155

مجلة هيئة الطاقة الذريّة السورية
2021

# عالم الذرّة

## الطباخ التحريضي :
آلية عمله محاسنه ومساوئه

## أيونات الكلوريد
وأثرها على حديد التسليح في المنشآت الخرسانية

## المجهر الإلكتروني
من أجمل ما قيل عن المجهر الإلكتروني أنه جهاز يستخدم أدق ما لا نراه ليرينا ما لا نراه

## الحشرات تسكت جرس الإنذار

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

**التنضيد والأرشفة**

غفران ناوروز - هنادي كنفاني

**التدقيق اللغوي**

ريما سنديان

**الإخـراج الفنـي**

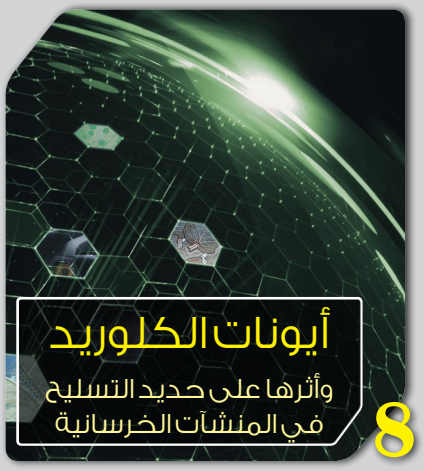
بشار مسعود

راما الكاج

أمل قيروط

# المحتويات

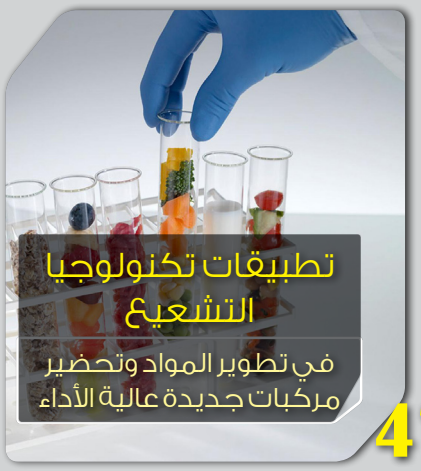
## مقـــالات

8

19

31



47


## أخبار علمية

57


أكبر مفاعل اندماجي في العالم: آي تي إي آر توكاماك 57

الحشرات تسكت جرس الإنذار 59

المواد النانوية في الصناعة الغذائية والأطعمة المبتكرة 61

تطور الممرضات وتغير المناخ يهددان محصول القمح بالانقراض 66

هل يمكن للممرضات النباتية أن تقفز إلى الحيوان والإنسان؟ 68

# 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 التّعجب 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.

# أيونات الكلوريد

## وأثرها على حديد التسليح في المنشآت الخرسانية:

### مصادرها وتفاعلاتها وطرق الكشف عنها والوقاية منها وعلاجها

*تمتلك البنى الخرسانة المسلحة القدرة على الديمومة وتحمُّل مجموعة من الظروف البيئية القاسية. ومع ذلك، قد تخضع هذه البنى للتخريب التدريجي نتيجة لتآكل حديد التسليح ضمنها. يشكل صدأ الحديد في البنى الإسمنتية المسلحة العامل الأكبر في تخريب هذه البنى. يلعب وجود شوارد الكلوريد ضمن البنى الإسمنتية دوراً كبيراً في تعزيز حدوث صدأ إسمنت التسليح. يشكل ماء البحر المصدر الأساس لشوارد الكلوريد، وهو ما يجعل البنى الإسمنتية القريبة منه أو المبنية فيه معرضة لهذا الهجوم بشكل كبير. تلعب المواد المضافة وكميتها أثناء تحضير الخلطة الإسمنيتة دوراً مهماً في حماية المنشآت الخرسانية من الهجوم الكلوريدي، بالإضافة إلى العديد من طرق الوقاية الأخرى المعتَمدة. طورت عدة طرائق تحليلية من أجل تقصي شوارد الكلوريد ضمن البنى الإسمنتية بدءاً من التقنيات التحليلية الكيميائية التقليدية، وانتهاء بالتقنيات التحليلية الحديثة. يساعد الكشف المبكر عن وجود الصدأ ضمن البنى الإسمنتية بشكل كبير في إصلاح هذه البنى، وعدم الحاجة إلى استبدالها من خلال اتخاذ الاجراءات المناسبة الكفيلة باستخلاص أيونات الكلوريد منها من أجل إطالة عمرها. يمكن رصد التآكل بأبسط أشكاله من خلال الرصد البصري، كما يمكن كذلك تقييم تآكل حديد التسليح ضمن الهياكل الإسمنتية بطرق حديثة مختلفة، جرى تطوير العديد منها مثل التقنيات الكهروكيميائية وغير التخريبية المستخدمة لمراقبة تآكل حديد التسليح في هياكل الخرسانة.*

**الكلمات المفتاحية: الخرسانة المسلحة، الهجوم الكلوريدي، المواد الإسمنتية، معالجة.**

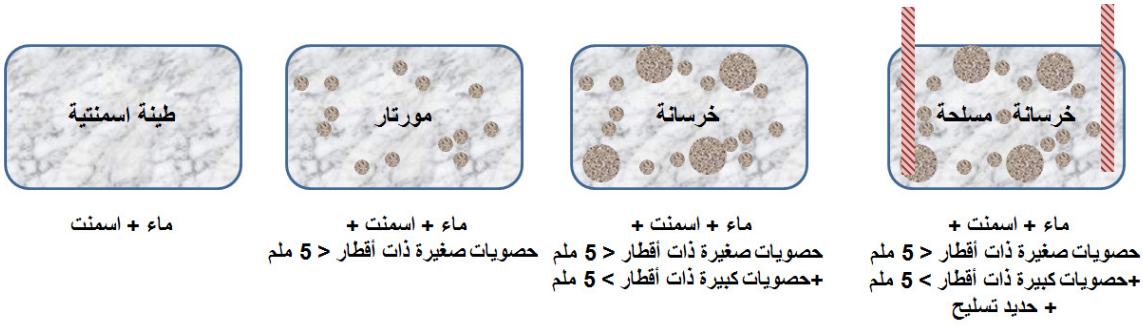
## مدخل إلى المواد الإسمنتية

شكّل اكتشاف الإسمنت ثورة في عالم البناء، وأدى إلى توسع المدن بشكل هائل في القرن الماضي، نظراً لخصائص الخرسانة المسلحة الفريدة، بدءاً من المقاومة الميكانيكية العالية وعمرها المديد، وانتهاء بمقاومتها للحرائق والعوامل الجوية المختلفة. يعد الإسمنت المادة الرئيسة المستعملة في البناء، حيث يحدث التصلب بينه وبين مواد البناء الأخرى المضافة إليه، وتحديداً الرمل والبحص بوجود الماء، ويربط بعضها مع بعضٍ لتشكيل البنى الإسمنتية الهائلة المحيطة بنا.

نسمي اصطلاحاً المواد اللدنة plastic التي تتصلب تدريجياً لتشكيل بنية اصطناعية شبيهة بالحجارة باسم المواد الإسمنتية cementing materials. تنشأ الصفة اللدنة (أو الصفة الطيِّعة) لهذه المواد من خلال خلطها في البدء مع الماء، ومن ثم تخضع لتفاعل تصلب لاحق. تجدر الإشارة لوجوب التمييز بينها وبين المواد الإسفلتية asphalts materials التي تخضع هي الأخرى لعملية تصلب في الهواء دون وجود الماء. يصنف الإسمنت تبعاً لتصلبه بوجود الماء أو دونه إلى إسمنت هيدروليكي أو غير هيدروليكي، على التوالي. يحدث تصلب الإسمنت غير الهيدروليكي في ظروف جافة دون وجود الماء. وعلى النقيض من ذلك، فإن الإسمنت الهيدروليكي (على سبيل المثال، الإسمنت البورتلاندي) يخضع للتصلب نتيجة لتفاعل كيميائي بينه وبين الماء. عرف الإسمنت الطبيعي أول مرة منذ ألفي عام،

وكان يدعى الإسمنت البوزولاني الذي استعمله الرومان، وكان ينتج عن طريق خلط الجير lime مع الرماد البركاني الذي يدعى بالبوزولانا pozzolana وإخضاع المزيج لسلسة من العمليات الحرارية لتشكيل المسحوق الإسمنتي الطبيعي. صنع الإسمنت البورتلاندي OPC أول مرة في بورتلاند بإنجلترا، عام 1824. يمتلك الإسمنت البورتلاندي الصنعي خصائص ميكانيكية أفضل بكثير مقارنة مع الإسمنت الطبيعي، ويتصلب بسرعة أكبر، وهو ذو تجانس عالٍ.

لا يستعمل الإسمنت البورتلاندي مع الماء لوحده عادة، بل يمزج عادة مع مكونات رئيسة، وهي الرمل والبحص بالإضافة إلى الماء لتشكيل ما يسمى الخلطة الإسمنتية التي ينتج بعد جفافها مادة صلبة تدعى الخرسانة concrete، وهي ذات خصائص ميكانيكية عالية. هناك مجموعة من المواد الأخرى التي تدعى المضافات additives، والتي يمكن إضافتها للحصول على خلطة إسمنتية ذات خصائص خاصة. تشمل هذه الإضافات الهواء ومسرعات أو مثبطات التصلب والرماد أو pozzolans، والسيليكا والملدّنات الفائقة superplasticizers وغيرها. يتطلب استعمال هذه الإضافات وجود متخصصين مهنيين ذوي خبرة للوصول إلى خلطات إسمنتية ذات خصائص محددة. يسمى اصطلاحاً مزيج الإسمنت والماء فقط بالعجينة الإسمنتية (أو الطينة) cement paste. يدعى مزيج الإسمنت والماء والرمل والبحص إما مورتار mortar أو خرسانة concrete اعتماداً على حجم الحصويات المستعملة فيما إذا كانت أقل من رتبة 5 ملم أو أكبر منها، على التوالي. تنصب قضبان الحديد ضمن البنى الخرسانية لإكسابها متانة إضافية، وتدعى البنية عندها بالخرسانة المسلّحة reinforced concrete. يعرض الشكل 1 رسماً توضيحياً للتعاريف المذكورة آنفاً.




**الشكل 1.** رسم توضيحي لأنواع الخلطات الإسمنتية، وتسمياتها الشائعة.

تجدر الإشارة إلى أن الخرسانة تكون طيّعة عند بدء الخلط وقوية متينة بعد انتهاء تفاعل التصلب، مما يجعلها المادة الأولية المستثمرة دون منازع في البنى الخرسانية المحيطة بنا من ناطحات السحاب وجسور وأنفاق وغيرها الكثير. يتم الوصول إلى خرسانة قوية متينة وذلك بالاعتماد على نسب محددة للمكونات المشكلة للخرسانة واعتماداً على طريقة الخلط. تختلف نسب المزائج لمكونات الخلطة الإسمنتية تبعاً للغاية المرجوة من البنية المطلوبة، وهناك الكثير من الأبحاث في هذا المجال.

يدعى البحص والرمل عادة باسم الحصويات aggregates، وهي تمثل جسيمات خاملة يرتبط بعضها بعضٍ بوجود الطينة الإسمنتية لتشكيل الخرسانة. تشكل الحصويات قرابة 70% من محتوى الخلطة الإسمنتية، وهي المكون الأكبر فيها. يؤدي وجود الحصويات دوراً كبيراً في خصائص البنية الإسمنتية الناتجة من خلال زيادة القساوة والتحمل وتعزيز المقاومة الحرارية، بالإضافة إلى مفعولها الاقتصادي كونها رخيصة الثمن. يؤدي نوع وحجم وكمية الحصويات المستخدمة دوراً مهماً في تحديد خصائص الخرسانة.

يشكل الماء المكون الرئيس في الخلطات الإسمنتية، فهو يؤدي دور المادة المانحة للطواعية للخلطة الإسمنتية عند صبها، وهو الذي يحدث تفاعل التصلب مع الإسمنت. تؤدي النسبة ماء/إسمنت (W/C) دوراً بالغ الأهمية في تحديد المواصفات الميكانيكية، ويجب أن يجري اختيارها بعناية.

ومن الجدير بالذكر أن المعادن تخضع بطبيعتها لتفاعلات التآكل، ولكن البيئة القلوية العالية للخرسانة (تتراوح قيمة الرقم الهدروجيني pH فيها من 12 إلى 13) توفر لحديد التسليح حماية ضد تفاعلات التآكل. عند هذه القيمة العالية للرقم الهدروجيني، تتشكل طبقة أكسيد رقيقة على سطح حديد التسليح وتمنع طبقات المعدن الداخلية من متابعة التأكسد. يقلل هذا الفيلم ذو الطبيعة الخاملة كيميائياً passive layer من معدل التآكل إلى مستوى ضئيل يبلغ عادة 0.1 ميكرومتر في السنة، بينما يتضاعف ألف مرة دونها.

## الأثر الكيميائي التدميري لأيونات الكلوريد على فولاذ التسليح ضمن البنى الإسمنتية

تبنى المنشآت الإسمنتية بهدف أن تستمر لفترة طويلة جداً. على الرغم من حقيقة أن الخرسانة المسلحة هي المادة الإنشائية الأساسية المستخدمة في معظم مشاريع الهندسة المدنية، إلا أنها ليست محصنة تماماً من التدهور؛ إذ يمكن أن تسبب العديد من العوامل أضراراً شديدة وهائلة في البنى الإسمنتية، مثل الحمولة الميكانيكية العالية والتفاعلات الكيميائية وتآكل حديد التسليح والتغيرات في درجات الحرارة، مما تؤدي إلى انهيار هذه البنى. إن العوامل التدميرية الكيميائية هي أكثر العوامل ضرراً وانتشاراً، ويعدّ الهجوم الكلوريدي أكثر شيوعاً.

إن تآكل الفولاذ في الخرسانة المسلحة هو عامل تدمير رئيس يؤثر على متانة البنى الإسمنتية المسلحة. أثبتت الأبحاث أن دخول أيونات الكلوريد إلى البنى الإسمنتية المسلحة هو السبب الرئيس وراء حدوث تآكل الفولاذ، حيث يوصف هذا الاختراق بصفة الهجوم الكلوريدي chloride attack. يبدأ التآكل بشكل متسارع عندما تخترق أيونات الكلوريد البنى الإسمنتية المسلحة، بوجود الماء والأكسجين وفقاً للآليات الكهروكيميائية التي سنناقشها فيما يلي.

إن أيونات الكلوريد الحرة الموجودة في المسامات ضمن البنية الإسمنتية، وتحديداً القريبة من سطح حديد التسليح، هي التي تسهم في بدء تآكل الفولاذ. لا تؤدي الكلوريدات المرتبطة بالمادة الإسمنتية دوراً في بدء التآكل في الظروف العادية، لذا فإن قدرة ربط الكلوريد هي خاصية مهمة للخرسانة للحفاظ على عمرها. تتأثر قدرة الربط بالكلوريد بالعديد من العوامل مثل نوع الإسمنت والمواد المضافة ونسبة W/C وعمر الخرسانة عند حصول الهجوم الكلوريدي ومدة التعرض له. عندما يتجاوز محتوى الكلوريد الحر في المسامات مستوى العتبة (وعادة هو 2% وزناً من البنية الإسمنتية)، يتفتت الغشاء الأكسيدي الواقي حول سطح حديد التسليح، وتبدأ عملية الصدأ المتسلسلة باتجاه عمق الحديد. الجدير بالذكر أن تآكل الفولاذ هو عملية كهروكيميائية تتطلب وجوداً متزامناً للرطوبة والأكسجين، وتحدث على مراحل عديدة. يلخص الشكل 2 الشروط الواجب توافرها في خلية التآكل الكهركيميائي، وحتى تتحقق عملية التآكل يجب:

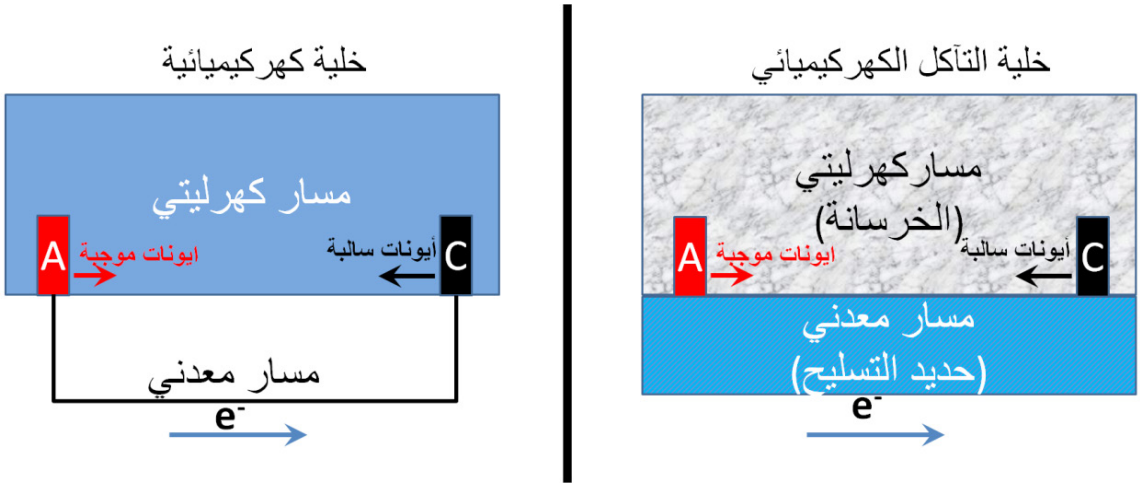
- أن تكون هناك منطقة موجبة أو مصعد.
- أن تكون هناك منطقة سالبة أو مهبط.
- أن يكون هناك كهرليت يضمن تدفق التيارات الأيونية بين المصعد والمهبط. من المهم ملاحظة أن كلاً من المصعد والمهبط يجب

أن يكونا مغموسين في الكهرليت نفسه. كما تجدر الملاحظة أن الغلاف الجوي الجاف لا يمثل كهرليتاً، إلا إذا كانت مستويات الرطوبة عالية.

- أن يكون هناك مسار لتدفق الإلكترونات الناتجة عن العمليات الكهركيميائية، والذي يشار إليه باسم "مسار معدني" بين المصعد والمهبط.

إن عمليات الوقاية المختلفة من عمليات التآكل كما سنناقشها لاحقاً، تشمل الإخلال بأحد الشروط السابقة. فعلى سبيل المثال، تشكل عملية طلاء سطح حديد التسليح أفضل وسيلة حماية من خلال الإخلال بشرط المسار المعدني. تجدر الإشارة هنا إلى الدور الكبير الذي تؤديه الطبقة الأكسيدية السطحية الخاملة الآنفة الذكر في وقاية حديد التسليح من خلال كسر المسار المعدني الذي تسلكه الإلكترونات، والذي يمنع من استمرار حدوث الصدأ ضمن أعماق أكبر. وكذلك تعد طرائق الحماية المهبطية من الوسائل الفعالة في كبح عمليات الصدأ من خلال تطبيق جهود كهربائية مناسبة تقيّد حركيّة الإلكترونات والأيونات ضمن مساراتها الآنفة الذكر. إن الحفاظ على أجواء جافة ضمن البنى الإسمنتية بعد إتمام عمليات تفاعلات التصلب ينفي شرط وجود الكهرليت الرطب، ويكبح عملية الصدأ، وذلك من خلال طلاء سطح الخرسانة بالمواد المناسبة. يعرض الشكل 3 رسماً تخطيطياً لمقارنة بين خلية كهركيميائية بسيطة ضمن كهرليت مائي وخلية التآكل الكهركيميائي التي تحدث على سطح حديد التسليح في الخرسانة المسلحة الرطبة والتي تؤدي دور الكهرليت.

**الشكل 2.** مخطط عن الشروط الواجب توافرها لحصول تآكل الحديد.




**الشكل 3.** رسم تخطيطي لمقارنة بين خلية كهركيميائية بسيطة ضمن كهرليت مائي (يسار الشكل) وخلية التآكل الكهركيميائي ضمن كهرليت خرساني (يمين الشكل).

يتسبب إحداث شق محلي أو نقر pit في الطبقة الأكسيدية السطحية لحديد التسليح، نتيجة عيوب في نوعية الحديد المستعمل أو بسبب عامل ميكانيكي ما نتيجة خدش أو إجهاد محلي أو غيرهما أو تغير في pH الوسط المحيط لحديد التسليح، في إحداث البؤرة الأولى لتآكل الحديد الذي يسمى التآكل النقري pitting corrosion. يؤدي وجود أيونات الكلوريد دوراً كبيراً في إنقاص pH الوسط المحيط بحديد التسليح، مما يعزز إزالة الطبقة الأكسيدية الواقية على سطحه، وتبدأ سلسلة تفاعلات التآكل لدى إزالة الطبقة الأكسيدية في منطقة النقر، حيث تتشكل منطقة المصعد عندها، ويحدث الهجوم الأولي في منطقة المصعد هذه على سطح الحديد المكشوف، حيث يتأكسد إلى أيونات الحديد الثنائي التي تنحل في الكهرليت ضمن النقر، وتتفاعل لاحقاً مع أيونات الكلوريد المهاجمة للبنية الإسمنتية التي تنجرف إلى هذه المنطقة الموجبة، لينتج كلوريد الحديد الذي يتفاعل بدوره مع الماء لينتج هيدروكسيد الحديد الثنائي والذي يتأكسد لاحقاً لإنتاج هيدروكسيد الحديد الثلاثي (أو الصدأ الأحمر). تنطلق الإلكترونات من منطقة المصعد وتتحرك من خلال الهيكل المعدني (حديد التسليح) إلى المواقع المجاورة على السطح، والتي تؤدي دور المهبط، حيث تتحد مع الأكسجين والماء لتشكيل أيونات الهيدروكسيد. تتفاعل هذه الأيونات مع أيونات الحديد الناتجة عن المصعد لإنتاج هيدروكسيد الحديد الثنائي الذي يتأكسد بدوره بوجود الماء والأكسجين لإنتاج هيدروكسيد الحديد الثلاثي. يمكن تمثيل مجموع هذه التفاعلات كما يلي:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$$

$$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH^-)$$

$$Fe^{2+} + 2Cl^- \rightarrow FeCl_2$$

$$FeCl_2 + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2HCl$$

يتابع أكسدته بوجود الأكسجين والماء ليشكل ومن ثم يتشكل الصدأ:

$$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3$$

تجدر الإشارة إلى أن تشكل حمض كلور الماء في المعادلة الرابعة المذكورة آنفاً يسهم في إنقاص القلوية ضمن النقر وزيادة عمليات التآكل اللاحقة. بالإضافة إلى الأثر التدميري للصدأ على حديد التسليح نفسه، تحتل نواتج الصدأ (أكاسيد وهيدروكسيدات الحديد) أحجاماً مضاعفة، ويؤدي تشكلها داخل الفضاء المقيّد للخرسانة في حدوث إجهادات هائلة عليها، والإسهام لاحقاً في تدميرها. يعرض الشكل 4 رسماً تخطيطياً لحدوث الصدأ في حديد التسليح ضمن البنى الإسمنتية المسلحة مع التفاعلات الرئيسة الحاصلة.

**الشكل 4.** رسم تخطيطي لحدوث الصدأ في حديد التسليح ضمن البنى الإسمنتية المسلحة مع التفاعلات الرئيسة الحاصلة.

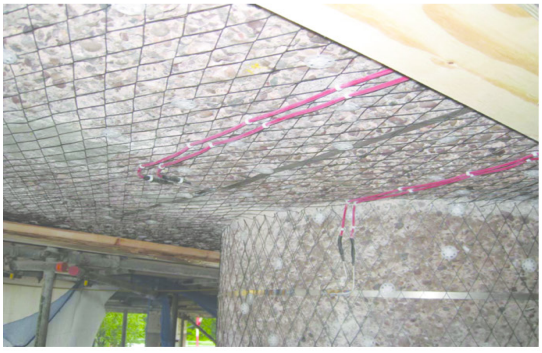
## مصادر أيونات الكلوريد

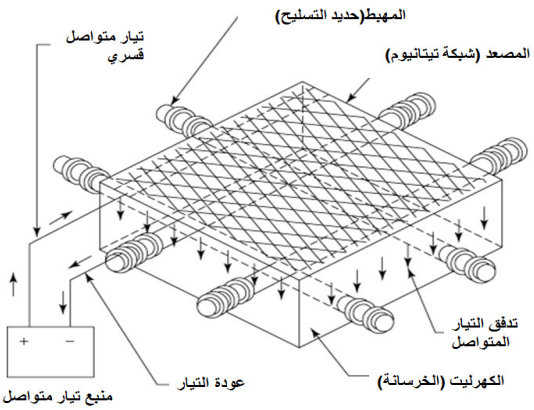
يشكل ماء البحر المصدر الأساس لأيونات الكلوريد، وهو ما يجعل البنى الإسمنتية القريبة منه أو المبنية فيه كالجسور والمنشآت النفطية المبنية في البحر والمباني قرب الشواطئ البحرية معرضة لهذا الهجوم بشكل كبير. كما تعدّ إضافة الملح في عمليات إذابة الثلوج deicing على الطرقات في المناطق الباردة مصدراً كبيراً لأملاح الكلوريد، حيث يستهلك منها سنوياً عشرات آلاف الأطنان. تجدر الإشارة في هذا السياق إلى أن امتداد التأثير السلبي الكبير الذي تسببه إضافة الملح على الطرقات ليشمل تآكل وإفساد المكونات المعدنية أسفل المركبات. كما يسهم وجود أيونات الكلوريد في الماء المضاف للخلطات الإسمنتية نتيجة عمليات الكلورة للماء لأغراض التعقيم في عملية هجوم الكلوريد الكيميائي، وإن كان إسهامه بشكل أقل ضرراً من المصدرين المذكورين آنفاً. جدير بالذكر أن منشآت المسابح وما يجاورها تتعرض كذلك للهجوم الكلوريدي نتيجة إضافة الكلوريد إليها في عمليات التعقيم.

## الوقاية من الهجوم الكلوريدي

إن الحفاظ على الهياكل الخرسانية الكبيرة مثل الجسور والمباني ومرائب وقوف السيارات والأرصفة البحرية هو ممارسة مستدامة وذات أهمية بالغة بيئياً واقتصادياً. هناك طرائق عديدة للوقاية من الهجوم الكلوريدي على البنى الإسمنتية المسلحة. تشمل أبسطها تغليف حديد التسليح بمواد عازلة مثل الإيبوكسي أو الطلاء، حيث يقطع هذا الإجراء المسار الإلكتروني في خلية التآكل الكهركيميائية الذي سبق أن أشير إليه في الفقرة السابقة. يجب اختيار الطلاء بحيث يحقق الديمومة من جهة، والأهم من ذلك أن يمنح التصاقية جيدة بين الحديد والخرسانة من جهة أخرى. يشار إلى أنه برغم فاعلية هذا الإجراء فإنه مكلف اقتصادياً.

كما تقدم طرائق الحماية المهبطية وقاية فعالة من مشاكل التآكل في الهياكل الخرسانية الجديدة، وتدوم لفترات طويلة. يعتمد مبدأ تقنية الحماية المهبطية على تطبيق تيار مستمر خارجي يعاكس التيارات المسببة للتآكل. يجري توصيل حديد التسليح بالقطب السالب لمنبع تيار كهربائي مستمر في حين يجري توصيل القطب الموجب بسطح الخرسانة إما من خلال شبكة معدنية خاملة ملتصقة بالسطح غالباً ما تكون من التيتانيوم أو طلاء ناقل للتيار الكهربائي، أو يتم تثبيت العديد من المساري المنفصلة في ثقوب محفورة في سطح الخرسانة. توفر هذه المنظومة مرور تيار قسري impressed current يكبح عمليات التآكل. يعرض الشكل 5 مخططاً لمنظومة الحماية المهبطية المذكورة. كما يمكن تحقيق هذه الحماية من خلال إجراء توصيل كهربائي لحديد التسليح مع معدن أكثر نشاطاً (هو الزنك غالباً)، وعندها تجري عمليات التآكل على هذا المعدن الذي يضحي بنفسه sacrificed metal بدلاً من حدوثها على حديد التسليح. يعرض الشكل 6 صورة لتطبيق الأسلوب المذكور في الحماية المهبطية. تجدر الإشارة في هذا السياق إلى أن وسائل الحماية المهبطية مطبقة أيضاً في معظم الهياكل الحديدية وتشمل أنابيب نقل النفط والخزانات الأرضية وهياكل السفن وغيرها.

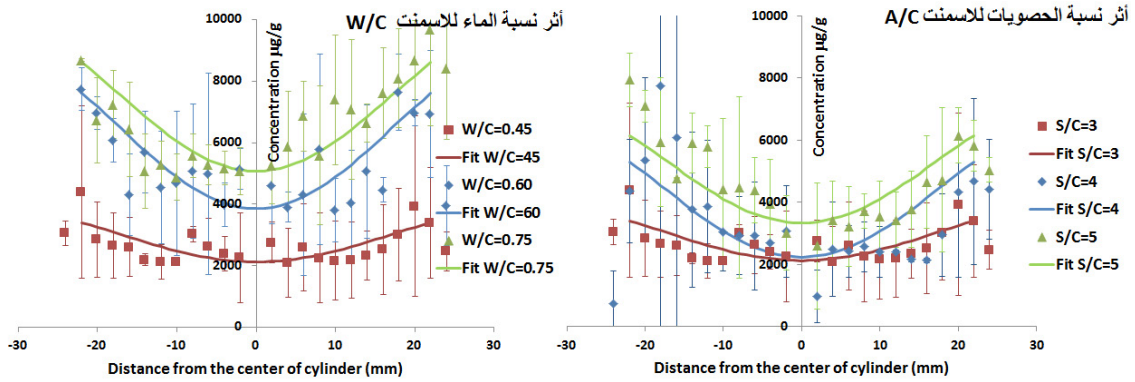





**الشكل 5.** مخطط لمنظومة حماية مهبطية (يمين الشكل) مع صورة حقيقية لشبكة خارجية على سطح الخرسانة (يسارالشكل).

**الشكل 6.** الحماية المهبطية باستعمال معدن تضحية sacificed metal.

إضافةً إلى ما سبق يعدّ تحضير خلطات إسمنتية بمواصفات خاصة وسيلة فعالة من أجل كبح حركية الأيونات المهاجمة فيها. يجري تحضير الخلطات بعناية تبعاً للغاية والظروف المحيطة بالبنية الخرسانية المراد إنشاؤها. تتحدد مواصفات الخلطة الإسمنتية من خلال نسب ونوع مكوناتها وطريقة مزجها، مثل نسبة الماء إلى الإسمنت ونوع الإسمنت المستعمل ومحتوى المواد المضافة مثل الخبث والرماد والسيليكا ونوعية الرمل المستخدم وحجم ونوع الحصويات وغيرها. على سبيل المثال، يوضح الشكل 7 سبر تركيز أيونات الكلوريد بدلالة العمق القطري في عينات خرسانية أسطوانية الشكل ذات قطر 50 cm، حُضّرت بنسب ماء/إسمنت W/C وحصويات/إسمنت A/C مختلفة، وجرى تركها في محلول مركز من الكلوريد لمدة تسعة أشهر. نلاحظ أن خفض نسب الماء للإسمنت W/C ينتج عنه مقاومة لهجوم الكلوريد. تؤدي نسبة الماء إلى الإسمنت دوراً مهماً في قوة الخرسانة والنفاذية porosity، وبالتالي التحكم في نفاذية أي من الأيونات المنحلة في الماء وتحديداً الكلوريدات فيها، وينبغي جعل هذه النسبة عند أدنى مستوى ممكن. كما يجب اختيار النسبة بين الإسمنت والحصويات A/C بعناية للحصول على القوة المطلوبة للبنية الخرسانية. إن نسبة الرمل إلى الإسمنت وأنواع وخصائص الرمل المستعملة هي عوامل مهمة تؤثر على الخواص الميكانيكية للكتل الخرسانية، وقد دُرس تأثيرها على انتشار أيونات الكلوريد في الهياكل الخرسانية. وبصفة عامة، فإن زيادة نسبة الرمل إلى الإسمنت ترتبط عادة بزيادة في هجوم أيونات الكلوريد.




**الشكل 7.** دراسة أثر الخلطة الإسمنتية في كبح انتشار أيونات الكلوريد:
يمين الشكل: أثر نسبة الحصويات للاسمنت A/C،
يسار الشكل: أثر نسبة الماء للاسمنت W/C.

وأخيراً، يجدر بالذكر أن جميع الوسائل الآنفة الذكر هي وسائل حماية من الهجوم الكلوريدي وليست وسائل معالجة، حيث إنها لاتؤدي إلى إزالة الكلوريد من البنية الإسمنتية لدى تضررها، وسنناقش هذه المسألة لاحقاً.

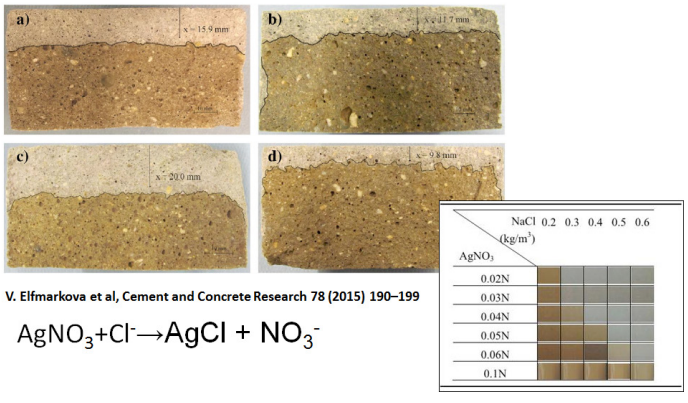
## التقنيات التحليلية لتوصيف انتقال الكلوريد ضمن البنى الإسمنتية

تتطلب مراقبة الجودة ضمن البنى الخرسانية المسلحة توظيف اختبارات من أجل تقصي أي تدهور محتمل ضمنها في مراحل مبكرة. هناك عدد كبير من الأبحاث التي تعنى بمشاكل تصدع البنى الخرسانية المسلحة، وقد أخذ موضوع مراقبة التآكل لحديد التسليح جزءاً

كبيراً منها. تضمن المراقبة الدقيقة لعمليات الصدأ ضمن البنية الإسمنتية منع بلوغها الحدود الخطيرة من خلال اتخاذ التدابير الوقائية في الوقت المناسب، أو العلاجية لدى تفاقم الوضع. يمكن تقصي التآكل بأبسط أشكاله من خلال الرصد البصري. كما يجري تقييم تآكل حديد التسليح ضمن الهياكل الإسمنتية بطرائق حديثة مختلفة. تشكل دراسة محتوى أيونات الكلوريد ضمن المواد الإسمنتية أمراً مهماً من أجل تقييم الهجوم الكلوريدي عليها. طوّرت في البدايات طرائق التحليل الكيميائي الرطبة التقليدية، واعتمدت لإجراء التحليل العنصري للمواد الإسمنتية. كما وثّقت هذه الطرائق وفقاً للجمعية الأمريكية للاختبار والمواد (ASTM) من أجل التحليل الكيميائي للإسمنت، وتشمل إيجاد توزع العناصر وخاصة أيونات الكلوريد بدلالة العمق في العينات الإسمنتية، عن طريق أخذ شرائح رقيقة من العينة عند أعماق عديدة من السطح، باستعمال أدوات اعتيان العينات الإسمنتية الحديثة profile grinder (انظر الشكل 8)، ومن ثم طحن هذه الشرائح إلى مسحوق ناعم، وإخضاع كل شريحة إلى الطرائق الكيميائية التقليدية المعتمدة الآنفة الذكر. من الواضح أن هذه الطرائق هي تخريبية ومكلفة وتستغرق وقتاً طويلاً.

يمكن تقصي أيونات الكلوريد المخترقة للبنى الإسمنتية باستخدام طريقة ترذيذ أو رش spray محلول نترات الفضة $AgNO_3$، حيث يرش على سطح مقطعي من الخرسانة ويتفاعل مع أيونات الكلوريد الحرة لتشكيل مركب كلوريد الفضة AgCl ذي اللون الأبيض المميز، والذي يمكن أن يفحص بسهولة باستعمال طرائق التدرج اللوني (الشكل 9). طورت مؤخراً أجهزة استشعار كهربائية مدمجة ضمن البنى الإسمنتية، حيث تمتلك أقطاباً كهربائية حساسة لأيونات الكلوريد، للحصول على معلومات التركيز ضمن العمق، وبالتالي رصد تآكل حديد التسليح في هياكل الخرسانة بشكل فوري.

