



AECS

# عالم الذرة

AECS

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

AECS

## المدير المسؤول

أ. د. إبراهيم عثمان

المدير العام لهيئة الطاقة الذرية

AECS

## رئاسة هيئة التحرير

أ. د. عادل الحرفوش

أ. د. محمد قعقع

AECS

## أعضاء هيئة التحرير

أ. د. فواز كرد علي

أ. د. مصطفى حمو ليلا

أ. د. علي حنون

أ. د. توفيق ياسين

أ. د. نزار مير علي

أ. د. نجم الدين الشرابي

أ. د. زهير قطان

AECS

AECS

AECS

## المتابعة والتنسيق

حسان بقلعة

## التنفيذ الضوئي

هنادي كنفاني

غفران ناوروز

## الإخراج الفني

بشار مسعود

مهند البيضة

أمل قيروط

## التدقيق اللغوي

نوال الحلح

ريما سنديان

AECS

AECS

# المحتويات

إعادة تدوير الوقود ومفاعلات  
الجيل الرابع

45

الحلول الرئيسية للتصميم  
والتنظيم

55

حُدود المعرفة

62

## أخبار علمية

- 70 ..... صحيفة ترانزستور سلك نانوي حساسة  
بالمس كالجلد البشري
- 72 ..... مغاوير الأرشيف المفقود
- 75 ..... مواد كيميائية عضوية مُلوّثة للبيئة ...  
أخطر ما صنعه الإنسان
- 78 ..... الموجات الراديوية تقيس التغيرات الحرارية  
للغلاف الجوي
- 80 ..... أولى جزيئات غاز نبيل وجدت في الفضاء

نافذة على عناصر الجدول الدوري:

الرادون ..... 82

## مقالات



مسرّع السنكروترون من أجل  
التطبيقات والعلوم التجريبية  
في الشرق الأوسط SESAME

5



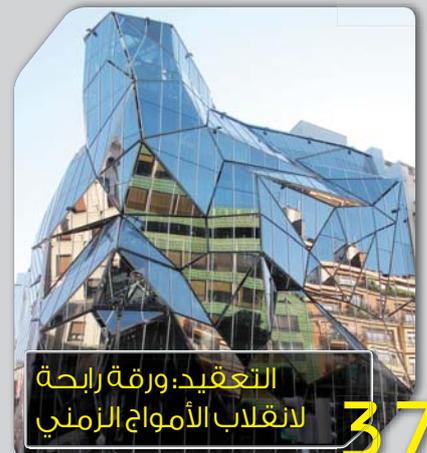
مفاعلات  
فلوريد الثوريوم السائل

15



الموجات الكهربائية ضمن  
الدماغ

28



التعقيد: ورقة رابحة  
لانعقاد الأمواج الزمنية

37

## ورقات علمية

- 91 إصدار حاملات الشحنة من العيوب في السليسيوم اللابلوري المهدرج الذاتي ..... التطعيم مدروسة بطرق سعة الوصلة
- 91 استخراج كثافات الطيف الضجيجي (المساهمات الذاتية والناجمة عن التشيع) ..... لمضخم شحنة مبني على أساس ترانزستور JFET
- 91 التحقق من صلاحية قياسات مطيافية غاما الحقلية ومطيافية غاما ..... المخبرية لتعيين  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$   $^{137}\text{Cs}$  في التربة
- 92 تأثير زمن التنميش في الخواص الضوئية والبنوية الجديدة لزرنخيد الغاليوم المسامي ..... (porousGaAs) المتشكل بطريقة التنميش الأنودي لـ  $n^+\text{-GaAs}$  في الكهرليت  $\text{HF}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$
- 92 تأثير طلي النيكل اللاكهربائي المتعدد على خشب الزان: تحضير وتوصيف
- 93 تأثير قناة ارتباط متجه الأيزو على الجزء الجهري لطاقة الارتباط النووي
- 93 تحديد اليورانيوم 238 في عينات البول لعمال الصناعة الفسفاتية باستعمال مطيافية ألفا
- 93 تشكّل البنية المسامية على سطح السليكون المعالج بجهاز البلازما المحرّقة
- 94 دراسة أثر الحرارة على أغشية رقيقة من خليطة التيتانيوم ..... -الألمنيوم- الفاناديوم (TiAlV) الموضوععة بتقنية بلازما انفرغ القوس الكهربائي
- 94 امتصاص الـ  $^{226}\text{Ra}$  من محاليل نفايات النفط على مبادلات كاتيونية صناعية

## تقارير علمية

- 95 استخدام جفيف الطحالب الحمراء في معالجة المياه الملوثة بالنكليدات المشعة ..... وبعض العناصر النزرة
- 95 استنسال وتوصيف مورثات أنزيمات اللاكتونيز من عزلات بكتيرية محلية تابعة للجنس *Bacillus sp.*
- 96 إعداد برنامج حاسوبي لتقدير الاستجابة الزلزالية في الأبنية - تطبيق على مبنى قسم الجيولوجيا
- 96 الاصطناع العضوي لبعض البوليستيرات مخبرياً ودراسة خصائصها الفيزيائية والكيميائية لإمكانية استخدامها في تحضير بعض المتراكبات
- 96 التوصيف الجزيئي لبعض الطرز الوراثية لنبات دوار الشمس باستخدام معلومات الـ RAPDs والـ ISSRs
- 97 برنامج نظام معلومات التعرض المهني الإشعاعي الداخلي في سورية (سوريس)
- 97 تحري آليات التغذية في النظم الكارستية عبر دراسة علاقة المحتوى النظائري والكيميائي لمياه الأمطار والينابيع: دراسة حالة نبعي الفيحة وبردي
- 98 تصميم نظام متقدم للمعالجة التفرعية وتنفيذه
- 98 تقصي متبقيات المبيدات الكلورية العضوية في الرسوبيات وبعض الرخويات في ساحل طرطوس
- 99 عزل الخلايا الجذعية اللحمية المتوسطة من نقي عظم الجرذ وزراعتها



- ترسل نسختان من مادة النشر باللغة العربية مطبوعتان بالآلة أو مكتوبتان بالحبر بخط واضح على وجه واحد من الورقة، وبفراغ مضاعف بين السطور.
- يُكتب على ورقة مستقلة عنوان مادة النشر واسم الكاتب وصفته العلمية وعنوانه مع ملخصين لها أحدهما بالعربية والآخر باللغة الإنكليزية حصراً، في حدود عشرة أسطر لكل منهما، ويطلب من كل من المؤلف أو المترجم كتابة اسمه كاملاً، باللغتين العربية والأجنبية، ولقبه العلمي وعنوان مراسلته.
- يُقدم المؤلف (أو المترجم) في ورقة مستقلة قائمة بالعبارات التي تشكل الكلمات المفتاحية "Key Words" (والتي توضح أهم ما تضمنته المادة من حيث موضوعاتها وغايتها ونتائجها والطرق المستخدمة فيها) وبما لا يتجاوز خمس عبارات باللغة الإنكليزية وترجمتها بالعربية.
- إذا سبق نشر هذا المقال أو البحث في مجلة أجنبية، ترسل الترجمة مع صورة واضحة عن هذه المادة المنشورة ويستحسن إرسال نسخة الأصل المطبوع والأشكال (الرسوم) الأصلية إن وجدت، ولو على سبيل الإعارة.
- إذا كانت المادة مؤلفة أو مجمعة من مصادر عدة، يذكر الكاتب ذلك تحت العنوان مباشرة كأن يقول "تأليف، جمع، إعداد، مراجعة" وترفق المادة بقائمة مرقمة للمراجع التي استقاها منها.
- إذا تضمنت المادة صوراً أو أشكالاً، ترسل الصورة الأصلية وكذلك الأشكال مخططة بالحبر الأسود على أوراق مستقلة، إلا إذا كانت موجودة في المادة المطبوعة بلغة أجنبية (كما جاء في الفقرة "4") مرقمة حسب أماكن ورودها.
- يُرسل مع المادة قائمة بالمصطلحات العلمية العربية المستخدمة فيها مع مقابلاتها الأجنبية إذا لم تكن واردة في معجم الهيئة للمصطلحات العلمية والتقنية في الطاقة الذرية الذي تم نشره في أعداد المجلة (18-2).
- تكتب المصطلحات وكذلك أسماء الأعلام باللغتين العربية والأجنبية عند ورودها في النص أول مرة ومن ثم يكتفى بإيراد المقابل العربي وحده سواء أكان هذا المقابل كاملاً أو غير كامل وتستعمل في النص المؤلف أو المترجم الأرقام العربية (1، 2، 3) أينما وردت مع مراعاة كتابتها بالترتيب العربي من اليمين إلى اليسار وإذا وردت في نص معادلة أو قانون أحرف أجنبية وأرقام نكتب المعادلة أو القانون كما هي في الأصل الأجنبي.
- يُشار إلى الحواشي، إن وجدت، بإشارات دالة (\*، +، x، ...) في الصفحة ذاتها، كما يشار في المتن إلى أرقام المصادر والمراجع المدرجة في الصفحة الأخيرة، وذلك بوضعها ضمن قوسين متوسطين [ ] .
- ترقم مقاطع النص الأجنبي والنص العربي بترتيب واحد في حالة الترجمة.
- يرجى من السادة المترجمين مراعاة الأمانة التامة في الترجمة.
- تخضع مادة النشر للتقييم ولا ترد إلى أصحابها نشرت أم لم تنشر.
- يمنح كل من الكاتب أو المترجم أو المراجع مكافأة مالية وفق القواعد المقررة في الهيئة.

## جميع المراسلات توجه إلى العنوان التالي:

الجمهورية العربية السورية  
هيئة الطاقة الذرية - مكتب الترجمة والتأليف والنشر  
دمشق - ص.ب: 6091  
هاتف: 11 6111926 (+963) - فاكس: 11 6112298 (+963)  
E-mail: tapo@aec.org.sy

## رسوم الاشتراك السنوي

- ◀ يمكن للمشاركين من خارج القطر إرسال رسم الاشتراك إلى العنوان التالي:
- المصرف التجاري السوري - فرع رقم 13 - مزة جبل - دمشق - ص.ب: 16005، رقم الحساب 2/3012.
- أو بشيك باسم هيئة الطاقة الذرية السورية.
- ◀ يمكن للمشاركين من داخل القطر دفع قيمة الاشتراك بحوالة بريدية على العنوان التالي:
- مجلة عالم الذرة - مكتب الترجمة والتأليف والنشر - هيئة الطاقة الذرية السورية - دمشق - ص.ب: 6091 مع بيان يوضح عنوان المراسلة المفضل.
- أو يدفع رسم الاشتراك مباشرة إلى مكتب الترجمة والتأليف والنشر في الهيئة: دمشق - شارع 17 نيسان.

- ◀ رسم الاشتراك من داخل القطر: للطلاب (200 ل.س، للأفراد (300 ل.س، للمؤسسات (1000 ل.س.
- ◀ رسم الاشتراك من خارج القطر: للأفراد (30 دولاراً أمريكياً، للمؤسسات (60 دولاراً أمريكياً.

## سعر العدد الواحد

سوريا: 50 ل.س	مصر: 3 جنيهات
لبنان: 3000 ل.ل	الجزائر: 100 دينار
الأردن: 2 دينار	السعودية: 10 ريات
وفي البلدان الأخرى: 6 دولارات	

## الإعلانات

- تود مجلة عالم الذرة إعلام الشركات والمؤسسات العاملة في قطاع التجهيزات العلمية والمخبرية كافة والصناعات المتعلقة بها عن فتح باب الإعلان التجاري فيها، للمزيد من الاستفسار حول رغبتكم بنشر إعلاناتكم التجارية يرجى الكتابة إلينا أو الاتصال بنا وفق العنوان الوارد أعلاه.

- يُسمح بالنسخ والنقل عن هذه المجلة للاستخدام الشخصي بشرط الإشارة إلى المرجع، أما النسخ والنقل لأهداف تجارية فغير مسموح به إلا بموافقة خطية مسبقة من الهيئة.

# مسرّع السنكروترون من أجل التطبيقات والعلوم التجريبية في الشرق الأوسط

## SESAME

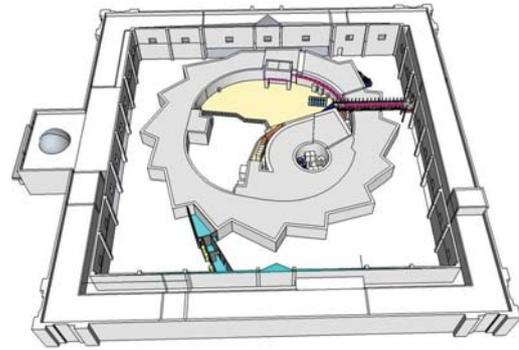
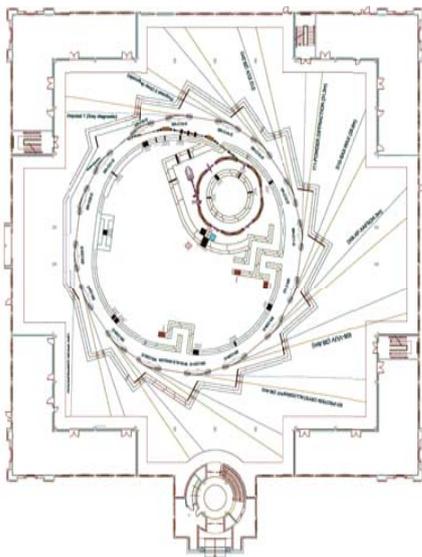
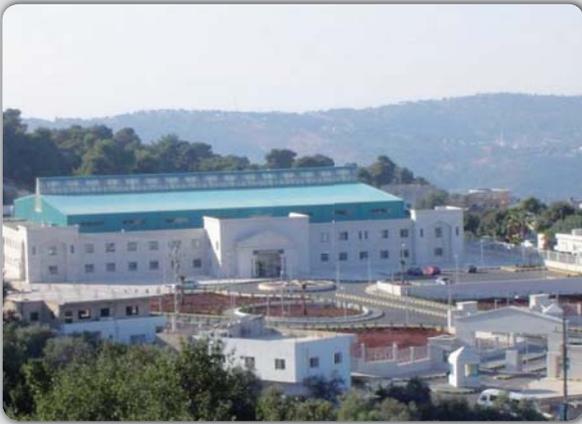
### آفاق وتحديات

بعد عقد ونيّف من الزمن من أعمال التخطيط والبناء، أصبح في الشرق الأوسط كيانٌ لمسرّع سنكروتروني، موجود على الأرض من حيث الهيكلية الإدارية والبناء والتجهيزات الأساسية. ويُتوقع وفقاً لأحدث خطة للتركيب والتشغيل أن يدخل في نطاق العمل والاستثمار في نهاية عام 2015. يعد هذا المشروع من المشاريع العملاقة، وهو الأول من نوعه في الشرق الأوسط، كمنظمة علمية تجمع عدة بلدان *intergovern-mental organization (IGO)* في مشروع تعاون علمي تحت رعاية اليونيسكو، كأول منظمة دولية تبنت رعاية هذا المشروع. ففي الدول المتقدمة مشاريع علمية رائدة ونموذجية في التعاون العلمي الدولي من أجل بناء المسرّعات واستثمارها، أشهرها "سيرن" في سويسرا. والدول الأعضاء المشاركة حالياً في مشروع الشرق الأوسط (سيزام) هي (حتى 2012): الأردن والبحرين وإيران والكيان الصهيوني والسلطة الفلسطينية والباكستان وتركيا ومصر وقبرص والدول المراقبة هي: فرنسا وألمانيا واليونان وإيطاليا واليابان والكويت والبرتغال وروسيا الاتحادية والسويد وسويسرا والولايات المتحدة الأمريكية وبريطانيا.

الكلمات المفتاحية: مسرّع السنكروترون، المسرّع سيزام، تطبيقات السنكروترون.

**Key words:** Synchrotron accelerator, intracellular synaptic, extracellular synaptic.





بانوراما لبناء المسرع من الخارج مع صورة حقيقية للموقع (في الأعلى) ومخطط المسرع والحزم الضوئية في داخل البناء (في الأسفل)

بين المستخدمين العلميين الذين سيعملون معاً في مشروع SESAME، مع احترام مبدأ المساواة وتكافؤ الفرص دون أي تمييز على أساس عرقي أو ديني، سعياً لتحقيق مبدأ العلم من أجل السلام. كما يهدف هذا المشروع من دون شك إلى السماح باستقطاب الكفاءات العلمية إلى المنطقة، وعدم تسرب الخبرات منها إلى الدول المتقدمة.

### اكتشاف الأشعة السنكروترونية

إن اكتشاف الإنسان للأشعة السنكروترونية في النصف الثاني من القرن العشرين جاء نتيجة دأب العلماء على البحث والتطوير في مجال تسريع الجسيمات. إن ما يميز به الإنسان من سواه من الكائنات الحية، هو ما لديه من ملكة السعي لفهم المادة المحيطة به ودراستها، وهي بدون شك ميزة تحليلية فريدة. وقد أدرك الإنسان في عهد الإغريق وجود جسيمات صغيرة لا يمكن رؤيتها أُطلق

يشتهر الشرق الأوسط عند الدول الغربية وفي حكايا الشعوب بقصة علي بابا وعبارة افتح يا سمسم التي تفتح الباب على كنوزٍ وفيرة. ولا شك أن هذه القصة كانت مُلهمةً لتسمية مسرع الشرق الأوسط للأشعة (الضوء) السنكروترونية من أجل التطبيقات والعلوم التجريبية في الشرق الأوسط باسم "سمسم" (SESAME) لعله يفتح الباب على كنوز العلم والمعرفة. وهذه الكلمة هي الأحرف الأولى من العبارة "Synchrotron-light for Experimental Science and Applications in the Middle East". يهدف هذا المشروع، من حيث المبدأ، إلى تمكين إجراء أبحاث على مستوى علمي عالٍ في الدول الأعضاء، في مواضيع علمية متنوعة كالعلوم البيولوجية والطبية وعلوم المواد والفيزياء والكيمياء والعلوم الأثرية. كما يهدف، من جهةٍ أخرى، إلى بناء جسور العلم والثقافة بين الدول المتجاورة، بغية التفاهم والتسامح المتبادل من خلال التعاون الدولي، وتعزيز العمل الإقليمي المشترك ما

للالكترونات، بواسطة حقل كهربائي متزايد على طول المسرع الخطي. ثم تحقن الإلكترونات المُسرَّعة لتدور في حلقة أولية تدعى حلقة التعزيز Booster، فتهيأ الإلكترونات فيها قبل عملية حقنها في حلقة السنكروترون الأكبر (حلقة التخزين). توجد مجموعة من المغناط موضوعة على حلقة المسرع هذه، عملها هو حرف الإلكترونات عن المسار المستقيم بحيث تبقى مأسورة ضمن الحلقة لساعات عدة. تصدر الإلكترونات أشعة السنكروترون (ضوء سنكروتروني) من داخل الحلقة لدى الانحراف عن مسارها بفعل حقل مغنطيسي متولد من أحد مغناط الحرف (Bending Magnets) أو المُموجات (Undulator) أو المُذبذبات (Wiggler). يكون لهذه الأشعة الكهرطيسية طاقة يمتد مجالها من الأشعة تحت الحمراء إلى الأشعة السينية. توضع خطوط حزم ضوئية حول الحلقة بدءاً من المغناط لتسيير الأشعة الصادرة وانتخاب الأطوال الموجية (مجال الطاقة) تبعاً للتطبيقات والاستخدامات المخطط لها في كل خط من خطوط الحزم الضوئية. ومنذ اكتشافها عام 1940، أصبحت الأشعة السنكروترونية أحد أهم مصادر الأشعة الكهرطيسية وتحديداً الأشعة السينية المستخدمة في تحليل بنى جزيئية معقدة كالبروتينات.

### مسرع الشرق الأوسط تاريخياً؛

ولدت فكرة مشروع هذا المسرع السنكروتروني في الشرق الأوسط في عام 1997 عندما قرّرت ألمانيا البدء ببناء مسرّعها السنكروتروني الجديد BESSY II بدلاً من مسرّع BESSY I وإهداء هذا الأخير إلى دول الشرق الأوسط، ليكون نواة مركز تعاون علمي على نمط مشاريع التعاون العلمية الأوروبية وكذلك مركز عبد السلام الدولي للفيزياء النظرية ICTP في إيطاليا. فقامت مجموعة من العلماء من مركز فيزياء الجسيمات في المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية في جنيف (CERN) باقتراح فكرة الموضوع على اليونسكو لتكون المنظمة الراعية وتقوم بالتنسيق والمباحثات مع الدول والحكومات المعنية. اقتُرحت الأردن في عام 2000 لاستضافة مركز المسرع وقدمت المكان المناسب بمساحة 6200 م<sup>2</sup> بالقرب من جامعة البلقاء على بعد 30 كم إلى الشمال الغربي من العاصمة عمان. أعلن اليونسكو في 2002-05-31 انطلاق مشروع مسرع السنكروترون ليكون أول مشروع من نوعه للتعاون الإقليمي في الشرق الأوسط في مجالات العلوم الأساسية والتطبيقية. وأهم التطبيقات المرجوة هي التحاليل الدقيقة لأهداف طبية وصيدلانية والبنى البيولوجية الجزيئية وتوصيف المواد والسطوح والتحليل البيئية والآثار والتصوير بالأشعة السينية وسواها من تطبيقات طبية وسريية.

عليها اسم الذرات. وكان لاكتشاف الإلكترونات في الذرات أواخر القرن التاسع عشر، وهي أحد أهم الجسيمات المكتشفة في الذرة على الإطلاق، الأثر الأهم في التطور الحضاري الذي نشهده اليوم. إذ إن لهذه الجسيمات علاقة بكل الظواهر الفيزيائية والكيميائية الموجودة في الطبيعة. فالكهرباء ما هي إلا حركة الإلكترونات في الأجسام الناقلة بتأثير حقل كهربائي. والأشعة الكهرطيسية التي هي أساس التطور الراهن في المجالات الممتدة من الاتصالات وحتى التطبيقات الطبية المستخدمة للأمواج الراديوية والمكروية وصولاً حتى الأشعة السينية، ما هي أيضاً إلا نتيجة اهتزاز أو حركة الإلكترونات. وخلال القرن العشرين كان التطور التقني في مسرعات الجسيمات كالإلكترونات والبروتونات الأثر البالغ في فهم ماهية المادة وسلوكها، من خلال اكتشاف البنية الذرية والعديد من الجسيمات المكونة للنواة فيها. وأحد أهم الاكتشافات في أواسط القرن العشرين، هو محدودية الطاقة التي يمكن أن تبلغها الإلكترونات المسرّعة في المسرعات الدائرية أو الحلقية، وذلك على الرغم من ازدياد قيمة الجهد المبذول من أجل زيادة طاقتها أو سرعتها. فقد تبين لاحقاً أن ذلك ما هو إلا نتيجة فقدان الإلكترونات لطاقتها الحركية على شكل إشعاعات كهرطيسية عندما تنحرف عن مسارها المستقيم بواسطة حقل مغنطيسي. سميت هذه الإشعاعات الصادرة عن انحراف الجسيمات المشحونة والمسرّعة إلى طاقات عالية بالأشعة السنكروترونية. وبنيت مسرعات لغاية استثمار هذه الأشعة، هي المسرعات السنكروترونية التي نعرفها اليوم. وتتالت الأبحاث والخبرات في فهم وتحديد شدة الإشعاع واتجاهه بالنسبة لاتجاه الإلكترونات والمجال الطيفي الناتج عن ذلك، فتيبين أن استطاعة الأشعة الصادرة تزداد طردياً مع ازدياد القوة الرابعة لطاقة الإلكترونات وأن الأشعة متمركزة باتجاه حركة الإلكترونات. ومن ثم أمكن الحصول على أشعة كالأشعة السينية بشدة لا يمكن بلوغها من أي مصدر آخر معروف. وأصبحت الحاجة لمسرعات السنكروترون فقط كمصدر للأشعة ضرورة في مجالات الأبحاث الأساسية وكذلك التطبيقية والصناعية. وبُني اعتباراً من عام 1980 العديد من المسرعات لهذا الغرض وحسب.

### المبدأ التقني للمسرعات السنكروترونية

يتألف المسرع السنكروتروني SESAME كأي مسرع سنكروتروني آخر، من أنبوب حلقي مملئ من الهواء تدور فيه إلكترونات (كما يمكن استخدام أي جسيم آخر مشحون كالپوزيترونات) بسرعة عالية تقترب من سرعة الضوء. ويسمى هذا الأنبوب بحلقة التخزين (storage ring). يستخدم في المرحلة الأولى مسرع خطي لتسريع الإلكترونات، انطلاقاً من منبع مصدر

4- حلقة التخزين (Storage Ring): تزود حلقة التعزيز الإلكترونيات إلى حلقة التخزين التي يتفرع عنها أنابيب مغلقة من الهواء أو من أي ذرات يمكن أن تشتت الحزم الإلكترونية الدائرة في الحلقة. تتحكم برامج حاسوبية بثبات واستقرار الحزمة في الحلقة. تتولد الأشعة السنكروترونية عند انحراف الإلكترونات عن مسارها بواسطة المغناطيس. تتصل حلقة التخزين بأنابيب أو خطوط الحزم السنكروترونية انطلاقاً من المغناطيس في الحلقة وتنتهي بمحطات تجريبية. يحتوي كل خط حزمة ضوئية على مجموعة من أجهزة الترشيح والتحكم بطول الموجة والشدة وفقاً لشروط التجربة المعنية في المحطة التجريبية.

5- تبيير الحزمة (Focusing the beam): إن الحفاظ على استقرار الحزمة أمر غاية في الأهمية عندما تكون المواد المدروسة بأبعاد ما دون النانومتر. وهذا يتطلب تحكماً حاسوبياً دقيقاً بمغانط رباعية وسداسية الأقطاب. وهي الأدوات المستخدمة في تبيير الحزم الإلكترونية في داخل حلقة التخزين بشكل دقيق ومستقر.



الشكل 1

بكثير. فنظراً للحاجة لتطبيقات المسرّع وفق إمكانيات متقدمة ومواكبة للمستوى العالمي، اتُخذ القرار في اجتماعات المجلس المؤقت للدول الأعضاء 2001-2002 بتحديث التصاميم ومواصفات المسرّع إلى الجيل الثالث من مسرّعات السنكروترون، ليكون من الأجيال المتقدمة بمواصفات تضاهي مثيلاتها في معظم مسرّعات الدول المتقدمة. يبيّن الجدول التالي الرساميل التي تبلغ 66 مليون دولار أمريكي تقريباً تكاليف بناء وتشغيل المسرّع حتى موعد التشغيل والاستثمار المرتقب في نهاية عام 2015. وفيها قدّمت الأردن لكان الاستضافة وإنشاء مشروع المسرّع ما قيمته 12 مليون دولار أمريكي، مع المساهمة أيضاً في تكاليف بناء صالة المسرّع والمخابر الملحقة وصالات الاجتماعات وورشات العمل والصيانة.

ولا تزال هناك حاجة إضافية لمبلغ 39 مليون دولار أمريكي تقريباً، من أجل استكمال تجهيزات المسرّع (28.13 مليون)، ولزوم الحزم الضوئية (9.51 مليون)، وأبنية ملحقة بالمسرّع مع أنظمة الأمان (1.33 مليون). كما أن تكلفة الأجور وتكاليف التشغيل المخطط لها يمكن أن تكون أكثر بكثير من مليوني دولار سنوياً، فقد تصل إلى (10-8.5 مليون).

تشكل في طور المشروع الأول مجلس مؤقت من 14 دولة هي الأردن والإمارات والبحرين وإيران والكيان الصهيوني وأرمينيا والسلطة الفلسطينية والباكستان وتركيا ومصر وقبرص والمغرب وعمان واليونان مع عشرة دول مراقبة هي ألمانيا والولايات المتحدة الأمريكية وروسيا الاتحادية وفرنسا وإيطاليا واليابان وبريطانيا والكويت والسودان والسويد. وقد أقر المجلس في البداية بدء الدول المؤقتة للمساهمة المالية اعتباراً من بداية عام 2001 من أجل تكاليف نقل مسرّع BESSY I إلى الأردن على أن تتكفل جميع الدول الأعضاء بتكاليف التشغيل والاستثمار المستقبلية. وترافق انطلاق المشروع بتسمية المجلس للبروفسور Dietrich Einfeld كمدير تقني للمشروع، كما ترافق بتدريب كوادر للتشغيل والصيانة من فنيين ومهندسين في عدد من مسرّعات أوروبا والولايات المتحدة.

### ميزانية المشروع:

غير أن استكمال التركيب وفق التخطيط الأولي للحصول على عمل أول خطوط الحزم الأيونية استلزم مبالغ إضافية. وأصبحت الميزانية (انظر الجدول) في المراحل اللاحقة أكبر مما حُطت له

نوع	قيمة التمويل مقدرة بمليون دولار أمريكي	الجهة الممولة أو المانحة
قيمة الأرض والكتل المشادة عليها وخطوط التزود بالكهرباء وسواها...	12.78	الأردن
مكونات مسرّع Bessy 1 الممنوحة في عام 2002	10 تقريباً	ألمانيا
تجهيزات للمسرّع	1.83	الولايات المتحدة الأمريكية وإيطاليا واليونيسكو
خطوط الحزم الضوئية ومكونات لبعض الحزم الممنوحة من دول مختلفة	23.3	بريطانيا وفرنسا وسويسرا والولايات المتحدة الأمريكية وألمانيا
المبالغ النقدية المقدمة من أجل إشادة بناء المسرّع	3.38	المملكة الأردنية
	5 تقريباً	الاتحاد الأوروبي
تكاليف الأجور والتشغيل	10.12	الدول الأعضاء
المجموع	66.43 تقريباً	

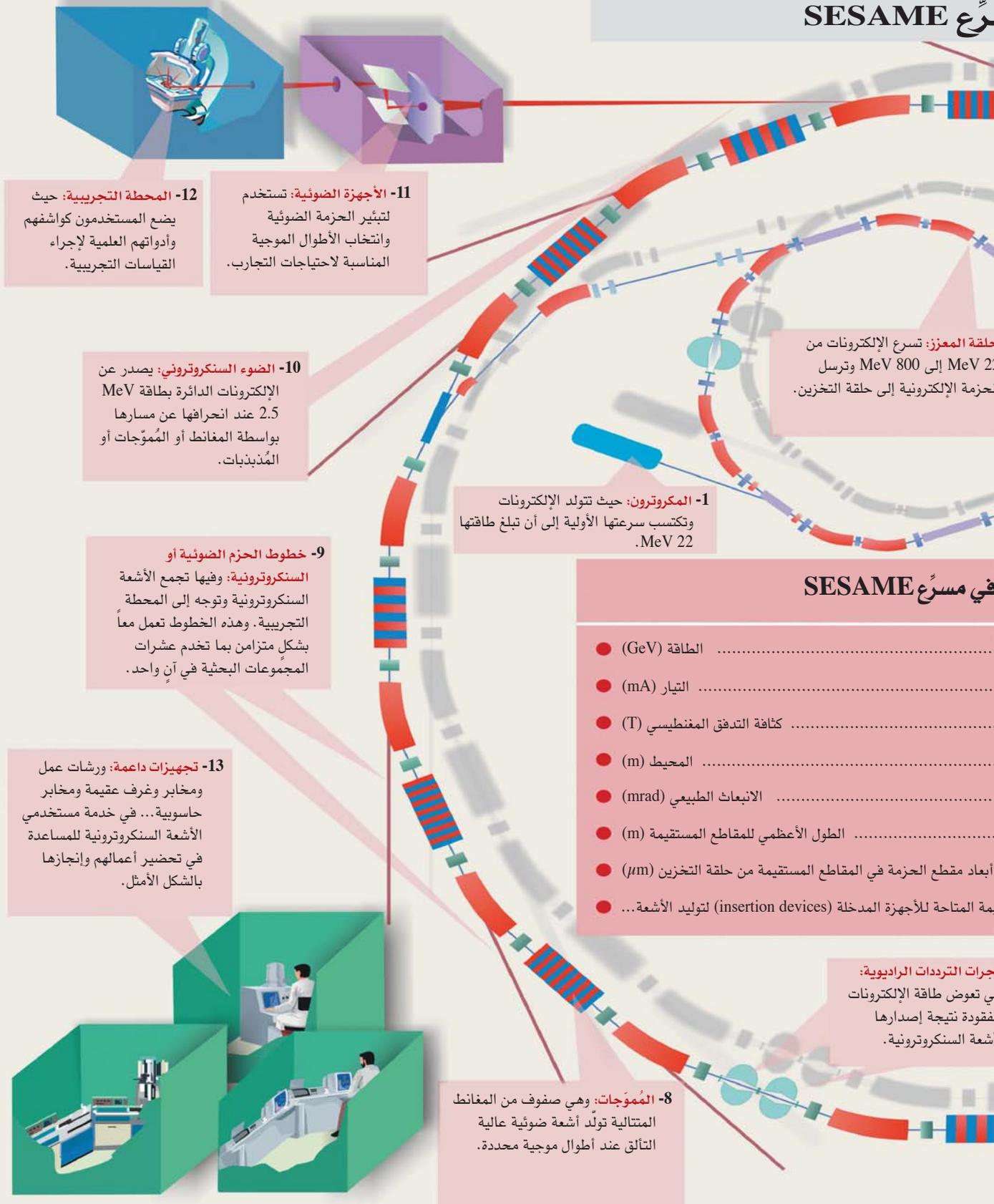
4. خط انعراج الأشعة السينية عن المسحوق بطاقة ضمن المجال (3-25 KeV)، لتطبيقات في مجال علوم المواد بشكل أساسي، وهذه التقنية فعّالة في دراسة عدم الانتظام واللابلورية في بنى المواد في الأبعاد الذرية والتغيرات البنيوية النانوية في شروط مختلفة أو حدية من حرارة وضغط بهدف تحضير المواد الذكية وتطويرها.
5. خط تشتت الأشعة السينية بزوايا صغيرة وكبيرة بطاقة ضمن المجال (8-12 keV)، لدراسة وتحليل بنى الجزيئات البيولوجية وخواصها الجزيئية في البوليميرات الصناعية والبيولوجية وتركيب الجزيئات الضخمة وتحليل المعقدات البروتينية.
6. خط الأشعة فوق البنفسجية بطاقة ضمن المجال (eV 10-200)، وهو مخصّص للفيزياء الذرية والجزيئية، وفيه تقنيات التأين والامتصاص الفوتوني التي تعطي معلومات أساسية عن ديناميكية الغازات وسلوكها في الغلاف الجوي الأرضي وأجواء الكواكب. كما يساعد الإصدار الفوتوني المستحث بالأشعة السنكروترونية في هذا المجال الطاقى في تحديد الخواص الإلكترونية في المواد والسطوح البيئية.
7. الأشعة السينية الناعمة فوق البنفسجية بطاقة ضمن المجال (50-2000 keV)، للدراسات والأبحاث في المجالات الكيميائية والطاقة والبيئة والعلوم الفيزيائية المختلفة. وهو خط ضوئي متعدد الأهداف يمكن استخدامه في تطبيقات مختلفة كما في تجارب تطوير المواد الجديدة التي تتطلب القياس المباشر أثناء التحضير أو أثناء تعديل خواصها.
- مواصفات مسرّع SESAME والخطوط الضوئية الأولى؛  
يوضح الشكل التالي مخططاً لمسرّع SESAME مع أهم المكونات والمواصفات الأساسية لحلقة التخزين. أما بالنسبة لخطوط الحزم الضوئية، فمن المزمع أن يكون في المسرّع سبعة خطوط في المرحلة الأولى من مراحل التشغيل والاستثمار بحيث تكون الثلاثة الأولى قابلة للاستثمار مع بدء التشغيل مباشرة في نهاية عام 2015. والخطوط هي:
1. خط ضوئي للتطبيقات في علوم البنى البلورية للبروتينات، بطاقة ضمن المجال (4-14 keV)، يهدف لدراسة بنية الجزيئات البيولوجية على المستوى الذري وتطوير الأبحاث والتطبيقات المتعلقة بالمواد الدوائية والصيدلانية.
  2. خط امتصاص الأشعة السينية في البنى الدقيقة والتفلور بالأشعة السينية، بطاقة ضمن المجال (3-30 keV)، ويهدف لدراسة المواد وتحليلها بأبعاد مكروية تتصل بعلوم المواد والعلوم البيئية، وكذلك دراسة تحضير مواد جديدة وصناعية كما في الصناعات البترولية، ودراسة التراكيب الكيميائية للمتعضيات الحجرية والرسوم الأثرية بطريقة لا تخريبية.
  3. خط الأشعة الضوئية تحت الحمراء بطاقة ضمن المجال (0.01-1 eV)، لدراسة الجزيئات البيولوجية والملوثات البيئية والآثار والعديد من المواد العضوية الطبيعية والصناعية. تعتبر مطيافية الأشعة تحت الحمراء من التقنيات المهمة في دراسة الأنسجة والخلايا الحية لكون هذه الأشعة غير مؤينة وهي واعدة في مجال التصوير الحي (time-resolved imag-ing) للخلايا الحية الأمر الذي له أهمية في المجال الحيوي والبيولوجي.

## مخطط عام لمسار



الشكل 2

## سرع SESAME



## في مسرع SESAME

- الطاقة (GeV) .....
- التيار (mA) .....
- كثافة التدفق المغنطيسي (T) .....
- المحيط (m) .....
- الانبعاث الطبيعي (mrad) .....
- الطول الأعظمي للمقاطع المستقيمة (m) .....
- أبعاد مقطع الحزمة في المقاطع المستقيمة من حلقة التخزين ( $\mu\text{m}$ ) .....
- قمة المتاحة للأجهزة المدخلة (insertion devices) لتوليد الأشعة...

## الوضع الراهن لمسرعات السنكروترون عالمياً وتحديات مشروع مسرع SESAME:

تتعلق بالتكلفة الباهظة من جهة والإمكانات التقنية والمعرفية من جهة أخرى. لذا، غالباً ما تشترك أكثر من دولة في مشروع كهذا. حتى الدول المتقدمة يمكن أن تشترك معاً في مشروع مسرع واحد كما في الدول الأوروبية في مسرع Elettra الموجود في تريستا-إيطاليا أو مسرع (ESRF) في غرونوبل-فرنسا. إلا أن بعضها يحاول دائماً الاحتفاظ بخصوصية بناء أجهزة علمية متقدمة كهذه على أرضه، ويحاول تأمين الدعم المادي والسياسي لهذه المشاريع الضخمة، كما حدث في العقد الماضي بين فرنسا وبريطانيا، فبدلاً من اشتراكهما ببناء مسرع سنكروتروني معاً، ذهبت كل منهما لبناء مسرعهما على أرضها (Soleil في فرنسا و Diamond في بريطانيا). كما تقوم دول من الشرق الأوسط، هي إيران وتركيا، إلى جانب اشتراكهما في مشروع مسرع SESAME بالعمل على مشروعها الوطني الخاص كل على حدة لبناء مسرع سنكروتروني باسم ILSF في إيران و TAC في تركيا. وباستثناء المسرعات الأيونية البحثية الموجودة مسبقاً في منطقة الشرق الأوسط (لدى سورية وإيران وتركيا ولبنان والأردن) سيكون مسرع SESAME السنكروتروني هو الأول من نوعه في منطقة الشرق الأوسط لأغراض بحثية وتطبيقية، على اعتبار أن أرمينيا في الوقت الراهن، هي أقرب من يمتلك مسرعاً من هذا النوع إلى منطقة الشرق الأوسط. وتبقى الولايات المتحدة الأمريكية الدولة التي تمتلك على أراضيها أكبر عدد من مسرعات السنكروترون في العالم وربما تحل اليابان بالمرتبة الثانية.

### التحديات:

إن بناء مسرع SESAME في الشرق الأوسط من الجيل الثالث لمسرعات السنكروترون بطاقة 2.5 ميغا إلكترون فولت بوصفه أحد الأجهزة التقنية المتقدمة، سيسمح بتطور تقني مترافق في مجال البنى التحتية والخدمية العلمية. فعملية التشغيل والصيانة الدائمة لاستمرار عمل منشأة علمية ضخمة كهذه على الوجه الصحيح، ستؤسس لبناء خبرات وإمكانات معرفية للأجيال القادمة في المنطقة. ذلك بالإضافة للفائدة العلمية والتطبيقية المرجوة من استخدام هذا المسرع في التقدم العلمي والتطور في الأبحاث الأساسية والتقنية والتطبيقية التي سيكون لها منعكس في مجال التطور الاقتصادي. إلا أن مجرد بناء مسرع سنكروتروني في إحدى الدول المتقدمة، هو بحد ذاته تحدٍ كبير، لكونه من المشاريع العملاقة التي تتطلب بنى تحتية تقنية داعمة وبنية معرفية متقدمة في مجال الخبرات التقنية وفيزياء المسرعات. بالإضافة إلى الحاجة لرصد ميزانية مالية كبيرة وتوفير قناعة لدى صنّاع القرار بأهمية هذه المشاريع. وتجدر الإشارة إلى أن الدول المتقدمة

ازدادت الحاجة لهذا النوع من المسرعات وأصبح هناك ما يزيد على ستين مسرعاً سنكروترونياً منتشراً حول العالم، يتركز معظمها في الولايات المتحدة وأوروبا واليابان. وتصل التكلفة الإجمالية المستثمرة عالمياً في المسرعات السنكروترونية إلى مليارات الدولارات التي تشمل تكلفة بنائها أو تحديث القديم منها وكذلك تكلفة تشغيلها المستمر. إن استثمار الدول المتقدمة بهذه المبالغ الطائلة في مسرعات السنكروترون ما هو إلا دليل على أهمية مردودها في تطور الأبحاث العلمية وآثارها في المجالات التطبيقية والصناعية. وبسبب ازدياد الحاجة لمزيد من تآلق حزم الفوتونات وإصدارها، ظهر ما يُسمى بالجيل الثالث من مسرعات السنكروترون التي تتميز بتيار عالٍ من الإلكترونات الدائرة في حلقة المسرع يصل إلى عدة ملي أمبير، وطاقة عالية تبلغ عدة جيجا إلكترون-فولت، مع وجود أجهزة خاصة من المُموجات أو المذبذبات (wigglers or undulations) في بنية حلقة المسرع، بالإضافة لمغانط حرف الحزمة الإلكترونية المحيطة بالحلقة كالتالي كانت معهودة في الأجيال السابقة. وتتمتع بعض المسرعات في الدول المتقدمة حالياً بمواصفات ما بعد الجيل الثالث، خصوصاً في المسرعات التي تستخدم ليزرات الإلكترون الحر. يوجد في مسرعات الجيل الثالث وما بعدها، خطوط حزم فوتونية بمواصفات متطورة من حيث تبئير الحزمة وانتخاب الأطوال الموجية مميز وشدة عالية. وبسبب إمكانية حرف الإلكترونات في أي نقطة من الحلقة تقريباً بواسطة المغانط المختلفة، فقد جعل هذا من وجود العديد من خطوط الحزم الفوتونية حول حلقة المسرع أمراً واقعاً وضرورياً للحصول على خطوط حزم ضوئية متعددة المواصفات وتطبيقات واسعة. ففي مسرع حديث مثل CANDLE في أرمينيا، يمكن تركيب أكثر من 50 خط حزمة ضوئية، حيث أن كل خط أساسي يمكن أن ينقسم إلى أكثر من خط ثانوي ينتهي بمحطة تجريبية لتطبيق ما. ولكن التكلفة الباهظة (التي قد تصل قيمتها التقديرية إلى مليوني دولار أمريكي في بعض الأحيان وأكثر من ذلك في بعض الخطوط المتقدمة بمواصفات خاصة) هي المعيار الأساسي لبناء أي خط، وليست الحاجة أو التطبيقات الممكنة هي المعيار الوحيد وحسب. ولهذا يمكن لمجموعات علمية أو صناعية من دولة ما أو من عدة دول أن تتشارك في بناء أو استخدام خط حزمة تتناوب على استخدامها على مدار العام وفق برامج محددة لذلك.

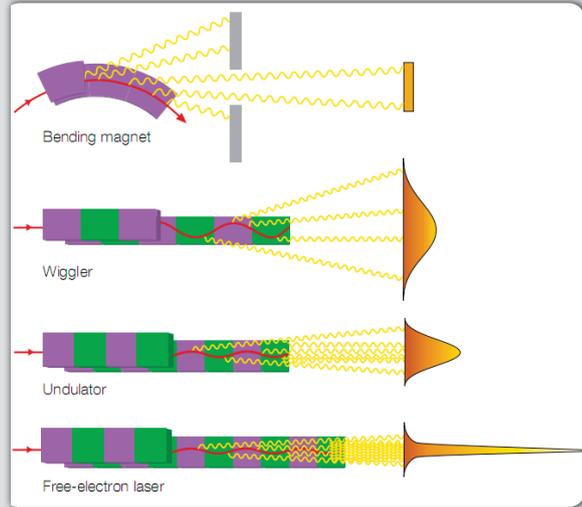
يوجد حول العالم أكثر من 60 مسرعاً سنكروترونياً يعمل أو قيد الإنشاء. يتوزع معظمها في الدول المتقدمة وذلك لأسباب



اكتمال خرسانة التدرّيع في أيار/مايو 2011



أعمال تركيب في منطقة حلقة التهيئة الأولية (booster)



• إن نجاح هذا المشروع لا يتعلق بالجانبين العلمي والمالي وحسب وإنما كذلك بحسن الإدارة ووضع السياسات العلمية الهادفة للمراحل اللاحقة لانطلاق استثمار المسرّع. سيتجلى هذا بمقدرة إدارة مشروع المسرّع على استقطاب الكفاءات العلمية المناسبة وتنظيم الأولويات وتشجيع التعاون بين الأفراد والمجموعات العلمية ضمن الدول وفيما بينها في

ما كانت لتخصّص ميزانيات هائلة لبناء مسرّعات سنكروترونية لولا أهميتها العلمية التي لا مثيل لها. ويبدو أن محاولة دول مثل إيران وتركيا الانضمام إلى عالم مسرّعات السنكروترون هو بسبب إدراكها لأهميتها وأهمية تطبيقاتها على الرغم من تكلفتها العالية. ولا شك في أن الشروع ببناء مسرّع سنكروتروني في الشرق الأوسط كان ولا يزال تحدياً كبيراً جداً، تواجهه مصاعب تقنية وعلمية ومادية، وقد انعكس ذلك في التأخير في الشروع باستثمار المسرّع. فعلى الرغم من أن الانطلاق الرسمي للمشروع كان في عام 2002، إلا أنه من المزمع أن يعمل المسرّع بشكل كامل وأن تكون ثلاثة أو أربعة من خطوط الحزم الضوئية فعالة وقيد الاستثمار في أواخر عام 2015.

إن التحدي الكبير ليس في مجرد بناء المسرّع وتشغيله وإنما في الحفاظ على التشغيل المستدام وفق الشروط المثلى وتأمين الدعم المالي المستمر لضمان حسن الاستخدام والاستثمار الأمثل وتبادل الخبرات المعرفية والتقنية ونقلها في هذا المجال للأجيال القادمة باستقلالية عن الخبرات في الدول المتقدمة. ومن أجل نجاح هذا المشروع لا بد من التعامل مع مجموعة من التحديات أهمها:

- إن انطلاق استثمار المسرّع وتشغيله بشكل مستدام، واستكمال بناء خطوط الحزم الضوئية فيه، يحتاج لمبالغ لا يستهان بها وهو رهْنُ بعدم الاعتماد على مساهمات أو مساعدات الدول المتقدمة والمنظمات الدولية، وبضمان استمرارية الدعم المالي الثابت من الدول الأعضاء في المشروع والتزامها بتقديم ميزانية ثابتة وفق مخططات زمنية معينة، تضمن استمرار مشروع المسرّع ونجاحه على المدى الطويل.
- تمكين ودعم البنى التحتية والإمكانات التقنية من خلال إحداث فرص عمل لخبرات معرفية وتقنية لدى الشركات الصغيرة والمتوسطة بالتحديد. الأمر الذي سيفضي لتأمين صيانة وصناعة مستلزمات مهمة وضامنة لحسن استمرار عمل مشروع المسرّع (نذكر منها على سبيل المثال هندسة الخلاء وصناعته وكذلك الدارات الإلكترونية الدقيقة). إن توفر هذا الدعم سيؤدي إلى التطوير التقني والصناعي مستقبلاً في المنطقة ويساعد على المدى البعيد بالاستقلال (إقليمياً) عن التبعية للدول المتقدمة في الحاجة للخبرات والمستلزمات التقنية.

وعلى الرغم من حداثة تصميمه، فإنه لن يكون لهذا المسرّع إمكانيات أفضل ولا استثمار أو مردود أفضل من نظرائه في الدول المتقدمة لاعتبارات التحديات المذكورة آنفاً. إلا أن مثل هذا المشروع سيحقق على المدى البعيد تقدماً على الصعيدين العلمي والتقني في منطقة الشرق الأوسط، ولا شك أنه سيؤدي في المرحلة الأولى إلى تباطؤ في اتساع فجوة فارق التقدم العلمي في مجال المسرّعات بين دول المنطقة والغرب، وسيؤدي إلى تقليص هذه الفجوة في المراحل المستقبلية، لاسيّما أن عدداً من المسرّعات الأخرى موجودة لدى بعض الدول في المنطقة وأن تنامي الخبرات في مجال المسرّعات هو في اتجاه تصاعدي، وهو بلا شك يساعد دول المنطقة، مثل تركيا وإيران، في اكتساب الخبرة وتطوير مشاريعها الوطنية الخاصة لبناء مسرّعات سنكروترونية على أراضيها. إلا أن نجاح مشروع مسرّع SESAME يعتمد أساساً على إدارة التحديات من جهة، وعلى وضع السياسات العلمية المناسبة خصوصاً فيما يتعلق بالمراحل اللاحقة لبدء عمل المسرّع واستثماره من جهة أخرى. كما أنه يعتمد بلا شك على متابعة الدعم العلمي والمادي من الدول المتقدمة والمنظمات الدولية الذي من خلاله تعمّ فائدة متبادلة ومردود حضاري للبشرية جمعاء.

مجالات بحثية حيوية، مع الحفاظ على التواصل العلمي المستمر مع الدول المتقدمة. هذا الأمر يحتاج إلى الاستفادة من خبرة الدول المتقدمة في هذا المجال لبناء كوادر ملمة بالجانبين الإداري والعلمي معاً ووضع السياسات العلمية والتخطيط العلمي لإدارة عمل هذا المسرّع وتسييره.

• بناء الكوادر البشرية من حيث التأهيل العلمي والتقني والإداري والاهتمام بالخبرات العلمية والتجريبية وتوريثها للأجيال المستقبلية ومنع تسربها إلى الدول المتقدمة. والعمل على بناء ثقافة العمل العلمي الجماعي وتطويرها، من خلال تشجيع التعاون وتبادل الخبرات وتناقل المعرفة، وهذا هو المبدأ الجوهرية في عمل مثل هذه المشاريع العلمية الضخمة ونجاحها.

• في معظم المشاريع الدولية الرائدة في مجال التعاون العلمي العالي المستوى، تكون الدول المتشاركة متقاربة ولديها قواسم مشتركة في مواضيع أهمها: السوية العلمية والخبرات التقنية والحالة المجتمعية وثقافة العمل الجماعي والأهم من ذلك هو وجود السلام. إلا أن عدداً من الدول المعنية حالياً بمشروع مسرّع SESAME لا تتقاسم كثير من هذه المواضيع وسواها. إنه حقاً لتحدي كبير أن تتمكن الدول من تجاوز خلافاتها واختلافاتها لإنجاح مشاريع علمية فيها خدمة للإنسان ومستقبله على هذا الكوكب.

إعداد: د. مثنى أحمد، هيئة الطاقة الذرية السورية.

