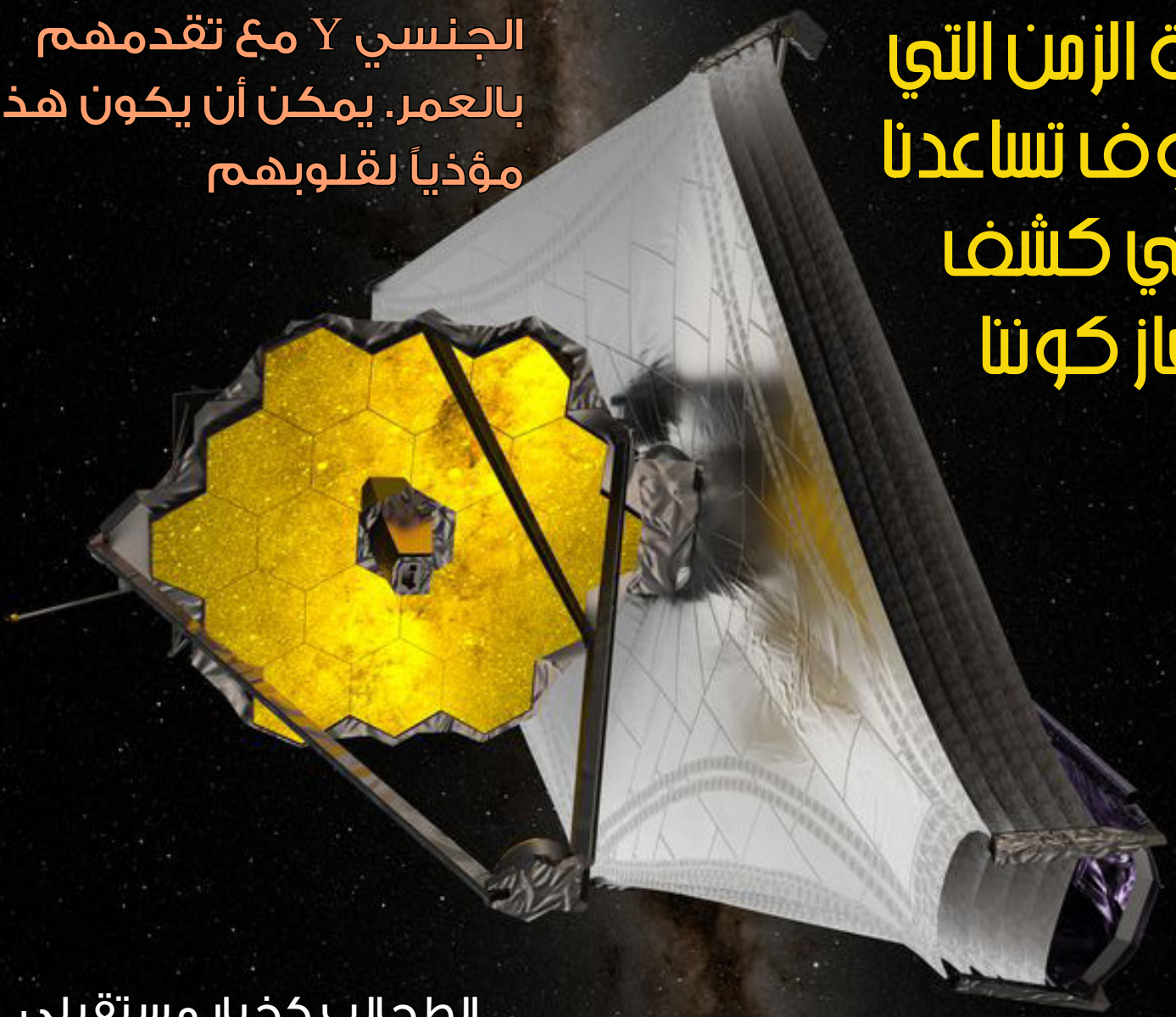
158

مجلة هيئة الطاقة الذريّة السورية
2022

# عالم الذرّة

## تلكسوب جيمس ويب: آلة الزمن التي سوف تساعدنا في كشف ألغاز كوننا



فقدان الرجال للصبغي الجنسي Y مع تقدمهم بالعمر. يمكن أن يكون هذا مؤذياً لقلوبهم

الطحالب كخيار مستقبلي واعد لتوليد الهدروجين الحيوي

الوعي عند النبات

إزالة التلوث الإشعاعي من المنشآت النفطية

www.saec.sy/aznis/Slider.aspx

# عـالـم الـذرّة

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

**المديـر المسـؤول**

**أ. د. إبراهيم عثمان**

*المدير العام لهيئة الطاقة الذرّية السورية*

**رئيس هيئـة التحرير**

**أ. د. ناديا حيدر**

**أعضاء هيئـة التحرير**

أ. د. فواز كرد علي
أ. د. محفوظ البشير
أ. د. عادل باكير
أ. د. عبد الحميد الريس
أ. د. جمال أصفهاني
أ. د. محمد طلاس
أ. د. محمد بهاء الصوص
أ. د. محمد سوقية
أ. د. إياد غانم
أ. د. عبد الغفار اللافي
أ. د. سامي حداد

**التدقيق اللغوي**

ريما سنديان

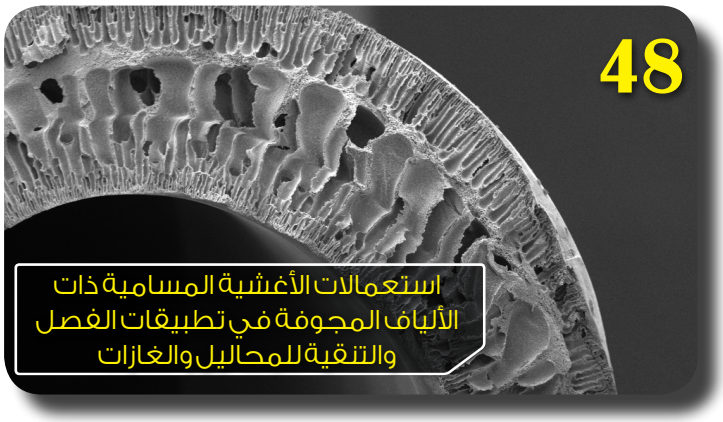
**التنضيد والأرشفة**

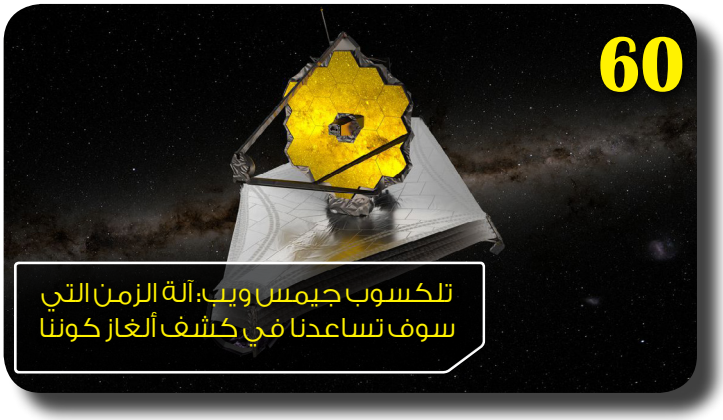
غفران ناوروز – هنادي كنفاني

**الإخـراج الفنـي**

بشار مسعود

# المحتويات



48
استعمالات الأغشية المسامية ذات الألياف المجوفة في تطبيقات الفصل والتنقية للمحاليل والغازات


60
تلكسوب جيمس ويب: آلة الزمن التي سوف تساعدنا في كشف ألغاز كوننا

## أخبار علمية 73

73 تطوير منصة نباتية لإنتاج لقاح بشري واعد في مواجهة فيروس كورونا

74 حاجة العلم لتقليص بصمته الكربونية
انبعاث غازات الاحتباس الحراري من البحوث العلمية يضر بالمناخ

76 نحو تصنيع خلايا شمسية شبه شفافة بحجم النوافذ

78 فقدان الرجال للصبغي الجنسي Y مع تقدمهم بالعمر. يمكن أن يكون هذا مؤذياً لقلوبهم

## مقـــالات

إزالة التلوث الإشعاعي من المنشآت النفطية 8

الطحالب كخيار مستقبلي واعد لتوليد الهدروجين الحيوي 27

الوعي عند النبات 35

الأرقام المعنوية وتقدير الأخطاء في العمليات الحسابية 41

# قواعد النشر في مجلة عالم الذرّة

## شروط النشر

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

## شروط الإعداد

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

الأوراق العلمية:

- Lodhi MA, Ye GN, Weeden NF et al. (1994). A simple and efficient method for DNA extraction from grapevine cultivars and Vitis species. Plant Molecular Biology Reporter 12(1): 6-13.

الكتب:

- Al-Khayri JM, Jain SM, Johnson DV (2015). Date Palm Genetic Resources and Utilization, vol 2. Asia and Europe. Dordrecht: Springer.

فصول في كتب:

- Haider N (2011). Identification of plant species using traditional and molecular-based methods, pp. 1-62. In: Wild Plants: Identification, Uses and Conservation (ed. Davis RE). Nova Science Publishers, Inc., New York, USA.

أطروحات:

- Haider N (2003). Development and Use of Universal Primers in Plants. PhD thesis. The University of Reading, Reading, UK.

مراجع الانترنت:

- Beauchamp FJC (2016). The history and origin of coffee. Available at: www.fjcollao.com/documents/HistoryOfCoffee.pdf (accessed 25 June 2019).

- تراعى في كتابة النص على الحاسوب إرشادات التنضيد حول علامات الترقيم والحالات الأخرى الواردة في المجلة والموجودة على موقع مجلة عالم الذرة.
- يذكر مرة واحدة في المقال، المقابل الأجنبي للمصطلح العربي.
- تستخدم وحدات قياس الجملة الدولية (SI) في القياس.

- عدم تأطير الأشكال والخطوط البيانية بأي إطار.
- كتابة الرموز الأجنبية على شكل نص أو إدراج الرموز المعقدة والمعادلات على شكل صورة. وعدم استعمال محرر المعادلات.
- استخراج وتصدير المنحنيات البيانية على شكل صور بدقة عالية (أكبر من 300dpi).
- إرفاق الصور والأشكال البيانية المدرجة في النص بصيغة صورة بدقة عالية (أكبر من 300dpi). كملفات منفصلة إضافة لوجودها في سياق النص.
- اختيار الورق بقياس 21×29.7 سم (A4). واختيار نوع الخط Simplified Arabic وحجم 14 للنص العربي. وخط نوع Times New Roman وحجم 12 للنص الأجنبي. واختيار فراغ مضاعف بين السطور.
- يجب ألا يتجاوز عدد صفحات المقال 20 صفحة.

## شروط الإيداع والتحكيم

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

# إرشادات منشودة إلى المشاركين في المجلة

## حول علامات الترقيم وبعض الحالات الأخرى عند كتابة النصوص باستخدام الحاسوب

بقلم المرحوم أ. د. زياد القطب

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

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

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

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

### البند الأول

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

– مثال: أين ذهبت المادة المضادة بكاملها؟

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

– مثال: كيف كان الكون بعد الانفجار العظيم!

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

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

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

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

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

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

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

- مثال: - المقدمة.

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

- مثال: مركبات عضوية–معدنية.

وكذلك توضع بين رقمين.

- مثال: انظر المراجع 154-161.

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

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

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

- مثال: نيسان/أبريل.

## البند الثاني (حالات أخرى):

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

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

الكلمات الأجنبية في النص العربي: داخل النص العربي لا تبدأ الكلمات الأجنبية بحرف كبير إلا إذا كانت اسم علم أو بلد (مثال: 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 إلاّ إذا كانت الكلمة اسم علم أو بلد عندها نكتب الحرف الأول من الكلمة كبيراً (مثال: Alfred.)

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

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

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

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

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

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

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

# إزالة التلوث الإشعاعي من المنشآت النفطية

توجد المواد المشعة الطبيعية naturally occurring radioactive materials (NORM) في أحواض النفط والغاز في باطن الأرض بتراكيز متباينة، وهي تنحل في سوائل الإنتاج خلال عمليات استخراج النفط، وتنتقل بذلك مرافقة السوائل الخارجة من الحوض ومترسبة على معدات الإنتاج وعلى السطوح التي تمر بها، فتتركز هذه المواد المشعة الطبيعية على الجدران الداخلية للأنابيب ومستودعات فصل النفط على هيئة رواسب حرشفية scales ووحل sludge. يؤدي وجود هذه الترسبات إلى تعرض العاملين على الاستخراج لخطر المواد المشعة الطبيعية، خاصة عندما يكون إنتاج المياه المرافقة produced water والحاملة للمواد المشعة الطبيعية كبيراً؛ ولهذا من الضروري تنظيف وإعادة تأهيل المعدات الملوثة والتخلص من النفايات الناتجة عن عمليات التنظيف بشكل آمن رغم ضآلة أخطارها مقارنةً بالنفايات المشعة الأخرى، وتقوم شركات النفط بجمع المياه المرافقة في بحيرات أو حفر غير مبطنة وتركها في العراء لتجف، فيؤدي ذلك إلى تلوث مساحات كبيرة من الأراضي والمناطق المحيطة بها وهذا ما يعرض العاملين في الصناعة النفطية وعموم الناس في الجوار إلى خطر التلوث الإشعاعي، كما يرافق عمليات التخلص من الوحل النفطي الناجم عن عمليات الإنتاج في البيئة المجاورة أيضاً تلوث بالمواد المشعة الطبيعية إضافة إلى التلوث بالمواد النفطية؛ حيث تجمع نفايات الوحل والرواسب الحرشفية الناتجة عن عمليات تنظيف المعدات في براميل أو حفر مبطنة وغير مبطنة يجري تخزينها في العراء فتكون عرضة للتحلل مما يؤدي إلى تلوث التربة، وقد أدّى وجود مثل هذه الملوثات إلى معالجة التلوث وإزالته وإعادة تأهيل المناطق الملوثة لمنع تعرض العاملين وعموم الناس، وهنا لا بد من اتخاذ الإجراءات الوقائية وتنفيذ المعالجة ضمن برامج محددة ومعتمدة لإزالة التلوث يشارك أو يشرف على تنفيذها عدد من المختصين في مجال الوقاية من الإشعاع وعدد من المصممين المهندسين ومن إدارة النفايات المشعة. نعرض في هذه الورقة آليات تركز المواد المشعة الطبيعية في المنشآت النفطية وأماكن وجودها وطرائق إزالة التلوث عن المعدات النفطية الملوثة إشعاعياً إضافة إلى عرض مفصل لبرامج معالجة الأراضي الملوثة في حقول النفط.

الكلمات المفتاحية: تلوث إشعاعي، حقول النفط، معدات ملوثة، مواد مشعة طبيعية، إعادة تأهيل.

## مقدمة

يعبّر الرمز NORM المستعمل في صناعة النفط والغاز عن المواد المشعة الطبيعية المنشأ، حيث ظهرت أولى التقارير حول المواد المشعة الطبيعية المنشأ والمرافقة لإنتاج النفط والغاز في بداية القرن العشرين، وذلك بعد سنوات قليلة من اكتشاف النشاط الإشعاعي على يد العالم هنري بكرل عام 1896، حيث اكتشف السوفييت وجود غاز الرادون الذي سموه في ذلك الوقت «بثق الراديوم» في النفط والغاز الطبيعي المستخرج في أراضي الاتحاد السوفيتي سابقاً، ومن ثم ظهرت تقارير كثيرة حول مرافقة غاز الرادون للغاز الطبيعي في كل من آبار أوربا وكندا وأمريكا، وبعد قرابة عشر سنوات أخرى نشر أول تقرير حول المواد المشعة الطبيعية في المياه المرافقة للنفط وذلك في الاتحاد السوفيتي السابق أيضاً في عام 1933، ولقد أثار هذا الاكتشاف اهتماماً كبيراً لدى المختصين في الاتحاد السوفيتي سابقاً اعتقاداً منهم أنه يمكن الاستفادة من هذه الظاهرة في إنتاج الراديوم الذي كانت له استعمالات واسعة وخاصة في التطبيقات الطبية. قام بعد ذلك عدد من الباحثين بدراسة النشاط الإشعاعي للصخور الرسوبية المرافقة للنفط وظهرت أول نشرة مرجعية حول توزع ومنشأ المواد المشعة الطبيعية في النفط وفي صخور الأحواض وفي المياه المالحة في العام 1952، وتألق اهتمام الدول الغربية بموضوع المواد المشعة الطبيعية وخاصة في الولايات المتحدة الأمريكية، وقد حث اكتشاف غاز الرادون في الغاز الطبيعي من حقل بان هاندل للغاز الطبيعي في ولاية تكساس عام 1949 المعنيين على إجراء مسح إشعاعي شامل للمواد المشعة الطبيعية المرافقة للهيدروكربونات والمياه الطبقية في آبار الغاز المنتشرة على أراضي الولايات المتحدة الأمريكية. وفي الوقت ذاته، لوحظت أول مرة عام 1951 الرواسب الحرشفية الحاوية مواد مشعة طبيعية متوضّعة داخل وخارج قمصان الآبار وأنابيبها، ولوحظت الظاهرة ذاتها في بئرين يقعان في حقل بان هاندل للغاز واكتشفت الرواسب الحرشفية والكدارة الغنيتان بالراديوم في المنشآت السطحية للحقل ذاته. وننوه هنا بأن البحوث المتعلقة بتشكل الرواسب الحرشفية في حقول الاتحاد السوفيتي السابق قد استمرت في الستينيات والسبعينيات في حين تناقص الاهتمام بهذا الموضوع في البلدان الغربية. وفي بداية السبعينيات عاد اهتمام الغرب مرة أخرى بالمواد المشعة الطبيعية في الصناعة النفطية عندما لوحظ أن غاز الرادون يتركز في سوائل الغاز الطبيعي الخفيفة مثل الإيتان والبروبان خلال عمليات المعالجة، وتبع هذا الاكتشاف إجراء مسوحات واسعة لتراكيز غاز الرادون في الغاز الطبيعي ولكن من وجهة نظر وقائية إشعاعية فقط. وعلى الرغم من إبراز ظاهرة وجود غاز الرادون ووليداته في منشآت إنتاج الغاز والكدارة والرواسب الحرشفية الحاوية وليدات غاز الرادون $^{210}Pb$، $^{210}Po$ لم تظهر هناك مشكلة حقيقية، رغم وجود بعض الدراسات البيئية التي جرت حول الراديوم في المياه الطبقية والمرافقة للنفط لبقاء الموضوع غير معلن من قبل شركات النفط، وبرزت مشكلة وجود المواد المشعة الطبيعية في صناعة النفط باكتشاف الرواسب الحرشفية المحتوية على الراديوم-226 في منشآت إنتاج النفط في بحر الشمال في العام 1981. أما الإعلان الأول عن وجود الرواسب الحرشفية المحتوية على الراديوم-226 في منشآت إنتاج النفط الأمريكي فكان في العام 1986 وهو التاريخ الذي نشطت فيه البحوث الجارية عالمياً، وعنيت بكافة الجوانب المتعلقة بالمواد المشعة الطبيعية بما فيها المنشأ وتقانات القياس والدراسات البيئية وإجراءات العمل الآمنة وطرائق التخلص من النفايات المشعة وطرائق إزالة التلوث وإعادة تأهيل البيئات الملوثة، وجرى التأكيد في هذه الدراسات في الدرجة الأولى على المواد المشعة الطبيعية المحتوية على الراديوم-226 والراديوم-228 والتي يسهل كشفها وقياسها، ولم يذكر وجود الرواسب الحرشفية والكدارة المحتوية على الرصاص-210 والبولونيوم-210 في منشآت الغاز الطبيعي إلا قليلاً، وقد بدأت دراسة آليات وجودها مؤخراً في منتصف التسعينيات. ولا بد من الإشارة هنا بأنه جرى اكتشاف وجود المواد المشعة الطبيعية في حقول النفط والغاز السورية في العام 1987 من قبل قسم الوقاية والأمان في هيئة الطاقة الذرية السورية وقد بدئ بتقييم المشكلة في كامل الحقول في العام 1994.

## آليات تركّز المواد المشعة الطبيعية أثناء عمليات استخراج النفط والغاز

توجد النكليدات المشعة في كل من سلسلتي اليورانيوم-238 والثوريوم-232 الطبيعيين في توازن إشعاعي أبدي في رسوبيات أحواض النفط، ويحدث خلل في هذا التوازن فقط عندما ينقل نكليد مشع معين من داخل حبيبات الرسوبيات إلى المحاليل المحيطة، وقد درست آليات انتقال النكليدات المشعة الطبيعية من كل من سلسلتي اليورانيوم-238 والثوريوم-232 على نطاق واسع في عدد كبير من التشكيلات الجيولوجية والأحواض النفطية، ويمكن تلخيص عملية انتقال النكليدات المشعة كنظائر الراديوم من مكان توضعها في الرسوبيات إلى المحاليل المحيطة بأربع آليات رئيسة، وهي انتشار النكليد في الطور الصلب وانحلاله جزئياً أو غسله كلياً أو جزئياً من الطبقات السطحية للرسوبيات والارتداد الميكانيكي المباشر جراء إطلاق جسيمات ألفا، وتعد آلية الانتشار في الطور الصلب أقل الآليات أهمية من بين هذه الآليات وخاصة للمواد المشعة الطبيعية قصيرة عمر النصف في كل من سلسلتي الراديوم-226 والراديوم-228؛ ويعود ذلك إلى انخفاض

معاملات الانتشار لهذه النكليدات في حبيبات الرسوبيات، ولذلك لا يمكن أن تفسر عمليات الانحلال المباشرة للمواد المشعة الطبيعية (من الرسوبيات إلى السوائل المحيطة) وجود التراكيز المرتفعة منها، ولكن يمكن أن تكون عمليات غسل المواد المشعة الطبيعية من الشبكة البلورية لمكونات رسوبيات الحوض أكثر أهمية لأن الحجوم الذرية لوليداتها التي تتشكل نتيجة التفكك الإشعاعي لن تكون ملائمة لتبقى في مواقع الشبكة البلورية لاختلاف الصفات الكيميائية والفيزيائية مع النكليد الأم، وأخيراً تعد آلية ارتداد الجسيمات ألفا الآلية الثانية من حيث الأهمية لانتقال المواد المشعة من الرسوبيات إلى السوائل المحيطة؛ إذ يؤدي إصدار جسيمة ألفا عالية الطاقة من تفكك النكليد المشع، اليورانيوم-234، ومن ثم الثوريوم-230 إلى إكساب الراديوم-226 طاقة ارتداد كبيرة تفوق طاقة الروابط الكيميائية، فتنتقل الذرة المرتدة التي تكون متوضعة بالقرب من سطح الفلز إلى المحاليل المحيطة أو إلى حبيبات الفلز القريبة منها مسببةً ضرراً يساعد على عملية الغسل لاحقاً، كما نشير هنا أنه، عملياً، لا يمكن التمييز بين آليتي انتقال المواد المشعة المذكورتين آنفاً؛ آلية الغسل وآلية ارتداد الجسيمات ألفا لحدوثهما في آن معاً. على أية حال، تعد آلية ارتداد الجسيمات ألفا في الأحواض الهيدروكربونية أكثر أهمية من الغسل، ويعود ذلك إلى التخريب الكبير الذي تسببه عملية الارتداد في سطح الفلزات الرسوبية، مما يساعد آلية الغسل بأن تكون أكثر فعالية، وقد تؤدي الآليات المذكورة آنفاً إلى زيادة تركيز الراديوم-226 على تراكيز والده اليورانيوم-238 في المياه المالحة، وهي تفسر أيضاً ارتفاع نسبة الفعاليتين $^{234}U/^{238}U$ في المياه المالحة، ويعود ذلك إلى ارتداد ذرات الثوريوم-234 في حبيبات الرسوبيات باتجاه المياه المسامية pore waters، ومن ثم يتفكك الثوريوم-234 إلى اليورانيوم-234 على حبيبات الرسوبيات والذي ينحل بدوره وينتقل إلى الطور المائي المحيط، وتحدث الآلية ذاتها لدى تفكك الثوريوم-228 وتشكل وانحلال الراديوم-228 والراديوم-224 من حبيبات رسوبيات الحوض. نستنتج مما سبق أن انتقال المواد المشعة الطبيعية من الرسوبيات يحدث بشكل رئيسي من خلال آليتين هما آلية الغسل وآلية ارتداد الجسيمات ألفا alpha recoil المباشر.

يكون الراديوم شديد الانحلال في المياه المالحة للأحواض الهيدروكربونية ذات الشروط الإرجاعية، وتفسر التراكيز المرتفعة للراديوم في المياه المالحة جزئياً بتشكله معقدات كلورية تمثل قرابة 60% من الراديوم المنحل. وتُظهر العلاقة بين الملوحة وتراكيز الراديوم في عدد من الأحواض الهيدروكربونية ازدياد فعالية غسل الراديوم بارتفاع درجة ملوحة المياه وازدياد استبدال ذرات الراديوم من الفلزات الطمية بالكاتيونات الأخرى (الكالسيوم والسترونسيوم والباريوم)، ونظراً لارتفاع انحلالية الراديوم في المياه المالحة، فإن معظم الراديوم يكون غير مدعم unsupported بتفكك اليورانيوم-238، وتصل النسبة $^{238}U/^{226}Ra$ في المياه المالحة إلى قرابة مئة ألف مرة إضافة إلى ارتفاع النسبة $^{232}Th/^{228}Ra$ ولكن بأقل درجة، ويعود هذا إلى أن فعالية انحلال الراديوم-228 أقل من فعالية انحلال الراديوم-226 لأن انحلال هذا الأخير مدعوم بعمليتي ارتداد في سلسلة اليورانيوم-238 في حين الراديوم-228 مدعوم بعملية ارتداد وحيدة ضمن سلسلة الثوريوم-232.

إن غاز الرادون شديد الانحلال في الهيدروكربونات والمياه المالحة في حوض النفط، ولهذا يوجد غاز الرادون في النفط الخام على شكل غير مدعم نتيجة تفكك الراديوم-226، أما في المياه المالحة فقد دلت القياسات أن غاز الرادون يكون على توازن أبدي مع والده الراديوم-226 أو بتراكيز أعلى تصل إلى 5 مرات بسبب ارتفاع تركيز الراديوم-226 في الرسوبيات وإعادة التصاق ذرات الراديوم-226 من المياه المالحة على رسوبيات الحوض وإطلاقها غاز الرادون الداعم للرادون المنحل والمتوازن في المياه المالحة. على أية حال، ينجم غاز الرادون الموجود في المياه المالحة إما بطريق تفكك الراديوم-226 الموجود في المياه المالحة أو بطريق ارتداده إلى السائل عند إصدار الجسيمات ألفا من الراديوم-226 الموجود في رسوبيات الحوض، ونظراً لقصر عمر النصف لغاز الرادون (3.8 أيام) فإنه لا تلاحظ إلا كميات قليلة منه في سوائل الهيدروكربونات، ومن الناحية العملية يأتي معظم الرادون الموجود في الهيدروكربونات أو المياه المالحة من الرسوبيات الثابتة أو المعلقة أو من مياه الحوض المالحة وهو يتشكل أيضاً من الرواسب الحرشفية المحتوية على الراديوم-226 والتي تترسب خلال عمليات الاستخراج على السطح الداخلي للأنابيب والمعدات الأخرى.

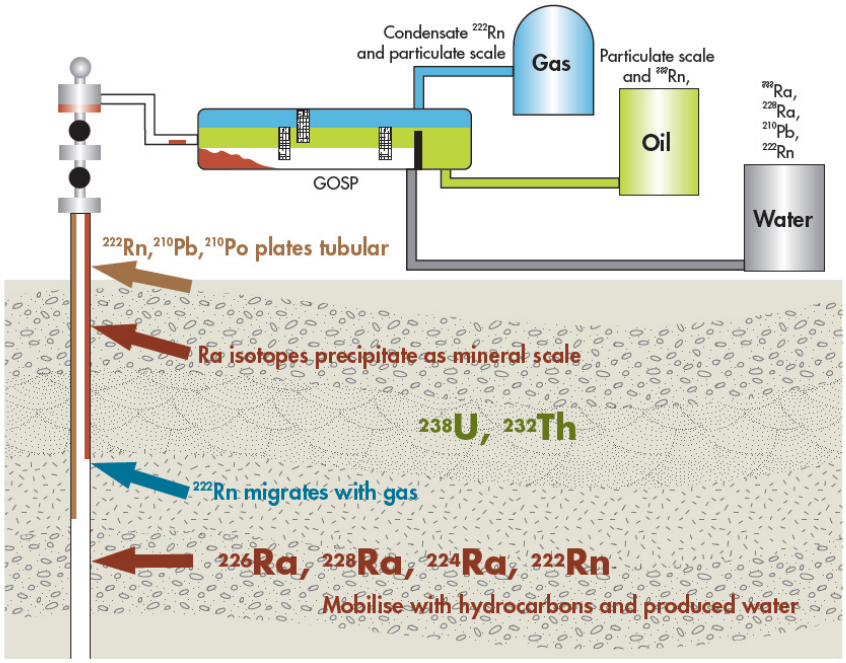
أما غاز الثورون (عمر نصفه 55 ثانية) فيبقى في توازن أبدي مع والده الراديوم-224 أو أنه يزيد قليلاً، ونظراً لقصر عمر نصف الثورون وصغر معدل وصول الغاز الطبيعي إلى سطح الملء والهيدروكربونات وهو نحو عدة دقائق، فإنه يندر أن تصل كميات محسوسة من غاز الثورون إلى المحيط الخارجي وأن تلاحظ في المنشآت المحيطة، ولهذا يعد هذا الغاز قليل الأهمية.

يعد الرصاص-210، وبأهمية أقل البولونيوم-210، جزءاً من مكونات المياه المالحة المرافقة للهيدركربونات، ونظراً لتشكيله معقدات كلورية أو عضوية مع الحموض العضوية الموجودة في الحوض الهيدروكربوناتي، فإن الرصاص يكون شديد الانحلال في المياه المالحة المرافقة للنفط والغاز، ونضيف هنا أن المواد المشعة الطبيعية التي تقع بين الرادون والرصاص-210 في سلسلة اليورانيوم-238 ذات

أعمار أنصاف قصيرة جداً، فلذلك هي تغذي باستمرار تراكيز الرصاص-210 في المياه المالحة وتجعل ادمصاص الرصاص على حبيبات الرسوبيات قليل الأهمية، وتكون تراكيز الرصاص-210 مماثلة لتراكيز غاز الرادون في سوائل الحوض الهيدروكربوناتية. وفي كل الأحوال، توجد على العكس بعض المؤشرات التي تدل على ارتفاع تراكيز الرصاص-210؛ الأمر الذي يؤدي إلى اختلال التوازن الأبدي بين الرادون والرصاص-210 في المياه المالحة للحوض، أما فيما يخص البولونيوم-210، النكليد الابن للرصاص-210، فلم يذكر وجوده في المياه المالحة، على الرغم من وجود معلومات حول انحلاليته في الماء ولا يمكن التنبؤ بوجوده في المياه المالحة لعدم معرفة تصرفاته الجيوكيميائية تحت شروط الأحواض النفطية.

## تراكم المواد المشعة الطبيعية في معدات خطوط إنتاج ومعالجة النفط والغاز (تلوث المعدات إشعاعياً)

تنتقل السوائل من الأحواض النفطية إلى معدات الإنتاج على السطح، وخلال عمليات المعالجة المختلفة وعملية الانتقال تتغير الخواص الفيزيائية (الضغط والحرارة، ...) والكيميائية لسوائل الإنتاج؛ مما يؤدي إلى انخفاض في انحلالية الراديوم والعناصر الأخرى المشابهة كيميائياً كالكالسيوم والسترونسيوم والباريوم، فتترسب لتكوِّن رواسب حرشفية أو وحلاً. تتشارك العناصر المشعة مع العناصر غير المشعة الموجودة في المياه المرافقة في تكوين هذه الرواسب في الأنابيب مثل ترسب الراديوم مع كبريتات الباريوم أو الترسب مع الكُدارة، وتبقى عادة كميات ضئيلة من العناصر المشعة مع النفط والمياه المرافقة، كما تبقى الكدارة والرواسب الحرشفية ضمن تجهيزات استخراج النفط والغاز مثل خطوط النقل وخزانات الفصل وخزانات المعالجة الحرارية والمياه المالحة، وتترسب أيضاً المواد المشعة الطبيعية في الفتحة السفلية لأنبوب النفط داخل البئر كما هو الحال في التجهيزات المركبة على سطح الأرض وفي التجهيزات المتممة والخزانات ومناطق رشح المياه المالحة، وكذلك على قميص البئر casing أو الأنابيب وفي أنبوب التنظيف والمعدات الأخرى المرافقة للتشغيل (الشكل 1). وقد تظهر الرواسب أيضاً في منشأة الإنتاج كمعدات تكرير المياه المرافقة ومعالجتها. كما تتعلق كمية الرواسب المتراكمة بعدة عوامل، منها معدل الضخ وزمن وصول الماء المرافق أو المنتج من الحوض إلى السطح breakthrough time وبنية الحوض الجيولوجية وطبيعة مياه الحقن.




**الشكل 1.** وجود المواد المشعة الطبيعية وحركتها في الأحواض النفطية.

درس ظاهرة تكوُّن الرواسب كثير من الباحثين؛ لما تسببه من خفض في فعالية عمل المعدات نتيجة تراكم والتصاق الرواسب بها، وهذا ما يدعو إلى تنظيفها بين الفينة والأخرى، وهو ليس بالأمر السهل، ولقد استعملت طرائق كيميائية وفيزيائية عديدة للحيلولة دون تكوّن هذه الرواسب. ولقد دلت الدراسات أن سبب تكوّن الرواسب الحرشفية يعود إلى الاختلاف في درجة الحرارة أو الضغط بين حوض التشكل والسطح خلال عمليات استخراج النفط. ويساعد عملية تكوّن الرواسب الحرشفية في المعدات السطحية عدةُ عوامل هي:

**1.** يجب أن يزيد تركيز الأيونات المعدنية في الماء على حد انحلالها.

**2.** يجب توافر جسيمات صغيرة أو سطوح خشنة لتكون مواقع لبدء تكوّن البلورة، وتنشأ هذه المواقع إما من التبلور المستمر للعناصر المترسبة أو من وجود تأكُّل أو تتدرج داخل التجهيزات التي تترسب على سطوحها الرواسب.

**3.** يجب أن تُمتص الأيونات المعدنية كالكالسيوم والباريوم والسترونسيوم في سطوح هذه المواقع وتكون مساهمة في تركيب البلورات.

**4.** يمكن أن يتطور توضع الرواسب الحرشفية إذا سمحت الشروط الهندسية بالتصاق البلورات على سطوح تجهيزات الإنتاج، وتعد العوامل المذكورة آنفاً أساساً يعتمد عليه في الحد من تكوّن الرواسب أو تخفيض تكوّنها.

كما يمكن التمييز بين أربعة أنماط للرواسب الحرشفية وهي:

**1.** رواسب حرشفية قاسية وتشاهد في الأنابيب القريبة من رؤوس الآبار وخطوط الإنتاج وفي نقاط محددة كالصمامات والمضخات.

**2.** رواسب حرشفية طرية إلى متوسطة القساوة وتلاحظ في خطوط الإنتاج السطحية كالفلاتر وخزانات الفصل وخطوط آبار حقن المياه المنتجة.

**3.** الكدارة أو الرواسب الطرية وتترسب في قعر الخطوط القريبة من الفلاتر ولكنها على الأغلب تكون موجودة في حاويات تخزين النفط وخزانات الفصل وتزداد كلما ازداد زمن تخزين النفط.

**4.** الرواسب الرقيقة وهي الرواسب التي تتشكل في خطوط إنتاج الغاز وهي لا ترى بالعين المجردة ولكنها ترافق صدأ مادة الأنابيب بكثرة.

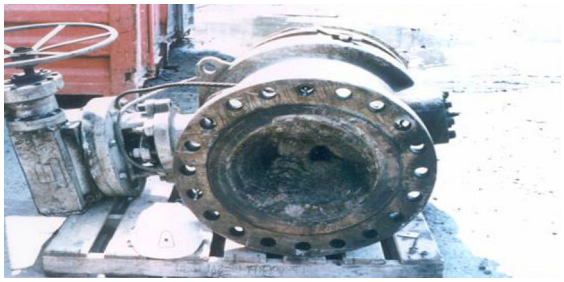
يختلف تركيز المواد المشعة الطبيعية من خط إنتاج إلى آخر ومن نقطة إلى أخرى ضمن خط الإنتاج الواحد وعادة ما تكون أعلى تراكيز الراديوم-226 في رواسب أنابيب نقل النفط في فوهة البئر وشجرات الميلاد X-mass trees، والتي هي نقطة خروج النفط من البئر إلى المعدات السطحية، إضافة إلى ارتفاعه في مواقع الترسيب كالنتوءات والأكواع وغير ذلك، وينخفض تركيز نظائر الراديوم في منشآت الغاز وأنابيب نقل الغاز، حيث ترتفع تراكيز غاز الرادون الذي بدوره يتفكك لتترسب وليداته، كما يبقى غاز الرادون أيضاً مع الغاز الطبيعي المرافق وحيث تقع نقطة غليان غاز الرادون بين نقطة غليان غاز الإيتان وغاز البروبان، فإنه يوجد بمستويات عالية في المضخات كمضخات إعادة الضخ reflux pumps والخزانات وخطوط الإنتاج المرافقة لمعالجة الإيتان والبروبان في منشآت معالجة الغاز مثل مرشحات الدخول inlet filters أكثر من وجوده في الأماكن الأخرى في خط إنتاج النفط، ومعروف أنه يمكن أن توجد مستَوَيات مرتفعة من الإشعاع في محطات إنتاج الغاز وخاصة عندما تخزن كميات كبيرة من الغاز أو تضغط.

لا توجد المواد المشعة الطبيعية بدرجة ملموسة في كل الآبار النفطية، وخاصة إذا لم يكن هناك حقن للمياه وإنتاج كميات كبيرة من المياه المرافقة، ولكن كقاعدة يمكن القول إن ازدياد ترسب المواد المشعة الطبيعية يرافق استعمال حجوم كبيرة من المياه لرفع الضغط، وهذا يؤدي إلى إنتاج حجوم كبيرة من المياه المرافقة.

يوضح الجدول 1 تركيز المواد المشعة الطبيعية في سوائل النفط والغاز ونفايات الصناعة النفطية كالرواسب الحرشفية والكدارة إضافة إلى المياه المرافقة، والتي جرى قياسها في العالم، ويلاحظ أن تراكيزها تفوق كثيراً تلك الموجودة في الطبيعة.

**الجدول 1.** تراكيز المواد المشعة الطبيعية في سوائل النفط والغاز ونفايات الصناعة النفطية.

| النظير المشع | النفط الخام (بكرل/غ) | الغاز الطبيعي (بكرل/م3) | المياه المنتجة (بكرل/ل) | الرواسب الحرشفية الصلبة (بكرل/غ) | الكدارة (بكرل/غ) |
|---|---|---|---|---|---|
| $^{238}U$ | 0.000001-0.01 | - | 0.0003-0.1 | 0.001-0.5 | 0.005-0.01 |
| $^{226}Ra$ | 0.0001-0.04 | - | 0.002 | 0.1-15000 | 0.05-800 |
| $^{210}Pb$ | - | 0.005-0.02 | 0.05-190 | 0.02-75 | 0.1-1300 |
| $^{210}Po$ | 0-0.01 | 0.002-0.08 | - | 0.02-1.5 | 0.004-160 |
| $^{232}Th$ | 0.0003-0.002 | - | 0.0003-0.001 | 0.001-0.002 | 0.002-0.01 |
| $^{228}Ra$ | - | - | 0.3-180 | 0.05-2800 | 0.5-50 |
| $^{222}Rn$ | - | 5-200000 | - | - | - |



**الشكل 2.** الرواسب الحرشفية داخل الأنابيب والمعدات.

يؤدي وجود المواد المشعة الطبيعية في الرواسب الحرشفية المترسبة في خطوط الإنتاج السطحية إلى ارتفاع المستويات الإشعاعية بسبب تراكم المواد المشعة الطبيعية، كما يمكن أن يستدل على وجود المواد المشعة الطبيعية بإجراء قياسات بسيطة بمقياس تعرض إشعاعي. يبين الجدول 2 معدل التعرض الإشعاعي على سطح بعض المعدات والأنابيب عند عدد من الآبار السورية، وفيه تُلاحظ القيم المرتفعة للتعرض الإشعاعي عند عدد من الآبار، فقد بلغت مثلاً عند البئر EW-106 نحو 23.5 مكروسيفرت/ساعة، وتعد الجرعات كافة مرتفعة لدى مقارنتها بالخلفية الطبيعية التي تساوي 0.09 مكروسيفرت/ساعة. ولا بد من الإشارة هنا إلى أنه يجب ألّا تزيد الجرعة الإشعاعية الإجمالية الخارجية والداخلية التي يمكن أن يتلقاها العاملون غير المصنفين إشعاعياً على 1 ملّي سيفرت/سنة، وألّا يزيد معدل الجرعة فيما يخص العمال المصنفين إشعاعياً على 20 ملي سيفرت/سنة، وذلك بمقتضى توصيات الوكالة الدولية للطاقة الذرية IAEA.

**الجدول 2.** مستوى التعرض الإشعاعي في مواقع مختلفة من خط إنتاج النفط في دير الزور (سورية).

| الموقع | نقطة القياس | معدل التعرض الإشعاعي (مكروسيفرت/ساعة) |
|---|---|---|
| 1 | رأس البئر (WE-106 Oil Well) | 23.5 |
| 2 | خزان فصل (EW-106 Separator) | 20 |
| 3 | رأس البئر (EW-105 Oil Well) | 12 |
| 4 | رأس البئر (WE-103 Oil Well) | 14 |
| 5 | خزان فصل (WE-103 Separator) | 11 |
| 6 | خزان فصل (EW-104 Separator) | 4.5 |
| 7 | خزان فصل (EW-101 Separator) | 3.8 |
| 8 | خط نقل المياه (Water Line) | 6 |
| 9 | خط نقل النفط (Oil Line) | 2.6 |
| 10 | مشعب (H.P. Manifold) | 10 |
| 11 | مشعب (L.P. Manifold) | 3 |
| 12 | خط اختبار (Test Line) | 2.2 |
| 13 | منطقة المشعب (Manifold Area) | 0.5 |

## إزالة التلوث الإشعاعي عن المعدات النفطية

### طرائق إزالة الرواسب الحرشفية عن المعدات في الموقع

تتوفر عدة طرائق لإزالة التلوث الإشعاعي عن المعدات في الموقع دون نزع المعدات أو الأنابيب بعيداً عن الخدمة، ويمكن التمييز بين طريقتين: الأولى هي إزالة الرواسب بالوسائط الميكانيكية كالحك والكشط وموسعات الثقوب والثانية هي استعمال المواد الكيميائية.