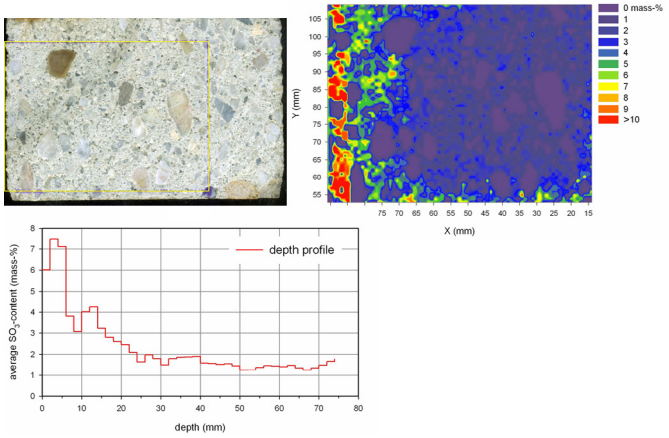
**الشكل 8.** أدوات الاعتيان والتحليل الحقلية لأيونات الكلوريد.




**الشكل 9.** طريقة ترذيذ spray محلول $AgNO_3$ على سطح مقطع عينة إسمنتية من أجل تقصي انتشار أيونات الكلوريد.

طبّقت التقنيات التحليلية الحديثة وغير الإتلافية لاحقاً، وخاصة تلك المرتبطة بالتقنيات القائمة على الكشف عن الأشعة السينية، وهي التفلور بالأشعة السينية XRF والتحليل الميكروي بالسبر الإلكتروني EPMA، وتقنية التحليل بالأشعة السينية المتحرضة بالجسيمات PIXE. تتمتع جميع هذه التقنيات بالقدرة على إيجاد الخرائط العنصرية التي تسمح بالتمييز بين مكونات الإسمنت والحصويات ضمن الخرسانة. إضافة إلى ذلك، تسمح هذه التقنيات بإجراء تحليل مباشر ومتعدد العناصر وسريع ولا إتلافي للعينات. يعرض الشكل 10

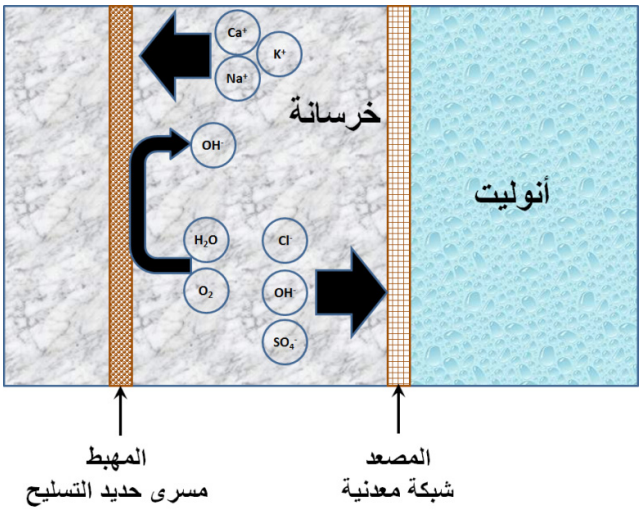
خريطة عنصرية لتوزع الكبريت في عينة إسمنتية أخذت من بنية إسمنتية موجودة في ماء البحر منذ ثلاثين عام. يبين المخطط السفلي سبر تركيز الكبريت بدلالة عمق العينة.




**الشكل 10.** خريطة عنصرية لتوزع الكبريت في عينة إسمنتية أخذت من مبنى في ماء البحر عمره ثلاثون سنة. يبين المخطط السفلي سبر تركيز الكبريت بدلالة عمق العينة.

## معالجة البنى الإسمنتية المتضررة بالكلوريد: تقنية الاستخلاص الكهركيميائي لأيونات الكلوريد

إن إصلاح البنى الخرسانية المتضررة بالكلوريد وحده ليس حلاً طويل الأمد عندما يكون التآكل هو مصدر تدمير البنية الخرسانية، فحتى بعد إصلاح مشاكل التآكل القائمة، فمن المحتمل استمرار وجود خرسانة ملوثة بالكلوريد تحيط بقضبان التسليح في المناطق المجاورة. تعدّ تكاليف الصيانة في الوقت الحاضر جزءاً رئيساً من الإنفاق الجاري على البنى الإسمنتية، حيث تستهلك الخسارات الناجمة عن عمليات التآكل جزءاً كبيراً من ميزانيات الدول، تصل لمليارات الدولارات. لقد أعطي موضوع معالجة البنى الإسمنتية المتضررة بالكلوريد أهمية كبيرة من أجل المحافظة عليها وتجنب عمليات الهدم أو الاستبدال أو إعادة البناء. استثمرت الطرائق الكهروكيميائية بكفاءة في مجال معالجة البنى الخرسانية المتضررة بالكلوريد، وتتضمن هذه الطرائق إعادة تأهيل البنى الإسمنتية المتضررة من خلال انتزاع أيونات الكلوريد من الخرسانة بطريقة كهركيميائية، وتعرف هذه العملية باسم "انتزاع الكلوريد الكهروكيميائي" electrochemical chloride extraction (ECE)، وهي طريقة لا إتلافية، وتخفض نسبة الكلوريد في العينة ما بين 20–70%، وربما أكبر من ذلك تبعاً للشروط التجريبية المطبّقة ونوع البنية الإسمنتية المعالجة. تتضمن هذه التقنية تطبيق جهد كهربائي مستمر DC لفترة قصيرة من الزمن (عادة عدة أسابيع)، حيث يجري توصيل فولاذ التسليح ضمن البنية بقطب سالب لمنبع كهربائي مستمر، ويجري توصيل سطح الإسمنت بالقطب الموجب، حيث تؤدي شبكة معدنية متصلة بسطح الإسمنت الخارجي دور المهبط، ويجبر تغير القطبية بين فولاذ التسليح وسطح الإسمنت أيونات الكلوريد الحرة بالتحرك نحو السطح بشكل ملحوظ؛ تدعى هذه الظاهرة بالهجرة الكهربائية electromigration، مما يساهم في التخلص من هذه الأيونات وكبح عمليات الصدأ التي يؤدي الكلوريد فيها دوراً محورياً. وكما ذكرنا سابقاً، تتطلب تقنية استخلاص الكلوريد الكهروكيميائية استعمال مسرى بشكل شبكة معدنية خارجي كمصعد، ويكون محاطاً بكهرليت، وفي حالتنا يدعى هذا الكهرليت أنوليت anolyte نظراً لوجود مسرى المصعد anode فقط على اتصال به. يستعمل الماء عادة كأنوليت، وفي بعض الأحيان تستعمل مواد ماصة للماء مثل الإسفنج في تغطية البنى الإسمنتية العمودية التي تخضع لاستخلاص الكلوريد بالتقنيات الكهركيميائية لتؤدي دور الأنوليت. يعرض الشكل 11 شكلاً تخطيطياً لخلية استخلاص كهركيميائية لبنية إسمنتية مع التفاعلات الرئيسة الحاصلة.




**الشكل 11.** شكل تخطيطي لخلية استخلاص كهركيميائية لبنية إسمنتية مع التفاعلات الرئيسة الحاصلة.

تتضمن العملية الكهركيميائية حدوث تفاعلات أكسدة–إرجاع عند الأقطاب الكهربائية. تحدث تفاعلات الإرجاع التالية عند المهبط (المنطقة المجاورة لفولاذ التسليح):

$$O_{2(g)} + 2H_2O_{(i)} + 4e^- \rightarrow 4OH^-_{(aq)} \quad (1)$$

$$2H_2O_{(i)} + 2e^- \rightarrow H_{2(g)} + 2OH^-_{(aq)} \quad (2)$$

$$2H^+_{(aq)} + 2e^- \rightarrow H_{2(g)} \quad (3)$$

$$Fe^{n+}_{(aq)} + me^- \rightarrow Fe^{n-m}_{(aq)} \quad (4)$$

يميل التفاعل 1 إلى الحدوث ببطء شديد لأن تركيز الأكسجين بالقرب من المهبط (فولاذ التسليح) صغير جداً ويميل إلى الانخفاض أثناء العملية. ويحدث التفاعل 3 فقط بشكل موضعي على سطح فولاذ التسليح. ينتج عن التفاعلين 2 و3 لدى تطبيق تيارات عالية في عملية الاستخلاص الكهركيميائي غاز الهدروجين بشكل كبير، حيث يلاحظ انطلاقه بوضوح على شكل فقاعات قرب فولاذ التسليح، ويمكن أن يتسبب تكون الهدروجين بالقرب من فولاذ التسليح في إضعاف الارتباط بين فولاذ التسليح والخرسانة، كما يسهم في إحداث تشققات داخلية، ويمثّل هذا أحد عيوب استعمال تقنية الاستخلاص الكهركيميائي. نلاحظ من التفاعل 4 تناقص درجة أكسدة الحديد، وبالتالي المساهمة في كبح عمليات الصدأ. إن زيادة القلوية التي تدلنا عليها نواتج التفاعلين 1 و2 تعزز كذلك من كبح عمليات الصدأ المتتالية الناتجة عن إزالة الطبقة الأكسيدية الواقية لفولاذ التسليح.

تحدث تفاعلات الأكسدة التالية قرب المصعد (المنطقة المجاورة للشبكة المعدنية):

$$2H_2O_{(i)} \rightarrow O_{2(g)} + 4H^+_{(aq)} + 4e^- \quad (5)$$

$$Me_{(s)} \rightarrow Me^{(n+)}_{(aq)} + ne^- \quad (6)$$

$$2Cl^-_{(aq)} \rightarrow Cl_{2(g)} + 2e^- \quad (7)$$

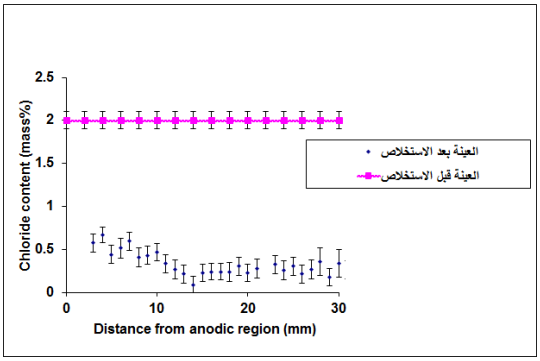
نلاحظ انطلاق غاز الكلور عند سطح العينات المعالجة كما في المعادلة 7، وزيادة الوسط الحمضي عند السطح كما في المعادلة 5، مع التآكل التدريجي للشبكة المعدنية المستعملة على السطح كمسرى مصعد في المعادلة 6.

كما يمكن أن تحدث التفاعلات التالية ضمن الكهرليت (الأنوليت) المستعمل –وغالباً ما يكون الماء– كما يلي:

$$2H_2O_{(i)} + Cl_{2(g)} \rightarrow HCl_{(aq)} + HOCl_{(aq)} \quad (8)$$

$$Me^{n+}_{(aq)} + nH_2O_{(l)} \rightarrow Me(OH)_{n(s)} + nH^+_{(aq)} \quad (9)$$

إضافة إلى التفاعلات السابقة تخضع الأيونات المختلفة ضمن البنية الإسمنتية للانتقال نحو القطب المعاكس لشحنتها تحت تأثير المجال الكهربائي المطبق في بنية المسام الخرسانية. وعموماً يحكم الانتقال الأيوني قانونا الهجرة والانتشار ويمكن وصفه بواسطة معادلة نرنست–بلانك. يبين الشكل 12 سبر التركيز العنصري لأيونات الكلوريد بدلالة العمق في عينتين إسمنتيتين ملوثتين بالكلوريد، أحدهما لم تخضع لعملية الاستخلاص الكهركيميائي والأخرى خضعت له، ونلاحظ كفاءة تطبيق هذه التقنية في التخلص من أيونات الكلوريد.




**الشكل 12.** سبر تركيز أيونات الكلوريد بدلالة العمق في عينتين إسمنتيتين قبل عملية استخلاص الكلوريد وبعده.

لا تخلو عملية الاستخلاص الكهركيميائي للكلوريد من البنى الإسمنتية المسلحة من بعض العيوب، ويمكن إجمال أهمها كما يلي:

① تغير في تركيب الإسمنت الأساسي؛ وذلك نتيجة إخضاع العناصر الأساسية الموجودة في الإسمنت للحقول الكهربائية المطبقة التي ينتج عنها هجرة لبعض الأيونات الأساسية في الإسمنت وتحديداً $Na^{+}, K^{+}, Ca^{2+}$ باتجاه فولاذ التسليح (طرف المهبط) إضافة إلى أيونات الهيدروكسيد $OH^{-}$ (بالاتجاه المعاكس)، فضلاً عن تشكل أيونات هيدروكسيد جديدة قرب المهبط (فولاذ التسليح)، كما ذكر سابقاً.

② إمكانية تضرر سطح البنى الإسمنتية؛ وذلك بسبب تغير pH الوسط قرب السطح وميله للحموضة نتيجة تشكل أيونات $H^{+}$، كما تشير إلى ذلك تفاعلات الأكسدة والإرجاع المذكورة سابقاً. يمكن الحد من هذا التأثير من خلال إجراء العملية ضمن أنوليت قلوي هو غالباً $Ca(OH)_2$ كما في حالتنا أو من خلال تمرير تيار مائي خارجي على سطح البنية المعالجة، من أجل تخفيف حموضة سطحها أثناء المعالجة. يمكن الحد من ذلك أيضاً من خلال فصل شبكة المصعد عن سطح البنية المعالجة بعازل مناسب.

③ قد يفضي تراكم أيونات الهيدروكسيد المتشكلة قرب فولاذ التسليح إلى تفاعلات مع مكونات البحص والرمل وتحديداً السيليكا، لإحداث تفاعلات تسمى alkali–silica reactions تنتج عنها مواد ذات أبعاد كبيرة قد تحدث تشققات ضمن الفراغ المقيد للبنية الإسمنتية. يمكن الحد بكفاءة من هذا المفعول الضار من خلال استعمال مزيج رمل– بحص ذي معايير تحد من فعاليته الكيميائية الآنفة الذكر.

④ إضعاف الارتباط بين فولاذ التسليح والإسمنت؛ نتيجة تغير مكونات الإسمنت قرب فولاذ التسليح كما ذكر في العيب الأول سابقاً. يتعزز هذا المفعول السلبي بزيادة كثافة تيار الاستخلاص وزيادة زمن المعالجة.

⑤ التشققات نتيجة انطلاق غاز الهدروجين بالقرب من فولاذ التسليح؛ وهذا يسهم في إضعاف الارتباط بين فولاذ التسليح والإسمنت، كما يعزز إحداث فجوات ضمن البنية الإسمنتية؛ مما يسبب في إضعافها.

نتيجة للآثار الجانبية السابقة، نوقشت الشروط التجريبية المثلى المطبقة على عملية الاستخلاص الكهركيميائي للكلوريد في المواد الإسمنتية بإسهاب من قبل العديد من الباحثين. كما يحدّ إجراء عملية الاستخلاص الكهركيميائي باستعمال كثافات تيارات منخفضة ضمن أزمنة معالجة طويلة تمتد لستة أشهر وبشكل كبير من عيوب استعمال تقنية الاستخلاص الكهركيميائي المذكورة آنفاً.

## المراجع


- Broomfield JP (1997). Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation, and repair. London; New York: E & FN Spon.

- Kett I (2000). Engineered concrete: mix design and test methods. Washington, DC: CRC Press.

- Poulsen E, Mejlbro L (2006). Diffusion of Chloride in Concrete: Theory and Application. New Yourk, USA: Taylor & Francis Group.

- Ramachandran VS, Beaudoin JJ (2001). Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology. Norwich, NY: William Andrew Publishing.

- Taylor P, Tennis P, Obla K, Ram P, Dam TV, Dylla H (2013). Durability of Concrete. Washington, D.C.: Transportation Research Board.


تأليف: **د. صلاح ريحاوي**، قسم الفيزياء، هيئة الطاقة الذرّية السورية.

# الطباخ التحريضي: آلية عمله محاسنه ومساوئه

بدأ الإنسان طهي طعامه من خلال إشعال النار في الهواء الطلق وتعريض الطعام للنار مباشرة، ثمّ تطورت عملية الطهي لتصبح أكثر سهولة ويسر مع تقدم التطوّر العملي الذي واكب حياة الإنسان؛ حيث تعدّدت طرق الحصول على الحرارة بدءاً من إشعال النار عن طريق حرق المواد القابلة للاحتراق مروراً باستخدام التيار الكهربائي عبر تمريره في أسلاك ذات مقاومة كهربائية عالية نسبياً كأسلاك التنغستين وهو ما يحدث في الأفران الكهربائية والحرارة المنبعثة من المصابيح الهالوجينية في الطباخ الهالوجيني أو طباخ الحبيبات. والطريقة الثالثة، وهي محط اهتمامنا، هي طريقة التحريض المغنطيسي أو ما يسمّى بالطباخ التحريضي induction cooker (وهو ما يطلق عليه خطأ اسم الطباخ الليزري) والذي يعدّ من أحدث أنظمة الطبخ المستخدمة في المنازل، فهذا الطباخ المستخدم لإعداد الطعام وتسخينه يعمل على الحقل المغنطيسي المتغيّر فقط. وهذه الطريقة مختلفة تماماً عن كل طرق الطهي الاعتيادية التي استخدمها الإنسان في عملية طهي طعامه. فهذه الطريقة لا تعتمد على انتقال الحرارة من المصدر الحراري وإنّما تعتمد على توليد الحرارة في وعاء الطبخ نفسه الذي يقوم بتوليد الحرارة اللازمة للطهي. حيث تؤدي طريقة التحريض المغنطيسي إلى توليد تيارات دوّامة eddy currents أو ما يعرف بتيار فوكو الإعصاريّة. وطريقة الطبخ بالتحريض المغنطيسي مختلفة كليّاً عن طريقة أفران الميكروويف التي تعد الطريقة الرابعة لأنواع الطبخ حيث يتم توليد الحرارة مباشرة داخل الطعام نفسه، إذ يعمل جهاز الميكروويف على تعريض الأطعمة لموجات الميكروويف الكهرومغنطيسية، حيث تدخل هذه الموجات إلى الأطعمة، وتقوم بتحريك جزيئات الماء وجزيئات بعض المواد الأخرى الموجودة فيها، وبعد تعرّض تلك الجزيئات للموجات الميكرويّة تبدأ بالتحرك والاهتزاز والاحتكاك والتصادم مع بعض مما يكسبها حرارة وطاقة فتصبح ساخنة. ومصدر أشعة الميكروويف في فرن الميكروويف هو أنبوب يسمى بـأنبوب المغنترون magnetron tube الذي يقوم بتحويل التيار الكهربائي إلى موجات كهرومغنطيسية يبلغ ترددها 2450 MHz في معظم الأفران، وتردّد التيار الكهربائي الذي يستقبله ذلك الأنبوب يكون 50 أو 60 Hz.

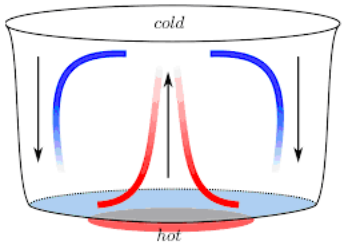
الكلمات المفتاحية: الطباخ التحريضي، طهي الطعام، التحريض المغنطيسي.

## مقدمة

تعرّف عملية طهي الطعام بأنها انتقال طاقة حرارية كافية إلى مكونات مادة الطعام حتى تنضجه، حيث تعتمد الآلية الفيزيائية في عملية الطهي على كميّة الحرارة التي يصدرها المصدر الحراري وطريقة انتقال هذه الطاقة، وأخيراً على الناقلية الحرارية للمادة المطهيّة. ويمكننا تحديد كمية الحرارة المنتقلة إلى المادة المطهيّة من خلال الاختيار المناسب للمصدر الحراري. وأمّا بالنسبة للناقلية الحراريّة فتحددها نوعيّة المادة المطهيّة. وكما نعلم فإن هناك ثلاث طرق رئيسيّة لانتقال الحرارة من المصدر الحراري إلى مكونات المادة المطهيّة، وهذه الطرق هي:

❶ **انتقال الحرارة بالنقل (بالتوصيل)**: هو انتقال الحرارة في المادة من ذرة إلى أخرى مع بقاء الذرات في أماكنها.

❷ **انتقال الحرارة بالحمل (الحمل الحراري)**: هو انتقال الحرارة عن طريق انتقال المادة الساخنة (الذرات أو جزيئات) من المكان الساخن إلى المكان البارد على شكل تيارات تدعى تيارات الحمل. ونشاهد مثال على ذلك انتقال الماء الساخن من قعر الإناء إلى الأعلى، كما يبين الشكل 1.



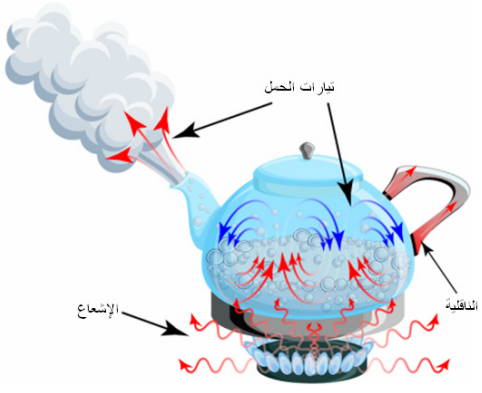

**الشكل 1.** انتقال الحرارة بالحمل.

بالرغم من أنّ الماء ناقل رديء للحرارة إلا أنّه عندما نضع إناء فيه ماء على موقد حراري فإنّه يسخن بعد فترة فكيف نعلل ذلك؟

نقول إنّ الماء (وحتى الزيت) الذي في أسفل الإناء يسخن ويتمدد وتقل كتلته الحجمية ويرتفع إلى الأعلى ويحل محله الماء الذي في الأعلى لأنّه أكثر كتلة حجمية ويستخدم هذا الماء بدوره ويرتفع للأعلى وهكذا؛ فالماء إذن يسخن بانتقال جزيئاته على شكل تيارات تدعى تيارات الحمل، ونشاهد هذا النوع من انتقال الحرارة في السوائل والغازات وتتشكل الآلية الأساسية في عملية طهي الطعام عن طريق انتقال الحرارة من المنبع إلى مكونات الطبخة.

❸ **انتقال الحرارة بالإشعاع**: هو انتقال الحرارة من المنبع دون الحاجة إلى وسط تنتقل فيه، ومثال ذلك وصول الحرارة من الشمس إلى الأرض، وكذلك من المدفأة إلى أجسامنا في الشتاء.

ويحدث هذا النوع من الانتقال عن طريق الإشعاع الكهرومغنطيسي الصادر عن جسم ساخن وتعرّض جسم ما آخر لتلك الأشعة فإنّه يمتص قسماً من الطاقة الحرارية الموجودة في طيف تلك الأشعة الكهرومغنطيسية. وتجدر الإشارة إلى أنّ طريقة انتقال الحرارة بالإشعاع لا تحتاج إلى وسط مادي كما هو الحال في الطريقتين السابقتين، ويوضح الشكل 2 الطرق الثلاث لانتقال الحرارة.



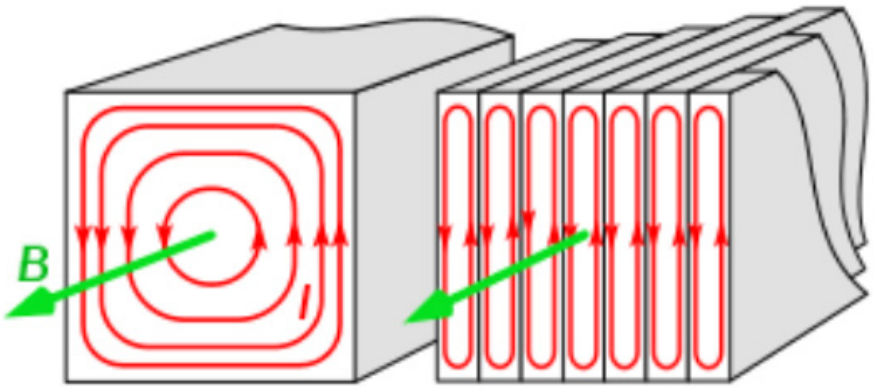

**الشكل 2.** الطرق الثلاث لانتقال الحرارة.

وتعمل جميع الطرق السابقة على تسخين المادة ومن ثم إنضاج طعامنا. إنّ وصول الحرارة بالطرق السابقة إلى المادة وحده لا يكفي لطهي الطعام وإنّما كميّة الحرارة الواصلة إلى المادة المطهيّة هي المطلوبة، وكمية الحرارة هذه تتعلق بمصدر الطاقة الحرارية الذي يجب عليه إصدار كمية حرارة كافية لنضج الطعام. ومن أهم مصادر الطاقة الحرارية نذكر: الطاقة الكيميائية المتحرّرة خلال التفاعلات الكيميائية في المواد القابلة للاحتراق كطباخ الغاز العادي (البوتوغاز) المنزلي، أو التفاعلات النوويّة (الاندماجية في النجوم أو الانشطاريّة في المفاعلات النوويّة) أو الطاقة الكهربائية المتولدة في محطات التوليد الكهربائي. ويكمن سعي الإنسان في الحصول على مصدر طاقة حراري صديق للبيئة رخيص التكلفة وسريع في طهي الطعام، وهذا ما يوفره الطباخ الإلكتروني التحريضي.

## التيارات الدوّامّة وآليّة توليدها

عندما تخضع صفائح معدنية لتدفق مغنطيسي متغير مع الزمن أو تكون تلك الصفائح متحرّكة بالنسبة لحقل مغنطيسي منتظم، سوف تتعرّض هذه الصفائح وبشكل دائم لتدفق حقل مغنطيسي متغير مع الزمن، ووفقاً لقانون فاراداي في التحريض الكهرومغنطيسي سوف تنشأ قوة محركة كهربائية تحريضية تولد بدورها تياراً كهربائياً متحرّضاً، وتتخذ هذه التيارات الكهربائية المتحرّضة عادة مسارات دائرية مقفلة ومتمركزة تقع في مستوي كل صفيحة وبمستويات عمودية على خطوط التدفق المغنطيسي المسبب لها، تُسمّى هذه التيارات التيَارات الدوّامة أو تيارات فوكو الإعصارية التي تتولّد عادة في الكتل المعدنيّة الخاضعة لحقول مغنطيسية متغيّرة.

ولهذه التيارات الكهربائية أثر سلبي على الأجهزة الكهربائية فهي تقوم بتولد حرارة عالية في الأجهزة الكهربائية مؤديّة إلى تلفها. وللتقليل من آثارها الحرارية الضارة تُستبدل الكتل المعدنيّة المصمّتة بكتل معدنيّة صغيرة أو ألواح معزولة بعضها عن بعض، فتنقطع فيها مسارات تلك التيّارات ممّا يخفّف من أثرها الحراري، وتوضع هذه الألواح بحيث توازي سطوحها خطوط الحقل المغنطيسي المطبق $B$، مما يؤدي إلى التقليل من هذه التيارات الكهربائية في الأجهزة الكهربائية. ويبين الشكل 3 مسارات التيارات الدوّامة في الكتل المعدنية وفي الصفائح المعدنية نتيجة تغير التدفق المغنطيسي الذي يجتازها وطرق التقليل من آثارها الضارة.

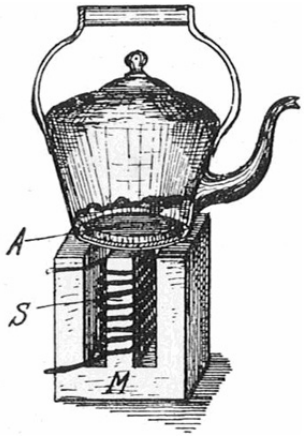



**الشكل 3.** جعل كتلة الحديد على شكل شرائح رقيقة جداً ذات سماكات صغيرة ومعزولة لتنقطع بذلك مسارات التيارات الدوّامة ممّا يقلل من آثارها الحرارية الضارة في الأجهزة الكهربائية.

بالرغم من أنّ لهذه التيارات آثاراً ضارة في الأجهزة الكهربائية إلا أنّها ذات تطبيقات مهمة، فهي تستخدم في مكابح القطارات الحديثة إمّا لإيقافها أو لإبطاء حركتها وتسمّى بالكوابح الكهرومغنطيسية، كما تُستثمر في أجهزة الكشف عن المعادن في نقاط التفتيش الأمنيّة ولاسيما في المطارات، وتستخدم حالياً بشكل واسع في عمل الطباخات التحريضية في منازلنا لطهي الطعام.

## مبدأ عمل الطباخ المنزلي التحريضي

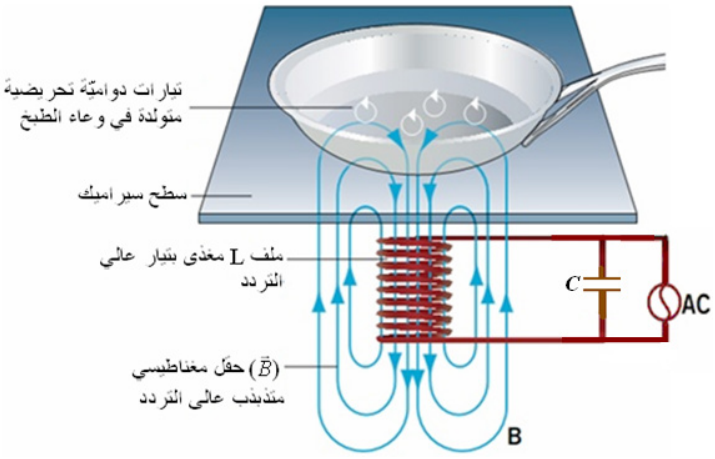
بعد اكتشاف ظاهرة التحريض الكهرومغنطيسي ودورها في توليد التيارات الدوّامة في الكتل المعدنية وتسخينها لهذه الكتل المعدنية سارع البحث العلمي إلى استثمار تلك التيارات في خدمة الإنسان وتسخيرها في عملية طهي الطعام فاخترع الطباخ المنزلي التحريضي. وقد سجّلت براءة اختراع لطباخ بالتسخين التحريضي عام 1909، ويوضّح الشكل 4 أول طباخ تحريضي ومبدأ عمله.




**الشكل 4.** أول طباخ تحريضي وهو عبارة عن ملف S يحرّض حقلاً مغنطيسياً في نواة المغنطيس M. ويمّر الحقل المغنطيسي خلال أسفل الوعاء A، محرّضاً التيارات الدوّامة فيه باستخدام تيار عالي التردد مولّد عن طريق دارة اهتزاز LC.

ويقوم مبدأ عمل الطباخ التحريضي على حادثة التحريض الكهرومغنطيسي التي تولد بدورها تيارات دوّامة في إناء الطباخ فقط. وكما ذكرنا سابقاً أنّ التيارات الدوّامة عبارة عن تيارات كهربائية تحريضية مغلقة متمركزة، وعند سريانها في ناقل معدني، وهو وعاء الطبخ، فإنّها تسخّن بذلك وعاء الطبخ بفعل جول الذي ينقل الحرارة المتولدة فيه إلى مكونات مادة الطبخ عن طريق النقل الحراري. وبدلاً من نقل الحرارة من المصدر الحراري مباشرة إلى مكونات الطبخة فإنّ هذه الطريقة في الطهي تسخّن وعاء الطباخ فقط، لذا نجد أن سطح الطباخ والهواء المحيط به لا يسخن في حين أنّ وعاء الطبخ ساخن، والسبب في ذلك يعود إلى عدم تولد تيارات دوّامة في العوازل والهواء.

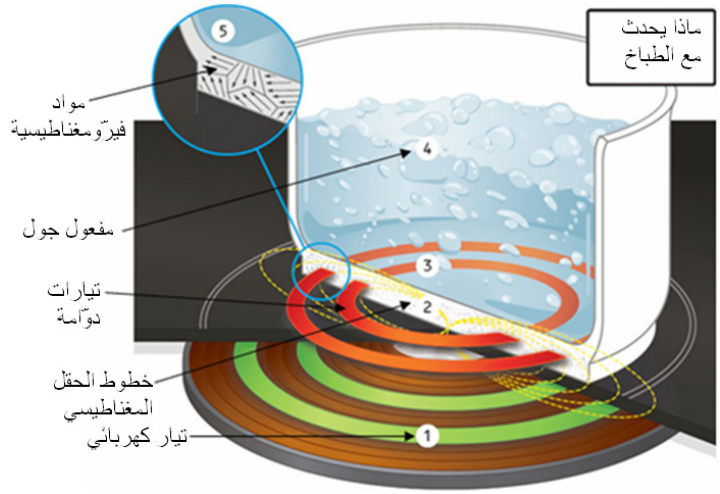
وحتى يقوم الطباخ التحريضي بتوليد تيارات دوّامة في وعاء الطبخ المعدني، يوضع ملف نحاسي (ذاتيته L) تحت الوعاء المعدني وقريباً جداً منه موصول على التوازي مع مكثّف (سعته C) لتشكيل دارة مهتزة LC رنينيّة تولد تيارات عالية التواتر، وعند عبور هذه التيارات عالية التواتر في الملف، يقوم الملف في هذه الحالة بتوليد حقل مغنطيسي متذبذب عالي التردد. وعند توجيه هذا الحقل المغنطيسي المتذبذب واختراقه أسفل وعاء الطباخ المعدني المصنوع من الحديد، تنشأ داخله تيارات تحريضية دوّامة شديدة نتيجة المقاومة الكهربائية المنخفضة لوعاء الطبخ فتسخّن وعاء الطبخ بفعل جول. وكلما رفعنا شدة الحقل المغنطيسي $B$ المتذبذب أو زدنا تردّد الاهتزاز $f$ ازداد إناء الطبخ سخونة، ويسخّن الإناء بدوره مكونات الطبخة عن طريق النقل الحراري كما ذكرنا سابقاً، ويوضح الشكل 5 هذا المبدأ.




**الشكل 5.** مبدأ توليد التيارات الدوامة في إناء الطبخ.

إنّ مرور التيار الكهربائي في الملف النحاسي يرافقه عادة ضياع كبير للطاقة الكهربائية نتيجة للمقاومة التي يبديها هذا الملف أمام مرور التيار الكهربائي العالي التوتر عبره وذلك نتيجة الظاهرة السطحية أو الظاهرة القشرية التي تظهر عند الترددات العالية وتسبب زيادة حرارة سلك الملف كلما زاد تردد الاهتزاز، وتلافياً لهذه الظاهرة يُستبدل الملف النحاسي L المبيّن بالشكل 5 عادة بملف يصنع عادة من سلك ليتز Litz wire؛ وهو حزمة من الأسلاك صغيرة المقطع معزولة ومجدولة مع بعضها، ويطلق على هذا الملف اسم ملف التشغيل work coil. ثمّ طُور ملف التشغيل هذا ليأخذ الشكل الحلزوني المبين بالشكل 6 حتى تتولّد تيارات دوّامة على كامل قعر وعاء الطباخ فتولّد حرارة في كامل سطح قعر وعاء الطباخ بشكل متجانس كما هو مبين في الشكل 7.

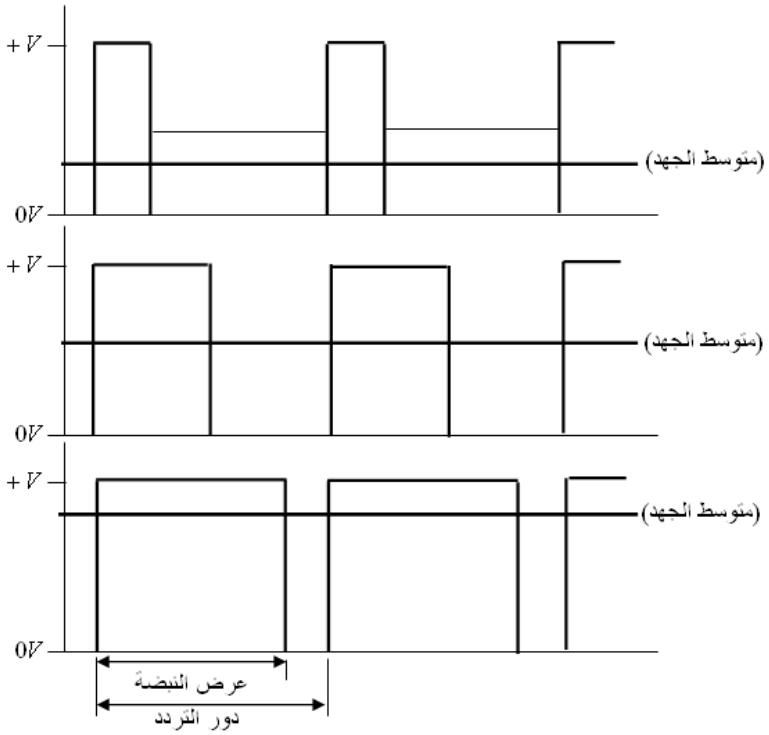
**الشكل 6.** ملف التشغيل في الطباخ المنزلي التحريضي.