◀ ملاحظة: لمزيد من الاطلاع يمكن زيارة الموقع الإلكتروني لمسرّع سيزام على الرابط: [www.sesame.org.jo](http://www.sesame.org.jo)

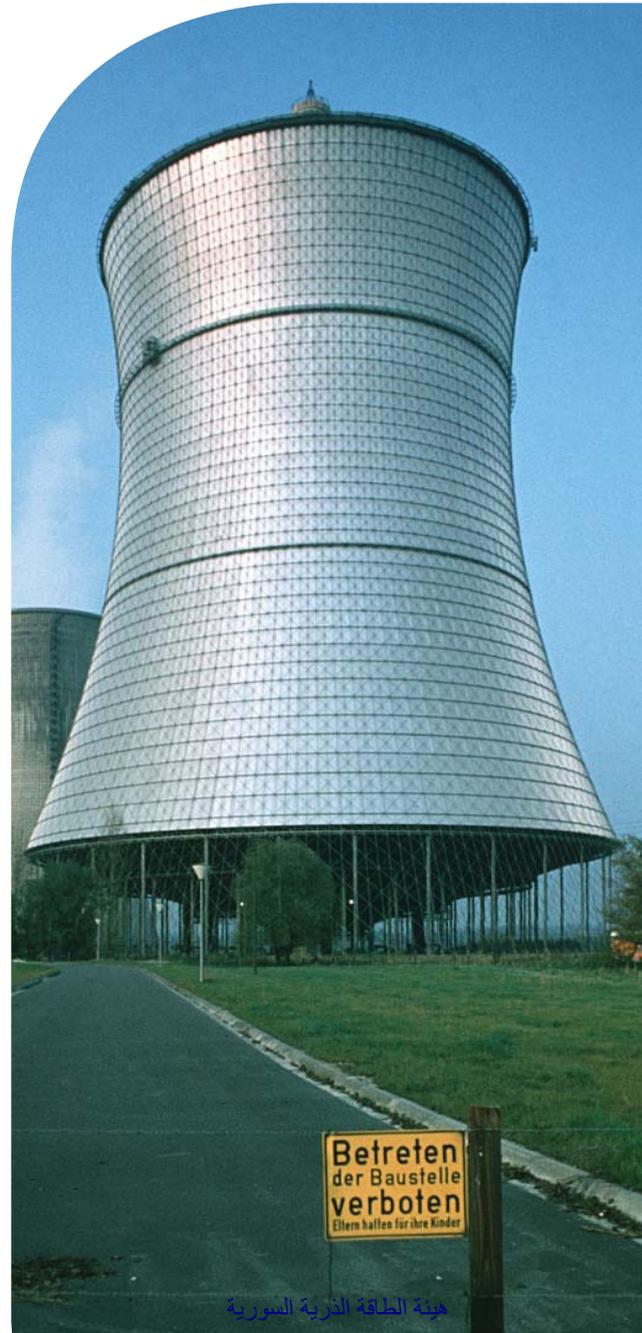
# مفاعلات فلوريد الثوريوم السائل

**الكلمات المفتاحية:** مفاعل الملح المصهور التجريبي، مفاعل فلوريد الثوريوم السائل، دورة وقود ثوريوم/يورانيوم، دورة وقود يورانيوم/بلوتونيوم، بطانة، وقود انشطاري، وقود خصب.

**Key words:** MSRE, LFTR, thorium/uranium fuel cycle, uranium/plutonium fuel cycle, blanket, fissile fuel, fuel fertile.

ماذا لو استطعنا إعادة عقارب الساعة إلى عام 1965 حيث امتلاك الطاقة قد أنجز؟ في حزيران/يونيو من ذلك العام، ولأول مرة حققت تجربة مفاعل الملح المصهور (MSRE) الحرجية في المختبر الوطني أوك ريدج (ORNL)، في تينيسي. فبدلاً من قضبان الوقود المألوفة في محطات الطاقة النووية الحديثة، استعمل MSRE وقوداً سائلاً -ملح فلوريد الثوريوم الحار والحاوي مادة انشطارية مذابة في محلول ذي لزوجة مساوية تقريباً للزوجة الماء عند درجة حرارة التشغيل. عمل MSRE بنجاح لخمس سنوات تقريباً، فاتحاً نافذة جديدة على التقانة النووية. وبعد ذلك أغلقت هذه النافذة محدثة ضجة كبيرة عندما أوقف العمل بالبرنامج البحثي للملح المصهور.

بإدراكنا الآن لتغير المناخ، وذروة النفط، وثرني مايل أي لاند، وتشرنوبل، والتدفق الغزير للنفط من المياه العميقة إلى السطح في خليج المكسيك في صيف عام 2010، ماذا لو استطعنا أن نأخذ طريقاً آخر للطاقة؟ يشعر الكثيرون أنه هناك رغبة جيدة للسماح لوقود MSRE



(Alvin Weinberg)، مدير ORNL منذ 1955 حتى 1973، والذي كان قد ترأس أحد محاور البحث الرئيسية أثناء تطوير الطاقة النووية، تلك الحالة في مذكراته -العصر النووي الأول:

في الأيام الأولى تحريينا جميع أنواع مفاعلات الطاقة، بمقارنة حسنات كل نوع وسيئاته. عدد الإمكانيات كان كبيراً، حيث هناك عدة خيارات لكل مكون من مكونات المفاعل -الوقود، والمبرد، والمهدى. فيمكن أن تكون المادة الانشطارية: U-233، أو U-235 أو Pu-239؛ المبرد: ماء، أو ماء ثقيل، أو غاز أو معدن مصهور؛ والمهدى يمكن أن يكون: ماء، أو ماء ثقيل، أو بيريليوم، أو غرافيت، أو غير موجود، كما في المفاعلات السريعة.... إذا حُسبت جميع مجموعات الوقود والمبرد والمهدى، فسوف ينتج ما يقارب ألف مفاعل من المفاعلات الموثوق بها. وهكذا، في بداية الطاقة النووية، توجب علينا اختيار أي الإمكانيات يمكن اعتمادها وأيها يمكن رفضها.

ربما، من بين الخيارات العديدة المشككة، كان أكثر الخيارات أهمية للمسار المستقبلي للطاقة النووية، قد اتُخذ من قبل العميد هيمان ريكوفير (Hyman Rickover) ذي الإرادة القوية ومدير المفاعلات البحرية. فهو من قرّر بأن تُشغّل الغواصة النووية الأمريكية الأولى، نوتيلوس (Nautilus)، بأكسيد اليورانيوم الصلب المخصب باليورانيوم-235، باستعمال الماء على أنه مبرد ومهدى معاً.

في عام 1955 أبحرت الغواصة نوتيلوس بنجاح. وبالاعتماد على زخم البحث والإنفاق على مفاعل نوتيلوس، شُيّد مفاعل ذو تصميم مشابه في محطة الطاقة الذرية للشحن بالسفن، في ولاية بنسلفانيا (Pennsylvania)، لتصبح أول محطة طاقة نووية تجارية عاملة في عام 1957.

استطاع ريكوفير أن يبيّن أسباب اختيار تشغيل نوتيلوس بمفاعل من النوع S1W (S1W-1) تعني غواصة من الجيل الأول مصنعة من قبل ويستنغهاوس). في ذلك الوقت كان هذا التصميم أكثر التصاميم ملائمةً لتشغيل غواصة، وأكثرها قابلية لأن تكون جاهزة بأسرع وقت ممكن. وقُدّمت دورة وقود اليورانيوم، البلوتونيوم 239 كنتاج ثانوي كان يستعمل في تطوير السلاح الحربي النووي الحراري.

واليوم، تُعدُّ هذه الأسباب هامشية، لكنها كانت حرجة للتعرف على المسار النووي الذي سلكناه منذ خمسينيات القرن الماضي. وبقيت معنا أيضاً كل جوانب اختيار ريكوفير. يمتلك وقود

السائل بالنضوج. ترى الرؤية الشعبية المستقبلية بأن مفاعلات الوقود السائل ستلعب دوراً مركزياً في اقتصاديات الطاقة، واستعمال الوفرة النسبية للثوريوم القابل للإنتاج بكميات كبيرة والخالي من إصدارات الكربون، والأمن ذاتياً، والمولد لكميات ضئيلة من النفايات.

من المؤكد أننا لا نستطيع إعادة عقارب الساعة إلى الوراء. الشيء المثير لمؤيدي طاقة وقود الثوريوم السائل، إنه مجرد برهان على صعوبة إقلاع الساعة ببساطة. تصافرت الأسباب التاريخية والتقنية والتنظيمية لجعل صعوباتها الضخمة مختلفة عن المسار الحالي للوقود الصلب في المحطات التي تعمل على اليورانيوم. ومع ذلك، يُعدُّ الخيار المستقبلي المتضمن الطاقة المعتمدة على وقود الثوريوم السائل مغرباً. سوف نعرض تاريخ طاقة الثوريوم، وتقانتها وكيميائها، واقتصادياتها، ونزن الحجج المؤيدة والمعارضة للثوريوم مقابل اليورانيوم.

## الاختيار

فكرة الوقود السائل في المفاعل النووي ليست جديدة. في عام 1942 اخترع العالم إنريكو فيرمي (Enrico Fermi) من جامعة تشيكاغو (Chicago)، أول مفاعل نووي مكون من كتل من اليورانيوم والغرافيت. وبعد عامين من ذلك التاريخ شُغّل أول مفاعل في العالم يعمل بالوقود السائل باستعمال وقود كبريتات اليورانيوم المنحلة بالماء. في جميع التفاعلات النووية التسلسلية، تمتص المادة الانشطارية نوترونًا، مما يسبّب انشطارها وتحرير نوترونات إضافية وطاقة ضخمة. تسير النوترونات الصادرة بسرعة قريبة من 10% من سرعة الضوء، وسوف يكون من الصعب أن تسبّب هذه النوترونات انشطاراً آخر في مفاعل كما هو الحال في مفاعل فيرمي بشيكاغو (Pile-1) باستثناء تلك النوترونات المهدأة بشدة -في المهدى- إلى سرعات مساوية لبضعة الكيلومترات في الثانية. في نظام فيرمي، تُهدى كتل الغرافيت المتوضعة بين صفائح الوقود سرعة النوترونات. كما يتألف نظام التحكم من قضبان مغلّفة بالكاديوم حيث تأسر بإدخالها النوترونات، ويتوقف التفاعل التسلسلي نتيجة لخفض توالد النوترونات. بتنظيم الحاصل النوتروني، تستمر المبادئ ذاتها المستعملة في تهدئة النوترونات والتحكم بالتفاعل التسلسلي لتكوّن المفاهيم المركزية في تصميم المفاعلات النووية.

في الفترة التالية مباشرة لاختراع فيرمي، ظهرت تشكيلة واسعة من الخيارات بحاجة للاستكشاف. يصف إلفين وينبيرغ



الشكل 1. الثوريوم متوفر نسبياً، وهو عنصر ذو نشاط إشعاعي منخفض، مما جعله في وقت من الأوقات يمثل مستقبل الطاقة النووية. لقد حُجِد الثوريوم عندما بدء عهد اليورانيوم بإطلاق الغواصة النووية الأميركية نوتيلوس، والتي كان قلب مفاعلها يملك التقنية نفسها الموجودة حالياً في الأسطول النووي. يعتبر الثوريوم عنصراً غير انشطاري ولكن يمكن تحويله إلى اليورانيوم الانشطاري-233. تكسب السمات الاقتصادية، والكيميائية، والأمان، ومظاهر منع الانتشار مظهراً جديداً لدورة وقود الثوريوم/يورانيوم كحل محتمل لمشاكل اليوم من تغير المناخ، وزيادة الطلب على الطاقة في البلدان النامية، والتهديدات من انحراف استعمال المواد النووية لأغراض محظورة. يبين الشكل حبيبات الثوريوم المصنعة في مركز بحوث بهابها الذري في مومباي- الهند (Bhabha research center in Mumbai, India)، الذي تتمثل مهمته بتطوير برنامج طويل الأمد لتحويل الهند إلى الاعتماد على طاقة الثوريوم خلال السنوات الخمسين القادمة، وذلك لكون احتياطات الهند من اليورانيوم قليلة ومن الثوريوم كثيرة.

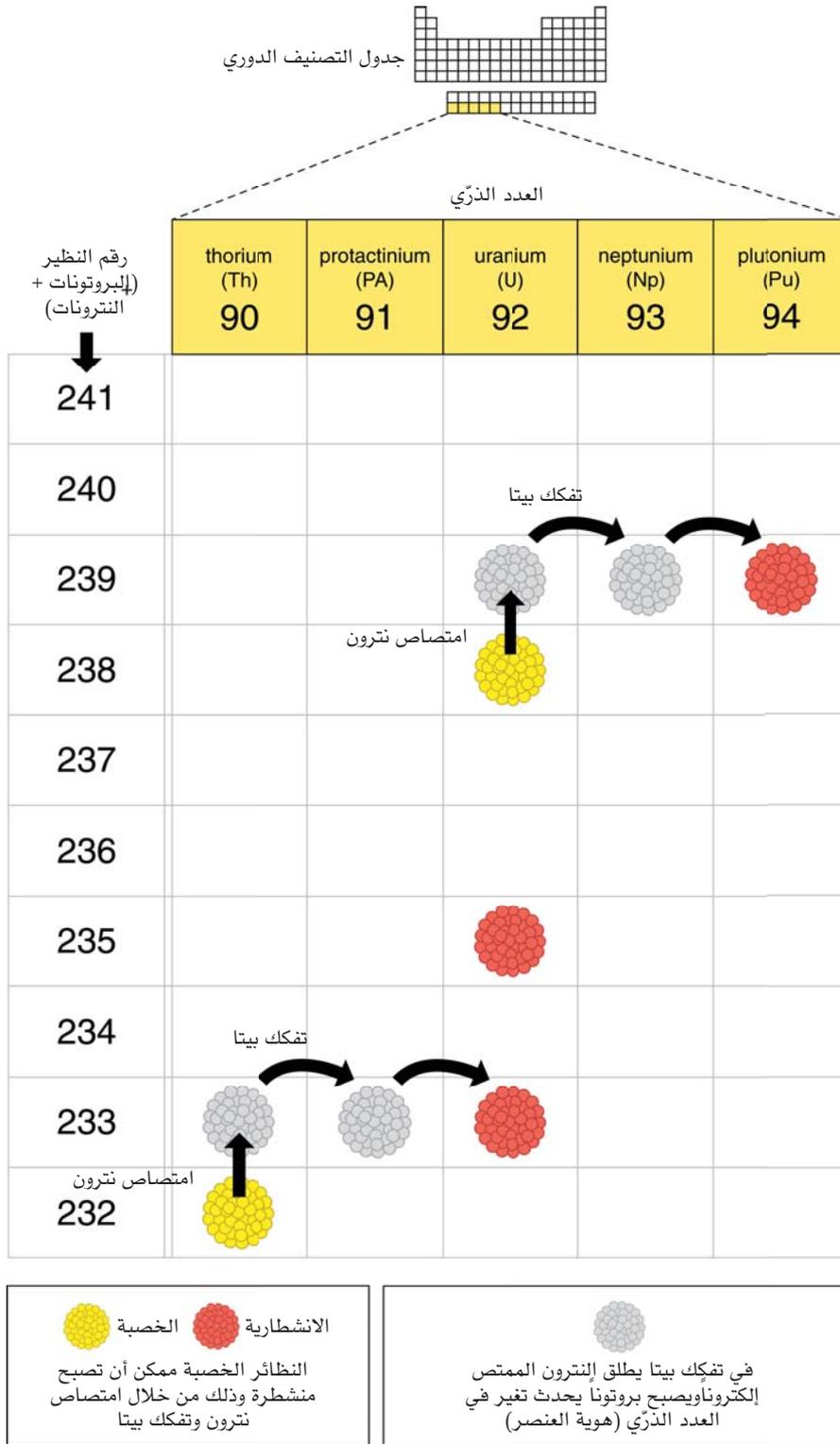
### مسبباً جموح المفاعل وحدث الانفجار.

تتضمن النواتج الثانوية لانشطارات اليورانيوم عناصر ما بعد اليورانيوم طويلة الأمد (عناصر فوق اليورانيوم في الجدول الدوري)، كالبلوتونيوم، والأمريسيوم، والكوريوم. كما أن التخلص من النفايات الناتجة عن اليورانيوم تُعدُّ مشكلة بحاجة إلى الحل حتى الآن.

### الثوريوم

عندما بنى فيرمي مفاعل تشيكاغو (Pile-1)، كان وقود اليورانيوم الخيار الوحيد الواضح: كان اليورانيوم-235 المادة الوحيدة الانشطارية على الأرض. مبكراً، وعلى أية حال، كان

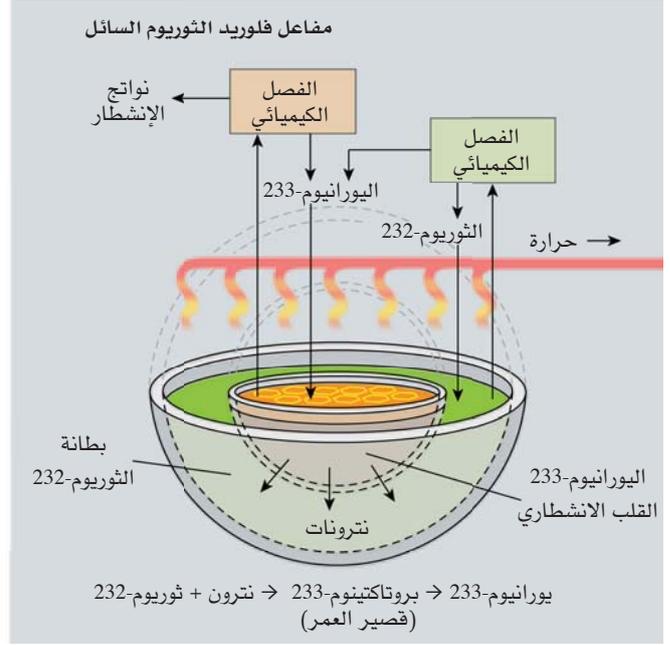
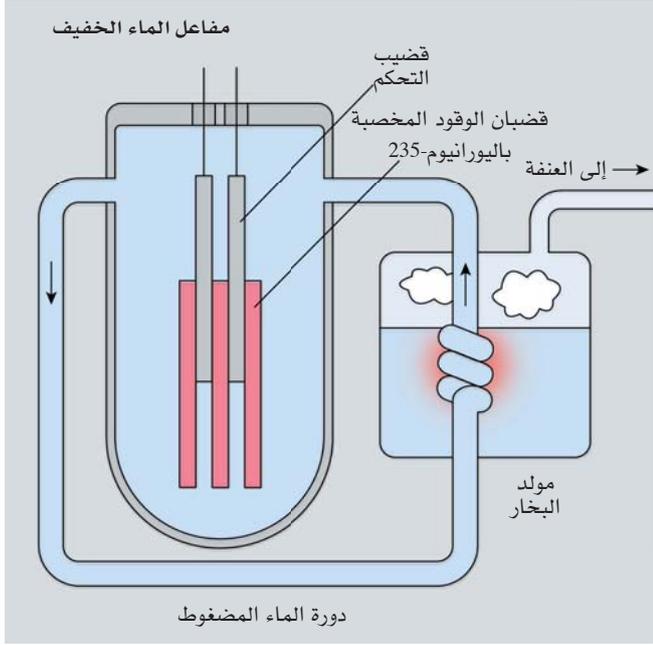
اليورانيوم تحديات متأصلة. تضر الحرارة والإشعاع الناتجان في قلب المفاعل كتل الوقود، لتشكل أحد أسباب خروج قضبان الوقود من الخدمة بعد بضع سنوات فقط وبعد استهلاك قدره من 3 إلى 5% من طاقة اليورانيوم الموجودة في هذه القضبان. أيضاً تتلف تدريجياً كفاءة الوقود نتيجة لتراكم نواتج الانشطارات ضمن قضيب الوقود، وخاصةً تراكم الكزينون-135 (xenon-135)، وهو معروف بشهيته الكبيرة للنترونات، ويقوم بدور سم الانشطارات نتيجة لإلحاقه الضرر بالحاصل النتروني للتفاعل التسلسلي. يُعدُّ الكزينون-135 من العناصر القصيرة العمر (له عمر نصف 9.2 ساعة) ولكن شكل بنيته مهم في إدارة المفاعل. على سبيل المثال، يتسارع التفاعل التسلسلي عند احتراق الكزينون-135 الأمر الذي يتطلب إعادة إدخال قضبان التحكم بعناية حتى يصبح المفاعل مستقراً. ساهم سوء إدارة هذا الإجراء في عدم الاستقرار في قلب مفاعل تشرنوبل



الشكل 2، تنتج في المفاعل زبوجة من النيوترونات مسيطر عليها عن طريق امتصاصها من قبل العناصر الأخرى الموجودة. النظائر الخصبة هي تلك النظائر التي تتحول إلى انشطارية (قابلة للانشطار) بعد أسرها للنيوترون المتعاقب. يمتص الثوريوم-233 الخصب نوترونًا ليصبح ثوريوم-233، والذي بدوره يخضع لاضمحلال بيتا- بإصدار إلكترون مترافقًا مع تحول النيوترون إلى بروتون. وبزيادة عدد البروتونات، يتحول الثوريوم-233 إلى بروتكتينيوم-233، والذي بدوره يخضع لاضمحلال بيتا مشكلًا يورانيوم-233 الانشطاري. ستمتص معظم ذرات اليورانيوم-233 الموجودة في المفاعل نوترونًا وتخضع للانشطار، ولكن بعضها سيمتص نوترونًا إضافيًا قبل حدوث الانشطار مشكلًا اليورانيوم-234 وهكذا حتى الوصول إلى عناصر أخرى. بمقارنة طرق إنتاج البلوتونيوم في المفاعلات العاملة على الثوريوم مع تلك العاملة على اليورانيوم، يتطلب الكثير من عمليات الامتصاص والتفكك للوصول إلى البلوتونيوم-239 عند البدء من الثوريوم-232، وبالتالي الكمية الصغيرة جدًا من البلوتونيوم الناتج يمكن أن تدار، ومن الممكن تحويلها إلى وقود الثوريوم وفي نفايات الدورات.

من المفهوم أنه باحتراق كمية صغيرة من اليورانيوم-235 بوجود كمية كبيرة من اليورانيوم-238 في المفاعل النووي ستولد نواتج متحولة، تتضمن النظائر الانشطارية كالبلوتونيوم-239. أيقظ رواد الطاقة النووية من غفلتهم التصورُ باستعمال مفاعلات اليورانيوم لتوليد وقود ثانوي في دورة الوقود الذي من شأنه تغيير العالم من خلال الحصول على طاقة رخيصة وغير محدودة. وبواسطة التحويل الكيميائي ذاته، يمكن تحويل نظير الثوريوم-232 اللانشطاري (النظير الطبيعي الوحيد للثوريوم) إلى يورانيوم-233 الانشطاري. تترافق دورة الوقود المعتمدة على الثوريوم مع كيمياء مختلفة، وتقانة مختلفة، ومشاكل مختلفة. وهي أيضاً تحلّ فعلياً العديد من المشاكل المستعصية في دورة وقود اليورانيوم التي تنتج اليوم 17% من الطاقة الكهربائية المولدة حول العالم و 20% من الطاقة المولدة في الولايات المتحدة الأمريكية.

الثوريوم موجود في القشرة الأرضية بكمية أكبر بحوالي أربع مرات من كمية اليورانيوم، كما أن استخراجه سهل. عندما يمتص الثوريوم-232 (عدده الذري 90) نوترونًا، سيتحول إلى الثوريوم-233، والذي بدوره سيخضع لسلسلة من اضمحلال بيتا (في اضمحلال بيتا يصدر إلكترون ويتحول النيوترون إلى بروتون) مُشكلًا بذلك يورانيوم-233 (عدده الذري 91). يُعدُّ اليورانيوم-233 مادة انشطارية ومناسبة جداً للعمل كوقود في المفاعل. وفي الحقيقة، فإن مزايا دورة وقود الثوريوم/يورانيوم مقارنة مع دورة وقود اليورانيوم/بلوتونيوم دفعت مجتمع العلماء والمهندسين الذين أعادوا إحياء عصر أبحاث الفين وينبرغ ومحاولتهم لجعل الطاقة المعتمدة على الثوريوم ضمن الاتجاه الرئيسي للأبحاث والسياسة وفي نهاية المطاف الإنتاج.



الشكل 3. في أغلب المخططات، يتألف مفاعل الماء الخفيف العامل بوقود اليورانيوم (جميع المفاعلات الأميركية) من قضبان الوقود، وقضبان التحكم، ومن الماء كمبرد ومهدئ معاً. يتألف مفاعل فلوريد الثوريوم السائل من قلب حرج (باللون البرتقالي) حاو على اليورانيوم-233 الانشطاري الموجود في ملح الفلوريد المصهور، ومن بطانة (باللون الأخضر) تحيط بهذا القلب مؤلفة من ملح الفلوريد المصهور الحاوي على الثوريوم-232. تمتص النوترونات الفائضة الناتجة عن الانشطار في القلب من قبل الثوريوم-232 الموجود في البطانة، متحولاً إلى اليورانيوم-233. يُسترد كل من اليورانيوم-233 ونواتج الانشطار الأخرى من خلال عملية الفصل الكيميائي والتوالد الحديث ومن ثم يوجه اليورانيوم-233 المسترد إلى القلب، ليخضع هناك للتفاعل التسلسلي.

في القلب من قبل الثوريوم-232 الموجود في البطانة المحيطة. ونتيجة لاضمحلال بيتا، يتحول الثوريوم-233 إلى بروتاكتينيوم-233 قصير الأمد، والذي بدوره يتحول بسرعة، نتيجة لاضمحلال بيتا مرة أخرى إلى يورانيوم-233 الانشطاري. تفصل هذه المادة الانشطارية من ملح البطانة كيميائياً وتحول إلى القلب لحرقتها كوقود، مولدة بذلك حرارة انشطار ونوترونات جديدة تحول الثوريوم الموجود في البطانة إلى وقود اليورانيوم-233.

## مزايا الوقود السائل

تقدم مفاعلات وقود الثوريوم السائل مجموعة من مزايا التصميم، والتشغيل، والأمان، وإدارة النفايات، والتكاليف، وعدم الانتشار مقارنة مع محطات الطاقة النووية التقليدية. على خلاف الوقود النووي الصلب، لا تتأثر أملاح الفلوريد السائل بالتحريب (التلف) الإشعاعي. وكما أشرنا سابقاً، فإن قضبان الوقود الصلب تكتسب تلفاً (تخريباً) بنوياً نتيجة لحرارة قلب المفاعل وإشعاعه، كما أن استبدالها يتطلب إغلاقاً للمحطة غالي الثمن بعد زمن تشغيلي قرابة 18 شهراً، حيث يتم إخراج ثلث قضبان الوقود بينما تخلط البقية. لا يشكل الوقود الطازج خطراً كبيراً، في حين يكون الوقود المستهلك مشعاً جداً ويجب أن يُعالج بمعدات مُحكم بها عن بُعد. بعد عدة سنوات من الخزن تحت الماء وذلك للسماح

في الوقت الحاضر استثنيت الطاقة المعتمدة على الثوريوم في مخابر الأبحاث الوطنية الأمريكية، لكنها استمرت وبشكل مكثف في الهند، التي لا تملك يورانيوم، لكنها تملك احتياطات ضخمة من الثوريوم. ربما يُعد أفضل مركز أبحاث معروف للثوريوم هو مجموعة فيزياء المفاعل في جرينوبل، فرنسا، والتي تمتلك مصادر كافية لتطوير الطاقة المعتمدة على الثوريوم، على الرغم من التزاماتهم بأن يبقى استعمال الثوريوم التجاري تجريبياً. (في فرنسا، تشكل الطاقة الكهربائية المنتجة من الطاقة النووية حوالي 80% من مجمل الطاقة الكهربائية المولدة، والتي تعتبر الأعلى في العالم، والمعتمدة على البنية التحتية الضخمة لمحطات الطاقة النووية التقليدية العاملة بالماء المضغوط وعلى البرنامج الوطني لإعادة معالجة الوقود من أجل إعادة تدوير وقود اليورانيوم).

بإيجاز، يتألف مفاعل فلوريد الثوريوم السائل (LFTR)، وتلفظ ليفتير (lifter) من قلب وبطانة «blanket»، محيطة بالقلب. تتألف البطانة من خليط رباعي فلوريد الثوريوم الموجود في ملح فلوريد منصهر تحت تأثير حرارة القلب والمؤلف من الليثيوم والبيريليوم. يتألف القلب من رباعي فلوريد اليورانيوم-233 الانشطاري الموجود أيضاً في أملاح الفلوريد المنصهرة والمؤلفة من الليثيوم والبيريليوم ضمن بنية غرافيتية تعمل بوصفها عاكساً ومهدئاً للنوترونات. ينتج اليورانيوم-233 في البطانة عندما تُمتص النوترونات المتولدة

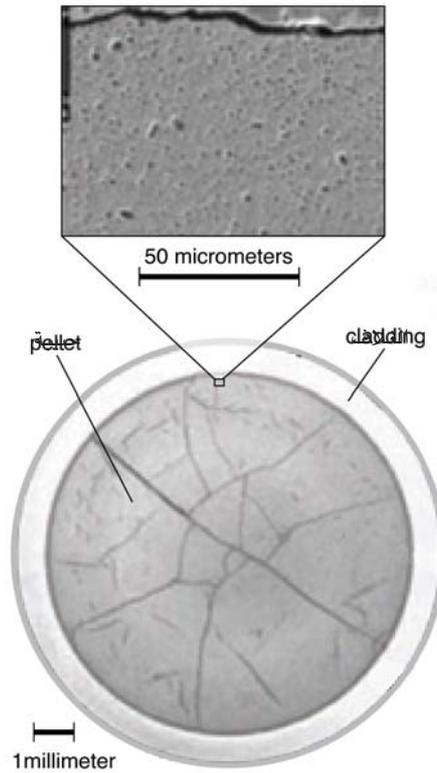
للذوبان (UF<sub>6</sub>). يُحوّل غاز الفلورين الفقاعي من خلال رباعي فلوريد اليورانيوم الموجود في البطانة إلى غاز سداسي فلوريد اليورانيوم (UF<sub>6</sub>)، يُستخرج سداسي فلوريد الثوريوم من المحلول، ويؤسر، ومن ثم يُعاد إلى رباعي فلوريد اليورانيوم القابل للذوبان بواسطة غاز الهيدروجين في عمود الإرجاع، وأخيراً يُوجه مباشرة إلى القلب ليعمل كوقود انشطاري.

يمكن إزالة نواتج الانشطار الأخرى مثل موليبدينوم، ونيوديميوم، وتكنيسيوم بسهولة من الوقود السائل باستعمال الفلورة أو بتقنيات التصفيح، مما يطيل كثيراً من كفاءة وقابلية استعمال الوقود السائل.

إن محاليل الفلوريد السائلة معروفة كيميائياً. تُدار يومياً ملايين الأطنان المكعبة من أملاح الفلوريد السائل عبر المئات من محطات الألمنيوم الكيميائية، وكذلك كل اليورانيوم المُستعمل في مفاعلات اليوم يجب أن يدخل ويخرج على شكل فلوريد لتتم عملية إغنائه. تأخذ تقانة مفاعلات LFTR عدة أشكال كامتداد واضح للهندسة الكيميائية النووية المعاصرة.

### لا للنفايات

من بين أكثر المزايا جاذبية لتصاميم LFTR هو بروفيل (سِيماء) نفاياتها. حيث تكون النفايات قليلة في مثل هذه التصاميم. لقد أصبحت مؤخراً مسألة النفايات النووية المتولدة خلال عصر اليورانيوم أقل وأكثر إلحاحاً سواء بسواء. إنها أكثر إلحاحاً لأنه منذ بداية عام 2009، قررت إدارة أوباما بأن مخزن جبل يوكا (Yucca Mountain Repository) الذي يشكل الموقع التصميمي ذا العزل الجيولوجي المستقر للنفايات الأمريكية الموجودة، لم يعد خياراً مناسباً. ودون جبل يوكا كاستراتيجية للتخلص من النفايات، لا تملك الولايات المتحدة الأمريكية أي استراتيجية أخرى. في أيار/مايو من عام 2009، قال وزير الطاقة ستيفن تشو (Steven Chu)، الحاصل على جائزة نوبل للفيزياء:

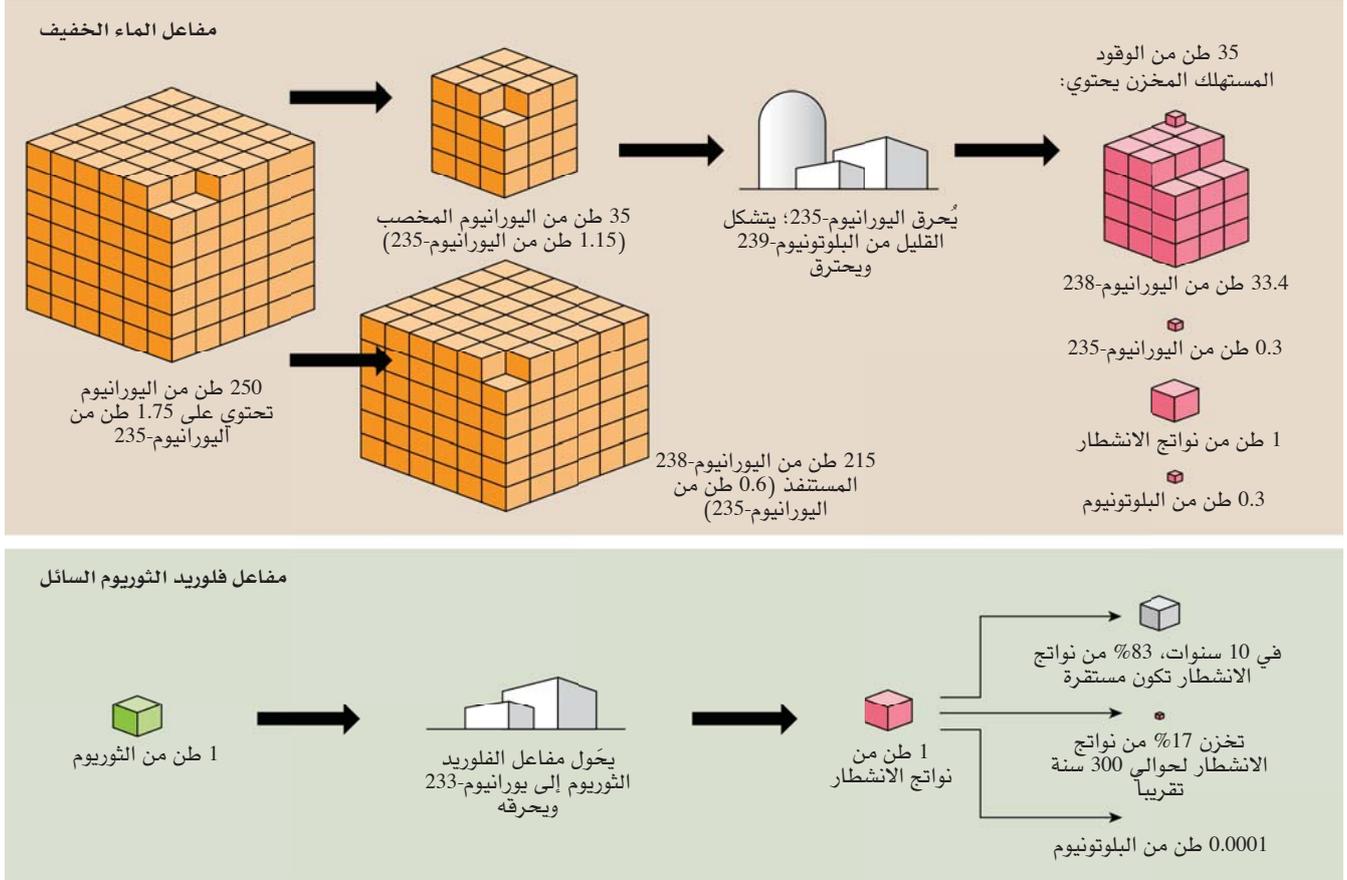


الشكل 4. تُزال قضبان وقود اليورانيوم فقط بعد استحقاق قدره 4% أو نحوها من طاقتها الكامنة. تتراكم الغازات الخاملة مثل الكريبتون والكريتون بالإضافة إلى نواتج الانشطار الأخرى كإسمايوم، والتي بدورها تمتص النيوترونات الضرورية لمساندة التفاعل التسلسلي. كما يكون الوقود الصلب مجهداً؛ بسبب فروق درجات الحرارة الداخلية؛ وبسبب الضرر الإشعاعي الذي يحطم الروابط التكافؤية لأكسيد اليورانيوم؛ وأخيراً بسبب نواتج الانشطار المسببة للبنية الشبكية للوقود الصلب. وبما أن الوقود الصلب يتعرض للتورم والتشوه، فإنه يجب استعمال أنابيب تغليف مشععة ومصنوعة من الزركونيوم لاحتواء هذا الوقود ونواتج انشطاره بداخلها، وذلك عندما تكون في المفاعل أو عندما تكون لعدة قرون في مستودع خزن النفايات.

لنواتج الانشطار ذات النشاط الإشعاعي العالية بالاضمحلال حتى الاستقرار، يمكن وبشكل آمن نقل قضبان الوقود إلى حاوية الخزن الجافة. لا يخضع وقود الفلوريد السائل للإجهاد البنيوي كما هو الحال في الوقود الصلب، كما يمكن أن تتحمل روابطه الأيونية مستويات غير محدودة من التلف الإشعاعي، في حين تكون تكاليف إزالة عناصر الوقود الصلب المصنعة وتكاليف التوقفات الدورية لاستبدالها مرتفعة جداً.

تعتبر الطرق الأكثر أهمية هي تلك التي بواسطتها يتلامس الوقود السائل مع الهندسة الكيميائية. ففي قضبان الوقود المصنوعة من أكسيد اليورانيوم يتولد العديد من نواتج ما بعد اليورانيوم مثل البلوتونيوم-239، الناتج عن امتصاص اليورانيوم-238 للنيوترون، متبوعاً بضمحلالات بيتا. ينشطر بعض من هذا البلوتونيوم مساهماً بثلاث الطاقة الناتجة في مفاعلات اليورانيوم. تكون جميع عناصر ما بعد اليورانيوم محطة في التدفق النيوتروني، إما بالانشطار المباشر أو بتحويلها إلى مادة انشطارية، ماعدا ذلك الوقود الصلب الواجب إزالته قبل الوصول إلى الاحتراق الكامل. أما في الوقود السائل، فيمكن أن تبقى نواتج ما بعد اليورانيوم في الوقود السائل للقلب، متحوّلة إلى مواد انشطارية بامتصاصها للنيوترونات.

في قضبان الوقود الصلبة، تكون نواتج الانشطار محصورة في بنية الشبكة البلورية لمادة الوقود. أما في حالة الوقود السائل فيمكن إزالة تلك النواتج بسهولة نسبياً. على سبيل المثال، من السهولة إزالة سم الانشطار -غاز الكزينون- وذلك لكون فقاعاته تتشكل خارج المحلول الملحي. يشكل فصل المواد بهذه الطريقة الميزة المركزية الرئيسية لطاقة الثوريوم، والتي من خلالها يتشكل اليورانيوم الانشطاري-233 في البطانة من أجل تصديره إلى القلب. يتشكل مجدداً في ملح فلوريد الثوريوم الموجود في البطانة يورانيوم-233 والذي بدوره يشكل رباعي فلوريد اليورانيوم القابل



الشكل 5. من بين الاختلافات العديدة بين دورة الوقود ثوريوم/يورانيوم ودورة الوقود يورانيوم مخصب/بلوتونيوم هو حجم المواد المستخدمة من بداية حتى نهاية توليد كميات متشابهة من الطاقة الكهربائية. يستخرج الثوريوم من نفس المناجم التي تحتوي على الأتربة النادرة، والتي من السهل فصل الثوريوم منها. بالمقابل، يجب معالجة كميات ضخمة من فلز اليورانيوم بشكل مجدي وغالي الثمن للحصول على كميات مفيدة من اليورانيوم المخصب بالنظير الانشطاري يورانيوم-235. من ناحية أخرى، تنتج دورة وقود اليورانيوم كمية كبيرة من النفايات الكتلية، والتي تحتاج إلى التخزين المعزول جيولوجياً لمئات من العقود. في حين تنتج دورة وقود الثوريوم نفايات قليلة جداً، ذات سمية إشعاعية قليلة على المدى البعيد، والتي تحتاج لتخزينها فقط ثلاثة عقود تقريباً.

ولكنها تنتج طيفاً مختلفاً تماماً من الأكتينيدات (العناصر فوق الأكتينيوم في الجدول الدوري، والنتيجة في المفاعلات عن طريق امتصاص النيوترونات والتحول). تُعدّ النظائر المختلفة لهذه العناصر المساهم الرئيسي في السمية الإشعاعية الطويلة الأمد للنفايات النووية.

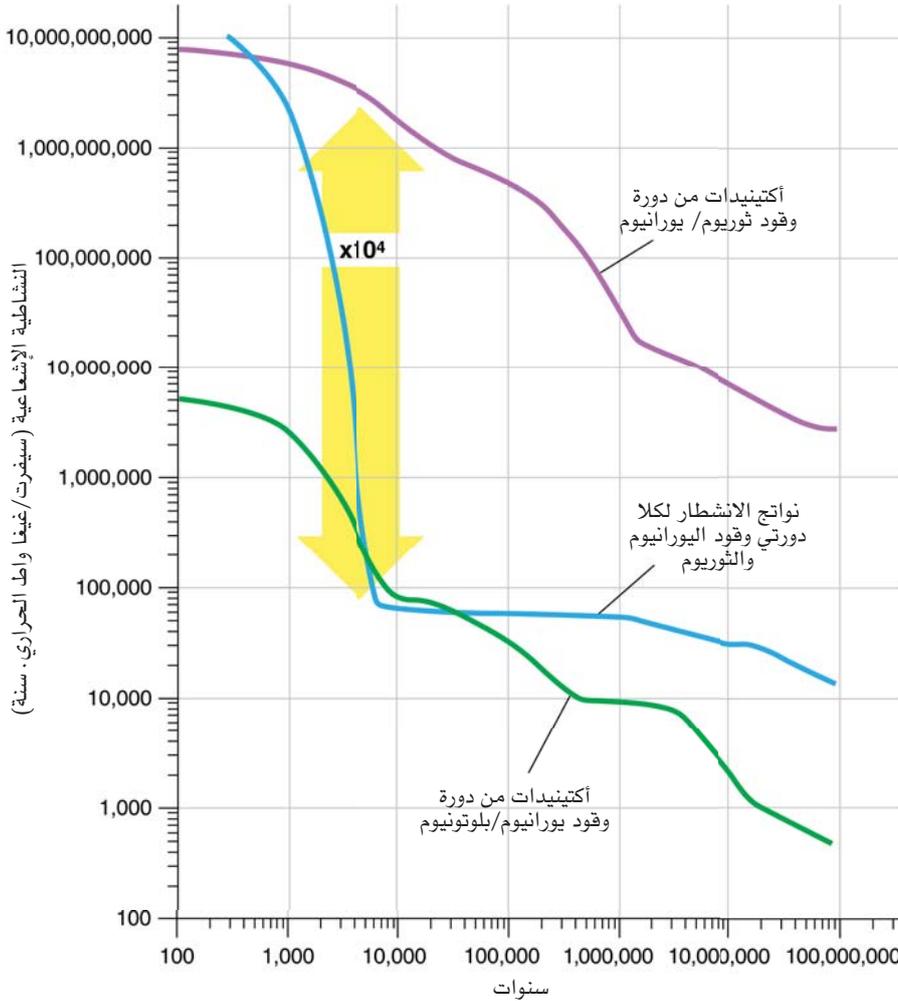
بما أن العدد الكتلي للثوريوم-232 أقل بست وحدات من اليورانيوم-238، يحتاج الثوريوم إلى أسر عدة نيوترونات لتحويله إلى أول عنصر ما بعد اليورانيوم. يبيّن الشكل 6 بأن السمية الإشعاعية لنفايات دورة الوقود ثوريوم/يورانيوم أقل بكثير من تلك المستعملة حالياً دورة يورانيوم/بلوتونيوم- بعد 300 عام تكون سميتها أقل بحوالي 10000 مرة.

بموجب القانون، تُعدّ الحكومة الأمريكية المسؤول الوحيد عن النفايات النووية التي نتجت حتى الآن، والتي جمعت 25 مليار دولار على شكل رسوم على الطاقة النووية المنتجة على مرور

"يجب استبعاد جبل يوكا بوصفه خياراً على الطاولة. إن ما سنفعله هو القول: دعونا نرجع خطوة إلى الوراء. نحن ندرك اليوم أننا نعرف أكثر بكثير مما كنا نعرف قبل 25 أو 30 عاماً." تقول هيئة التنظيم النووي (Nuclear Regulatory Commission) بأن الخزن بالحاويات الجافة في المواقع الحالية سيكون آمناً لعدة عقود من الزمن، وبذلك سيعطينا الوقت اللازم لمعرفة ما يتوجب علينا القيام به لاستراتيجية الخزن طويلة الأمد.

أصبحت مشكلة النفايات إلى حدّ ما أقل إلحاحاً وذلك لأن العديد من المالكين اعتقدوا بأن الوزير تشو على حق في أن النفايات المخزنة في حاويات صلبة وضخمة وتحت حراسة كافية، هي في الحقيقة ليست عرضة لأي حادث متوقع أو أي أذى في المنظور القريب، وتمكّننا من كسب الوقت لتطوير خطة سليمة للتخلص الدائم من هذه النفايات.

تنتج مفاعلات الثوريوم واليورانيوم نواتج الانشطار ذاتها،



الشكل 6. يمكن تحييد مسألة تخزين النفايات النووية عند الانتقال إلى مفاعلات فلوريد الثوريوم السائلة LFTR. تتطلب الكمية الصغيرة نسبياً من النفايات المتولدة عن مفاعلات LFTR إلى بضع مئات من السنين للتخزين المعزول في حين تحتاج النفايات المتولدة عن دورات وقود اليورانيوم/بلوتونيوم إلى بضع مئات الآلاف من السنين. تنتج نواتج الانشطار ذاتها عن المفاعلات العاملة على وقود الثوريوم أو على وقود اليورانيوم، والتي تمثلت سميتها الإشعاعية باللون الأزرق على مخطط الجرعة الإشعاعية كتابع للزمن. يمثل الخط باللون الأرجواني نفايات الأكتينيدات الناتجة عن مفاعلات الماء الخفيف، في حين يمثل الخط باللون الأخضر نفايات الأكتينيدات المتولدة عن مفاعلات LFTR. بعد 300 عام، ستكون السمية الإشعاعية لنفايات دورة وقود الثوريوم أقل بـ 10,000 مرة من مثيلاتها الناتجة عن نفايات دورة وقود يورانيوم/بلوتونيوم. أيضاً يمكن لمفاعلات LFTR استهلاك المواد الانشطارية المستخرجة من نفايات مفاعلات الماء الخفيف للبدء بتشغيل وقود جديد ثوريوم/يورانيوم.



ثلاثين عاماً وذلك من أجل التعامل مع هذه النفايات. إن التقاعس عن العمل على جبهة النفايات وذلك بالاعتباس من كلمات إدارة أوباما، لا يُعد خياراً. يشعر الكثيرون بأن جزءاً من 25 مليار دولار التي جُمعت حتى الآن سوف تنفق بشكل جيد على بدء بحوث طاقة الثوريوم المساهمة في الطاقة النووية المستقبلية مع الحد الأدنى للنفايات.

## الأمان أولاً

لقد كان حلم مصممي المفاعلات النووية الدائم هو إنتاج محطات نووية ذات أمان ذاتي -لعناصر المفاعل، والوقود، والمكونات الهندسية المستخدمة في إنتاج الطاقة- والذي من خلاله سيبقى المفاعل ومن دون تدخل بشري مستقرّاً أو يغلق ذاته استجابة لأي حادث، أو انقطاع في التيار الكهربائي، أو التغير غير الاعتيادي للحمل أو أي حوادث أخرى مؤسفة.

في الوضع الراهن للبحث والتصميم، يبدي تصميم مفاعلات LFTR درجة عالية من الأمان الذاتي. تُعدّ مفاعلات الماء المضغوط الشكل الوحيد الأكثر انتشاراً بين المفاعلات النووية الحالية. يقوم الماء في مفاعلات الماء الخفيف والثقيل والمغلي (والتي تشكل 441 مفاعلاً حول العالم) بدور المهدئ والمبرد معاً.

تسبب حرارة الانشطار غليان الماء، إما مباشرة في قلب المفاعل أو في مولد

الشكل 7. توفر محطات الطاقة النووية حوالي 20% من الطاقة الكهربائية الأميركية، و70% من الإمداد بالطاقة منخفضة الانبعاثات. إن كل 750 ميغاواط من القدرة الكهربائية الناتجة عن المفاعلات العاملة تجنب سنوياً تحرير مليون متر مكعب من غاز CO<sub>2</sub> الناتج عن احتراق الغاز الطبيعي.

لهيئة التنظيم النووي لترخيص تصميم محطة نووية جديدة هو أنه في حال حدوث انقطاع كامل للتيار الكهربائي، يبقى المفاعل مستقراً على الأقل لعدة أيام إذا لم يكن معطلاً تلقائياً.

كما يجري، فإن ميزة الأمان للسداة المتجمدة قديمة قدم الفين وينبيرغ من عام 1965 في مفاعل الملح المصهور التجريبي، إلا أن هذه الميزة تفي بمتطلبات هيئة التنظيم النووي من حيث الإغلاق الروتيني البسيط للمفاعل وذلك بقطع الطاقة عن نظام تبريد السداة المتجمدة. وعليه، في مفاعلات الملح المصهور لا نحتاج إلى الطاقة لإغلاق المفاعل، على سبيل المثال، الطاقة اللازمة لتحريك قضبان التحكم. وبعبارة أخرى، هناك حاجة للطاقة لمنع إغلاق المفاعل.

## التكلفة

في مصطلحات التكلفة، تكون مثالية إذا تنافست بنجاح مع الفحم دون أي دعم أو تعديل تشريعي للسوق. وهذا يمكن تحقيقه تماماً. عموماً، في محطات الطاقة النووية تكون تكاليف رأس المال أكبر مما هو موجود في محطات الوقود الأحفوري، في حين تكون تكاليف الوقود أقل. تكون تكاليف رأس المال في المحطات النووية أكبر مما ينبغي وذلك لأن عملية التشييد المتضمنة بناء الاحتواء، يجب أن تستوفي معايير عالية جداً؛ ومنشآت أنظمة التحكم الدقيقة؛ وأيضاً تتضمن تكاليف رأس المال الضرائب اللازمة لتغطية نفقات تفكيك المحطات النووية وإزالتها بعد خروجها من الخدمة.

بيّنت الدراسة تحت عنوان «مستقبل الطاقة النووية المنشورة عام 2003 والمعدلة عام 2009» بأن تكلفة رأس المال لمحطات الوقود الأحفوري مساوية لـ 2.3 دولار لكل واط مقابل 4 دولار لكل واط في محطات الطاقة النووية العاملة بالماء الخفيف. بالاعتماد على ما سبق، ستكون تكاليف رأس المال لمفاعلات الملح المصهور LFTR أقل من تلك النسبة وذلك لعمل هذه المفاعلات عند الضغط الجوي واحتوائها على الماء غير المضغوط.