تستعمل الطرائق الميكانيكية بغض النظر عن طبيعة الرواسب المتراكمة كخيار ثان، ويعود ذلك إلى سببين: الأول كلفتها المرتفعة؛ إذ يجب أن يدخل رأس الحك أو الكشط إلى داخل البئر ليصل إلى أعماق تصل إلى 3 كم، والثاني هو أنها لا تعد الطريقة الفعالة لإعادة تنشيط البئر لأنها لا تسحب الرواسب المزالة من العمق سحباً جيداً، ويُمكن لكميةٍ قليلة من المواد المكشوطة أن تتجمع وتغلق الفتحات التي تمرر السوائل وبهذا تنخفض الإنتاجية التي يمكن أن تصل إلى الصفر.

أما طريقة إزالة الرواسب بواسطة المواد الكيميائية فتعتمد إلى حد بعيد على نوع الرواسب الحرشفية، وتنشأ الصعوبة في استعمال أسلوب الإزالة الكيميائية عندما توجد أنواع مختلفة من الرواسب يصعب التنبؤ بتكوّنها، كما أن لكل نوع من أنواع الرواسب الثلاثة الرئيسة طرائق كيميائية محددة لإزالتها من داخل الآبار والتشكيلات، فمثلاً تستعمل مُحلات كيميائية لحل رواسب كبريتات الباريوم مثل رباعي أمين ثنائي إيتيلين حمض الخل EDTA، وحمض نترو ثلاثي أستيات NTA ومركبات كُلّابيّة chelating compounds أخرى، تكوّن معقدات منحلة مع أيونات الباريوم، في حين تستعمل الحموض كحمض كلوريد الماء في إزالة كربونات الكالسيوم.

تعد عملية الحفاظ على معدل إنتاجية كثير من آبار النفط باستعمال مزيلات رواسب كربونات الكالسيوم –وهي حموض معدنية وغير معدنية– من أكثر الإجراءات الروتينية الناجحة التي تجري في الحقل، مع ذلك توجد حالات تكون فيها هذه الطريقة غير فعالة، ويعود ذلك إلى تآكل جدران البئر إذا سُكب الحمض بأسلوب غير صحيح، ويعد حمض كلوريد الماء أكثر الحموض استعمالاً، كما تستعمل أيضاً حموض عضوية كحمض الخل أو مزيج من عدة حموض، وتحقن المواد الكيميائية بواسطة أنابيب مرنة تدخل إلى البئر محمولة على عربة خاصة لحقن السوائل (الشكل 3) تسمى بعربة الأنابيب الملفوفة coil tubing truck.

**الشكل 3.** عربة الأنابيب الملفوفة لحقن السوائل في الآبار.

### طرائق إزالة الرواسب الحرشفية عن المعدات بعد خروجها من الخدمة

يوجد طرائق عديدة لإزالة التلوث الإشعاعي عن المعدات النفطية بعد خروجها من الخدمة، ومنها ما يعتمد على التنظيف اليدوي أو التنظيف بالرمل المضغوط، وأكثر الطرائق فعالية وأمناً تلك التي تستعمل تياراً مائياً تحت ضغط عال، ويفضل إزالة تلوث التجهيزات من المواد المشعة من قبل أشخاص متخصصين، ويتوقف اختيار الطريقة المناسبة على عدة عوامل منها توافر وسائل العمل كالمنشآت وتجهيزات الإزالة وألبسة الوقاية وغيرها، إضافة إلى الكلفة المترتبة على إجراء مثل هذه العمليات والتي تقارن بقيمة التجهيزات التي ستخضع للتنظيف. على أية حال، يجب أن تُتبع إجراءات خاصة لسلامة العاملين عند إجراء هذه الأعمال المتخصصة، إضافة إلى أن البدء في مثل هذه الأعمال يحتاج إلى ترخيص من قبل المؤسسة أو المكتب المختص بمنح التراخيص لممارسة الأعمال ذات العلاقة بالمواد المشعة، ومن الطرائق المستعملة:

#### 1. التنظيف اليدوي

لا يلزم لتطبيق هذه الطريقة آلة ميكانيكية، فهي طريقة بسيطة يجري فيها الغسل اليدوي للتجهيزات بالمحاليل الكيميائية والماء، وتجري عمليات إزالة الكدارة من فواصل النفط في الخزانات الملوثة بالمواد المشعة الطبيعية يدوياً، فتجرف الكدارة من الخزان وتوضع في حاويات التخزين ثم يُغسل الخزان والكدارة بوساطة مضخة بسيطة، ولهذا تعد الطريقة اليدوية بسيطة وغير مكلفة ولكنها ذات فعالية منخفضة إضافة إلى خطورتها المرتفعة.

#### 2. التنظيف بالماء تحت ضغط عال

تستعمل هذه الطريقة على نطاق واسع ويجري التنظيف بها باستعمال الماء المضغوط high pressure water jetting لإزالة الرواسب الحرشفية المحتوية على مواد مشعة طبيعية، كما تستعمل هذه الطريقة لتنظيف التجهيزات الكبيرة من الرواسب الحرشفية، مثل أجهزة فصل النفط عن الماء وخزانات النفط وكذلك شبكات الأنابيب. تحتاج عمليات تنظيف الرواسب الحرشفية المحتوية على مواد مشعة إلى الماء المقذوف بضغط يقع بين 700 و2100 كغ/سم2؛ أي بين 10000 و30000 باوند/إنش مربع psi، ويعطي تطبيق هذه الطريقة إزالة فعالة للرواسب الحرشفية إضافة إلى قلة خطورة انطلاق الغبار المحتوي على مواد مشعة، إذ يحافظ تطبيقها على بقاء المواد المشعة في حالة رطبة. على أية حال، لهذه الطريقة بعض الأخطار المرافقة لتطبيق الضغط العالي، إضافة إلى انتشار التلوث على مساحة كبيرة ولهذا يفضل أن تكون أنظمة الغسيل بالضغط العالي محكمة الإغلاق، وألاّ يسمح للماء بأن ينساب إلى البيئة، بل يجب أن يعبأ أو يعاد استعماله في دارة مغلقة أو أن يمرر عبر مرشحات لاستخلاص الرواسب الحرشفية منه، كما يجب أن يجري التخلص من المياه الملوثة وفق إجراءات موافق عليها من قبل الجهة المختصة، ووفق المعايير المقرة للتخلص المأمون من المواد المشعة، ويوضح الشكل 4 صورة عن عملية إزالة الرواسب الحرشفية باستعمال الماء المضغوط.

**الشكل 4.** عملية إزالة الرواسب الحرشفية باستعمال الماء المضغوط.

### 3. طريقة موسع الفتحات بالمثقب

تستعمل هذه الطريقة في تنظيف شبكة أنابيب الإنتاج؛ حيث يوضع الأنبوب على منصب التنظيف ويُدخل موسِّع الفتحات من أحد طرفي الأنبوب ويبدأ بالدوران ليصل إلى الطرف الآخر بحيث يزيل الرواسب العالقة، ولهذه الطريقة مردود كشط عال، ويتولد من هذه العملية غبار ملوث بالمواد المشعة الطبيعية إذا استعملت هذه العملية بطريقة جافة، أما إذا استعمل موسع الفتحات بالدوران في جوٍّ رطب لتخفيض كمية الغبار المتولدة، فإنها تعد طريقة جيدة إضافة إلى إجراء العمليات ضمن نظام محكم الإغلاق لمنع انتشار المواد الملوثة، كما يستعمل عادة مع هذه الطريقة الماء تحت ضغط عالٍ، ويوضح الشكل 5 عملية تنظيف أنابيب الإنتاج.

**الشكل 5.** عملية إزالة الرواسب الحرشفية من أنابيب الإنتاج.

ويوجد حالياً محطات متنقلة لتنظيف المعدات النفطية باستعمال الماء المضغوط والتي يمكن أن تنقل بواسطة عربات إلى حقول النفط لتوفير أجور نقل المعدات إلى مواقع محطات إزالة التلوث، ويبين الشكل 6 إحدى هذه المحطات.

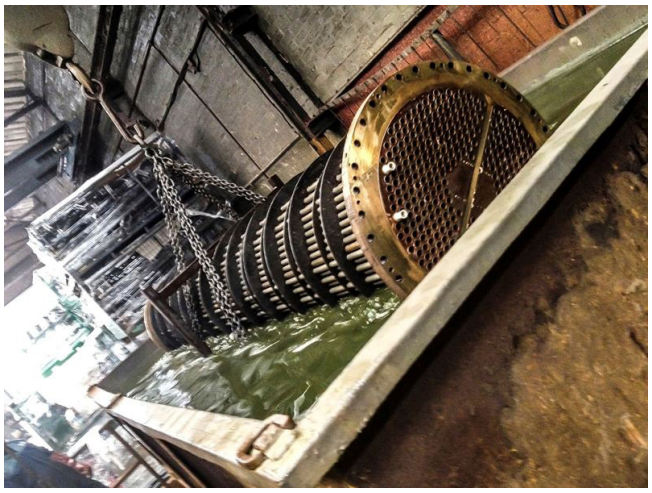
**الشكل 6.** محطة متنقلة لتنظيف أنابيب الانتاج.

### 4. التنظيف بطريقة المصّ بالهواء

يمكن أن تكون أنظمة التنظيف بالمصّ الهوائي وفق عملية جافة أو رطبة فعالةً في إزالة الجسيمات الملوثة بالمواد المشعة غير العالقة، وعادة ما تستعمل هذه الطريقة قبل تنظيف التجهيزات يدوياً. وتستعمل في هذه الطريقة مرشحات خاصة بأنظمة التنظيف لمنع انتشار التلوث إلى الأماكن المحيطة وتخفيض احتمال تكوّن المعلقات الملوثة بالمواد المشعة، ويجب أخذ الحذر لضمان عدم تراكم كميات كبيرة من المواد المشعة في جهاز التنظيف بمصّ الهواء، فهذا يرفع من خطرها على العاملين.

### 5. التنظيف بالمواد الكيميائية

جرت دراسة العديد من المواد الكيميائية لتنظيف المعدات الملوثة بالمواد المشعة الطبيعية، حيث تعتمد المواد الكيميائية المستعملة على خليط من الأحماض أو على مجموعات من الأحماض والمواد الفعالة؛ إذ يتم وضع المعدات في حوض مليء بالمواد الكيميائية لفترة من الزمن كما هو موضح في الشكل 7، ومن مساوئ هذه الطريقة توليد حجوم كبيرة من النفايات السائلة الحامضية التي تحتاج إلى تخلص بشكل آمن.



**الشكل 7.** تنظيف المعدات الملوثة بالمواد الكيميائية.

### 6. الغمر المبرد cryogenic immersion

تستعمل هذه الطريقة لإزالة التلوث الإشعاعي عن المعدات صغيرة الحجم وذلك باستعمال سلسلة من عمليات التبريد والتسخين الفائقين حيث تغمر المعدات في الآزوت السائل عدة مرات وتعرض للهواء الساخن، ويمكن إزالة الرواسب الحرشفية السميكة بسهولة عن سطوح المعدات مع ترك الرواسب الحرشفية كمادة صلبة تجمع للتخلص منها كنفايات، ومن مساوئ هذه الطريقة تشكل رواسب جافة قابلة للتطاير مما يتطلب نظام فلترة هواء وإجراءات وقائية صارمة.

### 7. النفث بالرمل sand jetting

تستعمل هذه العملية بشكل روتيني لتنظيف المعدات بالاقتران مع عمليات أخرى مذكورة آنفاً، وتكون عادة حجرات النفث مزودة بأنظمة ترشيح فعالة لإزالة الرواسب الحرشفية والرمل المتطاير داخل غرف النفث بالرمل لإعادة استعمالها في عملية الإزالة، ويمكن إعادة استعمال الرمل المستعمل في عملية التنظيف حتى اللحظة التي يجب التخلص منها في مكان مناسب، وتتطلب هذه العملية إجراءات وقائية صارمة كالتي تستعمل في عمليات إزالة التلوث الإشعاعي باستعمال الماء المضغوط، ومن مساوئ هذه الطريقة تراكم المواد المشعة في الرمل حيث يزداد التعرض الإشعاعي للمشغلين مع مرور الزمن إضافة إلى زيادة حجم النفايات المراد التخلص منها نتيجة خلط الرمل مع الرواسب الحرشفية المزالة.

### 8. طريقة الكشط الجاف dry abrasive method

يمكن تطبيق طريقة الكشط الجاف التي تستعمل أجهزة محمولة لإزالة الرواسب الحرشفية من سطوح المعدات التي يسهل الوصول إليها، ويؤدي الكشط الجاف والجلخ والتلميع إلى خطر انتشار التلوث الإشعاعي في الهواء وتعرض العاملين له، وبالتالي فإن تطبيق طرق الكشط الجاف يحتاج إلى تدابير وقائية للعمال والبيئة لا يمكن توفيرها عملياً إلا من قبل الشركات المتخصصة.

### 9. الصهر melting

يمكن صهر المكونات المعدنية الخردة الملوثة بالمواد المشعة الطبيعية في فرن صهر الحديد الخردة حيث يتم فصل المعادن عن النكليدات المشعة التي تبقى في الخبث أو في الغبار والأبخرة الغازية المنبعثة، ويتم تطبيق إزالة التلوث عن طريق الذوبان في منشآت صهر للمعادن مخصصة لهذا الهدف، وتستعمل هذه الطريقة على نطاق ضيق في العالم.

### 10. تنظيف تلوث تجهيزات منشأة الغاز

يمكن أن يحدث التلوث بالمواد المشعة الطبيعية في تجهيزات معالجة الغاز الطبيعي، حيث تتكون طبقات رقيقة غالباً لا تكون مرئية بالعين المجردة، ويمكن أن تتألف الطبقات من مواد ذات نشاط إشعاعي مرتفع تلتصق بجدران تجهيزات المعالجة، كما يمكن أن تزال هذه الطبقات بالمواد الكيميائية، ويكمن خطر هذه المواد كالرصاص-210 والبولونيوم-210 في التعرض الداخلي فقط، فهي لا تطلق الأشعة غاما التي تؤدي إلى تعرض خارجي ملموس.

وأخيراً، ينجم عن أعمال التنظيف المذكورة آنفاً نفايات مشعة تحوي تراكيز ملموسة من المواد المشعة الطبيعية، ولهذا يجب أن يجري نقلها أو التخلص النهائي منها بطرائق سليمة وضمن معايير خاصة بالتخلص من المواد المشعة.

## تلوث بيئة حقول النفط بالمواد المشعة الطبيعية

يحدث التلوث الإشعاعي في حقول النفط بالمواد المشعة الطبيعية نتيجة رمي المياه المرافقة للنفط والرواسب الحرشفية والوحل للبيئة المحيطة، حيث اعتادت شركات النفط في العالم جمع المياه المرافقة للنفط في بحيرات لتبخيرها؛ الشيء الذي أدى إلى تلويث التربة بالمواد المشعة الطبيعية (الشكل 8). لا بد من الإشارة هنا أنه يوجد طرائق آمنة عديدة للتخلص من المياه المرافقة ومنع تلوث التربة، ولعل أهمها إعادة حقن المياه المرافقة في إحدى الآبار العميقة، والتي يمكن أن تستعمل لرفع الضغط في الآبار النفطية منخفضة الضغوط، ولا قيمة تذكر لزيادة مستوى التلوث الإشعاعي بإعادة الحقن أو حقنها في أحواض مستنفذة depleted reservoirs، ويعتمد إتباع هذه الطريقة على توافر الآبار المناسبة للحقن، كما يمكن أن ترمى المياه المرافقة في المسطحات المائية الكبيرة كالبحار والمحيطات كما يمارس حالياً من قبل شركات النفط في كل من بحر الشمال وخليج المكسيك، وتحتاج ممارسة هذه الطريقة إلى دراسات معمقة لتقدير الأخطار الكمية الناجمة عن انتقال نظائر الراديوم إلى البيئة والإنسان، ومن الطرائق المقترحة والمكلفة معالجة المياه المرافقة لفصل نظائر الراديوم بالترسيب أو تمريرها على مرشحات تحوي مواد مازة للراديوم حيث يمكن أن يستفاد من المياه المعالجة في الزراعة، كما يمكن أيضاً فصل الرواسب المشعة باستعمال بحيرات تجميعية كتيمة القاع وتعريضها للتبخير كأن تبطَّن البحيرات ببطانة بلاستيكية تمنع تسرب المياه إلى التربة، وهي طريقةٌ مناسبة ورخيصة في المناطق الصحراوية الجافة حيث يمكن بعد التبخير جمع البطانة البلاستيكية وإرسالها إلى مخزن المواد المشعة للتخلص منها، وتستعمل أيضاً بحيرات التبخير المبطنة لتبخير المياه المرافقة وإنتاج ملح كلوريد الصوديوم الذي يمكن أن يستعمل في سوائل حفر الآبار.

يؤدي انتشار التلوث الإشعاعي في التربة إلى تعرض العاملين في الصناعة النفطية وكذلك عموم الناس للإشعاع إذا لم تتبع إجراءات الوقاية الإشعاعية المناسبة، ولتطبيق القواعد التنظيمية تدعو الحاجة إلى إزالة التلوث وإعادة تأهيل المناطق الملوثة لمنع تعرض العاملين وعموم الناس، وتنفذ عادة هذه العمليات ضمن برامج محددة بمشاركة عدد من المختصين في مجال الوقاية من الإشعاع والمهندسين المدنيين وإدارة النفايات المشعة.

**الشكل 8.** بعض بحيرات تبخير المياه المنتجة وتجميع الوحل في حقول النفط.

## برامج معالجة التربة الملوثة بالمواد المشعة الطبيعية والنفط

يهدف معظم برامج إزالة التلوث الإشعاعي وإعادة تأهيل البيئات الملوثة في حقول النفط إلى ما يلي:

– حماية المياه الجوفية من التلوث بالمواد المشعة والعناصر السامة.

– حماية عموم الناس من التعرض للمواد الملوثة إما بشكل مباشر حيث يوجد الناس بالقرب من هذه المناطق إما كبدو يرعون مواشيهم أو مزارعين أو عن طريق تلوث المياه والغذاء واستهلاكها من قبل القاطنين.

– حماية العاملين بالقرب من المناطق الملوثة من خطر التعرض للملوثات المشعة والسامة.

– الاستفادة من المناطق الملوثة بعد إعادة تأهيلها.

ولا بد قبل البدء بتنفيذ أي برنامج لإزالة التلوث الإشعاعي في حقول النفط من إجراء مسح أولي وتوصيف التربة الملوثة لتقدير حجم ومقدار ونوع المواد الملوثة في الموقع، ويتألف برنامج إزالة التلوث بالمواد المشعة الطبيعية في حقول النفط من أربع مراحل؛ أما المرحلة الأولى فهي إجراء مسح إشعاعي أولي للمناطق الملوثة لمعرفة حجم التلوث وحدوده. ولقد عنيت المرحلة الثانية بتقدير حجم التربة الملوثة بالمواد المشعة في كل موقع تبعاً للحدود التي يجري وضعها من قبل مكتب التنظيم والخاصة بالتخلص من النفايات المشعة وهي عادة تتعلق بالراديوم-226، ويتبع هذه المرحلة مرحلة ثالثة شاملة لأعمال إزالة التلوث التي تسلم للجهة التنظيمية للمراجعة والموافقة، أما المرحلة الأخيرة فهي مرحلة إزالة التلوث والمسح الإشعاعي النهائي.

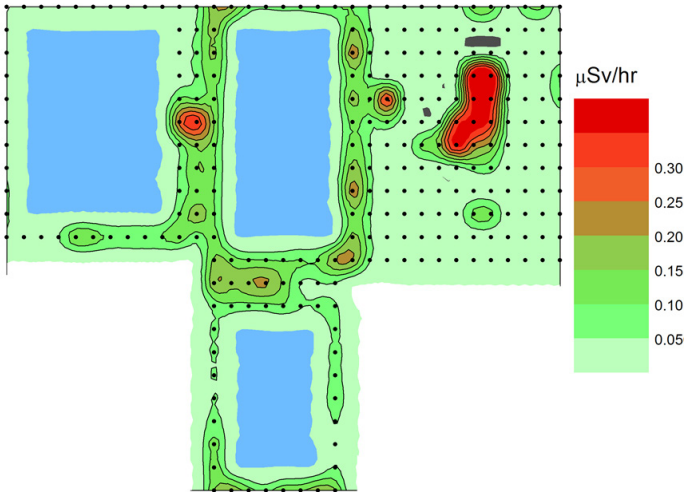
سنعرض فيما يلي تفاصيل الأعمال الواجب اتباعها لإزالة هذا التلوث وإعادة تأهيل البيئات الملوثة وفقاً لهذه المراحل.

### المسح الإشعاعي الأولي

تتراوح تراكيز المواد المشعة الطبيعية في المناطق الملوثة ما بين مستويات الخلفية الطبيعية ومستويات تزيد على المستويات الموجودة في غسالات عمليات استخراج ومعالجة خام اليورانيوم، وأكثر ما يستعمل للتعرف على التلوث بالمواد المشعة الطبيعية أجهزة المسح الإشعاعي المحمولة. تقيس هذه الأجهزة إشعاعات غاما الصادرة من الملوثات المشعة الطبيعية وتسجل مستويات العد أو الجرعات على رؤوس شبكة مسافات محددة تقل أو تزيد أبعادها تبعاً لمساحة المنطقة الملوثة، ولذلك لا بد من تحديد موقع المنطقة الملوثة بشكل دقيق (الشكل 9).

**الشكل 9.** المسوحات الإشعاعية في حفرة تبخير مياه مرافقة جافة.

ترسم الخرائط الإشعاعية لكل موقع من المواقع الملوثة ويجري تمييز المناطق المتقاربة في التلوث السطحي باستعمال برنامج حاسوبي لمعالجة البيانات ورسم الخرائط، ويوضح الشكل 10 إحدى الخرائط الإشعاعية التي رسمت لمنطقة ملوثة بالمواد المشعة في أحد حقول النفط، حيث يلاحظ توزع غير متجانس للنشاط الإشعاعي في البحيرات والقنوات في المناطق كافة، وتستعمل هذه الخرائط في تعيين عدد عينات التربة السطحية وسبور العمق الضرورية لتعيين حجم التربة الملوثة.




**الشكل 10.** خريطة إشعاعية لمنطقة ملوثة بالمواد المشعة الطبيعية في أحد حقول النفط (يدل اللون الأزرق على وجود الماء).

## تقدير حجم التربة الملوثة

تعطي المسوحات الغماوية معلومات أولية لتقدير التلوث وحدوده ولكنها غير كافية لتقدير حجم التربة الملوثة وحساب كلفة أعمال الإزالة ولهدف تقدير حجم التربة الملوثة المراد التخلص منها، لا بد من تقصي توزع النشاط الإشعاعي في التربة السطحية والعميقة في كل منطقة ملوثة، وذلك بجمع عينات سطحية وسبور عمق من النقاط الحارة التي تكون فيها قراءات غاما في أعلى قيمها، ومن ثم تقدير حجم التربة الملوثة التي يجب إزالتها ومعالجتها وفق معايير الإعفاء؛ أي المستوى الإشعاعي الذي تعد عنده المواد المحتوية على أقل منه عادية ولا تحتاج لمعالجة خاصة، ونعني بذلك المعايير الصادرة عن الهيئة التنظيمية في البلد المعني.

ونذكر في هذا المقام أن المعيار السوري لتحديد مستويات تلوث التربة بالمواد المشعة الطبيعية وخاصة ما يتعلق بحدود إزالة أو معالجة التربة الملوثة بالمواد المشعة الطبيعية في حقول النفط هو:

أولاً: لا تحتاج التربة المحتوية على الراديوم-226 بنشاط نوعي أقل من 0.15 بكرل/غ إلى أية معالجة (إعفاء).

ثانياً: تعامل كافة الترب الملوثة المحتوية على الراديوم-226 بنشاط إشعاعي نوعي أعلى من 5.2 بكرل/غ كنفاية مشعة يجب معالجتها أو التخلص منها وفق قواعد محددة.

ثالثاً: تحتاج الترب متوسطة التلوث أي المحتوية على الراديوم-226 بنشاط إشعاعي نوعي بين 0.15 بكرل/غ و5.2 بكرل/غ إلى معالجة خاصة في الموقع لتخفيض التعرض الإشعاعي إلى أقل من 100 مكروسيفرت/سنة.

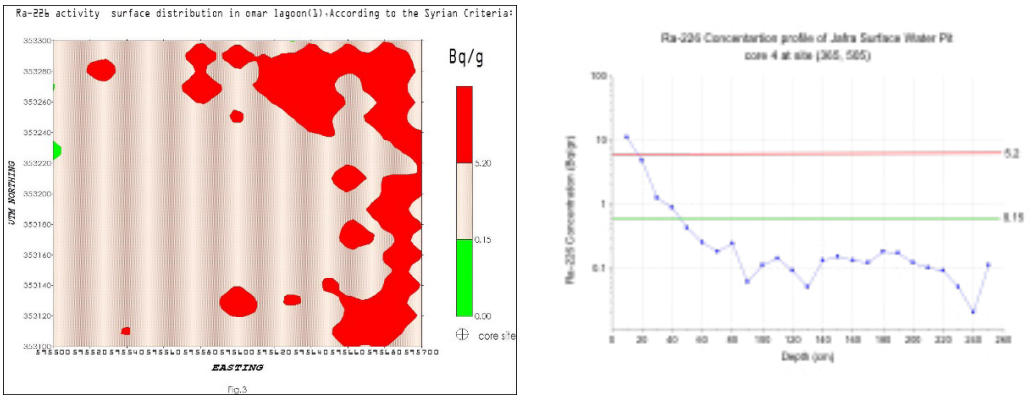
على الرغم من وجود علاقة بين تراكيز المواد المشعة في التربة وقراءات التعرض الغماوي فوقها فإنه يصعب التنبؤ بتراكيز النكليدات المشعة في التربة من قياسات غاما وحدها، ويعود ذلك للتدريع الناجم عن مادة التربة ذاتها وامتصاص إشعاع غاما الصادر من عمق التربة أو وسطها، أضف إلى ذلك حقيقة التوزع غير المتجانس للمواد المشعة الطبيعية مع إمكان وجود تراكيز مرتفعة في مناطق محددة تدعى بالبقع الحارة ناجم عن وجود كميات أكبر من الرواسب الحرشفية أو الكدارة التي يمكن أن تحوي تراكيز مرتفعة من الراديوم-226.

ويبين الشكل 11 توزع نشاط الراديوم-226 السطحي في إحدى البحيرات، ويلاحظ أن التوزع غير متجانس حيث توجد تراكيز مرتفعة نسبياً في مناطق محددة أي بقع حارة، حيث يكون فيها تركيز الراديوم-226 أعلى من 5.2 بكرل/غ، وربما يعود وجود مثل هذه البقع الحارة في البحيرات إلى وجود كميات من الرواسب الحرشفية أو الوحل يمكن أن تحوي تراكيز مرتفعة من الراديوم-226، وقد وصل أعلى تركيز للراديوم-226 في حقول النفط السورية إلى حوالي 100 بكرل/غ. على أية حال، لوحظت مستويات منخفضة من التلوث في عدد من المناطق، ودلت نتائج سبور العمق المأخوذة على أن التلوث قد وصل في بعض المواقع إلى عمق يزيد عن 1 م بينما لم يتجاوز في بعضها الآخر 30 سم وذلك في البقع الحارة، وقد قدر حجم التربة في أكثر المناطق تأثراً والتي لا بد من معالجتها كنفاية مشعة حسب المعايير السورية بافتراض وسطي عمق التلوث 50 مم بحوالي 30.000 م3.

وننوه هنا إلى أنه إضافة إلى تقييم التلوث من الناحية الإشعاعية لا بد من إجراء دراسات دقيقة لتحديد الخصائص الأخرى للمواقع الملوثة، وتشمل على سبيل المثال لا الحصر:

- خصائص التربة الميكانيكية والكيميائية والفلزية.
- المياه الجوفية والسطحية (المسيلات، عمق المياه،...).
- التلوث الكيميائي المرافق للتلوث الإشعاعي وخاصة النفطي والعناصر السامة.
- التنوع النباتي والحيواني.
- الدراسة الزلزالية.
- المناخ.

وتساعد نتائج الدراسات المذكورة في اتخاذ القرار في اختيار الطريقة المناسبة للمعالجة والتخلص من النفايات الناجمة عن عملية إعادة التأهيل.




**الشكل 11.** توزع الراديوم-226 في التربة السطحية والعمق في إحدى بحيرات التبخير الجافة في حقول النفط السورية.

## إعداد خطة إزالة التلوث

بعد أن يجري حساب حجم التربة الملوثة بالمواد المشعة الطبيعية الأعلى من الحد المعفى وتحديد مواصفاتها، تعد خطة إزالة التلوث انطلاقاً من نتائج التحليل والمسح الإشعاعي الغماوي الأولي، وتسلم للهيئة التنظيمية للموافقة عليها، وتشمل أية خطة لإزالة التلوث نتائج المسح الإشعاعي وتوصيف التربة الملوثة ووصفاً مختصراً لحالة المنطقة الملوثة ومقترحاً للتخلص منها إضافة إلى التقيد بإجراءات الوقاية الإشعاعية أثناء أعمال الإزالة وفق برنامج للمراقبة البيئية يتبع أعمال الإزالة وإعادة التأهيل.

اعتمدت طريقة معالجة المناطق الملوثة والتخلص من التربة الملوثة في حقول النفط السورية في مطامر سطحية على طريقة الاحتواء باستعمال حواجز هندسية متعددة الطبقات، ويمكن استعمال الطريقة ذاتها في معالجة أية تلوثات جديدة كونها طرائق مدروسة إذ تتوفر الخبرات الوطنية لتنفيذها وذات تكلفة منخفضة، وقد نفذت المطامر الهندسية في كل من شركتي الفرات ودير الزور وفق خطة لإزالة التلوث اعتمدت على دراسات بيئية وإشعاعية وهيدرولوجية وجيولوجية وزلزالية، حيث جرى في البداية حساب حجم التربة الملوثة بالمواد المشعة الطبيعية الأعلى من الحد المعفى وتحديد مواصفاتها، وقد أعدت بعد ذلك خطة لإزالة التلوث انطلاقاً من نتائج التحليل والمسح الإشعاعي الغماوي الأولي، وسلمت للهيئة التنظيمية للموافقة عليها. وتشمل أية خطة لإزالة التلوث نتائج المسح الإشعاعي وتوصيف التربة الملوثة ووصفاً مختصراً لحالة المنطقة الملوثة ومقترحاً للتخلص منها إضافة إلى التقيد بإجراءات الوقاية الإشعاعية أثناء أعمال الإزالة ووفق برنامج للمراقبة البيئية يتبع أعمال الإزالة وإعادة التأهيل، ويعتمد اختيار طريقة معالجة التربة الملوثة على عدة عوامل منها حجم التربة الملوثة المراد التخلص منها، وتوافر موقع لطمر التربة الملوثة ذي حجم كاف مع تقدير تكلفة التخلص من المتر المكعب الواحد من التربة الملوثة، تحسباً لما قد يحتاجه الأمر من مخزن إضافي أو توسعة كافية للتخلص من التربة الإضافية مع الأخذ بعين الاعتبار كافة الأعمال المدنية اللازمة لنقل النفاية إلى موقع الطمر والحصول على موافقة الهيئة التنظيمية. على أية حال، نفذت أعمال إزالة التلوث على قسمين؛ القسم الأول عني بإزالة التلوث أو المطمر أو بإعادة نثر التربة الملوثة في الموقع ضمن الحدود الإشعاعية المعمول بها، في حين يعنى

القسم الثاني بنقل التربة الملوثة إلى المطمر أو التخزين للتخلص النهائي منها، ويمكن أن يشمل القسم الأول نثر التربة الملوثة ومزجها بتربة نظيفة ومن ثم تغطيتها بتربة نظيفة أيضاً في حين يشمل القسم الثاني إعداد حفرة التخزين هندسياً أو ربما حقن التربة الملوثة في آبار مهجورة أو مزجها مع خلطة إسمنتية ومن ثم حقنها في تشكيلات جيولوجية تحت الأرض. يوضح الشكل 12 أعمال إنشاء المطمر السطحي، كما يوضح الشكل 13 المطمر الفني للتربة الملوثة بالمواد المشعة الطبيعية في أحد حقول النفط السورية.

**الشكل 12.** إنشاء مطمر للتربة الملوثة في حقل شركة الفرات للنفط.

**الشكل 13.** حفرة تخزين هندسية لتربة ملوثة بالمواد المشعة الطبيعية في أحد حقول النفط السورية.

إضافة إلى طريقة التخلص من التربة الملوثة في مطامر سطحية surface landfills آنفة الذكر، سنذكر فيما يلي أهم الطرائق الأخرى لمعالجة التربة الملوثة والتخلص من النفايات النفطية من تربة ملوثة ووحل والتي تحتوي على مواد مشعة طبيعية في حقول النفط.

### الحقن في الآبار المسدودة والمهجورة

يعد البئر الذي استُنفِدَت فُرص استثماره مكاناً جيداً للتخلص من المواد المشعة الطبيعية، وذلك بعد موافقة الجهات التنظيمية المختصة والجهات ذات العلاقة مثل هيئة الطاقة الذرية ووزارة البيئة ووزارة الموارد المائية في البلد المعني، وتخلط عادة التربة الملوثة بإسمنت خاص، وتضخ الخليطة الإسمنتية الطازجة إلى حوض تكوّن النفط أو تحقن إلى أسفل أنابيب الاستخراج الملوثة وتترك لتكوّن سدادةً تغلق خط الأنابيب بحيث تقع هذه السدادة تحت أسفل طبقة المياه الجوفية المستعملة كمصدر لمياه الشرب؛ أي يجب ألا يصل مستوى ارتفاع المواد المراد التخلص منها إلى مستوى المياه الجوفية المستعملة للشرب.

### طريقة التمزيق الهيدروليكي

يمكن أن تحقن التربة الملوثة إلى حوض تكوّن النفط أو إلى حوض مفصول جيولوجياً وميكانيكياً عن مصادر المياه الجوفية المستعملة للشرب بطريقة التمزق الهيدروليكي الذي يتم بمساعدة التفجيرات الجوفية، وتخلط النفايات المشعة كالرواسب الحرشفية أو التربة الملوثة

بالطين أو الإسمنت في تجهيزات خاصة بالخلط، ثم تُحقن غير المنحلة في الماء مع كمية كبيرة من الماء فتتحرك كلها معاً في حوض تكوّن النفط.

### نثر التربة الملوثة على الأرض وتمديدها

يمكن التخلص من التربة الملوثة والمحتوية أيضاً على الملوثة العضوية كالنفط بنثرها على الأرض وخلطها بتربة نظيفة، ولكن تحتاج مثل هذه الطرائق إلى دراسات معمقة لتقدير خطر انتقال المواد المشعة إلى الإنسان، وتعد هذه الطريقة من الطرائق البسيطة ولكنها تعتمد على وجود الأكسجين والماء والبكتريا التي عادة ما تكون متوافرة في التربة وهي ضرورية لتفكيك المركبات الهيدروكربونية في النفايات خاصة تلك التي تحوي الوحل، عادة ما تمارس هذه الطريقة عندما تكون النفايات قريبة من موقع نثرها ومزجها مع التربة النظيفة. أما الأخطار المرافقة لاستعمال هذه الطريقة فهي مهملة تقريباً والعوامل التي تحدد هذه الأخطار فهي تراكيز الراديوم في التربة بعد خلطها بتربة نظيفة واستعمال المنطقة المعالجة في المستقبل إما كمنطقة زراعية أو صناعية أو لغايات سكنية، ويبين الشكل 14 عمليات المعالجة بالنثر التي استعملت في حقول النفط السورية سابقاً.

**الشكل 14.** عمليات المعالجة بالنثر والتمديد بتربة نظيفة.

### أعمال الإزالة والمسح الإشعاعي النهائي

تقع مسؤولية إزالة التلوث في حقول النفط على شركات النفط التي تسببت في تلوث التربة، ولهذا تبدأ الشركة بأعمال الإزالة بعد الحصول على رخصة من الهيئة التنظيمية لتنفيذ الأعمال المذكورة في خطة الإزالة التي أعدتها الشركة للموافقة، وتنفذ أعمال الإزالة باستعمال معدات ثقيلة وبإشراف مدير المشروع من شركة النفط وبوجود مشرف الوقاية الإشعاعية المرخص، ولا بد من اتخاذ الإجراءات الوقائية خلال أعمال الإزالة كالسيطرة على غبار التربة الملوثة المحمول بالرياح بأن ترش التربة بالمياه أثناء أعمال كشط وتحميل وتفريغ التربة الملوثة مع غسل المعدات بعد أعمال الإزالة لتقليل تجمع التلوث عليها والأخذ في الحسبان أن يكون موقع وقوف العاملين في الاتجاه المعاكس لاتجاه الرياح، كما تجري مراقبة دخول العمال إلى الموقع وخروجهم بإشراف مسؤول الوقاية الإشعاعية والتأكد من ارتداء ألبسة الوقاية الفردية المؤلفة من أفرول وحذاء سلامة وقبعة وقفازات وقناع، كما هو موضح في الشكل 15 مع التأكيد على كافة السائقين ارتداء أجهزة الوقاية الفردية وإبقاء أبواب عرباتهم ونوافذها موصدة وتشغيل مكيف هواء المركبات. ومن الضروري إجراء قياسات للتلوث الإشعاعي بشكل دوري على العاملين وجمع عينات تربة سطحية وتحليلها لتعيين نشاط الراديوم-226 فيها ومقارنتها مع المعايير إضافة إلى إجراء قياسات إشعاعية لكافة المناطق المعالجة من قبل مسؤول الوقاية الإشعاعية. وبعد الانتهاء من أعمال الإزالة تغسل المعدات والعربات باستعمال وحدات نفث الماء الكهربائية والميكانيكية وفحصها للتأكد من عدم وجود التلوث، ولا بد من جمع كافة الأجهزة الفردية الملوثة والنفايات الأخرى في أكياس بلاستيكية للتخلص منها أصولاً.

يحفظ مسؤولو الوقاية الإشعاعية كافة تقارير المسح الإشعاعي لأهداف التفتيش المستقبلية ويمكن أن ترسل الهيئة التنظيمية المفتشين بين الفينة والأخرى لمراقبة التقييد بشروط تطبيق الرخصة الممنوحة للشركة والتحقق من أن الأعمال تمت وفق متطلبات الرخصة.

**الشكل 15.** ألبسة الوقاية الشخصية الواجب ارتداؤها أثناء تنفيذ مشاريع إزالة التلوث.

## برامج مراقبة للموقع

تعد مراقبة الموقع المعالج أمراً مهماً للغاية للتأكد من أن الإجراء العلاجي المستعمل كاف، وتعد معدلات انبثاق غاز الرادون مهمة لتقدير المخاطر الناجمة عن التربة الملوثة بالراديوم-226 ولتحديد الغطاء المناسب اللازم لتقليل هذا الخطر، ويمكن أن ينبعث غاز الرادون من تربة ملوثة بالراديوم وينتشر في الهواء الجوي المحيط، لذلك فإن قياس تراكيز غاز الرادون في التربة السطحية للمطمر السطحي أمر ضروري للتأكد من سلامة الطبقات السطحية للمطمر وعدم وجود أية شقوق فيها أو تشوهات نتيجة هطول الأمطار (انظر إلى الشكل 16)، كما يستدل من تحليل عينات المياه الجوفية من آبار المراقبة للمياه الجوفية التي تنشأ على أطراف المطمر على وجود أية تسريبات للمواد المشعة إلى المياه الجوفية بفعل مياه الأمطار نتيجة تضرر الطبقات السفلى للمطمر، كما يمكن وضع شبكة أنابيب في قعر المطمر لجمع أية غسالات leached water محتملة لضخها إلى السطح ومعالجتها، إضافة إلى ذلك لا بد من مراقبة المطمر أو مواقع التخلص والتخزين للتربة الملوثة عينياً وفق برنامج زمني محدد وتسجيل الموقع في السجلات العقارية كموقع لطمر التربة الملوثة لعدم استعمال الموقع في المستقبل لغايات سكنية أو زراعية.

**الشكل 16.** مراقبة غاز الرادون والمياه الجوفية لمطمر سطحي.

## خبرة هيئة الطاقة الذرية السورية في مجال المواد المشعة الطبيعية في صناعة النفط والغاز

اكتشفت مشكلة المواد المشعة الطبيعية في حقول النفط السورية عندما أجرى قسم الوقاية والأمان قياسات مبدئية سنة 1987، وتابعت الهيئة تركيز جهودها على مختلف الأصعدة وتم لها، بالتنسيق مع شركات النفط في العام 1996 وبصفتها الجهة الرسمية الوحيدة المسؤولة عن تتبع أمور الإشعاع في سورية، الولوج في الدراسة الميدانية لحجم المشكلة، فأرسلت فرقاً متخصصة إلى الحقول وإلى إدارات شركات النفط العاملة في سورية لشرح مخاطر وجود المواد المشعة الطبيعية في خطوط إنتاج النفط والغاز وفي المناطق الملوثة وتأثيرها على العاملين وعموم الناس ووضعت البرامج المناسبة لإزالة التلوث ومعالجة التربة الملوثة، كما وضعت الحدود والمعايير المتعلقة بالمواد المشعة الطبيعية.