**الشكل 7.** اتجاه الحقل المغنطيسي المتغير المتولّد في قعر وعاء الطباخ وجهة التيارات الدوّامة بعد تطوير ملف التشغيل.

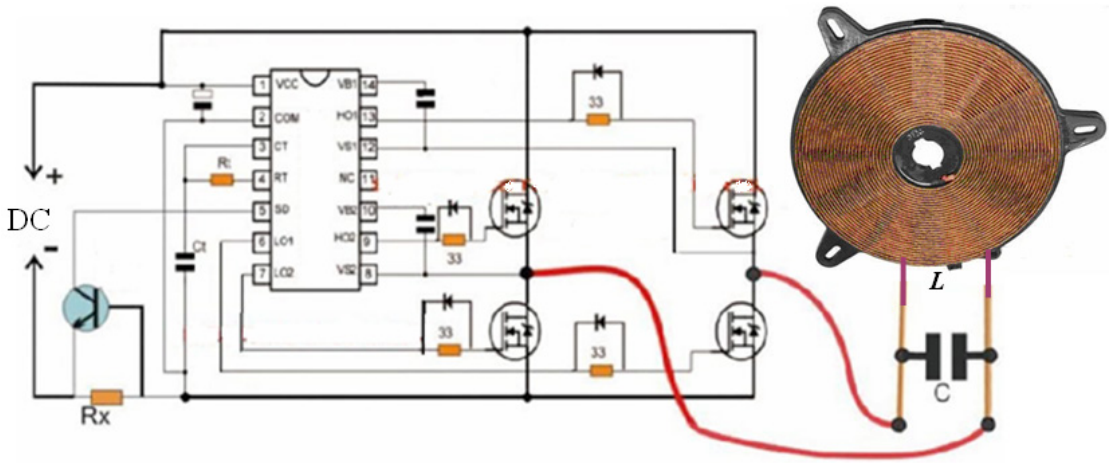
ويجب الإشارة إلى أنّ قعر وعاء التسخين مع ملف التشغيل يشكلان محولة كهربائية تقلل الجهد وتزيد من التيار، الثانوي فيها هو قعر وعاء التسخين الذي يشكل دارة مقصورة تتحول فيها الطاقة الكهربائية إلى حرارة نتيجة التيارات الدوامة فيها، ويبقى بذلك الملف المولّد للحقل المغنطيسي بارداً.

ويتم توليد الاهتزاز عن طريق توصيل أحد طرفي ملف التشغيل L بجهد التغذية الموجب والطرف الآخر إلى ترانزستور التشغيل. ويوصل على التوازي مع طرفي ملف التشغيل L مكثّف C لتشكيل الدارة المهتزّة الرنينيّة المولّدة للتيارات العالية التواتر. وحتى يتم الاستثمار الأمثل لهذه التيارات العالية التواتر في الطباخ التحريضي، لا بد لنا من تحويلها إلى نبضة مربّعة الشكل متحكّم بها، وهو ما يسمى بالتعديل الترددي لعرض النبضة PWM. ويقصد بالتعديل الترددي أنّه الفترة الزمنية التي سيفتح بها الترانزستور ويمرّر التيار الكهربائي ضمن الملف نسبة للفترة الزمنية التي سيغلق بها الترانزستور ويقطع التيار ضمن دارة الاهتزاز، ويبيّن الشكل 8 التعديل الترددي PWM.




**الشكل 8.** تعديل عرض النبضة.

ويتم توليد هذه النبضات عن طريق دارة خاصة؛ وهي عبارة عن معالج إلكتروني (IC) مخصّص لهذا الغرض، ثمّ تنقل النبضات المتولدة إلى دارة قيادة ترانزستور التشغيل وهو من النوع IGBT، كما هو موضح في الشكل 9.




**الشكل 9.** دارة الاهتزاز LC مع دارة المعالج الإلكتروني IC المولد للنبضات PWM.

وقد ذكرنا سابقاً أنّ الحرارة المتولدة في وعاء الطباخ تتعلّق بتردد الاهتزاز وقوة الحقل المغنطيسي. وبالاختيار المناسب لقيمتي ذاتية ملف التشغيل L وسعة المكثّف C يمكننا توليد اهتزاز تتراوح قيمته ما بين 24 و50 KHz وذلك انطلاقاً من العلاقة التالية:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (1)$$

## المكونات الرئيسية للطباخ التحريضي

① **جسر التقويم**: ومهمته تحويل الجهد المتناوب للشبكة العامة إلى جهد مستمر يمكن التعامل معه؛ حيث يكون جهد الدخل متناوباً قيمته 220 V ويخرج بقيمة 310 V في الجهد المستمر.

② **ملف التشغيل L**: وهو العنصر الأساسي في الطباخ والذي يولد الحقل المغنطيسي المهتز في قعر وعاء الطبخ.

③ **مكثّف الملف C**: وهو مكثّف خاص بالاهتزازات يوصَل على التوازي مع ملف التشغيل، وتتراوح قيمته ما بين 0.27 و0.33 $\mu F$، وقيمة جهده 1200 V للتيار المستمرّ و800 V للتيار المتناوب، ويُكتب عليه تردد الاهتزاز الأعظمي وهو 50 KHz.

④ ترانزستور الاستطاعة: وهو ترانزستور كبير من IGBT، يعمل بجهد تحمّل قدره 1200 V وتيار حمل أعظمي قدره 20 A. ويتم تثبيت هذا الترانزستور مع جسر التقويم على مشع حراري من الألمنيوم لتبريده.

⑤ دارة قيادة الترانزستور: وهي عادة عبارة عن أربعة ترانزستورات مهمتها نقل نبضات الاهتزاز من دارة تعديل عرض النبضة إلى بوابة ترانزستور الاستطاعة مع تأمين التيارات المناسبة له.

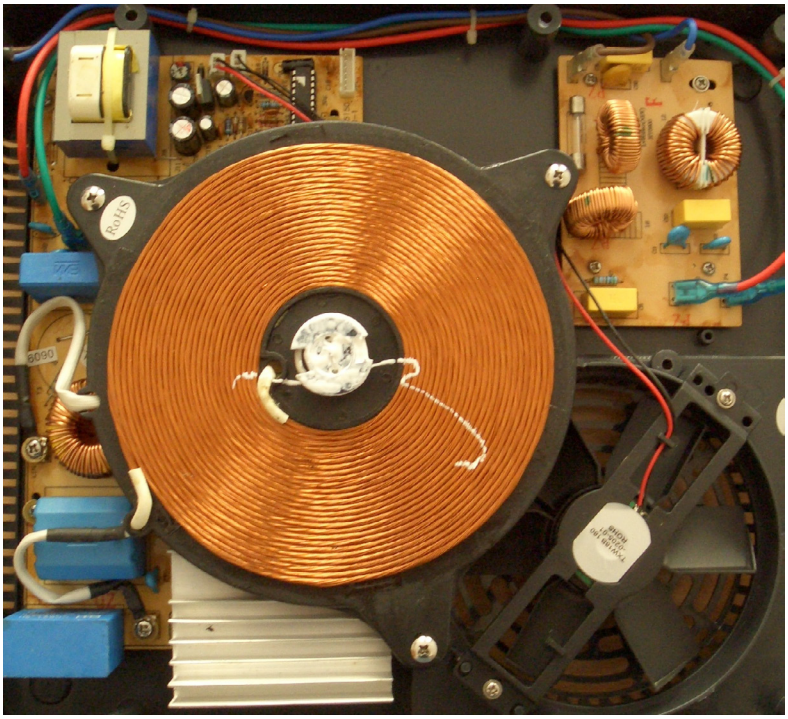
⑥ دارة التغذية: ومهمتها تأمين جهود التشغيل وهي جهد تشغيل ملف التشغيل 310 VDC وجهد قدح بوابة ترانزستور الاستطاعة 18 VDC وجهد دارة التحكم 5 VDC.

⑦ دارة حماية الدخل: وهي عبارة عن دارة مهمتها حماية الطباخ من النبضات الكهربائية العابرة، وتتكون من مكثّفات عديدة وملف وفيوز وقد نجد فايرستوراً.

⑧ دارة التحكّم والحماية: وتتكون إمّا من دارتين متكاملتين IC إحداهما للحماية والثانية للتحكّم أو مدمجتين بدارة متكاملة واحدة للحماية وأخرى للتحكّم وندعوها معالج تحكّم الجهاز.

⑨ لوحة واجهة المستخدم: وهي عبارة عن أزرار ضغط أو لمس مع شاشة رقميّة لإظهار حالات التشغيل المختلفة والأعطال.

⑩ مروحة تبريد: وتستخدم لتبريد الأجزاء الداخلية لدارات الطباخ التحريضي، ويبين الشكل 10 أجزاء الطباخ من الداخل.

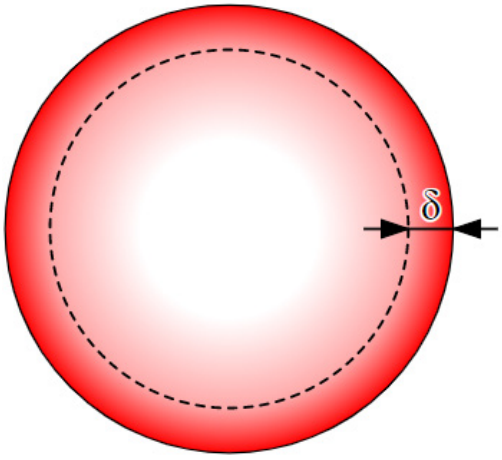


**الشكل 10.** منظر داخلي للطباخ التحريضي.

## الظاهرة القشريّة وخواص الأواني المستخدمة في الطباخ التحريضي

تعرّف الظاهرة القشريّة skin effect أنّها مرور التيار الكهربائي المتغيّر قرب السطح الخارجي أو القشرة الخارجيّة للناقل في خطوط النقل الكهربائية أو النواقل عموماً، بحيث تكون شدة التيار الكهربائي أعلى ما يمكن بالقرب من سطح الناقل وتتناقص تدريجيّاً كلما ابتعدنا عن السطح واقتربنا من مركز الناقل حتى ينعدم التيار تماماً عند عمق معيّن عن سطح الناقل يُسمّى بعمق القشرة skin depth $\delta$ التي تعطى بالعلاقة التالية:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi . f . \mu . \sigma}} \qquad (2)$$



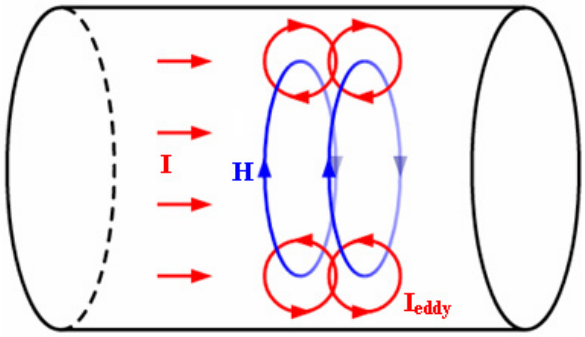

**الشكل 11.** تعريف عمق القشرة.

- الناقلية الكهربائية للمادة material electric conductivity $(\sigma)$ $(\Omega^{-1}m^{-1})$ وهو مقدار ثابت يتعلق بطبيعة المادة التي تعبّر عن مدى سماحية الناقل لمرور التيار الكهربائي عبره.

- النفاذية المغنطيسية magnetic permeability للمادة أو الوسط التي تعبّر عن إمكانية تدفق خطوط الحقول المغنطيسي في وسط ما. $(\mu)$ وهي مقدار ثابت خاص لكل مادة أيضاً، حيث تزداد كثافة تدفق خطوط الحقل المغنطيسي بازدياد نفاذية المادة والعكس صحيح.

- تواتر الحقل المغنطيسي المتذبذب الذي يولّد التيارات الدوّامة، وهو خاص بدارة الطباخ الكهربائي، والذي يمكن التحكّم به وتغييره من خلال دارة الطباخ التحريضي. $(f)$

وهذه الظاهرة ناتجة عن تغيّر الحقل المغنطيسي داخل الناقل الذي يؤدي إلى تسخين الناقل بسبب نشوء تيارات دوّامة عند مرورها ضمن الناقل حيث تقوم بمنع مرور التيّار الكهربائي في وسط الناقل، وتسمح له بالمرور عند السطح الخارجي. وبالنتيجة تؤدي إلى زيادة مقاومة الناقل $R$ وارتفاع حرارته.



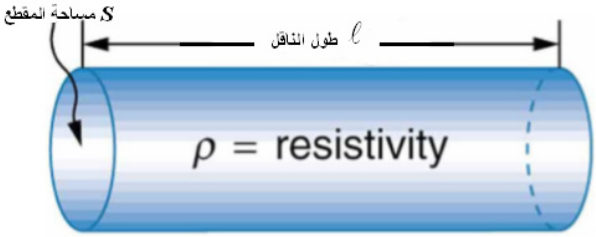

**الشكل 12.** تولّد التيارات الدوّامة بسبب الحقل المغنطيسي $(\vec{B} = \mu\vec{H})$ المتغيّر داخل الناقل.

وأمّا العوامل التي تؤثّر على عمق القشرة فهي:

❶ **تردّد التيار $f$** : حيث تزداد هذه الظاهرة بازدياد التردّد، إذ إنّه كلما زاد التردّد قلّت مساحة المقطع الفعّال $S$ للناقل التي يمر فيها التيار وبالتالي يقل عمق القشرة $\delta$، ويبين الشكل 13 تأثير زيادة التردد $f$ على عمق القشرة $\delta$.

**الشكل 13.** تأثير التردّد $f$ على عمق القشرة $\delta$.

وكلما ازداد التردّد $f$ ازدادت مقاومة الناقل $R$؛ لأنّ التيّار الكهربائي سوف يتمركز في الجزء الخارجي للناقل، وكما نعلم أنّ المقاومة الكهربائية $R$ هي حاصل ضرب طول الناقل $e$ في مقاومته النوعيّة resistivity $\left(\rho = \frac{1}{\sigma}\right)$ مقسومة على مساحة المقطع الذي يمر فيه التيار $S$، لذلك تقل المساحة $S$ بفعل الظاهرة القشريّة وتزداد مقاومة الناقل وفق العلاقة التالية:




$$R = \rho\frac{\ell}{S} \qquad (3)$$

**الشكل 14.** تعريف مقاومة الناقل R.

ومن أجل ناقل أسطواني المقطع متجانس نصف قطره $r$، فإنّ التيّارات الدوّامة سوف تمرّ في القشرة الخارجية لهذا الناقل، ولهذه القشرة سماكة قدرها $\delta$ ومساحة مقطعها $S$ والمعطى بالعلاقة التالية:

$$S = \pi.\delta^2 = \frac{1}{f.\mu.\sigma} \qquad (4)$$

وبالتالي فإنّ مقاومة هذا الناقل $R$:

$$R = \frac{\ell}{f.\sigma^2.\mu} \qquad (5)$$

تدل العلاقة (5) على أنّ المقاومة $R$ أصبحت تابعة لكلّ من طول الناقل $e$، والسماحية الكهربائية $\sigma$، والنفاذية المغنطيسية $\mu$ (وهذه المقادير جميعها ثابتة خاصة لكل معدن)، وأخيراً تواتر التيار $f$ المار في النطاق، الذي يحدد سماكة القشرة التي تمر فيها التيارات الدوّامة وبالتالي قيمة مقاومة الناقل. في حالة التيار المستمر DC يمر التيار في كامل مقطع الناقل وليس قرب السطح الخارجي فقط كما في التيار المتناوب AC، ممّا يعني أنّ مقاومة الناقل في حالة التيّار المستمر أقل من مقاومته في حالة التيار المتناوب.

❷ **قطر الناقل:** حيث تزداد هذه الظاهرة بازدياد قطر الناقل.

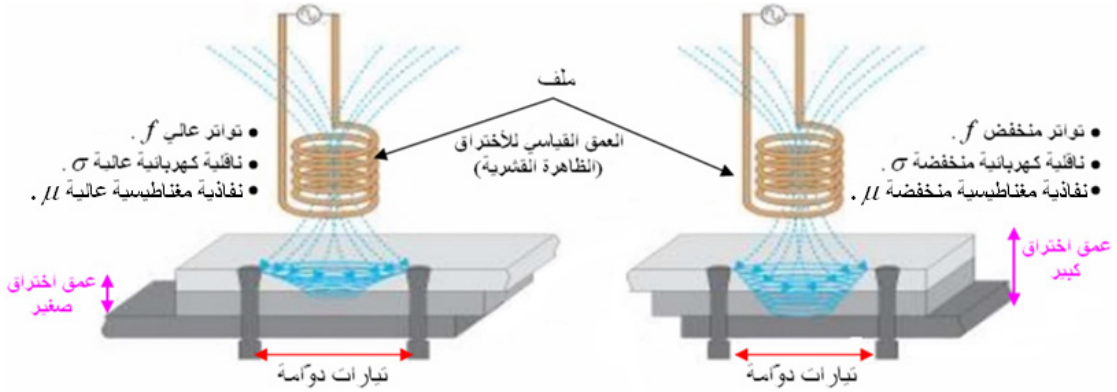
❸ **طبيعة المادة من حيث النفاذية المغنطيسية $\mu$ والسماحية الكهربائية $\sigma$:** حيث إنّ لكل عنصر نفاذية مغنطيسية وسماحية كهربائية خاصة به. ويبين الجدول 1 الخواص المغنطيسية والكهربائية لبعض المعادن المستعملة في صناعة أواني الطبخ.

**الجدول 1.** الخواص المغنطيسية والكهربائية لبعض المعادن والعناصر.

| المادة | النفاذية المغنطيسية $\mu$ $(H/m)$ | النفاذية المغنطيسية النسبية: $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{\mu}{4\pi\times10^{-7}}$ | السماحية الكهربائية $\sigma(S/m)$ عند 20 °C |
|---|---|---|---|
| الخلاء | $4\pi\times10^{-7}$ | 1 | ∞ |
| الهواء | $1.25663753\times10^{-6}$ | 1.00000037 | $3\text{-}8\times10^{-15}$ |
| الألمنيوم | $1.256665\times10^{-6}$ | 1.000022 | $2.82\times10^{7}$ |
| النحاس | $1.256629\times10^{-6}$ | 0.999994 | $5.96\times10^{7}$ |
| الحديد النقي (نقاوة 99.8%) | $6.3\times10^{-3}$ | 5000 | $1.0\times10^{7}$ |
| الحديد الصلب (99.8%) | 0.25 | 200000 | $1.0\times10^{7}$ |
| الفولاذ (الستانلس ستيل) | متغيرة بحسب نسبة الحديد في الفولاذ | 10000 | $2.17\times10^{6}$ |

نلاحظ من الجدول 1 أنّ الحديد الصلب والفولاذ يمتلكان أكبر نفاذية مغنطيسية على الإطلاق مقارنة مع كافة العناصر الأخرى، وأن لهما سماحية كهربائية مرتفعة نسبيّاً، وهذه الميزات المغنطيسية والكهربائية تجعلهما الوحيدين الصالحين فقط لصناعة أواني الطبخ في حالة الطباخ التحريضي.

ويبين الشكل 15 تأثير كلٍّ من تواتر التيار $f$ والسماحية الكهربائية $\sigma$، والسماحية المنغطيسية $\mu$ على عمق اختراق الحقل المغنطيسي المتذبذب للمادة $\delta$.



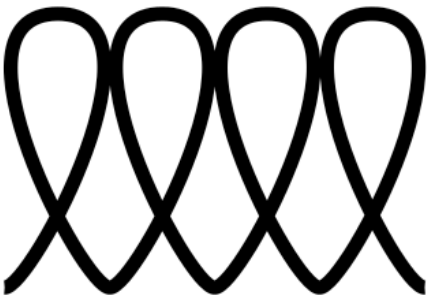

**الشكل 15.** تأثير كلٍّ من التواتر $f$ والسماحية الكهربائية $\sigma$ والنفاذية المنغطيسية $\mu$ على عمق القشرة $\delta$ وذلك من أجل مادتين مختلفتين.

نلاحظ من الشكل 15 أنّه بزيادة كلٍّ من تواتر التيار $f$ والنفاذية المغنطيسية $\mu$ الناقلية الكهربائية $\sigma$ فإنّ عمق اختراق الحقل المغنطيسي يقل، وبدوره يزيد من قيمة المقاومة الكهربائية وبالتالي من زيادة فعل جول في التسخين الحراري.

ونتيجة لذلك نقول إنّ الظاهرة القشرية هي التي تفرض علينا استخدم أوعية محدّدة وذات مواصفات معيّنة للطباخ التحريضي؛ لذلك نقول إنّه عند استخدام وعاء الطبخ في حالة الطباخ التحريضي يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار طبيعة المادة المصنوع منها قعر الإناء وسماكته، لأنّهما يؤديان دوراً أساسيّاً في شدة التيارات الدوّامة وبالتالي عملية التسخين؛ لذا يجب أنّ يكون وعاء الطبخ ذا نفاذية مغنطيسية عالية جداً وسماكة صغيرة.

لا يستخدم معدنيّ الألمنيوم والنحاس وحدهما مع الطباخ التحريضي بسبب خصائصهما المغنطيسية والكهربائية؛ إذ إنّ الألمنيوم والنحاس أكثر ناقلية كهربائية وحرارية من الحديد والفولاذ ولكنّ النفاذية المغنطيسية لهما منخفضة جداً وبالتالي العمق القشري $\delta$ لهما أكبر كونهما مواد غير مغنطيسية، وكما وجد سابقاً أنّ التيار يتدفق في طبقة رقيقة وخارجية من سطح المعدن، وهذه الطبقة (العمق القشري) في حالة الألمنيوم والنحاس تكون واسعة عريضة وبالتالي سوف تمرّ التيارات التحريضية في هذه الطبقة الواسعة العريضة وتواجه مقاومة كهربائية صغيرة، ممّا ينتج عن ذلك حرارة أقل مقارنة مع الحديد والفولاذ، ونتيجة لذلك لن يعمل طباخ التحريض بالكفاءة المطلوبة مع أوعية الألمنيوم والنحاس. ولكون أن الحديد والفولاذ يمتلكان نفاذية مغنطيسية كبيرة لذا يستخدمان بشكل أساسي في خلائط أوعية الطبخ التحريضي وبسماكة قعر صغيرة مع بعض المعادن الأخرى كالألمنيوم والنحاس التي لها ناقلية حرارية مرتفعة مقارنة مع الحديد والفولاذ.

لذلك يمكن أن يعمل الطباخ مع أوعية من معادن أخرى فيها نسبة حديد مرتفعة في قعر وعاء الطبخ، لذا تضع بعض الشركات المصنّعة لأواني الطبخ عادة الرمز المبيّن في الشكل 16 الذي يشير إلى أنّ هذا الوعاء يعمل مع الطباخ التحريضي.



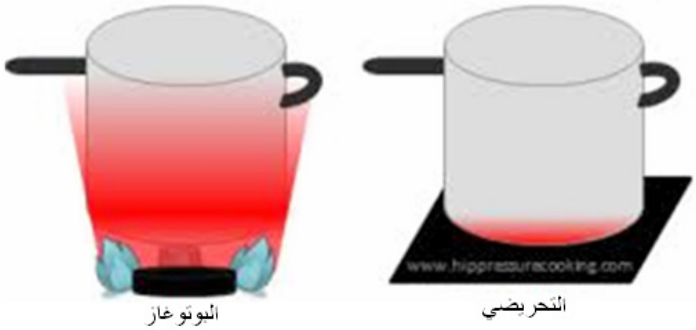
**الشكل 16.** يشير هذا الرمز الموجود في أسفل بعض أوعية الطبخ إلى أنّه يمكن استخدام الطباخ التحريضي.

يلزم للقلي استخدام مقلاة قاعدتها واسعة بشكل يغطي دائرة سطح الطباخ وأن تكون ذات ناقلية حرارية جيدة لنشر الحرارة بسرعة وبشكل متساوٍ؛ لذا يجب أن يكون أسفل المقلاة طبقة فولاذية مكبوسة على الألمنيوم، أو طبقة من الفولاذ المقاوم للصدأ فوق الألمنيوم؛ وذلك لأنّ الألمنيوم يمتلك ناقلية حرارية مرتفعة نسبيّاً تجعل الحرارة تنتشر في أرجاء المقلاة بشكل أكثر تجانساً. لا تكون درجة الحرارة

في قاعدة مقالي الفولاذ المقاوم للصدأ مع قاعدة الألمنيوم بالدرجة نفسها في الجوانب، فالمقالي الحديدية تعمل مع سطح الطباخ بالتحريض ولكنها ليست بناقل حراري جيد كالألمنيوم.

عند غلي الماء فإنه يدور وينشر الحرارة ويمنع وجود نقاط ساخنة. من الضروري أن يكون أسفل الوعاء ناقلاً حرارياً جيداً عند استخدامه في تسخين المرق وذلك لتوزيع الحرارة بشكل متساوٍ. ومع المرق السميك يفضل استعمال أوعية مبطنة بالكامل بالألمنيوم، مما يساعد على صعود الحرارة إلى جوانب الوعاء وتسخينه بصورة أسرع وأكثر انتظاماً.

وأخيراً يصنع سطح الطباخ من زجاج سيراميكي عازل كهربائياً وناقل حراري رديء ليقلّل من الضياع في الطاقة الحرارية المتولدة في أسفل وعاء الطبخ، وفي الأحوال العادية يبقى سطح الطباخ بارداً كفاية بحيث يمكن لمسه دون التعرض لإصابة بعد إزالة وعاء الطبخ.




**الشكل 17.** يَسخن فقط قعر وعاء الطباخ في حالة الطباخ التحريضي، في حين عند وضع الوعاء نفسه على طباخ الغاز العادي (البوتوغاز) فإنّ الوعاء يسخن بالكامل.

وتم حديثاً تطوير تكنولوجيا الطهي المغنطيسي لتعمل مع كل الأوعية مهما اختلفت مواد تصنيعها، وتعتمد هذه التقنية على إنتاج مجال كهرومغنطيسي عالي التردّد بحيث لا تستطيع أي مادة أن تمنع نفاذه فيها سواء كانت زجاجاً أم سيراميكاً أم ألمنيوم أم نحاساً. وهي مستخدمة في اليابان، وربما تحتاج إلى وقت لتنتشر في باقي الدول.

## محاسن الطباخ التحريضي ومساوئه

يتفوّق الطباخ التحريضي على أنواع أخرى من الطباخات المنزلية ببعض المزايا تجعله الواعد الأول للاستخدام المنزلي وفيما يلي بعض أهم محاسن ومساوئ هذا النوع من الطباخات:

1. اقتصادي في الطاقة؛ فهو يقلّل استهلاك الكهرباء بمقدار 1.5 تقريباً من استهلاك المواقد الكهربائية.
2. له مردود حراري كبير يصل إلى 90%، في حين يصل مردود طباخ الهالوجين 70%، والسخّانات العادية أقل من 65%، بينما طباخ الغاز العادي لا يتجاوز 45% (المردود الحراري هو نسبة الحرارة المفيدة إلى الطاقة المستهلكة). ويبين الجدول 2 مقارنة لبعض أنواع مصادر الطبخ المنزليّة.

**الجدول 2.** مقارنة بين بعض أنواع الطبّاخات من حيث استهلاكها للطاقة والطاقة المستفاد منها.

| نوع الطباخ | الطاقة المقدّمة | المردود | الطاقة المستفاد منها |
|---|---|---|---|
| الطباخ التحريضي | 2.8 kW | %90 | 2.52 kW |
| الطباخ الهالوجيني | 2.2 kW | %90 | 1.32 kW |
| السخّان الكهربائي | 2.0 kW | %45 | 1.1 kW |
| البوتوغاز المنزلي | 3.5 kW | %50 | 1.75 kW |

3. سرعة في الطبخ؛ حيث يستغرق إبريق الشاي ليغلي حوالي 8 دقائق على السخّانات العادية، بينما يستغرق دقيقتين على الطبّاخ التحريضي.
4. أكثر أماناً من غيره فهو لا يولّد حرارة إلا في قعر وعاء الطبخ (وفي بعض الطباخات الحديثة تحتوي على حساس يطلق إنذاراً إذا انسكب جزء من الطعام الساخن على سطح الطبّاخ)، ولا يسبب حروقاً عند ملامسته.
5. سهل التنظيف وجميل المنظر وصديق للبيئة.

وأمّا مساوئ الطباخ التحريضي فهي:

1. يتطلب نوعاً معيّناً من المعادن (الحديد والفولاذ) حتى يعمل وبالتالي لا نستطيع استعمال جميع أواني الطبخ الموجودة في المنزل.
2. يخلق مجال مغنطيسي متذبذب قد يؤثّر على بعض الأجهزة الكهربائية وخاصة عند الأشخاص الذين يعيشون مع منظم ضربات القلب.

## المراجع


– السمان أ (1982–1983). الكهرطيسية. مطبعة المدينة – دمشق، جامعة دمشق.

- Coey JMD (2010). Magnetism and Magnetic Materials, Cambridge University Press; 1st edition (accessed 3 Jan 2021), 625 pages.

- Davis J (1989). Conduction and Induction Heating. Institution of Electrical Engineers. ISBN: 0863411746, 9780863411748. Available at: https://books.google.com/books/about/Conduction_and_Induction_Heating.html?id=j43VeEgy1jIC (accessed 9 Jan 2021).

- Rudnev V, Loveless D, Cook RL (2017). Induction Heating (Manufacturing Engineering and Materials Processing), CRC Press, 2nd edition, 2nd Edition, 772 pages.

- Wikipedia, the free encyclopedia. Skin effect. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect. (accessed 11 Dec 2020).


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

# المجهر الإلكتروني

## من أجمل ما قيل عن المجهر الإلكتروني أنه جهاز يستخدم أدق ما لا نراه ليرينا ما لا نراه

*يعدّ التحليل النانوي nano-analysis من أكثر تطبيقات التقنية العالية hightechnology المستثمرة لأدوات القياس measurement instruments شيوعاً، وأهمها المجهر الإلكتروني الماسح scanning electron microscope SEM. تقدم هذه المقالة شرحاً علمياً عن أهمية المجاهر الإلكترونية واستعمالاتها في العلوم المختلفة، وتعطي فكرة واضحة عن الحاجة والمبادئ الفيزيائية التي دعت وسمحت باختراعها مع وصفٍ مبسطٍ لأقسامها وشرحٍ لكيفية عملها بأسلوب يفهمه غير المختص ويفيد المشغّل والمستثمر والطالب والباحث، إضافة إلى تغطية بعض الصعوبات التي يواجهونها خلال عملية التصوير بالمجهر الإلكتروني الماسح.*

*الكلمات المفتاحية: المجهر الضوئي، المجهر الإلكتروني الماسح، المنابع الإلكترونية، التآثر بين الحزمة الإلكترونية والمادة.*

## مقدمة

### تاريخ المجاهر بين الحاجة والاختراع

ما زالت عجلة العلم والاكتشافات والتطور العلمي تسير بنا نحو المزيد من التقدم والتطوير واكتساب المزيد من الخبرات والمعارف وبلوغ آفاق جديدة لم يكن للعقل أن يتخيلها؛ ومن ذلك رؤية مكونات المادة والكائنات والمخلوقات الدقيقة والبالغة الدقة. ولقد قدمت لنا هذه الاختراعات خدمات جليلة لا يعرف قيمتها إلا من استعملها، ومن بين هذه الصناعات القديمة الجديدة "المجهر" الذي جرى تطويره على مدار مئات السنين، ولا يخفى دوره على أحد خصوصاً في مجال البحث العلمي.

حاول الإنسان منذ آلاف السنين أن يطور قدرته على الرؤية بواسطة استعمال أدوات لتكبير الأشياء التي ينظر إليها، وتعود بداية قصة المجاهر إلى حقبة عصور ما قبل التاريخ عندما التقط الإنسان البدائي قطعة مستديرة من البلور الصخري أو الزجاج البركاني وقلبها بيده مستشعراً أثر الضوء عليها وأدرك تكبيرها للأشياء، ومنذ ذلك الوقت بدأت البشرية بمحاولة الرؤية عن طريق أدوات لتكبير الأشياء، فاستخدموا كرات زجاجية لأغراض مماثلة حيث قام النحاتون القدماء في حضارات الشرق الأوسط القديمة بملء كرات زجاجية بالماء لتكبير المنحوتات وفحصها بدقة، كما كانت عدسات القراءة البدائية شائعة في عصر الإمبراطورية الرومانية والعصور التي تلتها،

لكن التطور في مجال صناعة المجهريات والعدسات كان محدوداً وبطيئاً في تلك الفترة، واستمر على هذا المنوال حتى نهاية القرن السادس عشر حين أصبحت صناعة صقل العدسات بأنواعٍ وأشكالٍ رائعة تمثل فناً مهماً وجماليةً راقيةً. ومع نهاية القرن السادس عشر الميلادي، وتحديداً في العام 1590، حدثت أول طفرة علميةٍ في هذا المجال عندما استطاع صنّاع عدسات ألمان تركيب عدة عدسات في أنبوب ضوئي بنظام وترتيب ومواصفات معينة أدت لصنع أول مجهر مركب عرفه البشر، وأصبح بعدها في متناول يد الجميع. وبالرغم من أن تسمية المجهر أو الميكروسكوب تعود بأصلها إلى اليونانية (ينظر إلى look at) skopeo + (صغير small) mikros إلا أن العديد من المصادر ما فتئ يذكر أن أول من أطلق هذا الاسم ميكروسكوب أو مرآة الصغائرعلى المجهر كان الطبيب الألماني جيوفاني فابر Giovanni Faber في عام 1625 لوصف المجهر المركّب الخاص بالعالم الإيطالي الشهير غاليليو غاليلي Galileo Galilei مخترع المجهر البسيط الذي كان مؤلفاً من عدسة واحدة دعاه بالعين الصغيرة. ومن بين أهم العلماء والمخترعين الذين أدلوا بدلوهم في هذا المجال لا بد لنا من ذكر العالم الموسوعي العربي أبي علي الحسن بن الحسن بن الهيثم (965–1039 م) الذي يعدّ المؤسس الأول لعلم المناظر ومن أوائل الفيزيائيين التجريبيين الذين تعاملوا مع نتائج الرصد والتجارب في محاولة تفسيرها رياضياً دون اللجوء لتجارب أخرى، وقد قدم إسهامات كبيرة في الرياضيات والبصريات والفيزياء وعلم الفلك والهندسة وطب العيون والإدراك البصري، وله العديد من المؤلفات والمكتشفات العلمية التي أكّدها العلم الحديث.

من جهة أخرى فإن أول تقرير مفصّل تستخدم فيه ملاحظات سجّلت عن طريق الرؤية بالمجهر صدر سنة 1644 عن عين الذبابة والتركيب الداخلي للأنسجة الحية، ما لبث بعدها أن انتشر استخدام المجهر في عدة دول مثل إيطاليا وهولندا والمملكة المتحدة لأهميته في مجال البحوث العلمية. وبالرغم من أن جودة العدسات في المجاهر البدائية غالباً ما كانت ضعيفة، ولم تكن الصور واضحة جداً، لكنَّ هذه المجاهر البدائية قدّمت مساعدةً كبيرةً في معرفة المزيد عن علوم الحيوانات والنباتات. ولقد ساهم الكتاب الذي نشره العالم الإنجليزي روبرت هوك Robert Hooke سنة 1665 في شهرة المجهر وانتشاره، مضمناً إيّاه صوراً بيولوجية مجهرية مثيرة للدهشة حول نتائج تجاربه المجهرية في علم الأحياء دعاها ميكروغرافيا، أبهرت كثيراً من المتابعين آنذاك.

ثم جاءت بعد ذلك أكبر مساهمة في هذا المجال من أنطوني فان ليفينهوك Anton van Leeuwenhoek الذي ساعد في تعميم المجهريات كأسلوب في البحث والدراسة. ومع مرور الزمان أخذ علم المجهريّات يتطور بخطوات سريعة أكثر من أي وقت مضى، ففي سنة 1893 قام البروفيسور الألماني أوجوست كوهلر August Köhler بوضع تقنية جديدة لإضاءة العينات سميّت إضاءة كوهلر التي تعدّ من أساسيات المجهر الضوئي الحالي. وفي سنة 1953 منحت جائزة نوبل في الفيزياء لفريتز زرنيك Fritz Zernike لتطويره تقنية جديدة لإضاءة العينات أدّت إلى تحسين تباين العينات الشفّافة قيد الدراسة بواسطة تغيير طور موجات الضوء في ما دعي بمجهر تباين الطور، كما قام جورج نومارسكي Georges Nomarski في سنة 1955 بتطوير تقنية أخرى لإضاءة العينات الشفافة اعتماداً على تداخل موجات الضوء في ما يعرف بمجهر التداخل التباييني.