تستخدم في مفاعلات الملح المصهور بنية احتواء محكمة جداً، وذلك لعدم وجود البخار المتشكل عن الماء في حالة حدوث خلل في الضغط. أيضاً يمكن الاستغناء عن نظام الحقن الغالي الثمن والمستخدم لحقن المبرد العالي الضغط. هناك تصور واحد لصغر بنية الاحتواء في مفاعلات الملح المصهور ألا وهو وجود الخرسانة الصلبة تحت مستوى الأرض، مع قلنسوة خرسانية قوية على

البخار منتجة بذلك البخار الضروري لتحريك العنفات. يحافظ على الماء عند ضغط عالٍ لرفع درجة حرارة غليانه. ويكفل احتواء الضغوط الانفجارية باستعمال نظام مؤلف من أنابيب عالية الدقة والتكلفة، ومن أوعية الضغط. أما خط الدفاع الأخير فهو عبارة عن بناء احتواء ضخم ذي تكلفة عالية محيط بالمفاعل ومصمم لمواجهة أي كارثة انفجارية ومنع خروج المواد المشعة المدفوعة بالبخار المضغوط إلى الوسط الخارجي.

إن ميزة الأمان المتفق عليها في تصميم مفاعلات LFTR تكمن في أن المبرد -ملح الفلوريد السائل- لا يخضع للضغط. فلا يغلي ملح الفلوريد تحت درجات حرارة أقل من 1400 درجة مئوية. يقلل الضغط الطبيعي من تكاليف وأبعاد بناء محطة LFTR وذلك بتخفيض أبعاد ومتطلبات الاحتواء، بسبب الاستغناء عن ضرورة احتواء الضغط الانفجاري. في حال حدوث أي خلل سيتسرب الوقود في خط النقل دون انفجاره، ومن ثم يُؤسر هذا التسرب في بنية غير حرجة في حوض الأسر حيث يتم هناك تبريده وتصلبه.

ميزة الأمان الأخرى لمفاعلات LFTRs، والمشاركة مع الجيل الجديد لمفاعلات الماء المضغوط LWRs، هي معامل التفاعلية السلبية لدرجة الحرارة. على سبيل المثال، إذا ارتفعت درجة الحرارة في المفاعل إلى حد أعلى من المجال المعتاد، مما يدل على انحراف الاستطاعة، سيستجيب الوقود ذاتياً مترافقاً مع التمدد الحراري، مقلصاً بذلك المساحة الفعالة لامتناس النترونات -معامل التفاعلية لدرجة الحرارة سالب- وبالتالي تخفيض معدل الانشطار وهبوط درجة الحرارة من جديد. بالمناسبة، هناك الآن أشكال وبنى عديدة للوقود النووي والتي من بينها عدد يمكن اختياره كوقود صلب، يكون فيه ضياع التفاعلية غير محتمل.

في مفاعل LFTR، يُخفض التمدد الحراري للوقود السائل والمهدى من تفاعلية القلب. تسمح هذه الاستجابة بالتحكم المرغوب به للحمل اللاحق- تحت ظروف تغير الطلب على الطاقة، لا يحتاج المفاعل إلى وسيط للاستجابة للزيادات أو الانخفاضات التلقائية في طاقة الإنتاج.

يتمثل الخط الثاني للدفاع عن تصاميم LFTR بوجود سداة متجمدة متوضعة أسفل القلب -سداة الملح، والمبردة بواسطة مروحة للحفاظ عليها عند درجة حرارة أخفض من درجة تجمد الملح. إذا ارتفعت درجة الحرارة إلى درجة فوق النقطة الحرجة، تنصهر السداة ويفرغ الوقود السائل الموجود في القلب متدفقاً إلى بنية تحت حرجة في حوض الأسر. يمكن تطبيق هذا الإجراء عالي الأمان فقط في حالة الوقود السائل. أحد المتطلبات الحالية

الأعمال الاقتصادية أن تسويق أية تكنولوجيا يؤدي إلى خفض التكاليف وزيادة عدد الوحدات، كما يوفر منحني الخبرة فوائد في تخصص العمل، وعمليات الإنتاج المتكرر، والتوحيد القياسي للمنتجات وإعادة تصميم منتج فعال.

نظراً للحجم الصغير لمفاعلات LFTRs، يبدو أنه من المعقول أن نتوقع إمكانية تصنيع مفاعلات باستطاعة 100 ميغاواط بتكلفة تساوي تقريباً 200 مليون دولار. بالمقابل، تنتج شركة بوينغ لتصنيع الطائرات يومياً 200 مليون دولار، والتي يمكن اعتمادها كنموذج لإنتاج مفاعلات الملح المصهور.

تشكل البنية المعدلة المرحلة المهمة في عمليات تصنيع محطات الطاقة النووية التقليدية، كما إنه يمكن أن تبنى مفاعلات الماء المضغوط المتطورة AP1000 والتابعة لشركة ويستنغهاوس الرائدة عالمياً خلال 36 شهراً بدءاً من زمن بناء الخرسانة. يمكن تفسير جودة فوائد البنية المعدلة بوجود عملية التفيتيش المؤلفة من مجموعة من البروتوكولات المعدة من قبل متخصصين عاملين في بيئة تخصصية.



الشكل 8. تنتج شركة بوينغ يومياً 200 مليون دولار في خطوط الإنتاج الضخمة لصناعة الطائرات، والذي من شأنه أن يكون نموذجاً لإنتاج كميات كبيرة من مفاعلات فلوريد الثوريوم السائل. يقدم هذا الإنتاج المركزي الضخم حسناً التخصص بين العاملين، ومعايرة الإنتاج، والاستعمال الأمثل لمراقبة الجودة، كما يمكن إجراء التفيتيش من قبل عاملين مدربين تدريباً عالياً، باستعمال أجهزة ضخمة ومخصصة.

مستوى الأرض لمقاومة تأثير الطائرات أو أي اعتداءات منظورة.

توجد عوامل أخرى تساهم بشكل إيجابي في بنية المصاريف، مثل بساطة معالجة الوقود، وصغر الأجهزة، وبشكل مميز صغر تكاليف الوقود، وبشكل ملحوظ الكفاءة الطاقية العالية. تُعدّ مفاعلات الملح المصهور من مفاعلات درجة الحرارة العالية، العاملة عند درجة حرارة حوالي 800 درجة مئوية، والتي من وجهة النظر الترموديناميكية إيجابية لتحويل الطاقة الحرارية إلى كهربائية - المردود الحراري 45% تقريباً، مقابل 33% النموذجي لمحطات الفحم والطاقة النووية القديمة. أيضاً تفتح الحرارة العالية المجال لاستخدامات مفيدة للطاقة الحرارية، مثل إنتاج الهيدروجين الذي أصبح سهلاً نتيجة لارتفاع الحرارة، وكذلك إدارة العمليات الكيميائية الصناعية مع حرارة تشغيل عالية. بالاعتماد على موقع محطات الملح المصهور، يمكن أيضاً تزويد الحرارة مباشرة إلى المنازل والمكاتب.

من وجهة النظر الاقتصادية يجب على الثوريوم أن يتنافس مع كفاءة مصادر الطاقة الأولية والمتجددة. تتطلب عملية اتخاذ القرار

الناضج بأن نأخذ بالحسبان من جهة، فيما إذا كانت مصادر الطاقة المتجددة والكفاءة تستطيعان الإجابة الواقعية على احتياجات الطاقة المتزايدة سريعاً لكل من الهند والصين، وأن نأخذ بالحسبان من جهة أخرى، استخدام الوقود الأحفوري الرخيص في البلدان النامية - المعروف بتكاليفه البيئية العالية. كما يجب أن يضمن جزء من التكاليف المحسوبة والمنقولة إلى الثوريوم دوره في توسيع الازدهار في العالم المرتبط بزيادة الطلب على الطاقة. نحن لدينا توفير مالي نتيجة لتجنب التلوث البيئي الناتج عن الارتفاع الكبير في استهلاك الوقود الأحفوري في البلدان النامية.

ولعل الفكرة الأكثر إلحاحاً التي يمكن تصورها لدفع الطاقة المعتمدة على الثوريوم في الاتجاه الرئيسي، هي الإنتاج الضخم للثوريوم لدفع انتشاره السريع في الولايات المتحدة الأمريكية ومن ثم تصديره إلى أماكن أخرى. يلاحظ رجال

من أيلول/سبتمبر إلى تشرين أول/أكتوبر من عام 2003 فرضية العالم الأميركي؛ مجيد كاظمي، «وقود الثوريوم للطاقة النووية»). من الضروري أن يترافق اليورانيوم-233 الناتج عن الثوريوم-232 باليورانيوم-232، كوسيلة انتشار وقائية. يمتلك اليورانيوم-232 عمر نصف قصير نسبياً حوالي 73.6 سنة، ويحترق ذاتياً منتجاً نواتج اضمحلال تتضمن المصدرات الشديدة لإشعاعات غاما عالية الطاقة. من السهل الكشف عن إصدارات غاما التي تكون مدمرة للغاية لمكونات الذخائر، والدوائر وبشكل خاص الموظفين.

أيضاً يساهم الحاصل النتروني لتصاميم مفاعلات LFTR في توفير مخزون هذه المفاعلات من المواد النووية. في قلب مفاعل LFTR، حيث ينتج عن امتصاص نوترون من قبل اليورانيوم-233 أكثر من نوترونين في الانشطار الواحد -يستخدم أحد النوترونات لقيادة الانشطار التالي والآخر لتحويل الثوريوم-232 إلى يورانيوم-233 في محلول البطانة. على مجال واسع للطاقات، يصدر اليورانيوم-233 وسطياً 2.4 نوتروناً لكل امتصاص. ومع ذلك، مع الأخذ بعين الاعتبار معدل الانشطار التام الناتج عن الأسر، والأسر في نوى أخرى، ينبغي على مفاعل الملح المصهور ذي

يتمثل أحد الأدوار المحتملة لمحطات الطاقة النووية العاملة على الملح المصهور، باستبدالها بمكونات توليد الطاقة الناتجة من محطات احتراق الوقود الأحفوري العاملة، ودمجها مع البنية التحتية المستخدمة في توزيع الطاقة الكهربائية القائمة والمربوطة سلكياً إلى تلك المواقع. وبالفعل يمكن أن يكون التوفير كبيراً جداً بالتكيف مع البنية التحتية العاملة.

## عدم الانتشار

يُعدُّ التنافس من حيث التكاليف عاملاً مهماً في تطوير الطاقة النووية، ولكنه موجود إلى حد ما على مستوى مختلف عن اعتبارات حياة أو نهاية إدارة النفايات، والأمان، وعدم انتشار السلاح النووي. يجب أن يكون تصاعد دور الطاقة النووية في العالم مرتكزاً بشكل حاسم على القضاء على الاستخدام غير المشروع للمواد النووية.

عندما تمَّ إحياء فكرة طاقة الثوريوم في السنوات الأخيرة، كان محور النقاش حول مقاومة الثوريوم الذاتية للانتشار (انظر



الشكل 9. في القشرة الأرضية، يعتبر الثوريوم العنصر الأكثر شيوعاً من القصدير، والفضة، والزنك. يكافئ متر مكعب من القشرة الأرضية متوسطة الإنتاجية حوالي أربعة مكعبات من الثوريوم بحجم مكعب السكر، قادرة على تزويد الشخص الواحد بالطاقة لأكثر من عشر سنوات إذا انشطر الثوريوم بالكامل. يشير موقع ليمهي على حدود مونتانا-أيداهو (Lemhi pass on the Montana-Idaho border) على احتوائه على 1,800,000 طن من الثوريوم الخام عالي الدرجة. تستطيع خمسة آلاف طن من هذا الوقود تزويد الولايات المتحدة الأميركية بالطاقة الضرورية لمدة عام واحد. بسبب عدم وجود الطلب الحالي، أعادت الولايات المتحدة الأميركية حوالي 3200 طن من نترات الثوريوم المكرر إلى القشرة الأرضية عن طريق دفعه في صحراء نيفادا. أخذت الصورة في الشكل 9 بموافقة إدارة الأمن النووي الوطني/ مكتب موقع نيفادا.

الاقتراحات في شهر تشرين الثاني/نوفمبر من عام 2009 وتمّ إنجاز التصاميم في 30 أيلول/سبتمبر من عام 2010. بعد العرض المقدم من قبل اللجنة الاستشارية للطاقة النووية التابعة لوزارة الطاقة، أعلن الوزير تشو في كانون الثاني/يناير من عام 2011 فيما إذا سيُموّل واحد من هذه التصاميم لإنجازه، ليكون جاهزاً للتشغيل في عام 2021.

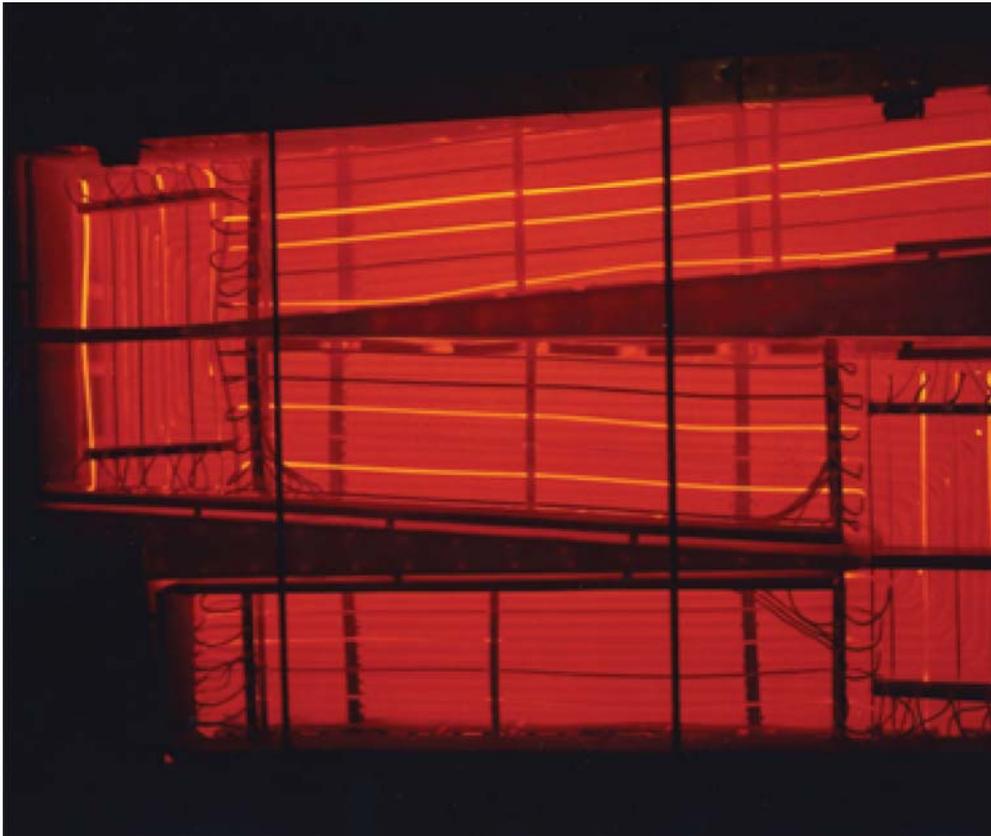
هناك تصميمان رئيسيان تحت الاعتبار. مفاعلات القلب المشوري ومفاعلات القلب ذي طبقة الوقود الحصوية (pebble bed)، التي هي عبارة عن إصدارات متقدمة جداً لتصاميم الوقود الصلب المستخدمة في الأعوام 1970 و 1980. في كلا التصميمين، جسيمات صغيرة مكسوة بالسيراميك ومصنوعة من اليورانيوم المخضب صنعت على شكل كرات أو حبيبات، ومرتبطة بتصاميم مناسبة لإدارة هذا الوقود في المفاعل. سمة وقود هذه التصاميم- توفر سمات الأمان الذاتي التي تتخلص من الانصهار الانهياي في المفاعل. ومن خلال التجارب تبين أن استحقاق الوقود الصلب

التصميم الجيد توجيهه 1.08 من النيوترونات الناتجة من الانشطار إلى الثوريوم لتتم عملية تحويله. وهكذا لا يخلق هذا التوازن الدقيق أي فائض بالنيوترونات، وهذا كافٍ لتوليد وقود لأجل غير مسمى. إذا كانت كميات معينة من اليورانيوم-233 مهدورة لأغراض غير سلمية، سيطفأ المفاعل بسبب عدم كفاية الناتج الانشطاري المتولد في البطانة.

فقط بالجهد المصمم، والمُموّل تمويلًا جيداً على مقياس البرنامج الوطني يمكن التغلب على العقبات التي تحول دون الاتجار غير المشروع لليورانيوم 233/232 المنتج في المفاعل. وهذا الجهد بالتأكيد أقل إثارة للمشاكل عند مواصلة تخصيص اليورانيوم الطبيعي أو توليد البلوتونيوم. في عالم يكون فيه الاعتماد على تكنولوجيا مفاعلات الملح المصهور على نطاق واسع، يُفوّض مشروع تخصيص اليورانيوم غالي الثمن بأكمله -الخطوة الأولى الضرورية لإنتاج البلوتونيوم- وسيجد العاملون خياراتهم تضيق ليصبح اليورانيوم غير صالح للاستعمال والبلوتونيوم بعيد المنال.

## الأفاق

ماهو نوع الجهد الوطني اللازم لإطلاق عصر الثوريوم؟ نحن ننظر إلى تجربة في النصف الثاني من عام 2010 صادرة عن وزارة الطاقة، تكشف عن مشروع محطة الطاقة النووية من الجيل الجديد بتكلفة مقدارها 5 مليارات دولار. وإثبات قانون الطاقة السياسي لعام 2005، طلب من هذا المشروع إثبات توليد الطاقة الكهربائية وربما الهيدروجين باستعمال منبع طاقي نووي ذي حرارة عالية. بُدئ بإنجاز هذا المشروع بالتعاون مع الصناعة، والمخابر الوطنية لوزارة الطاقة، والجامعات الأميركية. خلال السنة المالية لعام 2010، أنفق 528 مليون دولار أمريكي. وقد وصلت



الشكل 10. يبيّن الشكل التشغيل الناجح لمفاعل الملح المصهور التجريبي في المختبر الوطني أوك ريدج على مدى أربع سنوات بدءاً من عام 1969. من أجل إجراء الاختبارات الهندسية، لم يتم تثبيت بطانة الثوريوم. وقد جلب وقود اليورانيوم-233 الضروري للمفاعل من مفاعلات أخرى تحتوي على الثوريوم-232. في هذا المفاعل لا وجود للمولد العنفي. تتم إزالة غاز الكزيتون باستمرار لمنع حدوث الامتصاص غير المرغوب للنيوترونات. تجري عملية تبديل الوقود مباشرة دون توقف المفاعل. أثبتت بنية الغرافيت ومعدن الهيكل والمضخات والأنابيب ملاءمتها للعمل. أيضاً طُوّر مختبر أوك ريدج كيمياء فصل الثوريوم، واليورانيوم، ونواتج الانشطار في أملاح الفلوريد السائلة. أخذت الصورة في الشكل بموافقة المختبر الوطني أوك ريدج، وزارة الطاقة الأميركية.

الوقود الأحفوري إلى الوقود النووي، إلى جانب وجود ملف منع انتشار السلاح النووي المسؤول عن تصدير التقانة النووية إلى البلدان النامية، والتي فيها تصبح مشكلة تزايد استهلاك الوقود الأحفوري أكثر إلحاحاً.

لا يُعد مشروع محطة الطاقة النووية من الجيل الجديد حلاً. في الزمن القريب هناك احتمال ضئيل بوجود بديل عن الفحم والغاز لتوليد الطاقة الكهربائية في غضون جيل أو جيلين. ولكن يمكن تسريع إيجاد هذا البديل بمزاحمة وسائل البحث الأخرى، كالتقانة النووية البديلة والمتعطشة لدعم مشروع الفين وينبيرغ -مفاعل الملح المصهور- أو نستطيع أن نلقي نظرة فاحصة على وقود الثوريوم ونحن نعيد التفكير في كيفية إنتاج الطاقة المستهلكة في الجيل القادم. يتم بحث هذه القضايا وغيرها في المنتدى <http://energyfromthorium.com>، والذي يضم تجمعاً دولياً من العلماء والمهندسين العاملين على التحقق من الإمكانية المحتملة لوقود الثوريوم.

روبرت هارغرافس، رالف موير.

← نُشر هذا المقال في مجلة *American Scientist, Volume 98, 2010*. ترجمة د. سعدو الظواهره، جورج سابا، هيئة الطاقة الذرية السورية.

يصل إلى قيم أعلى من 19% قبل أن يتم استبدال هذا الوقود. حالياً في وزارة الطاقة الأميركية لا يُعد الثوريوم خياراً للتنمية.

إذا كانت وزارة الطاقة لا تعزز طاقة الثوريوم، فمن سيفعل ذلك؟ كانت المرافق مقيدة من قبل معظم الاقتصاديات الركيكة وذلك عند الاختيار بين الفحم و الطاقة النووية، وكلاهما منفور منه. كما أنه لم تمتلك هذه المرافق أي حافز ذاتي للتصور المريح وغير المثبت عند الانتقال إلى الثوريوم. إضافة إلى ذلك، قدمت الشركات الكبيرة مثل شركة ويستنغهاوس، اعتمادات مالية كبيرة إلى تقنية مختلفة، مفاعلات الماء الخفيف الضخمة، حيث أثبتت هذه التقانة صحتها باعتمادها من قبل هيئة التنظيم النووي من أجل البناء والترخيص. من بين خبراء السياسة والتقانة النووية من سمع بأن تقانة نووية كبيرة قد أصبحت جاهزة -مفاعلات الجيل الثالث لمحطات الطاقة النووية والتي حلت مشكلة الأمان، والتكلفة الفعالة للطاقة النووية. وأيضاً هؤلاء الخبراء لن يكونوا مضطهدين بشكل مفرط من مشكلة النفايات النووية. وعلى الأفق المنظور، يمكننا تصور حرق معظم أسوأ النفايات بتقنية مختلفة تماماً، مفاعلات النترونات السريعة التي تستهلك المواد التي تتطلب تخزيناً طويل الأمد.

لكن محطات ضخمة موافق عليها مسبقاً لن يتم إنتاجها بكميات كبيرة. لأنها لم تقدم تصوراً للانتقال السريع الواسع النطاق من

# الموجات الكهربائية ضمن الدماغ

تعتبر العصبونات مراكز تتحرك فيها جسيمات مشحونة كهربائياً، تولد بحركتها تيارات كهربائية ضعيفة (مكروية)، وتكون مسؤولة عن الموجات الكهربائية التي تُسجل على سطح الجمجمة، ويعكس تواتر هذه الموجات حالة الفرد من يقظة ووعي.

الكلمات المفتاحية: أمواج داخل الدماغ، مشبكية عصبية داخل خلوية، مشبكية عصبية خارج خلوية.

**Key words:** waves inside the brain, intracellular synaptic, extracellular synaptic.



واستخدم لأول مرة المصطلح : تخطيط الدماغ الكهربائي (EEG) Electro Encephalo Gramme، المستخدم لأيامنا الحالية لتوصيف الشحنات الكهربائية (التفريغ الكهربائي) المسجلة سواءً على السطح أو عميقاً بداخل الدماغ. ومع ذلك، فإن وجود النشاط الدماغى الكهربائي العفوي (الذاتي) كان قد اكتشف قبل ذلك بنصف قرن، على يد مدرس شاب بمدرسة العلوم الطبية في ليفربول Liverpool يدعى ريتشارد كاتون (1842 – Richard Caton) الذي نشر اكتشافاته الأولية التي رصدها عند الأرنب والقرد، مشيراً إلى إمكانية تسجيل تيارات كهربائية ضعيفة ذاتية (عفوية) وبشكل منتظم، بين الكترودين موضوعين على سطح القشرة الدماغية، وأن هذه الموجات الكهربائية تكون مرتبطة بوظيفة المنطقة المعنية من القشرة الدماغية على ما يبدو. وقد أسهم ريتشارد كاتون مع كثير غيره من علماء الفيزيولوجيا العصبية منذ أواخر القرن التاسع عشر، باكتشافات عديدة تأكدت صحتها لاحقاً، حول خصائص الكمونات الكهربائية الدماغية. فقد أظهر أن هذه الكمونات الكهربائية تكون غالباً ذات طبيعة اهتزازية (تذبذبية)، وأمكن تعديلها بتنبيهات حسية Sensorielles، وأنها تظهر عند تنبيه أو تنشيط المناطق القشرية حيث يتم التسجيل، ولزم الأمر خمسين سنة أخرى من أجل فهم آليات تشكلها.

كان الإنكليزي إدغار دوغلاس أدريان Edgar Douglas Adrian (1889-1977)، أول من اقترحوا النموذج العصبي لتفسير منشأ الموجات الكهربائية الدماغية. وقد حصل على جائزة نوبل Noble للطب والفيزيولوجيا في العام 1932، لأنه اكتشف المنبهات الحسية. وعلى سبيل المثال، يكون الشد العضلي مرتبطاً بشكل مباشر، بالفعاليات الكهربائية للألياف العصبية التي تربط هذه العضلات. وكان قد تحرى خصائص نظم التخطيط الكهربائي الدماغى في منطقة القشرة الدماغية عند الإنسان، ولكن الآليات التي اقترحها لتفسيرها كانت غير صحيحة.

بعد اختبار النموذج الذي يسمح بتفسير وجود تيار كهربائي، ووجود فروق في الكمون، ووجود موجات كهربائية في الدماغ، سنتعرف على المعلومات التي يمكن استنتاجها من تخطيط الدماغ الكهربائي EEG، وكيف تكون هذه التسجيلات طريقة لمقاربة دراسة حالة الوعي Conscience، ولنبدأ بالسؤال الأول : كيف يفسر علماء البيولوجيا العصبية حالياً وجود تيارات كهربائية في الدماغ؟ فهم يشبهون الأعصاب الهرمية Neurons Pyramidaux التي تشكل معظم أعصاب القشرة الدماغية (حوالي 80%)، بثنائيات قطب كهربائية، تولد تيارات خلوية خارجية، تكون الأساس في تشكل الموجات الكهربائية الدماغية.

فعندما نضع إلكتروداً معدنياً جيد الناقلية على سطح جمجمة الإنسان، ونوصل خرج الإلكترود إلى مضخم إشارة مربوط مع راسم الإشارة المهبطي، فإننا نستطيع رصد التغيرات العفوية التلقائية للكمون الكهربائي، الذي يمكن أن تتغير سعته من بضعة ميكرو فولت إلى عدة ملي فولط، وهكذا فإننا نسجل تبدلات الكمون في مناطق مختلفة من الدماغ، وهذا ما يعرف بالموجات الكهربائية الدماغية. تنتج هذه الظاهرة البيولوجية الكهربائية (الكهرا بيولوجية) عن آليات عصبونية موضحة جزئياً، تشكل المعلومة الوحيدة المتحدرة عن الدماغ، مع الاعتقاد أننا نستطيع تحليلها بالزمن الحقيقي وبدقة من رتبة الملي ثانية.

توجد الأمواج الكهربائية الدماغية عند جميع أفراد المملكة الحيوانية، ويمكن تسجيلها عند كل الأنواع الحيوانية، بدءاً من المراكز العصبية في الرخويات Mollusques المكونة من عدة أعصاب كروية ملتحمة Globulaire، وصولاً إلى دماغ الإنسان، الذي يحتوي على قرابة (1210 عصباً). ويتراوح مجال الترددات التي رصدت في المملكة الحيوانية من عشر الهرتز (0.1Hertz) إلى عدة مئات الهرتز، وبقيت كما هي عليه خلال التطور، على الرغم من تطور البنى الدماغية والكفاءات السلوكية، وبروز أو انبثاق العمليات الذهنية. ومع ذلك، فقد حُدِّدت بعض الفروق التي مايزال السبب في وجودها ومدلولاتها مجهولاً. وعلى ما يبدو، فإن ساعات الموجات الدماغية الكهربائية عند الأسماك والزواحف من بين أنواع أخرى، تكون أقل من تلك الساعات الملاحظة عند الثدييات.

## الموجات الدماغية موجودة عند كل الكائنات

من جهة أخرى، ينتج دماغ اللافقاريات، وخصوصاً دماغ الحشرات، والقشريات، ومعديات الأرجل، وبعض الحلقيات (الديدان) مثل دودة الأرض، موجات كهربائية بتوتر أعلى بـ 100 هرتز مما ينتجه دماغ الفقاريات، وقد لوحظ أن الأخطبوط المعروف Octopus Vulgaris، والذي يماثل نشاط دماغه الكهربائي دماغ الفقاريات، هو الحيوان الوحيد الذي تُظهر الموجات الكهربائية في دماغه فترات توقف مؤقتة غامضة تدوم عدة دقائق، لا يمكن تفسيرها، حيث تتوقف الفعالية الكهربائية الدماغية تماماً ويبقى السبب في ذلك مجهولاً.

تشير معظم كتب علم الأعصاب إلى أن الموجات الدماغية الكهربائية كانت قد وصفت عند الإنسان لأول مرة في عشرينيات القرن الماضي، من قبل طبيب الأمراض النفسية الألماني هانس بيرغر (1873-1941) Hans Berger، الذي نشر اكتشافاته عام 1929،



المشابك العصبية، وسنرى كيف تتولد هذه التيارات الكهربائية الأولية.

ينشأ عن الأعصاب الهرمية نقاط اتصال فيما بينها -مشابك عصبية- من جهة، واتصالات مع أعصاب في البنى تحت القشرة الدماغية من جهة أخرى، وبالأخص منطقة المهاد البصري Thalamus التي يتم فيها تحليل المؤثرات الحسية، وتخدم بتأمين التقوية والوصل Relais؛ ويسهم المهاد البصري في تنظيم النعاس والسهر والوعي. حيث تؤمن الأعصاب في منطقة المهاد البصري، اتصالات مشبكية مع الأعصاب الهرمية وذلك عن طريق تحرير الناقل العصبي المنبه الرئيسي الغلوتامات Glutamate في المشابك العصبية، وهذا يقود إلى تنبيه العصب الهرمي بعد المشبكي (انظر المؤطر 1: منشأ التيار الكهربائي الدماغية).

يطلق تثبيث الناقل العصبي الغلوتامات على مستقبلاته في المشابك العصبية فتح القنوات الأيونية الموجودة على الغشاء الخلوي للأعصاب الهرمية، مما يسمح بتدفق أيونات موجبة الشحنة تدخل إلى الاستطالة الشجرية العصبية Dendrite. يؤدي هذا

## فرضية ثنائي القطب Dipôle

تتوزع الأجسام الخلوية للأعصاب الهرمية، ذات الشكل المثلاثي، في طبقات مختلفة من القشرة الدماغية Cortex (نعرف منها 6 طبقات). وتمتلك الأعصاب الهرمية زائدة كبيرة شجرية التفرع تدعى الاستطالة القمية Apical تتفرع منها استطالات عديدة. وتخرق الاستطالات القمية مسافات كبيرة، تصل إلى سطح القشرة الدماغية، وتكون مرتبطة ومتصلة مع العصبونات المحورية Axones، المتحدرة من أعصاب أخرى بواسطة المشابك العصبية Synapses، حيث تؤمن العصبونات المحورية النقل السريع الوظيفي للإشارات العصبية.

السؤال الثاني: كيف يمكن تطبيق نموذج ثنائي القطب على الأعصاب الهرمية؟ علماً أن ثنائي القطب الكهربائي النموذجي، هو عبارة عن عنصر ناقل يحمل على نقاط متلاصقة متجاورة شحنات كهربائية، متساوية بالعدد ومتعاكسة بالشحنة (بالإشارة)، وهكذا يمكن اعتبار الأعصاب الهرمية في القشرة الدماغية كثنائيات قطب كهربائية، تمرر التيارات الكهربائية المكروية المتولدة عن تنشيط

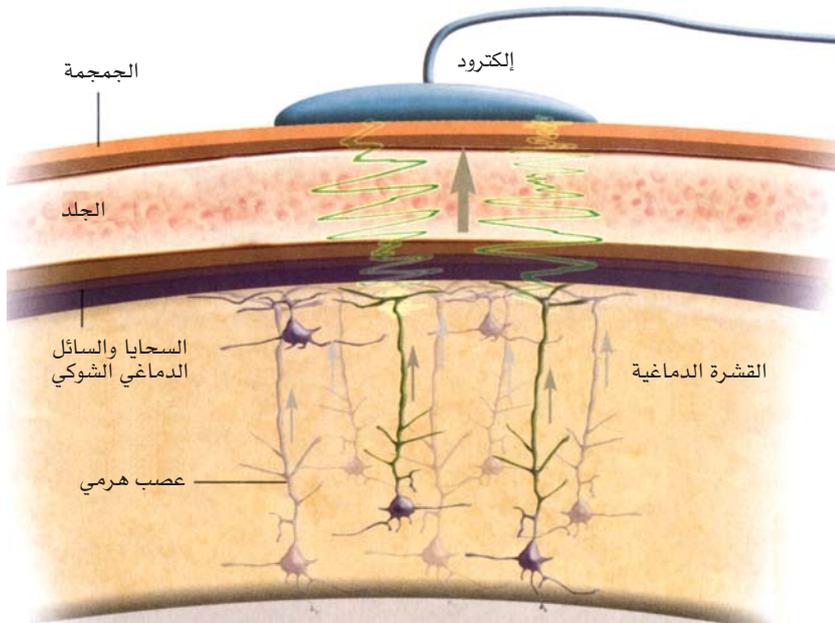
المشبكة، وعلى المقاومة الكهربائية للنسيج الدماغي، ولهذين العاملين قيمةً ضعيفة، مما يجعل الكمونات الكهربائية الدماغية الفردية (الناجمة من المشابك العصبية المنفردة) ضعيفة إلى أبعد الحدود، ومن جهة أخرى، تتناقص الكمونات الكهربائية طرماً مع مربع البعد عن نقطة تشكلها.

وضمن هذه الشروط، كيف يمكن تسجيل الموجات الدماغية الكهربائية بشكل سهل؟ لقد أصبح ذلك ممكناً بفضل التوزيع الهندسي للمحاور الشجرية العصبية القمية بشكل متوازٍ فيما بينها، وبشكل متعامدٍ على السطح المقوس للدماغ (الشكل 1). ويسمح هذا التوزيع بتجميع التيارات الكهربائية المشبكية المتولدة في النسيج الدماغي من كل عصب زمانياً ومكانياً، وبالتالي يمكن أن ينتج عن التجميع الزماني والمكاني لكل تيار أولي بسيط (ضعيف)، تيار مهم يمكن قياسه بوضع إلكترونيات خاصة على الجمجمة.

ونتيجة لتجميع التيارات المتوازية، يترجم التزامن الفجائي للتيارات المشبكية في عدد كبير من الأعصاب بموجات التخطيط الكهربائي الدماغي، والتي تكون سعتها Amplitude أكبر عندما يكون عدد المشابك العصبية المساهمة كبيراً. وتعتمد القطبية (موجب وسالب)، على اتجاه التيارات الكهربائية المشبكية (تنبيه أو تثبيط). ونحن نعلم إضافة لذلك، أن مدة الموجات الكهربائية

التدفق للشحنات الموجبة نحو الداخل في الاستطالة الشجرية العصبية، إلى إعادة توزع للشحنات الموجبة على طول محورها، حيث تمرر بدورها التيار باتجاه المناطق ضمن الخلية ذات الشحنة الإيجابية الأقل. ويخترق مسار التيار الكهربائي القنوات الغشائية الخلية، حيث تنتشر الأيونات، ومن ثم ينتشر التيار الكهربائي ويسري في الوسط الخارجي الخلوي ويعود إلى منطقة المشبك التي فقدت الشحنات الموجبة في المشبك.

والحالة التي ناقشناها هنا هي حالة المشابك العصبية التي تسهم في نقل التنبيه Excitatory، والمنهجية نفسها تنطبق على حالة المشابك العصبية التثبيطية Inhibitory، حيث لا يكون الناقل العصبي المساهم الغلوتامات، بل أهم ناقل عصبي مثبط، وهو الحمض غاما أمينو بوتريك (Gamma-Amino (GABA مثبط، وهذه المشابك العصبية التثبيطية موجودة على الأعصاب الهرمية، وتكون متحدرة من نمط آخر من الأعصاب، هي الأعصاب البينية (الأعصاب الوسيطة Interneurons)، التي يمكن تنشيطها بواسطة كل من أعصاب المهاد البصري والأعصاب الهرمية نفسها، وتعرض الأعصاب الوسيطة في العصب الهرمي تياراً أيونياً موضعياً بالاتجاه الخارجي (من الداخل إلى الخارج Sortant)، ناجماً عن دخول الشرسبات (أيونات الكلور)، أو خروج الشرجبات (أيونات البوتاسيوم). وإذا أخذنا مسارات التيار إلى داخل أو خارج العصب بالاعتبار، فإن مسار التيار الناجم عن مشبك عصبي تثبيطي يكون عكسياً مقارنةً مع جهة مسار التيار الناجم عن مشبك عصبي تنبهي.



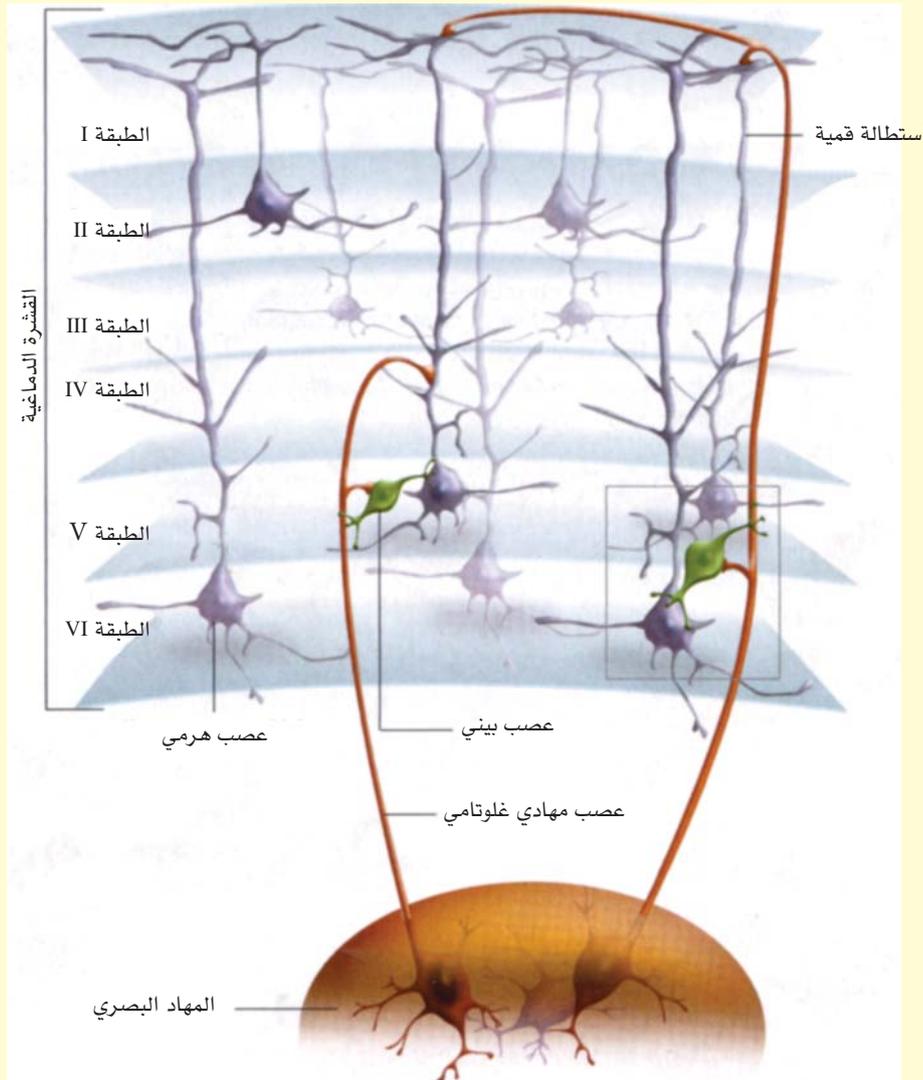
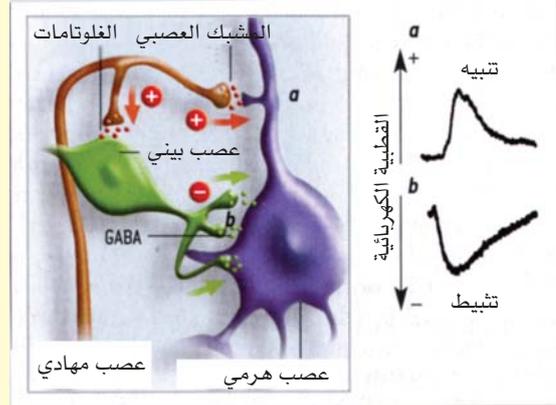
الشكل 1. تمثل الموجات الكهربائية الدماغية السطحية، التي تسجل بالإلكترونيات الموضوعة على سطح الجمجمة، مجموع التيارات المشبكية خارج الخلية التي يمكن تسجيلها من الأعصاب الهرمية. ويحدث تسلك الأعصاب الهرمية سلوك ثنائيات القطب الكهربائية، وتساعد نغصاتها التي تكون شبه متوازية على تجميع التيارات الكهربائية المنفردة. وتكون شدة التيار الكلي الناتج قابلة للتسجيل، على الرغم من كثافة البنى المختلفة التي تغطي القشرة الدماغية.

## تجميع التيارات الأولية

بناءً على ذلك، فإن العصب يعمل كثنائي قطب بمنابع وأبار (مصدر ومصرف) للتيارات المشبكية: حيث يشكل تسرب الشحنات الكهربائية وخروجها نحو خارج العصب المنابع، في حين تكون المناطق المشبكية المنشأ والقليلة الشحنات الكهربائية الأبار التي تتجمع فيها خطوط التيار. ويعتبر نموذج ثنائي القطب نموذجاً عملياً جداً، ولكنه يصطدم بعائقين: من جهة، اعتماد سعة الموجات الكهربائية الدماغية المسجلة على سطح الدماغ أو الجمجمة، بحسب قانون أوم Ohm على ناتج كثافة وغزارة التيارات

### منشأ التيار الكهربائي الدماغي

تكون الأعصاب في القشرة الدماغية بشكل رئيسي أعصاباً هرمية، حيث تأخذ الأجسام الخلوية لهذه الأعصاب شكلاً هرمياً، وتكون متوضعة في الطبقات V، III، II، VI من القشرة الدماغية. وتستخدم هذه الأعصاب الغلوتامات كوسيط كيميائي (ناقل عصبي)، وهو الناقل العصبي التنبيهي الرئيسي (باللون البرتقالي). تمتد أعصاب الطبقات السطحية (II و III) باتجاه الأعصاب القشرية في نصف الكرة الدماغية نفسه، أو نحو نصف الكرة الدماغية المقابل. وعلى العكس من ذلك، تكون الأعصاب في الطبقات العميقة (V و VI) متصلة مع البنى تحت-القشرية، وبالأخص المهاد البصري *Thalamus*. حيث تمتد الأعصاب المهادية ملتقمةً في الطبقات I و IV حيث تنشئ اتصالات مشبكية مع الأعصاب الهرمية ومع الأعصاب البينية *Interneurons*. وتكون الأعصاب البينية مرتبطة مع الأعصاب المهادية بواسطة مشابك عصبية تنبؤية تستخدم الغلوتامات، ومع الأعصاب الهرمية بواسطة مشابك عصبية تثبيطية تستخدم *GABA* كناقل عصبي. ويعتبر *GABA* أهم ناقل عصبي مثبط. وهكذا يمكن بواسطة ميكرو إلكترومغروس في عصب هرمي تسجيل إشارة تنبيه (a) أو إشارة تثبيط ذات قطبية كهربائية معاكسة (b). وتكون هذه الكمونات المشبكية، سواء التنبيهية منها أو التثبيطية الأساس في الموجات الكهربائية الدماغية.



هرتز) على القشرة الدماغية، والمعروفة حالياً أنها مرتبطة بحالة اليقظة الدماغية.

خلال النصف الثاني من القرن العشرين، جرى تطوير طرائق جديدة للتسجيلات الكهربائية الدماغية، وكانت المعالجة الرقمية للإشارات التي تُسجّل بمثابة بداية المعالجة الآلية للموجات الكهربائية الدماغية. وهكذا أمكن تحديد المكون الزمني والمكاني للموجات التي لها علاقة بحالات الوعي والوظائف الإدراكية. ويعتبر تحويل فورييه Transformation de Fourier، الطريقة الأكثر استخداماً لهذا النوع من التحليل. ويتم من خلاله تجزئة إشارة متذبذبة إلى مجموع عوامل جيبيّة Sinusoidales ذات تواترات مختلفة، مما يسمح بتحديد الطاقة النسبية للتواترات المختلفة المكونة وتسجيلها على مُسجّل للنشاط الدماغي الكهربائي. تسمح هذه الطريقة باستخراج مجموع تواترات الموجات الكهربائية الدماغية، وربطها بالحالات المختلفة من نشاط الدماغ. وهكذا أمكن وضع أسس تصنيف تواترات النظم القشرية الدماغية المرتبطة بحالات اليقظة.

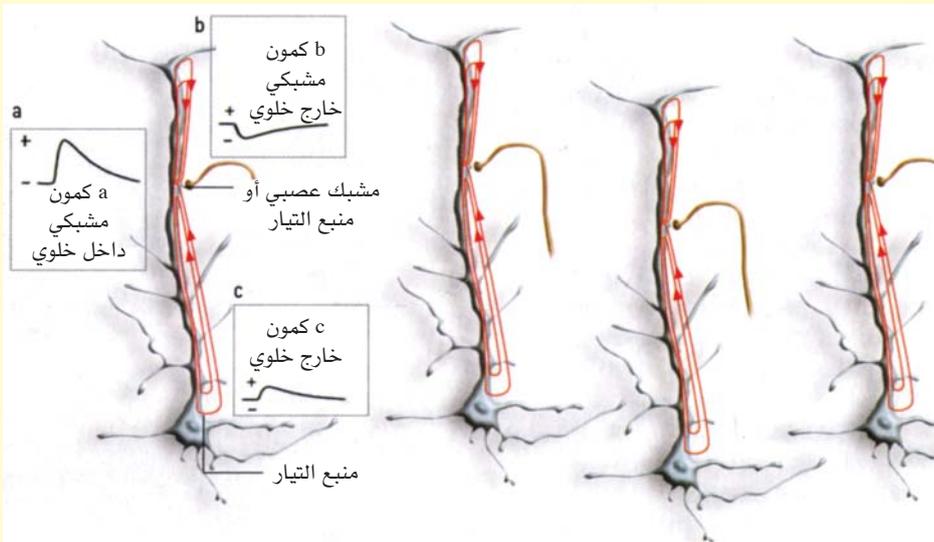
الدماغية المتناسقة لحد كبير، تكون أكثر قصراً، وأكبر سعةً، عندما يكون عدد المشابك العصبية المتورطة كبيراً، وأن هذه المشابك العصبية تكون منشطة بشكل متزامن معاً. وعلى العكس من ذلك، يمكن رصد نشاط مشبكي ضعيف التناسق مع الزمن على تخطيط الدماغ الكهربائي EEG الخارجي، على شكل موجات سريعة ذات سعة قليلة. وهكذا نفهم منشأ التيارات الكهربائية التي ترصد على الجمجمة، ولكن يجب أيضاً توفر إمكانية تسجيل هذه التيارات ومعرفة تفسير التسجيلات التي نحصل عليها.

لم تسمح الطرائق المستخدمة حتى بداية القرن العشرين، لوصف الموجات الدماغية الكهربائية، برصد الذبذبات ذات السرعة الكبيرة، مما جعل القياسات الدقيقة لتواتر هذه الموجات غير ممكن. وكان الفيزيولوجي البولوني نابليون سيبولسكي (Napoleon Nicodemus Cybulski, 1854-1919)، أول من أدرك أهمية التمثيل التخطيطي للموجات الدماغية الكهربائية، وأنجز في العام 1914 أول الصور للكومات الكهربائية الدماغية عند الكلب والقرود. وهكذا اكتشف الموجات السريعة (من رتبة 25

#### نموذج ثنائي القطب

تتسبب المشابك العصبية التنبهية الغلوتامية، التي تستخدم الغلوتامات كناقل عصبي، بتسرب الأيونات ويمكن اعتبارها كبر للتيار الكهربائي. وعلى العكس من ذلك، وعلى مسافة من هذه المشابك، تتراكم الأيونات بحيث تسلك الأغشية الخلوية سلوك منابع للتيار. وبالسوية البترية (a)، تظهر تسجيلات الكمون الكهربائي داخل الخلوي انحرافاً بالاتجاه الموجب للكمون (أو إزالة استقطاب)، في حين تُظهر تسجيلات الكمون الكهربائي خارج الخلوي (b) موضعياً انحرافاً بالاتجاه السالب للكمون (ناجماً عن دخول الشحنات الموجبة إلى داخل الخلية). وتظهر تسجيلات الكمون الكهربائي خارج الخلوي (بسوية المنبع) (c)، تغيراً موجباً للكمون (ناجماً عن خروج الشحنات الموجبة).

في الحقيقة، تدخل الكاتيونات إلى داخل الأعصاب بمستوى المشابك العصبية، ومن ثم تخرج منها بعد مسافة قصيرة. وعندها تصبح المشابك العصبية فقيرة بالشحنات الكهربائية مشكلة بئراً للتيار، تتجه إليها خطوط حقول التيار الكهربائي الناشئة من منبع التيار، حيث تتراكم، وبالعكس، زيادة في الشحنات الكهربائية. وتفسر المقاومة الكهربائية الضعيفة للوسط خارج الخلوي، مقارنةً مع مقاومة الأغشية الخلوية لماذا تكون تغيرات الكمون



الكهربائي خارج الخلوي ضعيفة أكثر من تلك المقاسة داخل الخلية. وهكذا، يكون كل عصب مركزاً لحقل كهربائي. وتمثل الموجات الكهربائية السطحية تجميعاً لكل التيارات المشبكية العصبية خارج الخلية التي تنتج عن الخلايا العصبية الهرمية التي تعمل جميعها كثنائيات قطب كهربائية.

## ديناميكية (حركية) الموجات الدماغية

هل يمكن حل هذه المصاعب والوصول إلى تحليل لديناميكية الموجات الكهربائية الدماغية؟ الجواب نعم، وذلك بفضل تحليل التواترات بدلالة الزمن. ويعتمد ذلك على تحويل الإشارة المسجلة إلى تمثيل أو تخطيط تندمج فيه بكل لحظة، الهجوم النسبية للتواترات المختلفة التي تكون موجودة في هذا التخطيط، ولكنها تكون مخفية في الإشارة الإجمالية. يمكن الحصول على مثل هذه المخططات التي تربط التواترات بالزمن (وتسمى مخططات الزمن-التواتر) بوضع مخطط موجي Ondelettes ذي مدد مختلفة فوق التخطيط الكهربائي الدماغى EEG (أي تواترات مختلفة): تُحلّل (تطبق) هذه الموجات المجزأة النظرية التي تكون معروفة التواتر والمطال على الإشارة المسجلة، ثم تحسب درجة تطابق كل نقطة. وبذلك تتم تجزئة الإشارة المسجلة إلى مجموع متجانس من مخططات موصّفة بشكل جيد، قياساً على الموجات الصوتية. تسمح هذه المخططات زمن-تواتر، بالتمثيل الكمي والكيفي لما يعرف بالموسيقا الدماغية، المرتبطة بالحالات الذهنية المختلفة، العادية منها والمرضية.

يمكن أيضاً التوصل لمعلومات ديناميكية أخرى لمخطط الدماغ الكهربائي، حيث يكون ممكناً اكتشاف ما إذا كان هناك ذبذبات متزامنة بالتواتر نفسه في مناطق متباعدة من الدماغ. وإذا كانت الحالة كذلك، يكون ممكناً أيضاً اكتشاف أي من المناطق فرضت تواترها على المناطق الأخرى. وهكذا يتم تقييم تزامن طور الأمواج الموزعة فراغياً، الأمر الذي يكون له أهمية في الظواهر المرتبطة باليقظة. سمحت مثل هذه الدراسات حول الخصائص الديناميكية للموجات الكهربائية الدماغية، التي أجريت من خلال الأبحاث الأساسية والسريية بتفسير الاضطرابات الوظيفية، التي تطرأ في شبكة الأعصاب كبيرة الأبعاد، خلال نوبات الصرع Epilepsie، ومرض الشلل الرعاشي Parkinson، أو انفصام الشخصية Schizophrenie.