ونظراً لتراكم المعدات النفطية الملوثة بالمواد المشعة الطبيعية لجأت شركة الفرات للنفط إلى بناء محطة لإزالة الرواسب الحرشفية بفعل الماء المضغوط وفقاً لرخصة بناء وتشغيل خاصة منحتها الهيئة للشركة، ولقد شغلت المحطة في بادئ الأمر لمدة تقارب العام بخبرات أجنبية بإشراف هيئة الطاقة الذرية السورية التي ساهمت مع شركة الفرات للنفط في تخفيض تكلفة التنظيف عن طريق إحلال الكوادر الوطنية محل الكوادر الأجنبية في حقول النفط السورية، وقد تمكنت الهيئة من تدريب ستة وعشرين مهندساً ومهندساً مساعداً لتشغيل المحطة وصيانتها.

اكتسبت هيئة الطاقة الذرية الخبرة الواسعة منذ العام 1986 في مجال التعامل مع المواد المشعة الطبيعية في حقول النفط حيث أبرمت عقوداً واتفاقيات مع العديد من الشركات العاملة في مجال النفط داخل سورية وخارجها وقدمت الخدمات في مجال التدريب وإجراء المسوحات الإشعاعية لحقول النفط وإنشاء محطات لتنظيف المعدات النفطية، ونذكر من الشركات التي قدمت الهيئة لهم الخدمات خارج سورية شركة تنمية نفط عمان في سلطنة عمان وشركة دليل للنفط وشركة أوكسي للنفط في سلطنة عمان وشركة تطوير للنفط في مملكة البحرين.

## المراجع


المصري م س (2004). الدليل الإرشادي للتعامل المأمون مع المواد المشعة الطبيعية في صناعة النفط والغاز، منشورات هيئة الطاقة الذرية السورية، دمشق.

عثمان إ، المصري م س (2010). النشاط الإشعاعي البيئي، منشورات هيئة الطاقة الذرية السورية، دمشق.

- Al-Masri MS, Suman H (2003). NORM waste management in the oil and gas Industry: The Syrian experience. J Radioanal Nucl Chem 256: 159-162.

- Al-Masri MS, Aba A (2005). Distribution of scales containing NORM in different oilfields equipment. J Appl Radiat Isot 64/4, 457-463, 2005.

- American Petroleum Institute (2006). Bulletin on management of naturally occurring radioactive materials (NORM) in oil and gas production, API Bulletin E2, Second Edition.

- Atomic Energy Commission of Syria (AECS) (1998). Exemption, clearance and treatment levels for NORM contaminated soil in the oilfields, Administrative Council Decision No. 441/98, Damascus.

- Atomic Energy Licensing Board (AELB) (2020). LEM/TEK/76 Sem.1 19 Ogos, Criteria for siting of disposal facility for waste containing naturally occurring radioactive material (NORM), Malaysia.

- International Association of Oil & Gas Producers IAOGP (2016). Guidelines for the management of naturally occurring radioactive material, http://www.ogp.org.uk/pubs/412.pdf

- International Atomic Energy Agency (2004). Extent of environmental contamination by naturally occurring radioactive materials (NORM) and technological options for mitigation, Technical Report No. 419. Vienna.

- International Atomic Energy Agency (2004). Radiation and waste safety in the oil and gas industry, IAEA Safety Report No.34, Vienna.

- International Atomic Energy Agency (2013). Management of NORM residues, TECDOC-1712, Vienna.

- International Atomic Energy Agency (2014). Safety standards specific safety guide No. SSG-31 Monitoring and surveillance of radioactive waste disposal facility, Vienna.

- International Atomic Energy Agency (IAEA) (2014). Near surface disposal facilities for radioactive waste, Specific Safety Guide No. SSG-29, Vienna, IAEA.

- International Atomic Energy Agency. (2013). Management of NORM residues, IAEA TECDOC 1712.

- Ireland Environmental Protection Agency. (2000). Landfill Manuals-Landfill Site Design, Wexford, EPA.

- Michele P, Valerio M, Emanuele B, Leonardo P, Paolo A (2012). Decommissioning and remediation of NORM/TENORM contaminated sites in oil and gas. Chem Eng Transact 28.

- Othman I, Al-Masri MS (2004). Disposal strategy for NORM waste generated by the Syrian oil industry. In: A Paper Presented at the International Symposium on the Disposal of Low Activity Waste. 13-17 December 2004, Cordoba, Spain.

- Petroleum Development Oman L.L.C (2014). Specification for NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials), Document ID: SP-1170.

تأليف: **د. محمد سعيد المصري**، قسم الوقاية والأمان، هيئة الطاقة الذرّية السورية.

# الطحالب كخيار مستقبلي واعد لتوليد الهدروجين الحيوي

*إن الطبيعة غير المتجددة للطاقة الأحفورية والتلوث البيئي الناجم عن استخدامها مثل الضباب تجعل من الملّح للغاية تطوير طاقة متجددة نظيفة فعالة، وأمام هذا التحدي يعدّ الهدروجين اليوم من مصادر الطاقة الواعدة في المستقبل في العالم حيث يخف تلوث الهواء ويتوقف خطر الإنذار العالمي، كما يؤمن أيضاً حماية البيئة بطريقة اقتصادية مستدامة، وقد تنوعت وتعددت طرق إنتاج الهدروجين حول العالم ولعل استعمال الطحالب الخضراء الدقيقة كان الأمثل بينها. إن توليد الهدروجين من الطحالب الخضراء الدقيقة ليس فكرة وليدة العصر؛ فمنذ الثلاثينيات بدأ توليد الهدروجين من الطحالب الخضراء الدقيقة كفكرة لكنها ما لبثت أن تحولت مع تطور التكنولوجيا إلى واقع لم يعد بالإمكان الاستغناء عنه كمصدر بديل للطاقة، وقد أدت الهندسة الوراثية دوراً مهماً وفعالاً في زيادة كفاءة إنتاج الهدروجين الحيوي من الطحالب الدقيقة.*

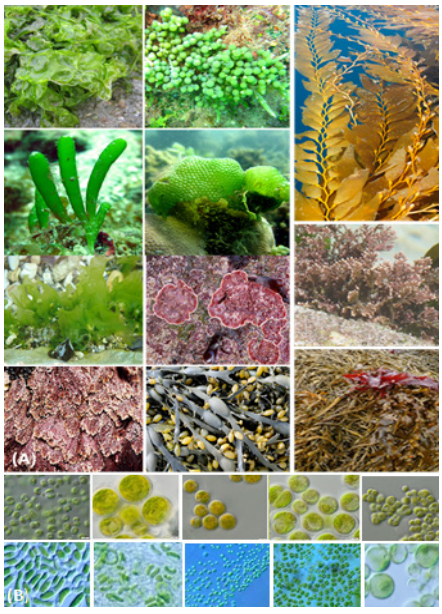
**الكلمات مفتاحية: الطحالب، الوقود، الهدروجين، التخمر، التحلل الضوئي.**

## مقدمة

تنتمي الطحالب algae إلى المملكة النباتية وتعرف عموماً بالنباتات الخضرية وأحياناً بالنباتات اللازهرية، إذ تقوم بعملية الاصطناع الضوئي بوساطة آلية خضرية بسيطة نسبياً تسمى thalle (مشرية أو ثالوس) يعتمد عليها أيضاً كوسيلة في التصنيف؛ حيث إن الآلية الخضرية يمكن أن تختلف ضمن ما يسمى thallophytes (المشريات) مع الفطور دون أن يؤثر هذا الاختلاف على الاصطناع الضوئي، كما أنها تسلك سلوكاً معاكساً للنباتات الراقية، فهي لا تملك جذوراً وسوقاً وأوراقاً حقيقةً، وتضم الطحالب أكثر من 20000 ألف نوع تقسم بشكلٍ عام إلى مجموعات رئيسية اعتماداً على محتواها من الصبغات إلى طحالب خضراء وزرقاء وحمراء وبنية وأحياناً تدرج الزرقاء تحت قائمة الطحالب الخضراء المزرقة ويصعب تمييزها ضمن المجموعة الواحدة مورفولوجياً، لذلك غالباً ما يتم اللجوء إلى دراسات مجهرية لتعطي صورة أكثر وضوحاً عن الطحلب المراد دراسته، كما تقسم من حيث بنائها الهيكلي إلى طحالب دقيقة تتكون من خلية واحدة وهي مجهرية لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة وطحالب كبيرة يتكون نسيجها الخلوي من عدد كبير من الخلايا يمكن رؤيتها بالعين المجردة (الشكل 1). إن معظم الطحالب ذات نواة حقيقية eukaryotic ماعدا الطحالب الخضراء المزرقة، وتعد الطحالب الخضراء أكبر أقسام الطحالب وتضم حوالي 7500 نوع وتتنوع هذه الطحالب في شكلها فمنها ما هو مجهري وحيد الخلية ومنها ما يكون على شكل خيطي أو على هيئة شبكة من الأنابيب على سطح الماء وبعضها يكون على شكل مستعمرات، وتتكاثر الطحالب جنسياً ولاجنسياً (خضرياً).

تعيش الطحالب إما على اليابسة (كسطح التربة والصخور وجذوع الأشجار أو على بقايا الأخشاب المتحللة في الأماكن ذات الرطوبة العالية المنخفضة الإضاءة أو في الوسط المائي سواء في المياه العذبة كالأنهار والبحيرات عذبة المياه) أو في المياه المالحة كالبحار والمحيطات وتعرف الأخيرة عموماً بأعشاب البحر.

تتمتع الطحالب الكبيرة والدقيقة باستخدامات عديدة في الطب والصيدلة كمضاد بكتيري وفطري ومضاد للأكسدة ومضاد للتخثر ومضاد للسرطان ومضاد للفيروسات والالتهابات...) نظراً لغناها بالمركبات النشطة بيولوجياً كالفلافونيدات والسيتروئيدات والقلوئيدات والفينولات...، وتستخدم كغذاء للإنسان لغناها بالعديد من العناصر الغذائيّة مثل: البروتينات والحديد والمغنيسيوم والفوليك والفيتامينات خاصةً فيتامين B12 أو تستخدم كمتممات غذائية للإنسان خاصةً الطحالب البحرية الخضراء، إذ ينتشر استعمال هذا النوع من أنواع الغذاء في المناطق الساحلية المنتشرة في مناطق مختلفة من العالم، كما أنها تعدّ جزءاً رئيسياً من مكونات الأطعمة في العديد من المناطق الآسيوية ككوريا والصين واليابان، وتستعمل في الصناعة كالمشروبات والشامبو ومعاجين الأسنان ومستحضرات التجميل والآغار... وفي التغذية كغذاء للكائنات الحية الأخرى في الأنهار والبحار والمحيطات وعلى اليابسة مثل المواشي والدواجن، كما أنها مخصب للتربة نظراً لغناها بالمواد العضوية كسماد عضوي وتقوم بتحسين قوام التربة نظراً لغناها بالنتروجين، وتستخدم كمؤشر بيولوجي مفيد للتلوث بالمعادن الثقيلة في النظم البيئية وكذلك في إزالة المعادن الثقيلة من المناطق الملوثة، كما تساعد الطحالب في عملية التوازن البيئي لأنها تدخل في تكوين الشعاب المرجانية التي تحتوي على مركبات كيميائية ذات خصائص مفيدة.




**الشكل 1.** التنوع الحيوي عند أعشاب البحر **(A)** والطحالب الدقيقة **(B)**.

استعمل الإنسان منذ قديم الزمان أنواعاً مختلفة من الطاقة المتوافرة على سطح الكواكب، فقام بحرق الأخشاب ليصنع ناراً يطهو به طعامه ودفئاً لمسكنه وحماية نفسه من الأعداء، وقد استعمل لاحقاً قوة الرياح واستفاد من تدفق جريان الماء إضافةً إلى المياه الساخنة المتفجرة من الأرض، ثم انتقل إلى تجفيف الثمار وتقديد اللحوم تحت الشمس بل استفاد حتى من حركة البحر مداً وجزراً، وفي نهاية المطاف وصل إلى ما يعرف بالطاقات المتجددة، وهذا الأخير ليس بالشيء المستحدث إنما الجديد في هذا الشأن ما أصبح التقدم التكنولوجي يتيحه اليوم من استفادة مثلى لموارد الطاقة هذه، غير أن التقدم كثيراً ما يحمل معه مشاكل تتمثل في الأخطار البيئية التي قد تنجم عن الاستغلال المفرط لموارد الطاقة المتجددة، وتتلخص هذه الأخطار بالتلوث الذي يمكن أن يصيب الهواء والمياه الجوفية إضافةً إلى كسر نواميس الطبيعة وتخريب توازناتها الأزلية.

لقد كان قطع إمدادات البترول العربي عن الغرب إبان حرب 1973 حافزاً لقيام مراكز البحوث العالمية هناك للبحث عن البديل، والآن يلوح في الأفق واقع ينذر بقرب نضب البترول المختزن في باطن الأرض بعد عقود طويلة من الاعتماد عليه كمصدر للطاقة.

يعدّ غاز الهدروجين الوقود المثالي في العالم حيث يخف تلوث الهواء ويتوقف خطر الإنذار العالمي كما يؤمن أيضاً حماية البيئة بطريقة اقتصادية مستدامة، حيث يمكن للهدروجين والكهرباء أن يشكلا فريقاً لتوفير خيارات جذابة في النقل وتوليد الطاقة. إن تفاعل هذين النمطين من الطاقة يقترح استخدام هدروجين الموقع لتوليد الطاقة الكهربائية مع خدمة تحويل الطاقة الكهربائية في نقل الطاقة وتوزيعها واستخداماتها مع توليد الهدروجين، كل ذلك يشكل ضرورة ملحة، وتكمن مشكلة التحدي في خلق الهدروجين كمصدر للطاقة مستقبلاً في إنتاج كميات كبيرة من غاز الهدروجين صديقة للبيئة وقابلة للتجدد، وهكذا فإن العمليات أو الإجراءات التي هي حالياً مجرد أفكار ومفاهيم في الطبيعة أو في مرحلة التطوير والتحسين مخبرياً بحاجة إلى تشجيع واختبار جدوى أو تطبيقاتها الأخرى بهدف تسويقها.

بالنظر إلى حساسية الأكسجين لأنزيم هيدروجيناز الحديد Fe-hydrogenase في الظروف البيئية للأكسجة السائدة على الأرض شكّل تساؤلاً يحتاج للإجابة فيما إذا كان الهدروجيناز مجرد بقايا من الماضي التطوري لكلوربلاست الطحالب الخضراء أو إذا كان هذا الأنزيم وعملية التمثيل الضوئي يمكن أن يُستخدما لتوليد غاز الهدروجين لأغراض تجارية. ومع ذلك فإن قدرة الطحالب الخضراء على توليد غاز الهدروجين من خلال عملية التمثيل الضوئي قد لفت أنظار الباحثين واهتمامهم لما للعملية من أهمية عملية جوهرية، يعود اختيار الطحالب كمصدر لإنتاج الهدروجين لما تتمتع به من خصائص فريدة، فهي أسرع النباتات نمواً على سطح الكرة الأرضية كما أنها تتمتع بقدرة هائلة على إنتاج أنواع مختلفة من الطاقة، وقد أشارت دراسات علمية إلى أهمية الطحالب كمصدر مهمّ لتوليد الطاقة القابلة للتجديد متضمنة بذلك إنتاج الهدروجين الحيوي والبيوغاز والبيوديزل إضافة إلى أهميتها كمنتجات اقتصادية يمكن استخدامها في مستحضرات التجميل وكمركبات حيوية فعالة وكغذاء.

تمثل ذرات الهدروجين نسبة 90% من إجمالي الذرات الموجودة في الكون، وتشكل الوقود الذي تعمل به الشمس والنجوم جميعاً والهدروجين ليس ساماً وغير محدود الكمية، لأنه يدخل في التكوين الكيميائي لكل شيء موجود على وجه التقريب، ولاسيما الماء الذي يعد غنياً بالهدروجين، ففي ساعة واحدة تسقط على الأرض كمية من الأمطار أو الثلوج تكفي لسد احتياجاتنا من الطاقة عشرات الآلاف من الساعات.

تكمن أهمية إنتاج الهدروجين من الطحالب في النقاط التالية:

- اتجاه واعد لإنتاج وقود حيوي مستقبلاً.
- اتجاه مبشر لحل المشاكل البيئية المرتبطة بالوقود الحجري.
- مصدر جذاب للطاقة بفضل حقيقة أنه قابل للتجديد وصديق للبيئة كونه لا ينتج غاز $CO_2$ من احتراقه وبذلك يقلل من تلوث الهواء.
- التكلفة الاقتصادية المنخفضة مقارنة مع مصادر أخرى للطاقة كالوقود الحجري مثل الغاز الطبيعي أو الغازولين.

## لماذا الطحالب الخضراء؟

يتناقص حجم الكلوروفيل في الأجزاء الهوائية للطحالب الخضراء إلى أدنى حدٍّ ممكنٍ أو ينقطع بهدف زيادة كفاءة تحويل النشاط البيولوجي النباتي الشمسي وإنتاج الهدروجين، إذ يقلل حجم الكلوروفيل في الأجزاء الهوائية للطحالب الخضراء من امتصاص وهدر التبذير في الإشعاع الشمسي بوساطة الخلايا الفردية مؤدياً بذلك إلى كفاءة أفضل استخدام وأفضل إنتاجية للاصطناع الضوئي بزراعة الكتلة الحية للطحالب الخضراء. وتجذب الطحالب الاهتمام الكبير نتيجة لإمكانيتها الإنتاجية التي تزيد عشر مرات عن الذرة المنتجة للإيثانول أو فول الصويا المستخدم في صنع وقود الديزل الحيوي لكل دونمين تقريباً، إضافة إلى ذلك قد تنمو الطحالب في الأراضي القاحلة والمياه الآسنة، حيث إن إنتاج الوقود لن يتنافس مع إنتاج الغذاء، كما أن الطحالب شديدة الاستهلاك لثاني أكسيد الكربون لدرجة يمكنها القيام في منع بعض هذا الغاز من المساهمة في الاحتباس الحراري، والذي يعد سبباً مكوناً لهذه الظاهرة. ولكن الجهود الرامية إلى الهندسة الوراثية للطحالب التي تعني عادة ربط الجينات مع الكائنات الحية الأخرى تثير قلق بعض الخبراء لأن الطحالب تؤدي دوراً حيوياً في البيئة، إذ إن الكائنات الضوئية وحيدة الخلية تنتج الكثير من الأكسجين في الأرض وهي أساس السلسلة الغذائية البحرية. وحسب العلماء فإن 3% من مياه السواحل على مستوى العالم يمكن أن تسمح بنمو طحالب تكفي لتعويض 270 مليار لتر من

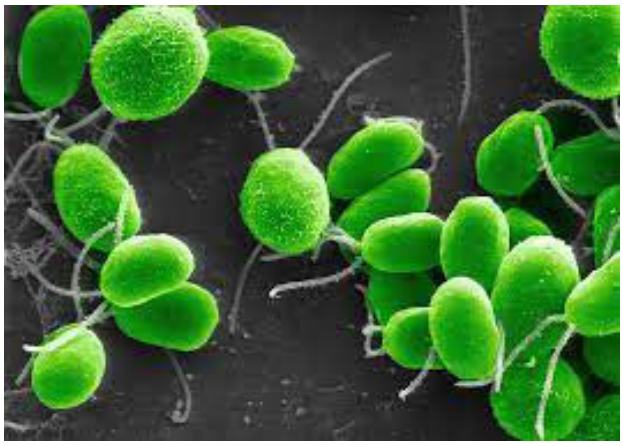
الوقود التقليدي ويكفي أن نعلم أن ما يسقط من أشعة الشمس على 1% من مساحة الصحراء الكبرى يكفي لتزويد العالم بأسره بحاجته من الكهرباء.

## إنتاج الهدروجين

إن الطبيعة غير المتجددة للطاقة الأحفورية والتلوث البيئي الناجم عن استخدامها مثل الضباب تجعل من الملحّ للغاية تطوير طاقة متجددة نظيفة فعالة، وباستخدام الكتلة الحيوية للطحالب الدقيقة كمصادر بديلة لطاقة المواد الخام مثل الهدروجين الحيوي يمكن إنتاج الميثان عن طريق التخمر والتمثيل الضوئي، وعلى عكس الطاقة الشمسية التي لها مساوئ انخفاض كثافة الطاقة وعدم الاستقرار وصعوبة التخزين، فإن الهدروجين الحيوي هو واحد من مصادر الطاقة المثالية الجديدة في الوقت الحاضر. وللاستفادة من الطحالب الدقيقة آفاق جذابة مختلفة نظراً للكتلة الأحيائية المتجددة وسهولة توسيع نطاق التكنولوجيا. وقد أدى التأثير السلبي لمنتجات احتراق الوقود الأحفوري على البيئة واستنفادها كطاقة غير متجددة إلى تسريع وتيرة تحول الطاقة في مختلف البلدان. وقد بدأ الباحثون دراسة الطاقة الجديدة النظيفة والفعالة ورخيصة الثمن والمواد الخام لإنتاج طاقة جديدة. كما تمت دراسة الطحالب الدقيقة باعتبارها مصدر طاقة حيوية معترف به حالياً تنتج الكتلة الحيوية والوقود الحيوي السائل مثل وقود الديزل الحيوي والإيثانول الحيوي على نطاق واسع، ومع ذلك فإن استهلاك الطاقة في عملية إعداد الوقود الحيوي السائل هو في كثير من الأحيان أكثر بكثير من الطاقة اللازمة لتحويل المواد الخام للكتلة الحيوية إلى وقود غازي مثل الهدروجين الحيوي $H_2$ والميثان الحيوي مما يؤدي إلى انخفاض كفاءة تحويل الطاقة. إضافة إلى ذلك فإن منتجات الوقود الحيوي الغازية يمكن استخدامها بطرق متعددة مثل الغاز الطبيعي المضغوط للمركبات، كما يمكن حقنه في شبكة الغاز الطبيعي وتوليد طاقة الاحتراق المباشر عن طريق محركات الاحتراق الداخلي.

## تكنولوجيا إنتاج الهدروجين

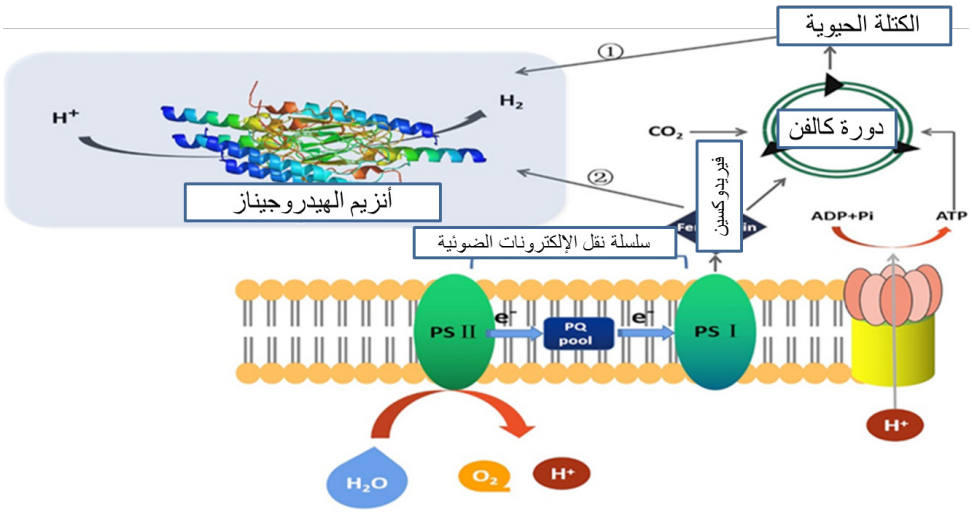
تعود فكرة إنتاج الهدروجين من الطحالب الخضراء الدقيقة إلى العالم الألماني هانز غافرون Hans Gaffron، حيث لاحظ في عام 1939 أثناء عمله في جامعة شيكاغو أن الطحالب التي كان يدرسها من نوع *Chlamydomonas reinhardtii*؛ وهي نوع من الطحالب الخضراء وحيدة الخلية كما يظهر الشكل 2، وكانت تتحول في بعض الأحيان من إنتاج الأكسجين إلى إنتاج الهدروجين، ولم يكتشف سبب هذا التغيير وقد فشل علماء آخرون لسنوات عديدة في محاولاتهم لاكتشافه. وفي أواخر التسعينيات اكتشف البروفيسور أناستاسيو ميليس Anastasios Melis الباحث في جامعة كاليفورنيا أنه إذا حرم وسط زراعة الطحالب من الكبريت فإنها ستتحول من إنتاج الأكسجين إلى إنتاج الهدروجين؛ فعندما تحرم الطحالب من الكبريت من وسط الزراعة يصبح الوسط لاهوائياً في الضوء بسبب الانخفاض المعنوي في نشاط $O_2$-evolving PSII المتبوع بإنتاج أتوماتيكي لـ Fe-dehydrogenase والاصطناع الضوئي للهدروجين. وقد بينت التحاليل البيوكيميائية أن عملية إنتاج الهدروجين هذه تكون مصحوبة بانخفاض تدريجي في محتوى النشاء والبروتين في الخلية.



**الشكل 2.** الطحلب الأخضر الدقيق *C. reinhardtii*.

بالمختصر تعتمد تكنولوجيا إنتاج الهدروجين الحيوي من الطحالب الدقيقة أساساً إما على عملية التخمر (التخمر في الضوء أو الظلام أو المدمج الضوء–الظلام) أو على عملية التمثيل الضوئي التي تتضمن التحلل الضوئي المباشر أو غير المباشر لإنتاج الهدروجين

الحيوي، كما هو مبين في الشكل 3. وتعتمد طريقة التخمر في الضوء (الشكل 4) على استخدام أشعة الشمس كمصدر للطاقة لعملية التمثيل الضوئي بدلاً من استخدام السكر، ويستخدم هذا المسار الضوء كمصدر للطاقة، لذلك فإن التخمر الضوئي مفيد مقارنة بالمسارات الأخرى.




**الشكل 3.** إنتاج الهدروجين الحيوي من الطحالب الدقيقة بوساطة طرق مختلفة.

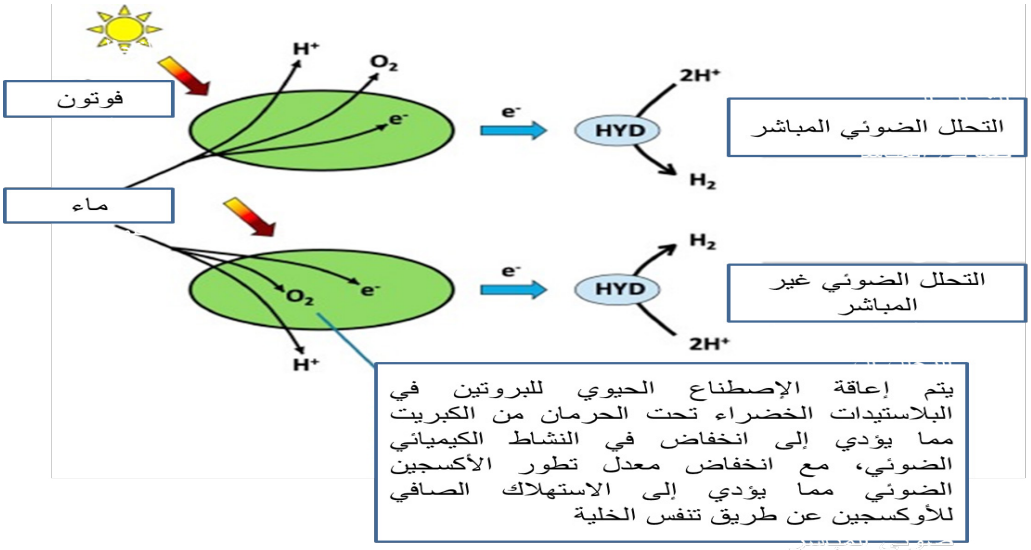
**الشكل 4.** إنتاج الهدروجين الحيوي من الطحالب الدقيقة بوساطة عملية التخمر في الضوء.

أما التخمر في الظلام فهو مسار مستقل عن الضوء يتم إجراؤه باستخدام المكروبات أو الطحالب الدقيقة. إن استخدام الطحالب الخضراء الغنية بالكربوهيدرات هو أكثر شيوعاً من استخدام الطحالب الدقيقة في إنتاج الهدروجين الحيوي في هذه العملية. ويعتمد هذا المسار على استخدم الركائز مثل الجلوكوز والسكروز والنشا والسليلوز لتعزيز معدل إنتاج الهدروجين، حيث إن 1 مول من الجلوكوز يعطي 12 مول من ذرة الهدروجين.

في عملية التحلل الضوئي يتم استخدام الطاقة الشمسية بواسطة PSII لتفكيك الماء إلى الأكسجين والطاقة وعامل إرجاع. يستخدم هذا العامل لإنتاج الهدروجين عن طريق إرجاع البروتونات باستخدام أنزيم النتروجيناز أو الهدروجيناز. تمر الإلكترونات المكتسبة من كسر المياه عبر سلسلة نقل الإلكترون التي تتكون من PSI & PSII ثم تنتج أدينوسين ثلاثي الفوسفات ATP ويرجع مركب الحديددوكسين. هذا ما يحدث في مختلف التفاعلات الأيضية لإنتاج الهدروجين، وتنقسم عملية التحلل الحيوي إلى مجموعتين: التحلل الضوئي المباشر وغير المباشر. إن الركائز الذاتية تنتج الإلكترونات التي تستخدم في التحلل الضوئي غير المباشر في حين يستخدم التحلل الضوئي المباشر الإلكترونات المنتجة من تقسيم الماء في PSII (الشكل 5).

في عملية التحلل الضوئي المباشر يتم تقسيم جزيئات الماء باستخدام أشعة الشمس كمصدر للطاقة في PSII، وبعد نقل الإلكترونات المتبقية إلى PSI يساعد الهدروجيناز على إنتاج الهدروجين دون توليد غازات الاحتباس الحراري الضارة، وهذه العملية تطلق أيضاً الأكسجين بشكلٍ متزامنٍ في الغلاف الجوي، أما في عملية التحلل الضوئي غير المباشر فيجرى مع الطحالب الدقيقة تحت ظروف لاهوائية، حيث يمكن للطحالب الدقيقة تحت هذه الظروف إنتاج الهدروجين الحيوي من خلال التخمر أو التنفس. إن التحلل الضوئي غير المباشر هو عملية ليست مستمرة حيث إن فترة الإضاءة تجعل النمو حساساً ضوئياً وتعيق تشكل أنزيم الهدروجيناز. وتتألف عملية التحلل هذه

من خطوتين: في الخطوة الأولى يتم إنتاج الأكسجين وتثبيت ثاني أكسيد الكربون بشكل طاقة كربوهيدرات كيميائية ولبيدات، والمرحلة الثانية هي نفسها المرحلة الأولى من الناحية الوظيفية ويستعمل فيها مفاعل ضوئي صغير محكم الإغلاق مع اصطناع غاز ثاني أكسيد الكربون الذي يوزع على مراحل في غياب التعرض للضوء، وتعتمد الإلكترونات المحررة من خلال عملية استقلاب الركيزة الأصلية (من أجل الإرجاع اللاضوئي) على استنزاف الأكسجين الذي يسبب سلسلة نقل الإلكترونات الأولية لتتوقف خلال الطور اللاهوائي، ويتم بعد ذلك نقل الإلكترون إلى أنزيم الهدروجيناز الناتج عن إنتاج الهدروجين الحيوي.




**الشكل 5.** إنتاج الهدروجين الحيوي من الطحالب الدقيقة بوساطة التحلل الضوئي المباشر وغير المباشر.

لهذا من الممكن تصميم المفاعلات الحيوية لإنتاج الهدروجين على نطاق واسع باستخدام الكائنات الحية الدقيقة، ويمكن تمييز المفاعلات الحيوية على أساس طبيعة إنتاج الهدروجين، وهي: المفاعلات الحيوية مع إنتاج الهدروجين في الظلام بواسطة البكتريا عن طريق تفاعل تحول ماء–غاز أو التخمر والمفاعلات الحيوية الضوئية مع إنتاج الهدروجين من $H_2O$ باستخدام الضوء الشمسي بوساطة البكتريا الزرقاء أو الطحالب الخضراء. إن الهدروجين المنتج من تفاعل تحول ماء–غاز أو من الجلسرين هو نظيف للحقن في خلايا الوقود، وتستخدم المخمرات أو المفاعلات الحيوية مع الخلايا الرادكة fixed cells لإنتاج الهدروجين في الظلام، وتتركز جهود البحث على تصميم المفاعلات الضوئية الأنبوبية أو أكياس من البلاستيك لدمج الطحالب الخضراء والبكتريا الزرقاء.

عموماً تم تطوير المفاعلات الحيوية لإنتاج $H_2$ من الطحالب الدقيقة بطرق وأشكال مختلفة ولأغراض مختلفة سواء للبحث العلمي أم للتجارة على نطاق واسع كما هو مبين في الشكلين 6 & 7.

**الشكل 6.** نماذج مصغرة لإنتاج الهدروجين من الطحالب الدقيقة مخبرياً بهدف البحث العلمي.

**الشكل 7.** إنتاج الهدروجين من الطحالب الدقيقة في مفاعلات حيوية باستعمال أشعة الشمس المباشرة على نطاق واسع.

وبمقارنة كفاءة الطرق المختلفة لإنتاج الهدروجين من الطحالب الدقيقة تبيّن أن أعلى مردودية لوحظت مع السلالات الطحلبية المعدلة وراثياً متبوعةً بنظام التخمر المدمج ضوء–ظلام والتحلل الضوئي غير المباشر والتخمر في الظلام والتخمر في الضوء وفي نهاية المطاف التحلل الضوئي المباشر. وبشكل أكثر تحديداً هناك نظام التمثيل الضوئي PSII المعتمد على مسار إنتاج $H_2$، والحرمان من المغذيات في مسار إنتاج $H_2$ أي نقص الكبريت والنتروجين والفوسفور والمغنيسيوم ومسار إنتاج الهدروجين الحيوي اللاهوائي تحت التخمر في الظلام، وتبين أن أكثر الطرق فعالية لإنتاج الهدروجين الحيوي هي حرمان الطحالب من الكبريت مقارنة بالحرمان من النتروجين والفوسفور والمغنيسيوم؛ إذ إن نقص الكبريت يثبط نشاط PSII ومعدل إنتاج الأكسجين، ويستهلك التنفس الطبيعي للميتوكوندريا الأكسجين، مما يؤدي إلى تنشيط الهدروجين في بيئة لاهوائية لتحفيز تطور الهدروجين الحيوي.

اقترح الهدروجين ليكون أحد بدائل الطاقة البديلة، ومن المتوقع أن يحل مع منتصف القرن الحادي والعشرين بديلاً للنفط بوصفه عملة العالم الأساس للطاقة الجاهزة عند الطلب، فيحد بذلك من تلوث الهواء والأمراض التنفسية الناجمة عن هذا التلوث كما أنه سيحد من السبب الرئيسي للاحتباس الحراري والتغير المناخي.

## إنتاج الهدروجين من الطحالب مقارنةً مع نظيره من الوقود الأحفوري

بمقارنة بسيطة بين إنتاج الهدروجين من الطحالب مع نظيره من الوقود الأحفوري نجد أنه في حالة الطحالب فإن المادة الخام هي أنواع مختلفة من الطحالب الدقيقة بينما في الوقود الأحفوري فهي الفحم والنفط والغاز الطبيعي، أما عمليات التحضير لإنتاج الهدروجين الحيوي من الطحالب الدقيقة فتتضمن التخمر، فعلى سبيل المثال يتم إنتاج الهدروجين الحيوي بالضوء أو الظلام أو الدمج ضوء–ظلام أو من خلال عملية التمثيل الضوئي مثل التحلل الضوئي البيولوجي المباشر أو غير المباشر للهدروجين الحيوي ودمج طرق مختلفة من الهندسة الوراثية. أما إنتاج الهدروجين في الوقود الأحفوري فهو يستهلك طاقة أكثر من الطاقة اللازمة لتحويل المواد الخام للكتلة الحيوية إلى وقود غازي مثل الهدروجين الحيوي والإيثان الحيوي. ومن حيث الخصائص فإن إنتاج الهدروجين من الطحالب يعد طريقة متجددة وسهلة ولا تتطلب مساحات واسعة من الأراضي وارتفاع قيمة السعرات الحرارية للهدروجين، في حين هي محدودة وغير متجددة في حالة الوقود الأحفوري. ومن حيث التأثير البيئي؛ ففي حالة الطحالب ينتج عن احتراق الهدروجين المياه، وهي غير سامة وخالية من التلوث ونظيفة وقابلة لإعادة التدوير، أما في حالة الوقود الأحفوري فيسبب الإنذار العالمي والضباب وتغير المناخ وتلوث المسطحات والحياة المائية وإطلاق كمية كبيرة من غازات الاحتباس الحراري CO و $CH_4$ و $N_2O$ و $CO_2$. أما بالنسبة للتكلفة فتتراوح بين 10-20 USD/GJ إذا افترضنا أن 1 kg من $H_2$ لديها طاقة مكافئة لـ 3.785 kg من البنزين، في حين أنها غير مستقرة ومتقلبة بشكل غير منتظم مقرونة مع ارتفاع الأسعار بسبب محدودية الموارد في حالة الوقود الأحفوري.

## طرق مختلفة لتحسين كفاءة إنتاج الهدروجين الحيوي

هناك طرق مختلفة يمكن من خلالها تحسين كفاءة إنتاج الهدروجين الحيوي مثل عملية دمج البكتريا–الطحالب الدقيقة وإضافة sodium bisulfite ($NaHSO_3$) والزراعة مختلطة التغذية mixotrophic culture التي تعتمد على إضافة إسيتات الصوديوم كمصدر للكربون وإنتاج الكربوهيدرات لإنتاج الهدروجين بالتخمر في الظلام وشل حركة الطحالب الدقيقة لتحسين استخدام الضوء.

في عملية دمج البكتريا–الطحالب الدقيقة، تتم زراعة الطحالب الدقيقة والبكتريا تحت شروط نقص الكبريت لتحسين كفاءة إنتاج الهدروجين الحيوي عن طريق تقصير المرحلة الهوائية فوجود البكتريا يساعد على استهلاك الأكسجين، وبالتالي تسريع دخول مرحلة التمثيل الغذائي اللاهوائي. إضافة إلى ذلك، أظهرت الدراسات أن معدل إنتاج الهدروجين الحيوي يرتبط بحجم خلايا الطحالب الدقيقة، على سبيل المثال فإن صغر حجم الخلايا لديه معدل إنتاج أعلى من الهدروجين الحيوي؛ لذا يكون في هذه الطريقة من الزراعة لـ *Chlamydomonas* و*Chlorella* معدل إنتاج الهدروجين الحيوي أعلى عند الجنس *Chlorella* مقارنةً مع نظيره *Chlamydomonas* بسبب حجم خلايا *Chlorella* الأصغر نسبياً.

إضافة إلى ذلك يمكن أن يؤدي تعايش البكتريا والطحالب الدقيقة إلى زيادة نمو الطحالب الدقيقة بشكل أكثر فعالية، ويمكن استخدام الكتلة الحيوية التي يتم الحصول عليها بعد الزراعة المشتركة في إنتاج الميثان الذي يعد المكون الرئيسي للغاز الحيوي، في حين أن إضافة $NaHSO_3$ يمكن أن تقلل من معدل إطلاق الأكسجين في التمثيل الضوئي وتوفير بيئة لاهوائية وتنشيط الهدروجيناز وتحفيز تطور الهدروجين الحيوي. إلى جانب ذلك ومن خلال تحسين تصميم المفاعل الحيوي يمكن زيادة كفاءة الاصطناع الضوئي للطحالب الدقيقة وبالتالي تعزيز معدل إنتاج الهدروجين الحيوي.

## الهندسة الوراثية لزيادة إنتاج الهدروجين الحيوي

كان للهندسة الوراثية عند الطحالب الدقيقة دور كبير ومهمٌّ في تحسين كفاءة إنتاج الهدروجين وذلك عن طريق طفرة عشوائية أو تصميم هيدروجيناز جديد لجعله أكثر مقاومة للأكسجين، ولكن للأسف –حتى الآن– لم تجعل الأبحاث الحالية الهيدروجيناز فعالاً في تحمُّل الأكسجين، كما يمكن الحفاظ على نشاط الهدروجيناز إذا كان يمكن القضاء على وجود الأكسجين في الخلايا، وذلك لأن pyruvate oxidase عند بكتريا *Escherichia coli* يقوم بتحفيز الأكسدة من بيروفاتي oxidative decarboxylation of pyruvate، والتي سوف تستهلك الأكسجين، ولذلك قام الباحثون بإقحام pyruvate oxidase مع محفزات جينات *E. coli* داخل جينوم الكلوروبلاست لطحلب *C. reinhardtii* الأمر الذي سيؤدي إلى مضاعفة إنتاج الهدروجين ثلاث مرات في سلالة الطحلب المعدلة وراثياً.

## الاستنتاجات

على الرغم من التقدم التكنولوجي الذي تم التوصل إليه حالياً بهدف تحسين كفاءة إنتاج الهدروجين الحيوي من الطحالب الخضراء الدقيقة، ومع ذلك، فإن المستوى الحالي لإنتاج الهدروجين الحيوي لا يزال غير كافٍ لاستخدامه كطاقة صناعية وتجارية وعالمية، ولا تزال هناك حاجة إلى مزيد من الاستكشافات لزيادة معدل إنتاج الهدروجين الحيوي بشكل فعال من الطحالب الدقيقة. وفي هذا الصدد، من الأهمية بمكان مواصلة التحقيق في تنظيم مسارات الأيض اللاهوائية للطحالب الدقيقة. إضافة إلى ذلك لا تزال كيفية تحسين نظام التخمر الحالي لإنتاج الهدروجين الحيوي الفعال بحاجة إلى مزيد من البحث.

## المراجع


- Ahmed SF, Rafa N, Mofijur M, Badruddin IA, Inayat A, Ali MS, Rafa N, Khan TMY. (2021). Biohydrogen production from biomass sources: Metabolic pathways and economic analysis. Front Energy Res 9: 753878.

- Beer LL, Boyd ES, Peters JW, Posewitz MC (2009). Engineering algae for biohydrogen and biofuel production. Curr Opin Biotechnol 20(3): 264-71.