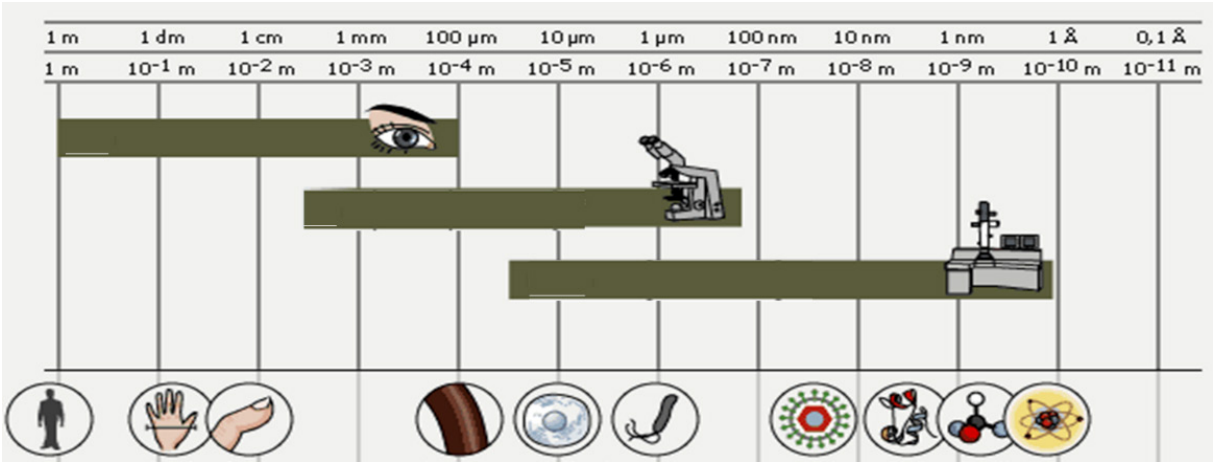
## ما هو المِجهَر

المِجهَر أو الميكروسكوب هو جهاز يختصُّ بتكبير الأجسام الصغيرة والأشياء التي لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة وإظهار التفاصيل الدقيقة لها من أجل اكتشاف تكوينها ودراستها، ويسمَّى العلم الذي يهتم باستكشاف الأجسام الصغيرة وتفاصيلها الدقيقة بواسطة المجهر بعلم المجهريات، يعد المجهر أحد أكثر الأجهزة وأوسعها استخداماً في علم الأحياء، وقد ساهم اختراع المجهر والتقنيات الحديثة التي تعمل على الأمواج الكهرطيسية في توسيع دائرة الإبصار، فتمكَّن البشر بواسطته من رؤية ما لم يستطيعوا رؤيته من قبل.

من المفيد قبل البدء بالخوض بالتفصيل في أقسام المجاهر وخصائصها وميزاتها ذكر بعض الخصائص والمعلومات عن الضوء المرئي وحقل الرؤية للعين المجردة وكل من المجهر الضوئي والإلكتروني. يقسم مجال الرؤية للأجسام بحسب الأداة المستخدمة وأبعاد الجسم المرئي إلى ثلاثة أقسام (انظر الشكل 1).

- الرؤية بالعين المجردة والتي تمكّننا من تمييز أبعاد حتى 0.1 مم.
- الرؤية بواسطة المجهر الضوئي التي تسمح بالتمييز حتى عدة مئات من النانومتر.
- الرؤية بواسطة المجاهر الإلكترونية التي يمكنها التمييز حتى عدة أنغستروم.

يبين الشكل 1 حقل الرؤية المتاح باستخدام العين المجردة وكلّ من المجهرين الضوئي والإلكتروني.




**الشكل 1.** حقل الرؤية للعين المجردة والمجهرين الضوئي والإلكتروني.

## المِجهَر الضوئي

يُعدّ المجهر الضوئي أحد أبسط أنواع المجاهر وأكثرها استعمالاً، ولأنه يعدّ مُنخفض التكلفة نسبياً مما جعله مثالياً للاستخدام في التعليم والبحث وكذلك للهواة أيضاً؛ فهو يَستخدم الضوء ومجموعة من العدسات لتكبير الأجسام الصغيرة، ويوجد فيه مسار خاص لمرور الضوء وصولاً إلى العينة المدروسة، ومن ثم تكوين صورة واضحة لها تفوق حجمها الطبيعي. تبدأ عملية الرؤية المجهرية بالعدسة العينية في الطرف العلوي لأسطوانة المجهر المعدنية وتنتهي بالعدسة الجسمية المسؤولة عن التكبير والمثبتة على القرص المتحرك بطرفها السفلي بالقرب من العينة؛ حيث يوجد أكثر من عدسة يمكن إختيار إحداها نظراً لاختلاف قدرتها على التكبير، كما يمتلك المجهر الضوئي ضابطين دوّارين أحدهما للضبط التقريبي والثاني للضبط الدقيق، إضافة إلى حامل مسطّح توضع العينة عليه ومصباح كهربائي أو مرآة في أسفله لتوجيه الضوء نحو الشريحة الزجاجية الشفافة التي تُوضع عليها العينة. أما الجزء الأخير من المجهر فهو المكثّف؛ وهو يتولى مهمة تكثيف الضوء وجعله حزمة واحدة وتوجيهه إلى العينة. تعمل هذه الأجزاء مع بعضها لتقديم صور واضحة ودقيقة للجسم المدروس، ونذكر من أنواع المجاهر الضوئية:

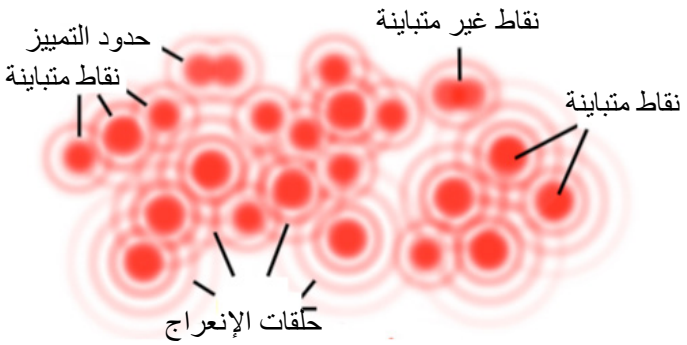
❶ **المجهر الضوئي البسيط:** وهو مجهر مُكوّن من عدسة واحدة فقط.

❷ **المجهر الضوئي المركّب:** ويتألف أبسط أنواعه من عدسة عينيّة يمكن من خلالها رؤية العيِّنة المراد دراستها وعدسة جسمية تكون قريبة من الجسم المراد تكبيره، أمّا المجاهر الضوئية المركّبة الحديثة فهي أكثر تعقيداً، وتتكوّن من عدسة عينيّة وعدد من العدسات الجسمية إضافةً إلى مصباح كهربائي أو مرآة لتوجيه الضوء نحو العينة. يصل التكبير النموذجي للمجهر الضوئي المركّب إلى 1500 مرة، في حين تصل قدرة الفصل أو التباين إلى 0.2 ميكرومتر.

❸ **المجهر التشريحي:** يتكوَّن المجهر التشريحي من عدستين عينيتين وعدة عدسات جسمية، وهو يعطي صورة ثلاثية الأبعاد لسطح العينة المدروسة ومكبّرة بحدود خمسين مرة. يُستخدم المجهر التشريحي في عمليات التشريح والجراحة المجهرية ودراسة العينات التي يمكن رؤيتها بالعين المجردة مثل الحشرات والبلورات.

## مفاهيم فيزيائية ساهمت في اختراع المجهر الإلكتروني

تحدُّ خصائص الضوء المرئي الفيزيائية من دقة وقوة التمييز والتباين في المجاهر الضوئية بسبب طول موجة الضوء المرئي المحصور بين 380 نانومتر و750 نانومتر، فإذا تجاوزت قدرة التكبير للمجهر ألفي مرة (2000×) تصبح صورة العينة المدروسة ضبابية أو غير واضحة التباين. يظهر الشكل 2 صورة مأخوذة بالمجهر الضوئي تبين حلقات الانعراج الناجمة عن تداخل الضوء الصادر عن نقاط مضيئة وحدود التباين فيها.




**الشكل 2.** صورة بالمجهر الضوئي تبيّن حلقات الانعراج وحدود التمييز والنقاط المضيئة المتباينة وغير المتباينة.

تستخدم في المجهر الإلكتروني حزمة من الإلكترونات من أجل إعطاء صورة مكبّرة للعينة، بدلاً من شعاع الضوء المرئي؛ وذلك لما تملكه الإلكترونات من خواص مزدوجة (جسيمية وموجية) ولكون طول موجتها المواكب أصغر بكثير من طول موجة الضوء المرئي مما يمكّن عن طريق التحكم في طول موجة إلكترونات السبر من الحصول على صور أدق لمكونات الأجسام المجهرية. فللحصول على صورة مكبّرة وواضحة يلزم أن يكون طول موجة الإشعاع المسلّط على الجسم المدروس أصغر من المسافة الفاصلة بين مكوّناته المراد رؤيتها، وبالتالي لفحص عينات تحوي مكونات أبعادها أصغر من 300 نانومتر كالجسيمات النانوية أو صبغيات الخلايا أو الفيروسات نحتاج إلى مجهر متطور ذي كفاءة عالية كالمجهر الإلكتروني الماسح الذي يعد واحداً من بضعة أنواع من المجاهر الإلكترونية التي تملك قدرة على تكبير الأجسام والحصول على صور مجّسمة ودقيقة أوضح بكثير من الصور التي تقدمها المجاهر الضوئية وأكبر من حجمها الطبيعي بما يزيد عن مليون ضعف.

## عيوب المجاهر الإلكترونية

على الرغم من المزايا والفوائد العديدة التي تمتلكها وتقدمها المجاهر الإلكترونية إلا أنها تتضمن عيوباً أهمها: عدم إمكانية استخدامها لمراقبة الخلايا الحيّة لأنَّ العينة يجب أن تخضع للتجفيف أو التبريد والتجميد، وتتعرض لجرعة عالية من الإلكترونات خلال القياس مما يؤدي إلى موتها بسبب طاقة الإلكترونات العالية، إضافة إلى الحاجة إلى بيئة الخلاء التي يجب أن توضع بها العينات في المجهر الإلكتروني خلال الفحص والتي تؤثّر في العديد من الأجسام المحتوية على مواد طيّارة أو سريعة التبخر، كما يحتاج إجراء الفحص إلى الدقّة والخبرة عند إعداد وتحضير العينات المراد دراستها، إضافة إلى ارتفاع ثمن هذه المجاهر وتكاليف صيانتها.

### التباين وقدرة الفصل

لا تقتصر وظيفة المجهر على التكبير أي إظهار المادة التي يتم دراستها بحجم أكبر، بل تتعداها إلى إظهار التفاصيل، وهو ما يُعرف بالتباين أو قدرة الفصل resolution.

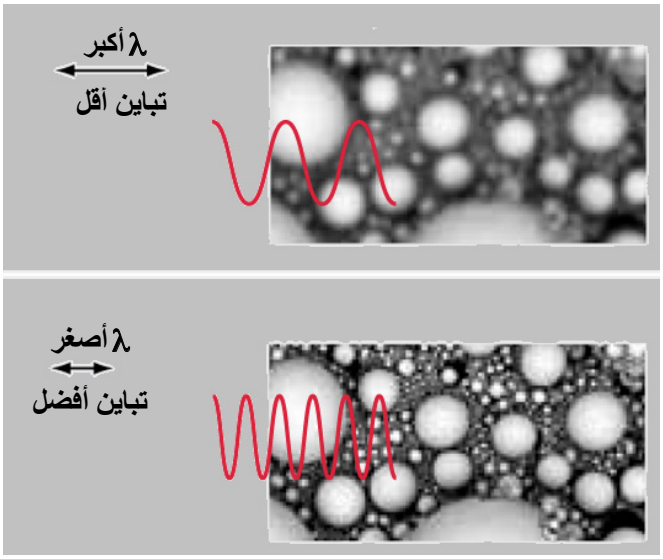
تُعرَّف قدرة الفصل أو التباين أنَّها القدرة على تمييز أقصر مسافة بين نقطتين من الجسم، وتعتمد على طول موجة الشعاع المستخدم، وترتبط بطول موجته حسب العلاقة التالية:

$$d = 1.22\ \lambda/\alpha$$

- $d$ هي أقصر مسافة بين نقطتين من الجسم نقدر على تمييزها.
- $\lambda$ طول موجة الشعاع المستخدم لتصوير الجسم.
- $\alpha$ الفتحة العددية التي تعتمد على زاوية ورود حزمة السبر.

يتبين من هذه العلاقة أن قدرة الفصل تتناسب طرداً مع طول الموجة؛ فكلّما قصر طول الموجة كانت قدرة الفصل وتمييز التفاصيل الصغيرة للعينة أعلى، وفيما يتعلق بالضوء المرئي فإن قيمة طول الموجة الوسطية $\lambda$ تبلغ 550 نانومتراً تقريباً، مما يجعل أقصر مسافة

فاصلة بين نقطتين من الجسم يمكن تمييزها بوساطة المجهر الضوئي هي 180 نانومتر، ولا يمكن تحسين قدرة الفصل أكثر من ذلك إلّا باستعمال أشعة ذات طول موجي أصغر، كما هو واضح في الشكل 3، وهذا ما يمكن أن توفره الإلكترونات المتحركة بسرعة كبيرة في المجاهر الإلكترونية حيث يمكن إنقاص طول الموجة المواكب للإلكترونات بزيادة طاقتها الحركية أي بزيادة فرق الكمون المسرِّع لها. نظراً لأن جهود التسريع المستعملة في المجاهر الإلكترونية تتراوح بين العديد من الكيلو فولط وعدة مئات من الكيلو فولط، مما يجعل طول موجة الإلكترون أصغر من طول موجة الضوء بآلاف المرات، وتصبح بذلك مقدرة الفصل في المجهر الإلكتروني أفضل منها في المجهر الضوئي بآلاف المرات.




**الشكل 3.** الفرق في التباين لصورتين مأخوذتين لنفس العينة باستعمال طولين موجيين مختلفين.

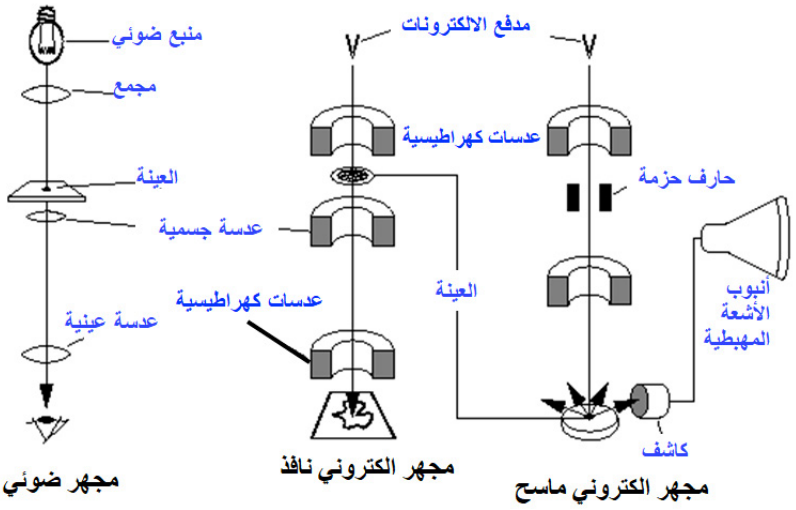
## مقارنة بين أنواع المجاهر الإلكترونية

جرى بناء أول مجهر إلكتروني على يد المهندسَين الألمانيّيْن إرنست روسكا Ernst Ruska وماكس نول Max Knoll عام 1931، وقد تمكّنا من خلاله من تكبير العينات 400 مرة فقط، وبعد عامين استطاع روسكا تصنيع مجهر إلكتروني يتمتّع بدقّة أعلى من تلك التي يمكن الحصول عليها باستخدام المجاهر الضوئية، حيثُ عُدَّ تصميمه نموذجاً تُبنى عليه جميع المجاهر الإلكترونية الحديثة. ونعدّد من أنواع المجاهر الإلكترونية:

- **المجهر الإلكتروني النافذ transmission electron microscope TEM:** يُستخدم هذا النوع لدراسة المحتويات الداخلية للعينة، ويعتمد في عمله على إطلاق إلكترونات السبر من منبع إلكتروني يُعرف بالمدفع الإلكتروني electron gun، ويتمُّ تركيز الإلكترونات على العينة المراد دراستها باستخدام عدسات كهروستاتيكية وكهرومغنطيسية، وعند اصطدام الإلكترونات بالعينة فإنّ بعضها يتمكّن من المرور خلالها، وبعضها الآخر يتشتّت، وعند خروج الإلكترونات التي اخترقت العينة تكون محملّة بمعلومات عن بنية وتركيب وطبوغرافية مادة العينة، وتعرض الصورة بواسطة شاشة عرض مفلورة مغطّاة بمادة فسفورية تظهر عليها صورة العيّنة بالتكبير المطلوب.

- **المجهر الإلكتروني الماسح scanning electron microscope SEM:** يعمل المجهر الإلكتروني الماسح بطريقة مختلفة عن المجهر الإلكتروني النافذ؛ وذلك لأنّ الإلكترونات التي تصل إلى العينة تتسبب في إطلاق إلكترونات ثانويّة منخفضة الطاقة من العينة، يتم بعد ذلك رصد الإلكترونات الثانويّة بواسطة كاشفٍ خاصٍ بها ومن ثم تتكون صورة مكبّرة وثلاثية الأبعاد لسطح العينة تعرض على الشاشة.

إضافة إلى النوعين السابقين من المجاهر الإلكترونية نذكر أيضاً المجهر الإلكتروني النافذ الماسح scanning transmission electron microscope والمجهر الإلكتروني العاكس reflection electron microscope. يبين الشكل 4 مخططاً توضيحياً للمقارنة بين المجهر الضوئي والمجهرين الإلكترونيين الماسح والنافذ.




**الشكل 4.** مخطط مقارنة بين المجهر الضوئي والمجهرين الإلكترونيين الماسح والنافذ.

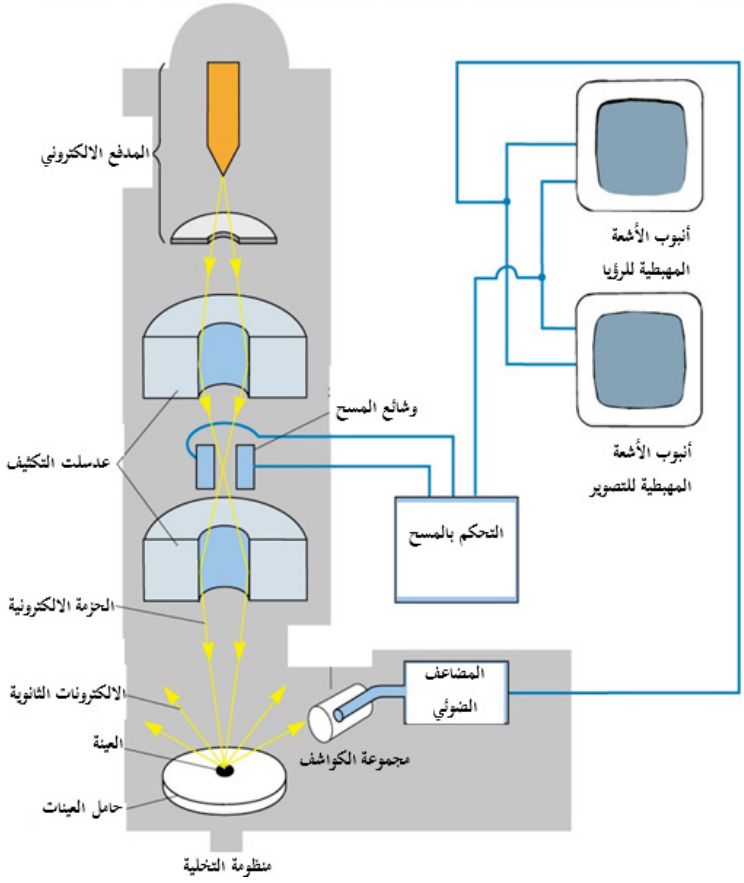
**سنقتصر في هذه المقالة على وصف وتوضيح آلية عمل المجهر الإلكتروني الماسح من بين أنواع المجاهر الإلكترونية المختلفة.**

## فيزياء وأقسام وآلية عمل المجهر الإلكتروني الماسح

يمتلك المجهر الالكتروني الماسح عمقاً كبيراً للمجال depth of field، يسمح لقدر كبير من العينة أن تكون مركَّزة في حقل الرؤية في وقت واحد وينتج صوراً تمثل تمثيلاً جيداً للعينة بالأبعاد الثلاثية، معطياً صوراً عالية الدقة، مما يتيح فحص مميزات العينة عن كثب وبتكبير عالٍ. إن الجمع بين التكبير العالي وعمق المجال الأكبر والدقة الكبيرة يجعل من المجهر الإلكتروني الماسح واحداً من أكثر الأدوات استخداماً في مجالات البحث العلمي والصناعات التطبيقية.

مقارنةً بالمجهر الضوئي، وبدلاً من استخدام صورة كاملة لمجال الرؤية، يستخدم المجهر الإلكتروني الماسح استراتيجية قياس وتسجيل الصورة من نقطة إلى نقطة، حيث يجري استعمال حزمة إلكترونات عالية الطاقة لإثارة العينة والتفاعل مع ذرات سطحها، ومن ثم يتم جمع الإشارات المختلفة الصادرة التي تعطي معلومات طوبوغرافية مثل ملامح سطح العينة وتفاصيلها من شكل وحجوم للجسيمات المكونة له، وكيميائية مثل تحليل للعناصر والمركبات التي يتألف منها السطح والكميات النسبية لها، وبلورية مثل ترتيب الحبيبات والبلورات وتوضعها النسبي، وتمكِّن دراسة جميع تلك المعلومات وتحليلها وترابطها ببعضها إلى تكوين صور متكاملة مميزة لسطح العينة وتعطينا معلومات قيمة عن التركيب الكيميائي والبلوري لسطحها.

يعرض الشكل 5 مخططاً توضيحياً للمجهر الإلكتروني الماسح وأقسامه المختلفة التي سنأتي على شرحها وتبيان آليات عملها تباعاً.




**الشكل 5.** مخطط توضيحي للمجهر الإلكتروني الماسح وأقسامه المختلفة.

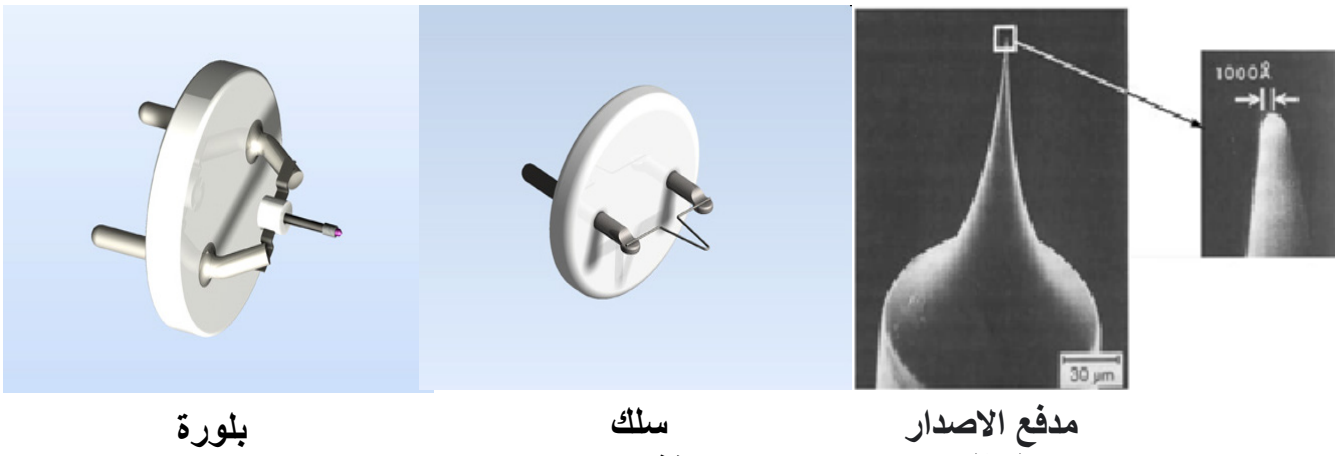
## أقسام المجهر الإلكتروني الماسح ومكوناته

### ① منبع الإلكترونات أو المدفع الإلكتروني

بغية الحصول على كثافة إلكترونية عالية على سطح العينة المراد تصويرها، جرى اختراع عدة أنواع من منابع الحزم الإلكترونية تُستخدم لتوليد حزمة إلكترونية دقيقة يتم فيما بعد التحكم فيها وتركيزها على سطح العينة. ويوجد نوعان أساسيان لمدافع الإلكترونات هما:

**1. المدفع الحراري الأيوني thermionic** وهو عبارة عن سلك (فتيل) من التنغستين على شكل زاوية حادة رأسها حاد جداً نصف قطره <0.1 ميكرومتر أو بلورة من بوريد اللنتانيوم. يتم تسخين سلك التنغسين بواسطة التيّار المستمر إلى درجة حرارة حوالي 2700 كلفن أو بلورة الـ $LaB_6$ إلى حوالي 2000 كلفن. نشير إلى أنه في هذا القسم من المجهر لا بد من توافر خلاء من مرتبة $10^{-3}$ باسكال للفتيل أو $10^{-4}$ باسكال لبلورة $LaB_6$ لمنع أكسدتهما.

**2. مدفع الإصدار الحقلي field-emission** وله نوعان؛ بارد وحار حيث يُستعمل هنا حقل كهربائي قوي لاقتلاع وتوليد الإلكترونات كما يظهر في الشكل 6، فتقتلع الإلكترونات من رأس الحافة المدببة بواسطة الحقل الكهربائي القوي (أكبر من $10^7$ فولط/سم) عند طرفه بسبب المفعول الإبري الحاد، ومن الممكن أن يصل القطر عند الحافة المدببة إلى < 10 نانومتر. ولابد من توافر خلاء عالٍ أفضل من $10^{-6}$ باسكال لتجنب القصف الأيوني لرأس مدفع الإصدار الحقلي بسبب الغاز المتبقي. من الناحية المثالية، يتم استخدام مدفع الإصدار الحقلي ضمن خلاء من مرتبة $10^{-9}$ باسكال. بالرغم من ذلك ستظل بعض جزيئات الغاز تسقط منجذبةً إلى رأس المدفع من وقت لآخر وتسبب تقلبات في تيار الانبعاث. وفي النهاية يتم تغطية رأس المدفع بالكامل، فيصبح الاقتلاع غير مستقر للغاية، مما يستوجب بعد ذلك تنظيف المهبط عن طريق تسخينه بنبضات سريعة ذات درجة حرارة عالية تصل إلى 2000 درجة مئوية لبضع ثوان في حالة المنبع البارد. وبدلاً من ذلك يمكن إبقاء رأس المدفع ساخناً (800–1000 درجة مئوية) من أجل المنبع الحار، وفي هذه الحالة يتم إعادة إقتلاع غالبية جزيئات الغاز الملتصقة على الفور ويتم الحفاظ على انبعاث مستقر مقبول حتى في خلاء من مرتبة $10^{-6}$ باسكال أو نحو ذلك.




**الشكل 6.** صورة لنوعي منابع الإصدار الإلكتروني الحراري والحقلي.

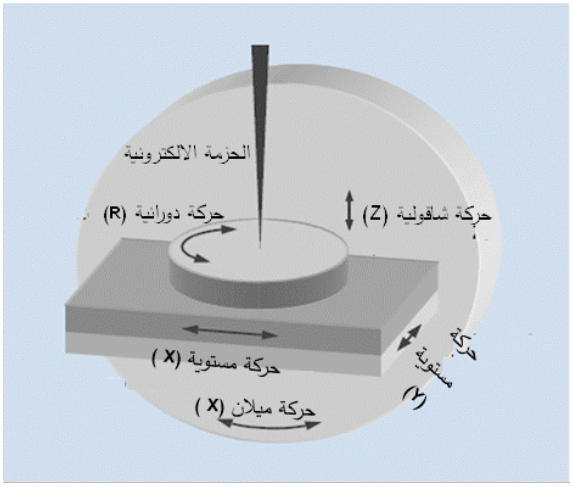
### ② العمود

يحتوي على وشائع وفتحات وعدسات كهرومغنطيسية لتبئير حزمة المسح وتوجيهها، إذ تحدّد عدسات التكثيف وتبئير الحزمة الإلكترونية تيار الحزمة الإلكترونية المتآثر مع العينة، في حين تشكل العدسة الجسمية المجسّ أو المسبر النهائي الذي يحدّد الحجم النهائي لحزمة الإلكترونات وبالتالي تحدد دقة المجهر الماسح وتباينه. تتحكّم العدسة الجسمية في التبئير النهائي لحزمة الإلكترونات عن طريق تغيير شدة الحقل المغنطيسي إلى أن يصل قطر بقعة الحزمة الإلكترونية على العينة بحدود 10 نانومتر وتحمل تيار حزمة إلكترونية تقريباً $10^{-9}$–$10^{-12}$ A. وبالرغم من أنه جرى تصميم العدسة الجسمية وتشكيل نمط الحقل المغنطيسي بدقة فائقة وعناية عالية جداً، فإن

الدقة (أو التباين) التي يمكن تحقيقها بواسطتهما لا يمكن أن تتطابق مع ما هو مطلوب للتحكم بحزمة إلكترونية بقطر 10 نانومتر، لذلك يجري إضافة المبَئِّر stigmator؛ وهو أحد مكونات المجاهر الإلكترونية التي تخفض اللابؤرية للشعاع عن طريق فرض حقل كهربائي أو مغنطيسي ضعيف رباعي الأقطاب على شعاع الإلكترون يتكوّن من زوجين من قطع الأعمدة المرتبة في الاتجاهين X وY، ويستعمل لتصحيح العيوب الطفيفة في العدسة الجسمية، فعن طريق تغيير التيار في العدسة الجسمية، تتغير شدة الحقل المغنطيسي وبالتالي يتغير البعد البؤري لها. لكن نظراً لكون الإلكترونات القادمة من المدفع الإلكتروني تنتشر بطاقات واتجاهات حركية مختلفة، فلا يتم تبئيرها بنفس المستوى لتشكيل بقعة حادة ولذلك يجري إضافة فتحة لحظر الإلكترونات الشاردة وبالتالي تصبح الحزمة المتبقية أضيق، من ثم يتم استخدام مجموعتين من الوشائع لحرف الحزمة الإلكترونية وتمكينها من مسح سطح العينة بنمط نقطي مشابه لذلك الموجود على شاشة التلفزيون، مما يؤدي إلى سبر الجزء المرغوب دراسته من سطح العينة نقطة تلو الأخرى، لإنتاج صورة مكبرة على شاشة العرض، تمسح الحزمة الإلكترونية المنطقة المراد تكبيرها من العينة وتنقل هذه الصورة إلى شاشة العرض أو أنبوب الأشعة المهبطية (أنظر الشكل 5).

### ③ الحجرة ومنصة حامل العينات

تُعد حجرة الخلاء من بين الأقسام الأساسية للمجهر الإلكتروني الماسح بما فيها منظومة التخلية، ومِنصة حامل العينات. نشير إلى أنه عند استخدام المجهر الإلكتروني الماسح، لا بد أن يكون العمود الإلكتروني وحجرة العينات في خلاء دائماً؛ لأنه إذا كان العمود في بيئة مليئة بالغاز، فسوف يؤدي ذلك إلى تشتت الإلكترونات المنبعثة من المدفع الإلكتروني بواسطة جزيئات الغاز المحيط، مما يؤدي إلى تقليل كثافة وثبات الحزمة على الجزء المدروس من العينة. ومن جهة أخرى، فإن جزيئات الغاز التي يمكن أن تأتي من العينة أو من المجهر نفسه، يمكن أن تشكّل مركبات تتكاثف على سطح العينة مما يؤدي إلى تقليل التباين وإخفاء التفاصيل في الصورة، ولهذا يزوّد المجهر الالكتروني بمنظومة متكاملة من المضخات: مضخة أولية؛ عادة ما تكون ميكانيكية دورانية الجافة تؤمن خلاء من مرتبة 1 باسكال، وثانوية من نوع توربينية تسمح من خلال تصميمها الخاص ودورانها السريع بالوصول إلى خلاء ذي قيمة حدية من مرتبة $10^{-7}$ باسكال وتؤمن الوصول إلى الضغط المطلوب للتشغيل في كل من العمود وحجرة العينات.

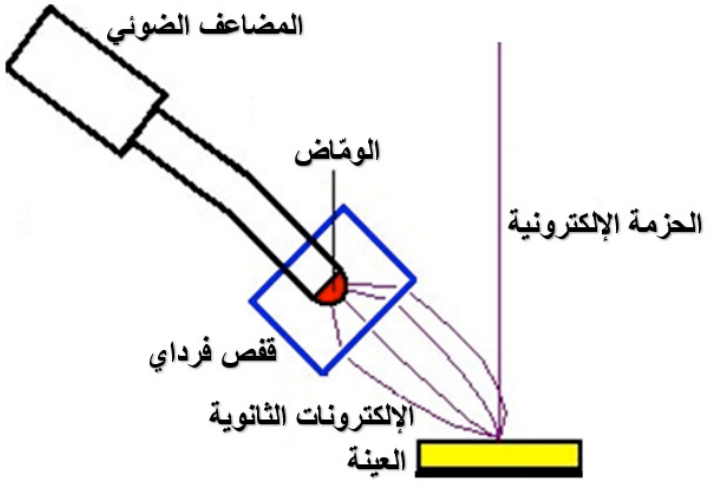



**الشكل 7.** مخطط توضيحي لمنصة حامل العينات.

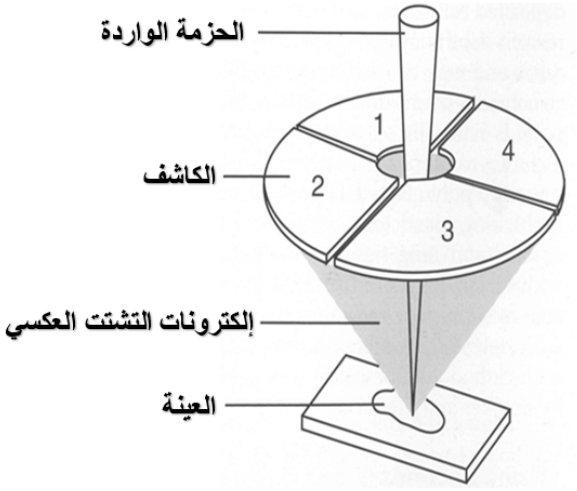
تعد منصّة حامل العينات من بين الأقسام الرئيسة للمجهر الإلكتروني الماسح، فقد صممّت بشكل يؤمّن تحكّماً وحركةً كاملةً للعينات المثبّتة عليها ضمن كامل الفراغ من خلال الحركة بالاتّجاهات الثلاثة إضافةً إلى الدوران حول محور الحزمة وكذلك الميلان بزوايا صغيرة باتجاه عمودي على الحزمة كما هو موضح بالشكل 7. كما يمكن إضافة حامل عينات مبرد يسمح بدراسة وتصوير العينات السائلة والبيولوجية خلال تجميدها عند درجات حرارة تقارب 250 كلفن.

### ④ الكواشف

تعد الكواشف من أهم أقسام المجهر الرئيسية ولها عدة أنواع نذكر منها كاشف الإلكترونات الثانوية الذي يعمل بشكل جيد مع الالكترونات منخفضة الطاقة ويتألف من قفص فرداي faraday cage ودليل تسريع ومضاعف ضوئي وعادة ما يتموضع بشكل جانبي بالنسبة لمنصة حامل العينات كما هو موضح بالشكل 8، وكاشف الكترونات التشتت العكسي الذي يتبين من إسمه أنه يعمل على الالكترونات المشتتة عالية الطاقة والتي تتحرك باتجاه معاكس لحزمة الإلكترونات الواردة، ونظراً لطاقاتها العالية فلا يمكن تجميعها بواسطة قفص فراداي كما هو الحال في كاشف الالكترونات الثانوية، ولذلك يستخدم حساس مصمم على شكل أربع شرائح متموضعة بشكل مباشر فوق العينة بحيث تدخل الحزمة الواردة من منتصفها كما هو مبين في الشكل 9.