هكذا، وباستخدام طرائق قياس التزامن والمصادفة، درس فريق المؤلف الاهتزازات المسجلة خلال نوبات الصرع من نمط الغيبوبة العابرة Absence، أي التي تتظاهر بفقدان الوعي بدون اختلاجات عضلية نظمية خلال عدة ثوان. وظهر أن الموجات المسجلة خلال مثل هذه النوبات تكون ظاهرياً متزامنة في مختلف مناطق الدماغ، وتتطلق في منطقة صغيرة من القشرة الدماغية، ثم تنتشر عبر دارات مشبكية عديدة في منطقة القشرة الدماغية وتحت القشرة الدماغية، تكون مسؤولة عن الأعراض السريية

تكون حالة اليقظة، بوضع الراحة مرتبطة، بشكل عام، بذبذبات Oscillations مطابقة إلى 10 هرتز تقريباً (وهو الإيقاع Rhythme ألفا)، وتكون سائدة في المناطق القذالية (قفا الرأس). تعكس هذه الموجات ذات المطال الضعيف نسبياً الأنشطة المشبكية المتزامنة. وخلال الانتقال نحو مرحلة النعاس البطيء (دون أحلام)، تظهر اهتزازات أو ذبذبات جديدة، أكثر بطناً وذات مطال أكبر. وفي المراحل السابقة للنوم والتي يتم خلالها الفصل الوظيفي بين الدماغ والعالم الخارجي، تظهر فجأة على القشرة الدماغية حزم موجات من 7-15 هرتز. ويمكن تمييز الاستغراق في النوم الأكثر عمقاً، بوجود موجات مهيمنة ذات تواترات أكثر عمقاً، وهي الموجات دلتا (من 1-4 هرتز) والموجات المعروفة بالبطينة (من 0.5-1 هرتز). ويسمح استخدام فلترة نوعية لإشارة التخطيط الكهربائي الدماغى EEG باستبعاد أطيايف مختلفة من التواترات بشكل اصطفائي، بهدف إظهار التواترات الأخرى بشكل أفضل.

تظهر حالة اليقظة، تماماً مثل حالة النوم المترافق بالأحلام، تبدلات كبيرة لشكل ومطال موجات التخطيط الكهربائي الدماغى EEG. ويمكن أن يظهر نمطان رئيسيان من الذبذبات ذات المطالات الضعيفة على الخط القاعدي لهذه الذبذبات، ويغلب النمط بيتا من الموجات (من 15-30 هرتز) في المناطق الحركية من القشرة الدماغية، ويتوافق ذلك مع التحضير للسلوكيات الحركية. أما الموجات الدماغية غاما الأكثر سرعة (من 30-200 هرتز)، فيمكن اعتبارها مميزة لنظم التنبيه أو اليقظة المفرطة Hypervigilance، وتسمح ربما للمنبه الحسي بالاقتراب من حالة اليقظة والوعي، وذلك بتنسيق الاستجابات العصبية المنتشرة في مجمل القشرة العصبية. ومع ذلك، تبقى هذه الوظيفة السببية للنظام غاما في الخبرة الذهنية الذاتية، الإجمالية والمترابطة، موضوع جدال ونقاش.

تمثل متحولات فوربيه أداة مهمة تفيد بفق شيفرة (حل أسرار) تواترات الموجات الدماغية، وتقدم معلومة إجمالية حول مجمل مدة تسجيل هذه الموجات، ولكنها لا تقدم عنها أي فكرة، وخصوصاً فيما يتعلق باللحظة الحقيقية لانبثاق التواترات المختلفة، التي تُكوّن إشارات تخطيط الدماغ الكهربائي EEG. وهذا يخلق بعض الصعوبة، وذلك لكون الفحص البسيط بإلقاء نظرة على التخطيط الكهربائي الدماغى، يكشف عن حركية التواترات (ديناميكية)، حيث يتطور محتواها من التواترات مع الزمن، وحتى عندما لا تتغير حالة اليقظة لدى الفرد.

سمحت هذه التجارب بالوصول إلى فهم أفضل لآليات بدء نوبات الصرع، وكشفت النقاب أيضاً عن الآليات البيولوجية العصبية التي تضم الانتقال شبه اللحظي بين حالة الفرد الواعي وفاقد الوعي. وتكون موجات التخطيط الكهربائي الدماغية المميزة في حالة الوعي سريعة وبسعات ضعيفة، مترافقة مع كمونات كهربائية مشبكية تنبيهية سريعة وبسعات ضعيفة أيضاً، في أعصاب قشرة الدماغ، المسجلة على مقربة من بؤرة الصرع.

ونذكر بأن نوبة الصرع تنشأ في منطقة محدودة جداً من القشرة الدماغية، وتنتشر كالموجة اعتباراً من هذه النقطة. تُترجم النوبة بظهور موجات كهربائية في القشرة بشكلٍ عنيف، ويكون للموجات مطال كبير وتواتر منخفض، وتكون متزامنة في أعصاب عديدة في قشرة الدماغ. كشف تحليل التسجيلات المختلفة عن وجود اهتزازات بتواتر أكبر بكثير، تماماً قبل الشروع بنوبة الصرع. وهذه الموجات الدماغية والعصبية تكون بمثابة إشارة مبكرة لفقد الوعي الذي سيحصل لاحقاً.

## الموجات الكهربائية الدماغية: هل تنظم العلاقات الاجتماعية؟

سمحت دراسة الموجات الدماغية والعصبية بفهم أفضل لتشكيل الموجات في منطقة محدودة من القشرة الدماغية

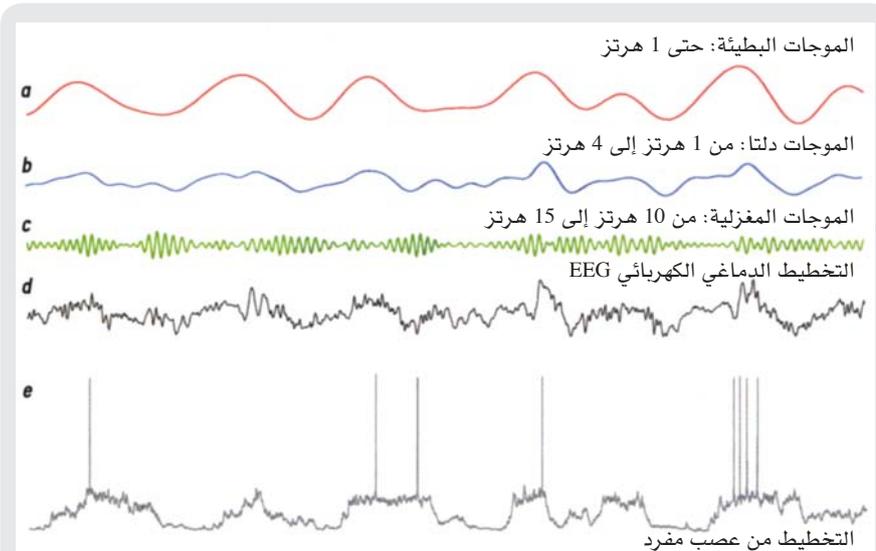
الملاحظة خلال نوبات الصرع، وتكون أيضاً مسيطرة على إيقاف هذه النوبات. ويوضح هذا المثال قدرة طرائق تحليل الخصائص الديناميكية للموجات الكهربائية الدماغية، في تحديد الشبكات العصبية المسؤولة عن الأعراض العصبية وتأثيرها على الوظيفة الإجمالية للدماغ.

كيف يمكن الذهاب لأبعد من ذلك في فهم آليات الموجات الكهربائية الدماغية؟ وكيف يمكن تحديد سيرورة العمل العصبية الأولية التي تضم الظواهر الذهنية المرتبطة بها؟ تتطلب الإجابة على هذه الأسئلة إجراء التجارب التي تسمح بتسجيل الموجات الكهربائية الدماغية وتغيرات الكمون الكهربائي في الأعصاب منفردة في حالة دماغية محددة وبالوقت نفسه: أي يجب التمكن من ربط فعالية الأعصاب المنفردة في مناطق مختلفة من الدماغ بالنشاط الكهربائي الدماغية الإجمالي الذي يعطي التخطيط الكهربائي الدماغية EEG. وتعكس، في الوقت نفسه، تغيرات الكمون الكهربائي للأعصاب المعلومات المشبكية التي تتم معالجتها بهذه الأعصاب، وأيضاً خصائص القنوات الأيونية الموجودة على أغشية هذه الأعصاب.

## الانتقال من حالة الوعي Conscious إلى اللاواعي Inconscient

طور هذا النمط من الدراسات، عالم الأعصاب الكندي ميرسي ستيرياد Mircea Steriade، المولود في بوخارست (1924-2006)،

وذلك لوصف الآليات العصبية في الحالات المختلفة من الوعي واليقظة وحالات الصرع، وهي قليلة الاستخدام مخبرياً بسبب الصعوبات التقنية الكثيرة. ومع ذلك، استطاع المؤلف ومساعدوه تطبيق هذا النمط من المقاربة التجريبية، مترافقة مع إنجاز مخططات زمن-تواترات، على دراسة التغيرات الديناميكية التي تطرأ على موجات التخطيط الكهربائي الدماغية EEG عند الجرد، وذلك في حالة نوبة صرع من نمط الغيبوبة العابرة. سُجِّل التخطيط الكهربائي الدماغية EEG عند الجرد، مع تغيرات الكمون في الأعصاب التي تغرس فيها إلكترودات القياس. وهكذا أمكن مراقبة النشاط الكهربائي في الأعصاب وربطه بالنشاط الدماغية الإجمالي.



الشكل 2، يمكن تجزئة تسجيل التخطيط الكهربائي الدماغية EEG بعد عمليات فلترة مختلفة، إلى مكونات تواتر عديدة. وبهذا الشكل، فإن التخطيط الأولي الخام (d) يكون محتويًا على الموجات البطيئة (a)، والموجات دلتا (b)، والمغازل (c).  
تعكس سعة التخطيط الكهربائي الدماغية EEG عدد الأعصاب التي تنتج بوقت واحد الكمونات المشبكية. ونستنتج أن تسجيل التخطيط الكهربائي الدماغية EEG (d)، الناتج عن تجميع الكمونات الناتجة عن آلاف الأعصاب المنفردة، ينسجم مع ذبذبات الكمون المسجل بإلكترود مغروس في عصب محدد على مقربة من النقطة التي يتم منها تسجيل التخطيط الكهربائي (e).

(أو السببية التصاعدية)، حيث تندمج ديناميكية الأعصاب مع الديناميكية الدماغية الإجمالية الأكثر وفرةً.

وعلى عكس ذلك، فإن النشاط الذهني بحد ذاته، يؤثر بالآلية الراجعة (الهابطة) على الفعاليات الدماغية، حيث تؤثر الفعالية الإجمالية بشكل موضعي على منطقة محددة مسؤولة عن القدرة العقلية. ويمكن أن تشير هذه الظواهر من السببية التبادلية، وهي أكبر من العلاقة التبادلية البيولوجية العصبية للوعي -شبكات الأعصاب- إلى التآثر بين الفعاليات الكهربائية للدماغ واختبارات الوعي بنوع من الطابع التبادلي، ولكنها لا توضح الآليات العصبية البيولوجية لظهور حالة الوعي.

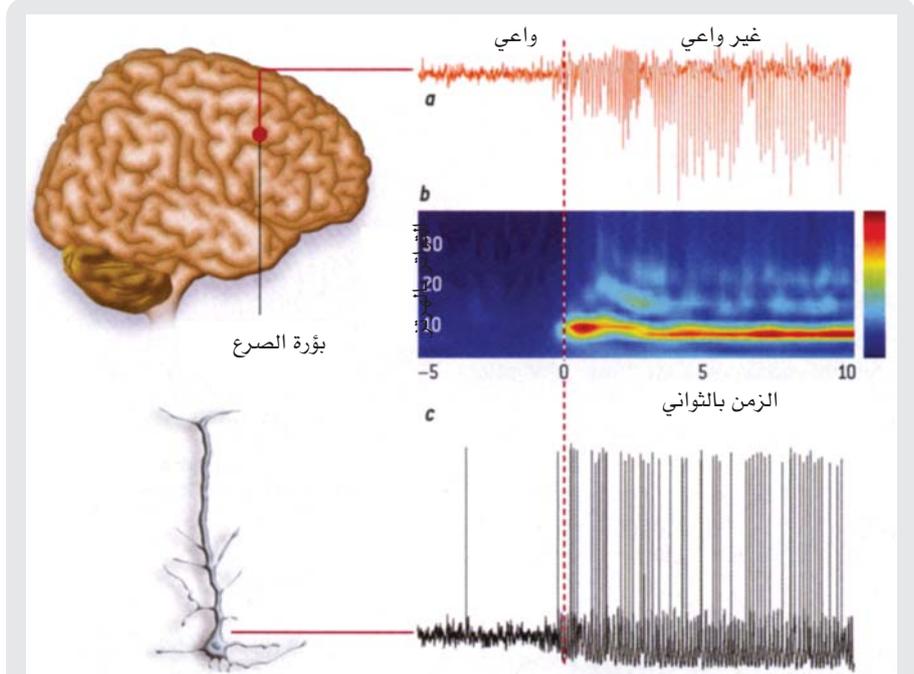
أظهرت دراسة حديثة لفريق الباحثة لين كارنيرو (2009-1955) Line Garnero في المشفى الباريسي Pitie-Salpetriere، أنه وفي وقت محدد، عندما يقلد شخص

حركة يد شخص آخر، تتطابق الموجات الكهربائية الدماغية للشخصين ضمن مجال محدد من التواتر، وهكذا يكون للموجات الكهربائية الدماغية وظائف متعددة : فهي تحدد الحالة الذهنية للشخص (من يقظة ووعي، إلخ)، وتضبط الوظائف الإدراكية، كما اكتشف أنها تضم العلاقات الاجتماعية، ويمكن فيها بلا شك سر ظهور الحالة الواعية والتفكير.



ستيفان شاربيي، أستاذ العلوم العصبية في جامعة بيير وماري كوري (باريس 6)، وهو بمرتبة مدير بحوث في معهد الدماغ والنخاع الشوكي ICM في باريس.

← نُشر هذا المقال في مجلة *Pour La Science*, N° 409، 2011، ترجمة د. غسان عليا، هيئة الطاقة الذرية السورية.



الشكل 3. يمكن متابعة الانتقال من حالة الوعي إلى حالة اللاوعي، عند الجرذ المصاب بنوع من الصرع المعروف بالغبوبية، حيث يلاحظ فقدان وعي يستمر لبضع ثوانٍ. ويمكن تسجيل الموجات الكهربائية الدماغية القشرية (a) والفعالية الكهربائية في الأعصاب الموجودة ضمن منطقة الصرع (c). تقدم المعالجة الرياضية الرقمية للإشارة الكلية لتسجيل التخطيط الدماغية EEG خريطة ديناميكية، حيث يمكن إظهار كيفية تطور الذبذبات مع الزمن، وهذا لا يسمح بقراءة التخطيط الدماغية الكهربائي. ونحصل على الخريطة تواترات-زمن التي تشير إلى المطال النسبي (b)، من الأقل كثافة (باللون الأزرق) إلى الأكثر كثافة (باللون الأحمر) لتواترات إشارة التخطيط الدماغية الكهربائي EEG خلال الانتقال من حالات اليقظة. وهكذا، فإن الموجات القريبة من 10 هرتز تكون سائدة خلال مرحلة اللاوعي.

وانتشارها لمسافة بعيدة. وسمحت أيضاً بتتبع كيفية الانتقال من حالة اليقظة والوعي إلى حالة اللاوعي. وإذا كان علماء الأعصاب قد حققوا تقدماً ملحوظاً في فهم وظائف وعمل الدماغ، منذ عقدين من الزمن، فإنه يبقى هناك بعض المصاعب والتحديات، مثل الكشف عن الأسس العصبية للوعي، وإظهار الأسس العصبية للتفكير، وهما يشكلان التحديان الرئيسيان اللذين يواجهان علماء الأعصاب. تمثل تغيرات الموجات الكهربائية الدماغية الفعاليات العصبية الوحيدة المرتبطة بشكل لحظي بالعمليات العقلية الذهنية المختلفة (حالة اليقظة، المهام الإدراكية)، حيث يمكنها أن تكون الركيزة الكهربائية البيولوجية لظهور حالة الوعي انطلاقاً من النشاط العصبي. واعتماداً على هذه النظرية، التي تبناها عالم البيولوجيا العصبية بنجامين لبيت (1916-2007) Benjamin Libet والباحث في علوم الإدراك فرانسيسكو فاريللا Francisco Varela (1964-2001)، تولد التآثرات المعقدة بين الوحدات الوظيفية في الدماغ (الأعصاب) الفعالية الكلية (الموجات الكهربائية الدماغية) حيث تنشأ فعالية اليقظة الذهنية، وبمعنى آخر، يكون للنشاط الإجمالي للدماغ أبعاداً أكبر من التجميع البسيط لنشاط الأعصاب منفردةً، أو أكثر من ذلك، يكون للمحصلة النهائية خصائص تتفوق على جمع خصائص المكونات، وهنا فنحن أمام ظاهرة حالة الوعي

# التعقيد: ورقة رابحة للانقلاب الأمواج الزمني

يمكن للأمواج في بعض الشروط أن تمتطي مجرى الحياة وتتجمع تحديداً في المكان الذي صدرت عنه وهو مبدأ الانقلاب الزمني الذي يجد تطبيقات جديدة باستمرار. غير أن ما يثير الدهشة أكثر اكتشاف أن هذا التجمع يكون أكثر فعالية بقدر ما يكون الوسط الذي تعبره الأمواج أكثر تعقيداً.

## ملخص

- يمكن للأمواج التي يصدرها منبع نقطي أن تخضع لعملية الانقلاب الزمني التي تجعلها تعيد إحياء فلمها بالمقلوب.
- يتطلب إجراء هذه العملية عادة العديد من الهوائيات التي تتناوب بين دوري الإصدار والاستقبال. يكفي في بعض الحالات وجود عنصر واحد من الهوائيات.
- عملية الانقلاب الزمني للأمواج تكون أكثر فعالية بقدر ما يكون الوسط الذي تنتشر فيه الأمواج أكثر تعقيداً.
- تتطور التطبيقات الممكنة للانقلاب الزمني مثلاً في الاتصالات.
- في الوسط المعقد تكون الدقة (أو حد المقدرة الفاصلة) أفضل بكثير من الدقة التي تسمح بها طرائق أخرى.

الكلمات المفتاحية: تعقيد، انقلاب زمني، تطبيقات جديدة.

**Key World:** complexity, time reversal, new applications.



## التعقيد ورقة رابحة في حالة الانقلاب الزمني للأموج

يجد التحكم في انتشار الأمواج، الزماني والمكاني في بيئة معقدة، تطبيقات متنوعة في الطب والاتصالات وعلم الزلازل والأتمتة المنزلية domotic والطيران... الخ. وقد ابتكرت أولى تقنيات التحكم في الأمواج الضوئية وهي البصريات التلاؤمية adaptive optics المستعملة في تحسين جودة صور النجوم التي تصل إلى الأرض مشوهة بفعل اضطراب الجو أو لدى تبئير الحزم الضوئية العالية الشدة في الجو. حيث يمكن استعمال مرايا قابلة للتشوه للتخلص من آثار هذه الاضطرابات وجعل التبئير وجودة الصور أفضل ما يمكن.

من المثير للفضول أن تعقيد الأوساط التي تنتشر فيها الأمواج ليس عائقاً بالضرورة، بل على العكس. وسوف نقوم بدراسة تبين أنه يمكن لجودة تبئير الأمواج في بعض أوساط الانتشار المعقدة أن تصبح أفضل بكثير منها في حال الأوساط البسيطة. وهذه حالة تبئير الأمواج بعملية الانقلاب الزمني تعود بعدها إلى نقطة انطلاقها، كما لو كنا نمرر فلماً لانتشارها بالمقلوب. يمثل هذا الأمر مجال مرايا الانقلاب الزمني التي تسمح لموجة معينة بإعادة إحياء كل مراحل حياتها الماضية.

سنهتم بأوساط انتشار من التعقيد بحيث تشوه نبضة موجية في أثناء انتشارها إلى درجة أن الإشارة التي يستقبلها مستقبل بعيد، لا تشبه بأي شكل من الأشكال الإشارة التي صدرت من المنبع، تدعى هذه الأوساط بالأوساط المبددة. يواجهنا هذا النوع من الصعوبات عندما يصدر هاتف نقال مثلاً نبضة كهرومغناطيسية قصيرة جداً. يجري استشعار هذه الأخيرة عن بعد عشرة شوارع مثلاً على شكل قطار من النبضات يقابل تراكب العديد من النبضات العنصرية القادمة من العديد من المسارات التي قطعها الإشارة بين المنبع والمستقبل: لقد أدى ارتداد الموجة عن العديد من العوائق إلى إحداث القدر نفسه من الإشارات الثانوية. يحدث هذا الأمر في حالة الأمواج الصوتية التي تخضع للعديد من الارتدادات، كما يحدث أيضاً في حالة الأمواج الضوئية وخاصة في حالة النبضات الضوئية الفائقة القصر التي تنتشر في وسط ناثر كجسم الإنسان.

فكيف يمكن معالجة مثل هذه الإشارات؟ بعد أن ذكرنا بمبدأ الانقلاب الزمني، سندرس ما يمكن أن يتجلى به الوسط الناثر بوصفه ورقة رابحة وسنعرض بعضاً من التطبيقات الممكنة لهذه الظاهرة.

## امتطاء الزمن

ما هي آلية عمل مرايا الانقلاب الزمني؟ لقد صُممت هذه التقنيات، في بادئ الأمر، في حالة الأمواج الصوتية المسموعة والأمواج فوق

الصوتية في تسعينيات القرن الماضي، نظراً لتلاؤم تواترات اهتزاز هذه الأمواج المنخفضة (من بضعة كيلوهرتز إلى بضعة ميغاهرتز) مع سرعة حفظ المعلومات في الذاكرات الإلكترونية، المتوافرة. ولما تزايدت سرعة هذه المكونات الإلكترونية غداً ممكناً تطبيق مبدأ الانقلاب الزمني على الأمواج المكروية الكهرومغناطيسية المستخدمة في الاتصالات وعلى أمواج الرادار (التي تبلغ مجال الغيغاهرتز). أخيراً، سمحت إمكانية قياس الأمواج الضوئية والتحكم بتكليفها الزماني والمكاني بتحقيق أولى تجارب التحكم بالضوء من خلال الأوساط النائرة.

تستفيد هذه الأدوات كلها من حقيقة أن انتشار الأمواج في وسط غير ناثر هي عملية عكوسة. غير أن الموجة التي تصدر من منبع معين تخضع في أثناء انتشارها في وسط معقد للعديد من التشوهات، بفعل ظواهر الانكسار أو الانتثار المضاعف أو أيضاً الارتداد. لكنه يتوافر دائماً، مهما تكن التشوهات، على الأقل نظرياً، موجة توأم قادرة على اجتياز كل المسارات المعقدة التي اتبعتها الموجة الواردة، في الاتجاه المعاكس، وتتقارب عند المنبع بالضبط.

يمكن لمرآة انقلاب زمني مؤلفة من شبكة من الهوائيات العكوسة (تؤدي دور المرسل والمستقبل على التناوب) وتحيط بالمنبع بشكل كامل أن تولد فيزيائياً هذه الموجة التوأم. ولتحقيق ذلك، يرفق بكل هوائي أداة تحوّل إشارة الموجة الضوئية أو الصوتية إلى إشارات رقمية تعالج في ذاكرات عديدة للقيام بعملية الانقلاب الزمني. تتألف مرآة الانقلاب الزمني المثالية في الصوت مثلاً من سطح مغلق مغطى بمحاويل<sup>(1)</sup> (مفردها محوّل) كهروضغطية تؤدي دور الميكروفونات ودور المكبرات على التناوب (انظر الشكل 1). تسجل الإشارات التي يصدرها المنبع ثم تعاد قراءة الإشارات المحفوظة كلها في أثناء مرحلة الانقلاب الزمني بقلب السجل الزمني للإشارات التي يستقبلها كل ميكروفون؛ حيث تقرأ أولاً الإشارات التي وصلت أخيراً وبالعكس. في المرحلة الثانية تنتقل الميكروفونات جميعها بشكل متزامن إلى نمط مكبر الصوت وتلقم بالإشارات المقلوبة زمنياً والقادمة من الذاكرات الإلكترونية. لنلاحظ أنه يمكن تحقيق العملية نفسها بأمواج كهرومغناطيسية باستبدال هوائيات بمحاويل كهروضغطية مثل تلك المستخدمة في الهواتف النقالة مثلاً.

وبذلك نحقق شروطاً ابتدائية جديدة للإصدار، فتعود الموجة التي تصدر بهذه الطريقة، بسبب العكسية، إلى نقطة انطلاقها. غير أنه إذا كانت الموجة التي تعيد إصدارها مرآة الانقلاب الزمني تتقارب بشكل مثالي في منطقة المنبع الابتدائي، فهي لن تتوقف فيها بل تعيد انطلاقها بالضرورة في الاتجاه المعاكس على شكل موجة متباعدة. إذا كانت الموجة المستخدمة في التجربة جيئية فإننا نلاحظ

1 المحوّل (جمعها محاوويل)، أداة أو عنصر يحوّل إشارة دخل إلى إشارة خرج مختلفة عنها، مثل الميكروفون واللاقط الصوتي والخلية الكهروضوئية والخلية الكهروضغطية وسواها. (المراجع)

لكننا كنا نقتصر عملياً على مرايا انقلاب زمني ليس لها إلا فتحة زاوية محدودة (تعطى بالنسبة بين أبعاد المرآة والبعد عن المنبع). وعندما قمنا باختبار مثل هذه المرايا في مجال الأمواج فوق الصوتية، كانت هناك مفاجأة رائعة في انتظارنا. وقد بينا أن عدد المحاويل اللازم لإعادة تبئير موجة بشكل فعال ينخفض، في حالة إشارات قصيرة عريضة الطيف، عندما يكون الوسط الذي تنتشر فيه الأمواج معقداً. بتعبير آخر، على الرغم من خضوع الأمواج لانتثرات مضاعفة بسبب العوائق أو الارتدادات عن الجدران، ينخفض عدد المحاويل الضرورية للانقلاب الزمني لدرجة أنه يكفي محوّل واحد في كثير من الحالات.

يمكن لمرآة الانقلاب الزمني في هذه الشروط، على الرغم من صغرها الشديد، أن تحقق بقعاً بؤرية أبعادها دائماً من مرتبة نصف طول الموجة. وقد لوحظ هذا المفعول في أكثر السيناريوهات تنوعاً مثل انتشار الأمواج فوق الصوتية الممتريّة الطول الموجي على أبعاد تبلغ أمتاراً عدة أو انتشار الأمواج الصوتية المسموعة في البحر على أبعاد تبلغ مئات الكيلومترات أو حتى انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية السنتيمترية على كيلومترات عدة. وقد أصبح ذلك ممكناً نظراً لأن مرآة الانقلاب الزمني تبدو في بيئة معقدة أكبر بكثير مما هي عليه في الحقيقة. إذ ليست أبعاد المرآة هي التي تحدد المقدرة الفاصلة المكانية بل خصائص الوسط حيث تنتشر الأمواج.

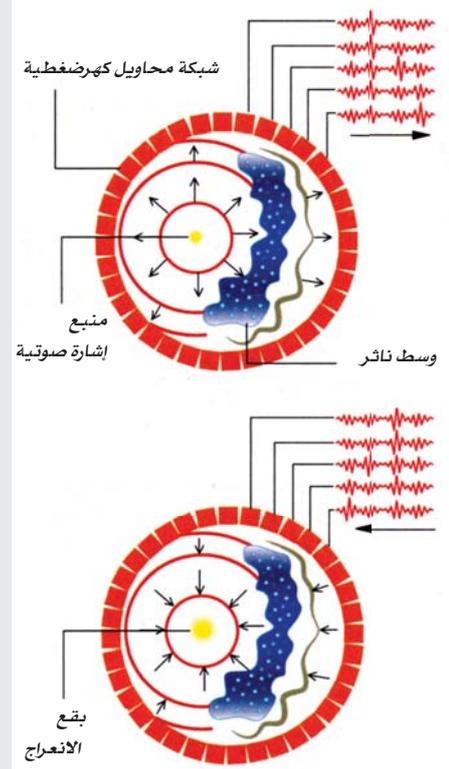
#### وسط مبدّد أكثر فعالية من وسط متجانس

أكدت التجارب العديدة هذه النتيجة المدهشة. توضح هذا المفهوم أول تجربة أجراها أرنود ديروود Arnaud Derod في عام 1994 في مختبرنا. ولهذا غمرنا مرآة انقلاب زمني مؤلفة من 96 محوّلًا في حوض من الماء. وقد قمنا بتعديل خصائص الوسط بوضع شبكة من 2000 ساق معدنية تنثر الأمواج التي يصدرها المنبع فيه.

في حالة إشارة ابتدائية قصيرة  $1\mu s$  يكون للإشارة الملاحظة لدى خروجها من الوسط الناثر مسار كلي عشوائي يمتد على زمن مدته  $200\mu s$ . غير أننا نتحقق بعد الانقلاب الزمني أن الإشارة فوق الصوتية التي انتشرت في الاتجاه المعاكس عبر مجمل السيقان تجد مدتها الابتدائية عند المنبع وتعود فتتبار على بقعة بؤرية لا تعتمد على أبعاد المرآة (انظر المؤطر).

والدهش أكثر أيضاً أنه يمكن تخفيض عدد عناصر المرآة بالانتقال من 96 عنصراً إلى عنصر واحد فقط، مشكلاً بذلك مرآة انقلاب زمني شبه نقطية؛ حيث تحافظ البقع البؤرية على الأبعاد نفسها ولكنها تبدي مزيداً من النهايات العظمى الطفيلية للشدة إلى جانبي الشدة العظمى.

كيف يحدث أن تعود الإشارة فوق الصوتية شبه العشوائية والتي يصدرها محوّل انقلاب زمني وحيد وتتبار عبر وسط ناثر،



الشكل 1. تلتقط الإشارة الصوتية التي يصدرها المنبع بمحاويل كهروضغطية تحيط بالمنبع وتحفظ (الشكل العلوي) ثم يعاد إصدار كل هذه الإشارات بترتيب زمني معكوس وتتجمع الموجة التي أحدثت بهذه الطريقة على المنبع الابتدائي (الشكل السفلي). غير أن هذه الموجة التي تتقارب لا تتوقف عند المنبع النقطة بل تحدث موجة جديدة متباعدة، الأمر الذي يؤدي إلى ظهور بقعة انعراج حول المنبع.

في هذه الحالة أنه يحدث حول نقطة المنبع تداخل بناءً بين هاتين الموجتين، في منطقة أبعادها  $\lambda/2$  في حالة الطول الموجي  $\lambda$ . أي أنه عوضاً عن استرداد صورة المنبع النقطة بالضبط، تتشكل بقعة تدعى البقعة البؤرية: إن هذا الحد للانعراج هو الذي يمنع إعادة بناء الصور المثالية للأجسام المنابع.

والأهم من ذلك أنه يضاف لهذا التبئير المكاني أيضاً إعادة تبئير زمني في الحالة التي يصدر فيها المنبع إشارة قصيرة واسعة الطيف (تنجم عن انضمام العديد من الإشارات الجيبية المختلفة في أطوالها الموجية) في وسط ناثر: على الرغم من تبديد الوسط تجد الموجة المنقلبة زمنياً مدتها الابتدائية في مكان وقوع منبعها! فنحصل بذلك على انضغاط مكاني زمني للطاقة في نقطة المنبع.

#### من مفاجأة إلى أخرى

كان المنبع، في المخطط المدرّوس، حتى الآن، محاطاً بحلقات كاملة، وهو أمر غير واقعي كثيراً. فقد كان يتوجب وضع عدد كبير من المحاويل في جميع اتجاهات المكان بالنسبة إلى المنبع.

## الانقلاب الزمني للأموح فوق الصوتية في وسط ناثر

لدراسة انتشار رزمة من الأمواج فوق الصوتية في وسط ناثر عشوائي البنية، قمنا بغمر مرآة انقلاب زمني صغيرة طولها 40mm مؤلفة من 96 محولاً كهروضغطياً، في حوض ممتلئ بالماء (a). تعمل هذه المرآة عند تواتر مركزي 3MHz (الطول الموجي من مرتبة 0.5mm). يُدخل وسط ناثر، عرضه كبير، مؤلف من 2000 ساق معدنية تتجاوب عند نحو 3MHz، بين هذه المرآة ومنبع صغير جداً للأمواج فوق الصوتية.

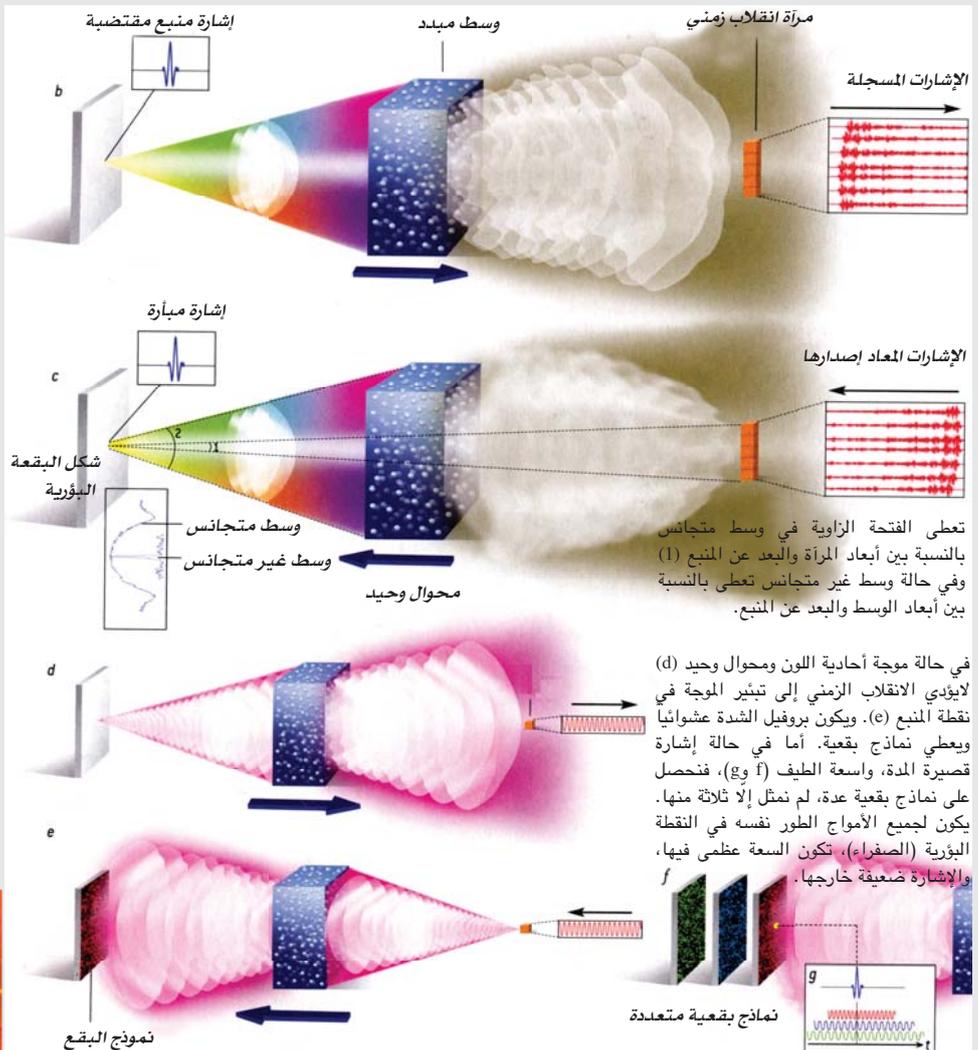
في أول مرحلة من التجربة يصدر المنبع النقطة إشارة فوق صوتية قصيرة جداً تستمر ميكروثانية. ينتشر هذا القطر من الأمواج فوق الصوتية عبر غابة من السيقان التي تقوم بتعديله. ينقسم الجزء الأكبر من الموجة الابتدائية إلى عدد كبير من الموجات في كل اصطدام مع السيقان. يمكن أن تتكرر العملية مرات عديدة، وعند الخروج من الوسط يمكن الحصول على إشارة فوق صوتية طويلة جداً 200µs تتميز بسلوك ضجيج عشوائي (b). تسجل المحاول الستة والتسعون هذه الإشارات التي مدتها من مرتبة 200µs.

بعد الانقلاب الزمني في الذواكر الإلكترونية يعاد إصدار الستة والتسعين ضجيجاً صوتياً في الوسط. تلاحظ عندئذ الإشارة فوق الصوتية التي تنتشر في مجموعة السيقان وتحقق أنه في موقع المنبع الابتدائي تستمر الإشارة فوق الصوتية الآن 1µs، أي تصادف مدتها الابتدائية تماماً (c).

إن أبعاد البقعة البؤرية الحاصلة من خلال الوسط الناثر وهو هنا غابة السيقان، من جهة أخرى، أصغر بكثير من البقعة الملاحظة في تجربة انقلاب تجري في وسط متجانس، في الماء حصراً. في التجربة التي تجري في وسط متجانس، نجد النتيجة التقليدية: تعتمد أبعاد البقعة البؤرية على الفتحة الزاوية التي ترى من خلالها المرآة من النقطة البؤرية. بوجود الوسط الناثر تصبح مجموعة سيقان الوسط في هذه الحالة بعد الانقلاب الزمني هي منبع الإشعاع المترابط الذي يتبار في النقطة الابتدائية: أي إن هذه الفتحة الجديدة هي التي تثبت أبعاد البقعة البؤرية ولم تعد أبعاد المرآة. في حال هندسة تجربتنا تتحسن المقدرة الفاصلة بالعامل 35 لدى الانتقال من الماء إلى غابة السيقان المعدنية، نظراً لأن الفتحة الزاوية أكبر بـ 35 مرة. أخيراً في حالة نبضات فائقة

القصر يكفي محوّل واحد للحصول على بقعة بؤرية لها الأبعاد نفسها. بالعكس عندما تجري التجربة بموجة أحادية اللون وبمحوّل واحد (d) نتحقق بأن الموجة لا تتبار بعد الانقلاب الزمني (e). إذ إن موجة حمراء مثلاً تعطي نموذجاً بقيقاً (على الشاشة الحمراء).

في حالة إشارة قصيرة مكونة من أطوال موجية عدة (الأحمر والأخضر والأزرق في هذه الحالة) نلاحظ نماذج لبقع عديدة (f). أي إن المركبات الطيفية لا تعيد تبيرها في نقطة المنبع ولكنها تكون في الطور نفسه في هذه النقطة، وفي هذه النقطة فقط (g) بحيث تكون الإشارة فيها شديدة جداً في لحظة معينة هي الزمن البؤري.



إما التبئير في كل مكان من النقاط أو استخدام هذا البنك من الإشارات لإيجاد موقع أي منبع من المنابع أو لأخذ صورة لمنبع معقد بالاعتماد على الإشارة التي يسجلها هوائي وحيد.

### التجاويف والمصائد الأخرى

جاء نجاح تقنيات الانقلاب الزمني من حقيقة ملاحظة المفعول نفسه الموجود في الأوساط النائرة في العديد من الحالات في الحياة العادية. من الأمثلة على هذه الحالات: حالة انتشار موجة في وسط تحيط به جدر عاكسة. نحن في هذه الحالة في وضع مماثل للوضع في منظار الأشكال kaleidoscope، يظهر فيه تكرار جسم صغير بشكل دوري وفق اتجاهات معينة. يحدث الأمر نفسه في حالة مراقب يقع في تجويف عاكس أو داخل جدر دليل موجي، حيث يبدو كل محوّل في مرآة انقلاب زمني صغيرة مترافقاً بالعديد من المحاويل الوهمية التي تحدثها الجدر العاكسة. يحدث لدينا انطباع بحيارة مرآة انقلاب زمني كبيرة مؤلفة من الكثير من المحاويل.

رصد وليام كبرمان William Kuperman وزملاؤه من المعهد الأمريكي للبحث SCRIPPS في عام 2002 هذا المفعول المنقطع النظير في البحر، عندما قاموا بتصميم مرآة انقلاب زمني صوتية طولها 98 متراً مؤلفة من 29 محوّلًا تعمل عند تواتر مركزي قدره 3kHz (أي الطول الموجي 50cm) وقاموا بغمرها في بحر جزيرة Elbe المفتوح في منطقة عمقها من مرتبة مئة متر. وبتعديل الإشارة التي ترسلها مرآة الانقلاب الزمني قاموا بتبئير رسالة صوتية على بعد عشرة كيلومترات لم يلتقطها إلا غواص يقع في مكان البقعة البؤرية! وقد قدمت هذه التقنية العديد من الابتكارات في مجال الاتصالات تحت المائية، ومؤخرًا أجرى فريق ياباني اتصالات على بعد أكثر من ألف كيلومتر بالانقلاب الزمني.

فهل يمكن الحفاظ على تبئير جيد باختزال الـ 29 محوّلًا في مرآة الانقلاب الزمني إلى محوّل وحيد؟ ليس إذا بقينا في البحر الذي يسلك سلوك دليل للأمواج الصوتية ترتد فيه الأمواج بين قاع البحر وسطح الماء، ولكنها يمكن أن تتسرّب جانبياً. يبدي الدليل الموجي في الواقع قليلاً من درجات الحرية التواترية. يكمن الحل في العمل في تجويف مغلق يتم احتباس الأمواج فيه. نحن نعلم أن حقلًا موجياً محتبساً في تجويف يمكن أن ينظر له دائماً على أنه انضمام لعدد معين من أنماط الاهتزاز التي يمكن تحديد تواتراتها بدقة. حيث تهتز، في حالة كل نمط، نقاط الوسط كلها بالتواتر الزمني نفسه ولكن بأطوار وسعات مختلفة.

تهتز بعض النقاط بطور معين، وأخرى على التعاكس في الطور. أما النقاط الواقعة في عقد الأنماط فلا تهتز على الإطلاق، في حين أن النقاط الواقعة في بطونها تهتز كثيراً. يقترن، بكل نمط للاهتزاز، نموذج اهتزاز، وأصغر بعد بين عقدة وبتن فيه تساوي نصف طول

في حين أن ذلك مستحيل فيما لو أجريت التجربة بإشارة جيبيية (وحيدة الطول الموجي) وليس بإشارة قصيرة واسعة الطيف؛ إن عكس الاتجاه الزمني يعني في حالة موجة جيبيية (توصف بسعتها وطورها) ردّ هذه الموجة باستبدال طورها بعكسه؛ إذ إن موجة جيبيية (أحادية اللون) يصدرها منبع صغير جداً (موجة كروية متباعدة) لا تتبأّر أبداً مهما يكن طورها لدى عبورها وسطاً ناثرًا.

على العكس فالإشارة تُحدث، بعد عبورها مثل هذا الوسط، حقلًا تتميز شدته في مستوي المراقبة ببروفيل عشوائي يتميز بنماذج من البقع العشوائية التوزع. تعتمد أبعاد البقع على الطول الموجي وعلى أبعاد الوسط الناثر. تُعدّ البقع مماثلات للأهداب التي تنتج عن تداخل موجتين مستويتين، ولكن الأمر هنا يتعلق بتداخل العديد من الأمواج مهما يكن طورها وسعتها. وبالتالي لا يسمح هوائي انقلاب زمني وحيد بإعادة تبئير موجة أحادية اللون: لتبئير أمواج أحادية اللون لا بد من وجود العديد من الهوائيات وبالتالي مرآة انقلاب زمني كبيرة.

لماذا يكفي هوائي واحد في حالة إشارة عريضة الطيف؟ عندما يستخدم إشعاع ابتدائي مقتضب جداً ينتشر في وسط ناثر، تستمر الإشارة التي يلتقطها الهوائي مدة طويلة ويكون طيفها واسعاً. في عملية الانقلاب الزمني، على الرغم من أن أياً من المركبات الطيفية لن يتبأّر عند المنبع، إلا أنها تصل جميعها ولها الطور نفسه. وبالتالي تتميز كل المنحنىات الجيبية المختلفة التواترات والسعات، في نقطة المنبع، بالطور نفسه، الأمر الذي يحدث إشارة شديدة جداً في لحظة معينة: تدعى «الزمن البؤري».

بالمقابل، في حالة النقاط الواقعة خارج المنبع (بدءاً من البقع الأقرب)، تصل المركبات الطيفية بأطوار مختلفة إلى حدّ كافٍ بحيث يعطي انضمامها إشارات ضعيفة. إن النسبة بين السعة في النقطة البؤرية والسعة في البقع الخارجية الأقرب تميز فعالية التبئير هذه. وتتعلق هذه النسبة بعدد نماذج البقع المستقلة (فهي لا تتشابه فيما بينها وغير مترابطة) الموجودة في الطيف الذي يصدره المنبع. يوجد، في تجربتنا، نمطاً نموذج بقعي مستقل تقابل تواترات مختلفة. ويقال إن الإشارة الزمنية التي يلتقطها الهوائي تتضمن نمطاً درجة من الحرية التواترية.

يعني هذا الكلام أن هذا الهوائي الوحيد الذي يتميز بمئتي درجة حرية تواترية قادر على تبئير إشارة عريضة الطيف بالجودة نفسها لمئتي هوائي موزعة مكانياً وتعمل بتواتر وحيد (أحادي اللون).

هكذا، فإن هوائياً واحداً يستفيد من تنوع واسع في التواترات، وبالتالي يوجد عدد كبير من درجات الحرية التواترية لتبئير إشعاع في وسط ناثر. يقابل كل نقطة من المكان إشارة زمنية وحيدة. وبمجرد معرفة جملة الإشارات المقابلة لكل نقاط المنطقة، يمكن

في الواقع الوصول إلى ذلك ولكن، لتحقيق ذلك يجب ألا يقع المنبع الذي يجب تبئير الحزمة عليه في وسط متجانس: إذ إن المنبع نفسه هو الموضوع في وسط غير متجانس.

يجب أن يحدث هذا الوسط الذي يحيط بالمنبع طيف أنماط مقاييس اهتزازها المكاني أخفض بكثير من الأطوال الموجية المستخدمة. وللحصول على مثل هذه النتيجة لابد من وجود وسط مؤلف من مجموعة من المجاوبات الصغيرة المقترنة بشدة فيما بينها. يجب أن تكون أبعاد هذه المجاوبات أصغر بكثير من الأطوال الموجية التي تجعلها في حالة تجاوب. أي يجب أن تكون أبعادها دون (تحت) الطول الموجي، والتي يمكن أن تتوضع بسبب صغر أبعادها بأعداد كبيرة في منطقة صغيرة مقارنة بطول الموجة. وهي تتوزع إما بشكل غير منتظم أو بشكل دوري.

تحقق إذاً بنية (نوعاً من مادة اصطناعية فريدة تسمى مادة سامية أو مترقية meta-materiel) تشبه جزيئاً كبيراً، متماثل الذرات المقترنة فيما بينها، أو قطعة بلورية صغيرة. نعرف بأن ذرة معينة تسلك سلوك مجاوب تشيره فوتونات ذات تواترات معينة، وبأن الطول الموجي لهذه الفوتونات المثيرة أكبر بكثير من أبعاد الذرة. نلاحظ، عندما ندرس جزيئاً مؤلفاً من عدة ذرات مقترنة، طيف أنماط تجاوب أكثر غنى من طيف ذرة معينة، وإن كل تواتر تقابله بنية مكانية نوعية لاهتزاز الذرات (نمط اهتزاز الذرات).

يمكن للسلم المكاني لاهتزازات هذه الأنماط أن يكون بصغر البعد بين ذرتين متجاورتين والذي يكون هنا أصغر بكثير من الطول الموجي. من هنا ندرك بأنه يمكن لهوائي عريض العصابة (مستخدم في الانقلاب الزمني) قادر على إثارة العديد من الأنماط دون الطول

موجة الأمواج الصوتية المهتزة بتواتر النمط. لهذا السبب يتميز نمطان مختلفان في تواتريهما بنموذجي اهتزاز مستقلين يماثلان نموذجيهما البقيين المستقلين.

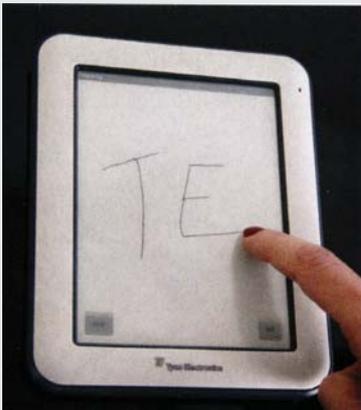
يمكن لمنبع وحيد يقع في النقطة A من تجويف معين، ويصدر نبضة قصيرة عريضة الطيف، أن يثير العديد من أنماط هذا التجويف. كما يمكن لمحوال بسيط يقع في أي نقطة B من التجويف أن يؤدي دور مرآة انقلاب زمني. يقيس المحوال في النقطة B إشارة محصلة لكافة الأنماط التي تولدها النقطة A التي تمتد على زمن طويل جداً. يعاد إصدار الإشارة في التجويف بعد الانقلاب الزمني فتعود وتتبار في النقطة A. تكون إعادة التبئير الزمني-المكاني أكثر فعالية بقدر ما يكون عدد الأنماط التي يثيرها المنبع كبيراً. فيما يتعلق بأبعاد البقعة البؤرية، فهي من مرتبة أصغر مسافة تفصل بين عقدة وبطن في مختلف الأنماط، أي نصف طول موجة التواترات الأكثر ارتفاعاً في الطيف.

إن تطبيق هذه التجربة يلامس الأتمتة المنزلية domotic: فهي تسمح بتحويل أي جسم صلب (منضدة، باب، مزهية، حائط... الخ) إلى لوامس ذكية Keyboard. لنتخيل أثر إصبع على سطح جسم، الذي إذا لم يكن كبيراً جداً، يسلك سلوك تجويف. فهو يولد موجة مرنة تنتشر فيه وترتد عنه. إن تسجيل هذه البصمة الصوتية، خلال زمن طويل بمحوال وحيد، يتضمن كل المعلومات الخاصة بإيجاد مصدرها. يعيد الانقلاب الزمني، كما أشرنا، تبئير هذه الإشارة في منبعها. ولتحقيق مساحة تتأثر باللمس range tactile في جسم معين، يقسم سطحه إلى نقاط تأثير عنصرية، يتم في طور التعلم تسجيل البصمات الزمنية الصوتية. وعندما نطرق على منطقة منه نقارن بصمة هذا التأثير بينك البصمات المحفوظة.

يُردُّ هذا الأمر إلى تحقيق عملية الانقلاب الزمني رياضياً في الحاسوب والسماح بالحصول على أجسام تتأثر باللمس، عملية جداً. فلا يمكن تحقيق كلافية بلواس وهمية فحسب، بل إن التقنية قابلة للتطبيق أيضاً عندما تنزاح الإصبع على سطح. تُحدث الإصبع بالانزلاق ضجيج احتكاك يسمح بتتبع مسارها؛ حيث تصبح الإصبع فأرة حاسوب. وقد شهدت مؤسسة Sensitive Object الفنية التي أسسها Ros Kiri Inj وهو أحد باحثي مختبرنا، نجاحاً كبيراً وأعدت شرائها مؤخراً الشركة الأمريكية الكبيرة Tyco-Electronics وهي تطور مثل لوحات اللمس هذه.

