



١٦٤

عالم الذرة^س

مجلة هيئة الطاقة الذرية السورية

2025

التقنيات النووية اللاإتلافية في الصناعة

التمييز النظيري للكربون في النباتات

بطاريات الليثيوم أيون



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



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

AECS

رئيس هيئة التحرير

د. فواز كرد علي

أعضاء هيئة التحرير

د. رامي جرجور

د. دانا جودت

د. عماد خضير

د. محمد بهاء الصوص

د. سعدو الظواهرة

د. عبد القادر عبادي

د. بشار عبد الغني

د. ماهر عبودي

د. عبد الوهاب علاف

د. وليد الفارس

د. عبد الغفار اللافي

د. يحيى لحفي

AECS

AECS

AECS

AECS

الإخراج الفني

أمل قيروط

بشار مسعود

راما الكاج

التدقيق اللغوي

ريما سنديان

التنضيد

غفران ناوروز

AECS

AECS

المحتويات



التطبيقات غير الكهربائية للطاقة النووية:
إنتاج الهيدروجين وتحلية مياه البحر

67



تقانة الإخصاب بالزجاج (IVF): من أطفال
الأنابيب حتى الخلايا الجذعية

75



تحديد الباتولين في عصير ومشتقات التفاح
باستعمال نظام تحضير آلي للعينات
LC-APCI-MS/MS و

82

أخبار علمية

بروتين حشري يمنع العدوى البكتيرية

94

من فطر لعين إلى علاج
السرطان: الأسبرجیلوس فلافوس
ينتج دواءً جديداً فعالاً

95

أشجار التين تحول غاز CO_2 الجوي إلى حجر، هذا
ما كشفت الأبحاث

97

طريقة جديدة ومذهلة لإنتاج الأمونيا
دون الحاجة إلى الوقود الأحفوري،
طريقة جديدة قد تحدث نقلة نوعية
في قطاعي الهيدروجين والزراعة

98

مقالات

التقنيات النووية للإنتاجية
الصناعية في الصناعة

8

التمييز النظيري للكربون في
النباتات وأهميته الزراعية

22

نظام تحليل البيانات في تجارب
الفيزياء النووية

42

بطاريات الليثيوم أيون: التكوين
والأنواع والاستدامة

52

الأطر المعدنية العضوية: مادة العجائب
في القرن الحادي والعشرين

61

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 المرحوم 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 الهيدروجين الفران 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 وتوخيئاً 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 إحداها 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 فاكثراً، 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.



التقنيات النووية اللاإتلافية النوعية في الصناعة

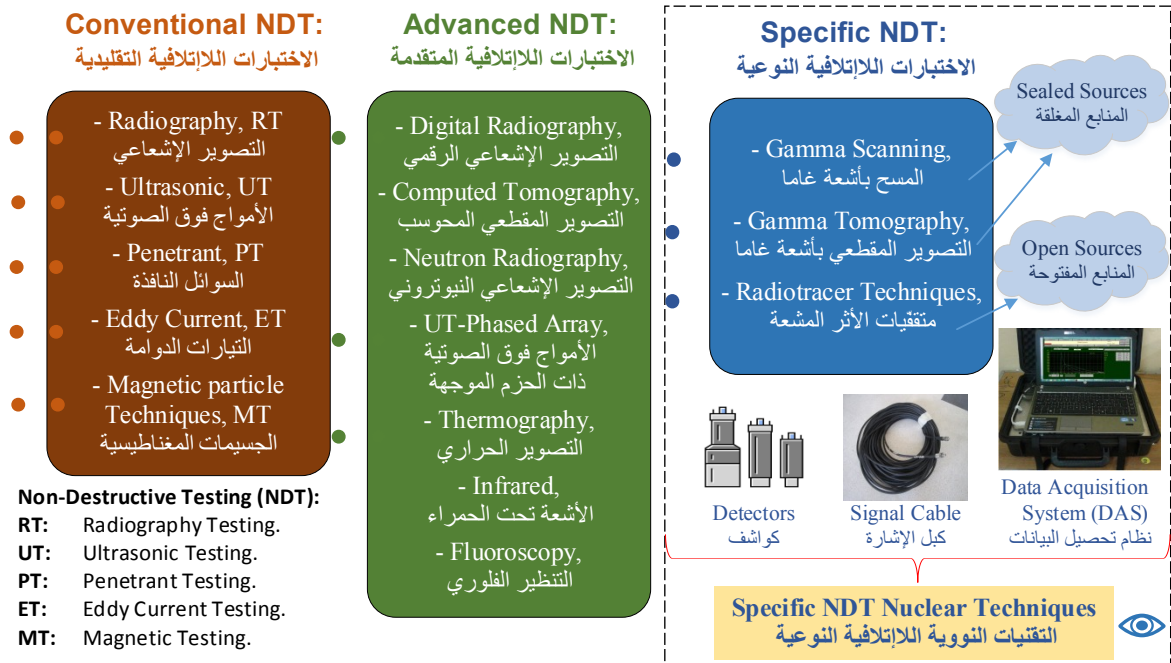
ملخص

تستخدم النظائر المشعة على نطاق واسع من التطبيقات في الصناعات المختلفة. تساعد هذه التطبيقات في تطوير الصناعة وجعلها أكثر إنتاجية واستدامة بالاعتماد على تكنولوجيا الطاقة النووية وأجهزة القياس النووية الإلكترونية الحديثة. إن الفوائد الاقتصادية الناتجة عن استخدام النظائر المشعة المفتوحة والمغلقة في الصناعة قد تزايدت بصورة كبيرة وباتت معترفاً بها من قبل المستخدمين النهائيين. لقد ساهمت الوكالة الدولية للطاقة الذرية على مدى سنوات بالتمويل السخي وبالجهود الضخمة في التطبيقات الصناعية للتقنيات النووية اللاإتلافية. ونتيجة للمشاريع الإقليمية المنفذة في شرق آسيا والمحيط الهادي وفي أمريكا اللاتينية وفي أفريقيا والتي تضمنت عشرات البرامج الوطنية؛ فقد جرى تدريب متخصصين على استخدام النظائر المشعة في كشف وتحديد مشاكل الأنظمة الصناعية. إن الهدف من هذه المقالة هو التعرف على التقنيات النووية اللاإتلافية النوعية والتوسع إلى تطبيقها في قطاع الصناعة في سورية.

الكلمات المفتاحية: التقنيات النووية اللاإتلافية، التطبيقات الصناعية للنظائر، متقنيات الأثر المشعة، أمثلة العمليات الصناعية، التصوير المقطعي المحوسب الصناعي، ديناميكا الموائع المحوسبة CFD.

مقدمة

تعدّ الاختبارات اللاإتلافية (NDT) أداة أساسية في دفع عجلة التطور والتقدم الصناعي وفي ضمان جودة المنتجات الصناعية وضبطها؛ كما تشكل عصب أي منشأة تعمل بكفاءة [1]. تتطور طرائق الاختبارات اللاإتلافية وتقنياتها باستمرار، ويمكن حالياً تمييز عشرات الطرائق المستخدمة في شتى المجالات الصناعية. يتم أحياناً استخدام أكثر من طريقة (تقنية) في اختبار المنتج الصناعي وذلك للتأكد من نتائج الاختبار أو الكشف عن عيوب ذات طبيعة مختلفة. ويمكن القول إن تقنيات الاختبارات اللاإتلافية المختلفة ليست في موضع تنافس أو انتقاء اختياري، وإنما تكمل بعضها بعضاً. ومن الجدير ذكره، أن لكل تقنية مزايا وحدوداً معينة يجب أخذها بالحسبان عند وضع أي برنامج للاختبار. يمكن تصنيف طرائق الاختبارات اللاإتلافية ضمن مستوى معين من التجريد إلى ثلاثة أنواع (الشكل 1): الاختبارات اللاإتلافية التقليدية conventional NDT، الاختبارات اللاإتلافية المتقدمة advanced NDT والاختبارات اللاإتلافية النوعية specific NDT.



الشكل 1. تصنيف طرائق الاختبارات اللاإتلافية وتقنياتها.

قامت دول كثيرة في العالم خلال العقود السابقة على توطين عدد من طرائق الاختبارات اللاإتلافية التقليدية والمتقدمة، وقد نجحت ببناء القدرات الوطنية المطلوبة والمرتبطة بهذه الطرائق (الكوادر البشرية، المعدات، منشآت اختبار/مختبرات). كما قامت هذه الدول بتشكيل اللجان الوطنية للاختبارات اللاإتلافية من أجل تأسيس وتطوير نظام تأهيل وترخيص وطني في طرائق الاختبارات اللاإتلافية يتوافق مع المواصفات الدولية [2، 4، 5]. تعمل الوكالة الدولية للطاقة الذرية منذ سنوات على مساعدة الدول الأعضاء النامية على توطين التقنيات النووية اللاإتلافية النوعية، وذلك عبر المشاريع الإقليمية المنفذة في آسيا والمحيط الهادئ وفي أمريكا اللاتينية وأفريقيا. تعتمد طرائق الاختبارات النووية اللاإتلافية النوعية في جوهرها على استخدام النظائر المشعة الصناعية في كشف مشاكل الأنظمة الصناعية وتحديداتها، وتشمل: متتقيات الأثر المشعة، مسح الأعمدة (الأبراج) بأشعة غاما، التصوير المقطعي الصناعي بأشعة غاما... إلخ.

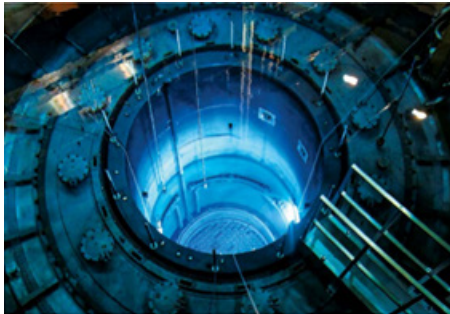
خطت منطقة آسيا والمحيط الهادئ لتعزيز القدرات الوطنية لدى الدول الأعضاء في الوكالة على تطبيق النظائر المشعة والتقنيات القائمة على الإشعاع من أجل دعم إدارة العمليات الصناعية الأنظف والأكثر أماناً. تُستخدم النظائر المشعة في مجالات علمية وصناعية متنوعة لتحسين الإنتاجية والحصول على معلومات دقيقة، من خلال التتبع والرصد الدقيقين، والتي لا يمكن الحصول عليها بأية طريقة أخرى. تتمتع بعض البلدان في هذه المنطقة (مثل الصين والهند وباكستان وفيتنام وإندونيسيا) بشراكات قوية للغاية مع الصناعات والبلدان الأخرى لتنفيذ التقنيات النووية اللاإتلافية النوعية في المنشآت (المحطات) الصناعية، وبالتحديد في صناعات النفط والغاز والصناعات المعدنية والصناعات التحويلية ومحطات معالجة مياه الصرف الصحي. تؤدي التقنيات النووية اللاإتلافية النوعية دوراً مهماً في تحديد عيوب المنشآت والمحطات

الصناعية وفي كشف الأعطال التي تطرأ على المنشآت والمحطات الصناعية دون الحاجة للإغلاق، مما يفيد في رفع جاهزية ووثوقية عمل هذه المنشآت وخفض زمن التوقف عن الإنتاج وفي حماية البيئة والإنسان من الحوادث الصناعية.

في هذه المقالة سوف يتم عرض كيفية استخدام النظائر المشعة وأهميتها في كشف مشاكل الأنظمة الصناعية وتحديداتها، خاصة في صناعات البترول، البتروكيماويات، التعدين، الفوسفات، الذهب، الإسمت، الورق، السكر والزجاج. إضافة إلى ذلك، سوف يتم عرض أمثلة عن تطبيقات النظائر المشعة المفتوحة والمغلقة في الصناعة، ومنها: قياس توزع زمن البقاء داخل العمليات الصناعية، وقياس زمن خلط المركبات، وقياس معدل التدفق، وكشف أماكن الانسداد أو التسريب في الأنابيب والمبادلات الحرارية، ومسح الأعمدة (أبراج التقطير في مصافي النفط) بأشعة غاما، والتصوير المقطعي المحسوب بأشعة غاما. كما تبين أهمية دمج وتكامل تقنيات متقنيات الأثر المشعة التي تطبق مبدأ قياس توزع زمن البقاء RTD مع محاكاة ديناميكا الموائع المحوسبة CFD لكشف الأعطال وأمثلة (تحسين) العمليات الصناعية، كما سيتم عرض أحدث التقنيات الرقمية وأجيال التصوير المقطعي المحسوب الصناعي المرتبطة بالترتيب الهندسي لثنائية كاشف-منبع في الصناعة. إلى جانب ذلك، وفي إطار المحاور السابقة، سوف يتم تسليط الضوء على طرائق تحليل البيانات والعلاقات بين العمليات والنماذج الرياضية الموجودة التي تصف الأنظمة والعمليات الصناعية.

التطبيقات الصناعية للنظائر المشعة

بدأ استخدام النظائر المشعة في كشف مشاكل الأنظمة الصناعية وتحديداتها منذ أكثر من خمسين عاماً، ومنذ ذلك الحين، تطورت تطبيقاتها لتصبح مؤهلة وفعالة لفحص العمليات وأمثلتها في شتى المجالات الصناعية. وبالنظر إلى اتجاهات عمليات التصنيع في البلدان النامية، تشير الدلائل على أن التقنيات النووية اللاإتلافية ستستمر في أداء دور مهم في الصناعة لسنوات عديدة قادمة؛ ويعود نجاحها في المقام الأول إلى ميزة الكشف المباشر دون الحاجة إلى إغلاق محطات المعالجة [6]. تُعد النظائر المشعة التي تُصدر أشعة غاما والنيوترون مناسبة تماماً للاستخدام في التطبيقات الصناعية، وعلى الرغم من وجود عدد من النظائر المشعة في الطبيعة فإن غالبية العناصر المشعة المستخدمة في الصناعة هي عبارة عن نظائر مشعة صناعية. يوضح الشكل 2 ثلاث طرائق لإنتاج النظائر المشعة الصناعية.



1- Nuclear Reactors
المفاعلات النووية



2- Cyclotrons
السيكلوترون

Major Radioisotopes Generators: مولدات النظائر المشعة الأساسية:



3- Radioisotope Generators
مولدات النظائر المشعة

$^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$, $T_{1/2} = 66 \text{ h} \rightarrow 6 \text{ h}$, IT 140keV	1
$^{113}\text{Sn} \rightarrow ^{113\text{m}}\text{In}$, $T_{1/2} = 115.1 \text{ d} \rightarrow 99.5 \text{ min}$, IT 392 keV	2
$^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137\text{m}}\text{Ba}$, $T_{1/2} = 30.17 \text{ y} \rightarrow 2.55 \text{ min}$, IT 661.6 keV	3

Radiotracers
متقنيات أثر مشعة

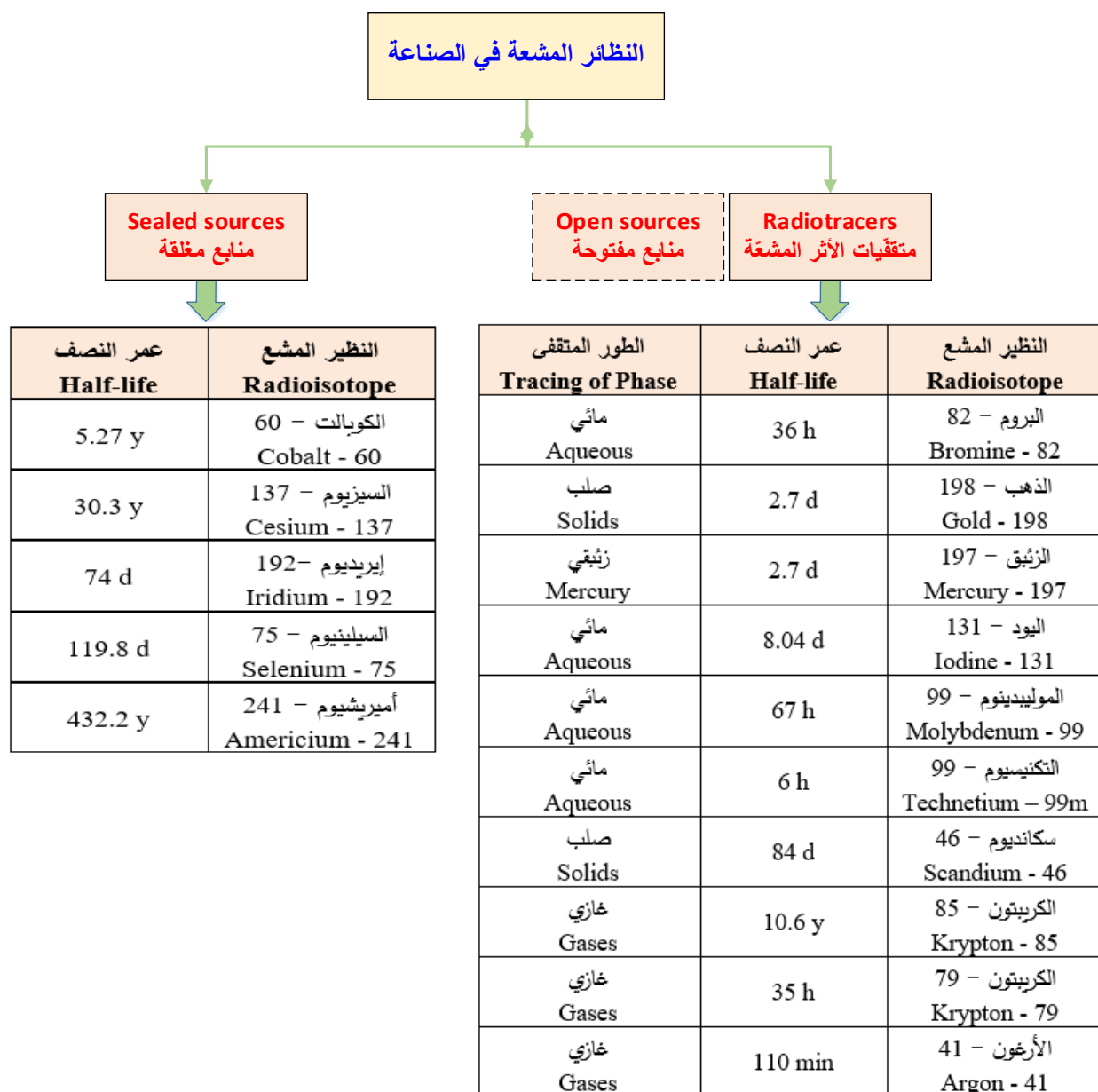
الشكل 2. طرائق إنتاج النظائر المشعة.

تنقسم تقنيات الإشعاع المستخدمة في كشف مشاكل العمليات الصناعية وتحديدها وأبراج التقطير والأنابيب إلى فئتين:

● تقنيات المصادر المشعة المغلقة sealed radioactive source [7].

● تقنيات المصادر المشعة المفتوحة (متتقيات الأثر المشعة) open radioactive source (radiotracer) [8].

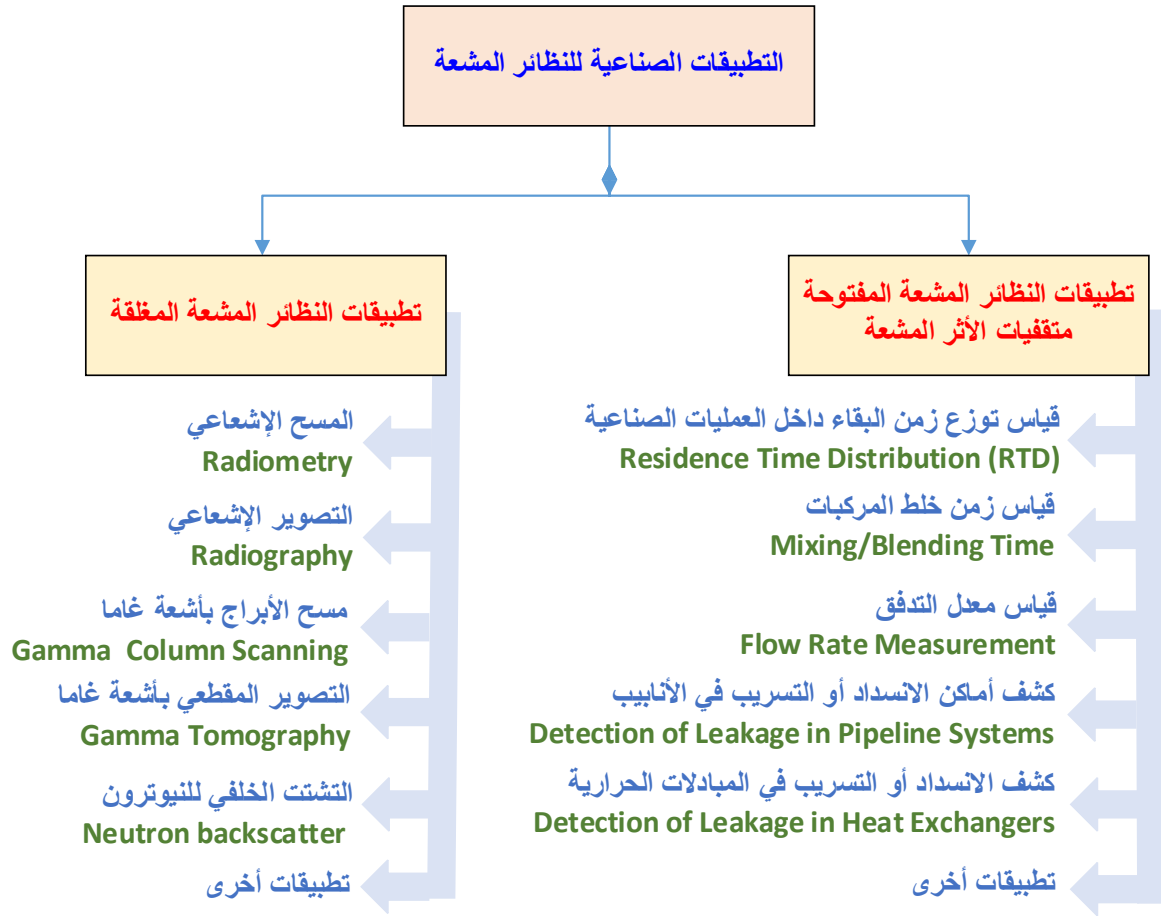
يوضح الشكل 3 أهم النظائر المشعة المستخدمة في تقنيات المصادر المشعة المغلقة والمفتوحة. من الجدير بالذكر، أنه بالرغم من المميزات الكثيرة لاستخدام الإشعاع في التطبيقات الصناعية، فإنه يتطلب تطبيق برنامج وقاية إشعاعية يتضمن إجراءات ومستلزمات وقاية العاملين وعموم الناس، إضافة إلى إجراءات خاصة في حالات الطوارئ.



الشكل 3. أكثر النظائر المشعة استعمالاً في الصناعة.

لقد أستخدمت التطبيقات الصناعية للنظائر المشعة على نطاق واسع كأداة تشخيص فريدة من نوعها للغايات التالية: تحديد الأعطال في العمليات الصناعية دون الحاجة إلى إيقاف التشغيل، أمثلة أداء العمليات الصناعية وتحسينها، تحسين جودة المنتج. لقد تراكمت خبرات واسعة عالمياً في التطبيق الآمن لتقنيات المصادر المشعة المغلقة والمفتوحة، وهناك العديد من التطبيقات التي تم توطئتها في الدول الأعضاء والتي تقدم خدمات روتينية لصناعاتها المحلية (الشكل 4).

- تشمل المتطلبات اللازمة لتطبيق تقنيات النظائر المشعة في الصناعة مايلي:
- الكوادر البشرية: المدير التنفيذي، مهندسي التشغيل، فنيين ومسؤول الوقاية الإشعاعية.
- التراخيص: رخص للكوادر البشرية، رخص للمواد المشعة ورخص للأماكن.
- الأجهزة والمعدات: نظام تحصيل البيانات، كواشف مع كبلات الإشارة، حاسب محمول، مجراع الجيب، مقياس المسح الإشعاعي، أنظمة الحقن، أدوات أمان مثل القفازات والسترات الواقية.
- البرمجيات: برامج تحصيل البيانات وبرامج معالجة البيانات.



الشكل 4. التطبيقات الصناعية للنظائر المشعة المفتوحة والمغلقة.

متتقيات الأثر المشعة radiotracers

المتتقيات هي مواد ذات خصائص ذرية أو نووية أو فيزيائية أو كيميائية أو بيولوجية، يمكن أن تساعد في تحديد أو مراقبة أو متابعة سلوكيات مختلف العمليات الفيزيائية أو الكيميائية أو البيولوجية. والمتتقيات الإشعاعية هي مركبات كيميائية تتم الاستعاضة عن ذرة أو أكثر منها بنظير مشع [8]. يمكن استخدام المتتقيات الإشعاعية في استكشاف آلية التفاعلات الكيميائية وذلك برصد الاضمحلال الإشعاعي radioactive decay لتلك المتتقيات. إن المواد المشعة الأكثر استخداماً لاختبار المتتقيات الإشعاعية في التطبيقات الصناعية هي باعثة أشعة غاما gamma emitter. يوضح الشكل 3 أشهر المتتقيات الإشعاعية حسب الطور: الطور المائي، الطور الغازي، الطور الصلب والطور الزئبقي [3].

تؤدي تقنية متتقيات الأثر المشعة دوراً مهماً في تحديد عيوب المنشآت والمحطات الصناعية مثل المناطق الراكدة/stagnant\dead الميته، والتوجيه channelling، والتسربات leakages... إلخ [9]. سيؤدي استكشاف الأعطال وتحديد أوجه القصور في مصانع المعالجة ومصانع المواد الكيميائية وفي صناعات النفط والغاز ومحطات معالجة مياه الصرف الصحي ومصانع المعادن إلى إغلاق المصنع، وبالتالي

زيادة التكاليف التشغيلية للمصانع المعنية. 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 تقنية متقنيات الأثر المشعة في الصناعة من أجل:

■ كشف التسرب وتحديد: من خطوط الأنابيب المدفونة تحت الأرض؛ المبادلات الحرارية في مصنع البتروكيماويات؛ مبادل حراري في مصفاة البترول؛ برج الطحن في مصنع الأسمدة...إلخ.

■ قياس معدل التدفق: قياس معدل التدفق لطور واحد في أنابيب النقل؛ قياس متعدد الأطوار (النفط الخام والمياه والغاز) في خط أنابيب...إلخ.

■ قياس كفاءة وجودة الخلط: خلط المركبات في مصانع المعالجة.

لابد من تلبية العديد من متطلبات قبل تنفيذ الاستقصاء بالاستعانة بمتقنيات الأثر المشعة. هذه المتطلبات متضمنة في الخطوات اللازمة لتنفيذ التطبيقات الصناعية للنظائر المشعة التالية:

1- زيارة الموقع وتقييم الموقف: وتشمل مناقشات مع مهندسي التشغيل حول العملية والمشاكل الموجودة فيها؛ فهم سير العملية الصناعية وحجمها والعوامل البيئية والفيزيائية المحيطة بها؛ تحديد أماكن الحقن إن وجدت وتحديد مكان تثبيت الكواشف والأجهزة؛ قياس مستوى الإشعاع الطبيعي بالموقع.

2- اختيار النظير المشع المناسب: وتشمل العوامل المهمة في اختيار المتقنيات الإشعاعية على نوع و طاقة الإشعاع المنبعث؛ عمر النصف للمتقنيات؛ التوافق الفيزيائي/الكيميائي مع المواد التي يُراد اقتفاؤها (الاستقرار الفيزيائي والكيميائي)؛ مُعلمات العملية (درجة الحرارة، الضغط، الحجم، متوسط زمن الإقامة المتوقع)؛ السمية الإشعاعية الكيميائية؛ سهولة الإنتاج وتكلفته؛ طريقة القياس (أخذ العينات أو القياس في الموقع) وغيرها. يصعب في العادة تلبية جميع متطلبات مقتني مثالي ما، ولابد من التنازل عن بعضها، وحتى في حال تلبية مقتني إشعاعي لجميع المعايير المطلوبة، فقد لا يتوافر لدى البلدان النامية.

3- تحديد الشدة الإشعاعية التي سيتم استخدامها: تُعد كمية المادة المطلوبة الخطوة المهمة التالية بعد اختيار المادة المشعة المناسبة لتطبيق معين. تُحدد حساسية القياس، والدقة المطلوبة، وتشتت المادة، وكثافة الإشعاع الخلفي، الحد الأدنى لكمية المادة القابلة للاستخدام. ويُحدد الحد الأقصى بناءً على اعتبارات السلامة الإشعاعية. من الناحية المثالية، ينبغي استخدام أقل كمية ممكنة من المواد المشعة، بما يتوافق مع تحقيق أهداف القياس.

4- إنتاج المادة المشعة أو تحضيرها: يُنصح باستخدام مولدات النظائر المشعة الأساسية الثلاثة المبينة في الشكل 2، خصوصاً للممارسين في الدول النامية الذين قد لا تتوفر لديهم مرافق أخرى لإنتاج النظائر المشعة.

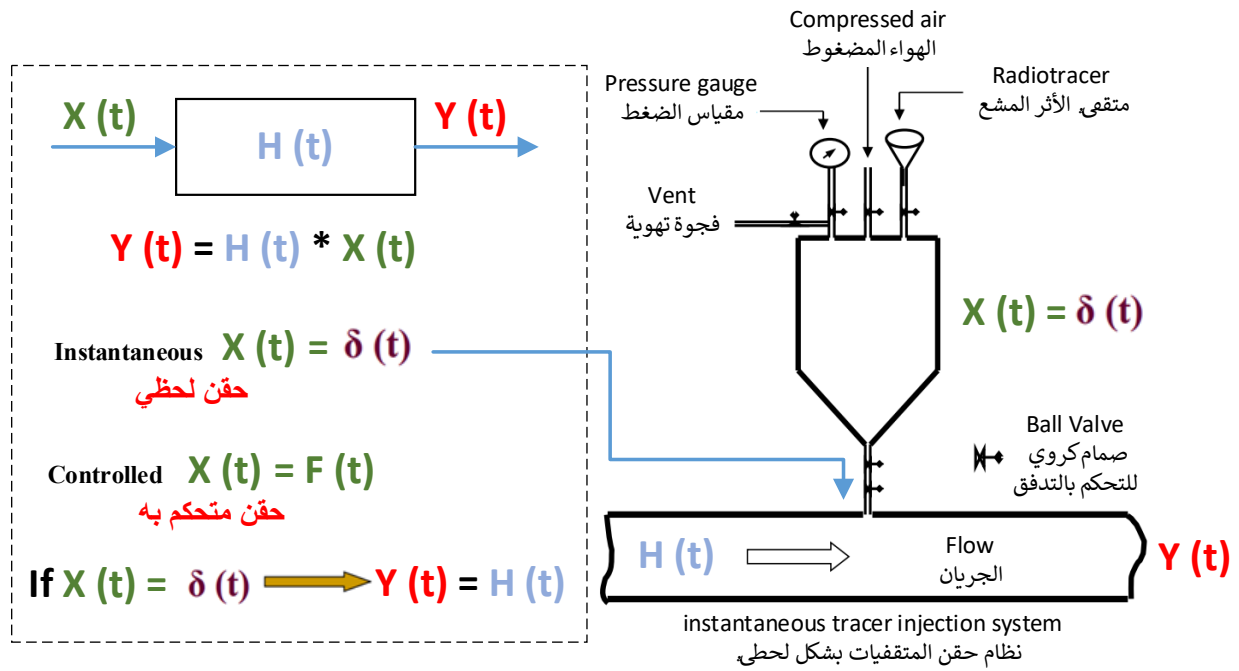
5- نقل المادة المشعة والأجهزة إلى الموقع: يجب مراعاة حدود السوية الإشعاعية على سطح الطرود وحساب دليل النقل.

6- حقن المادة المشعة أو تثبيتها: من حيث الجوهر، يجب أن يكون للمتقنيات سلوك مماثل لسلوك التدفق الكلي. وهذا يؤكد على أهمية طريقة حقن المتقنيات في النظام وأهمية الاختلاط بالتدفق الكلي (الشكل 5). والطريقة الشائعة للحقن هي الحقن النبضي pulse type injection، ويتم استخدام الحقن اللحظي dirac's delta function في الغالب في تجربة المتقنيات الإشعاعية بسبب البساطة والتكلفة الأقل والمعلومات الكثيرة. كما يجب أن يكون خلط المادة المشعة مع المادة المراد اقتفاؤها بعملية فيزيائية.

7- كشف المادة لإشعاعية ومراقبتها (تحصيل البيانات): وذلك باستخدام كواشف وميضية تثبت في أماكن معينة وترتبط بنظام تحصيل البيانات DAS. سوف يتم توضيح هذه الخطوة في الفقرات اللاحقة.

8- معالجة البيانات وتحليلها: تعد معالجة البيانات عملية مرهقة وتستغرق وقتاً طويلاً، وبالتالي هناك حاجة إلى تطوير برمجيات ذكية لتحليل بيانات الكواشف الإشعاعية لتسريع عملية التحليل.

9- المسح الإشعاعي للمكان وتقديم التقرير.



الشكل 5. حقن المادة المشعة في نظام الجريان.

كشف التسرب بقياس توزيع زمن البقاء RTD

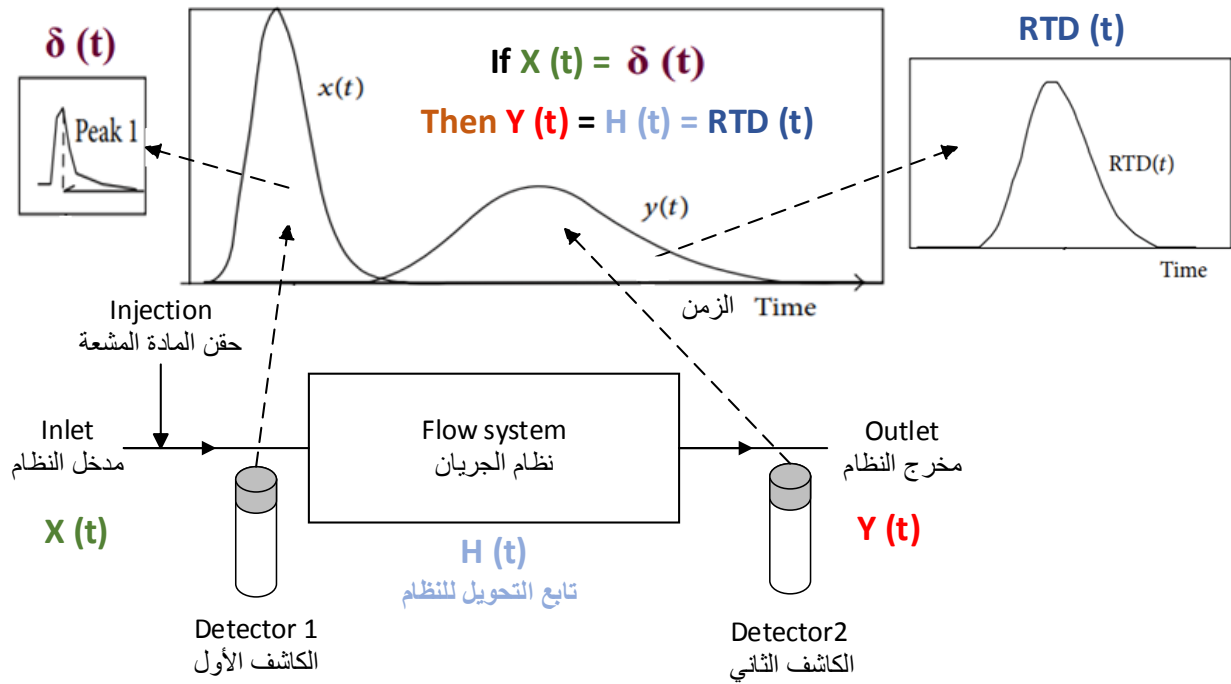
يمكن أن تكشف التسربات في المنشآت وفي خطوط الأنابيب من خلال معرفة الفترة الزمنية التي يستغرقها قفاء الأثر ليظهر على الكاشف. على الرغم من أن تقنية توزيع زمن البقاء (RTD) residence time distribution قابلة للتطبيق في نطاق صناعي واسع، إلا أن صناعات البترول والبتروكيماويات، وقطاعات معالجة المعادن، ومعالجة مياه الصرف الصحي تعدّ المستفيد الأنسب؛ هذه الصناعات منتشرة عالمياً ولها أهمية اقتصادية وبيئية كبيرة.

تقوم تقنية كشف التسربات باستخدام قفاء الأثر المشع على قياس توزيع زمن البقاء RTD [10]. عندما تكون مدة دفقة قفاء الأثر الداخلة إلى النظام قصيرة جداً (بضع ثوان) فيعرف منحنى الاستجابة الناتج من كاشف المخرج بأنه منحنى توزيع زمن البقاء RTD. يظهر الشكل 6 الوضع التجريبي لهذه التقنية: تحقق دفقة صغيرة من عنصر أثر مشع مناسب في تيار العمل وتراقب حركته عبر النظام بكواشف أشعة مثبتة خارجياً [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.

RTD أو $E(t)$ هي دالة توزيع احتمالي تصف مقدار الوقت الذي يقضيه عنصر سائل داخل مفاعل (نظام). إذا تم حقن دفقة من قفاء مشع عند مدخل نظام في الزمن t يساوي 0، وقيس تركيزها كدالة للزمن عند المخرج، 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).



الشكل 6. نموذج فورمان لقياس توزيع زمن البقاء RTD.

يمثل متوسط زمن الإقامة (MRT) mean residence time متوسط الوقت الذي تقضيه الجسيمات في النظام ويتم حسابه عددياً. يمكن كتابة التعبير الرياضي للحظة الأولى والذي يمثل متوسط زمن الإقامة في صورة منفصلة على النحو التالي:

$$\bar{t} = M_{i=1} = \frac{\int_0^{\infty} t C_i(t) dt}{\int_0^{\infty} C_i(t) dt} = \frac{\sum_i t_i C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i}. \quad (2)$$

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

$$MRT = M_{1outlet} - M_{1inlet} \quad (3)$$

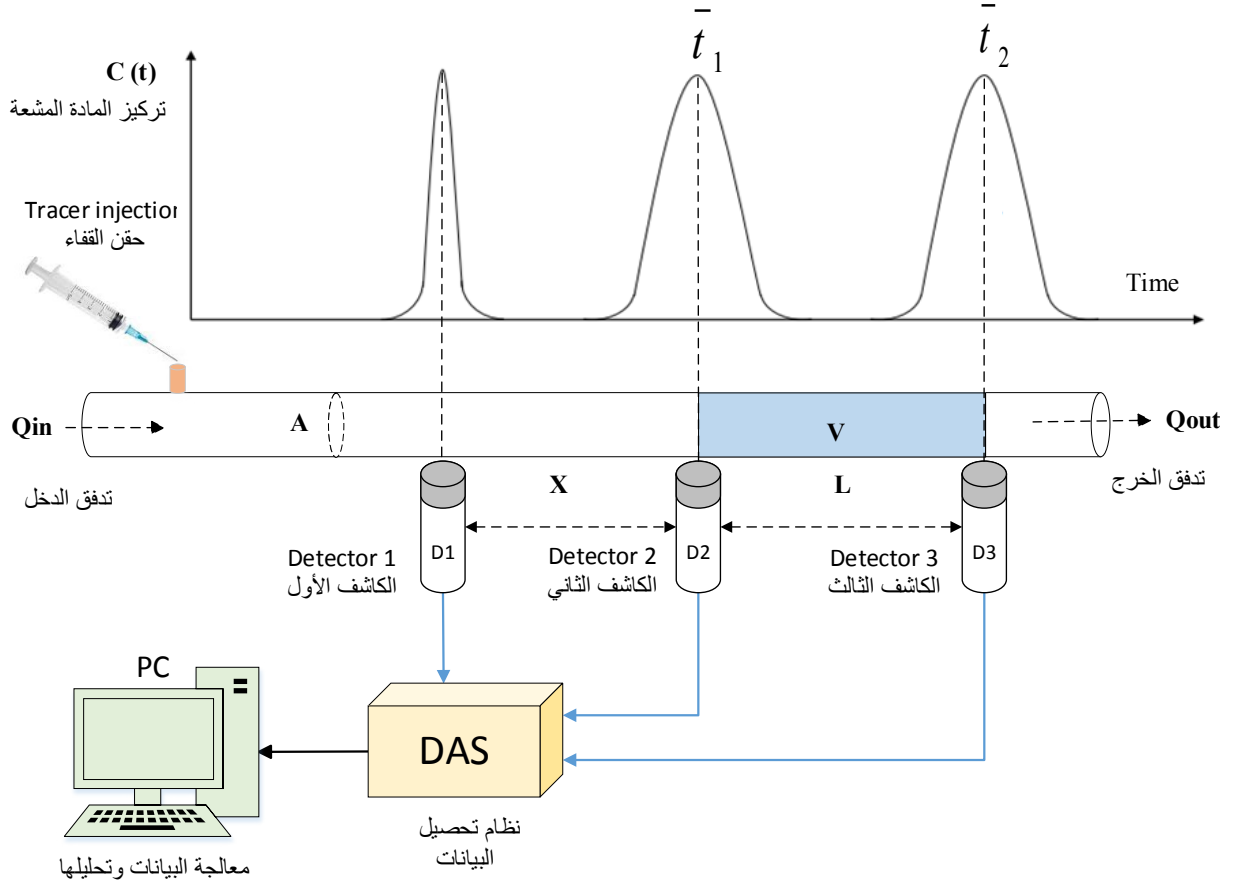
حيث M_{1inlet} - اللحظة الأولى لمنحني الاستجابة عند المدخل، و $M_{1outlet}$ - اللحظة الأولى لمنحني الاستجابة عند المخرج.

تجب معالجة بيانات القفاء المشع لإزالة أي تشويش والحصول على التمثيل الإشعاعي الفعلي. تستخدم لتطوير معالجة بيانات القفاء المشع وتحليلها تطبيقات مثل LabView وMathlab. تتضمن المعالجة سلسلة من الخطوات المتعلقة بمعالجة الإشارة الرقمية، ومنها: تصحيح الخلفية background correction، وتصحيح الاضمحلال الإشعاعي radioactive decay correction، وتصحيح نقطة البداية starting point correction، والتصفية filtering، واستقراء البيانات extrapolation. يعد منحني RTD أحد المعلمات المهمة التي يمكن أن توفر معلومات كثيرة حول الخصائص أو الديناميكا المائية للنظام قيد الدراسة. يجب أن تحلل هذه المعلومات بدقة، لذلك قامت الوكالة الدولية للطاقة الذرية بتطوير ستة نماذج رياضية لتحليل منحنيات RTD التي تم الحصول عليها تجريبياً.

يكشف التسرب عن طريق كشف قمة إضافية سابقة للقمة الأساسية. تمثل القمة الأساسية الجريان النموذجي للسائل عبر كامل النظام، في حين تمثل القمة الإضافية المميزة للتسرب وجود اتجاه تدفق ناتج عن خلل في اتجاه الجريان الطبيعي، وتظهر هذه القمة أمام الكاشف قبل القمة الأساسية. يحسب معدل التسرب كنسبة بين مساحتي هاتين القمتين: الإضافية والأساسية. يُحقق طول الخط المطلوب لتجانس المادة المشعة مع السائل المراد اقتفاؤه عند نقطة تساوي 100 ضعف للقطر الخارجي للأنبوب من نقطة الحقن. ويتم حقن المادة المشعة في السائل ذي الضغط الأعلى في المبادلات الحرارية وذلك لقياس تسرب السوائل.

قياس معدل التدفق

تُعد المعرفة التفصيلية بمعدلات التدفق في مختلف مكونات أي مصنع أمراً ضرورياً لتشغيله بأقصى كفاءة. تُستخدم المواد المشعة على نطاق واسع لقياس معدلات تدفق السوائل والغازات والمواد الصلبة في أنظمة العمليات الصناعية. إن المعرفة بمعدلات التدفق مطلوبة لعدة أغراض؛ منها: معايرة عدادات التدفق المثبتة؛ قياس معدل التدفق في الأنظمة التي لا تحتوي على عدادات تدفق مثبتة؛ قياس توزيع التدفق في الشبكة؛ توفير بيانات استهلاك الطاقة في جميع أنحاء المحطة؛ الكشف عن التسريبات وتحديد كميتها؛ قياس كفاءة المضخات والتوربينات؛ إضافة لتشخيص الأعطال في تشغيل المحطة لأغراض التحكم البيئي. يوضح الشكل 7 مخططاً صندوقياً لقياس معدل التدفق في خط الأنابيب. القفاء الإشعاعي الذي يمكن استخدامه لمثل هذه التطبيقات هو التكنيشيوم ^{99m}Tc [12].



الشكل 7. مخطط صندوقي لقياس معدل التدفق.

يحسب معدل التدفق باستخدام متقنيات الأثر المشعة وفقاً للعلاقة التالية:

$$\text{Flow Rate} = Q = \frac{\text{Volume}}{\text{MRT}} = \frac{A * L}{\bar{t}} = \text{Flow Area} * \text{Velocity} \quad (4)$$

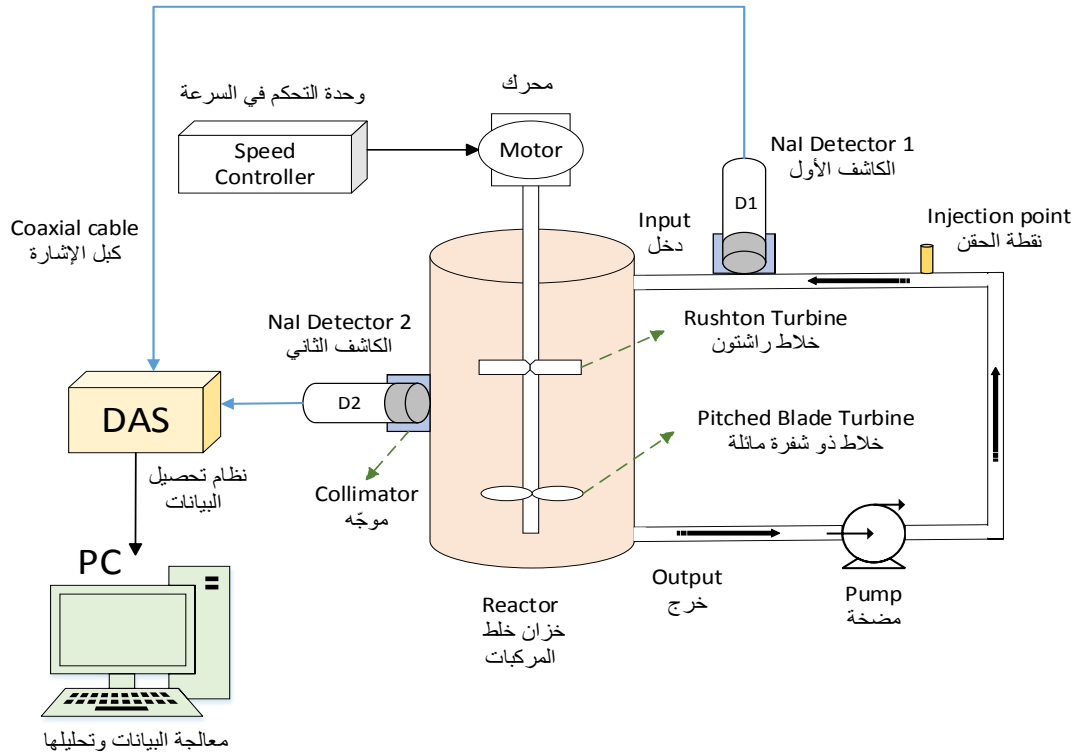
حيث: A - مساحة المقطع العرضي لخط الأنابيب؛ L - المسافة بين الكاشفين D_2 و D_3 ؛ MRT - متوسط زمن الإقامة. يحسب متوسط زمن الإقامة الإجمالي من العلاقة التالية:

$$\text{MRT} = \bar{t} = \bar{t}_2 - \bar{t}_1 \quad (5)$$

حيث: $\bar{t}_2$ - متوسط زمن الإقامة من الكاشف D_3 ؛ $\bar{t}_1$ - متوسط زمن الإقامة من الكاشف D_2 .

تقياس كفاءة الخلط وجودته

تُستخدم عمليات الخلط على نطاق واسع في العديد من التطبيقات الصناعية، بما في ذلك تجانس السوائل المعقدة للزجة لخلط البوليميرات والدهانات وبلمرة المحاليل وغيرها. تُعد كفاءة عملية الخلط وتحسينها من المعايير الرئيسية التي يجب تناولها لتحقيق أعلى جودة للمنتج وأقل تكاليف للإنتاج. يتم استخدام تقنية متقفيات الأثر المشع لقياس كفاءة الخلط (المزج) وجودته في مصانع المعالجة. ولقد أثبتت اختبارات المتقفيات الإشعاعي فعاليتها في أمثلة معايير التشغيل الرئيسية (معدل التغذية، عدد الخلطات، زاوية الشفرات، سرعة الخلط) لزيادة كفاءة عملية الخلط والحصول على ظروف التشغيل المثلى [13]. يوضح الشكل 8 مخططاً صندوقياً لقياس كفاءة عملية الخلط وجودتها.

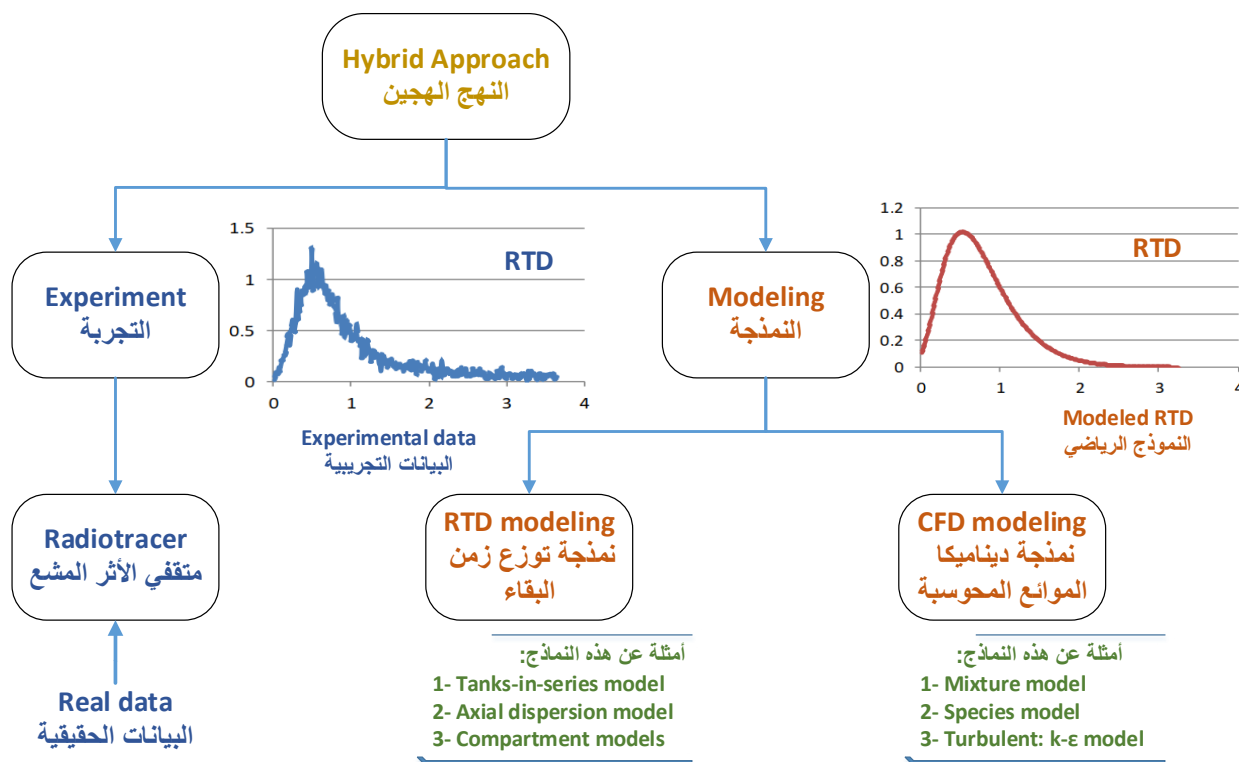


الشكل 8. مخطط صندوقي لقياس كفاءة الخلط وجودته.

المتقفيات الإشعاعية وديناميكا الموائع المحوسبة CFD

تساهم معرفة أفضل بتدفق الموائع التي تمر عبر الأنابيب وخطوط النقل في الحصول على معلومات حول العمليات الداخلية والتعديلات الميكانيكية للكتل البنوية المكونة للنظام، مما يؤدي إلى تحسين أدائها. لقد أصبحت نمذجة ديناميكا الموائع المحوسبة computational fluid dynamics (CFD) أداة شائعة لإدارة النظم الطبيعية، وتستخدم بشكل متزايد لدراسة مصير الجسيمات والملوثات وسلوكها. تستخدم ديناميكا الموائع المحوسبة الطرائق العددية والخوارزميات لحل المسائل التي تتضمن سريان الموائع، وتحليل نتائج المحاكاة. إن ما يتم الوصول إليه ليس سوى حلول تقريبية، وينصبّ البحث حالياً على زيادة سرعة الحسابات وزيادة دقة الطول العددية مقارنة بالنتائج التجريبية. في حين تُستخدم تقنيات المتقفيات الإشعاعية للتحقق من صحة النماذج الهيدروديناميكية، وذلك لتعزيز الثقة في قيمتها التنبؤية.

لا يحل CFD محل التجارب بشكل كامل ولكنها تساعد في إعطاء نظرة تفصيلية للنموذج بما في ذلك إمكانيات تصوّر العملية أو التدفق ضمنه، حيث لا تتوفر البيانات التجريبية بسهولة. تستند بيانات المتقفيات الإشعاعية إلى الملاحظة المباشرة، ولكنها تقتصر على معلومات معينة من النظام وعلى نطاق محدود من المكان والزمان. يمكن للنماذج العددية نظرياً استيعاب جميع المعلومات المهمة، ولكنها محدودة بافتراضاتها الأساسية وقدرتها الحاسوبية المتاحة. لكل من النهجين حدوده، لكنهما معاً يُقدّمان طريقة فعّالة للغاية لدراسة النظم المعقدة. أصبح من الواضح، على مدار السنوات القليلة الماضية، أن النمذجة التآزرية ونهج التقفي الإشعاعي يُمكنهما تقديم مساهمة كبيرة في معالجة المشكلات المعقدة في النظم الطبيعية (الشكل 9).



الشكل 9. النهج الهجين لمتتقيات الأثر المشعة والنمذجة العددية.

نظراً للقبول الضعيف في منطقة آسيا لاستخدام متتقيات الأثر المشعة في الصناعة، يمكن استخدام محاكاة ديناميكا الموائع المحوسبة كأداة لتصوير العمليات في الصناعات المعنية. إن تطبيق محاكاة ديناميكيات الموائع المحوسبة سيوفر لأصحاب المصانع صورا وأفكاراً حول سلوك الديناميكا المائية لمنشآتهم الغامضة. إلى جانب ذلك، يمكن استخدام نتائج توزيع زمن البقاء RTD من تقنيات ديناميكا الموائع المحوسبة CFD وتقنيات المتتقي الإشعاعي كأدوات قيمة لتوصيف المنشآت (المحطات) الصناعية.

سيولد هجين تكنولوجيا ديناميكا الموائع المحوسبة ومتتقيات الأثر المشعة تآزراً جيداً من قبل الصناعات، وبالتالي يمكن التقليل من الشكوك والمخاوف المتعلقة بالسلامة بشأن إدخال تقنيات متتقيات الأثر المشعة بين أصحاب المصانع. ختاماً، تعد محاكاة ديناميات الموائع المحوسبة أداة ضرورية لتفسير بيانات المتتقيات الإشعاعية والتحقق من صحة نموذج النظام، وهي ليست مجرد ظاهرة تنبؤية، بل يمكن استخدامها أيضاً كمدقق لتجارب القفاءات الإشعاعية [14].

مسح الأعمدة بأشعة غاما

تُستخدم طريقة مسح الأعمدة وأبراج التقطير بأشعة غاما على نطاق واسع في مصانع البتروكيماويات والعمليات الكيميائية لأغراض استكشاف الأعطال وإصلاحها. يوفر مسح أشعة غاما مؤشراً على حالة التشغيل داخل أعمدة وخزانات المعالجة. لقد أثبتت هذه الطريقة كفاءة عالية لتحديد مشاكل المصانع والعمليات أثناء تشغيل العملية دون انقطاع، مما يُحقق وفورات اقتصادية كبيرة. تستخدم طريقة المسح بأشعة غاما مبدأ نقل أشعة غاما وامتصاصها عند مرورها عبر الأجسام. عند مرور أشعة غاما عبر وسط ما، فإن شدة الإشعاع المنقول ترتبط بطول مساره وكثافة المادة التي يمر من خلالها. يمكن وصف انتقال حزمة من فوتونات أشعة غاما وحيدة الطاقة عبر وسط امتصاص على النحو التالي:

$$I_x = I_0 e^{-\mu P x} \quad (6)$$

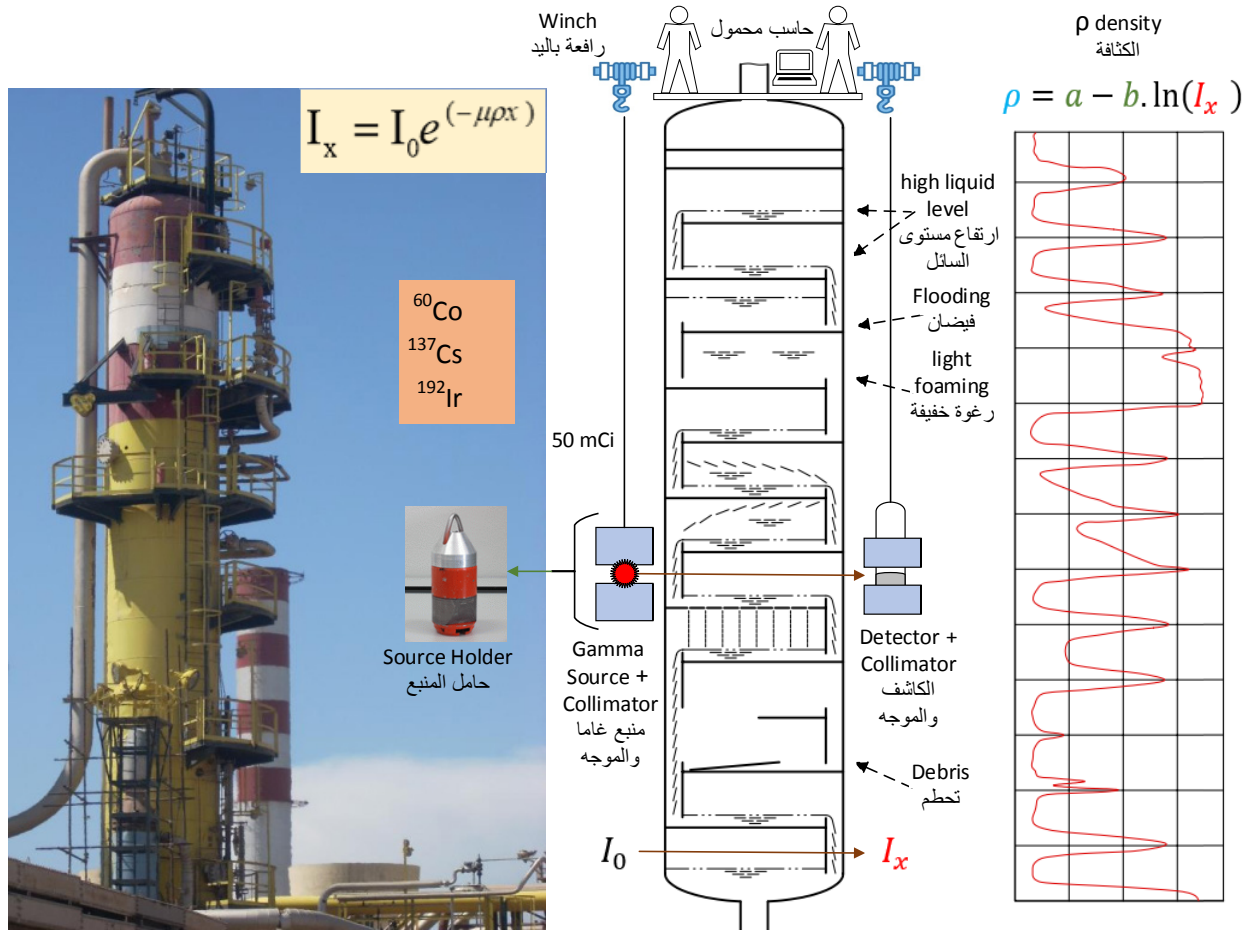
حيث: I_x - شدة الأشعة النافذة عبر المادة بين المصدر المشع المغلق والكاشف الوميضي (متغير): I_0 - شدة الإشعاع الساقط دون وجود وسط لامتصاص الإشعاع بين المصدر المشع المختوم والكاشف الوميضي (ثابت): μ - معامل الامتصاص للمادة قيد الدراسة (ثابت): P - كثافة المادة الماصة بين المصدر والكاشف الوميضي (متغير): x - سمك المادة التي يمر عبرها الإشعاع (ثابت).

