسبة تتراوح بين 50 و60 بالمئة مقارنة ببداية التجربة، كما أظهرت النتائج أن الدواء يعمل على إبطاء التدهور المعرفي لدى الأشخاص بشكل طفيف مقارنة بأولئك الذين تناولوا الدواء الوهمي. لكن من غير الواضح ما إذا كان تغيير بهذا الحجم سيساعد المرضى، فقد أثارت النتائج معضلة محيرة؛ فعلى عكس التوقعات، فإن المرضى الذين شهدوا أكبر انخفاض في مستويات تاو لم يستفيدوا أكثر من غيرهم في الاختبارات المعرفية.

قدمت اختصاصية الأعصاب كاثرين مامري، رئيس قسم العلاجات الجديدة في مركز أبحاث الخرف بجامعة كوليدج لندن، بيانات هذه التجارب السريرية لدواء ديرانيرسن، والتي بدأت في تشرين أول 2017، وذلك أمام الجمهور في قاعة مؤتمرات مكتظة في المؤتمر الدولي لجمعية الزهايمر. وتقول عالمة الأعصاب الجزيئية هيدر سنايدر من جمعية الزهايمر ومقرها شيكاغو، إن نتائج هذه التجارب السريرية تمثل خطوة مهمة إلى الأمام؛

حيث يعاني أكثر من سبعة ملايين شخص تبلغ أعمارهم 65 عاماً فما فوق في الولايات المتحدة من مرض الزهايمر، وكان من الصعب الحصول على علاجات لإبطاء تطوره، ناهيك عن علاجه.

مركب ديرانيرسن هو مركب متعدد النيكليوتيدات معاكس الاتجاه (antisense oligonucleotides)، وهو جزء اصطناعي من الـ DNA يعمل على إسكات المورثات؛ حيث يرتبط ديرانيرسن بمورثة MAPT التي تنتج بروتين تاو الذي له دور في مرض الزهايمر؛ ففي حالة الزهايمر يتصرف بروتين تاو بشكل غير طبيعي ويشكل تشابكات تؤدي إلى تلف الخلايا العصبية.

شملت المرحلة الثانية من التجارب السريرية، والتي هدفت إلى تحديد فعالية الدواء وسلامته، 416 مشاركاً يعانون من ضعف إدراكي خفيف أو مرض الزهايمر في مرحلة مبكرة. حيث يعتقد الباحثون أن التدخل العلاجي قبل تقدم المرض سيعطي العلاجات فرصة أفضل للنجاح. قسّم القائمون على التجربة مجموعة المرضى المشاركين إلى ثلاث مجموعات لتلقي الدواء: مجموعة تلقت جرعة 60 مغ من ديرانيرسن كل 24 أسبوعاً، في حين تلقت المجموعات الثانية جرعة أعلى وقدرها 115 مغ كل 12 أو 24 أسبوعاً، حيث تم حقن الدواء مباشرة في النخاع الشوكي. وقد تلقت المجموعة الثالثة دواء وهمياً، واستمرت التجربة 76 أسبوعاً بالمجمل.

قام الفريق بتقييم المرضى باستخدام مجموعة من الاختبارات المعرفية التي تقيس ذاكرتهم وقدرتهم على حل المشاكل وقدرتهم على تتبع الوقت والموقع. إن ما توقعه فريق العمل هو أن يؤثر الدواء على نتائج اختبارات المرضى المعرفية بطريقة تستجيب للجرعة؛ أي أن أولئك الذين تلقوا الجرعة الأعلى من ديرانيرسن كانوا سيحصلون على فائدة أكبر. إلا أن النتائج لم تظهر ذلك، فقد انخفضت سويا جميع مجموعات التدخل الدوائي بمعدل أبطأ من مجموعة الدواء الوهمي. ومع ذلك، فإن هناك تطوراً بينته النتائج، ففي حين أن النتائج المعرفية لجميع المشاركين ساءت مع تقدم مرض الزهايمر لديهم، إلا أن الأشخاص في المجموعة التي تلقت الجرعة الأدنى 60 مغ أظهروا أبطأ انخفاض، فقد انخفضت درجاتهم بنسبة 26 بالمئة أقل من أولئك الذين تلقوا العلاج الوهمي، الذين لم يكن مستغرباً أن يكون أدائهم هو الأسوء، مقارنة مع 9 بالمئة للمجموعة التي تلقت أعلى جرعة. ومع ذلك فقد أظهروا أيضاً انخفاضاً أقل في مستويات تاو لديهم مقارنة مع مجموعات الجرعات العالية.