**الشكل 8.** مخطط توضيحي لكاشف الإلكترونات الثانوية.

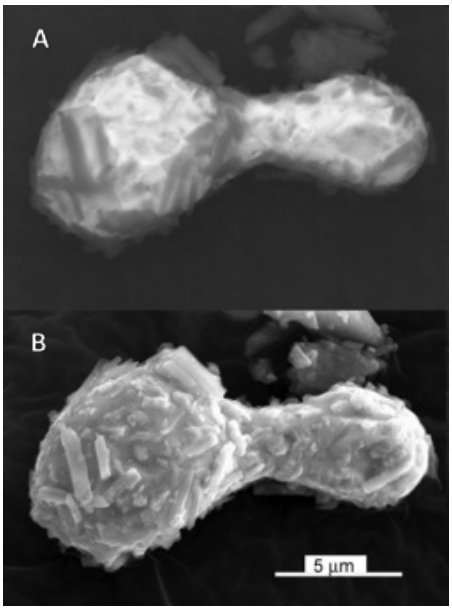



**الشكل 9.** مخطط توضيحي لكاشف إلكترونات التشتت العكسي.

يعد إختيار الكاشف المناسب أمراً مهماً جداً عند التصوير والتحليل بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح بهدف الحصول إلى النتيجة المثلى المطلوبة من دراسة العينة فاذا كان الهدف من الدراسة الحصول على صورة طبوغرافية مميزة مثالية التباين لسطح العينة، يكون عندها استعمال كاشف الإلكترونات الثانوية هو الأنسب، بينما إذا كان الهدف من الدراسة الحصول على تمييز التركيب المورفولوجي لمحتوى سطح العينة وتباينه، فيكون استعمال كاشف إلكترونات التشتت العكسي هو الأنسب. يبين الشكل 10 مقارنة بين صورتين لحبيبة من خليطة معدنية مأخوذتين بكل من كاشفي الإلكترونات الثانوية وإلكترونات التشتت العكسي.

بالإضافة الى الكاشفين السابقين يمكن أن يزود المجهر الإلكتروني الماسح بكاشف إضافي مخصص للعمل في الضغوط المرتفعة نسبياً أو الخلاء المنخفض وهو كاشف من نوع الالكترونات الثانوية ويناسب استعماله لدراسة العينات البيولوجية أوغير الناقلة كهربائياً.

من بين الكواشف الهامة والمستخدمة أيضاً في المجهر الإلكتروني الماسح يوجد كاشف الأشعة السينية المشتتة للطاقة energy dispersive X–ray EDX وهو كاشف سلكوني يستخدم للتحليل العنصري لمكونات العينة المدروسة ودراسة التوزع المورفولوجي لها على سطح العينة وله نوعان مخصصان للعناصر الثقيلة أو الخفيفة.




**الشكل 10.** مقارنة بين صورتين لحبيبة من خليطة معدنية مأخوذتين بكل من كاشفي إلكترونات التشتت العكسي (A) الإلكترونات الثانوية (B).

### التآثر بين الحزمة الإلكترونية والعيِّنة

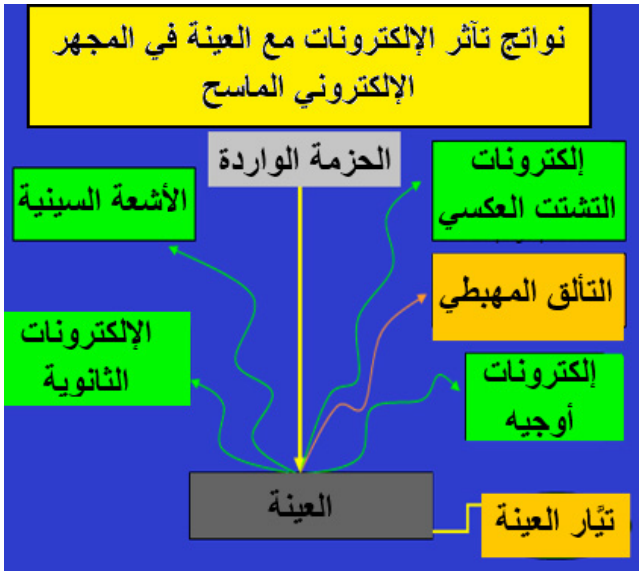
يعد التآثر المباشر وغير المباشر بين حزمة إلكترونات السبر والعينة المدروسة من أساسيات عمل المجهر الإلكتروني، حيث إن التفاعل بين الحزمة الإلكترونية والعينة هو ما يجعل الفحص المجهري بواسطة المجهر الإلكتروني ممكناً، ويعد التشتّت المرن والتشتت غير المرن عمليتي التفاعل الذري الأساسيتين، إن الإشارة النهائية المستخدمة في تكوين الصورة ليست نتيجة لعمليات تشتت الإلكترونات الواردة فحسب؛ بل نتيجة للضياع الكامل للإلكترون الوارد والفقد التدريجي لطاقته والانتشار الجانبي الناتج عن التشتت المرن المتعدد بزوايا كبيرة. يتم تحويل الجزء الأكبر من طاقة الإلكترون الأولية المفقودة أثناء سلسلة عمليات التشتت غير المرنة إلى فونونات أو حرارة. عندما تصطدم حزمة الإلكترونات بسطح العينة المراد دراستها ينجم عن ذلك التفاعل إصدارات إلكترونية وضوئية بطاقات مختلفة نعدّد منها: الإلكترونات الثانوية، إلكترونات التشتت العكسي، إلكترونات أوجيه، إصدار الأشعة السينية، التألق الضوئي (الشكل 11).

وفيما يلي شرحاً لبعض تلك الإصدارات بتفصيل مبسّط بحسب حاجتنا للمعرفة:

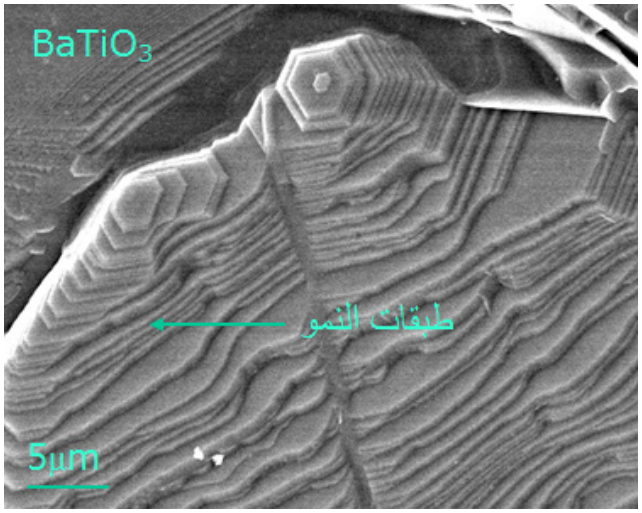
• **الإلكترونات الثانوية secondary electrons SE**: وهي إلكترونات ذات منشأ من العينة المدروسة ذاتها، وتنتج عن تفاعلات غير مرنة للإلكترونات الواردة عالية الطّاقة مع إلكترونات التكافؤ لذرات سطح العينة المدروسة، ممّا يتسبب في اقتلاع بعض من تلك الإلكترونات. تملك الإلكترونات الثانوية طاقات حركية أقل من 50 إلكترون فولط وتعد الأقل نسبياً بين أنواع الإلكترونات الأخرى، وهي تنجم بشكل أساسي عن سطح العينة وتتعلق كثيراً بطبوغرافيته ولهذا فهي تعطيه دقة تباين عالية. يبين الشكل 12 صورة مأخوذة بواسطة الإلكترونات الثانوية لبلورة تيتانات الباريوم $BaTiO_3$ أثناء تنميتها تبدو فيها طبقات النمو بدقة تباين جيدة وعمق مقبول للمجال.

إن تفاعل حزمة الإلكترونات مع سطح العينة الصلبة يمكن أن يؤدي إلى اقتلاع إلكترونات غير محكمة الربط من عصابة النقل في المعادن أو عصابة التكافؤ في العوازل وأنصاف النواقل، ينتج عن هذا التفاعل نقل كمية قليلة من الطاقة؛ أيّ عدد قليل من الإلكترون فولط إلى العصابة الإلكترونية ويسبب ذلك فقداً طفيفاً للطاقة وتغيراً في مسار الإلكترون الوارد، حيث يمكن أن يؤدّي كل إلكترون وارد إلى سطح العينة إلى إصدار عدة إلكترونات ثانوية. تملك 90% من هذه الإلكترونات الثانوية طاقات أقل من 10 إلكترون فولط، غالبيتها بين 2 إلى 5 إلكترون فولط. ولابد من الإشارة إلى أن هناك فرقاً كبيراً بين طاقة إلكترونات الحزمة الواردة مقارنة بالإلكترونات الثانوية الصادرة عن العينة.

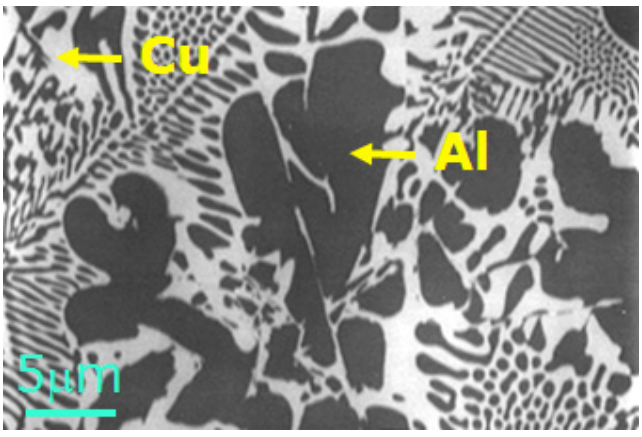
• **إلكترونات التشتت العكسي back scattered BSE electrons**: وهي إلكترونات ذات طاقات حركية عالية تتشتت بفعل حقل نوى ذرات العينة المدروسة؛ إذ تتولد إلكترونات التشتت العكسي كما يوحي الاسم عن طريق التفاعلات المرنة لإلكترونات الحزمة الواردة مع نوى الذرات في العينة، حيث يَنتج عن التشتت المرن تغير ضعيف أو معدوم في طاقة الإلكترون. فبالرغم من التغيير في كمية الحركة p= mv إلا أن الكتلة m لا تتغير، وبالتالي يحصل التغيير في إتجاه شعاع السرعة، بحيث تتراوح زاوية التشتّت المرن بين الإلكترون السالب والنواة الموجبة من 0–180 درجة. تملك إلكترونات التشتت العكسي طاقات حركية عالية نسبياً مقارنة بالإلكترونات الثانوية وترتبط بشكل وثيق بالعدد الذري Z لمادة العينة المدروسة وبالتالي فهي تعكس خصائص تباين تابعة له، فترتبط بكيميائية العينة بشكل أساسي، حيث تبدو المواد التي




**الشكل 11.** مخطط توضيحي لنواتج تآثر إلكترونات السبر مع ذرات العينة المدروسة.




**الشكل 12.** صورة مأخوذة بواسطة الإلكترونات الثانوية لبلورة تيتانات الباريوم.

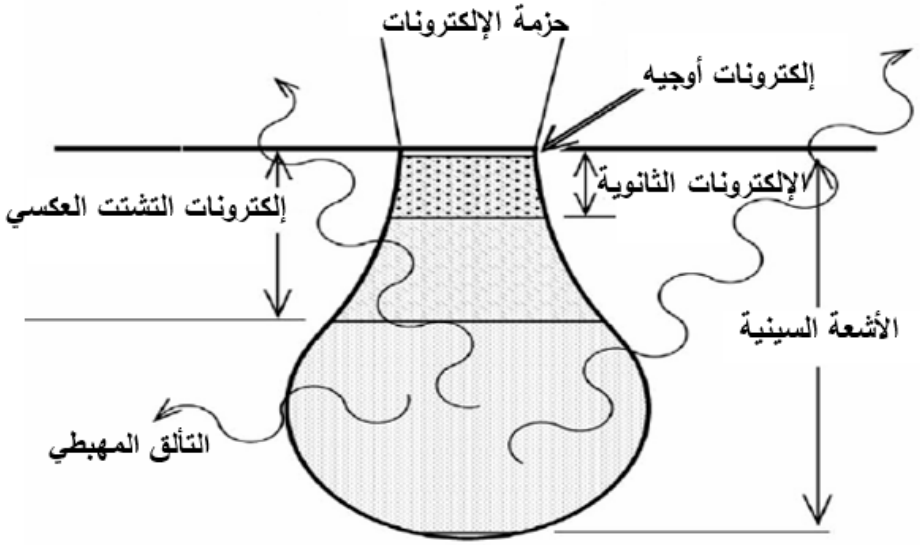



**الشكل 13.** صورة مأخوذة بواسطة إلكترونات التشتت العكسي لخليطة من الألمنيوم والنحاس.

تملك قيمة مرتفعة للعدد الذري أكثر سطوعاً من المواد ذات القيم المنخفضة لـ Z. يبين الشكل 13 صورة مأخوذة بواسطة إلكترونات التشتّت العكسي لعينة خليطة من الألمنيوم (Z=13) والنحاس (Z=29).

## مسار إلكترونات السبر والإصدارات المختلفة في العينة المدروسة

لا تسلك الإلكترونات الساقطة على العينة مسارات على شكل خطوط مستقيمة فيها، ولكن بدلاً من ذلك تسير بشكل مسارٍ متعرج خلال اختراقها العينة، وتتفاعل تلك الإلكترونات مع ذرات العينة على طول مسارها فيها مولدةً إصداراتٍ مختلفةً. ونظراً للاختلافٍ في طاقات هذه الإصدارات، يختلف عمق الاختراق لكل منها في المادة. ومن جهة أخرى يعتمد حجم منطقة التفاعل بين حزمة الإلكترونات الواردة والعينة المدروسة على جهد التسريع؛ أي الطاقة الحركية للإلكترونات الواردة ويتناسب عكسياً مع العدد الذري لمادة العينة كما هو واضح في الشكل 13، فالإصدارات المختلفة التي يمكن ملاحظتها على سطح العينة تأتي إذاً من أجزاء مختلفة من منطقة حجم التفاعل، ويدعى الحجم المسؤول عن كل إصدار إلكتروني بحجم منطقة الهروب escape region لذلك الإصدار، يحدّ حجم الهروب من دقة الصور التي يتم إنتاجها باستخدام إلكترونات التشتّت العكسي، وبشكل متناسب مع قيمته، بغض النظر عن مدى صغر القطر الفعلي لبقعة حزمة الإلكترونات الساقطة على العينة، فإذا كان قطر بقعة حزمة الإلكترونات الأولية الساقطة على العينة يساوي 5 nm فإن عمق حجم منطقة الهروب يكون من مرتبة 10 nm و1 µm من أجل الإلكترونات الثانوية وإلكترونات التشتّت العكسي على التوالي، بينما يكون عمق منطقة الإصدار للأشعة السينية من مرتبة 5. µm يبين الشكل 14 مخططاً توضيحياً لعلاقة حجم مناطق الهروب أو الإصدارات المختلفة في مادة العينة المدروسة.

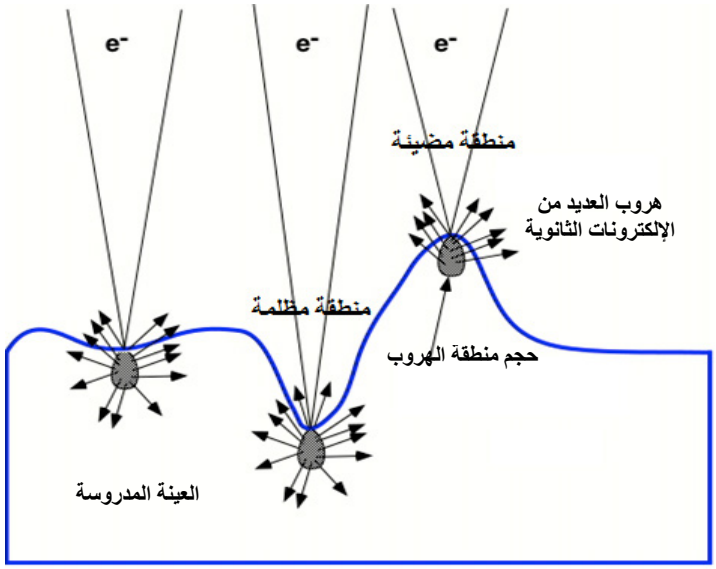



**الشكل 14.** مخطط توضيحي لحجم مناطق الهروب أو الإصدار في مادة العينة المدروسة.

## علاقة طبوغرافية سطح العينة بالإصدارات الإلكترونية المختلفة وتباين الصورة

يحدث التباين الطبوغرافي في الصور المأخوذة كون كفاءة توليد كل من الإلكترونات الثانوية وإلكترونات التشتّت العكسي تعتمد على زاوية السقوط بين حزمة الإلكترونات الماسحة وسطح العينة، ولهذا فإن الاختلافات المحلية البسيطة في زاوية السقوط العائدة لخشونة سطح العينة تؤثر على عدد الإلكترونات التي تغادر هاربة من السطح من نقطة إلى أخرى، وبالتالي يكون التباين الطبوغرافي الناتج تابعاً للشكل المادي لسطح العينة، ففي المناطق التي يكون فيها السطح مائلاً نسبة للحزمة الإلكترونية الساقطة، تقطع الإلكترونات مسافات أكبر في المنطقة القريبة من سطح العينة، وهذا يعني أنه يتم توليد المزيد من الإلكترونات الثانوية داخل منطقة عمق الهروب في السطوح المائلة أكثر من المناطق التي تكون معامدة للحزمة الإلكترونية. إضافة إلى ذلك، يمكن للإلكترونات الثانوية الهروب من جوانب النتوءات والحواف بشكل أكبر مما يؤدي إلى ظهور السطوح المائلة أكثر إضاءة من السطوح المنبسطة (انظر الشكل 15)، ونشير إلى أنه يتم

إبراز الحواف والقمم بشكل ملحوظ أكثر في الصور المأخوذة باستعمال الإلكترونات الثانوية مقارنة بإلكترونات التشتت العكسي التي تستخدم عادة في العينات ذات السطوح المستوية حيث يكون التباين الطبوغرافي لسطحها ضعيفاً.




**الشكل 15.** علاقة شدة إصدارات الإلكترونات الثانوية بطبوغرافية سطح العينة.

• **التألق المهبطي cathodoluminescence CL:** هو إصدار الأشعة فوق البنفسجية أو المرئية أو الأشعة تحت الحمراء التي يتم تحفيزها بواسطة القصف الإلكتروني بالحزمة الإلكترونية الواردة، وهو يظهر في العديد من المواد خصوصاً في أنصاف النواقل والمعادن؛ حيث يحتوي هذا التألق على الكثير من المعلومات التحليلية التي يمكن أن تساعد في الكشف عن الاختلافات المادية التي لا يمكن الكشف عنها بطرق أخرى؛ على سبيل المثال دراسة توزع الإشابة في أنصاف النواقل وعمليات إعادة اتّحاد حوامل الشحنات مما يسمح بتصوير عيوب الشبكة البلورية.

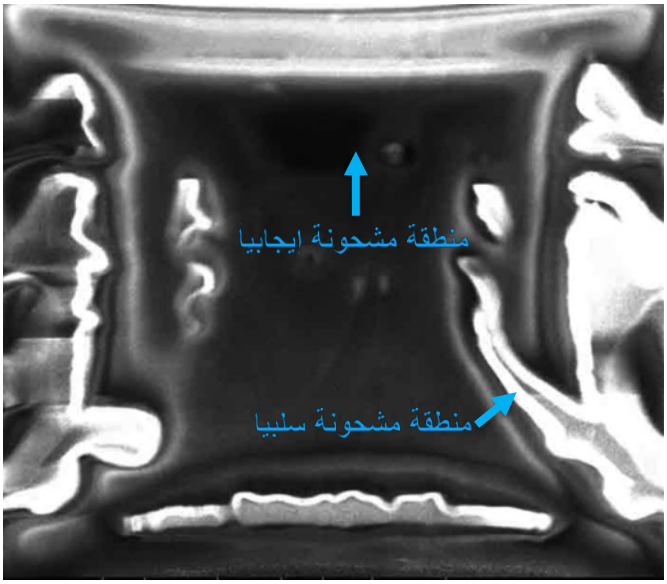
## التباين المثالي ومحدودية تباين الصورة

يمكن أن يحدَّ التباين المثالي في الصور المأخوذة بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح من قبل عدة عوامل ضوئية وإلكترونية تتعلق بانعراج الحزمة الإلكترونية وتتوضح من خلال العلاقة التي تعطي دقة الفصل أو أصغر مسافة بين نقطتين من العينة يمكن تمييزها بالعلاقة $d=1.22\ \lambda/\alpha$، فمن أجل جهد تسريع للإلكترونات قدره 20 kV يكون طول الموجة المواكبة للإلكترونات $\lambda=0.0087$ nm، ومن أجل فتحة عددية للعدسة الجسمية قدرها $\alpha= 5\times10^{-3}$ نحصل على قدرة تباين مساوية لـ $d=2.1$ nm. فمن أجل مجهر إلكتروني مزود بمدفع إلكتروني من نوع الإصدار الحقلي تكون قدرة الفصل فيه من مرتبة 1.0 nm عند جهد تسريع 30 kV. من جهة أخرى هنالك عوامل أخرى تحد من التباين المثالي كحجم العينة وتحديداً حجم منطقة الهروب فيها، وعلى ذلك يعتمد التباين النهائي على المواصفات الإلكترونية الضوئية، كما أنه يخضع لخصائص فيزيائية وعوامل تشغيلية أخرى، نذكر منها: اللانقطية أو اللابؤرية astigmatism وتباين الكمون voltage contrast وتباين المجال field contrast ومفعول الشحن charge effect.

## أثر الشحن الكهربائي لسطح العينة على الصورة

عند تصوير عينات عازلة كهربائياً أو ذات ناقلية كهربائية ضعيفة بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح تتراكم الشحنات على سطحها بسرعة ممّا يمنع وصول الإلكترونات الصادرة إلى الكاشف وينجم عن ذلك تشوه للصورة الملتقطة مما يجعل متابعة عملية التصوير صعبةً أو مستحيلة. هنالك نوعان من الشحن يمكن أن يتأثر بهما سطح العينة؛ الأول هو الشحن الساكن ويعتمد على توازن الشحنات الكلّي بالعينة، والثاني هو الشحن الديناميكي وهو يتولّد بالعينة نفسها من أزواج ثقب–إلكترون، ومن خلال الدمج بين هاتين المساهمتين يمكننا إنشاء نموذج مفصل لعملية الشحن الكلي لسطح العينة خلال عملية التصوير بالمجهر الإلكتروني الماسح. من المهم الإشارة إلى أن سطح

العينة يمكن أن يشحن من خلال تراكم للشحنات السالبة أو الموجبة عليه، فإذا كانت المنطقة الممسوحة أكثر سطوعاً من الخلفية فيكون عندها شحنها سلبياً، أما إذا كانت المنطقة الممسوحة أكثر قتامةً من الخلفية، فيكون شحنها إيجابياً. يمكن التغلب على هذه الظاهرة بعدة أمور أهمها: العمل في نظام الكشف بالخلاء المنخفض و/أو إنقاص جهد التسريع لحزمة الإلكترونات الواردة والعمل بنظام الجهد المنخفض لتحديد منطقة الفحص في العينة بسرعة، وقد يكون إجراء طلاء للعينة بطبقة رقيقة جداً من الكربون أو الذهب مناسباً في بعض الحالات. يبين الشكل 16 صورة مأخوذة بالمجهر الإلكتروني الماسح لعينة مشحونة كهربائياً.

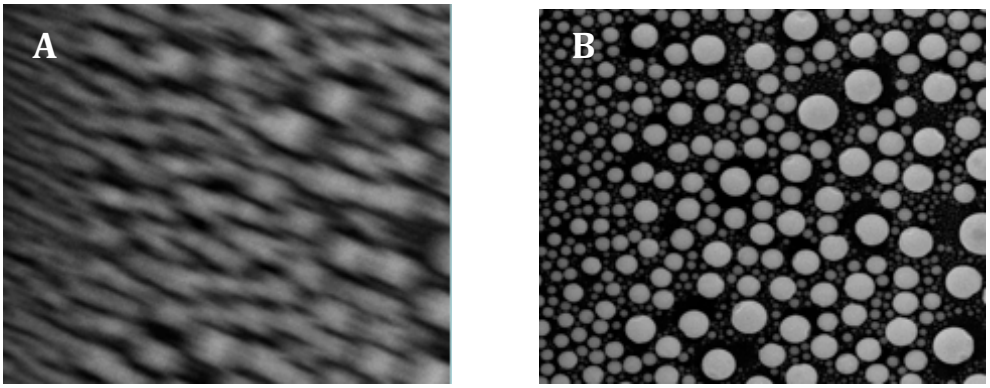



**الشكل 16.** صورة مأخوذة بالمجهر الإلكتروني الماسح لعينة مشحونة كهربائياً.

## تباين الكمون وأثر اللانقطية على الصورة

تتولد حقول كهربائية ومغنطيسية عالية القيمة نتيجة للكميات الصغيرة من الشحنات المتواجدة على سطح العينة، تحرف هذه الحقول حزمة السبر الإلكترونية الساقطة، وتؤثر على مسارات الإلكترونات الصادرة، حيث يُنتج الكمون الكهربائي المحلي المتولّد على سطح المواد الكهرحديدية أو أنصاف النواقل شكلاً خاصاً من التباين يدعى تباين الكمون فتبدو بعض المناطق على سطح العينة أكثر قتامةً أو أكثر إضاءةً تبعاً لكمونها الكهربائي بالنسبة إلى كمون التأريض.

يعرض الشكل 17 صورتين مأخوذتين بالمجهر الإلكتروني الماسح لجسيمات من الفضة النانوية يبدو فيهما أثر اللانقطية على دقة تباين الصورة (A- صورة غير مصححة، B- صورة العينة بعد تصحيح اللانقطية).




**الشكل 17.** أثر اللانقطية على دقة تباين صورة مأخوذة بالمجهر الإلكتروني الماسح لجسيمات من الفضة النانوية (A- صورة غير مصححة، B- صورة العينة بعد تصحيح اللانقطية).

## محدودية التكبير والتباين

لنطرح السؤال التالي: ما أصغر شيء يمكننا رؤيته بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح؟ للإجابة نقول: إذا تمكنّا من مسح منطقة من سطح العينة بعدها 10 نانومتر فقد نرى الذرات بالفعل!! لكن هل سنستطيع؟

تتكون الصورة الموجودة على شاشة أنبوب الأشعّة المهبطية من نقاط تسمّى البيكسل pixels. على سبيل المثال، تعرض شاشة جهاز الكمبيوتر 1024×768 بيكسل كلّ منها قياسه 0.25 مم تقريباً وهذه البيكسلات تعد الوحدات الأساسية في الصورة التي لا يمكن الحصول فيها على تفاصيل أدق من بيكسل واحد. بفرض أن صورة العينة على الشاشة مؤلفة من 1000 بيكسل في كل خط نقطي فيها، عندها نتصور وجود 1000 بيكسل في كل خط نقطي مقابل من العينة، وأن التباين أو الدقة يساويان قطر ذلك البيكسل من سطح العينة.

من المعروف أنه لا يمكن للإنسان دون أدوات مساعدة أن يميّز بالنظر بشكل موثوق مميزات جسمية أبعادها أصغر من حوالي 0.1 مم (100 ميكرومتر)، فإذا فرضنا D قطر البيكسل على شاشة أنبوب الأشعة المهبطية، وكان P قطر البيكسل على سطح العينة، عندها يكون من غير الضروري جعل قطر الحزمة الإلكترونية أو قطر النقطة على شاشة أنبوب الأشعة المهبطية أصغر من البعد D=100 $\mu$m، وبالتالي ستملك النقطة المقترنة أو البيكسل المقابل من سطح العينة التي تُنتج إشارة الصورة قطراً أصغر يعطى اعتماداً على علاقة التكبير بـ:

$$\text{التكبير} = 100\ \mu\text{m} / \text{التكبير} = P = D$$

بفرض أن حزمة الإلكترونات الواردة تقوم بالمسح 1000 نقطة أفقياً و1000 خط عمودياً عبر العينة، وهذا يعطينا 1000000 نقطة من المعلومات، حيث يتم نقل الإشارات المقروءة من الإلكترونات المنبعثة من كل نقطة إلى النقطة المقابلة على الشاشة، ونظراً لأن الشاشة تحتوي أيضاً على 1000 نقطة أفقياً و1000 خط عمودياً، فيكون هناك تطابق بنسبة 1:1 بين المسح على العينة وشاشة العرض. بما أن الطول x الذي تمسحه الحزمة الإلكترونية على العينة أصغر من الطول c المقابل له على شاشة الأشعة المهبطية، ينتج عن ذلك تكبير يمكن تعديل نسبته عن طريق تغيير طول المسح على العينة، فكلما كانت مساحة بقعة حزمة الإلكترونات على العينة أصغر زاد التكبير. يعد الحصول على درجاتٍ مختلفةٍ من نسب التكبير متحولاً مهماً عند استخدام المجهر الإلكتروني الماسح.

ويتحقق الشرط الأمثل للتصوير عندها حين يكون حجم منطقة الهروب للإشارة المعنية مساوياً لحجم البيكسل، بينما تكون الإشارة ضعيفةً إذا كان حجم منطقة الهروب المعتمد على قطر بقعة الحزمة الإلكترونية على سطح العينة أصغر من حجم البيكسل، وبالرغم من أن التباين لا يزال محقّقاً لكنّنا سنحصل على صورة ذات ضجيج مرتفع. أما إذا كان حجم الهروب أكبر من حجم البيكسل، فتتداخل الإشارة من وحدات بيكسل مختلفة وتظهر الصورة خارج نطاق التركيز وبالتّالي تكون الصورة ذات دقة قليلة؛ وكمثال على ذلك إذا كان قطر بقعة الحزمة الإلكترونية يقارب 5 نانومتر، وكان عمق حجم منطقة الهروب يساوي 5 ميكرومتر، فإن الدقة المكانية في أفضل الأحوال ستكون من مرتبة ميكرومتر؛ لذا نحتاج للوصول إلى تباين عال إلى حزمة إلكترونية دقيقة، وقطر للبقعة على سطح العينة صغير، وهو ما نحصل عليه من خلال: زيادة تيّار عدسة المكثّف وتقليل مسافة العمل؛ لكن تصغير قطر بقعة الحزمة يؤدي أيضاً إلى تقليل تيّار الحزمة وبالتالي تزداد نسبة الإشارة إلى الضجيج سوءاً. في المجاهر الإلكترونية الماسحة المتطورة يمكن أن تكون دقة التباين من مرتبة بضعة نانومترات، حيث يتم تحديد قيمة حدها الأعلى بواسطة قطر بقعة حزمة الإلكترونات على سطح العينة والذي يعتمد بدوره على جودة العدسة الجسمية ونوع مدفع الإلكترونات وجودته.

## عمق المجال

ينسب عمق المجال في العديد من أجهزة التصوير بشكل عام إلى المسافة بين أقرب وأبعد نقطتين تملكان تركيز حاد ومقبول في الصورة. ويعد العمق الكبير للمجال الذي يمكن سبره أحد أهم مزايا التصوير بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح. وهو ما يجعل فحص السطوح الخشنة ودراستها ممكناً وبتكبير أعلى بكثير مما هو متاح عند استعمال المجاهر الضوئية.

ينشأ هذا العمق الكبير في المجال في المجهر الإلكتروني من هندسة الحزمة الإلكترونية، حيث تُبئّرالعدسة الجسمية النهائية للمجهر الإلكتروني حزمة الإلكترونات على مستوى التقاطع وبأفضل تركيز للحزمة بينما يزداد قطر بقعة الحزمة مع تقاربها وتباعدها فوق وتحت

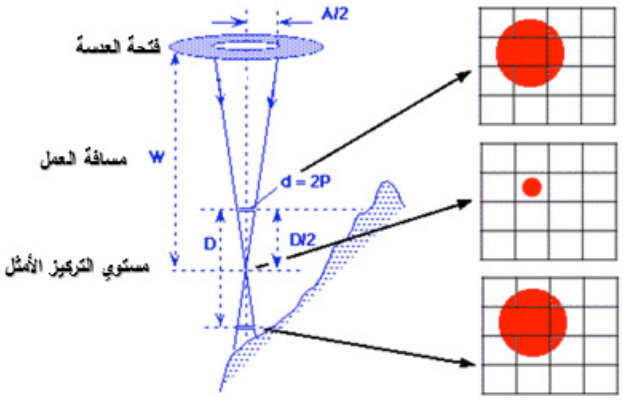
هذا المستوى. عند المسافة D (عمق المجال أو عمق التركيز) تظهر الصورة بتركيز حاد وبشكل مقبول. ولكن عند مسافة قدرها نصف عمق المجال D/2 أعلى وأسفل مستوى التقاطع، يصبح قطر الحزمة ضعف قطر البيكسل المستخدم، ويؤدي ذلك إلى تداخل الإشارات من وحدات البيكسل المجاورة بما يكفي لجعل الصورة تبدو غير واضحة.

وتُعطى D بالعلاقة:

$$D = \frac{4 \times 10^5 W}{A \times M} \quad (\mu m)$$

حيث A : فتحة العدسة، M: نسبة التكبير، W: مسافة العمل.

يبين الشكل 18 رسماً توضيحياً لعلاقة عمق المجال بكل من فتحة العدسة ومسافة العمل وأثر عمق المجال على تركيز ووضوح الصورة المأخوذة بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح.



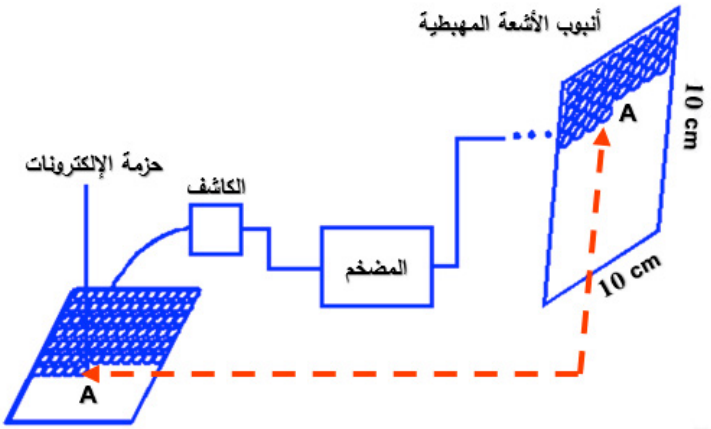

**الشكل 18.** رسم توضيحي لعلاقة عمق المجال بكل من فتحة العدسة ومسافة العمل.

من أجل تصوير أجسام ذات حجوم صغيرة وتباين جسمي لمكونات العينة باستعمال المجهر الإلكتروني الماسح فإنه من الضروري استعمال شدة عالية لتيار الحزمة الإلكتروني بالإضافة لسرعة مسح بطيئة بهدف زيادة الإشارة الملتقطة بالنسبة للضجيج، ولتمييز جسمين صغيرين على خلفية ضوضاء عشوائية، تُظهر الدراسات التجريبية أن تمايز الإشارة بينهما يجب أن يكون على الأقل خمسة أضعاف مستوى الضوضاء.

## آلية تشكيل الصورة في المجهر الإلكتروني الماسح

ضمن كاشف الإلكترونات الثانوية ينجذب الإلكترون الثانوي الصادر عن العينة إلى شبكة التجميع أو قفص فاراداي بواسطة انحياز إيجابي من مرتبة 200–300 فولط ثم تسرع الإلكترونات المجمعة إلى قرص الوماض داخل القفص بتطبيق جهد تسريع مقداره 10–12 كيلو فولط فيتولد نتيجة لتصادم الإلكترونات بقرص الوماض فوتونات مرئية لا تلبث أن تصل إلى المضاعف الضوئي، حيث يتم تضخيم الإشارة الضوئية، ثم يتم استعمال الإشارة الكهربائية النهائية من المصعد لتعديل شدة حزمة الإلكترونات الواردة على شاشة عرض الأشعة المهبطية (أنظر الشكل 8).

كما تبين لنا، فإنّه كلما زادت الطاقة الحركية للإلكترونات الواردة إلى سطح العينة، كان النطاق الذي يمكن للإلكترونات اختراقه فيها أعمق بحيث يتناسب حجم منطقة التفاعل بين الحزمة الإلكترونية والعينة مع طاقة الإلكترونات الواردة. تقوم حزمة الإلكترونات الواردة بمسح منطقة مستطيلة في سطح العينة بواسطة استخدام مجموعتين من الملفات التي تسمح بحرف الحزمة الإلكترونية الساقطة على العينة في نمط نقطي متزامن مع حزمة الإلكترونات في أنبوب الأشعة المهبطية على شاشة العرض حيث تتناسب شدة الإشارة عند النقطة A عليها مع الإشارة الصادرة من النقطة A من سطح العينة ويتم تعديل شدة تلك الإشارة من أجل تلك النقطة على الشاشة بواسطة المضخم، وهي ترتبط أيضاً مع شدة الإشارة الصادرة عن أجهزة الكشف: على سبيل المثال كاشف الإلكترونات الثانوية أو كاشف إلكترونات التشتت العكسي، يبين الشكل 19 مخططاً توضيحياً لآلية تشكيل الصورة في المجهر الإلكتروني الماسح.