يُظهر التعبير 6 أن شدة الإشعاع التي يقيسها الكاشف الوميضي تتناسب عكسياً مع كثافة المادة الماصة P . يمكن إعادة صياغة العلاقة

6 بحيث يظهر الكثافة كتابع لشدة الأشعة النافذة كمايلي:

$$\rho = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I_x}\right)}{\mu x} = \frac{\ln(I_0)}{\mu x} - \frac{\ln(I_x)}{\mu x} = a - b \cdot \ln(I_x) \quad (7)$$

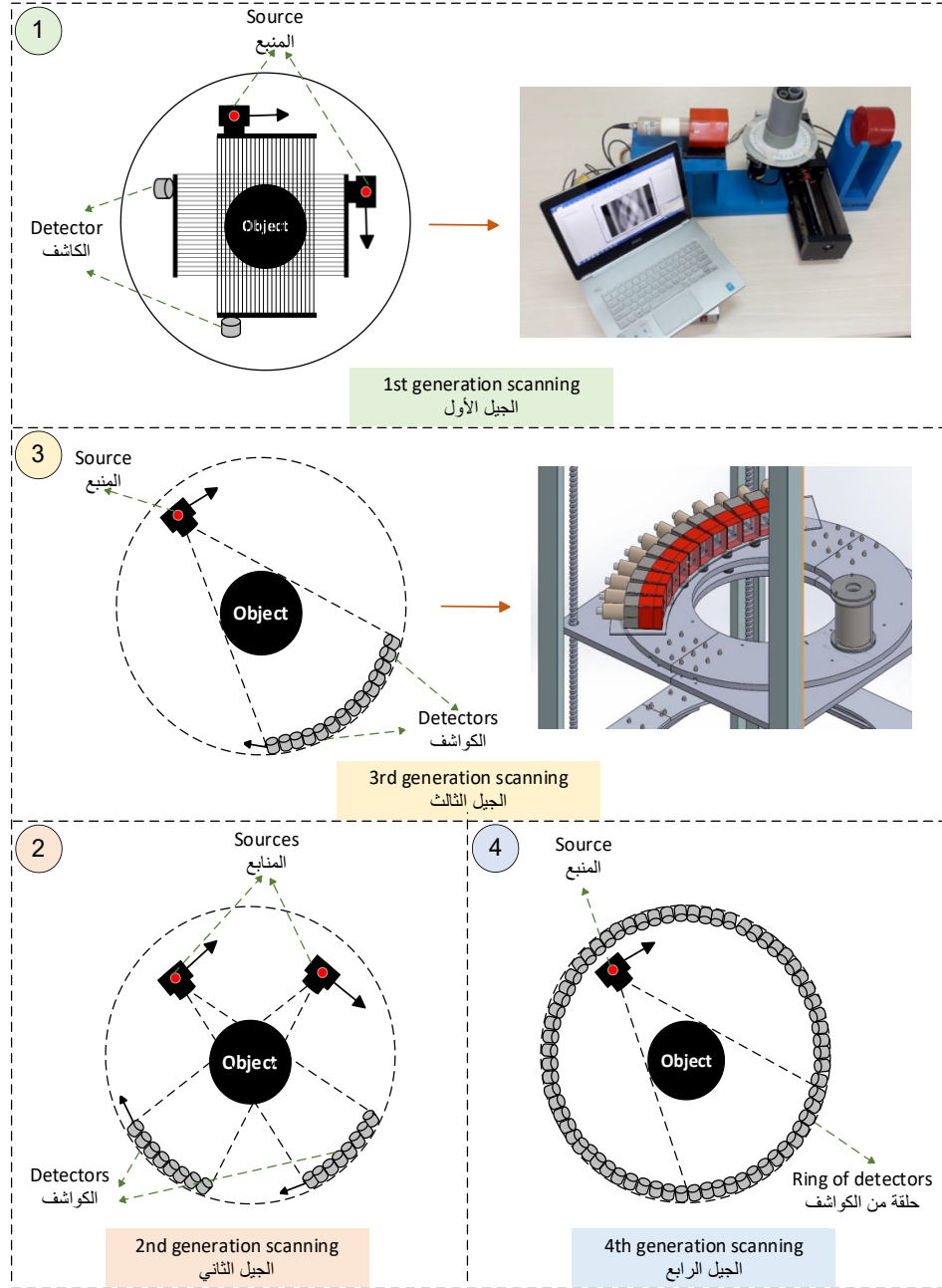
يبين الشكل 10 طريقة مسح أبراج التقطير في مصافي النفط بأشعة غاما [15]. يوضع منبع غاما مناسب وكاشف وميزي على الارتفاع نفسه، وذلك على السطح الخارجي لبرج التقطير. تؤخذ قياسات شدة الإشعاع في مواقع مناسبة أثناء تحريك المنبع والكاشف معاً على طول البرج. تُعرض البيانات الناتجة في مخططات بيانية شدة الإشعاع أو كثافة المادة. يُمكن التحليل التفصيلي لهذه البيانات من إجراء تقييمات لحالة الهياكل الداخلية ومواد العملية داخل البرج.



الشكل 10. مسح أبراج التقطير في مصافي النفط بأشعة غاما.

التصوير المقطعي المحوسب بأشعة غاما

يُعد التصوير المقطعي المحوسب بأشعة غاما gamma computed tomography مُكملاً لتقنيات متقنيات الأثر المشعة ومصادر غاما المغلقة والمستخدم على نطاق واسع في تحليل وحدات العمليات الصناعية. تمثل أبراج التقطير والرافعات ووحدات المعالجة متعددة الأطوار أكثر وحدات العمليات الصناعية الملائمة لتطبيق هذه التقنية. يرتبط تصميم أجهزة المسح (منصات التصوير) بجيل التصوير المقطعي المحوسب [16، 17]. يشير مصطلح جيل التصوير المقطعي المحوسب إلى الترتيب الهندسي لمجموعة الكواشف ومصدر الإشعاع والطريقة المعتمدة لتحصيل البيانات لعدد الإسقاطات المطلوب. يتضمن ذلك من حيث المبدأ على تدوير ترتيب ثنائية كاشف-منبع بشكل متزامن بالنسبة للجسم قيد الدراسة (الشكل 11).



الشكل 11. أجيال التصوير المقطعي المحوسب بأشعة غاما.

التوصيات

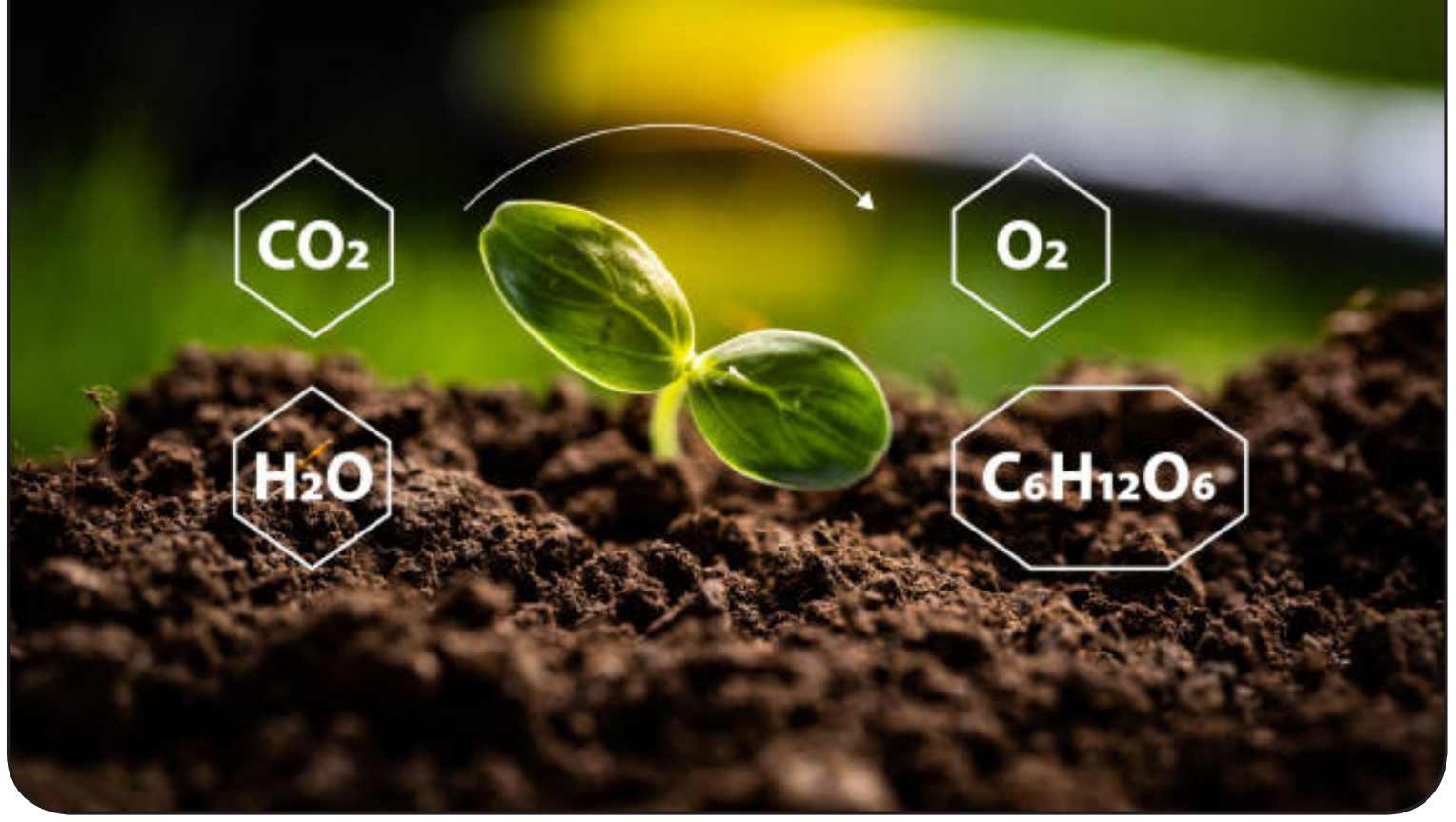
ختاماً، وفي ظل الخطوات المتسارعة التي تنتهجها الدول النامية في مجال تطبيق التقنيات النووية للإتلافية في الصناعة يمكننا أن نوصي بما يلي:

- العمل على توطین طرائق الاختبارات اللاتلافية النوعية والسعي إلى تطبيقها في قطاع الصناعة في سورية.
- ضرورة دعم اللجنة الوطنية للاختبارات اللاتلافية لاستخدام النظائر المشعة في كشف وتحديد مشكلات الأنظمة الصناعية.
- الاستمرار في تنمية وصقل الكفاءات الشابة في مجال الاختبارات اللاتلافية، باعتبارها العنصر الفعّال في دفع عجلة التطور والتقدم الصناعي.
- العمل على استقطاب الكفاءات العلمية في مجال المعلوماتية وعلوم الحاسب من أجل تطوير البرمجيات اللازمة لمعالجة البيانات وتحليلها واستخدام الذكاء الصناعي في مجال الاختبارات اللاتلافية.

المراجع

- [1] د. وفيق حرارة، «الاختبارات اللاإتلافية في الصناعة»، قسم الخدمات العلمية – هيئة الطاقة الذرية السورية، 2015.
- [2] د. وفيق حرارة، «الاختبارات اللاإتلافية: طريقة التصوير الشعاعي الصناعي»، قسم الخدمات العلمية – هيئة الطاقة الذرية السورية.
- [3] د. وفيق حرارة، م. محمد أفغاني، «كشف التسريبات بمتقنيات الأثر المشعة»، قسم الخدمات العلمية – هيئة الطاقة الذرية السورية، 2009.
- [4] <https://www.iaea.org/topics/industrial-radiography>
- [5] <https://www.iaea.org/topics/other-non-destructive-testing>
- [6] <https://www.iaea.org/topics/radiotracers>
- [7] IAEA-TECDOC-1925, Industrial Applications of Sealed Radioactive Sources, 2020.
- [8] IAEA Technical Reports Series No. 423, Radiotracer Applications in Industry: A Guidebook, Vienna (2004).
- [9] PANT, H.J., Applications of the radiotracers in the industry: A review, Applied Radiation and Isotopes, Volume 182, April 2022.
- [10] IAEA TECDOC Series No.31, Radiotracer Residence Time Distribution Method for Industrial and Environmental Applications, Vienna (2008).
- [11] Stegowski, Z. and Furman, L. (2004). Radioisotope tracer investigation and modeling of copper concentrate dewatering process, Inter. J. Min. Proc. 73(1): 37-43.
- [12] Kasban, H., Zahran, O., Arafa, H. El-Kordy, M., Elaraby, S. M. S., and 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.
- [13] Othman N, Kamarudin SK, Takriff MS, Rosli MI, Engku Chik EM, Meor Adnan MA. Optimization of a continuous hybrid impeller mixer via computational fluid dynamics. ScientificWorldJournal. 2014; 2014:619474. doi: 10.1155/2014/619474.
- [14] Furman, L. and Stegowski, Z. (2011). CFD models of jet mixing and their validation by tracer experiments, Chem. Eng. Process. 50: 300-304.
- [15] ISO 23159:2020, Non-destructive testing — Gamma ray scanning method on process columns, Standards Publication.
- [16] IAEA-TECDOC-1589, Industrial Process Gamma Tomography, Final report of a coordinated research project 2003–2007, 2008.
- [17] Azmi, B. and Stefanus, M., Investigation of Multiphase Condition in Pipeline Using Gamma Computed Tomography, GANENDRA Maj. IPTEK Nukl., vol. 22, no. 2, p. 103, 2019, doi:10.17146/gnd.2019.22.2.5342.

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



التمييز النظيري للكربون في النباتات وأهميته الزراعية

ملخص

يُعدُّ تحديد قيم النظائر المستقرة للكربون ^{12}C و ^{13}C في النباتات وسيلة مهمة لفهم العوامل المؤثرة في نموها نظراً لحدوث تجزئة نظيرية لهما أثناء القيام بعملية التمثيل الضوئي والاصطناع الضوئي. تفضّل النباتات أثناء قيامها بعملية الاصطناع الضوئي تثبيت $^{12}\text{CO}_2$ على $^{13}\text{CO}_2$ حيث تغدو النسبة النظيرية للكربون ^{13}C إلى ^{12}C في الأنسجة النباتية أقل من النسبة الموجودة في الغلاف الجوي، وهذا يدل على مقدرة النبات على التمييز بين هذين النظيرين. وتؤكد البيانات عموماً إلى فعالية استعمال قيم التمييز النظيري للكربون $\Delta^{13}\text{C}$ كمؤشر انتقائي للحصول على طرز وراثية نباتية متحملة للإجهادات البيئية ذات كفاءة استعمال مرتفعة من الماء وأكثر إنتاجية.

الكلمات المفتاحية: التمييز النظيري للكربون $\Delta^{13}\text{C}$ ، الاصطناع الضوئي.

أهمية الاصطناع الضوئي

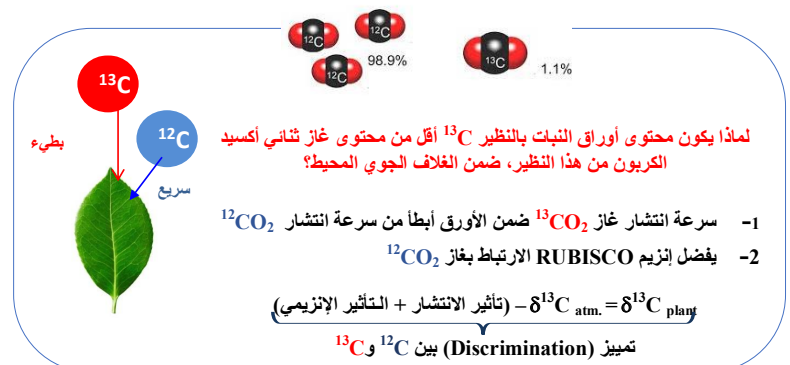
تعتمد الكائنات الحية لبناء أجسامها على عناصر طبيعية كالأكسجين والهيدروجين والكربون والفسفور والنيتروجين التي تمثل نقطة ارتباط بين مكونات النظم البيئية الحية وغير الحية. وتحصل الكائنات الحية على تلك العناصر بواسطة السلسلة الغذائية؛ إذ تقوم النباتات بامتصاصها من التربة أو المياه أو الهواء من خلال ما يُعرف بـ"الدورات البيوجيوكيميائية"، وتتعرض لعمليات كيميائية ثم تدخل أجسام الكائنات الحية مكونةً جسم الكائن الحي.

تعتمد الأرض على الاصطناع الضوئي photosynthesis كمصدر للغذاء والطاقة والأكسجين. تحدث عملية الاصطناع الضوئي في النباتات الخضراء والأعشاب البحرية والطحالب التي تستخدم الطاقة المكتسبة (الشمسية) من الضوء لتحويل غاز ثنائي أكسيد الكربون CO_2 (يشكل حوالي 0.04% من حجم من الغلاف الجوي) والماء H_2O إلى أكسجين O_2 . ويساعدها على امتصاص الضوء مادة اليخضور (الكلوروفيل) الموجودة في أوراق النباتات. وتتم هذه المعادلة في دورتين، تسمى الأولى تفاعلات الضوء وهي تفاعلات تعتمد على وجود الضوء حيث يستخدم فيها ضوء الشمس لتصنيع الأدينوزين ثلاثي الفوسفات ATP (الطاقة التي تستخدمها الخلية) وNADPH Nicotinamide Adenine Dinucleotide Phosphate التي تحمل الإلكترونات، وتدعى الثانية تفاعلات الظلام أو تفاعلات دورة كالفن، وهي تفاعلات تتم في الظلام لتشكيل مركبات ثلاثية الكربون، ولذلك تسمى ثلاثية المسار الكربوني C3 التي تحدث في أغلب الأنواع النباتية. وهناك دورة "هاتش سلاك" في عدد قليل من الأنواع النباتية حيث تدعى رباعية المسار الكربوني C4 لأن أول مركب يندمج فيه غاز CO_2 يتكون من أربع ذرات من الكربون، وما يحدث في الاصطناع الضوئي هو أن ثنائي أكسيد الكربون يدخل من خلال المسامات الموجودة في الأوراق ويتحد مع الماء والعناصر الغذائية الآتية من الجذور. وبمساعدة الطاقة الكيميائية التي تؤدي مادة اليخضور (الصانعات الخضراء) دوراً في تحويلها من مجرد طاقة ضوئية، يتم تحويل المواد المتحددة إلى أكسجين وسكر بسيطاً، ويتم إطلاق الأكسجين إلى الهواء عبر مسامات الأوراق. وبعد أن ينحل السكر في الماء الآتي من الجذور عبر الأوعية، يقوم الماء بتوزيعه على أجزاء النبات. وتستعمل نواتج البناء الضوئي في تصنيع مركبات عضوية أخرى تدخل في تكوين الأحماض النووية والدهنيات والبروتينات والهرمونات وغيرها، وتوفر بذلك الطعام لجميع الكائنات الحية. يتأثر معدل الاصطناع الضوئي بعوامل عديدة، سواء كانت داخلية تتعلق بالنبات أم/و خارجية تتعلق بالبيئة المحيطة. وتشمل العوامل الداخلية رئيسياً بنية الورقة وسُمك القشرة والبشرة وكثافة الأوبار على سطحها وتركيب النسيج المتوسط وموضع الجسيمات في الخلايا وحجم المسام وتوزعها. وتشمل العوامل الخارجية: الحرارة والضوء وشدته وتركيز ثنائي أكسيد الكربون والماء والعناصر المعدنية والارتفاع عن سطح البحر والإجهادات الحيوية واللاحيوية كالجفاف والملوحة وغيرهما.

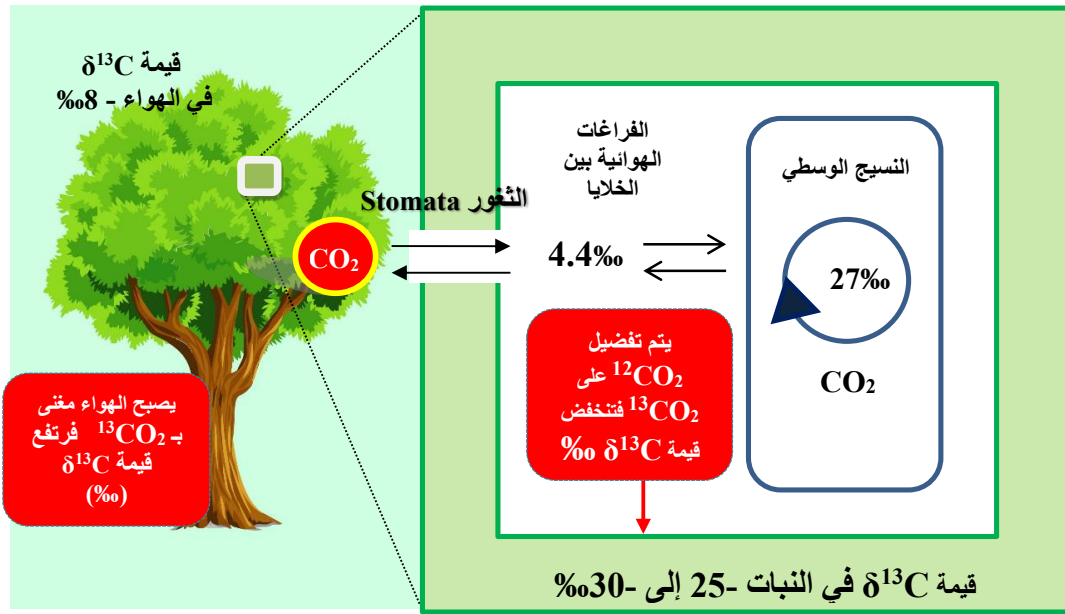
مآرات عملية الاصطناع الضوئي وتجزئة نظائر الكربون

يوجد للكربون نظيران مستقران متوافران طبيعياً هما ^{12}C و ^{13}C . يشكل نظير الكربون 12 (98.89%) من الكربون على الأرض، في حين يشكل الكربون 13 ما تبقى 1.11%. يتصف النظيران ^{12}C و ^{13}C بخصائص كيميائية وفيزيائية متشابهة إلى حد بعيد، ولكنهما لا يصلان إلى حد التطابق، وتحدث، نتيجة للفرق النسبي في الكتلة الذرية بينهما، تجزئة نظائرية لهما في الأملاح والمياه والغازات أثناء العمليات "البيو-جيو- كيميائية" المختلفة. وبقياس محتوى مادة ما من النظير ^{13}C يمكن معرفة مصدرها وتتبع مسارها والتفاعلات الكيميائية أو الحيوية التي مرت بها. يزداد تركيز ^{12}C في المواد الحيوية نتيجة التفاعلات الكيميائية الحيوية المنحازة ضد ^{13}C . تختلف نسبة هذين النظيرين تبعاً لاندماجهما في الأنظمة الحية والعمليات الحيوية والفيزيائية إضافة إلى التفاعلات الكيميائية، حيث يعبر عن هذا الاختلاف بالتجزئة النظيرية isotopic fractionation. تفضل النباتات أثناء قيامها بعملية الاصطناع الضوئي تثبيت $^{12}CO_2$ على $^{13}CO_2$ حيث تغدو النسبة النظيرية للكربون ^{13}C إلى ^{12}C في الأنسجة النباتية أقل من النسبة الموجودة في الغلاف الجوي، مما يدل على مقدرة النبات في التمييز discrimination بين النظيرين ^{12}C و ^{13}C والذي يعبر عنه بالوحدة $\Delta^{13}C\%$ (الشكل 1).

الشكل 1. التمييز النظيري الإنزيمي والتمييز النظيري بالانتشار.



تتم عملية الاصطناع الضوئي في مرحلتين؛ حيث يتم في المرحلة الأولى دخول ثنائي أكسيد الكربون عبر الثغور. وفي أثناء انتشاره يحدث تمييز بين نظائر الكربون الثقيلة وغير الثقيلة. ونظراً لأكبر حجم ذرة ^{13}C فإن سلوكها وانتشارها بطيء مقارنة مع ^{12}C ؛ لذلك فإن سرعة حركة وانتشار غاز ثنائي أكسيد الكربون المحتوي على $^{13}\text{CO}_2$ عبر الثغور التنفسية ليست بسرعة وحركية $^{12}\text{CO}_2$ نفسها، لذا فإن استعماله لن يكون بجاهزية النظير الخفيف ^{12}C ذي السرعة الأكبر في الحركة، وفي هذه الحالة يصبح الهواء المحيط بالنبات مغني بـ $^{13}\text{CO}_2$ ، في حين يكون الهواء الموجود داخل الورقة فقيراً بالنظير $^{13}\text{CO}_2$ (الشكل 2). يدعى هذا النوع من التمييز النظيري بالانتشار diffusion وتقدر قيمته بـ 4.4%. وتتمثل المرحلة الثانية بعملية الكرسلة carboxylation حيث يتم تثبيت ثنائي أكسيد الكربون وتشكل السكريات وفق مسارات عديدة تختلف عن بعضها باختلاف النوع النباتي، حيث جرى تصنيفها إلى ثلاث مجموعات وفقاً لمسار عملية الاصطناع الضوئي (C3 و C4 و CAM).

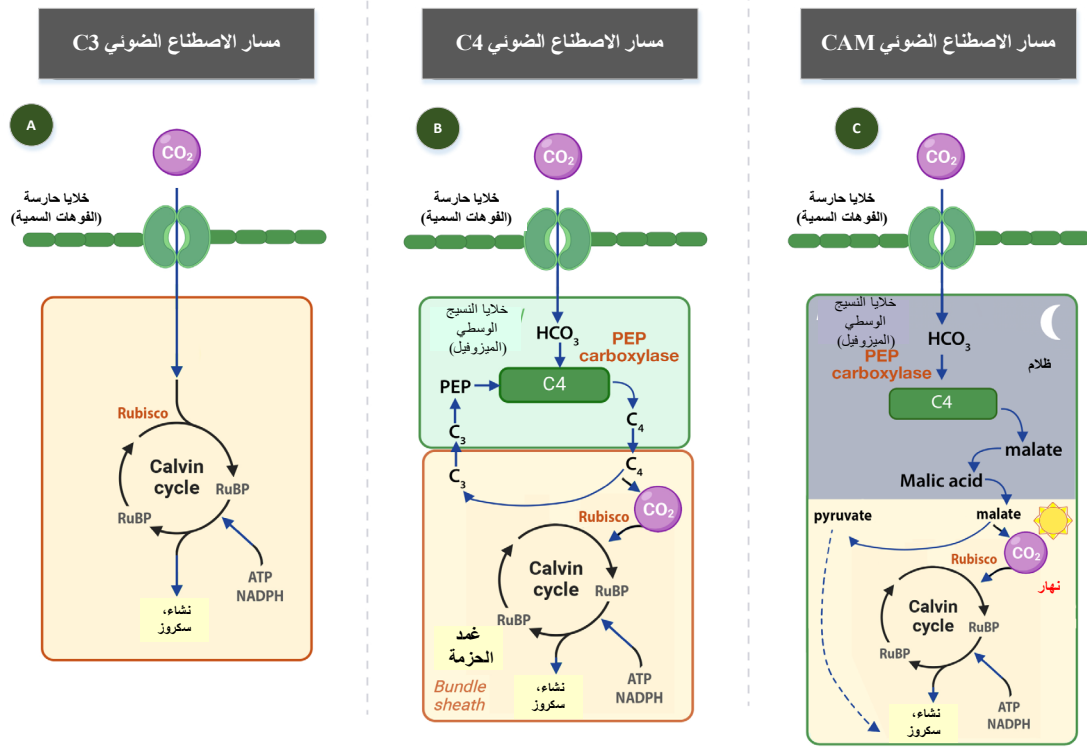


الشكل 2. مخطط توضيحي يبين أن القيمة النظرية للكربون $\delta^{13}\text{C}$ في الأنسجة النباتية أقل من النسبة الموجودة في الغلاف الجوي؛ مما يدل على مقدرة النبات في التمييز بين ^{12}C و ^{13}C على مستوى الفوهات السمية وعلى المستوى الإنزيمي ضمن خلايا النسيج الوسيط (الميزوفيل).

مسار تثبيت CO_2 في نباتات C3 (ثلاثية المسار الكربوني)

يعد الاصطناع الضوئي ثلاثي الكربون هو المسار الأبسط لتثبيت الكربون خلال عملية الاصطناع الضوئي في النبات. وتوجد هذه الطريقة لدى كل الأنواع النباتية كخطوة أولى في حلقة كالفن- بنسون، وهي الطريقة الوحيدة لدى حوالي 95% من نباتات الأرض، بما فيها جميع الأنواع الشجرية. سميت النباتات باسم ثلاثية المسار الكربوني (C3) نظراً لأن أول مركب يندمج فيه غاز CO_2 يتكون من ثلاث ذرات من الكربون (الشكل 3)، وتتصف نباتات هذه المجموعة بانفتاح المسام نهاراً، ويعد إنزيم الريبولوز بيوفوسفات كربوكسيلاز Ribulose biphosphate carboxylase (Rubisco) المسؤول عن تثبيت CO_2 والاصطناع الضوئي الذي يحدث في خلايا النسيج الوسيط (الميزوفيل) Mesophyll، وتتبع هذه المجموعة أغلب الأنواع النباتية التي تنتشر عادة في المناطق الرطبة والباردة أو المعتدلة الحرارة (كالقمح والشعير والرز...). وتقل كفاءة الاصطناع الضوئي في درجات الحرارة العالية، وتتصف نباتات هذه المجموعة عموماً باحتوائها على عدد كبير من الثغور وبمعدل فقدان مرتفع من الماء.

يتوسط إنزيم Rubisco تفاعل ارتباط غاز CO_2 مع السكر ريبولوز بيوفوسفات Ribulose biphosphate (RuBP) خماسي الكربون لتشكيل جزيئين من حمض الفسفوغلوسريك phosphoglyceric acid (PGA). ونظراً لكون PGA هو أول مركب ثابت ناجم عن تثبيت CO_2 والذي يتألف من ثلاث ذرات من الكربون، فإن النباتات التي تتبع إلى هذا المسار من تثبيت CO_2 تسمى نباتات C3. في مرحلة لاحقة، يُرجع PGA إلى سكر Triose-P باستعمال الطاقة التمثيلية NADPH2 و ATP الناجمتين عن التفاعلات الكيميائية الضوئية. وبعد ذلك، يتحول جزء من Triose-P إلى منتجات نهائية للاصطناع الضوئي كالغلوكوز والسكروز والنشاء بصورة رئيسية مع إمكانية تصنيع مركبات أخرى كالأحماض الدهنية والعضوية ومواد كربوهيدراتية أخرى، وذلك بصور تعتمد على النوع النباتي والظروف البيئية المحيطة (الشكل A-3).



الشكل 3. مسارات عملية الاصطناع الضوئي في النباتات.

يفضل إنزيم Rubisco الارتباط بالنظير $^{12}\text{CO}_2$ وخاصة عند وجود ثاني أكسيد الكربون بتركيز مرتفعة. ويعتمد تركيز CO_2 داخل الورقة C_i على معدل الاصطناع الضوئي وعلى مدى انفتاح المسام الذي يؤثر بالتالي في قيمة التمييز النظيري. ويمكن إيضاح ذلك في المثالين التاليين:

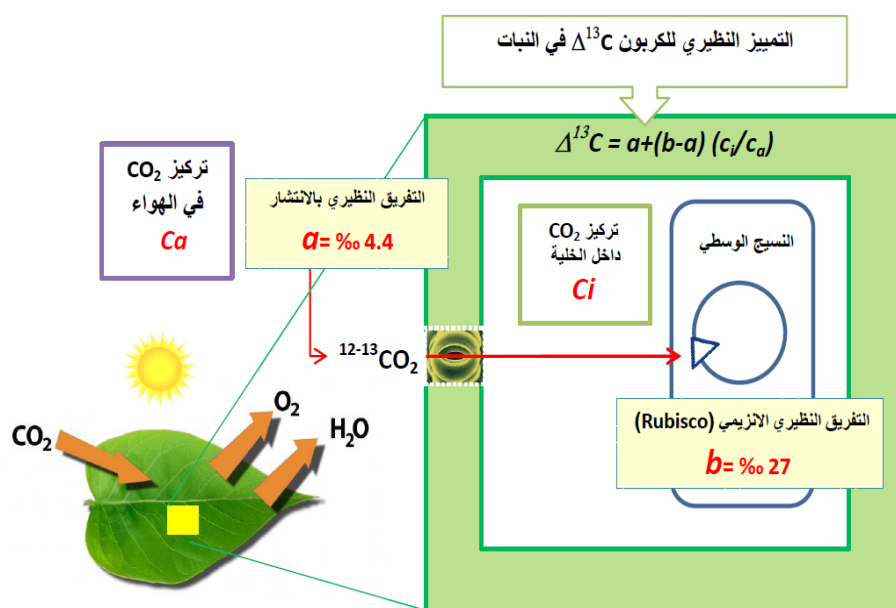
المثال الأول: إن الانغلاق التام للفوهات السمية سيضمن عدم انتشار غاز CO_2 داخل خلايا الورقة، وبالتالي فإن معظم غاز CO_2 المتاح الموجود ضمن فراغ المسام سيستعمل في أثناء عملية الاصطناع الضوئي، بما لا يسمح لإنزيم Rubisco القيام بالتمييز النظيري تجاه $^{13}\text{CO}_2$. وفي هذه الحالة تكون قيمة C_i قريبة من الصفر، وقيمة C_i/C_a ستكون قريبة من الصفر، وبالتالي فإن التمييز النظيري الإنزيمي Rubisco سيكون مساوياً إلى الصفر وسيكون التمييز النظيري الوحيد هو التمييز بالانتشار وقيمته (4.4‰). ونظراً لأن قيمة $\delta^{13}\text{C}$ في الهواء تساوي -8‰، فإن القيمة النظرية المفترضة δ في المادة النباتية ذات الفوهات السمية المغلقة تماماً هي -12.4‰.

المثال الثاني: في حال كانت الفوهات السمية مفتوحة تماماً فإن تركيز CO_2 داخل الخلية C_i يقارب تركيزه في الهواء ($\text{C}_i/\text{C}_a=1$) وبالتالي فإن التمييز بالانتشار سيكون مهماً مقارنة بالتمييز النظيري الإنزيمي Rubisco الذي سيغدو مرتفعاً، والذي سيرتبط بالنظير $^{12}\text{CO}_2$ الأكثر إتاحة. وفي هذه الحالة سيكون التمييز النظيري الإنزيمي في أقصى حالاته:

$$[\text{التمييز النظيري الإنزيمي} (-30\text{‰}) + \text{قيمة } \delta^{13}\text{C} \text{ في الهواء} (-8\text{‰})] = -38\text{‰}.$$

تقع قيمة $\delta^{13}\text{C}$ في نباتات هذه المجموعة فعلياً ضمن مجال الحالتين السابقتين؛ إذ تتراوح بين -22‰ و -35‰.

يمكن أن نتوقع، بناءً على ما سبق، أن التمييز النظيري أثناء عملية الاصطناع الضوئي للنباتات يرتبط بالعلاقة بين C_i و C_a ؛ فعند ازدياد تمثيل غاز CO_2 أو انخفاض معدل الناقلية المسامية stomatal conductance ينخفض تركيز غاز CO_2 داخل الخلية نتيجة التجزئة النظرية للكربون ^{13}C . وقد عبر باحثون عن ذلك رياضياً بمعادلة وصف فيها اعتماد قيم $\Delta^{13}\text{C}$ على الموصفات الفيزيولوجية للنبات خاصة نسبة تركيز غاز CO_2 داخل الخلية (C_i) إلى تركيزه في الخارج (Ca) $\approx 330-360 \text{ ppm}$ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)، علماً أن تركيز CO_2 في الغلاف الجوي قد ازداد خلال 150 سنة الأخيرة، من 280 إلى $380 \mu\text{mol mol}^{-1}$. ويوضح الشكل 4 التمييز النظيري لنباتات C3 المتعلق بالتجزئة النظرية بالانتشار وإنزيم Rubisco وتركيز غاز CO_2 داخل الخلية وخارجها.



الشكل 4. مخطط لخلية نباتية من المسار C3 يبين التمييز النظري للكربون $\Delta^{13}C$ ، وعلاقته بالتجزئة النظرية بالانتشار وبإنزيم Rubisco وتركيز غاز CO_2 داخل الخلية C_i وخارجها C_a .

مسار تثبيت CO_2 في نباتات C4 (رباعية المسار الكربوني)

ساد الاعتقاد سابقاً أن الطريقة الوحيدة لتثبيت CO_2 هي طريقة كالفن. وفي مطلع العام 1966 اكتُشف مسار آخر لتثبيت CO_2 في بعض الأنواع النباتية كقصب السكر والذرة وغيرهما، حيث سميت بالنباتات رباعية المسار الكربوني C4؛ لأن أول مركب يندمج فيه غاز CO_2 يتكون من أربع ذرات من الكربون (الشكل 3-B). تتصف نباتات هذه المجموعة بانفتاح المسام نهاراً وبقدرة عالية على استعمال الماء، وتستخدم إنزيم PEP لامتصاص ثنائي أكسيد الكربون حيث يسمح بامتصاصه سريعاً وتسليمه مباشرة إلى إنزيم Rubisco للقيام بعملية الاصطناع الضوئي. تنتشر نباتات هذه المجموعة في المناطق الحارة والجافة، حيث تستطيع إنجاز الاصطناع الضوئي في درجات الحرارة العالية. وتتصف نباتات هذه المجموعة عموماً بعدد ثغور أقل من نباتات C3 مما ينعكس على انخفاض معدل الفقد المائي. ومن أجل تجنب عملية التنفس الضوئي، طورت نباتات C4 آلية لزيادة كفاءة تسليم CO_2 لإنزيم Rubisco. لقد استفادت هذه النباتات من البنية التشريحية الخاصة بالورقة حيث توجد الصانعات الخضراء (الكوروبلاست) ليس فقط في خلايا النسيج الوسطي (الميزوفيل) في الجزء الخارجي من الأوراق فحسب بل في الخلايا الحزمية؛ أي خلايا غمد الأوعية.

بدلاً من التثبيت المباشر في حلقة كالفن، يُحوّل CO_2 إلى حمض عضوي رباعي الكربون لديه القدرة على إعادة توليد CO_2 في كلوروبلاست الخلايا الحزمية. بعد ذلك، تستطيع الخلايا الحزمية الناقلة استخدام ثنائي أكسيد الكربون لتكوين الكربوهيدرات عبر المسار التقليدي لـ C3.

ويمكن إيضاح هذا المسار على النحو الآتي: في خلايا النسيج الوسطي (الميزوفيل) mesophyll، يتوسط الإنزيم Phosphoenolpyruvate (PEP) carboxylase (PEPC) تفاعل ارتباط CO_2 بالمستقبل المسمى Phosphoenolpyruvate (PEP) ليعطي مركب Oxaloacetate (OAA) الذي يتألف من أربع ذرات من الكربون، وبناءً على ذلك جاءت تسمية النباتات التي تتبع هذا المسار في تثبيت غاز ثنائي أكسيد الكربون، أثناء عملية الاصطناع الضوئي، بنباتات رباعية الكربون C4. يتحول Oxaloacetate بسرعة إلى مركب مالات Malate أو إلى أسبارتات Aspartate أو إلى كليهما معاً. تنتقل هذه المركبات بعد ذلك إلى الخلايا الحزمية bundle sheath cells الموجودة حول الحزمة الوعائية vascular bundle لتتحول إلى مركب Pyruvate. وفي أثناء ذلك، تتحرر جزيئة من CO_2 بحيث ترتبط مرة أخرى مع RuBP لتشكيل 3-PGA في دورة كالفن (مسار تثبيت CO_2 في نباتات C3)، ويحدث ذلك في الخلايا الحزمية bundle sheath cells.

مسار تثبيت CO_2 في نباتات CAM (Crassulacean Acid Metabolism)

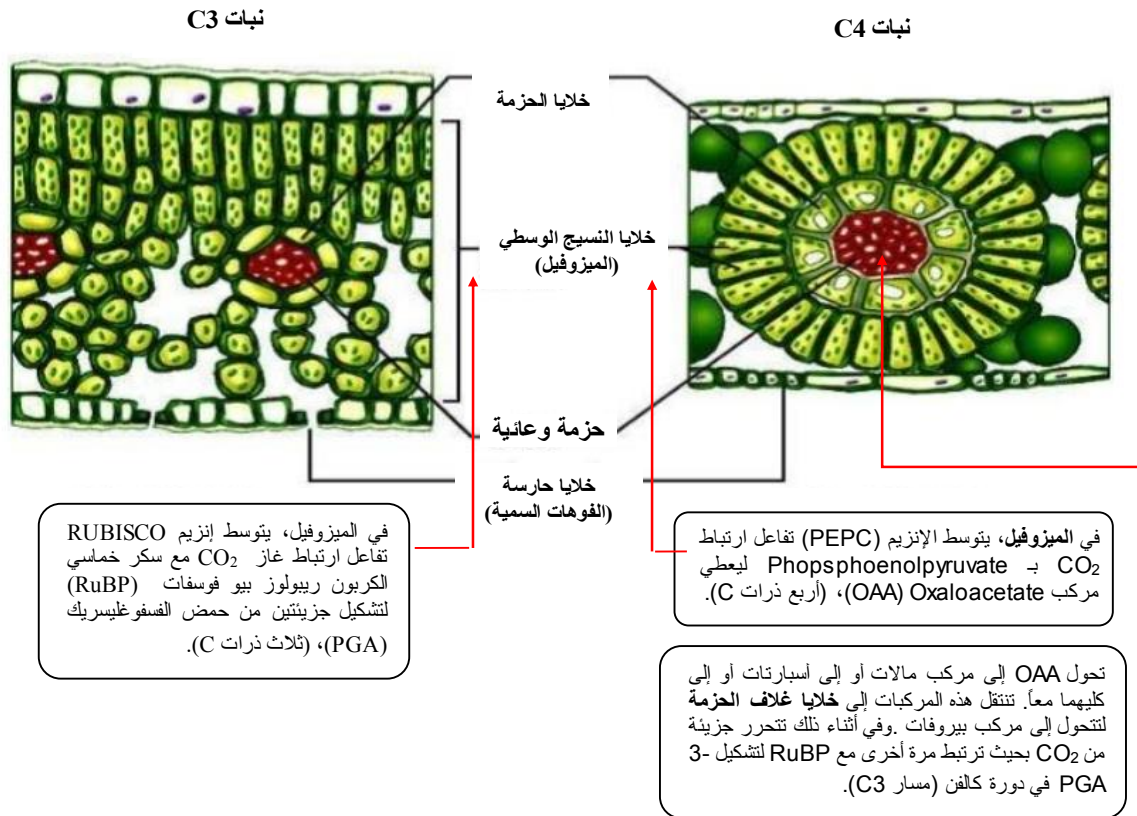
سميت النباتات اختصاراً باسم "CAM" نظراً لاكتشافها للمرة الأولى في العائلة Crassulaceae، حيث تشير التسمية إلى الاستقلاب الحمضي في هذه الفصيلة وليس المقصود به "استقلاب حمض الكراسولاسيان"، حيث يحدث امتصاص ثنائي أكسيد الكربون ليلاً، ويتم

تخزينه على شكل حمض التفاح "malic acid" رباعي الكربون ضمن الفجوات العصارية لاستخدامه في الاصطناع الضوئي حين تتوافر الطاقة من ضوء الشمس في اليوم التالي. يتبع لهذا المسار بعض الأنواع النباتية المنتشرة رئيسياً في المناطق الصحراوية والقاحلة، والتي تتبع عادةً للمجموعة C4، وتختلف عنها في أن فصل المسارين C3 عن C4 يكون زمنياً وليس مكانياً، بحيث يكون المسار شبيهاً بنباتات C4 ليلاً ونباتات C3 نهاراً. ويمكن إيجاز ذلك على النحو الآتي:

يتم تثبيت CO_2 بواسطة إنزيم PEP في الظلام وفق المسار C4 حيث تكون الثغور مفتوحة، وتتراكم المالات Malate في الفجوات الخلوية leaf cell vacuoles. تنغلق الفوهات السمية أثناء النهار، بحيث يتم الحفاظ على كمية من الماء متاح، ويتحرر CO_2 داخلياً مع المالات، ليعاد تثبيته مجدداً من خلال دورة كالفن بواسطة إنزيم Rubisco كما هو الحال في نباتات C3. تتصف النباتات التي تتبع المسار CAM بامتلاكها لهذه الطريقة الفيزيولوجية والكيميائية المميزة بحيث تطفئ عليها صفة "الهروب من الجفاف" من خلال إبقاء الثغور في الأوراق مغلقة طوال اليوم لتقليل النتح. ومن هذه النباتات الأناناس واللاغاف وإجاص بريكلي ونباتات عصارية مختلفة كالصباريات وغيرها. تتراوح قيم $\delta^{13}C$ من -12‰ إلى -30‰ أو من -14‰ إلى -33‰ والتي تتأثر بالظروف البيئية، ويُنّ باحثون أن القيم تتراوح بين 10‰ و-34‰. ويبين الشكل 7 مسار عملية الاصطناع في نباتات CAM إضافة إلى C3 و C4 والمقارنة بينها (الشكل C-3).

الاختلافات التشريحية والكيميائية-الحيوية والفيزيولوجية بين نباتات C3 و C4

نظراً لانتشار نباتات المجموعتين C3 و C4 مقارنة بنباتات CAM وبسبب أهميتها الاقتصادية والغذائية في العالم، فإن معظم الأبحاث والدراسات تناولت هاتين المجموعتين التي تختلف نباتاتها في العديد من الموصفات الشكلية والوظيفية. وجد أن الخلايا الحزمية في نباتات المجموعة C4 تحتوي على الصانعات الخضراء إضافة إلى وجودها في خلايا النسيج الوسطي، أما في نباتات المجموعة C3 فينحصر وجود الصانعات الخضراء في خلايا النسيج الوسطي فقط (الشكل 5).



الشكل 5. الاختلافات التشريحية والكيميائية-الحيوية والفيزيولوجية بين نباتات C3 و C4.

تمتاز نباتات C4 بسرعة القيام بعملية الاصطناع الضوئي مقارنة بنباتات C3 تحت ظروف شدة ضوئية عالية وحرارة مرتفعة، لأن ثنائي أكسيد الكربون يتم إيدخاله إلى إنزيم Rubisco ولا يسمح له بالتقاط الأكسجين والقيام بالتنفس الضوئي. تتمتع هذه النباتات (C4) بكفاءة مرتفعة لاستخدام الماء، لأن إنزيم PEP carboxylase يأخذ ثنائي أكسيد الكربون سريعاً، ولا توجد ضرورة لبقاء الثغور مفتوحة، وبالتالي يكون معدل فقد ماء عن طريق النتح أقل نسبياً من نباتات المجموعة C3.

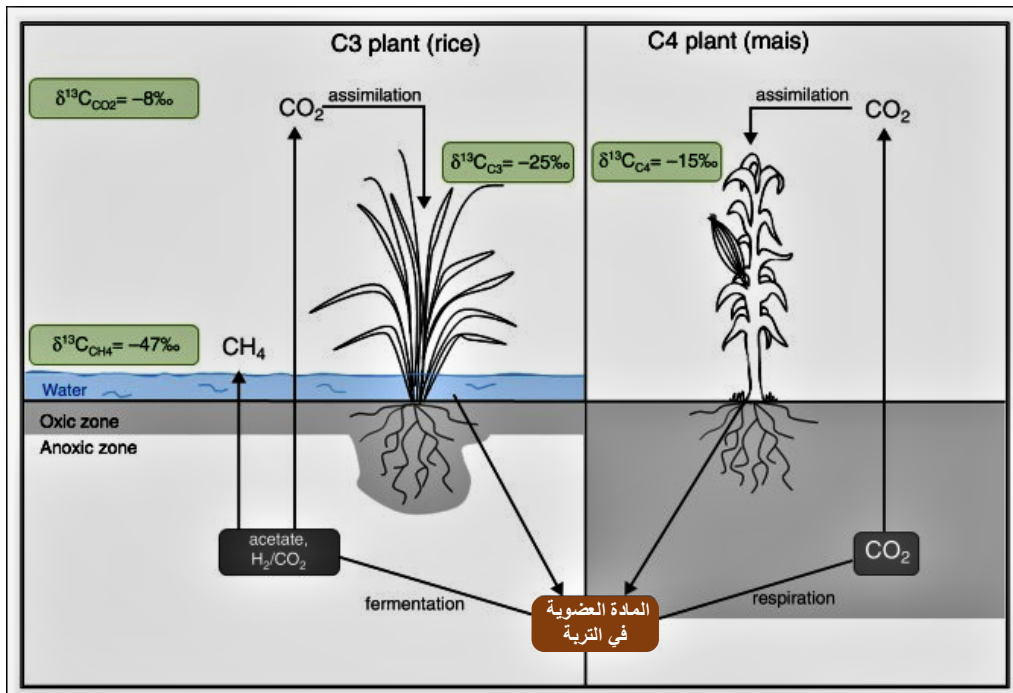
في ظروف الحرارة المرتفعة أو الجفاف أو الملوحة أو بوجود كمية منخفضة من CO_2 الجوي يكون ثنائي أكسيد الكربون محدوداً في خلايا النبات. عندئذ، يُستخدم الأكسجين من قبل النبات، وهذا ما يسمى بالتنفس الضوئي الذي يمثل هدراً لطاقة النبات، وهذا ما يحدث في نباتات C3، حيث إن الإنزيم المثبت لثنائي أكسيد الكربون الجوي له تلاؤم أيضاً مع الأكسجين. عند نباتات C4، يثبت ثنائي أكسيد الكربون الجوي بواسطة إنزيم ليس له تلاؤم مع الأكسجين، وبذلك يعيق عملية التنفس الضوئي. نظراً لأن كل جزيء من ثنائي أكسيد الكربون يجب أن يثبت مرتين، فإن مسار C4 يعد أكثر استهلاكاً للطاقة من مسار C3 الذي يتطلب 18 ATP من أجل تركيب جزيء واحد من الغلوكوز، في حين يتطلب مسار C4 30 ATP. لكن من ناحية أخرى، تفقد النباتات المدارية أكثر من نصف الكربون الذي حصلت عليه بالاصطناع الضوئي خلال عملية التنفس الضوئي، ولهذا يعد مسار C4 هو آلية تكيف لتقليل الفقد. ويمكن الاختلاف الرئيس الملاحظ بينهما، عموماً، في أن تثبيت CO_2 في نباتات C3 يكون منفرداً (أحادي) single fixation، في حين يكون التثبيت في نباتات C4 مزدوجاً double fixation. وفيما يتعلق بالقيمة النظرية فإن متوسط قيمة $\delta^{13}C$ في نباتات C3 هو -25‰ وفي نباتات C4 هو -15‰. ويخلص الجدول 1 بعض الاختلافات التشريحية والكيميائية-الحيوية والفيزيولوجية بين نباتات C3 وC4.

الجدول 1. بعض الاختلافات بين نباتات C3 وC4		
C4	C3	
Oxaloacetic acid أربع ذرات من الكربون	3- phosphoglyceric acid ثلاث ذرات من الكربون	النتاج الأولي لعملية الاصطناع الضوئي
تحتوي على نوعين من الصناعات: الأول يوجد في الخلايا الحزمية والثاني في خلايا النسيج الوسيط	تحتوي على نوع واحد من الصناعات توجد في خلايا النسيج الوسيط "الميزوفيل" للورقة	البنية التشريحية للورقة الصناعات الخضراء (البلاستيدات) Chloroplast
الميزوفيل والخلايا الحزمية (دورة كالفن ومسار هاتش-سلاك) Hatch and Slack	في خلايا الميزوفيل (دورة كالفن) Calvin Cycle	موضع ومسار الاصطناع الضوئي
<u>التثبيت الأولي</u> : phospho- enol pyruvate (PEP) carboxylase <u>التثبيت الثاني</u> : في خلايا غلاف الحزمة rubisco	<u>التثبيت الأولي</u> : ribulose bisphosphate carboxylase (rubisco) لا يوجد تثبيت ثان	انزيمات تثبيت CO_2 (الكرسلة Carboxylation)
150 - 300 ~ 25% of C3	350 - 1000 مرتفع	سرعة النتح غ ماء لكل غ مادة جافة
قليل	كبير	عدد الثغور
مرتفعة	قليلة نسبياً	كفاءة استعمال الماء
50-54	34-39	معدل النمو الأعظمي $g\ d^{-1}$
25 - 35 °C تستطيع إنجاز الاصطناع الضوئي في درجات الحرارة العالية	15 to 25 °C كفاءتها تقل في درجات الحرارة العالية	درجة الحرارة المثلى °C
تحتاج إلى شدة ضوئية عالية للوصول إلى أعلى معدل اصطناع ضوئي	لا تحتاج إلى شدة ضوئية عالية للوصول إلى أعلى معدل اصطناع ضوئي	الاستجابة للضوء
منخفض جداً ، فقط في خلايا غلاف الحزمة	(30 to 50%) مرتفع	التنفس الضوئي
40 إلى 80	6 إلى 40	معدل الاصطناع الضوئي $\mu moles\ m^{-2}\ s^{-1}$
150±40	300±60	تركيز CO_2 داخل الخلية (Ci) $\mu moles\ mol^{-1}$
0.6-0.7	0.3-0.4	نسبة C_i/C_a $C_a = 330-360\ \mu moles\ mol^{-1}$
بين 8- و 20‰	بين 22- و 35‰	قيمة $\delta^{13}C$ ‰
الحرارة والجافة	الرطبة والباردة أو المعتدلة الحرارة	مناطق الانتشار
عدد قليل من النباتات: كالنخلة الصفراء، والنخلة العلفية وقصب السكر	أغلب النباتات كالرز، قمح، شعير، خضروات، بقوليات....	الأنواع النباتية

التجزئة النظائرية في دورة الكربون في الطبيعة وقياسها

تعرف دورة الكربون في الطبيعة بأنها العملية التي ينتقل بها الكربون من الغلاف الجوي إلى الكائنات الحية ثم إلى الأرض ثم إلى الغلاف الجوي مرة أخرى. وتعد كمية الكربون ثابتة على الأرض وفي الغلاف الجوي، وأن الدورة الطبيعية للكربون متوازنة. يعود الكربون إلى الغلاف الجوي والمائي من خلال عمليات الاحتراق والتنفس والتحلل، ويحصل خلال دورة الكربون تبادلات في غاز ثنائي أكسيد الكربون بين المخازن الطبيعية الأربعة لكوكبنا (الغلاف الجوي والمحيط الإحيائي والغلاف الصخري والغلاف المائي). يؤدي النشاط البشري من خلال عمليات التصنيع وإزالة الغابات وحرق الوقود الحفري إلى تغير في هذه التبادلات، ويغرق غلافنا الجوي بكميات متزايدة من غاز CO_2 مسببة ظاهرة الاحتباس الحراري؛ فهذا الغاز هو من الغازات الدفيئة حيث يحبس الحرارة في الغلاف الجوي ويمنع الأشعة من المرور خلال الغلاف الجوي.

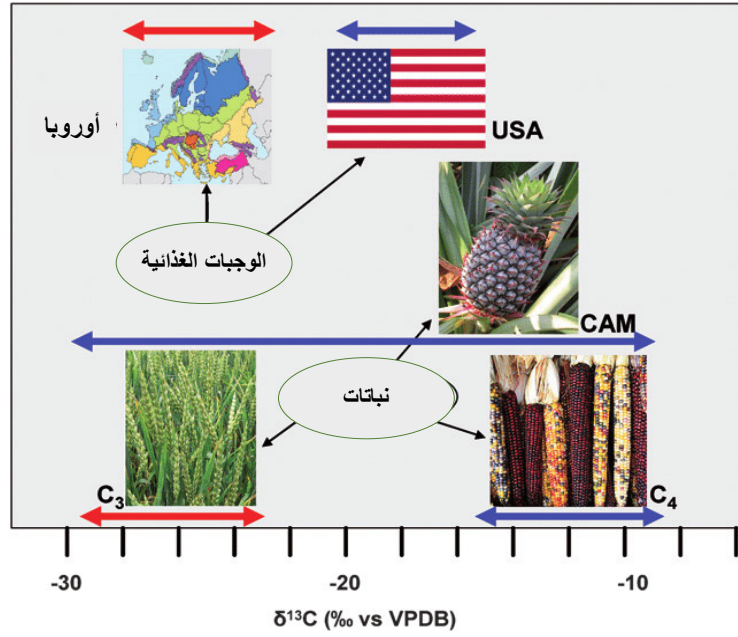
تتضمن دورة الكربون تبادلات نشطة لثنائي أكسيد الكربون بين الغلاف الجوي والنظم البيئية الأرضية والمحيطات. تتناقص قيمة $\delta^{13}\text{C}$ لثنائي أكسيد الكربون في الغلاف الجوي استجابةً لمداخلات ثاني أكسيد الكربون المنضب بالنظير ^{13}C من الوقود الأحفوري، إضافة إلى حرق الكتلة الحيوية والتحلل. فعلى مدار المئة عام السابقة، كان الانخفاض تقريباً 1‰ (من -7‰ إلى -8‰). حيث يبلغ الفرق في قيمة التجزئة النظائرية الصافية للنباتات ذات الانتشار الواسع C_3 وذلك بين ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي والكتلة الحيوية النباتية حوالي 20‰. في حين تكون القيمة أصغر (حوالي 5‰) في نباتات C_4 . وتحتوي المادة العضوية في التربة على مستوى أكبر من الكربون تقدر بعدة أضعاف مقارنة بالغلاف الجوي أو الكتلة الإحيائية للنباتات، وتكون متشابهة عموماً أو مغناة قليلاً بالكربون ^{13}C مقارنة بالنباتات السائدة. ويبين الشكل 6 التجزئة النظيرية للكربون في دورة الكربون.