- Melis A, Happe T (2001). Hydrogen production. Green algae as a source of energy. Plant Physiol 127: 740-748.

- Pal P, Chew KW, Yen H-W, Lim JW, Lam MK, Show PL (2019). Cultivation of oily microalgae for the production of third-generation biofuels. Sustainability 11: 5424.

- Wang K, Khoo KS, Chew KW, Selvarajoo A, Chen W-H, Chang J-S, Show PL (2021). Microalgae: The future supply house of biohydrogen and biogas. Front Energy Res 9: 660399.


تأليف: **د. باسل صالح**، قسم البيولوجيا الجزيئية والتقانة الحيوية، هيئة الطاقة الذرّية السورية.

# الوعي عند النبات

تمتلك النباتات حواس موازية لحواس الإنسان، فهي قادرة على الإحساس والاستجابة على النحو الأمثل للعديد من المتغيرات البيئية مثل الضوء والماء والجاذبية الأرضية ودرجة الحرارة وتركيب التربة الكيميائي والفيزيائي والمغذيات والسموم والمكروبات والحيوانات العاشبة التي تلتهمها والإشارات الكيميائية الآتية من النباتات الأخرى، كما أنها تشعر بوجود عائق أمام تقدم جذورها في التربة حتى قبل أن تصبح بتماس مباشر مع هذا العائق، فيغير الجذر طريقه لتفادي هذا العائق، هذه السلوكيات المعقدة لا يمكن تفسيرها بشكل كامل من خلال آليات الكيمياء الحيوية المألوفة، وكأن هناك نظام معالجة معلومات يشبه الدماغ يقوم بدمج البيانات وتنسيق الاستجابة السلوكية للنبات، وقد ظهرت حديثاً أبحاث عديدة تسعى إلى فهم كيفية معالجة النباتات للمعلومات التي تحصل عليها من بيئتها لاستمرار حياتها وتطويرها والتكاثر بالشكل الأمثل وفهم كيفية إدراك النباتات لظروفها والاستجابة للمدخلات البيئية بطريقة متكاملة، حيث تظهر النباتات ذكاءً واضحاً في قدرتها الجوهرية على معالجة المعلومات من المحفزات الحيوية واللاحيوية التي توجه النبات لاتخاذ القرارات المثلى حول نشاطه المستقبلي في بيئة معينة.

الكلمات المفتاحية: البيولوجيا العصبية النباتية، التراسل بين النباتات، الحواس النباتية، الوعي.

## مقدمة

إن تصورنا الجامد عن الذكاء وارتباطه بالخلايا العصبية إضافة إلى ميلنا إلى ربط السلوك بالفعل والحركة يمنعنا من إعطاء التقدير الكافي لإمكانيات النبات وذكائه، فبطريقة ما يجمع النبات كل هذه المعلومات حول بيئته ويدمجها، ثم يقرر ما سيفعل؛ فالنباتات تمتلك شيئاً غريباً غير عصبي ومع ذلك لا يزال يناسب معيار الوعي الأساسي للتجربة الأولية للحياة، إنه شيءٌ يشبه أن تكون شاعراً بوجودك فعلاً ولك إرادةٌ حرة.

يتطلب تحديد موقع الغذاء وتحديد التهديدات المحيطة بالنباتات وجود جهاز حسي متطور للغاية. طورت النباتات ما بين خمس عشرة وعشرين حاسة مميزة، بما في ذلك نظائرها الخمسة المتعارف عليها في المملكة الحيوانية وهي حاسة الشم والذوق؛ إذ تستشعر المواد الكيميائية الموجودة في الهواء أو في أجسامها وتستجيب لها، وحاسة البصر فهي تتفاعل بشكل مختلف مع الأطوال الموجية المختلفة للضوء وكذلك مع الظل، وحاسة اللمس فالجذر يعرف عندما يصادف جسماً صلباً. كما وجد العلماء أن أطراف جذور النبات، إضافةً إلى استشعار الجاذبية والرطوبة والضوء والضغط والصلابة يمكنها أيضاً استشعار الحجم والنتروجين والفوسفور والأملاح والسموم المختلفة والمكروبات والإشارات الكيميائية من النباتات المجاورة، ويمتلك النبات هذه سلوكيات المتطورة لكنها مثل معظم السلوكيات النباتية هي سلوكيات غير مرئية أو بطيئة جداً عند مقارنتها بالسلوك الحيواني؛ لذلك من الصعب ملاحظتها بسهولة.

في عام 1973 نُشر كتاب من تأليف بيتر تومبكينز Peter Tompkins وكريستوفر بيرد Christopher Bird كان عنوانه "الحياة السرية للنباتات"، لاقى هذا الكتاب إقبالاً جماهيرياً ملفتاً حتى أنه وصل إلى قائمة صحيفة نيويورك تايمز لكونه أكثر الكتب تداولاً، ادعى المؤلفان أن النباتات كائنات واعية وتشعر بالعواطف الإنسانية، وتفضل الموسيقى الكلاسيكية عن موسيقى الروك آند رول، ويمكن أن تستجيب للأفكار ومشاعر البشر وتتفاعل معها، وقد قدم هذا الكتاب مزيجاً مخادعاً من علم النبات والتجارب العلمية المفبركة لكنه حاول التركيز على فكرة قداسة الطبيعة وإبداعها، ورغم أن هذا الكتاب كان فاقداً لمصداقيته من الناحية العلمية لكنه ترك بصمته الكبيرة من الناحية الثقافية، فأخذ الأميركيون يتحدثون إلى نباتاتهم ويعزفون لها موسيقى موزارت، ولا شك أن الكثيرين لا يزالون يفعلون ذلك حتى الآن، فهناك دائماً لمسة من الرومانسية في تفكيرنا ونظرتنا للنباتات. لقد أسر هذا الكتاب كما يبدو مخيلة القراء، فبدأت تتسرب إلى منطق التفكير البشري رؤية جديدة عن الطبيعة وعلاقتنا مع النباتات.

تمتلك النباتات حواس موازية لحواس الإنسان، فهي قادرة على الإحساس والاستجابة على النحو الأمثل للعديد من المتغيرات البيئية مثل الضوء والماء والجاذبية الأرضية ودرجة الحرارة وتركيب التربة الكيميائي والفيزيائي والمغذيات والسموم والمكروبات والحيوانات العاشبة والإشارات الكيميائية من النباتات الأخرى، كما أنها تشعر بوجود عائق أمام تقدم جذورها في التربة حتى قبل أن تصبح بتماس مباشر مع هذا العائق فيتفادى الجذر العائق ذلك بتغيير طريقه، هذه السلوكيات المعقدة لا يمكن تفسيرها بشكل كامل من خلال آليات الكيمياء الحيوية المألوفة، وكأن هناك نظام معالجة معلومات يشبه الدماغ يقوم بدمج البيانات وتنسيق الاستجابة السلوكية للنبات. قال العالم مانكوسو Mancuso: "نبات الفاصولياء يعرف بالضبط ما هو حوله في البيئة نحن لا نعرف كيف، ولكن هذه واحدة من خصائص الوعي، أنت تعرف موقعك في العالم، الحجر لا".

## استجابة النباتات السلوكية للمؤثرات البيئية

إن تحديد موقع الغذاء وتحديد التهديدات المحيطة يتطلب وجود جهاز حسي متطور للغاية. طورت النباتات ما بين خمس عشرة وعشرين حاسة مختلفة، بما في ذلك نظائرها الخمسة المتعارف عليها في المملكة الحيوانية، فهي تستشعر وجود المواد الكيميائية في الهواء أو في أجسامها وتستجيب لها بشكل مشابه لحاسة الشم والذوق عند الحيوانات، ويتفاعل النبات بشكل مختلف مع الأطوال الموجية المختلفة للضوء وكذلك مع الظل بما يشبه حاسة البصر، كما أن الجذر يعرف عندما يصادف جسماً صلباً أو عائقاً ما في تلمسه بما يشبه حاسة اللمس. لقد فتنت هذه القدرات الحسية لجذور النباتات العالم الشهير تشارلز داروين الذي أصبح في سنواته الأخيرة شغوفاً بشكل متزايد بالنباتات، فقد أجرى هو وابنه فرانسيس عشرات التجارب البارعة التي تعتمد على مراقبة النباتات، وقد تضمّن العديد منها تجارب على جذور النباتات الصغيرة، وقد تبين لدارون أن الجذر النباتي يمكن أن يستشعر الضوء والرطوبة والجاذبية وفرق الضغط والعديد من المؤثرات البيئية الأخرى، ثم يحدد مساره الأمثل للنمو. كان للجملة الأخيرة من كتاب داروين "قوة الحركة في النباتات" عام 1880 أثر ملهم على بعض علماء البيولوجيا النباتية: "ليس من المبالغة أن نقول إن قمة الجذر لها القدرة على توجيه حركات الأجزاء الأخرى المجاورة

في النبات، حيث يعمل الجذر كدماغ الحيوانات، ويتلقى الانطباعات من أعضاء الإحساس، ويوجه التحركات المتعددة". كان داروين ينظر للنبات كنوع من الحيوانات المقلوب رأساً على عقب، فدماغه في الأسفل تحت الأرض وأعضاؤه التناسلية موجودة في الأعلى.

وجد العلماء منذ ذلك الحين أن أطراف جذور النبات، إضافة إلى قدرتها على استشعار الجاذبية والرطوبة والضوء والضغط والأجسام الصلبة التي تعترض طريقها يمكنها أيضاً استشعار الفراغ والنتروجين والفوسفور والأملاح والسموم المختلفة والمكروبات والإشارات الكيميائية من النباتات المجاورة. إن الجذور التي على وشك مواجهة عقبة لا يمكن اختراقها أو مادة سامة ما تغيّر مسارها قبل الوصول إليها، وتغير الجذور سلوكها إذا كانت الجذور القريبة منها هي لنفس النبات أو عائدة لنبات آخر، فعادةً ما تتنافس النباتات على مساحة التغذية الجذرية المتاحة فيما بينها، ولكن عندما وضع الباحثون عدة نباتات من نوع *Cakile edentula* في الوعاء نفسه حدت النباتات من سلوكياتها التنافسية المعتادة وتحولت لسلوك المشاركة للموارد المتاحة.

بطريقة ما يجمع النبات كل هذه المعلومات حول بيئته ويدمجها، ثم "يقرر" ماذا سيفعل. يضع بعض العلماء علامات الاقتباس للإشارة إلى الاستعارة في كلمة "يقرر" في النبات، في حين يسقطها بعضهم الآخر عن قصد عند الحديث عن أي اتجاه بالضبط يقرر النبات توجيه جذوره أو أوراقه، فبمجرد أن يتوسع تعريف "السلوك" ليشمل أشياء مثل التحول في مسار الجذر أو إعادة تخصيص الموارد البيئية المتاحة أو إصدار مادة كيميائية قوية، تبدأ النباتات في الظهور كعناصر أكثر نشاطاً وذكاءً؛ فالنباتات تستجيب للإشارات البيئية بطرق أكثر دقة أو تكيفاً مما قد توحي به كلمة غريزة. يقول ريك كاربان Rick Karban عالم البيئة النباتية في جامعة كاليفورنيا: "النباتات تدرك المنافسين لها وتنمو بعيداً عنهم". كما شرح العالم ديفيس عندما سُئل عن مثال لصنع القرار في النبات: "إنهم أكثر حذراً عند مواجهة غطاء نباتي حي مقارنة بالأشياء غير الحية، ويستجيبون للمنافسين المحتملين قبل أن يتم تظليلهم والتفوق عليهم". إن هذه سلوكيات متطورة لكنها مثل معظم السلوكيات النباتية هي سلوكيات غير مرئية أو بطيئة جداً عند مقارنتها بالسلوك الحيواني؛ لذلك من الصعب ملاحظتها بسهولة.

## أثر الحياة اللاطئة sessile على تكيف النبات واستجابته للتأثيرات المحيطة

في الواقع، يمكن إرجاع العديد من القدرات المثيرة للإعجاب عند النباتات إلى مأزقها الوجودي الفريد ككائنات متجذرة في الأرض، فهي غير قادرة على التحرك (لاطئة) والتقاط الأشياء التي تحتاجها أو الانتقال إلى مكان آخر عندما تصبح الظروف غير مواتية في المكان الذي تنمو فيه، كما أن النباتات لا يمكن أن تهرب من أعدائها، وهي تؤكل كثيراً من قبل الحيوانات العاشبة، لذلك هي لا تحتوي على أعضاء متخصصة لا يمكن تعويضها عند فقدها، فقد يفقد النبات أكثر من 90% من جسمه دون أن يتسبب ذلك له بالموت، ولا يوجد شيء يوازي هذه المرونة في عالم الحيوان.

يستدعي نمط الحياة اللاطئة كما يسميه علماء الأحياء النباتية إدراكاً واسعاً ودقيقاً لبيئة النبات المباشرة، حيث يتعين على النبات أن يجد كل ما يحتاج إليه، وأن يدافع عن نفسه ضد الحيوانات التي تتغذى عليه والأمراض التي تصيبه والحشرات التي تتطفل عليه، في حين يظل ثابتاً في مكانه، وقد فرض هذا النمط على النبات تطوير موهبته غير العادية في الكيمياء الحيوية، والتي تفوق بكثير تلك التي لدى الحيوانات؛ فعلى سبيل المثال عندما تتغذى الظباء على أوراق أشجار الأكاسيا، تنتج هذه الأوراق مواد عفصية، الأمر الذي يجعلها غير شهية ويصعب هضمها، وعندما يكون الطعام نادراً ويكون تجول الظباء بين شجيرات الأكاسيا مفرطاً، تنتج أوراق هذه الأشجار كميات من السموم قد تكون كافية لدرجة قد تصل لقتل الحيوانات، وهناك أمثلة أخرى في الطبيعة؛ فعلى سبيل الذكر يوجد العديد من الأدوية من الأسبرين إلى المواد الأفيونية مشتقة من مركبات مصممة بواسطة النباتات كوسيلة دفاعية أو تحقق لها غرضاً ما كونها غير قادرة على التنقل والحركة أو الهروب، فقد تنشر النباتات مركبات جزيئية معقدة للإشارة إلى تعرضها لإجهاد ما أو ردع الأعداء وتسميمهم أو تجنيد الحيوانات لأداء خدمات مختلفة لهم، حيث وجدت دراسة نشرت في مجلة Science أن الكافيين الذي تنتجه العديد من النباتات قد لا يعمل كمواد كيميائية دفاعية كما كان يعتقد سابقاً فحسب بل يستعمله النبات في رحيقه كعقار مؤثر عصبياً، حيث يشجع الكافيين النحل على تذكر نبتة معينة والعودة إليها، مما يجعل النحلات المدمنات على الكافيين ملقحات أكثر إخلاصاً لهذا النبات وأكثر فعالية في التلقيح.

## التراسل بين النباتات

لقيت دراسة الإشارات التي تبعثها بعض النباتات لبعض اهتماماً في الأبحاث النباتية منذ أوائل الثمانينيات من القرن الماضي،

فالنباتات تتحدث بمفردات كيميائية لا يمكننا إدراكها أو فهمها بشكل مباشر. وقد أشارت عدة دراسات إلى أن بعض النباتات تنبعث منها مواد كيميائية متطايرة عندما تمضغ أو تصاب بطفيلي ما مشيرةً إلى الأوراق الأخرى لتهيئ دفاعاتها، وقد يتضمن الدفاع تغيير نكهة الورقة أو قوامها أو إنتاج سموم أو مركبات أخرى تجعل نسيج النبات أقل قابلية للهضم من قبل الحيوانات العاشبة التي تتغذى عليها، وهناك في الطبيعة أمثلة عديدة على هذا التواصل الكيميائي، حيث لاحظ بعض المزارعين أنه عندما يتم قص أوراق نبات الميرمية في الربيع، وهو أمر يحاكي هجوم الحشرات وقرضها لأوراق النبات الذي يؤدي إلى إطلاق مواد كيميائية متطايرة، فإن كلاً من النبات المقصوص وجيرانه غير المقصوصين يظهرون بشكل ملحوظ ضرراً أقل للحشرات خلال الموسم. يعتقد العالم كاربان أن النبات ينبه جميع أوراقه إلى وجود آفة، لكن جيرانه يلتقطون الإشارة أيضاً، ويتحركون ضد أي هجوم. قال كاربان: "نعتقد أن عشبة الميرمية تتنصت بشكل أساسي على بعضها، ووجد أنه كلما كانت النباتات أكثر ارتباطاً، زادت احتمالية استجابتها للإشارة الكيميائية، مما يشير إلى أن النباتات قد تظهر شكلاً من أشكال التعرف على الأقارب، فمساعدة أقاربك هي طريقة جيدة لتحسين احتمالات بقاء جيناتك على قيد الحياة. ربما يكون أذكى مثالاً على إشارات النبات يشمل تأثيراً على نوعين من الحشرات؛ الأول في دور الآفة والثاني كمبيد لها. إن العديد من الأنواع بما في ذلك الذرة والفاصولياء تنبعث منها نداء استغاثة كيميائية عندما تهاجمها اليرقات، والدبابير الطفيلية على بعد مسافة ما تستشعر تلك الرائحة، وتتبعها إلى النبات المصاب، وتشرع في تدمير اليرقات ببطء. يطلق العلماء على هذه الحشرات اسم "الحراس الشخصيين للنباتات".

## هل يمكن فعلاً أن يكون النبات ذكياً وواعياً؟

يصّر بعض علماء النبات على ذلك محتجين بكون النباتات من وجهة نظرهم تستطيع الإحساس والتعلم وحتى التذكر والتفاعل بطرق مألوفة لدى البشر؛ الأمر الذي قد يكون مريحاً للأشخاص الذين تحدثوا لفترة طويلة إلى نباتاتهم أو عزفوا لها الموسيقى.

إن سلوك النبات في حياته اليومية وردات فعله على الظروف والمتغيرات البيئية يتم تنسيقها عبر أجزاء الكائن الحي النباتي كلها مجتمعة عن طريق شكل من أشكال إرسال الإشارات المتكامل ونظام دقيق من الاتصال بين أجزاء النبات يتم عبره إرسال المحرضات البيولوجية وتحقيق الاستجابة المطلوبة، يشمل هذا النظام إشارات كهربائية تنتقل لمسافات طويلة وانتقال الأوكسينات ضمن الأنسجة الوعائية للنبات وإنتاج مواد كيميائية معروفة بكونها مرتبطة بالجهاز العصبي عند الكائنات الأرقى. إن النباتات تفعل ذلك دون أدمغة، وهذا بطريقة أو بأخرى شيءٌ مذهلٌ لأننا نفترض تلقائياً أننا بحاجة إلى دماغ لمعالجة المعلومات والتفكير واتخاذ القرار بما يجب عمله، لكن هذا الشيء غير موجود عند النبات.

إن إدراكنا المحدود للخلايا العصبية إضافة إلى ميلنا إلى ربط السلوك بالفعل والحركة يمنعنا من إعطاء التقدير الكافي لإمكانيات النباتات. لكن تبقى ضرورة وجود "الرقابة الذاتية" وتجنب الانحياز لفكرة وجود شكل من الوعي عند النبات بين الباحثين الذين يسعون إلى استكشاف التشابه والتجانس المحتمل بين البيولوجيا العصبية وعلم الأحياء النباتية؛ أي إمكانية أن تكون النباتات أكثر ذكاء وأكثر شبهاً بنا مما يعتقد معظم الناس، وأن تكون قادرة على الإدراك والاتصال فيما بينها ومعالجة المعلومات واتخاذ القرار والتعلم والتذكّر.

## البيولوجيا العصبية النباتية

ظهرت حديثاً أبحاث عديدة في مجال جديد من علوم البيولوجيا النباتية تسعى إلى فهم كيفية معالجة النباتات للمعلومات التي تحصل عليها من بيئتها لاستمرار حياتها وتطويرها والتكاثر بالشكل الأمثل، وكذلك فهم كيفية إدراك النباتات لظروفها والاستجابة للمدخلات البيئية بطريقة متكاملة، حيث تظهر النباتات ذكاءً واضحاً في قدرتها الجوهرية على معالجة المعلومات من المحفزات الحيوية واللاحيوية التي توجه النبات لاتخاذ القرارات المثلى حول نشاطه المستقبلي في بيئة معينة.

في عام 2006 نشر مقال مثير للجدل في مجلة اتجاهات في علوم النبات Trends in Plant Science يقترح مجالاً جديداً للبحث والاكتشاف، وقد اختار المؤلفون تسميته "علم الأعصاب النباتية" وهو مجال يعتمد على أبحاث البيولوجيا النباتية ويهدف إلى فهم كيفية معالجة النباتات للمعلومات التي تحصل عليها من بيئتها لاستمرار حياتها وتطويرها والتكاثر بالشكل الأمثل. وقد استعمل هذا المقال –ربما لأول مرة– مصطلح الإحساس الذاتي عند النبات self-censorship. لقد اتفق على تسمية هذا النوع من الأبحاث البيولوجية بدراسة البيولوجيا العصبية النباتية، وهي تسمية خاطئة نوعاً ما؛ لأن الباحثين في هذا المجال لا يجادلون بأن النباتات لديها خلايا عصبية أو

أدمغة، بل لديها طرق لأخذ كل البيانات الحسية التي يجمعها النبات في حياته اليومية فيدمجها ويحللها ثم يستجيب بما يناسب من تصرف.

على الرغم من أن من يطلق عليهم مصطلح "علماء الأعصاب النباتية" قد ادعوا أن النباتات تمتلك العديد من السمات العقلية الموجودة عند الحيوانات، مثل الوعي والإدراك والقصد والتعمد والعواطف والقدرة على الشعور بالألم، لكن البحث عن أدلة على هذه القدرات في النباتات يعد أمراً مربكاً للغاية.

بين بعض الباحثين أنهم عندما قاموا بتشغيل تسجيلًا صوتياً لدودة قارضة تمضغ ورقة للنباتات، تفاعلت النباتات مع هذا الصوت بأنها بدأت في إفراز مواد كيميائية دفاعية، على الرغم من أن النبات ليس مهدداً حقاً، لكنها تسمع بطريقة ما صوتاً أو ترداداً هو بالنسبة لها صوت مرعب لدودة قارضة تمضغ أوراقها.

لقد تغاضى "علماء الأعصاب النباتية" باستمرار في ادعائهم بأن النبات لديه شكل من الوعي عن درجة التعقيد الهيكلي والوظيفي الذي كان على الدماغ الحيواني أن يصل إليه من التطور لظهور الوعي. وبحسب عدة دراسات أجراها بعض العلماء لوضع فرضية تضع معايير لظهور الوعي عند الحيوانات تستند إلى دراسة استقصائية لتشريح الدماغ والتعقيد الوظيفي وسلوكيات مجموعة واسعة من الحيوانات، وكانت الحيوانات الوحيدة التي استوفت هذه المعايير هي الفقاريات بما في ذلك الأسماك ومفصليات الأرجل مثل الحشرات والسرطانات والرخويات مثل الأخطبوط والحبار. وفي ضوء هذه المعايير كان لا بد من اعتبار أن احتمال وجود نمط فعّال من الوعي عند النباتات –مع الأخذ بالحسبان بساطتها التنظيمية النسبية وعدم وجود الخلايا العصبية والدماغ– غير وارد.

يشعر العلماء بعدم الارتياح عند الحديث عن دور الخيال في عملهم، لكن التقدم العلمي غالباً ما يعتمد على الخيال كمحرض أساسي للفكر. تساعد الاستعارات المجازية في تحفيز الخيال الاستقصائي للعلماء، ومن الواضح أن مصطلح "البيولوجيا العصبية للنباتات" هو استعارة مجازية، فالنباتات لا تمتلك نوع الخلايا المنشطة والتواصلية التي نسميها الخلايا العصبية. ومع ذلك، أثار استعمال هذا المصطلح سلسلة من الأسئلة مثل وجود طرق أخرى لمعالجة المعلومات أو أنواع أخرى من الخلايا والشبكات الخلوية التي يمكن أن تؤدي بطريقة ما إلى سلوك ذكي. لقد ألهم هذا المصطلح مجموعة من التجارب التي تعد بتعميق فهمنا ليس للنباتات فحسب بل أيضاً للأدمغة.

## الوعي عند النبات

لعل استعمال مصطلح "الوعي عند النبات" مسألة مثيرة للجدل، بل للسخرية أحياناً عند لصقها بسلوك النباتات الحياتي، فإذا عرّفنا الوعي على أنه الوعي بالذات والمعاناة من الواقع أي الشعور بما يحدث أو القدرة على التفكير في التجارب الحياتية ومعرفة الذات وتأملها في المرآة أو التأمل الذاتي والتفكير بالوجود بحسب الحكمة الشهيرة للعالم والفيلسوف ديكارت "أنا أفكر إذاً أنا موجود" أو الذاكرة العرضية وإمكانية تذكر التجارب الشخصية السابقة التي حدثت في وقت ومكان معينين أو رؤية الأحلام والقدرة على التخيل والتفكير المعرفي العالي؛ كل هذه الأمور تحتاج بالتأكيد إلى مستوى عالٍ من الوعي ربما يمكننا بدرجة من الثقة من استنتاج أن النباتات لا تملك هذا النوع أو المستوى من الوعي. لكن بالوقت نفسه إن تحديد ماهية الوعي وبنيته وتعريفه موضوع مثير للنقاش والجدل، ولكي نصل إلى قدر معقول من الاتفاق حول تعريف الوعي يمكن أن نجزئ مفهوم الوعي إلى مكوناته الأساسية، فالعلماء ومن ضمنهم مؤيدو فكرة وجود نوع من الوعي عند النبات يركزون على دراسة ما يسمى الوعي المدرك عن طريق الحواس أو الوعي الأساسي. إن جميع الكائنات الحية الواعية تمتلك وعياً بدائياً لكن بعضها فقط طور وعياً ذا مستوىً أعلى. إن حصر إشكالية جدلية الوعي عند النبات ضمن نطاق مناقشتنا للوعي الأساسي يتيح لنا التركيز على الحد الأدنى من معايير الوعي في النباتات، فهناك بالفعل أدلة وفيرة على أن الوعي عند الحيوانات يعتمد على وجود الدماغ والجهاز العصبي، ومع ذلك، جادل العديد من مؤيدي الوعي النباتي بأن النباتات لا تحتاج إلى وعي من الشكل والمستوى الموجودين عند الإنسان أو الحيوان حتى أن معظم مؤيدي وعي النبات يدعون أن جميع الخلايا الحية واعية، وهي نظرية تأملية مليئة بالأدلة المضادة، لكنهم مازالوا يشيرون دائماً أن النباتات تمتلك شيئاً "غريباً" غير عصبي، ومع ذلك لا يزال يتناسب مع معايير الوعي الأساسي للتجربة الأولية للحياة.

## المراجع

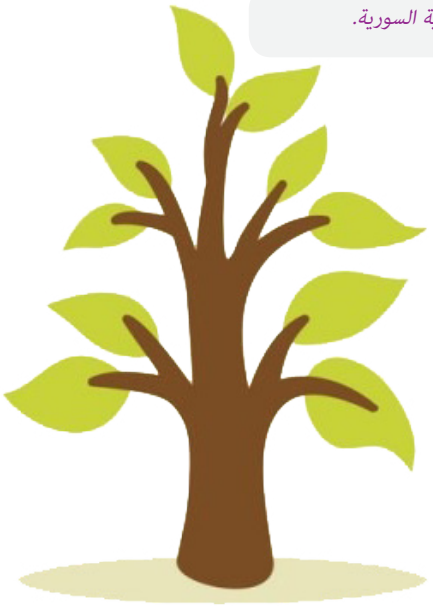
- Brenner ED Stahlberg R, Mancuso S, Vivanco J, Baluška F, Van Volkenburgh E (2006). Plant neurobiology: an integrated view of plant signaling. Trends in Plant Science 11(8): 413-419.

- Mallatt J, Blatt MR, Draguhn A, Robinson DG, Taiz L (2021). Debunking a myth: plant consciousness. Protoplasma 258(3): 459-476.

- Pollan M (2001). The botany of desire: a plant's eye view of the world. Random House, New York.

- Taiz L, Alkon D, Draguhn A, Murphy A, Blatt M, Hawes C, Robinson DG (2019). Plants neither possess nor require consciousness. Trends in Plant Science 24(8): 677-687.

تأليف: **م. جلال العطار**، قسم الزراعة، هيئة الطاقة الذرّية السورية.



# الأرقام المعنوية وتقدير الأخطاء في العمليات الحسابية

*يتطلب حل المسائل الرياضية بالطرائق العددية في معظم الحالات تكراراً لعمليات حسابية، وقد يضخّم هذا التكرار الأخطاء الصغيرة المرتكبة في كل عملية قياس أو عملية حسابية بسبب الاستعاضة عن الأعداد التامة بأعداد تقريبية، وقد يجعل منها أخطاءً لا يستهان بها؛ لذا لا بد من استعراض أنواع تلك الأخطاء وتحديد مصادرها وطرائق حسابها كي نتمكن من الحد من تضخمها في المسائل المدروسة. ومن الضروري أيضاً التطرق إلى الأرقام التي نُسجلها عند قياس كمية والتي تدل زيادة عددها على زيادة الدقة في ذلك القياس، وتدعى هذه الأرقام بالأرقام المعنوية لعدد.*

*الكلمات المفتاحية: الأرقام المعنوية، تقدير الأخطاء، العمليات الحسابية.*

## مقدمة

يعدّ التّحليل العدديّ أحد فروع الرّياضيات المهمّة ويُستخدم عادةً في إيجاد حلول لبعض المسائل الرياضية التي لا يمكن حلّها بالرياضيات التحليلية؛ حيث تكون النتيجة التي نحصل عليها تقريبية، وبما أنّنا نحصل على نتيجةٍ تقريبيّة أو حلّ تقريبي، فهذا يعني وجود نسبة خطأ علينا حسابه، إلا أنّنا لو استطعنا إيجاد الخطأ لاستطعنا إيجاد الحلّ الفعليّ المضبوط؛ الأمر الذي يعني أن إيجاد الخطأ غير ممكن لذا نسعى إلى إيجاد تقريب للخطأ أو حجم الخطأ؛ أي القيمة العظمى التي لا يتجاوزها هذا الخطأ. تتلخّص إذاً مهمّة التحليل العددي بإيجاد الحل التقريبي لمسألة ما وتقويم الخطأ المرتكب.

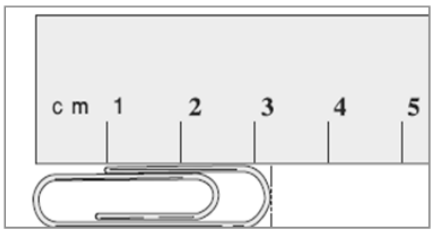
يتطلب حل المسائل الرياضية بالطرائق العددية في معظم الحالات تكراراً لعمليات حسابية، وقد يضخّم هذا التكرار الأخطاء الصغيرة المرتكبة في كل عملية قياس أو عملية حسابية بسبب الاستعاضة عن الأعداد التامة بأعداد تقريبية، وقد يجعل منها أخطاءً لا يستهان بها،

وسنقوم في هذا المقال باستعراض أنواع تلك الأخطاء وتحديد مصادرها وطرائق حسابها كي نتمكن من الحد من تضخمها في المسائل المدروسة، لكن لا بد قبل حساب الأخطاء من التعرف على الأرقام المعنوية.

الأرقام المعنوية لعدد هي تلك الأرقام التي نحصل عليها من القياس وتدل زيادة عدد الأرقام التي نُسجلها عند قياس كمية ما على زيادة الدقة في ذلك القياس.

## الفرق بين الأرقام المؤكدة والأرقام التقديرية

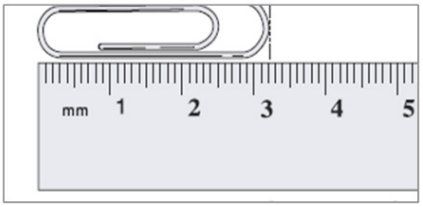
إذا طُلب منك معرفة طول المشبك في الشكل التالي فإنك ستُجيب 3.2 أو 3.1 أو 3.3 سم.




وهنا نلاحظ أن:

- الرقم 3 هو رقم أكيد وهو مدرج على المسطرة؛ أي توجد تدريجة واحد له والجميع يتفق على هذا الجواب فهو رقم أكيد.
- أمّا 0.2 و 0.1 و 0.3 فهي أرقام تقديرية مشكوك فيها يُمكن للشخص أنْ يُقدرها.

أما إذا أخذنا الشكل التالي وطُلب منك معرفة طول المشبك فإنك ستجيب 3.21 أو 3.22 أو 3.23 مم.




- إنّ الرقم 3.2 هو الآن رقم أكيد وهو مدرج على المسطرة، إذ توجد تدريجتان الأولى للرقم 3 والثانية للرقم العشري 0.2، والجميع يتفق على هذا الجواب فهو رقم أكيد.
- أمّا 0.01 و 0.02 و 0.03 هي أرقام تقديرية مشكوك فيها يُمكن للشخص أن يقدرها.

تدل زيادة عدد الأرقام عند قياس كمية ما على زيادة الدقة في القياس، حيثُ يكون 3.23 مثلاً أكثر دقة من 3.2؛ أي: "كلما زاد التدريج في المسطرة زادت الدقة".

يُطلق على عدد الأرقام المؤكدة جميعها إضافة إلى الأرقام التقديرية الأرقام المعنوية، وتدل زيادة عددها على زيادة الدقة في القياس.

## قواعد الأرقام المعنوية والتقريب

نبدأ من أول رقم مغاير للصفر ابتداء من اليسار عند استعراض أرقام عدد ما، سواء كان هذا العدد صحيحاً أم عشرياً، وعندما نعبّر عن قيمة ما بشكل عددي فإننا عادة نحتفظ بالأرقام المضبوطة أو التي نعتقد أنها مضبوطة من هذا العدد ونهمل باقي الأرقام، وتسمى الأرقام التي يعتقد أنها مضبوطة من عدد ما بالأرقام المعنوية لهذا العدد وتتولد بشكل عام جراء إجراء عمليات القياس.

وهنا:

**1.** تُعد الأرقام غير الصفرية أرقاماً معنوية؛ فمثلاً: 759 يتكوّن من 3 أرقام معنوية و 7.8516 يتكوّن من 5 أرقام معنوية.

**2.** الصفر يمكن أنْ يكون معنوياً أو غير معنويٍّ كما يلي:

1- إذا كان الصفر يقع بين الأرقام غير الصفرية فيعدّ رقماً معنوياً؛ فالعدد 2.033 يتكون من 4 أرقام معنوية و 5008 يتكون من 4 أرقام معنوية و 900.00005 يتكوّن من 8 أرقام معنوية.

2- الأصفار التي تقع على يسار العدد لا تعدّ أرقاماً معنوية؛ فمثلاً: 0.0237 يتكوّن من 3 أرقام معنوية و0.000201 يتكون أيضاً من 3 أرقام معنوية.

3- الأصفار التي تقع يمين العدد العشري هي أرقام معنوية؛ فالعدد 258.50 يتكون من 5 أرقام معنوية و9000.0 يتكوّن أيضاً من 5 أرقام معنوية.

4- الأصفار التي تقع يمين العدد غير العشري لا تُعد أرقاماً معنوية فالعدد 50000 يتكوّن من رقم معنوي واحد فقط، حيثُ $50000=5\times10^{4}$ (تهمل الأسس)، ومن ناحية أخرى فالعدد 0.0005 يتكوّن أيضاً من رقم معنوي واحد حيثُ $0.0005=5\times10^{-4}$ (تهمل الأسس).

## قواعد الجمع والطرح

عند جمع الأعداد المعنوية أو طرحها فإن النتيجة تكون متضمنة لعدد من الأرقام على يمين العلامة العشرية، بحيث يكون عددها مساوياً لأقل الأرقام المتضمنة في الكميات التي تم جمعها أو طرحها مع مراعاة قواعد التقريب؛ بمعنى آخر: في الجمع والطرح ننظر لعدد الخانات العشرية في الأرقام المجموعة والمطروحة فيكون الناتج رقماً يحتوي على عدد من الخانات العشرية مساوية للخانات الأقل في الأرقام المجموعة والمطروحة. فإذا أخذنا على سبيل المثال الأعداد 11.1 و6.26 و7.939 نجد أن العدد الأقل دقة هو الذي له عدد أقل من المنازل العشرية وهو العدد 11.1. يعطي جمع الأعداد الثلاثة باستخدام الآلة الحاسبة الناتج 25.299 ولأن أقل رقم دقة هو منزلة عشرية واحدة فيجب أن يحتوي الناتج على منزلة عشرية واحدة أيضاً وبالتالي يكون المجموع بعد التقريب 25.3.

## قواعد الضرب والقسمة

عدد الأرقام المعنوية في حاصل الضرب وناتج القسمة يجب أن يساوي عددها في أقل الأعداد المضروبة أو المقسومة مع مراعاة قواعد التقريب؛ فمثلاً: إذا أردنا ضرب العدد 27.2 بالعدد 15.63 ثم قسمنا الناتج على العدد 1.846 فنجد أن الناتج باستخدام الآلة الحاسبة هو: 230.3011918=1.846/(27.2×15.63). ولأن العدد الذي يحتوي على أقل أرقام معنوية هو 27.2 أي ثلاثة أرقام معنوية فيجب أن يتضمن الناتج ثلاثة أرقام معنوية فقط وبالتالي يكون ناتج العملية هو: $0.230\times10^{3}$.

## قواعد تقريب الأرقام المعنوية

بفرض أن المسألة التي نتعامل معها تحتم علينا أن يكون الناتج رقمين معنويين وفي الآلة الحاسبة ظهر الناتج مكوناً من أربعة أرقام فما هي القاعدة التي نعتمد عليها في إسقاط الأرقام التي لا نحتاجها في الناتج. إن هذه العملية خاضعة لقواعد التقريب وهي 4 قواعد مشابهة لقواعد التقريب المتعارف عليها رياضياً وتختلف في قاعدة واحدة.

1- إذا كان الرقم المراد إسقاطه أقل من 5 يسقط وتسقط الأرقام التي تليه ويترك الرقم الأخير دون تغيير؛ مثال: 1.243678 مقرب إلى 3 أرقام معنوية يصبح 1.24.

2- إذا كان الرقم المراد إسقاطه أكبر من 5 يسقط وتسقط الأرقام التي تليه ويضاف للرقم الأخير واحد؛ مثال: 1.24767 مقرب إلى 3 أرقام معنوية يصبح 1.25.

3- إذا كان الرقم المراد إسقاطه هو 5 متبوعاً برقم غير الصفر يسقط وتسقط الأرقام التي تليه ويضاف للرقم الأخير واحد؛ مثال:

العدد 151 مقرب إلى رقم معنوي واحد يصبح 200.

4- إذا كان الرقم المراد إسقاطه هو 5 متبوعاً بالصفر أو لا يتبعه أي أرقام أخرى يسقط وتسقط الأرقام التي تليه ويضاف للرقم الأخير واحد إذا كان فردياً، ويترك بدون تغيير إذا كان زوجياً؛ مثال: العدد 1350 مقرب إلى رقمين معنويين يصبح 1400، بينما العدد 125 يصبح بعد تقريبه إلى رقمين معنويين 120.

## القاعدة الذهبية في الأرقام المعنوية

تقدم القاعدة الذهبية طريقة كتابة الرقم المعنوي بحسب عدد الأرقام المعنوية فيه؛ لنفرض أننا نحتاج أن يكون الناتج في المسألة مكوناً من 4 أرقام معنوية والرقم في الآلة الحاسبة مكوناً من رقمين معنويين مثلاً 1500 فكيف يمكن أن نكتب الرقم 1500 بحيث يتضمن 4 أرقام معنوية، الجواب هو $15.00\times10^{2}$؛ فعلى سبيل المثال إذا أردنا حساب الناتج مستخدمين العدد الصحيح من الأرقام المعنوية في العملية $4.0\times5.0$ فيجب أن يكون الناتج مكوناً من رقمين معنويين فقط، فكيف نعبّر عن الجواب بالعدد الصحيح من الأرقام المعنوية؟

1) 20 غير دقيق (رقم معنوي واحد).

2) 20.0 غير دقيق (3 أرقام معنوية).

3) $2.0\times10$ دقيق (رقمين معنويين).

## أنواع الأخطاء

إن الأعداد الحقيقية التي لا يمكن التعبير عنها بعدد منته من الأرقام العشرية تعدّ كثيرة فنعبّر عنها بشكل تقريبي، كأن نقول مثلاً إن العدد $\pi$ يساوي تقريباً 3.14159 والعدد $\sqrt{2}$ يساوي تقريباً 1.4142 والعدد $e$ يساوي تقريباً 2.71828 كي نستطيع الإفادة منها تطبيقياً. وبشكل عام فنحن أمام ارتكاب أخطاء معينة، وأهم مصادر هذه الأخطاء هي:

**1. أخطاء الصيغ:** إن الصيغ المستخدمة للتعبير عن الحوادث والقوانين الفيزيائية هي صيغ تقريبية في معظم الحالات أو أنها تحتوي على ثوابت وهذه الثوابت معطاة بدورها بشكل تقريبي مثل استعمال طريقة أشباه المنحرفات لحساب تكامل عددي؛ لذا يدعى هذا النوع من الأخطاء بأخطاء الصيغ.

**2. أخطاء القصر:** وهي أخطاء تنجم عن كون المسألة تحوي عدداً كبيراً أو لانهائياً من الحدود عندما يعبّر عنها بشكل رياضي، حيث إن بعض التوابع الرياضية تعطى بشكل سلاسل غير منتهية مثل:

$$Sin\,x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \cdots$$

وخطأ القصر ينجم عن الاكتفاء بعدد منته من هذه الحدود.

**3. أخطاء القياس:** وتنجم بسبب الحساسية المحدودة في أجهزة القياس أو تنجم عن الشخص الذي يقوم بعملية القياس أو تنجم عن طرائق القياس نفسها.

**4. أخطاء التدوير:** عندما نمثل عدداً كسرياً بشكل عشري فقد يحتوي هذا الشكل على عدد غير منته من الأرقام بعد الفاصلة أو على عدد كبير منها، وكي نستطيع استعمال هذا العدد نقوم بتدويره والاكتفاء بعدد من الأرقام بعد الفاصلة شرط أن يكون الخطأ الناجم أصغر ما يمكن وهذا نسميه خطأ التدوير.