**الشكل 19.** مخطط توضيحي لآلية تشكيل الصورة في المجهر الإلكتروني الماسح.

## نصائح وملاحظات

هناك نصائح وملاحظات من المهم جداً أن يعرفها وأسئلة يجب الإجابة عليها من قبل من يرغب بدراسة وتوصيف عينات بواسطة مختلف أجهزة التوصيف بشكل عام وبالمجهر الالكتروني الماسح بشكل خاص تبدأ بالتساؤلات التالية:

ماذا أعرف سلفاً عن خواص عيناتي الفيزيائية والكيميائية والكهربائية والطبوغرافية؟ ماذا اريد أن أدرس بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح؟ مانوع العينات التي يمكنني أن أدرسها؟ وما يلزمني لتحضير عيناتي لتلائم المتطلبات الخاصة بالمجهر؟

عندما أحدد الأجوبة عن هذه الأسئلة وأدخل عينتي لحجرة الفحص بالمجهر أحدد أي كاشف يجب أن أستعمل، وهنا يظهر دور خبرة المشغل للجهاز ومهمته للتواصل مع طالب التصوير لمعرفة وتحديد ماذا يريد أن يرى أو يحلل متجنباً المشاكل والصعوبات التي يمكن أن تظهر خلال التصوير والدراسة وإمكانيات حلّها إن أمكن.

جرى في هذه المقالة استعراض عام لأهم المبادىء الفيزيائية والتقنية التي سمحت باختراع وتطوير المجهر الإلكتروني إضافة إلى معلومات عديدة تفيد المشغّل المستثمر له والباحث الدارس المستفيد من صوره للحصول على أفضل صورة بالتكبير والتباين المثالي المطلوب، وقد استحق المجهر الإلكتروني الماسح أن يحجز مكانه في قائمة أفضل الاختراعات الحديثة، نظراً إلى مساهماته في تطوير البحوث العلمية، فشكراً لكل من ساهم في صناعة وتطوير هذا الجهاز الرائع.

## المراجع

- Echlin P (2009). Handbook of Sample Preparation for Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. Springer US.
- Egerton RF (2005). Physical Principles of Electron Microscopy: An Introduction to TEM, SEM, and AEM. Springer US.
- Kanaya K, Okayama S (1972). Penetration and energy-loss theory of electrons in solid targets.J Phys D App Phys 5: 43–58.
- Pennycook SJ, Nellist PD. Scanning Transmission Electron Microscopy. Springer-Verlag New York.
- Reimer L (1998). Scanning Electron Microscopy Physics of Image Formation and Microanalysis. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Tescan (2008). Scanning Electron Microscope VEGA II: Instruction for use. Czech Republic: Tescan.
- Ul-Hamid A (2018). A Beginners' Guide to Scanning Electron Microscopy. Springer, Cham.
- Zhou W, Lin Wang Z (2007). Scanning Microscopy for Nanotechnology. Springer-Verlag New York.

تأليف: **د. أنس الخوام**، قسم الفيزياء، هيئة الطاقة الذرّية السورية.

# تطبيقات تكنولوجيا التشعيع في تطوير المواد وتحضير مركبات جديدة عالية الأداء

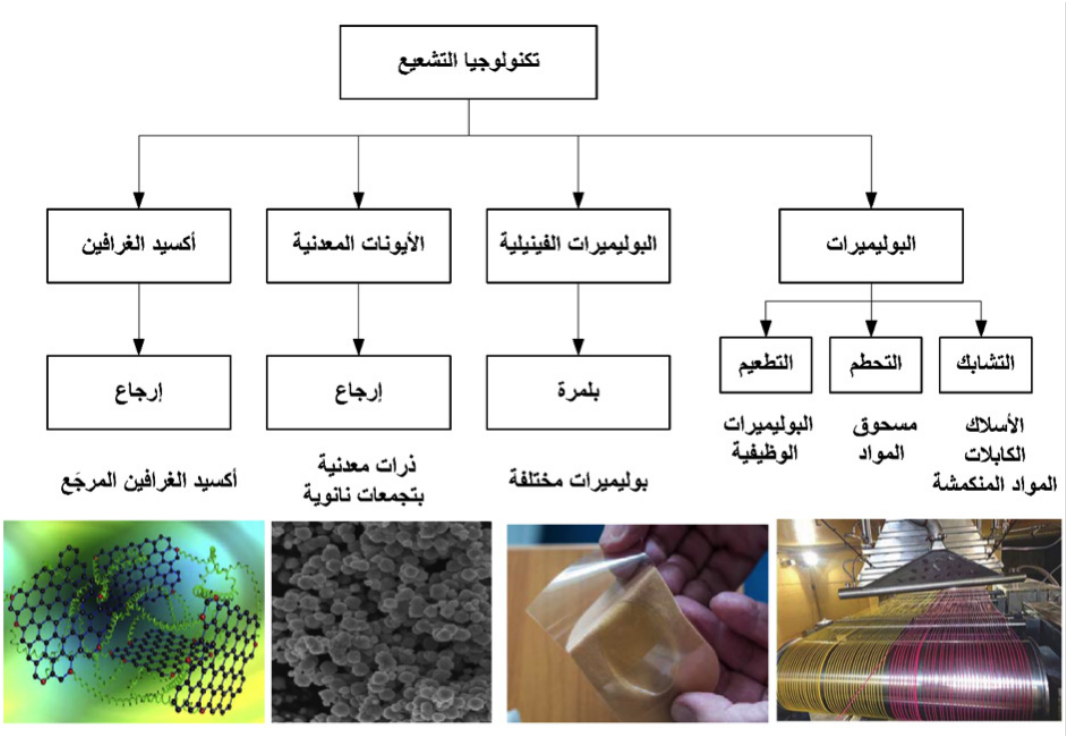
*"تؤدِّي التكنولوجيا الإشعاعية دوراً مهمّاً في دعم التنمية المستدامة، حيث تتيح أدوات متعدِّدة الاستعمالات أكثر فعالية من حيث التكلفة وأكثر صداقة للبيئة مقارنة بالبدائل التقليدية. وغالباً ما تتطلَّب هذه التكنولوجيا قدراً أقل من الطاقة وتولِّد قدراً أقل من النفايات. ويُعدُّ هذا دوراً مهمّاً بالنسبة إلى جميع البلدان، خاصَّة البلدان ذات الموارد المحدودة" يوكيا أمانو، المدير العام للوكالة الدولية للطاقة الذرية، 2009-2019. تُسلِّط هذه المقالة الضوء على المبادئ الأساسية لتكنولوجيا التشعيع وبعض التطبيقات التي تُوظَّف فيها العلوم والتكنولوجيا الإشعاعية بفعالية في جميع أنحاء العالم، خاصّة في هيئة الطاقة الذرية السورية.*

## مقدمة

لقد ترسّخ التشعيع كأسلوب قوي لتعديل خواص المواد وخاصة البوليميرات؛ فمن وجهة نظر كيميائية، يؤثر التشعيع في خواص البوليمير من خلال ثلاثة أنماط رئيسية من التفاعلات الكيميائية وهي التحطيم التسلسلي chain scission والتشابك cross-linking والتطعيم grafting، كما يؤثر على الخواص الفيزيائية مثل الكثافة والخواص البصرية optical properties نتيجة لتغير البنية الكيميائية للمواد. استعمل التشعيع كوسيلة لتعديل شكل سطوح surface morphology المواد وتوليد نماذج مجعّدة مختلفة، فضلاً عن استعماله للحصول على بنى نانوية للمواد، ومن جهة أخرى يمكن جعل المنتجات التي نستعملها يومياً مثل الهواتف الذكية وإطارات السيارات والضمادات أكثر أماناً أو أكثر موثوقية أو أكثر فعالية باستعمال التكنولوجيا الإشعاعية. إضافة إلى ذلك، تعدُّ التكنولوجيا الإشعاعية أداة للقيام بجملة من الأنشطة منها عمليات التحقُّق من الأمان، وتطهير المياه وتنظيف ملوِّثات الهواء وحتى تحسين الإنتاج الغذائي وحفظ الأغذية. ويتواصل ازدياد التأثير العالمي لهذه التكنولوجيا في الحياة اليومية والتنمية المستدامة بفضل ما يتم إحرازه من تقدُّم في نطاق البحث والابتكار ضمن مجال العلوم الإشعاعية.

## المبادئ الأساسية لتكنولوجيا التشعيع في تطوير المواد

يعد التشعيع من الطرائق الكثيرة الاستعمال لتعديل البوليميرات؛ فعندما يمر الإشعاع في مادة ما فإنه يخسر قسماً من طاقته بالتفاعل مع إلكترونات المادة ويتشكل نتيجة لذلك إلكترونات حرة وذرات مؤينة وجزيئات وأنواع نشيطة مثل الجذور الحرة. يكون للإشعاع الساقط وبعض من الإلكترونات المتحررة طاقة عالية وكافية لفصم الروابط الكيميائية، ونتيجة لذلك تتشكل أنواع قادرة على إنتاج تفاعلات التحطيم التسلسلي والتشابك وتشكيل نواتج جانبية منخفضة الوزن الجزيئي غير مشبعة. وإذا جرى التشعيع بوجود الهواء فإن التفاعل مع الأكسجين يؤدي إلى إنتاج الجذور البيروكسيدية التي قد تؤدي إلى تشكيل متبادلات وظيفية مثل الهيدروكسيل. وكما هو مبين في الشكل 1 يمكن استعمال تأثير التشعيع على المواد لتصنيع مواد وظيفية مختلفة ذات تطبيقات تجارية متنوعة.




**الشكل 1.** تأثيرات التشعيع المستعملة لتحضير الأنواع المختلفة من المواد.

إن التطبيق التجاري الرئيسي لهذه التقنية هو تشابك سلاسل البوليمير، المستعمل على سبيل المثال في إنتاج عوازل الأسلاك والكابلات وإطارات السيارات أو المطاط الطبيعي للأدوات الطبية مثل القفازات. هذه الطريقة قادرة ضمن درجة حرارة الغرفة على تشبيك المنتجات النهائية، وتحقيق خصائص المواد المتفوقة والمساعدة على التخلص من المخلفات الكيميائية السامة. ومن التطبيقات التجارية الأخرى في جميع أنحاء العالم: الأنابيب القابلة للتقلص بالحرارة ولفائف الطعام والبوليميرات المتشابكة القابلة للذوبان في الماء والمعروفة أيضاً باسم الهلامات المائية؛ مثل تلك التي يتم تسويقها لتضميد الجروح خاصةً في حال الحروق وقرح السكري. وتشمل التطبيقات الجديدة للهلامات المائية المواد الفائقة الامتصاص للرعاية الصحية والتطبيقات الزراعية وتنقية مياه الصرف الصحي وتثبيت الأنزيمات. كما يُستعمل التحلل الإشعاعي المتحكم به للبوليميرات والذي يُطلق عليه أيضاً التحطم المتسلسل لتحسين الخصائص، فضلاً عن تحسين معايير التوافق والمعالجة لكل من البوليميرات الطبيعية والصناعية. ولعل أكبر تطبيق تجاري لهذه التقنية هو تحلّل بولي تترافلورو إيثيلين PTFE بالتشعيع في الهواء، مما ينتج عنه مسحوق دقيق منخفض الوزن الجزيئي مع توافق محسَّن مع المواد الأخرى التي يمكن استعمالها كمضافات للأحبار والطلاء. أما التطعيم بالتشعيع فيستعمل عند الحاجة إلى خواص جرمية وسطحية مختلفة للمادة. تشمل المنتجات التجارية فواصل البطاريات والألياف المطعّمة ذات قابلية محسنة للصبغ والامتزاز وتركيز الأيونات القيّمة وإزالة الأيونات السّامة والتنقية والترشيح والمنتجات ذات السطوح المتوافقة حيوياً وغير المتّسخة، وسطوح زراعة الخلايا لهندسة صفائح الخلايا، وثمة استعمال آخر لتقنية التشعيع وهو "تشكيل السطح"؛ حيث يتم تعديل أجزاء معينة فقط من السطح أو مادة ما، إما بالربط المتشابك المستحث أو التحطيم المتسلسل أو التطعيم. ومن أهم التطبيقات التجارية لهذه العمليات هي استعمال الأشعة السينية وحزم الإلكترون وحزم الأيونات في الطباعة لإنتاج الدوائر الإلكترونية الدقيقة لرقائق الكمبيوتر. أما ما يتعلق بأيونات المعادن وأكسيد الجرافين، فيمكن إحداث تفاعلات كيميائية في المادة الصلبة المنتشرة في الماء دون استعمال البادئات الكيميائية، حيث يولّد الانحلال الإشعاعي للماء أنواعاً مختزلة مثل الإلكترونات المميّهة التي يمكن أن تعمل كعوامل أكسدة–إرجاع فعالة لإنتاج جسيمات نانوية معدنية وإرجاع أكسيد الجرافين.

## مصادر التشعيع المستعملة في تعديل المواد

الإشعاع هو شكل من أشكال الطاقة له نوعان هما الإشعاع المؤيِّن والإشعاع غير المؤيِّن. ويتأتّى الإشعاع المؤيَّن من الذرات غير المستقرَّة التي تمرُّ بمرحلة تحوُّل لكي تصبح مستقرَّة، وتُسمى هذه العملية بالنشاط الإشعاعي. كما يُمكن للإشعاع المؤيِّن أن يتأتّى من عملية تسريع للجسيمات بواسطة مجال كهرومغنطيسي. وثمَّة أنواع عديدة من الإشعاع المؤيِّن وهي جسيمات ألفا وجسيمات بيتا وأشعة

غاما، فضلاً عن الجسيمات والموجات المسرَّعة التي تُسمى الإلكترونات والبروتونات والأشعَّة السينية. وثمَّة أيضاً جسيمات دون ذرية مثل النيوترونات والأيونات المشحونة التي تُستعمل كمصدر للتطبيقات الإشعاعية.

يعد اختيار مصدر أو طريقة التشعيع المناسبة لتطبيق تكنولوجيا التشعيع في تصنيع المواد المتقدمة أمراً مهماً عند النظر في شكل المادة وأبعادها، وعمق الاختراق المطلوب والقدرة الإنتاجية. إن القضية الرئيسية هي تصنيع المواد المستهدفة من خلال المعالجة الإشعاعية بتكلفة اقتصادية فعّالة. ولعل من أهم طرائق التشعيع الفعالة وأكثرها ملاءمة في معالجة المواد استعمال محطة أشعة غاما γ ومسرِّع حزمة الإلكترون EB بطاقات حزمة مختلفة.

## محطة التشعيع بأشعة غاما

من أجل المعالجة الإشعاعية يتم تطبيق أشعة غاما 1.17 و1.33 ميغا إلكترون فولط المنبعثة من الكوبالت-60 Co-60 على نطاق واسع. الكوبالت-60 هو نظير صنعي مشع للكوبالت بعمر نصف يبلغ 5.27 سنة. يتم إنتاجه صناعياً من النظير الكوبالت-59 بامتصاص النيوترونات في المفاعلات النووية، كما يمكن استعمال السيزيوم-137 كمصدر لأشعة غاما. إن عمق تغلغل أشعة غاما مرتفع للغاية، وتعد مناسبة لمعالجة المواد من أي شكل وحجم. كما يشيع استعمالها في تعقيم الأغذية والمعدات الطبية التي تستعمل لمرة واحدة مثل المحاقن والإبر. مقارنة مع طرائق التعقيم الأخرى مثل البخار والحرارة الجافة وأكسيد الإيثيلين، فإن أشعة غاما آمنة ونظيفة ويسهل التعامل معها. إن الجرعة الممتصة لقتل البكتريا هي عادة 3-5 كيلو غراي، وقد تكون 8-10 كيلو غراي أو أكثر، تبعاً للهدف المراد تعقيمه. يوجد عدد من منشآت أشعة غاما في جميع أنحاء العالم لحفظ الأغذية وتعقيمها والبحث والتطوير. في الصين مثلاً، ثمة أكثر من 140 محطة أشعة غاما قيد التشغيل حالياً. نادراً ما يتم استعمال أشعة غاما للتطبيقات الصناعية للمعالجة الإشعاعية للمواد. ومع ذلك، فإنها مناسبة بشكل خاص لمعالجة المواد في الحالة السائلة مقارنة بمسرّع الإلكترون. وقد جرى تسويق المستحلب الناجم عن البلمرة بالإشعاع لمونوميرات الأكريلات في الصين لأكثر من 20 عاماً. ولا يزال العديد من المصانع يعمل بتكاليف تنافسية وجودة منتج من خلال استعمال مصادر أشعة غاما. وكمثال آخر على ذلك المعالجة الإشعاعية للمطاط بأشعة غاما في ماليزيا، حيث يتم تشغيل المصنع على نطاق صناعي، ويتم تشعيع اللاتكس المطاطي لتحقيق درجة منخفضة من الارتباط المتشابك للمطاط في اللاتكس. ويوجد في هيئة الطاقة الذرية السورية محطة تشعيع غاما بهدف الأغراض البحثية وتعقيم المواد الطبية والغذائية.

## مسرع حزم الإلكترونات

ثمة طرائق عديدة مختلفة لتسريع الإلكترونات وتكوين حزمة، كما يوجد أنواع مختلفة من المسرّعات (انظر الشكل 2). ومسرعات الإلكترونات عبارة عن آلات متعددة الأغراض توفر طاقة لحزمة الإلكترون تصل إلى عدة ميغا إلكترون فولط، وتُستعمل في العديد من التطبيقات، بدءاً من الأبحاث الأساسية حول تفاعلات الجسيمات إلى الاستعمال الطبي ومعالجة البوليميرات. ولكل نوع من أنواع المسرعات خصائصه وتصميمه الخاص لتطبيقات معينة. وهنا نأخذ بالحسبان فقط استعمال مسرعات الإلكترون في التعقيم ومعالجة المواد، وهي أكثر التطبيقات شيوعاً لمسرّعات حزم الإلكترون في الصناعة.

**الشكل 2.** مسرعات حزم الإلكترون: (أ) المسرع الخطي (10 ميغا إلكترون فولط، 20 كيلو واط)، و(ب) المسرع من نوع دينامترون (3 ميغا إلكترون فولط، 90 كيلو واط) و(ج) نظام حزم الإلكترون منخفض الطاقة لشركة كومت للتجهيزات الميكانيكية.

## مسرّع حزم الإلكترونات عالي الطاقة (10 ميغا إلكترون فولط)

عادةً ما تُستعمل مسرعات حزم الإلكترون ذات الطاقة الأعلى من 10 ميغا إلكترون فولط للعلاج الإشعاعي وإنتاج النظائر للطب النووي (على سبيل المثال، نظائر F-18)، كما يمكن استعمالها لتشعيع الأحجار الكريمة. ونظراً لمعدل الجرعة الأعلى، فيلزم وقت أقل للتعرض مما يقلل التدهور المحتمل. مقارنة مع محطة تشعيع غاما لا توجد مشكلة في إيقاف التشغيل ولا توجد نفايات مشعّة للتخلص منها، مع أن عمق الاختراق لمسرعات حزم الإلكترون أقل بكثير من عمق أشعة غاما؛ فعندما يتم تشعيع جانبين من مادة ما بمسرعات 10 إلكترون فولط يكون عمق الاختراق الفعال 9 سم عندما تكون كثافة المادة 1 غ/سم3، وهذا كافٍ للتعقيم وتشعيع الطعام.

## مسرّع حزم الإلكترونات متوسط الطاقة (5 ميغا إلكترون فولط)

فيما يتعلق بالمعالجة الإشعاعية للبوليميرات، فإنه كلّما زاد تيار الحزمة أو الطاقة، خصوصاً إذا كان عمق الاختراق للمسرّع يلبّي المتطلّبات زادت القدرة الإنتاجية؛ مما يؤدّي إلى انخفاض كبير في تكلفة المعالجة الإشعاعية. تعد طاقة الحزمة 4.5-5 ميغا إلكترون فولط كبيرة نسبياً، ويمكن تطبيقها للتشابك في الأنابيب والكابلات والألواح ذات السماكة الكبيرة التي لا يمكن اختراقها بواسطة حزمة طاقة منخفضة. يفيد ذلك فقط في الربط الإشعاعي للمواد ذات السماكة الكبيرة أو بعض المواد المحدّدة الأخرى. ومع ذلك، فإذا كانت شدّة التيّار كبيرة تصل إلى 30 ملّي أمبير أو حتى أعلى وعمق الاختراق مرتفعاً نسبياً، يمكن تطبيق هذا النوع بشكل فعّال للتدهور الإشعاعي لـ PTFE والبوليميرات الأخرى. حيث يلزم عادةً جرعة عالية ممتصّة للحصول على كميّة كبيرة من التحلّل، وعلى سبيل المثال، قد تتجاوز الجرعة الممتصة للتدهور الإشعاعي لـ PTFE المعاد تدويره 1000 كيلو غراي لإنتاج مسحوق دقيق منه.

## مسرّع حزم الإلكترونات متوسط الطّاقة (1-3 ميغا إلكترون فولط)

غالباً ما تُستعمل هذه المسرّعات في الصين؛ وهي مناسبة للتشابك في الأنابيب والكابلات والأسلاك والمواد القابلة للتقلص. يتم اختيار طاقة الشّعاع وفقاً لمتطلبات عمق الاختراق والقدرة الإنتاجية. وتعد هذه المسرعات جذابة جداً للصناعة من حيث تكلفة المحطة والموثوقية وقدرة المعالجة.

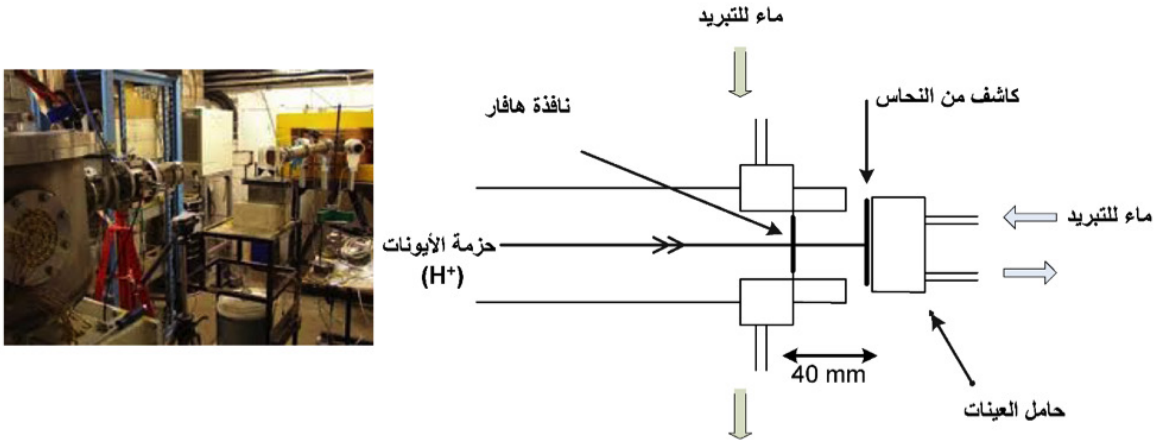
## مسرّع حزم الإلكترونات منخفض الطاقة (100-500 كيلو إلكترون فولط)

عادةً ما يستعمل مسرع منخفض الطاقة من أجل تشعيع الألياف والأغشية والصفائح والكابلات بسماكة صغيرة؛ بسبب عمق الاختراق المطلوب المنخفض للغاية. يمكن أن يكون تيار الشعاع 100-200 ملّي أمبير أو أعلى. للتشغيل المستمر في الصناعة، يتحرك نظام النقل تحت الدعامة بسرعة عالية، وذلك اعتماداً على جرعة المعالجة الممتصة. وقد أنتجت شركة Ebeam Technologies سلسلة من مسرعات حزم الإلكترون منخفضة الطاقة بمدى طاقة من 80 كيلو فولط حتى 300 كيلو فولط، بعرض يتراوح من 150 مم إلى 2.74 متراً، وقوّة شعاع حتى 600 كيلو واط من أجل تلبية طلب السوق. يعد تطبيق مسرّعات حزم الإلكترون منخفضة الطاقة أمراً ضرورياً لتصنيع أغشية متعددة الطبقات من البولي أوليفين للتغليف؛ فبعد الربط المتشابك، يتم تعزيز المقاومة الحرارية والقوة الميكانيكية للأغشية، والأهم من ذلك، يمكن تحسين قوة الختم الحراري بشكل كبير، كما يمكن استعمال حزم الإلكترون منخفض الطاقة للربط المتشابك أو تعديل سطح ألياف البوليمير؛ حيث يمكن للجذور الحرّة الناتجة عن الإشعاع على سطح الألياف والغشاء أن تبدأ بلمرة التطعيم للمجموعات الوظيفية. يستعمل هذا النوع من المواد المعدّلة في المركبات لتعزيز الترابط بين ألياف البوليمير والمواد الحاملة أو يمكن استعماله كمواد وظيفية مستقلة لامتصاص أيونات المعادن الثقيلة وتنقية مياه الصرف. فضلاً عن المعالجة الإشعاعية لمواد البوليمير، يمكن استعمال حزم الإلكترون منخفض الطاقة لمعالجة الطلاءات، وهي عملية صديقة للبيئة أكثر من المعالجة بالأشعة فوق البنفسجية، حيث يضاف البادئ الضوئي في المعالجة بالأشعة فوق البنفسجية، كما يمكن استعماله أيضاً لتعقيم الحبوب عن طريق قتل البكتريا السطحية، حيث يمكن أن تكون طاقة الحزمة أقل من 100 كيلو إلكترون فولط لمعالجة وتعقيم السطوح.

## مسرعات التشعيع الأيوني

يمكن استعمال مسرعات الجسيمات التي توفر مجموعة مختلفة من الأيونات والطاقات لتعديل خواص المواد وخاصة البوليميرات، ويمكن لهذه المسرّعات تسريع الهدروجين (البروتونات والديوتيرونات) والهيليوم (الهيليوم-3 والهيليوم-4) بكثافة عالية للطاقات تمكن من

إجراء تفاعلات نووية. ولابد لتعديل البوليميرات من استعمال حزمة أيونية بتيار منخفض وتبريد العينات المشعّة منعاً لانصهارها بتأثير التشعيع، ويوضح الشكل 3 الإعدادات التجريبية لتعديل خواص البوليميرات باستعمال حزمة بروتونات أو هيليوم ناتجة عن مسرع حلقي.




**الشكل 3.** الإعدادات التجريبية لتعديل خواص البوليميرات باستعمال المسرع الحلقي.

## أمثلة لتطبيقات التكنولوجيا الإشعاعية في تحضير مواد جديدة لمستقبل أكثر استدامة

### أغشية التبادل الأيوني

بعد عقود من الجهد المستمر، أدت تقنية التطعيم الإشعاعي إلى اعتماد طريقة جديدة لتركيب أغشية التبادل الأيوني تتمتع بمزايا فريدة هي:

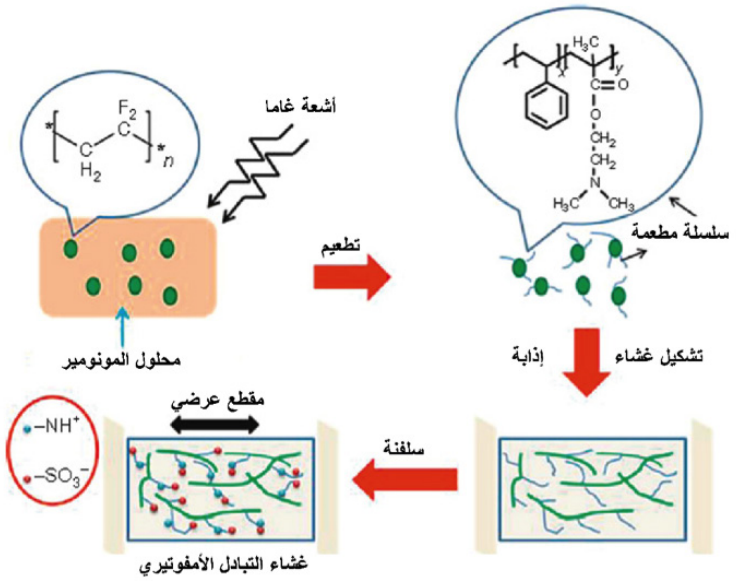
مرونة عملية التحضير؛ إذ تتوافر ركائز بوليميرية مختلفة ومونوميرات لمجموعة متنوعة من أغشية التبادل الأيوني بناءً على متطلبات التطبيق، ويمكن تغيير طبيعة الغشاء أو تحسينها ببساطة بتغيير طريقة التطعيم أو ظروف التشعيع.

العملية بسيطة وراسخة؛ حيث جرى تطوير تقنية التطعيم الإشعاعي على مدار أكثر من 50 عاماً، ويتضمن التركيب الإشعاعي لأغشية التبادل الأيوني بشكل عام الخطوات الثلاث التالية؛ تشعيع البوليمير وإدخال محلول المونومير، وإدخال المجموعات الأيونية متبوعة بمعالجة كيميائية بسيطة. يتراوح سمك مادة فيلم البوليمير بشكل عام بين 50 و200 ميكرومتر، ويمكن أن يفي مسرّع الإلكترون بطاقة 1 ميغا إلكترون فولط بمتطلبات عمق الاختراق للغشاء.

إنها فعالة وصديقة للبيئة؛ إذ يمكن أن ينتج التشعيع بجرعة ممتصة تبلغ 10-100 كيلو غراي كمية كافية من الجذور الحرة في البوليمير لتلبية احتياجات التصنيع الإشعاعي لأغشية التبادل الأيوني دون إضافة أي مواد كيميائية.

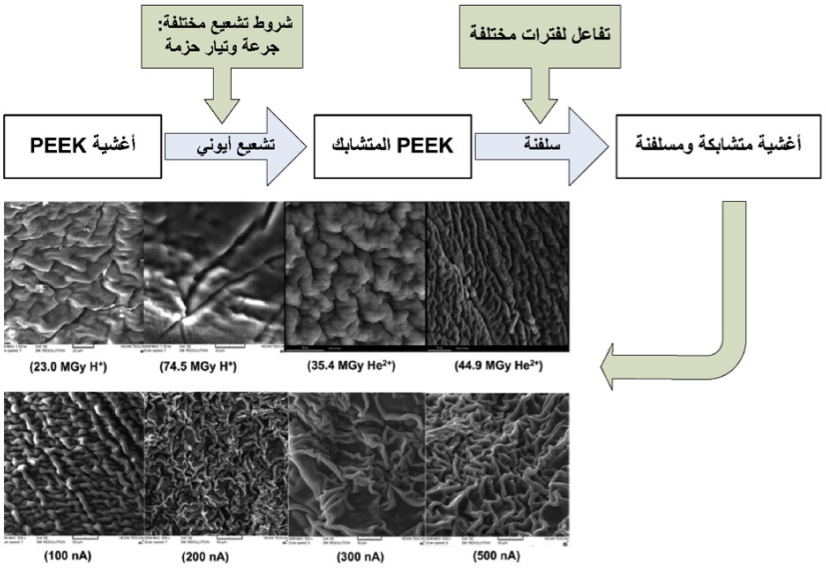
وعلى الرغم من المزايا السابقة، تعاني أغشية التبادل الأيوني المحضرة بعملية التطعيم الإشعاعي التقليدية من التوزيع غير المتجانس لسلاسل التطعيم، بمعنى آخر يتم إثراء سطح الغشاء بسلاسل التطعيم بشكل أساسي. يؤدي عدم التجانس هذا إلى عدم وجود مجموعات التبادل الأيوني في البنية الداخلية للغشاء عند انخفاض درجة التطعيم لأقل من 20%، حيث لا يتم تشكيل قنوات نقل البروتون المحبة للماء، ومن ناحية أخرى تنخفض القوة الميكانيكية للغشاء عند درجة تطعيم عالية بشكل ملحوظ حتى أنها تؤدي إلى صعوبة تجميع الأغشية لاختبار أداء بطارية التدفق أكسدة–إرجاع مثلاً؛ لذلك فإن مشكلة التوزيع غير المتجانس لسلاسل التطعيم في البنية الجرمية للغشاء في حال انخفاض درجة التطعيم تشكل عيباً يحد من التطبيق الصناعي للغشاء المشعّ، ومن أجل حل المشكلات المذكورة آنفاً جرى تصميم عملية جديدة يستعمل فيها مسحوق بولي فينيليدين فلوراید PVDF بدلاً من الفيلم كركيزة؛ إذ تصبّ المساحيق المطعمة في أحجام مختلفة من مواد الأغشية، وأخيراً يُحصل على غشاء ثنائي السلوك عن طريق السلفنة sulfonation والبرتنة protonation، ويبين الشكل 4 طريقة إجراء التحضير. وقد أظهرت التحاليل المختلفة للغشاء توزعاً متجانساً للمجموعات الناقلة للبروتون مقارنة بالتطعيم التقليدي؛ مما

يشكل قناة أيونية موحّدة، كما أشار اختبار الموصّلية conductivity للغشاء أيضاً إلى أن هذا الهيكل الموحّد يسهل الحفاظ على جزيئات الماء داخل الغشاء؛ مما يسهل نقل البروتون. تعد عملية السلفنة لإنتاج غشاء التبادل الأيوني خطوة أساسية في إدخال مجموعة حمض السلفونيك، ولكنها أيضاً تفاعل مؤكسد شديد تسبب مخاوف بيئية. على الرغم من إمكانية تطعيم أحادي سلفونات ستيرين الصوديوم SSS مباشرة على غشاء PVDF، إلا أنه يتطلب حزمة إلكترونات كمصدر إشعاع ووجود ثنائي ميثيل فورماميد DMF، فضلاً عن وجود تركيز عالٍ من محلول حمض الكبريت. ومع ذلك، عندما يتم خلط ن، ن–ثنائي إيثيل أمينو إيثيل ميتا أكريلات DMAEMA مع SSS بالتركيز نفسه، يمكن تحقيق تفاعل التطعيم بنجاح باستعمال درجة تطعيم أعلى، وخاصة بوجود كواشف نقل سلسلة RAFT لتلبية احتياجات الأغشية المستعملة في بطاريات الفاناديوم. ومقارنة مع غشاء nafion-117، فإن الغشاء ثنائي السلوك بدرجة تطعيم 43% لديه معامل نفاذية أقل لأيونات الفاناديوم وموصّلية مماثلة. كما يمكن الحفاظ على توتّر الدارة المفتوحة لبطارية الفاناديوم فوق 1.4 فولط لمدة 85 ساعة، وهو أعلى بكثير مقارنة بغشاء nafion-117. وعلى عكس غشاء التبادل البروتوني المستعمل في خلية الوقود، يحتاج الغشاء المستعمل في خلية تدفق الفاناديوم إلى أن يكون حاجزاً لمنع نقل الإلكتروليت الذي يحوي أيونات الفاناديوم. وللغشاء ثنائي السلوك مع البوليمير الفلوري كركيزة استقرار كيميائي جيد ونقل جيد للبروتون يعيق نفاذ أيون الفاناديوم، كما تتفوق الخصائص الكهروكيميائية للغشاء على تلك الخاصة بغشاء حمض البيرفلوروسلفونيك التجاري، وبالتالي فإن لها آفاق تطبيق جيدة. ومع ذلك، فإن البحث والتطوير الحاليّين للغشاء المعالج بالإشعاع لا يزالان في المرحلة المختبرية. ويوجد العديد من التحدّيات مثل الكفاءة وعملية التوسّع وخفض التكلفة لتلبية احتياجات بطاريات تدفق الفاناديوم.




**الشكل 4.** عملية جديدة لإعداد أغشية التبادل الأيوني الثنائية السلوك باستعمال مجموعة من تقنيات التطعيم الإشعاعي وطرق صبّ المحلول.