الشكل 6. التجزئة النظيرية للكربون في دورة الكربون حيث يبين متوسطات قيمة $\delta^{13}\text{C}$ في نباتات C_3 و C_4 ونواتج التحلل.

من ناحية أخرى، نظراً لأن الكائنات الحية (الإنسان أو الحيوان) لا يمكنها دمج الكربون إلا من خلال تناولها لمادة نباتية أو حيوانية، فإن نسب نظائر الكربون في كائن ما ستعكس النسبة النظيرية لمصدر الغذاء. ويبين الشكل 7 أن الأنظمة الغذائية البشرية في القارة الأوروبية أغنى بنباتات C_3 كالقمح والشعير... إلخ، في حين أن الأنظمة الغذائية البشرية في أمريكا الشمالية أكثر ثراءً في نباتات C_4 كالذرة وقصب السكر. لذلك، فإن أي شخص يعيش في أمريكا الشمالية سيكون له جسد ذو نسب نظيرية أكثر شبهاً بنباتات C_4 وسيكون له مستويات أقل بالكربون 13 (أي قيم δ أقل سلبية) مقارنة بالأوروبيين. بمعنى «أنت ما تأكله» you are what you eat.

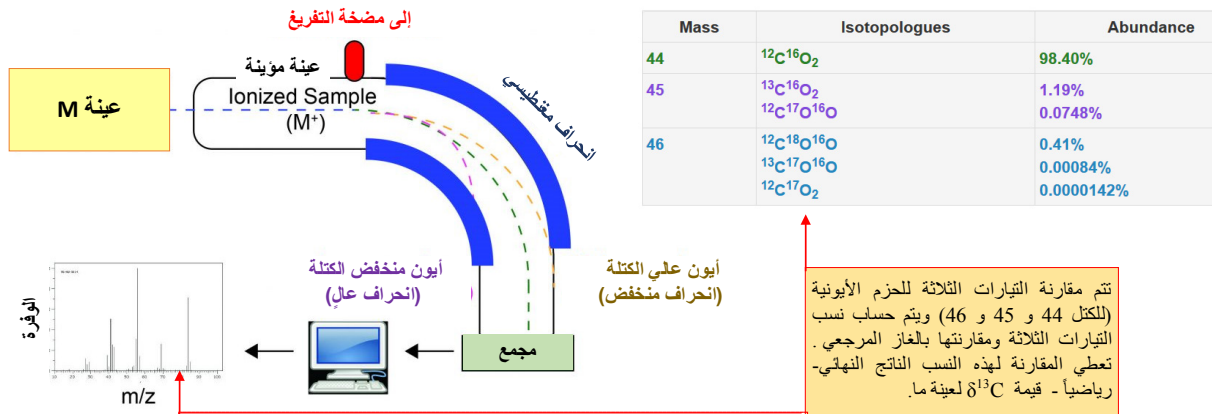
يعين التركيب النظيري للكربون في العينة بقياس النسبة بين قيمتي النظيرين المستقرين الثقيل ^{13}C والخفيف ^{12}C باستعمال جهاز مطياف الكتلة الذي يتكون من أربعة أجزاء رئيسية هي: نظام الإدخال ومولد الأيونات ومحلل الأيونات ونظام تجميع الأيونات وكشفها.



الشكل 7. أمثلة على الاختلافات في نظائر الكربون في النباتات والوجبات الغذائية للإنسان في القارتين الأمريكية والأوروبية.

يعتمد مبدأ قياس النظائر بواسطة مطياف الكتلة على انحراف شعاع من الجزيئات المشحونة في مجال مغناطيسي عمودي على اتجاه سريانه حيث يعتمد مقدار الانحراف على النسبة بين الكتلة والشحنة (m/e)؛ فعند تأين تيار من غاز حاو لنظائر مختلفة لعنصر ما (على سبيل المثال: ^{12}C و ^{13}C في CO_2) في مولد الأيونات وتسريع هذه الأيونات الموجبة بفرق جهد عالٍ، ثم تعريضها لتأثير مجال مغناطيسي عمودي على اتجاه المجال الكهربائي، يتحول مسار هذه الأيونات إلى مسار دائري نتيجة لتأثير تيار الأيونات (الشكل 8).

يعتمد قطر دائرة الانحراف على النسبة بين كتلة الأيون وشحنته؛ فالأيون ذو الكتلة الأكبر يكون قطر مساره انحرافه أكبر من قطر مساره انحراف الأيون الأصغر في الكتلة. وبهذه الطريقة يمكن فصل نظائر الأيون عن بعضها نظراً لاختلاف كتلة كل منها عن الآخر مع تساويها في الشحنة الكهربائية. يتم بعد ذلك تجميع هذه الأيونات المفصولة في مجمعات أيونية خاصة، حيث تفقد هذه الأيونات شحناتها الكهربائية. ينتج عن فقد هذه الشحنات الكهربائية للأيونات سريان تيار كهربائي صغير يتناسب مع عدد الأيونات الواصلة إلى كل مجمع أيوني يمكن من خلال قياسه تحديد الوفرة النسبية لكل نظير.



الشكل 8. مطياف الكتلة، فصل النظائر وفقاً لكتلتها.

يعين التركيب النظيري للكربون في العينة بقياس النسبة بين قيمتي النظيرين المستقرين ^{12}C و ^{13}C وذلك من خلال المقارنة مع معيار ثابت standard محدد فيه قيمة النسبة $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ، بشكل دقيق. جرى في البداية استخدام القيمة 0.0112372 المقيسة في المادة الكربونية للمستحاثات *Belemnite americana*، الموجودة فقط في طبقة رسوبية بحرية Pee Dee والتي تعود للعصر الطباشيري (الكريتاسي) أو حقبة "Cretaceous belemnite rostrum" جرى بولاية كارولينا الجنوبية South Carolina في الولايات المتحدة الأمريكية. في العام

1957 حددت قيمة النسبة المئوية أنفاً، وذلك من خلال قياس قيمة هذه النسبة في غاز ثنائي أكسيد الكربون CO₂ المتشكل من تفاعل كربونات الكالسيوم لهذه المستحاثات مع حمض الفسفور المركز. ومن الجدير بالذكر أن قيمة هذه النسبة تم اعتمادها لاحقاً لفترة طويلة كـمعيار عالمي نسبة لهذه المستحاثات المعروفة بشكل شائع بالرمز (PDB)، اختصاراً لكلمات Pee Dee Belemnite. فيما بعد، ومع تعدد تطبيقات استخدام الكربون المستقر ¹³C في مختلف المجالات العلمية، باتت الكميات المتوافرة لمستحاثات Belemnite محدودة وغير كافية لتغطية الحاجة لهذا المعيار، فكانت الحاجة لإيجاد معيار دولي بديل تكون فيه القيمة المطلقة للنسبة ¹³C/¹²C أقرب ما يكون من قيمة النسبة السابقة 0.0112372. قامت الوكالة الدولية للطاقة الذرية، ومقرها مدينة فيينا، بتحضير واعتماد عينة عيارية جديدة، أو ما يعرف بـ"Vienna-PDB" أو "VPDB"، بلغت فيها قيمة هذه النسبة (0.011183±0.1‰)، وهي قيمة مختلفة قليلاً (أقل من 0.01‰) عن القيمة السابقة.

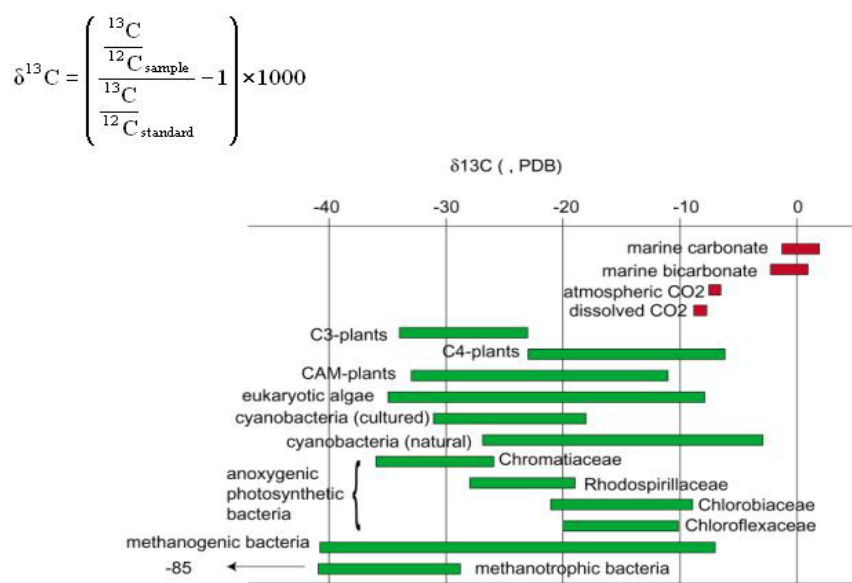
يقاس المحتوى النظيري للنظير ¹³C للغاز CO₂ الناتج من العينة من خلال مقارنته مع غاز آخر CO₂ عياري، تكون فيه القيمة المطلقة للنسبة النظيرية ¹³C/¹²C معلومة. ويعبر بشكل شائع عن قيمة تغير التركيب النظيري لعينة ما بالقيمة دلتا (δ)، المقدرة بوحدة بالآلف (‰)، كما في المعادلة التالية:

$$\delta^{13}\text{C} = \left(\frac{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000$$

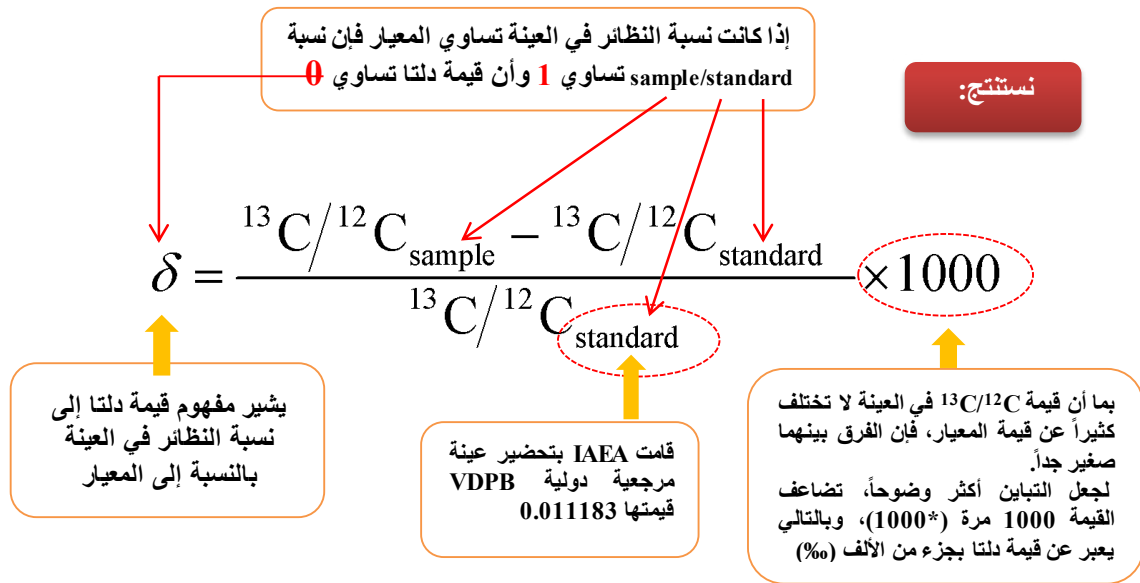
ويُقاس التغير الطبيعي في محتوى النظير ¹³C للعينة، من خلال مقارنته مع المحتوى النظيري في المادة المرجعية الدولية PDB أو PDB، حيث تبلغ القيمة المطلقة للنسبة ¹³C/¹²C في المعيار VPDB قيمة تساوي 0.01118. فمادة تكون فيها مثلاً قيمة النسبة ¹³C/¹²C بقدر 0.010893، ستكون من أجلها القيمة (δ¹³C) بقدر -25.7‰:

$$(0.010893/0.01118 - 1) \times 1000\text{‰} = -25.7\text{‰}$$

وإذا كانت القيمة النظيرية للكربون δ¹³C في العينة مساوية للصفر (0‰)، فهذا يعني أن العينة لها ذات التركيب النظيري للمادة المرجعية، وإذا كانت القيمة بقدر (2.05‰)، فهذا يعني أن العينة تحوي فائضاً بقدر 2.05 أجزاء بالآلف من الكربون الثقيل ¹³C، مقارنة بالمادة المرجعية. ومثلاً، في حال كانت القيمة δ للنسبة النظيرية للكربون 13 سالبة (-13‰)، فهذا يدل على أن العينة تحتوي على 13 جزءاً بالآلف من النظير ¹³C أقل من المادة المرجعية المعتمدة. وقد أشار بعض الباحثين إلى أن قيم δ¹³C في النباتات ثلاثية المسار الكربوني تتراوح بشكل عام بين 22- و 33‰، وبين 8- و 20‰ في النباتات رباعية المسار الكربوني، ومن 10- إلى 34‰ في النباتات ذات المسار CAM. وتقدر قيمة δ¹³C في غاز ثنائي أكسيد الكربون الموجود في الهواء بنحو -8‰ (الشكل 9).



الشكل 9. المحتوى النظيري للكربون (δ¹³C‰) في النباتات وفي الهواء (-8‰) وفي مواد أخرى، مقارنة بالمعيار PDB.

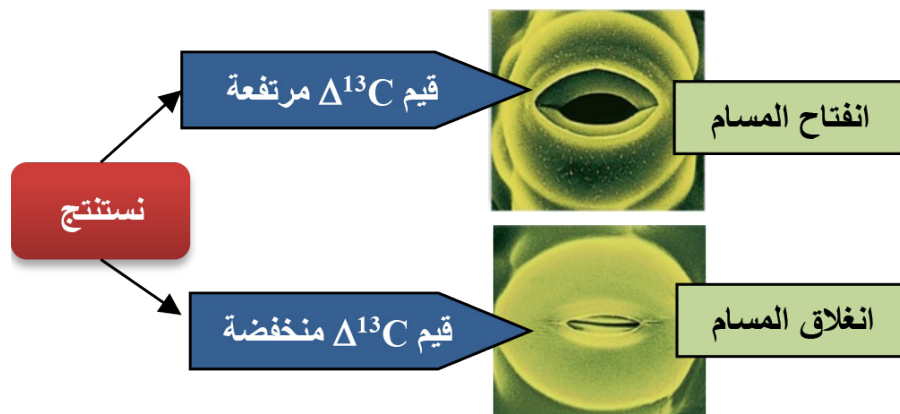


نظراً لأن النباتات تفضل تثبيت $^{12}\text{CO}_2$ على $^{13}\text{CO}_2$ أثناء قيامها بعملية الاصطناع الضوئي فإن النسبة النظرية للكربون ^{13}C إلى ^{12}C في الأنسجة النباتية تصبح أقل من النسبة الموجودة في الغلاف الجوي؛ مما يدل على مقدرة النبات على التمييز بين النظيرين ^{12}C و ^{13}C . وبناءً على ما سبق جرى واستعمال تقنية التمييز النظيري للكربون ($\delta^{13}\text{C}$ ‰) Carbon Isotope Discrimination أي CID في أغلب الأبحاث العلمية ذات الصلة، حيث تؤخذ بالحسبان القيمة النظرية $\delta^{13}\text{C}$ في العينة sample مقارنة مع القيمة $\delta^{13}\text{C}$ المقيسة في الهواء التي تكون قيمتها 8‰- وفقاً للمعادلة التالية:

$$\Delta^{13}\text{C} = (\delta^{13}\text{C}_{\text{air}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{sample}}) / (1 - \delta^{13}\text{C}_{\text{sample}}/1000)$$

الظروف البيئية والقيم النظرية للكربون ^{13}C

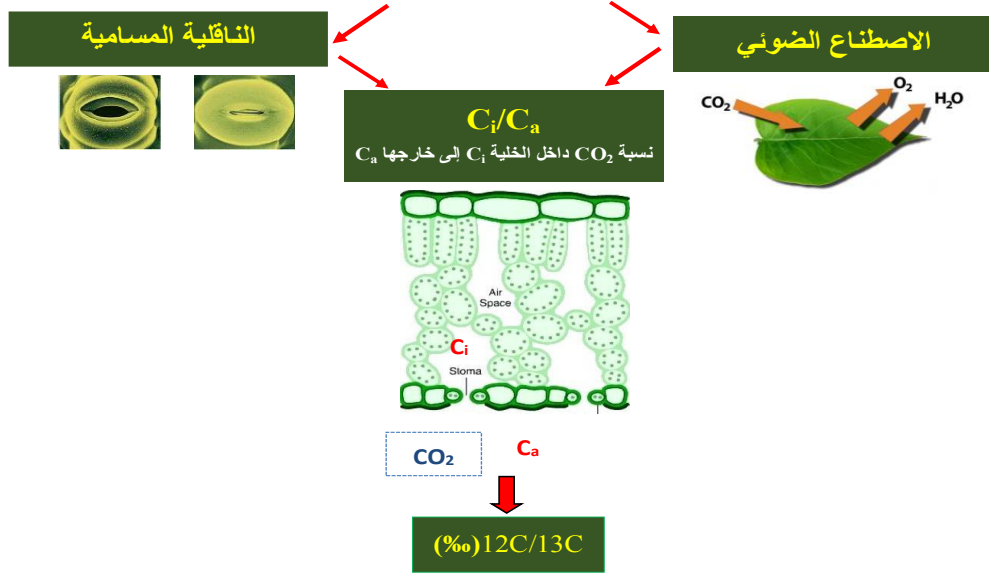
تعطي قيم التمييز النظيري $\Delta^{13}\text{C}$ في نباتات ثلاثية المسار الكربوني C3 قياساً شاملاً عن تمثيل الكربون خلال فترة النمو، حيث تعكس هذه القيمة التغيرات التي نسبة غاز CO_2 في داخل الخلية Ci إلى خارجها Ca المترافقة مع نفاذية المسام وعملية الكرسلة بإتريم Rubisco، وجدير بالذكر أن أي عامل يؤثر على عمل الثغور التنفسية وعملية الكرسلة تؤثر في كمية ^{13}C في الأنسجة النباتية؛ فالإجهاد المائي والملوحة ودرجة الحرارة وأشعة الشمس تخفض من قيمة $\Delta^{13}\text{C}$ من خلال تأثيرها على عمل المسام. وتنعكس أكثر القيم سلباً لـ $\delta^{13}\text{C}$ ارتفاعاً في قيم التمييز النظيري $\Delta^{13}\text{C}$. ففي حال عدم تعرض النبات إلى أي إجهاد، فإن المسام تكون أكثر انفتاحاً والتمييز النظيري يكون مرتفعاً. أما في حال تعرض النباتات إلى إجهاد، فالمسام سوف تنغلق جزئياً مما يخفض من قيم $\Delta^{13}\text{C}$.



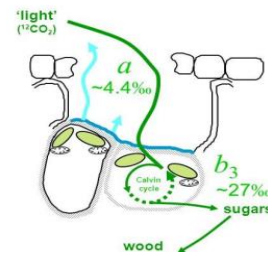
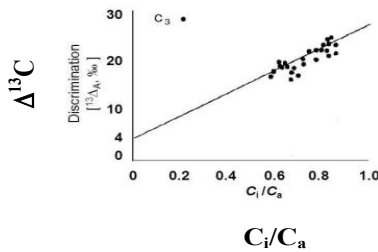
ويخلص الشكل 10 علاقة الظروف البيئية وبعض العمليات الزراعية بالاصطناع الضوئي والناقلية المسامية وتأثيرها في نسبة غاز CO_2 داخل الخلية إلى خارجها وفي قيم التمييز النظيري للكربون $\Delta^{13}C$ والوفرة الطبيعية لنظير الكربون $\delta^{13}C$ في نباتات C3.



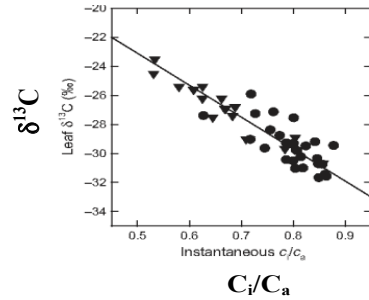
العوامل البيئية (الجفاف، الملوحة، الحرارة، الرطوبة، التسميد، والنظم الزراعية المختلفة)



علاقة طردية بين $\Delta^{13}C$ ونسبة C_i/C_a



علاقة عكسية بين $\delta^{13}C$ ونسبة C_i/C_a



الشكل 10. علاقة الظروف البيئية وبعض العمليات الزراعية بالتمثيل الضوئي والناقلية المسامية وتأثيرها في نسبة غاز CO_2 داخل الخلية إلى خارجها وفي قيم التمييز النظيري للكربون $\Delta^{13}C$ والوفرة الطبيعية لنظير الكربون $\delta^{13}C$ في نباتات C3.

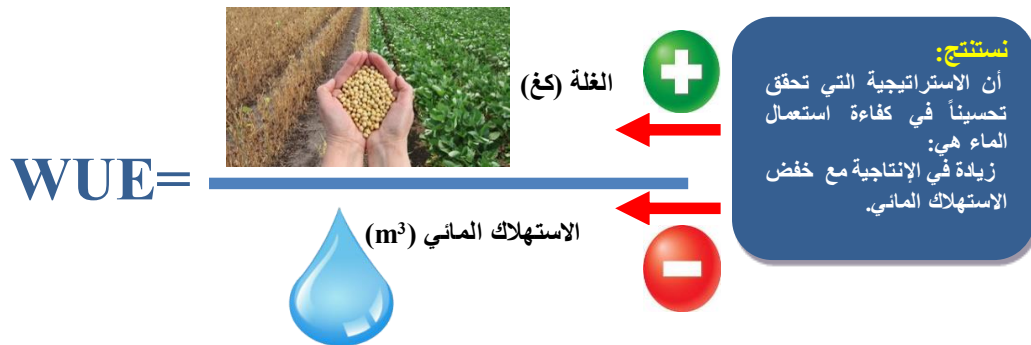
العلاقة بين كفاءة استعمال الماء WUE_i والتمييز النظيري للكربون $\Delta^{13}C$ في نباتات C3

تشير كفاءة استعمال الماء WUE_i إلى نسبة الماء المستخدمة في عملية الأيض النباتي plant metabolism إلى الماء المفقود من قبل النبات من خلال عملية النتح transpiration ويستعمل عادة نوعين من هذه الكفاءة:

- كفاءة استعمال المياه لعملية الاصطناع الضوئي photosynthetic water-use efficiency، وتسمى أيضاً كفاءة استعمال المياه الذاتية (الأصلية) $iWUE_{intrinsic}$ (intrinsic of water-use efficiency)، وتقاس عادة بالوحدة $(\mu mol \text{ mol}^{-1})$ أو $(\mu mol \text{ mol}^{-1})$ (الأنية $mmol^{-1}$). تمثل قيمة WUE_i على أنها نسبة معدل تمثيل الكربون خلال عملية الاصطناع الضوئي $(\mu mol \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ إلى معدل النتح transpiration $(mmol \text{ H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ خلال زمن محدد، كما يمكن التعبير عنها أيضاً بنسبة التمثيل

الصافي لغاز ثاني أكسيد الكربون إلى الناقلية المسامية stomatal conductance لبخار الماء (mol H₂O m⁻²s⁻¹)؛ أي معدل انتشار بخار الماء من خلال الثغور. وتحسب iWUEintrinsic بحاصل قسمة A/gs أي معدل الاصطناع الضوئي/الناقلية المسامية، وWUE instantaneous بحاصل قسمة A/E أي معدل الاصطناع الضوئي/معدل النتج.

● كفاءة استعمال المياه المتعلقة بالإنتاجية water-use efficiency of productivity، وتسمى أيضاً الكفاءة المتكاملة لاستخدام المياه integrated water-use efficiency والتي عادة ما تعرف بأنها نسبة الكتلة الحيوية biomass إلى معدل النتج أي «الماء المفقود» خلال فترة زمنية طويلة، ويمكن التعبير عن الكفاءة المتكاملة لاستخدام المياه بالكتلة الحيوية (WUEB) أو الغلة (WUEY) المتراكمة لكل وحدة من المياه المستعملة وتقاس بالوحدة (g kg⁻¹).



إن امتصاص CO₂ من خلال المسام سيؤدي حتماً إلى فقدان في بخار الماء (تبادل غازي gas exchange). وتعتمد الأهمية النسبية لعملية الاصطناع الضوئي والنتج على عوامل فيزيولوجية ومورفولوجية وبيئية؛ حيث يمكن أن تكتسب الأنواع النباتية المختلفة والنامية في ظروف نمو متباينة كميات مختلفة من الكربون لكل وحدة من المياه المفقودة. إن هذه الكميات -وهي نسبة معدلات الاصطناع الضوئي الصافي والنتج (كفاءة استعمال الماء)- ذات أهمية بيئية كبيرة، يمكن قياسها على نطاقات زمنية قصيرة أو طويلة. فعلى المدى القصير، غالباً ما يتم قياس كفاءة استعمال الماء اللحظية WUE instantaneous بتحليل الغاز بالأشعة تحت الحمراء. ومع ذلك، تتغير هذه الكفاءة بشكل كبير لورقة نباتية معينة على امتداد فترات زمنية قصيرة بسبب شدة الضوء المتغيرة ونقصان ضغط البخار، على سبيل المثال؛ وهذا يسبب صعوبات في التفريق بين تأثير العوامل البيئية عن تأثير الأنواع النباتية المختلفة. وللمقارنة، ينصح بالأخذ بالحساب حساب كفاءة استعمال الماء الآتية-الأصلية أي نسبة معدل الاصطناع الضوئي الصافي إلى الناقلية المسامية. وهذا يبعد من تأثير اختلافات الضغط البخاري في معدلات النتج. بما أن ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء يشتركان في مسار الانتشار الموضعي نفسه ولكن بمعدل انتشار للماء أسرع بـ 1.6 مرة من CO₂، فإن كفاءة استعمال الماء الأصلية تتعلق بتدرج CO₂.

يمكن التعبير عن كفاءة استعمال الماء WUE من خلال النظر إلى العلاقة بين عملية الاصطناع الضوئي (A) وعملية النتج (E).

$$\frac{\text{Photosynthesis}}{\text{Transpiration}} = \frac{C_i - C_a}{1.6v} = \frac{\text{Assimilation (mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ S}^{-2})}{E \text{ (mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{ S}^{-2})}$$

v: الفرق في تركيز بخار الماء بين داخل الخلية وخارجها.

1.6: معامل انتشار بخار الماء وجزيئات ثنائي أكسيد الكربون في الهواء، وهي نسبة الانتشار المولي لـ CO₂ إلى H₂O؛ أي (gCO₂ = gH₂O/1.6).

يمكن قياس كفاءة استعمال الماء بقياس كمية إنتاج المادة الجافة خلال الزمن منسوبة إلى كمية ماء النتج (كفاءة النتج transpiration efficiency) (TE)، أو من خلال قياس التبادل الغازي؛ أي كفاءة استعمال المياه الذاتية "الأصلية" WUE_i.

يمكن قياس WUE_i من خلال قياس النسبة بين قيمة تمثيل غاز CO₂ (A) إلى قيمة الناقلية المسامية (A/gs). ونظراً لتبعية النتج E لكل من الناقلية المسامية gs وانخفاض الضغط البخاري، فإنه من الممكن الإشارة أحياناً إلى قيمة A/gs على أنها الكفاءة الحقيقية لاستعمال الماء.

$$WUE_{intrinsic} = \frac{A}{g} = \frac{(C_i - C_a)}{1.6}$$

إن توظيف النظائر المستقرة للكربون مفيد لدراسة كفاءة استعمال الماء على نطاقات زمنية أطول. يعتمد ذلك على حقيقة أن إنزيمات الاصطناع الضوئي تميز ضد النظير المستقر الأثقل ^{13}C نسبة إلى ^{12}C أثناء عملية الاصطناع الضوئي، حيث يتم استنفاد ^{13}C في الأوراق مقارنةً بالغلاف الجوي ويعتمد مدى التمييز الإنزيمي تجاه ^{13}C على تركيز CO_2 الداخلي C_i ، فإذا كان C_i منخفضاً بالنسبة إلى C_a (الخارجي)، فإن الهواء الموجود داخل الورقة يصبح غنياً «مخصباً» بالنظير ^{13}C ، وتتناقص قدرة الإنزيم على التمييز. ونتيجة لذلك، سيتم تثبيت كميات أكبر من الكربون 13 مقارنة بالنباتات التي تقوم بعملية الاصطناع الضوئي بوجود قيم C_i أعلى.

اعتماداً على معادلة حساب التمييز النظيري Δ ، فإن قيمة $\Delta^{13}\text{C}$ تتناسب طردياً مع قيمة C_i/C_a وهي تتحدد بالعلاقة بين الاصطناع الضوئي A والناقلية المسامية؛ لذلك فإن $\Delta^{13}\text{C}$ هو مقياس لكفاءة استعمال المياه الذاتية WUE_i أو لفعالية النتج، ونسبة التمثيل A إلى النتج gs (A/gs) يمكن تقديرها على أنها WUE_i وفقاً للمعيار VPD:

التجزئة النظيرية بالانتشار
 $a = \text{‰}4.4$

$$\Delta = a + (b - a) \left(\frac{C_i}{C_a} \right)$$

التجزئة النظيرية الإنزيمية (rubisco)
 $b = \text{‰}27$

تركيز CO_2 داخل الخلية
تركيز CO_2 خارج الخلية

العلاقة بين التمييز النظيري للكربون وكفاءة استعمال الماء

Carbon Isotope Discrimination A measure of intrinsic Water-Use Efficiency

$$\Delta^{13}\text{C} = a + (b - a) (c_i/c_a)$$

$$\Delta^{13}\text{C} = 4.4 + (27 - 4.4) (c_i/c_a)$$

$$c_i/c_a = (\Delta^{13}\text{C} - 4.4) / 22.6$$

$$\text{WUE}_{\text{intrinsic}} = A/g_s = (c_i - c_a) / 1.6 = c_a (1 - c_i/c_a) / 1.6^*$$

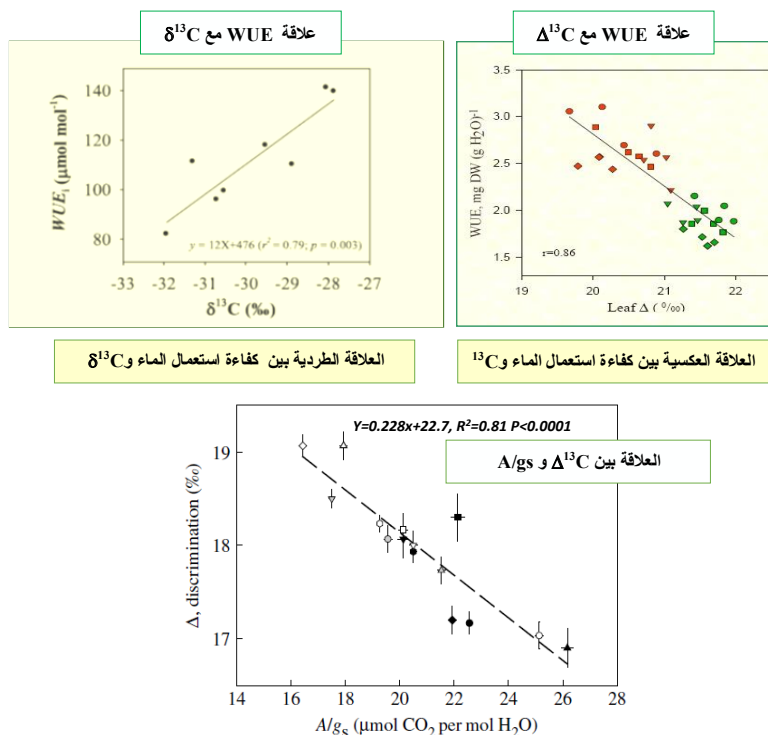
أو

$$\text{WUE}_{\text{intrinsic}} = A/g_s = c_a [1 - (c_i/c_a)] (0.625)^{**}$$

$a = 4.4$ (diffusion of CO_2); $b \approx 27$ (enzymatic fractionation), C_i internal CO_2 , C_a = ambient CO_2 (e.g., $330\text{--}360 \mu\text{mol mol}^{-1}$)

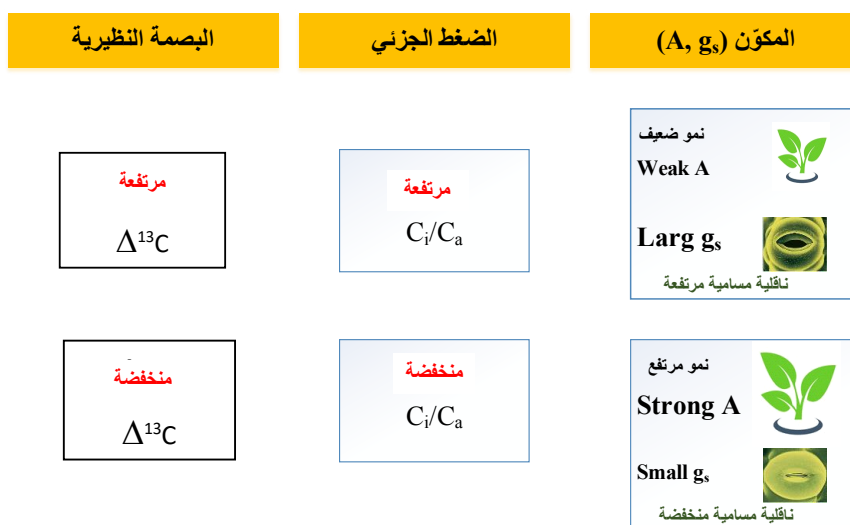
* القيمة 1.6 هي نسبة انتشار الماء وثاني أكسيد الكربون في الهواء.
** تشير القيمة 0.625 إلى العلاقة بين التوصيل المائي (conductance of H_2O) إلى التوصيل الغازي (conductance of CO_2) نظراً لارتفاع الوزن الجزيئي لغاز ثاني أكسيد الكربون ($0.625 \text{ gH}_2\text{O} = \text{gCO}_2$).

اعتماداً على ما سبق فإن قيمة $\Delta^{13}\text{C}$ مرتبطة مع WUE_i من خلال تأثير معدل تمثيل ثنائي أكسيد الكربون A والناقلية المسامية g_s على تركيز CO_2 داخل الخلية C_i . فعند انغلاق المسام، تنخفض قيمة الناقلية المسامية g_s ومن ثمّ تزداد بالتالي كفاءة استعمال الماء WUE_i مما يرفع من معدل تمثيل CO_2 (ارتفاع في قيمة A). ويحدث بالمقابل استهلاك CO_2 داخل الخلايا فينخفض تركيزه فيها ومن ثمّ يقل التمييز النظيري؛ لذلك فإن كفاءة استعمال الماء مرتبطة عكسياً مع قيمة التمييز النظيري $\Delta^{13}\text{C}$ وطردياً مع قيمة $\delta^{13}\text{C}$ (الشكل 11).

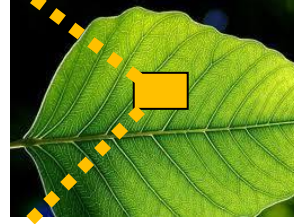
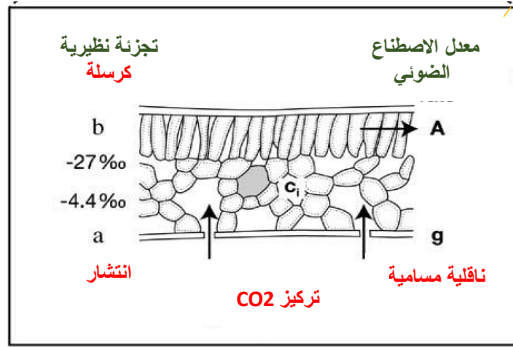


الشكل 11. العلاقات المتبادلة بين كفاءة استعمال الماء WUE و $\delta^{13}\text{C}$ و $\Delta^{13}\text{C}$.

ومن الجدير بالذكر تناول العديد من الدراسات علاقة الارتباط بين كفاءة استعمال الماء وقيمة Δ أو δ لمحاويل عديدة والتي أظهرت أن الاختلافات الوراثية في قيم ^{13}C يمكن أن تكون ذات أهمية كمعيارٍ للاستدلال عن كفاءة استعمال الماء. ويبين الشكل 12 العلاقة بين قيم $\Delta^{13}\text{C}$ والناقلية المسامية g_s والاصطناع الضوئي A ونسبة C_i/C_a عند انغلاق الثغور وانفتاحها.



الشكل 12. مخطط تمثيلي لتأثيرات الاصطناع الضوئي والناقلية المسامية في قيم C_i/C_a وبالتالي $\Delta^{13}\text{C}$.
A: Assimilation (تمثيل)؛ g_s : Stomata conductance (ناقلية مسامية)



$$\Delta^{13}\text{C} = a + (b-a) \cdot C_i/C_a$$

$$iWUE = A/g = C_a \cdot (1 - C_i/C_a) \cdot 0.625$$

$$C_i/C_a = (\Delta^{13}\text{C} - 4.4\text{‰}) / 22.6$$

$$C_i/C_a = (\delta^{13}\text{C}_{\text{plant}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{air}} + a) / (b-a)$$

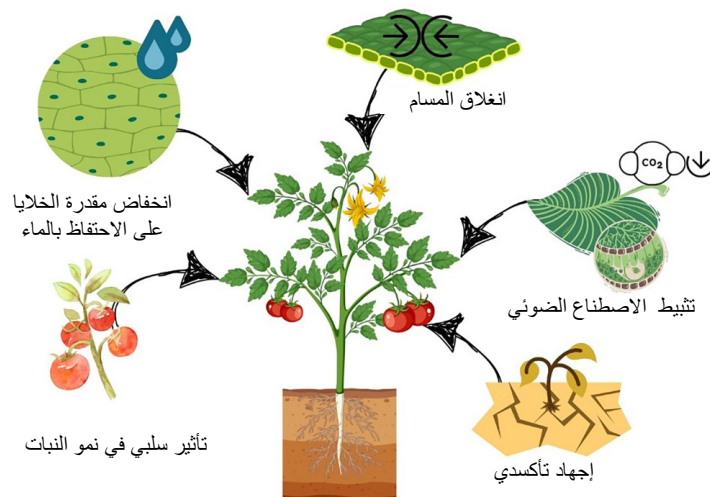
$$C_i = C_a [(\delta^{13}\text{C}_{\text{plant}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{air}} + a) / (b-a)]$$

نستنتج أن:
قيم $\Delta^{13}\text{C}$ و WUE_i
أو $\delta^{13}\text{C}$ متعلقة
بنسبة C_i/C_a

تجزئة نظائر الكربون والإجهادات اللاحيوية في الأنظمة الزراعية

انتقاء طرز وراثية متحملة للإجهاد المائي

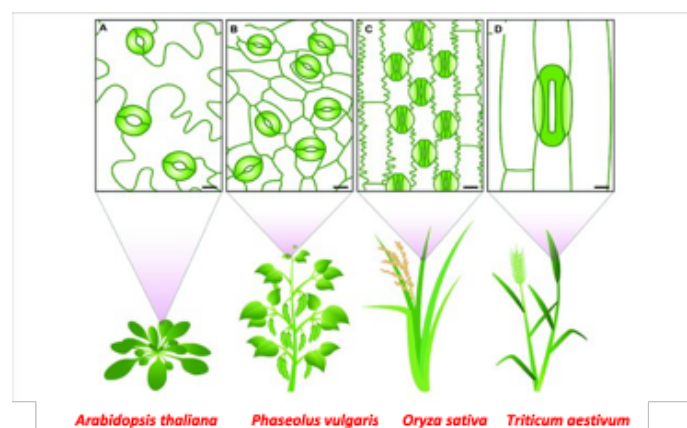
نادراً ما تتوافر الظروف البيئية المثلى لنمو النبات من الماء والهواء والتربة والعناصر الغذائية، بل غالباً ما يتعرض النبات أثناء نموه إلى أنواع مختلفة من الإجهادات الحيوية (آفات حشرية ومرضية) واللاحيوية (جفاف وملوحة وحرارة....). تبدي النباتات المتعرضة لإجهاد مائي استجابات مؤقتة لتنظيم حالتها المائية، وهذه الاستجابات هي ذات طبيعة فيزيولوجية ومورفولوجية. وتستجيب النباتات للإجهاد المائي بآليات تختلف مع النوع النباتي. إن التقليل من فقدان الماء، من خلال خفض معدل النتج عن طريق التنظيم الثغري، هي الآلية الرئيسة التي تسهم في الحفاظ على محتوى مائي داخلي كاف لضمان قدرة النبات على إعطاء إنتاج مقبول تحت ظروف الجفاف. ويخلص الشكل 22 التأثيرات الفيزيولوجية والشكلية للجفاف واستجابة لها النوع من الإجهاد اللاحيوي لها (الشكل 13).



الشكل 13. التأثيرات الفيزيولوجية والشكلية للجفاف في نمو النبات.

تؤدي ثغور الأوراق دوراً رئيسياً في التأثير على العديد من المظاهر الكيميائية-الحيوية المتعلقة بعملية الاصطناع الضوئي، فهي ترتبط بعملية تثبيت CO_2 والنتح، وهذا ينعكس على كفاءة استعمال الماء في إنتاج المادة الجافة. إن تحسين عملية فتح الثغور وإغلاقها والتحكم بها خلال فترة التعرض للإجهادات البيئية كالجفاف مثلاً يعدّ من الصفات الفيزيولوجية التي تخدم برامج تربية النبات، وخاصة في انتقاء أكثر الطرز الوراثية تحملاً لمثل هذا النوع من الإجهاد. من المعروف أن النباتات التي تتميز بكفاءة استعمال مرتفعة للماء تكون أكثر مقدرة على تحمل الجفاف من النباتات ذات الكفاءة المنخفضة في استعمال الماء.

من ناحية أخرى، يؤثر كل من كثافة الثغور وحجمها في حركة المسام وبالتالي في الناقلية المسامية gs ومعدل الاصطناع الضوئي A وكفاءة استعمال الماء WUE . ويتحكم بذلك عوامل وراثية تختلف باختلاف النوع النباتي. على سبيل المثال: يترافق صغر حجم المسام في نبات الأرابيدوبسيس مع تحسين في كفاءة استعمال الماء. وتتصف أصناف الرز بانخفاض SS بحيث تتمكن من خفض قيم gs ضمن الظروف الجافة. ويوضح الشكل 14 الشكل الكلي للخلايا الحارسة للثغور في نبات الأرابيدوبسيس A والفاصولياء B والشكل المضلع (باللون الأخضر الغامق) في النباتات العشبية كالرز C والقمح D ، حيث يلاحظ بوضوح الاختلافات في حجم الثغور وكثافتها. من ناحية أخرى، يبين الشكل 15 تغيرات في حالة المسام تبعاً لوجود الماء، كما يبين الشكل 16 حالة المسام تبعاً لكثافتها، وتأثير ذلك في كفاءة استعمال الماء.

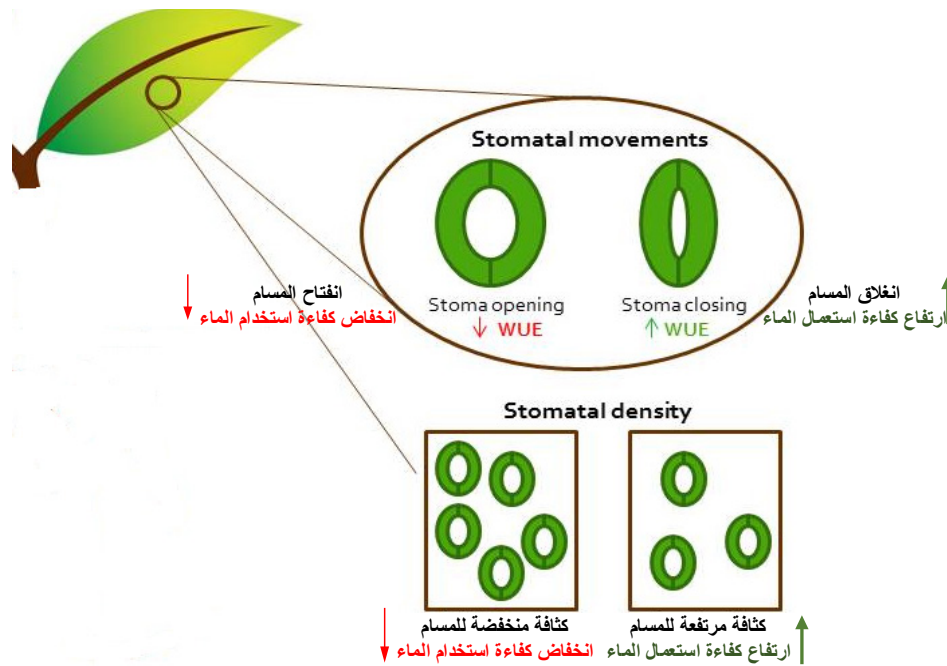


الشكل 14. الاختلافات في حجم الثغور وكثافتها وشكل الخلايا الحارسة لها في نباتات الأرابيدوبسيس A والفاصولياء B و الرز C والقمح D (المقياس 10 μm)، (Bertolino et al., 2019).

تستعمل تقنية $\delta^{13}C$ للتمييز بين الطرز الوراثية المختلفة في العديد من الأنواع النباتية ذات الطراز $C3$. وتعكس قيمة $\delta^{13}C$ رئيسياً المدى الذي يكون من خلاله التمثيل الأولي لغاز ثنائي أكسيد الكربون مقصوراً على عملية الأكسدة الإنزيمية له (الكرسلة) أو/ وعلى انتشاره في الأوراق. ومن الجدير بالذكر أن قيمة $\delta^{13}C$ في كامل النبات تعبر عن مجمل هذه العمليات. ويمكن أن تؤدي العمليات المسؤولة عن توزيع المنتجات الأولية للتمثيل الضوئي ضمن أجزاء النبات المختلفة إلى حدوث اختلافات في قيم $\delta^{13}C$ بين هذه الأجزاء. وتسبب الإجهادات البيئية كالجفاف إلى تغيير في قيم $\delta^{13}C$ نتيجة التأثيرات في التوازن بين عمليتي الأكسدة الإنزيمية والناقلية المسامية لغاز CO_2 . تتصف الطرز الوراثية للنباتات الأكثر تحملاً للجفاف، عموماً، بقيم $\delta^{13}C$ أكثر سلباً من الطرز الأقل تحملاً للجفاف، وخاصة في الأوراق.



الشكل 15. مقارنة بين حالتي المسام عند الإجهاد المائي والري الجيد.



الشكل 16. العلاقة بين كثافة المسام وحالته وكفاءة استعمال الماء WUE.

إن تطوير أصناف نباتية متحملة للجفاف في ظل شح الموارد المائية المناسبة للري يعد مطلباً رئيساً في برامج تربية النبات. في هذا الصدد، أجري العديد من الأبحاث، وبذل الكثير من الجهود، لانتقاء طرز وراثية تتمتع بإنتاجية مرتفعة وكفاءة عالية لاستعمال الماء ضمن ظروف مجهدّة مائية، وذلك استناداً إلى معايير شكلية وفيزيولوجية. استعملت طريقة التمييز النظيري للكربون ($\Delta^{13}C$) إضافة إلى طرائق تقليدية للتربية، بكثافة، كمؤشر على كفاءة استعمال الماء WUE، في عمليات التحسين الوراثي في المحاصيل ذات المسار الاستقلابي C3. واستعملت العلاقة العكسية بينهما ($\Delta^{13}C$ و WUE) لانتقاء غير مباشر طرز وراثية ذات كفاءة استعمال مرتفعة من الماء في بيئات محددة، فقد لوحظت تباينات وراثية واضحة في قيم $\Delta^{13}C$ في محاصيل عديدة. تعمل النباتات ذات المسار التمثيلي C3 على تمييز الكربون الثقيل ^{13}C ؛ مما يؤدي إلى نقصه في النبات. ترتبط قيم التمييز النظيري للكربون $\Delta^{13}C$ إيجابياً مع نسبة C_3/C_a ، ولذا تسهم في الحصول على قياس متكامل لفعالية الاصطناع الضوئي من حيث الاستجابة للظروف البيئية خلال دورة حياة النبات. أظهرت قيم التمييز النظيري $\Delta^{13}C$ ، في العديد من الأنواع النباتية المدروسة، علاقة ارتباط سلبية مع كفاءة استعمال الماء. كما أنها مرتبطة مع إنتاج المادة الجافة وكذلك مع كفاءة تثبيت الأزوت الجوي في النباتات البقولية.

العلاقة بين التمييز النظيري للكربون والملوحة

تتشكل الترب الملحية نتيجة لعمليات طبيعية أو من خلال النشاطات البشرية والاستغلال غير المستدام للأراضي الزراعية، وتنتشر الأراضي المتأثرة بالملوحة انتشاراً واسعاً في المناطق الجافة وشبه الجافة؛ لأن معدلات التبخر في هذه المناطق تفوق كثيراً كميات الهطول مما يؤدي إلى تجمع الأملاح بالقرب من سطح التربة بعد جفافها. كما تنتشر الأراضي المملحة الناتجة من النشاطات البشرية، وخاصة الري غير المستدام، في المناطق الزراعية الجافة وشبه الجافة. تقع الأراضي المملحة عموماً في مجموعتين، هما: الأراضي الملحية التي تشكلت بفعل العوامل الطبيعية كالسبخات والأراضي المحيطة بالبحيرات المالحة والترب والمستنقعات المجاورة لشاطئ البحر والأراضي الزراعية المملحة بفعل النشاطات البشرية وخاصة الري غير الرشيد. يعود السبب في انخفاض نمو النباتات المعرضة إلى إجهاد ملحي إلى جملة من العوامل الفيزيولوجية كتغير في التوازن الأيوني، وحالة الماء في التربة، والتغذية المعدنية، والسلوك المسامي وفعالية الاصطناع الضوئي، فضلاً عن تموضع الكربون في النبات واستعماله. ينخفض معدل الاصطناع الضوئي في النباتات عموماً نتيجة الإجهاد الملحي. ويحدث ذلك من جراء انخفاض في الناقلية المسامية، وبالتالي محدودية إتاحة غاز ثاني أكسيد الكربون لإنجاز عملية الكرسل. يمكن أن تثبط عملية الاصطناع الضوئي بتأثير الملح أيضاً بمعزل عن التأثير المسامي، حيث تنخفض فعالية إنزيم RuBP Carboxylase وانخفاض المقدرة على إعادة تشكيله مجدداً.

يعد انخفاض قيم التمييز النظيري $\Delta^{13}\text{C}$ مؤشراً إلى ارتفاع في كفاءة استعمال الماء WUE في نباتات C3؛ نظراً لأن العلاقة بين $\Delta^{13}\text{C}$ و WUE هي علاقة عكسية. لوحظ انخفاض في قيم $\Delta^{13}\text{C}$ لدى العديد من الأنواع النباتية المتعرضة إلى إجهاد ملحي في عدد من المحاصيل الاقتصادية. ونظراً لوجود بعض التشابه بين تأثير الإجهاد الملحي والجفاف في نمو النباتات، فإن عدداً قليلاً من الدراسات تناول تأثير الإجهادين معاً على قيم $\Delta^{13}\text{C}$ وتوظيفها لانتقاء أصناف عالية الإنتاج. كما بينت الدراسات وجود ارتباط بين قيم $\Delta^{13}\text{C}$ ودرجة التحمل للملوحة في سويات متباينة من الملوحة ضمن نظم ري مختلفة، وبالتالي يمكن الاستفادة من هذه التقنية في انتقاء طرز وراثية نباتية أكثر تحملاً للملوحة والجفاف ضمن برامج التربية.

الاستنتاجات

يسهم تحديد نسب نظائر الكربون المستقرة في النباتات في إعطاء رؤى عن العمليات الفيزيولوجية والتفاعلات بين النباتات والبيئة. إن استمرارية البحوث المتعلقة بتأثير العوامل البيئية والفيزيولوجية في قيم التمييز النظيري للكربون $\Delta^{13}\text{C}$ سيزيد من إمكانية التعمق في معرفة دورها في نمو النبات؛ حيث ينبغي أن تقع أولوية الأبحاث في مجال فهم الآليات المسؤولة عن التنسيق والموازنة بين عملية الاصطناع الضوئي والناقلية المسامية؛ إذ تعكس قيم $\Delta^{13}\text{C}$ استجابة العمليات الفيزيولوجية تجاه البيئة المحيطة، فالإجهاد البيئي يمكن أن يعدل من قيمة $\Delta^{13}\text{C}$ نتيجة التأثير في التوازن بين عمليتي الكرسة والناقلية المسامية، وهذا له أهمية في انتخاب نباتات ذات كفاءة مرتفعة في استخدام المياه مع قدرة عالية على الاصطناع الضوئي.

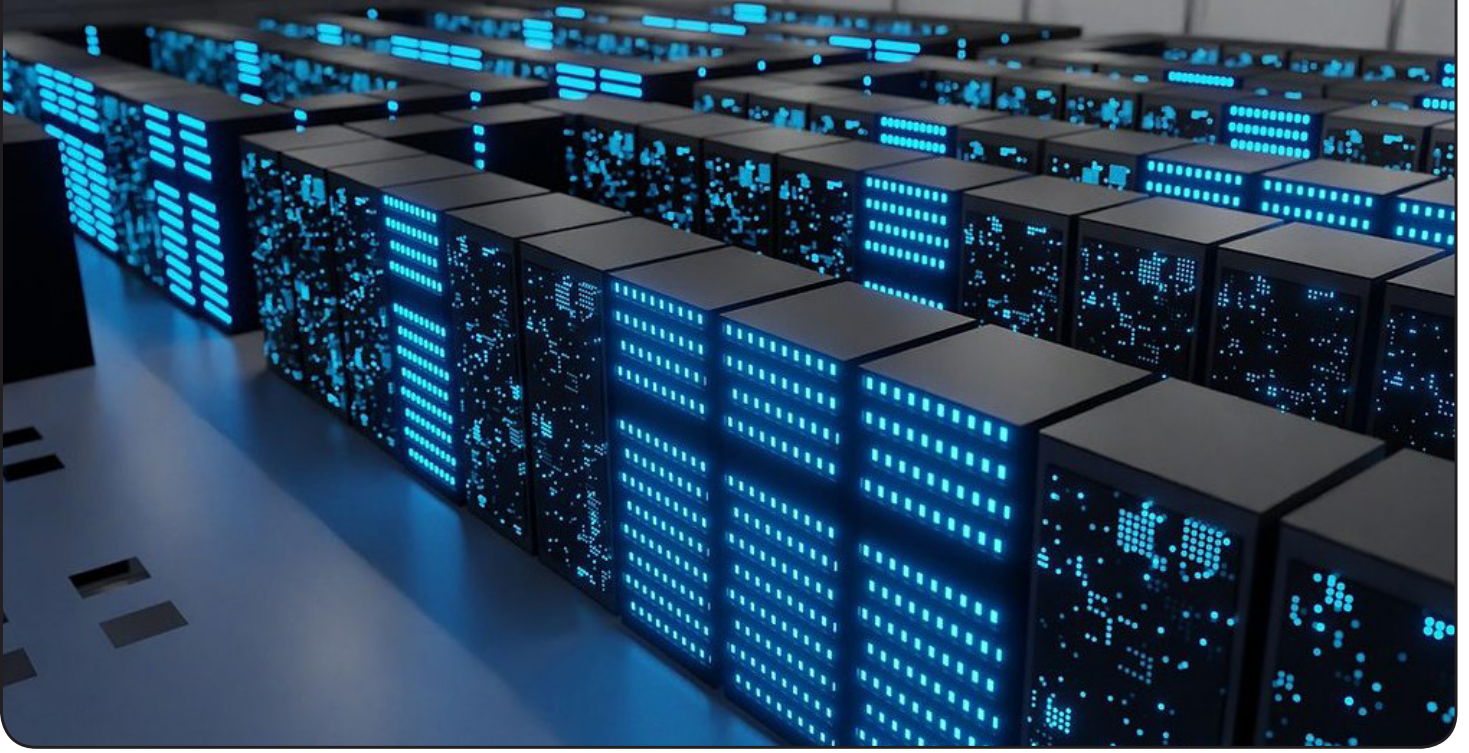
تؤثر العوامل البيئية واتباع بعض العمليات الزراعية في انفتاح المسام وانغلاقها وفي عملية الكرسة وبالتالي في كمية ^{13}C في الأنسجة النباتية. إن تحديد قيم التمييز للكربون $\Delta^{13}\text{C}$ في المحاصيل الاقتصادية خاصة التابعة للمسار C3 كالقمح والشعير والحمص وغيرها يعد وسيلة مهمة للاستدلال عن كفاءة استعمال الماء مما يساعد مربّي النباتات، إضافة إلى توظيف الطرائق الزراعية والفيزيولوجية في انتقاء طرز وراثية ذات كفاءة مرتفعة لاستعمال الماء وذات انتاج جيد ضمن ظروف الزراعة البعلية والمروية أو في الترب المتأثرة بالملوحة. إضافة إلى ذلك يعدّ قياس $\Delta^{13}\text{C}$ مؤشراً مناسباً لتقييم الاختلافات الناجمة عن العمليات الزراعية والإجهاد المائي بما يتعلق بالنمو وتثبيت الآزوت الجوي في البقوليات. وهناك حاجة إلى مزيد من الدراسات الحقلية التي توظف الاختلافات في قيم الوفرة الطبيعية بالنظيرين ^{15}N و ^{13}C لتبيان دور العمليات الزراعية في نمو المحاصيل الزراعية وإنتاجها ضمن الظروف البيئية المختلفة.