### مجاوبات مقترنة من أجل مقدره فاصلة فائقة

تبين الأمثلة السابقة أن الوسط الناثر أو الجدر العاكسة تسمح لهوائي صغير بالتحويل إلى عدسة مكانية زمانية يمكنها خلال زمن قصير أن تبئير إشارات على بعد من مرتبة الطول الموجي. فهل يمكن استخدام المبدأ نفسه للنزول إلى أخفض من الطول الموجي؟ يمكن



الشكل 2. يمكن لأي دعامة بما فيها الدعامة الخشبية، بفضل الانقلاب الزمني أن تصبح لوحاً يتأثر باللمس tactile tablet. من شأن تأثير إصبع على لوح أو الضجيج الذي تحدثه بالانتقال على سطحه أن يولد موجة مرونة ترتد في الجسم ويلتقطها محوال. يمكن مقارنة هذه الإشارة بينك الإشارات التي سبق حفظها. وبذلك تجري إعادة بناء مسار الإصبع عنصورة عنصورة أو موقعها على اللوح.

إن توافر بقع بؤرية مليمترية الأبعاد في مجال الاتصالات مهم، نظراً لأنه يمكن، بوضع هوائيات عدة تفصل بينها مليمترات عدة في وسط من المجاوبات، إرسال رسائل مختلفة مبرأة على كل من هوائيات الوسط بدءاً من هوائي أو هوائيات عدة موجودة في المجال البعيد. وبذلك يمكن الاستفادة من تعقيد الوسط لزيادة كمية المعلومات المستقبلية في حجم معين. وقد أحدثت الشركة Time Reversal Communication للاستفادة من هذه الأفكار في مجال الاتصالات السرية والمألوفة بتدفق عالٍ جداً.

يطبق هذا المبدأ للتبشير كسر الطول الموجي أيضاً في الصوت. وقد قرر ليروزي و لمالك تطبيقه، فقاما بتحضير بلورة صغيرة مؤلفة من 49 علبة صودا فارغة (انظر الشكل 3). نعلم في الصوتيات أنه يمكن تصنيع مجاوبات كسرية الطول الموجي تدعى مجاوبات هلمولتز Helmholtz. إن هذه العلب الأسطوانية المفرغة هي مجاوبات قطرها 6.6cm وتتجاوب عند التواتر 420Hz، الذي يقابل الطول الموجي 80cm.

بتصنيع بنية بلورية مؤلفة من 7×7 علبة، نحقق وسطاً يمكن أن يهتز وفق نمط مختلف للاهتزاز تمتد من 340 إلى 420Hz. وباستخدام إصدار صوتي قصير طوله 10ms يتركز عند 400Hz فوق إحدى العلب مباشرة نرصد في المجال البعيد موجة صوتية تنتج من انضمام كل الأنماط. إن إعادة تبشير الأمواج الصوتية بالانقلاب الزمني، كما في حالة الأمواج المكروية، تكون شديدة الفعالية، حيث يحدث في بقع بؤرية أبعادها من مرتبة  $\lambda/25$ .

تتضاعف تطبيقات مرايا الانقلاب الزمني بالإضافة إلى غيرها، في المجال الطبي، في معالجة بعض الأورام الدماغية بالأمواج فوق الصوتية المبرأة. يتعلق الأمر في هذه الطريقة بتبشير الأمواج فوق

الموجي sub-wavelength أن يجمع الضوء أو الطاقة الميكانيكية في بقع بؤرية، أبعادها أصغر من الطول الموجي. ويقدر ما يكون عدد المجاوبات المقترنة أكبر يكون المفعول أكثر وضوحاً.

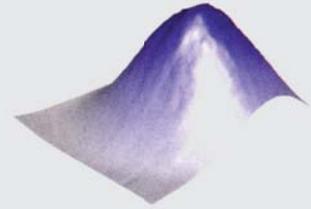
قمنا بالتعاون مع جيوفري ليروزي Geoffroy Lerosey وجوليان دو روزني Julien de Roseny ووفابريس لمالك Fabrice Lemcult وأرنولد توران Arnaud Tourin من معهد لانجفان بإجراء التجارب الأولى على هذا المبدأ في مجال الأمواج المكروية والأمواج الصوتية. وقد انصب اهتمامنا في التجربة الأولى على تبشير أمواج كهرومغناطيسية من نوع الأمواج المكروية المستخدمة في الاتصال ضمن الحزمة Wi-Fi، تواترها المركزي المستخدم 2.4 GHz ويقابله الطول الموجي 12cm.

وأما منبع الإشعاع المستخدم فهو سلك نحاسي صغير أدرج في بنية مؤلفة من أسلاك نحاسية صغيرة موزعة جانبياً بشكل عشوائي ولكنها قريبة جداً بعضها من بعض. تتميز جميع هذه الأسلاك بأن لها الطول نفسه، وقع الخيار عليه، بحيث تتجاوب الأسلاك مع التواتر 2.4 GHz. تُحدث هذه الأسلاك بالاقتران فيما بينها طيفاً من الأنماط الجماعية الغنية جداً والتي تتضمن العديد من التواترات، التي تمتد من مئات الميغاهرتز إلى 2.4 GHz. بعد إصدار المنبع في هذه البنية نبضة عريضة الطيف تستمر 10ns يستقبل هوائي يقع في المجال البعيد إشارة طويلة جداً تنتج من انضمام كل الأنماط المثار. يكفي الانقلاب الزمني لهذه الإشارة الكهرومغناطيسية لإعادة تبشيرها في المنبع. ولكن أبعاد البقعة البؤرية المقبسة في هذه الحالة تساوي جزءاً من ثلاثين من الطول الموجي  $\lambda/30$ . تنتج هذه البقعة من الانضمام الترابطي لجميع الأنماط دون الطول الموجي من الموجة المتولدة بالانقلاب الزمني والتي تهتز على أبعاد من مرتبة البعد بين سلكين والذي هو من مرتبة المليمتر.

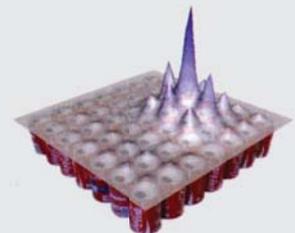


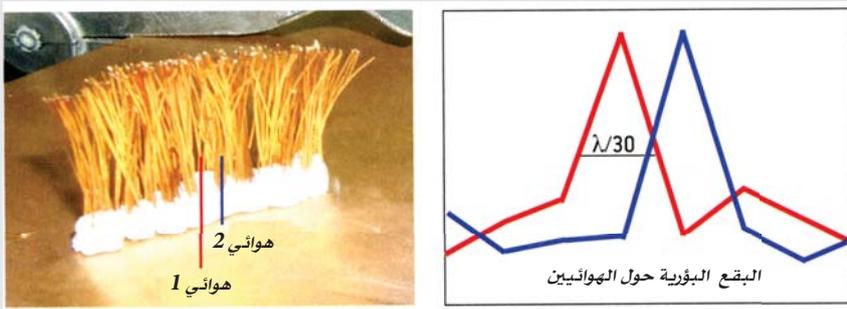
الشكل 3. بلورة مكونة من 49 علبة من الصودا يمكن أن تهتز وفق نمط مختلف للاهتزاز تمتد تواتراتها من 340 إلى 420Hz، في حين أن العلبة المنفردة تهتز بالتواتر 420Hz. عندما تستقبل إحدى العلب إشارة صوتية طولها نحو بضعة ملي ثانية تثار كافة أنماط البلورة وتستقبل محاويل بعيدة محصلة انضمام هذه الأنماط. تتركز الإشارة بعد الانقلاب الزمني على العلبة الوحيدة حيث كان يقع المنبع، بمقدرة فصل قدرها  $\lambda/25$ .

بقعة بؤرية من دون وجود العلب

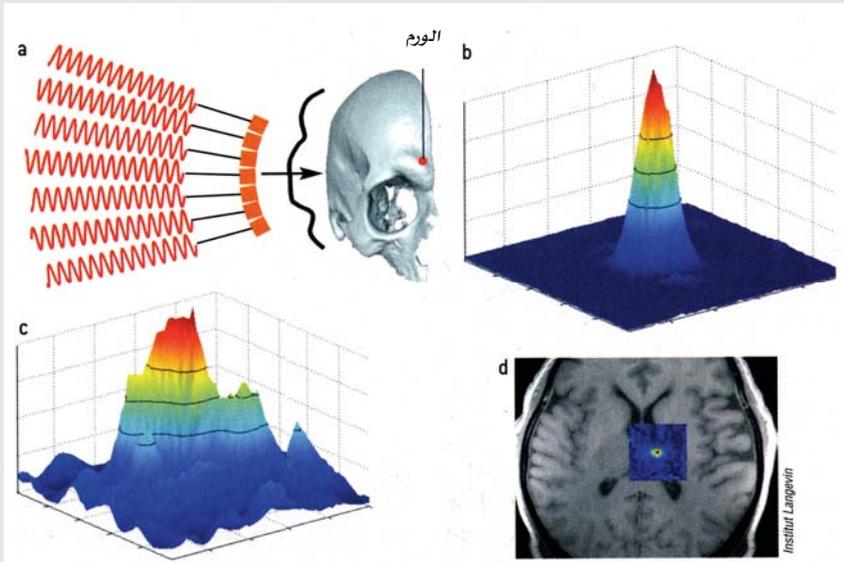


بقعة بؤرية بوجود العلب





الشكل 4. أسلاك من النحاس عديدة وصغيرة (مجاوبات كهروطيسية) لها الأبعاد نفسها، تتوزع بشكل عشوائي على دعامة. يحدث الاقتران فيما بينها مجموعة غنية جداً من أنماط الاهتزاز الجماعية. تثار هذه الأنماط بنبضة كهروطيسية تصدر عن هوائي صغير (الأحمر أو الأزرق) يقع في قلب البنية. يوجد هوائي يقع على مسافة بعيدة يستقبل إشارة معقدة تمثل محصلة انضمام كل الأنماط المثارة. تسمح عملية الانقلاب الزمني وإعادة الإصدار بإعادة تجميع الموجة في مصدرها ولكن ببقعة بؤرية مليمترية الأبعاد ( $\lambda / 30$  الشكل الأيمن) أي أربعة مليمترات. يعني هذا الأمر أنه يمكن لهوائي بعيد أن يرسل رسائل واضحة إلى كل من الهوائيين القريبين أحدهما من الآخر.



الشكل 5. لحرق ورم دماغي، نركز عليه أمواجاً فوق صوتية شديدة، بإجراء عملية انقلاب زمني (a)، ولكن ذلك يتطلب زرع مُصدرٍ يقع في منطقة الورم. ولتجنب ذلك تستخدم طريقة وهمية للانقلاب الزمني. بمعرفة الصورة الثلاثية الأبعاد للجمجمة يمكن بناء نموذج لانتشار موجة فوق صوتية في الدماغ ونقوم بمحاكاة العديد من الانقلابات الزمنية بالاعتماد على أي نقطة في الدماغ. تسمح الطريقة بتبشير الأمواج بدقة (b) لا تتبأر الموجة من دون تصحيح الزيوغ العائدة للجمجمة (c). تسمح هذه الطريقة التي جرى اختبارها على الحيوان برفع درجة حرارة الخلايا الورمية حتى  $65^{\circ}\text{C}$  (النقطة الحمراء)، الأمر الذي يؤدي إلى إتلافها.

الصوتية العالية الشدة خلال ثوانٍ عدة من خلال الجمجمة مع تصحيح زيوغ الانتشار العائدة للعظم.

#### الانقلاب الزمني في الدماغ

وقد أثبتنا بالتعاون مع ميكائيل تانتر وجان فرنسوا أوبرلي أن تقنية الانقلاب الزمني تسمح بتعويض مفعولات الجمجمة بدقة. وقد برهنا، باستخدام نموذج بدئي مكون من 300 محوّل ومُصدر مزرورع في دماغ نعجة، أنه يمكن تركيز استطاعات صوتية في مناطق مليمترية تكفي لرفع درجة حرارة النسيج إلى الدرجة  $65^{\circ}\text{C}$ . ولتجنب استعمال مصدر مزرورع ابتكرنا طريقة تستعمل منبعاً افتراضياً. تكمن هذه الطريقة بعد الحصول على الصورة الثلاثية الأبعاد للجمجمة بماسح الأشعة السينية، في بناء نموذج معلوماتي لانتشار فوق الأصوات داخل الجمجمة ومحاكاة عملية الانقلاب الزمني للإشارات القادمة من أي نقطة من الدماغ. وقد صنعت الشركة Super Sonic Image مرآة انقلاب زمني فيها 512 محوّلًا يتلاءم مع التصوير ب-IRM. وقد تم تبرير هذه الطريقة على الجثث وسيتم قريباً اختبارها ضمن إطار المشروع Ultra-brain في معهد الدماغ والنخاع الشوكي.

أخيراً، لا بد من القول بأن السونارات ورادارات الانقلاب الزمني، هي كذلك في أوج تطورها، ويمكن استخدامها في التصوير تحت الماء الضحل حيث يستحيل عملياً، بسبب الارتدادات، التعرف بطرائق السونار التقليدية على أهداف، كالمناجم. كما تسمح رادارات الانقلاب الزمني أيضاً بمراقبة أشخاص يتنقلون خلف الجدران. وتطبيقات الانقلاب الزمني في الأوساط المعقدة جمّة سواء في حالة الأمواج الصوتية أو الكهروطيسية. والأكثر من ذلك تطبيقات هذه التقنيات على الأمواج الضوئية والأمواج الزلزالية وحتى الأمواج المائية في سطوح البحار هي أكثر من واعدة.

نُشر هذا المقال في مجلة *Pour la Science* n° 409, November, 2011  
ترجمة د. سهام طرابيشي.

# إعادة تدوير الوقود ومفاعلات الجيل الرابع

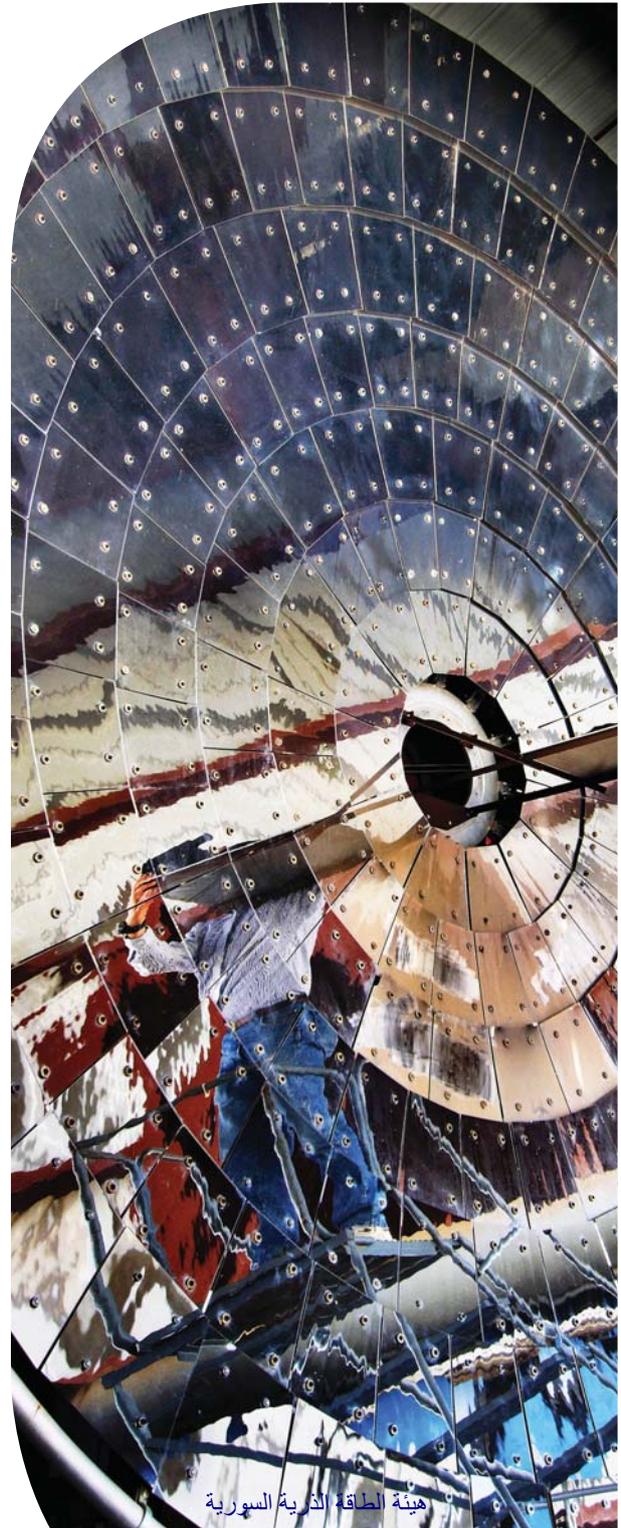
تسعى مفاعلات الجيل الرابع للإجابة على مواضيع تتعلق باستدامة الطاقة النووية، من خلال التوفير في الموارد الطبيعية، وتقليص كمية النفايات، وأمان وقوع حوادث نووية وتحاشيها. دُرست أنماط عديدة من المفاعلات ضمن إطار المنتدى الدولي لمفاعلات الجيل الرابع (GIF)، ومن ضمنها مفاعلات النترونات السريعة ومفاعلات الحرارة العالية (بنترونات سريعة أو بدونها).

في فرنسا، وقع الاختيار على مواصلة الجهد حول المفاعلات ذات النترونات السريعة المُبرّدة بالصوديوم، كسلسلة ثبتت إمكانية تبوئها الموقع الأفضل من أجل الوصول إلى عرض بمقياس صناعي مع حلول العام 2040. وهناك أيضاً توجه أقل أهمية نحو المفاعلات السريعة المُبرّدة بالغاز، وهي تقانة لم تتأكد إمكانيةها بعد.

تركز هذا المقال على التقدم الذي وصلت إليه البرامج الموجهة بشكل خاص نحو مناح إستراتيجية واقتصادية (أسواق). يضع هذا المقال المفاعلات ضمن رؤية ديناميكية، ويلخص المحاسن العديدة للوضع الفرنسي، خاصة من جهة توافر صناعة إعادة التدوير الأفضل عالمياً، التي تضع هذا البلد في المقدمة ضمن هذا السبق. والقضية الأساسية، على المدى المنظور، ليست سوى تجاوز كلي لمشكلة مناجم اليورانيوم.

الكلمات المفتاحية: مفاعلات الجيل الرابع، إعادة تدوير الوقود، مفاعلات سريعة.

**Key World:** Reactors of 4<sup>H</sup> generation, Recycling of fuels, Speed Reactors.



المركبات الرئيسية الأكثر سمية إشعاعية على المدى الطويل. تتطلب هذه الإمكانية في التحويل بذل جهود كبيرة في قطاعي البحث والتطوير (R&D)، وهذا لا يخلو من مساوئ ترتبط بمعوقات تتعلق باستثمار المفاعلات وإنشاءات دورة الوقود.

وبغية القيام في المستقبل باستخلاص جزء من المعلومات حول أمثلة إدارة المواد النووية، ينصب الهدف إذاً حول تطوير مفاعلات نوترونات سريعة مُبرّدة بالصوديوم وتستجيب لمعايير مفاعلات الجيل الرابع. وقبل مواجهة حدوث أي انتشار صناعي وتجاري، فإنه يجب تطوير مفاعلات تحقق مستوى أمان مكافئ على أقل تقدير لمستوى أمان مفاعلات الماء الموجودة عندئذ. من الضروري إذاً، وبشكل موضوعي، وضع ابتكار أكثر تطوراً مقارنةً بنماذج المفاعلات النووية السابقة مثل فينكس (Phénix) أو سوپر فينكس (Superphénix). كما أنه من الضروري أيضاً تقليص الزيادة في النفقات إلى الحد الممكن، فيما يتعلق بجوانب الاستثمار، وتحسين إمكانيات تقبل هذه التكنولوجيا، طالما أن أمد إيقاف مفاعلات سوپر فينكس، المرتبطة أصلاً بقرار سياسي، ما يزال رهينة تقارير عديدة.

مع ذلك، يجب التذكير بالخصائص المفضلة فيما يخص معيار الأمان في مفاعلات RNR المُبرّدة بالصوديوم، التي يمكن أن نذكر من بينها، بشكل خاص، ما يلي:

- أن يتمّ ابتكار مفاعل متكامل تكون فيه كامل الدارة الأولية موجودة في الحوض الأساسي، والتي تحقق تخميدياً حرارياً شديد الأهمية،

## 1. لماذا مفاعلات الجيل الرابع؟

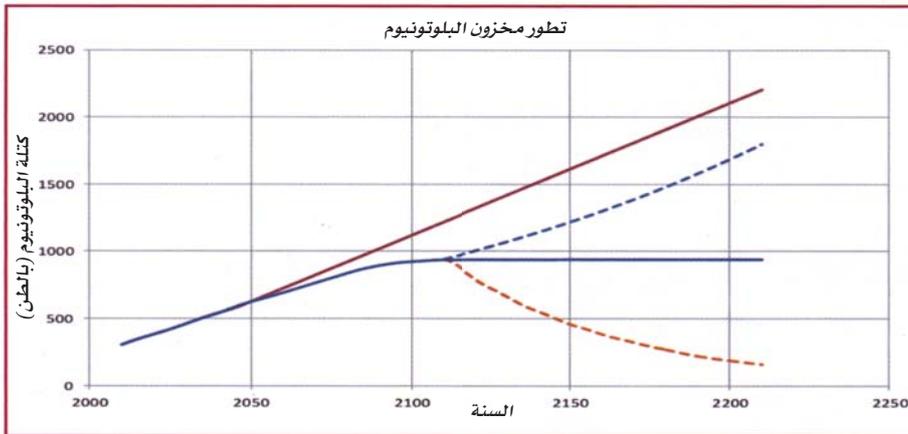
تجمع مفاعلات النوترونات السريعة (RNR) محاسن مهمة فيما يتعلق بموضوع الاستدامة الطاقية:

- تسمح مفاعلات RNR بتنمية واسعة لموارد اليورانيوم الطبيعي (يتكون اليورانيوم الطبيعي ممّا يزيد على 99% من اليورانيوم-238، وحوالي 0.7% من اليورانيوم-235). يستخدم بشكل رئيسي في مفاعلات الجيلين الثاني أو الثالث اليورانيوم-235 (نظير انشطاري)، وهذا ما أدى إلى استخدام سيئ لموارد اليورانيوم الطبيعي. تمتلك مفاعلات النوترونات السريعة، بحدّ ذاتها، إمكانية حرق اليورانيوم-238 (نظير عالي الوفرة)، محوّلة إياه، عبر ظاهرة القنص النوتروني، إلى البلوتونيوم-239 (نظير انشطاري) الذي يغذي تفاعلات الانشطار. وبذلك، نجد أن القدرة الطاقية لليورانيوم ستتضاعف وفق معامل من مرتبة 50 إلى 100 مرة. نشير هنا إلى أن فرنسا تمتلك فوق أراضيها مخزوناً مهماً من اليورانيوم-238 في مخزونات اليورانيوم المستنفد (حيث يخزن حوالي 300 ألف طن في موقعي بييرلات وبيسين (Bessines)، وهذا ما يسمح، في حال استعمال مفاعلات RNR السريعة، بإنتاج طاقة كهربائية بالوتيرة الحالية لفترة تمتد لآلاف عديدة من السنين؛

- تمتلك مفاعلات RNR إمكانية إعادة تدوير البلوتونيوم بشكل فعال، وهذا ما يعطي مرونة كبيرة لإدارة مخازن البلوتونيوم، ويسمح بتناوب عمل منظومة المفاعلات النووية الحالية (REP) ومنظومة مفاعلات النوترونات السريعة (RNR).

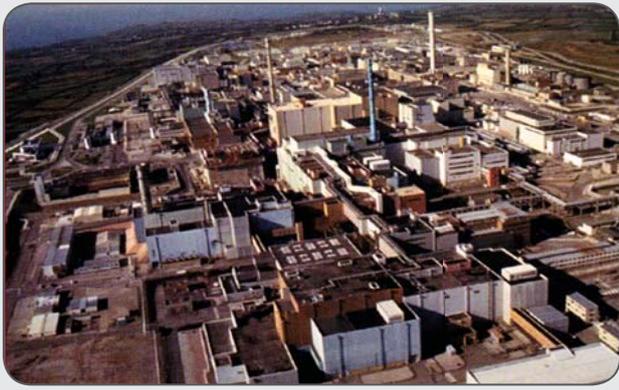
وهكذا تستطيع مفاعلات RNR استهلاك البلوتونيوم و/أو المساهمة في تشكيل استقرار نظائري لمخزون البلوتونيوم من أجل تجنب تراكم كميات كبيرة منه. كما تستطيع أيضاً إنتاج مواد انشطارية بوفرة كبيرة من أجل تغذية الزيادة المتصاعدة لمنظومة المفاعلات (انظر الشكل 1)؛

- تمتلك مفاعلات RNR إمكانية حرق أكتينيدات (نيوكليدات) منجمية، منتجةً بذلك نفايات نووية نهائية خالية من



الشكل 1. سيناريوهات تطور حصيلة البلوتونيوم في فرنسا (المصدر: مفوضية الطاقة الذرية الفرنسية). الخط الأحمر: منحى بدون مفاعلات سريعة؛ الخطوط المتقطعة: منح ممكنة للمخزون وفقاً لمنظومة المفاعلات النووية وإدارة المفاعلات السريعة.

<sup>1</sup> اسم أطلق عام 1935 على منطقة في جنوب أواسط الولايات المتحدة، أصيبت بقطوع وعواصف ترابية أدت إلى نقص الأمطار لفترة طويلة صاحبها تفكك التربة وهلاك النباتات الطبيعية.



الشكل 2. مصنع هاغ Hague (المصنع الأكبر لمعالجة إعادة التدوير).

وفقاً لهذا القانون، مبدأ حماية صحة الأفراد وضمان المحافظة على البيئة، ومبدأ تجنب النفقات التي ستمولها الأجيال القادمة أو تقليصها، وتجنب مبدأ ملوث-يدفع. وبهذا الشكل، فإن معالجة الوقود المستنفد تستجيب إذاً إلى متطلبات تخفيض كمية النفايات وأذيتها. وبذلك تكون عملية المعالجة وإعادة التدوير متكاملة في السيناريو الأساس المطبق حالياً من قبل الكهربائيين الوطنيين تحت مراقبة وكالة الصحة الوطنية ASN.<sup>3</sup>

يمكن لعملية إعادة تدوير الوقود النووي المتبعة حالياً ضمن منظومة مفاعلات REP الفرنسية أن تسمح في اقتصاد 25% من كمية اليورانيوم الطبيعي، وذلك بفضل إعادة تدوير البلوتونيوم الموجود ضمن الوقود MOX REP واليورانيوم القابل للاستخدام أيضاً، من خلال طريقة إغناء جديدة (وقود يسمى «URE»<sup>4</sup>). فعلياً، إن الوقود المستخدم لليورانيوم الطبيعي المغنى (المخصب) يحوي حوالي 94% من اليورانيوم و1% من البلوتونيوم، و4% من المواد الانشطارية و1% من الأكتينيدات المنجمية. تسمح معالجة الوقود المستنفد في مصنع هاغ HAGUE باستخلاص اليورانيوم والبلوتونيوم بشكل منفصل والتحكم بالأكتينيدات المنجمية والمنتجات الانشطارية على شكل حزم (طرود) من النفايات المزججة ذات الاستقرارية الكبيرة جداً والمعدة للتخزين الجيولوجي. كما تسمح هذه التقنية بتخفيض كمية الأكتينيدات الموجودة في النفايات، بعد إعادة تدوير البلوتونيوم.<sup>5</sup>

وهو عامل مهم فيما يتعلق بموضوع الأمان. كما أن ثابت الزمن الذي يميز حالة تسخين المفاعل عند توقف نظام التبريد، هو إذاً أكبر بحدود 20 مرة مقارنةً مع مفاعل يعمل بالماء؛

- أن تكون الدارة الأولية غير مضغوطة؛

- أن يكون هامش الغليان كبيراً جداً (نموذجياً 300 درجة)؛

- أن يجري الدوران الطبيعي للصوديوم بسهولة، وهذا ما يسمح بتصميم دارات تساعد على التخلص من الاستطاعة المتبقية بشكل متنوع، موجبة أو سالبة، والتي تم فحص فاعليتها مسبقاً.

فمن الممكن ابتكار مولدات بخار تضمن غياب عواقب الخلل في شروط الأمان لاحتتمال حدوث تفاعل صوديوم-ماء، وهذا يتطلب ابتكار منظومة تحويل للطاقة بدون ماء (أي وجود مبادلات صوديوم-أزوت). يمكن الإشارة هنا، إلى أن المخاوف حول موضوع الأمان ستكون الكلمة المفتاح لتطوير مفاعلات الجيل الرابع (RNR)، التي يجب أن تحقق التكامل بدءاً من ابتكارات متطلبات الأمان الأكثر صرامة وبشكل خاص المعلومات المستخلصة من حادث فوكوشيما (FUKUSHIMA).

أخيراً، لنتذكّر بأن الإدارة المثلى للمواد النووية في حالة مفاعلات RNR يجب أن تكون مرتبطة بدارة مغلقة للوقود. وبذلك، تستطيع مصانع المعالجة وإعادة التدوير لمفاعلات REL ومفاعلات RNR أن تكون عندئذ بمثابة منشآت منفصلة أو منشآت مشتركة مع إجراء بعض التعديلات.<sup>2</sup>

## 2. إعادة تدوير الوقود المستنفد

من أجل الأسباب المشار إليها آنفاً، فيما يخص الإدارة المثلى للموارد والمواد النووية (يورانيوم وبلوتونيوم بشكل خاص)، تُعدُّ عمليات المعالجة وإعادة التدوير خياراً استراتيجياً وطنياً تمّ اتخاذه خلال العقود الأولى لتنفيذ خطط تنمية الطاقة النووية في فرنسا. يستجيب هذا الاختيار في أيامنا هذه إلى الأهداف المحددة في قانون 28 حزيران/يونيو 2006 المتعلق بإدارة المستدامة للمواد والنفايات المشعة، حيث يجب أن تحترم إدارة النفايات،

<sup>2</sup> على سبيل المثال، من أجل معالجة الوقود المستهلك، يجب توافر ورشات مختلفة تماماً، ولكن بعد الحل يمكن أن تصبح العملية مشتركة.

<sup>3</sup> يقوم الكهربائيون في شركة كهرباء فرنسا (EDF) في تنسيق دراسة متكاملة حول هذه الدورة وجدواها وما سينبعث عنها في مجالات منتظمة وفقاً لمعايير (ASN). بيّنت الدراسة الأخيرة هذه وجود ترابط إجمالي.

<sup>4</sup> يورانيوم من أجل (إعادة) معالجة المخصب.

<sup>5</sup> يُعدُّ البلوتونيوم، بشكلٍ كمي، أكثر الأكتينيدات سمية إشعاعية على المدى الطويل.

5000 طن/سنة). وهكذا، سيتحرك مركز الاهتمام لتنمية الطاقة النووية بشكل كبير باتجاه قارة آسيا. وبذلك فإن مسألة المحاسن التنافسية التاريخية للتكنولوجيا الفرنسية ستكون في وضع حرج جداً. وبشكلٍ موازٍ، يجب العمل بقوة في المحافظة على متطلباتٍ سوية عالية من الأمان عبر مفاعلات الجيل الرابع، وهذا ما يفرض أن تكون فرنسا موجودة في خضم الإنجازات الحقيقية.

ومع الأخذ بعين الاعتبار للوضع السياسي داخل العديد من البلدان، الذي يقود إلى توقيف البرامج النووية أو تخفيضها المدنية إلى مستويات دنيا، تبدو فرنسا حالياً مرجعاً عالمياً في العديد من المجالات النووية: دور سلطة الأمان النووي، ودور في البرلمان، وفي الصناعة، والتكنولوجيا، والبحث العلمي.... الخ، وبشكلٍ خاص فيما يتعلق بمجال المعالجة وإعادة التدوير. الأوراق الراجعة الفرنسية هي إذاً هائلة ومعترف بها عالمياً، ولكن بشرط أن تحافظ فرنسا على هذا التقدم التكنولوجي. فتطوير عملية المعالجة للوقود المستنفد في العالم ستكون بالمحصلة فرصة لفرنسا. وإن إحدى مظاهر المسائل الحالية هي إذاً في المحافظة على هذا المستوى الرفيع، وفي جعل هذه التكنولوجيا تتطور سواء على المستوى الصناعي أو على مستوى الابتكار أو ما يتعلق بقطاعي البحث والتطوير (R&D). وإن استثمار هذه التقانات سيسمح باستخلاص البلوتونيوم من الوقود المستنفد لبدء برامج المفاعلات السريعة من الجيل الرابع. وهنا أيضاً، يُعدّ الوضع الفرنسي مرناً إلى حدٍ كبير، لاسيما أن توافر هذه التكنولوجيا والخبرات المرتبطة بها، سيسمح في الأيام القادمة بالوصول إلى موارد البلوتونيوم الموجودة بشكلٍ خاص في الوقود المستخدم MOX، بغض النظر عن الطاقة الهائلة الكامنة في اليورانيوم المسلوب الخصوية.

### 3. سوق مفاعلات النترونات السريعة من الجيل الرابع المبردة بالصوديوم

تستند السوق المرتبطة بهذه المفاعلات على معايير صناعية مثل التوفير (التنافسية وتخفيض مخاطر التعرض لتأرجحات أسعار اليورانيوم)، وعلى معايير أكثر صرامة كضمان الشراء وإدارة النفايات. ووفقاً للمعيار الأول، فإن سوق هذه المفاعلات يمكن أن تبصر النور بدءاً من منتصف هذا القرن، علماً بأن الكهربائيين يسعون إلى ضمان موارد مستدامة على مدى الحياة لتجهيزاتهم المستخدمة في الإنتاج، ممّا يعطي حسنة أكيدة لمفاعلات RNR (التي لا تستهلك عملياً أي كمية من اليورانيوم الطبيعي)<sup>8</sup>. وفيما

إن الصناعة الفرنسية في معالجة وإعادة تدوير الوقود المستنفد الناتج من مصانع هاغ HAGUE في منطقة كوتنتين COTENTIN ومصانع MELOX الموجهة لتصنيع الوقود MOX، تمتلك تكنولوجيا دقيقة ومتطورة جداً (سواءً على الصعيد البيئي أو الصناعي)، إذ إنها تُعدّ الأهم من حيث الاستطاعة على مستوى العالم، وهذا ما يجعلها قائدة لهذا القطاع. جرى توقيع عقود منذ عشرات السنين مع زبائن يابانيين وألمان وإنكليز وإيطاليين وهولنديين وبلجيكيين وسويسريين وأستراليين، وأيضاً مع الصينيين والأمريكيين، بشكلٍ خاص عبر تصدير الخدمات (معالجة وإعادة تدوير) و/أو عبر عمليات المعالجة، وإعادة التدوير وتصنيع الوقود. وهكذا، فقد قامت المجموعة الدولية لقطاع الطاقات النووية والمتجددة (AREVA) بإنشاء مصنع لتصنيع MOX في مقر شركة AREVA-SHAW في الولايات المتحدة الأمريكية. تهتمّ مجموعة AREVA أيضاً وبشكلٍ كبير جداً فيما يخص إنشاء مصانع المعالجة وإعادة التدوير وأمثلتها في منطقة روكاشو-مورا (ROKKASHO-MURA) في اليابان. وهناك بعض المباحثات الجارية حالياً مع بلدان كالصين من أجل إنشاء مصنع كبير للمعالجة وإعادة التدوير.

أخيراً، وكما أشرنا إليه آنفاً، فإن معرفة وإتقان تكنولوجيا إعادة تدوير الوقود المستنفد سيكونان عنصرين أساسيين لا غنى عنهما إطلاقاً من أجل إدارة مثلى للمواد النووية وتطوير مفاعلات النترونات السريعة. تستند دورة الوقود لمفاعلات النترونات السريعة على إعادة تدوير الوقود المستنفد التي، مع الأخذ بعين الاعتبار لخصائص هذه المفاعلات، يجب أن تسمح بنسبة استخدام شبه مكتملة لليورانيوم. تستطيع هذه التكنولوجيا أيضاً المساهمة بشكلٍ أكبر في تقليص سمية التلوث الإشعاعي الذاتية للنفايات، لأن مفاعلات النترونات السريعة تستطيع، عبر عملية التحويل، تقليص كمية الأكتينيدات المنجمية ذات عمر-النصف الطويل<sup>6</sup> في منتجات النفايات النهائية.

ولهذا، فقد اتخذت الدول التي تنمو حاجاتها الطاقية بشكلٍ قوي، مثل الصين والاتحاد الروسي والهند، خياراً يهدف إلى تنمية الطاقة النووية بشكلٍ واضح. ولأسباب تتعلق بإدارة الموارد وضمان عملية الشراء، فقد ربطوا هذا الخيار بالمعالجة وإعادة التدوير، وربطوه أكثر من ذلك أو أقل على المدى القصير بمفاعلات النترونات السريعة. ومن المحتمل عند آفاق العام 2030، أن يتجاوز التفرغ السنوي للوقود المستنفد في هذه البلدان الكميات العائدة لبلدان أخرى (حوالي 7000 طن/سنة<sup>7</sup> (TML/AN<sup>7</sup>) مقابل حوالي

<sup>6</sup> العناصر الإشعاعية الأكثر سمية على المدى الطويل.

<sup>7</sup> يشير الرمز tML إلى كمية المعادن الثقيلة بالأطنان (سواء اليورانيوم أو الأكتينيدات الأخرى، بشكلٍ أساسي).

<sup>8</sup> يستند هذا التاريخ بشكلٍ خاص على الاكتشافات الجديدة لليورانيوم، وعلى مواقعها، وكلف استثمارها والارتفاع في استطاعة منظومة المفاعلات النووية الدولية. في هذا المضمار، ولمواجهة هذه المعاملات غير المؤكدة، فإن تطوير تكنولوجيا مفاعلات الجيل الرابع يمكن أن تبدو ضماناً إزاء صدمات تقلب الأسعار.

الشعبية بالعناصر الضرورية من أجل اتخاذ القرار بمواصلة إنشاء المفاعل التجريبي ASTRID، الذي سيتمّ وضعه في الاستخدام بحلول العام 2020.

يمثل المفاعل التجريبي ASTRID مشروعاً لمفاعل باستطاعة 600 ميغا واط كهرباء. حيث قامت فرنسا بإنجاز مفاعل تجريبي صغير غير مولد للكهرباء (RAPSODIE)، ومن ثمّ إنجاز أول مفاعل باستطاعة 250 ميغا واط كهرباء مولد للكهرباء مع شركة فينكس PHÉNIX، وأخيراً، تحالفت فرنسا مع شركاء أجانب راغبين في التحول إلى المقياس الصناعي مع شركة سويفر فينكس SUPERPHÉNIX (استطاعة بقيمة 1200 ميغا واط كهرباء).

فيما بعد، وعلى قاعدة العودة إلى خبرات حول المفاعلات المنجزة في الماضي، فقد حصل نقد شديد للمفاهيم، حيث تمّ وضع برنامج للبحث والتطوير، ويجب على المفاعل ASTRID أن يسمح بشكلٍ حقيقيّ باختبار مظاهر الجدة للابتكارات التي نتجت عن برنامج البحث والتطوير المشترك بين مفوضية الطاقة الذرية الفرنسية (CEA) وشركة كهرباء فرنسا (EDF) والمجموعة الدولية لقطاع الطاقات النووية والمتجددة (AREVA).

يُعدّ البرنامج التجريبي ASTRID المرحلة المفتاح التي ستسمح بإنجاز استعراض صناعي لمفاعل من الجيل الرابع، وهنا يجب التذكير بأنه خلال العقود القادمة، ستكون التوترات المناخية والنزاعات الطاقية أكثر حدة. سيقدّم المفاعل ASTRID ضمانات من جهة الأمن والأمان مكافئة على أقلّ تقدير لتلك الموجودة في مفاعلات الجيل الثالث، مع الأخذ بعين الاعتبار للخبرة الراجعة من حادث مفاعل فوكوشيما، وسيظهر تقدماً واضحاً في موضوع الاستثمار الصناعي.

شكّل البرنامج ASTRID من أجل تحقيق المفاعل ASTRID بشكل صريح، ومن أجل إنشاء دارات للتقييم التكنولوجي للصوديوم وتقييم مكونات المفاعل وفقاً للمقياس الأول، بالإضافة إلى إنشاء ورشة تصنيع وقود للقلوب (AFC). وإلى جانب الورشة المُخصّصة لتصنيع القلوب، يجب أيضاً التنبؤ بورشات لازمة تهتمّ بخبرات التحويل التي ستعتمد كلفها ومساحاتها على الخبرات التي سيحافظ عليها بدقة.

يبين الشكل 3 الروزنامة الزمنية لبرنامج المفاعل ASTRID، حيث سيكون الاستحقاق الأول المحدد بقانون 28 حزيران/يونيو 2006 في نهاية العام 2012، وهو الموعد الذي تستطيع عنده القوى الشعبية امتلاك عناصر فنية وموازنات مالية (بشكلٍ خاص فيما يتعلق بالمبلغ وتخطيط الاستثمارات)، من أجل اتخاذ قرار مواصلة الدراسات المتعلقة بإنشاء هذا النمط التجريبي. كما انخرطت

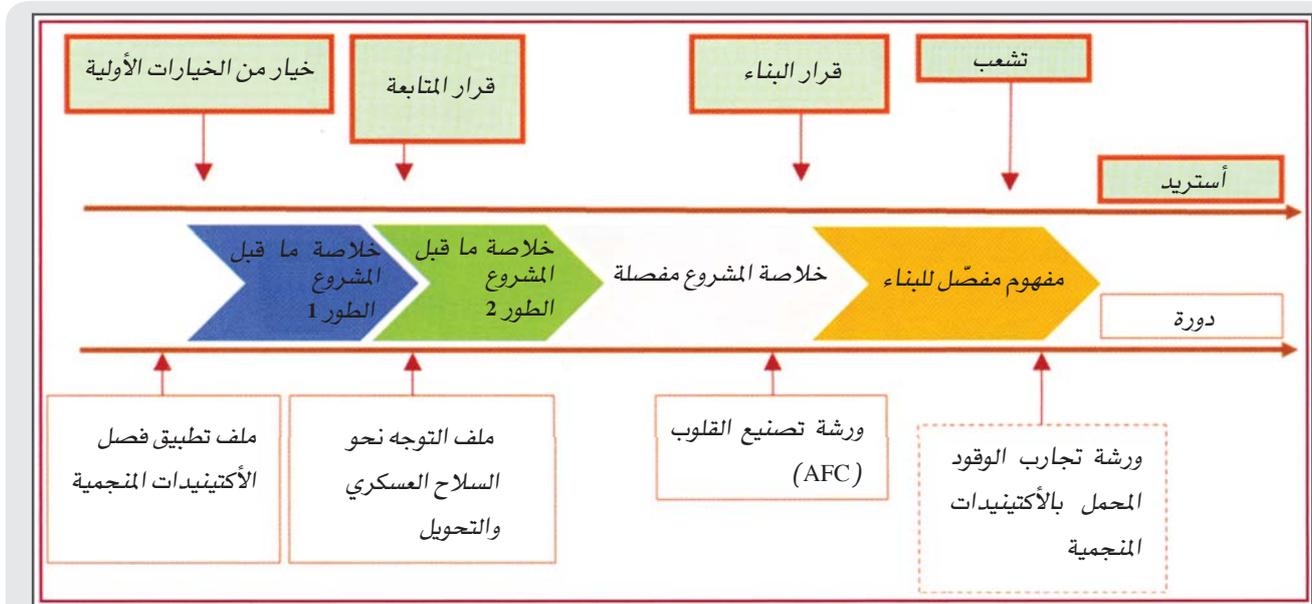
يتعلق بالمعيار الثاني، يمكن للسوق أن تنطلق في فترة أقرب، مع قيادة محددة لدول مثل الصين والهند أو روسيا أيضاً. وهكذا، من الممكن الأخذ بفرضية السوق العالمية لمفاعلات RNR، التي ستري النور قبل حدوث النزاعات حول السوق العالمية لليورانيوم (فرضية «السوق المبكرة»). يمكن لهذه السوق أن تبدأ في العام 2030، بشكلٍ خاص في الصين والهند.

ضمن الطور الأول هذا، حيث ستوضع مفاعلات RNR في الخدمة لأسباب تتعلق بحقوق الملكية دون أن تصل إلى حد المنافسة، يمكن أن نفكر بأن انتشارها سيكون متواضعاً. وفي وقت لاحق، عندما تُقيّم على أنها منافسة اقتصادياً، فإن الطلب عليها سيزداد. يمكن أن يبدأ هذا الطور في منتصف هذا القرن.

ستبدو فرنسا إذاً حليفاً استراتيجياً محبباً لبلدان أخرى صناعية. وستواصل الهند والصين استراتيجيات تعطي مكاناً أكبر لعمليات المعالجة وإعادة التدوير ووصول مفاعلات RNR. وبوضع ذلك في منظور المستقبل (تطوعياً) كما ذكر سابقاً، نشير إلى أن روسيا طلبت إلى فرنسا وبشكلٍ رسمي في نهاية العام 2011 بأن تضع لها قدماً ضمن تعاون متين في هذا المجال، وذلك عبر تقديم مفاعل يمكن أن يكون صناعياً بحلول العام 2030. وبدون الدخول في تفاصيل أكبر، فقد أعلنت الصين عن اهتمام كبير في موضوع مفاعلات RNR ورغبتها في اقتناء مئات عدة من المفاعلات قبل حلول العام 2050، وهناك مفاعلان من طراز BN500 RNR على طريق التفاوض مع روسيا، كما بدأ المفاعل CEFR (المفاعل الصيني التجريبي السريع باستطاعة 20 ميغا واط كهرباء) بإنتاج الكهرباء في العام 2011. وفي الهند، فقد تمّ وضع برنامج نشيط جداً حول مفاعلات RNR-صوديوم. ومن الآن لسنوات عديدة من المتوقع حصول تباين في المفاعل PEBR (مفاعل حثّ سريع تجريبي) باستطاعة 500 ميغا واط كهرباء، الذي سيعقبه وبسرعة سلسلة من 6 مفاعلات CFBR (مفاعل حثّ سريع صناعي) بذات الاستطاعة.

#### 4. البرنامج الجاري وزج مفاعلات الجيل الرابع في المنظومة النووية الفرنسية

إن البحوث التي تقوم بإجرائها مفوضية الطاقة الذرية الفرنسية (CEA) حول هذه الأنماط المعروفة بالجيل الرابع، تستند إلى مفهوميين حول مفاعلات تختلف فيما بينها من حيث الحمولة الحرارية ودرجة الاكتمال: المفاعلات السريعة المُبرّدة بالصوديوم في إطار المشروع التجريبي ASTRID والمفاعلات السريعة المُبرّدة بالغاز. في نهاية العام 2012، وفي مواجهة الاستحقاق المحدد بقانون 28 حزيران/يونيو 2006، تمّ تشكيل الملف الموجه لتعريف القوى



الشكل 3. تحت الشكل: روزنامة البرنامج أستريد Astrid.

-المجموعة الدولية لقطاع الطاقات النووية والمتجددة (AREVA):  
تقوم بتحضير غلايات التسخين، ومنظومات التحكم، والإكسسوارات  
النووية؛

- شركة كهرباء فرنسا (EDF): تقوم بتقديم المساعدة في تقييم  
كفاءة التغطية، واستثمار REX ودراسات الأمان؛

- مؤسسة ALSTOM: تقوم بتنفيذ منظومة تحويل الطاقة ماء-بخار  
وغاز (أزوت)؛

- مؤسسة COMEX النووية: تقوم بتنفيذ عمليات ابتكار منظومات  
الروبوتات الآلية (ROBOTIQUE) والمناولة.

لقد كانت حصيلة النتائج لهذا التعاون الصناعي في نهاية  
العام 2011 إيجابية جداً، إذ إن هناك أكثر من 450 شخصاً  
(من CEA والمؤسسات الصناعية) عملوا ضمن إطار المشروع  
ASTRID. والمبدأ هو إشراك المؤسسات الصناعية في البحث  
والتطوير (R&D) وفي إجراء دراسات مفهوم المفاعل لضمان إفادة  
المؤسسات فيما يتعلق بالمسائل الفنية المطلوبة.

هناك مناقشات جارية مع صناعات أخرى، حيث تمّ بشكلٍ  
عام وضع برامج تعاون دولية مع فنيين يعملون في مجال سلسلة  
مفاعلات RNR المُبرّدة بالصوديوم (روسيا، اليابان، الصين، الهند،  
الولايات المتحدة الأمريكية، وأيضاً السويد والمملكة المتحدة).

كان حادث مفاعل فوكوشيما فرصة جديدة للتذكير بمبادئ  
الأمان على أساس مفهوم مفاعلات RNR المُبرّدة بالصوديوم.  
وهكذا، سيظهر استعراض الأمان لمفاعل ASTRID من جهة أولى

مفوضية الطاقة الذرية الفرنسية (CEA) خلال الفترة 2010-2012  
في تنفيذ الطور الأول لخلاصة ما قبل المشروع المخصّصة لتقييم  
كلفة الاستثمار لهذا الاستحقاق، وتحديد الخيارات الفنية المستجدة  
وتوجهات الأمان. ومن المتوقع القيام بالطور الثاني لخلاصة ما قبل  
المشروع خلال عامي 2013-2014. أما تفاصيل ما قبل المشروع،  
فمن المتوقع القيام بها خلال الفترة 2015-2017، وهي الفترة التي  
سيتمّ بعدها الدخول في طور دراسات التنفيذ والإنشاء الفعلي،  
حيث يجب أن يوضع المفاعل في العمل في أفق العام 2020. عند  
كل مرحلة رئيسية، سيتمّ مراجعة الخيارات الموضوعية بشكلٍ يضمن  
احترام معايير مفاعل الجيل الرابع.

تكون دراسات مفاهيم للطراز ASTRID المتضمنة لتفاصيل طور  
ما قبل المشروع ممولة بموجب برنامج الاستثمارات المستقبلية.  
يغطي هذا البرنامج (بعنوان «طاقة الغد النووية») أيضاً دراسات  
مفهوم ورشة تصنيع قلوب المفاعل التجريبي ASTRID، وتجديد  
عملية التركيب التقني أو تنفيذها من أجل توصيف المكونات  
بالمقياس الأول. وحتى نهاية العام 2017، من المتوقع صرف 650  
مليون يورو (€) تحت عنوان برنامج استثمارات المستقبل حول  
البرنامج ASTRID.

تُحاط مفوضية الطاقة الذرية الفرنسية (CEA) بصناعيين  
يساهمون بدراسات مفهوم الطراز ASTRID عبر مذكرات تعاون  
تلحظ مسبقاً مساهمات رؤوس الأموال للمشاركين. وهكذا، رغم  
احتفاظ مفوضية الطاقة الذرية الفرنسية (CEA) بمسؤولية وضع  
المخططات الهندسية لمجمل المفاعل وقلبه ووقوده، تقوم المؤسسات  
الصناعية الآتية بتنفيذ الدارات التالية:



الشكل 4. حوض مفاعل أستريد Astrid وهندسته المتكاملة (المصدر: مفوضية الطاقة الذرية الفرنسية).

سيجري إدخال الجزء الثاني لمفاعلات RNR باستطاعة 40 غيغا واط كهربائي بدءاً من العام 2080 من خلال استبدال المفاعلات EPR الواصلة إلى نهاية أعمارها. وبدءاً من العام 2100، ستكون كامل منظومة المفاعلات النووية المنتجة للكهرباء قائمة حصرًا على مفاعلات RNR.

تبدأ السيناريوهات كافة في العام 2005 وتمتد فترة دراستها حتى العام 2050، وهو التاريخ الذي يجب أن تصبح عنده المنظومة دائمة في الحالات كافة. يكون استخراج الكميات البدائية للمواد ناجماً من المخزون الوطني للنفايات المشعة ومن المواد القابلة للتقييم التي توفرها مؤسسة ANDRA.