ومن جهة أخرى، يمكن تطبيق التشعيع الأيوني؛ بروتون وهليوم ضمن شروط محددة مدروسة متبوعاً بتفاعل السلفنة لتشكيل البنى المجعّدة في أغشية بولي إيثر إيثر كيتون PEEK (انظر الشكل 5). تحتوي هذه البنى المجعّدة على مجموعات وظيفية يمكن تعديلها كيميائياً، ويمكن اقتراح مجموعة متنوعة من التطبيقات لهذه الأغشية، كما يمكن التحكم بالتجاعيد بتغيير درجة السلفنة وكثافة التشابك وأنواع الأيونات المستعملة في التشعيع ومعدل الجرعة الإشعاعية. وبسبب خواص هذه الأغشية الدقيقة التركيب، فإنها واعدة لمجموعة واسعة من التطبيقات خاصة تلك التي تتطلب مساحة سطح كبيرة وتطريز patterning سطح موحّد بما في ذلك الامتزاز الانتقائي للأيونات المعدنية selective adsorption وأغشية التبادل البروتونية proton exchange membrane والإلكترودات لتطبيقات خلايا الوقود fuel cell. وقد تبيّن أن للأغشية المتشابكة نفاذية منخفضة جداً لأيونات الفاناديوم، حوالي $1.5\times 7^{-10}$ سم$^2$ دقيقة$^{-1}$، وهو أمر ذو أهمية قصوى لتقليل عبور أيونات الفاناديوم في بطارية التدفّق أكسدة–إرجاع المشغّلة بأيونات الفاناديوم. إن الخصائص المحسّنة بما في ذلك القيمة العالية لسعة التبادل الأيوني وامتصاص الماء والثبات الميكانيكي فضلاً عن التكلفة المنخفضة تجعل أغشية PEEK المتشابكة والمسلفنة مرشحاً جيّداً لتطبيق بطارية التدفق أكسدة–إرجاع.




**الشكل 5.** تشكيل البنى المجعدة في أغشية بولي إيثر إيثر كيتون المشععة بالأيونات والمسلفنة.

## تحضير الهلامات المائية

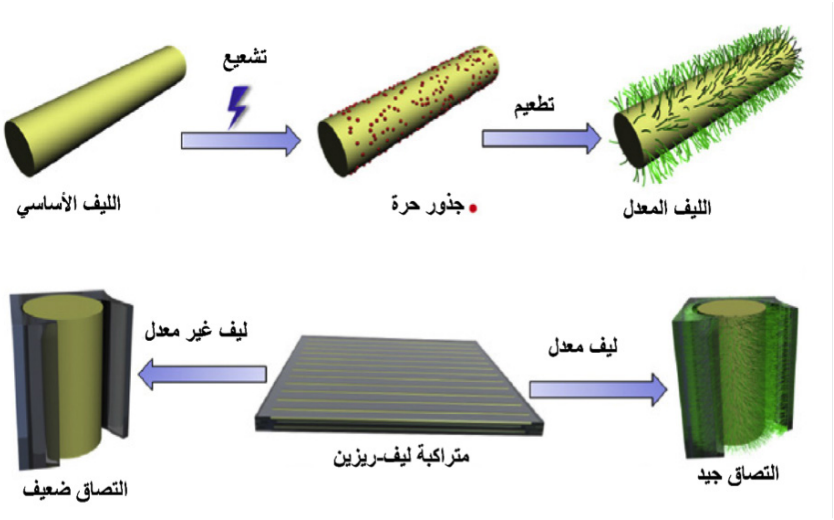
يمكن تحضير الهلامات المائية وتعقيمها باستعمال بعض البوليميرات وتشبيكها بأشعة غاما أو الحزم الإلكترونية، حيث توضع هذه البوليميرات في الماء في قوالب أو صمّامات وتعرّض للإشعاعات. إن تقنيات الربط المتشابك باستعمال الإشعاعات أكثر أماناً بكثير من التقنيات الكيميائية؛ إذ لا تنشأ عنها شوائب لعدم استعمال أي مواد كيميائية فيها. ويمكن للإشعاعات كسر الروابط الكيميائية وإنشاء روابط جديدة تغيّر من الخصائص الكيميائية والمادية والبيولوجية لمادة ما دون إجراء معالجة كيميائية إضافية ودون جعل هذه المادة مشعة. ويُمكّن ذلك من إعادة تصميم البوليميرات على المستوى الجزيئي لخدمة غرض معيّن. ففي حال الهُلامات المائية يسفر الربط المتشابك عن ترابط البوليميرات لتكوّنَ نوعاً من الهُلام يتميز بقوته وليونته وشفافيته وملاءمته الحيوية. ويمكن استعمال الهُلامات المائية في ضمادات الجروح والحروق وتحتوي على نسبة تتراوح بين 70 و95% من الماء، وهي لا تدبق بالجرح وتتركه رطباً لكي تساعد على تعافيه كما تمتص إفرازاته، فضلاً عن سهولة تخزينها واستعمالها. ومن الأمثلة الرائدة على مثل هذه المنتجات الضماد الذي تنتجه هيئة الطاقة الذرية السورية تحت الاسم التجاري SYR-Gel.

## ألياف الأراميد

في الوقت الحاضر، يتمثّل العيب الرئيسي لطرائق تحضير المنسوجات الوظيفية التقليدية في أن مزج المواد أو المجموعات الوظيفية على المنسوجات غير آمن؛ مما يؤدّي إلى ضعف المتانة الوظيفية. تكون طاقة الإشعاع المؤين من أشعة غاما أو حزمة الإلكترون أعلى بعدة مرات من طاقة الرابطة التشاركية 3-4 إلكترون فولط؛ لذلك من الممكن توليد الجذور الحرة بسهولة على المنسوجات بطريقة التشعيع، وقد تكون الجرعة الممتصّة المنخفضة قادرة على بدء بلمرة التطعيم للمونوميرات الفينيلية وتشكيل رابطة تشاركية بين النسيج والقطع المطعمة لتحقيق وظيفية دائمة.

ألياف الأراميد عبارة عن ألياف بولي أميد أروماتية تحتوي على أكثر من 85% من روابط الأميد المرتبطة مباشرة بالحلقة الأروماتية. يتمتع هذا النوع من الألياف بالمزايا التالية: الوزن الخفيف والقوة العالية والمعامل العالي لمقاومة التشوه ومقاومة درجات الحرارة العالية (درجة حرارة التحلل 560 درجة سلزية) ومقاومة التآكل الممتازة. إن قوة ومعامل مقاومة التشوه لألياف الأراميد هي من خمس إلى ست مرات ومن مرتين إلى ثلاث مرات على التوالي، وهي أعلى من تلك التي تتمتع بها الأسلاك الفولاذية ذات القطر نفسه، في حين أن الوزن لا يتجاوز سوى خمس وزن السلك الفولاذي. وثمة نوعان من ألياف الأراميد هما بولي أميد ميتا–أروماتي وبارا–أروماتي، وفيما يتعلّق بالبولي أميد ميتا–أروماتي، تبلغ الزاوية بين مستوي الأميد ومستوي الفينلين 30 درجة؛ مما ينتج عنه الهيكل الأكثر استقراراً. إن حاجز

طاقة الدوران للرابطة فينيل–أميد والرابطة نتروجين–كربون (C-N) مرتفع؛ مما يؤدي إلى سلاسل ممتدة بالكامل. إضافة ذلك، يمكن أن يؤدي وجود روابط هدروجينية قوية إلى تعزيز استقرار التركيب الكيميائي لألياف الأراميد. إن التركيب البلوري للبولي أميد بارا–أروماتي هو شبه معيني، وسلاسل الجزيئات الضخمة ممتدة بالكامل في المنطقة البلورية. إن الزاوية HN-O هي 160 درجة، وهي مواتية لتكوين رابطة هدروجينية بين الجزيئات. تعطي هذه الهياكل الفريدة خصائص فيزيائية وكيميائية ممتازة، ولكنها تسبب أيضاً بعض المشكلات مثل: درجة عالية من التبلور وسطح أملس ونقص في المجموعات النشطة كيميائياً؛ مما يؤدي إلى ضعف قوة الالتصاق بين ألياف الأراميد وركيزة الراتنج، ولذلك، فمن الضروري تعديل سطح الألياف للتطبيقات العملية، يستعمل التشعيع لتحقيق ذلك كما هو موضح في الشكل 6.




**الشكل 6.** التعديل السطحي المحثوث بالتشعيع للألياف عالية الأداء وتطبيقها في المتراكبات.

## فلكنة vulcanization المطاط وصناعة الإطارات

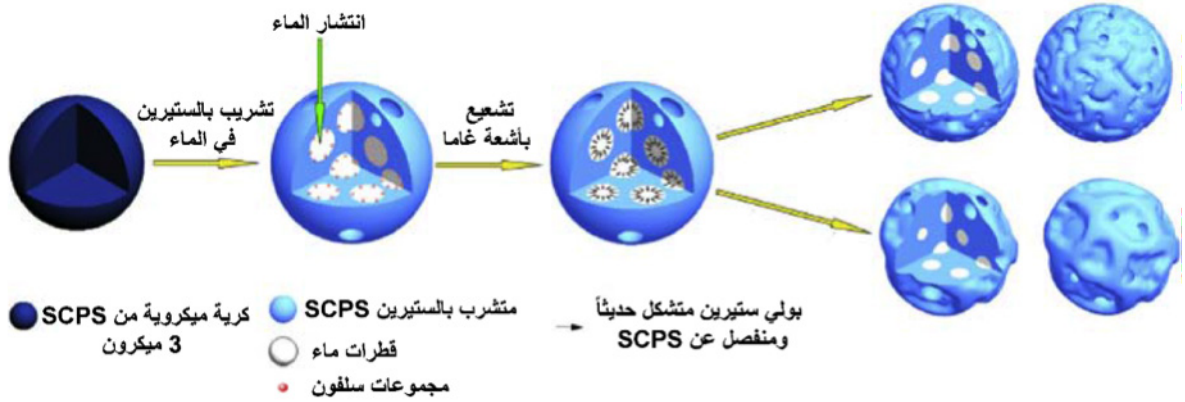
يعد تطبيق التشعيع من أجل تقسية المطاط وتعديله تقنية مستقبلية في معالجة البوليميرات. وقد ظهرت هذه الطريقة في منتصف القرن العشرين، وقام العديد من مصنعي الإطارات المشهورين في العالم بتطبيق تقنية الفلكنة الإشعاعية في مصانعهم بحلول نهاية القرن العشرين. ويعالج في الوقت الحاضر أكثر من 93% من الإطارات المصنعة في اليابان بمسرعات حزم إلكترونية منخفضة الطاقة من أجل المعالجة السابقة للمعالجة بالحرارة. أصبحت الفلكنة الإشعاعية بحزم الإلكترون في السنوات الأخيرة معترفاً بها ومقبولة تدريجياً في صناعة المطاط والإطارات في الصين. وأنشأت بعض الشركات المصنعة للإطارات بالفعل خطوط إنتاج بالاعتماد على الفلكنة الإشعاعية؛ حيث تتشكل الجذور الحرة عندما تتعرض جزيئات المطاط الكبيرة لأشعة ذات طاقة عالية مثل حزم الإلكترونات والأشعة السينية عند درجات حرارة وضغوط طبيعية؛ مما يتسبب في تشابك السلاسل الرئيسية لتشكيل بنى ثلاثية الأبعاد، وينتج المستوى نفسه من الفلكنة مقارنة بالفلكنة الكيميائية. تؤدي الفلكنة الإشعاعية لتحسين خصائص المطاط لمقاومة التمزق والشيخوخة والأوزون. ويمكن تحقيق الفلكنة الكاملة بسرعة في درجة الحرارة والضغط العاديين باستعمال الفلكنة الإشعاعية مع العديد من المزايا بما في ذلك السرعة والإنتاج المرن وتوفير الطاقة والتلوث المنخفض، وبمجرد معرفة الشروط المناسبة للفلكنة الإشعاعية يمكن توزيع حزمة الإلكترونات بالتساوي في جميع أنحاء العينة؛ مما يؤدي إلى كثافة تشابك موحدة وبنية منتظمة، كما يمكن أن تتغلب عملية الفلكنة الإشعاعية على عيوب الفلكنة الكيميائية بما في ذلك التلوث واستهلاك الطاقة واستهلاك الوقت والفلكنة غير المنتظمة.

## تحضير المواد النانوية

تملك المواد النانوية بعداً واحداً على الأقل أصغر من 100 نانو متر، وتعدّ أكثر المواد الواعدة في القرن الحادي والعشرين. ثمة عدد من الطرائق لتحضير المواد النانوية، وتعد تقنية التشعيع نهجاً فريداً؛ حيث يتم استعمال الإلكترونات المذابة أو المميّهة الناتجة عن التحلل الإشعاعي كعوامل إرجاع. فضلاً على ذلك، ومقارنة بالطرائق الأخرى، تتميز طريقة التشعيع بالعديد من المزايا؛ حيث يمكن تشغيلها في درجة حرارة وضغط عاديين أو حتى عند درجة حرارة منخفضة وفترة التحضير فيها قصيرة مع إجراءات بسيطة، ويكون للمنتج حجم

جسيمات صغير وتوزيع ضيق يسهل التعامل معه، وتكون الإنتاجية عالية وإعادة المعالجة مريحة؛ لذلك فإن طريقة التشعيع واعدة لتصنيع كميات كبيرة من الجسيمات النانوية في ظل الظروف العادية. تطوّرت طريقة التشعيع بسرعة كطريقة جديدة لتحضير المواد النانوية المعدنية، واستعملت لتحضير المجموعات المعدنية من Ag وAu وCu وPt وPd وPb وIr وCd وTl بنجاح في محلول مائي. واستكشفت آلية تكوين الكتل المعدنية بالتشعيع؛ فعندما يشعّع محلول مائي مخفف يحتوي على أيونات معدنية بإلكترونات عالية الطاقة أو أشعة غاما، يولد الانحلال الإشعاعي للماء أنواعاً مختزلة من ذرات H والإلكترونات المميّهة والأنواع المؤكسدة (•OH الجذور الحرة) والأنواع أو الجزيئات النشطة الأخرى، ثم تتفاعل هذه الأنواع النشطة مع أيونات المعادن وتنقل الطاقة المشعّة إلى المذاب بشكل غير مباشر. يعادل كمون الأكسدة القياسي للإلكترون المميّه 22.77 إلكترون فولط مع قدرة إرجاع قوية تمكّن نظرياً من إرجاع أيونات المعادن جميعها باستثناء المعادن القلوية والمعادن القلوية الترابية. لإرجاع أيونات المعادن بشكل فعّال، عادة ما يكون من الضروري إزالة $O_2$ المذاب من المحلول بضخ $N_2$ عالي النقاوة وإضافة كاسحات الجذور الحرة مثل الأيزوبروبانول والإيثانول لإزالة جذور الهدروكسيل المؤكسدة. يمكن لهذه الأنواع المرجعة أن ترجع تدريجياً أيونات المعادن إلى ذرات معدنية أو أيونات معدنية بتكافؤ أخفض، ثم تتكتل ذرات المعدن المتشكلة حديثاً في نوى وتنمو إلى أن تصبح جسيمات نانوية تترسب لاحقاً من المحلول. كما يمكن استعمال هذه الطريقة لتحضير جزيئات أكاسيد المعادن والكبريتيدات النانوية، كما يمكن دمجها بسهولة مع عملية البلمرة الغروية لتحضير مركبات نانوية هجينة غير عضوية/عضوية وتحضير الكريات المكروية البوليميرية المسامية وتحضير كريات البوليمير المسامية المتشابكة وغيرها من المواد المتقدمة.

ومن جهة أخرى، يمكن باستعمال تقنية البلمرة المحثوثة بالإشعاع تحضير تنظيمات مورفولوجية دقيقة، ويمكننا الحصول على بوليمير بشكل كرات مكروية مسامية ذات بنى مسامية متنوعة وأشكال كاملة وحتى وظائف محددة؛ مثال على هذه الجسيمات عندما تستعمل الكرات المكروية الحمض السلفوني لبولي ستيرين المتشابك SCPS كبذرة، فيمكن تصنيع كريات مكروية بوليميرية مسامية ذات أشكال جديدة مختلفة تماماً عن الهيكل المجوّف الذي يشبه القفص. إن سبب تحضير مثل هذه الأشكال الخاصة هو إحداث انفصال طوري بين بولي ستيرين PS المتشكّل حديثاً بعد تشريب الكرات بمونومير الستيرين ووضع مبادر initiator من ثنائي فينيل بنزن وتطبيق التشعيع في الواجهة بين الكرات المكروية المتشابكة SCPS والطور المائي الخارجي أو طور الماء الداخلي المتكون والمترافق بانتفاخ بذور SCPS المكروية، كما هو مبين في الشكل 7.




**الشكل 7.** آلية تشكيل الكريّات المكروية متعددة التجاويف شبيهة الجوز وشبيهة الخوخ المحضّرة من بذور SCPS بحجم يزيد على 2 مكرو متر بالبلمرة الاستحلابية المحثوثة بأشعة غاما.

## الاستنتاج

يمكن أن يتسبب الإشعاع في تغييرات في مجموعة متنوعة من خصائص المواد بما في ذلك الخصائص الكيميائية والكهربائية والمغنطيسية والميكانيكية والبصرية وما إلى ذلك، ويمكن للتكنولوجيا الإشعاعية أن تسهم في فتح الكثير من الأبواب نحو مستقبل أفضل، وتعد كأحد أكثر الخيارات صداقة للبيئة وأكثرها فعالية من حيث التكلفة والتطبيقات العديدة في مختلف مجالات الحياة مثل الصحة والبيئة والصناعة والبنى التحتية؛ ففي المجال الصحّي يمكن توظيف تكنولوجيا الإشعاع لتفتيت الخلايا السرطانية ومكافحة العوامل الممرضة

الضارة الموجودة في الأغذية وتعقيم الأدوات الجراحية واللوازم الطبية، ويمكن لتكنولوجيا الإشعاع أن تجعل بيئتنا نظيفة بالقضاء على الملوِّثات الموجودة في الماء وفي الهواء وفي الأرض قبل أن تُلوِّث البيئة وكذلك معالجة مواد النفايات الأخرى مثل ثُفل قصب السكر؛ وهو مادة ليفية تنتج عن صناعة السكر أو قشور المأكولات البحرية مثل الروبيان؛ وذلك بتحويلها إلى مواد تغليف قابلة للتحلُّل البيولوجي وأكثر صداقة للبيئة أو مغذّيات عالية الجودة لأغراض الزراعة. وفي الصناعة يمكن توظيف تكنولوجيا الإشعاع لربط ووصل الجزيئات لإنتاج كوابل وأسلاك أمتن وأكثر استدامة واستحداث مواد وطلاءات عالية الأداء للمنازل والسيارات في جميع أنحاء العالم، كما تساعد تكنولوجيا الإشعاع على رؤية أغوار المباني والآلات بغية ضمان أن يظل هيكلها سليماً ومأموناً لا سيما عقب وقوع كوارث طبيعية.

ولا بد من توافر عمال مهنيين ذوي مهارات عالية ومعدّات مناسبة من أجل الاستفادة من الإمكانات المتاحة من العلوم والتكنولوجيا الإشعاعية. ومن خلال الدعم الذي تقدِّمه هيئة الطاقة الذرية السورية يمكن للعديد من المرافق الخدمية في البلاد الحصول على ما يلزم من دورات تدريبية وتعليمية ومشورة خبراء ومعدات ضرورية لاعتماد هذه التكنولوجيا.

## المراجع


- Ajji Z, Othman I, Rosiak JM (2005). Production of hydrogel wound dressings using gamma radiation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 229(3-4): 375-380.

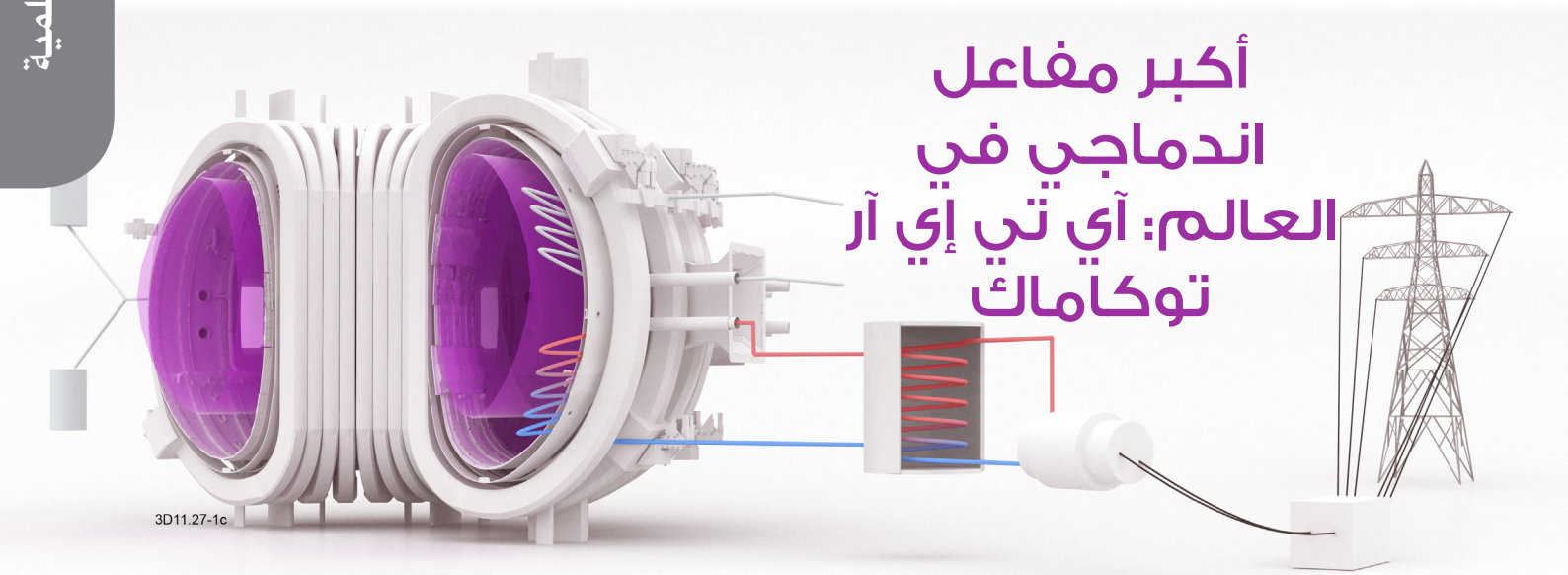
- Al Lafi AG, Hasan R, Al-Kafri N (2019). Sulfonated Cross-Linked Poly (ether ether ketone) Films with Wrinkled Structures: Preparation and Vanadium Ions Permeability. Macromolecular Research 27(12): 1239–1247.

- Charlesby A (1960). Atomic radiation and polymers, Pergamon Press Ltd., London.

- Guozhong W, Maolin Z, Mozhen W (2019). Radiation Technology for Advanced Materials: From Basic to Modern Applications. Shanghai Jiao Tong University Press.


*تأليف: د. عبد الغفار اللافي، قسم الكيمياء، هيئة الطاقة الذرّية السورية.*

# أكبر مفاعل اندماجي في العالم: آي تي إي آر توكاماك

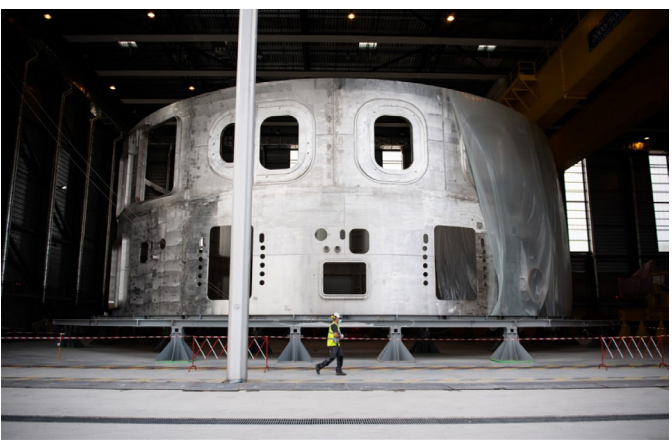



بدأ العلماء بإنشاء أكبر مفاعل اندماج نووي حراري في العالم في جنوب فرنسا، ويعملون على تشغيله في نهاية عام 2025. يدعى هذا المشروع باسم آي تي إي آر (ITER) ويمثل تعاوناً دولياً هادفاً بين 35 دولة. يهدف المشروع لإثبات جدوى الطاقة الاندماجية باستعمال جهاز مغنطيسي عملاق يدعى توكاماك tokamak وهو اختصار روسي لـ toroidal chamber with magnetic coils الذي يعني «حجرة حلقية ذات ملفات مغنطيسية»، وقد نُوّه عنه أول مرة من قبل الفيزيائي الروسي إيغور كولفين عام 1957. إن المفاعل الجديد متطور جداً ويزن حوالي 23 ألف طن، كما يتضمن مغانط فائقة التوصيل يبلغ وزنها حوالي 3 آلاف طن وتتصل مع بعضها بكبلات عالية التوصيل طولها 200 كيلومتر. إن الحجرة الحلقية ذات الملفات المغنطيسية الخاصة بمفاعل الاندماج النووي ستكون الأضخم من كل ما قد تم بناؤه على الإطلاق وأن حجمها سيعادل ضعف أكبر حجم يستثمر الآن.

معدل درجة الحرارة: سيندرج مفاعل الاندماج النووي تحت أحد أكثر الأماكن حرارة في الكون بحيث تقدّر درجة حرارة حجرة الخلاء المتضمنة البلازما بـ 150 مليون درجة سلزية، فضلاً عن كونه من أكثر الأماكن برودة في الكون حيث يجب أن تحتفظ البلازما بدرجة حرارة تبلغ نحو أربع درجات كلفن (–269 درجة سلزية) لتقيد المغانط والتحكم بها. إن الفصل بين الاثنين سيتم بواسطة بطانة من الفولاذ المطلي بالبريليوم وذلك لحماية بعض الأقسام من بعضها الآخر، وهذه البطانة ستعلق على الجدار الداخلي لحجرة الخلاء بواسطة قاعدة المفاتيح المغطاة الآن بأغطية صفراء لحمايتها من الغبار.

حجرة الخلاء: سيتم بناء حجرة الخلاء الخاصة بمفاعل الاندماج النووي من ستة أجزاء، وكل جزء منها سيتم تصنيعه إما في كوريا الجنوبية أو في إيطاليا. كان لابد من شحن المقاطع الفولاذية الضخمة بالقارب إلى ميناء فوس سور مير بالقرب من مرسيليا، حيث تم نقلها على بعد 100 كيلومتر شمال شرق موقع ITER. وقد وصلت القطع الأولى، وسيقوم العمال بتوصيلها بمغنطيس ودروع حرارية ثم ينزلونها في غرفة توكاماك.

تجميد عميق: يمكن للمغانط فائقة التوصيل في المفاعل أن تعمل فقط في درجات حرارة فائقة البرودة بالقرب من الصفر المطلق، والتي سيتم الحفاظ عليها بواسطة الهيليوم السائل الذي يدور من خلال مضخات مبردة يتحكم المشغلون في النظام بها عبر مجموعة معقدة من الصمامات اليدوية بناءً على القراءات المحلية للضغط ودرجة الحرارة والتدفق، وستكون محطة التبريد المكتملة التي بناها المقاول Air Liquide أكبر وحدة تبريد بالهيليوم في العالم.



قفص مغنطيسي: سيتم تغليف بلازما الاندماج الخاصة بـ ITER واحتواؤها بواسطة عش من المغانط، بما في ذلك ستة مغانط بوليويدية poloidal فائقة التوصيل على شكل حلقة، وسيتراكم بعضها فوق بعض أفقياً لإحاطة البلازما. فضلاً عن ذلك، سيحيط 18 ملفاً حلقياً بالماكينة عمودياً، وسيجلس ملف لولبي مركزي كبير في المنتصف، مما يشكل أكبر نظام مغنطيسي فائق التوصيل تم

بناؤه على الإطلاق. تسمح الموصلات الفائقة للتيار الكهربائي بالتدفق دون مقاومة؛ مما يسمح للإلكترونات بالتحرك بحرية لخلق مجالات مغنطيسية شديدة. صنعت المغانط من النيوبيوم–القصدير والنيوبيوم–التيتانيوم والمغانط البوليويدية؛ وهي مكونات ITER الوحيدة المصنّعة في الموقع بأقطار تتراوح بين 17 و24 متراً ويصل وزن كل منها إلى 400 طن متري، فهي كبيرة جداً بحيث لا يمكن بناؤها في مكان آخر ونقلها.

ويطمح فريق مشروع آي تي إي آر إلى إجراء اختبارات عديدة باستخدام المفاعل الضخم الجديد. ويتوقع الفريق إنتاج كمية ضخمة من الحرارة والطاقة تعادل 10 أضعاف الطاقة التي يستهلكها المفاعل باستعمال بلازما ذاتية التسخين. ويعني ذلك أن المفاعل سينتج نحو 500 ميغاواط من الطاقة الكهربائية؛ أي ما يعادل الطاقة التي ينتجها أصغر المفاعلات النووية في الولايات المتحدة الأمريكية حالياً باستعمال 50 ميغاواط من الطاقة. وأضاف الفريق أن درجة الحرارة داخل المفاعل قد تبلغ 10 أضعاف درجة الحرارة في لب الشمس. ومن هنا نجد أن مشروع آي تي إي آر سيصبح جهداً عالمياً ضخماً لجعل الطاقة الاندماجية أمراً واقعاً، لكنه ليس المشروع الوحيد؛ إذ تحاول شركات ناشئة عديدة داخل الولايات المتحدة الأمريكية وخارجها تحويل الطاقة الاندماجية إلى مصدر تجاري للطاقة.

*ترجمة: د. عبد الغفار اللافي، هيئة الطاقة الذرية السورية.*

- Popular Mechanics, 28/07/2020.
*https://www.popularmechanics.com/science/energy/a33449184/largest-fusion-reactor-iter-tokamak-assembly-begins/*
- Scientific American, 1.12.2020.
*https://www.scientificamerican.com/article/worlds-largest-fusion-reactor-begins-assembly/*

# الحشرات تسكت جرس الإنذار

تُسكت يرقات دودة ثمار البندورة صرخات النبات الذي تتغذى عليه طلباً للمساعدة أثناء استهلاك اليرقات لأوراق النبات، وقد تعطي النتائج تبصّرات عن مقدرة النباتات مثل البندورة والصويا على تحمّل عوامل ضغط إضافية مثل التغير المناخي.

"لقد اكتشفنا استراتيجية جديدة حيث تستعمل حشرة لعابها لتمنع إطلاق دفاعات نباتية تطلق في الهواء وذلك من خلال التحكم بالثغور الموجودة على سطح أوراق النباتات". قال غاري فيلتون –بروفسور ورئيس قسم الحشرات في ولاية بنسيلفانيا– أن الثغور هي ثقوب صغيرة على أوراق النبات تنظم تبادل الغازات بما فيها الإطلاقات الدفاعية للنبات وثاني أكسيد الكربون بين النبات والبيئة المحيطة.

درس الباحثون تأثيرات أنزيم محدد؛ هو غلوكوز أوكسيداز (GOX) الذي يوجد في لعاب يرقات حشرة ثمار البندورة *Helicoverpa zea* على ثغور النبات وعلى دفاعات النبات المحرَّرة المسماة مواد النبات المتطايرة التي تحفز آكلات الأعشاب على إطلاقها herbivore-induced plant volatiles (HIPV).

"يعتقد أن هذه HIPVs تساعد على حماية النبات من الحشرات آكلة الأعشاب عن طريق جذب الأعداء الحيوية لآكلة الأعشاب هذه وعن طريق تحذير النباتات المجاورة من وجود آكلات النبات بالقرب منها" كما قال فيلتون، وقد أضاف: "بالنتيجة، هناك احتمال أن يؤدي إغلاق الثغور على سطح الأوراق إلى تعديل التفاعلات عبر كامل مجتمع النبات".

استعمل الباحثون في تجاربهم تقنية كريسبر/كاس-9 (CRISPR/Cas9)؛ من أجل تحرير (إعادة كتابة أو تصحيح) الجينوم للحصول على يرقات ينقصها أنزيم GOX. وفي غرف زجاجية تحتوي على فلاتر كمصائد لجمع HIPV، سمح الباحثون لليرقات التي تفتقد للأنزيم الفعال إلى جانب يرقات لم يحدث عليها أي تغيير بالتغذي على نباتات البندورة والصويا والقطن مدة ثلاث ساعات، ومن أجل فحص استجابة الثغور لتأثير أنزيم GOX فحص الفريق نباتات الأوراق تحت المجهر وقاسوا حجم فتحات الثغور بعد ذلك، ثم استخلصوا المواد الطيّارة من مصائد الفلتر واستعملوا الكروماتوغرافيا الغازية المقرونة بمطيافية الكتلة من أجل التعرف على هوية وكمية مركبات HIPVs.

"الدراسة هي الأولى التي تستعمل تقنية تحرير الجينات عن طريق تقنية كريسبر/كاس9 من أجل دراسة وظيفة أنزيم في لعاب الحشرة» كما قالت بو آن لين؛ طالبة الدكتوراه في علم الحشرات بجامعة بنسلفانيا والمؤلفة الرئيسة للدراسة. وأضافت: «لقد أمكننا باستعمال مقاربات صيدلانية جزيئية وفيزيولوجية تبيان أن أنزيمات في اللعاب تؤدي دوراً رئيساً في إغلاق ثغور النباتات بتحفيز من الحشرات واحتمال إنقاص إطلاق عدة مواد دفاعية".

وفعلاً، وجد الفريق المؤلَّف من خبراء في مجال البيولوجيا الجزيئية والبيئة الكيميائية وفيزيولوجيا النبات وعلم الحشرات أن أنزيم GOX الذي تفرزه يرقات الحشرات على أوراق النبات يتسبب في إغلاق الثغور في نباتات البندورة خلال دقائق، وفي كل من البندورة والصويا خلال 48 ساعة، كما وجدوا أن GOX يمنع إطلاق عدّة HIPV أثناء تغذي اليرقات بما فيها (Z)-3-hexenol، (Z)-jasmone وacetate (Z)-hexenyl، وهي إشارات مهمة في دفاعات النبات تأتي عن طريق الهواء ولم يوجد أي تأثير لأنزيم GOX على نباتات القطن؛ الأمر الذي يبين أن تأثير هذا الأنزيم على نقل المواد عبر الثغور يعتمد على نوع النبات.

أشارت لين إلى حقيقة أن تطوير يرقات حشرة ثمار البندورة أنزيماً من اللعاب يثبط إطلاق مركبات دفاعية متطايرة لدى أنواع محددة هو مؤشر على أهمية دفاعات النباتات المتطايرة في تطور الحشرات آكلة النباتات.

"إن الثغور هي أعضاء لا تتحسّس وتستجيب لعوامل الشدة البيئية فحسب، وإنما تؤدي دوراً في نمو النبات أيضاً» كما قال فيلتون، وأضاف: «لأن الثغور تؤدي دوراً مهماً في تنظيم درجة حرارة الورقة النباتية ومحتواها من الماء". تشير اكتشافاتنا إلى أن السيطرة على فتحات الثغور من قبل حشرة قد يؤثر على استجابة النبات لتزايد درجات الحرارة الناجم عن التغير المناخي وعلى الاستجابة لنقص المياه.

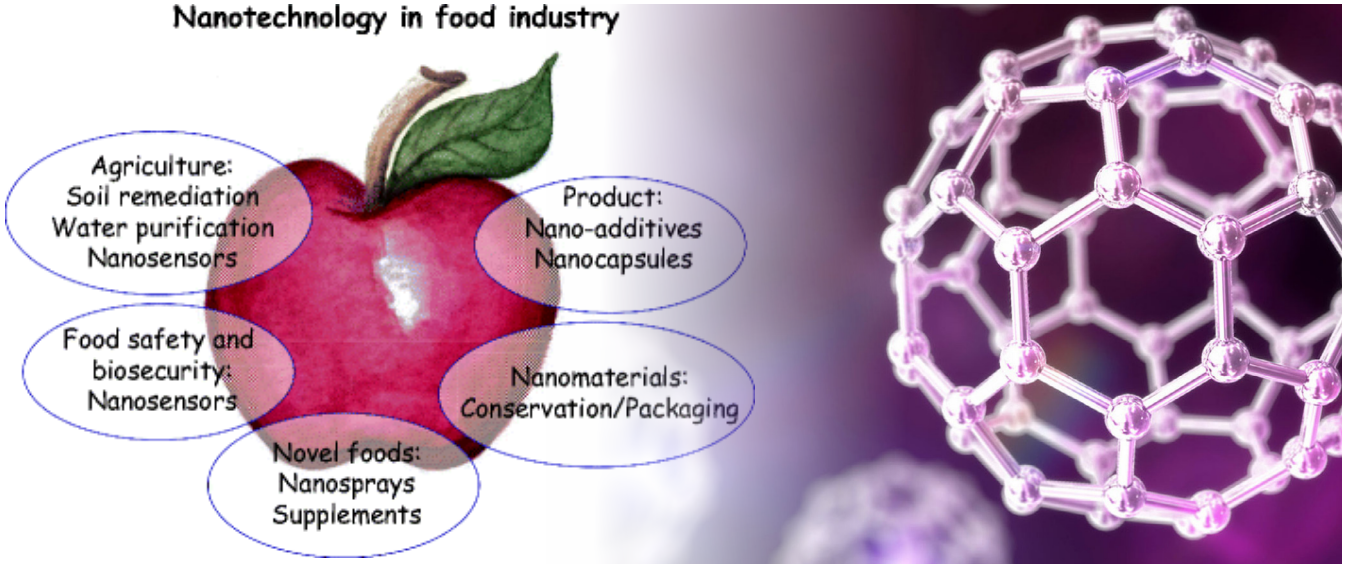
*ترجمة: د. إياد غانم، هيئة الطاقة الذرية السورية.*

Science Daily, 7.2.2021.