مراجع للاستزادة

- [1] Bachiri A, Djebbar R, Mekliche A, Djenadi C, Ghanim AMA (2018). Carbon isotope discrimination as physiological marker to select tolerant wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) under water limited conditions. American Journal of Plant Physiology 13(1):1-7. <https://scialert.net/abstract/?doi=ajpp.2018.1.7>
- [2] Bertolino L T., Caine R S and GrayJ E (2019). Impact of Stomatal Density and Morphology on Water-Use Efficiency in a Changing World. Front. Plant Sci. 10:225. doi: 10.3389/fpls.2019.00225
- [3] Blaser B. and Conard R (2016). Stable carbon isotope fractionation as tracer of carbon cycling in anoxic soil ecosystems. Current Opinion in Biotechnology 41,122-129. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.07.001>
- [4] Cernusak A L, Ubierna N, Winter K, Holtum J A M, Marshall J D and Farquhar G D (2013). Environmental and physiological determinants of carbon isotope discrimination in terrestrial plants. New Phytologist. doi: 10.1111/nph.12423.
- [5] Condon AG, Farquhar GD, Rebetzke GJ, Richards RA (2006). The Application of carbon isotope discrimination in cereal improvement for water-limited environments. In: Drought Adaptation in Cereal. The Haworth Press, Inc.pp.171-219. biology.anu.edu.au/CMS/FileUploads/file/.../226CondonCerealImprovement.pdf

- [6] Farquhar GD, Ehleringer JR and Hubick KT (1989). Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Ann. Rev. Plant Physiol. Mol. Biol.* 40: 503-537. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.40.060189.002443>
- [7] Hussain M I & Al-Dakheel A J (2018). Effect of salinity stress on phenotypic plasticity, yield stability, and signature of stable isotopes of carbon and nitrogen in safflower. *Environ Sci Pollut Res.*, 25(24), 23685–23694. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2442-z>
- [8] Hussain MI, Al-Dakheel AJ and Reigosa MJ (2018). Genotypic differences in agro-physiological, biochemical and isotopic responses to salinity stress in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) plants: Prospects for salinity tolerance and yield stability. *Plant Physiology and Biochemistry* 129: 411–420. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.06.023>
- [9] Kurdali F., Al-Ain F and Al-Chammaa M (2018). Evaluation of water stress tolerance in advanced breeding lines of durum and bread wheat using ^{13}C . *J. Stress Pysiol. & Bioche* 2:5-18.
- [10] Munjonji L, Ayisi KK, Vandewalle B, Haesaert G, Boeckx P (2017). Carbon Isotope Discrimination as a Surrogate of Grain Yield in Drought Stressed Triticale. In: Leal Filho W, Belay S, Kalangu J, Menas W, Munishi P, Musiyiwa K (eds). *Climate Change Adaptation in Africa. Climate Change Management*. Springer, Cham . https://doi.org/10.1007/978-3-319-49520-0_37

◀ تأليف: د. فواز كرد علي، مكتب التأليف والترجمة والنشر، هيئة الطاقة الذرية السورية.



نظام تحصيل البيانات في تجارب الفيزياء النووية

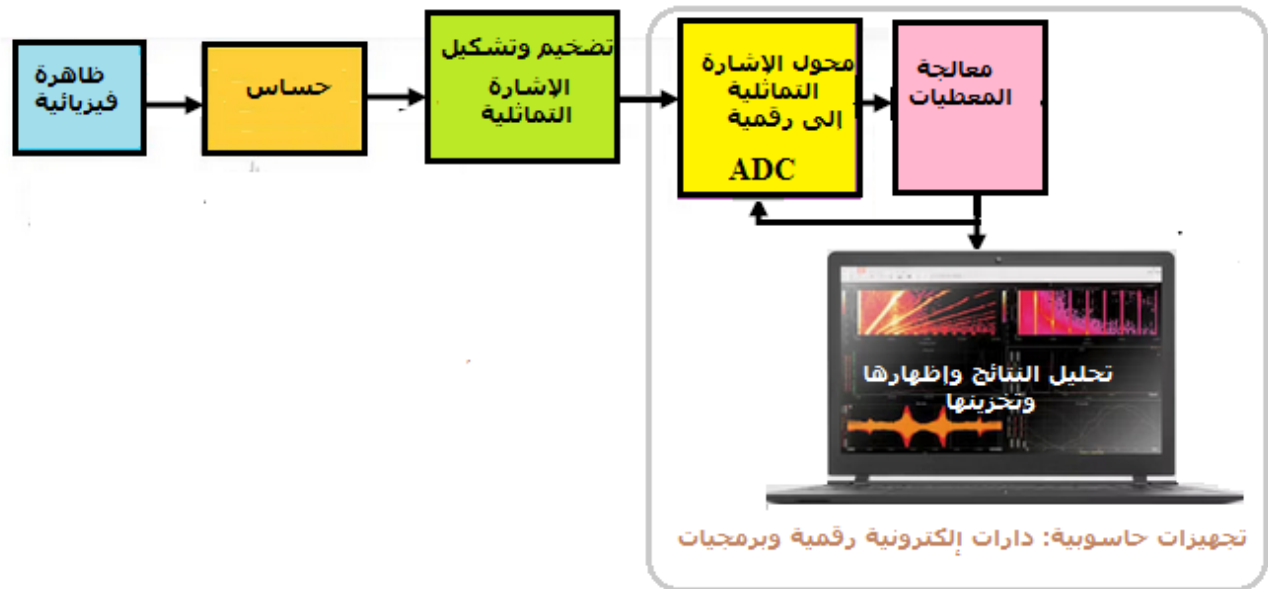
ملخص

في قياسات الظواهر الفيزيائية التي تتم بواسطة حساسات والتي تعطي عند مخرجها إشارات كهربائية، يعدّ نظام تحصيل البيانات data acquisition-DAQ صلة الوصل بين هذه الحساسات وبين منظومة الحواسيب والمعالجات الرقمية التي تؤمن المعالجة والتخزين والتحليل والإظهار للقياسات المطلوبة. وبالتالي يؤمّن مثل هذا النظام توافقاً بين هاتين الجهتين، وينجز معالجة أولية للبيانات تخفف من تدفق البيانات الكبير الذي عادة ما يحصل في التجارب الضخمة إلى منظومة الحواسيب، وذلك برفض البيانات التي تصنف أقل أهمية والتقليل من كمية البيانات المفيدة التي يمكن أن تُفقد أثناء التحصيل، وبالتالي تزيد من سرعة عملية التحصيل ودقتها. وهذا ما يحصل بشكل خاص في منشآت وتجارب الفيزياء النووية الضخمة كالمسرعات التي تعطي تدفقاً هائلاً من البيانات، التي يجب أن تُعالج وتُصنّف وتُرشح أولاً قبل إرسالها إلى التخزين في ذواكر ضخمة من أجل مزيد من التحليل لاحقاً بعد إيقاف التجربة off-line.

الكلمات المفتاحية: تحصيل البيانات، حساسات، منظومات القدر، فيزياء نووية.

هدف نظام تحصيل البيانات ومكوناته

بهدف الحصول على معلومات عن تجربة أو ظاهرة فيزيائية معينة توصل هذه التجربة بشكل مباشر مع الحساسات التي تحول القيم الفيزيائية الناتجة عن هذه التجربة إلى إشارات كهربائية تماثلية analogue signals حاملة المعلومات الأساسية عن هذه الظاهرة. يجب إدخال هذه الإشارات إلى تجهيزات مثل الحواسيب والمعالجات ووحدات التخزين (الذاكر)، وذلك من أجل قياس المقادير التي تحملها الإشارات عن هذه الظاهرة وحسابها. وهذا لا يتم مباشرة، ولكن يتم بواسطة نظام يقوم بتوافق جيد بين الإشارات الأولية وتجهيزات معالجتها واستخلاص النتائج منها، وهذا النظام يسمى نظام تحصيل البيانات. يقوم هذا النظام بداية بتضخيم الإشارات الأولية (التمثيلية) وتشكيلها بالشكل المناسب وتقليل الضجيج المترافق معها لتصبح قابلة للقياس والمعالجة وهو ما يسمى بـ signals shaping، وبعد ذلك يحولها إلى إشارة رقمية digital signal وهي نبضات كهربائية تنتقل بين مستويين يطلق على كل منها بت bit والتي تسمى بيانات data وهي التي يتم قياسها ومعالجتها بواسطة دارات معالجات رقمية، ومن ثم تحليلها واستخلاص قيم المقادير الفيزيائية المطلوبة. وكأمثلة عن الظواهر الفيزيائية التي يمكن تحصيلها وقياسها: المقادير الكهربائية مثل التيار، والجهد، والشحنات، وتردد الإشارات، ومقادير أخرى مثل الضغط، ودرجة الحرارة، والمسافة، والاهتزاز، والوزن، وغيرها. إذاً يتكون نظام التحصيل في التجارب الفيزيائية الصغيرة الموجودة في المخبر العادية كما يبين المخطط الصندوقي في الشكل 1 من الأجزاء التالية: مضخم أولي للإشارة التماثلية القادمة من الحساس ويتبعه مضخم رئيسي ومن ثم تدخل الإشارة التماثلية المضخمة إلى محول الإشارة من تماثلية إلى رقمية analogue to digital convertor-ADC الذي يحول مطال الإشارة التماثلية إلى قيمة رقمية، وأخيراً تدخل البيانات الرقمية إلى وحدة المعالجة والتحليل والتخزين وإظهار النتائج التي تتضمن تجهيزات رقمية صلبة وبرمجيات تكون غالباً ضمن جهاز حاسوب. يعد المحول ADC جزءاً مهماً في دارات التحصيل؛ حيث يملك مدخلين أحدهما للإشارة التماثلية والآخر لإشارة تحكم منطقية تأمره بالبدء في عملية التحويل أو الانتهاء منها، إضافة طبعاً إلى المخرج الذي يحوي البيانات الرقمية. يصنف النظام المبين في الشكل 1 بأنه ذو قناة تحصيل واحدة لأنه مرتبط بحساس واحد، أما في التجارب الكبيرة فنحتاج إلى عدد أكبر من الحساسات قد تصل إلى الآلاف وبالتالي تكون مرتبطة بعدد مماثل من قنوات التحصيل التي تعطي عند مخرجها مجتمعة تدفقاً هائلاً من البيانات.

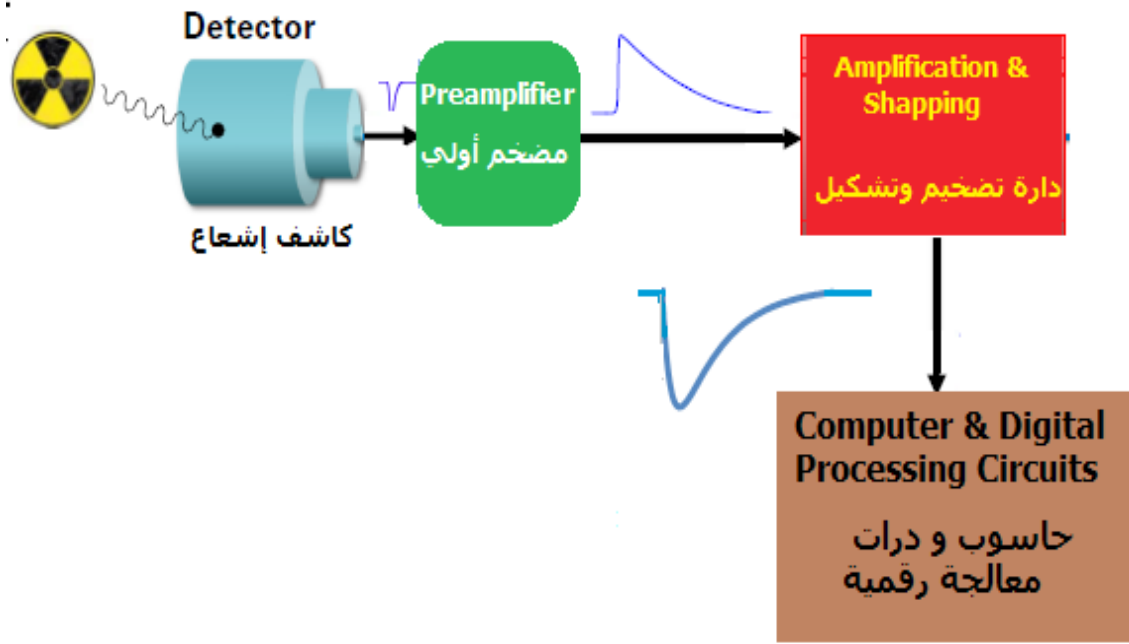


الشكل 1. مخطط صندوقي لقناة تحصيل بيانات تجربة فيزيائية مخبرية.

تُستخدم أنظمة التحصيل في تطبيقات عديدة مثل الأتمتة الصناعية ومراقبة البيئة والبحث العلمي والتشخيص الطبي. فهي تضمن دقة البيانات وموثوقيتها، مما يُمكن المؤسسات من اتخاذ قرارات مدروسة والتحكم في العمليات ومراقبة المعايير الأساسية، وتُعد أدوات متعددة الاستخدامات تُسهّل خلالها عملية تحليل البيانات الرقمية للحصول على قياسات موثوقة.

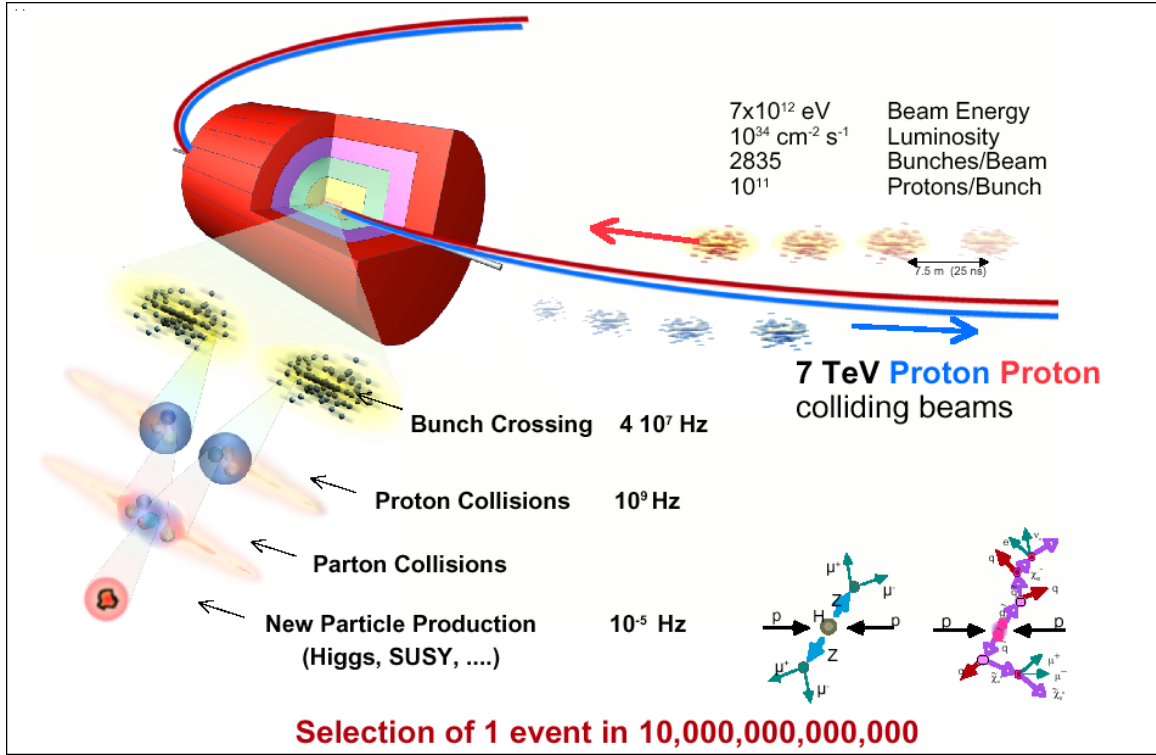
تحصيل البيانات في تجارب الفيزياء النووية

يحصل عموماً في مثل هذه التجارب تفاعلاً نووياً بين إشعاع نووي ومادة ما (تشكل الهدف) في حجرة أو مكان التفاعل. تلتقط كواشف الإشعاع الموجودة حول الهدف الإشعاعات والجسيمات الناجمة عن التفاعل وتحولها إلى إشارات كهربائية. يتكون نظام التحصيل في التجارب المخبرية عادة من قناة أو قناتين، ويكون الهدف من التجربة إما قياس طيف طاقة الإشعاع وتدفقه ونوعه أو دراسة مكونات الهدف. يبين الشكل 2 مخططاً صندوقياً مبسطاً لقناة تحصيل نووية تستخدم في التجارب المخبرية، حيث تُضخم الإشارة القادمة من كاشف الإشعاع بواسطة مضخم أولي وبعدها تضخم مرة ثانية لإعطائها الشكل وقيمة المطال المناسبين لإدخالها إلى الدارات الرقمية مثل المحول ADC، مع ملاحظة أن مطال هذه الإشارة يكون معكوس القطبية بالنسبة لإشارة الدخل، وبعد ذلك يتم إجراء القياس وتحليل النتائج وإظهارها من قبل وحدة المعالجة المركزية للحاسوب وغيرها من الدارات الموجودة ضمن الحاسوب.



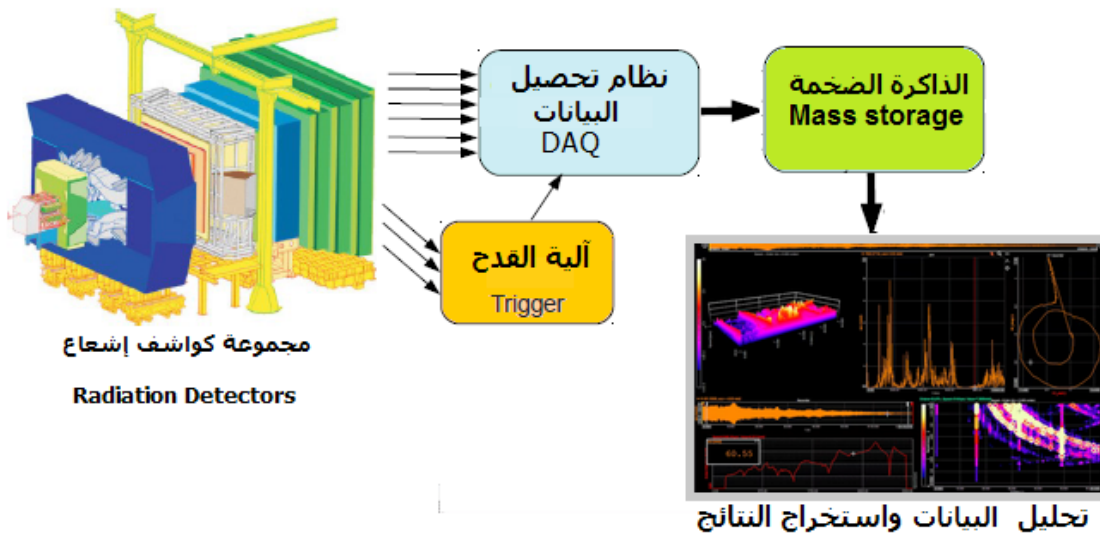
الشكل 2. مخطط صندوقي لنظام تحصيل بيانات كشف إشعاع نووي في المخبر.

أما في التجارب النووية الضخمة فيمكن أن توجد آلاف الأقنية المتصلة بعدد مماثل من كواشف الإشعاع ذات الأنواع والحجوم المختلفة، ويمكن أن تدوم التجربة ساعات أو أياماً أو أشهراً. حيث يستقبل نظام تحصيل البيانات عدداً كبيراً جداً من الإشارات القادمة من الكواشف، وتطلق مصطلحات مثل هذه الأنظمة على المجموعة الكاملة من الإشارات الناجمة عن تفاعل نووي واحد بالحادثة event، ويمكن أن يكون هناك آلاف إلى ملايين الحوادث التي تحدث بشكل عشوائي وتحصل في الثانية الواحدة، وهي تكون بأحجام مختلفة من حيث عدد البيانات، وقد يكون عدد قليل منها مثيراً للاهتمام أو مطلوباً بقياسه والحصول على معلومات عنه. وكمثال على ذلك ما يحصل في مسرعات الجسيمات الضخمة حيث تتصادم جسيمات مسرعة تدور في اتجاهين متعاكسين مع بعضها داخل المسرع. تُعد هذه التصادمات بالغة الأهمية لدراسة الجسيمات والقوى الأساسية من خلال التفاعلات النووية. لا تُرسل هذه المُسرَّعات حزمًا إشعاعية مستمرة من الجسيمات، بل تُجمَع الجسيمات في حزم bunches قصيرة وكثيفة، ويحصل التصادم بينها بسرعة تُقارب سرعة الضوء، ويطلق على كل تصادم تقاطع الحزم bunches crossing. وكمثال على هذه المسرعات: مصادم الهدرونات الكبير (Large Hadron Collisions-LHC) في مركز الأبحاث الأوروبي CERN، وهو مصادم بروتون-بروتون باستطاعة تصل إلى 13 TeV، وبتردد تقاطع الحزم يبلغ 40 ميغاهرتز، ومعدل تدفق إشعاع luminosity يبلغ $10^{34}/\text{sec.cm}^2$ ، ويُنتج في المتوسط 18 تصادمًا في كل عبور حزمة. تعطي الحوادث الناجمة عن تفاعلات المسرع معدل بيانات يقدر بـ 100 Tetra Bytes/sec. يبين الشكل 3 رسماً توضيحياً عن أحد تجارب هذا المصادم مع بيان الحزم الرئيسية والبيانات المتعلقة بها.



الشكل 3. رسم توضيحي عن أحد تجارب المصادم LHC مع بيان حزم الجسيمات الرئيسية الناجمة عن تصادم البروتونات المسرعة وتردد تقاطع الحزم بال Hz.

إذاً: في مثل هذه التجارب الضخمة حيث يكون الوسط معقداً جداً يجب أن تكون أنظمة تحصيل البيانات سريعة الاستجابة ومرنة لكي تتمكن من استيعاب هذا الكم الكبير من البيانات وتنسيقها واختيار المرغوب منها وتخزينها داخل ذاكرة كبيرة عند مخرج نظام التحصيل من أجل تحليلها بواسطة أنظمة حواسيب ومعالجاتها فيما بعد. يبين الشكل 4 مخططاً صندوقياً مبسطاً لمثل هذه الأنظمة وهو يختلف عن قناة التحصيل المبينة في الشكل 2 بوجود تجهيزات إضافية، ومن أهمها تلك التي تتحكم بتدفق البيانات داخل نظام التحصيل؛ وهي عبارة عن آلية تسمى القدرح triggering mechanism ومهمتها تقنين تدفق البيانات، حيث يتم إلغاء البيانات التي لا تتوافق مع المعايير الموضوعة للتحصيل من بين العدد الهائل الناجم عن الحوادث وذلك لعدة أسباب منها صعوبة تخزين هذا العدد الهائل من البيانات، أو أن يكون مصدر هذه الحوادث ناجماً عن ضجيج إلكتروني أو تداخل كهرومغناطيسي أو حوادث غير مرغوبة للتحصيل ضمن الهدف المحدد للقياس؛ أي باختصار اختيار الحوادث المرشحة للتحصيل.



الشكل 4. مخطط صندوقي لمكونات التجهيزات والأجزاء الموجودة حول نظام تحصيل بيانات يُستخدم في تجارب الفيزياء النووية.

إضافة إلى ما ذكرناه فإن أنظمة التحصيل الكبيرة تحوي أجزاء أخرى مساعدة في عملية التحصيل ترتبط بالأجزاء الرئيسة، وهي:

- **وحدات التحكم:** وهي تضمن إدارة آلية جمع البيانات والإشراف على تشغيلها ومزامنتها مع بقية وحدات التحصيل.
- **البرمجيات:** تسمح للمستخدمين بتشكيل البيانات data formation التي يجمعها النظام ومراقبتها وتحليلها.
- **بروتوكولات الاتصال:** تؤمن إرسال البيانات واستقبالها بين النظام من جهة وأجهزة أو شبكات خارجية من جهة أخرى.
- **وحدات التخزين:** وتستخدم لتخزين البيانات المسجلة، حيث تتوفر مجموعة من الخيارات، بما في ذلك بطاقات الذاكرة، أو محركات الأقراص الصلبة، أو التخزين الضبابي cloud storage. وهذا يؤمن حلول تخزين مؤقتة ودائمة.
- **واجهة المستخدم user interface:** تسمح للمستخدمين بالتفاعل مع نظام التحصيل وجمع البيانات والتحكم فيه بشكل فعال.
- **وحدات المعايرة:** وتستخدم من أجل ضمان الدقة، حيث تتم معايرة الحساسات والنظام بشكل دوري وفقاً للمعايير المعروفة.
- **ساعة الوقت الحقيقي:** وظيفتها الحفاظ على التوقيت الدقيق لضمان الحصول على البيانات المتزامنة وختم الوقت time stamping.
- **آليات ضغط البيانات:** يتم ذلك من أجل التقليل من حجم البيانات المبيعة للتخزين والنقل في التطبيقات البعيدة remote أو ذات الموارد المحدودة.

- **وحدات التغذية الكهربائية:** توفر الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل مختلف أجزاء نظام التحصيل والحساسات.
- **خطوط وشبكات نقل البيانات:** تستخدم خطوط نقل عيارية مجمعة ضمن مجموعات يطلق على كل منها باص bus لنقل البيانات بين التجهيزات القريبة من بعضها نسبياً، أما عندما تكون هذه التجهيزات عديدة ومتباعدة فيتم استخدام تكنولوجيا الشبكات مثل ethernet التي تستعمل غالباً الألياف الضوئية.

بناءً على ما سبق يمكن تلخيص عمل منظومة تحصيل البيانات بالنقاط التالية:

- نقل البيانات من الكاشف إلى الذواكر الضخمة.
- تكوين التجارب وتنظيمها والتحكم بها.
- مراقبة تدفق البيانات وأجهزة الكشف والدارات المرافقة وإبلاغ المشغل بالمشاكل.
- تشكيل وبناء الحوادث events building بالشكل المطلوب من التجربة ومن ثم قياسها وتحليلها أحياناً في الزمن الحقيقي وغالباً بعد الانتهاء من التحصيل.

منظومة القذح

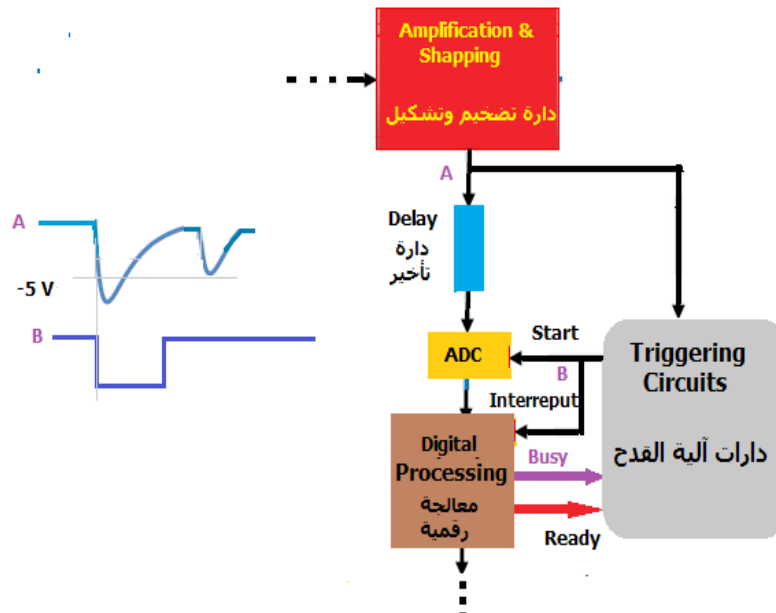
وهي تشكل جزءاً مهماً من نظام تحصيل البيانات وتؤمن البدء في التقاط البيانات بناءً على حوادث مرجعية أو شروط محددة مسبقاً مطابقة للخيارات النظرية الموضوعية. ففي تجارب المصادمات العملاقة، يكون القذح مسؤولاً عن الاختيار في الوقت الحقيقي لمجموعة البيانات الفرعية subset المراد تسجيلها، حيث تكون قيمة تدفق الحوادث مرتفعة للغاية ولا يمكن معالجتها وتسجيلها بالكامل في الزمن الحقيقي باستخدام التقنيات الحالية، وبالتالي يكون من الضروري خفض هذا التدفق بنسبة كبيرة جداً. ففي مثال المصادم LHC تصل الأمور أحياناً إلى اختيار حادثة واحدة من بين 10^{13} حادثة أي تكون نسبة الرفض حوالي 99.998%، ويعرض الجدول 1 أمثلة عن معدل تدفق الجسيمات في بعض التجارب وتردد القذح الذي يتناسب مع معدل التدفق النهائي للجسيمات التي تم تحصيلها وتخزينها، حيث نلاحظ الفرق الكبير بينهما.

	Bunch Crossing Rate (a)	Trigger Rate Output (b)
LEP	45 kHz	~ 5 Hz
Tevatron	2.5 MHz	~ 50-100 Hz
HERA	10 MHz	~ 5 Hz
LHC	40 MHz	~ 100-200 Hz

الجدول 1. أمثلة عن معدل تدفق الجسيمات (a) في بعض التجارب وتردد القذح (b) الذي يتناسب مع معدل التدفق النهائي للجسيمات التي تم تحصيلها وتخزينها.

تتكون منظومة القذح من دارات إلكترونية وبرمجيات مترافقة معها، وكلما زاد التقدم الإلكتروني في هذا المجال، حصلنا على نظام قذح يستطيع انتخا ب البيانات المطلوبة بدقة. سنعرض مثالين عن دارات قذح بسيطة:

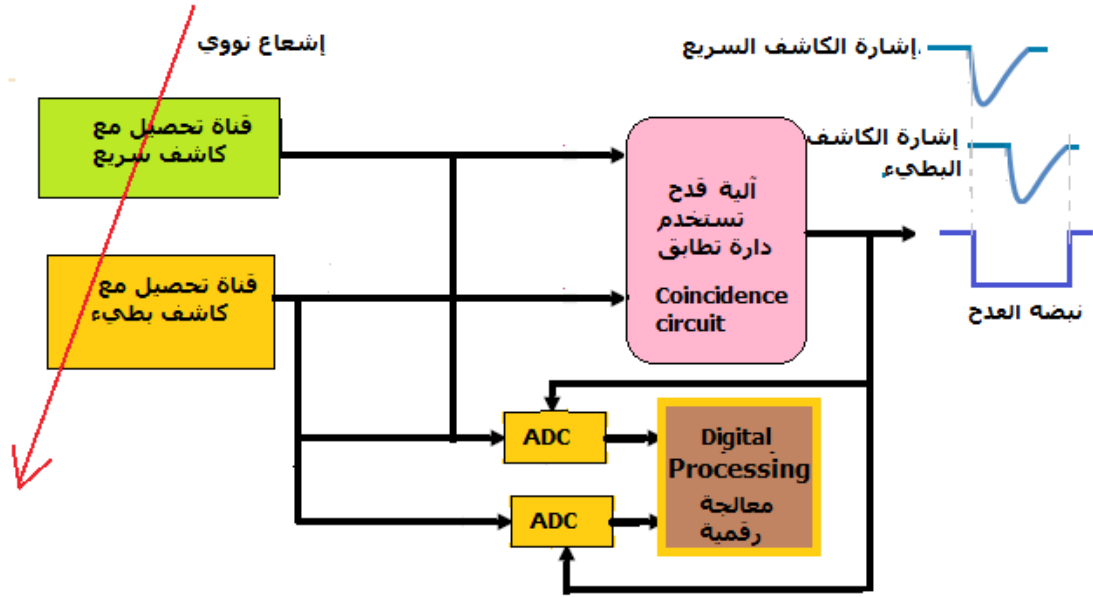
● **معي ار القذح هو تحصيل الإشارات عند قيمة ما لمطالها:** يبين الشكل 5 مخططاً لهذه الدارة، حيث تدخل الإشارة التي يجب أن تقاس والآتية من خرج دارة التضخيم (الإشارة A) إلى مدخل دارة القذح ومدخل بيانات المحول ADC (عبر دارة تأخير سن فصل دورها لاحقاً)؛ فإذا فرضنا أن المعيار الموضوع لدارة القذح هذه هو تسجيل الإشارات ذات المطال يساوي أو أكبر من 5 V مثلاً فسنعطي دارة القذح عند مخرجها نبضة مربعة (الإشارة B) توافق النبضة الكبيرة من هذه الإشارة على مدخلي التحكم للمحول ADC وللمعالج الرقمي (قناة التحصيل)، حيث تأمر هذه الإشارة المحول بالبدء بعملية التحويل وتأمر المعالج بالتوقف عن المعالجة interrupt حتى ينتهي عمل المحول ADC. يتم تأخير الإشارة المراد تحصيلها A فترة زمنية ما عبر دارة تأخير delay وهي الإشارة التي يتم تحصيلها فعلياً. إن هذا التأخير ضروري لتعويض الزمن تستغرقه دارة القذح في إصدار النبضة B. يجب أن يأخذ العرض الزمني لهذه النبضة بالحسبان الزمن اللازم لعمل المحول ADC الذي يعدّ زمناً ميثاً في عملية التحصيل. ويمكن تطوير آلية القذح حسب الحاجة؛ فمثلاً إذا كانت إشارات حادثة سابقة ما زالت قيد المعالجة، فتضاف دارات منطقية إلى دارة القذح الرئيسية لتعطي إشارة قذح جديدة تتفاعل مع قناة التحصيل بحيث تعطي رداً معاكساً عبر إشارة «مشغول» busy إلى دارة القذح لتوقفها عن العمل وتخبرها أنه مشغول ويلزمه زمن ما لتحصيل الحادثة، وبالتالي لا يتم تسجيل الحوادث التي تأتي أثناء تفعيل هذه الإشارة، وبعد الانتهاء من المعالجة يصدر عن القناة إلى دارة القذح إشارة ثالثة تخبرها أنها جاهزة للعمل ready ويتم إعادة تفعيل دارة القذح لتبدأ دورة تحصيل جديدة.



الشكل 5. مخطط صندوقي لآلية القذح حسب معيار تحصيل الإشارات عند قيمة ما لمطالها.

● معيار القذح هو تحصيل الإشارات ضمن فترة زمنية ما

تُستخدم في أنظمة التحصيل آلية قذح ناجمة عن ما يسمى كشف المصادفة أو المطابقة coincidence detection، وهي تُستخدم لتحديد الحالات التي يسجل فيها كاشفان أو أكثر إشارات تحدث خلال فترة زمنية قصيرة جداً مثل اكتشاف فوتونين من التفاعل نفسه، أو الكشف عن أشعة غاما وربط اكتشافها بانبعثات جسيمات أخرى مثل جسيمات بيتا، حيث يساعد هذا الكشف المتزامن على فهم مخططات الاضمحلال وخصائص النواة. ويكون كذلك مفيداً في التجارب التي يوجد فيها كاشف كبير متعدد الطبقات يستخدم لكشف نواتج التفاعل النووي. يبين الشكل 6 مثلاً لآلية القذح لإشارتين من كاشفين مختلفين أحدهما سريع الاستجابة مثل الكواشف الوميضية والآخر بطيء الاستجابة نسبياً مثل حجيرات التأين حيث يدخلان إلى دارة التتابع التي تعطي نبضة على خرجها تجبر قناة التحصيل الرقمية على تسجيل ومعالجة هاتين الإشارتين ضمن فترة حدوثهما معاً.



الشكل 6. مخطط صندوق آلية القدح حسب معيار تحصيل الإشارات ضمن فترة زمنية محددة.

بناء على ما سبق يمكن تلخيص ثلاثة وظائف رئيسية لمنظومة القدح وهي:

1- ترشيح filtering الأحداث غير المرغوب فيها ضمن عدة مستويات قدح: أي اختيار البيانات المعالجة أو المرفوضة عبر عدة مستويات قدح triggering levels الذي قد يصل عددها إلى أربعة مستويات، أي أن منظومة القدح تجبر النظام على ترشيح البيانات بحيث يضيق نطاقها من مستوى لآخر أي نحصل على حزمة أقل للبيانات المطلوبة. ففي المستوى الأول يتم رفض أكثر من 95% من البيانات. أما في المستويات التي تلي ذلك فيتم الاختيار الدقيق للبيانات المطلوبة شيئاً فشيئاً، حيث تزداد هذه الدقة بالانتقال إلى المستوى الأعلى. يقلل هذا النهج الهرمي من القدح بشكل كبير من حجم البيانات مع ضمان عدم تفويت الأحداث المهمة، مما يجعل النظام أكثر كفاءة وسهولة في الإدارة.

2- إخبار أجزاء النظام بموعد القراءة أو باللحظة "المناسبة" لتحصيل البيانات: وهو يحصل بين الإشارات الواردة من أجل الأخذ بعين الاعتبار زمن التحصيل أو الزمن الميث في قناة التحصيل، والذي يتكون من مجموع الأزمنة التالية: الزمن اللازم لتحويل الإشارات من تماثلي إلى رقمي والزمن اللازم للمعالجة بواسطة وحدة المعالجة المركزية وزمن التخزين؛ فمثلاً: إذا كان زمن التحصيل مساوياً إلى 1 ملي ثانية وبالتالي يلزم الحفاظ على أقصى معدل قدح دوري مساوياً إلى $1/1\text{ms}$ كيلو هرتز. ويمكن أن يضاف إلى زمن التحصيل الرئيسي زمناً ميثاً آخر مثل ذلك الذي تحتاجه الإشارة الرئيسية إلى الانتشار عبر النظام قبل تحصيلها كما هو الحال في قياسات زمن الترحال time-of-flight أي في التجارب التي تقيس الزمن الذي يستغرقه شيء ما لقطع مسافة ما، فيتعين تأخير بدء التحصيل حتى تقطع الإشارة تلك المسافة. وفي هذا الصدد تؤدي ما يسمى بدارات التأخير delay circuits دوراً مهماً في منظومة القدح، وهناك العديد من الأشكال والتصاميم نذكر منها:

■ **دارات إلكترونية رقمية:** تعطي عند مخرجها نبضات رقمية مربعة تطبق على مدخل التحكم لدارات رقمية أخرى. تتمتع هذه الدارات بدقة عالية ويمكن التحكم بقيمة هذا الفاصل الزمني، ولكن يجب أن تصمم بدقة عالية وتستخدم عناصر إلكترونية عالية الجودة.

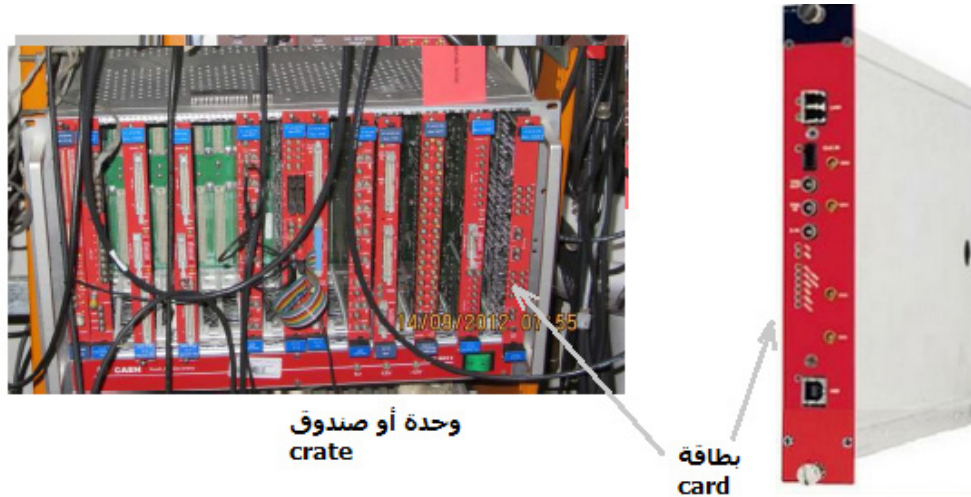
■ **دارات تماثلية:** وهي عبارة عن كابل معين يسبب تأخيراً مباشراً للإشارة التي تُرسل عبره متناسباً مع طول الكابل ومواصفاته، وهذا عادة ما يستخدم للإشارات التماثلية كما هو الحال في دائرة القدح في الشكل 5.

■ **التأخير بواسطة البرمجيات (مثل استخدام تابع تأخير بواسطة برنامج):** ويتمتع بدقة أقل ولكنه أكثر مرونة لفترات التأخير الأطول ويتجنب مشاكل أعطال الدارات الإلكترونية.

■ **التأخير بواسطة ريليه (relay) كهربية:** وهي تستخدم للتأخيرات الأطول، ويمكن استخدامها للتأخير الزمني أو تفعيل دائرة تأخير أخرى للحصول على زمن تأخير طويل؛ أي استخدام دارتي تأخير على التسلسل.

النماذج المعيارية في أنظمة التحصيل

يتطلب استخدام نظام التحصيل استعمال دارات مختلفة موضوعة بأصغر حجم ممكن، ولكن النظام يصبح في هذه الحالة صعب الإدارة وخاصة إذا تم وضع الكثير من الوظائف في دارة أو بطاقة إلكترونية card واحدة؛ لذلك استدعت الحاجة إلى تصميم دارات وبطاقات تقوم بوظيفة واحدة ويمكن استخدامها (وضعها أو تبديلها) بسهولة ومرونة، فتم تصنيع هذه البطاقات على شكل علب مغلقة ذات شكل متوازي مستطيلات كما هو مبين في الشكل 7 وتتصل مع الخارج بوصلات مناسبة عيارية سواء للتغذية الكهربائية أم مخارج الإشارات. يسمح ذلك بإعادة استخدام هذه البطاقات ذات الوظيفة الواحدة في تطبيقات مختلفة، مما يؤدي إلى الحد من تعقيدها وزيادة موثوقيتها وقابليتها للصيانة والمرونة في استخدام واختيار ما نريد من دارات. يتم وضع البطاقات الإلكترونية داخل صندوق أو وحدة crate يكون مفتوحاً من الأمام، عبر سلك خاصة عيارية للجهتين: البطاقة والصندوق، أي يمكن وضع ونزعها هذه البطاقات بسهولة ونقلها من صندوق لآخر. يبين الشكل 7 صورة لأحد البطاقات ووحدة (صندوق) وبداخلها مجموعة من البطاقات الإلكترونية. يتم تأمين التغذية الكهربائية اللازمة لعمل البطاقات عبر لوحة خلفية rear backplane عيارية متصلة بطاقة تغذية كهربائية power supply موجودة في داخل كل وحدة. إذاً يمكن استخدام هذه البطاقات والوحدات العيارية عالمياً بسهولة في كل التجارب ومختلف المخبر الموجودة بها أنظمة تحصيل بيانات. تستخدم في تجارب الفيزياء النووية المخبرية نماذج وحدات بسيطة، ومن أشهرها وحدة نيم NIM-nuclear Instrument module، التي يمكن أن تستوعب كل وحدة منها 12 بطاقة، وكأمثلة على تلك بطاقات المضخمات الرئيسية ودارات العد والتطابق والتمييز ... إلخ. لا تتصل هذه الوحدة بالحاسوب وبالتالي لا تستخدم برمجيات في عملها، ويتم توصيل الإشارات والبيانات من هذه البطاقات وإليها عبر كوابل محورية مفردة ولا يوجد إمكانية للوصل عبر الباص.



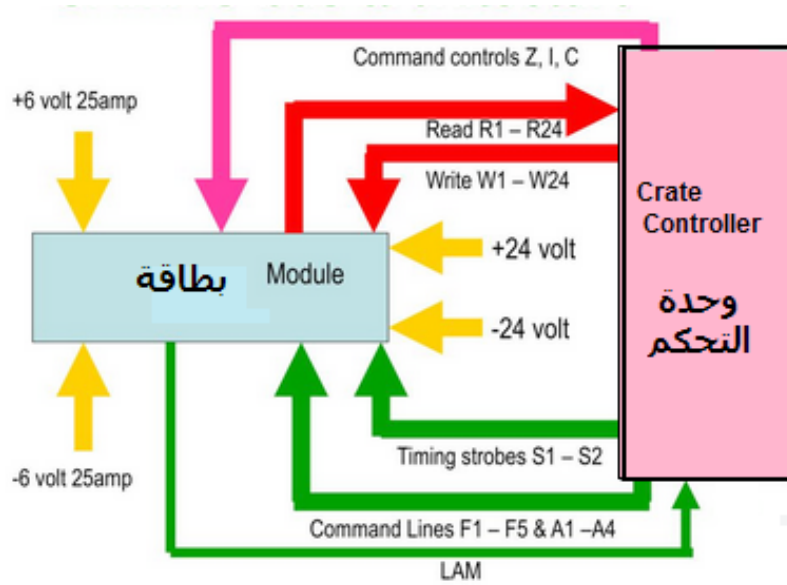
الشكل 7. نموذج من بطاقة إلكترونية (على اليمين) تستخدم في وحدات النماذج العيارية (على اليسار).

أما في نظام تحصيل بيانات كبير يضم الآلاف من الأقنية والتجهيزات المرافقة لها وما تطلبه من أسلاك وكابلات ووصلات كهربائية وميكانيكية، يجب أن يكون هذا النظام عالي الأداء ويتعامل مع معدل عالٍ لنقل البيانات إلى الحاسوب المركزي ودقة عالية في التحويل تناظري/رقمي، وسعة كبيرة للقنوات التي تحمل البيانات. لذلك تستخدم وحدات عيارية تضم بطاقات تؤدي وظائف أخرى مثل الدارات الرقمية والمنطقية والمحولات ADC والمعالجات والذاكر ذات السعات المناسبة ووحدات تحكم controller. إلخ، كما يمكن أن توجد بطاقات تضم عدة قنوات تحصيل. يتم الاتصال بين البطاقات داخل الوحدة نفسها أو بين عدة وحدات بواسطة كابلات الباص الموجودة خلف الوحدة، وهي تقوم بالنقل المتوازي لجميع البيانات والتحكم فيها من أجل تسهيل تبادل البيانات الكثيرة وإجراء وظائف القياس المتنوعة. وسنورد مثالين عن هذه الوحدات أو النماذج التي تستخدم في أنظمة تحصيل التجارب النووية.

● نموذج CAMAC

يُعد من أقدم الوحدات التي استخدمت في تحصيل البيانات، وهو اختصار لـ "القياس والتحكم الآلي بالحاسوب" computer automated measurement and control، وتستخدم على نطاق واسع في تجارب الفيزياء النووية وفيزياء الجسيمات والتطبيقات الصناعية، وهي

نسخة مطورة عن نموذج NIM. يُوفر CAMAC لوحة خلفية لنقل البيانات وهذا يعني أنه يُمكن تعديل مُعاملات كل قناة عبر اللوحة الخلفية، وقراءة البيانات بالطريقة نفسها، مما يُتيح للواجهة الأمامية قنوات إدخال أكثر. تحتوي كل وحدة CAMAC على 25 سكة أي يمكن إدخال 25 بطاقة، وهو تقريباً ضعف عدد مثيلاتها في نموذج NIM. وتغطي هذه البطاقات طيفاً أوسع من الوظائف، مثل المحولات ADC بسعة 16 بت، والذاكر ووحدات تحكم ومقارنة الإشارات ودارات قياس متنوعة، حيث يتم ربطها بمسار البيانات. وطبعاً يمكن إضافة بطاقات أخرى تقوم بمهام معينة حسب طبيعة التجربة وإجراء التعديلات البرمجية المناسبة على الوحدات القابلة للبرمجة. وأهم ما يميز هذه المنظومة هو وجود بطاقتي تحكم خاصتين لكل وحدة تكونان صلة الوصل بين بقية الوحدات وجهاز الحاسوب الرئيسي، والغرض منها هو إصدار أوامر إلى مختلف البطاقات والتحقق من حالتها، وتبادل البيانات بين الحاسوب ومختلف بطاقات CAMAC. كذلك يوفر هذا النموذج حلاً مثالياً لمتطلبات أنظمة جمع البيانات عالية الأداء، حيث يضم باص نقل البيانات، وكما يبين الشكل 8 (48) خط نقل رقمي (24 خط قراءة، 24 خط كتابة)، إضافة إلى خطوط العناوين والتحكم، ويكون كل باص مؤهلاً لنقل كلمات بطول من 16 إلى 24 bit وبمعدل 1 Mega words/sec والكافّة لمعدل نقل بيانات يصل حتى 8 Mb/sec.



الشكل 8. بنية خطوط الباص المستخدمة في نموذج CAMAC.

يمكن أن تستخدم وحدات CAMAC بأعداد قليلة في التجارب الصغيرة والمتوسطة، أو بأعداد كبيرة في التجارب الضخمة تتعامل مع آلاف القنوات التي يمكن أن ترتبط مع بعض عبر شبكة ألياف بصرية سريعة، بمسافة ثلاثة كيلومترات لكل عقدة، وبمعدل نقل إجمالي يصل إلى ثلاثة ميغابايت في الثانية إلى الحاسوب الرئيسي. وفي حالة نظام تحصيل كبير يمكن توصيل عدة وحدات قد تصل إلى سبع بواسطة خط بيانات سريع يدعى غالباً فرع branch ينتهي ببرنامج تشغيل فرع branch driver متصل مباشرة بالحاسوب الرئيسي، بحيث يتكون النظام الكامل من عدة فروع متوازية.

● نموذج VME (Versa Module Europa)

وهو نموذج أوسع ومطور أكثر من CAMAC، وذلك من خلال توفير خيارات أكثر وسرعة نقل أعلى. يوفر VME خيارات لدمج وحدات من نموذج CAMAC معها ويتم ذلك باستخدام وصل كهربائي وميكانيكي عياري بينهما، مما يسمح للباحثين باستخدام وحدات CAMAC المتوافرة سابقاً مما يُقلل من تكلفة التجربة. يُستخدم VME حالياً في معظم التجارب الصغيرة والكبيرة وعلى نطاق واسع، وهناك عدة نماذج تحتوي على امتدادات extension مختلفة مما يؤدي إلى مرونة بالاستخدام. بالنسبة لمواصفات الباص فهو يحوي 64 خط عناوين مناصفة بين القراءة والكتابة، ويكون كل باص مؤهلاً لنقل كلمات بطول من 8 إلى 64 bit وبمعدل 2 Mega words/sec والكافّة لمعدل نقل بيانات يصل حتى 60 Mbytes/sec.

الخلاصة وأفاق مستقبلية

في الختام، يؤدي تحصيل البيانات دوراً محورياً في مختلف الصناعات والتخصصات؛ فهو يشمل جمع البيانات الأساسية وتحليلها واستخدامها لضمان دقة القياسات، والرصد الفوري، واتخاذ قرارات مدروسة. ورغم مزاياها كالدقة والأتمتة، إلا أن هذه الأنظمة قد تكون معقدة ومكلفة. لذلك، من الضروري مراعاة عوامل مثل اختيار الحساسات وصيانة النظام بعناية لضمان جودة الأداء. في عالمنا اليوم الذي يركز على البيانات، لا يزال جمع البيانات أداة لا غنى عنها لتحسين الكفاءة والحفاظ على الجودة وتشجيع الابتكار.

إن مستقبل جمع البيانات واعد ومتطور باستمرار، وهو مدفوع بالتقدم التكنولوجي السريع. ومن الأمثلة على ذلك نظام التحصيل المعياري المفتوح openDAQ. وهو مشروع مشترك بين شركتين كبيرتين لجمع البيانات – Dewesoft وHBK. وهو ناجم عن حزمة تطوير برمجيات (SDK) تهدف إلى توحيد بروتوكولات البيانات المستخدمة في أنظمة DAQ. يُحدد هذا المعيار البروتوكولات والواجهات التي يُمكن لمُوردي خدمات جمع البيانات تنفيذها في أجهزتهم وبرامجهم، مما يُسهّل على المستخدمين دمج أجهزة جمع البيانات المختلفة في سير عملهم، وقد بدأ استخدام هذا النظام منذ عام 2024.

كذلك فإن مستقبل جمع البيانات مشرق وحافل بالابتكارات التي ستؤثر بشكل كبير على المجتمع وعمليات الأعمال business operations. وسيتميز بأساليب جمع البيانات تكون أسرع وأكثر كفاءة وأخلاقية، مدعومة بتقنيات متقدمة، ومدفوعة بالحاجة إلى رؤى معقدة تنجز في الزمن الحقيقي، وهذا مرتبط بشكل رئيسي في التقدم في مجال الدارات الإلكترونية والبرمجيات.

مراجع للاستزادة

- [1]. Bravar A., An Introduction to CAMAC, Geneva University, Physic Section.
- [2]. Wielers M., Introduction to Trigger and Data Acquisition, Rutherford Appleton Laboratory 2015
- [3]. Strong J., Trigger and Data Acquisition for the Large Hadron Collider, Department of Physics, Royal Holloway, University of London. UK.
- [4]. Silverstien S., Introduction to Triggering and Data Acquisition, Stockholm University, Sweden.
- [5]. Data Acquisition Systems Used for Nuclear Instrumentation at Particle Accelerator Facilities Proceedings of the IAEA Technical Meeting Held in Vienna, Austria, 2019

◀ إعداد: د. جمال الدين عساف، قسم الخدمات العلمية، هيئة الطاقة الذرية السورية.

بطاريات الليثيوم أيون

التكوين والأنواع والاستدامة



ملخص

أصبحت بطاريات الليثيوم حجر الأساس في تشغيل معظم الأجهزة الإلكترونية والسيارات الكهربائية، مُغذيةً عالمنا الذي يزداد توجهاً نحو الطاقة المستدامة ووعياً بالبيئة. تتميز هذه البطاريات بكفاءتها العالية وكثافة طاقتها الكبيرة، مما جعلها خياراً مفضلاً في تطبيقات متعددة. ومع ذلك، مع القوة الكبيرة تأتي مسؤولية كبيرة. وقد جلب النمو السريع لسوق بطاريات الليثيوم أيون العالمي -المتوقع أن يتجاوز 446.85 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2032- تحديات غير مسبوقة فيما يتعلق بالسلامة والنقل والتأثير البيئي. نستعرض في هذه المقالة بطاريات الليثيوم من حيث مكوناتها، آلية عملها، تقنيات الشحن والتبريد، إضافة إلى التحديات البيئية المرتبطة بها، وآخر ما توصلت إليه الأبحاث في مجال تطوير البطارية وسلامة تشغيلها.

الكلمات المفتاحية: بطارية ليثيوم أيون؛ شحن، تفريغ؛ كاثود؛ أنود؛ تبريد؛ إعادة تدوير؛ إدارة البطارية.

تعريف بطارية ليثيوم-أيون وتاريخها

البطارية أداة كهروكيميائية تخزن الطاقة الكيميائية على شكل طاقة كهربائية عبر عملية تُعرف بالأكسدة والإرجاع، مما يُمكن من تشغيل مختلف الأجهزة الكهربائية. تعمل البطارية كمصدر طاقة محمول ومستقل، حيث تُوصل الطاقة الكهربائية إلى مختلف الأجهزة بشكل مستقل عن مصدر طاقة خارجي. للبطاريات أهمية بالغة في تشغيل مجموعة واسعة من الأجهزة الإلكترونية، بدءاً من الأجهزة الإلكترونية الاستهلاكية صغيرة الحجم كالهواتف الذكية وأجهزة الكمبيوتر المحمولة، وصولاً إلى الأنظمة الأكثر تعقيداً كالسيارات الكهربائية وأنظمة تخزين الطاقة. لعل من أقدم الأمثلة على أبحاث بطاريات ليثيوم أيون القابلة لإعادة الشحن هو ما قامت به وكالة ناسا (الإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء) بتطوير بطارية CuF_2/Li في عام 1965. ويعد الكيميائي البريطاني ستانلي ويتينغهام أول من أسس مفهوم بطارية ليثيوم أيون الحالية في عام 1974، باستعماله لكاثود من كبريتيد التيتانيوم (TiS_2) ذي البنية الطباقية التي تمتص أيونات الليثيوم دون تغيير كبير في بنيتها البلورية. وفي أواخر السبعينيات، حاولت شركة إكسون تسويق هذه البطارية تجارياً، ولكن ثبت أن التركيب أكثر

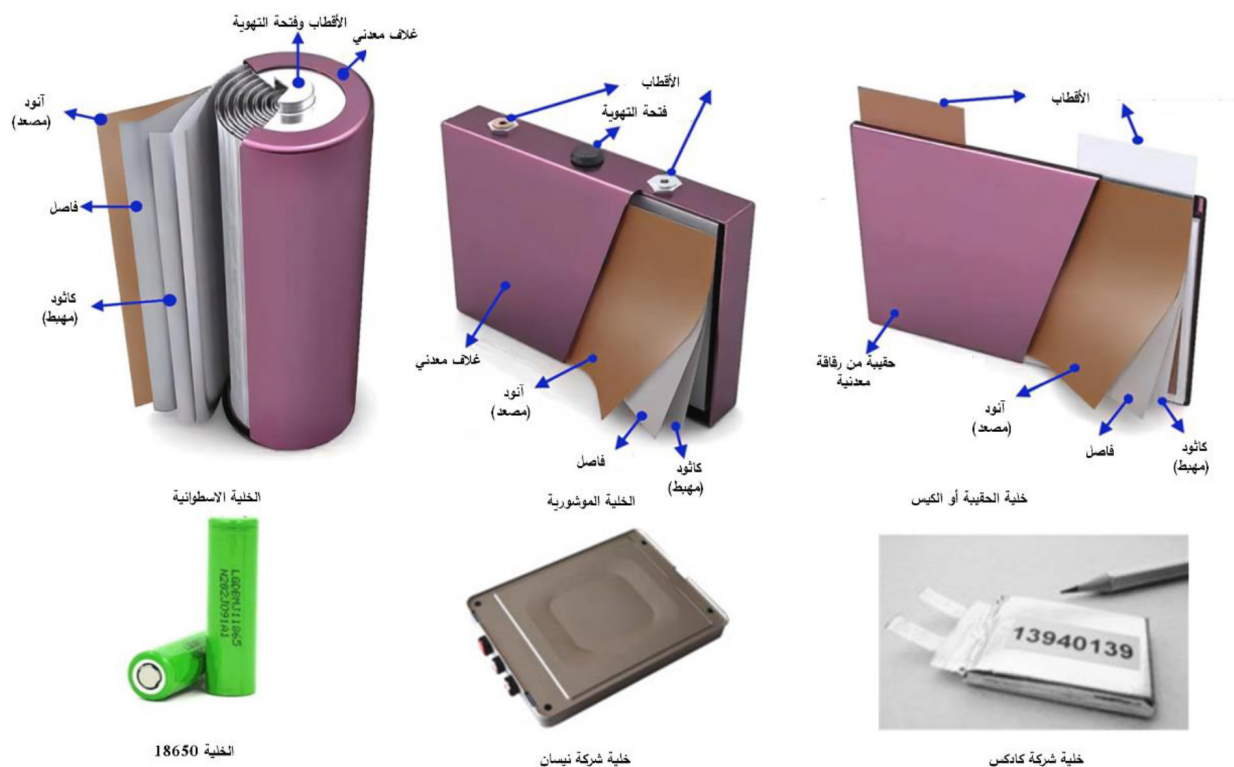
تكلفة وصعوبة بسبب إطلاق غاز كبريتيد الهيدروجين الخطير (H_2S) عند تعرض TiS_2 للرطوبة والماء. فضلاً عن ذلك يشتعل الليثيوم المعدني المكون لخلايا البطاريات تلقائياً، وهو أمر محظور، ولهذا الأسباب ولأسباب أخرى، توقفت شركة إكسون عن تصنيع هذه البطاريات. أدت الجهود البحثية المختلفة في عام 1980 إلى تطوير كاثود من أكسيد كوبالت الليثيوم ($LiCoO_2$ أو LCO) ذي البنية الطبقيّة، والذي ينتج جهداً أعلى وهو مستقر للغاية في الهواء، واستعمل هذا المركب لاحقاً في أول بطارية ليثيوم أيون تجارية، على الرغم من عدم حل مشكلة قابلية الاشتعال بشكل كامل. كما طور رشيد يازمي الأنود من غرافيت الليثيوم خلال ذلك الوقت، وطور التداخل الكهروكيميائي للأكسدة والإرجاع لليثيوم مع الغرافيت، وظهر أنود التداخل الذي يعمل بشكل مشابه للكاثود لمنع تكوين معدن الليثيوم أثناء شحن البطارية. وفي عام 1987، حصل ياماهاكي ياماهاكي على براءة اختراع لأول بطارية ليثيوم تجارية تحتوي على أنود كربون ناعم (مادة تشبه الكربون)، وكاثود LCO وإلكترونيات قائم على إستر الكربونات. وبدأت شركة سوني بإنتاج وبيع أول بطاريات ليثيوم أيون قابلة لإعادة الشحن في العالم في عام 1991. وماتزال تكنولوجيا بطارية الليثيوم أيون في تطور إلى وقتنا الراهن.