ولتمييز الأعداد المدورة نكتب عادة قيمة العدد مضافاً إليه أو مطروحاً منه نصف وحدة من المرتبة العشرية المدورة؛ فنكتب مثلاً $1.3852\pm0.5\times10^{-4}$ أو $1.3852\pm5\times10^{-5}$، وبالتالي يكون الخطأ $e \le \frac{5}{10^5}$.

ونلاحظ أن الأخطاء الناجمة عن التدوير قد تتعاظم في العمليات الحسابية؛ لذلك لا بد من دراسة طرائق تعيين قيم عظمى لها.

وأخيراً، من الطبيعي أن يكون بعض هذه الأخطاء موجوداً في مسألة ما وغير موجود في مسألة أخرى.

## الخطأ المطلق والخطأ النسبي

نفرض أن $\chi_0$ هي قيمة تقريبية للعدد $\chi$ ونستخدمها بدلاً من $\chi$ في الحسابات. نقول إن الفرق بين القيمة التامة للعدد $\chi$ والقيمة التقريبية $\chi_0$ هو الخطأ المرتكب في هذا العدد ونكتب:

$$\alpha_x = \chi - \chi_0$$

إذا كان $\chi < \chi_0$ قلنا إن $\chi_0$ مقربة بالنقصان لـ $\chi$ (تقريب يساري)، أما إذا كان $\chi_0 < \chi$ قلنا إن $\chi_0$ مقربة بالزيادة لـ $\chi$ (تقريب يميني) وفي كلتا الحالتين نكتب $\chi \approx \chi_0$.

ولمّا كانت إشارة الخطأ غير مهمة في معظم الحالات فإننا نفضّل استخدام القيمة المطلقة، وهذا ما يسمى بالخطأ المطلق ويرمز له بالشكل:

$$e_x = |\chi - \chi_0|$$

وبما أن القيمة التامة لـ $\chi$ غير معلومة في غالب الأحيان، فبدلاً من الخطأ المطلق $e_x$ بحد ذاته نعرّف تقديراً أعلى له نسميه بالحد الأعلى للخطأ المطلق ويعطى بالعلاقة:

$$|\chi - \chi_0| = \varepsilon$$

ومنه يكون $\chi_0 - \varepsilon \le \chi \le \chi_0 + \varepsilon$ وبالتالي نسمّي $\chi_0 - \varepsilon$ تقريباً يسارياً للعدد $\chi$ و $\chi_0 + \varepsilon$ تقريباً يمينياً له. وباعتبار أن المقدار $\varepsilon$ صغير إذا ما قورن بقيمة العدد التام $\chi$ فيمكن أن نكتب:

$$\chi = \chi_0 \pm \varepsilon \qquad (1)$$

ملاحظة: عندما يقال إن العدد $\chi_0$ هو قيمة تقريبية للعدد $\chi$ بخطأ لا يتجاوز $10^{-n}$ أو بدقّة حتى $10^{-n}$ فهذا يعني أن: $|x - x_0| \le \frac{1}{10^n}$.

لا يعطينا الخطأ المطلق في غالب الأحيان فكرة جيدة عن دقة القياس أو الحساب، كأن نرتكب مقدار الخطأ المطلق نفسه في حساب طول حافلة نقل ركاب وطول ملعب كرة قدم، فبديهي أن يكون القياس الثاني هو الأدق والأفضل. من هنا تبرز أهمية معرفة الخطأ المطلق في واحدة الطول وهو ما يسمّى بالخطأ النسبي ويعطى بالعلاقة:

$$\eta_x = \frac{|x - x_0|}{|x|} = \frac{e_x}{|x|}$$

وفي حال عدم معرفة قيمة $\chi$ التامة فإننا نستخدم الحد الأعظمي للخطأ المطلق $\varepsilon$ فنحصل على الحد الأعلى للخطأ النسبي ويعطى بالعلاقة التقريبية:

$$\delta_x = \frac{e}{|x_0|} \quad , \quad \varepsilon << |x_0| \qquad (2)$$

وهكذا نجد أن: $\eta_\chi \le \delta_\chi$.

نلاحظ أن في حالة الأعداد التي تكون قريبة من الواحد يكون الخطأ المطلق والخطأ النسبي متساويين تقريبياً، أما في حالة الأعداد التي لا تكون قريبة من الواحد فإن هناك فرقاً بين الخطأ المطلق والخطأ النسبي.

من العلاقتين (1) و(2) نجد أنه إذا علمنا الحد الأعلى للخطأ النسبي $\delta_\chi$ حصلنا على حدود العدد التام، أي أن هذا العدد يقع بين $\chi_0(1-\delta_\chi)$ و $\chi_0(1+\delta_\chi)$ على الشكل:

$$x = x_0(1 \pm \delta_x) \qquad (3)$$

فبفرض $\chi_0$ هو عدد تقريبي للعدد التام $\chi$ وأن $\varepsilon$ هو الحد الأعلى للخطأ المطلق في $\chi$ وأن $\chi > 0$ و $\chi_0 > 0$ فإن:

$$x \geq x_0 - \varepsilon \quad \Rightarrow \quad \eta_x = \frac{e_x}{|x|} \leq \frac{\varepsilon}{x_0 - \varepsilon}$$

ومن ثم يمكن اعتبار $\delta_x = \frac{\varepsilon}{x_0 - \varepsilon}$ كحد أعلى للخطأ النسبي في $\chi$، وبما أن $\varepsilon$ صغير جداً مقارنة مع $\chi_0$ فيمكننا أن نكتب: $\delta_x \approx \frac{\varepsilon}{x_0}$.

## تراكم الأخطاء

نذكر هنا عدداً من النظريات التي تتعلّق بالأخطاء وتراكمها دون برهان. نبدأ بالخطأ المطلق ثم الخطأ النسبي في العمليات الحسابية الأربع:

– **نظرية 1**: إن الخطأ المطلق المرتكب في مجموع جبري لعدة أعداد تقريبية لا يتجاوز مجموع الأخطاء المطلقة للأعداد المجموعة ($e_{x+y} \leq e_x + e_y$).

وهكذا يمكن التعميم على مجموع أكثر من عددين وهو ما يدعى بمبدأ جمع الأخطاء. ومن أجل الحد الأعلى للخطأ المطلق المرتكب في مجموع جبري فهو يساوي مجموع الحدود العليا للأخطاء المطلقة في الحدود المجموعة.

– **نظرية 2**: الخطأ المطلق المرتكب في حاصل طرح عددين تقريبيين لا يتجاوز مجموع خطأيهما المطلقين ($e_{x-y} \leq e_x + e_y$).

وفيما يتعلق بالحد الأعلى للخطأ المطلق المرتكب في حاصل الطرح فإنه يساوي مجموع الحدود العليا للأخطاء المطلقة في المطروح والمطروح منه.

ملاحظة: عندما نقول الخطأ المطلق أو الخطأ النسبي فإننا نقصد الخطأ المطلق الحدي أو الخطأ النسبي الحدي.

– **نظرية 3**: إن الخطأ المطلق المرتكب في جداء عددين تقريبيين يعطى بحده الأعلى بالعلاقة التالية:

$$e_{xy} = e_x |y_0| + e_y |x_0| \qquad (4)$$

ويمكن التعميم على جداء أكثر من عددين، ففي حالة ثلاثة أعداد نجد أن الخطأ المطلق الحدي المرتكب في الجداء يعطى بالعلاقة:

$$e_{x.y.z} = e_x |y_0 z_0| + e_y |x_0 z_0| + e_z |x_0 y_0|$$

– **نظرية 4**: إن الخطأ المطلق المرتكب في قسمة عددين تقريبيين يعطى بحده الأعلى بالعلاقة التالية:

$$e_{x/y} = \frac{e_x}{|y_0|} + e_y \left| \frac{x_0}{y_0^2} \right| \qquad (5)$$

– **نظرية 5**: إن الخطأ النسبي في حالة الجمع الجبري لعدّة أعداد تقريبية موجبة لا يتجاوز أعظم حد أعلى للأخطاء النسبية في الأعداد المجموعة ($\delta_u \leq \max(\delta_{x_1}, \delta_{x_2}, \mathrm{K}, \delta_{x_n})$).

– **نظرية 6**: إن الخطأ النسبي في حاصل طرح عددين تقريبيين يعطى بحده الأعلى بالعلاقة:

$$\eta_{x-y} \leq \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{|x_0 - y_0|} \qquad (6)$$

ملاحظة: عند طرح عددين تقريبيين متساويين تقريباً تكون العلاقة السابقة غير مفيدة، وذلك لأن المقام يصبح صغيراً جداً وبالتالي يكون الخطأ النسبي في الطرح كبيراً جداً على الرغم من كون الخطأين النسبيين في العددين صغيرين.

– **نظرية 7**: إن الخطأ النسبي في جداء عدة أعداد تقريبية غير معدومة لا يتجاوز مجموع الأخطاء النسبية في تلك الأعداد ($\eta_{x.y} \leq \eta_x + \eta_y$).

يمكن تعميم هذه النتيجة على جداء أكثر من عددين، فمن أجل ثلاثة أعداد مثلاً يكون لدينا:

$$\eta_{x\cdot y\cdot z} \le \eta_x + \eta_y + \eta_z$$

ملاحظة: في حال تساوي جميع الأعداد المضروبة نحصل على الخطأ النسبي في قوة عدد حيث لا يتجاوز هذا الخطأ جداء الخطأ النسبي للعدد بأسّه، فإذا كان على سبيل المثال: $u = \chi^n$، فإن الخطأ النسبي الحدي المرتكب في المقدار $u$ يكون: $\delta_u = |n|\ \delta_x$.

– **نظرية 8**: إن الخطأ النسبي في حاصل قسمة عددين تقريبيين لا يتجاوز مجموع الخطأين النسبيين للمقسوم والمقسوم عليه $(\eta_{\frac{x}{y}} \le \eta_x + \eta_y)$.

## الأخطاء المرتكبة في حساب قيم التوابع

في أغلب الأحيان يكون من الصعب حساب قيمة التابع من أجل قيمة معينة للمتحول؛ لذلك قد نضطر إلى حساب قيمته من أجل قيمة تقريبية لهذا المتحول وذلك بخطأ مطلق محدد. نورد فيما يلي دون برهان النظريتين التاليتين المتعلقتين بالخطأين المطلق والنسبي المرتكبين في تابع لمتحول واحد أو عدة متحولات.

– **نظرية 1**: إن الخطأ المطلق المرتكب في التابع $y = f(x)$ يساوي جداء القيمة المطلقة لمشتق هذا التابع في الخطأ المطلق المرتكب في المتحول $x$، باعتماد $x_0$ قيمة تقريبية لـ $x$؛ أي أن:

$$e_y = \left|f'(x)\right| \cdot e_x \qquad (7)$$

نتيجة: يمكن أن نحصل على الخطأ النسبي الحدي المرتكب في التابع $y = f(x)$ كما يلي:

$$\delta_y = \frac{\left|f'(x)\right| \cdot e_x}{\left|f(x)\right|} = \left|x \cdot \frac{f'(x)}{f(x)}\right| \cdot \delta_x \qquad (8)$$

– **نظرية 2**: الخطأ المطلق المرتكب في تابع لعدة متحولات يساوي مجموع جداءات القيم المطلقة لمشتقات هذا التابع بالنسبة للمتحولات في الخطأ المطلق للمتحول الموافق فإذا كان: $u = f(x,y.z)$، فإن الخطأ المطلق هو:

$$e_u = \left|\frac{\partial f}{\partial x}\right| \cdot e_x + \left|\frac{\partial f}{\partial y}\right| \cdot e_y + \left|\frac{\partial f}{\partial z}\right| \cdot e_z \qquad (9)$$

نتيجة: ويعطى الخطأ النسبي الحدي وفق العلاقة:

$$\delta_u = \left|x \cdot \frac{f_x'}{f}\right| \cdot \delta_x + \left|y \cdot \frac{f_y'}{f}\right| \cdot \delta_y + \left|z \cdot \frac{f_z'}{f}\right| \cdot \delta_z \qquad (10)$$

## المراجع


– الحسيني د، صبح م. الأسس العامة للتحليل العددي. منشورات جامعة دمشق 1991-1992.

– دنان ف. الرياضيات للمهندسين (10) الرياضيات العددية. 1990-1991.

– عبد الله هـ. التحليل العددي. منشورات جامعة حلب 1983-1984.

– الدرويش أ. التحليل الحديث. منشورات جامعة حلب 1977-1978.

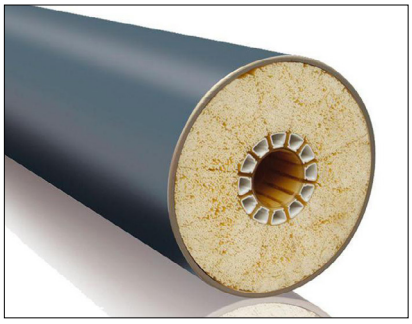

تأليف: **د. بشار عبد الغني**، قسم الخدمات العلمية، هيئة الطاقة الذرّية السورية.

# استعمالات الأغشية المسامية ذات الألياف المجوفة في تطبيقات الفصل والتنقية للمحاليل والغازات

يتزايد بشكل مستمر في العقود الأخيرة استعمال تقنية وحدة الأغشية المسامية ذات الألياف المجوفة في تطبيقات الفصل والتنقية للمحاليل والغازات المحتوية على مزائج مواد من أكثر من عنصر أو مركّب كيميائي في مجالات الصناعات الكيميائية والهندسة الكيميائية والغذائية ومعالجة المياه وتحلية مياه البحر والطب والبيولوجيا والكيمياء التحليلية بسبب ما تتمتع به من فوائد ومزايا عديدة في عمليات الفصل والتنقية للمحاليل والغازات مقارنة مع طرائق الفصل التقليدية كالامتزاز والادمصاص والتقطير والاستخلاص والتعرية وغيرها؛ ففي المجال الطبي ونتيجة التطوّر الحديث في تصنيع الألياف الغشائية المجوفة وصناعة البوليميرات خلال العقدين الأخيرين أصبح الفلتر الغشائي ذو الألياف المجوفة من أهم الأجزاء الرئيسية في جهاز تنقية الدم في المشافي الذي يقوم بعملية غسل الدم وتنقيته لمرضى الفشل الكلوي؛ حيث يتمتع الفلتر بميزات الكلفة التشغيلية الأقل والحجم الأصغر والأداء المكثف الفعّال، وفي مجال معالجة مياه الصرف الصناعي وتنقية مياه الشرب زاد استعمال وحدات الفلاتر الغشائية ذات الألياف المجوفة في محطات التنقية والفصل لمعالجة المياه بسبب ما تقدّمه من ميزات عالية في عدم حاجتها للحرارة وانخفاض استهلاكها للطاقة ولجودة الفلترة والتنقية ولصغر حجم وحداتها التشغيلية في المحطات التشغيلية، وفي مجال الصناعات الكيميائية والمشروبات

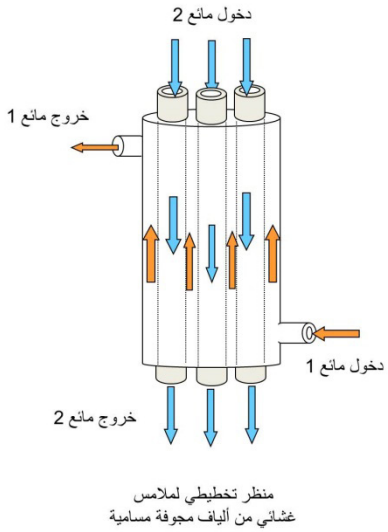
*الغذائية وصناعة أحبار الطابعات استعملت الأغشية المسامية ذات الألياف المجوفة كأجهزة فلاتر وتلامس غشائية لتنقية السوائل من الغازات والأبخرة والفقاعات، وفي مجال الصناعات البتروكيماوية استعملت فلاتر الألياف المجوفة الغشائية في مصافي التكرير لتنقية الغازات الطبيعية من غاز ثاني أكسيد الكربون أو في وحدات إنتاج وتنقية الغازات مثل الهدروجين أو النتروجين، وما يزال التوسع مستمراً في تطبيق الأغشية المسامية ذات الألياف المجوفة في مجالات أخرى مثل الصناعة الغذائية لمنتجات الألبان والحليب وفي معامل الأدوية والمخابر التحليلية، وتسعى حالياً العديد من المراكز العلمية والفرق البحثية من خلال مشاريعهم البحثية المتواصلة والمتزايدة في إيجاد تطبيقات جديدة لوحدات الألياف المجوفة الغشائية في مجالات عمليات التعدين المائي ومجالات تنقية المواد والمحاليل والغازات.*

**الكلمات المفتاحية: الألياف المجوفة، عمليات الفصل والتنقية، فصل الغازات بالغشاء المسامي، تنقية المياه بالأغشية المسامية.**

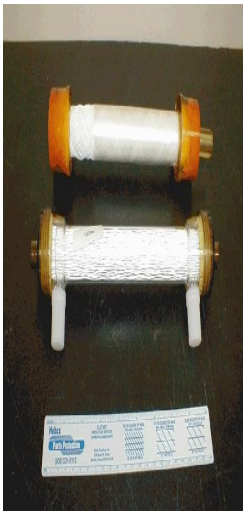


## مقدمة

الأغشية المسامية ذات الألياف المجوفة هي وحدة إنشائية module تحوي بداخلها حزمة من العشرات أو المئات أو الآلاف من ألياف مسامية مجوَّفة (الشكل 1)، وتكون الألياف المجوَّفة عبارة عن أنابيب أسطوانية مجوّفة يتراوح قطرها الخارجي بين 50-1000 مكرومتر والقطر الداخلي بين 25-800 مكرومتر ومصنوعة من غشاء بوليميري مكرو مسامي porous polymer membrane، ويتراوح مجال نفوذيتها بين 30-70% حسب نوع البوليمير وطريقة تصنيعه. تُجمع حزمة من تلك الألياف المجوَّفة ضمن غلاف أسطواني الشكل من مادة زجاجية أو بلاستيكية أو معدنية باستعمال لاصق راتنج إيبوكسي لربط نهايات الألياف المجوَّفة مع طرفي ذلك الأنبوب الغلاف (الشكل 2)، ويُسمّى هذا التجميع وحدة الأغشية المسامية ذات الألياف المجوفة hollow fiber membrane module. في بعض المراجع والمنصات العلمية الإلكترونية يطلق اسم الفلتر الغشائي ذي الألياف المجوفة عند استعمال الوحدة الغشائية في مجال تنقية المياه والغازات وغسل الدم في عملية الديلزة dialysis، وفي حال استعمال الألياف المجوفة كسطح تلامس بين الأطوار المائعة كما هو الحال في الاستخلاص السائل–السائل liquid-liquid extraction فيطلق على الوحدة الغشائية اسم الملامس الغشائي ذي الألياف المجوَّفة.

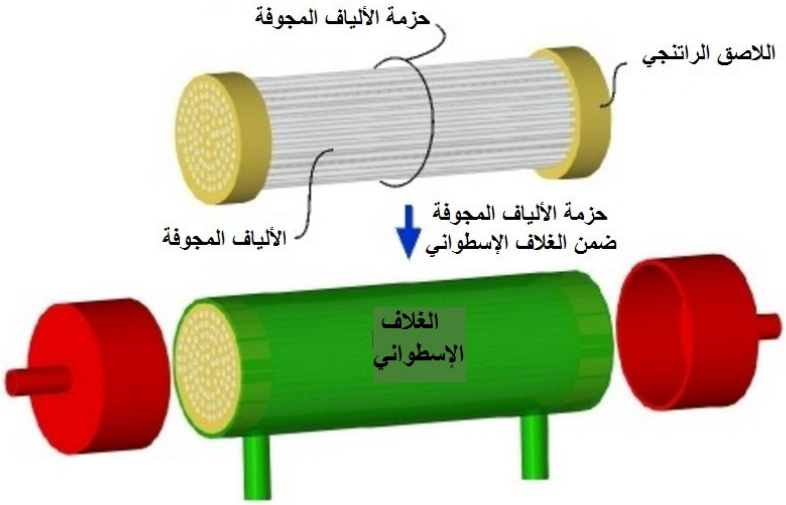



منظر تخطيطي لملامس غشائي من ألياف مجوفة مسامية

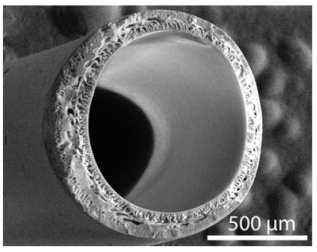


مثال على فلتر غشائي وخرطوشة ألياف مجوفة hollow fiber membrane cartridge

**الشكل 1.** صورة ورسم توضيحي لملامس غشائي من الألياف المجوفة مع تدفُّق متعاكس للأطوار المائعة.




**الشكل 2.** تجهيز وحدة إنشائية غشائية من الألياف المجوفة المسامية.




مقطع عرضي بواسطة SEM لغشاء ليفي مجوف مصنوع من polysulfone

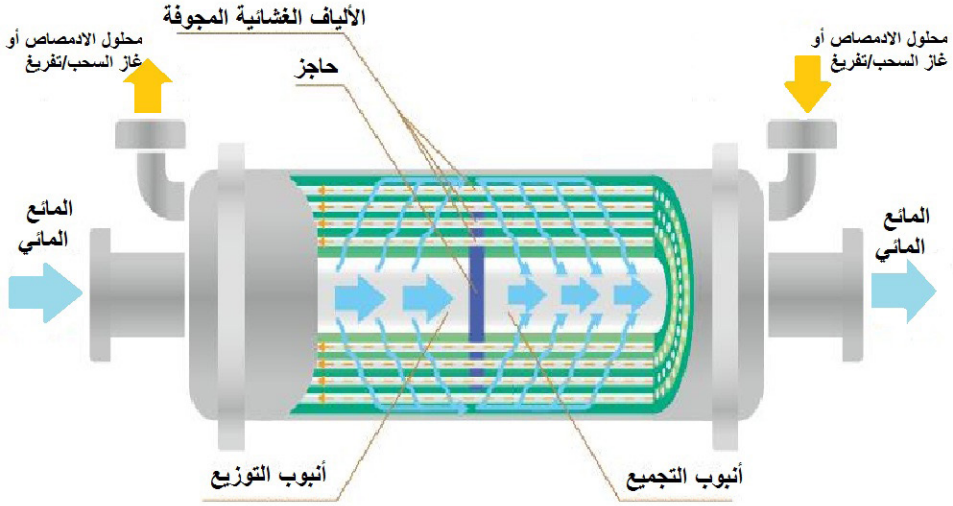
ألياف مسامية مجوفة

**الشكل 3.** صورة لحزمة ألياف مجوفة غشائية وصورة مقطع عرضي لليف مجوف بواسطة مطيافية المسح الإلكتروني.

يقوم الغشاء البوليميري المسامي في الوحدة الإنشائية ذات الألياف المسامية المجوَّفة بدور سطح التماس بين الأطوار المائعة (السائلة أو الغازية) وحاجز شبه نفوذي لبعض المكونات الداخلة في تركيب الأطوار المائعة (الشكل 1)، وتوصف طريقة التشغيل في

وحدة الألياف المجوفة كالآتي: يتدفَّق أحد الطورين المائعين داخل الألياف في حين يتدفَّق الطور الآخر خارجها، ويتمّ جعل سطح التلامس مستقراً على مستوى مسامات الغشاء المكرو مسامي وجدران الألياف المجوّفة بفضل تطبيق ضغط خفيف على هذه الأطوار الملامسة للغشاء بواسطة صمّامات مناسبة تقوم بتنظيم تدفُّقات الأطوار المائعة، ويكون الغشاء في الوحدة الغشائية بمثابة حاجز شبه نفوذي semi-permeable barrier بين طورين مائعين قد يكونان متماثلين أو مختلفين بالحالة (سائلة أو غازية)، ويكون وسيلة لجلب أو وضع طورين مائعين غير ممتزجين مثل طوري سائل وغاز أو طور سائل مائي مع طور سائل عضوي في حالة تماس بعضهما مع بعض دون تبعثر طوري non-dispersive contact.

في حالة كان أحد الأطوار المائعة سائلاً والآخر غازاً يتموضع سطح التماس المشترك للأطوار المائعة عند سطح مسامات الغشاء بشكل ساكن غير متبعثر، ولا يحدث هناك تبعثر أو تداخل بين الأطوار، ويقوم الطور السائل بشغل الفراغات المسامية ضمن الغشاء.




**الشكل 4.** صورة توضيحية لملامس غشائي يفصل بين طورين سائل وغازي.

وفي حالة كان كلا الطورين سائلَين سيتبلَّل الغشاء فقط بأحد الطورين السائلين تبعاً للطبيعة الكيميائية للغشاء (كاره للماء hydrophobic membrane أو محب للماء hydrophilic membrane)؛ بمعنى آخر ستمتلئ المسامات بالسائل الذي يملك ألفة كيميائية أكبر مع الغشاء ويتمركز سطح التماس في النهاية الطرفية لكل مسام. يؤمِّن هذا السطح المسامي سطح تبادل بين الطورين السائلين ويسمح بانتقال المادة.

ويتمّ انتقال المادّة عبر الغشاء المسامي تحت تأثير إحدى القوى المحركة لعمليات الفصل driving force الناشئة بين الطورين المائعين على جانبي الغشاء الذي يسمح بانتقال المادّة دون تعديل خصائص التوازن الترموديناميكي. يمكن أن تكون القوة المحركة إما تدرج التركيز concentration gradient، كما هو الحال في عمليات الديلزة والاستخلاص السائل–السائل أو تدرج الضغط pressure driven operations، كما يحدث في عمليات الفلترة المكروية microfiltration والفلترة الفائقة ultrafiltration والفلترة النانوية nanofiltration والتناضح العكسي reverse osmosis وعمليات فصل الغازات gas separation.

## طبيعة أغشية الألياف المجوفة المسامية

يصنع غشاء الليف المجوف hollow fiber membrane (HFM) من البوليميرات الصنعيّة. ويكون أكثر البوليميرات شيوعاً في تركيب الأغشية HFMs هو أسيتات السليلوز ونيتروسليلوز وإسترات السليلوز وبولي السلفون PS وبولي إيثر سلفون PES وبولي أكريلونيتريل PAN وبولي الأميد PI وبولي الإيثيلين PE وبولي بروبيلين PP وبولي رباعي فلورو الإيثيلين PTFE وثنائي فلوريد بولي الفينيليدين PVDF وكلوريد بولي الفينيل PVC.

تأخذ الأنواع المختلفة من المواد البوليميرية (اللدنة) عدة أشكال هندسية مختلفة مسطحة لوبية مجوفة، لكن وجد أنّ أكثر الأغشية ملاءمة للاستخلاص الغشائي غير المبعثر هو الألياف المجوَّفة المسامية المصنوعة من مواد لدنة بوليميرية، وتتحدّد الخصائص الكيميائية

للأغشية البوليميرية الاصطناعية والخصائص الفيزيائية كنسبة المسامية على الغشاء وأبعاد المسامات وطريقة انتشارها حسب طبيعة البوليمير وشروط تصنيعه.

أدت صناعة الأغشية البوليميرية دوراً مهماً في تطوّر استعمال الألياف المجوَّفة المسامية وتوسيع تطبيقاتها في مجالات الفصل والتنقية، ويتوفر العديد من أنواع البوليميرات، ولكل بوليمير خصائص نوعية، ويتمّ اختيار البوليمير الغشائي بناءً على طبيعة الأطوار وكيمياء المواد المراد فصلها، ويجب أن يقدّم البوليمير في بعض الأحيان ألفة ربط منخفضة للجزيئات المنفصلة كما في حالة تطبيقات التكنولوجيا الحيوية، ويجب أن يتحمّل ظروف التنظيف القاسية.

ولقد جرى تطوير الأغشية الليفية المجوفة في الأصل في الستينيات من القرن الماضي لتطبيقات التناضح العكسي، ومنذ ذلك الحين أصبحت سائدة الاستعمال في معالجة المياه وتحلية المياه وزراعة الخلايا والطب وهندسة الأنسجة، ويتمّ تعبئة معظم أغشية الألياف المجوفة المتوافرة في السوق التجارية في خراطيش cartridges يمكن استخدامها لمجموعة متنوعة من عمليات الفصل السائلة والغازية.

## فوائد الأغشية المسامية ذات الألياف المجوَّفة

يقدّم استعمال الملامس أو الفلتر الغشائي ذي الألياف المجوَّفة المسامية في مجال تطبيقات عمليات الفصل والتنقية عدّة فوائد في التشغيل والأداء والكلفة الاقتصادية وقابلية التوسع بالنسبة لأجهزة الفصل والتنقية التقليدية مثل أبراج امتصاص الغازات وأعمدة الاستخلاص وأعمدة الامتصاص والامتزاز وخلاطات الأطوار السائلة، ويمكن إيجاز تلك الفوائد بما يلي:

– تتمتَّع طريقة الأغشية المسامية ذات الألياف المجوفة بمزايا تقنية مهمّة؛ مثل سهولة تصنيع أجهزتها وسهولة تشغيلها وقابلية تطبيقها على تنقية مختلف الموائع السائلة أو الغازية مثل مياه البحار والمياه الصناعية والغازات، لذلك لا يطرح الانتقال لتقنية كهذه من المستوى المخبري إلى المستوى الصناعي أية مشكلات كبيرة.

– تعدّ تلك التكنولوجيا أقل كلفة تشغيلية من كلفة طرائق الفصل والتنقية التقليدية، وتتطلب في الواقع صيانة أقل وتخفِّف من ضياع المواد المتفاعلة وتستهلك طاقة أقل، ولهذه الأسباب جميعها يمكن اعتبارها تكنولوجيا نظيفة للبيئة واقتصادية.

– تسمح هذه التقنية بالفصل دون الحاجة إلى تبعثر الأطوار المتعاكسة والمتلامسة وبالعمل مع أطوار سائلة لها كثافات متقاربة من بعضها بفضل أن سطح التماس بين الأطوار المتموضع في مسامات الغشاء هو ساكن وغير متبعثر؛ ولذلك تكون هذه الطريقة عملياً مفيدة في حالة التطبيقات التي يؤدي فيها تبعثر الأطوار إلى ضياع مواد باهظة الثمن مثل المخلصات الماكروحلقية synthetic macrocycles ويزيد من الكلفة الاقتصادية أو عندما يسبب التبعثر مشاكل أخرى في حالة التماس بين السائلين مثل مشكلة الاستحلاب emulsion غير المرغوب بها وهذا يؤدي إلى صعوبة بالغة وانتظار أزمنة طويلة في المرقدات settlers لفصل الأطوار بعد التبعثر dispersion.

– يكون سطح التماس في الملامس الغشائي بين الأطوار المائعة المتلامسة على سطوح الغشاء وفي مسامات الغشاء مستقلاً عن الشروط الهيدروديناميكية مثل شروط تدفّق الموائع وطريقة الخلط بينها، وتكون مساحة السطح غير متبعثرة ومعروفة وثابتة وقابلة للتحكم به، بينما يكون سطح التماس في أجهزة الفصل والتنقية التقليدية تبعثرياً وغير ثابت زمنياً ومكانياً ويحتاج إلى حسابات نظرية ورياضية معقدة للتنبؤ بقيمته التقديرية.

– يسمح استعمال التصميم الهندسي للملامس الغشائي ذي الألياف المجوّفة بزيادة سطح التماس والتبادل بين الطورين المائعين بزيادة أطوال الألياف المجوفة أو بزيادة عددها ضمن الملامس، كما يمكن زيادة مساحات التبادل من خلال ضم الملامسات مع بعضها، وعند مقارنة مساحة سطح التماس والتبادل بين الطورين المائعين بالنسبة لواحدة حجم الجهاز (يعني المساحة النوعية) يكون السطح النوعي أكبر لصالح الملامس الغشائي رغم صغر أبعاده وحجمه مقارنة مع أجهزة الاستخلاص التقليدية؛ مثلاً في حالة استعمال ملامس غشائي بطول 45 سم محتوٍ على 9000 ليف مجوف تكون مساحة التماس والتبادل بين الأطوار بحدود 1 م$^2$ ويمكن أن يعادل أداء عمود فصل تقليدي يملك من 2 إلى 4 طبقات نظرية.

– تسمح هذه التقنية بتحكّم دقيق لتدفّقات الأطوار المائعة خلال التشغيل، ويمكن أن تتدفّق الأطوار المتلامسة باستقلاليّة الواحدة عن الأخرى.

– مقارنة مع التصاميم الغشائية الأخرى الموجودة مثل تصميم الأغشية الصفائحية المستوية flat sheet membranes أو تصميم الوحدة ذات اللف اللولبي spiral-wound module، أصبح تصميم الوحدة الإنشائية ذات الألياف المسامية المجوَّفة أكثر التصاميم حظاً من ناحية قابلية تطبيقه على المستوى الصناعي في مختلف مجالات الفصل، نظراً لأنه يؤمِّن سطح تماس كبير مقارنةً مع التصاميم الغشائية الأخرى، الأمر الذي يزيد من سرعة انتقال المادّة. إن هذه الميزة الديناميكية إضافة إلى الميِّزات الأخرى لأغشية الألياف المجوّفة هي سبب الاهتمام الكبير للباحثين لتصميم الملامس الغشائي ذي الألياف المسامية المجوّفة.

– تمتلك الملامسات الغشائية ذات الألياف المسامية المجوَّفة هيكلاً ذاتي الدعم self-supporting structure وكثافة تعبئة عالية high packing density؛ فعلى سبيل المثال ستحتوي الوحدة ذات اللف اللولبي بقطر 20 سم وطول 1 متر على حوالي 20-40 متراً مربعاً من مساحة الغشاء، في حين أن وحدة الألياف المجوفة المكافئة المملوءة بألياف يبلغ قطرها 100 مكرومتر ستحتوي على حوالي 300 متر مربع من مساحة الغشاء، لذلك تعدّ الملامسات الغشائية ذات الألياف المسامية المجوفّة عالية الإنتاجية لمعالجة فصل الغاز على نطاق واسع large scale gas separation processing كما تتطلبه العمليات الصناعية.

– تعدّ عمليات الفصل بالأغشية المسامية عمليات فصل باردة غير حرارية وتستخدم درجات حرارة معتدلة وتكون بديلاً لعمليات الفصل الحرارية thermal separation processes القائمة على استخدام الحرارة لإنجاز فصل وتنقية منتج معيّن، وميّزة الفصل على البارد تجعل الأغشية المسامية المجوّفة حلاً بديلاً لفصل المواد الحساسة للحرارة heat-sensitive compounds في بعض مجالات الصناعات الغذائية والبيولوجية والصيدلانية بسبب أن التعرّض لحرارة أثناء الفصل يؤدي إلى تفاعلات كيميائية جانبية وتغيير خواص المنتج المراد فصله.

– تتمتع تقنية الفصل بوحدات الأغشية المسامية بمزايا تشغيلية مُحفزَة لصالح التشغيل والاستثمار الصناعي كإمكانية التشغيل المستمر في الوحدات الإنشائية continuous and modular operation وتكثيف العمليات واستخدام درجات حرارة معتدلة وانخفاض كلفة الصيانة والتشغيل، حيث يمكن وصل عدة وحدات من الألياف الغشائية على التسلسل ويمكن تكثيف العمليات intensification of operations دون أخذ حيز مكاني كبير من موقع العمل.

## تطبيقات الأغشية المسامية ذات الألياف المجوفة

نظراً للمزايا العديدة التي تقدّمها تقنية الملامسات والفلاتر الغشائية ذات الألياف المجوفة في مجال الفصل والتنقية ما يزال تزايد استعمال الألياف المجوفة الغشائية في مختلف تطبيقات عمليات الفصل والتنقية مستمراً على نطاق المخابر ونطاق وحدات الفصل separation units في المحطات الصناعية، ومع ذلك لم يتمّ اعتبارها مهمّة من الناحية الفنية حتى منتصف السبعينيات من القرن التاسع عشر. تختلف عمليات وتطبيقات فصل الأغشية بناءً على آليات الفصل وحجم مسامات الغشاء وحجم الجسيمات المنفصلة. وتشمل عمليات الأغشية المستخدمة على نطاق واسع الفلترة المكروية والفلترة الفائقة والفلترة النانوية والتناضح العكسي وفصل الغازات والتحليل الكهربائي وغسيل الكلى والملامسات الغشائية في الاستخلاص السائل–السائل.

**الجدول 1.** مجالات تطبيقات فصل الأغشية بناءً على حجم مسامات الغشاء وحجم وكتلة الجزئيات والجسيمات المنفصلة.

| حجم مسام الغشاء | كتلة الجزئيات والجسيمات المنفصلة | العملية الغشائية | الضغط المطبق في الفلترة بالبار Bar | مجال المواد التي يمكن إزالتها |
|---|---|---|---|---|
| > 10 مكرومتر | – | فلترة عادية | - | رمل ودقائق كبيرة |
| > 0.1 مكرومتر | > 5000 كيلو دالتون | فلترة مكروية | < 2 بار | جراثيم كبيرة – خميرة – دقائق |
| 100-2 نانومتر | 5000-5 كيلو دالتون | فلترة فائقة | 10-1 بار | جراثيم – جزيئات ماكروية بروتين – فيروسات كبيرة |
| 2-1 نانومتر | 5-0.1 كيلو دالتون | فلترة نانوية | 20-3 بار | فيروسات – أيونات ثنائية التكافؤ |
| < 1 نانومتر | < 100 كيلو دالتون | تناضح عكسي | 80-10 بار | أملاح – جزيئات عضوية صغيرة |

تستخدم الفلترة المكروية والفلترة الفائقة على نطاق واسع في معالجة الأطعمة والمشروبات كالترشيح المكروي للبيرة beer microfiltration والترشيح الفائق لعصير التفاح، كما تستخدم في تطبيقات التكنولوجيا الحيوية وصناعة الأدوية كإنتاج المضادات الحيوية وتنقية البروتين وفي تنقية المياه ومعالجة مياه الصرف الصحي وصناعة الإلكترونيات الدقيقة microelectronics industry وغيرها،

وتستخدم أغشية الترشيح النانوي والتناضح العكسي بشكل أساسي لأغراض تنقية المياه، في حين تُستخدم الأغشية الكثيفة dense membranes لفصل الغازات كإزالة ثاني أكسيد الكربون من الغاز الطبيعي وفصل غاز النتروجين عن الهواء وإزالة البخار العضوي من الهواء أو تيار النتروجين.

من أهم التطبيقات الحالية نذكر ما يلي:

## معالجة المياه الصناعية وتنقية مياه الشرب

تأخذ تقنية فلاتر الأغشية ذات الألياف المجوّفة دوراً مهماً ومتزايداً في مجال تطبيقات تنقية مياه الشرب ومعالجة المياه الصناعية، فمنذ منتصف القرن التاسع العشر جرت عمليات معالجة المياة الملوثة بمساعدة أغشية الألياف المجوفة عبر عمليات الفلترة المكروية والفلترة الفائقة وإزالة الملوثات كالجسيمات الضارة والغرويات colloids والجزيئات الكبيرة macromolecules، وتساعد أغشية الألياف المجوفة على فلترة مياه المجاري والصرف الصناعي قبل تصريفها في البحيرات أو في الأنهار حتى لا تلوّثها، وتسمح بإعادة استعمال المياه في بعض الاستعمالات الممكنة كالري والمسابح.

**الشكل 5.** تنقية ماء الشرب بواسطة الملامسات الغشائية ذات الألياف المجوَّفة المسامية بقدرة إنتاج 300 متر مكعب/الساعة في إحدى محطات التنقية.

من جهة أخرى، يعدّ إنتاج مياه الشرب باستعمال الأغشية المجوفة بواسطة طريقة التناضح العكسي RO من التطبيقات التقنية المهمة في محطات تحلية مياه البحر، وتنتج حالياً طريقة التناضح العكسي نحو 7 ملايين متر مكعب سنوياً من مياه البحر في جميع أنحاء العالم.

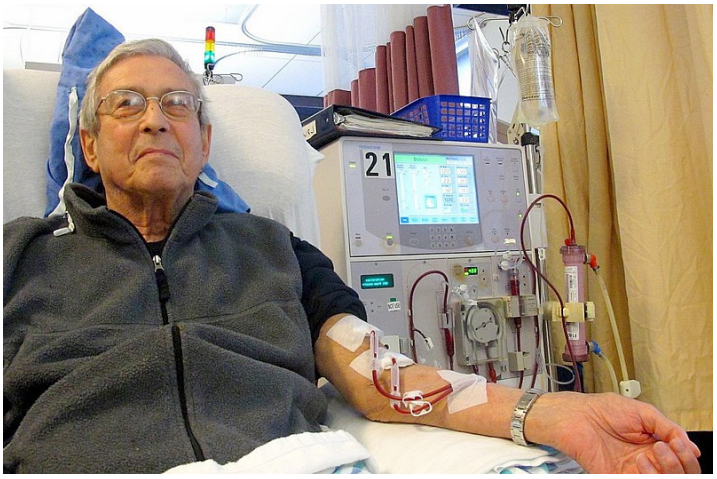
**الشكل 6.** حزم من ألياف مسامية مجوفة مغمورة ضمن مفاعل حيوي غشائي يستخدم في عملية معالجة المياه.

تتميز طريقة فلترة (ترشيح) المياه بالأغشية بأنها لا تحتاج إلى تسخين وبالتالي تكون أوفر اقتصادياً من طرق الفصل الحرارية مثل التقطير distillation أو طريقة التصعيد sublimation أو طريقة التبلور crystallization، وتتمّ آلية الفصل بالأغشية المسامية بطريقة فيزيائية بحتة حيث ينفصل الراشح permeate عبر الغشاء المسامي إلى خارج الألياف المجوفة عن المحلول المستبعد الذي يبقى في داخلها، لذلك وجدت عملية الترشيح بالأغشية المسامية تطبيقات كثيرة في محطات معالجة المياه، فكلها طرق على البارد cold separation،

لذلك يمكن بواسطة ترشيح الأغشية القيام بفصل مواد لا يمكن فصلها بالطرق الحرارية، كما هو الحال في حالة فصل سائلين لهما نفس درجة الغليان azeotropic liquids، حيث يتعذّر فصلهما عن طريق التبخير والتقطير، أما في طريقة الأغشية فيمكن باختيار نوع الغشاء فصل مواد بعينها من دون التأثير على باقي المواد الأخرى.