وتبعاً لخصائص مفاعلات الجيل الرابع، ستسمح عملية انتشار هذا الجيل بـ:

- التقليل التدريجي من عمليات استيراد اليورانيوم حتى تصبح معدومة كلياً؛
- التقليل ربما من السمية الإشعاعية الطويلة الأمد لرزم النفايات.

#### 5. هل بالإمكان تسريع انتشار مفاعلات الجيل الرابع في فرنسا؟

ضمن إطار مأمورية «طاقات 2050»، ورد في رسالة الوزارة المُصدرة للمأمورية تساؤلاً في دفتر شروط النفقات حول إمكانية تقريب موعد استحقاق تشغيل المفاعلات الأولى من الجيل الرابع في فرنسا. وهذا ما تمّت دراسته من قبل مفوضية الطاقة الذرية الفرنسية (CEA) عبر سيناريو ستكون بموجبه مفاعلات الجيل الرابع منتشرة قبل حلول العام 2040 (فجرى تحديد العام 2035).

أن المخطط الهندسي يمثل جزءاً لا يتجزأ من الهندسة المتكاملة للمفاعل (انظر الشكل 4) من أجل ضمان التحكم في كل لحظة بمخزون الصوديوم اللازم لتبريد المفاعل (وهذا ما أصبح ممكناً عبر تركيب حوض مضاعف، باعتبار أن الدارة البدائية ليست مضغوطة، ولعدم وجود دارات أولية)، ومن جهة ثانية، فإن خصائص الصوديوم تسمح بمفهوم منظومات تخلية للاستطاعة المتبقية، مباشرة أو غير مباشرة، المتنوعة (يمكن بشكل خاص استخدام الغلاف الجوي كمصدر بارد): نصوب هنا على التخلص الفعلي من فقد منظومة التفريغ للاستطاعة المتبقية.

يصوب المشروع الجاري على إمكانية السماح بانتشار هذه المفاعلات بدءاً من العام 2040، فيما لم تستدع الحاجة إلى الابتعاد عن هذا التاريخ. في هذه الحالة، ستبقى مفاعلات RNR في حالة تعايش خلال فترة 15 عاماً مع مفاعلات الماء، وتقود الأفكار القائمة حالياً إلى البحث عن أنظمة توافق بين منظومتي مفاعلات RNR و REP. سندرس فيما بعد حالة انطلاق أكثر تبكيراً.

تفيد السيناريوهات المدروسة في تقييم الحلول المختلفة لإدارة النفايات، وهو ما يسمح بتكوين رؤية شاملة لمجمل مكونات المنظومة (وقود، مفاعلات، مصانع تدوير، تخزين) بدءاً من الوضع القائم حالياً وحتى حالات التوازن، التي يمكن في بعض المرات أن تحصل بشكل نسبي في أوقات أبعد. تسمح هذه الدراسات في تقدير «الكفاءات» لمختلف حلول التحويل المعتمدة، وكما أنها تسمح في إيجاد توضيحات حول الفترات الانتقالية بهدف تقييم حقيقة انتشار الخيارات المأمولة وفي توضيح الصعوبات المحتملة على سبيل المثال فيما يتعلق بتوافر المواد، وإمكانات عمليات إعادة التدوير أو التراكم للمواد المودعة.

لا تبحث هذه السيناريوهات في التعبير عن حقيقة صناعية محدّدة وفرضياتها هي بالضرورة قابلة للنقاش. وتشترك هذه السيناريوهات في اعتبار أن إعادة تجديد المنظومة الحالية من المفاعلات النووية ستسعى للوصول إلى استطاعة ثابتة مقدارها (60 غيغا واط كهرباء) بهدف إنتاج 430 تربيون واط ساعي كهربائي/سنة. ففي السيناريو الأساس، من المتوقع نشر مفاعلات تعتمد على المياه من النمط EPR باستطاعة 40 غيغا واط ساعي خلال الفترة 2020-2040 ومن ثمّ مفاعلات نترونات سريعة باستطاعة 20 غيغا واط ساعي خلال الفترة 2040-2050. يتوافق العام 2040 مع الفرضية المقبولة بشكل عام من أجل استكمال سلسلة المفاعلات RNR ويتناغم مع تاريخ الاستحقاقات الكبرى لإعادة تجديد المنظومة الكهرونووية ومصانع تدوير الوقود.

- فيما يتعلق ببنية المنظومة النووية، ستكون النتيجة الأساسية للدراسة هي أن الإسراع بزمن قدره 5 سنوات سيسمح، بالمقارنة مع السيناريو الأساس، بامتلاك منظومة نووية أكثر أهمية تقوم على مفاعلات RNR في منتصف القرن الحالي (حوالي 50% من مفاعلات المنظومة بدلاً من الثلث)، وهذا ما سيخفض بالتالي استهلاك اليورانيوم الطبيعي، باعتبار أن هذه المفاعلات لا تستهلك اليورانيوم الطبيعي أو تكاد لا تستهلك منه إلا كمية قليلة جداً. في

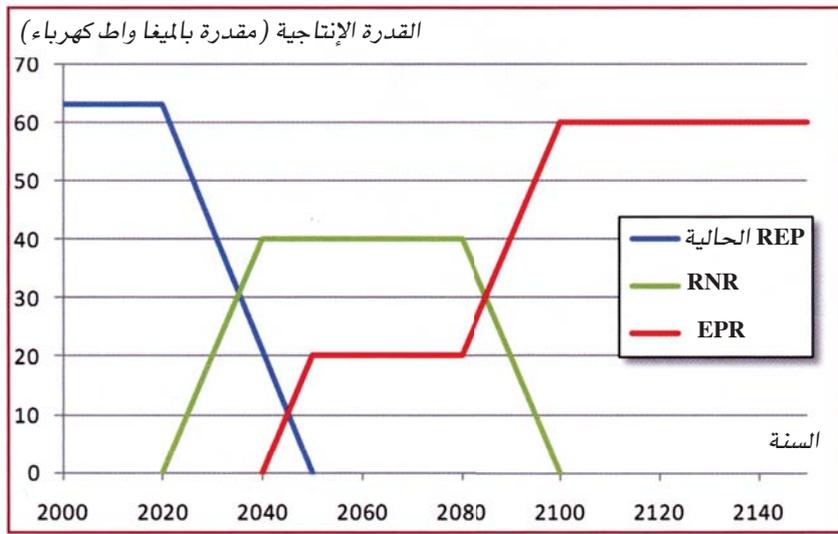
تهدف الخطة إلى إحداث تنوع في هامش سيناريو (السيناريو الأساس المبين آنفاً) يفترض توفر استطاعة نووية ثابتة، وذلك بإنشاء مفاعلات سريعة تمثل ثلث مفاعلات المنظومة النووية في أفاق العام 2050. يبين الشكل 6 هذا السيناريو بالمقارنة مع سيناريو الشكل 5.

إن هذا التاريخ المحدد للعام 2035 لن يكون ممكناً إلا عبر بذل جهد كبير جداً<sup>9</sup>. يجب في الحقيقة التذكير بأن الإسراع بوضع

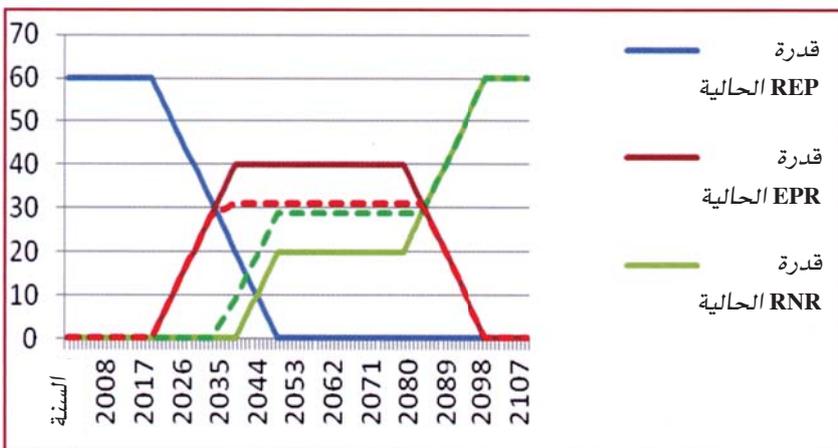
هذه المفاعلات موضع التشغيل (الخدمة) سيتطلب الإسراع والتكثيف الشديدين جداً في برامج البحوث والتطوير مع وجود محدودية في زمن اكتساب الخبرة الراجعة. إن الوصول إلى هدف كهذا سيفترض بكل تأكيد وجود صعوبات مهمة، في سياق ضغط شديد حول موضوعي الأمان والاقتصاد.

بشكل آخر، إن سيناريو كهذا لن يكون ممكناً إلا إذا كانت فرنسا تمتلك صناعة إعادة تدوير للوقود المستخدم وصناعة الوقود النووي MOX بشكل ديناميكي، وامتلاك قدرات متكيفة لتشغيل هذه المفاعلات في الوقت المطلوب. كما لن يكون ذلك ممكناً أيضاً إلا إذا كان هناك انخراط على الأمد الطويل في استراتيجية طاقة تركز حيزاً مهماً لطاقة نووية غير محققة بعد: بشكل خاص في حالة حدوث تراجع ملموس في استطاعة مفاعلات المنظومة النووية، وبالتالي لن يكون لهذا السيناريو سوى احتمال ضعيف، وسيكون من الوجهة الفنية صعب التحقق. فمن الواجب عندها توقع بناء بضعة مفاعلات RNR، وليس برنامجاً كاملاً.

وستكون العواقب الأساسية لسيناريو كهذا كما يلي (مرتبةً تبعاً للأهمية):



الشكل 5. استطاعة إنتاجية وفقاً لنمط المفاعل (مقدرة بالميغا واط كهرباء) ضمن سيناريوهات تجديد منظومة المفاعلات النووية الحالية بالمفاعلات السريعة RNR بدءاً من العام 2040 (سيناريو باستطاعة نووية كلية ثابتة) (المصدر: مفوضية الطاقة الذرية الفرنسية).



الشكل 6. استطاعة إنتاجية للمفاعلات السريعة RNR (مقدرة بالميغا واط كهرباء) الجاهزة بدءاً من العام 2035؛ تمثل المنحنيات التقطعية المنظومات في الحالة التي ستكون فيها جاهزية المفاعلات السريعة RNR فعلية في العام 2035.

<sup>9</sup> سنعود فيما بعد للمقيدات التي تفرضها.

- وفيما يخصّ النفايات النهائية، سيسمح مثل هذا السيناريو بعدم إنتاج نفايات مزججة حاوية على الأكتينيدات المنجمية (أكثر الفلزات تلويثاً على المدى الطويل) بدءاً من وضع المصنع الجديد في منطقة هاغ HAGUE، مضافاً إليه تأخر متغير للحصول على عدد كافٍ من مفاعلات RNR اللازمة لترميم الأكتينيدات. وفي أقل تقدير، فإن هذا ينطبق على النفايات الموجودة ضمن الوقود المستخدم لتشغيل مفاعلات RNR. وفي الحالات كافة، سيسمح سيناريو كهذا بكسب ما يقارب 5 سنوات من «سبِق» المفاعلات فيما يتعلق بإدارة عملية التدوير في جزئها النهائي.

- وبعبارة تتعلق بمخزون البلوتونيوم، فإن مخزون البلوتونيوم المنفصل سيزداد (وسيتّم تحويله لتغذية المفاعلات السريعة). سيتطلب تسريع انتشار مفاعلات الجيل الرابع جهداً كبيراً جداً.

يتوافق هذا السيناريو الجديد المصمّم من أجل مأمورية «طاقات 2050» إذاً مع حالة مرغوبة جداً بوضع المفاعل الأول RNR في الخدمة في العام 2035. مع ذلك تجدر الإشارة إلى أن الإسراع بوضع هذه المفاعلات موضع التشغيل (الخدمة) يتطلب المزيد من الإسراع ببرامج البحوث والتطوير وتكثيفها مع محدودية في الزمن لاكتساب الخبرة الراجعة. ومن أجل حصول ذلك خلال فترة زمنية صغرى للخبرة الراجعة حول استثمار النموذج التجريبي AS-TRID (تبدو مدة 5 سنوات فترة صغرى)، سيفترض أن إنشاء هذا المفاعل إلى جانب المفاعل الصناعي الأول البدائي يجب أن يتحقّق في غضون مدة تقل عن 6 سنوات<sup>11</sup>، بحيث تجري استعراضات الأمان سريعاً ويتحقّق بناء الأمان ضمن فترات مقيدة وبنجاح<sup>12</sup>، سواء فيما يتعلق بالنمط التجريبي ASTRID، أو المفاعل الصناعي الأول، أو المنشآت المطلوبة لدورة الوقود الخاصة بمفاعلات RNR ويتمّ بناؤها جميعاً ووضعها في الخدمة في فترات زمنية مترابطة، وكذلك جمع كل ذلك مع عمليات التمويل المطلوبة.

لا يمكن إذاً أخذ التاريخ 2035 بصفته هدفاً افتراضياً - غير مضمون - ولا يمكن الوصول إليه إلا عبر بذل جهدٍ مهم جداً بدءاً من الآن. سيصطدم الوصول إلى هذا الهدف بكل تأكيد بعقبات جمّة، في سياق ضغطٍ شديدٍ حول موضوع الأمان والوفرة الاقتصادية.

الحقيقية، إن التوافر المبكر لتكنولوجيا المفاعلات السريعة سيسمح بزيادة مساهمة هذه المفاعلات في منظومة المفاعلات النووية. وفي الحقيقة لن يكون إنشاء مفاعلات جديدة من الطراز RNR منظماً بشكلٍ ملموس إلا إذا ظهرت الحاجة لهذه الاستطاعة. يُعدّ تاريخ النضوج الصناعي لهذه التكنولوجيا عاملاً مهماً: بقدر ما يكون هذا التاريخ متأخراً بقدر ما يكون العدد المتبقي من مفاعلات REP الحالية المطلوب تنسيقها أقل، وبالتالي ستكون إمكانية التبدّل عبر تركيب مفاعلات RNR أكثر ضعفاً؛

- وبعبارة اقتصادية، إن الزيادة في النفقات لسببٍ كهذا قد تمّ تقديرها بالمقارنة مع السيناريو الأساس المبيّن آنفاً، مع وصول المفاعل الأول السريع المبرّد بالصوديوم في العام 2040. إن هذه الزيادة في النفقات يمكن أن تكون من مرتبة مليار يورو في السنة لفترة تمتد 15 عاماً كفترة صعود في استطاعة منظومة المفاعلات RNR، بالمقارنة مع السيناريو الأساس<sup>10</sup>. وفيما بعد هذا التاريخ، سيفرض هذا السيناريو بشكلٍ تلقائي كلفة مكافئة، باعتبار أن الفرضية بهذه التواريخ (ما بعد العام 2050) هي أن السعر العالمي لليورانيوم سيرتفع بشكلٍ تكون معه كلف إنتاج المفاعلات العاملة على الماء والمفاعلات RNR السريعة متقاربة فيما بينها؛

- سيكون لهذا السيناريو حسنة تسريع إمكانات توافر بعض الخصائص المرغوب بها في مفاعلات RNR، أي إنها تساعد في:

● تقليص استيراد اليورانيوم الطبيعي (سيكون الربح الكلي من مرتبة 55 ألف طن خلال فترة استثمار المفاعلات، أي ما يقارب 7 سنوات من استهلاك المنظومة الحالية من المفاعلات)؛

● إدارة البلوتونيوم (يمكن تعديل المخزون إلى المستوى المطلوب، وذلك حتى في ظل سيناريو خروج تدريجي من الطاقة النووية).

- وبعبارة تتعلق بالانفتاح نحو الأسواق الخارجية، سيكون توافر مفاعل صناعي من طراز RNR، إذا ما تطورت هذه الأسواق خلال العقدين القادمين، هو أيضاً حسنة مهمة لوضع التكنولوجيا الوطنية (ربط الحالة القابلة للتطبيق مع شريك أجنبي) في موضع القيادة على المستوى العالمي؛

<sup>10</sup> سيبقى هذا الرقم خاضعاً للتأكيد من خلال دراسة كاملة.

<sup>11</sup> يفترض أن تستغرق مدة الإنشاء للمفاعل الأول EPR في منطقة فلامان فيل FLAMAN VILLE عشر سنوات.

<sup>12</sup> الأخذ بعين الاعتبار لمتطلبات الأمان التي كانت بشكلٍ خاص جديدة من أجل هذه المفاعلات ذات الأجيال المطورة.

هاغ HAGUE وميلوكس MELOX، وأيضاً بفضل أعمال البحث والتطوير وصناعتها التطويرية (الابتكار) والبناء والاستثمار. تتطور هذه المنشآت بشكلٍ طردي وتتعمق في منحٍ عديدة: تقليص حجوم النفايات والمنتجات النهائية، وابتكار تقانات جديدة في مزج النفايات مع الزجاج، ومواكبة ارتفاع معدلات احتراق الوقود. يشكل هذا السبق التقني وسيلة أساسية للنمو بما يسمح لفرنسا بمواصلة أداء دورٍ مهمٍّ على المستوى الأول في مجال الطاقة النووية في المستقبل. من هنا، وإلى جانب الجهود اللازمة والمهمة الواجب القيام بها من أجل تطوير المفاعلات، كابتكار مفاعل الجيل الرابع ASTRID، لا يزال هناك عمل استراتيجي لا بد من مواصلته في مجال دورة الوقود.

وفي أقل التقديرات، توافق هذه الدراسة الروزنامة الزمنية للبرنامج الحالي، المحدد بشكلٍ معقول، وتوافق تاريخ الوضع في الخدمة لمفاعل صناعي من الجيل الرابع في العام 2040 وفقاً للسيناريو «الأساس»، إلا إذا بينت الحاجة غير ذلك.

## 6. الاستنتاج

يقود الاستخدام العقلاني لموارد اليورانيوم، وإعادة تدوير البلوتونيوم، وبشكلٍ عام أمثلة دورة المواد النووية إلى تداخل صارم بين عمليات المعالجة وإعادة التدوير ومفاعلات النترونات السريعة من الجيل الرابع. ولهذا السبب، فقد قام المنتدى الدولي لمفاعلات الجيل الرابع (GIF) بمعالجة أنظمة مفاعلات الجيل الرابع بقصد التأكيد على تكاملية دورة الوقود والمفاعلات، اللذين، بموجبهما فقط، يمكن ضمان الاستدامة المطلوبة للطاقة النووية.

تسمح عملية المعالجة بانطلاق مفاعلات RNR وبالذرة المرتبطة بهذه المفاعلات. ومع أن بعضها يمكن تشغيلها باستخدام اليورانيوم المُخصَّب، سيبقى هذا استثناءً مكلفاً. ستتطلب فترة التعايش الطويل بين مفاعلات REL وRNR في المستقبل النووي مرونة يمكن ضمان جزء منها عبر التفكير بعناية بحيث تتم عملية معالجة وقود مفاعلات REL ووقود مفاعلات RNR في ذات الوقت أو بالتتالي.

رأينا أخيراً كيف أن عملية المعالجة ستسمح بالإسراع على المنحى المتعلق بالتحويل وتحسين إدارة النفايات. وفيما لو أن خيار التحويل قد اتخذ على المستوى الصناعي، فإن معالجة متقدمة ستؤدي دوراً مفيداً وستسمح بسحب جزء من الحسنة الكامنة لمفاعلات RNR وقدراتها في ترميد أو حرق العناصر الأكثر تلويثاً في الوقود المستهلك.

يبدو إذاً وبشكلٍ واضحٍ جداً أنه أمام مستقبل مجهول، فإن توافر تقانات للمعالجة وإعادة التدوير ستعطي مرونة وتسمح بتأقلمات مهمة.

من هنا، فإن امتلاك تقانات للمعالجة يُعدّ وسيلة أساسية، ليس من أجل التحضير للوصول إلى مفاعلات الجيل الرابع فحسب، بل أيضاً من أجل إدارة أفضل لمنظومات ستكون مؤلفة خلال عقود عدة، سواء من مفاعلات RNR ومفاعلات REL أيضاً.

تتمتع فرنسا حالياً بموقع قيادي على المستوى العالمي فيما يتعلق بالمعالجة وإعادة التدوير، وذلك بفضل منشآتها في منطقة

جان-غي دوفيزو دولافيرن، فرانسوا غوشيه، جيل ماتونييه: مفوضية الطاقة الذرية الفرنسية/قسم الطاقة النووية (CEA/DEN).

نُشر هذا المقال في RGN، ترجمة د. زهير قطان. عضو هيئة التحرير.

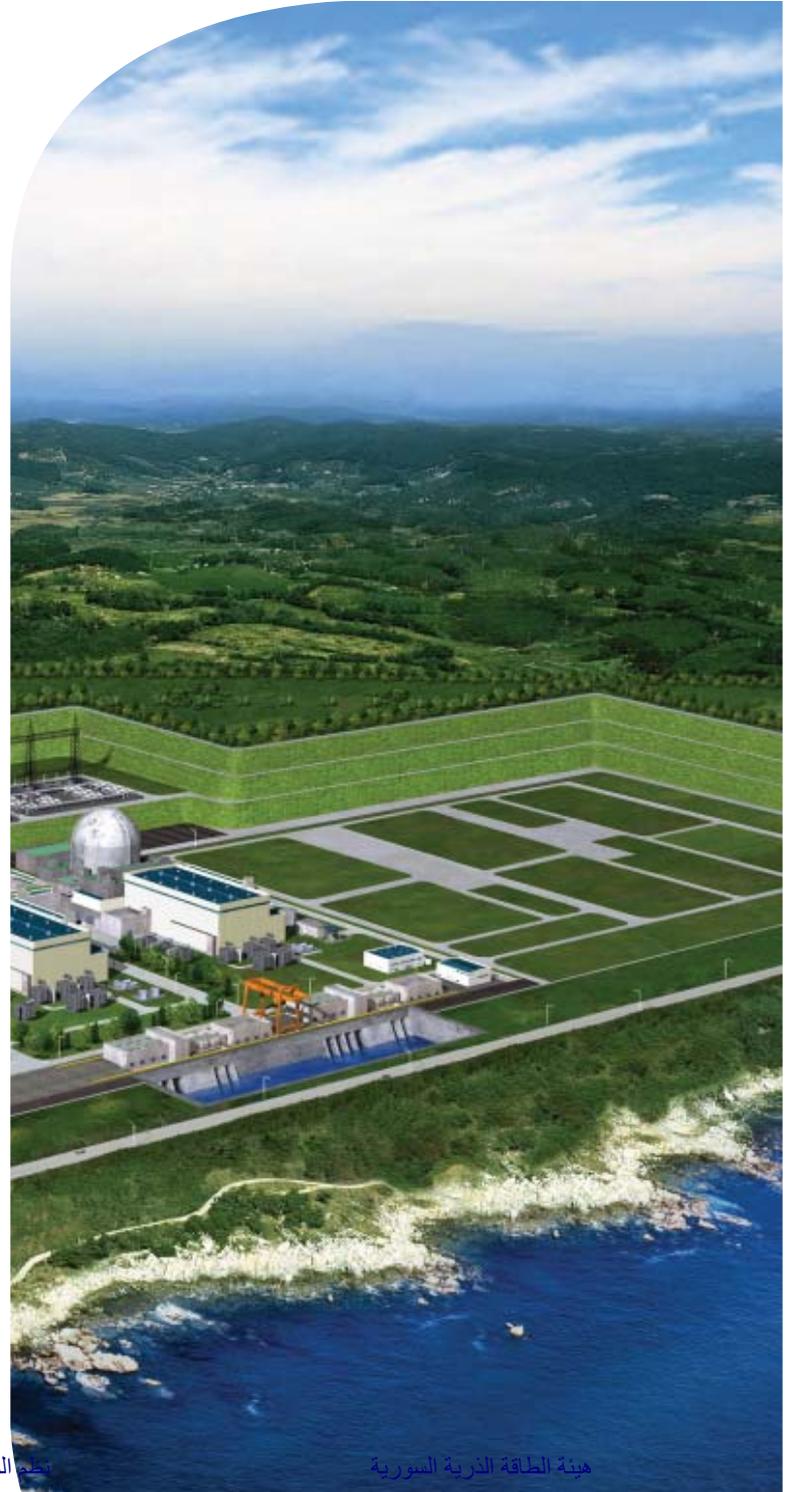
# الحلول الرئيسية للتصميم والتنظيم

## ملخص

إن هدف هذه الورقة هو تطوير مشروع تقديمي نموذجي ذي معطيات مثل لمفاعلات الجيل الثالث المعتمدة على تكنولوجيا مفاعلات الطاقة المبردة والمهدأة بالماء-VVER وذلك بإنشاء المفاعل VVER-TOI. إن التكنولوجيا المستخدمة في هذا المشروع تجمع عدداً من الثوابت الرئيسية الهادفة إلى استعمال المعلومات والتقنيات الحديثة للإدارة. كما وُجِّه المشروع VVER-TOI لتوفير القدرة التنافسية لتكنولوجيا المفاعلات الروسية من النوع VVER في السوق الدولية، وبناء المزيد من محطات الطاقة النووية التسلسلية المعتمدة على المشروع VVER-TOI سواء في روسيا أم خارجها.

الكلمات المفتاحية: مفاعل، استمثال، حلول، مشروع محطة الطاقة النووية، حوادث تصميمية وفوق تصميمية، أمان.

**Key World:** VVER-TOI, the reactor VVER-TOI, optimization, solutions, project of NPP, design and beyond design accident, safety.



الأخذ بعين الاعتبار ديناميكية تطوير السوق العالمية في السنوات 5-7 القادمة، أهم هذه الخصائص: الأمان الكلي والتكلفة، ومدة البناء، والتصاميم النموذجية والتسلسلية، واستخدام التقانة الحديثة للمعلومات. فُرنز 24 معياراً من المعايير ذات القدرة التنافسية، والتي تتحدد على أساسها المتطلبات الأساسية الفنية والاقتصادية لإنشاء المشروع النموذجي للمحطة النووية.

في إطار تنفيذ المشروع VVER-TOI من أجل تحقيق المتطلبات التقنية والاقتصادية، التي تسمح بخلق منتج تنافسي في السوق الخارجية، أُجريت أمتلّة واسعة للحلول التصميمية لـ NPPs المرجعية في جميع المجالات التالية:

#### ● المخطط العام والنقل؛

#### ● الحلول التكنولوجية للمباني والمنشآت الرئيسية لـ NPP؛

● مفهوم أمان NPP مع الأخذ بعين الاعتبار تجربة الحوادث في محطة فوكوشيما؛

#### ● الحلول التخطيطية (التنظيمية) للبناء والإعمار؛

● الحلول الكهربائية والنظام المؤتمت للتحكم بالعمليات التكنولوجية.

سمحت المؤشرات التقنية والاقتصادية، المستمدة من العمل ثلاث سنوات على المشروع VVER-TOI، بالتحدث بثقة عن الحاجة المستقبلية للمشروع سواء في السوق الداخلية أو الخارجية (كما هو مبين في الجدول التالي).

نفذت الحلول التنظيمية للمخطط العام للمشروع VVER-TOI بناءً على المخطط التقليدي لتوزيع المباني والمنشآت الرئيسية لمحطة الطاقة النووية، ولكن مع إدخال نهج جديد في تنظيم المباني الملحقة، ووسائل الاتصال التقنية ومعدات النقل، التي سمحت بتخفيض مساحة منطقة العمل إلى 23%، والحد من محيط الحماية المادية بمقدار 26%، وطول الأنفاق التكنولوجية بنسبة

كانت المهمة الكلية الموكلة للمشروع النموذجي لمفاعل الطاقة المبرّد والمهدّد بالماء ذي المعطيات المثلى (Water- VVER-TOI Typical Optimized Informatized)، هي تصميم مشروع نموذجي لوحدة توليد الطاقة باستطاعة عالية ذي قدرة على التنافس مع الدول القيادية النامية والمعترف بها في مجال الطاقة النووية، فيما يتعلق بالحلول التقنية واستخدام التكنولوجيات (التقانات) الحديثة للمعلومات. من أجل حلّ المسألة المعطاة، جرى تنفيذ الكثير من الأعمال المهمة، ويمكن أن نقول في هذه اللحظة: إن المهمة قد أنجزت، والمشروع قد اكتمل.

تمثلت الشروط الأولية الرئيسية في إنشاء المشروع VVER-TOI بالمشاكل الاستراتيجية التالية، الموجودة تاريخياً في الصناعة لعام 2009:

1- غياب المشروع التسلسلي النموذجي لمحطة الطاقة النووية (NPP)، الملبي للمتطلبات التنافسية الحديثة للسوق العالمية. أُعدّ آخر مشروع تسلسلي نموذجي في عام 1980 (نُفذ في تسع محطات نووية متعددة الوحدات في روسيا وخارجها- زابوروج، بالاكوف، روستوف، كالينين، تيميلين في جمهورية التشيك، وغيرها).

تُعد المشاريع الحديثة لمحطات الطاقة النووية (NPP)، المصمّمة في روسيا على مدى 15 سنة الماضية (محطة بوشهر، محطة كودانكولام، محطة نوفوفورونيج الثانية، محطة لينيفراد الثانية، محطة تيانفان) فريدة من نوعها (ليست نموذجية)- ووفقاً لتكلفتها العالية وأزمنة الخدمة الطويلة للمعدات، فإن هذه المحطات ذات معايير الأمان العالية تحظى برضاء المجتمع العالمي واعترافه، ولكنها من جهة ثانية تفتقد إلى المنافسة في مجال استعمال وسائط التصميم الحديثة وإدارة البيانات.

2- غياب الخبرة في تعزيز الموارد البشرية للصناعة من أجل تنفيذ مشروع واحد

حُدّدت، لنا وللخبراء الأجانب معاً، قائمة من الخصائص النوعية والكمية، التي يمكن أن تضمن قدرة المشروع على التنافس، مع

## جدول المواصفات التقنية والاقتصادية للمشروع VVER-TOI

المؤشرات التقنية والاقتصادية	القيمة
مدة الخدمة: لوحدة توليد الطاقة ومنشأة المفاعل، سنة	60
استطاعة وحدة توليد الطاقة، ميغا واط: ● الكهربائية (الكلية وعند الأداء الآمن) ● الحرارية	1255 3300
المردود الحراري الكلي لوحدة توليد الطاقة عند الشروط السنوية الوسطية، %	38
معامل الاستفادة من المحطة (عند دورة وقود 18 شهراً)، %	93
المجال المتاح لتغيير الاستطاعة (ريجيم المناورة)، %	100-50-100
شدة الهزة الأرضية التصميمية على المقياس MSK-64، درجة	7
شدة الهزة الأرضية الأعظمية المحسوبة على المقياس MSK-64، درجة: ● التصميم الأساسي ● استجابة البنى والمجموعات للأمان (حسب الطلب)	8 9 (حتى 0.41g)
سقوط طائرة: ● الحادثة الأولية التصميمية، طن ● الحادثة الأولية فوق التصميمية، طن	20 400
الزمن اللازم لتأمين العمل الذاتي للمحطة في حالة الحوادث فوق التصميمية، ساعة	72
منطقة تنظيم تدابير الإخلاء الإجباري للسكان، كيلومتر	لا تزيد عن 0.8
المنطقة التي لا يتطلب إدخال معايير الوقاية للسكان خارج حدودها عند الحوادث الكبيرة، كيلومتر	3
كمية النفايات المشعة الصلبة، المتشكلة عند استثمار المحطة النووية والمقسمة إلى مجموعات بحسب نشاطيتها (من أجل الوحدة الأولى)، طن	44.5
مصروف الطاقة الكهربائية على الحاجات الخاصة، %	6.47
العدد النوعي لعمال الإنتاج الصناعي، فرد/ميغاواط	0.37
المساحة النوعية للأراضي المشغولة على المخطط العام (من أجل وحدتين من الطاقة بدون حساب دوران مياه التغذية وأنظمة تسليم الطاقة)، مترمربع/ميغاواط	200
مدة البناء بدءاً من الخرسانة الأولى حتى الإقلاع الفيزيائي (من أجل الوحدة التسلسلية)، شهر	40
العنفة	منخفضة السرعة
بناء المفاعل: ● تخفيض عدد قضبان المعايير لنظام التحكم والحماية ● إدخال مضخات تدوير أساسية حديثة ● إدخال نوع جديد من فولاذ الهيكل ● استخدام نظام المعالجة الكيميائية لمياه الدارة الأولى (معالجة البوتاسيوم والهيدروجين).	خفضت من 121 حتى 94 نفذت نفذت نفذت
أنظمة الأمان	في المشروع الأساسي نفذت التجربة مع التوافق الأمثل لقنوات الأمان الفعلية والسلبية

40%، والمساحة الداخلية للطرق المعبدة بـ 12% (الشكل 1).



الشكل 1. المظهر العام لمحطة طاقة نووية بوحدين من النوع VVER-TOI

تحققت المساهمة الرئيسية في إنجاز تلك النتائج، بواسطة الحلول التالية المستخدمة في تنظيم المخطط العام:

- استثناء السكك الحديدية المستخدمة لتسليم الحمولات إلى بوابة بناء المفاعل؛
- إزالة محطة السكك الحديدية من منطقة توضع المباني والمنشآت الرئيسية؛
- وضع كلٍّ من المنشآت ذات الخطورة الانفجارية المحتملة

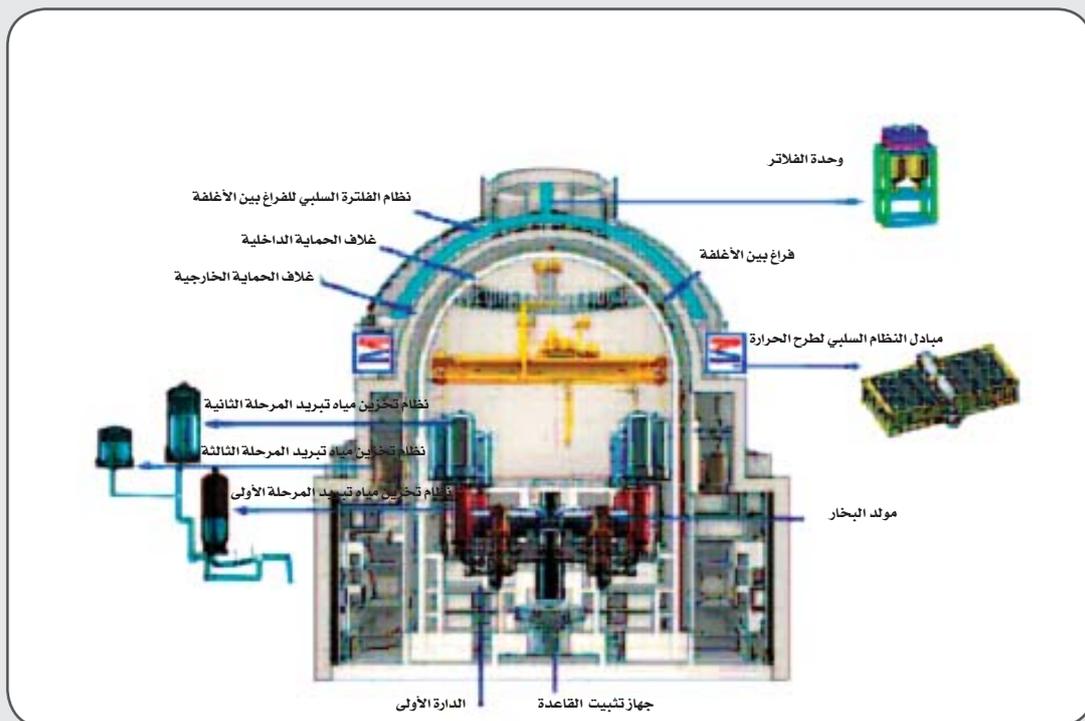
ومجموعة منشآت تسليم القدرة الكهربائية خلف السياج؛

- استبدال خطوط الاتصال المرنة 500 كيلوفولط بسلسلة من الأسلاك المعزولة؛
- دمج محطات التخلص من مياه الصرف الصحي مع مبنى وحدة إزالة الملوحة.

في النموذج الأساسي تبلغ مساحة المنطقة الصناعية 598000 متر مربع مع الأخذ بالحسبان منشآت دوران مياه التغذية.

يُصرف الاهتمام الخاص في تنفيذ المشروع VVER-TOI على زيادة أمان وحدة توليد الطاقة. وقد تحققت في هذا المشروع مجموعة متكاملة من الحلول التقنية، التي تسمح بتوفير أمان المحطة النووية واستبعاد الانبعاثات فوق المعيارية من المواد المشعة إلى الوسط المحيط، الناتجة من التأثيرات الخارجية (طبيعية وتقنية) مع الأخذ بعين الاعتبار الحوادث الأولية الداخلية والتوقفات الإضافية.

بُني مفهوم ضمان أمان المحطة على أسس تطبيق أنظمتها، ذات مبادئ العمل المختلفة: فاعلة (active) ومنفعلة (passive). في هذه الحالة يمكن توفير جميع وظائف الأمان عن طريق العمل المستقل لأنظمتها الفاعلة والمنفعلة (الشكل 2).



الشكل 2. استخدام نظام التبريد السليبي والتدريج المضاعف (ثنائي الأغلفة) في المشروع VVER-TOI

9 درجات على المقياس MSK-64 عند تسارع أفقي أعظمي على السطح الخالي للأرض مقداره 0.41g.

عند توضع NPP من النوع VVER-TOI في المناطق ذات المستوى العالي لنشاط الزلازل، سيجري تنفيذ دراسة نهائية حول تأثيرات الزلازل مع الأخذ بعين الاعتبار الشروط الزلزالية والجيولوجية الموجودة (الشكل 3).

وفقاً لنتائج التحليل الديناميكي، أُجري فحص استقرار المباني والمنشآت على مستوى الدرجة الأولى للانقلاب، والذي يُعدُّ أحد أهم المؤشرات الرئيسية لكفائها.

بيّن الفحص، أن تأمين مقاومة انقلاب مع احتياطٍ كافٍ قد أنجز. وعلى وجه الخصوص، وجد أن معامل الاحتياط في مبنى المفاعل UJA مساوياً لـ  $K=1.58$  أما في المبنى الملحق للمفاعل UKC فكان هذا العامل مساوياً لـ  $K=1.44$ . وهذا أعلى بكثير من معامل الوثوقية النظامي  $n=1.25$ .

أظهر فحص التركيبات المستقلة لبناء المفاعل (جدران، وأسقف، وألواح الأساس)، والمباني الأخرى والمنشآت المصنفة من الفئة

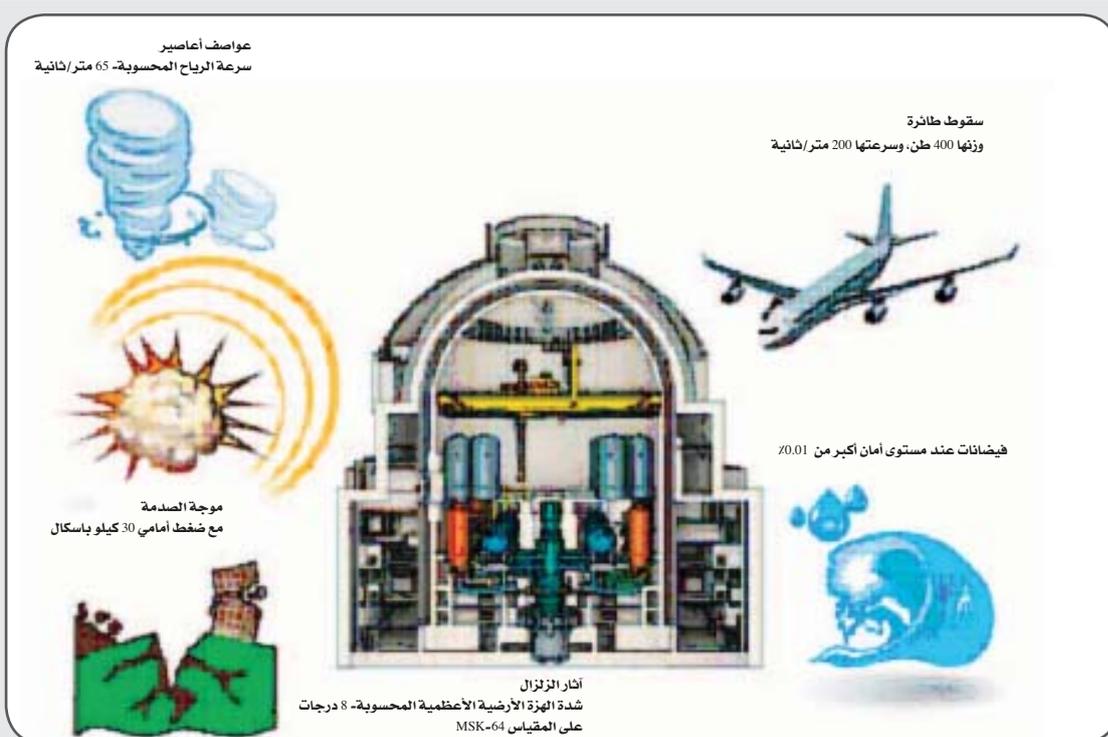
وضعت البنى الإنشائية للمباني والمرافق، وكذلك المعدات وخطوط الأنابيب التقنية، ووسائل الاتصال الأخرى وبنية NPP من النوع VVER-TOI، انطلاقاً من التصاميم الأساسية التالية لآثار الزلازل:

● الهزة الأرضية الأعظمية المحسوبة - شدتها 8 درجات على المقياس MSK-64 عند تسارع أفقي أعظمي على السطح الخالي للأرض مقداره 0.25g (g هو تسارع الثقالة الأرضية)؛

● الهزة الأرضية التصميمية - شدتها 7 درجات على المقياس MSK-64 عند تسارع أفقي أعظمي على السطح الخالي للأرض مقداره 0.12g؛

● هزة أرضية تزيد على الهزة الأرضية الأعظمية المحسوبة بـ 40% عن قيمة التسارع الأفقي الأعظمي على السطح الخالي للأرض (نُفذ هذا الإجراء مع استخدام تقريبات واقعية).

بهدف توفير إمكانية توضع المحطة في مواقع تتمتع (بالمقارنة مع مما سبق) ببارامترات عالية جداً للتأثيرات الزلزالية، وبدون تغيير ملموس في الحلول البنيوية الأساسية للمشروع، دُرست إمكانية فهم تأثيرات الهزة الأرضية الأعظمية المحسوبة - شدتها



الشكل 3. الاختبارات التصميمية وفوق التصميمية المحتمل حدوثها على المشروع VVER-TOI

استخدم في المشروع VVER-TOI ترتيب «متقابل» جديد لوحدة المفاعل، وهو يتميز من جميع التوضعات المتوازنة السابقة لمولدات البخار ومن التوضّع الضيق للعروات، مما سمح بمنع تأثير الحالات الطارئة على العروة المجاورة، وكذلك المساواة بين أطوال خطوط الأنابيب الواصلة إلى العنفة.

من أجل خفض مدة الإصلاحات الوقائية المخطط لها مسبقاً في الترتيب الجديد لقسم المفاعل، ظهرت إمكانية خفض مستوى محطة استيعاب نظام التبريد الطارئ لقلب المفاعل ذات المرحلة الأولى وتحرير مساحة على مستوى الخدمة من أجل ترتيب وإصلاح وحدة المفاعل في الإصلاحات الوقائية المخططة مسبقاً.

سمح تنفيذ هذا الترتيب بتوفير أمثلة الحلول التخطيطية في الاتجاهات التالية:

- الحدّ من تدفقات عبور الكابلات والقنوات في المجالات التكنولوجية؛

- تخفيض الحجم الإضافية للمباني (ممرات ومداخل)؛

- الحدّ من وصلات ربط خطوط الأنابيب بين المعدات التكنولوجية؛

- تقليل العدد الكلي للأنظمة، المنفذة للمهام الرئيسية؛

- الفصل المادي لحجرات البخار (تتوضّع هذه الحجرات على يمين مبنى المفاعل UJA ويساره)؛

- من أجل التزود بالبخار، تُستخدم أنابيب بأقطار اصطلاحية DN 700 mm؛

- أربعة خزانات لنظام التبريد الطارئ لقلب المفاعل من المرحلة الأولى جرى نقلها من مستوى الخدمة إلى مستوى آخر؛

- جرى تنظيم طابق من الكابلات اللازمة لتوضّع نظام التحكم والحماية؛

- تأمين الاتصال المباشر بين منطقة أعمال الحفر وطوابق الكابلات والأنفاق. بذلك يُستغنى عن مد الكابلات الكهربائية في الفراغ الموجود بين الأغلفة (الجدران).

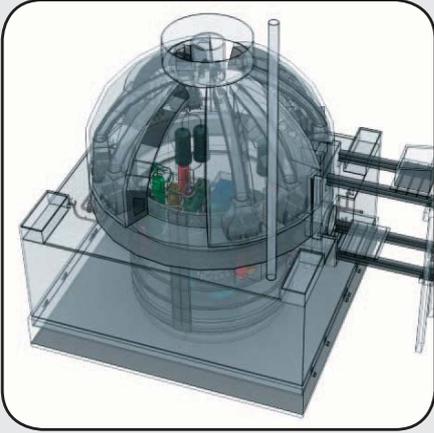
الأولى حسب التصنيف NP-031-01، أنه يمكن عند تسارع قدره 0.41g إدخال التسليح الفولاذي المطلوب في هذه العناصر دون التغيير في سماكتها، أي دون التغيير في الحلول التخطيطية (التنظيمية) للمشروع.

إحدى المزايا الإضافية المهمة للمشروع، هي الحلول في فهم تأثيرات سقوط طائرة عسكرية أو طائرة ثقيلة بوزن 400 طن. فوفقاً للواجب التقني، دُرست حادثة سقوط طائرة عسكرية من النوع فانطوم RF-4E على المشروع NPP من النوع VVER-TOI، بوصفها حادثة تصميمية. ومن أجل هذه الحادثة، يوفّر المشروع جميع متطلبات الأمان على أساس المحافظة. حيث حوُفظ على قيم متانة الخرسانة والتجهيزات لتساوي قيمها المحسوبة مع معامل وثوقية مقداره 1.3. يُعد معيار الاستقرار لبنية الخرسانة الوقائية هو غياب الضرر المؤدي إلى ظهور شقوق نفوذة ومكشوفة في الجدران بعد التعرض، عندئذ أُخذ مقدار تشوه الشدّ الحدي للتسليح مساوياً 0.8% للتسليح الطولي و 0.4% في حالة التسليح العرضي.

ووفقاً للواجب التقني، دُرست حادثة سقوط طائرة تجارية كبيرة على المشروع NPP من النوع VVER-TOI بوصفها حادثة فوق تصميمية. في هذا الصدد، أُخذت قيم متانة الخرسانة والتسليح مساوية للقيم المعيارية مع معامل وثوقية مساوي للواحد. من أجل هذه الحادثة يضمن المشروع عدم خروج المواد المشعة إلى الوسط المحيط. ومن أجل تبرير استقرار NPP لمثل تلك التأثيرات تستخدم تقريبات واقعية.

عند حادثة سقوط طائرة، يكمن معيار الاستقرار لبنية خرسانة الحماية في غياب الضرر المؤدي إلى ظهور الشقوق النفوذة والمكشوفة في الجدران بعد التعرض، عندها أُخذت قيمة تشوه الشدّ الحدي للتسليح مساوية 0.5% وهذه القيمة تتطابق مع متطلبات معايير هيئة التنظيم النووية الأمريكية USA NRC من أجل حساب الحوادث فوق التصميمية.

تضمن حلول التنظيم والتصميم الحدّ من الآثار الديناميكية على المعدات داخل مبنى المفاعل. من أجل تحقيق هذا الهدف تمّ فصل تركيبات الوقاية الخارجية عن المباني الداخلية بروابط قابلة للتشوه وفراغ بين الأغلفة، بهدف منع الانتقال المباشر للآثار الديناميكية إلى البنى والعناصر الداخلية لـ NPP.



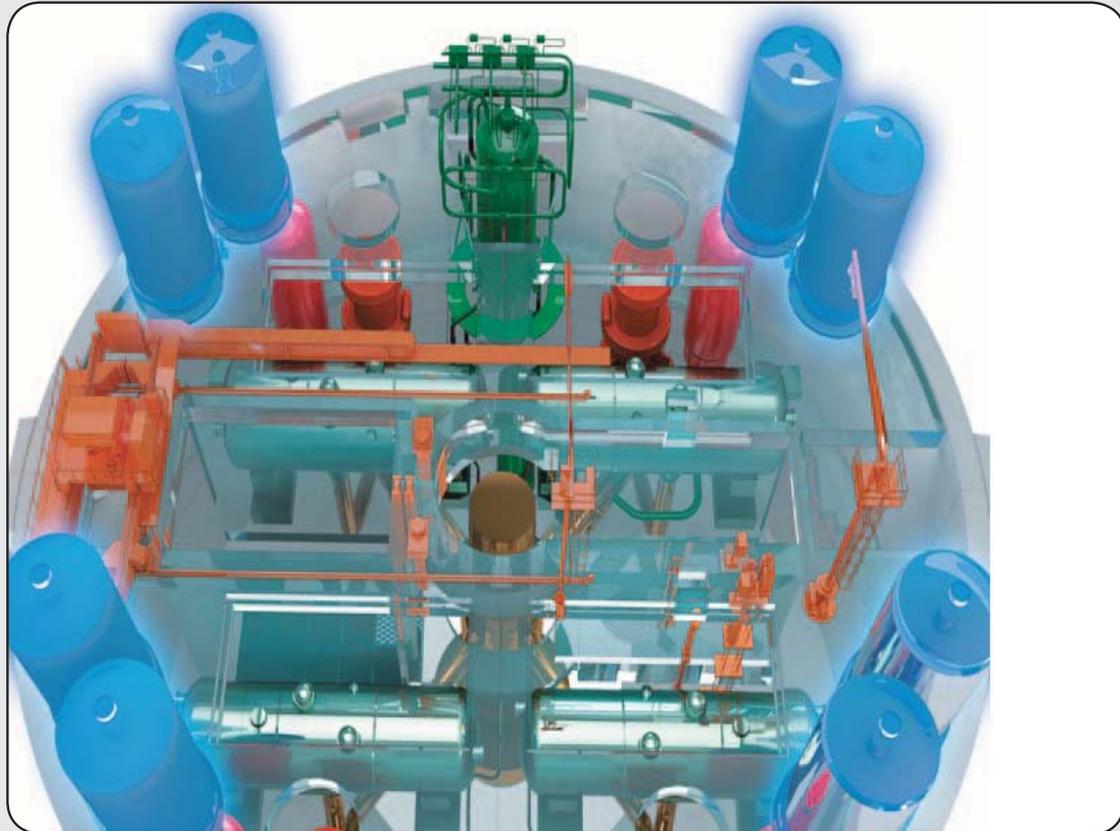
الشكل 4. الوحدة المتكاملة للمشروع VVER-TOI

إنَّ الاستغناء عن التوضُّع الضيق للتجهيز الواحد للانتقال إلى التوضُّع المدمج (الشكل 5)، قاد إلى التقليل من جدران الخرسانة وصمّامات التهوية والأبواب والبوابات، الضرورية من أجل إنشاء الحمايات لتأمين الاستثمار والصيانة. كما تقع معدات المضخات في مناطق مشتركة تستخدم لإجراء أعمال الصيانة وحماية العمال من الأشعة السينية وأشعة غاما بواسطة شاشات

عند تصميم أبنية المفاعل المساعدة أُخذ مبدأ التوضُّع المدمج للمعدات والاتصالات، بالإضافة إلى الأخذ بعين الاعتبار جوانب أخرى كالوصول إلى المعدات التي تتطلب الفحص الدوري والإصلاح، وإمكانية التفكيك، والتبديل والترحيل، وكذلك مساحة كافية لحركة الأفراد والمواد. كما يؤمن تجميع المبنى إمكانية البناء باستخدام طرق خطوط التجميع الصناعية مع الاستفادة القصوى من وحدات تصاميم البناء مسبقة الصنع (الشكل 4).