تكوين بطارية ليثيوم-أيون ومبدأ عملها

يوضح الشكل 1 التركيب النموذجي لبطارية ليثيوم-أيون، إذ تتكون من قطب موجب (الكاثود) وقطب سالب (الأنود) وإلكترونيات وواصل ومجمعي تيار وغطاء. تُعد الأقطاب الكهربائية جزءاً من بطاريات الليثيوم أيون، حيث تُحمل الجسيمات وتُوفّر الإقحام والإزالة لها. يوفر الإلكترونيات قنوات نقل لأيونات الليثيوم، ويتكون من أملاح الليثيوم والمذيبات العضوية ومواد مضافة أخرى. يقوم الفاصل بعزل الأقطاب الموجبة والسالبة عن بعضها لتجنب التفاعل المباشر للمادة الفعالة في الإلكترونيات. وتُعد رقائق النحاس ورقائق الألمنيوم خيارات جيدة لمجمعي التيار في بطاريات الليثيوم أيون.

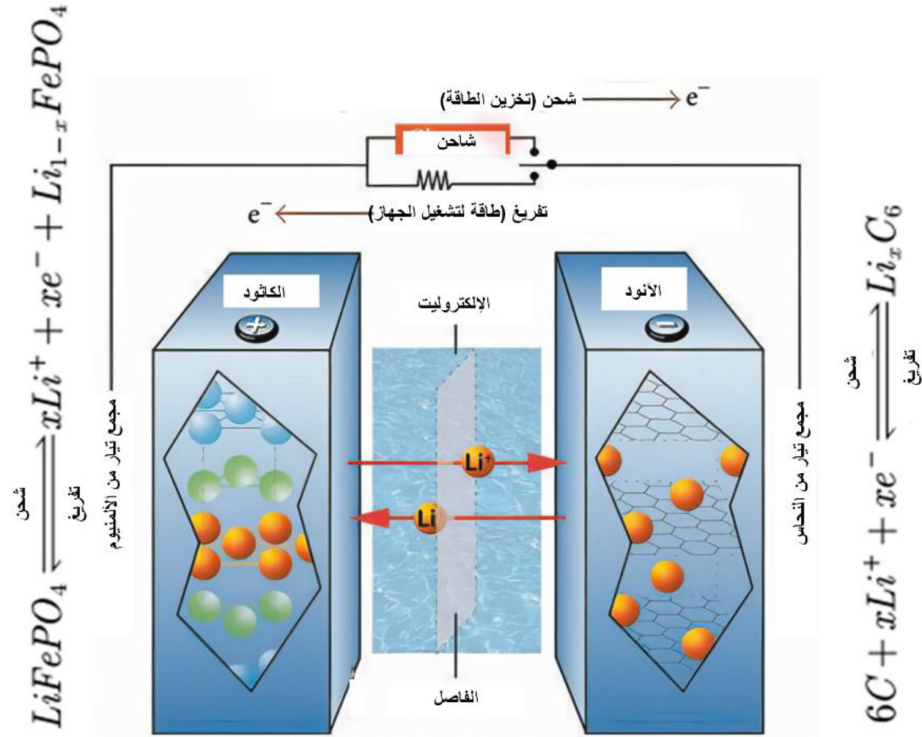
تصنف بطاريات الليثيوم أيون حسب شكلها إلى بطاريات أسطوانية وموشورية وكيسية، كما هو موضح في الشكل 1. وبفضل التطورات في عملية التصنيع، تتميز الخلايا الأسطوانية بمزايا مثل زيادة الاتساق وانخفاض تكاليف الإنتاج وسهولته. ومع ذلك، عادةً ما تكون سعتها أقل من 4 أمبير/ساعة. وتعد الخلايا 18650 (تدل الأرقام على قطر البطارية 18 مم وارتفاعها 650 مم) و21700 والأكثر شيوعاً.

في المقابل، توفر الخلايا الموشورية مرونة تصميمية أكبر واستغلالاً أفضل للمساحة وزيادة في السعة. ومع ذلك، فإن أقطابها السالبة والموجبة المتعددة تزيد من احتمالية عدم الاتساق وقصر الدارة. فضلاً عن ذلك، تُعَدّ السعة العالية للخلايا الموشورية قدرة نظام إدارة البطاريات على إدارة تبديد الحرارة والشحن. يمكن الحصول على طاقة كافية في التطبيقات العملية، من خلال توصيل خلايا متعددة على التوازي أو على التوالي لإنشاء وحدات بطاريات، ثم تربط وحدات البطاريات معاً لتكوين حزمة بطاريات.



الشكل 1. أشكال بطاريات الليثيوم أيون ومكوناتها.

يوضح الشكل 2 مبدأ عمل بطاريات الليثيوم أيون؛ إذ تعتمد البطارية على حركة أيونات الليثيوم خلال إلكتروليت يفصل بين الكاثود والأنود. أثناء عملية التفريغ، تنتقل أيونات الليثيوم والإلكترونات من القطب السالب، حيث تمر أيونات الليثيوم عبر الفاصل لتصل إلى القطب الموجب، وتتم الإلكترونات عبر مجمع التيار والسلك لتصل إلى القطب الموجب. يُعكس هذا التفاعل في عملية الشحن؛ لنأخذ بطارية فوسفات حديد الليثيوم كمثال، حيث يوصف التفاعل الكهروكيميائي أثناء عملية الشحن والتفريغ كما هو موضح في الشكل 2. يتطلب هذا التفاعل توازناً دقيقاً في الجهد والتيار لضمان كفاءة التشغيل وسلامة البطارية.



الشكل 2. مبدأ عمل بطارية ليثيوم-أيون.

أنظمة تبريد بطاريات الليثيوم-أيون

تُعد إدارة الحرارة عاملاً حاسماً في أداء بطاريات الليثيوم وسلامتها، وعلى وجه الخصوص في التطبيقات الصناعية والنقل الكهربائي. يصبح التحكم بدرجة الحرارة مع ازدياد كثافة الطاقة داخل الخلايا ضرورة لتجنب الانخفاض السريع في العمر الافتراضي أو حدوث حالات خطيرة مثل الانفجار أو الاشتعال الذاتي. ولهذا طورت عدة تقنيات لتبريد البطاريات، يمكن تصنيفها إلى ثلاث فئات رئيسية:

1. التبريد بالهواء air cooling: يُستعمل الهواء الطبيعي أو الموجه عبر مراوح لتبريد البطاريات، وهو الأقل تكلفة والأبسط من حيث التركيب، لكنه أقل فعالية في إزالة الحرارة، خاصة في الأنظمة ذات الكثافة العالية للطاقة مثل السيارات الكهربائية.
2. التبريد بالسائل liquid cooling: يعتمد على تدوير سوائل مثل الماء أو مزيج من الغليكول والماء حول البطارية. يُعد هذا النظام أكثر فعالية من التبريد الهوائي، لأنه يمتص الحرارة بشكل أسرع ويوفر توزيعاً حرارياً أكثر توازناً. وهو شائع في السيارات الكهربائية عالية الأداء مثل تسلا وبورش تاكان.
3. أنظمة التبريد بالمواد ذات التغير الطوري phase change materials – PCM: تعتمد على مواد تمتص كمية كبيرة من الحرارة أثناء تحولها من الحالة الصلبة إلى السائلة. تُستعمل هذه الطريقة في التطبيقات التي تتطلب صيانة منخفضة، لكنها محدودة من حيث القدرة على التبريد الطويل الأمد أو الديناميكي.

وبالمقارنة، يوفر التبريد بالسائل أفضل توازن بين الأداء والفعالية الحرارية، لكنه أكثر تعقيداً وتكلفة. في حين يناسب التبريد الهوائي الأنظمة منخفضة القدرة، ويُعد PCM حلاً واعداً للتطبيقات المتوسطة بفضل كفاءته الصامتة وعدم حاجته لطاقة تشغيل إضافية.

أنظمة شحن بطاريات الليثيوم-أيون

تُستخدم بطاريات الليثيوم في مجموعة واسعة من التطبيقات، من الهواتف الذكية إلى السيارات الكهربائية، ولهذا تختلف أنظمة الشحن حسب الاحتياج. وتنقسم الشواحن إلى أنواع متعددة، أهمها:

1. الشواحن التقليدية standard chargers: توفر تياراً منخفضاً وشحناً بطيئاً نسبياً. وهي مثالية للحفاظ على عمر البطارية وتقليل الحرارة، وتُستعمل في الأجهزة الصغيرة مثل الهواتف وساعات البلوتوث.
2. الشواحن السريعة fast chargers: توفر تياراً وجهداً أعلى، وتقلل وقت الشحن بشكل كبير. تعتمد على تقنيات مثل quick charge أو USB power delivery. ومع ذلك، يمكن أن ترفع درجة حرارة البطارية وتؤثر على عمرها إذا لم يتحكم بها جيداً.
3. الشواحن الذكية smart chargers: مزودة بوحدة تحكم إلكترونية تراقب حالة البطارية، وتنظم التيار والجهد تلقائياً لتقليل الإجهاد الحراري وزيادة الأمان. تستعمل في الأجهزة الحساسة والطبية، وكذلك في بعض السيارات الكهربائية.
4. شواحن التيار المباشر DC fast chargers: شائعة في السيارات الكهربائية، حيث توفر طاقة عالية (عادة من 50 إلى 350 كيلوواط)، وتقوم بشحن البطارية مباشرة دون الاعتماد على محول داخلي. يمكنها شحن 80% من السعة في أقل من 30 دقيقة. لكنها تتطلب تبريداً فعالاً وتكون أكثر تكلفة.

كفاءة بطارية الليثيوم-أيون وأدائها

تُعد بطاريات الليثيوم من أكثر أنواع البطاريات كفاءة من حيث الطاقة والوزن، إذ تتميز بكثافة طاقة عالية تتيح تخزين كمية كبيرة من الطاقة في حجم صغير نسبياً. وتعتمد كفاءة البطارية على عدة عوامل، أهمها السعة التي تُقاس بالمللي أمبير الساعي (mAh)، وعدد دورات الشحن والتفريغ التي تتحملها دون فقد كبير في السعة، والذي يتراوح عادة بين 300 و2000 دورة حسب نوع البطارية وظروف التشغيل. ومن العوامل المؤثرة على أداء البطارية درجة الحرارة؛ إذ تؤثر الحرارة المرتفعة على تفاعلات البطارية وقد تُسرّع من تدهورها، في حين تؤدي الحرارة المنخفضة إلى انخفاض قدرتها على التفريغ. وقد يسبب الشحن السريع أو التفريغ العالي تقليل العمر الافتراضي، وكلما كان التفريغ أقل عمقاً (أي عدم استهلاك البطارية بالكامل)، زاد عدد الدورات الممكنة. ويعرف العمر الزمني calendar life للبطارية بعمرها قبل أن تفقد جزءاً من سعتها حتى دون استعمال، بسبب التفاعلات الكيميائية البطيئة.

وتستعمل أنظمة ذكية لإدارة البطارية battery management systems, BMS لتحقيق أفضل كفاءة؛ إذ تعمل هذه الأنظمة على مراقبة الجهد والحرارة والتيار، مما يضمن أداءً مستقرًا وأماناً. يهدف نظام BMS إلى حماية البطارية وتحسين أدائها عن طريق مراقبة وتحكم مستمرين في معايير التشغيل الرئيسية كما يدل الشكل 3. وتشمل وظائفه الأساسية ما يلي:

1. مراقبة الجهد الكهربائي: يقوم بقياس جهد كل خلية في البطارية على حدة، ويمنع تجاوز الحد الأعلى overvoltage أو النزول عن الحد الأدنى undervoltage.
 2. مراقبة درجة الحرارة: يتحقق من حرارة البطارية عبر مستشعرات متعددة، ويوقف التشغيل أو الشحن إذا رصد حرارة غير طبيعية.
 3. موازنة الخلايا cell balancing: يضمن تساوي الجهد بين جميع الخلايا لتجنب تلف خلية دون أخرى، وذلك باستعمال تقنيات التوازن النشط أو السلبي.
 4. مراقبة التيار: يحمي من التيار الزائد أو القصير، وهو ما قد يؤدي إلى تلف البطارية أو نشوب حريق.
 5. حساب حالة الشحن SoC – state of charge: يقدّر كمية الشحن المتبقية بدقة، ويعرضها للمستخدم (مثل شريط البطارية في الأجهزة).
 6. تقدير صحة البطارية (SoH – state of health): يتابع مدى تدهور البطارية بمرور الوقت.
 7. التحكم بالشحن والتفريغ: يفصل البطارية عن النظام إذا رُصد خلل، لحمايتها من التلف أو الحوادث.
- تُستعمل أنظمة BMS في السيارات الكهربائية والهجينة، وفي أنظمة تخزين الطاقة الشمسية، والحواسيب المحمولة والهواتف الذكية، والطائرات دون طيار والمعدات الطبية المحمولة.



الشكل 3. نظام إدارة البطارية ووظائفه.

التكنولوجيا الحالية لبطاريات الليثيوم أيون

تتكون بطاريات الليثيوم أيون من ثلاثة مكونات رئيسية: الأنود والكاثود والإلكترونيات. يؤثر اختيار مادة كل مكون بشكل كبير على أداء البطارية وسلامتها وملاءمتها للتطبيق. وتستعمل معظم بطاريات الليثيوم أيون التجارية إلكترونيات سائلة مثل ملح LiPF_6 المذاب في مزيج من المذيبات العضوية مثل كربونات ثنائي الميثيل (DMC)، وكربونات الإيثيلين (EC)، وكربونات إيثيل الميثيل (EMC)، وكربونات ثنائي الإيثيل (DEC) وغيرها. وتتمتع بموصلية أيونية عالية؛ إلا أنها قابلة للاشتعال وتشكل خطر التسرب. ولتحسين السلامة والاستقرار، فقد اقترحت الإلكترونيات الصلبة (مثل: العقيق، والكبريتيد)، وتشمل التحديات انخفاض الموصلية الأيونية والتوافق البيئي، وتستعمل هذه الإلكترونيات لتطوير بطاريات الحالة الصلبة.

تعتمد الكاثودات والأنودات المستعملة في التكنولوجيا الحديثة لبطاريات الليثيوم أيون على مركبات الإدخال insertion-compounds. وتتوفر خمسة أنواع من الكاثودات. يتميز أكسيد الليثيوم والكوبالت (LCO) بكثافة طاقة عالية، لكن استقراره الحراري محدود، وتكلفته عالية نسبياً، ويستعمل في بطاريات الهواتف الذكية وأجهزة الكمبيوتر المحمولة. ويتميز كاثود أكسيد المنغنيز والليثيوم (LMO) بمقاومة داخلية منخفضة تتيح إمكانية الشحن السريع والتفريغ عالي التيار، وتتميز بالاستقرار الحراري العالي، لكن للبطارية دورات تفريغ محدودة. ويتميز فوسفات حديد الليثيوم (LFP) باستقرار حراري ممتاز وأمان وعمر افتراضي طويل مع كثافة طاقة أقل مقارنةً بأكسيد الليثيوم والكوبالت، ويستعمل في بطاريات المركبات الكهربائية وتخزين الطاقة المتجددة. وتتوفر ميزة جيدة في كاثود أكسيد الليثيوم والنيكل والمنغنيز والكوبالت (NMC)؛ إذ يمكن تعديل نسب التركيب لتحسين الأداء، من حيث كثافة الطاقة والاستقرار الحراري والتكلفة، ويستعمل في

بطاريات الأدوات الكهربائية والمعدات الطبية والمركبات الكهربائية. ويتميز كاثود الليثيوم والنيكل والكوبالت وأكسيد الألمنيوم (NCA) بكثافة طاقة عالية وعمر افتراضي طويل، ولكنه يتطلب إدارة حرارية دقيقة، ويستعمل في السيارات الكهربائية خاصة طرازات تسلا. ويوضح الجدول 1 مقارنة لبطاريات الليثيوم-أيون المحتوية على الكاثودات السابقة.

الجدول 1. مقارنة بين الأنواع المختلفة للكاثودات في بطاريات الليثيوم-أيون

نوع البطارية	متوفرة منذ	الجهد الاسمي (فولت/خلية)	مدى التشغيل النموذجي (فولت/خلية)	الطاقة النوعية (واط ساعي/كغ)	عدد الدورات (دورة)	التكلفة (دولار/كيلو واط ساعي)
LCO	1991	3.6	3-4.20	150-200	500-1000	310
LMO	1996	3.8	3.0-4.2	100-150	300-700	390
LFP	1996	3.2-3.3	2.5-3.65	90-120	2000	580
NCA	1999	3.6	2.5-3.65	200-260	500	350
NMC	2008	3.7	3.0-4.2	150-220	1000-2000	420

ويوجد من جهة أخرى أربعة أنواع من الأنودات. يتميز الغرافيت بموصلية كهربائية عالية واستقرار هيكلي جيد وعمر افتراضي طويل، ويستعمل في بطاريات الإلكترونيات الاستهلاكية والمركبات الكهربائية. في حين تتميز متراكبة السليكون والغرافيت بسعة نظرية أعلى من الغرافيت النقي، ولكنها تشهد توسعاً كبيراً في الحجم أثناء دورتي الشحن والتفريغ، وتستعمل في بطاريات التطبيقات الناشئة في الأجهزة عالية الطاقة. وتتميز البطارية المحتوية على أنود تيتانات الليثيوم بجهد خلية اسمي يبلغ 2.40 فولت، ويمكن شحنها بسرعة وتوفر تيار تفريغ عالٍ، وتمتلك عدد دورات أعلى من عدد دورات ليثيوم أيون Li-ion العادية وهي أكثر أماناً، ولها خصائص تفريغ ممتازة في درجات الحرارة المنخفضة، ويمكن الحصول على قدرة 80 بالمئة عند الدرجة 30 سلزيوس. أما أنود معدن الليثيوم الذي مازال في مرحلة البحث والتطوير، فيتميز بكثافة طاقة عالية جداً، إلا أنه يعاني من تحديات تتعلق بالسلامة بسبب تكوين الشجيرات dendrite.

أنواع بطاريات الليثيوم أيون

بطارية ليثيوم-كبريت (Li-S): يُعد الكبريت (S) خياراً جيداً لمواد الكاثود في بطاريات الجيل التالي؛ إذ يوفر سعة محتملة تبلغ 1675 ملي أمبير ساعي غرام⁻¹؛ أي ما يقرب من 10 أضعاف أكاسيد المعادن الانتقالية المستعملة حالياً. وعلى الرغم من أن الكبريت أكثر وفرة من الكوبالت والنيكل في قشرة الكوكب وأقل تكلفة بكثير، إلا أن مجموعة متنوعة من العوائق التكنولوجية تمنع استعمال كاثودات الكبريت في المزيد من التطبيقات. تساهم الموصلية الكهربائية المنخفضة والجهد الكهروكيميائي المنخفض وأقطاب التحويل ذات التمدد الكبير في الحجم بحوالي 80% في تشقق المواد وانفصالها عن شبكة الأقطاب الموصلة. إضافة إلى ذلك، يتميز الكاثود المصنوع من الكبريت بدرجة حرارة تبخر أقل، مما يؤدي إلى فقدان الكبريت النقي أثناء عملية تجفيف القطب تحت الفراغ. وتهاجر بولي سلفيدات منخفضة الرتبة إلى الكاثود خلال هذه المرحلة، مما يؤدي إلى إعادة الأكسدة وإنتاج Li_2S_2 و Li_2S ، وهما ناتجان ثانويان غير قابلين للذوبان يتسببان في تفريغ ذاتي، وعادةً ما يكون لهما كفاءة كولومية منخفضة. حالت هذه العقبات التكنولوجية بعد سنوات عديدة من البحث والتطوير دون التسويق التجاري الواسع لكاثودات الكبريت لبطاريات Li-S، أشارت العديد من الدراسات إلى أن ألياف الخشب متوسطة المسامية المتفحمة يمكن أن تكون بمنزلة مضيف لتداخل الكبريت الذي يُثبت دورة بطارية Li-S الاستثنائية، كما تبين أن الجمع بين الطور البيني الصلب والإلكتروليتي المستقر يُعد تقنية جديدة لتثبيت تأثير النقل في بطاريات Li-S.

بطارية ليثيوم-ثنائي أكسيد الكربون (Li/CO_2-O_2): في الآونة الأخيرة، ازداد اهتمام مجتمع البطاريات ببطاريات ليثيوم-ثنائي أكسيد الكربون. يمكن تثبيت ثنائي أكسيد الكربون (CO_2) باستعمال هذه التقنية أثناء تخزين الطاقة. وتتميز البطارية الغازية التي تحمل تسمية Li/CO_2-O_2 بسعة تفريغ عالية غير رجعية تفوق سعة بطارية ليثيوم-هواء بثلاث مرات. طورت بعد ذلك، باستعمال ثنائي ميثيل سلفوكسيد (DMSO)، بطارية ليثيوم-ثنائي أكسيد الكربون-ثنائي أكسيد عكسية تُنتج ليثيوم-ثنائي أكسيد الكربون عكسياً. وعلى الرغم من وجود بطاريات ليثيوم-غاز أخرى، تستعمل غازاً مختلطاً من ثنائي أكسيد الكربون/أول أكسيد الكربون لتحقيق ساعات شحن، اقترح شو وأرتشر وآخرون (2013) بطارية ليثيوم-ثاني أكسيد الكربون أساسية تستخدم غاز ثاني أكسيد الكربون النقي كقطب كهربائي عامِل.

بطارية ليثيوم-هواء ($Li-Air$ or $Li-O_2$): ظهرت بطارية ليثيوم-هواء ($Li-O_2$) مع إلكتروليتي عضوي في عام 1996؛ إذ يمكن استعمال عمليات الأكسدة والإرجاع بين المعدن الجيري والأكسجين لشرح كيفية عمل بطاريات $Li-O_2$ هيكلياً. ونظراً لكثافتها العالية،

جذبت بطاريات الليثيوم-هواء الكثير من الاهتمام كبديل لبطاريات الليثيوم أيون عالية السعة (حوالي 3500 واط/كغ⁻¹): إذ تتمتع بكثافة طاقة مفيدة تصل إلى 1700 واط/كغ⁻¹. في بطارية ليثيوم-هواء، يعمل الكاثود غالباً كمحفز مدمج في ركازة كربون، في حين يكون الأنود غالباً معدن ليثيوم. بناءً على الإلكتروليتات المستعملة، يمكن تقسيم هذه البطارية إلى أربعة هياكل مختلفة: بطاريات Li-O₂ المختلطة، وبطاريات Li-O₂ غير البروتونية، وبطاريات Li-O₂ المائية، وبطاريات الحالة الصلبة بالكامل. يجذب الترتيب اللابروتوني أكبر قدر من الاهتمام لأنه يشكل حاجزاً فورياً بين الإلكتروليت والأنود، مما يحمي معدن الليثيوم من تفاعل الأكسدة والإرجاع الخاص بالإلكتروليت أثناء الشحن والتفريغ. عند تزويد الخلية بأنود من معدن الليثيوم أثناء عملية التفريغ، تنتج قوة دافعة كهربائية تبلغ حوالي 2.9 فولت وطاقة نوعية نظرية تبلغ 3500 واط/كغ. فضلاً عن ذلك، فإن تكلفة بطاريات Li-O₂ أقل من بطاريات الليثيوم أيون التقليدية؛ إذ يصنع مركب المادة الفعالة بسهولة بالغة. يمكن تشغيل بطارية Li-Air بكل من الإلكتروليتات المائية وغير المائية. في البيئة المائية، يمكن أن ينتج التفريغ LiOH الذي يمكن أن يؤدي إلى الانسداد لسوء الحظ، لأنه لا يتحلل تماماً، مما يؤدي إلى ترسبه، كما أنه يقلل من كثافة الطاقة وقابلية التدوير.

بطارية الأقطاب العضوية: اقترح استعمال المواد العضوية كأقطاب لبطاريات الليثيوم أيون على مدار العقود القليلة الماضية، على الرغم من أنها حظيت باهتمام أقل من استعمال الأقطاب المعدنية. تتمثل فوائد البطارية في الاستدامة القوية والمرونة في تصميم المواد والصدقة البيئية وثراء الموارد بفضل مكوناتها خفيفة الوزن مثل الكربون والهيدروجين والنتروجين والأكسجين. وقد دُرِس العديد من المواد العضوية بشكل مكثف على مدار العشرين عاماً الماضية، بما في ذلك مجموعات الإيمين (C=N)، ومركبات الكربونيل، والجذور العضوية، والكبريت العضوي. وتُعد المواد الكيميائية القائمة على الكربونيل، مثل الكينون، ذات أهمية خاصة نظراً لإمكاناتها العالية في الأكسدة والإرجاع، ونشاطها القوي في الأكسدة والإرجاع، وتوافرها. ومع ارتباط المزيد من مجموعات الكربونيل بعمليات متعددة الإلكتروليتات، تنتج الأنيونات متعددة التكافؤ لنشاط الأكسدة والإرجاع من خلال نقل الإلكترونات العكسي. ومع ذلك، ثمة عدد من العيوب الجوهرية لاستعمال مواد الأقطاب الكهربائية العضوية في البطاريات، بما في ذلك قابليتها العالية للذوبان في الإلكتروليتات، وضعف موصليتها، وانخفاض كثافة طاقتها، وضعف حركية تفاعلها. يشمل الحل الشائع لهذه المشاكل إضافة مواد موصلة مثل الجرافيت، وتغيير البنية باستعمال مواد موصلة مختلفة مثل أنابيب الكربون النانوية/الغرافين، فضلاً عن تعديل مستوى القطب. وقد اقترحت مركبات عضوية مماثلة تحتوي على مجموعات وظيفية أزوية (N=N) لمعالجة ما سبق ذكره من العيوب. إن التركيب الكيميائي للقطب الكهربائي الأزوي أبسط من التركيب الكيميائي للقطب الكهربائي الكربونيلي أو الإيميني، وكلاهما يتطلب أكثر من المجموعتين الوظيفيتين. تتميز بطاريات مركبات الأزو بثبات جيد للدورة ومعدلات سعة عالية. تُعد الأسلاك النانوية العضوية ذاتية التجميع باستعمال ملح ثنائي صوديوم حمض الكروكونيك (CAD) تقنية رائعة أخرى لحل مشاكل الأقطاب الكهربائية العضوية لبطاريات الليثيوم.

بطاريات الحالة الصلبة: يُعد الإلكتروليت الصلب مكوناً مهماً في إنتاج بطاريات الحالة الصلبة. يمكن إنتاج ثلاث فئات رئيسية هي إلكتروليتات البوليمير الصلبة، وإلكتروليتات الأغشية الرقيقة الصلبة، وإلكتروليتات صلبة غير عضوية. من ناحية أخرى، توفر الإلكتروليتات الصلبة من نوع الكبريتيد مقاومة منخفضة لحدود الحبيبات، وخصائص ميكانيكية جيدة، وموصلية عالية (10⁻² Scm⁻¹). ومع ذلك، تتميز هذه المواد بتوافق ضعيف مع الأقطاب الكهربائية وانخفاض استقرار الأكسدة. إضافة إلى ذلك، يصعب إنتاجها بسبب انبعاث غاز كبريتيد الهيدروجين الخطير (H₂S) عند ملامسة TiS₂ للرطوبة والماء. وقد اقترحت إلكتروليتات البوليمير الصلبة (SPEs) كإلكتروليتات صلبة محتملة لبطاريات الحالة الصلبة. تُستعمل بعض إلكتروليتات البوليمير بشكل متكرر مثل أكاسيد البولي إيثيلين (PEOs)، وبولي (أكريلونيتريل) (PAN)، وفلوريد البولي فينيلدين (PVDF)، وبولي ميثيل ميثاكريلات (PMMA)، وأكاسيد البولي (إيثيلين) (PEO) كمادة مضافة. وقد جذبت أكاسيد البولي (إيثيلين) ذات الوحدة المتكررة من أملاح الليثيوم المحتوية على -CH₂-CH₂-O- اهتماماً كبيراً نظراً لطبيعتها غير السامة، وسهولة الوصول إليها، واستقرارها الكيميائي الممتاز. تشمل الفوائد الشائعة لاستعمال البوليميرات كإلكتروليتات صلبة مرونة فائقة واستقراراً عالياً لمعدن الليثيوم ومعامل قص منخفض، إلا أنها تنطوي أيضاً على عيوب، بما في ذلك انخفاض جهد الأكسدة الكيميائي وانخفاض الاستقرار الحراري وانخفاض التوصيل الأيوني. ينبغي مناقشة العديد من القضايا المتعلقة باستعمال مواد الإلكتروليتات الصلبة (SPEs) في التطبيقات العملية. كما أثارت الأغشية الرقيقة من الإلكتروليتات الصلبة اهتماماً لأنها أتاحت تطوير بطاريات أغشية رقيقة تتفوق على بطاريات الليثيوم أيون التقليدية من حيث كثافة الطاقة ومرونة التصميم والاكتناز.

محاسن بطاريات ليثيوم أيون وماؤها

تُستخدم بطاريات الليثيوم أيون (LIBs) على نطاق واسع، وأصبحت جزءاً لا يتجزأ من تخزين الطاقة الحديث؛ نظراً لكثافة طاقتها العالية، مما يسمح بتشغيل الأجهزة لفترة أطول ونطاقات قيادة أطول في المركبات الكهربائية، كما تتميز بمعدل تفريغ ذاتي منخفض، مما

يحافظ على كفاءة الشحن عند عدم استعمالها. ومع ذلك، فإن لهذه البطاريات عيوباً ملحوظة، بما في ذلك الحساسية لدرجات الحرارة القصوى التي يمكن أن تؤثر على الأداء وعمرها الافتراضي. كما تُثير بطاريات الليثيوم أيون مخاوف تتعلق بالسلامة، مثل خطر ارتفاع درجة الحرارة ومخاطر الحرائق المحتملة، وخاصة في المركبات الكهربائية والأجهزة الإلكترونية الاستهلاكية، خاصة في حال تلفها أو التعامل معها بشكل غير صحيح. تنشأ مشاكل بيئية نتيجة استخراج المواد الخام مثل الليثيوم والكوبالت، مما قد يؤدي إلى تدهور بيئي، فضلاً عن التحديات المرتبطة بإعادة تدوير هذه البطاريات، حيث يؤدي التخلص منها بشكل غير سليم إلى تلوث التربة والمياه. فضلاً عن ذلك، تتدهور سعة بطاريات الليثيوم أيون بمرور الوقت، مما يُقلل من فعاليتها مع الاستخدام لفترات طويلة.

التطلعات المستقبلية ودور الذكاء الاصطناعي

يركز التطوير المستقبلي لبطاريات الليثيوم أيون على مجالات رئيسية عديدة لتحسين الأداء والسلامة والاستدامة. ومن أهم هذه المجالات تطوير بطاريات الحالة الصلبة التي تستعمل الإلكتروليتات الصلبة لتحسين السلامة وكثافة الطاقة. وتعمل مشاريع التعاون الأوروبية بنشاط على تطوير الجيل الرابع من بطاريات الليثيوم أيون المزودة بالإلكتروليتات الصلبة، بهدف إيجاد حلول صناعية طويلة الأمد. ومن المتوقع أن تؤدي تقنية مواد تغيير الطور (PCM) المتقدمة ذات الأداء الاستثنائي دوراً أساسياً واسع النطاق في مستقبل أنظمة تبريد الطاقة المتجددة والمركبات الكهربائية. ونتيجة لذلك، ومع تطور تطبيقات مواد تغيير الطور والحاجة إلى تحسين نقل الحرارة فيها، يجب أن يكون هناك تركيز مثالي للجسيمات النانوية فيها. ونظراً لاختلاف الموصلية الحرارية للجسيمات النانوية المختلفة، من الضروري تحديد التركيز الأمثل للجسيمات النانوية فيها ودراسته في الدراسات المستقبلية. ستكون تقنية مواد تغيير الطور المغلفة بالميكرو هياكل الدعم المتقدمة وتكوينات الزعانف والرغوة المثالية تقنيةً مستقبلية ذات تطبيقات واسعة قريباً، لا سيما في التبريد السلبي لمجموعات البطاريات؛ لذا يجب التركيز بشكل كبير على تطبيقات الجسيمات النانوية والتغليف الدقيق وهياكل دعم مواد تغيير الطور المتقدمة.

من المعروف أن المركبات الكهربائية يجب أن تكون خفيفة الوزن قدر الإمكان لقطع مسافات طويلة باستخدام كمية الطاقة نفسها. يشير هذا إلى ضرورة بذل جهود لزيادة كثافة طاقة بطاريات الليثيوم أيون وإجراء دراسات لخفض وزنها. في المقابل، ستؤدي هذه الدراسات إلى تكوينات حرارية غير عادية ومشاكل حرارية خطيرة؛ لذلك ينبغي التركيز على الأبحاث التي تزيد من فوائد كل نظام تبريد وتقلل من عيوبه، وتسرع وتيرة الأبحاث المتعلقة بأنظمة التبريد الهجينة.

يُحدث تطبيق الذكاء الاصطناعي (AI) والتعلم الآلي (ML) في أبحاث مواد البطاريات ثورة في تصميم أنظمة تخزين الطاقة وتحسينها. يمكن للخوارزميات التي تعتمد على الذكاء الاصطناعي التنبؤ بخصائص المواد وتحديد التركيبات المثلى، مما يُسرع من اكتشاف مواد الأنود عالية الأداء. على سبيل المثال، طورت شركة Breathe Battery Technologies خوارزمية قادرة على زيادة سرعات شحن بطاريات الليثيوم أيون بنسبة تصل إلى 30% مع الحفاظ على عمرها الافتراضي. يمكن نشر حزمة البرامج هذه المعروفة باسم breathe charge عبر التحديثات اللاسلكية وهي خفيفة الوزن بما يكفي لتشغيلها على الأنظمة المدمجة القديمة. يعمل هذا النظام عن طريق تحديد معدل الشحن المثالي بدقة أكبر من جداول البحث التقليدية المستخدمة في معظم المركبات الكهربائية. باختصار، يُعد تطوير أنودات السليكون/الكربون، إلى جانب تقنيات التوصيف المتقدمة والتحسين القائم على الذكاء الاصطناعي، واعداداً للغاية لمستقبل بطاريات الليثيوم أيون عالية الأداء.

إعادة تدوير بطاريات الليثيوم أيون: ضرورة بيئية وفرصة اقتصادية

تبرز الحاجة الملحة لإعادة تدوير بطاريات الليثيوم أيون بعد انتهاء عمرها الافتراضي بسبب التوسع السريع في استعمالها في الهواتف الذكية والحواسيب المحمولة والسيارات الكهربائية؛ إذ تحتوي البطاريات على معادن ثمينة مثل الليثيوم والكوبالت والنيكل التي يمكن استعادتها وإعادة استعمالها. ولا تمثل إعادة تدوير بطاريات الليثيوم أيون ضرورة بيئية فحسب، بل تمثل أيضاً فرصة اقتصادية كبيرة. ومن المتوقع أن تؤدي إعادة التدوير دوراً محورياً في تلبية الطلب المتزايد على البطاريات وتقليل الأثر البيئي المرتبط بها مع التقدم في التقنيات وزيادة الوعي بأهمية الاستدامة. وتشير دراسة حديثة من جامعة ستانفورد إلى أن إعادة تدوير بطاريات الليثيوم أيون لاستعادة المعادن الحيوية لها تأثيرات بيئية أقل بكثير مقارنة بتعدين المعادن الخام. وعلى نطاق واسع، يمكن أن تساعد إعادة التدوير أيضاً في تخفيف عدم الأمان طويل الأجل في إمدادات المعادن الحيوية للبطاريات. لا تزال هناك تحديات تواجه عملية إعادة التدوير على الرغم من فوائدها البيئية والاقتصادية؛ إذ تختلف البطاريات في تركيبها الكيميائي وتصميمها، مما يجعل من الصعب إنشاء أنظمة إعادة تدوير فعالة. فضلاً عن ذلك، غالباً ما تكون الخلايا متماسكة بمواد لاصقة قوية تجعل من الصعب تفكيكها، مما يجعل من الأخص لمصنعي البطاريات شراء المعادن المستخرجة حديثاً بدلاً من استخدام المواد المعاد تدويرها حتى مع ارتفاع الأسعار بسرعة. من المتوقع أن ينمو سوق إعادة تدوير

بطاريات الليثيوم أيون العالمي بشكل كبير في السنوات القادمة؛ إذ قُدرت قيمة السوق بـ7.2 مليار دولار في عام 2024، ومن المتوقع أن تنمو بمعدل نمو سنوي مركب يزيد عن 20.6% من عام 2025 إلى عام 2034. ويسعى العديد من الشركات الناشئة إلى تحسين تقنيات إعادة التدوير، فمثلاً، تستعمل شركة Redwood Materials مزيجاً من العمليات الحرارية والكيميائية لاستخلاص المعادن القيمة من البطاريات المستهلكة، في حين تعتمد شركة Li-Cycle على عملية كيميائية تستعيد تقريباً جميع مكونات البطارية.

وفي الختام، تمثل بطاريات الليثيوم دعامة أساسية للتكنولوجيا الحديثة. ومع تزايد الطلب عليها، يصبح من الضروري تطويرها بطرائق أكثر أماناً وكفاءة، والاهتمام بإعادة تدويرها لحماية البيئة. وبالنسبة للطلاب والباحثين، فإن هذا المجال لا يزال مليئاً بالتحديات والفرص البحثية الواعدة.

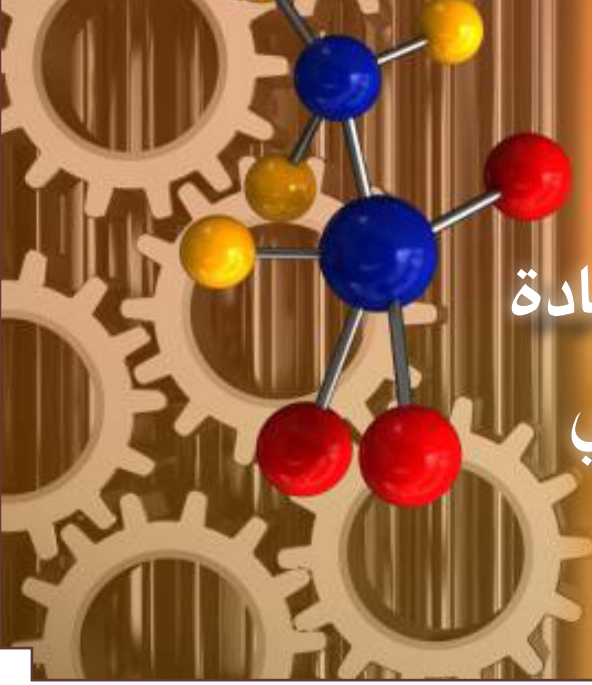
للاستزادة

Harish Sharma, Shivangi Sharma, Pankaj Kumar Mishra, A critical review of recent progress on lithium-ion batteries: Challenges, applications, and future prospects, Microchemical Journal: 212, (2025), 113494. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.113494>

Sajjad Kharabati, Seyfolah Saedodin, A systematic review of thermal management techniques for electric vehicle batteries. Journal of Energy Storage: 75, (2024), 109586. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109586>.

Maoyong Zhi, Rong Fan, Xiong Yang, Lingling Zheng, Shan Yue, Quanyi Liu, Yuanhua He, Recent research progress on phase change materials for thermal management of lithium-ion batteries. Journal of Energy Storage: 45, (2022), 103694. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103694>.

◀ إعداد: د. عبد الوهاب علاف، ود. عبد الغفار اللافي، قسم الكيمياء، هيئة الطاقة الذرية السورية.



الأطر المعدنية العضوية مادة العجائب في القرن الحادي والعشرين

ملخص

فاز البروفيسور الأردني عمر ياغي، أستاذ الكيمياء في جامعة كاليفورنيا بيركلي، بجائزة «نوابغ العرب» لعام 2024 عن فئة العلوم الطبيعية؛ وذلك تقديراً لإسهاماته الرائدة في مجال الكيمياء الشبكية وتطوير الأطر العضوية المعدنية. (Metal-organic frameworks: MOFs). يعدّ ياغي من أبرز العلماء العرب في العالم، حيث نشر أكثر من 300 بحث علمي استشهد بها أكثر من 250 ألف مرة وسجل 70 براءة اختراع. وقد أسهمت ابتكاراته في مواجهة تحديات عالمية تتعلق بالطاقة والمياه والبيئة، مما جعل أعماله مصدر إلهام للباحثين حول العالم ودافعاً لتعزيز الابتكار العلمي في المنطقة العربية.

تعدّ الأطر المعدنية العضوية مادة العجائب في القرن الحادي والعشرين. تتكون من أيونات أو تجمعات معدنية مُرتبطة بريائط عضوية لتشكيل هياكل مسامية أحادية أو متعددة الأبعاد. تتميز بدرجة غير مسبقة من الضبط الكيميائي والبنوي، واستقرار حراري، ومسامية فائقة، ومساحة سطحية كبيرة، مما يجعلها مرشحة مثالية للعديد من التطبيقات الواعدة. في هذا المقال، نلخص التقدم الحديث في تصميم هذه الأطر وتركيبها، ونستكشف تطبيقاتها المحتملة في مجالات تخزين الغازات وفصلها، والحفز، وإيصال الأدوية، والاستشعار الكيميائي/الحيوي، والمكثفات الفائقة، والبطاريات القابلة لإعادة الشحن، وأجهزة الاستشعار القابلة للارتداء ذاتية التغذية المعتمدة على المولدات النانوية. أخيراً، يُحدد هذا المقال التحديات الراهنة ويُوضح الفرص المستقبلية في هذا المجال، مما قد يوفر مراجع قيّمة للباحثين.

الكلمات المفتاحية: الأطر العضوية المعدنية، الامتزاز، التركيب الكيميائي، السطح الحر، الهيدروجين.

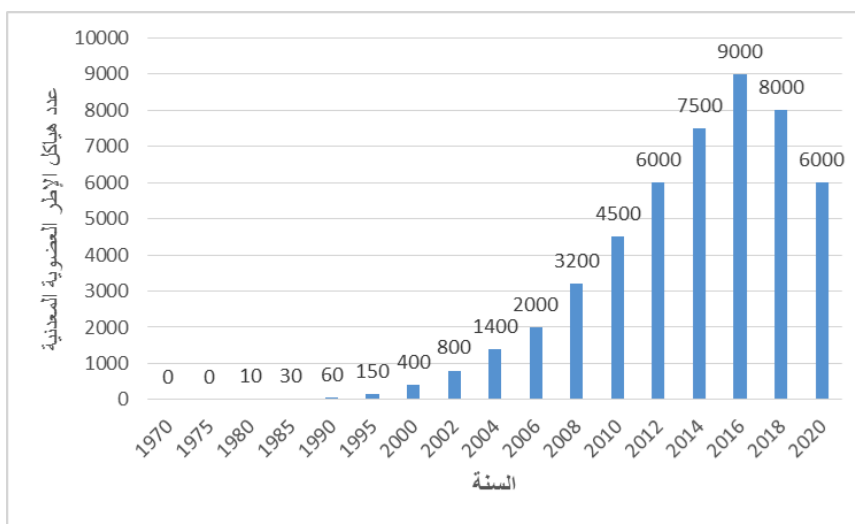
مقدمة

الأطر المعدنية العضوية (موف) هي فئة ثورية جديدة من المواد الصلبة البلورية التي يمكن تصميمها لالتقاط أنواع لا حصر لها من المواد وتخزينها، بما في ذلك غازات الاحتباس الحراري، أو لاستخدامها كحاملات أدوية نانوية. ويمكنها أيضاً سحب الماء من الهواء في الصحراء دون الحاجة إلى أية طاقة.

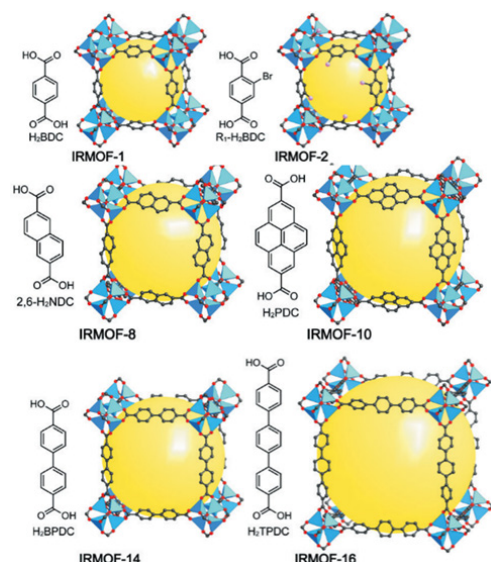
ومن الخصائص الرئيسية لمركبات موف التي أطلق عليها البعض اسم "المواد المعجزة"، هي مقدار المساحة الفارغة التي تحويها، وغالباً ما توصف في الأدبيات العلمية بأنها "فائقة المسامية"، حيث تتمتع هذه الهياكل النانوية الشبيهة بالإسفنج بأكبر مساحة داخلية من أية مادة معروفة. ويمكن أن يغطي غرام واحد من هذه المواد النانوية مسطح ملعب كرة قدم مساحته $(7000 \text{ m}^2/\text{g})$ [1].

وقد انبثقت الموفس، إضافة إلى الهياكل الكيميائية الجديدة الأخرى، بما في ذلك الأطر العضوية التساهمية (كوف) والأطر الإيميدازولات الزيوليتية (زيف)، من مجال يسمى الكيمياء الشبكية—وهو اسم صاغه رائد هذا المجال الكيميائي عمر ياغي الذي يعمل في مختبر كاليفورنيا ومختبر لورانس بيركلي. كان ياغي رائداً في مجال الكيمياء الشبكية منذ 20 عاماً عندما بدأ في الجمع بين المعادن والجزئيات العضوية في محاولة لتخزين الغازات والسوائل بشكل أفضل. وكان العلماء قد حاولوا اصطناع هياكل كيميائية مماثلة لعقود من الزمن، لكنها كانت تنهار دائماً. وقد نجح ياغي وفريقه في جامعة ولاية أريزونا للمرة الأولى في إنشاء عناقيد أكبر حجماً وثابتة من الناحية المعمارية [2].

ومنذ ذلك الحين، نما هذا المجال بشكل كبير. في الوقت الحاضر، هناك حوالي 100,000 نوع مختلف من الموفس والعدد في ازدياد، ويبدو أن استخداماتها لا تعد ولا تحصى (الشكل 1).



الشكل 1. تزايد عدد الأطر العضوية المعدنية الجديدة المسجلة في قواعد البيانات العالمية مع الزمن.



تتألف موفس من مكونات عضوية وغير عضوية. وتتضمن المكونات العضوية (روابط/ربائط التجسير) قاعدة مترافقة من حمض كربوكسيلي أو أيونات مثل مركبات الفسفور العضوي وأملاح حمض السلفونيك ومركبات حلقة غير متجانسة كما هو موضح في الشكل 2.

الشكل 2. ثماني وحدات معدنية تحيط بالمسام (تمثل الكرة الصفراء المساحة المتاحة في المسام) في الإطار المعدني العضوي المسمى موف. وتحتوي كل وحدة على أربع وحدات من الزنك رباعي السطوح (باللون الأزرق) وترتبط بالوحدة المجاورة لها بواسطة مجموعة حمض عضوي.

المركبات غير العضوية هي أيونات أو عناقيد معدنية تسمى وحدات البناء الثانوية. تعتمد هندسة الموفس على الربط والهندسة التحليلية لمكونات غير عضوية (أيونات المعادن) والمجموعة الوظيفية العضوية الطابع من أجل أمثلة الموفس لتطبيق معين. وقد

الشكل 3. بنى الموفس مع مختلف العقد المعدنية والروابط العضوية.

تبين أن موفس تشمل مجموعة متنوعة من الأشكال، بما في ذلك المثلثات ذات النقاط الثلاث، والعجلات المربعة ذات النقاط الأربع، والمنشور الثلاثي ذو النقاط الست، وثمانية الأوجه ذات النقاط الست كما هو موضح في الشكل 3.

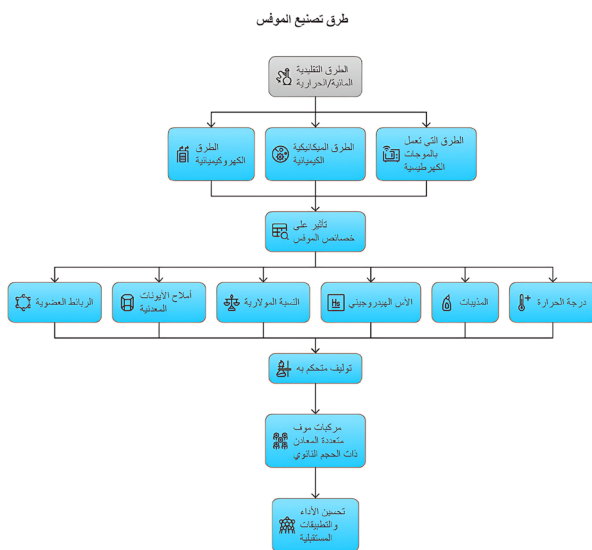
تتميز المركبات ثلاثية الأبعاد بشكل خاص بهيكلها المعقدة. تُظهر هذه الهياكل مسامية عالية ومساحات سطحية محددة، مما يعزز فائدتها في تطبيقات مختلفة مثل الحفز وتخزين الغازات والفصل. وتسمح شبكات المسام المترابطة بانتشار جزيئات الضيوف واستيعابها بكفاءة عالية بدءاً من جزيء الهيدروجين وصولاً إلى الأنسولين، وهو أمر بالغ الأهمية في العمليات التحفيزية والطبية [3].

ولتعزيز خصائص الموفس التقليدية طور الباحثون الأطر الهجينة التي تدمج مكونات مختلفة لتحقيق تأثيرات تآزرية، مثل إدخال أنواع مختلفة من العناصر المعدنية أو استخدام أكثر من نوع في الروابط العضوية. ويمكن أن تترث هذه الأطر الهجينة القائمة الخصائص المفيدة للمواد المكونة لها، مما يؤدي إلى تحسين الاستقرار والتفاعلية [4]. فعلى سبيل المثال، أظهرت الأطر الهجينة التي تجمع بين أكسيد الجرافين ومركبات موف نشاطاً تحفيزياً محسناً لتفكيك الملوثات، مما يُظهر إمكانات التهجين في تحسين أداء هذه المواد الهجينة، مما

يُتيح تصميم مواد ذات خصائص امتصاص محددة. وتشمل التطورات الحديثة دمج المجموعات الوظيفية التي تعدل خصائص المسام، وبالتالي تعزيز الاستقرار في ظل ظروف مختلفة وتحسين قدرات امتصاص الغازات [5, 6]. على سبيل المثال، تبين أن إدخال روابط عضوية وظيفية مختلفة لتحسين الاستقرار الحراري والمائي وبالتالي تحسين امتصاص الأسيتيلين في مركبات الموفس متعددة المعادن.

طرائق اصطناع الأطر العضوية المعدنية

يمكن تصنيع الموفس باستخدام الطرق التقليدية المائية/الحرارية، وكذلك التقنيات الحديثة مثل الطرائق الكهروكيميائية والميكانيكية الكيميائية والطرائق التي تعمل بالموجات الكهرومغناطيسية. تؤثر طرائق الاصطناع هذه على خصائص الموفس مثل حجم المسام ومساحة السطح والثباتية الحرارية والكيميائية. تؤدي عوامل مثل الروابط العضوية وأملاح الأيونات المعدنية والنسبة المولارية والأس الهيدروجيني والمذيبات ودرجة الحرارة أدواراً حاسمة في تصنيع هذه المواد. ويُعد التوليف المتحكم به لمركبات موف متعددة المعادن ذات الحجم النانوي محور تركيز لتحسين الأداء والتطبيقات المستقبلية [7].



الشكل 4. طرائق اصطناع الأطر العضوية المعدنية.

● **التصنيع الحراري بالمذيبات التقليدية:** تُستخدم هذه الطريقة تقليدياً لتصنيع الموف. وتتضمن تفاعل أيونات الفلزات مع الروابط العضوية في مذيب تحت ظروف درجة حرارة عالية لتكوين هياكل الموف؛ إلا أن هذه الطريقة محدودة مقارنةً بالطرق الأحدث مثل الطرق الكهروكيميائية والميكانيكية الكيميائية والطرق التي تعمل بالموجات الميكروية.

● **التصنيع الكهروكيميائي:** طريقة أحدث لتصنيع الموفس، وتتطوي على توليد موفس متعددة المعادن من خلال التفاعلات الكهروكيميائية التي يمكن أن تكون أكثر ملائمة للتطبيقات الصناعية.

● **التصنيع بمساعدة الأمواج الميكروية:** طريقة ناشئة لتصنيع الموفس. تستخدم هذه التقنية طاقة الموجات الميكروية لتسهيل تشكيل هياكل الموفس المائية، مما يوفر مزايا مثل وقت التفاعل الأسرع والخصائص المختلفة المحتملة في المركبات الناتجة. تتميز هذه الطريقة بالظروف الخالية من المذيبات، والإنتاجية الكمية في وقت قصير.

تقدم هذه الطرق مزايا وعيوب مختلفة من حيث الكفاءة وجودة المنتجات والتأثير البيئي وسهولة التشغيل. كل طريقة لها خصائصها الفريدة التي يمكن أن تكون مفيدة اعتماداً على متطلبات محددة لعملية تصنيع معينة.

تطبيقات الأطر العضوية المعدنية واستخدامها

برزت الأطر العضوية المعدنية كمواد متعددة الاستخدامات ذات تطبيقات واسعة في مجالات متنوعة، لا سيما في المجالات النووية، والتحفيز، وتخزين الغازات، وإيتاء الدواء، ومعالجة البيئة.

● التطبيقات النووية للأطر العضوية المعدنية

تعد الأطر العضوية المعدنية من المواد الواعدة في مجال العلوم النووية، لاسيما في إدارة النفايات المشعة، حيث أثبتت فعاليتها في فصل النظائر المشعة وإزالتها من البيئات الملوثة. جرى تطوير أكثر من عشرين نوعاً مختلفاً من الأطر العضوية المعدنية لاستخدامها في إزالة أيونات اليورانيوم بشكل انتقائي، مع تحقيق تقدم ملحوظ في قدرات الامتزاز الخاصة بها؛ فعلى سبيل المثال، أظهر إطار المادة UiO-68 الذي كان أول إطار يُطوّر لهذا الغرض، قدرة امتزاز تصل إلى حوالي 217 ملغم لكل غرام [8]، في حين قدمت الدراسات اللاحقة تعديلات مختلفة على الأطر، مثل المركب المؤلف من أكسيد الحديد وزيف-8، والذي سجل قدرة امتزاز مرتفعة بلغت 539 ملغم لكل غرام خلال مدة اتصال قصيرة لا تتجاوز 30 دقيقة. كما أظهرت أطر مثل MIL-101 (Cr) ومشتقاتها المعدلة بمجموعات الأمين تحسناً ملحوظاً في كفاءة الإزالة، حيث بلغت قدرات إزالة MIL-101-NH₂ و MIL-101-ED و MIL-101-DETA على التوالي 90، 200، و350 ملغم لكل غرام. إضافة إلى ذلك، أظهر إطار UiO-66-AO المعتمد على الأميدوكسيم قدرة فعالة على إزالة أيونات اليورانيوم من مياه البحر في فترة زمنية قصيرة تقل عن عشر دقائق [9]. كما جرى تسليط الضوء على كفاءة الأطر العضوية المعدنية في إزالة نظائر أخرى مثل السترانشيوم، السيزيوم والفوراييد [10] واليود المشع [11]، مما يجعلها أدوات قيمة لمواجهة التحديات المرتبطة بالنفايات المشعة الناتجة عن المفاعلات النووية ومصادر أخرى. وتُعزى هذه الفعالية إلى المساحة السطحية العالية والتركيب المسامي للأطر التي تسمح بالامتزاز الانتقائي للنظائر المشعة مع تقليل التداخل من الأيونات الأخرى الموجودة في مصفوفة النفايات. إلى جانب ذلك، جرى دراسة استخدام الأطر العضوية المعدنية في فصل الغازات النبيلة مثل الكزيتون والكريبتون [12] اللذين يوجدان بشكل شائع في تدفقات النفايات الناتجة عن المفاعلات النووية. وتعد الطرق التقليدية لفصل هذه الغازات، مثل التقطير بالتبريد مكلفة وتستهلك طاقة عالية، في حين أظهرت الأبحاث الحديثة إمكانية تصميم أطر عضوية معدنية قادرة على استقطاب هذه الغازات ديناميكياً، مما يتيح التقاطها عبر الامتزاز عند درجات حرارة الغرفة ودرجات حرارة مرتفعة، وهو تقدم مبتكر يعزز من كفاءة التعامل مع الغازات النبيلة الناتجة عن عمليات الانشطار النووي.

● التحفيز

تعمل الأطر العضوية المعدنية كحفازات غير متجانسة فعالة بفضل مساحتها السطحية العالية وبُنيتها المسامية القابلة للتعديل. تساهم هذه الخصائص في تسهيل العديد من التفاعلات الكيميائية، مثل تفاعلات هنري والتحويلات العضوية الأخرى، مما يجعلها ذات قيمة كبيرة في الاصطناع الكيميائي والتطبيقات الصناعية. كما أظهرت الدراسات الحديثة إمكانات محفزات الذرة المفردة المدعومة بالأطر العضوية المعدنية التي توفر كفاءة عالية في استخدام الذرات وأداءً تحفيزياً معززاً خصوصاً في التحفيز متعدد الأطوار.