## تنقية الدم لمرضى الفشل الكلوي

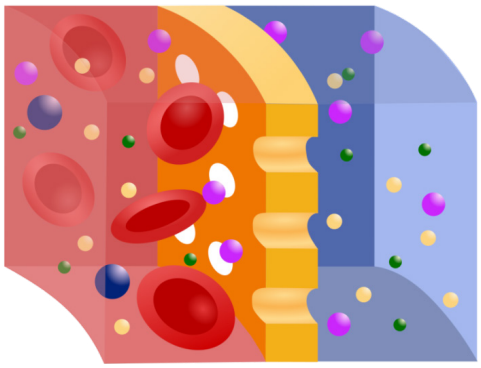
أصبحت الفلاتر الغشائية ذات الألياف المجوَّفة المسامية أحد الأجزاء الرئيسية في جهاز تنقية الدم لمرضى القصور الكلوي في المشافي (الشكل 7)، وتعرف عملية تنقية الدم لمرضى العجز الكلوي باسم غسل الكلية أو الديلزة أو الميز الغشائي، وهي تقنية تؤدي دور الكلية الصناعية وتهدف إلى تنقية الدم وإزالة الفضلات والماء الزائد والمواد السامة من الجسم وتعويض فقدان عمل الكلى الطبيعية والسليمة.




**الشكل 7.** مريض يجرى له عملية تنقية الدم بواسطة فلتر الألياف المجوفة.

يعتمد المبدأ العلمي للديلزة على مبدأ انتشار الشوارد (أيونات) ion diffusion بين محلول الدم ومحلول الديالة (سائل غسيل الكلى) dialysate والترشيح الفائق للسوائل عبر غشاء شبه نفوذي. تتم إزالة الفضلات والماء الزائد عن حاجة الجسم في عملية غسيل الكلى عن طريق تدوير الدم خارج الجسم في الملامس الغشائي (فلتر خارجي) في جهاز غسيل الكلى، حيث يتدفق الدم من جانب واحد من غشاء شبه نفوذي في اتجاه واحد وتتدفق الديالة من الجانب المقابل في الاتجاه المعاكس.

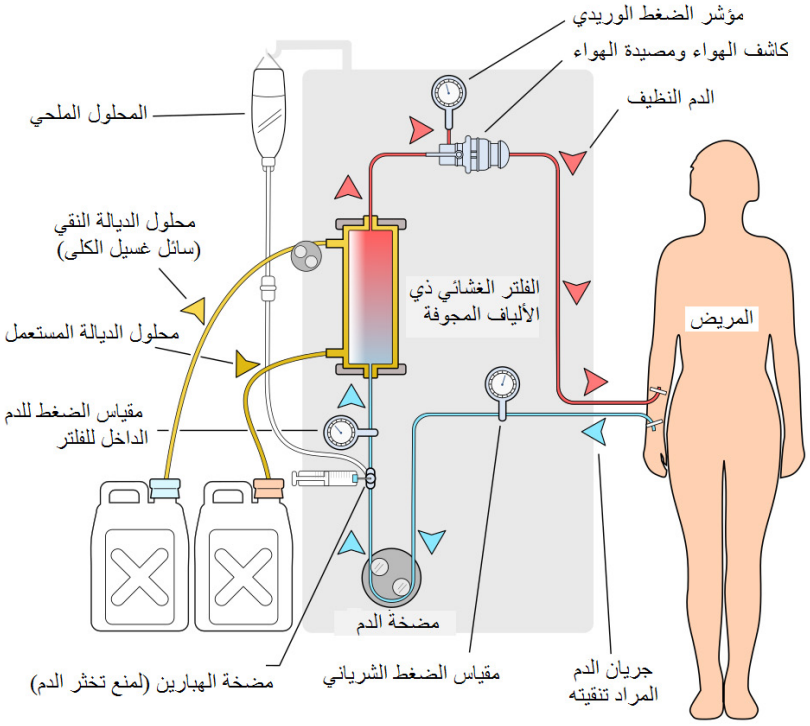
يسمح غشاء الألياف المجوفة –وهو غشاء شبه نفوذي عبارة عن طبقة رقيقة من المواد تحتوي على ثقوب أو مسام مختلفة الأحجام– بتمرير المواد المذابة والسوائل الصغيرة عبر غشاء الألياف المجوفة المسامية، لكن الغشاء يمنع مرور المواد الأكبر حجماً كخلايا الدم الحمراء والبروتينات الكبيرة. وتخضع عملية عبور المواد على طرفي الغشاء إلى قانون الانتشار الذي هو خاصية لتوزع المواد في الماء؛ إذ تميل المواد الموجودة في الماء إلى الانتقال من منطقة ذات تركيز عالٍ إلى منطقة ذات تركيز منخفض. وتتم عملية الديلزة إما عبر الجريان المتعاكس counter-current flows حيث يجري محلول الديالة في اتجاه معاكس لجريان الدم وهذه الطريقة الأكثر شيوعاً أو عبر تقنية الجريان المتوافق co-current flows بين الديالة والدم وهي طريقة أقل شيوعاً. في الجريان المتعاكس يتم خلق أعلى فرق تركيز ممكن؛ بحيث تسهل نفاذية الأيونات والفضلات بسرعة خارج الدم، ويساهم الجريان المتعاكس في إخراج الماء الزائد من الجسم عبر استعمال فرق الضغط المائي بين الدم وجهاز الديلزة وذلك عبر تخفيض الضغط الذي تجري مادة الديالة به.



**الشكل 8.** رسم تخطيطي لغشاء شبه نافذ أثناء غسيل الكلى، حيث يكون الدم أحمر، ويكون سائل غسيل الكلى أزرق ويكون الغشاء أصفر.

ويزيد تدفق التيار المعاكس للدم والديالة من تدرج تركيز المواد المذابة بين الدم والديالة، مما يساعد على إزالة المزيد من اليوريا والكرياتينين من الدم. تكون تركيزات المواد المذابة الموجودة عادة في البول مثل البوتاسيوم والفوسفور واليوريا مرتفعة بشكل غير مرغوب فيه في الدم، ولكنها منخفضة أو غير موجودة

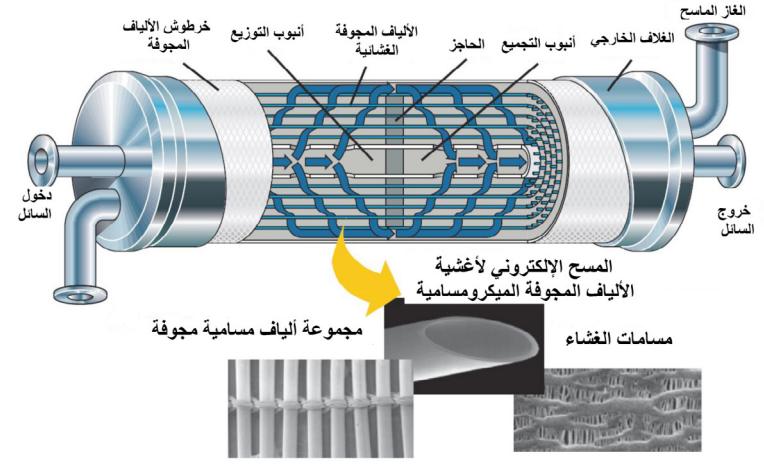
في محلول غسيل الكلى، ويضمن الاستبدال المستمر للديالة الحفاظ على تركيز المواد المذابة غير المرغوب بها منخفضاً على هذا الجانب من الغشاء، ويحتوي محلول غسيل الكلى على مستويات من المعادن مثل البوتاسيوم والكالسيوم التي تشبه تركيزها الطبيعي في الدم السليم، وبالنسبة إلى مادة مذابة أخرى هي البيكربونات يتم تعيين مستوى محلول غسيل الكلى عند مستوى أعلى قليلاً من مستوى الدم الطبيعي لتشجيع انتشار البيكربونات في الدم، وعادة ما يتم تحديد مستويات مكونات الديالة من قبل مختص بأمراض الكلى وفقاً لاحتياجات المريض الفردية.




**الشكل 9.** مخطط توضيحي لدارة عملية غسيل الكلى المبسطة simplified hemodialysis circui.

## فصل الغازات

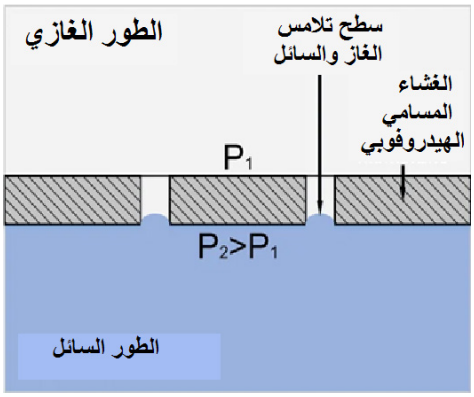
تعد الملامسات الغشائية للأطوار الغازية والسائلة التي تعتمد على الأغشية المسامية ذات الألياف المجوفة مثالاً على عمليات الفصل الهجين عالية الفعالية في مجال تكنولوجيا الأغشية؛ إذ توفّر الألياف المجوفة الغشائية سطح تماس ثابتاً ومحدداً جيداً لنقل المادة بين الأطوار الغازية والسائلة دون تداخل أحد الأطوار مع الآخر في حين يوفر هيكلها الغشائي مساحة سطح تماس كبيرة جداً بالنسبة لحجم الجهاز مما يتيح تقليل حجم جهاز فصل الغازات ومرونة بناء وحداتها الغشائية.




**الشكل 10.** فصل الغازات بواسطة الملامسات الغشائية للأطوار الغازية والسائلة.

تستعمل الأغشية المسامية ذات الألياف المجوفة في عمليات نزع الفقاعات والغازات من المحاليل في المخابر التحليلية والصيدلانية والبحثية وفي أماكن الإنتاج لصناعات متعددة كمصافي تكرير النفط والغاز ومحطات توليد الطاقة والبخار وصناعة المشروبات الغذائية وصناعة الإلكترونيات الدقيقة وأشباه النواقل وصناعة حبر نفاث للطباعة والأحبار والطلاء، وزيادة نقاوة المياه المستعملة في معامل الأدوية وفي المخابر والأجهزة التحليلية، حيث ينعكس استعمال الألياف المجوفة الغشائية في عملية فصل الغازات إيجاباً في زيادة الجودة وسرعة الإنجاز وتحسين الأداء.

يستند عمل أغشية الألياف المجوفة المسامية في فصل الغازات على مبدأ النفاذية الانتقائية selective permeation عبر سطوح الغشاء المسامي، ويعتمد معدل نفاذية كل غاز على قابلية الذوبان وعلى معدل انتشار الغاز، حيث تمر الغازات ذات القابلية العالية للذوبان والجزيئات الصغيرة عبر الغشاء بسرعة كبيرة، في حين تستغرق الغازات الأقل قابلية للذوبان ذات الجزيئات الأكبر وقتاً أطول لتجتاز الغشاء، وتتمّ عملية الفصل عبر الغشاء بتطبيق قوة دافعة على جانبي الغشاء وهي عبارة عن فرق الضغط الجزئي partial pressure difference بين داخل الألياف المجوفة (جانب الاحتباس retentate side) وخارج الألياف المجوفة (جانب النفاذ permeate side)، ويسمح فرق الضغط الجزئي بتغلغل الغاز عبر الغشاء كلما زاد الفرق في الضغط؛ فعلى سبيل المثال يجري فصل ثاني أكسيد الكربون والميثان في حالة معالجة الغاز الحيوي بهدف تحسينه كوقود بتطبيق فرق ضغط بحدود 20 باراً، ويجتاز غاز ثاني أكسيد الكربون مسامات الغشاء بسرعة كبيرة في حين يميل الميثان إلى الاحتباس، ومن الجدير ذكره أن قدرة الفصل عبر الغشاء لا تتأثر بشروط التشغيل حتى مع وجود ضغوط جزئية تصل إلى 20 باراً.




**الشكل 11.** تموضع سطح التلامس بين الطورين السائل والغازي مع تطبيق فرق ضغط على جانبي الغشاء.

ويغطي استعمال أغشية الألياف المجوفة مجموعة واسعة من التطبيقات في مجال فصل الغازات، وهي كالآتي:

– تستعمل في تنقية الغازات في مصافي تكرير النفط والغاز الطبيعي: لقد جرى في السنوات الأخيرة تركيب وحدات من الملامسات الغشائية في مصافي تكرير النفط والغاز الطبيعي لفصل الغازات والأبخرة لغايات تنقية الغاز الطبيعي بإزالة الشوائب المؤذية مثل مركبات الكبريت أو غاز ثاني أوكسيد الكربون، أو لاستعادة المركبات العضوية المتطايرة أو لمعالجة غاز المداخن أو لتنقية الهدروجين من الشوائب أو لفصل النتروجين من الهواء، وتمّ الاعتراف بطريقة الملامس الغشائي كطريقة بديلة ومفيدة لعمليات الفصل التقليدية كثيفة الطاقة مثل التقطير والامتزاز adsorption والامتصاص الكيميائي والمعالجة بالتبريد.

– تستعمل حالياً ملامسات غشائية من ألياف مجوفة من ماركة تجارية Liqui-Cel في صناعة الإلكترونيات الدقيقة وأشباه النواقل لتفريغ الغاز من الماء لإنتاج مياه فائقة النقاوة، وتحقّق مستويات منخفضة للغاية من غازات الأوكسجين $O_2$ وثنائي أوكسيد الكربون $CO_2$ التي تتطلبها مصانع شاشات العرض المسطحة وأشباه النواقل، حيث تساعد مستويات الأكسجين المنخفضة على حماية إنتاجية المنتج وانخفاض مستويات ثاني أكسيد الكربون في زيادة كفاءة التأين الكهربائي وعمليات التبادل الأيوني.

– تستعمل في تنقية الغازات المرافقة لصناعة المشروبات الغذائية: تستعمل الملامسات الغشائية لإضافة الغازات المذابة إلى السوائل أو إزالتها منها، حيث تعدّ الملامسات الغشائية وسيلةً مناسبة جداً وسريعة وقابلة للتشغيل على خطوط الإنتاج حيث تقوم هذه الملامسات الغشائية بإزالة غاز الأكسجين أو إزالة/إضافة غاز ثنائي أوكسيد الكربون من المشروبات الغذائية أو تقليل كميات غاز النتروجين إلى المستويات المطلوبة من التركيز في المشروبات الغذائية، كما تساعد أيضاً الملامسات الغشائية على التحكم بدقة بمستويات مكونات

النكهة والرائحة وتعديل جودة المشروبات الكحولية والغازية.

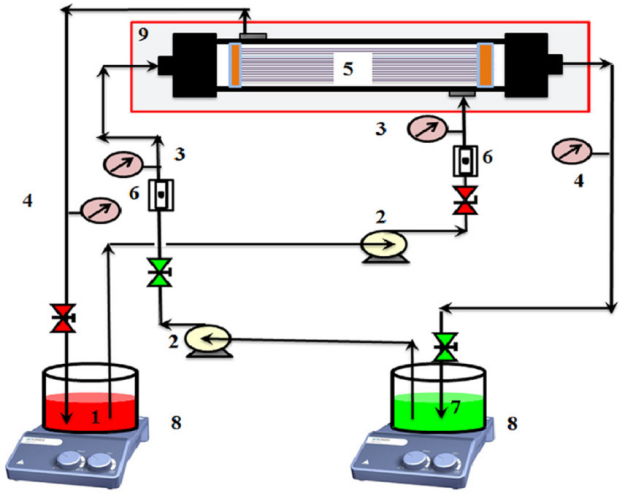
– تتطلب صناعة المستحضرات الصيدلانية مصدراً مستمراً للمياه النقية بناقلية أقل من 1.3 µS/cm، وعادة تستعمل تقنيات التناضح العكسي والكهروغشائية EDI، ويمكننا اليوم استخدام ملامسات الغشاء كبديل مدمج وخالٍ من المواد الكيميائية تعمل في أنظمة مغلقة مما قد يساعد في تقليل مخاطر دخول الملوثات إلى المياه عالية النقاوة.

– في صناعة بعض الطلاءات والأحبار تُستخدم أنواع مطورة من الملامسات الغشائية من ماركة Liqui-Cel على نطاق واسع لإزالة الفقاعات والغازات المذابة من الأحبار والطلاء والسوائل الأخرى ذات التوتر السطحي المنخفض حيث تؤثر الغازات الموجودة في خطوط الإنتاج سلباً على العملية. يمكن أن تؤدي إزالة الغازات والفقاعات من الأحبار والسوائل المتوافقة الأخرى إلى تحسين الإنتاجية ومنع العيوب وتحسين الأداء التشغيلي، وغالباً ما تقوم الطابعات النافثة للحبر بإزالة غاز الأحبار لمنع تقليل عيوب جودة الطباعة ومنع حدوث أخطاء في الفوهات أو نفث الحبر.

– في المخابر والأجهزة التحليلية تستخدم أنواع مطوّرة من الملامسات الغشائية في التطبيقات المخبرية والتحليلية بهدف التخلص من الغازات والفقاعات في الأجهزة التحليلية أو في أنظمة إمداد المياه DI المخبرية، وهذا قد يساعد في تحسين موثوقية القياس وتقليل إعادة العمل وتحسين جودة المنتج وكفاءة المختبر بشكل عام؛ حيث يمكن أن تتداخل الغازات المذابة مع قراءات الأجهزة ويمكن أن تغير تكوين المحلول المراد تحليله أو تؤثر على نتيجة التحاليل.

## في مجال الاستخلاص السائل–السائل

يجري استعمال الأغشية المسامية ذات الألياف المجوفة في عمليات الاستخلاص السائل–السائل من أجل فصل عناصر كيميائية عضوية ولاعضوية من محاليلها السائلة بهدف استرداد تلك العناصر أو تنقية المحاليل. تدخل الألياف الغشائية في عملية الاستخلاص كسطح تماس فاصل بين الطورين السائلين المتدفقين بضخ مستمر بواسطة مضخات تدفقية؛ ولهذا يطلق على الوحدة الغشائية المستعملة في مجال الاستخلاص بالملامس الغشائي، ويتمركز سطح التماس الفاصل على أحد وجهي الغشاء بحسب طبيعة الغشاء وألفته الكيميائية اتجاه السوائل المتماسة، ويتم جعل سطح التماس مستقراً بين الأطوار السائلة بفضل التحكم بصمامات التدفق الموصولة مع الأنابيب الخارجة من الوحدة الغشائية.




**الشكل 12.** مخطط توضيحي لدارة الاستخلاص السائل–السائل بواسطة الأغشية المسامية ذات الألياف المجوفة لاسترداد أيونات معدنية من طور تغذية إلى طور مستقبل آخر stripping phase.

يعمل الملامس الغشائي ذو الألياف المجوفة على إتاحة إجراء الاستخلاص الالسائل–السائل دون تبعثر أطوار مع مساحة سطح تماس نوعية كبيرة تقارب تلك التي نحصل عليها في أجهزة الاستخلاص التقليدية كأعمدة الاستخلاص والخلاطات–المرقدات. كما يؤمن الملامس الغشائي سرعة انتقال مادة سريعة بين الطورين، ولا تحتاج الأطوار إلى زمن انتظار لفصلها عن بعض كما يحدث في الاستخلاص القائم على خلط الأطوار وبعثرتها في الأجهزة التقليدية. وما يزال البحث العلمي مستمراً في هذا المجال على صعيد التصاميم والتطبيقات لنقل تكنولوجيا من نطاق المخابر إلى النطاق الصناعي.

## المراجع


- Albaraka Z, Singh SK, Ghnimi S, Asfari Z, Trebouet D (2011). Studies on the Extraction-Simultaneous Back-Extraction of Alkali Metal Picrates Using 1,3 Bis-Benzo-Crown-6-Calix[4] Arene in Hollow-Fiber Contactors. Solvent Extraction Ion Exchange 29: 534-550.

- Basu R, Sirkar KK (1992). Citric acid extraction with microporous hollow-fibers. Extraction Ion Exchange 1: 229.

- Bazhenov SD, Bildyukevich AV, Volkov AV (2018). Gas-liquid hollow fiber membrane contactors for different applications. Fibers 6: 1-41.

- Brun JP (1989). Procédés de séparation par membranes. MASSON, Paris, France.

- Daiminger UA, Geist AG, Nitsch W, Plucinski PK (1996). Efficiency of hollow fiber modules for nondispersive chemical extraction. Industrial & Engineering Chemistry Research 35: 184-191.

- Faria LFF, Luccio MD, Nobrega R, Borges CP (2002). Development and characterization of microfiltration hollow-fiber modules for sterilization of fermentation media. Brazilian Journal of Chemical Engineering 19: 141-150.

- Gabelman A, Hwang ST (1999). Hollow fiber membrane contactors. Journal of Membrane Science 159: 61-106.

- Klaassen R, Feron P, Jansen A (2008). Membrane contactor applications. Desalination 224: 81-87.

- Li G, Kujawski W, Robert V, Koter S (2021). A review - The development of hollow fiber membranes for gas separation processes. Int J Greenh Gas Control 104: 103195.

- Nakatsuka S, Nakate I, Miyano T (1996). Drinking water treatment by using ultrafiltration hollow fiber membranes. Desalination 106: 55-61.

- Pabby AK, Sastre AM (2002). Developments in dispersion-free membrane-based extraction-separation processes. Ion Exchange and Solvent Extraction 15: 331-469.

- Reed BW, Semmens MJ, Cussler EL (1995). Chapter 10: Membrane contactors. In: Membrane Separations Technology Principles and Applications, Richard DN (ed). Elsevier, Netherland.

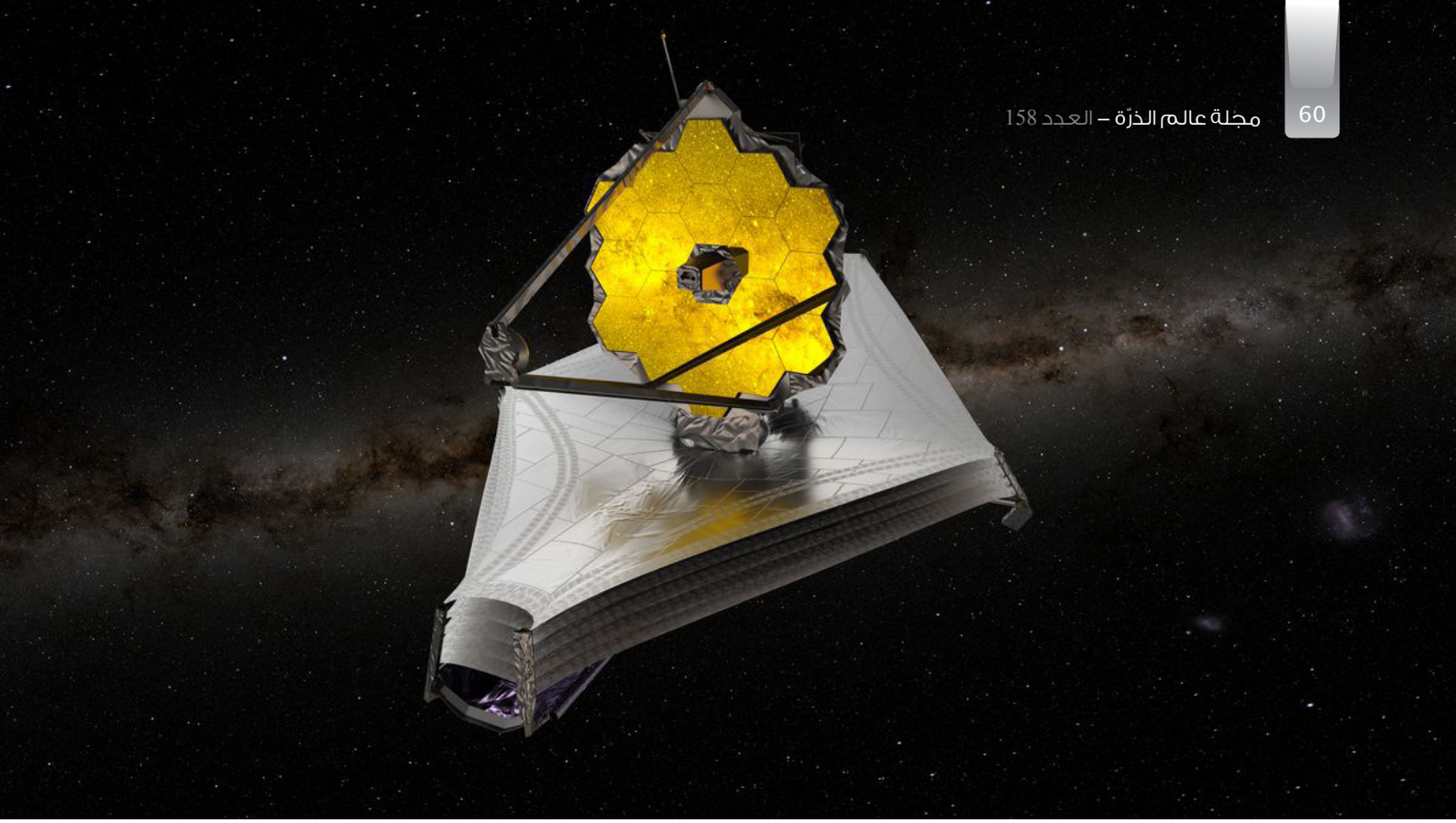
- Sengupta A, Sirkar KK (1986). Membrane Gas Separation. In: Progress in Filteration and Separation (ed. Wakeman RJ), vol. 4, pp. 289-415.

- Singh SK, Asfari Z, Trebouet D (2012). Recent Advances in the Extraction of Target Metal Ions with Liquid Membrane Processes Incorporating Macrocycle Carriers. Separation and Purification Reviews 42: 28-86.

- Sirkar KK (1997). Membrane separation technologies: Current developments. Chemical Engineering Communications 157: 145-184.

- Younas M, Rezakazemi M (2021). Introduction to membrane contactor technology. In: Water Treatment, Food Processing, Gas Separation, and Carbon Capture. Wiley-VCH GmbH, Weinheim, Germany.


تأليف: **د. زاهر البركة**، مكتب التعدين المائي، هيئة الطاقة الذرّية السورية.



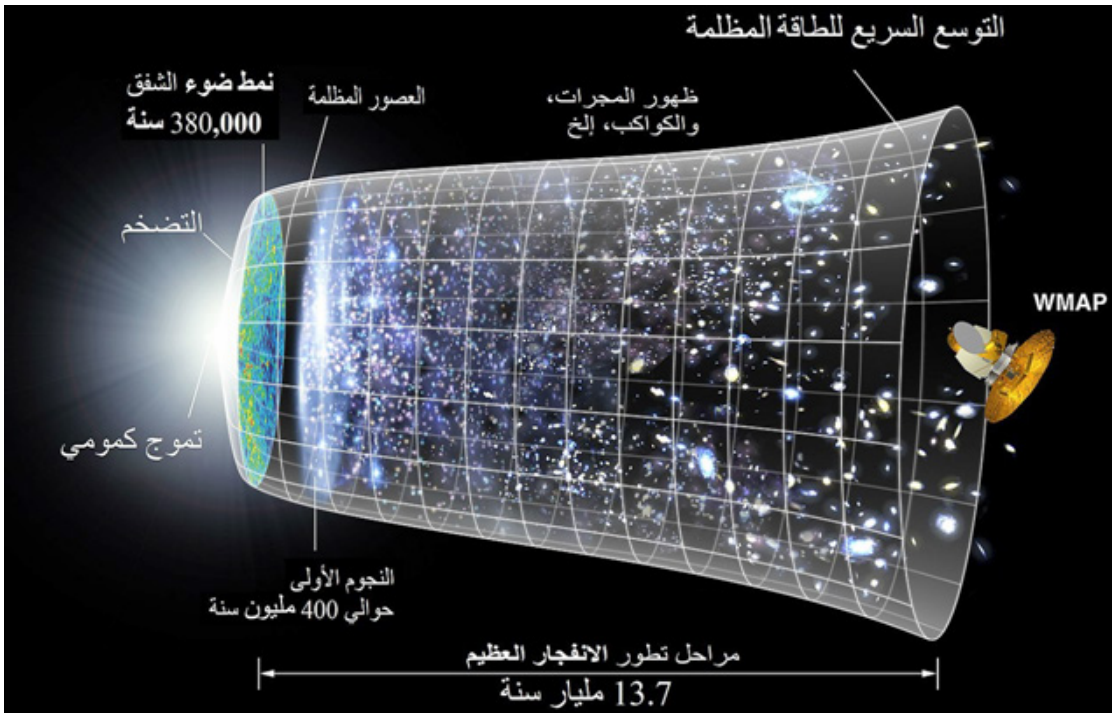
# تلكسوب جيمس ويب: آلة الزمن التي سوف تساعدنا في كشف ألغاز كوننا

*بعد تأخّر دام أكثر من 37 سنة، وبتكلفة بلغت حوالي 10 مليار دولارات أمريكي وبالتعاون بين وكالة الفضاء الأمريكية والأوربيّة والكنديّة، أبصر تلسكوب جيمس ويب النور واستقرّ في نقطة لاغرانج الثانية ليفتح مرآته الأساسيّة المكوّنة من 18 قطعة من المرايا سداسيّة الأضلاع المصنوعة من البيريليوم المطليّ بالذهب والتي تتحد لتكوين مرآة قطرها 6.5 أمتار، وهي بذلك أكبر من مرآة هابل التي تبلغ 2.4 متراً. وعلى عكس تلسكوب هابل الذي يرصد الأشعة القادمة من أعماق الكون الواقعة في المجال المرئي، فإنّ تلسكوب جيمس ويب سوف يرصد الأشعة تحت الحمراء، والممتدّة من 0.6 إلى 8.3 مكرومتر، وهو ما يسمح له برصد الأجرام ذات الانزياح الأحمر التي توجد في أعماق الكون والبعيدة جداً عنا التي لا يستطيع تلسكوب هابل رصد ذلك الحيّز من الأشعة تحت الحمراء، وبذلك يتمكّن العلماء والباحثون من إلقاء نظرة أولى على مراحل تشكّل الكون وإيجاد تفسيرات لظواهر عديدة عجز تلسكوب هابل عن الإجابة عنها واكتشاف نجوم وكواكب وعوالم أخرى، فيحل بذلك ألغازاً ويجيب العلماء عن تساؤلات طالما عجزت أدوات الرصد الأخرى عن الإجابة عليها.*

## مقدّمة

يعد إطلاق تلسكوب جيمس ويب من أهم الأحداث العلمية في تاريخ علم الفضاء، لما سيقدم للعلماء من اكتشافات علميّة هائلة، ويحل العديد من الألغاز المحيّرة، ويقود العلماء إلى اكتشافات أخرى لم تكن في الحسبان، لأنّه في بداية الكون وقبل 13.5 مليار سنة، لم يكن

في وسع الضوء الناتج عن النجوم المتشكّلة في بداية الكون الهروب من شدّة كثافة الضباب الكوني المعتم الناتج عن الغاز البدائي الذي كان يحيط بتلك النجوم المتشكّلة، ولكنّ بعض الفوتونات تمكّنت من الهروب عبر هذا الضباب الكثيف خلال المراحل الأولى لتوسّع الكون، وعن طريق تلسكوب جيمس ويب سوف يتمكّن العلماء من رصد تلك الفوتونات التي عمرها 13.5 مليار، كما أنّ تلسكوب جيمس سوف يمكّن العلماء من رؤية الضوء الناتج عن بداية الكون الذي عمره 13.8 مليار سنة والواصل إلينا بصور أوضح بكثير وبتقنيات حديثة جداً لم تكن موجودة سابقاً، ممّا يوفّر للعلماء صوراً ومعلومات أكثر بكثير من الصور والمعلومات التي أعطتها التلسكوبات الأخرى، وبتقنيات أخرى لم تكن موجودة سابقاً.




**الشكل 1.** مراحل تشكل الكون وفق نظرية الانفجار العظيم وانطلاق الفوتونات الأولى.

ولن تقتصر مهمة جيمس ويب على البحث عن بداية الكون وأصله، بل سوف يجمع الكثير من المعلومات عن أغرب لغز في الكون وهو الثقوب السوداء وعن أقدم المجرّات الموجودة في الكون ومعلومات أكثر دقّة وتفصيلاً عن نظامنا الشمسي وعن البحث عن إمكانية وجود حياة أخرى خارج كوكب الأرض، وذلك عن طريق عملية التحليل الطيفي للعناصر الموجودة في تلك الكواكب.

## القصة منذ البداية

يعد علماء الكونيات وعشاق علم الفلك أنّ تلسكوب جيمس ويب حلم قد تحقق، حيث إنّ آلاف المهندسين والعلماء وثلاثمئة جامعة ومؤسسة بحثية وشركة من تسع وعشرين ولاية أمريكيّة وأربع عشرة دولة حول العالم وتعاون دولي مشترك بين وكالة ناسا لعلوم الفضاء ووكالة الفضاء الأوربيّة ووكالة الفضاء الكنديّة شاركوا وساهموا في تصميم وتصنيع وتطوير تلسكوب جيمس ويب على مدار خمس وعشرين سنة وبميزانية حوالي عشرة مليارات دولار، وقد أبصر تلسكوب جيمس ويب النور وانطلق نحو مهمته المنوط بها، وفي 25 كانون الأول عام 2021 تمّ تحقيق هذا الحلم وأطلق أكبر تلسكوب فضائي على الإطلاق وهو تلسكوب جيمس ويب عبر صاروخ أريان 5 العملاق من قاعدة كور في غويّانا الفرنسية الموجودة على خط الاستواء، وذلك للاستفادة من أقصى سرعة لدوران الأرض حول نفسها وهي عند خط الاستواء والبالغة 1650 km/h، مما يعطي قوّة دفع إضافية لمحرّكات صاروخ أريان 5. ويعد صاروخ أريان 5 من المساهمات الأوربيّة المهمّة في هذه المهمّة العلميّة، ممّا يسّمح للعلماء الأوربيّين الاستفادة جزئياً من المراقبة الفضائية لجيمس ويب، والتي تقدر بحوالي 15% من وقت المراقبة.

سيوفر تلسكوب جيمس ويب من خلال تقنياته الحديثة دقة وحساسية محسّنتين تفوقان تلسكوب هابل، كما أنه سيخلف تلسكوب سبيتزر Spitzer الفضائي؛ وهو تلسكوب فضائي يلتقط الأشعة تحت الحمراء وهو رابع تلسكوب مهم أطلقته ناسا في 25 آب عام 2003

من مركز كينِدي للفضاء في قاعدة كانافيرال للقوات الجويّة، وهذا التلسكوب قد انتهت مدة خدمته في عام 2020. وسوف يوضع تلسكوب جيمس ويب الفضائي على بعد 1.5 مليون كيلومتر خلف الأرض والشمس في نقطة لاغرانج الثانية L2 وسوف يحوم حول تلك النقطة في مدار دائري ليقوم بالرصد.

تعتمد تقنية الرصد في تلسكوب جيمس ويب على رصد موجات الأشعة تحت الحمراء، ويمكنه أيضاً رؤية الضوء المرئي البرتقالي والأحمر، إضافة إلى منطقة منتصف الأشعة تحت الحمراء، وهذا يعتمد على الجهاز نفسه، ويؤكد تصميمه على رصد الأشعة تحت الحمراء القريبة والمتوسطة، وبالتالي سوف يتمكّن العلماء من اختراق الغبار الكوني يرصدون الفوتونات القادمة من أعماق الكون، وهذا يعني رصد العمليات التي أدّت إلى تكوين النجوم والكواكب، وذلك لأنّ معظم الأشعة التي تنبعث من الأجسام التي درجة حرارتها مماثلة لدرجة حرارة الأرض تكون في نطاق الأشعة تحت الحمراء المتوسطة.

ومن المعروف أنّ هابل يدور في مدار حول الأرض على بعد 570 km في حين أنّ جيمس ويب سوف يدور في مدار حول الأرض على بعد 1.5 mkm، كما هو موضّح في الشكل 2.

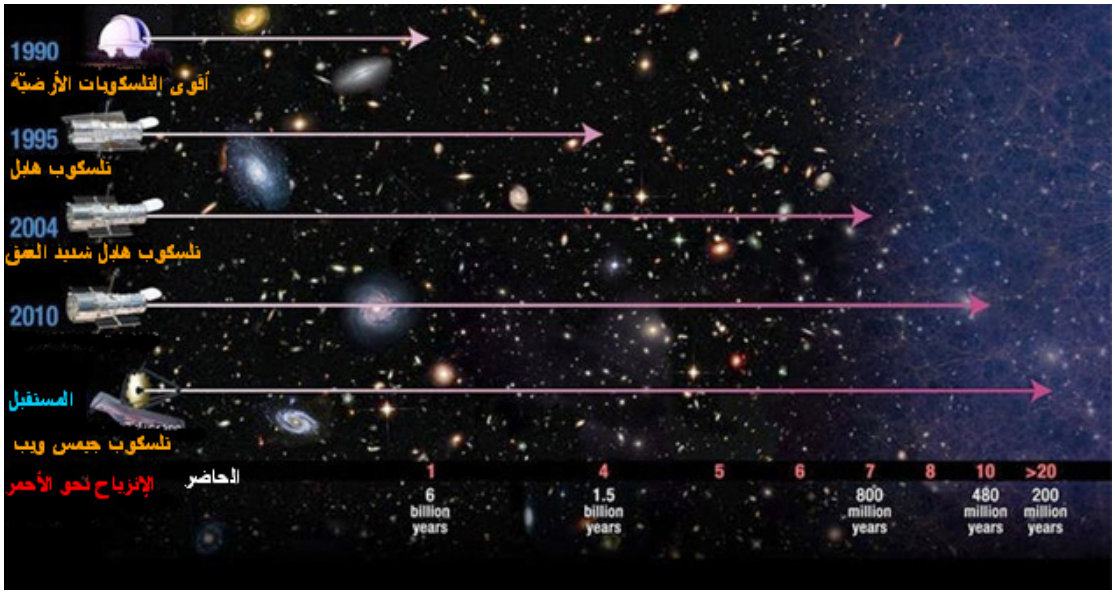
**الشكل 2.** مدار تلسكوب جيمس ويب مقارنة مع مدار هابل حول الأرض.

ولكن هناك العديد من الأسباب العلمية التي تجعلنا في حاجةٍ إلى تلسكوب يمكنه رصد الأشعة تحت الحمراء منها دراسة نشأة أولى النجوم والمجرّات البعيدة جداً والتي نشأت نحو 200 مليون سنة بعد الانفجار العظيم، ويعدّ الرصد باستخدام الأشعة تحت الحمراء مهماً جداً لعدَّة أسباب؛ أحدها هو أن الأشعة فوق البنفسجية والضوء المرئي المُرسل من أولى الأجسام المشعة التي تشكلت عندما كان الكون في مرحلته الأولى قدّ تمدَّدت بسبب توسع الكون، وهذا ما يُعرف بظاهرة «الانزياح نحو الأحمر»، وبالتالي هي تصلنا اليوم على هيئة أشعة تحت حمراء بعد 13 مليار سنة؛ لذلك سيتمكن التلسكوب من النظرإلى الضوء المرئي الأول، وهناك سبب آخر هو أنّ النجوم والكواكب تتشكَّل في سحب من الغاز والغبار مما يحجب عنا الرؤية، أما الأشعة تحت الحمراء فتخترق هذه السُّحب بسهولة ويُسر سامحةً لنا برؤية ما في داخلها، ومن غير الواضح بالنسبة لنا كيفية تحول الكون من حالة بسيطة جداً لا تحتوي إلا على الهدروجين والهليوم إلى الكون الذي نراه اليوم، لكن تلسكوب ويب سيرى مسافات شاسعة من الفضاء وينظر إلى عصور من الزمن لم تُشاهد من قبل، وسيساعدنا هذا في الإجابة عن هذه الأسئلة المهمة. إضافة إلى دراسة العناصر الكيميائية والجزيئات في الغلاف الجوي للكواكب خارج المجموعة الشمسية.

إنّ وجود تلسكوب جيمس ويب في نقطة لاغرانج الثانية L2 سوف يجعله يبعد كثيراً عن أي نوع من التشوّهات الفلكيّة التي يسببها الغلاف الجوي للأرض، ممّا ينتج عنها تشتيت وامتصاص للضوء، ويستطيع بذلك رصد أجزاء من الكون لم يكن بمقدور العلماء رصدها من قبل، لأننا كلّما تعمّقنا في أعماق الكون وابتعدنا عن الأرض كان الرصد أفضل وأدق مقارنة مع الرصد بالقرب من سطح الأرض، ويتيح له بذلك اكتشاف كواكب أخرى تدور حول نجوم أخرى، ويرصد النجوم التي ولدت خلف سديم الغبار الكوني، وباعتبار أنّ تلسكوب هابل كان قادراً على اكتشاف المجرّات الحديثة إلا أنّ تلسكوب جيمس ويب سوف يكون قادراً على اكتشاف المجرات الأقدم والموجودة على حافة الكون المرئي، ولكن المشكلة في عمل تلسكوب جيمس ويب في المدار البعيد جداً عن الأرض تجعل العلماء عاجزين عن إجراء أي إصلاح أو صيانة له على عكس تلسكوب هابل الذي يمكن للعلماء إجراء إصلاحات أو صيانات له على مدار السنوات وذلك بسبب قربه من الأرض.