*www.sciencedaily.com/releases/2021/02/210217151011.htm*

# المواد النانوية في الصناعة الغذائية والأطعمة المبتكرة

تستخدم تكنولوجيا النانوية في تطوير قطاع صناعة المُنتجات الغذائية وتنمية مواردها وضمان سلامة منتجاتها وجودتها؛ حيث تتعلق التكنولوجيا النانوية بالمواد التي يتراوح حجمها عموماً بين 1 و 300نانومتر. وطبقت التكنولوجيا النانوية في معظم مراحل صناعة الأغذية بدءاً من المزرعة إلى مائدة الطعام، وتشمل: تصنيع الأغذية ، وأنظمة حفظ الغذاء، وتطبيق تقانة النانو في مجالات إنتاج الأغذية وتجهيزها وسلامتها وتعبئتها وتغليفها. كما تستخدم تلك التقنية في كبسولات النانو nano capsules لتنشيط تلك الأغذية واستبدال كوليسترول اللحوم، وفي أنابيب النانو nano tubes وجزيئات النانو nano particles لإنتاج أغلفة وعبوات الأطعمة لإزالة المسببات المرضية ومقاومة تخرب الغذاء.




## التكنولوجيا النانوية

يمكن أن توصف التكنولوجيا النانوية بأنها تصميم وإنتاج وتطبيق البنى والأجهزة والنُّظم والمواد وذلك بتحجيم المواد والتحكم في شكلها بحيث لا يزيد حجمها على حجم الذرة والجزيء. وتُعرِّف المبادرة الوطنية لتقنية النانو national nanotechnology initiative في الولايات المتحدة المواد النانوية على أنها مواد يتراوح حجمها بين 1 و100 نانومتر. والنانومتر هو واحد على ألف مليون من المتر . ويتعامل معظم التطبيقات عموماً مع البنى التي تكون أقل من 300 نانومتر. ومصدر الاهتمام بالتكنولوجيا النانوية هو أن الحجم اللامتناهي في الصغر للغاية لدقائق المادة يعطيها مساحة سطحية عالية جداً ويكسبها خواص فيزيائية وكيميائية تختلف اختلافاً كبيراً عن خواص الحجم الأكبر؛ وهذه الخواص للمواد النانوية تزيد من نشاطها الكيميائي والبيولوجي، ومن ثَمّ تتيح تقنية النانو تطوير مواد جديدة مع مجموعة واسعة من التطبيقات المحتملة. تُستخدم المواد النانوية في مجموعة متنوعة من المنتجات الاستهلاكية والطبية والتجارية والصناعية، وتوفر المواد النانوية مجموعة واسعة من الفرص لتطوير منتجات وتطبيقات مبتكرة في النظام الغذائي، تشمل مراحل الإنتاج في الزراعة ومعالجة الأغذية وتغليفها وحفظها وتحسين الجودة. وتقسم تطبيقات تكنولوجيا النانو في مجال صناعة الغذاء إلى قسمين رئيسيين: تطبيقات داخل الغذاء وتطبيقات خارجية.

## تطبيقات داخل الغذاء

تضاف بعض المواد النانوية إلى الأغذية وتعمل على تحسين الغذاء مثل محسنات المذاق واللون والقوام، وتقوم بعض المواد النانوية بزيادة القيمة الغذائية والامتصاص مثل المغذيات والمكملات الغذائية.

## تحسين مواصفات المواد الغذائية مثل اللون والقوام والنكهة

بدأت صناعة الأغذية في استخدام تقنية النانو لتطوير مكونات نانوية الحجم لتحسين لون الطعام وملمسه ونكهته. تُستخدم الجسيمات النانوية و والسيليكا غير المتبلورة amorphous silica كمضافات غذائية؛ فمثلاً يستخدم كمُلوِّن في طبقة مسحوق السكر على الكعك.

## المغذيات والمكملات الغذائية

تُستخدم المواد النانوية كمكونات وإضافات غذائية (مثل الفيتامينات ومضادات الميكروبات ومضادات الأكسدة) في الغذاء وبمثابة مكملات غذائية لتعزيز الامتصاص والتوافر البيولوجي. وتندرج الإضافات الغذائية النانوية التي يتناولها الكثير منا والمحتوية على إضافات لمواد نانوية لعناصر فلزية حرة مثل الحديد والزنك، وكذلك الكبسولات الجيلاتينية النانوية المسام المحتوية على تركيزات عالية من زيوت الأسماك الشهيرة (الأوميجا 3: omega 3) ومواد الإنزيمات المصاحبة لها التي تعمل على تشغيل تلك الإنزيمات بكفاءة ويسر مثل (الكيو

Q10 :10) وغيرها ضمن الأغذية النانوية. وتضاف حبيبات مضادات الأكسدة النانوية ذات المساحة السطحية الكبيرة لامتصاص الرطوبة في الغذاء. كما تضاف حبيبات عنصر الحديد التي تقل أقطارها عن 300 نانومتر إلى بعض المشروبات الغذائية. ويُمكن إضافة الحبيبات النانوية المُخلقة لفلز الحديد إلى أنواع الدقيق المختلفة المستخدمة في صناعة مختلف المخبوزات والحلويات. وجرت إضافة حبيبات نانوية مؤلفة من عنصر السيلينيوم إلى منتجات الشاي الأخضر، مما عزَّز من الفوائد الصحية الناتجة عن امتصاص ذلك العنصر المهم بسهولة ويسر.

وقد نجحت أخيراً إحدى الشركات الألمانية الكُبرى المتخصصة في إنتاج اللحوم المحفوظة وتعبئتها في ابتكار كبسولات مسامية مصنعة من غرويات colloids متدنية الأحجام تقل أبعاد أقطارها عن 30 نانومتراً، ويتم تعبئتها ببعض الفيتامينات المهمة مثل «ج وهـ» لتضاف إلى مُنتجات تلك اللحوم بغرض رفع قيمتها الغذائية دون أن يفطن المستهلك إلى وجودها. وفي الإطار نفسه، يجري استخدام بعض الأحماض الدهنية الآمنة كمواد حافظة لمنتجات اللحوم المحفوظة حيث توضع داخل الكبسولات نفسها السالف ذكرها، مما يضمن المحافظة على المنتج وثبات ألوانه.

ولم تكن تكنولوجيا النانو غائبة عن التصدي لأعداء صحة الإنسان التقليديين مثل الملح والسكر المعروفين «بالسموم البيضاء». ولعل توافر حبيبات نانوية الأحجام من تلك المنتجات يمثل خبراً ساراً يُسعد الكثيرين من محبي المذاقين؛ الحلو والمالح.

## تطبيقات خارجية:

## إنتاج مواد تعبئة الأغذية وتغليفها

تساعد المواد النانوية على تحسين شروط تعبئة الأغذية وتغليفها وتخزينها، حتى أنه يمكن إضافة روبوتات ذكية تقوم بعمل مختبرات في تحليل الغذاء. ومن تطبيقات التقنية النانوية في إنتاج مواد تعبئة الأغذية وتغليفها:

### أغلفة نشطة

تستخدم تقنيات النانو في إنتاج أغلفة نانوية تتألف من قوالب من البلمرات، يتم التحكم في مقاييس أبعاد فتحات مسامها ولها خواص ميكانيكية ووظيفية جيدة تمكنها من منع حدوث تبادل للرطوبة والغازات مع الوسط الخارجي والتي تؤثر في عملية توزيع المواد الملونة ومواد النكهة والمواد المضادة للأكسدة والإنزيمات والمواد المضادة للتلون البني واستخدامها في تغليف المنتجات الغذائية الطازجة كاللحوم والأجبان والخضار والفواكه وغيرها وحفظها حتى بعد فتح العبوة بمعالجة سطوح العبوات الخارجية بطبقة رقيقة شفافة مضادة للأكسدة يقل سمكها عن 5 نانومترات، وتتميز بكونها عناصر لمواد نانوية آمنة غير سامة متوافقة حيوياً مع الإنسان، فلا تلزم إزالتها عند تناول المنتج الغذائي، ومن أكثر المواد استخداماً (فلز الفضة وأكسيد الزنك وحديثاً تم استخدام الزيوت الطيارة في صور عدة منها المستحلبات النانوية والكبسولات النانوية)، وتتميز تلك المواد بقدرتها على تحليل الملوثات من المواد العضوية والبكتريا ومقاومة الميكروبات التي قد تتراكم على السطوح الخارجية للمنتجات الغذائية خلال فترات الحفظ.

### عبوات حافظة

تستطيع أغلفة هذه العبوات أن تطلق بعض المواد الكيميائية النانوية داخل العبوات كالمواد المضادة لنمو الميكروبات والمواد المضادة للأكسدة والملونات والمدعمات الغذائية داخل الأغذية لإطالة فترة الصلاحية أو تحسين النكهة أو اللون أو القيمة الغذائية، وتطوير عبوات غذائية نانوية يمكنها امتصاص أي نكهات أو روائح غير مرغوبة تنشأ داخلها وإنتاج عبوات تستطيع ضخ غازات ثاني أكسيد الكربون أو الأكسجين إلى خارجها.

## مستشعرات النانو الغذائية

لا يقتصر دور الحبيبات النانوية المُضافة إلى مواد العبوات الغذائية على ما سبق ذكره فحسب، بل إنها تؤدي في الوقت ذاته دوراً مهماً آخر حيث إنها تعمل كحساسات نانوية nanosensors تُوظّف لمراقبة سلامة المنتج الغذائي المُغلف وبيان صلاحيته. وتُعد الحساسات المكونة من حبيبات نانوية الأحجام من أبسط وأرخص الأنواع الكاشفة عن حالة المنتج الغذائي المعبأ وسلامته. وكما يتم استخدام تلك الحساسات البسيطة في اكتشاف أية تغيرات قد تطرأ على الغذاء المحفوظ في الحاويات الخاصة بتبريد الأطعمة والمواد الغذائية وكذلك داخل أماكن عرضها ومنافذ البيع والتوزيع.

وتعتمد فكرة عمل هذه الفئة من الحساسات في اكتشاف وجود الأنشطة البكتيرية والميكروبية على التغير التدريجي الطارئ على ألوان حبيباتها. ونظراً لما تتمتع به الحبيبات المُكونة لتلك الحساسات بمساحة سطوح كبيرة، فإن هذا يجعل منها مُستشعرات شديدة الحساسية تعمل عند أقل تركيزات بكتيرية أو ميكروبية. كما تُضاف إلى حبيبات الحساسات النانوية حبيبات أخرى فائقة النعومة تقوم بمقاومة الأنشطة البكتيرية ومقاومة الأكسدة، مما يزيد من مدد صلاحية المُنتجات الغذائية وبقائها على أرفف منافذ البيع دون تلف.

## سلامة الغذاء المحتوي على مواد نانوية

كما هو الشأن في ما يتعلق بكل المواد الجديدة المستخدمة في الأغذية وفي تجهيزها يلزم تقدير الآثار الصحية والبيئية المحتملة للمواد النانوية الحجم قبل أن يتم استخدامها في الأغذية. وقد يتعرض المستهلكون للمواد النانوية عن طريق استهلاك الأطعمة والمشروبات التي تحتوي على هذه الجزيئات الصغيرة للغاية ذات المساحة السطحية التفاعلية الكبيرة والتي لا تعرف درجة خطورتها على الصحة. وبمجرد امتصاصها في الجهاز الهضمي قد تتراكم بيولوجياً في أعضاء مختلفة من الجسم، مما يؤدي إلى آثار ضارة محتملة؛ لذلك فإن تطبيق تكنولوجيا النانو من مجال صناعة الأغذية هو محل اهتمام الجمهور. وسيعتمد القبول العام للأغذية والمنتجات الغذائية التي تحتوي على مواد نانوية على درجة أمانها الصحي؛ لذلك لن تجني صناعة الأغذية فوائد تقنية النانو إلا إذا تمت معالجة القضايا المتعلقة بالسلامة وكانت الشركات المنتجة للمواد النانوية أكثر انفتاحاً بشأن ما تفعله.

في مارس 2009، نشرت اللجنة العلمية للوكالة الأوربية لسلامة الأغذية رأياً عن علم النانو وتكنولوجيا النانو فيما يتعلق بسلامة الأغذية والأعلاف الحيوانية، وأصدرت اللجنة الأوربية في مايو 2011 وثيقة إرشادية عن كيفية تقييم المخاطر المحتملة المرتبطة ببعض استخدامات تكنولوجيا النانو ذات الصلة بالأغذية، وقدمت توصيات عملية للمنظمين عن كيفية تقييم التطبيقات الصناعية لاستخدام المواد النانوية المهندسة في المضافات الغذائية والإنزيمات والمنكهات والمواد الملامسة للأغذية والأغذية الجديدة والمكملات الغذائية ومضافات الأعلاف ومبيدات الآفات. كما أصدرت إدارة الغذاء والدواء الأمريكية (FDA) مسودة إرشادات لاستخدام الصناعة للمواد النانوية في علف الحيوانات. ومع ذلك، فإن هناك حاجة إلى مزيد من البحث لتحديد تأثير المواد النانوية في الغذاء على صحة الإنسان لضمان السلامة العامة وتحسين التواصل العام بشأن الاستخدام الآمن لهذه المواد في إمداداتنا الغذائية. تم الإبلاغ عن بعض طرق الاختبار لتقييم سلامة المواد النانوية. ومع ذلك، لا توجد حالياً بروتوكولات قياسية مقبولة دولياً لاختبار سمية المواد النانوية في الغذاء أو الأعلاف. وما تزال

المراكز البحثية والمنظمات والسلطات المختصة بالسلامة الغذائية وضمان أمانها ومراقبة جودتها تعمل على تطوير مثل هذه البروتوكولات.

## الاستنتاجات

فوائد استخدام تكنولوجيا النانو في صناعة الأغذية كثيرة ومن المتوقع أن تنمو. تؤثر هذه التكنولوجيا الجديدة السريعة التطور على كل جانب من جوانب نظام الغذاء من الإنتاج إلى المعالجة والتعبئة والنقل ومدة الصلاحية والتوافر البيولوجي. ستنمو التطبيقات التجارية للمواد النانوية في صناعة الأغذية بسبب خصائصها الفريدة والجديدة، وسيزداد باستمرار تعرض الإنسان للمواد النانوية، لذلك فإن التأثير الصحي للمواد النانوية في الغذاء هو مصدر قلق عام رئيسي. تعد القدرة على تحديد كمية المواد النانوية طوال دورة حياة الغذاء أمراً بالغ الأهمية في التصنيع الغذائي وأمان المنتج الاستهلاكي والسلامة الصحية للمستهلك. يعتمد القبول العام للأغذية والمنتجات ذات الصلة بالأغذية التي تحتوي على مواد نانوية على سلامتها الصحية. إن وجود إطار تنظيمي دولي موحد لتقييم تكنولوجيا النانو ضروري لكل من الغذاء وعلف الحيوانات.

*ترجمة: د. زاهر البركة، هيئة الطاقة الذرية السورية.*


- Cuffari B (2015). Nanotechnology in Food. https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=4069.
- Hayes AW, Sahu SC (2017). Nanotechnology in the food industry: A short review. https://www.foodsafetymagazine.com/magazine-archive1/februarymarch-2017/nanotechnology-in-the-food-industry-a-short-review/.
- Sahani S, Sharma YC (2020). Advancements in applications of nanotechnology in global food industry. Food Chemistry p. 128318.
- Shafiq M, Anjum S, Hano C, Anjum I, Abbasi BH (2020). An overview of the applications of nanomaterials and nanodevices in the food industry. Foods 9(2): 148.

# تطور الممرضات وتغير المناخ يهددان محصول القمح بالانقراض

*يعدّ القمح .Triticum L أكثر المحاصيل أهمية من الناحية الاقتصادية والمحصول الأول لمعظم دول العالم؛ فهو يزود العالم بـ 55% من إجمالي الكربوهيدرات و20% من السعرات الحرارية المستهلكة ويحتل 17% من المساحة المزروعة مؤمناً الغذاء لأكثر من بليوني نسمة أي حوالي 40% من عدد السكان. كما يعد القمح من أهم المحاصيل العالمية لتغذية الإنسان، وهو يطحن من أجل استخدامه في صناعة الخبز وحبوب المائدة والمعجنات والبيتزا والحلويات والعديد من ألوان الطعام.*

وفي ظل القلق المتزايد عالميّاً بشأن الأمن الغذائي وتزايُد الطلب على محاصيل الحبوب بسبب النمو المتسارع في عدد السكان من جانب والتغيرات البيئية التي تشهدها الكرة الأرضية من جانب آخر وزيادة متطلبات العالم نحو إنتاج الغذاء كان الدافع الرئيس لتبني طرائق جديدة أسرع وأكثر فعالية وموثوقية لتطوير أصناف محسنة ولزيادة الغلة وتقليل المخاطر التي تهدد هذا المحصول الاستراتيجي. فقد أجرى الباحثون في الصين مسحاً لتشكيل ربط بين الطقس وشدة الوبائية لفطر الفيوزاريوم ودراسة معادلة بين الطقس وشدة الوبائية للأمراض الفطرية على محصول القمح. يعد الطقس مؤشر للتنبؤ بتأثير شدة المرض كما هو الحال بالنسبة للتنبؤ بالطقس المستقبلي المتوقع للفترة من 2020 إلى 2050؛ حيث يتوقع أن تاريخ إزهار القمح سيكون أبكر ومترافقاً فعلياً بزيادة الإصابة بمرض اللفحة المبكرة على محاصيل القمح، إذ يعد الذبول الفيوزاري المبكر مرضاً خطيراً يهاجم نباتات القمح في مناطق عدة من العالم، ويمكن أن يسبب خسائر في محصول القمح عند اشتداد الوبائية إلى أكثر من 60%، وتصبح هذه الخسارة أكبر ضمن ظروف معينة بإنتاج الفطر لسموم كيميائية تعرف بـ ميكوتوكسين.

## تطور الممرضات وآثارها المدمرة على محصول القمح

يعد تطور الممرضات الفطرية وتحول بعض العزلات إلى سلالات شديدة الشراسة أمراً خطيراً كما في مرض صدأ الساق على القمح (UG99)، حيث يترك آثاراً مدمرة حين يصيب المحصول، ويهدد مسبب هذا المرض وهو الفطر *Puccinia graminis* إنتاج القمح في البلدان المنتجة في آسيا الوسطى؛ فهناك أكثر من بليون مواطن في العالم لا يملكون غذاء كافياً، وإن تغير المناخ ووجود هذه الممرضات بالإضافة إلى زيادة نمو السكان هي عوامل تهدد الأمن الغذائي المستقبلي، وتجعل تحسين مكافحة الأمراض الفطرية هدفاً جوهرياً في العالم، وتضع هذا المحصول الاستراتيجي بدائرة الخطر.

تعرض القطر العربي السوري إلى جائحة وبائية بمرض الصدأ الأصفر في عام 2010، مما أظهر عجز جميع الأصناف المحلية للوقوف في مواجهة المرض بإظهار نوع المقاومة، وللأسف، فإن جميع الأصناف المحسنة في سورية بالإضافة إلى الأصناف المدخلة عاجزة عن إبداء أي مقاومة تجاه المرض في الظروف الوبائية المواتية لحدوث المرض وهذا ما حدث عام 2010؛ مما أدى إلى خسارة حوالي 50% من الإنتاج الحبّي نتيجة حساسية الأصناف المزروعة وعدم التدخل بالوقت المناسب بالمبيدات الفطرية.

## تغير المناخ وآثاره السلبية على محصول القمح

أوضح باحثون بجامعة ولاية كانساس Kansas الأميركية، في دراسة نشروا تفاصيلها في «المجلة العلمية لتغير المناخ»، أن إنتاج العالم من القمح خلال عام 2013 بلغ 701 مليون طن، وأضافوا أن ارتفاع حرارة الأرض بمعدل درجة واحدة خلال ذلك العام أدى إلى خسارة 42 مليون طن من الإنتاج الكلي للقمح عالمياً، بتراجع نسبته 6 بالمئة من الإنتاج، وأجرى الباحثون دراسة منهجية على نماذج من محاصيل القمح ضمن 30 عينة ميدانية من جميع أنحاء العالم تم أخذها من المناطق التي تراوح متوسط درجة الحرارة فيها خلال موسم القمح بين 15 و32 درجة مئوية، ووجد الباحثون أن ارتفاع درجات الحرارة أدى إلى تقليص الفترة الزمنية التي تنضج فيها نباتات القمح بشكل سليم، وتنتج الغلال بشكل كامل؛ ما أدى إلى نقص إنتاجها خلال الحصاد، كما وجدوا أن الآثار الناجمة عن تغير المناخ ودرجات الحرارة المتزايدة على القمح ستكون أكثر حدة من المتوقع وسيحدث ذلك في وقت أقرب مما كانوا يتوقعون، ونصحت الدراسة العلماء باتخاذ التدابير اللازمة لمواجهة الارتفاعات المتوقعة في درجات الحرارة خلال العقود المقبلة، بسبب تفاقم التغيرات المناخية على هذا المحصول.

*ترجمة: م. إياد الشحادة، هيئة الطاقة الذرية السورية.*

https://www.sciencedaily.com/releases/2014/02/140226125252.htm

https://smsa.yoo7.com/t57-topic

# هل يمكن للممرضات النباتية أن تقفز إلى الحيوان والإنسان؟

*عدت قدرة الممرضات النباتية على إحداث أمراض في أنظمة الإنسان والحيوان، حتى وقت قريب ذات أهمية ثانوية. ومع ذلك، ذكر كيم وآخرون عام 2020 حديثاً أن هناك دلائل حديثة على اكتشاف إصابات حيوانية وبشرية تسببها الفطريات والبكتريا والفيروسات المسببة للأمراض النباتية والتي قد يكون لها آثار خطيرة على صحة الإنسان والحيوان. وعلى الرغم من المسارات التطورية المتباينة للممرضات النباتية والحيوانية، فقد ظهرت مؤخراً أدلة على عدوى الحيوانات التي تسببها العوامل الممرضة النباتية أو العكس؛ وتشمل هذه العوامل بعض أنواع من الأجناس Pantoea وBurkholderia وRhizobium وPseudomonas، التي يمكن أن تسبب جميعها أمراضاً حيوانية على الرغم من أنها تُعرف في المقام الأول بإسم عوامل ممرضة نباتية. وبشكل مشابه، ذكر بارك وآخرون عام 2011 أن هناك بعض أنواع السالمونيلا التي تعد بشكل أساسي من العوامل الممرضة الحيوانية قادرة أيضاً على إصابة العوائل النباتية.*

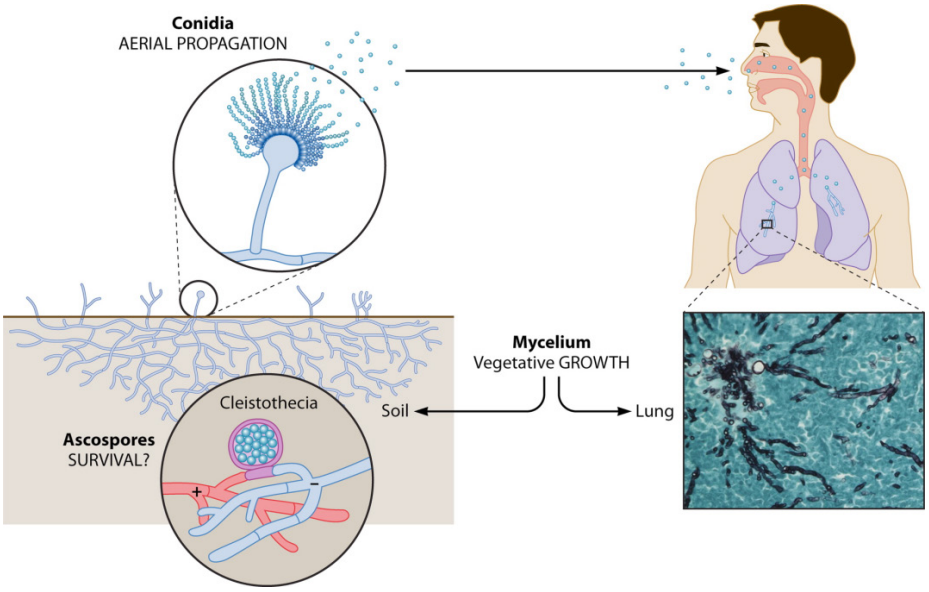
تم تصنيف مسببات الأمراض تاريخياً على أنها من مسببات الأمراض النباتية أو مسببات الأمراض الحيوانية وفقاً لخصائص مضيفها. ومع ذلك، فإن هذا المصطلح لا يصف بشكل كاف مسببات الأمراض التي يمكن أن تصيب العوائل من كلا المملكتين النباتية والحيوانية. يعد النهج الحالي المتمحور حول الإنسان أن الممرضات القادرة على إصابة و/أو التسبب في المرض لدى البشر من مسببات الأمراض البشرية، بغض النظر عن قدرتها على إصابة الكائنات الحية الأخرى.

والسؤال الأكثر أهمية هو: إذا أصابت مسببات الأمراض الفطرية للنبات البشر، فهل يمكن أن تؤدي إلى ظهور مرض من الصعب التعرف عليه أو تشخيصه خطأ على أنه مرض مجهول السبب؟ وجد أن هناك علاقة وثيقة بين بعض مسببات الأمراض الفطرية للنبات والحيوان ووجود شبه تطابق بين جينات الطرفين. علاوة على ذلك، تشير أعداد متزايدة من الدراسات إلى أنه يمكن اكتشاف مسببات أمراض نبات لدى الثدييات البشرية وغير البشرية حيث أن هناك بيانات تجريبية توضح دخول الفطريات النباتية إلى خلايا هذه الثدييات وأنسجتها، لذلك سيتم هنا التركيز على العوامل الممرضة الفطرية النباتية الخطيرة على الحيوان والإنسان.

تضم المملكة الفطرية ما يصل إلى 6 ملايين نوع وهي بالغة الأهمية من حيث اتساع تأثيرها وعمقه على الصحة العالمية والزراعة والتنوع البيولوجي والبيئة والتصنيع والبحوث الطبية الحيوية، حيث يرتبط أكثر من 600 نوع من الفطريات بالبشر. يعد الأفراد الذين

يعانون من ضعف في جهاز المناعة أكثرهم عرضة للخطر، ولكن الأفراد الأصحاء معرضون لخطر الإصابة بمسببات الأمراض المعروفة والناشئة، خاصة في الحالات التي تنطوي فيها العدوى على وجود عدد كبير من أبواغ الفطر المعدية. ومع الزيادة العالمية في حدوث العدوى الفطرية الغازية invasive وظهور وانتشار مسببات الأمراض الفطرية المقاومة لجميع الفئات الحالية من مضادات الفطريات، فإن هذه الكائنات تشكل تهديداً قوياً على صحة الإنسان. وبالتالي يتعرض البشر والحيوانات يومياً لكوكبة ضخمة من الأبواغ الكونيدية الفطرية النباتية من خلال عدد لا يحصى من الطرائق. إنه من المتفق عليه تاريخياً وتقليدياً وجود فصل صارم بين مسببات الأمراض الفطرية للنبات والفقاريات فيما يتعلق بنطاق مضيفها ومدى إمراضها حيث كان يُعتقد أن فطريات النبات تصيب النباتات فقط، لكن على الرغم من هذا الاعتقاد فإن هناك العديد من الأمثلة لمسببات الأمراض الفطرية المنتشرة في النباتات تم اكتشافها أيضاً في البشر والحيوانات.

تسبب بعض الفطريات التي تصيب الإنسان والحيوان أمراضاً مختلفةً فقد تصاب الرئتين والحلق والأذن والجلد والشعر بأنواع من الأسبرجلس aspergillus وغيرهـــا. يشمل جنس الأسبرجلس مئات عديدة من أنواع العفن منتشرة في جميع أنحاء العالم، حيث نتعرض جميعاً لأبواغ الأسبرجلس عبر مكيفات الهواء والسماد العضوي وفي الأماكن الرطبة. يصاب الناس عموماً بالمرض المتسبب من الأسبرجلس عندما يكون لديهم جهاز مناعي ضعيف أو رئة تالفة أو حساسية شديدة (الشكل 1).




**الشكل 1.** فطر الأسبرجلس الذي يصيب النبات والإنسان عبر أبواغه الكثيفة.

كما تسبب بعض الفطريات الممرضة النباتية تسمماً للإنسان والحيوان مثل الفطر كلافيسبس بوربوريا وغيره حيث تؤدي إلى انحلال الأعصاب أو شلل للجهاز العصبي الرئيسي أو التسمم الدموي، كما أن كثيراً من هذه الفطريات تنتج سموماً ثبت أن لها علاقة بحدوث سرطان لدى الإنسان، كما وجد أن بعض أنواع فطر الأسبرجلس تفرز السموم الفطرية بما يعرف بالأفلاتوكسينات في الحبوب المخزونة أوأثناء الحصاد مما ينتج عنها تسمماً للإنسان والحيوان عند تغذيته على مثل هذه الحبوب (الشكل 2).

**الشكل 2.** فطر الأسبرجلس الذي يصيب النبات والحيوان.

كما أن ممارسة العديد من المهن المعينة قد تؤدي إلى التعرض لمسببات الحساسية الفطرية النباتية ومن ثم مشاكل في الرئة؛ ومن الأمثلة على ذلك تضرر رئة المزارع بسبب التعرض للبنسليوم في القش الرطب، ورئة مزارع العنب بسبب التعرض لفطر botrytis، ورئة عاملي التبغ بسبب التعرض للأسبرجلس في المَزارع. كما يؤثر التهاب الجيوب الأنفية الفطري التحسسي (ARFS) على حوالي 12 مليون شخص على مستوى العالم وذلك من خلال عدوى الجهاز التنفسي بأبواغ الفطريات النباتية المتنوعة مثل *A. fumigatus* و*A. flavus* و*Bipolaris spicifera* و*Curvularia lunata* و*A. alternata*، مما يؤدي إلى انسداد الأنف والأورام الحميدة والضعف في الرؤية.

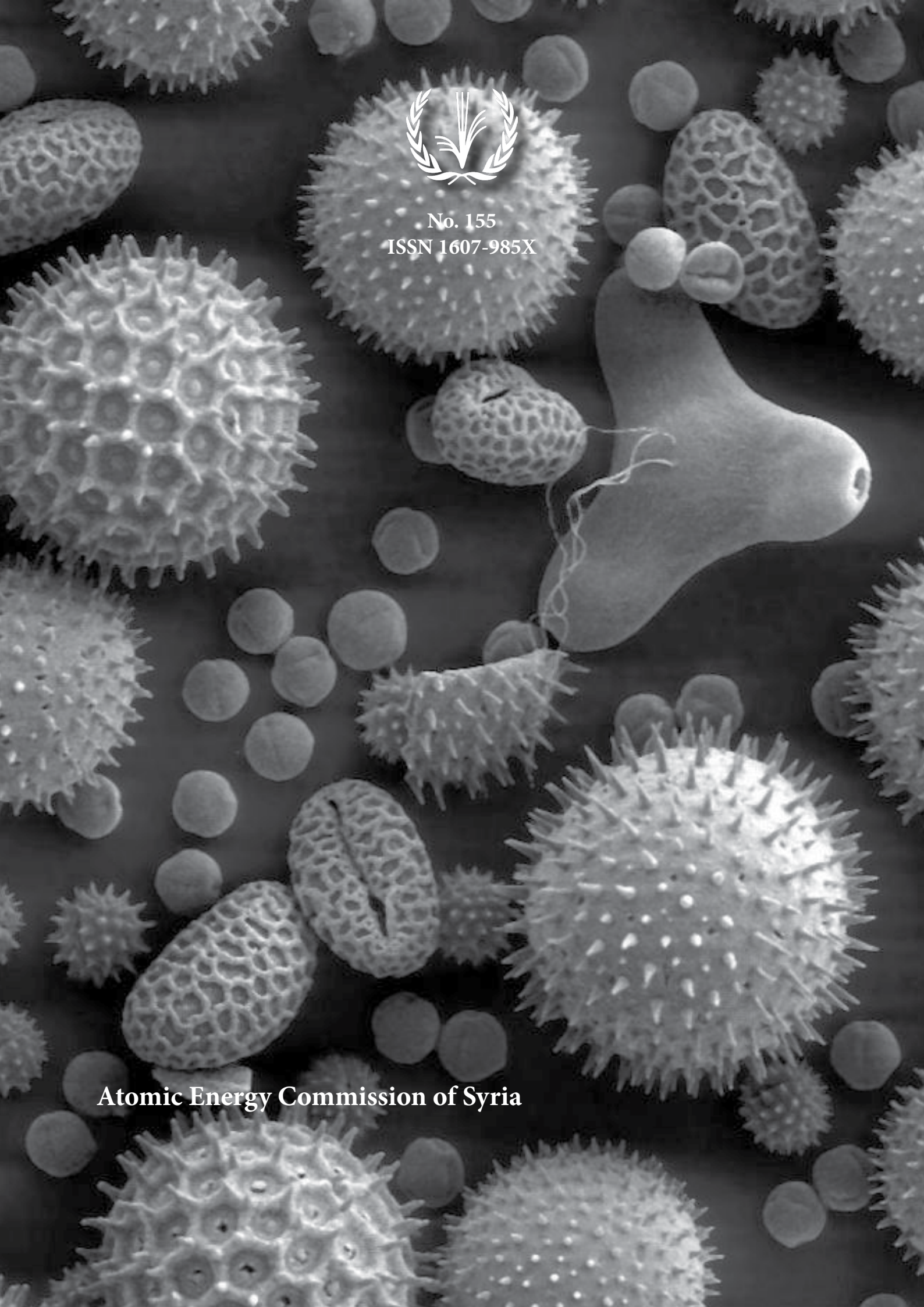
## أهمية المتابعة المستقبلية للممرضات النباتية

إن احتمال أن تكون الأمراض الحيوانية والبشرية ناجمة عن مسببات أمراض نباتية هو مفهوم جديد يثير أسئلة جدية فيما يتعلق بميل مثل هذه العدوى إلى الحدوث في الأفراد الأصحاء والذين يعانون من نقص المناعة. وعلى الرغم من وجود حالات عدوى كثيرة بمسببات الأمراض النباتية في الطبيعة والبيئات الزراعية والمستشفيات والمنازل، إلا أن مدى انتشار هذه العدوى في عموم السكان غير واضح؛ إذ تستهلك الحيوانات والبشر بشكل يومي أنسجة النباتات حيث تقوم بهضمها في المعدة عند درجة حموضة منخفضة؛ حوالي الرقم الهيدروجيني 2 الذي يعد خط دفاع رئيسي ضد الميكروبات المهاجمة. فقد كان يُعتقد حتى القرن العشرين بأن الظروف البيئية القاسية كانت كافية لمنع العدوى الميكروبية وانتقالها إلى الجهاز الهضمي، لكن وفقًا لدراسات حالية فإن العدوى البشرية والحيوانية يمكن أن تنتج عن طريق الجلد التالف أو المسار التنفسي، ولذا، فإن اضطراب المناعة لدى الحيوان والإنسان يسهل لهذه الممرضات تطوير استراتيجيات عدوى متخصصة للتلاؤم مع المضيف.

هدفنا هنا زيادة الوعي والحذر من أن تهديدات الممرضات النباتية عامة والفطرية منها خاصة تتفاقم وأنه في حال أصابت مسببات الأمراض النباتية المعروفة بـ phytonoses البشر والحيوانات فقد تساهم في ظهور مرض لا يمكن التعرف عليه أو تشخيصه بشكل خاطئ. وقد أكدت جائحة COVID–19 الحالية مدى عدم استعدادنا نحن البشر في مكافحة الأمراض حيوانية المنشأ لذلك يجب أن نفكر في الوقت نفسه بخطوة للأمام وهي: كيف يمكننا تجنب الأوبئة الأخرى التي قد تنشأ عن الممرضات النباتية في المستقبل دون تعطيل إمداداتنا الغذائية؟

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

- Kim JS,Yoon SJ, Park YJ,Kim SY,Ryu CM (2020). Crossing the kingdom border: Human diseases caused-by plant pathogens. Environmental Microbiology 22(7): 2485-2495.
- One Health:Fungal pathogens of humans, animals, and plants: Report on an American Academy of Microbiology Colloquium held in Washington, DC, on October 18, 2017. Washington (DC): American Society for Microbiology; 2019. Available at: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK549988.



No. 155
ISSN 1607-985X

Atomic Energy Commission of Syria