● إيتاء الدواء

في المجال الطبي الحيوي، تُستخدم الأطر العضوية المعدنية كناقلات دوائية، يمكن تصميمها لتشكيل ناقلات نانوية تحيط بالعوامل العلاجية، مما يتيح إطلاقاً مستهدفاً ومتحكماً للدواء. على سبيل المثال، طُوّرت هياكل هجينة من الأطر العضوية المعدنية المغلفة بالكيتوزان وأكسيد الجرافين كناقلات مشتركة للأدوية المضادة للسرطان، حيث أظهرت هذه الأنظمة تحسناً في تحميل الدواء وملف إطلاقه. إضافة إلى ذلك، يمكن دمج مكونات حساسة للأس الهيدروجيني داخل هياكل الأطر العضوية المعدنية لتمكين إطلاق الدواء بشكل متحكم فيه استجابةً لمحفزات بيئية محددة، مثل الظروف الحمضية في بيئة الأورام.

● التطبيقات البيئية

أظهرت الأطر العضوية المعدنية قدرة واعدة في التطبيقات البيئية، لاسيما في تقليل تلوث الهواء وتنقية مياه الصرف. تتيح مساحتها السطحية العالية وأسقفها القابلة للتعديل امتصاص مجموعة متنوعة من الملوثات بفعالية، بما في ذلك المعادن الثقيلة والمركبات العضوية. كما أن قدرتها على التجدد واستقرارها عبر دورات امتصاص/تحرير متعددة تعزز من فعاليتها كمادة ممتصة في عمليات التنظيف البيئي.

● تخزين الغازات ونصلها

تعد المسامية الفريدة للأطر العضوية المعدنية ميزة رئيسية تجعلها مرشحة ممتازة لتقنيات تخزين الغازات وفصلها. على سبيل المثال، يمكن لبعض الأطر العضوية المعدنية النقاط ما يصل إلى 90% من غاز ثاني أكسيد الكربون من خليط الغازات، وهو أمر حيوي لمبادرات

احتجاز الكربون وتخزينها. وتعزى قدرتها على فصل الغازات إلى هندسة مسامها القابلة للتعديل وانتقائيتها العالية، مما يسمح لها بالتمييز بين الغازات المختلفة بناءً على معدلات انتشارها. وتعد هذه الخاصية مفيدة بشكل خاص في تطبيقات تنقية الهواء وتقليل الانبعاثات الصناعية

● تخزين الهيدروجين

تعدُّ الأطر العضوية المعدنية أيضاً مواد واعدة في مجال تخزين الهيدروجين، حيث يمكن استغلال مساميتها العالية وكيميائيتها القابلة للتعديل لتعزيز قدرة الامتزاز للهيدروجين. أظهرت التطورات الحديثة في اصطناع أنواع محددة من الأطر العضوية المعدنية إمكاناتها لتخزين الهيدروجين بأمان وكفاءة، مما يجعلها مناسبة لتقنيات خلايا الوقود وغيرها من تطبيقات الطاقة.

التحديات والقيود

تعدُّ الأطر العضوية المعدنية مواد ذات خصائص فريدة وإمكانات تطبيقية واسعة، إلا أن هناك العديد من التحديات والقيود التي تعيق تطبيقها على نطاق واسع.

تُعدُّ مسألة الاستقرار الحراري والكيميائي من أبرز التحديات التي تواجه الأطر العضوية المعدنية، لاسيما تلك الأطر ذات المسام الكبيرة. غالباً ما تعاني هذه الهياكل من ضعف في الاستقرار نتيجة انهيار البنى ذات الكثافة المنخفضة عند إزالة المذيبات. على الرغم من الجهود المبذولة لتعزيز السلامة الهيكلية للأطر، مثل استخدام تقنيات الربط المتسلسل (catenation)، والتي أظهرت نتائج واعدة، إلا أن تحقيق استقرار متسق ومستدام لا يزال يمثل حاجزاً رئيسياً أمام التوسع في التطبيقات العملية.

يشكل إنتاج الأطر العضوية المعدنية على المستوى الصناعي تحدياً كبيراً، نظراً لتكاليف الإنتاج المرتفعة، وصعوبات ضبط الجودة، وغياب المعايير والتنظيمات الموحدة. كما تزيد الأعباء الاقتصادية بسبب تكاليف المواد الخام والتخلص من النفايات، مما يثير مخاوف بيئية إضافية. إضافة إلى ذلك، فإن الطبيعة الزمنية الطويلة لطرق الإنتاج الحالية تعقد جهود التوسع في التصنيع على نطاق واسع.

على الرغم من أن الأطر العضوية المعدنية أظهرت أداءً واعدًا في تطبيقات متعددة، إلا أن أدائها قد يكون غير كافٍ في بعض المهام عند استخدامها كمادة مستقلة. لمواجهة هذه المشكلة، طُوِّرت مواد هجينة قائمة على الأطر العضوية المعدنية تجمع بين الخصائص المفيدة للأطر ومواد أخرى لتعزيز الاستقرار والموصلية والنشاط التحفيزي. ومع ذلك، لا يزال تحسين هذه المواد الهجينة يمثل تحدياً مستمراً يتطلب المزيد من البحث والتطوير.

التطورات المستقبلية للأطر العضوية المعدنية

يعدُّ البحث والتطوير المستمر في مجال الأطر العضوية المعدنية مفتاحاً لفتح آفاق جديدة وتعزيز التقنيات الحالية في مختلف الصناعات، حيث ستركز الاتجاهات المستقبلية على عدة محاور رئيسية لمعالجة التحديات القائمة والاستفادة بشكل أكثر فعالية من إمكانات هذه المواد. من أبرز هذه المحاور تحسين تقنيات الاصطناع، لاسيما تطوير طرق متقدمة لتحضير الأطر الهجينة من نوع موف -فوق-موف عبر النمو الإبيتاكسي الذي يتيح تكوين هياكل ذات طبقات أو نواة-قشرة بخصائص محسنة، مع أهمية اختيار أطر مضيئة وضييفة ذات ثوابت شبكية متوافقة لضمان نمو متجانس وتعزيز الوظائف.

كما يعدُّ توسيع نطاق الإنتاج الصناعي للأطر العضوية المعدنية أمراً ضرورياً لتلبية الطلب المتزايد، مما يستدعي تطوير عمليات تصنيع فعالة من حيث التكلفة وصديقة للبيئة، بما في ذلك استغلال مواد النفايات البلاستيكية مثل البولي إيثيلين تيريفثاليت المعاد تدويره في الاصطناع، مما يساهم في الاستدامة وحل مشاكل توفر المواد الخام. إضافة إلى ذلك، تبرز تطبيقات الأطر العضوية المعدنية في مجالات تخزين الطاقة، وتقنيات التحويل، وتقليل انبعاثات الغازات الدفيئة، حيث ستركز الدراسات المستقبلية على تحسين تصاميم الأطر لتعزيز استقرارها وكفاءتها في هذه المجالات، فضلاً عن دورها المحتمل في تقنيات معالجة مياه الصرف بفضل تصميماتها الاقتصادية والبسيطة في التشغيل. وأخيراً، مع نضوج هذا المجال، يصبح من الضروري معالجة التحديات المتعلقة بتكاليف الإنتاج، وضبط الجودة، وغياب المعايير التنظيمية الموحدة؛ حيث إن وضع معايير قياسية لإنتاج الأطر العضوية المعدنية وتوصيفها سيسهم في تسهيل دمجها في التطبيقات المختلفة وتعزيز الابتكار داخل الصناعة.

الخاتمة

في الختام، لقد حظيت الأطر المعدنية العضوية باهتمام كبير مؤخراً نظراً لخصائصها الفريدة وإمكاناتها الواعدة في مختلف التطبيقات. على الرغم من التقدم الملحوظ في أبحاث هذه المواد، لا تزال هناك تحديات تتعلق بفهم استقرارها وبنيتها، مما يستدعي المزيد من الدراسات المستقبلية للوقوف على أسباب تدهور البنية البلورية مع مرور الزمن وتطوير استراتيجيات لتعزيز استقرارها على المدى الطويل. كما ستركز

الأبحاث القادمة على تخصيص خصائص الأطر المعدنية العضوية لتلبية متطلبات تطبيقات محددة، من خلال اختيار الأيونات المعدنية، والروابط العضوية، والمجموعات الوظيفية المناسبة. هذا التخصيص يمكن أن يعزز من كفاءة وخصوصية استخداماتها في مجالات تخزين الغازات، والتحفيز الكيميائي، والطب النانوي، والاستشعار البيولوجي؛ مما يفتح آفاقاً جديدة لتصميم مواد ذات أداء محسن ومستدام. إضافة إلى ذلك، فإن التوسع متعدد التخصصات في أبحاث الأطر المعدنية العضوية، الذي يجمع بين الكيمياء وعلوم المواد والفيزياء والهندسة، يساهم في توسيع نطاق تطبيقاتها ويدعم تطوير أطر معدنية عضوية ذات قدرات متقدمة. إن هذه الاتجاهات المستقبلية ستسهم بلا شك في دفع عجلة التقدم العلمي والتكنولوجي، وتوفير حلول مادية أكثر كفاءة ودقة وقابلية للتحكم في مختلف المجالات.

مراجع للاستزادة

- [1] Farha, O.K., et al., (2012). Metal–Organic Framework Materials with Ultrahigh Surface Areas: Is the Sky the Limit? *Journal of the American Chemical Society*, 134(36): p. 15016-15021.
- [2] Introduction to Metal–Organic Frameworks. *Chemical Reviews*, 2012. **112**(2): p. 673-674.
- [3] Ding, M., et al., (2019). Carbon capture and conversion using metal–organic frameworks and MOF-based materials. *Chemical Society Reviews*. **48**(10): p. 2783-2828.
- [4] Kalmutzki, M.J., C.S. Diercks, and O.M. Yaghi (2018). Metal–organic frameworks for water harvesting from air. *Advanced Materials*. **30**(37): p. 1704304.
- [5] Zhang, Q., et al., (2023). Recent advances in metal-organic frameworks: Synthesis, application and toxicity. *Science of The Total Environment*, **902**: p. 165944.
- [6] Joseph, A.M., et al., (2025). Nature inspired metal-organic frameworks: Challenges, innovations, and prospects. *Polyhedron*, p. 117545.
- [7] Azbell, T.J., et al., (2023). Simplifying the Synthesis of Metal–Organic Frameworks. *Accounts of Materials Research*, **4**(10): p. 867-878.
- [8] Sheta, S.M., et al., (2023). Recent progress in high-performance environmental impacts of the removal of radionuclides from wastewater based on metal–organic frameworks: a review. *RSC advances*. **13**(36): p. 25182-25208.
- [9] Ma, L., et al., (2021). UiO-66-NH-(AO) MOFs with a New Ligand BDC-NH-(CN) for Efficient Extraction of Uranium from Seawater. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **13**(48): p. 57831-57840.
- [10] Assaad, T. and B. Assfour, (2024) ADSORPTION OF RADIOFLUORINE 18 F IONS ONTO METAL ORGANIC FRAMEWORK. *Fluoride* 57(3).
- [11] Assaad, T. and B. Assfour, (2017). Metal organic framework MIL-101 for radioiodine capture and storage. *Journal of nuclear materials*. **493**: p. 6-11.
- [12] Assfour, B. and S. Dawahra, (2020). Separation of noble gases through nano porous material membranes. *Annals of Nuclear Energy*, **148**: p. 107730.



التطبيقات غير الكهربائية للطاقة النووية: إنتاج الهيدروجين وتحلية مياه البحر

ملخص

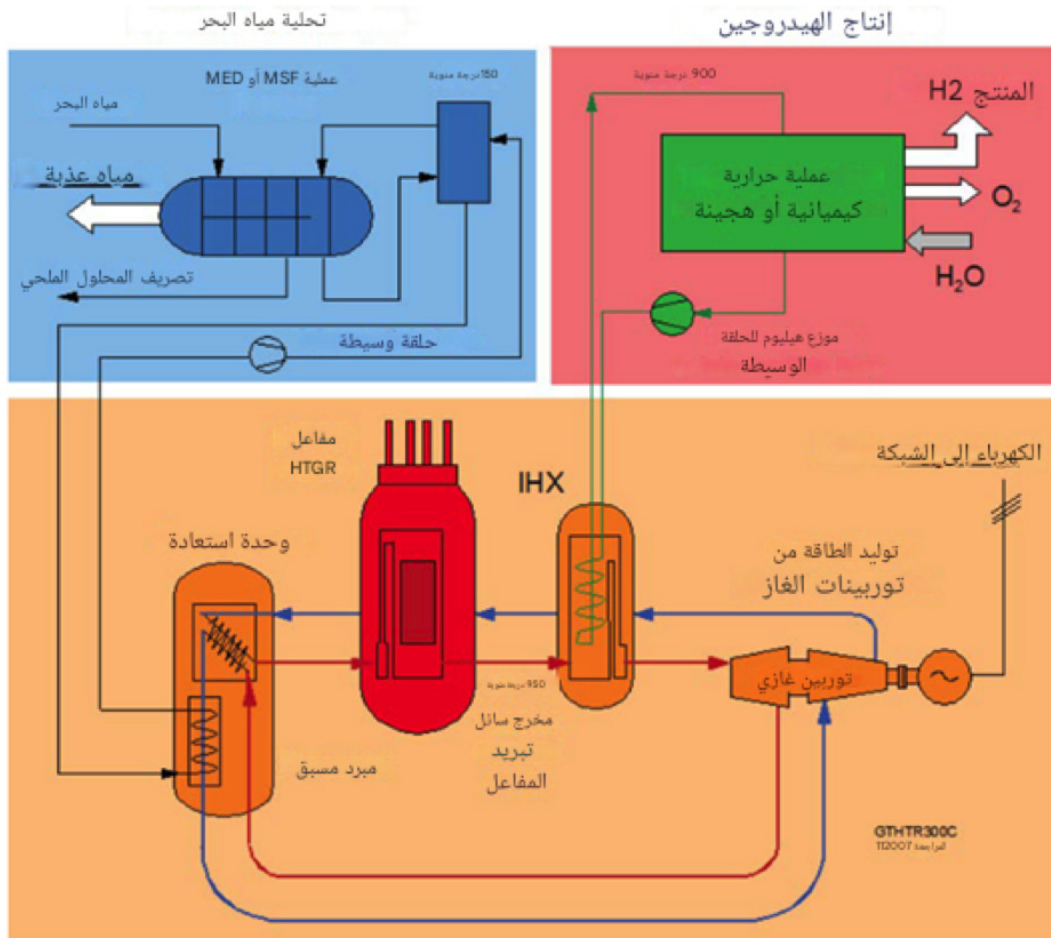
غالباً ما يُنظر إلى الطاقة النووية على أنها مرتبطة حصرياً بتوليد الطاقة الكهربائية. ومع ذلك، فإن تطبيقات الطاقة النووية تتجاوز بكثير إنتاج الكهرباء، وتشمل التوليد المشترك للطاقة والتدفئة والتبريد المركزي والتسخين عالي الحرارة وإنتاج الهيدروجين والوقود البديل والنقل وتحلية المياه. تُوسّع هذه التطبيقات الإضافية آفاق الطاقة النووية توسعاً ملحوظاً، وتُعزز الفوائد التي يمكن جنيها منها مثل تقليل الأثر البيئي والتخفيف من آثار تغير المناخ. كما يتزايد الاهتمام بالتطبيقات غير الكهربائية للطاقة النووية لأسباب بيئية واقتصادية وأمنية وغيرها.

الكلمات المفتاحية: التطبيقات غير الكهربائية، الطاقة النووية، الهيدروجين، التحلية.

مقدمة

يمكن للتطبيقات غير الكهربائية التي تعمل بالطاقة النووية أن تقدم حلاً مستداماً لعدد من تحديات الطاقة التي سيتعين على الأجيال الحالية والمستقبلية مواجهتها. هناك اهتمام متزايد في جميع أنحاء العالم باستخدام الطاقة النووية في التطبيقات غير الكهربائية مثل: تحلية مياه البحر وإنتاج الهيدروجين وتدفئة المناطق وتطبيقات صناعية مختلفة. يؤدي الهيدروجين دوراً رئيسياً في العديد من التطبيقات الصناعية. ومن المعترف به على نطاق واسع أنه ناقل طاقة صديق للبيئة، ويمكن استخدامه كوقود نظيف للنقل دون المساهمة في ظاهرة الاحتباس الحراري. تُظهر تقنيات إنتاج الهيدروجين النووي إمكانات كبيرة، ولها عدد من المزايا لحصة الهيدروجين المتزايدة في اقتصاد الطاقة العالمي في المستقبل مقارنة بالمصادر الأخرى. وبصرف النظر عن خفض ضرائب الكربون، فإن مدخلات الكهرباء لإنتاج الهيدروجين آخذة في التناقص مع ارتفاع درجات الحرارة التي توفرها المفاعلات النووية ذات درجة الحرارة المرتفعة. إضافة إلى ذلك، فإن توليد الكهرباء في درجات الحرارة المرتفعة هذه يعد أكثر كفاءة، وأكثر اقتصاداً أيضاً.

كما ثبت أن تحلية المياه بالطاقة النووية هي خيار قابل للتطبيق لتلبية الطلب المتزايد على المياه الصالحة للشرب في جميع أنحاء العالم، مما يوفر المياه للمناطق القاحلة وشبه القاحلة التي تواجه نقصاً حاداً في المياه. كما يمكن استخدام تحلية المياه النووية في الإدارة الفعالة للمياه في محطات الطاقة النووية، لا سيما في المناطق التي تعاني من ندرة المياه، لضمان توفير إمدادات المياه المنتظمة لجميع مراحل بناء محطات الطاقة النووية وتشغيلها وصيانتها. تُنتج أنظمة المفاعلات الغازية عالية الحرارة (HTGR) طاقة كهربائية وحرارة عالية لإنتاج الهيدروجين وبخار منخفض الحرارة عند اقترانها بنظام تحلية المياه. وتُستخدم طاقة المفاعل استخداماً مشتركاً لتوليد الكهرباء والتزود بالحرارة اللازمة للتطبيقات الأخرى (الشكل 1). ومن المتوقع أن تؤدي هذه المفاعلات دوراً مهماً في تحقيق الحياد الكربوني بحلول عام 2050 من خلال تمكين إزالة الكربون من القطاعات الصناعية التي يصعب تخفيفها. ويمكن لمفاعل واحد إنتاج 80000 طن من الهيدروجين سنوياً، بتكلفة إنتاج متوقعة تبلغ دولاراً أمريكياً واحداً للكيلوغرام في عام 2050 للاستخدام المشترك لتوليد الطاقة وإمدادات التدفئة.



الشكل 1. محطة طاقة نووية بتقنية HTGR لتوليد الكهرباء والهيدروجين والمياه العذبة.

إنتاج الهيدروجين

بحلول عام 2035، سيحتاج العالم إلى ملايين الأطنان من الهيدروجين النظيف، لكن الهيدروجين لا يمكن أن يُسهم إسهاماً كاملاً في إزالة الكربون بشكل عميق إلا إذا أُنتج من مصادر طاقة منخفضة الكربون وتوفرت طاقة كافية لتوليد الكهرباء منخفضة الكربون، بعد تلبية أولويات أخرى مثل الكهرباء المباشرة لقطاع النقل.

على المدى القصير (بحلول عام 2030)، يمكن إنتاج الهيدروجين من خلال عملية تُسمى «التحليل الكهربائي للماء» والتي كما يوحي اسمها، تتطلب مدخلات من الماء والكهرباء. ولا يُعدّ الهيدروجين الناتج عن التحليل الكهربائي للماء منخفض الكربون إلا إذا استخدم الكهرباء من طاقة الرياح أو الطاقة الشمسية الكهروضوئية أو الطاقة الكهرومائية أو الطاقة النووية.

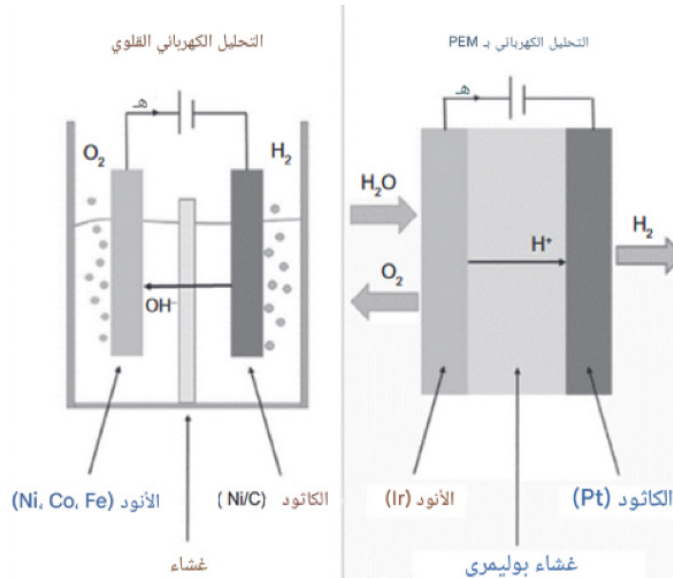
على المدى المتوسط، من المتوقع ظهور ابتكارات جديدة ستسمح أيضاً بإنتاج الهيدروجين بطرق مختلفة وأكثر كفاءة، بما في ذلك من الوقود الأحفوري إلى جانب احتجاز الكربون والتقنيات النووية المتقدمة مثل الجيل الجديد من المفاعلات النووية الصغيرة النمطية (SMRs). ستستخدم هذه التقنيات النووية المتقدمة درجات حرارة عالية (أكثر من 700 درجة مئوية) لإنتاج الهيدروجين بكفاءة من خلال عمليات كيميائية حرارية تتطلب مدخلات من الماء والحرارة.

يمكن استخدام أي نوع من المفاعلات النووية لإنتاج الهيدروجين طالما أنه قادر على توفير الكهرباء والحرارة اللزمتين للعمليات. ومع ذلك، يُعدّ سائل تبريد المفاعل ودرجة حرارته القصوى معيارين أساسيين لتحديد نوع المفاعل الأنسب لعمليات الإنتاج المختلفة. كما يُعدّ حجم الطاقة عاملاً مهماً، إذ تُعدّ المفاعلات الكبيرة أكثر ملاءمةً للتوليد المشترك للكهرباء وإنتاج الهيدروجين، في حين تُعدّ المحطات صغيرة الحجم أكثر ملاءمةً للاستخدام الفردي (مثلاً لإنتاج الهيدروجين فقط).

تُعدّ الاعتبارات الخاصة أكثر أهميةً لأنواع معينة من المفاعلات. على سبيل المثال، ستكون تكلفة توليد الهيدروجين أقل جاذبية لمحطة صغيرة الحجم تُستخدم لإنتاج الهيدروجين فقط، كما هو الحال عند استخدام مفاعلات الماء الخفيف لإنتاج الهيدروجين. ومع ذلك، من الممكن جعل هذه العملية أكثر جدوى من الناحية الاقتصادية، مثل: استخدام الطاقة خارج أوقات الذروة أو التوليد المشترك لتقليل التكاليف أو تقاسمها. تُعدّ مفاعلات الطاقة الصغيرة والمتوسطة القائمة على مفاعلات الغاز عالية الحرارة (HTGR) خياراً جذاباً أيضاً، يمكن لمحطات الطاقة النووية المتقدمة في المستقبل، مثل مفاعلات درجة الحرارة العالية جداً (VHTR) أو المفاعلات المبردة بالماء فوق الحرج (SCWR)، أن توفر ليس الكهرباء اللازمة فحسب، بل حرارة عالية نسبياً، مما يوفر كفاءة عالية لدورة الطاقة الصافية.

طرق توليد الهيدروجين

● توليد الهيدروجين بالتحليل الكهربائي



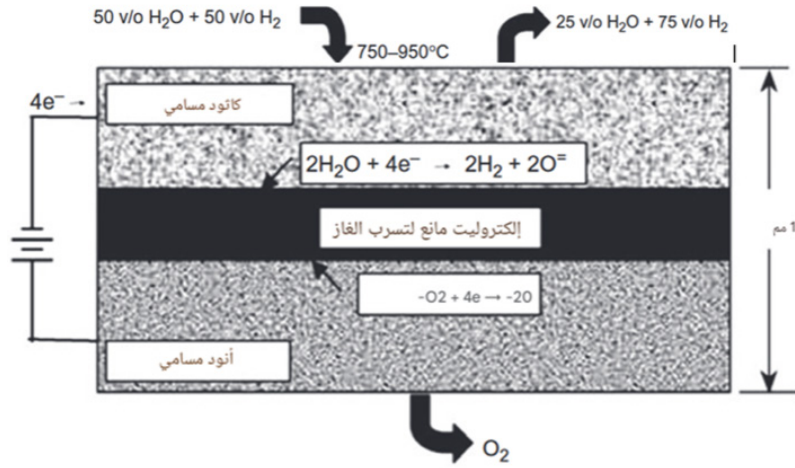
يُعدّ التحليل الكهربائي أبسط عملية متاحة حالياً لإنتاج الهيدروجين مباشرةً من الماء (الشكل 2). وعلى الرغم من إمكانية دمج التحليل الكهربائي التقليدي منخفض الحرارة مع جميع المفاعلات العاملة حالياً، إلا أنه لن يكون منافساً اقتصادياً. يتم عند درجات الحرارة الأعلى تحديد عمليات محتملة مختلفة لإنتاج الهيدروجين، مثل التحليل الكهربائي بالبخار عالي الحرارة وغيرها من العمليات الكيميائية الحرارية. في هذه الحالة، يُمثل استخدام المفاعلات عالية الحرارة لإنتاج الهيدروجين خياراً عملياً؛ نظراً لأن معظم هذه العمليات تتمتع بكفاءة أعلى من التحليل الكهربائي منخفض الحرارة. ومن أنواع التحليل الكهربائي التي يُنظر في نشرها على نطاق صناعي إلى جانب التحليل الكهربائي القلوي التقليدي: التحليل الكهربائي بغشاء تبادل بروتوني (PEM)، والتحليل الكهربائي بالبخار عالي الحرارة (HTSE) باستخدام سيراميك موصل للأكسجين.

الشكل 2. مبادئ تشغيل التحليل الكهربائي للماء القلوي وغشاء تبادل البروتون (PEM).

يمكن تقليل استهلاك الكهرباء اللازم للتحليل الكهربائي بزيادة

نطاق درجة الحرارة؛ إذ ينخفض إجمالي الطلب على الطاقة للتحليل الكهربائي في الطور البخاري بفعل حرارة التبخير، والتي يمكن توفيرها بتكلفة أقل بكثير باستخدام الطاقة الحرارية بدلاً من الطاقة الكهربائية. في الواقع، في نطاق درجات الحرارة العالية (800-1000 درجة مئوية)

يمكن أن يكون استهلاك الكهرباء أقل بنحو 35% من استهلاك التحليل الكهربائي التقليدي. إضافة إلى ذلك، تتحسن كفاءة توليد الكهرباء عند درجات الحرارة العالية تحسناً ملحوظاً. تُعد عملية HTSE ميزة نظراً لكفاءتها العالية في تحويل الحرارة إلى هيدروجين عند اقترانها بدورات طاقة عالية الكفاءة (الشكل 3).

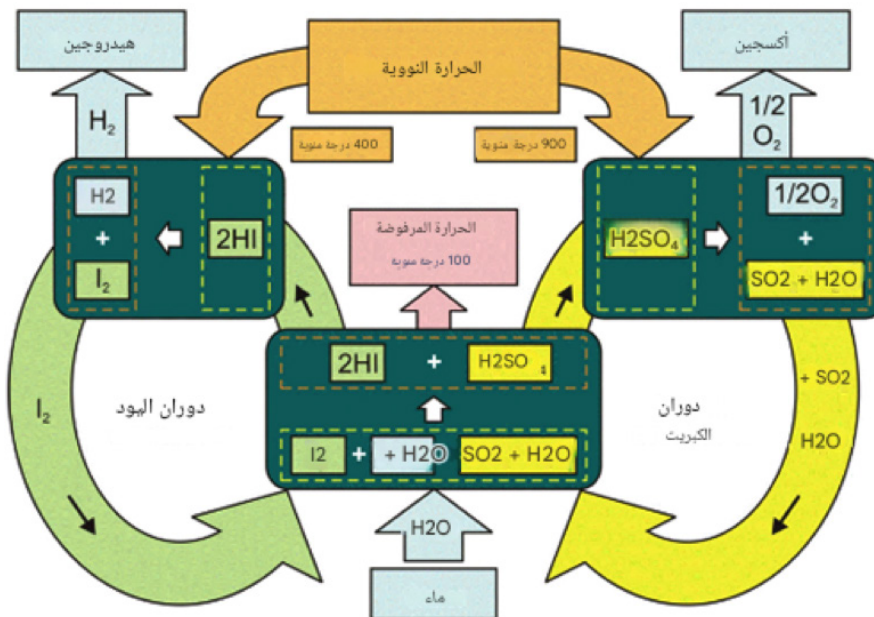


الشكل 3. مخطط الخلية المستوية للتحليل الكهربائي بالبخار.

● توليد الهيدروجين من خلال الدورات الكيميائية الحرارية

تُعد العملية الكيميائية الحرارية خياراً واعداً لإنتاج كميات كبيرة من الهيدروجين عن طريق انقسام الماء في درجات حرارة عالية. أبسط طريقة لانقسام الماء هي التحليل الحراري المباشر في خطوة واحدة، إلا أن هذا يتطلب درجات حرارة تزيد عن 2500 درجة مئوية لكميات معقولة، وهو أمر غير ممكن صناعياً؛ لذلك يُنظر حالياً في عمليات متعددة الخطوات. تُركز الأبحاث المتعلقة بالدورات الكيميائية الحرارية بشكل رئيسي على استخدام مدخلات الحرارة الأولية الشمسية أو النووية.

ومن الدورات التي تستحق دراسة خاصة عملية الكبريت-اليود (S-I) المعروفة أيضاً بدورة Ispra Mark 16، والتي طورتها في الأصل شركة General Atomics الأمريكية، ثم تبنتها وعدلتها مؤسسات مختلفة مثل وكالة الطاقة الذرية اليابانية (JAEA). تتكون هذه الدورة أساساً من ثلاثة تفاعلات كيميائية (الشكل 4). من بين جميع الدورات الكيميائية الحرارية، تُعد دورة S-I هي الدورة ذات الكفاءة الأعلى المذكورة. ويُقدّر الحد النظري لكفاءة العملية الكلية بنسبة 51%، بافتراض تفاعلات كيميائية عكسية مثالية.

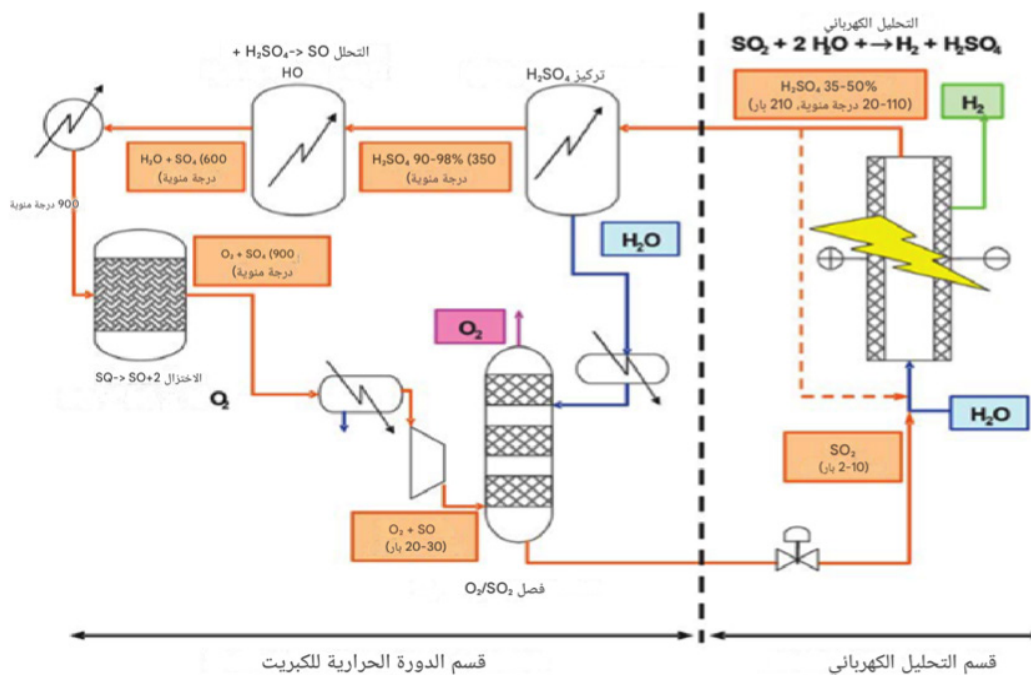


الشكل 4. مخطط لدورة الانقسام الحراري الكيميائي للمياه بالكبريت واليود.

في جميع الدراسات التي فحصت الدورات الكيميائية الحرارية فحصاً منهجياً، حُدثت دورات عائلة الكبريت S-I والكبريت الهجين والكبريت-البروم الهجين- كأكثر المركبات الواعدة، حيث تتميز بمعدلات كفاءة أعلى ودرجة تعقيد أقل (من حيث عدد التفاعلات والفصل). وتشترك هذه المركبات الثلاثة في التحليل الحراري لحمض الكبريتيك عند درجات حرارة عالية.

● توليد الهيدروجين باستخدام الدورات الهجينة

تجمع الدورة الهجينة بين مزايا التفاعلات الكيميائية الحرارية والتفاعلات الإلكتروليتية. في هذا النوع من الدورات، يُجبر التفاعل منخفض الحرارة ذو الكفاءة الحرارية الديناميكية المنخفضة كهروكيميائياً. تُعرف عملية الكبريت الهجين (HyS) التي دُرست في الأصل في مختبر لوس ألاموس العلمي وطورتها شركة ويستنجهاوس أيضاً بدورة إسبرا مارك 11 (الشكل 5).



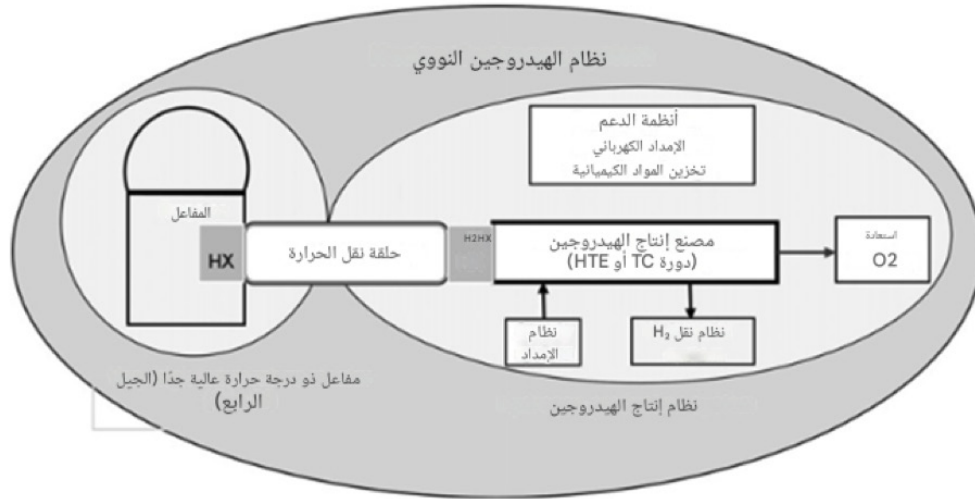
الشكل 5. رسم تخطيطي لدورة ويستنجهاوس الهجينة الكبريتية.

جرى البحث في العديد من الدورات الكيميائية الحرارية البديلة لإنتاج الهيدروجين التي تعمل في درجات حرارة معتدلة تتراوح بين 500 و600 درجة مئوية. تقلل درجات حرارة التشغيل المنخفضة من تكاليف المواد والصيانة، ويمكنها استخدام الحرارة الضائعة منخفضة الدرجة بفعالية، مما يحسن كفاءة الدورة ومحطة الطاقة. تشمل المزايا الإضافية سهولة التعامل مع العوامل الكيميائية والتفاعلات. ومن الدورات الهجينة:

دورة النحاس-الكلور (Cu-Cl) ودورة الحديد-الكلور أو دورة «مارك 9» ودورة أكسيد النحاس الهجينة الكيميائية الحرارية لكبريتات النحاس. ومن العمليات الكيميائية الحرارية الواعدة الأخرى: دورة الكالسيوم-الحديد-البروم أو دورة UT-3 التي طُوّرت في جامعة طوكيو (UT) والتي تتكون من أربعة تفاعلات غازية-صلبة.

تكامُل نظام الهيدروجين النووي

تُدخل أنظمة إنتاج الهيدروجين المقترنة بمفاعل نووي اعتبارات ومتطلبات جديدة في تصميم وتشغيل محطة الهيدروجين النووية المقترنة. يجب أن يكون موقع المحطة النووية ومحطة توليد الهيدروجين في موقع واحد لتبادل الطاقة الحرارية. تتضمن واجهة الربط بين المفاعل ونظام إنتاج الهيدروجين مسارات طويلة محتملة لنقل الحرارة عند درجات حرارة عالية ومبادلات حرارية معرضة لبيئات كيميائية عالية الحرارة ومسببة للتآكل، وقضايا جديدة تتعلق بالسلامة والتنظيم، وبنى تحتية للعمليات الكيميائية ونقل وتخزين الهيدروجين والأكسجين. ستكون هذه المشكلات شائعة في أي محطة هيدروجين نووية، إلا أن العديد من المشكلات الأخرى ستعتمد على عملية إنتاج الهيدروجين المحددة. يوضح الشكل 6 واجهة لمحطة الهيدروجين النووية المقترنة وتوازنها. يوفر المفاعل عالي الحرارة حرارة العملية النووية لمحطة الهيدروجين من خلال حلقة وسيطة لنقل الحرارة.



الشكل 6. مخطط الربط بين المفاعل النووي ومحطة الهيدروجين.

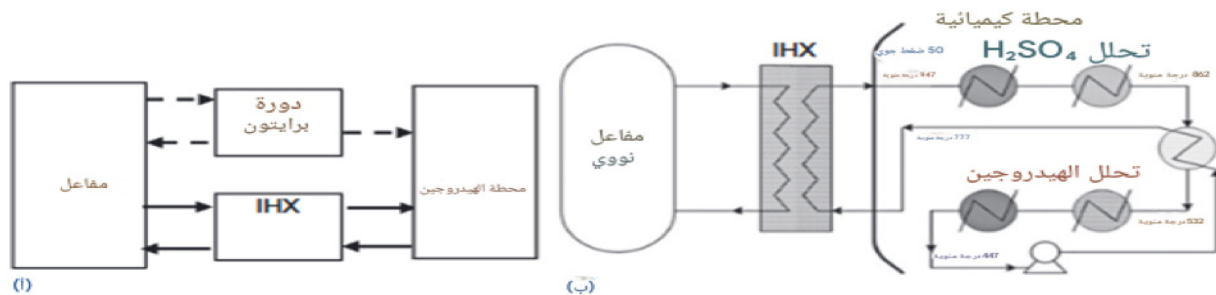
كما نوقش سابقاً يمكن إنتاج الهيدروجين باستخدام المفاعلات النووية إما عن طريق التحليل الكهربائي أو العمليات الكيميائية الحرارية دون أي مساهمة لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. تقتصر مفاعلات الماء الخفيف أو الماء الثقيل والمفاعلات المبردة بالغاز العاملة حالياً على درجة حرارة قصوى تبلغ 350 درجة مئوية؛ لذلك يمكن استخدام هذه المفاعلات للتحليل الكهربائي عند درجات حرارة منخفضة. فيما يتعلق بعملية التحليل الكهربائي منخفضة الحرارة، تكون متطلبات البنية التحتية الإضافية ضئيلة، حيث يمكن استخدام خطوط الطاقة الكهربائية على أي مسافة من المحطة النووية، ويمكن أن تقع محطة التحليل الكهربائي في موقع الطلب. باستثناء المشكلات الاقتصادية، لا تواجه تقنية الهيدروجين النووي أي مشكلات كبيرة في إنتاج الهيدروجين. يتطلب التحليل الكهربائي البخار عالي الحرارة درجات حرارة تتراوح بين 700 و 1000 درجة مئوية. تنتج مفاعلات الماء الخفيف الحالية، ومفاعلات الماء الخفيف المتقدمة المبردة بالماء على المدى القريب درجات حرارة أقل من 350 درجة مئوية، ولا يمكن استخدامها لهذه الأغراض. ومع ذلك، يمكن أن تصل سوائيل تبريد أخرى في العديد من مفاعلات الجيل الرابع إلى درجات حرارة عالية (أكثر من 700 درجة مئوية)، ويمكن ربطها بمحطات كيميائية حرارية. يوضح الجدول 1 خيارات إنتاج الهيدروجين النووي.

الجدول 1. خيارات إنتاج الهيدروجين النووي*

طريقة إنتاج الهيدروجين				
التحليل الكيميائي الحراري		التحليل الكهربائي		
تقسيم الماء	إصلاح الميثان بالبخار	بخار عالي الحرارة	الماء	
SI < 850 لدورة S-AGR < 600	700<	300< لمفاعل الماء الخفيف LWR 600< لدورة النحاس والكلوريد	0<	درجة الحرارة المطلوبة (°م)
45<، حسب درجة الحرارة	80-70	90-85	85-70	كفاءة العملية الكيميائية (%)
غير ممكن	غير ممكن	30	27	الكفاءة المقترنة بمفاعل الماء الخفيف (%)
60-40، حسب الدورة ودرجة الحرارة	70<	60-40، حسب درجة الحرارة	أقل من 40	الكفاءة المقترنة بـ HTGR أو AHTR أو S-AGR (%)
يزيل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون	عملية كيميائية مثبتة مع تخفيض 40% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون	يمكن ربطها بمفاعلات تعمل في درجات حرارة متوسطة ويزيل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون	تكنولوجيا مثبتة مع مفاعلات الماء الخفيف ويزيل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون	الإيجابيات
كيمياء مضرّة تتطلب التطوير	لم يتم القضاء على انبعاثات ثاني أكسيد الكربون ويعتمد ذلك على أسعار الميثان	يتطلب مفاعلات عالية الحرارة. كما يتطلب تطوير وحدات HTES.	كفاءة منخفضة	السلبيات

*مفاعل الماء الخفيف (LWR): مفاعل غاز ثاني أكسيد الكربون فوق الحرج (S-AGR): يود الكبريت (SI): كلوريد النحاس (Cu-Cl): مفاعل عالي الحرارة مبرد بالغاز (HTGR): مفاعل درجة الحرارة العالية المتقدم (AHTR): التحليل الكهربائي عالي الحرارة للبخار (HTES).

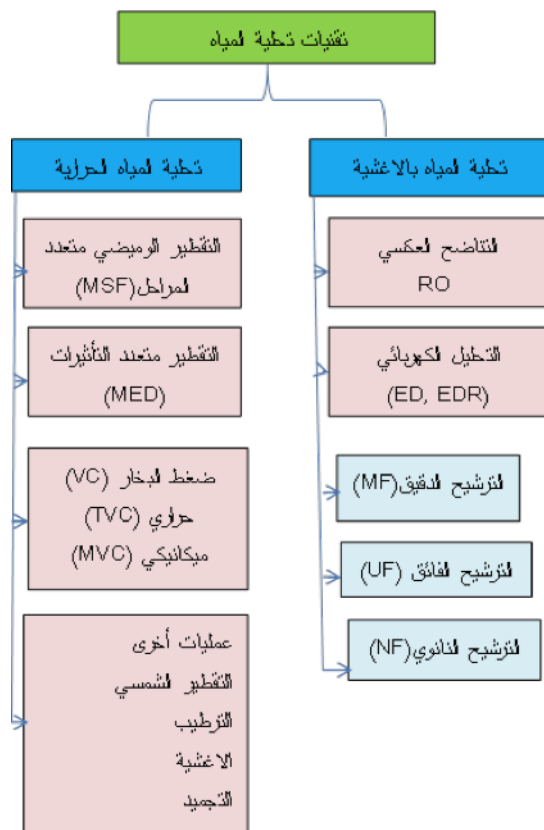
يعتمد تكوين اقتران محطة الطاقة النووية (NPP) ومحطة إنتاج الهيدروجين (HPP) على نوع المفاعل وطريقة إنتاج الهيدروجين. يمكن توصيل محطة الطاقة النووية بنظام تحويل طاقة مثل دورة برايتون المباشرة، لإنتاج كهرباء تُغذي محطة الهيدروجين بالطاقة، كما هو الحال في عملية HTSE (الشكل 7-أ). كما يوضح الشكل 7-ب مثلاً على مفاعل عالي الحرارة مُقترن مباشرةً بدورة SI. يمكن توصيل المفاعل بمحطة الهيدروجين باستخدام مبادل حراري وسيط (IHx) أو زوج من مبادلات حرارية متسلسلة (IHx) من خلال أنظمة متنوعة.



الشكل 7. (أ) ربط محطة نووية عالية الحرارة بمحطة هيدروجين. (ب) مفاعل عالي الحرارة جداً متصل بمحطة هيدروجين تعتمد على دورة SI.

تحلية المياه

تُعد ندرة المياه مشكلة عالمية تؤثر على العديد من الدول سنوياً. إلى جانب الحفاظ على المياه ومكافحة التلوث واستصلاح المياه، يُنظر حالياً في حلول جديدة للمياه العذبة بما في ذلك تحلية المياه لمواجهة نقصها. وقد دفع القلق المتزايد بشأن تكلفة الوقود الأحفوري وعدم اليقين بشأن توافره، إضافة إلى المخاوف البيئية الأخرى المرتبطة به، إلى البحث عن مصادر طاقة بديلة لتلبية احتياجات تحلية المياه المستقبلية، بما في ذلك الطاقة النووية. وتُعد تحلية مياه البحر بالطاقة النووية أكثر ملاءمة من الأنظمة التقليدية نظراً للمخاوف البيئية من تزايد تركيز غازات الدفيئة في الغلاف الجوي خاصة ثاني أكسيد الكربون.



الشكل 8. تصنيف تقنيات تحلية المياه.

تقنيات تحلية المياه

يتوافر العديد من التقنيات التجارية لتحلية مياه البحر من بينها ثلاث طرق نموذجية هي: التقطير متعدد التأثيرات (MED) والتقطير الوميضي متعدد المراحل (MSF) والتناضح العكسي (RO). يمكن تصنيف النوعين الرئيسيين من تقنيات تحلية المياه المستخدمة حول العالم عموماً إلى عمليات تحلية حرارية، حيث تُغلى مياه التغذية ويُكثف البخار على شكل ماء نقي (مقطر)، أو عمليات تحلية غشائية حيث تُستخدم أغشية شبه نفوذة لتصفية المواد الصلبة الذائبة. تتطلب كلتا التقنيتين طاقة للعمل. ويندرج تحت هذين النوعين فئات فرعية (عمليات) تستخدم تقنيات مختلفة، كما هو موضح أدناه في الشكل 8.

فيما يتعلق بتحلية المياه النووية، تشمل بعض المشاريع الجارية والمستقبلية مفاعل الماء الثقيل (HWR) بقدرة 220 ميغاواط (كهربائي) في الهند، والمفاعل المتصل بمحطة تحلية تعمل بتقنية التقطير الوميضي متعدد المراحل (MSF) والتناضح العكسي، ومفاعل NHR-10 الصيني بقدرة 10 ميغاواط (حراري)، ومفاعل الماء المضغوط (PWR) في المغرب (العمل على هذا المشروع معلق حالياً)، ومفاعل الماء المضغوط النمطي (SMART) بقدرة 100 ميغاواط (كهربائي) في جمهورية كوريا، ومفاعل KLT-40 المثبت على بارجة مع التسخين المسبق بالتناضح العكسي، ومفاعلي الماء المضغوط المتكاملين بقدرة 15 و90 ميغاواط كهربائي، ومفاعل Ruta الحراري بقدرة 55 ميغاواط حراري (في

الاتحاد الروسي). وقد أطلق ائتلاف من سبع منظمات صناعية وبحثية وتطويرية أوروبية وكندية مؤخراً مشروع EURODESAL لتحلية المياه في جنوب أوروبا الذي يعتمد على استخدام مفاعلات مبتكرة. فيما يتعلق بإمدادات الحرارة للعمليات، فإن تشغيل مفاعل الاختبار عالي الحرارة (HTTR) (في اليابان)، وتنفيذ مشروع مفاعل الوقود الحبيبي النمطي (PBMR) (في جنوب أفريقيا)، وتشغيل HTR-10 (في الصين) وتشغيل مفاعلات الهيليوم المعيارية التوربينية الغازية (GT-MHRs) (في فرنسا واليابان والاتحاد الروسي والولايات المتحدة) هي أقرب الاحتمالات الممكنة.

تُعدّ تحلية المياه النووية تطبيقاً غير كهربائي مهم للطاقة النووية والحرارة، حيث ترتبط ارتباطاً وثيقاً وتتوافق مع التنمية المستدامة، وإدارة تغير المناخ (سواء من حيث التخفيف أم التكيف)، والأمن المائي، كما تُمكن هذه المشاريع من التشغيل المرن لمحطات الطاقة النووية في مزيج الطاقة المستقبلي، ومن خلال آليات ربط القطاعات، ستدعم النمو المستدام للصناعات الأخرى المعتمدة على المياه أيضاً، بما في ذلك نشر اقتصاد الهيدروجين النظيف. هناك العديد من المشاريع التي نُفذت بنجاح في آسيا وأوروبا وأمريكا الشمالية، والتي أثبتت الجدوى التقنية والتجارية لهذه الأنظمة، وقد أبدت دول أخرى اهتماماً بهذه المشاريع. توفر تحلية المياه النووية المياه العذبة بتكلفة تتراوح بين 0.5 و2.5 دولار أمريكي للمتر المكعب، مع انبعاثات ثاني أكسيد الكربون خلال دورة الحياة تتراوح بين 0.009 و0.045 كجم من ثاني أكسيد الكربون/متر مكعب من المياه العذبة المنتجة، وذلك حسب التكنولوجيا ونطاق النشر. وتظل هذه الأرقام مستقرة ومحسنة ضد العوامل الخارجية مثل أسعار الوقود أو ضرائب الكربون.

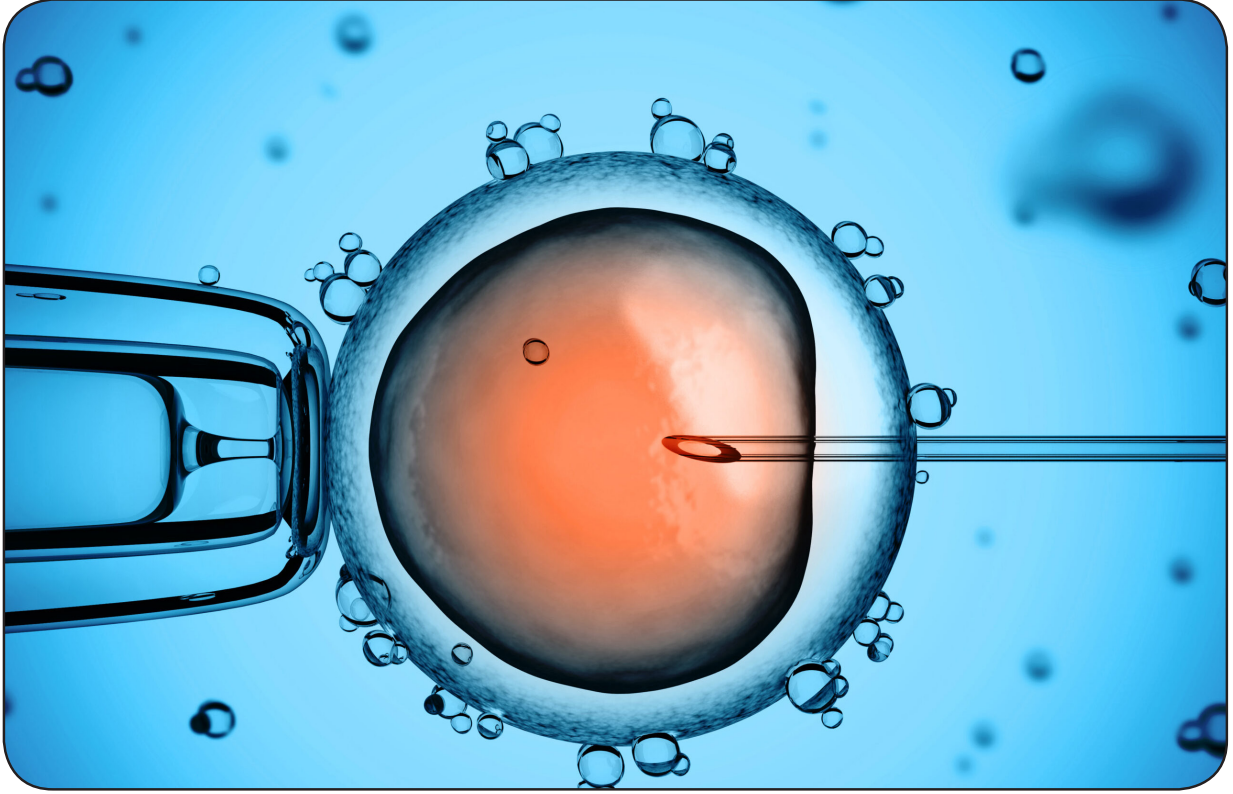
مراجع للاستزادة

- [1] IAEA-TECDOC-1885. Nuclear–renewable hybrid energy systems for decarbonized energy production and cogeneration. Vienna, 22–25 October 2018
- [2] IAEA-TECDOC-1753. New technologies for seawater desalination using nuclear energy VIENNA, 2015.
- [3] Marc A. Rosen. Nuclear Energy: Non-Electric Applications. European journal of sustainable development research, 2021, 5(1), em0147.
- [4] Roxanne Pinsky. Comparative review of hydrogen production technologies for nuclear hybrid energy systems. Progress in Nuclear Energy 123 (2020) 103317.

◀ إعداد: د. سعدو الظواهره ، قسم الهندسة النووية، هيئة الطاقة الذرية السورية.



تقانة الإخصاب بالزجاج (IVF): من أطفال الأنابيب حتى الخلايا الجذعية



ملخص

تعد ولادة لويز براون في العام 1978 بواسطة الإخصاب بالزجاج (IVF) *in vitro fertilization* بداية الحقبة الذهبية لهذه التقانة. اعتمدت التقانة على خمس خطوات أساسية تبدأ من التحفيز الهرموني للمبيض مروراً بجمع البويضات والحيوانات المنوية، ومن ثم إخصاب البويضة خارج الجسم ليتم بعدها زرع الجنين ونقله إلى الرحم المستقبل. ساهمت هذه التقانة خلال العقود الأربعة الماضية في تغيير العالم؛ وذلك من خلال التغير الهائل الذي أحدثته في المفاهيم الخاصة بكل من علوم التكاثر والأجنة والأمراض الوراثية وصولاً إلى علوم الخلايا الجذعية. ومع ولادة الملايين من الأطفال من خلال تطبيقها، مثلت تقانة IVF إحدى أهم الحلول العملية لمعالجة مشكلة العقم لدى البشر. وبالرغم من جميع المشاكل الأخلاقية والجدلية المرافقة، إلا أن الإخصاب بالزجاج ودون أدنى شك كان أحد أهم التقانات الحيوية التي استطاع الباحثون من خلالها فتح آفاق علمية وعملية جديدة لدى كل من البشر والحيوانات.

الكلمات المفتاحية: الإخصاب بالزجاج، جنين، بويضة، خلايا جذعية.

لمحة تاريخية عن الإخصاب بالزجاج (IVF)

كانت البدايات المبكرة للإخصاب بالزجاج أو ما يعرف أيضاً بالإخصاب بالمختبر بدافع البحث عن تطوير تقانات التخصيب خارج الجسم لدى الثدييات. يعود تاريخ الإخصاب بالزجاج إلى تسعينيات القرن التاسع عشر، وذلك عندما أبلغ والتر هيب وهو أستاذ بجامعة كامبريدج بالمملكة المتحدة عن أول محاولة معروفة لزراعة الأجنة في الأرانب. وصف ألدوس هكسلي في العام 1932 هذه التقنية في روايته الخيالية العلمية «عالم جديد شجاع». في حين قام جريجوري بينكوس في العام 1934 بخلط بويضات وحيوانات منوية لأرنب وحاول زرع الجنين في أرنب بديل. بعد أربعة عشر عاماً وفي العام 1948، استطاعت ميريام مينكين وجون روك استعادة أكثر من 800 بويضة من النساء. وفي العام 1959 حصل مين تشوه تشانغ وهو باحث صيني في مجال الإنجاب على أول دليل لا يقبل الشك على الإخصاب في المختبر عن طريق تحقيق ولادة حية للمرة الأولى لأرنب باستخدام بويضات وحيوانات منوية من أرنب أسود. بجميع الأحوال، خلال الفترة ما بين الأعوام 1944 وستينيات القرن العشرين كان هناك الكثير من الادعاءات المختلفة لتحقيق نجاح بالإخصاب بالزجاج لدى البشر، ولكن لم ينشر روبرت إدواردز مع زملائه باري بافيستر وباتريك ستيتو أول دليل مقنع عن المراحل المبكرة من تخصيب البويضات البشرية في المختبر إلا في العام 1969. بدأ هذا البحث في ستينيات القرن الماضي كامتداد لأعمال إدواردز السابقة حول علم وراثته وإنضاج البويضات لدى الفئران. شجع اكتشاف إمكانية النجاح بإنضاج بويضات الفئران في المختبر العالم إدواردز على معرفة ما إذا كان من الممكن أيضاً إنضاج البويضات البشرية في المختبر وذلك بهدف توفير وسيلة لدراسة أصول اختلال الصبغة الصبغية لدى الإنسان. في ذلك الوقت كان الدافع الأساسي هو دراسة انتقال الأمراض الوراثية بين البشر، ومنع انتقالها إن أمكن. وبناءً على ذلك وفي العام 1965، جرى وصف المسار الزمني للتغيرات الكروموسومية أثناء إنضاج البويضات البشرية، وفي العام 1968، أبلغ إدواردز عن نجاح استخدام خزعات من الكيسة الأريمية للأرانب للحصول على الأجنة الحية الناتجة عن تقانة الإخصاب بالزجاج، ليتم لاحقاً التأكد من هذا الإجراء من خلال نقل هذه الأجنة إلى رحم الحيوان المستقبل؛ وبذلك قدمت جميع هذه التجارب الأدلة والخطوات الأولية على ما يعرف حالياً بمبدأ التشخيص الوراثي ما قبل الزرع.