والسؤال الذي يطرح نفسه لماذا يطلق العلماء تلسكوبات إلى الفضاء بدلاً من المراصد الأرضيّة إنّ السبب في ذلك يعود إلى مشكلتين رئيستين يسببهما الغلاف الجويّ: المشكلة الأولى تكمن في أنّ الغلاف الجوي يقوم بتشتيت الضوء الواصل من الفضاء إلى الأرض، حيث

يعمل الغلاف الجوي على تشويه المشهد الملتقط بوساطة التلسكوبات الموجودة على الأرض، وذلك بصرف النظر عن كبر التلسكوبات أو تطورها، ويعد هذاالتشوه الناتج عن الغلاف الجوي السبب وراء ظهور النجوم وكأنها تُومض، أمّا السبب الثاني فراجع لما يقوم به الغلاف الجوي من حجب أو امتصاص أطوال موجية محددة من الإشعاع بشكل جزئي مثل الإشعاع فوق البنفسجي أو الأشعة تحت الحمراء أو أشعة غاما أوأشعة إكس قبل أن تصل هذه الأشعة للأرض، حيث إنّ الطيف المرئي يشكل فقط 35% من الطيف الكلي؛ مما يؤدي إلى نقص كبير في الطيف الواصل إلى الأرض، وهذا يؤدي إلى تشويش العلماء في قياساتهم عند القيام بفحص جسم ما كنجم مثلاً تتم دراسته بالاعتماد على أنواع معينة من الأطوال الموجية التي يُصدرها، علماً أنّ التلسكوبات الأرضية الحديثة تستخدم تكنولوجيات متطورة من أجل تصحيح التشوه الناتج عن الغلاف الجوي لكن لا توجد أي طريقة من أجل رؤية الأطوال الموجية التي يمنعها الغلاف الجوي من الوصول إلى الأرض، وهذا يعني أنّ المراصد الأرضيّة تتيح للعلماء رصد حيز صغير جداً في السماء وخاصة للنجوم الساطعة والقريبة من الأرض، أما ما عدا ذلك فمن المستحيل رصدها عبر المراصد الأرضيّة، لذلك أطلق العلماء تلسكوبات تدور حول الأرض، كتلسكوب هابل وتلسكوب سبيتزر الفضائي، لكن للتعمّق أكثر فأكثر داخل أعماق الكون يتوجّب على العلماء إرسال تلسكوبات ذات مرايا أكبر وأبعد عن الأرض.




**الشكل 3.** تطور تلسكوبات المراقبة الفلكيّة.

وتعد أكثر الطرق فعالية من أجل تجنب مشاكل الغلاف الجوي في وضع تلسكوبات فضائيّة تدور حول الأرض كما هو الحال في تلسكوب هابل، وغالباً ما يعتقد الناس وبشكل خاطئ أن قوّة التلسكوب تكمن في قدرته على تكبير الأجسام، ولكن هذا غير صحيح حيث تعمل التلسكوبات على تجميع أكبر كميّة من الضوء من تلك التي تجمعها العين البشرية، فكلما كانت مرآة التلسكوب أكبر تمكن التلسكوب من جمع أكبر كميّة من الضوء، وبالتالي تتحسين رؤيته.

وبفضل رؤيته للأشعة تحت الحمراء سيُكمل تلسكوب جيمس ويب مهمة هابل ويوسِّع مجالَ اكتشافاته العلمية، وبفضل تغطيته لطولٍ موجي أعلى وحساسيته الدقيقة سيتمكّن هذا التلسكوب من العودة بالزمن وإلقاءِ نظرة عن كثب لبداية الكون، وبعد مراحل عديدة وحرجة من إطلاق التلسكوب واستغراقه مدة شهر للوصول إلى مداره المخصص يبدأ التلسكوب القيام بالمهمة الموكولة إليه، وبعد مرور ستة أشهر يكون التلسكوب جاهزاً للعمل، ويبدأ بإرسال الصور والمعلومات، وسوف ترتكز مهمة تلسكوب جيمس ويب على أربع نقاطٍ أساسيّة:

1. دراسة نشأة أولى الكواكب والنجوم في الفترة التي تلي مباشرةً عصر الظلمات.
2. تحصيل فهم أعمق عن ولادة أولى المجرات وتطوُّرها.
3. البحث في تكوين النجوم وأنظمة الكواكب.
4. استكشاف الكواكب خارج المجموعة الشمسية ومحاولة تعقُّب أي أثرٍ لبصمة حيوية لحياة خارج كوكبنا.

## الأجزاء الرئيسية لتلسكوب جيمس ويب

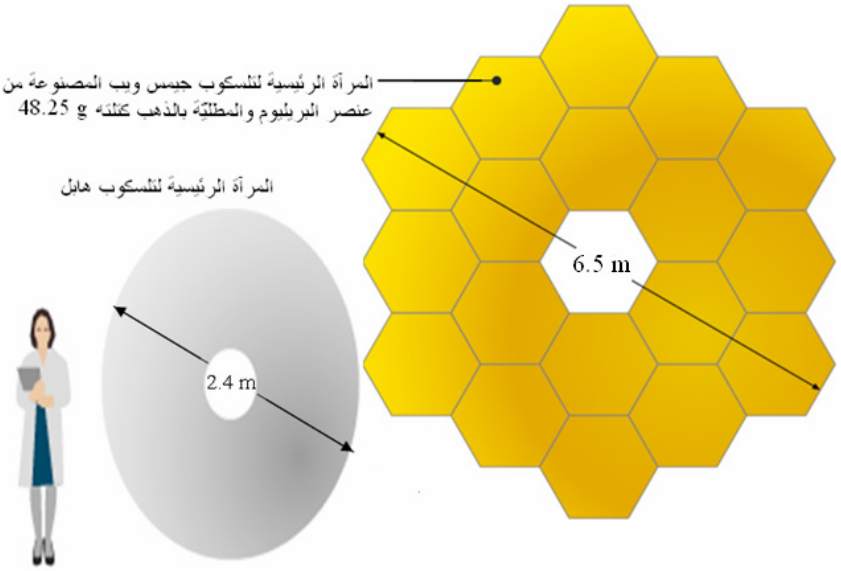
### أولاً- المجموعة البصريّة Optical Telescope Element (OTE)

وهذه المجموعة تتكوّن من العناصر التالية:

**1. المرآة الرئيسية primary mirror**

تتكون المرآة الرئيسية لتلسكوب جيمس ويب –وهي عنصر التلسكوب البصري– من 18 قطعة من المرايا سداسية الأضلاع المصنوعة من البيريليوم المطلي بالذهب –التي تتحدّ لتكوين مرآة قُطرها 6.5 أمتار– وهي أكبر بكثير من مرآة هابل التي تبلغ 2.4 متر، وإذا بُنيت كمرآة واحدة كبيرة، فستكون كبيرة جداً بالنسبة لمركبات الإطلاق الموجودة حالياً، ولن يتمكّن العلماء من إدخالها داخل صاروخ الفضاء؛ لذلك تتكون المرآة من 18 قطعة سداسية الأضلاع تُفتح بعد إطلاق التلسكوب.

تم اختيار البيريليوم لأنه يحتفظ بشكله في درجات حرارة شديدة البرودة دون أنّ يغيّر من أبعاده، إضافة إلى ذلك أنّ وزنه الذرّي خفيف جداً ممّا يقلّل بشكل كبير من كتلة مرآة جيمس ويب. لكن مشكلة البيريليوم أنّه غير عاكس للضوء خاصة الأشعة تحت الحمراء، ولحلّ هذه المشكلة تمّ طلاؤه بطبقة رقيقة جداً من الذهب سماكتها 100 نانومتر، وذلك لأنّ الذهب كثافته عالية وسوف يزيد من وزن التلسكوب، لكنّه أفضل عاكس للأشعة تحت الحمراء من بقيّة العناصر الأخرى، حيث بلغت كميّة الذهب المستخدمة في طلاء المرآة التي قطرها 6.5 أمتار 48.25 غراماً فقط. إنّ هذه التقنيّة المستخدمة في صناعة المرآة جعلت كتلة مرآة التلسكوب أخف بمرّتين ونصف من مرآة تلسكوب هابل التي قطرها 2.4 متر.




**الشكل 4.** الفرق بين مرآتي تلسكوب جيمس ويب وتلسكوب هابل.

**2. المرآة الثانويّة secondary mirror**

هذه المرآة مصنوعة من نفس عناصر المرآة الأساسية، لكن نصف قطرها 0.74 متر، وهي بذلك أصغر من المرآة الأساسية، كما أنّها تتميّز بقابليتها للحركة حيث يمكن ضبطها لتركيز الأشعة نحو أجهزة الكاميرات ومجموعة المطيافيّة. وتعمل هذه المرآة على استقبال الأشعة تحت الحمراء القادمة من المرآة الرئيسية وتوجيهها نحو وحدة الكاميرات والمطيافيّة.

### ثانياً- وحدة الأجهزة العلمية التكامليّة Integrated Science Instrument Module (ISIM)

هي عبارة عن الهيكل الكبير الذي يحمل ويدعّم المرايا السداسية الكبيرة للتلسكوب والبصريات الأخرى (من كميرات وأجهزة مطيافيّة) وأدوات التلسكوب، كما توكل إليه عملية ضبط المرايا، ويتكون من العناصر التالية:

1. كاميرا الأشعة القريبة من تحت الحمراء Near-Infrared Camera (NIRCam).
2. مطيافية الأشعة القريب من الأشعة تحت الحمراء Near-Infrared Spectrograph (NIRSpec).

3. مجس منتصف الأشعة تحت الحمراء Mid-Infrared Instrument (MIRI).

4. مستشعر التوجيه الدقيق/التصوير بالأشعة تحت الحمراء القريبة والمطياف غير الشقي Fine Guidance Sensor (FGS-NIRISS) and Near Infrared Imager and Siltless Spectrograph.

## ثالثاً- الدرع الشمسي Sunshield

نظراً إلى احتياج التلسكوب إلى درجة حرارة منخفضة، وذلك من أجل الحفاظ على مجموعة مستشعرات التلسكوب بعيداً عن أشعّة الشمس المباشرة وحمايتها من مصادر الضّوء الأخرى مثل القمر والأرض، وهو أمر بالغ الأهمية؛ قام مهندسو ناسا ببناء حاجب شمسي من خمس طبقات من بلاستيك الكابتون kapton وهو عبارة عن مركّب polyamide عاكس للأشعة وطارد للحرارة، وكل طبقة من بلاستيك الكابتون سماكتها رفيعة جداً وشفافة وسهلة الطي واللف، وأوّل طبقة من بلاستيك الكابتون والمواجهة للشمس تبلغ سماكتها 0.05 mm وهي أسمك طبقة، في حين أنّ الطبقات الأربع الأخريات تبلغ سماكة كل طبقة منها 0.02 mm، ومع أنّ بلاستيك الكابتون شفاف فسوف يمرّر الضوء، ولحلّ هذه المشكلة تمّ طلاء كل طبقة من هذه الطبقات بمادة الألمنيوم بطبقة سماكتها 100 nm على كلا الجانبين ومغطاة بطبقة من السليكون على الجانب المواجه للشمس على الطبقتين الأكثر سخونة لعكس حرارة الشمس مرة أخرى إلى الفضاء بعيداً عن أجهزة التلسكوب، وتركت مسافات بين الطبقات الخمس حتى لا تنتقل الحرارة بين هذه الطبقات مستفيدين من العازل الحراري الناتج من تفريغ الضغط بين الطبقات نتيجة الخلاء في الكون؛ مما يوفّر بذلك عدم انتقال أي حرارة إلى الجانب المظلم للتلسكوب الذي يحتوي على المرايا والكاميرات والحساسات الحراريّة، والذي يؤثّر بدوره على عمل هذه الأجهزة، وبذلك نحصل على عازل حراري شبه مطلق، وبالتالي لن يبقى مصدر للأشعة تحت الحمراء القادمة إلى المجموعة البصرية سوى أعماق الكون.

وقد تم تصميم الدرع الشمسي بحيث يتم طيّه اثنتي عشرة مرّة ليتلاءم مع انسيابية الحمولة الصافية لصاروخ أريان 5 الذي يبلغ قُطره 4.57 متر وطوله 16.19 متراً، وبمجرد أن يتم نشره عند نقطة لاغرانج الثانية سوف يُفتَح ليأخذ الأبعاد التالية 14.162 متراً × 21.197 متراً.

إنّ الغاية من الدرع الشمسي هي توفير شروط عمل مناسبة له، حيث إنّ عمل تلسكوب جيمس ويب يتطلّب إبقاء درجة حرارته أقل من 50 كلفن والموافقة لـ 233 °C-، كما أنّ موقعه بالقرب من نقطة لاغرانج الثانيّة الخاصة بمدار الشمس–الأرض يُبقي جميع الأجسام الثلاثة على نفس الجانب من التلسكوب الفضائي في جميع الأوقات، ومداره في هذه الحالة يجنّبه ظِل الأرض والقمر، مما يحافظ على بيئة ثابتة للدرع الشمسي والمصفوفات الشمسية من أجل توليد الطاقة الكافية لتشغيل جميع أجهزته، ويتواصل دائماً مع الأرض عبر هوائي الإرسال، كما يحافظ الدرع على ثبات درجة حرارة المعدات الموجودة على الجانب المُظلم، وهذا أمر بالغ الأهمية للحفاظ على المحاذاة الدقيقة لقطاعات المرآة الأساسية.

## رابعاً- حافلة المركبة الفضائيّة Spacecraft bus

توفّر حافلة مركبة الفضاء وظائف الدعم اللازمة لتشغيل تلسكوب جيمس ويب. فهي عنصر الدعم الأساسي للتلسكوب، بحيث توفّر الدعم اللازم لتشغيل التلسكوب، من خلال احتوائها على عدد كبير من الحواسيب والاتصالات ومحرّكات الدفع وتحمّل الأجزاء الهيكليّة، وكافة الأجهزة الأخرى للتلكسوب.

## خامساً- تجهيزات إضافيّة

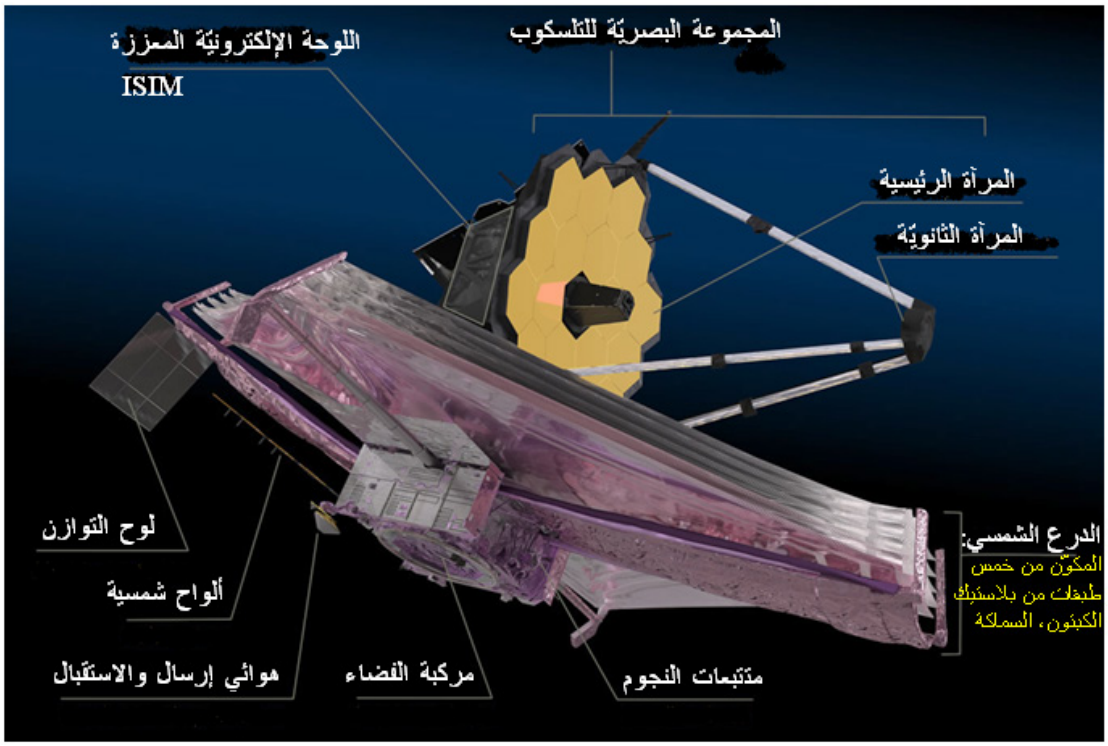
1. لوح التوازن momentum flap: يعمل على توجيه التلسكوب باتجاه معين.

2. هوائي الإرسال antenna: يستخدم من أجل إرسال واستقبال المعلومات والتواصل مع فرق العمل على الأرض.

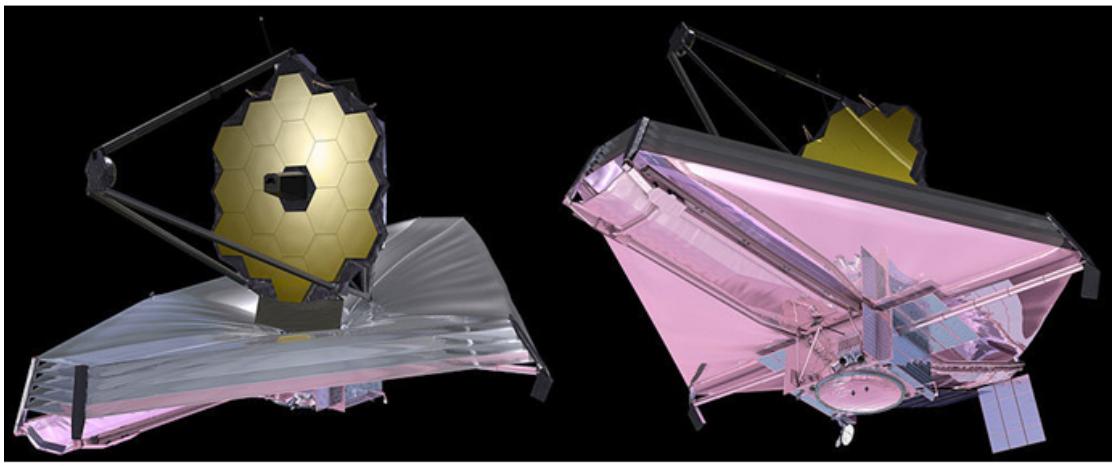
3. ألواح شمسيّة solar arrais: توجّه الألواح الشمسية نحو الشمس دائماً لتحويل ضوء الشمس إلطاقة كهربائية لازمة لتشغيل التلسكوب، حيث تقوم هذه الألواح بعملية تزويد الطاقة الكهربائية باستطاعة قدرها 2000 واط لأجهزة التلسكوب.

4. متتبعات النجوم star trackers: هي تلسكوبات صغيرة تستخدم أنماط النجوم لتوجيه التلسكوب.

5. منظومة التبريد cooling system: مهمة منظومة التبريد هذه تخفيض درجة حرارة أجهزة التلسكوب في الجانب المظلم (233 °C-) حتى تعمل أجهزة التلسكوب بالشكل المطلوب.




**الشكل 5.** الأجزاء الرئيسية لتلسكوب جيمس ويب.

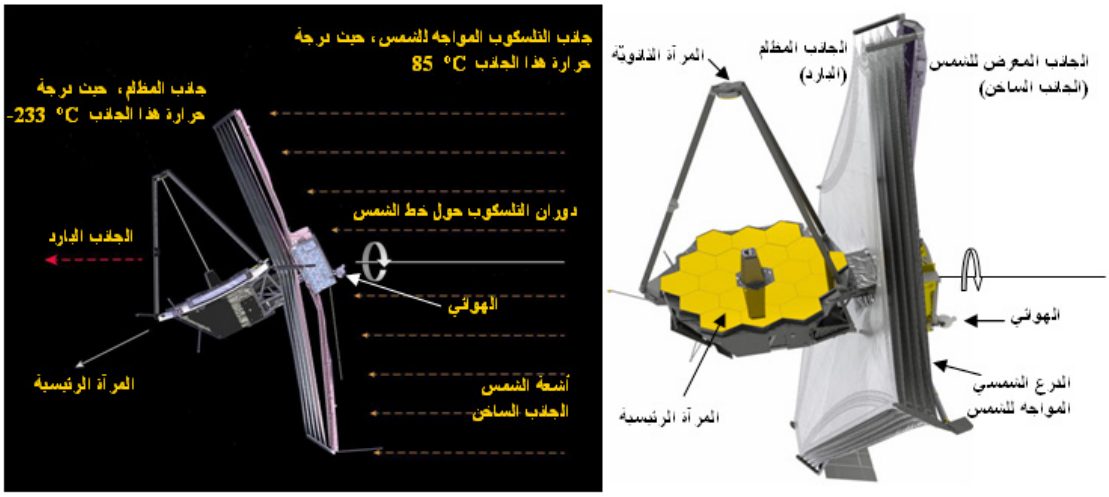



**الشكل 6.** جانب سفلي وعلوي لتلسكوب جيمس ويب.

## التحدّيات والصعوبات

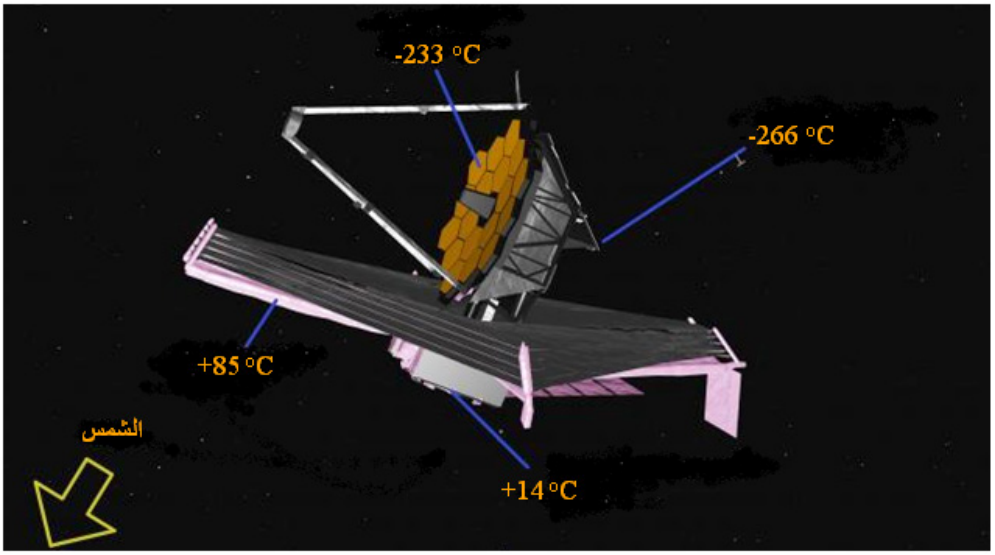
تعد مهمة تلسكوب جيمس ويب من أصعب وأعقد المهمات العلمية، حيث إنّ هناك العديد من التحديات التي واجهت هذه المهمة، ومن أهم التحديّات التي واجهت العلماء هي أنّ تلسكوب جيمس ويب يجب أن يعمل عند درجة حرارة منخفضة جداً وقريبة من الصفر المطلق، وذلك حتى تتمكّن أجهزة التلسكوب من العمل بشكل تام، وبالتالي ترصد الأشعة تحت الحمراء القادمة من أعماق الكون والصادرة عن المجرّات البعيدة والتي ظهرت في بداية نشأة الكون دون أي تشويش، وأن يزوّد بالطاقة اللازمة لعمله بنفس الوقت؛ لذلك يجب على التلسكوب امتلاك جانب معرّض لضوء الشمس تصل فيه درجة الحرارة إلى 85 °C لكي يستفيد منها في توليد الطاقة الكهربائية من خلال الألواح الشمسيّة ودرجة حرارته تعد مرتفعة، وجانب آخر مظلم يحتوي على الكاميرات والمشعرات الحراريّة، ومحميّ بشكل تام من أشعة الشمس أو أي مصدر حراريّ يشوش على عمل أجهزته الحساسة للأشعة تحت الحمراء وقد تصل درجة حرارة هذا الجانب إلى 233- °C، وإلا فإن الأشعة تحت الحمراء من التلسكوب نفسه سوف تطغى على أدواته ويقيسها بدلاً من قياس الأشعة تحت الحمراء القادمة من أعماق الكون، وهنا يأتي دور الدرع الشمسي الذي يعدّ بحد ذاته اختراعاً مذهلاً في حماية وحجب أشعة الشمس عن الجانب المظلم،

وهو يعمل كمظلة كبيرة تسمح للمرآة الرئيسية والبصريات والأدوات بالتبريد وخفض درجة الحرارة 40 كلفن والموافق للدرجة 233- °C، وتبلغ مساحته مساحة ملعب تنس، ومن ميزاته أنّه خفيف الوزن وقوي جداً ومقاوم لعوامل تآكل الإشعاع الشمسي، وأنه يحافظ على أبعاده مع اختلاف درجات الحرارة الرهيبة التي يتعرّض لها وعاكس للضوء، وهذا ما حققه درع الشمس، وبالتالي لن يبقى أي مصدر للأشعة يتلقاها الجانب المظلم من التلسكوب سوى الأشعة القادمة من المجرّات والنجوم البعيدة والموجودة في أعماق الكون، وهذا ما حققه الدرع الشمسي في الحفاظ على الفرق في درجات الحرارة الرهيب بين الجانب الساخن والمواجه للشمس والجانب المظلم البارد في التلسكوب والمواجه لأعماق الكون.




**الشكل 7.** الفرق بين جانبي التلسكوب المضيء والمظلم.

ومن التحديات التي واجهت عمل التلسكوب خفض درجة حرارة جهاز استشعار الأشعة تحت الحمراء إلى درجة منخفضة جداً تصل إلى 266 °C-، حيث إنّ درجة حرارة الجانب المظلم للتلسكوب في مداره هذا تبلغ 83 °C- وتعد هذه درجة عالية جداً بالنسبة لعمل الكاميرات والمشعرات الحراريّة، ومن هنا يجب على العلماء صنع جهاز تبريد بكلفة 150 مليون دولار يبرّد جهاز الاستشعار إلى هذه الدرجة المنخفضة، وأنّ يبرّد أجهزة التلسكوب دون أن ينتج أي اهتزاز مهما كان ضعيفاً، لأنّ أي اهتزاز ينتجه جهاز التبريد هذا ولو كان ضعيفاً جداً من شأنه أن يؤدي إلى اهتزاز في التلسكوب، وينتج صوراً ضبابية غير واضحة، ويستهلك القليل من الطاقة الكهربائية، لأنّه مزوّد بـ 2000 واط يجب أن تكفيه خلال فترة تشغيله. لذلك تمّ اختراع جهاز تبريد لا يحتوي على محرّك أو ضاغط أو أجهزة متحرّكة، كما تم اختراع نظام تبريد يعمل بالأمواج الصوتيّة يتم فيه تبريد غاز الهليوم إلى درجة حرارة منخفضة تصل إلى 267 °C- والذي يدعى pulse tube cryocooler.




**الشكل 8.** درجات الحرارة على جوانب تلسكوب جيمس ويب في مداره.

الشكل 9. آلية نقل تلسكوب جيمس ويب عبر صاروخ أريان 5.

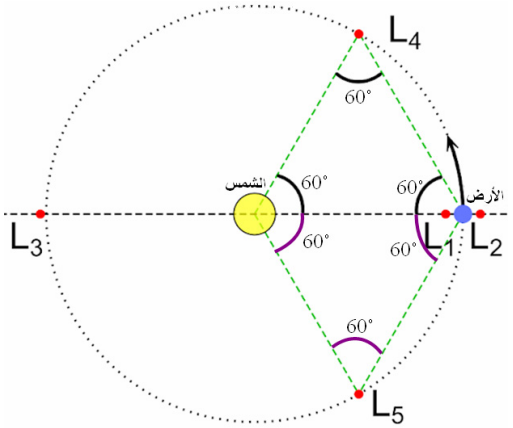
ومن أهم التحديّات التي واجهت العلماء والمهندسين أيضاً كيفيّة نقل تلسكوب بهذا الحجم عبر صاروخ ونقلها إلى الفضاء، وذلك لأنّ تلسكوب جيمس ويب يعدّ أكبر تلسكوب تمّ إطلاقه إلى الفضاء، وعملية الإطلاق هذه تعدّ بحد ذاتها إحدى أهم الصعوبات من حيث التقنيات والتعقيدات في تاريخ ناسا، وذلك بسبب كبر حجمه الناتج عن كبر درعه الشمسي، وتغلب العلماء على هذه الصعوبات بأن جعلوا هذا التلسكوب على شكل طبقات يتمّ تجميعها داخل صاروخ الإطلاق.

وبالرغم من أنّ العلماء اختبروا عملية الفتح عشرات المرّات، ولكن يبقى الخوف من آخر مرّة تمّ فيها قفل الدرع الشمسي، فلو حصل أي خطأ في آخر عملية قفل للدرع الشمسي فسوف تظهر خلال عملية الفتح، وخلال أوّل أسبوعين من عملية الإطلاق سوف ينفتح التلسكوب على مراحل عديدة، ويجب أن تتم عملية الفتح ببطء وهدوء شديدين، لأنّ أي حركة سريعة سوف تؤدي إلى التفاف التلسكوب حول نفسه بشكل خارج عن السيطرة ويخرج عن مداره ويضيع في الفضاء، وخلال عملية الفتح هذه وجد العلماء أنّ هناك 300 احتمال لحدوث الخطأ، والسبب في ذلك يعود إلى وجود 107 مقبض لتثبيت الدرع حيث تفتح هذه المقابض بالتدريج مع بعضها ببطء شديد، وبعدها يأتي دور البكرات والكبلات ومحرّكات التشغيل حتى تنشر الدرع الشمسي بشكله النهائي، وهذه العملية لوحدها تستغرق ثلاثة أيام تليها عملية فتح الأجهزة البصريّة للتلسكوب وتمركزها في مكانها.

وبعد مرحلة فتح ونشر الدرع الشمسي ونشر أجهزة هذا التلسكوب تبقى مخاطر أخرى كاحتمال اصطدام نيازك ولو كانت صغيرة جداً بالدرع الشمسي، لأنّه مصنوع من مادة بلاستيك الكابتون الرقيق والشفاف وقد يؤدي ذلك إلى تمزيقه، ولحل هذه المشكلة وضع العلماء فواصل تثبيت على شكل أشرطة متينة تمنع حدوث هذه التمزّقات حتى لو حدث اصطدام بين نيازك صغيرة والدرع الشمسي يبقى الثقب محصوراً بين هذه الفواصل.

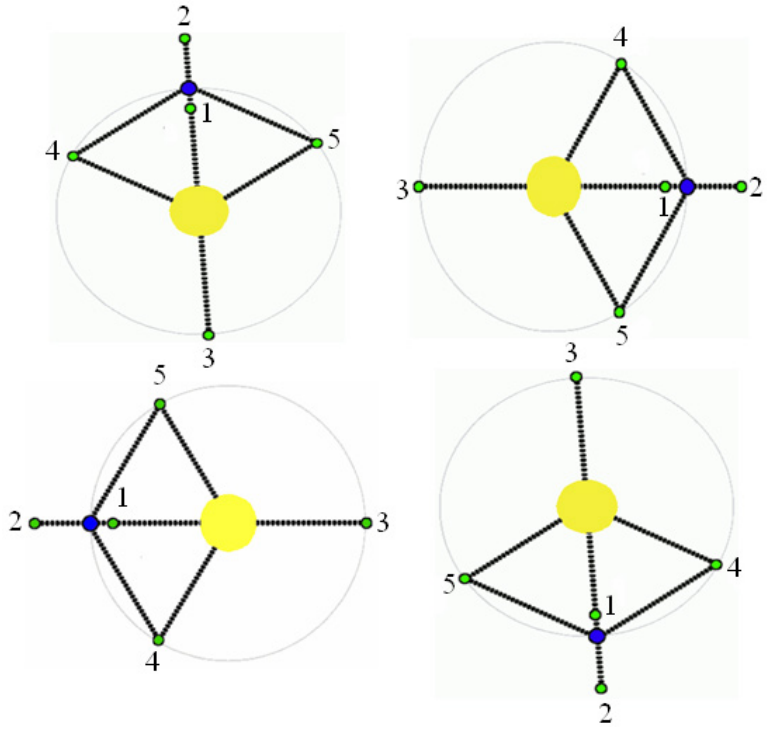
## ما هي نقاط لاغرانج Lagrange points

إنّ نقاط لاغرانج الخمس أو ما يُسمّى بمسألة الأجسام الثلاثة the three-body problem هي نقاط مميزة في ميكانيك الأجرام السماوية، وهي النقاط في الكون تتعادل أو تتساوى فيها قوى الجاذبيّة بحيث يمكن اعتبار الجاذبيّة في هذه النقاط معدومة، وتحدث عند تأثير جاذبية جرمين سماويين كبيرين على جسم ثالث في العادة أصغر حجماً مما يجعل حركته تتبع حركة الجسمين الكبيرين، وسمّيت هذه النقاط بهذا الاسم على اسم عالم الرياضيات الفرنسي جوزيف لويس لاغرانج Joseph-Louis Lagrange عام 1772، والذي كان امتداداً لرياضيّات العالم ليونارد إيلر Leonhard Euler، ويرمز لهذه النقاط الخمس بـ L1 وL2 وL3 وL4 وL5 كما هو موضّح في الشكل 10.




**الشكل 10.** نقاط لاغرانج الخمس لمسألة جرمين كبيرين هما الشمس والأرض وجرم ثالث صغير بالنسبة للجرمين الباقيين كقمر صناعي.

ورياضياً تعدّ نقاط لاغرانج حلول مسألة حركة ثلاثة أجسام تحت فعل الجاذبية بينها، فإذا كان لدينا جسمان فائقا الكتلة فإن قوى الجاذبية ستتوازن تماماً بينهما في خمسة أماكن، وفي كلٍّ من هذه الأماكن الخمسة يمكنك وضع قمر صناعي أو مركبة فضائية لهما كتلة صغيرة نسبياً، ويحافظان على موقعهما ببذل القليل من الطاقة وتتحرّك هذه النقاط الخمس كجملة واحدة كما هو موضّح في الشكل 11.




**الشكل 11.** النقاط الخمس عبارة عن نقاط لاغرانج الخمس التي تتحرّك مع جملة الأجسام الثلاثة كجملة واحدة.

تعد نقطة لاغرانج الأولى L1 أكثر نقاط لاغرانج وضوحاً وشهرةً، فهي نقطة التوازن بين قوتي جذب الجسمين، وتقع بين الشمس والأرض، وأي قمر صناعي مثلاً يدور حول الشمس سوف يكون بعده عنها أقصر من بعد الأرض عنها، فيدور حول الشمس في دورة زمنيّة أقصر، ونظراً لتأثير جاذبيّة الأرض عليه في نفس الوقت، فتقلّ جاذبيّة الشمس عليه، وعلى سبيل المثال؛ عند وضع قمر صناعي على ارتفاع قليل فوق سطح القمر سوف تعمل قوة جذب الأرض على سحبه نحو الأرض لكن قوة جذب القمر ستبطل قوة جذب الأرض، ولن يحتاج القمر الصناعي إلى استخدام الكثير من الوقود للحفاظ على موقعه، وتبعد هذه النقطة عن الأرض نحو 1.5 مليون كيلومتر في اتجاه الشمس لكن هذه النقطة غير مناسبة لتلسكوب جيمس ويب بسبب قربها من الشمس والأرض، وسوف تشوش على عمل التلسكوب.

تقع نقطة لاغرانج L2 على خط امتداد المسافة من الشمس إلى الأرض على الناحية البعيدة عن الشمس. كما تتسم هذه النقطة أيضاً بصفات نقطة لاغراج L1. من المفروض أن يكون زمن مدار جسم في هذا المكان حول الشمس أطول من 365 يوماً إلا أن قوة الجاذبية الأرضية والجاذبية الشمسية العاملتين على الجسم في نفس الاتجاه تعملان على أن تكون دورته حول الشمس تستغرق أيضاً 365 يوماً، وتوجد هذه النقطة على بعد 1.5 مليون كيلومتر من الأرض.

وقد نتساءل عند هذه النقطة لماذا لا تقوم الجاذبية المشتركة للجسمين الضخمين بجذب القمرالصناعي الصغير إلى الأرض. في الواقع سيكون القمر الصناعي عند النقطة L2 في مدار أعلى ومن المتوقع أن يسقط خلف الأرض، في حين يتحرك ببطء أكثر حول الشمس، ولكن قوة جاذبية الأرض ستقوم بسحبه للأمام لتساعد على إبقائه في هذا الوضع المستقر. ومشكلة هذه النقطة بالنسبة للأقمار الصناعية أنّ ظل الأرض سوف يحجب عنها ضوء الشمس اللازم لتشغيل الأقمار الصناعيّة.

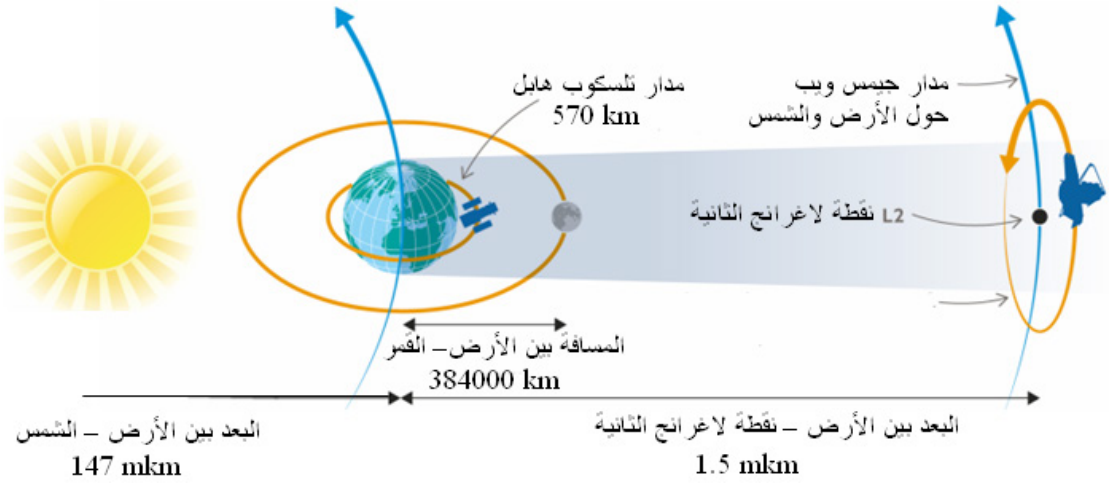
وبالنسبة لنقطة لاغرانج L3 فإنها تقع على الخط الواصل بين الكتلتين الكبيرتين وراء الجسم ذي الكتلة الأكبر، وعند وضع أي قمر صناعي أو تلسكوب في هذه النقطة سيبقى متوارياً تماماً خلف الشمس، ولن نستطيع رؤيته أو التواصل معه.

وتقع النقطتان L4 وL5 إلى الأمام والخلف من الجسم ذي الكتلة المنخفضة في المدار، ويمكن تشكيل مثلث متساوي الأضلاع بين الكتلتين، والنقطة الثالثة في المثلث هي النقطة L4، وإذا قمنا بقلب المثلث رأساً على عقب سوف نحصل على النقطة L5.

والجدير ذكره أنّ نقاط لاغرانج الثلاث الأولى غير مستقرة من ناحية الجاذبية، وأن أي قمر صناعي يوجد هناك سينحرف في نهاية المطاف عن وضع الاستقرار، وهو ما يُسمّى بالاستقرار القلق، لذلك سيحتاج القمر الصناعي إلى نوع من محركات الدفع للحفاظ على موقعه مستهلكة بذلك طاقة سوف تنفذ في نهاية المطاف ويخرج بذلك القمر عن الخدمة، ولفهم سلوك هذه النقاط تخيّل جبلاً مصقولاً مرتفعاً بقمة حادة، وعند وضع كرة بولينغ على هذه القمة لن تحتاج إلى الكثير من الطاقة للحفاظ على موقعها، ولكن الرياح ستهب في نهاية المطاف لتسقطها من مكانها إلى أسفل الجبل، وينطبق مفهوم هذه القمة على النقاط من L1 إلى L3، وهذا هو السبب في أننا لا نرى أي أجسام طبيعية متوضعة في تلك الأماكن.

ولكن النقطتين L4 وL5 مستقرتان بالفعل وهذا ما يُسمّى بالتوازن المطلق، فهما في الوضع المعاكس للنقاط الثلاث السابقة، وتشبهان وادياً عميقاً ستميل كرة البولينغ لتقع نحو أسفله وتستقر فيه؛ لذلك نجد الكويكبات وبقايا النيازك والحجارة الكونيّة ومخلفات المجموعة الشمسية تستقر في هاتين النقطتين وخاصة الكواكب الكبيرة مثل كوكب المشتري، فهي تمثل كويكبات طروادة Trojan المأسورة في آبار الجاذبية الطبيعية على الرغم من التفاعل الجذبي بين المشتري والشمس، وتتمركز أغلب أفكار الخيال العلمي حول وضع محطة فضائية أسطوانية دوارة عملاقة O'Neill cylinder في نقطتي L4 وL5، فهي ستكون مستقرة تماماً في المدار، وستكون عملية الوصول إليها سهلة نسبياً، وستكون أكثر الأماكن مثاليةً لبدء استعمار النظام الشمسي، وبالنسبة لتلكسوب جيمس ويب من غير المناسب وضعه في هذه النقطة لأنّه قد يتحطّم في هذه النقطة بسبب حجارة النيازك وغيرها.

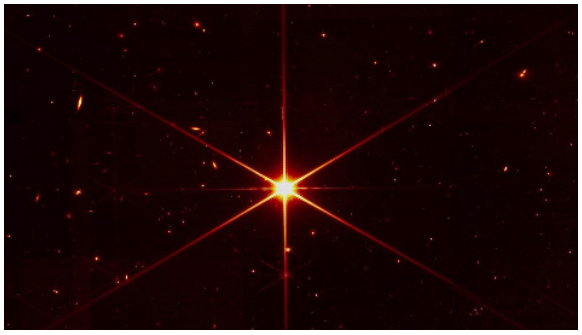
وتمّ اختيار نقطة لاغرانج الثانية L2 لوضع تلسكوب جيمس ويب فيها؛ لكونها بعيدة عن الشمس وقريبة نوعاً ما من الأرض 1.5 mkm وموجّهة دائماً نحو الأرض، وبالتالي تبقى على اتصال مع التلسكوب في جميع الأوقات، أمّا عيبها الوحيد فإنّها غير مستوية تماماً، مما يضطر لتزويد التلسكوب بكميّة قليلة من الوقود من حين إلى آخر، لكي يتم ضبط مسار التلسكوب من فترة إلى أخرى حتى يبقى في مساره المحدّد مستهلكاً بذلك كميّة من الوقود زيادة عن اللازم، ومحدّداً نظريّاً بعمر قدره حوالي 10 سنوات، وفي نهاية المطاف سوف ينتهي عمل هذا التلسكوب بسبب نفاذ كمية الوقود المختزنة فيه. علميّاً ورصديّاً تعد هذه النقطة المثلى لدراسة وسبر أعماق الكون. في الواقع إنّ تلكسوب جيمس ويب لن يوجد عمليّاً في نقطة لاغرانج الثانية L2، وإنّما سوف يدور حولها في مسار دائري، لأنّ ظل الأرض في هذه الحالة سوف يحجب أشعة الشمس عنه، وبالتالي لن تعمل أجهزته التي تعتمد على الطاقة الكهربائية، ويبين الشكل 12 موقع ومسار تلسكوب جيمس ويب في نقطة لاغرانج الثانية.