من الناحية النظرية، ينبغي لدواء ديرانيرسن أن يقلل بشكل متناسب من تأثير مرض الزهايمر على الدماغ عن طريق خفض مستويات تاو، إلا أن بيانات التجربة لم تدعم ذلك؛ فقد يكون ذلك بسبب العدد الصغير من الأشخاص المشاركين في التجربة أو أحجام التأثير الصغيرة للدواء، وذلك وفقاً للطبيب النفسي روب هوارد الذي لم يشارك مع فريق الدراسة والذي تابع بقوله: إن حجم التغيير في الدرجات المعرفية كان ضئيلاً للغاية وتساءل إن كانت هذه الاختلافات ذات دلالة سريرية. هذا وتخطط شركة بيوجين لنقل الدواء إلى تجارب المرحلة الثالثة، واختباره على مجموعة أكبر. وإذا سارت هذه الدراسة كما هو مخطط لها، وحصل المركب الدوائي على موافقة إدارة الغذاء والدواء في الولايات المتحدة، فإنه سيكون أول دواء يستهدف بروتين تاو لتعديل الذاكرة في مرض الزهايمر.



وافقت إدارة الغذاء والدواء الأمريكية في عامي 2023 و2024 على دوائي ليكانيماب ودونانيماب، وهما أول الأدوية الجديدة لمرض الزهايمر منذ ما يقرب من عقدين من الزمن. ويستهدف الدواءان بروتيناً مختلفاً يسمى أميلويد بيتا، والذي يتشكل على شكل لويحات لرجة في الدماغ، إلا أن تاو أثار اهتمام الوسط البحثي، لأنه في حين أن لويحات الأميلويد تظهر أولاً في مرض الزهايمر، فإن تغيرات تاو لها صلة أقوى بكثير بالتدهور المعرفي.

أشارت بيانات التجربة إلى أن ديرانيرسن يحسن الإدراك بالقدر نفسه تقريباً مثل أدوية الأميلويد، لكن ديرانيرسن لم يشارك هذه المركبات الآثار الجانبية الضارة، والتي يمكن أن تسبب نزيفاً صغيراً في الدماغ، وقالت مامري: إن بعض المرضى عانوا من آثار جانبية مرتبطة بالبزل القطني المستخدم لحقن الدواء، بينما عانى آخرون من الارتباك، إلا أن هذا بدا مؤقتاً. لا يزال من غير الواضح ما إذا كان من الممكن استخدام ديرانيرسن جنباً إلى جنب مع الأدوية

التي تستهدف الأميلويد أو بالتسلسل معها، على الرغم من أن ذلك ممكن كما قالت سنايدر. وقالت: إن تجارب سريرية أخرى تختبر بالفعل مزيجاً من الأدوية التي تستهدف تاو والأميلويد عند المرضى الذين يعانون من أشكال وراثية نادرة من مرض الزهايمر.

ترجمة د. دانا جودت، قسم البيولوجيا الجزيئية والتقانة الحيوية، هيئة الطاقة الذرية السورية.

<https://www.sciencenews.org/article/new-alzheimers-drug-tau-promise>



هيئة الطاقة الذرية السورية
Atomic Energy Commission of Syria

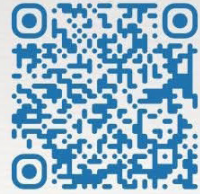


الصفحات الرسمية
لهيئة الطاقة الذرية السورية
— syraegov —

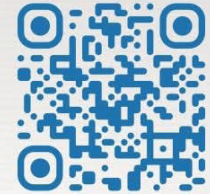
f Facebook



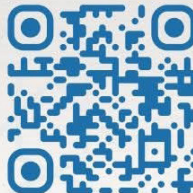
Instagram



X X platform



Telegram



in LinkedIn



Youtube