في العام 1976، كانت ليزلي براون وزوجها جون، من مدينة بريستول في المملكة المتحدة، قد فشلا في الحمل بشكل طبيعي طوال تسع سنوات من زواجهما المتواصل، حيث كان لدى ليزلي براون كتل في قناة فالوب وتم العمل على معالجتها دون أي نجاح يذكر. تمت إحالة ليزلي إلى الدكتور باتريك كريستوفر ستيتو، طبيب أمراض النساء في مستشفى أولدهام العام في مدينة مانشستر، المملكة المتحدة، حيث نصحتها بتجربة تقانة تجريبية جديدة لتجاوز انسداد قناة فالوب. وبناءً على ذلك، خضعت ليزلي لاستخراج البويضات بالمنظار خلال دورة إباضة طبيعية غير محفزة. استخدم روبرت جيفري إدواردز، عالم وظائف الأعضاء البريطاني، الحيوانات المنوية لزوجها لتخصيب البويضة المستردة منها في المختبر. وبعد بضعة أيام، وضع جنين مكون من 8 خلايا داخل الرحم. لاحقاً، في 25 يوليو من العام 1978، ولدت لويز براون بعملية قيصرية في مستشفى أولدهام على يد جون ويبستر في عمر حمل يبلغ 38 أسبوعاً و5 أيام. تمتعت لويز بصحة جيدة عند الولادة وكان وزنها 5 أرطال و12 أونصة (2700 غرام). ومع ولادة لويز براون احتفل العالم ببداية حقبة جديدة من تكنولوجيا الإنجاب البشري المساعد، حيث مثلت هذه اللحظة البداية الحقيقية للعصر الذهبي للإخصاب بالزجاج.

المراحل والخطوات الأساسية للإخصاب بالزجاج لدى البشر

في جوهره وباختصار، الإخصاب بالزجاج هو النجاح في تخصيب البويضة بواسطة الحيوان المنوي خارج الجسم، ومن ثم نقل الجنين الناتج بعد زراعته إلى الرحم المستقبل لمتابعة عملية الحمل. يتضمن البروتوكول الخاص بالإخصاب بالزجاج لدى البشر خمس مراحل أساسية وهي:

1- تحريض المبيض وتحفيزه.

2- استخراج البويضات.

3- جمع الحيوانات المنوية.

4- الإخصاب وتطور الأجنة.

5- نقل الأجنة.



الشكل 1. المراحل الأساسية لتقانة الإخصاب بالزجاج لدى البشر.

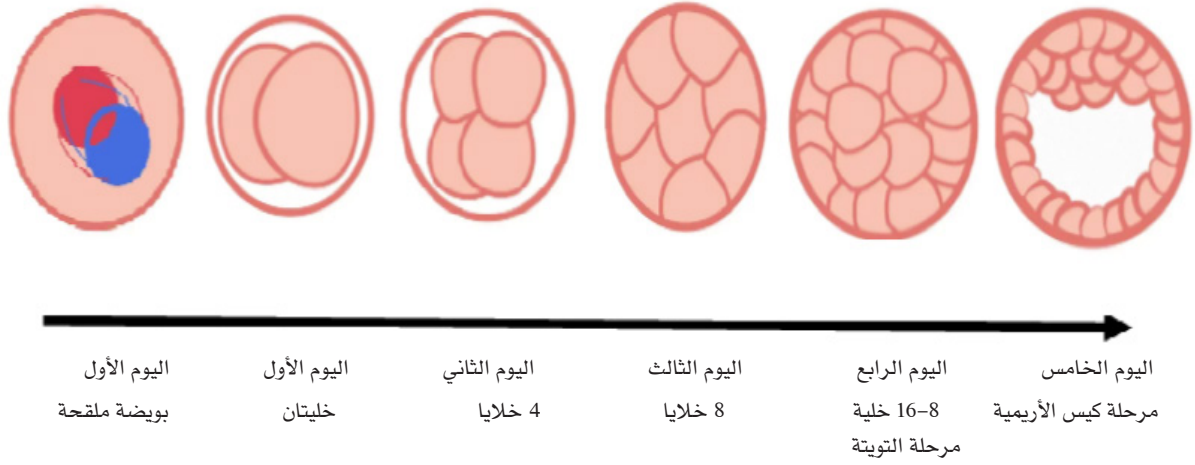
أولاً- تحفيز المبيض: يتضمن بروتوكول العلاج عادةً عملية تحفيز المبيض بمساعدة حقن مشتقات الهرمونات المنشطة للغدد gonadotropin، حيث يتم تطبيق الحقن في منطقة البطن أو الذراع يومياً، وتستمر هذه المعالجة لمدة تقارب من سبعة إلى عشرة أيام، بهدف زيادة إنتاج البويضات وتحسين فرص الحصول على بعض الأجنة ذات القدرة العالية على الزرع.

ثانياً- استخراج البويضات: يتم استخراج أو سحب البويضات من الجريبات المبيضية مباشرة قبل الإباضة، وتتم باستخدام المنظار عندما تكون البويضة في المرحلة الطورية الثانية من الانقسام الاختزالي، وتُسمى هذه العملية أيضاً «التقاط الخلايا الببيضية». وتتم عملية استخراج البويضات بعد حوالي 36 ساعة من المعالجة الهرمونية المحفزة النهائية. ويعد هنا توقيت استخراج البويضات أمراً بالغ الأهمية لضمان نجاح دورة الإخصاب بالزجاج اللاحقة ومراحلها.

ثالثاً- جمع الحيوانات المنوية: يمكن بعد استخراج البويضات أو أثناء استخراجها، جمع السائل المنوي من الرجل المتبرع، ليتم مباشرةً تجهيز السائل المنوي بعد القذف، مع إمكانية تجميد هذا السائل وحفظه أو المباشرة باستخدامه فوراً لتخصيب البويضات خارج الجسم.

رابعاً- الإخصاب وتطور الأجنة: تُجمع البويضات مع الحيوانات المنوية معاً ليحدث الإخصاب. في الحالات الطبيعية، تحدث هذه المرحلة ضمن قناة فالوب، ولكن عند الإخصاب في الزجاج يُستخدم طبق بتري (سواء بلاستيكي أو زجاجي) لوضع البويضات والحيوانات المنوية معاً، حيث يحتوي الطبق على وسط استزراع متخصص وهو عبارة عن سائل مغذٍ؛ وذلك لمحاكاة البيئة الفسيولوجية لقناة فالوب. تُوضع أطباق البتري في حاضنات خلال فترة تمتد من 12 إلى 18 ساعة تقريباً للمحافظة على قيمة الأس الهيدروجيني (pH) ودرجة الحرارة المشابهة تماماً لبيئة قناة فالوب؛ أي البيئة التي توجد فيها البويضة والحيوان المنوي داخل الجسم. يحدث خلال هذه الفترة العديد من التحولات الأساسية للحيوان المنوي التي تتعلق بتغيرات في الغشاء البلازمي ليدخل فيما يُعرف بحالة الاستعداد sperm capacitation، ومن ثم إطلاق حالة الحركة النشطة hyperactivated sperm motility، ومن ثم يتم إطلاق تفاعل الجسم الطرفي acrosome reaction للحيوان المنوي. وبذلك يستطيع الحيوان المنوي من خلال هذه السلسلة من العمليات المعقدة اختراق البويضة للحصول لاحقاً على البويضة الملقحة أو المخصبة. بجميع الأحوال، وفي حالات خاصة بالعقم عند الذكور، يتم تطبيق ما يعرف بتقانة الحقن المجهرى للنطف، أي حقن الحيوانات المنوية داخل سيتوبلازما البويضة ICSI: intracytoplasmic sperm injection، حيث يُحقن حيوان منوي واحد في كل بويضة، وذلك للتغلب على حالات العقم عند الذكر، خاصة عند استخدام الحيوانات المنوية المستحصلة من الخصية.

بعد إتمام عملية الإخصاب بنجاح، يتم الانتقال إلى مرحلة زرع الأجنة: وفي هذه المرحلة تتم متابعة الأجنة الناتجة عن البويضة الملقحة خلال فترة تمتد لخمس أيام تقريباً. تُزرع الأجنة في أطباق بتري ضمن محلول خاص بالزرع وتوضع بعدها ضمن الحاضنات خلال فترة الزرع. تُعرف المرحلة الممتدة من اليوم الثاني إلى اليوم الثالث «بمرحلة الانقسام» ويحدث فيها انقسام البويضة المخصبة إلى خليتين ثم إلى أربع خلايا ثم ثمانية خلايا، ويسمى اليوم الرابع بالمرحلة التوتية، وفي اليوم الخامس يسمى مرحلة كيس البلاستولة أو كيس الأريمية.



الشكل 2. المراحل الزمنية لتطور الجنين خلال عملية الزرع خارج الجسم.

خامساً- نقل الأجنة: تتضمن عملية نقل الأجنة قيام الطبيب بإدخال قسطرة إلى الرحم عبر عنق الرحم، ويتم عادةً توجيه القسطرة من خلال استخدام الأيكو (جهاز الموجات فوق الصوتية) ليتم حقن الجنين أو الأجنة (والتي تكون بمرحلة كيس الأريمية) بعناية في الرحم. إذا كان هناك أي أجنة إضافية قابلة للحياة، فقد يكون من الممكن تجميدها لإنجاح محاولات الحمل اللاحقة. من الواجب الإشارة إلى أن العديد من البويضات قد تفشل في الإخصاب أو تنتج أجنة ذات نوعية رديئة، أو حتى أنها تحتوي على أعداد غير طبيعية من الكروموسومات. بجميع الأحوال، يمكننا اليوم حفظ الأجنة الاحتياطية ذات النوعية الجيدة بالتجميد لاستبدالها في أي دورة لاحقة في حال فشل الدورة الأولى الأساسية للإخصاب بالزجاج.

الخطوات والمراحل الأساسية للإخصاب بالزجاج لدى الحيوانات

بصورة عامة، تعتمد بروتوكولات الإخصاب بالزجاج لدى الحيوانات على أساسيات الخطوات الخمس السابقة الذكر عند البشر، مع وجود اختلافات من حيث عملية سحب البويضات وإنضاجها وجمع السائل المنوي وحفظه وفترة زراعة الأجنة وطرق نقلها. عند الحيوانات يتم سحب البويضات إما من مبايض حيوانات حية بواسطة تقانة OPU: ovum pick up أو من مبايض حيوانات ميتة (مذبوحة). بجميع الأحوال، تُفحص البويضات المجموعة من الحيوانات تحت المكبرة، وبناءً على مواصفات مورفولوجية خاصة يتم اختيار الأنسب منها لتتم عملية تحضينها لمدة 24 ساعة بدرجة حرارة 38-39 مئوية بالحاضنة ضمن وسط خاص بإنضاج البويضات IVM: *in vitro* maturation medium. يتم لاحقاً تلقيح البويضات إما بواسطة سائل منوي مجمد للذكور أو من خلال السائل المنوي الطازج، وفي حالة استخدام سائل منوي مجمد يتم العمل على فصل الحيوانات المنوية الميتة عن الحية واستخدام الحيوانات المنوية الحية والمتحركة لإتمام عملية الإخصاب. وفيما يتعلق بمرحلة زرع الأجنة، فعند الأبقار على سبيل المثال، تمتد هذه العملية لمدة 7-8 أيام بعد الإخصاب للوصول إلى مرحلة كيس الأريمية ومن ثم النقل إلى رحم الحيوان المتلقي.

كيف ساهمت تقانة الإخصاب بالزجاج في تغير العالم

خلال العقود الأربعة الماضية ساهمت تقانة الإخصاب بالزجاج في تغير العالم، وذلك من خلال إحداث تطور علمي هائل في المفاهيم الخاصة بعلوم التكاثر والأجنة والأمراض الوراثية وصولاً إلى علوم الخلايا الجذعية؛ لذلك يمكن هنا أن نذكر أهم النقاط التي ساهمت تقانة الإخصاب بالزجاج بإحداث التغير، وهي:

1- فتح البوابة لفهم أعمق لعلوم التكاثر لدى كل من البشر والحيوانات

لم تساعد الأبحاث الخاصة بتقانة الإخصاب بالزجاج في تحسين التقانة ذاتها فحسب، بل أدت إلى رؤى أكثر عمقاً لعلوم التكاثر لدى كل من البشر والحيوانات، فعلى سبيل المثال، كان بالإمكان دراسة الأسباب الخاصة بالإجهاض المبكر أو عيوب نمو الأجنة عند البشر. وفي

هذا الصدد وبحسب أليسون مردوخ، أستاذ الطب النسائي في جامعة نيوكاسل، فقد غيرت الأبحاث على الأجنة البشرية فهمنا الأساسي لعلم الوراثة البيولوجية الخلوية. إضافة إلى مساعدتنا في فهم الأسباب وراء كون خصوبة الجنس البشري سيئة للغاية، فقد استطاعت أبحاث الإخصاب بالزجاج توسيع تطبيقات علم الأجنة البشرية أو حتى علم الأجنة الحيوانية. وبذلك تم لدى البشر الانتقال إلى ما هو أبعد من العلاج السريري للعقم، الانتقال إلى مراحل خاصة بالوقاية من المشاكل الطبية الأخرى.

2- معالجة مشكلة العقم لدى البشر

ينتج اليوم من تطبيق تقانة الإخصاب بالزجاج لدى البشر ملايين الولادات في جميع أنحاء العالم. وفي هذا الصدد، تمثل الولادات الناتجة عن الإخصاب بالزجاج 1-3% من جميع الولادات كل عام في الولايات المتحدة الأمريكية وفي أوروبا. في الواقع، دفع الطلب المتزايد لعلاج مشاكل الخصوبة لدى البشر العلماء إلى البحث في تطوير التقانات المساعدة على الإنجاب وتحسين أنظمة الإخصاب بالزجاج. تمكن حديثاً بعض الأزواج الخاضعين لتقانة الإخصاب بالزجاج من اختبار أجناتهم وراثياً لتقليل انتقال طفرات الجينات المرتبطة بالأمراض الوراثية. كذلك أصبح استخدام الحيوانات المنوية والبويضات المانحة أمراً شائعاً بشكل متزايد، وفي بعض البلدان أصبح للنساء غير القادرات على الحمل الخيار بالاستعانة بنساء قادرات على الحمل لاستكمال عملية الحمل باستخدام بويضاتهن المستردة بالمختبر والملقحة بالحيوانات المنوية العائدة للزوج. يجب الإشارة إلى أن هناك الكثير من الجدل والقضايا الأخلاقية الإشكالية التي طرحها استخدام هذه التقانة سواء في إطار البحث العلمي أو ضمن إطار القضايا الطبية العلاجية لمشكلة العقم لدى البشر.

3- إثارة الجدل من جديد حول الوضع الأخلاقي لأبحاث الأجنة

واجهت تقانة الإخصاب بالزجاج وأبحاث الأجنة المرتبطة مجموعة من القضايا الأخلاقية من جميع الديانات تقريباً، لكن المعارضة الرئيسية نشأت من الكنيسة الكاثوليكية التي أصدرت في عام 1987 بياناً عقائدياً يعارض الإخصاب بالزجاج، وأعربت عن قلقها بشأن ثلاث قضايا رئيسية، وهي: 1. تدمير الأجنة البشرية التي لا تستخدم للزرع، 2. التلقيح الصناعي من قبل متبرع غير الزوج، 3. قطع العلاقة الأساسية بين الفعل الزوجي والإنجاب. من جهة أخرى، يعد المعدل المرتفع بشكل غير عادي للولادات المتعددة المرتبطة بالإخصاب بالزجاج مصدر قلق كبير، لأنه يزيد من مخاطر الإجهاض التلقائي. بجميع الأحوال، تتم معالجة هذه المشاكل من خلال تطوير تقانات أفضل تستخدم عدداً أقل من الأجنة المخصبة لتحقيق الحمل، مع استمرار النقاشات الجادة الخاصة في تنظيم أخلاقيات الأبحاث المرتبطة بتقانات الإخصاب بالزجاج ووضع التشريعات النافذة لها.

4- تطوير التقانات والاختبارات الجينية للأجنة

تم توثيق العديد من التحاليل الجينية الأكثر تفصيلاً للخلايا المأخوذة من الأجنة وذلك بهدف البحث عن الجينات المرتبطة بالأمراض. تسمى هذه الطريقة بالتشخيص الوراثي قبل الزرع (PGD) preimplantation genetic diagnosis، وهي مسموح بها من قبل بعض البلدان لفحص ما يقارب 400 مرض خطير مرتبط بالجينات (مثل التليف الكيسي). الهدف الرئيسي من هذه التقانات هو ألا يتم زرع الأجنة التي تحمل متغيرات جينية مرتبطة بالأمراض الوراثية؛ مما يساعد في القضاء على خطر انتقال الحالة المرضية للأزواج الذين يعرفون أنهم حاملون للجين الممرض. لكن؛ من جهة أخرى، تغذي تكنولوجيا فحص الجينات للأجنة الكثير من المخاوف والقضايا الأخلاقية خاصة في ما يتعلق بما يعرف بالأطفال المصممين مسبقاً؛ أي الذين يتم اختيارهم ليس لتجنب الأمراض الوراثية فحسب بل لأن لديهم جينات يعتقد أنها مرتبطة بصفات نوعية مرغوبة مثل الذكاء ولون البشرة والقوة الجسدية. تعد هذه الممارسة غير قانونية في الكثير من البلدان، ولكن لا يوجد حتى الآن تشريعات دولية ملزمة بمنعها والحد من استخدامها.

5- تمهيد الطريق لأبحاث الخلايا الجذعية

بسبب وجود معارضة دينية وأخلاقية واضحة لأبحاث الأجنة، بدأت أبحاث الخلايا الجذعية بعد فترة طويلة من تحقيق النجاح الأول والأهم في مجال الإخصاب بالزجاج. لم تبدأ هذه الفكرة حقاً في الانطلاق إلا بعد عزل الخلايا الجذعية الجنينية البشرية (HESCs) وذلك في العام 1998. من المعلوم أن الأجنة في مراحلها الأولى تتكون من خلايا جذعية، حيث يمكن لهذه الخلايا أن تتطور إلى أي نوع من الأنسجة في الجسم؛ وبذلك تصبح الأجيال اللاحقة من الخلايا الناتجة من هذه الأجنة خلايا متخصصة: مثل خلايا القلب والجلد والعضلات والخلايا العصبية... ونظراً لتعدد استخداماتها، يمكن استخدام خلايا HESC لزراعة الأنسجة الخاصة بما يعرف حالياً بالطب التجديدي. لكن في العام 2001، تم في الولايات المتحدة الأمريكية إعاقه العلاجات باستخدام الخلايا الجذعية بسبب الحكم الذي أصدرته إدارة الرئيس جورج دبليو بوش والمتعلق بمنع التمويل الفيدرالي للأبحاث التي تستخدم خطوط HESC الجديدة المأخوذة من الأجنة الناتجة عن تقانة

الإخصاب بالزجاج. على الرغم من هذه العقبات التنظيمية، فقد حقق علم الخلايا الجذعية البشرية منذ ذلك التاريخ وحتى الآن تقدماً كبيراً. كانت المملكة المتحدة رائدة في هذا المجال، فعلى سبيل المثال ساهمت مجموعة العالم مردوخ البحثية في نيوكاسل في تطوير تقانات نقل الميتوكوندريا، والتي يُطلق على نسلها اسم «الأطفال ثلاثية الآباء»، وذلك بهدف مكافحة أمراض الميتوكوندريا الوراثية.

الآفاق المستقبلية لتقانة الإخصاب بالزجاج

من المتوقع أنه في غضون العقد المقبل ستحدث تطورات مهمة وكبيرة بتقانة الإخصاب بالزجاج. تشمل هذه التطورات المتوقعة تطوير أدوات التشخيص، والمساعدة في تحديد جودة كل من البويضات والحيوانات المنوية، وتطويراً أفضل للوسائط والأوساط الخاصة بزرع الجنين خارج الجسم وصولاً لأفضل الوسائل المساعدة لزراعته ضمن الرحم المستقبلي، بالإضافة طبعاً إلى تحديد أفضل توقيت لنقل الأجنة. إن الفهم الأفضل لزراعة الأجنة خارج الجسم وتطورها سيدعم أيضاً تطوير وسائل تشخيصية محسنة وذلك مع تطوير أدوية جديدة لتعزيز معدلات نجاح النقل إلى الرحم المستقبلي.

إضافة إلى ما سبق ذكره، تعد أتمتة مختبرات الإخصاب بالزجاج وتصغيرها من الأهداف المستقبلية المهمة، حيث يمثل تجهيز أي مختبر وتوظيفه وتشغيله يدوياً جزءاً كبيراً من التكلفة العالية للتقانة. يتمتع مفهوم المختبرات الذكية الجديدة بالقدرة على إحداث ثورة في تقانة الإخصاب بالزجاج من خلال التمكين لعمليات الأتمتة لجميع الخطوات والمراحل المتضمنة للبروتوكولات في نظام واحد. وفي هذا الصدد، تم بالفعل زراعة أجنة بشكل آلي بالكامل باستخدام ما يعرف بحاضنات الفاصل الزمني (time-lapse incubators) والتي تسمح بالمراقبة المستمرة لتطور الجنين المزروع خارج الجسم مقابل مرحلة النقل إلى الرحم المستقبلي. يُمكن لتحليل البيانات الناتجة عن حاضنات الفاصل الزمني اختيار الأجنة ذات الاحتمالية الأعلى للحمل، كما تعدّ هذه البيانات ذات أهمية فائقة من حيث دراسة التوقيت الدقيق للانقسامات الخلوية من اليوم الثاني والثالث بعد الإخصاب والدراسة الدقيقة والمستفيضة لمرحلة التوتية وكيس الأريمية.



الشكل 3. حاضنة الفاصل الزمني الخاصة بتقانة الإخصاب بالزجاج (time-lapse incubator).

من جهة أخرى، أصبح الحفظ بالتجميد لكل من الحيوانات المنوية والبويضات والأجنة أحد أهم المجالات المرافقة لنجاح تقانة الإخصاب بالزجاج. وبهذا الصدد، يعدّ التزجيج vitrification الطريقة السائدة حالياً لحفظ البويضات والأجنة بالتجميد. من الواجب الإشارة إلى أنه قد تم فعلاً إدخال أنظمة شبه آلية لتزجيج البويضات/الأجنة، وهي الآن في المراحل المبكرة من الاعتماد السريري لدى البشر وضمن مجالات الأبحاث المعمقة لدى الحيوانات.

من جهة أخرى، وكما هي الحال في جميع مجالات العلوم، فقد شق الذكاء الاصطناعي طريقه إلى عالم الإخصاب بالزجاج. تقوم هذه التقانات حالياً بتحليل كميات هائلة من البيانات، بما في ذلك تاريخ المرضى والتطور الجنيني ومعدلات النجاح، وذلك للمساعدة في تقديم توصيات علاجية متخصصة. يمكن للذكاء الاصطناعي أن يساعد الأطباء والباحثين على اتخاذ قرارات مستتيرة، مما يزيد من فرص نجاح نتائج الإخصاب بالزجاج والمصممة خصيصاً لتلبية احتياجات مرضى العقم. لكن دون أدنى شك، ربما يكون المفهوم الأكثر ثورية اليوم في

علوم التكاثر والأجنة هو مفهوم تكوين الأمشاج في المختبر IVG: *in vitro* gametogenesis، حيث نجح -بشكل خاص- العلماء اليابانيون في إنجاز العديد من الأبحاث المهمة ضمن هذا المجال.

وأخيراً، سيؤدي الاستخدام المتزايد لتقانة الإخصاب بالزجاج إلى تغيير الطرق التي تتكاثر بها نسبة كبيرة من الأنواع على الكرة الأرضية سواء لدى البشر أم الحيوانات؛ فلدى البشر من المحتمل أنه في المستقبل القريب سيتم إنجاب ما يصل إلى 10% من جميع الأطفال من خلال تقانة الإخصاب بالزجاج (أو ما يعرف بأطفال الأنابيب). بجميع الأحوال، يتطلع الباحثون في جميع أنحاء العالم إلى إنجاز تطورات واعدة تعمل على تحقيق اختراقات تعالج العقبات التقنية الحالية لهذه التقانة إلى جانب العمل المستمر على العوامل التنظيمية والأخلاقية، حيث من الضروري أن تشارك الهيئات العامة سواء العلمية أم التنظيمية في إنشاء إطار عام للتقييم العلمي والأخلاقي لهذه التقانة ولجميع التكنولوجيات الناشئة حديثاً ضمنها.

مراجع للاستزادة

- [1] Alomar M (2007). Bull effect as a source of variability in in vitro embryo production. PhD thesis. Université Catholique de Louvain, Belgium.
- [2] Ball P (2018). Seven ways IVF changed the world – from Louise Brown to stem-cell research. <https://www.theguardian.com/society/2018/jul/08/ivf-in-vitro-fertilisation>
- [3] Eskew AM, Jungheim ES (2017). A history of developments to improve in vitro fertilization. *Missouri Medicine* 114(3):156-159.
- [4] Holm P, Shukri NN, Vajta G, et al. (1998). Developmental kinetics of the first cell cycles of bovine in vitro produced embryos in relation to their in vitro viability and sex. *Theriogenology* 50(8): 1285-1299.
- [5] Kushnir VA, Smith GD, Adashi EY (2022). The future of IVF: The new normal in human reproduction. *Reproductive Sciences* 29(3): 849–856.
- [6] Marquant-Le Guienne, B, Gérard, M, Solari, A, Thibault C. (1989). In vitro culture of bovine egg fertilized either in vivo or in vitro. *Reproduction Nutrition Development* 29(5): 559–568.
- [7] Nagamatsu G, Hayashi K. (2017). Stem cells, in vitro gametogenesis and male fertility. *Reproduction* 154(6): 79–91.
- [8] Steptoe PC, Edwards RG (1978). Birth after the reimplantation of a human embryo. *Lancet* 2: 366.

◀ إعداد: د. مازن العمر ، قسم الزراعة، هيئة الطاقة الذرية السورية.



تحديد الباتولين في عصير ومشتقات التفاح باستعمال نظام تحضير آلي للعينات و LC-APCI-MS/MS

ملخص

الباتولين هو سم فطري يمكن أن يلوث المنتجات المشتقة من التفاح. وضعت إدارة الغذاء والدواء مستوى تدخل عند 50 جزءاً في البليون جزء (نانوغرام/جم) للباتولين في عصير ومنتجات التفاح. لمراقبة هذا السم الفطري بشكل فعال، هناك حاجة لطرائق تحليلية مناسبة يمكن الاعتماد عليها لتحديد مستويات الباتولين بكفاءة عالية. في هذا العمل، طورنا طريقة آلية لتحضير العينات متبوعة بالكروماتوغرافيا السائلة بتأين كيميائي بالضغط الجوي مع مقياس الطيف الكتلي الترادفي (LC-APCI-MS/MS) لتحديد وقياس تركيز الباتولين في تحليل واحد، مما يزيد من قدرة التحاليل على كشف الباتولين في الأطعمة مقارنة مع الطرق الضوئية التقليدية. باستعمال نظام آلي لتحضير العينات من عصير التفاح الطازج والمبستر، وهريس التفاح، وأغذية الأطفال المعتمدة على التفاح، وصلصة التفاح، ولفائف التفاح، ومربى التفاح عُززت العينات بالباتولين الموسوم بالكربون-13 ($^{13}\text{C-patulin}$)، واستخلص بثنائي كلورو ميثان (DCM) دون تدخل بشري، أتبع بتحليل LC-APCI-MS/MS بالتأين السالب. حققت الطريقة حد كشف كمي 4.0 نانوغرام/غرام وخطية تتراوح من 2 إلى 1000 نانوغرام/مل ($0.99 < r^2$). أجري التحليل الكمي بالتمديد النظيري (^{31}C isotopes dilution) باتولين بسلسلة عيارية كمعيار داخلي. كان متوسط الاسترداد و(الانحرافات المعيارية النسبية %RSD) في سبع مجموعات من أوساط مختلفة موسومة بالباتولين 95% (9%) في 10 نانوغرام/غرام، 110% (5%) عند

50 نانوغرام/غرام، 101% (7%) عند 200 نانوغرام/غرام، و104% (4%) عند 1000 نانوغرام/غرام (n=28). كان مجال التباين (RSD) داخل مجموعة الوسط الواحد وبين المجموعات بأوساط مختلفة 3-8% و4-9% على التوالي. تم تأكيد وجود الباتولين في العينات الحقيقية، بمقارنة أطياف MS/MS التي تعمل بمبدأ توليد الأيونات المعزز المعتمد على المعلومات (IDA-EPI) مع الأطياف المرجعية. أنشئ التتبع المتروولوجي لقياس تركيز الباتولين في عصير التفاح الطازج (15.6 ± 56.6 ميكروغرام/غرام) والمبستر (8.0 ± 21.1 ميكروغرام/غرام) في العينات الحقيقية باستعمال مادة عيارية مرجعية معتمدة (CRM) وبيانات المعايرة لإظهار مجال الثقة في البيانات ($k = 2$ ، الثقة 95%).

الكلمات المفتاحية: الباتولين، تحضير العينات آلياً، LC-APCI-MS/MS.

مقدمة

عصير التفاح والأطعمة التي تحتوي على التفاح وسيلة مريحة للمستهلكين خصوصاً للأطفال، لزيادة استهلاك الفاكهة وتحسين جودة النظام الغذائي عموماً، يقدر استهلاك عصير التفاح في الولايات المتحدة بحوالي 7.3 لتر للشخص الواحد سنوياً، مما يجعله ثاني أكثر منتجات العصير استهلاكاً. ومع ذلك، فإن طرائق حصاد التفاح وتخزينه قد يعرضه للتلوث بالباتولين، وهو سم فطري يفرزه كل من فطور البنسيليوم *penicillium* والرشاشيات *aspergillus* وخاصة البنسيليوم الموسع *penicillium expansum*، والتي يمكن أن تنمو على الفاكهة. لتقليل خطر التعرض الغذائي للباتولين، حددت إدارة الغذاء والدواء مستوى تدخل قدره 50 جزءاً في البليون للباتولين في عصير التفاح ومنتجات عصيره. حالياً، تجري مختبرات FDA الميدانية تحاليل كشف الباتولين في العينات باستعمال الكروماتوغرافيا السائلة المزودة بكاشف الأشعة فوق البنفسجية، وهنا يجب تأكيد هوية الباتولين بتحليل مستقل باستعمال مطياف الكتلة. إن وجود تحليلين منفصلين يتطلب تقنيتين تحليليتين مختلفتين وهي عملية مرهقة. إضافة إلى ذلك، يجري حالياً تحضير العينة يدوياً إلى حد كبير، مما يجعل تحليل الباتولين عملاً مضنياً.

لاستبدال تحضير العينات التقليدي يدوياً وتحقيق التحليلين معاً بشكل متزامن والتقدير الكمي للباتولين في تحليل واحد، درس التحضير الآلي للعينات مع تحليل الكروماتوغرافيا السائلة المقرون بالمطياف الكتلي الترادفي (LC-MS/MS). عُرض سابقاً التحضير الآلي للعينات لتحليل السموم الفطرية mycotoxine، أمثلت طريقة تحليل الباتولين في العينات الموجودة بأنواع أوساط مختلفة باستعمال محضر آلي متكامل لتحسين كفاءة وتكرارية التحليل وتحقيق إنتاجية عمل كبيرة مقارنة مع طرق تحضير العينات اليدوية. قرن تحضير العينة الآلية بالكروماتوغرافيا السائلة بالتأين الكيميائي بالضغط الجوي جنباً إلى جنب مع مقياس الطيف الكتلي الترادفي (LC-APCI-MS/MS)، مما عزز الحساسية والانتقائية لتحليل الباتولين مقارنة مع الطرق الضوئية. أثناء إجراء هذه الدراسة، كان معظم تحاليل الباتولين على LC-MS معتمدة على التأين بالتريز الكهربائي (ESI). بينما اعتمدت دراسات أقل على طرق التأين البديلة، مثل التأين الضوئي بالضغط الجوي (APPI) والتأين الكيميائي بالضغط الجوي (APCI)، لتقدير الباتولين. يعزز استعمال تقنية المنشط المساعد dopant-assisted كفاءة التأين في تقنية التأين الضوئي بالضغط الجوي APPI؛ ولكن يجب أولاً تقييم عمل المذيبات المختلفة المنشطة للتأين، ومعدلات التدفق، والمذيبات، مما يضيف تعقيداً إلى أي طريقة تعتمد على APPI لتحليل الباتولين الروتيني. في المقابل، APCI، يشبه التأين الكيميائي (CI) ولكنه يجري بالضغط الجوي، ويشترك مع ESI بالخطوات نفسها ويقترن بـ LC. في التأين الكيميائي بالضغط الجوي APCI، تشكل الحرارة وغاز الإرداذ رذاذاً يسوق العينة الخارجة من جهاز LC. تتشكل الأيونات في طور الغازي بالتفريغ الكهربائي من الإكليل corona. هذه الميزات تجعل APCI مناسباً تماماً لتأين المركبات المنخفضة الكتلة والمستقرة حرارياً. إضافة إلى ذلك، APCI هو غالباً ما يكون

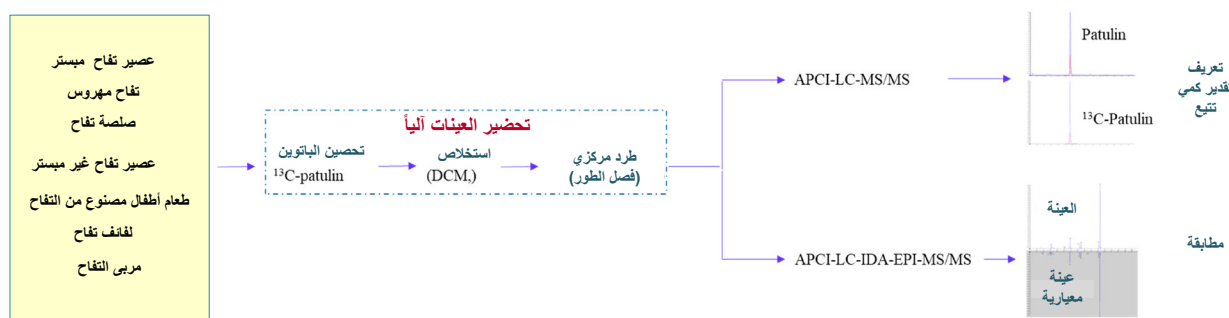
أقل عرضة لتأثيرات أوساط العينة مقارنةً بالتأين بـ ESI، مما يوفر ميزة إضافية لقياس الباتولين في مجموعة واسعة من العينات بأنواع أوساط مختلفة.

جرى التركيز في الدراسات السابقة، على مقدار الكبح في شدة الإشارة الذي يسببه وجود أوساط مختلفة وهو التحدي التقني الأهم المرتبط بـ LC-MS. على الرغم من أنه عند إنجاز المعايرة بأوساط مطابقة يمكن أن يخفف ذلك تأثيرات الوسط على التحليل الكمي، إن التمديد بالنظير المستقر stable isotope dilution يعدّ الطريقة المفضلة لقياس كمية الباتولين. إن استعمال السموم الفطرية الموسومة بشكل متجانس بالكربون 13 والمتاحة تجارياً جعل من تقنية التمديد بالنظير المستقر ممارسة شائعة، وخاصة عند إجراء تحليل السموم الفطرية باستعمال LC-MS. هذه الطريقة مقبولة على نطاق واسع وتلغي الحاجة إلى المعايرة بأوساط مطابقة أو الحاجة إلى الإضافة القياسية spiking وتقلل من تأثيرات تحضير العينة ونوع الوسط على التحليل الكمي باستخدام LC-MS.

هناك طرائق متعددة لتحضير عينات عصير التفاح ومشتقاته للتحليل بتقنية LC-MS، بما في ذلك الاستخلاص المباشر دون تنقية، والاستخلاص بطريقة QuECh-ERS، وهي طريقة سريعة وسهلة ورخيصة وفعالة وأمنة، وتتخلص بمجانسة العينة وتثيلها وطحنها يتبع ذلك الفصل بالطور الصلب أو الاشتقاق أو استخلاص سائل-سائل متبوعاً بخطوات تنقية، غالباً يتضمن الاستخلاص بالطور الصلب SPE. قبل حقن المستخلص في LC-MS يجب اتباع خطوات التنقية وعمليات استبدال المذيب والتبخير وإعادة الحل لكي تتلاءم العينة مع تقنية LC-MS ورفع حساسية التحليل. تشتمل عمليات تحضير العينات يدوياً عادةً على الاستخلاص، والرج، والطرء المركزي، وضخ السائل، والترشيح، إغلاق/فتح العبوات، وخطوات الاستخلاص بالطور الصلب SPE. مثل هذه المهام تتطلب جهداً كبيراً ولا تستغرق وقتاً طويلاً فحسب، بل تساهم في التسبب في تباين نظامي لنتائج الطريقة (عدم اليقين).

عرضت درجات متفاوتة لأتمتة تحاليل السموم الفطرية باستعمال LC-MS، ولم يتم توثيق أية طريقة تحضير آلية مخصصة لتحضير عينات تحليل الباتولين. إن التقدم في تقنيات الأتمتة سهّل دمج مراحل إعداد العينات المختلفة في جهاز واحد، يعد استبدال التحضير اليدوي الشاق للعينة المعدة لتحليل الباتولين بالتحضير الآلي بشكل كامل عملية واحدة. في تجاربنا، اختير نظام آلي متكامل سلس ومناسب لإعداد مختلف أنواع العينات وتحليلها، وتنفيذ خطوات العمل المحددة مسبقاً. تكمن الميزة الأساسية لمثل هذا النظام المتكامل في الاستغناء عن العمليات اليدوية خاصة تلك التي تتضمن الخطوات المختلفة لإعداد العينة. أمثل نظام تحضير العينات الآلي وطور وجرى التحقق منه باستعمال طريقة LC-APCI-MS/MS (الشكل 1) لتقدير الباتولين في عصير التفاح والأطعمة المشتقة منه. وكانت الأهداف المحددة على النحو التالي:

- تطوير طريقة تحليل لتحديد كمية الباتولين وقياسها في عصير التفاح والأطعمة ذات الصلة، ولتحقق من صحة طرق التحليل الكيميائية ومن استعمال مقياس الطيف الكتلي لتأكيد الهوية باتباع إرشادات إدارة الغذاء والدواء الأمريكية (FDA) المقررة.
- تطوير وإعداد نظام تحضير آلي واستعمال آلية مؤتمتة لاستبدال الإجراءات اليدوية ومقارنة أداء الطريقة لكل حالة.
- إنشاء التتبع المترولوجي لقياسات الباتولين عند التحضير الآلي للعينات وعند استعمال طريقة LC-APCI-MS/MS لعينات مرجعية معتمدة (CRMs) لنقدر بشكل منهجي صحة عدم اليقين في جودة البيانات ومقداره.



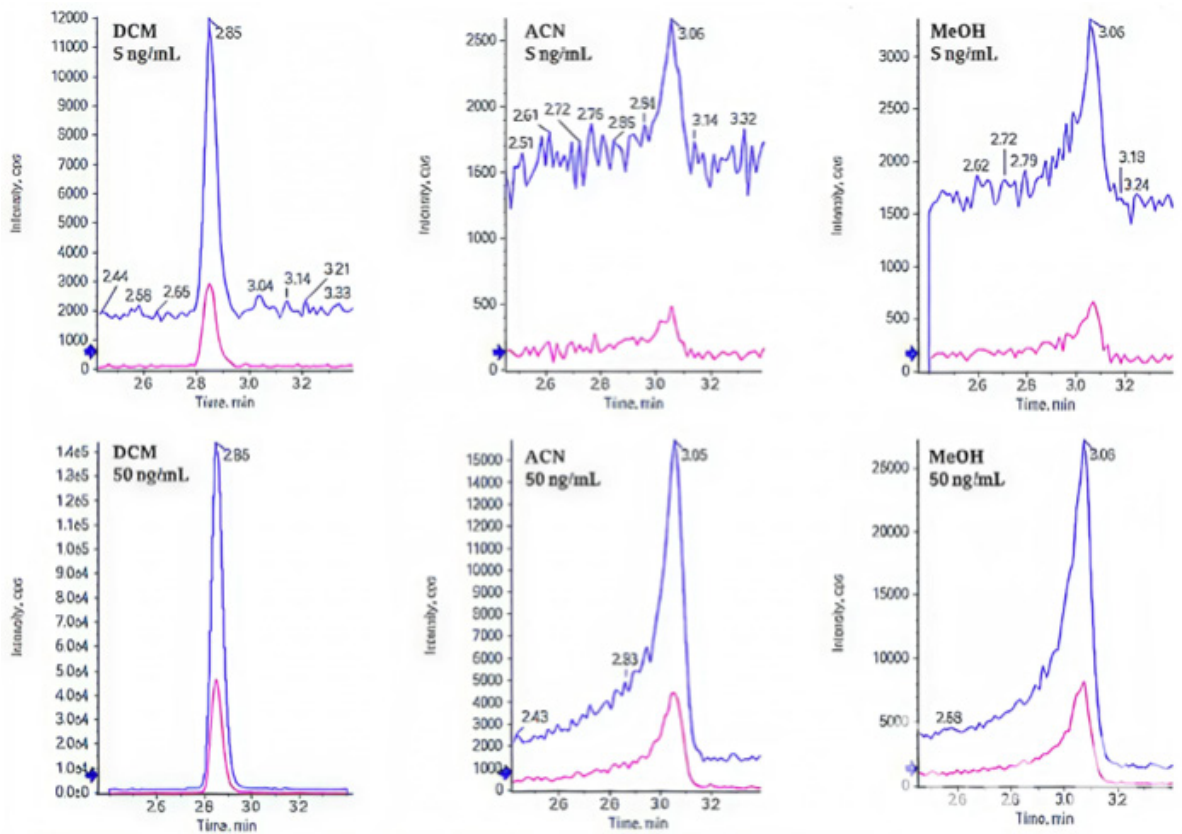
الشكل 1. إعداد العينات آلياً وتحليل الباتولين في تقنية LC-APCI-MS/MS.

النتائج

الهدف من هذا العمل هو تطوير طريقة تحليلية لتحديد كمية الباتولين وقياسها باستعمال LC-MS وتقييم التحضير الآلي للسلسلة العيارية ومعالجة العينات. يعزز استعمال LC-MS انتقائية التحليل مقارنة بالطرق الضوئية، ويقلل أيضاً من حساسية التحليل للتداخلات الناتجة عن مكونات الأوساط التي توجد العينة فيها (على سبيل المثال، 5-هيدروكسي ميثيل فورفورال) الذي له امتصاص في نفس مجال امتصاص الباتولين في الأشعة فوق البنفسجية. من خلال إقران LC-MS مع التمديد بالنظائر المستقرة، فمن الممكن إجراء استخلاص مباشر دون خطوات تنقية إضافية للعينة التقليدية بما في ذلك الاستخلاص بالطور الصلب، والتبخير، وإعادة الترسيب، والتي تشكل تحدياً لأتمتة تحضير العينات. في الجزء التالي، سنقوم باستعمال بيانات الأداء لتوضيح أنه يمكن إقران نظام إعداد العينات الآلي مع LC-APCI-MS/MS وتطبيق ذلك لتحديد كمية الباتولين وتقديرها في عينات المنتجات المشتقة من التفاح.

مقارنة التأين في كل من APCI و ESI

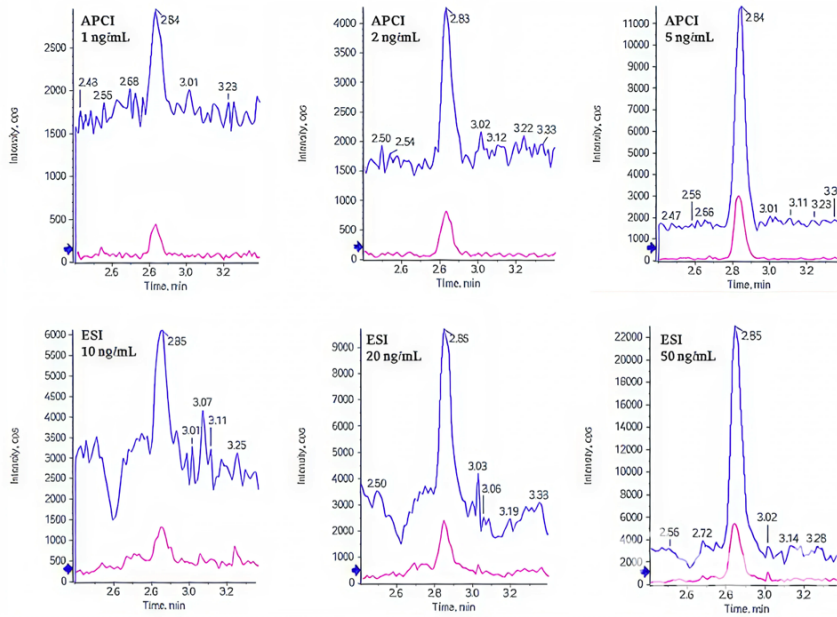
ثبت أن التمديد بالنظائر المستقرة LC-MS هو المفتاح الذهبي للتحاليل الكمية التي تؤدي إلى تحضير مبسط للعينات وتزليل تأثير عدم تطابق الأوساط بين العينات الحقيقية و عينات منحنى المعايرة في التحاليل الكمية، ولكن نجاح هذا التطبيق يعتمد على حساسية LC-MS وخصوصيتها. درست المؤثرات الرئيسية على حساسية تحليل الباتولين التي تتضمن أنواع المذيبات، وطريقة التأين، وقطبية المحلات، باستعمال طرق التأين الكيميائي بالضغط الجوي APCI والتأين بالتبريد الكهربائي ESI بعد أمثلة كل منها. تأثرت شدة إشارة الباتولين بشكل مباشر بدرجة كبح التأين عند استعمال التأين في كل من APCI و ESI. يقارن الشكل 2 استجابة إشارة الباتولين في حال إحداث التأين باستعمال APCI عند (1-5) نانوغرام/مل واستجابة إشارة الباتولين عند إحداث التأين باستعمال ESI عند (50-10) نانوغرام/مل بمذيبات عيارية. في ظروف الاختبار، أعطى APCI تأيئاً بكفاءة عالية للباتولين في جميع الشروط المدروسة من مذيبات وأوساط مختلفة، وكانت حساسيته مبدئياً أعلى بـ 10 مرات من التأين باستعمال ESI. لتحقيق أداء مماثل في حال استعمال التأين في ESI يتطلب خطوة رفع التركيز الإضافية، مما يعقد عملية إعداد العينة ويحد من كفاءة الوقت.



الشكل 2. مقارنة بين شدة إشارة الباتولين في حال التأين في كل من ESI و APCI باستعمال مذيبات عيارية.

مقارنة مذبذبات الاستخلاص

لتجنب استبدال المذيب ولضمان الفصل الكافي في الكروماتوغرافيا والحصول على شكل قمة متناظر، يفضل الاستخلاص بمذيبات تعطي نسبة استخلاص مرضية وتلائم الطور المتحرك في الكروماتوغرافيا السائلة LC. على الرغم من أن خلاات الإيثيل والميثانول والأسيتونيترييل تستعمل بشكل شائع كمذيبات لاستخلاص الباتولين وتحليله، لكن ثنائي كلور الميثان DCM هو بديل واعد لاستخلاص السموم الفطرية المعتدلة القطبية. إن إجراء الاستخلاص سائل-سائل بخلاات الإيثيل يتطلب مراحل استخلاص متعددة وتنقية ورفع التركيز، على سبيل المثال: الاستخلاص بالطور الصلب (SPE)؛ لذلك لم يتم أخذه بالاعتبار في الدراسة. وتمت مقارنة الميثانول والأسيتونيترييل وثنائي كلور الميثان DCM من حيث شدة إشارة الباتولين وعلى أداء جهاز LC-MS الخاص بنا. يبين الشكل 3 بوضوح أن DCM تفوق على المذيبين الآخرين مع تذيل قمة أمامي خلفي أقل حتى عند استعمال حجم حقن 20 ميكرو لتر. باستعمال DCM كمذيب استخلاص، يمكن تحليل هذه المستخلصات باستعمال LC-MS مع التمديد (10 مرات) للوصول للتركيز المستهدف 50 نانوجرام/جرام، المستوى المسموح به من قبل إدارة الغذاء والدواء. الأسيتونيترييل والميثانول أقل قطبية من الطور المتحرك عند النسبة البدائية (5/95)، هذا الاختلاف في القطبية يخرب توازن توزيع الباتولين في الطور الثابت في عامود الكروماتوغرافيا السائلة، مما يؤدي إلى استبقاء غير كاف للباتولين على العمود معطياً طيفاً غير مثالي عند حقن حجم 20 ميكرو لتر. على العكس، يمتلك DCM قطبية أعلى من الطور المتحرك LC. ونتيجة لذلك، يميل الباتولين إلى التركيز عند مدخل العمود، مما يعزز الحساسية حتى عند أحجام حقن أعلى من (20 ميكرو لتر) دون حدوث توسع broadening في القمة، كما هو موضح في الشكل 3.



الشكل 3. مقارنة بين المذبذبات العيارية مثل الأسيتونيترييل والميثانول وثنائي كلور الميثان.

تقييم نظام تحضير العينات الروبوتية

عند تحضير محاليل المعايرة يجب أن تكون التكرارية عالية في استعمال الماصة. لقد حددنا هذه العملية المتكررة على أنها عملية مناسبة للأتمتة حيث اختير نظام chemspeed swing XL لأداء هذه المهمة المحددة. وكان الهدف مقارنة التحضير الآلي للعينات مع التحضيرات اليدوية وتقييم تأثيره على تحليل العينات. يوضح الشكل S1 تأثير خطوات تحضير تراكيز محاليل المعايرة مع التأكيد على الخطوات والأدوات المهمة، وإثبات تماسك العملية الآلية، استعمل التحضير الآلي لإنشاء ثماني دفعات من عينات منحني المعايرة، لتخضع للتحليل بعد ذلك على LC-MS. وتتكون كل دفعة من تسعة محاليل معايرة يتراوح تركيزها من 2 نانوجرام/مل إلى 1000 نانوجرام/مل. يلخص الجدول 1 المتوسط والانحراف المعياري النسبي (RSD) لكل تركيز معايرة. بعيداً عن أدنى نقطة معايرة عند 2 نانوجرام/مل، التي تُظهر 19% RSD، أعطت جميع محاليل المعايرة الأخرى $RSD \geq 10\%$.

الجدول 1. متوسط إشارة الباتولين إلى ^{13}C - باتولين وقيم الانحراف المعياري النسبي المقابلة في مختلف نقاط المعايرة.

Con. (ppb)	متوسط نسبة الإشارة Patulin / ^{13}C -Patulin	RSD (%) n=8 *
2	0.004	19
5	0.020	4
10	0.046	8
20	0.100	6
50	0.333	5
100	0.509	5
200	1.228	8
500	2.964	4
1000	6.415	4

* تم إعداد وتحليل ثماني دفعات من السلسلة العيارية تتراوح بين 2-1000 جزء في البليون في أيام متفرقة

يصبح إعداد العينة (الشكل S2) أكثر تعقيداً مع إضافة الأدوات والخطوات اللاحقة. خضعت سبع عينات بأوساط مختلفة للاختبار، حيث برمج نظام chemspeed لتنفيذ عمليات إضافة العياري spiking، وضخ السوائل، والاستخلاص، والطرء المركزي، وفتح العبوات وإغلاقها ونقل حاويات العينات دون تدخل بشري. حيث أضيف لكل وسط أربعة تركيزات (10 و 50 و 200 و 1000 نانوغرام/غرام) في أربع مكررات. ثم أجري تحليل LC-APCI-MS/MS على المستخلصات المحضرة. يلخص الجدول 2 نسبة الاسترداد والانحراف المعياري النسبي RSD للأوساط السبعة. تتراوح نسبة الاسترداد من 89-114%، مع RSD تتراوح بين 0.4-11%. وحسبت التغيرات بين المكررات وبين الأوساط أيضاً وفقاً لـ ISO-5725-2 [42]. بلغ RSD لمكررات الوسط نفسه 8% عند 10 نانوغرام/غرام، و4% عند 50 نانوغرام/غرام، و5% عند 200 نانوغرام/غرام، و3% عند 1000 نانوغرام/غرام، في حين بلغ RSD بين الأوساط 9% عند 10 نانوغرام/غرام، و5% عند 50 نانوغرام/غرام، و7% عند 200 نانوغرام/غرام، و4% عند 1000 نانوغرام/غرام. تشير هذه النتائج بقوة إلى أن نظام إعداد العينات الآلي مع LC-APCI-MS/MS يمكنه إجراء تحليل كمي متواصل للعينات الغذائية المشتبه بتلوثها بالباتولين.

الجدول 2. نسبة الاسترداد والتباين (RSDs، n = 4) داخل وبين مجموعة الأوساط للعينات المضاف لها العياري التي حضرت آلياً.

التركيز (نانوغرام/غرام)	المجال									مجال تغير الوسط (RSDr%)	مجال تغير الوسط (RSDr%)
	الإضافة القياسية للوسط	الانحراف المعياري النسبي	الاسترداد	عصير التفاح المبستر	لفائف التفاح	مربي التفاح	هريس التفاح	صلصة التفاح	عصير التفاح الطازج	طعام الأطفال المعتمد على التفاح	
10	4-11	89-104	9.3 (11)	104 (9)	92 (8)	89 (7)	92 (8)	91 (6)	104 (4)	8	9
50	3-7	105-114	105 (4)	114 (4)	111 (5)	113 (4)	106 (2)	114 (7)	109 (3)	4	5
200	0.4-7	91-110	91 (7)	103 (4)	96 (3)	106 (6)	98 (0.4)	110 (4)	105 (1)	5	7
1000	1-5	96-107	104 (4)	107 (2)	104 (5)	106 (3)	96 (1)	107 (2)	104 (1)	3	4

للمقارنة، حضر يدوياً سبع عينات بأوساط مختلفة، أدرجت النتائج في الجدول 3، بما في ذلك نسبة الاسترداد والانحرافات المعيارية النسبية (RSDs). تتراوح نسبة الاسترداد عند التحضير اليدوي بين 85% و125%، ومع RSDs وتراوح بين 2% إلى 8%، بلغت الفروقات بين المكررات في الوسط نفسه 6% عند 10 نانوغرام/غرام، و4% عند 50 نانوغرام/غرام، و4% عند 200 نانوغرام/غرام، و4% لـ 1000 نانوغرام/غرام، وRSDs بين العينات بأوساط مختلفة 15% عند 10 نانوغرام/غرام، 5% عند 50 نانوغرام/غرام، 7% عند 200 نانوغرام/غرام، و6% عند 1000 نانوغرام/غرام. تشير النتائج المتداخلة إلى أنه لا يوجد فروقات معنوية بين نتائج نسبة الاسترداد وRSDs بين التحضير الآلي والتحضير اليدوي للعينات، كما هو موضح في الشكل S3، ويؤكد ذلك الشكل S4. لا توجد قيم متطرفة (عمليات استرداد كبيرة أو صغيرة بشكل غيرعادي) تم تحديدها في جدول لإجراءات. أثبت اختبار (t-test) أنه لا يوجد فرق إحصائي بين متوسط الاسترداد عند التحضير الآلي (n=28، 103%) وعند التحضير اليدوي (n=28، 102%). ومن الواضح أن كلا الإجراءين أسفرا عن نتائج متقاربة.

الجدول 3. نسبة الاسترداد والتباين (RSDs، %، n = 4) داخل وبين مجموعة الأوساط للعينات المضاف لها العياري التي حضرت يدوياً.

التركيز (نانوغرام/ غرام)	المجال									مجال تغير الوسط (RSDr%)	مجال تغير الوسط (RSDR%)
	الإضافة القياسية للوسط										
	طعام الأطفال المعتمد على التفاح	عصير التفاح الطازج	صلصة التفاح	هريس التفاح	مربى التفاح	لفائف التفاح	عصير التفاح المبستر	الاسترداد	الانحراف المعياري النسبي		
10	91 (8)	96 (5)	119 (7)	85 (7)	100 (7)	102 (2)	125 (6)	91-125	2-8	6	15
50	115 (5)	107 (5)	110 (4)	106 (2)	113 (5)	103 (2)	113 (1)	103-115	2-5	4	5
200	96 (5)	93 (2)	92 (3)	86 (2)	90 (3)	96 (4)	105 (4)	86-105	2-5	4	7
1000	109 (4)	103 (2)	100 (2)	96 (6)	104 (4)	95 (7)	106(2)	95-109	2-7	4	6

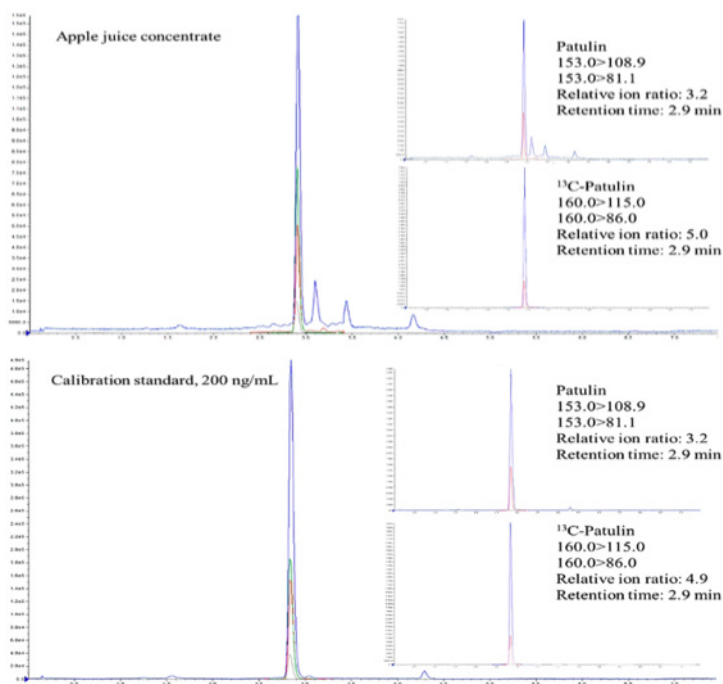
قدّر حد كشف الكمي للطريقة (LOQ) بـ 4.0 نانوغرام/غرام مع الأخذ بالحسبان أدنى نقطة معايرة مكافئة، 2.0 نانوغرام/مل وعامل التمديد، 2. وجرى التحقق من هذا الحد باستعمال بروتوكول وكالة حماية البيئة لتحديد حد الكشف. تم تحضير تسع عينات من عصير التفاح مضاف لها الباتولين بمعدل 5.0 نانوغرام/غرام باستعمال التحضير الآلي للعينات وتحليلها باستخدام LC-APCI-MS/MS. المتوسط والانحراف المعياري (SD) للباتولين في العينات التسع كان 4.62 ± 0.39 نانوغرام/غرام. حد الكشف للطريقة مقدر كما يلي:

$$(MDL) = t(8, 0.99) \times SD = 2.896 \times 0.39 \text{ ppb} = 1.14 \text{ ng/g and LOQ} = 3 \times MDL = 3.42 \text{ ng/g.}$$

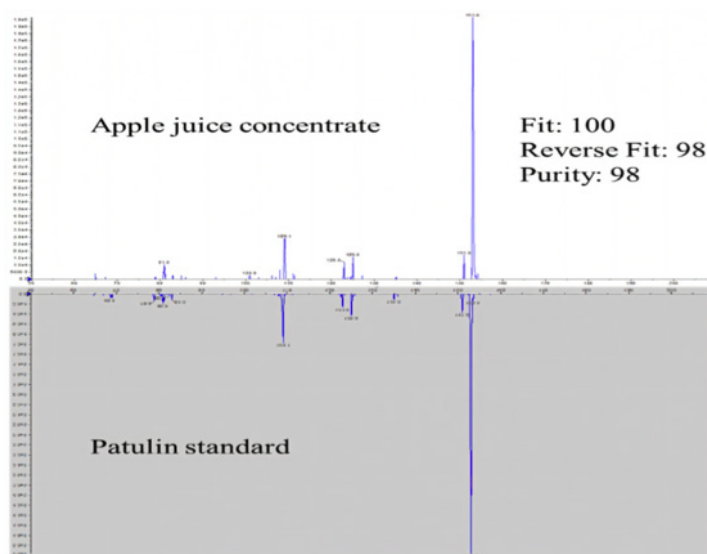
تحديد وتأكد البنية والتتبع المتروولوجي لقياسات الباتولين

في المجلد، جمع ست عشرة عينة من عصير التفاح الطازج، ومن عصير التفاح المبستر، ومن المنتجات الغذائية المشتقة من التفاح كعينات ملائمة من المتاجر المحلية وعبر الإنترنت، حضرت العينات آلياً، وحللت باستعمال LC-APCI-MS/MS. اكتشف الباتولين في عينة واحدة من عصير تفاح وعينة واحدة من عصير تفاح مركز. تم تحديد بنية الباتولين باتباع معايير تحديد البنية المحددة وفق إرشادات إدارة الغذاء والدواء الأمريكية التي تعنى بالتحقق من صحة الطرائق الكيميائية لبرامجها، الطبعة الثالثة (الشكل 4). تم التأكد من بنية الباتولين أيضاً باستخدام أطياف IDA-EPI. كان النقاء 100، 98، 98، 98، على التوالي (الشكل 5)؛ مما يدل على درجة عالية من التطابق بين أطياف الباتولين المقيسة والأطياف المرجعية.