نتيجة لوضع الممرات حول المبنى، توضع الخزانات والمعدات التقنية الكبيرة كالفلترات والمبخرات وغيرها في موضعين أو ثلاثة مواضع مرتبة كلها في فضاء واحد. سمح هذا الحل الترتيبي المعطى بتخصيص ممرات للكابلات اللازمة لتشغيل الأجهزة.

يتم ترتيب مواضع منطقة الدخول المراقب مع اعتبار توضع المواقع العاملة بشكل دوري وغير العاملة في المساحة نفسها، مما سمح بتبسيط تجميع خطوط الأنابيب وتقسيم تدفق هذه الخطوط والقنوات في الممرات والأنفاق إلى خطوط أنابيب نظيفة وغير نظيفة.



الشكل 5. التوضُّع المتقابل للمعدات في المشروع VVER-TOI

توفير مايلي:

- إصدار الوثائق التشغيلية بالشكل الكامل قبل البدء بمرحلة البناء.
- استخدام الحلول الفريدة في مجال تطبيق المباني الكبيرة للمشاريع.
- حلول زيادة كتل البناء المسبقة الصنع والحد من عملية التجميع في الموقع (استخدام شركات صناعة البناء).
- الاستخدام الكلي لعناصر الأجهزة والأنابيب (الجاهزية القصوى للمصنع).
- التنظيم الأمثل لأعمال تجميع البناء، واستخدام طريقة خطوط التجميع.

محمولة وهي عبارة عن نظام مبتكر مرن للحماية من الإشعاع. تتألف هذه الشاشات من مادة البولي يورثين-رصاص أو من السليكون- تنغستن.

يتم مدّ شبكة الأنابيب وترتيبها عن طريق تخصيص ممرات وأنفاق ومرافق. كقاعدة، يتم تجميع المباني الواقعة على مسافة معينة، على أن تكون فعالية البيئة الحاوية معدات تقنية من الدرجة ذاتها. كما يقود التوضّع المدمج للمعدات، التجمع بهذا الشكل، إلى خفض حجم الوقاية الإشعاعية، وكذلك الحد من خطوط النقل التقنية (الأنابيب المشعّة، وقنوات تصريف المياه والتهوية الخاصة)، والتي تؤدي بدورها خفض كمية المصادر المشعة، التي تتطلب معدات وقائية خاصة.

تقود الحلول التنظيمية في مجال التهوية وتكييف الهواء، إلى خفض حجم عمليات البناء في المباني والأماكن التي تشغلها المعدات وأنظمة قنوات التهوية، وإلى زيادة الأمان من الحرائق والحد من خطوط قنوات التهوية.

يتم وضع معدات التهوية انطلاقاً من شروط المخطط العام للمبنى، وإمكانية سحب الهواء وتفريغه، وجلب المعدات إلى غرف الخدمات من أجل الفحص والإصلاح والتفكيك والنقل. من أجل العبور الشاقولي لقنوات السحب في المبنى المتكامل، استخدمت أنفاق شاقولية خاصة، تخرج مباشرة إلى غرفة مركز السحب الحاوية معدات التهوية.

تسمح الحلول التنظيمية لتوضع الممرات حول المبنى بأن تقلل إلى حد كبير من وجود نظام التدفئة داخل المرافق العملية غير النظيفة، كما تحد من الطول الإجمالي للقنوات في المبنى. من أجل تطهير المرافق والمعدات، اشترط استخدام وحدات تطهير متحركة.

إن استخدام الحلول المتطورة الموحدة من قبل خبراء الشركة المساهمة «مشروع الطاقة النووية»، عند تطوير التخطيط ثلاثي الأبعاد (3D) للمباني والمنشآت دون التأثير على مكونات المشروع VVER-TOI، سيسمح بتنفيذ أي توزع للبنى بما يتوافق مع متطلبات إجراء الأعمال التجميعية للبناء وإمكانية النقل، فضلاً عن

نُشر هذا المقال في مجلة الطاقة الذرية الروسية العدد 12، كانون الأول 2012، ترجمة د. سعدو الظواهره، جورج سابا، هيئة الطاقة الذرية السورية.

# هُدُودُ الْعَرَفَةِ

هل سيستطيع العلم توقع كل شيء،  
وحساب كل شيء؟ بالتأكيد لا. فمنذ القرن  
العشرين، يكتشف الرياضيون والفيزيائيون  
قيوداً للمعرفة يصعب كسرها.

الكلمات المفتاحية: نظريات عدم الاكتمال، حدود  
المعرفة، منظومات شواشيية.

**Key World:** The theorems of incompleteness,  
The limits of the Knowledge,  
chaotic systems.

## ما هو أساسي

- لن تسمح الرياضيات والفيزياء بفهم كل شيء. وتطرح بعض النظريات حدوداً للمعرفة.
- تُعدُّ نظريات عدم الاكتمال the theorems of incompleteness غودل من بين أقدم الأمثلة لقيود أساسية في الرياضيات.
- هناك حدود للمعرفة وحدود لوجود الأشياء، لأنه من المستحيل حساب بعض الأشياء الرياضية وحتى معرفة ما إذا كان بعضها موجوداً.
- تفرض المنظومات الشواشيية حدّاً تنبؤياً: ليس من الممكن تحديد حالة المنظومة بعد مستقبل محدود.



تماماً، ومكتمل الإنجاز عملياً. فلا يوجد جديد يمكن اكتشافه. وكل ما يجب عمله هو مجرد قياسات شديدة الدقة

لم يفكر هيلبرت قط أن الرياضيات كانت قد أنجزت تماماً لأنه اقترح، في العام 1900، قائمة تتضمن 23 مسألة كبيرة مفتوحة للنقاش. وكان يعمل أيضاً على برنامج يهدف إلى تطوير نظرية للبرهان، من أجل تقديم قواعد صلبة للرياضيات. ومن وجهة نظره، يجب على كل حقيقة رياضية أن تخضع للبرهان، وذلك بطريقة لا تدع مجالاً للشك فيما يخص صلاحية هذا البرهان.

### استبعاد الشك في الرياضيات

وبعكس ما قاله دو بوا-ريموند، صرح هيلبرت: «في الرياضيات، لا وجود للكلمة لن نعرف». وُجدت هذه الأفكار لدى تيار من التجريبيين المنطقيين في حلقة فيينا، وهؤلاء مجموعة من فلاسفة عشرينيات القرن العشرين الذين فكروا بأن المعرفة تستطيع أن تستقر على أسس صلبة.

وبالنسبة لهذه المدرسة من التفكير، من الممكن بناء المعرفة أولاً بأول، متأكدين بالتحقق، عند كل مرحلة من بنائها، بأن النظريات المجهزة تكون صحيحة. وأن البناء الكلي المعد سيكون توصيفاً

### بديهية الاختيار the axiom of choice

تتطلب بديهية الاختيار أنه بوجود مجموعات عديدة غير فارغة، يمكن اختيار عنصر من كل مجموعة من أجل تشكيل مجموعة جديدة. وبصورة أكثر منهجية، توجد في كل أسرة من المجموعات وظيفة اختيارية تربط بكل مجموعة واحداً من عناصرها. هذه البديهية عديمة الأهمية وليست ضرورية في حالة المجموعات المنتهية. ومع ذلك، فهي مفيدة للبراهين التي تأخذ بالاعتبار مجموعات لانهائية. وغالباً ما تضاف بديهية الاختيار هذه إلى بديهية زرميلو-فرانكل Zermelo-Fraenkel في نظرية المجموعات. كما أنها كانت مستعملة ضمناً حتى نهاية القرن التاسع عشر، قبل أن تكون مصاغة بشكل دقيق من قبل إرنست زرميلو Ernst Zermelo.

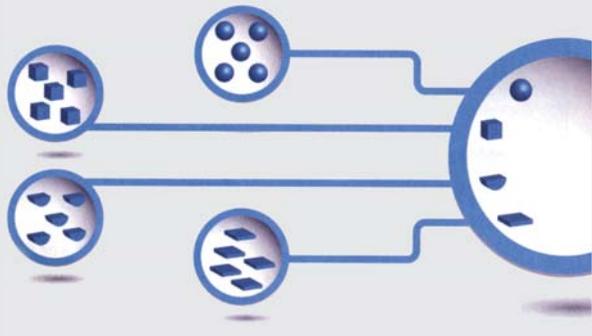
ومع ذلك، فهذه البديهية مثيرة للجدل. يفضل الرياضيون ذوو الحدس الرياضي عدم استعمالها. وفي الواقع، توفر بديهية الاختيار وجود بعض الأشياء، لكنها لا تقدم طريقة للبناء، وهذا ما يجعلها غير مرضية من وجهة نظر الرياضيين ذوي الحدس الرياضي.

بحث البشرية دائماً عن فهم للعالم المحيط بها وزيادة معارفها عنه. أحدث اختراع الطباعة، ونشر الموسوعات، وإنشاء مكتبات كبيرة، وفي الآونة الأخيرة، ظهور الحواسيب والذاكرات الإلكترونية القادرة على تخزين ما يعادل مكتبة وطنية كبيرة في جهاز بحجم اليد، أحدث كل ذلك ثورة في الوصول إلى المعرفة. ومع هذا، لا يزال بعيدين عن معرفة كل شيء وفهم كل شيء. يمكن للمرء القول إنها مجرد مسألة وقت وصبر. ولكن هناك أيضاً عقبات تقنية وبيولوجية أو اجتماعية، وهناك مسائل أعمق في جوهرها. فعلى سبيل المثال، إن أي شخص، بغض النظر عن ذكائه، سيكون غير قادر على استيعاب كل المعرفة المتاحة اليوم. وكما سنرى، جرى اكتشاف هذه المشاكل الجوهرية في مجالي الرياضيات والفيزياء، حيث كان الأمل معقوداً عليهما في تحقيق المعرفة الكاملة، ومع ذلك، كانا أقل مثالية.

ففي العام 1931، نشر عالم المنطق النمساوي كورت غودل Kurt Godel نظريتين حطمتا حلم عالم الرياضيات الألماني الكبير، دافيد هيلبرت David Hilbert، في بناء رياضيات قادرة في المستقبل على برهنة أي بيان دون أي شك. أثبت غودل بشكل قطعي أنه، في كل مجال من الرياضيات، توجد بيانات، رغم صحتها، لا يمكن أبداً برهنتها. وأدت أعمال غودل، بالإضافة إلى تطورات أخرى في الرياضيات والفيزياء، إلى تأمل فلسفي حول محدودية المعرفة البشرية. فبان معاً، أظهرت الثورات العلمية الكبيرة مثل النظرية الكمومية، ورياضيات القرن العشرين وفيزيائه وجود حدود في حقل المعرفة لا يمكن تخطيها.

تبرز أهمية هذا التناقض أكثر وضوحاً عندما نتعرف إلى السياق العلمي في أواخر القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين. فقد انتاب علماء القرن التاسع عشر بعض التفاؤل وفكروا أنه يمكن حل أي مشكلة، وظنوا أن الأمر مسألة وقت، ومسألة وسائل ومهارة. اعتقد معظم العلميين أن العلم سيجعل أجوبة لأغلب الأسئلة الممكنة المتعلقة بالعالم المحيط بنا. وبالتأكيد، اعتقد قليل منهم أن الوصول إلى هذه المرحلة النهائية قد تحقق مسبقاً. يعود ذلك إلى أن الإطار النظري في نهاية القرن التاسع عشر بدا لهم متيناً ويصلح أن يكون أساساً لتفسيرات يمكن تطويرها فيما بعد. فكان العلميون مقتنعين بأن النظريات القائمة، إذا ما حسّنت، ستكون كافية لتأخذ بالاعتبار مجمل الظواهر المعروفة والممكن اكتشافها أيضاً.

بالتأكيد، لم يكن الكل متيقناً من هذا الشعور. فقد عبر الفيزيولوجي الألماني إميل دو بوا-ريموند Emil du Bois-Reymond عن ذلك في العام 1872 بقوله: "ignoramus et ignorabimus" الذي يعني "نحن لا نعلم ولن نعلم". لكن موقفه لم يكن مقبولاً لدى الأكثرية. ويعكس ذلك، اعتقد الفيزيائي البريطاني اللورد كلفن Kelvin، في أواخر القرن التاسع عشر "أن علم الفيزياء يشكّل آنذاك، بشكل رئيسي، مجموعاً متناسقاً



التي سنعالجها هنا هي من نمط آخر: إنها شديدة الارتباط بطبيعة نظريات الرياضيات والفيزياء وبنياتها، ولن تكون قابلة للتحسين عن طريق تقدم تقني.

### عقبات مرتبطة بالمجموعات اللانهائية

الرياضيات هي بالأساس المجال العلمي الذي ننتظر منه مزيداً من اليقين. رغم أن الرياضيات ليست علماً تجريبياً، غير أنها لا تنطق إلا بأشياء حقيقية ويجب أن تسمح ببرهان كل ما هو حقيقي. وقد كانت، على أية حال، أمنية هلبرت ورفضه بأننا لن نعلم كل شيء في الرياضيات. كان توجه برنامجه منح هذا الحقل العلمي نظرية البرهنة لا تترك مجالاً للشك بصلاحيته إثبات شيء ما. كانت هذه الإرادة مدفوعة بفعل الحوارات النشطة بين علماء رياضيات نهاية القرن التاسع عشر وبداية القرن العشرين، حيث تعلق تلك الحوارات ببعض البراهين التي قبلت من البعض ورفضها البعض الآخر. تعلق الأمر خصيصاً ببديهية الاختيار، المصاغة من قبل عالم الرياضيات الألماني إرنست زرميلو، والتي اعتمدت عليها براهين عديدة (انظر المؤطر في الصفحة 64).

إن مواضيع الجدل كانت غالباً تتعلق بنتائج مقادير أو مجموعات لانهائية. ولتجنب هذا النمط من الجدالات، قصد برنامج هلبرت بناء

كاملاً للحقيقة، ليس فقط لمظاهرها الرقمية، إنما أيضاً لبنيتها الأساسية. وبهذه الطريقة، لن يوجد أي شك حول صدقية البيانات. وهكذا، سيكون العلم قادراً على توقع الأحداث المستقبلية وصفاً وكمياً بدقة كافية وعلى مدى زمني لا نهائي.

حطم علم القرن العشرين بسرعة هذه الآمال. فكما ذكرنا أعلاه، وضع غودل نهايةً لبرامج هلبرت من خلال البرهان على نظرياته الشهيرة بعدم الاكتمال. حيث أظهرت هذه النظريات أنه، في كل مجال من الرياضيات، يوجد بيانات صحيحة، لكنه من المستحيل إثباتها في هذا المجال من الرياضيات.

إضافة إلى ذلك، أدت فيزياء القرن التاسع عشر، المكونة بشكل أساسي من ميكانيك نيوتن ومن الترموديناميك والكهرطيسية، إلى ولادة ثورتين رئيسيتين، النظرية النسبية والنظرية الكمومية. وحملت هذه الهياكل، التي من المناسب أن يضاف إليها فيزياء المنظومات غير الخطية التي طورت كثيراً بين العامين 1970 و1990، ضربة قاتلة لآمال كلفن.

### العلم بيني حدوده الذاتية

اليوم، تُعدُّ فكرة تفسير كل شيء غير قابلة للاستمرار بسبب التأكد، بواسطة العلم نفسه، من وجود حدود لا يمكن تخطيها وفق منطق العلم ذاته. من الملائم تصنيف هذه الحدود وفق أربع فئات سنعرضها فيما يأتي. تنسب الحدود البنوية constructive limits إلى استحالة بناء خطاب علمي خالٍ من أي شك ويستند على أسس حقيقية. تظهر الحدود التنبؤية predictive limits استحالة توقع بعض الظواهر بدقة قسرية وفق سلم زمني غير محدد. نجد مثل هذا النمط من الحدود في الفيزياء، في نظرية الشواش على سبيل المثال. تُعنى الحدود الإدراكية cognitive limits بوجود مجالات تظل خارج متناول المعرفة. تظهر هذه الحدود في رياضيات دراسة الأعداد المحددة تماماً، لكنها غير قابلة للحساب، وهي أعداد لا يمكننا تعيينها، بأحسن حال، إلا في حالة انتهائها بأعداد عشرية. أخيراً، تستبعد الحدود المختصة بعلم الكائنات ontological limits بعض الكيانات المفاهيمية مظهرة عدم تماسكها أو بوضعها خارج حقل فهم الخطاب العلمي. وهذه هي حالة الميكانيك الكومومي مع الدور المتميز للمراقب أو، في حالة الرياضيات، مع تساؤل بوجود بعض الأشياء أو عدمها.

تتمايز هذه الحدود عن تلك الناجمة عن العقبات العملية. وتكون هذه العقبات مثلاً مرتبطة بمعطيات عديدة جداً بحيث تكون صعبة المعالجة، أو، على العكس، مرتبطة بعدم كفايتها؛ يمكن أيضاً أن تكون مرتبطة بأزمة حساب طويلة جداً. يمكن لهذه الحدود أن تحسّن (لكن مع احتمال عدم نسيانها) عن طريق تطوير تقانات القياس والحساب، أو عن طريق جمع معطيات جديدة. الحدود

### العدد أوميغا لـ غريغوري شيتان Gregory Chaitin

يُعرّف العدد أوميغا لشيتان بصفته الاحتمال الذي تتوقف عنده آلة تيرينغ Turing machine في وقت محدد، وذلك عندما تنفذ هذه الآلة برنامجاً مختاراً بشكل عشوائي. يعبر هذا البرنامج العشوائي عن تتابع زوجي من 0 و1 حيث تُسحب كل بتة بشكل عشوائي. يجب أن يكون البرنامج محدداً ذاتياً، أي إنه يحوي إشارة تنهي البرنامج، على هيئة تتابع للبتات، مثل 1111. من الممكن تقدير أوميغا من خلال إعادة السحب العشوائي للبرنامج مرات عدة. لا يمكن الوصول إلى أوميغا إلا نظرياً، لأنه يتوجب تنفيذ سحب البرامج مرات غير محدودة. علاوة على ذلك، إنه من المستحيل معرفة ما إذا كان برنامج عشوائي لا يتوقف أبداً (وهي مشكلة غير قطعية). وعملياً، يتم تقرير زمن للتنفيذ نعتبر بعده أن البرنامج لا يتوقف.

العدد أوميغا هو مجرد احتمال؛ فهو إذن محصور بين 0 و1، ويمكن أن يكتب وفق تتابع زوجي غير منته من الشكل  $0, a_1, a_2, \dots, a_n, \dots$  وهو أيضاً غير قابل للحساب بواسطة خوارزمية وأرقامها، باستثناء عدد محدد من بينها، تكون غير قطعية بالمعنى الآتي. يمكن لمنظومة منهجية معقولة تحديد أرقام أوميغا، أي برهنة بضعة بيانات من النمط  $a_i = 1$  أو  $a_i = 0$ ، لكن منظومة مقبولة لا يمكنها برهنة إلا عدداً محدوداً من البيانات من هذا النوع. ومن أجل غالبية الأرقام  $a_i$  لـ أوميغا، لا يمكن للمنظومة إثبات بيان ما ولا إثبات ضده.

عدد العناصر في مجموعة ما. فإذا كانت المجموعة المعنية غير منتهية، يكون العدد الكاردينالي (الأصلي) ما وراء المنتهي، وهو مفهوم أدخله عالم الرياضيات الألماني جورج كانتور Georg Cantor. إن وجود البعض من هذه الأعداد، "الكاردينالات الكبيرة major cardinaus"، غير مقبول عالمياً، حتى لو لم يقُد هذا الوجود إلى أي تناقض. وبالنسبة لبعض علماء الرياضيات، فإن حجة عدم التناقض غير كافية لتبرير وجود هذه الكاردينالات.

### بيانات غير قطعية

لا ولن يوجد أبداً سبب ملزم ومحدد بشكل نهائي حول ماهية الأشياء الرياضية الموجودة وغير الموجودة. يتأتى هذا التحديد الوجودي حول وجود شيء رياضي من حقيقة أن الشكلية الرياضية نفسها لا يمكنها فرض هذا الوجود. بالنسبة للحدسيين، توجد فقط الكيانات التي يمكن أن تخضع للبناء. أما بالنسبة لغيرهم من الرياضيين، إن تضمين شيء ما ينتج من خيار شخصي مؤسس على اعتبارات ناجمة عن بساطة طبيعية، وعن خصوبة أو عن فاعلية. يجب إذن رفض الإقرار بصورة قطعية فيما يخص مسألة الوجود لأشياء رياضية.

حتى لو اعتمدنا شكلية محددة تماماً، فمن المستحيل أن نحدد خصائص بعض الأشياء تحديداً لا لبس فيه. وهكذا، فإن بديهية زرميلو-فرانكل Zermelo-Frankel، التي أسس عليها علماء الرياضيات نظرية المجموعات بشكل عام، تُعدُّ كافية من أجل جزء كبير من الرياضيات الحالية. بالمقابل، لا تقول لنا هذه البديهية شيئاً عن حقيقة بديهية الاختيار. هذا البيان غير قطعي، إذ لا يمكن إثباته أو رفضه في بديهية زرميلو-فرانكل. والشيء نفسه يقال من أجل وجود الكاردينالات الكبيرة. إن بديهية زرميلو-فرانكل متوافقة مع الإقرار بهذه البيانات ومع نفيها. لا يشكل الحدس عنواً كبيراً للتقرير بصحة هذه البيانات. وينتج من ذلك أنه غداً من الصعب قبول وجهة النظر التي تُقرُّ بوجود مجموعات صحيحة إما أن تكون خصائصها صحيحة أو تكون خاطئة.

سبب الاكتشاف الحديث لاقتراحات جديدة غير قطعية، بخاصة في مجال المعلوماتية النظرية، التراجع خطوة إضافية إلى الخلف فيما يخص الادعاء بالقدرة على إيجاد الجواب لكل تساؤل رياضي. يهتم عالم الرياضيات الأرجنتيني الأمريكي غريغوري شيتان Gregory Chaitin بالمعادلات الديوفانتينية equations diophantiennes، وهي معادلات متعددة الحدود تكون معاملاتها أعداداً تامة وكذلك تكون مجاهيلها أعداداً تامة أيضاً. لقد بنى شيتان واحدة من هذه المعادلات التي تحتوي على 1700 متحول ومعلمٍ وحيدٍ رمز له بـ  $n$ . ووفقاً لـ قيمة  $n$ ، يكون للمعادلة عدد محدد (منته) من الحلول أو لانهائي. فمن أجل قيمة محددة لـ  $n$ ، هل يكون عدد الحلول محدداً

الرياضيات وفق نظرية الدليل المسمى "نهائي finitiste" بحيث يتجنب العودة لأي شيء لانهائي معتبر في كليته. كان هلبرت يأمل بإظهار أن كل حقيقة رياضية ستكون قابلة للبرهنة في مثل هذا البناء ويكون ذلك بطريقة مقنعة لكل علماء الرياضيات. مع ذلك، بين غودل عند نشر نظرياته بعدم الاكتمال في العام 1931، أن هذا الأمل كان مجرد وهم.

أظهرت النظرية الأولى أنه في كل منظومة منهجية -مجموع أشياء مرتبط بعدد منته من بديهيات وقواعد منابلة الرموز- تحتوي على علم الحساب، توجد اقتراحات حقيقية لا نستطيع إثباتها ولا رفضها، نسميها غير قطعية. تعلن النظرية الثانية أن عدم التناقض في المنظومة -أي أن هذا لا يقود إلى تأكيد وضد هذا التأكيد في آن معاً- هو في الوقت نفسه اقتراح غير قطعي.

هذا يعني أنه يجب رفض الأمل بإثبات أي اقتراح حقيقي لمنظومة منهجية. إن أي منظومة منهجية ستحتوي على اقتراحات لا يمكن أبداً برهنتها، رغم أنها حقيقية. إضافة إلى ذلك، هذا يعني أنه يستحيل البرهان أن منظومة منهجية ليست متناقضة بالاعتماد على براهين لا تخرج من إطار هذه المنظومة. إذاً لا يمكننا أبداً التأكد من أن المنظومة المنهجية المستعملة ليست متناقضة، إلا بالتوجه لبرهنتها بالاعتماد على منظومة منهجية أكثر اتساعاً؛ ولكن عدم التناقض في المنظومة المؤسسة سيخضع بدوره للتساؤل.

تقيم هذه النظريات حداً بنوياً: فمن المستحيل بناء نظام رياضياتي منهجي غير متناقض يسمح بالتعبير عن شمولية الرياضيات، مثله مثل أي بيان صحيح قابل للتعبير عنه في هذه المنظومة (بخاصة عدم تناقضه الذاتي) يكون قابلاً للبرهنة في المنظومة.

هناك مشكلة أخرى، تتعلق بالأسباب المثارة من قبل هلبرت لتحفيز برنامجه، تأتي من غموض المصطلح «يوجد» في حالة شيء ما في الرياضيات. فبالنسبة لـ هلبرت، إن هذا الشيء في الرياضيات موجود إذا كان غير متناقض. أما بالنسبة للرياضيين الحدسيين، لا يوجد شيء رياضي إلا إذا كان بالإمكان أن يخرج عنه عملية فعلية للبناء. وعلى سبيل المثال، يقال عن المجموعة إنها مُنظمة تماماً إذا امتلك كل جزء غير فارغ عنصراً أكثر صغراً. تسمح بديهية الاختيار بإظهار وجود تنظيم جيد لمجموع الأعداد الحقيقية. وبالنسبة لـ هلبرت، إن هذا التنظيم الجيد موجود. إن هذه النتيجة طبيعية فيما يخص الأعداد الحقيقية، لكنها غير ممكنة لشرح عملية بناء فعلية في حالة مجال مفتوح لأعداد حقيقية. أما بالنسبة للحدسيين، فإن هذا التنظيم الجيد غير موجود.

علاوة على ذلك، حتى لو رُفضت قيود الحدسيين الكبيرة جداً، غالباً ما يصعب الإقرار بوجود بعض الأشياء. ففي نظرية المجموعات، تستخدم أعداد تسمى كاردينالية (أصلية) لتقدير

عدد منتهٍ، وإلا فهي مساوية للواحد).

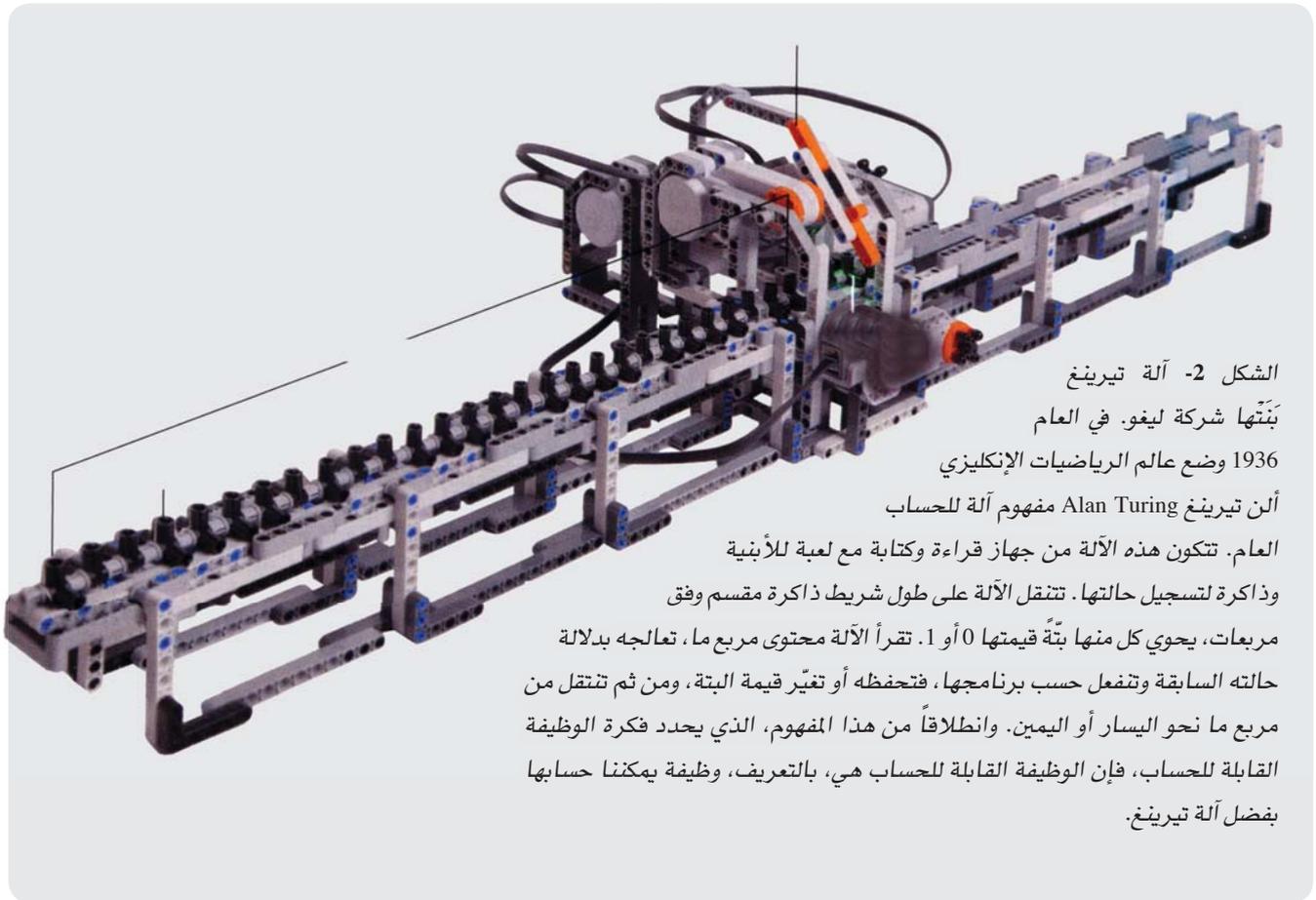
### مجموعة لانهائية غير قابلة للإثبات

لا تكون الأعداد من نمط أوميغا قابلة للحساب، مما يقود إلى الحد الإدراكي الآتي: مهما كانت المنظومة المنهجية المستعملة، توجد مجموعة لانهائية صحيحة يستحيل البرهان عليها - فإذا أعطينا لكل بنة القيمة التي يمكن أن تأخذها، بالضرورة تكون بعض المجموعات صحيحة. وعلاوة على ذلك، تكون مجموعات هذا النمط، التي يكون حلها خارج الإمكانية بشكل نهائي، أكثر عدداً بكثير من تلك التي يمكن معالجتها.

وفيما يتعلق بالحدود المعروفة في الفيزياء، فإنها غالباً ما تكون ذات طبيعة تنبؤية. وبشكل عام، ليس من الممكن تزويد أكثر من احتمالية حول قياس مستقبلي، وذلك بسبب الطبيعة العشوائية أو الكمية للظواهر. إن دراسة المنظومات الديناميكية اللاخطية في الميكانيك التقليدي، التي يخضع سلوكها لمعادلات تفاضلية لاخطية، أظهرت خصائص مفاجئة. فسلوكها قطعي: يُعد المعطى الخاص بالحالة الابتدائية كافياً، من حيث المبدأ، لحساب حالتها في كل لحظة. ويجب أن تكون مثل هذه الأنظمة متوقعة تماماً. ومع ذلك أثبت في الأدلة خاصة "الحساسية للشروط البدائية"، التي حسبها يتضخم فرق صغير بين حالتين

(منتهاياً)؟ أثبت شيتان أنه لا يمكن لأي منظومة منهجية أن تكون قادرة على تحديد نهائية عدد الطول لهذه المعادلة أو لانهائية إلا من أجل عدد محدد من قيم  $n$ . هذا يعني أنه مهما كانت المنظومة المنهجية المعنية، فإنه لا يمكن الإجابة بشكل عام على المسألة التالية: "هل لهذه المعادلة عدد منتهٍ أو لانهائي من الطول من أجل هذه القيمة لـ  $n$ ؟".

تنتج هذه المشكلة، المرتبطة بأعمال شيتان على آلات تورينغ العالمية the universal Turing machine، عن حواسيب نظرية قادرة على التعامل مع أي نمط من الحساب (انظر الشكل 2). حدد شيتان العدد  $\Omega$  (أوميغا) بصفته الاحتمال الذي تتوقف عنده الآلة بنهاية زمن محدد عندما نطلب منها تنفيذ برنامج عشوائي مصاغ وفق كود زوجي، أي أن كل بنة (1 أو 0) فيه مختارة بشكل عشوائي (انظر المؤطر في الصفحة 65). العدد أوميغا محدد تماماً، لكنه غير قابل للحساب. تستطيع منظومة منهجية أن تحسب على الأكثر عدداً منتهاياً من بنات هذه الاحتمالية، المصاغة في المنظومة الزوجية. تعود مسألة المعادلة الديوفانينية ذات المَعلم  $n$  أيضاً لحساب عدد من النمط أوميغا لمعرفة ما إذا كان عدد الحلول التامة منتهاياً. تقابل كل بنة قيمة لـ  $n$  وتشير ما إذا كانت الحلول لها عدد منتهٍ (على سبيل المثال، تكون البنة المعنية مساوية للصفر إذا كانت الحلول لها



الشكل 2- آلة تيرينغ

بنتها شركة ليفو. في العام

1936 وضع عالم الرياضيات الإنجليزي

ألن تيرينغ Alan Turing مفهوم آلة للحساب

العام. تتكون هذه الآلة من جهاز قراءة وكتابة مع لعبة للأبنية

وذكرة لتسجيل حالتها. تنتقل الآلة على طول شريط ذاكرة مقسم وفق

مربعات، يحوي كل منها بنة قيمتها 0 أو 1. تقرأ الآلة محتوى مربع ما، تعالجه بدلالة

حالتها السابقة وتنفعل حسب برنامجها، فتحفظه أو تغير قيمة البنة، ومن ثم تنتقل من

مربع ما نحو اليسار أو اليمين. وانطلاقاً من هذا المفهوم، الذي يحدد فكرة الوظيفة

القابلة للحساب، فإن الوظيفة القابلة للحساب هي، بالتعريف، وظيفة يمكننا حسابها

بفضل آلة تيرينغ.

## صعوبة الحوسبة

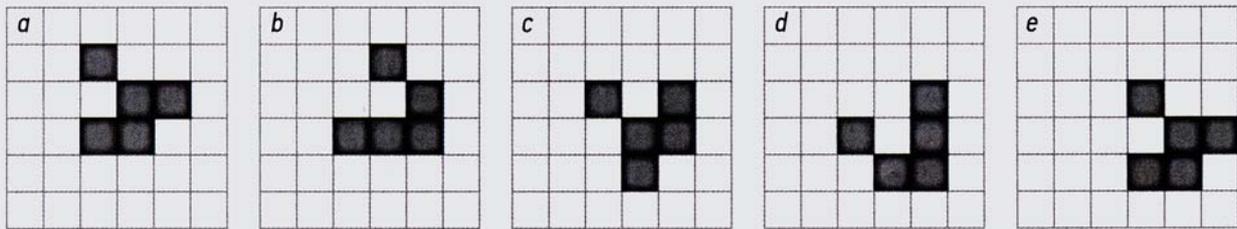
يوجد حدٌ تنبؤي آخر ناجم عن احتمالية صعوبة الحوسبة. يتعلق هذا الحد بالمنظومات التي لا يوجد أي طريقة أخرى لمعرفة الحالة التي ستكون فيها هذه المنظومات في لحظة لاحقة إلا إذا جرت محاكاتها، أي إعادة إنتاج سلوكها، خطوة بخطوة، على حاسوب وترك هذا السلوك مستمراً حتى اللحظة المعنية. وهذا يعني أنه لا يوجد أي اختصار لمعرفة هذه الحالة، مثل صيغة تسمح بشكل مباشر بحساب الحالة المقابلة للحظة معينة. والطريقة الوحيدة هي السماح باستمرار جميع المراحل التي تسبقها.

لقد وضعت هذه الخاصية بشكل مسبق في سياق الآليات الخلوية. تعمل هذه الآليات وفق مبدأ التكرار. وبالانطلاق من تشكيل بدائي لشبكة تكون فيها الخلايا في حالات مختلفة، تشير قواعد بسيطة إلى كيفية الحصول على التشكيل التالي. وهكذا، يتعلق وضع الخلايا في تشكيل في الوقت  $n + 1$  بتشكيل الوقت  $n$ .

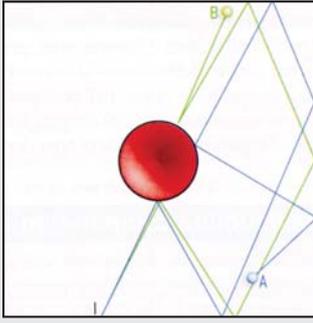
المثال الأكثر شيوعاً في هذا المجال هو لعبة الحياة لعالم الرياضيات البريطاني جون كونواي John Conway. فمن أجل بعض الحالات البدئية، تكون التشكيلات اللاحقة سهلة التنبؤ. وعلى سبيل المثال، نذكر الحالة عندما يظهر سلوك دوري أو عندما تميز حركة منتظمة للخلايا الانتقال من التشكيل  $n$  إلى التشكيل  $n + 1$ . ولكن بعض الحالات البدئية تتحدى أي محاولة للتنبؤ بتطورها والطريقة الوحيدة لمعرفة ما آلت إليه، بعد مئة خطوة على سبيل المثال، تتمثل بعبور الـ 99 خطوة المتوسطة.

يمكننا أيضاً إيضاح أن معرفة المصير النهائي لتشكيل بدئي هي مشكلة غير محسومة: فلا يوجد أي خوارزمية عامة قادرة على التنبؤ، عندما نفترض تشكيلاً للدخول، ما إذا كان سينتهي بالتوسع أو ما إذا كان سيحفظ الخلايا إلى أجل غير مسمى.

ويجب، خلال الحساب، المرور بالطريق نفسه الذي تسلكه المنظومة الحقيقية دون توافر إمكانية الاختصار للتعرف مباشرة على الحالة التي تعيننا. ليس المقصود هنا استحالة معرفة هذه الحالة، لأنه بمحاكاة المنظومة يمكن التوصل إلى الحالة. أي إن المقصود هو استحالة الذهاب «بأسرع من المنظومة» لمعرفة إلى أين تذهب. وبطريقة أو بأخرى، هذا يعني أن الطريقة الوحيدة لمعرفة الحالة هي ملاحظة المنظومة ذاتها أو محاكاة نسخة منها على الحاسوب. يمكن لذلك أن يغدو استحالة حقيقية إذا ما حاولنا معرفة ما ستؤول إليه المنظومة على المدى البعيد، لأن المحاكاة يمكن أن تأخذ وقتاً يتجاوز قدراتنا العملية. تحمل صعوبة الحوسبة وجهة نظر نافعة من أجل فهم بعض الظواهر الطارئة. وتجدد الإشارة إلى أنه، رغم الشك بأن منظومات عديدة غير قابلة للحوسبة، يبقى اليوم الإثبات الدقيق بأن منظومة معينة تمتلك هذه الخاصية هي مشكلة رياضياتية مفتوحة.



توجد قواعد بسيطة تحدد تطور الصناديق من مرحلة إلى التي تليها في لعبة الحياة للعالم جون كونواي. تصبح الخلية الميتة (صندوق أبيض) حية (صندوق أسود) إذا أُحيطت بثلاث خلايا حية وتبقى الخلية حية إذا كانت محاطة بخليتين أو ثلاث خلايا حية. ففي التابع المشار إليه في الرسم، يكون التطور دورياً، وسيصبح النمط الأول (a) مثل النمط الأخير (e) منزاحاً بصف وعمود. وباستثناء حالات خاصة، يصعب تنبؤ التطور لتشكيل ما دون حساب كل مرحلة.



الشكل 3- يقدم بليارد سيناي مثلاً بسيطاً عن فوضى قطعية. ففي مركز البليارد المربع الشكل يوجد عائق دائري تقفز فوقه كرتا البليارد  $A$  و  $B$ . تنطلق هاتان الكرتان من النقطة البدئية  $A$  نفسها باتجاهين شبه متماثلين. وبعد زمن محدد، يكون المساران مختلفين جداً. من الممكن نظرياً التنبؤ بموقع كل من الكرتين في أي لحظة، ولكن، عملياً، تمنع الحساسية العالية للشروط البدئية الوصول إلى تنبؤ صحيح، إذ إن الريبة الأكيدة حول الشرط البدئي تتعاظم بسرعة كبيرة بدلالة الوقت وتشوش إمكانية معرفتنا للمسار.

توقع مؤكد فيما يخص النتيجة لهذا النمط من القياس.

لكن الفيزياء الكمومية هي أكثر تطرفاً في تحديها لمداركنا البديهية المعتادة المتمثلة باعتقادنا أن هناك حقيقة مستقلة عن أي مراقب وتشبه ما نتصوره عنها. إن استحالة التعبير عن النظرية الكمومية وفق شكل موضوعي قوي (أي لا إشارة فيه لأي قياس ولا لأي مراقب) هي حجة مهمة ضد هذا الموقف. الميكانيك الكومومي لا يصف الحقيقة بحد ذاتها، إنما يقتصر على وصف الحقيقة التجريبية للظواهر. لقد أخفقت غالبية المحاولات الهادفة إلى توصيف حقيقة ممكنة كما هي، وذلك من خلال استعمال شكليات بديلة. فنحن بالتالي مضطرون للاكتفاء بوصف مظهر للواقع من خلال الظواهر التجريبية ورفض وصف الواقع بحد ذاته. في هذا الحد الوجودي، يكون الوصول ممكناً فقط إلى الواقع التجريبي الاستثنائي.

إن جميع الحدود المستعرضة هنا ناتجة من براهين آتية من العلم نفسه، ويُعدُّ اكتشافها ظاهرة مثيرة، لأن الاكتشاف جرى في الوقت نفسه مع نمو غير مسبوق للمعارف التي جلبها العلم. ويسمح العلم لنا بتزايد معرفة المناطق التي يستكشفها، فإنه قد أظهر مناطق لا يمكن الوصول إليها ونحن لا نشتبّه بوجودها. إن هذا الاكتشاف، الذي غالباً ما يتم تجاهله، هو بلا شك واحد من الأشياء الأكثر استثنائية في العلم المعاصر فيما يخص المستوى المعرفي.

هيرفي زويرن: هو أستاذ مشارك في وحدة التدريب والبحث الفيزيائي في جامعة باريس ديدرو ورئيس كلية الفيزياء والفلسفة.

نشر هذا المقال في *Pour la Science*، ترجمة د. عادل حرفوش. رئاسة هيئة التحرير.

بدائيتين بشكل أسّي بدلالة الزمن (انظر الشكل 3).

عرفت هذه الملاحظة، التي أعلن عنها الفرنسي هنري بوانكاريه Henri Poincare منذ نهاية القرن التاسع عشر، بمصطلح «تأثير الفراشة *effet papillon*» المشهور للعالم الأمريكي إدوارد لورنز Edward Lorenz. في العام 1963، بين عالم المناخ الأمريكي هذا، في حالة نظام لثلاث معادلات تفاضلية لاخطية بسيطة، أن حالتين متقاربتين بدائياً بقدر ما نريد (الفرق غير قابل للتمييز بدرجة الدقة المعتمدة) يمكن أن تتطورا بحيث لا يعود بينهما أي شيء مشترك في نهاية وقت محدد. وبالنتيجة: يبدو من المستحيل إطلاق تنبؤات أبعد من أفق زمني معين، رغم أن القوانين المتحركة بتطور المنظومات هي قطعية. نتحدث في هذه الحالة عن عشوائية قطعية، حيث تعطي المنظومة الانطباع بتطور عشوائي، في بداية حقيقة يكون فيها قطعياً. تعبر هذه العشوائية تماماً عن عدم قدرتنا لتحديد حالة بدائية بشكل دقيق لانهائي.

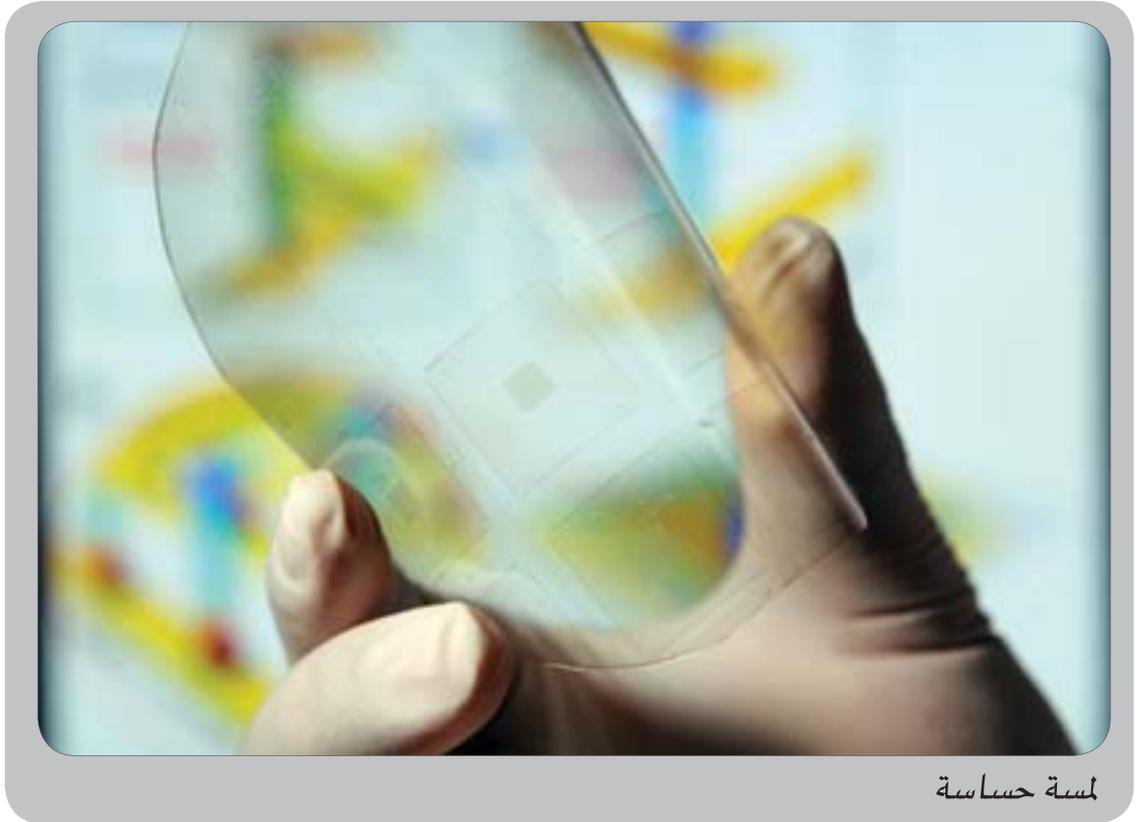
### أفق التنبؤ في المنظومات العشوائية

يتعلق الأفق الزمني للتوقعات بالمنظومة العشوائية المعالجة. يمكن لبعض الوقت توصيف حركة بوصلة موضوعة في حقلين مغنطيسيين أحدهما ثابت والآخر يدور. يمتد تعريف مسارات كواكب المنظومة الشمسية على مدار بضعة ملايين من السنين. لكن في ما وراء هذا الأفق، يمكن لأكثر التغيرات البدئية صغراً أن تؤدي إلى حالات مختلفة جداً.

تفرض حساسية الشروط البدئية هذه، التي تعود إليها مواضيع غالبية المنظومات الديناميكية، حداً مبدئياً في قدرتنا على التنبؤ. ويتحسين الدقة في الشروط البدئية، يمكن تحسين هذا الأفق، لكن دون التمكن من استبعاده تماماً. فمن أجل منظومات كهذه، ينتفي التوصيف التفصيلي لديناميكياتها. فيجري الاهتمام بالأخرى بالخصائص المتقاربة للمنظومة، أي الاهتمام بتطورها الوصفي على مدى بعيد، وبالخواص المشتركة بينها وبين منظومات أخرى من النمط نفسه. يجري الحديث في هذه الحالة عن خصائص عامة يجب الاكتفاء بها لتوصيف ما يحدث وسطياً على عدد كبير من هذه المنظومات. عندها تصبح التنبؤات مجرد احتمالات.

تظهر الفيزياء الكمومية نمطاً من اللاحتمية أكثر تطرفاً، حيث تتأني الاحتمالات من روح الظواهر ذاتها وليس من جهلنا أو من عدم قدرتنا في تعيين حالة ما بالشكل الكافي. وعلى سبيل المثال، حتى عندما تكون حالة الإلكترون معروفة تماماً بأنه يمكن معرفتها نظرياً، فإنه من المستحيل توقع نتائج بعض خصائصه اللهم إلا بشكل احتمالي. يمكن لموقع هذا الإلكترون ولعزمه أو لسبينه أن يأخذ قيماً مختلفة لا يمكن تعيينها إلا بالقياس، ويكون ذلك احتمالياً بطبيعته. والمقصود أيضاً مرة أخرى هو حد توقعي، لأنه من غير الممكن الحصول على

## صفيحة ترانزستور سلك نانوي حساسة باللمس كالجلد البشري



لمسة حساسة

حالياً من مواد ذات مقاومة نوعية بحيث تتغير على نحو مميّز عند لمسها، لكن ميّز الأجهزة منخفض على نحو مثير للريبة، حيث تبلغ مساحة العنصورة (عنصر الصورة) 1 مم تقريباً. قام فريق من معهد جورجيا للتقانة، يقوده زهونغ لين وانغ Zhong Lin Wang، بتخفيض حجم العنصورة إلى 20-50  $\mu\text{m}$ ، وبتحسين الحساسيات المقاومة بعامل لا يقل عن 30، وذلك باستغلال الظاهرة الفيزيائية الفريدة المتمثلة في المفعول الكهروضغطي piezoelectric effect.

عندما يكون نصف الناقل الكهروضغطي خاضعاً لإجهاد ميكانيكي، فإن تناظر بلّوراته المكوّنة له يصبح مشوّهاً، مشكلاً شحنة استقطاب على امتداد طول المادة. استعمل وانغ هذا المبدأ منذ بضع سنوات لخلق مكوّن كهربائي من رزم من أسلاك نانوية من أكسيد الزنك

صنّع فريق من الباحثين في الولايات المتحدة الأمريكية صفيقات مرنة شبيهة بالجلد من ترانزستورات أسلاك نانوية تحوّل الحركة الميكانيكية إلى إشارات إلكترونية وتكون حساسة كطرف الإصبع البشري، طبقاً لما يقوله الباحثون. وهذا يعني أن الصفيقات يمكن أن تساعد الروبوبات (الإنسان الآلي) بالحدس على التحكّم بالقوة التي تستعملها للإمساك بالأشياء، ويمكن استخدامها في الأعضاء الاصطناعية البشرية، إضافة إلى أنها تقدّم لنا طرائق جديدة لتشكيل سطح بيني مع من نبات (أجهزة) إلكترونية متنوعة.

وقد برهنت عملية استنساخ الحس الإنساني للمسة الحس العميق بواسطة الإلكترونيات على وجود صعوبة بالنسبة لعلماء الروبوبات. وهناك توجه لأن يتم تصنيع الحسّات اللمسية الموجودة

## الإحساس بالأفكار

يشير كونيهارو تاكي Kuniharu Takei، المهندس في جامعة ولاية أوساكا اليابانية، والذي لم يكن مشتركاً في الدراسة، إلى أن حساسية صفيقة وانغ تعادل أفضل حساسات الضغط للمسية. ومع ذلك، فإنه يعتبرها «إنجازاً» بالنسبة للإلكترونيات التفاعلية البشرية، لأن الباحثين تمكنوا من بناء نبيطة بمقياس جهري شفافة ومرنة. ويجازف كونيهارو عندما يقول: «مع هذه النبيطة، سيكون ممكناً تصميم شاشة لمسية تتحسّس بالفعل بما يدور في عقلك، وذلك لكونها تستطيع أن تستشعر قوة الضغط للمسي»، ويضيف: «إذا كنت غاضباً أو ساخطاً، فإنك ربما تضغط الشاشة بقوة، أما إذا كنت سعيداً فربما تلمس الشاشة بطريقة إيقاعية».