**الشكل 12.** مدار تلسكوب جيمس ويب في نقطة لاغرانج L2.

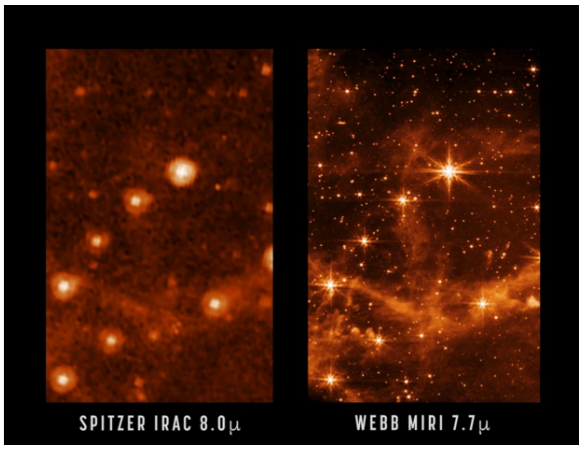
وسوف تسمح قوى الجاذبيّة للشمس والأرض وقوّة الطرد المركزيّة للتلسكوب في هذه النقطة بالحفاظ على موقعه، حيث لا يحتاج إلى قوّة دفع صاروخيّة إضافيّة تحول دون ابتعاده عن موقعه هذا.

وفي 11 شباط جاءت الصور الأولى من تلسكوب جيمس ويب، وقد استغرق التقاطها أسبوعاً كاملاً، فهي عبارة عن فسيفساء مكونة من 1560 صورة تصل إلى 54 غيغا بايت من البيانات، ومع استمراره في مهمته سوف يصبح قادراً على إرسال صور أكثر تفصيلاً، وقد تمّ اختيار نجم معيّن وأُخذت صورة لهذا النجم كخطوة تجريبيّة لمدى جاهزيته للعمل، فكانت صورة رائعة مدهشة مبينة بالشكل 13.



**الشكل 13.** الصورة الأولى التي التقطها تلسكوب جيمس ويب.

لا شك أنّ تلسكوب جيمس ويب سوف يحدث ثورة علمية في علم الفضاء ويساعد على الكشف والإجابة عن أسئلة كان من الصعب على أي تلسكوب آخر الإجابة عنها، فمثلاً إن الشكل 14 يبيّن لنا الفرق بين صور تلسكوب جيمس ويب وتلسكوب سبيتزر الملتقطة لنفس المنطقة (سحابة ماجلان) في الفضاء.

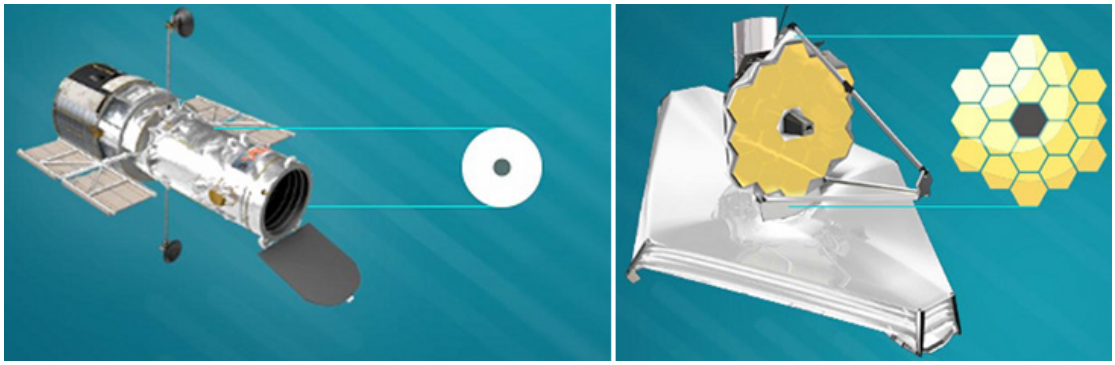



الشكل 14. صورة لسحابة ماجلان الكبيرة تم التقاطها (على اليسار) بواسطة سبيتزر، و(على اليمين) بواسطة تلسكوب جيمس ويب الفضائي.

## الخاتمة

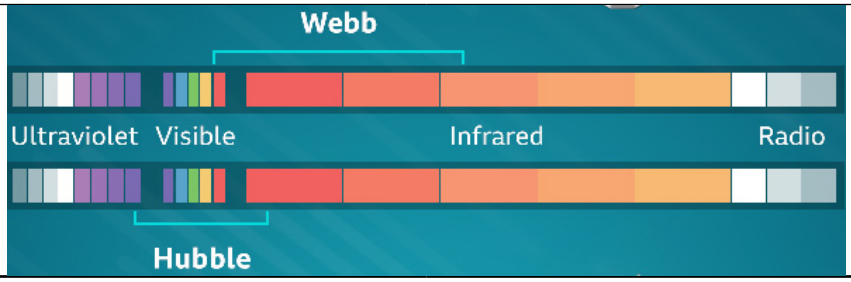
في الواقع نحن ممتنُّون إلى تلسكوب هابل في كلّ ما نعرفه اليوم، لكن الطموح البشري والتطور التكنولوجي الذي وصلنا إليه يتجاوز إمكانيته، لذلك يعد تلسكوب جيمس ويب ثورةً تكنولوجية، وربما يعتقد البعض أنه التلسكوب البديل، لكن الأصحّ قوله هو أنه خليفة هابل، وسوف يكمل في مسيرته العلمية ما عجز هابل عن اكتشافه، ولكنّ الفضل كله يعود إلى تلسكوب هابل الذي يُعَد المحفز الأساسي لأسسِ المهمّةِ العلمية التي تم إنشاء خليفته من أجلها. واعترافاً بالجميل لعلماء خدموا العلم وقدموا الكثير للبشرية، سُمِّي تلسكوب جيمس ويب الفضائيّ نسبةً إلى جيمس إدوين ويب الذي تولى رئاسة مؤسسة الإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (ناسا) خلال برنامج أبولو (1961-1968 م)، حيث ساعدت مهارات وخبرات جيمس أدوين ويب السياسية والإدارية على دعم برنامج أبولو الذي أرسل إلى القمر عام 1969 م.

وفي النهاية لابد من أن نقوم بمقارنة سريعة بين تلسكوبي جيمس ويب وهابل، حيث يبين الشكل 15 والجدول 1 مقارنة بسيطة وسريعة بينهما.



**الشكل 15.** مقارنة بين تلسكوبي جيمس ويب وهابل.

**الجدول 1.** مقارنة بين تلسكوبي جيمس ويب وهابل.

| المقارنة | تلسكوب جيمس ويب | تلسكوب هابل |
|---|---|---|
| الإطلاق | 2021 | 1990 |
| مدّة العمل الافتراضية | 10 سنوات | 32 سنة |
| قطر المرآة الرئيسية | 6.5 m | 2.4 m |
| الكتلة | 6200 kg | 12200 kg |
| درجة حرارة العمل | -230 °C | 20 °C |
| المدار | 1.5 mkm | 570 km |
| مجال الطيف المرصود | – مجال رصد طيف جيمس ويب: يتراوح بين 0.6 و 8.3 مكرومتر وهو يوافق للضوء الذي تردده أقل من الضوء المرئي حتى منتصف الأشعة تحت الحمراء<br>– مجال رصد طيف هابل: يتراوح بين 0.8 و2.5 مكرومتر وهو يوافق للضوء المرئي والأشعة فوق البنفسجية | |
| |  | |

## المراجع


– ما هي نقاط لاغرانج (2017)؟

Available at: https://nasainarabic.net/education/articles/view/what-are-lagrange-points.

– محادثة حول ويب: هيكلية ومكونات تلسكوب «جيمس ويب» الفضائي التابع لناسا (2015).

Available at: https://nasainarabic.net/webb/articles/view/webb-conversations-components-structure-of-nasa-s-james-webb-space-telescope.

- James Webb Space Telescope's tantalising first images (2022). Available at: https://www.skyatnightmagazine.com/space-missions/james-webb-space-telescope-images/

- Science Focus, James Webb Space Telescope. Everything you need to know about the Hubble successor (2022). Available at: https://www.sciencefocus.com/space/james-webb-space-telescope/

- The observatory is the space-based portion of the James Webb Space Telescope system (2022). Available at :https://webb.nasa.gov/content/observatory/index.html

- What Are The Lagrange Points? (2016). Available at: https://www.universetoday.com/102785/what-are-lagrange-points/?utm_content=bufferaf4fd&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer.


تأليف: **د. سامي الشيخ سلو**، قسم الفيزياء، هيئة الطاقة الذرّية السورية.

المركبات الكيميائية في نبات القنب حائط صد أمام فيروس كورونا

# تطوير منصة نباتية لإنتاج لقاح بشري واعد في مواجهة فيروس كورونا

يبدو أن مستقبل اللقاحات أشبه بتناول سلطة أكثر من الحصول على حقنة في الذراع، حيث يدرس العلماء ما إذا كان بإمكانهم تحويل النباتات الصالحة للأكل إلى مصانع لقاحات mRNA، حيث تعمل تقنية الحمض النووي الريبوزي المرسال mRNA المستخدمة في لقاحات "كوفيد-19" عن طريق تعليم خلايانا التعرف على الأمراض المعدية وحمايتنا منها. يعمل العلماء على توصيل تكنولوجيا هذا اللقاح عبر النباتات الصالحة للأكل أملاً في أن يتمكنوا من تطوير اللقاحات بنفس التكنولوجيا المستخدمة في تطوير لقاحات فايزر وموديرنا ضد كوفيد-19 حيث يمكن هضم النباتات بسهولة أكبر من حقنة اللقاح.

وإذا نجحت التجارب فستكون هذه النباتات نعمة للدول ذات الدخل المنخفض لأنها أسهل في التخزين والنقل من جرعات لقاحات كوفيد-19، ويشار إلى أن تقنية mRNA المستخدمة في لقاحات فايزر وموديرنا كانت موجودة منذ فترة طويلة، ولكن نادراً ما كانت تستخدم في الطب حتى وقت قريب، وهي تعمل من خلال تقديم تعليمات للجسم حول كيفية تكوين بروتينات spike التي تغذي عدوى كوفيد-19، وبمجرد أن يكتشف الجهاز المناعي للشخص البروتين، فإنه سيقاومه، ويشكل مناعة ضد البروتينات إذا ظهرت مرة أخرى في جسم الإنسان عن طريق التعرض للفيروس، وتعمل الشركات الآن على تطبيق هذه التقنية على لقاحات أخرى بما في ذلك لقاح الإنفلونزا السنوي.

ويعتقد الباحثون أن البلاستيدات الخضراء –أحد أنواع الصانعات الخلوية الموجودة في خلايا النبات– يمكنها أن تحمل الجينات التي لا تكون عادة جزءاً من النبات، وتعني هذه السمة أن هذا الجزء من النبات يحمل الكثير من الإمكانات، وأوضح جيرالدو: «إنها مصانع صغيرة تعمل بالطاقة الشمسية وتنتج السكر والجزيئات الأخرى التي تسمح للنبات بالنمو. إنها أيضاً مصدر غير مستغل لصنع الجزيئات المرغوبة». ويعمل الفريق على اكتشاف الطريقة المثالية لنشر مادة الحمض النووي الريبوزي المرسال في البلاستيدات الخضراء بطريقة لن تدمرها، وإذا نجحت فسيكون من الممكن إعطاء لقاحات كوفيد-19 واللقاحات الأخرى التي تستخدم تقنية mRNA عن طريق الفم، كما سيسمح هذا بإنتاج لقاح يمكن نقله بسهولة أكبر عبر مسافات طويلة.

ومن جهة أخرى أشارت الدراسات إلى الدور المهم الذي قد تؤديه بعض المركبات الكيميائية داخل نبات القنب والتي قد تشكل علاجاً ثورياً في مواجهة فيروس كورونا؛ حيث تم تحديد ما لا يقل عن ثلاثة مركبات يتم إنتاجها بشكل طبيعي في نبات القنب تتمتع بفعالية في منع جزيئات الفيروس التاجي من دخول الخلايا البشرية، وهذه الآلية تحاكي فعالية نشاط الأجسام المضادة، حيث ترتبط مركبات القنب نفسها بالبروتين الشوكي المميز للفيروس.

ويؤكد العلماء المشاركون في الدراسة أن الأمر يجب أن يخضع بشكل دقيق لسلسلة من التجارب السريرية قبل أن يتم التأكد على وجه اليقين ما إذا كانت الفكرة قابلة للتطبيق في الحياة الواقعية بالطريقة التي تعمل بها في الظروف الخاضعة للرقابة المشددة في المختبر، ومع ذلك يقول الدكتور ريتشارد فان بريمن؛ أحد مؤلفي الدراسة وأستاذ الكيمياء الطبية في جامعة ولاية أوريغون: "إن النتائج واعدة بشكل لا يصدق"، وأضاف أن "عدداً من مكملات القنب الغذائية التي تحتوي على هذه المركبات متاحة دون وصفة طبية في جميع أنحاء البلاد"، ما يعني أنه إذا تم نقل النتائج إلى مرحلة التجارب السريرية وتم إثبات النظرية، فسيكون العلاج الوقائي متاحاً على الفور لملايين البشر.

ولاحظ العلماء خلال التجارب المخبرية أنه مع الاستخدام الواسع النطاق للقنب يمكن الجمع بين التطعيم والخلاصات التي حصلنا عليها من نبات القنب خصوصاً المحتوية على مركبات CBD-A و CBG-A و THC-A من أجل خلق بيئة أكثر تحدياً لفيروس كورونا SARS-CoV-2، مما يقلل من احتمالية هروبه من الأجسام المضادة.

*ترجمة: م. محمد جوهر، هيئة الطاقة الذرية السورية.*

- Interesting Engineering-Health. Tobacco-based COVID-19 vaccine got FDA approval for human trials. *https://interestingengineering.com/tobacco-based-covid-19-vaccine-got-fda-approval-for-human-trials. 2020.*
- Ortega-Berlanga B, Pniewski T (2022). Plant-based vaccines in combat against coronavirus diseases. Vaccines 10(2): 138. *https://doi.org/10.3390/vaccines10020138.*

# حاجة العلم لتقليص بصمته الكربونية

## انبعاث غازات الاحتباس الحراري من البحوث العلمية يضر بالمناخ

**ما هي قيمة العلم؟ فيما يتعلق بإجابة العديد من الباحثين، فإنها: "العلم لا يقدر بثمن".**

لا يقتصر الأمر على أن العلم قد وفر أسس الحياة الحديثة من خلال تنقية المياه وتوفير الطاقة والكهرباء والاتصالات أو من خلال الأشياء المفيدة التي يمكن الحصول عليها باستعمال هذه التقانات، فالعلم يعمّق فهمنا للعالم من حولنا بطريقة تتجاوز الفوائد المادية، ربما لم يكن الشاعر ويليام بليك William Blake يفكر في العلم عندما وصف رؤيته بقوله: "عالم في حبة رمل وسماء في زهرة برية"، لكن كان من الممكن أن يكون كذلك. بالنسبة لي فإن أعمق قيمة للعلم هي الطريقة التي يمكن أن تجعلنا نشعر بالارتباط بمقياس الكون وقدرة القوى الطبيعية.

ومع ذلك يمكن أن يكون العلم مكلفاً. لقد أثار بعض الباحثين مؤخراً أسئلة صعبة حول تكلفة معينة مثل البصمة الكربونية للعلم. يستخدم البحث العلمي الواسع النطاق الكثير من الطاقة القائمة على الكربون وينبعث منها كميات كبيرة جداً من غازات الاحتباس الحراري، مما يساهم في أزمة المناخ الحالية، لذلك حتى عندما يساعدنا العلماء في فهم العالم، فإنهم يتسببون أيضاً في بعض الضرر له.

في دراسة حالة حديثة لعلوم الكمبيوتر يناقش ستيفن غونزاليس مونسيرات Steven Gonzalez Monserrate وهو الباحث في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا Massachusetts Institute of Technology التكاليف البيئية لهذا المجال البحثي ولا سيما التخزين السحابي للكمبيوتر ومراكز البيانات الضخمة التي ماتزال تتوسع. كما يؤكد أنّ السحابة هي "مستهلكة للكربون"، ويمكن لمركز بيانات واحد استخدام نفس كمية الكهرباء التي يستخدمها 50000 منزل، وتتمتع السحابة بأكملها ببصمة كربونية أكبر من صناعة الطيران بأكملها، لكنّ مشكلة الكربون في البحث لا تقتصر فقط على علوم الكمبيوتر، فالمراصد الفلكية الكبيرة والتلسكوبات الفضائية هي بواعث كبيرة، فقد وجدت إحدى الدراسات التي نُشرت في وقت سابق من هذا العام في مجلة Nature Astronomy، أن المراصد الفلكية الرائدة في العالم ستنتج على مدار حياتها حوالي 20 مليون طن متري من مكافئ ثنائي أكسيد الكربون $CO_2e$. في مؤتمر صحفي أعلن الباحثون فيه عن نتائجهم، قال المؤلفون إنه إذا أراد العالم مواجهة التحدي المتمثل في انعدام انبعاثات غازات الاحتباس الحراري بحلول عام 2050، فإنه يجب على علماء الفلك تقليل البصمة الكربونية لمنشآتهم البحثية بما يصل إلى 20 مرة؛ يعني ذلك بناء عدد أقل من المراصد الكبيرة. لقد حلّل هؤلاء الباحثون منشآتهم الخاصة في معهد البحوث في الفيزياء الفلكية وعلم الكواكب IRAP في تولوز، فرنسا، فوجدوا أنّ متوسط انبعاثات غازات الاحتباس الحراري للفرد كان 28 طناً متريا من ثنائي أكسيد الكربون سنوياً مقارنة بـ 4.24 طناً متريا للفرد في العام بالنسبة للمواطن الفرنسي العادي.

ركز علماء آخرون على البصمة الكربونية للمؤتمرات البحثية؛ إذ يعد الاجتماع السنوي للاتحاد الجيوفيزيائي الأمريكي AGU أحد أهم التجمعات لعلوم المناخ، وعادة ما يُعقد في سان فرانسيسكو. قام مصمم نماذج المناخ ميلان كلاور Milan Klöwer وزملاؤه بحساب البصمة الكربونية المتعلقة بالسفر لاجتماع AGU لعام 2019 والذي بلغ 80000 طن متري من ثنائي أكسيد الكربون؛ أي حوالي ثلاثة أطنان مترية لكل عالم مشارك. كان هذا الناتج للفرد مساوياً للناتج السنوي للشخص العادي الذي يعيش في المكسيك. قدم كلاور أفكاراً للحد من البصمة منها: نقل الاجتماع إلى مدينة في وسط الولايات المتحدة لخفض مسافة السفر وعقد المؤتمر كل سنتين وتشجيع المشاركة الافتراضية. بالمجمل، يمكن أن تقلل هذه التغييرات من أثر السفر بأكثر من 90%. وقد أعلن AGU أنّه يخطط لتغيير المواقع بشكل مستمر في المستقبل واستخدام نموذج الاجتماع الهجين.

ولكن كما تظهر تحليلات علم الفلك وعلوم الكمبيوتر، فإنّ البحث، وليس السفر فقط، هو الذي يوسع البصمة الكربونية العلمية، فقد خلصت إيما ستروبيل Emma Strubell عالمة الكمبيوتر في جامعة كارنيجي ميلون Carnegie Mellon University وزملاؤها في دراسة

لم تتم مراجعتها بعد إلى أنّه من وجهة نظر ميزانية الكربون، قد يكون من الأفضل تخصيص المقدار الهائل من الطاقة المستهلكة في نمذجة الذكاء الاصطناعي neural network من أجل تدفئة المنزل لأسرة. وقد أثيرت شكاوى مماثلة حول المعلوماتية الحيوية ونمذجة اللغة والفيزياء.

هذه حقيقة يصعب مواجهتها، ولكن مع مرور الوقت ينبغي على العلماء إيجاد طريقة للقيام بالمزيد من عملهم بموارد أقل بكثير من طاقتنا لمنع حدوث كارثة مناخية.

*ترجمة: د. جمال العبدالله، هيئة الطاقة الذرية السورية.*

Scientific American, 1.7.2022

*https://www.scientificamerican.com/article/science-needs-to-shrink-its-carbon-footprint/*

# نحو تصنيع خلايا شمسية شبه شفافة بحجم النوافذ

طور باحثون من جامعة ميشيغن طريقة لتصنيع خلايا شمسية عالية الكفاءة شبه شفافة وذلك في خطوة مهمّة نحو وضع تلك الخلايا على نوافذ الشقق في الأبنية السكنية.

قال ستيفن فوريست الأستاذ الجامعي في كلية الهندسة الكهربائية في جامعة بيتر فرانكين المرموقة وأحد المشاركين في دراسة منشورة في مجلة JOULE: "نستطيع الآن من حيث المبدأ تصنيع خلايا شمسية عضوية شبه شفافة بطول مترين وعرض مترين وهو ما يجعلنا قريبين من مساحة النوافذ في الأبنية السكنية".

تتصف الخلايا الشمسية التقليدية المصنوعة من مادة السليكون بكونها غير شفافة مطلقاً، وهي تستعمل في مزارع الطاقة الشمسية ويمكن وضعها فوق سطوح المباني إلا أنه من غير الممكن وضعها على النوافذ لأنها تمنع مرور الأشعة الشمسية إلى داخل المباني، أما الخلايا الشمسية العضوية التي تكون فيها الطبقة الماصة للضوء نوعاً من البلاستيك فيمكن أن تكون شفافة.

بقيت الخلايا الشمسية العضوية متراجعة عن الخلايا السليكونية بسبب تحديات هندسية أدت إلى مردود منخفض وعمر افتراضي قصير، إلا أن أبحاثاً جديدة في مختبر فوريست أدت إلى تحسن كبير في المردود حيث اقترب من 10%، أما العمر الافتراضي فتم تقديره بثلاثين عاماً.

مثّل تصنيع وصلات كهربائية على المستوى المكروي بين الخلايا الشفافة المكونة للوح الشمسي تحدياً كبيراً حيث إن استعمال الطريقة التقليدية التي تعتمد على الليزر في تشكيل الخلايا يمكن أن يؤدي إلى تخريب الطبقة الماصة.

وقد طوّر الباحثون عوضاً عن الطريقة التقليدية طريقة جديدة لتشكيل الخلايا تعتمد على التقشير متعدد الخطوات وصلوا من خلالها إلى ميز resolution على المستوى المكروي؛ حيث قاموا في البداية بترسيب أفلام رقيقة من البلاستيك ثم قاموا بتشكيلها على شكل شرائط رفيعة جداً ثم قاموا بتوضيع الطبقات العضوية والمعدنية قبل أن ينزعوا الشرائط البلاستيكية وصولاً إلى الحصول على وصلات كهربائية دقيقة جداً بين الخلايا.

قامت مجموعة البحث بتوصيل ثماني خلايا شمسية شبه شفافة أبعاد كل منها 4 × 0.4 سم ويفصل بينها وصلات عرضها 200 مكرون لإنشاء لوح مساحته 13 سم$^2$، وقد بلغت كفاءة تحويل الطاقة 7.3% أي أقل بنسبة 10% تقريباً من الخلايا الشمسية المنفردة. أكد الباحثون أن هذه الخسارة الصغيرة في المردود لا تزيد مع زيادة مساحة اللوح؛ لذا من المتوقع الحصول على مردود مماثل للألواح ذات المقاسات الأكبر التي تتناسب مع نوافذ الأبنية، وتقترب شفافية الخلايا المصنعة من 50% ويميل لونها إلى الأخضر، وبالتالي فهي مناسبة للاستخدام في نوافذ الأبنية التجارية، أما بالنسبة للأبنية السكنية فمن المرجح أن تكون ذات نسبة شفافية أعلى ومرغوبة أكثر وهو أمر يمكن تحقيقه باستخدام التقنية السابقة نفسها.

يقول السيد شينجينغ هوانغ طالب دكتوراه في الفيزياء التطبيقية وأحد المشاركين في البحث المنشور: "لقد حان الوقت لدخول الشركات الصناعية في هذه التكنولوجيا من أجل المساهمة في نشرها على نطاق واسع من خلال تقليل كلفتها".

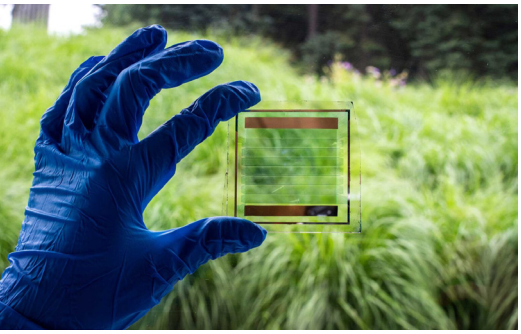
وفي المرحلة التطبيقية سيتم وضع لوح الخلايا الشمسية المرنة بين لوحين من ألواح النوافذ العادية الشفافة وسوف يكون الهدف

من أفلام النوافذ المولدة للطاقة هو أن تكون شفافة بنسبة 50% وبكفاءة تتراوح بين 10 و15% وهو أمر يمكن تحقيقه في غضون عامين وفقاً للسيد فورست الذي أضاف: "إن البحث الذي نقوم به يقلل من المخاطر على الصناعيين عند قيامهم بالاستثمارات اللازمة لعمليات الإنتاج على نطاق واسع".

كما أكد السيد فوريست على إمكانية تعميم هذه التقنية على الأجهزة الإلكترونية العضوية الأخرى حيث تقوم مجموعته بالفعل بتطبيقها على العناصر الإلكترونية OLEDS للإضاءة البيضاء. وقد تقدمت جامعة ميشيغان بطلب لحماية براءات الاختراع وتسعى للحصول على شركاء لتقديم التكنولوجيا إلى السوق.

يشغل السيد فوريست كرسي التدريس "باول ج غوبل" في العلوم الهندسية كما أنه أستاذ مدرس في كليات الهندسة الكهربائية والمعلوماتية وعلوم المواد والفيزياء والفيزياء التطبيقية. قام المشاركان في البحث هوانغ وديجوفان بتصميم التجارب وتنفيذها، أما يونجشي لي المساعد في الأبحاث فقد ساهم في تصنيع الخلايا الشمسية في منشأة لوري النانوية.

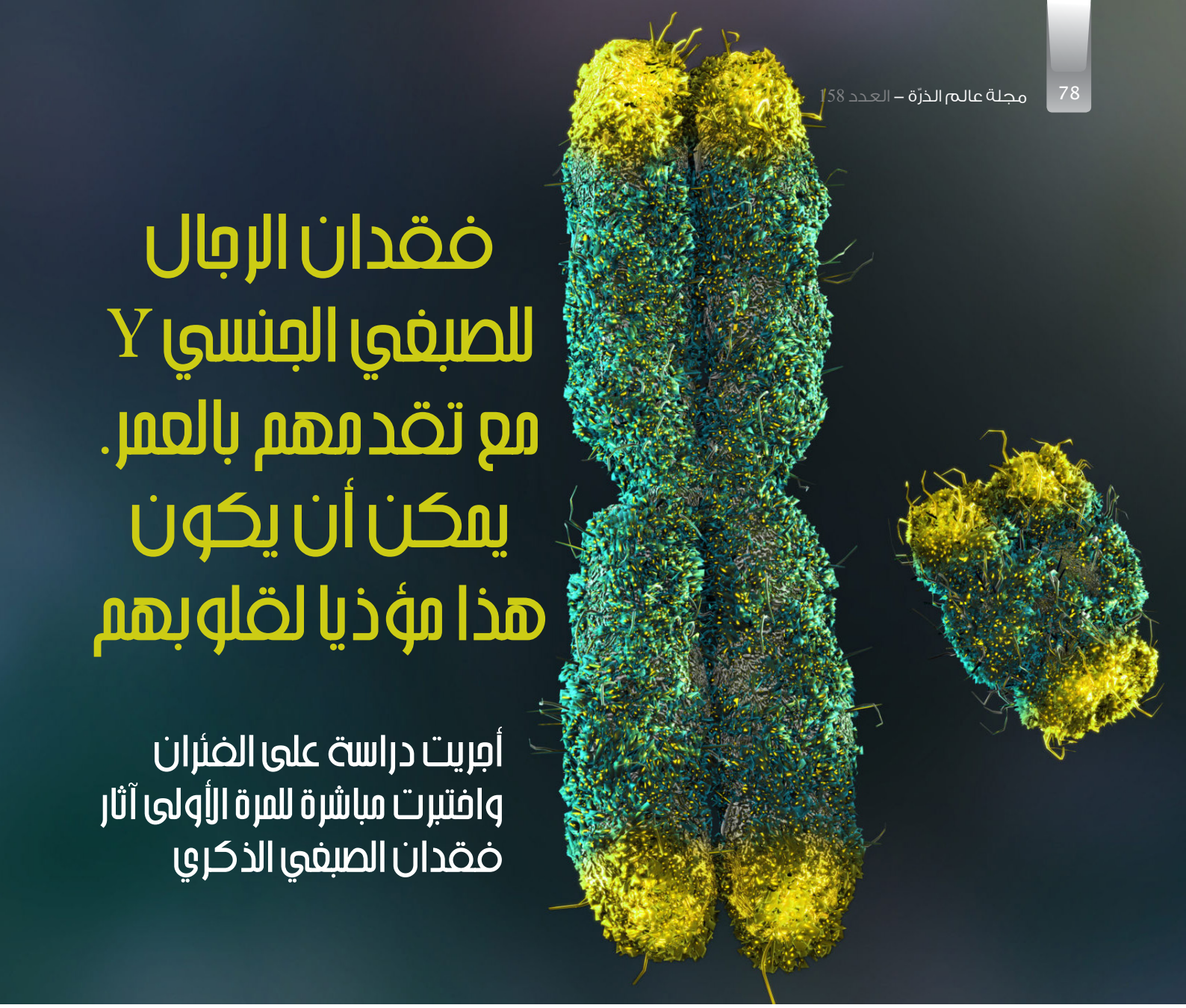
تم دعم البحث بشكل أساسي من قبل وزارة الطاقة الأمريكية كما تم توفير دعم إضافي من قبل شركة Universal Display Corporation التي يساهم فيها مادياً كل من جامعة ميشيغن والسيد فوريست.



ترجمة: د. محسن شحّود، هيئة الطاقة الذرية السورية.

Science News, 19.7.2022

*https://www.sciencedaily.com/releases/2022/07/220719113406.htm*



# فقدان الرجال للصبغي الجنسي Y مع تقدمهم بالعمر. يمكن أن يكون هذا مؤذيا لقلوبهم

## أجريت دراسة على الفئران واختبرت مباشرة للمرة الأولى آثار فقدان الصبغي الذكري

لا يفقد الرجال كلما تقدموا بالعمر شعرهم فحسب، بل يفقدون المقوية العضلية وغضروف الركبة، ويبدؤون بفقدان الصبغي Y في خلاياهم. ربط العلماء هذا الاضمحلال بقائمة طويلة من الأمراض وبخطورة موت مرتفعة، لكن يبقى هذا الدليل غير مباشر وظرفياً. أشار الباحثون الآن أنه عندما يزيلون الصبغي Y من ذكور الفئران تموت هذه الذكور أبكر من مثيلاتها من الفئران التي تحمل الصبغي Y، يمكن أن يعود السبب لتصلب قلوبها. وأشار جون بيري وهو باحث وراثي بشري في جامعة كامبردج إلى أن هذا أقوى دليل حتى الآن أن فقدان الصبغي Y يعدّ مضراً للصحة، ويقود بيري واحدة من أكبر الدراسات على تواتر فقدان الصبغي Y لدى الرجال، لكنه غير مرتبط بالبحث الجديد.

بغض النظر عن سمته الذكورية، يعد الصبغي Y –الذي يحتوي 71 مورثة والأصغر من عُشر الصبغي الجنسي X– أقل قيمة من الصبغي X.

ولكن لماذا لا يمر هذا الصبغي إلى إحدى الخليتين البنتين في بعض الأحيان عندما تنقسم الخلايا. يعد تحليل عينات الدم أسهل طريقة لكشف فقدان الصبغي Y، حيث وجد الباحثون أن الصبغي فُقد على الأقل في بعض خلايا الدم البيضاء في حوالي 40% من الرجال بعمر 70 سنة وفي 57% للرجال بعمر 93 سنة ولدى بعض الرجال المسنين أكثر يفقد الصبغي Y في أكثر من 80% من الخلايا.

يمكن أن تبقى الخلايا حية وتتكاثر دون الصبغي Y لكن عندما يفقد الرجال الصبغي Y في بعض من خلاياهم يبدون أكثر عرضة للمعاناة من مرض قلب أو سرطان أو مرض الزهايمر أو أمراض أخرى مرتبطة بالعمر. إضافة إلى ذلك، يمكن أن تكون هذه الحالة

السبب في موت الرجال أبكر بخمس سنوات من النساء وسطياً في الولايات المتحدة حسب ما أضاف البيولوجي الجزئي كنت والتس من جامعة فرجينيا.

ولاختبار فيما إذا كانت إزالة الصبغي Y تضر بالصحة، أجرى والتس وزملاؤه ازدراع نقي عظم لـ 38 فأراً، واستخدموا تقنية الـ CRISPR-Cas9 لتحرير المورثات من أجل إزالة الصبغي Y من خلايا نقي عظم الفأر، وأدخلوا بعدها الخلايا المُحورة في فئران ذكور فتية أزيل منها نقي العظم، لم تبعد هذه المقايضة الصبغي Y من المجموع لكنها أزالت الصبغي Y في 49 إلى 81% من خلايا الدم البيضاء وهي النسبة نفسها في أشخاص عدة لديهم فقدان الصبغي Y. وقد تلقت الفئران الـ 37 الشاهدة في هذه التجربة أيضاً زرع نقي العظم لكن حافظت على الصبغي Y.

تابع الباحثون مجموعتين من الفئران لمدة سنتين، كانت القوارض فاقدة الصبغي Y تموت على الأغلب خلال هذه الفترة ويبقى على قيد الحياة حوالي 40% من هذه الفئران لمدة 600 يوم بعد عملية الزرع مقابل 60% من القوارض الشاهدة.

وقد كان لدى الفئران التي فقدت الصبغي Y قلوباً أضعف أيضاً، إضافة إلى ذلك ظهرت مشكلة بناء نسيج ضام قاسٍ، وهي عملية دعيت بالتليف في قلوب الفئران التي فقدت الصبغي Y، إذ يصلب هذا التراكم القلب ويعطل قدرته على ضخ الدم.

لم تلغ زراعات نقي العظم التي نفذها الباحثون الصبغي Y في خلايا عضلات القلب، لكن خلايا كريات الدم البيضاء والمسماة ميكروفاج (البالعات) التي تتولد في نقي العظم تنزلق إلى القلب، وقد وجد الباحثون أن العديد من خلايا ميكروفاج في الفئران الخالية من الصبغي Y تبدأ بتحفيز تشكل التليف محرضة خلايا أخرى في القلب لتكوّن المزيد من الأنسجة الضامة.

ويمكن لشيء مشابه أن يحدث في البشر. لقد حصل والتس وزملاؤه على دنا DNA ومعلومات البقاء على الحياة من حوالي 15000 رجل من بنك UK-Biobank وهو قاعدة بيانات صحية هائلة، وقد حدد فريق العمل أن الرجال ممن فقدوا الصبغي Y في على الأقل 40% من خلايا الكريات البيضاء لديهم ويبدو أن 31% منهم يموتون من أمراض جهاز الدوران أكثر من الذين يكون لديهم الصبغي Y أكثر توافراً، وعندما تمكن العلماء من معرفة أسباب الموت المرتبط مع غياب الصبغي Y اكتشفوا عدة أمراض قلبية تتضمن الفشل القلبي.

حفز فقدان الصبغي Y التليف في القلب مسبباً فشلاً قلبياً وموتاً مبكراً، هذا ما استنتجه فريق العمل في مجلة Science، وقد قلل الباحثون لفترة طويلة من أهمية الأثر الصحي للصبغي Y لأنه لا يحتوي إلا على القليل من المورثات. يقول والتس: "لكن تشير الحقيقة إلى إلقاء الضوء عليه" ويضيف: "هذا يعود لجدولة سنوات عدة من الحياة الضائعة".

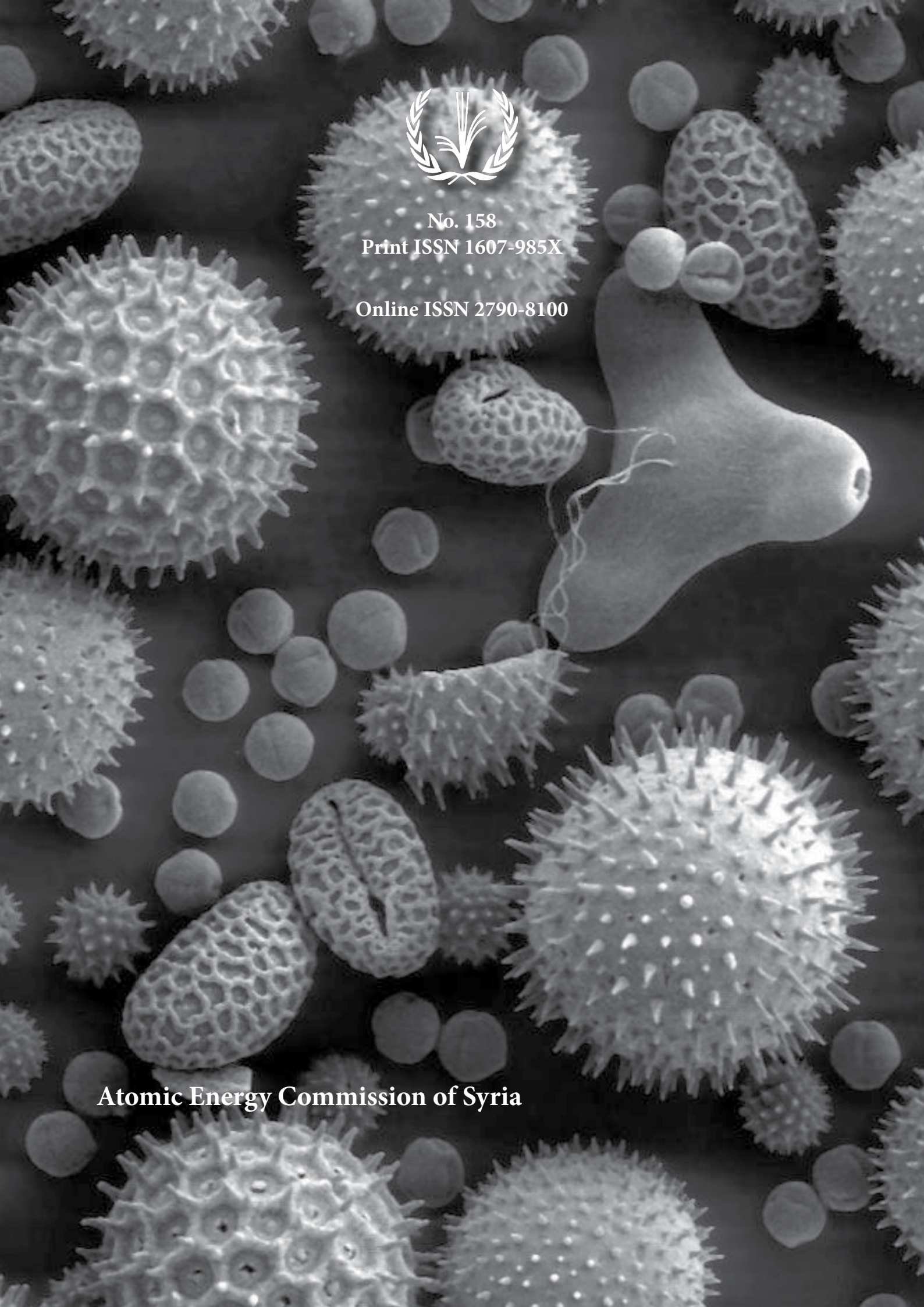
ورأى ميتشل ماشيلا؛ وهو يعمل في الوبائيات الوراثية في معهد الوطني للسرطان ولم يكن مرتبطاً بهذه الدراسة أن هذا البحث يقدم دليلاً مقنعاً. إن اكتشاف أن البلعات (الميكروفاج) في الفئران، التي فقدت الصبغي Y، تُغير في شخصيتها وتبدأ بتحفيز التليف وهذا ذو معنى، هذا ما أضافه بيولوجي النسج الضامة آني برادشو من جامعة جنوب كارولينا الطبية.

هذا التحول هو أساسي للعديد من حالات التليف التي نراها في القلب. ومع ذلك، فقد حذر طبيب القلب نيكولاوس فرانفوجياني في جامعة أبرت أينشتاين للطب من أن هذه النتيجة لا تؤكد أن زيادة التليف يقتل الفئران، ويقول: "في الحيوانات فاقدة الصبغي Y يكون التليف قليلاً لحد ما". إضافة إلى ذلك تعاني القوارض من ضعف القلب وهذا ليس سيئاً ولا يكون مميتاً، ويمكن أن تموت الفئران بسبب أسباب أخرى مرتبطة بالقلب، ويقول: "ماتزال الدراسة مثيرة ويمكن أن يكون لها أثر كبير في الطريقة التي نرى فيها فشل القلب".

*ترجمة: د. وليد الأشقر، هيئة الطاقة الذرية السورية.*

Science News, 19.7.2022

*https://www.science.org/content/article/men-lose-y-chromosomes-they-age-it-may-be-harming-their-hearts*



No. 158
Print ISSN 1607-985X

Online ISSN 2790-8100

Atomic Energy Commission of Syria