تكمن أهمية التتبع المتروولوجي في دعمه لصحة الطريقة، إن دقة قياسات الباتولين وصلاحيته حسب المعايير الدولية تتم من خلال نسبها إلى مواد مرجعية مقبولة ولها نقاوتها بعدم يقين معتمد. إن عدم وجود التتبع المتروولوجي يمكن أن يقلل من موثوقية قياس العينات، لأن ذلك يعيق تتبع قيمة عدم اليقين المرتبط بالقياسات الفردية.



الشكل 4. تحديد الباتولين في عينة حقيقية باستعمال LC-MS/MS.



الشكل 5. تأكيد هوية الباتولين باستخدام IDA-EPIMS/MS.

LC-APCI-MS/MS والتحقق من صحتها لتحليل الباتولين في عصائر التفاح والمنتجات ذات الصلة مع إعداد العينة آلياً. يوفر تحضير العينات آلياً طريقة مباشرة ومناسبة لمختلف الأوساط الغذائية القائمة على التفاح، وعدم الحاجة إلى طرائق خاصة معتمدة على نوع الوسط. تم تقييم أداء هذه الطريقة مع الأخذ بالحسبان صحة الطريقة والإحكام وحد الكشف ومقدار عدم اليقين. مقارنة مع إجراءات التحضير اليدوية، أظهر إعداد العينات الآلي أداءً مماثلاً في تحليل الباتولين، ليحل محل المناولة اليدوية مع تحسن الكفاءة في اختبار العينة.

القسم التجريبي

المواد الكيميائية والمواد

الأسيتونيتريل، الميثانول، الماء، ثنائي كلورو ميثان (ACS، 99.5%) بدرجة نقاوة HPLC، تم شراء حمض الفورميك وفورمات الأمونيوم بدرجة نقاوة MS من شركة Thermo Fisher Scientific (Waltham, MA, USA). طورت المادة المرجعية المعتمدة (CRM) من الباتولين

ولذلك قمنا بتحديد تراكيز الباتولين في عينتين حقيقيتين تم تحضيرهما آلياً، جنباً إلى جنب مع المادة العيارية بمجال واسع من عدم اليقين ($n = 2$ ، ما يقرب من 95% ثقة)، وباستعمال بيانات المعايرة والبروتوكولات المعمول بها. استعملت مواد مرجعية معتمدة (CRM) لتقدير عدم اليقين المرتبط ب LC-APCI-MS/MS، اعتماداً على التباين بين الأوساط (الجدول 2) لتقدير عدم اليقين المرتبط بتحضير العينة. وبالتالي، بلغ تركيز الباتولين 21.1 ± 8.0 نانوغرام/غرام (ك = 2) في عصير التفاح و 56.6 ± 15.6 نانوغرام/غرام (ك = 2) في مركز عصير التفاح، ويمكن إتباع هذا القياس إلى النظام الدولي للوحدات.

في حالة العينتين الحقيقيتين اللتين تم توليدهما بالتحضير اليدوي، كانت تراكيز الباتولين 11.4 ± 14.3 نانوغرام/غرام و 52.6 ± 21.3 نانوغرام/غرام ($n=2$ ، الثقة 95%). ويؤدي الإجراء اليدوي إلى ثقة أوسع لكلا القياسين، وبغض النظر عن إجراءات إعداد العينة، فإن مجال الثقة أوسع عند التركيز الأقل. إن تفصيل المكونات الإحصائية المستخدمة لتقدير عدم اليقين مدرج في الجدول S1.

الاستنتاجات

بالنظر إلى الخواص الفيزيائية والكيميائية للباتولين، فإن مكونات الأوساط مثل الفينولات والسكريات والبكتين الموجودة في عصير التفاح والمواد الغذائية المشتقة من التفاح تؤثر في نسبة الاسترداد وتحديد بنية الباتولين. تقليدياً، اتبعت عمليات الاستخلاص المتعددة والتنقية باستعمال الاستخلاص بالطور الصلب (SPE) ثم التحليل على تقنية LC لتحقيق نسبة استرداد مرضية وتقليل تأثير تدخلات الأوساط. في تحاليل LC-MS، يعد تطابق أوساط عينات منحني المعايرة مع أوساط العينات ضرورياً لتحاليل الكمية عند عدم استعمال طريقة التمديد النظائري. إضافة إلى ذلك، يفضل أتمتة تحضير العينة لتقليل العمليات اليدوية للكيميائيين؛ لذلك توضح هذه الدراسة كيفية تطوير طريقة

بالمعهد الوطني للمقاييس في الصين GBW(E)100673 (CRM)، وتم شراؤه من شركة Chemtek inc (Waltham, MA, USA). كانت نقاوة الباتولين المعتمدة 99.7% مع عدم اليقين $U(\%) = 0.3 (k = 2)$. تم شراء عصير التفاح، صلصة التفاح، أغذية الأطفال المعتمدة على التفاح، هريس التفاح، فاكهة التفاح ولفائف التفاح ومربى التفاح من المتاجر المحلية وعبر متاجر الإنترنت.

تم شراء محلول الباتولين المركز (100 ميكروغرام/مل، في الأسيتونيترييل) ومادة المعايرة الداخلية (IS) الموسومة بنظير مستقر، ^{13}C -باتولين (25 ميكروغرام/مل، في الأسيتونيترييل)، من مختبرات شركة رومر (Union, MO, USA). حضر محلول 1000 ميكروغرام/لتر من ^{13}C -باتولين في الأسيتونيترييل. حضرت محاليل العمل من الباتولين بتركيزات 10، 20، 50، 100، 200، 500، 1000، 2000، 5000، 10000 ميكروغرام/لتر (ppb) بتمديد محلول الباتولين المركز بالأسيتونيترييل. تم تخزين جميع المحاليل عند درجة (-20) مئوية. حضرت محاليل السلسلة العيارية بحجم (0.5 مل) عند 1، 2، 5، 10، 20، 50، 100، 200، 500، 1000 ميكروغرام/لتر بتمديد المحلول المقابل بالأسيتونيترييل 10 مرات. تم إعداد كل محلول من السلسلة العيارية بحجم (0.5 مل) بمزج 400 ميكروغرام/لتر من ثنائي كلورو ميثان (DCM)، و50 ميكروغرام/لتر من محلول العمل، و50 ميكروغرام/لتر من محلول ^{13}C -باتولين. كان التركيز النهائي لـ ^{13}C -باتولين 100 ميكروغرام/لتر.

نظام تحضير العينة الآلي

استعمل نظام chemspeed swing XL من شركة (Chemspeed Technologies, Füllinsdorf) السويسرية لإعداد السلسلة العيارية وإعداد العينات خلال هذه الدراسة. باختصار، يتكون نظام Swing XL من حامل بأبعاد (2.35×1.92×0.95 م) في هذه الدراسة ركب عليه الأدوات والرفوف والصفائح: ذراع آلية علوية مع وحدة تبادل الأدوات، ذراع آلي (DENSO robotics)، ووحدة مناولة السوائل بأربع قنوات مزودة بوحدة غسيل، ووحدة توزيع ووزن (GDU-v) لنقل السوائل مجهزة بميزان تحليلي (قابلية القراءة الوزنية: 1 ملغ؛ الدقة الحجمية: 1 ميكروغرام)، ووحدة التوزيع الوزنية (GDU-p) لنقل المواد الصلبة مزودة بميزان تحليلي (قابلية القراءة الوزنية، 1 ميليغرام)، ووحدة متعددة المقابض لمهام النقل، وأداة تستخدم لفتح وإغلاق عبوات العينات ذات الأغشية اللولبية، ورف يحوي 48 برأ (8×6) للمناولة التلقائية لعينات LC سعة 2 مل، ورف يحوي 50 برأ (10×5) لأنابيب الطرد المركزي سعة 15 مل، ورف به 21 برأ (7×3) لأنابيب الطرد المركزي سعة 50 مل، وغطاءان (واحد لأنابيب الطرد المركزي سعة 15 مل والآخر لأنابيب الطرد المركزي سعة 50 مل الأنابيب)، وحامل حقنة يستعمل لتخزين المحاقن المعدة للاستعمال مرة واحدة سعة 0.1 مل و12.5 مل. كما جرى ربط النظام بجهاز الطرد المركزي sigma, osterode am harz, germany. وفقاً لتوجيهات autoSuite، تحركت الذراع الآلية فوق المنصة، لالتقاط الأدوات وإكمال المهام المختلفة. وتقوم الذراع الآلية DENSO بنقل العينات من جهاز الطرد المركزي وإليه الأجهزة المستخدمة في سير العمل. تمت برمجة جميع إجراءات نظام swing XL باستخدام برنامج chemspeed autoSuite (الإصدار 2.4.20.1) الذي تم استخدامه أيضاً لتطوير ومحاكاة وتحسين سير العمل. سيتم وصف سير العمل هذا بلغة واضحة في الأقسام التالية.

سير العمل لإعداد السلسلة العيارية

تم إعداد السلسلة العيارية عن طريق تمديد المحاليل وإضافة ^{13}C -باتولين، حيث جرى تحضير اثنين من المحل دون إضافات (واحد منها أضيف له ^{13}C -باتولين) وعشرة تراكيز مختلفة للسلسلة العيارية بتركيزات تتراوح من 1 ميكروغرام/لتر إلى 1000 ميكروغرام/لتر باستخدام نظام swing XL على النحو التالي:

الخطوة 1. تم تحميل المذيبات، ومحاليل العمل، والمحاقن، ثم جرى تحديد الأماكن والأدوات بواسطة البرنامج لضمان الالتقاط والاستبدال الدقيق بين العناصر.

الخطوة 2. التقتت الذراع الآلية العلوية وحدة توزيع السائل (GDU-v) لتحميل حقنة 12.5 مل من حامل الحقنة، وسحب 5 مل من DCM من خزان DCM، وزعت الذراع المذيب DCM بشكل تسلسلي في عبوات التحليل في ملقم العينات الآلي لجهاز LC، حيث تم وضع 400 ميكروغرام في كل منهما. تم التخلص من المتبقي من DCM في المحقنة في حاوية النفايات، وبعد ذلك تم تفريغ المحقنة (تم وضعها مرة أخرى في حامل المحقنة).

الخطوة 3. قام GDU-v بتحميل حقنة سعة 0.1 مل ونقلها إلى عبوة محلول العمل الأول (10 ميكروغرام/لتر). باستخدام هذه المحقنة، قام GDU-V بسحب 50 ميكروغرام من الهواء قبل سحب 50 ميكروغرام من محلول العمل، ثم وزع المحلول في عبوات تحليل العينات في LC سعة 2 مل. للتأكد من إخراج العينة بأكملها من المحقنة، وتم ضبط حجم التوزيع على 100 ميكروغرام. بعد ذلك، كرر GDU-v الإجراءات

المذكورة آنفاً لعينات المعايرة الأخرى. قام GDU-v برمي المحقنة بعد تحضير عينات المعايرة في قوارير عبوات عينات LC المحملة مسبقاً. الخطوة 4. قام GDU-v بتحميل حقنة سعة 0.1 مل وانتقل إلى حاوية ^{13}C -patulin. تمت برمجة المحقنة لتضخ 50 ميكرو لتر من الهواء قبل سحب 50 ميكرو لتر من محلول ^{13}C -باتولين (IS)، ثم جرى توزيع محلول ^{13}C -باتولين في 2 مل من LC قارورة عينة. قام GDU-v برمي المحقنة بعد أن تمت إضافة ^{13}C -patulin في عبوات المعايرة.

الخطوة 4. انتهى هذا الجزء الآلي من تحضير السلسلة العيارية. لم يتم ربط chemspeed بجهاز LC-MS، ولذلك تم نقل عبوات السلسلة العيارية المعدة إلى LC-MS يدوياً ثم حلت العينات بواسطة ملقم العينات الآلي لجهاز LC.

سير العمل لإعداد العينات

تم إغناء العينات بـ ^{13}C -باتولين ثم استخلاصها. وكانت العينات قد أعدت ألياً باستخدام نظام swing XL على النحو التالي:

الخطوة 1. يعمل الذراع الآلي العلوي على فتح الغطاء اللولبي لعبوات العينات 15 مل التي تم تحميلها مسبقاً على رف العينات، والتي بدورها كانت مثبتة على طاولة الهزاز.

الخطوة 2. يعمل الذراع الآلي العلوي على فتح الغطاء اللولبي، وتركيب GDU-v، وتحميل حقنة 12.5 مل، وضخ عينات سائلة (على سبيل المثال: عصير التفاح، 1000 ± 25 ملغ لكل منهما) في عبوات سعة 15 مل. وبدلاً من ذلك، بالنسبة للعينات الصلبة المتجانسة (على سبيل المثال، لفات الفاكهة، تم تفريق 1000 ± 25 ملغ لكل منهما) باستخدام GDU-p. وبدلاً من تحميل حقنة، ركب GDU-p وتم وضع حاوية مليئة بلفائف الفاكهة المتجانسة.

الخطوة 3. تفريغ المحقنة سعة 12.5 مل أو حاوية توزيع العينات الصلبة بوضع 0.1 مل بتوزيع 50 ميكرو لتر من ^{13}C -IS في كل عينة.

الخطوة 4. يعمل الذراع العلوي على تركيب GDU-v، ووحدة موزع السائل ذات أربع قنوات، ثم إضافة 2 مل من DCM إلى كل عينة.

الخطوة 5. بعد فك وحدة موزع السائل ذات 4 قنوات، يقوم الذراع العلوي بإغلاق عبوات العينات 15 مل.

الخطوة 6. يعمل الذراع العلوي على فك الغطاء اللولبي، وهز قوارير العينة سعة 15 مل عند 1000 دورة في الدقيقة لمدة 3 دقائق بميزة الاهتزاز لحامل العينات.

الخطوة 7. يعمل الذراع العلوي على تركيب وحدة متعددة المقابض ونقل عبوات العينات 15 مل إلى حامل عينات جهاز الطرد المركزي.

الخطوة 8. يعمل الذراع الآلي على نقل العينات إلى جهاز الطرد المركزي، ويتأكد المشغل البشري من تثقيب العينات بمعدل 4500 دورة في الدقيقة الواحدة وذلك لمدة 5 دقائق.

الخطوة 7. يعمل الذراع الآلي على نقل العينات إلى خارج جهاز الطرد المركزي، حيث يستخدم الذراع العلوي وحدة متعددة المقابض لنقل عبوات العينات مرة أخرى إلى رف العينة 15 مل.

الخطوة 10. يعمل الذراع العلوي على فك الذراع الآلي وتركيب وحدة متعددة المقابض، وتركيب وحدة إغلاق العينات اللولبية، ثم فتح قارورة العينة، ووضع الأغشية على اللوحة.

الخطوة 11. يعمل الذراع العلوي على فك وحدة إغلاق وفتح العينات اللولبية وتثبيت وحدة موزع السوائل ذات 4 قنوات، ثم غسل الأنابيب والإبر، وبسحب 0.5 مل من الطبقة السفلية (DCM)، ونقل المستخلص إلى عبوة 2 مل خاصة لجهاز LC.

الخطوة 12. يعمل الذراع العلوي على فك وحدة موزع السوائل ذات 4 قنوات.

الخطوة 13. يعمل الذراع العلوي على تركيب وحدة فتح وإغلاق عبوات العينات اللولبية.

الخطوة 14. يعمل الذراع العلوي على فتح وإغلاق عبوات العينات اللولبية والعودة إلى مكانه.

الخطوة 15. وبهذا يكون قد أنجز الجزء الآلي من تحضير العينة، ويقوم المشغلون بعد ذلك بتحميل قوارير العينات LC يدوياً في جهاز أخذ العينات الآلي LC-MS لتحليل LC-MS.

يبين الشكلان S1 و S2 توضيحاً للأدوات والخطوات الأساسية في سير العمل أعلاه.

تحضير العينة يدوياً

تم وزن العينات (1.00 ± 0.05 غرام) في عبوات سعة 15 مل، وتمت إضافة 50 ميكرو لتر من محلول ^{13}C -باتولين (1.0 جزء في المليون) متبوعاً بإضافة 2 مل من DCM، وجرى استخدام خلاط geno/grinder لرج عبوات العينة لمدة 3 دقائق عند 1000 دورة في الدقيقة متبوعاً

بالطرد المركزي (5 دقائق، 4200×جم) لتسهيل الفصل، أخذ حوالي 0.5 مل من مستخلص DCM ونقلت بعدها إلى وحدة تلقين العينات التلقائية LC لتحليل LC-APCI-MS/MS، ثم طحنت لفائف الفاكهة بالطحن المبرد، وخزنت العينات في -80 درجة مئوية طوال الليل، ثم مزجت مع الثلج الجاف باستعمال خلاط robot coupe، وفي اليوم التالي خزنت في أكياس غير محكمة الإغلاق عند -20 درجة مئوية. للسماح بتسامي ثاني أكسيد الكربون، استخلصت العينات بالإجراءات المذكورة آنفاً.

دراسات التعافي

درست نسبة الاسترداد في تحاليل عصير التفاح المبستر والطازج، هريس التفاح، أغذية الأطفال المعتمدة على التفاح، وصلصة التفاح، ولفائف التفاح، ومربى التفاح بنسب 10، 50، 200، 1000 ميكروغرام/غرام. وجرى إغناء عينات فارغة (0.05 ± 1.00 جم) بـ 100 ميكرو لتر من محاليل العمل عند 100، 500، 2000، 10000 ميكروغرام/لتر و 50 ميكرو لتر من محلول العمل ^{13}C -باتولين (1000 ميكروغرام/لتر)، وحضرت بالطريقة الموصوفة سابقاً. حضرت العينات في أربع مكررات درجة إغناء. قدرت كمية الباتولين باستعمال منحني معايرة مع IS من ^{13}C -patulin، واعتمد تحديد الهوية على زمن الاستبقاء ضمن +5% ووجود أيونين فريدين ومحمدي البنية ضمن نسبة تسامح مطلقة $\pm 10\%$ لوحدة الأيونات لمعيار وقت الاستخدام.

تحليل LC-APCI-MS-MS

تم اقتران جهاز كروماتوغرافيا السائلة من شركة شيمازو الشهيرة (كولومبيا، ماريلاند، الولايات المتحدة الأمريكية) مع مطياف كتلة مؤلف من رباعي الأقطاب quadrupole SCIEX يعمل بطريقة مصيدة الأيونات 500 (QTRAP) + وتأمين كيميائي بالضغط الجوي APCI، وعمود فصل EC-C18 من شركة Agilent بأبعاد (2.1×150 مم؛ 1.9 ميكرومتر) وعمود حماية بأبعاد (2.1×5 مم؛ 2.7 ميكرومتر). يتكون الطور المتحرك في جهاز LC من 10 (ملم فورمات الأمونيوم/0.1% حمض الفورميك/الماء) في القناة (A) و (10 ملم فورمات الأمونيوم مع 0.1% حمض الفورميك/الميثانول) في القناة (B). بدأ السائل الحامل من تركيز 5% (B)، وُرفِع التركيز إلى 30% (B) في 1.5 دقيقة، ثم حافظ السائل الحامل على هذا التركيز النهائي لمدة 2 دقيقتين، ثم بعد ذلك رفع تركيز (B) تدريجياً إلى 100% (B) في 0.5 دقيقة، ومن ثم أعيد تركيز السائل الحامل إلى 5% (B) خلال 0.5 دقيقة بزمّن برنامج إجمالي بلغ 7.5 دقيقة بمعدل تدفق قدره 0.3 مل/دقيقة. كان حجم الحقنة 20 ميكرو لتر، وكانت درجة حرارة العمود 40 درجة مئوية. تم تشغيل مطياف الكتلة واختيار التأين السلبى مع طريقة مسح نمط المسح المتعدد الكتلي (sMRM). كان زمن المسح 1 ثانية، ونافذة الكشف 60 MRMs ثانية.

عرضت طريقة أمثلة نمط التحليل في مطياف الكتلة من النوع MRM للباتولين و ^{13}C -باتولين في الجدول 4. ضبطت معاملات منبع الأيونات APCI على الشكل التالي: غاز الستارة 36 واحدة؛ تدفق الغاز المصادم من النتروجين عال؛ درجة حرارة منبع الأيونات 600 درجة مئوية؛ ضغط غاز التأين الأول 60 رطلاً لكل بوصة مربعة؛ وتيار التريز 3- مايكرو أمبير. تم استخدام شروط LC متطابقة للتحليل من نمط MRM للباتولين في تحليل LC-ESI-MS/MS. تم ضبط معاملات منبع الأيونات التريز بالكهرباء الساكنة ESI على النحو التالي: ضغط غاز الستارة 36 رطلاً لكل بوصة مربعة؛ فرق جهد رذاذ أيوني التريز الأيوني -4500 فولت؛ درجة حرارة المنبع 600 درجة مئوية؛ ضغط غاز التأين الأول والثاني كل منهما عند 60 رطلاً لكل بوصة مربعة.

الجدول 4. تحويلات باتولين MRM والمعلومات التي تعتمد على المركب.

Analystes	Q1 Mass (Da)	Q3 Mass (Da)	Retention Time mints	DP (eV)	EP (eV)	CE (eV)	CXP (eV)
Patulin	153.0	108.9	2.9	-5	-10	-12	-29
	153.0	81.1	2.9	-5	-10	-12	-5
^{13}C -Patulin	160	115.0	2.9	-20	-10	-12	-11
	160	86.0	2.9	-20	-10	-12	-11

LC-MS التحليل المعتمد على المعلومات (IDA) وتحليل أيون المنتج المحسن (EPI)

تم تأكيد هوية الباتولين حسب بروتوكول تقنيات الاكتساب المعتمدة على المعلومات IDA-EPI. تم تطبيق شروط في جهاز LC مطابقة للشروط في كل من جهازين LC-MS-IDA-EPI و LC-APCIMS، وجرى الاعتماد على مرجعيات مكتبية عن السموم الفطرية وغيرها (SCIEX, Framingham, MA, USA) لمطابقة أطياف EPI المرجعية التي تم جمعها من العينات الحقيقية. تم ضبط ضغط غاز التصادم (N₂) على «مرتفع»، جمعت أطياف برنامج التحسين الموسع (EPI). في المجال من m/z 50 إلى 200، وضبط زمن ملء مصيدة الأيونات بزمن التعبئة الديناميكية وتم مسح الأيونات الناتجة من QTRAP 6500+ بمعدل 10,000 وحدة دولية/ثانية. وكانت درجات حرارة المنبع والفولتية هي نفسها تلك المستخدمة لتحليل LC-APCI-MS/MS. فيما يتعلق بعمليات البحث في المكتبة، ضبطت نافذة التسامح لكل من الشظية والأيون الأولي عند 0.4 amu. وكانت نافذة زمن الاستبقاء 60 ثانية، وكانت عتبة الكثافة النسبية 0.05، وضبط الحد الأدنى للنقاء عند 50.

اختصارات:

CI	التأين الكيميائي
CRM	المواد المرجعية المعتمدة
DCM	ثنائي كلورو ميثان
ESI	التأين بالرذاذ الكهربائي
GDU	وحدة توزيع وزنية
IDA-EPI	أيون المنتج المعزز المعتمد على المعلومات
LC-APCI-MS/MS	الكروماتوغرافيا السائلة المقرونة بالتأين الكيميائي بالضغط الجوي مع مطياف الكتلي الترادفي
LOQ	حد الكشف
MDL	حد كشف الطريقة
QTRAP	المصيدة الأيونية مع رباعي الأقطاب
QuEChERS	سريعة، سهلة، رخيصة، فعالة، آمنة
RSD	الانحراف المعياري النسبي
sMRM	المسح المجدول لمراقبة التفاعلات المتعددة
SPE	استخلاص بالطور الصلب
SD	الانحراف المعياري

المصدر:

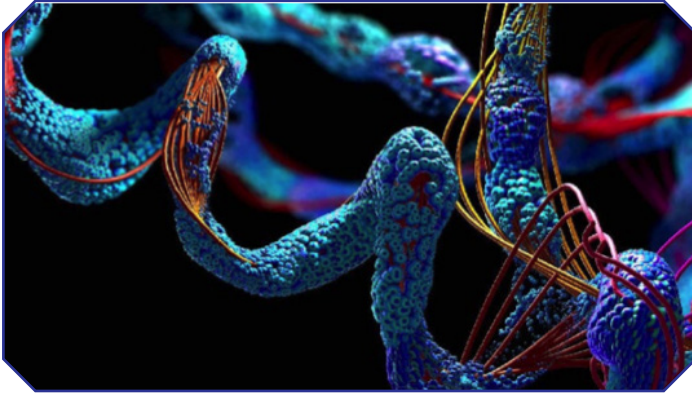
Kai Zhang and Lauren Zhang 2024. Determination of Patulin in Apple Juice and Apple-Derived Products Using a Robotic Sample Preparation System and LC-APCI-MS/MS Toxins, 16, 238. <https://doi.org/10.3390/toxins16060238>

ملاحظة: الأشكال S1 و S2 و S3 و S4 تجدونها في الرابط:

<https://www.mdpi.com/article/10.3390/toxins16060238/s1>

◀ إعداد: ك. علي الزير، قسم الكيمياء، هيئة الطاقة الذرية السورية.

بروتين حشري يمنع العدوى البكتيرية



تم استخدام البروتين الذي يمنح البراغيث حركتها لطرد الخلايا البكتيرية، حيث أظهرت نتائج المختبر قدرة هذه المادة على منع عدوى الغرسات الطبية.

طوّر علماء في أستراليا طلاءً ذكياً طارداً للبكتيريا، مصنوعاً من الريزولين، وهو بروتين حشري فائق المرونة يمنح البراغيث قوتها الخارقة في القفز. يُشكّل الريزولين المعدّل عند وضعه على سطوح مثل الغرسات الطبية أو الأدوات الجراحية، قطرات نانوية تُعطّل الخلايا البكتيرية، بما في ذلك السلالات المقاومة للمضادات الحيوية، مثل المكورات العنقودية الذهبية المقاومة للميثيسيلين *Methicillin-resistant Staphylococcus aureus* (MRSA)، دون الإضرار بالأنسجة البشرية. وفي التجارب المخبرية، كان الطلاء فعالاً بنسبة 100% في منع البكتيريا من الالتصاق وتشكيل الأغشية الحيوية، وهو سبب رئيسي للعدوى بعد الجراحة. جرى استخدام البروتين الذي يمنح البراغيث حركتها لطرد الخلايا البكتيرية، حيث أظهرت نتائج المختبر قدرة هذه المادة على منع عدوى الغرسات الطبية. تعد الدراسة المشتركة التي قادها باحثون في جامعة RMIT في أستراليا أول استخدام معلن لطلاءات مضادة للبكتيريا مصنوعة من بروتينات محاكاة الريزولين لمنع البكتيريا تماماً من الالتصاق بالسطح. وقالت البروفيسورة ناميتا روي تشودري المؤلفة الرئيسية للدراسة: "إن هذا الاكتشاف يمثل خطوة حاسمة نحو الهدف المتمثل في إنشاء سطوح ذكية تمنع البكتيريا الخطيرة، وخاصة تلك المقاومة للصادات الحيوية مثل MRSA، من النمو على الغرسات الطبية". وأضافت: "إن هذا العمل يظهر كيف يمكن تعديل هذه الطلاءات لمحاربة البكتيريا بشكل فعال، ليس على المدى القصير فحسب، بل ربما على مدى فترة طويلة".

على الرغم من إجراءات التعقيم ومكافحة العدوى، توجد البكتيريا غالباً على الغرسات الطبية بعد الجراحة؛ إذ قد يؤدي ذلك إلى التهابات تتطلب استخدام الصادات الحيوية، ولكن مع تزايد شيوع ظاهرة المقاومة لهذه الصادات، تبرز الحاجة هنا إلى تدابير وقائية جديدة. وقالت تشودري: «إن مقاومة المضادات الحيوية دفعت إلى زيادة الاهتمام باستخدام مواد سهلة التحضير وذاتية التعقيم للسطوح المضادة للبكتيريا؛ لذلك قمنا بتصميم هذا السطح لمنع الالتصاق الأولي للبكتيريا وتشكيل غشاء حيوي يعمل على تقليل معدلات الإصابة بشكل كامل». وأضافت: "إن التطبيقات المحتملة يمكن أن تشمل طلاء يستخدم لرش الأدوات الجراحية والغرسات الطبية والقسطرة وضمادات الجروح".

يعد الريزولين بروتيناً مرناً يوجد في العديد من الحشرات يُضفي مرونة مطاطية ناعمة على الأعضاء والأنسجة النشطة ميكانيكياً؛ إذ يُمكن حشرات العديد من الأنواع من القفز أو تحريك أجنتها بكفاءة. على سبيل المثال، يُمكن الريزولين البراغيث fleas من القفز لمسافة تزيد عن مئة ضعف طولها في زمن قدره ميكرو ثانية. قالت تشودري: "تعد هذه الخصائص الاستثنائية للريزولين والبروتينات المحاكاة له وطبيعته غير السامة مثالية في عدد من التطبيقات التي تتطلب استعمال مواد وطلاءات مرنة ومتينة ومتوافقة حيوياً". وأضافت: "تتراوح هذه التطبيقات بين هندسة الأنسجة وتوصيل الأدوية والإلكترونيات المرنة والمعدات الرياضية، ولكن هذا أول عمل يُنشر حول أدائه كطلاء مضاد للبكتيريا. لقد ابتكر الفريق أشكالاً عديدة من الطلاء من أشكال مُعدّلة من الريزولين، ثم اختبروا تفاعلاتها مع بكتيريا الإشريكية القولونية E.coli وخلايا الجلد البشري في ظروف مخبرية، وأظهرت الدراسة كيف أن البروتينات المعدلة في شكل قطرات نانوية والمعروفة باسم coacervates كانت فعالة بنسبة 100% في صد البكتيريا، وتتوافق جيداً مع الخلايا البشرية السليمة، وهو جزء مهم من نجاح الزرع الطبي. قال الدكتور نيسال وanasinجا، المؤلف الرئيس للدراسة من معهد RMIT: «إن المساحة السطحية العالية للقطرات النانوية تجعلها مناسبة جداً في التفاعل مع البكتيريا وصدّها. وأضاف: «بمجرد ملامستها، تتفاعل الطبقة مع الأغشية الخلوية البكتيرية المشحونة سلباً من خلال قوى كهروستاتيكية، مما يؤدي إلى تعطيل عملها بتسرب محتويات الخلايا وموتها في النهاية». إن الطلاءات القائمة على الريزولين لم تظهر فعالية في منع البكتيريا من الالتصاق بالسطح بنسبة 100% فحسب، بل إنها قدمت أيضاً العديد من المزايا مقارنة بالطرائق التقليدية. وعلى عكس المضادات الحيوية التي يمكن أن تؤدي إلى المقاومة، فإن الاضطراب الميكانيكي الذي تسببه طلاءات الريزولين قد يمنع البكتيريا من إنشاء آليات المقاومة. وفي الوقت

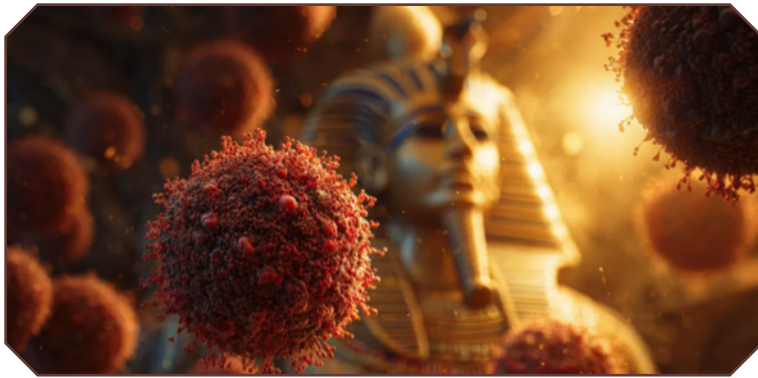
ذاته، ونظراً للمصدر الطبيعي للريزولين وتوافقه الحيوي فإنه يعمل على تقليل خطر حدوث ردود فعل سلبية في الأنسجة البشرية؛ وبما أنه من البروتينات، فهو أكثر ملاءمة للبيئة من البدائل القائمة على جسيمات النانو الفضية.

قال البروفيسور نابا دوتا، المشارك في تأليف الدراسة: «إن البروتين المقلد للريزولين يستجيب بشكل كبير للمحفزات والتغيرات في بيئته، مما يجعله قابلاً لضبط العديد من الوظائف». تعدّ هذه النتائج المبكرة واعدة للغاية كطريقة جديدة للمساعدة في تحسين مكافحة العدوى في المستشفيات وغيرها من المؤسسات الطبية، ولكن هناك حاجة الآن إلى المزيد من الاختبارات لمعرفة كيفية عمل هذه الطلاءات ضد مجموعة أوسع من البكتريا الضارة. يشمل العمل المستقبلي ربط شرائح الببتيد المضادة للميكروبات أثناء الاصطناع التآشبي لمحاكاة الريزولين ودمج عوامل إضافية مضادة للميكروبات لتوسيع نطاق النشاط. وأضاف: «إن الانتقال من البحث المخبري إلى الاستخدام السريري سيتطلب ضمان استقرار المادة وقابليتها للتوسع، وإجراء تجارب واسعة النطاق حول السلامة والفعالية، مع تطوير أساليب إنتاج ذات أسعار معقولة للتوزيع على نطاق واسع».

◀ ترجمة د. فواز كردعلي، مكتب التأليف والترجمة والنشر، هيئة الطاقة الذرية السورية.

Insect protein blocks bacterial infection. ScienceDaily, 2 June 2025.

من فطر لعين إلى علاج السرطان: الأسبرجيلوس فلافوس ينتج دواءً جديداً فعالاً



في تطور علمي مذهل، حوّل باحثون فطراً ارتبط طويلاً بالموت إلى سلاح محتمل ضد السرطان تم العثور على فطر الأسبرجيلوس فلافوس *Aspergillus flavus* في مقابر، مثل مقبرة الملك توت عنخ آمون؛ إذ كان يُخشى منه في السابق بسبب أبواغه القاتلة. الآن، نجح العلماء في جامعة بنسلفانيا والعديد من المؤسسات الشريكة في استخراج فئة جديدة من الجزيئات منها تسمى الأسبيريجيميسينات asperigimycin التي تظهر تأثيرات قوية ضد خلايا سرطان الدم (اللوكيميا). تعدّ هذه المركبات جزءاً من مجموعة نادرة تُعرف باسم RiPPs الفطرية، يبدو أنها تعطل انقسام الخلايا السرطانية بفعالية عالية.

بحوث من جامعة بنسلفانيا فطراً قاتلاً إلى مركب فعال لمكافحة السرطان بعد عزل فئة جديدة من الجزيئات من فطر الأسبرجيلوس فلافوس، حيث قام الباحثون بمعالجة المواد الكيميائية المستخلصة من فطريات المحاصيل السامة والمرتبطة بالوفيات (في المقابر) واختبارها ضد خلايا سرطان الدم. وكانت النتيجة: مركباً واعداً في القضاء على السرطان، ينافس الأدوية المعتمدة من إدارة الغذاء والدواء الأمريكية، ويفتح آفاقاً جديدة في اكتشاف المزيد من الأدوية.

تقول شيري جاو، الأستاذة المساعدة في الهندسة الكيميائية والبيولوجية الجزيئية والهندسة الحيوية في جامعة بنسلفانيا والمؤلفة الرئيسية لدراسة بحثية جديدة منشورة: "الفطريات هي التي أعطتنا البنسلين".

من اللعنة إلى العلاج

يعد فطر الأسبرجيلوس فلافوس-المسمى في كثير من الأحيان بالفطر الأصفر المسمى نسبةً إلى أبواغه الصفراء-ميكروباً شريراً. بعد أن فتح علماء الآثار مقبرة الملك توت عنخ آمون في عشرينيات القرن الماضي، أثارت سلسلة من الوفيات المبكرة بين فريق التنقيب شائعات عن لعنة فرعونية. وبعد عقود من الزمن، افترض الأطباء أن الجراثيم الفطرية التي ظلت خاملة لآلاف السنين ربما أدّت دوراً في ذلك.

في سبعينيات القرن العشرين، دخل اثنا عشر عالماً قبر كازيمير الرابع في بولندا. وفي غضون أسابيع، توفي عشرة منهم. وكشفت التحقيقات اللاحقة أن القبر يحتوي على فطر الأسبرجيلوس فلافوس الذي يمكن أن يؤدي سمومه إلى التهابات الرئة، وخاصة لدى الأشخاص الذين يعانون من ضعف في جهاز المناعة. والآن، الفطر نفسه هو المصدر غير المتوقع لعلاج جديد واعد للسرطان.

اكتشاف فطري نادر

العلاج المذكور هو فئة من الببتيدات التي يتم تصنيعها عن طريق الريبوسومات ثم تعديلها بعد الترجمة، أو RiPPs، والتي يتم نطقها مثل «التمزق» في قطعة من القماش. يشير الاسم إلى كيفية إنتاج المركب -بواسطة الريبوسوم، وهو بنية خلوية صغيرة تصنع البروتينات- وتم تعديله لاحقاً لتعزيز خصائصه القاتلة للسرطان.

يقول تشيويو ني، باحث في CBE والمؤلف الرئيسي للورقة البحثية: «تنقية هذه المواد الكيميائية أمر صعب». في حين تم تحديد آلاف من RiPPs في البكتيريا، لم يُعثر إلا على عدد قليل منها في الفطريات. ويعود ذلك جزئياً إلى أن الباحثين السابقين أخطؤوا في تحديد بروتينات الريبوسومات الفطرية على أنها ببتيدات غير ريبوسومية، ولم يكن لديهم فهم كافٍ لكيفية تكوين الفطريات لهذه الجزيئات. يضيف ني: «تركيب هذه المركبات معقد، وهذا ما يمنحها هذا النشاط الحيوي الاستثنائي».

البحث عن المواد الكيميائية

للعثور على المزيد من مركبات RiPPs الفطرية، قام الباحثون أولاً بمسح عشرات السلالات من فطر الأسبرجيلوس، التي اقترحت الأبحاث السابقة أنها قد تحتوي على المزيد من المواد الكيميائية. وبمقارنة المواد الكيميائية التي تنتجها هذه السلالات مع كتل بناء RiPP المعروفة، حدد الباحثون (الأسبرجيلوس فلافوس) كمرشح واعد لمزيد من الدراسة.

أشار التحليل الجيني إلى بروتين معين في فطر الأسبرجيلوس فلافوس كمصدر لبروتينات RiPP الفطرية. عندما أوقف الباحثون الجينات المنتجة لهذا البروتين، اختفت أيضاً العلامات الكيميائية التي تُشير إلى وجود بروتينات RiPP. إن هذا النهج الجديد -الذي يجمع بين المعلومات الاستقلابية والوراثية لم يحدد مصدر RiPPs الفطرية في الأسبرجيلوس فلافوس فحسب، بل يمكن استخدامه أيضاً للعثور على المزيد من RiPPs الفطرية في المستقبل.

دواء جديد قوي

بعد تنقية أربعة أنواع مختلفة من بروتينات ريبوبروتين RiPPs، وجد الباحثون أن الجزيئات تشترك في بنية فريدة من الحلقات المتشابهة. أطلق الباحثون على هذه الجزيئات، التي لم تُوصف من قبل اسم الأسبيريجيميسين، نسبةً إلى الفطر الذي وُجدت فيه. حتى دون أي تعديل، عند خلط الأسبيريجيميسينات مع خلايا السرطان البشرية، أظهرت إمكانات طبية: اثنان من المتغيرات الأربعة كان لهما تأثيرات قوية ضد خلايا سرطان الدم، في حين أظهر متغير آخر، أضاف إليه الباحثون مادة دهنية، أو جزيئاً دهنيّاً، يوجد أيضاً في غذاء الملكات الذي يغذي النحل، أداءً جيداً مثل السيتارابين والداونوروبيسين، وهما دواءان معتمدان من إدارة الغذاء والدواء الأمريكية ويستخدمان منذ عقود لعلاج سرطان الدم.

كسر شفرة دخول الخلية

لفهم سبب تعزيز الدهون لفعالية الأسبيريجيميسين، قام الباحثون بتنشيط وتعطيل جينات في خلايا سرطان الدم بشكل انتقائي. وقد أثبت أحد الجينات، SLC46A3، أهميته في السماح لأسبيريجيميسين بدخول خلايا سرطان الدم بأعداد كافية.

يساعد هذا الجين المواد على الخروج من الليزوزومات، وهي الأكياس الدقيقة التي تجمع المواد الغريبة التي تدخل الخلايا البشرية. يقول ني: «يعمل هذا الجين كبوابة، فهو لا يساعد الأسبيريجيميسين على دخول الخلايا فحسب، بل قد يُمكن أيضاً «الببتيدات الحلقية» الأخرى من فعل الشيء نفسه، مثل الأسبيريجيميسين، تمتلك هذه المواد الكيميائية خصائص طبية -فقد حصل ما يقرب من عشرين ببتيداً حلقياً على موافقة سريرية منذ عام 2000 لعلاج أمراض متنوعة مثل السرطان- ولكن العديد منها يحتاج إلى تعديل لدخول الخلايا بكميات كافية. ويقول ني: إن معرفة أن الدهون يمكن أن تؤثر على كيفية نقل هذا الجين للمواد الكيميائية إلى الخلايا يمنحنا أداة أخرى لتطوير الأدوية.

تعطيل انقسام الخلايا

من خلال المزيد من التجارب، وجد الباحثون أن الأسبيريجيميسينات تُرجّح أنها تُعطّل عملية انقسام الخلايا. يقول غاو: "تنقسم الخلايا السرطانية بشكل لا يمكن السيطرة عليه. هذه المركبات تمنع تكوين الأنابيب الدقيقة، وهي ضرورية لانقسام الخلايا. ومن الجدير بالذكر أن

المركبات كان لها تأثير ضئيل أو معدوم على خلايا سرطان الثدي أو الكبد أو الرئة -أو مجموعة من البكتيريا والفطريات- مما يشير إلى أن التأثيرات التخريبية للأسبيريغيميسين تقتصر على أنواع معينة من الخلايا، وهي سمة أساسية لأي دواء مستقبلي".

الاتجاهات المستقبلية

إضافة إلى إثبات الإمكانيات الطبية للأسبيريغيميسينات، حدد الباحثون مجموعات مماثلة من الجينات في الفطريات الأخرى، مما يشير إلى أنه لا يزال هناك المزيد من RiPPs الفطرية التي يتعين اكتشافها. يقول ني: "على الرغم من العثور على عدد قليل منها، إلا أن جميعها تقريباً تتميز بنشاط حيوي قوي، إن المنطقة غير المستكشفة تتمتع بإمكانات هائلة".

إن الخطوة التالية هي اختبار الأسبيريغيميسين على نماذج حيوانية، على أمل الانتقال يوماً ما إلى التجارب السريرية على البشر. يقول غاو: "لقد وهبتنا الطبيعة هذه الصيدلية المذهلة، وعلينا أن نكتشف أسرارها، وبصفتنا مهندسين، نحن متحمسون لمواصلة الاستكشاف والتعلم من الطبيعة واستخدام هذه المعرفة لابتكار حلول أفضل".

◀ ترجمة د. ماهر عبودي، قسم تكنولوجيا الإشعاع، هيئة الطاقة الذرية السورية.

From cursed tomb fungus to cancer cure: *Aspergillus flavus* yields potent new drug. ScienceDaily, 23 June 2025.

أشجار التين تحول غاز CO₂ الجوي إلى حجر، هذا ما كشفته الأبحاث



أظهرت دراسة جديدة أن بعض أصناف أشجار التين تخزن كربونات الكالسيوم في جذوعها-بشكل أساسي، محولةً إياها (جزئياً) إلى صخور؛ حيث وجد فريق مكون من علماء كينيين وأمريكيين ونمساويين وسويسريين أن هذه الأشجار قادرة على سحب غاز ثنائي أكسيد الكربون من الغلاف الجوي وتخزينه على شكل صخور كربوناتية كلسية في التربة المحيطة، وقد عُرِضت نتائج هذا البحث في مؤتمر جولد شميت في براغ.

تُعدّ هذه الأشجار- موطنها الأساس في كينيا- من أوائل أشجار الفاكهة التي ثبت امتلاكها لهذه القدرة، المعروفة باسم «مسار كربونات الأكسالات». تستخدم جميع الأشجار عملية

التمثيل الضوئي لتحويل غاز ثنائي أكسيد الكربون إلى الكربون العضوي الذي يُشكل جذوعها وفروعها وجذورها وأوراقها؛ ولهذا السبب يُنظر إلى زراعة الأشجار كوسيلة محتملة لتخفيف انبعاثات غاز ثنائي أكسيد الكربون، كما تستخدم بعض الأشجار أيضاً غاز ثنائي أكسيد الكربون لتشكيل بلورات أكسالات الكالسيوم، وعندما تتحلل أجزاء من الشجرة، تتحوّل هذه البلورات بواسطة بكتيريا أو فطريات متخصصة إلى كربونات كلسية، هي ذات فلز الحجر الكلسي أو الجيري، وهذا يزيد من درجة حموضة التربة المحيطة بالشجرة، كما يزيد من توافر بعض العناصر المغذية.

وعادة، يتصف الكربون اللاعضوي الموجود في الكربونات الكلسية بعمر أطول بكثير في التربة من الكربون العضوي؛ مما يجعله طريقة أكثر فاعلية لعزل غاز ثنائي أكسيد الكربون.

قال الدكتور مايك رولي، وهو محاضر مرموق في جامعة زيورخ: "نحن نعلم منذ فترة عن مسار كربونات الأكسالات، ولكن لم تؤخذ بالحسبان إمكانية هذه القدرة في عزل الكربون عزلاً كاملاً. إذاً كنا نزرع الأشجار لأغراض الزراعة الحراجية؛ نظراً لقدرتها على تخزين غاز ثنائي أكسيد الكربون بوصفه كربوناً عضوياً أثناء عملية إنتاج الغذاء، يُمكننا الآن اختيار أشجار تتوافر فيها ميزة إضافية، كما تفيد في عزل الكربون اللاعضوي على شكل كربونات كلسية".

قام فريق علمي من جامعة زيورخ وجامعة نيروبي التقنية في كينيا وغابة سادان ومخبر لورانس بيركلي الوطني وجامعة كاليفورنيا، ديفيس وجامعة نيوشاتيل، بدراسة ثلاثة أصناف من أشجار التين المزروعة في مقاطعة سامبورو في كينيا؛ حيث قاموا بتحديد المسافة التي تتشكل عندها الكربونات الكلسية من الشجرة، وحددوا المجتمعات الميكروبية المشاركة في العملية، وذلك باستخدام التحليل السنكروتروني (مصدر ضوء الإشعاع السنكروتروني) في ستانفورد، فوجدوا أن الكربونات الكلسية تتشكل على السطح الخارجي لجذوع الأشجار وفي أعماق لب الخشب. وشرح الدكتور رولي قائلاً: "مع تكوّن الكربونات الكلسية، تصبح التربة المحيطة بالشجرة أكثر قلوية، وتتشكل الكربونات الكلسية على سطح الشجرة وداخل قوامها الخشبي، على الأرجح، نتيجةً لتحلل بلوراتها بواسطة الكائنات الدقيقة الموجودة على السطح، واختراقها داخل أعماق الشجرة. وهذا يُظهر أن الكربون اللاعضوي يُخزّن بعمق أكبر داخل الخشب، أكثر مما كنا نعتقد سابقاً". ومن بين الأصناف الثلاثة لأشجار التين التي تمت دراستها، وجد العلماء أن النوع "Ficus wakefieldii" كان الأكثر فاعلية في عزل غاز ثنائي أكسيد الكربون على شكل كربونات كلسية. ويخطط الباحثون الآن لتقييم مدى ملائمة هذه الشجرة للزراعة الحراجية، من خلال تحديد احتياجاتها من المياه وإنتاجية الفاكهة، مع إجراء تحليل أكثر تفصيلاً لكمية غاز ثنائي أكسيد الكربون التي يمكن عزلها في ظل ظروف مختلفة. أُجريت معظم الأبحاث المتعلقة بمسار

أكسالات-الكربونات في بيئات استوائية، وركزت على الأشجار التي لا تنتج غذاءً. كانت شجرة الإيروكو (*Milicia excelsa*)، كشجرة أولى، تُكتشف بأنها ذات مسار نشط للأكسالات-الكربونية. تستطيع هذه الشجرة طوال حياتها حجز طن من الكربونات الكلسية في التربة. وتعد أكسالات الكالسيوم من أكثر الفلزات الحيوية ذات الوفرة، حيث تُنتج بلوراتها العديد من النباتات. كما تنتشر الكائنات الدقيقة التي تُحوّل أكسالات الكالسيوم إلى كربونات كلسية، على نطاق واسع. وأوضح الدكتور رولي قائلاً: "من السهل التعرف على الكربونات الكلسية في البيئات الأكثر جفافاً". ومع ذلك، حتى في البيئات الأكثر رطوبة، لا يزال عزل الكربون ممكناً. حتى الآن، تم تحديد أصناف عديدة من الأشجار التي يمكنها تشكيل الكربونات الكلسية، لكننا نعتقد أن هناك أصنافاً أخرى كثيرة. وهذا يعني أن مسار الأكسالات-الكربونية قد يُمثل فرصة مهمة لم تُستكشف بعد للمساعدة في تخفيف انبعاثات غاز ثنائي أكسيد الكربون عند زراعة الأشجار في الغابات.

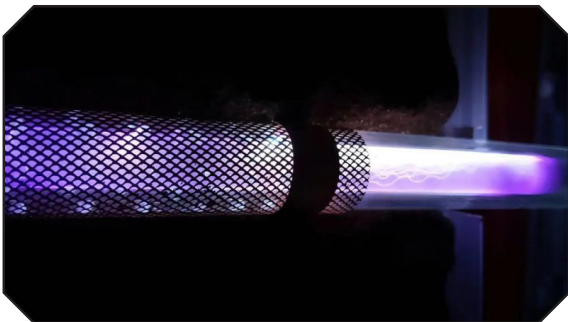
◀ ترجمة د. زهير قطان، قسم الجيولوجيا، هيئة الطاقة الذرية السورية.

<https://phys.org/news/2025-07-fig-trees-atmospheric-stone-reveals.html>

طريقة جديدة ومذهلة لإنتاج الأمونيا دون الحاجة إلى الوقود الأحفوري

طريقة جديدة قد تُحدث نقلة نوعية في قطاعي الهدروجين والزراعة

اكتشف علماء أستراليون طريقةً لإنتاج الأمونيا، وهي مُكوّن أساسي في الأسمدة، باستخدام الهواء والكهرباء فقط، وذلك بمحاكاة البرق وتوجيه تلك الطاقة عبر جهاز صغير، تجاوزوا بذلك الطريقة التقليدية المعتمدة على الوقود الأحفوري والتي استُخدمت لأكثر من قرن. قد يؤدي هذا الاكتشاف إلى إنتاج أسمدة أنظف وأرخص، بل يُساهم في توفير الطاقة للمستقبل مُوفراً مصدراً بديلاً مُحتملاً للوقود لقطاعات مثل الشحن.



عمود البلازما المُستخدم لبدء عملية إنتاج "الأمونيا الخضراء"

استغل باحثو جامعة سيدني الصواعق الصناعية لتطوير طريقة أكثر كفاءة لإنتاج الأمونيا، وهي إحدى أهم المواد الكيميائية في العالم. وتُعد الأمونيا أيضاً المكون الرئيسي للأسمدة التي تُشكل ما يقرب من نصف الإنتاج العالمي من الغذاء. وقد نجح الفريق في تطوير طريقة أبسط لإنتاج الأمونيا NH_3 في صورة غاز. وكانت جهود سابقة لمختبرات أخرى قد أنتجت الأمونيا في محلول الأمونيوم NH_4^+ ، وهو ما يتطلب طاقة وعمليات أكبر لتحويله إلى المنتج الغازي النهائي.

تُسبب الطريقة الحالية المتبعة لإنتاج الأمونيا (عملية هابر-بوش) تكاليف باهظة مضرّة بالمناخ؛ إذ تُخلف بصمة كربونية هائلة، كما يجب أن تُنفذ على نطاق واسع وبالقرب من مصادر الغاز الطبيعي الرخيص لجعلها فعّالة من حيث التكلفة.

العملية الكيميائية التي أطمعت العالم، وفريق سيدني الذي يتطلع إلى إحداث ثورة فيها

كان الطلب على الأمونيا الطبيعية (معظمها على شكل فضلات الطيور) كبيراً لدرجة أنه كان سبباً في إشعال فتيل الحروب. أتاح اختراع عملية هابر-بوش في القرن التاسع عشر إنتاج الأمونيا من صنع الإنسان، وأحدث ثورة في الزراعة والصناعة الحديثة؛ إذ يعتمد حالياً 90% من إنتاج الأمونيا العالمي على عملية هابر-بوش.

يعد إقبال الصناعة على الأمونيا في تزايد مستمر. يسعى المجتمع العلمي العالمي خلال العقد الماضي إلى اكتشاف طريقة أكثر استدامة لإنتاج الأمونيا لا تعتمد على الوقود الأحفوري.

يقول البروفيسور بي جيه كولن، الباحث الرئيسي من كلية الهندسة الكيميائية والبيولوجية الجزيئية بجامعة سيدني ومعهد Net Zero: "يتطلب إنتاج الأمونيا حالياً إنتاجاً مركزياً ونقلًا لمسافات طويلة، نحن بحاجة إلى "أمونيا خضراء" منخفضة التكلفة، لامركزية، وقابلة للتطوير". وقد عمل فريقه على إنتاج "الأمونيا الخضراء" لمدة ست سنوات. وأضاف كولن: "في هذا البحث، نجحنا في تطوير طريقة تسمح بتحويل الهواء إلى أمونيا في حالته الغازية باستخدام الكهرباء. إنها خطوة هائلة نحو أهدافنا". وقد نُشر البحث في مجلة Angewandte Chemie الدولية.

تحتوي الأمونيا على ثلاثة جزيئات هيدروجين، مما يعني إمكانية استخدامها ناقلاً ومصدراً فعالاً للهيدروجين ومصدراً للطاقة، بل ربما وسيلة فعالة لتخزين الهيدروجين ونقله. وقد وجدت هيئات الصناعة إمكانية الحصول على الهيدروجين عن طريق "تكسير" الأمونيا لفصل الجزيئات لاستخدامه. كما تُعد الأمونيا مرشحاً قوياً للاستخدام كوقود خالٍ من الكربون نظراً لتركيبها الكيميائي. وقد جذب هذا اهتمام قطاع الشحن المسؤول عن حوالي 3% من إجمالي انبعاثات غازات الاحتباس الحراري العالمية.

حل لغز كيميائي

تعتمد طريقة فريق البروفيسور كولن الجديدة لتوليد الأمونيا على تسخير قوة البلازما، وذلك بكهربة الهواء أو إثارته. لكن "النجم star" عبارة عن محلل كهربائي غشائي، يتكون من صندوق فضي بسيط المظهر، حيث يحدث التحول إلى غاز الأمونيا.

يُنتج الأمونيا NH_3 خلال عملية هابر-بوش عن طريق دمج غازي النتروجين N_2 والهيدروجين H_2 تحت درجات حرارة وضغط مرتفعين، وبوجود محفز (مادة تُسرّع التفاعل الكيميائي). تستخدم الطريقة القائمة على البلازما التي طورها فريق البروفيسور كولن الكهرباء لإثارة جزيئات النتروجين والأكسجين في الهواء، ثم يُمرر الفريق هذه الجزيئات المثارة إلى جهاز التحليل الكهربائي الغشائي لتحويلها إلى أمونيا. أكد الباحثون أن هذه الطريقة تمثل مساراً أسهل لإنتاج الأمونيا.

قال البروفيسور كولن: «إن النتائج تُشير إلى مرحلة جديدة في إنتاج الأمونيا الخضراء، ويعمل الفريق حالياً على جعل هذه الطريقة أكثر كفاءة في استخدام الطاقة وأكثر تنافسية مقارنةً بعملية هابر-بوش. هذا النهج الجديد عبارة عن عملية من خطوتين، تجمع بين البلازما والتحليل الكهربائي، وقد نجحنا بالفعل في جعل مكون البلازما قابلاً للتطبيق من حيث كفاءة الطاقة والقابلية للتوسع». وأضاف البروفيسور كولن: «لإيجاد حل أكثر شمولاً لإنتاج الأمونيا المستدامة، نحتاج إلى تعزيز كفاءة استخدام الطاقة لمكون المحلل الكهربائي».

◀ ترجمة د. عبد الوهاب علاف، قسم الكيمياء، هيئة الطاقة الذرية السورية.

A shocking new way to make ammonia, no fossil fuels needed. ScienceDaily, 5 July 2025.



No. 164
Print ISSN 1607-985X

Atomic Energy Commission of Syria