وتوافق زهينان باو Zhenan Bao، وهي عالمة مواد في جامعة ستانفورد، بأن مستوى التكامل في هذا العمل يُعدُّ رائعاً. مع ذلك، وفي ظروف محاكاة الحسّ البشري للمس، فإنها تشعر بأن النبيطة ستستفيد من مجال إحساس ضغطي أوسع.

ويشير وانغ إلى أن الهدف التالي للفريق يتمثل في بناء جذاذات ترانزستور ذات كثافة أعلى وحساسية أعلى، ويضيف: «إننا أيضاً سنربط ترانزستورات كهروضغية بالإلكترونيات سليكونية وبالبيولوجيا»، ويضيف: «إنني أتوقع بأننا خلال خمس سنوات سنرى بعض التطبيقات المثيرة والمبتكرة».

محمولة شاقولياً بين الإلكترونيات: وهو ما يُعرف باسم الترانزستور الكهروضغية. وبخلاف ترانزستورات مفعول الحقل التقليدية - التي لها إلكترومد مصدر التيار، وإلكترومد للمصرف وإلكترومد للبوابة تتحكّم بالتدفق فيما بين هذه الإلكترونيات - فإن الترانزستور الكهروضغية يشتمل على إلكترومدين فقط هما إلكترومد المصدر وإلكترومد المصرف. ويعمل الاستقطاب الكهروضغية الداخلي للمادة عمل البوابة، وبذلك فهو يُنظّم التيار من خلال السيطرة على كيفية تدفق الإلكترونيات عند كلّ نهاية للسلك.

## عرض عنصريات اللمس

في العمل الجديد، صنّع فريق وانغ صفيقة وظيفية من أكثر من 8400 ترانزستور حسّاس باللمس أطلق عليها الباحثون اسم عنصريات لمس "taxels"، المأخوذ من tactile pixels. وبدءاً بركازة رقيقة شفافة، وضع الفريق أشرطة متوازية من أكسيد الإنديوم القصديري كإلكترومد سفلي. وقد لُطّخت هذه بتماسات من الذهب -لطة واحدة لكلّ سلك نانوي سيجري تشكيكه- وذلك قبل أن تُصنّع الأسلاك النانوية نفسها شاقولياً للأعلى باستخدام تقنية الإنماء الكيميائي الهيدروحراري المنخفض درجة الحرارة low temperature chemical-growth technique. وأخيراً، تُضاف تماسات الذهب والإلكترومد العلوي - وهي أشرطة وضعت بشكل متصالب مع الإلكترونيات السفلي - وذلك قبل أن تُطلى الصفيقة ككلّ بالبوليمير لختمها وحمايتها من الرطوبة والتاكل.

ويتضمّن كلّ ترانزستور 1500 سلك نانوي تقريباً، بقطر 500 nm لكلّ سلك نانوي. وبإمكان الترانزستور الكشف عن تغيّرات طفيفة في الضغط قيمتها 10 KPa -مماثلة للمسة لطيفة كما في الطباعة على لوحة المفاتيح. وربما تغطّي "جذاذة الترانزستور الكهروضغية piezotronic" المنجزة مساحة بسيطة أقل من سنتيمتر مربع واحد، ولكن إنتاج صفيقة متكاملة كهذه كان الخطوة الرئيسة في عملية انتقال المفهوم إلى التطبيقات العملية.

وبالإضافة إلى أن الروبوتات تمنح حسّاً أكثر تلاؤماً للمس، فإن هذه التقانة يمكن أن تحسّن القابلية (المقدرة) الوظيفية للأعضاء الاصطناعية البشرية، وتمنحنا طرائق جديدة للتفاعل مع الإلكترونيات، ومثال ذلك رسم التوقيع الإلكتروني المحسّن. ويوضّح وانغ قائلاً: «عندما توتّع اسمك، يمكننا أن نستعمل هذه الصفيقات لتسجيل البيانات، وكذلك القوة أو الضغط المطبّقان عندما تكتب اسمك، وكذلك السرعة التي تكتبه بها»، ويضيف: «هذا سيجعل توتقيك أكثر فعالية، وذا دلالات بُعدية أكثر، وأمناً أكثر».

# مغاوير الأرسيف المفقود

تستطيع المختارات (المقتنيات) القديمة من الأنسجة المشعّة الإجابة عن الأسئلة التي تدور في الأذهان حالياً حول مخاطر التشعيع. الآن، يقوم الباحثون ببذل جهدٍ جديّ لحفظ الخزائن.



لوحة قرب موقع معالجة الوقود المستعمل في محطة ماياك (Mayak) للطاقة النووية الروسية تحذر من الدخول إلى المنطقة الملوثة إشعاعياً

تستطيع المختارات القديمة تقديم مصدر لا يمكن إعادة تكوينه في يومنا هذا. أجريت معظم التجارب تحت شروطٍ دقيقة، عند طيفٍ عريضٍ من الجرعات الإشعاعية وعادةً لمدة تقارب زمن حياة الحيوانات. «لن نستطيع أبداً إعادة القيام بتلك التجارب على الحيوانات، وذلك لسببين يرتبطان بالتمويل والأخلاق»، هذا ما قالته السيدة غايل فولوساك (Gayle Woloschak)، الباحثة في البيولوجيا الإشعاعية بجامعة نورث ويستيرن (شمال-غرب) في شيكاغو، بولاية أيلينوي الأمريكية. «ولكن من المحتمل أن نستطيع إعادة استعمال النسيج الموروث».

خلال السنوات القليلة الماضية، قام الباحثون حول العالم بتنظيم جهدٍ لتعيين وحفظ أرسيف الأنسجة لتجارب تشعيع الحيوانات الرئيسية كافة، ونالوا دعماً من وكالات تمويل مختلفة المجالات، منها المفوضية الأوروبية والمعهد الوطني الأمريكي للسرطان ووزارة الطاقة الأمريكية.

إلا أن التحديات كانت عظيمة، فعلى الباحثين أن يظهروا بأن عمر العينات، وتقنيات الحفظ المستعملة من أجل ذلك، لم تؤثر على

تخبئ بلدة أوزرسك (Ozersk) المنعزلة بعيداً في جنوب سلسلة جبال الأورال الروسية آثاراً بالية ضخمة لتجربة سرية. فمنذ بداية فترة الخمسينيات من القرن الماضي إلى نهاية الحرب الباردة، جرى تشعيع حوالي 250 ألف حيوان بصورة منهجية (نظامية). هوجم بعضها بجسيمات ألفا ( $\alpha$ ) وبيتا ( $\beta$ ) أو أشعة غاما ( $\gamma$ )، في حين تمّ إطعام الجزء الآخر مركبات مشعّة. كانت بعض تلك الجرعات مرتفعةً إلى حدّ كافٍ لقتل الحيوانات على الفور، في حين كانت الجرعات الأخرى منخفضة جداً إلى درجةٍ بدت وكأنها غير مؤذية. بعد موت الحيوانات - فئران، جرذان، كلاب، خنازير وبعض القردة - قام العلماء بتشريح أنسجة تلك الجثث لرؤية الأذى الذي أحدثته ذلك النشاط الإشعاعي. فقاموا بأخذ شرائح رقيقة من الرئة والقلب والكبد والمخ وأعضاء أخرى ووضعها في قوالب من البرافين، من أجل تشريحها وفحصها تحت المجهر. ووضعت أعضاء أخرى في أوعية من الفورمالين. إن قيام الولايات المتحدة بهجوم نووي رهيب، كان السبب وراء رغبة الاتحاد السوفيتي سابقاً في معرفة كيف يمكن للأشعة أن تحدث أذية للأنسجة وتسبب الأمراض كالسرطان. إن المخاوف حول حوادث محلية المنشأ مثل كارثة عام 1957 التي أصابت محطة ماياك (Mayak) النووية، القريبة من أوزرسك (Ozersk)، كانت محرّضاً آخر. قام العلماء خلال تجاربهم بحفظ الأنسجة وتسجيل ملاحظاتهم بأدق التفاصيل. ووضع أرسيف مشابه في الولايات المتحدة وأوروبا واليابان خاص بالأنسجة المشعّة، حيث جرت التضحية بما يقارب نصف مليار حيوان لهذا الغرض. ولكن مع اقتراب الحرب الباردة من نهايتها، توقف جمع تلك المختارات، ولم يعد هناك إمكانية لإصلاحها.

الآن، أصبح هذا الأرسيف مهماً جداً لجيل جديد من علماء البيولوجيا الإشعاعية، خاصة الذين يرغبون في اكتشاف تأثير جرعات الإشعاع المنخفضة جداً - الأقل من 100 ملي سيفرت - كتلك التي يتلقاها عامة الناس أثناء مراجعاتهم الطبية، كعمليات المسح الإشعاعي التشخيصي-المحوسب، والأفراد القاطنون قرب المفاعلات النووية المتضررة كمنطقة فوكوشيما في اليابان.

## «لن نستطيع أبداً إعادة القيام بتلك التجارب على الحيوانات»



يوجد الآن أرشيف تفصيلي لعينات تعود لـ 23 ألف حيوان جرى تشيعيها خلال الحرب الباردة في معهد الفيزياء الحيوية لجنوب الأورال.

(ERA-PRO)، بوصفه جزءاً من جهدٍ يعود لعام 1996 لرقمنة معطيات التجارب الإشعاعية التي جرى تنفيذها في أوروبا.

في عام 2006، أخطر مدير برنامج تشيعيع الحيوان في معهد الفيزياء الحيوية لجنوب الأورال في أوزرسك (SUBI) الباحثة تايبو بوجود طيف هائلٍ من الدراسات التي تمّ تنفيذها في المعهد، «في الوقت الذي لا نعلم فيه كثيراً عن معهد SUBI سوى الاسم»، هذا ما قالته الباحثة تايبو، التي لم تكن تعلم تماماً بكل تأكيد ما الذي تتوقعه لدى وصولها مع فريقها الصغير ضمن برنامج ERA-PRO.

### خارج-الحدود

انقضت شهور عدة للحصول على موافقة الجانب الروسي لزيارة مركز أوزرسك (Ozersk) المغلق. وبعد رحلة طيران طويلة، وثلاث ساعات من قيادة السيارة وتصريح أمني طويل، استطاع الوفد مقابلة مجموعة صغيرة من الباحثين الكبار في السن في منزل مهجور ذي سقفٍ بفتحات ونوافذٍ محطمة. كانت الشرائح الزجاجية وكراسات المخابر مرميةً على أرض بعض المكاتب، في حين كانت غرف مكاتب أخرى مدفأةً وتحتوي صناديق خشبية، وكُدمت فيها شرائح وقوالب من الشمع ضمن حقائب بلاستيكية. وصل عدد العاملين في المعهد في أوج البرنامج إلى أكثر من 100 فرد، في حين لم يتجاوز العدد عشية التوقف المفاجئ للبرنامج خلال الحرب الباردة سوى 4 إلى 5 أفراد، كانت مهمتهم الحفاظ على المواد المنتجة. كانت دهشة الزوار كبيرة عند رؤية أن هؤلاء الباحثين قادرين على ربط العينات كافة، المأخوذة من حوالي 23 ألف حيوان، مع بروتوكولات مفصلة للتجارب الفردية المنفذة. «كان العلماء فرحين جداً بوجود أحدٍ من هؤلاء على أقل تقدير قادر على العناية بهذه المختارات» هذا ما قالته الباحثة تايبو. «لقد أخبروني

سلسلتي الـ DNA والـ RNA والمحتوى البروتيني لتلك العينات. وكان عليهم في آنٍ معاً أخذ تلك المعطيات الجزيئية لإظهار فيما إذا كانت كهربائية الخلية قد تعطلت عند جرعات إشعاعية منخفضة. أشارت اختباراتهم المبكرة إلى إمكانية استعمال بعض العينات، وهذا ما جعلهم يأسفون لذلك القدر الكبير من الجهود المبذولة لجمع تلك المواد حول العالم، والتي باتت مفقودة الآن.

### خزانات إشعاعية

عندما بدأ السكان الذين نجوا من تفجير قنبلتي هيروشيما وناكاراكي والعاملون المصابون بحادثة محطة مايك (Mayak)، يعانون من مرض وعائي قلبي عند معدلات طبيعية، بدا واضحاً أن تأثير الإشعاع هو أكبر بكثير من إحداث سرطان، ولكن الشيء غير المعروف هو فيما إذا كان بإمكان جرعات إشعاعية منخفضة جداً أن تزيد من خطر هذه الأمراض وغيرها وكيف يمكنها ذلك. افترض البيولوجيون، بشكل عام، أن الضرر سيكون متناسباً مع شدة الجرعة، ولكن الدراسات ضمن-الزجاج (*in vitro*) أظهرت بأن الخلايا تستطيع إصلاح تلف الـ DNA البسيط الذي يسببه الإشعاع - وأن الجرعات الإشعاعية المنخفضة من الممكن حتى أن تحمي الخلية ضد خطر التعرض المستقبلي.

«من المحتمل أن يكون هناك جرعة عتبة يكون الإشعاع دونها غير مؤذٍ»، هذا ما قاله وولفغانغ فايس (Wolfgang Weiss)، رئيس قسم الوقاية الإشعاعية والصحة في المكتب الاتحادي الألماني للوقاية الإشعاعية في ميونخ. لم تُلقِ الدراسات الوبائية لعموم الناس المعرضين للأشعة أثناء قيامهم بعملهم أو الحوادث النووية أو الإجراءات الصحية الضوء الكافي حول هذا الموضوع. فبعض تلك الدراسات استندت إلى عددٍ قليل جداً من الناس غير كافٍ لكشف ما يمكن أن تحدثه حوادث مرضية متزايدة خفيفة في المرض، وبالنسبة للآخرين، ليس واضحاً ما هي الجرعة المتلقاة من قبل الأفراد. لهذا، ورغم أن وكالات الوقاية الإشعاعية تضع قيوداً نموذجية للتعرض أثناء العمل (من أجل الصناعة النووية، على سبيل المثال) بقيمة متوسطة تقدر بـ 20 ملي سيفرت في السنة، ليس لدى العلماء معطيات متينة يمكن بالاستناد إليها وضع استنتاجات شديدة الوثوقية حول حدّ الإشعاع، أي المقدار الذي يمكن أن يكون حقاً حدّاً آمناً. يمكن أن تذخر أنسجة الحيوانات القديمة ببعض الإجابات.

في شهر شباط/فبراير لعام 2007، كان البحث عن مثل هذه الأنسجة المبرر لقيام الباحثة سويل تايبو (Soile Tapio) بمهمة من أحد مراكز البحوث النووية الألمانية السابقة، وهو مركز هيلمهولتز في ميونخ، إلى مركز أوزرسك (Ozersk) القاسي والكئيب. كانت تايبو تقوم بتنفيذ جزءٍ من برنامج بعنوان «وقاية الأرشيف البيولوجي الإشعاعي الأوربي

على سبيل المثال، أنه باستعمال التقانة التي تعرف بتفاعل السلسلة البوليميرية لتضخيم الجينات، يمكنها كشف التحولات أو إعادة تنظيم جينات السرطان النوعية في الأنسجة المشعّة التي تحولت إلى أنسجة مسرطنة. في حين وضعت الباحثة تايبو تقانات بروتينية معيارية، يمكن تطبيقها على بعض الأنسجة القديمة، وتقوم مجموعات متعددة بدراسة ما إذا كانت السلاسل المجهرية لك RNA - التي تساعد على التحكم بالهوية الجينية، والتي تكون مستقرة نسبياً - موجودة في العيّنات.

العلماء على أهبة الاستعداد الآن لتطبيق مثل هذا العمل على الأنسجة المورثة بصورة منهجية. فالباحثة تايبو، على سبيل المثال، بصدد القيام بعملٍ حول أنسجة القلب المغمورة بالبارافين من فئران مشعّة خلال الدراسات القديمة لروسيا والولايات المتحدة. وهي ترغب في تعيين أية إشارات ضرر، يمكن بواسطتها تفسير الحالات المرتفعة لمرض الأوعية القلبية للأفراد الناجين من التفجيرات النووية. "إن العلماء الذين قاموا بهذه الدراسات كانوا يبحثون عن السرطان فقط، ولكن يمكن الآن البحث عن أمراض أخرى، نعلم بأنها ذات صلة"، هذا ما تقوله الباحثة تايبو.

لا أحد يتوقع أن تكون الإجابات سريعة وسهلة. تستطيع الدراسات تعيين العديد من الاستجابات الجزيئية، التي لا علاقة لها بالمرض. «إن استجابة إجهاد الخلايا لأية جرعة من الإشعاع - أدنى من الجرعات التي تدمر الخلية - تُعدُّ شبكة معقدة من النشاطات، من المحتمل أن تؤثر على العديد من الطرق الجزيئية المختلفة»، بحسب الباحثة تايبو. ويتوقع علماء البيولوجيا الإشعاعية أن تتغير جرعة «الأمان» الحرجة المستقبلية بين الأنسجة وبين الأفراد.

ولكن، على أقل تقدير، صارت أنسجة أوزرناك مُنظمة ومرتبّة، وفقاً لرغبة من قام بحراستها. وسيتمّ نقلها قريباً إلى أبنية تخزين بمواصفات فنية رفيعة تمّت إشتادتها في فناء معهد SUBI، في أن معاً مع أنسجة بشرية مأخوذة من العاملين الذين تعرضوا للإشعاع في محطة ماياك (Mayak) النووية. يأمل الباحثون أن تجد الأنسجة الحيوانية حياة تجريبية جديدة في هذا الوقت على صعيدٍ دولي.

مرات عدة برغبتم بتصنيفها وترتيبها قبل وفاتهم». في الوقت ذاته كانت تجري عملية إنقاذ أخرى في الولايات المتحدة، تقوم بها الباحثة فولوساك (Woloschak) في منتصف تسعينيات القرن الماضي، التي كانت تعمل على عيّنات تعود لـ 7000 كلب صغير و50000 فأر جرى تشيعها خلال تجارب أجريت في مختبر بحوث أرغون (Argonne) بولاية أيلينوي بين عامي 1969 و1992. ولكن، مع انتقال الباحثة فولوساك إلى جامعة نورث ويسترن كان فزعها كبيراً عندما علمت بأن تلك العيّنات جرى رميها خارجاً، وهي بحاجة لموافقة أمنية من قسم الطاقة لتخزينها في جامعة نورث ويسترن.

«وعندما تبين للجمهور بأنه لدي أنسجة مختبر أرغون كافة، بدأ الجمهور يسأل فيما إذا كان باستطاعتي حفظ أنسجتهم أيضاً»، قالت الباحثة فولوساك. تُعدُّ جامعة نورث ويسترن الآن المقر الرسمي للمواد كافة حول دراسات تشيع الحيوان في الولايات المتحدة الأمريكية، حيث قدّرت الباحثة فولوساك بأنها تلقت حتى الآن 20 ألف عينة. ولكنها اكتشفت أيضاً بأن العديد من تلك العيّنات قد تعرّض للتلف، من ضمنها تلك العيّنات التي تعود إلى دراسات واسعة على الفئران، أجريت في مختبر أوك ريدج (Oak Ridge) الوطني في ولاية تينيسي وبعض الدراسات ذات المقياس الكبير، التي جرى القيام بها على الكلاب في جامعة كاليفورنيا. قالت الباحثة فولوساك بأنها «شعرت بالخيبة والغضب لقيام الحكومة بإنفاق ملايين عديدة من الدولارات - وجهود بشرية هائلة - من أجل القيام بدراسات سيكون مصيرها الإتلاف بسبب مخاوف حول المكان».

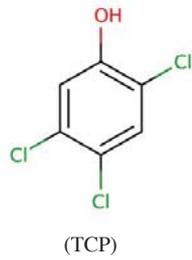
جرى أيضاً إتلاف مختارات من الأنسجة في أماكن أخرى، شملت تلك التجارب التي أجريت في جامعة هيروشيما في اليابان والوكالة الوطنية الإيطالية للتقانات الجديدة ومركز الطاقة والتنمية الاقتصادية المستدامة في كازاخستان ومجموعة مراكز بحوث الصحة البريطانية في هارويل (Harwell).

يدرك العلماء أن وضع الأيدي على أنسجة قديمة سيكون فقط التحدي الأول: سوف يكون عليهم لاحقاً العمل على التأكد فيما إذا كانت الجزيئات الحيوية في المواد ما تزال قابلة للكشف والقياس. فهم يريدون تعيين وتحليل الطرق الجزيئية المتأثرة بجرعات تشيع ضعيفة لرؤية كيف تتكيف خلايا الأنسجة المختلفة - أو تفشل في التكيف - مع ذلك الإجهاد، أو كيف يمكن لها فيما بعد الانخراط في طريق المرض. هم يرغبون أيضاً في كشف أنماط جزيئية بيولوجية يمكن أن تساعد على تحديد قدر الأشعة التي يتلقاها الفرد أو فيما إذا كان هو أو هي، بشكلٍ خاص، عُرضةً لأشعةٍ أحدثت مرضاً.

قدّمت أعمال الباحثة فولوساك خلال تسعينيات القرن الماضي بعض الأمل حول عيّنات الفئران لمختبر أرغون القديم. فقد وجدت،

# مراد كيميائية عضوية ملوثة للبيئة ... أخطر ما صنعه الإنسان

في نهاية الستينيات من القرن الماضي، كان العلماء على علم بوجود مواد ثانوية تُسمى الديوكسينات في مبيدات عشبية معينة، وبخاصة تلك الحاوية على المبيد العشبي (5.4.2-ثلاثي كلورو فينول (TCP))، أو المبيدات المشتقة منه:



فمن أقدم الحوادث التي ظهرت كانت حادثة وقعت عام 1949، عندما انسكبت حاوية تحتوي على هذا المبيد، وتعرض العمال لمرض يُسببه وجود الكلور في الديوكسينات، وهو مرض يمكن أن يقود إلى تشوهات خلقية دائمة. وجرى فيما بعد تحديد المذنب، الموجود في الخليط التفاعلي للمبيد العشبي، بأنه الديوكسين (8.7.3.2-ثلاثي كلورو ثنائي بنزو-بارا-ديوكسين).

في العام 1990 تغير قانون حظر الاطلاع على معطيات الأبحاث المعنية بهذا الموضوع في ألمانيا، وتبين وجود زيادة في الأمراض لدى العمال المعرضين لبعض المبيدات العشبية، وكانت الزيادة مثيرة بشكل خاص في أمراض الغدد والجهاز الهضمي والتنفسي وفي تشوهات الجهاز العصبي المحيطي. وأشارت الدراسات الألمانية إلى أن الديوكسين يُشوش كلاً من منظومة المناعة وآليات التحكم الهرموني لدى الإنسان.

صدر قانون فدرالي في الولايات المتحدة في العام 1979 يحظر استعمال بعض المبيدات العشبية الحاوية على المبيد TCP، ولا تزال بعض الدول في العالم الثالث تستعمل هذه المبيدات دون علم بمخاطرها على البيئة وعلى الكائنات الحية، بما فيها الإنسان.

أدت نتائج الأبحاث في هذا المجال إلى تصنيف نوعين من المواد الخطرة:

1- الديوكسينات Dioxins، مجموعة من المواد الكيميائية العضوية العطرية، وبالتحديد الديوكسينات ثنائية بنزو-بارا- المتعددة الكلورة (PCDDs)، نذكر منها الديوكسين الأكثرسمية:

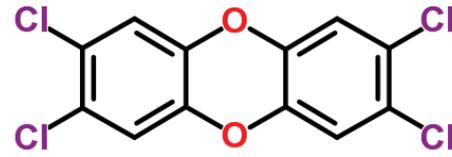
مع بدء حربها في فييتنام عام 1962، أطلقت الولايات المتحدة الأمريكية برنامجاً أثار جدلاً حتى يومنا هذا يتعلق باستعمال المواد الكيميائية وتأثيراتها على البيئة. لقد استعملت الولايات المتحدة آنذاك طائرات متخصصة لرش مناطق مختارة من الغابات بكميات هائلة من المبيدات المنزورة (المزيلة) لأوراق الأشجار. وكان الهدف من إزالة أوراق الأشجار هو الكشف عن عناصر المقاومة الفييتنامية في تلك الغابات، علماً أن هذا البرنامج لم يُثبت جدواه.

وكانت المادة الأكثر استعمالاً في تلك الحرب هي العامل البرتقالي (تسمية صحفية)، وهو اسم يعود إلى الشريط البرتقالي المرسوم على الحاويات المعبأة فيها هذه المادة. واستناداً إلى مصدر التصنيع والجهة المسؤولة عن رقابة الجودة لهذا المبيد العشبي، وُجد أن العامل البرتقالي مشوبٌ بمواد كيميائية عُرفت باسم الديوكسينات Dioxins (بتركيز يتراوح بين 2 و50 ميكروغرام/غرام). وفيما بعد ساد اعتقاد واسع أن هذه الديوكسينات سببت نفوق أعداد كبيرة من الحيوانات. إضافة إلى ذلك، وبسبب الانتشار الواسع للعامل البرتقالي في الأراضي الزراعية المجاورة للغابات، فقد عُزي للديوكسينات الزيادة في موت الأجنة والولادات المشوهة بين أطفال فييتنام.



بعد حرب فييتنام، ادعى المحاربون الأمريكيون القدامى الذين تعرضوا للعامل البرتقالي خلال الحرب بأن الأمراض التي يعانون منها بعد عودتهم إلى أمريكا، بما في ذلك السرطان والتشوهات الوراثية لدى أطفالهم سببها وجود الديوكسينات في العامل البرتقالي. وفيما بعد، وُجدت علاقة مؤكدة بين هذه الادعاءات والعامل البرتقالي المشوب بالديوكسينات. وفي العام 1998 تابع المعهد الطبي في الولايات المتحدة أبحاثاً للكشف عما إذا كان العامل البرتقالي قد سبب أمراضاً مميتة مثل مرض الهودجكين Hodgkin's disease أو سرطان الغدد اللمفاوية أو سرطان البروستات، إلخ.

WHO TEF	International TEF	المركب
		بعض الديوكسينات:
1.0	1.0	2,3,7,8-TCDD
1.0	0.5	1,2,3,7,8-PCDD
0.1	0.1	1,2,3,4,7,8-HCDD
		بعض الفورانات:
0.1	0.1	2,3,7,8-TCDF
0.05	0.05	1,2,3,7,8-PCDF
0.5	0.5	2,3,4,7,8-PCDF



(8.7.3.2-رباعي كلورو ثنائي بنزو-بارا-ديوكسين (TCDD))

وتُظهر الصورة التالية بعض الأثر الذي تتركه هذه المادة على الإنسان:



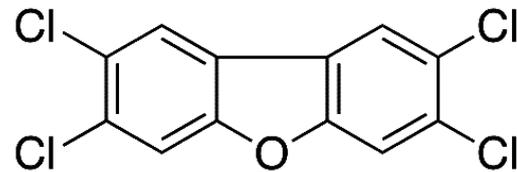
قبل التسمم بالديوكسين

بعد التسمم بالديوكسين

وأخرى مُعتمَدة من قبل منظمة الصحة العالمية (WHO TEF). إن قيم TEF هي عبارة عن تقديرات فقط، ويمكن استعمالها للحصول على فكرة حول كثافة وجود هذه المواد الناجمة عن مصدر ما. فإذا كانت كمية الديوكسينات أو الفورانات عند مصادر انبعاثها معروفة، يمكن تقدير الخطورة النسبية لكل من هذه المواد، أو لكميتها الإجمالية. فعلى سبيل المثال، إذا انبعثت مادة الـ 2,3,7,8-TCDD بكمية 0.5 غرام في اليوم، ومادة الـ 1,2,3,7,8-PCDF بكمية 2.0 غرام في اليوم، فالكمية الإجمالية المنبعثة هي 2.5 غرام. وبالتالي، بناءً على ما جاء في الجدول أعلاه، سيكون معامل مكافئ السمية الإجمالي:  $(0.5 \times 1.0) + (2.0 \times 0.05)$ ، أي ما يعادل 0.6 غرام من الـ 2,3,7,8-TCDD في اليوم.

لا تتخرَّب هذه المواد الكيميائية بسهولة بفعل العوامل الفيزيائية أو البيولوجية، وكلما تزايد عدد ذرات الكلور في جزيء المركب، زادت استقراريته وبالتالي ديمومته في مكان التلوث. تُعدُّ انحلالية هذه المواد في الماء ضعيفة جداً، إنما تنحل بسهولة في المحلات العضوية وفي الدهون والترية. يحدث ادمصاص هذه المواد الكيميائية على سطوح حبيبات التربة، ولا يحدث تحرُّرها بسهولة. ويقدر عمر النصف لأخطرها سميّة بعشر سنوات على الأقل، كما أن الديوكسينات تتراكم في الأنسجة الدهنية للسماك والحيوانات الأخرى.

غالباً ما تكون مركبات PCDDs على شكل مواد ثانوية مرافقة لتصنيع بعض المبيدات العشبية، والمواد الحافظة للأخشاب ومركبات كيميائية أخرى. فالمبيدات العشبية المستعملان في العامل البرتقالي يشتملان أصلاً من المركب ((2,4,5-trichlorophenol (TCP)). وهذا المبيدات العشبية، المترافقان بالمادة الشائبة TCDD، هما:



(8.7.3.2-رباعي كلورو ثنائي بنزوفوران (TCDF))

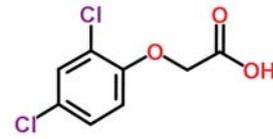
عُرف 75 مركباً من النوع الأول (الديوكسينات) و135 مركباً من النوع الثاني (الفورانات)، ويُعدُّ كلا النوعين من الملوّثات العضوية الخطيرة المُعدَّة. اعتمدَ المركب 8.7.3.2-رباعي كلورو ثنائي بنزو-بارا-ديوكسين (TCDD)، بصفته الأكثر سميّة، معياراً لتقدير سميّة الديوكسينات الأخرى والفورانات، وأُسند إليه الرقم (1.0) بصفته معامل مكافئ السميّة Toxic Equivalence Factor (TEF) لهذا الديوكسين. يُظهر الجدول الآتي معاملات مكافئات السميّة لبعض مركبات الديوكسين والفوران، المُعتمَدة دولياً (International TEF)

يعود تشكل الديوكسينات في الحراقات إلى عدم كفاية الأكسجين خلال عمليات الحرق، وإلى انخفاض درجات الحرارة وزمن البقاء القصير في حيز الحراق.

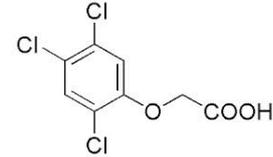
تستند المخاوف بشأن الديوكسين إلى ما تسببه الكميات الصغيرة جداً من عيوب خلقية ووفيات لدى الحيوانات الصغيرة (كما هو مبين في الجدول الآتي):

جرعة الديوكسينات المميتة لأنواع مختلفة من الحيوانات

LD <sub>50</sub> /μg · kg <sup>-1</sup>	الحيوان
<1	خنزير هندي
22	جرذ (ذكر)
45	جرذ (أنثى)
<70	قرود
115	أرنب
114	فأر
>300	كلب
>500	ضفدع كبير
5000	همستر



2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) و



2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid (2,4,5-T)

يمكن أن تنتج الديوكسينات والفورانات أيضاً خلال عملية حرق المواد المحتوية على الكلور، عندما تستعمل الحراقات القديمة وغير الفعالة. وفيما مضى، كانت عملية حرق النفايات الصلبة الحاصلة في المدن تشكل المصدر الرئيس للديوكسينات والفورانات (كما هو مبين في الجدول الآتي):

مصادر انبعاث الديوكسينات والفورانات وكمياتها

عدد الغرامات الإجمالية المقدر في العام 1998	عدد الغرامات الإجمالية المقدر في العام 1990	
18	35	محطات إنتاج الطاقة (المستعملة للفحم والنفط)
17	38	احتراق الفحم (منزلي وصناعي)
26	26	احتراق الخشب (منزلي وصناعي)
43	42	مصانع اللبيدات
14	12	مصانع كيميائية
22	27	صناعة المعادن غير الحديدية
14	605	حرق النفايات الصلبة للمدن
24	51	حرق النفايات الطبية
3	5	حرق حمأة مياه الصرف الصحي
4	6	حرق النفايات الكيميائية
11	28	النقل الطرقي، بنزين/ديزل
64	121	كوارث الحرائق والحرائق الزراعية المفتوحة
65	86	مصادر أخرى
325	1079	الإجمالي

إن مفعول الديوكسين TCDD المميت للحيوان هو ما قاد إلى اعتقاد بعض الناس بأن الديوكسينات تمثل المواد الكيميائية الصناعية الأكثر سمية، فقال عنها مدير وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة: «إنها أخطر مادة صنعها الإنسان»، وقال نائبه: «إن 85 غراماً من الديوكسين في مياه نيويورك وضواحيها تكفي لقتل كل كائن حي»، ومع أن تأثيراتها على الإنسان لم تثبت بعد، يُعتقد بأنها تسبب إجهاضات، وتشوهات خلقية، ومشاكل سلوكية وعصبية حادة.

# الموجات الراديوية تقيس التغيرات الحرارية للغلاف الجوي



مخدم ساعات أمواج راديوية منعكسة عند درجات حرارة متغيرة

الراديوية ذات الترددات المنخفضة جداً والتي تنشأ من منارات ملاحية بعد ارتدادها عن الغلاف الأيوني، الذي يحتوي على حدّ الغلاف الأوسط. هذا، وتتأثر قوة الإشارة المستلمة بكثافة الغلاف الأيوني والذي بدوره يكون ناتجاً عن الحرارة. كان الفريق قادراً على رصد علاقة واضحة بين درجات حرارة الغلاف الجوي العلوي وسعة الموجات الراديوية المنقطة. وقد أُجريت الحسابات من انبعاثات ثنائي أكسيد الكربون المقيسة بواسطة تقنية أجهزة سبر الغلاف الجوي باستعمال القياس الإشعاعي للانبعاث عريض الحزمة SABER<sup>(2)</sup>، التي قام بها ساتل الديناميكية النشطة للغلاف الحراري والغلاف الأيوني والغلاف الأوسط TIMED<sup>(3)</sup>.

يقول بعض الباحثين إنه يمكن استخدام الموجات الراديوية ذات الترددات المنخفضة جداً لقياس درجات حرارة حدّ الغلاف الأوسط mesopause<sup>(1)</sup>، وهو ما يُعرف بالحدّ الأدنى من الغلاف الجوي العلوي. إن هذا الأسلوب الجديد يوفر طريقة أرخص وأكثر شمولية في تحليل آثار تغيّرات المناخ في المدى البعيد على الغلاف الجوي العلوي، وكذلك في تحليل ظواهر أخرى قصيرة المدى، مثل العواصف الشمسية أو الرعدية.

إن زيادة مستويات غازات الدفيئة على سطح الأرض -مثل ثنائي أكسيد الكربون- تعكس الأشعة تحت الحمراء الهاربة وتعيدها إلى الأرض مما ينتج عنه مفعول حراري. لكن التراكيز العالية لهذه الغازات في الجزء العلوي من الغلاف الجوي يكون لها مفعول معاكس. ففي هذه الكثافات الجوية المنخفضة، يقوم ثنائي أكسيد الكربون بدور مغاير لدوره السابق، حيث يشع الحرارة ويعكسها نحو الفضاء، وهو يفعل ذلك عند هذه الارتفاعات بصورة فعّالة أكثر من الأكسجين أو النتروجين، والمكونات الرئيسية الأخرى للغلاف الجوي.

عندما يبرد الغلاف الجوي العلوي، فإنه أيضاً يتقلص تدريجياً ليصبح أكثر كثافة ويقترب أكثر من سطح الأرض. وبالإضافة إلى ذلك، إن هذا التبريد يعدّل مسارات انتشار الموجات الراديوية التي تمرّ عبر الغلاف الجوي العلوي.

## ترابط واضح

تعتمد طريقة الباحثين في عملهم على قياس سعة الموجات

1- طبقة في الغلاف الجوي تقع بين الغلاف الأوسط (ميزوسفير) والغلاف الحراري (ترموسفير) على ارتفاع بين 80-85 كيلومتراً تبدأ فيها درجات الحرارة بالارتفاع مع زيادة الارتفاع. (المدقق العلمي)

2- SABER: اختصار لـ:

Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry. (المدقق العلمي).

3- TIMED: اختصار لـ:

Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetic Dynamics (المدقق العلمي)

الغلاف الجوي على الصعيد العالمي"، ويضيف أيضاً: "أن هذه المنهجية الجديدة يمكن أن تساعد في مواضيع علمية مهمة، مثل تأثير تغيّر المناخ العالمي في الغلاف الجوي العلوي".

ولتدعيم هذه الدراسة، يبحث فريق العمل حالياً في إمكانية رصد المزيد من الموجات الراديوية، ولفترات طويلة، من مواقع مختلفة من جميع أنحاء العالم. هذا، وتستخدم دراستهم الحالية محطات راديوية موجودة في اليونان، ونيوزلندا. وبالإضافة إلى ذلك، يتطلع فريق العمل إلى مقارنة نتائجه مع مصادر أخرى لدرجات الحرارة وبيانات المؤشرات للطاقة الشمسية.

ويقول مؤلف المقال كولين برايس Colin Price: «لقد وجدنا علاقة عدم تطابق قوي بين سعة/شدة الأمواج الراديوية المنخفضة التواتر التي قيست في ساحتنا، وتغيّرات في درجة حرارة الغلاف الجوي العلوي/الغلاف الأيوني المنخفض، ويضيف برايس: «لقد وجدنا أن التبريد/التسخين (الاحتراق) للغلاف الأيوني المنخفض (على ارتفاع 90 كم تقريباً) يسبب زيادة/نقصاناً في سعة الأمواج الراديوية».

تضيف هذه الدراسة الجديدة الكثير إلى معرفتنا حول التغيّرات الحاصلة في درجات الحرارة في الغلاف الجوي العلوي. وفي حين أن الدافع الأساسي لمثل هذه الترجّحات هو الشمس التي تفسر من 60-70% من التغيّرات، إلا أنه لم يكن ممكناً في السابق قياس الطبيعة الحقيقية للانحرافات المتبقية بصورة منهجية.

#### قياسات رخيصة ومستمرة

سابقاً، كانت الدراسات المباشرة لدرجات حرارة حدّ الغلاف الأوسط صعبة ومكلفة، وذلك لأن المنطقة تكون منخفضة جداً ليتم القياس على الطبيعة بواسطة السواتل المدارية، وكذلك مرتفعة جداً بالنسبة للطائرات أو بالونات الطقس. وقد أفاد الفريق بأن أجهزته الأرضية سهلة الاستخدام وأكثر فعالية إلى حدّ كبير من حيث التكلفة، إذ إن كل هوائي للتردّدات المنخفضة جداً مع حاسوب وتجهيزاته يكلف فقط حوالي بضعة آلاف من الدولارات. وتسمح الطريقة الجديدة أيضاً بالقياس المستمر والمتواصل لمنطقة معينة من الجزء العلوي من الغلاف الجوي، وهي مهمة غير ممكنة حتى مع القياسات غير المباشرة من السواتل المدارية مثل بعثة TIMED لناسا.

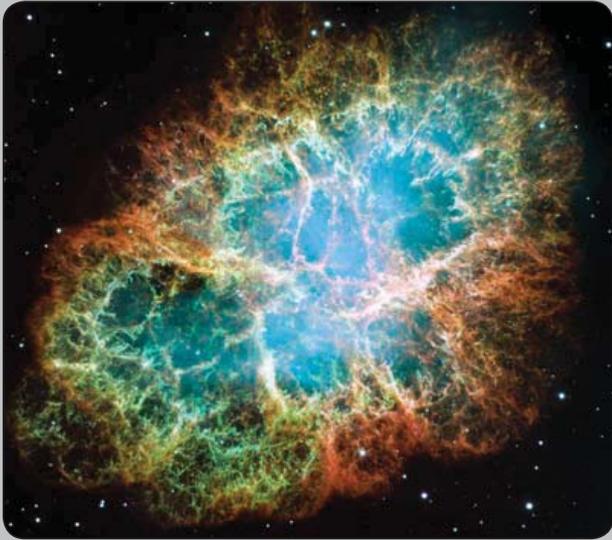
بالإضافة إلى ذلك، فإن تأثير الغازات المسببة للاحتباس الحراري (غازات الدفيئة) على الغلاف الجوي العلوي تكون أكثر وضوحاً مما هي عليه على مستوى سطح الأرض. فكل درجة واحدة من التسخين في الغلاف الجوي السفلي تقابلها 10 درجات من التبريد في الغلاف الجوي العلوي. ووفقاً لبرايس، فإن هذا التأثير المتزايد يجعل تأثير التغيّر المناخي أسهل للرصد.

#### المزيد من العمق في المشاهدات

يقول تيتوس يان Titus Yuan، وهو فيزيائي من جامعة ولاية أوتاه والذي لم يشارك في هذه الدراسة: "يوفر هذا الاكتشاف إمكانيات كبيرة من الناحية الاقتصادية لسبر هذه المنطقة الغامضة من

نُشر هذا الخبر في مجلة ChemMatters, April 2012 ترجمة  
نسرين شحادة، هيئة الطاقة الذرية السورية.

# أولى جزيئات غاز نيل وجدت في الفضاء



تشكّل الأرغون في النجم الميت الذي آل إلى برج السرطان

لقد رصد فريق دولي من علماء الفلك بالمصادفة الجزيئات الفضائية الأولى التي لها سلوك غاز نيل، الأرغون. أوحى الاكتشاف المدهش، في حطام نجم منفجر، بالتركيب النظيري للعنصر، مما يؤكد التوقعات المتوارثة بأن الأرغون قد تشكل في نجوم ميتة كهذه.

بمجرد أن تدعى الغازات بالخاملة، فهذا يعني أنها عناصر العمود الأخير من الجدول الدوري، حيث تكون طبقات إلكتروناتها الخارجية مغلقة (مكتملة) مما يمنعها في العادة من تبادل الإلكترونات مع ذرات أخرى لتشكيل جزيئات. ولكن، في عام 1962 اكتشف الكيميائيون جزيئات تحتوي على الكزنيون فأصبحوا اليوم يسمون هذه العناصر الغازات النبيلة بدلاً من ذلك. ولكن لا أحد على الإطلاق رأى في أي وقت مضى جزيئاً في الفضاء يأوي غازاً نبيلًا، على الرغم من أن أحد هذه الغازات - وهو الهيليوم - يُعدّ العنصر الثاني الأكثر وفرة في الكون.

كان مايك بارلو MIKE BARLOW، وهو عالم فلك في الكلية الجامعية بلندن، وزملاؤه يستخدمون المرصد الفضائي هرشل لدراسة بقايا المستعر الفائق، بما في ذلك برج السرطان المعروف جيداً. نجمت هذه البقايا عندما نفذ القوقود من نجم ضخم يبعد 6500 سنة ضوئية عن الأرض في برج الثور، محدثاً شرارة أدت إلى انفجار ساطع شهده أسلافنا في عام 1054.

## البحث عن جزيئات شائعة

كان بارلو وزملاؤه يريدون أن يرصدوا غبار برج السرطان، الذي يشع حرارته بأطوال موجية تقع في مجال تحت الأحمر البعيد التي كشفها هرشل. كما أنهم تفحصوا أطياف هرشل من أجل خطوط مصدرها جزيئات مشتركة مثل أحادي أكسيد الكربون.

لم يعثر العلماء على هذه الجزيئات إطلاقاً. لكنهم، بدلاً من ذلك، رأوا خطي إصدار غامضين، أحدهما عند الطول الموجي 243 ميكرون، والآخر عند 486 ميكرون، وهو ضعف الطول الموجي للأول

بالضبط. قال بارلو: "لقد كانت هبةً جاغتنا بلا مقابل أن كان ذلك جزيئاً بسيطاً ثنائي الذرة - ذرتان تدوران حول بعضهما بعضاً". وبعد الفشل في إيجاد توافق بين جزيئات شائعة ثنائية الذرة، أدرك العلماء أنهم قد كانوا يراقبون الأيون الجزيئي لهريد الأرغون، الذي صيغته الكيميائية هي ARH+ .

يقول بارلو، "لقد كان ذلك مفاجأة لنا، فلا أحد كان قد تنبأ بهذا الجزيء". نحن ندعو هذا الاكتشاف باكتشاف المصادفة لنجعله يبدو علمياً أكثر قليلاً، لكنه كان حدثاً عرضياً - أي اكتشاف محظوظ". وربما يتشكل الجزيء المميز عندما يقابل أرغون أحادي التآين (أي ذرة أرغون فقدت أحد إلكتروناتها) هيدروجيناً جزيئياً (H2) وينتزع منه ذرة هيدروجين.

الأرغون (الذي عدده الذري 18) هو العنصر الحادي عشر الأكثر وفرة في الكون وهو الغاز الثالث الأكثر شيوعاً في جو كواكب الزهرة والأرض والمريخ. يشكل هذا العنصر 0.93% من الهواء الذي نتنفسه. وإن معظم الأرغون الأرضي هو الأرغون-40، الذي يأتي من تفكك البوتاسيوم-40 المشع في الصخور.

## نظير الأروغون الأخف

وولسي، فالعنصر نشأ أساساً في المستعر الفائق. وبالمقابل، لو ولد النجم وفق الرقم الأكبر، لكان أنتج معظم الأروغون فيه قبل وقوع الانفجار، خلال الأشهر القليلة الأخيرة من حياته.

ينبغي على النجوم الضخمة أيضاً أن تُنتج كميات أصغر من نظير أروغون آخر، مثل الأروغون-83. وإذا استطاع العلماء الكشف عن هذا النظير، لكان بإمكانهم أن يقارنوا وفرة الأروغون-63. ويقول بارلو: «إنه اختبار مباشر لنظرية التفاعل النووي في المستعر الفائق». كما أنه يأمل في استعمال المقاريب الأرضية للبحث في برج السرطان عن نظائر الأروغون الأثقل، لأن المرصد الفضائي هرشل توقف مؤخراً عن الرصد.

نحن ندعو الاكتشاف باكتشاف المصادفة لنجعله يبدو علمياً أكثر قليلاً، لكنه كان حدثاً عرضياً -اكتشاف محظوظ. تلك هي مقولة مايك بارلو من الكلية الجامعية بلندن.

لكن الباحثين في الجانب النظري قد تنبؤوا منذ فترة طويلة بأن النجوم الضخمة ينبغي أن تصنع كميات كبيرة من نظير أروغون أخف، الأروغون-36، الذي يحوي عددين متساويين من البروتونات والنترونات. وكان علماء فلك آخرون قد كشفوا بالفعل عن ذرات أروغون في برج السرطان. «لكن لم يكن هناك دليل مباشر على أنها الأروغون-36»، كما يقول بارلو، لأن الخطوط الطيفية الذرية لنظائر الأروغون المختلفة لها تقريباً الأطوال الموجية نفسها، مما يؤدي إلى صعوبة التمييز بينها.

أما بالنسبة للجزيئات، فإن المهمة سهلة، لأن الجزيئات التي تحتوي على نظائر أروغون مختلفة تصدر الإشعاع عند أطوال موجية مختلفة بشكل ملحوظ. لذلك، كشفت جزيئات هيدريد الأروغون التركيبية النظرية للعنصر: فهو الأروغون-36، تماماً كما تتوقع النظرية.

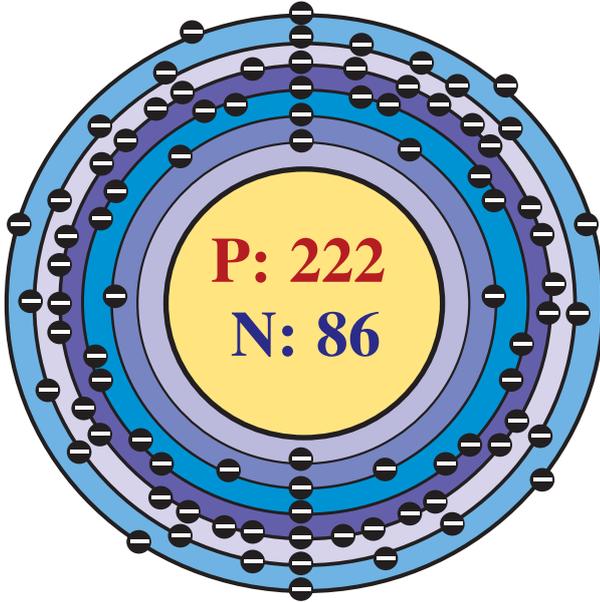
## المعتقدات المرعية مؤيدة

ويقول عالم الفلك ستان وولسي WOOSLEY، وهو خبير المستعر الفائق في جامعة كاليفورنيا في سانتا كروز، والذي لم يشارك بالاكتشاف: «من الجميل أن نرى معتقدات مرعية مؤيدة. إن النجم الضخم، في أوائل حياته، يضيء من خلال تحويل الهيدروجين إلى هيليوم، كما تفعل الشمس. ثم يحترق الهيليوم في النجم مكوناً كربوناً وأكسجيناً، ويستمر ذلك ليؤدي في نهاية المطاف إلى تشكل عناصر أثقل. ينشأ الأروغون خلال مرحلة حرق الأكسجين، حيث تصطدم إحدى نوى الأكسجين-16 بنواة أخرى، مشكلة الكبريت-32. وتكون نواة الكبريت في حالة مثارة وتصدر عادة جسيم هيليوم-4، وبذلك تتحول إلى سليكون-28. كما تصطدم جسيمات الهيليوم-4 بنواتي السليكون-28 والكبريت-32 لتشكل الأروغون-36 وأيضاً الكالسيوم-40.

يقول وولسي إن توقيت تشكل الأروغون يتوقف على النجم نفسه، حيث يعتقد علماء الفلك أنه وُلد أضخم من الشمس بثماني مرات إلى ست عشرة مرة. وإذا كان الرقم الأقل هو الصحيح، يقول

## نافذة على عناصر الجدول الدوري

## الرادون



الرمز:	Rn
العدد الذري:	86
الكتلة الذرية النسبية:	222
درجة انصهاره:	-71.15 °C
درجة غليانه:	-61.85 °C
كثافته سائلاً عند درجة الغليان:	4.4 g.cm <sup>-3</sup>
حالات الأكسدة:	6, 2, 0

فهو يُنتج عناصر مشعة جديدة تسمى وليدات الرادون أو نواتج اضمحلاله. وعلى عكس الرادون الغازي بحد ذاته، تكون وليدات الرادون صلبة وتلتصق بسطوح الأجسام الصلبة، بطريقة تشابه التصاق حبيبات الغبار الموجودة في الهواء. وإذا ما تم استنشاق مثل هذه الملوثات، يمكن لها أن تلتصق على جدران مسارات الهواء الداخل إلى الرئتين مما يزيد من خطر سرطان الرئة.

وعلى عكس جميع العناصر الأخرى الوسيطة في سلاسل الاضمحلال المذكورة أنفاً، يكون الرادون بحالة غازية وبالتالي يتم استنشاقه بسهولة. وهكذا، حتى في الجيل الحالي من المفاعلات النووية، يُعدُّ الرادون المتولد بشكل طبيعي مسؤولاً عن غالبية تعرّضات الجمهور للإشعاع المؤيّن. وغالباً ما يكون الرادون المساهم الأكبر في جرعة الإشعاع الخلفية، وهو الأكثر تغيّراً بين مكان وآخر. وعلى الرغم من عمره القصير، يمكن لغاز الرادون من بعض المصادر الطبيعية أن يتراكم في المباني بتراكيز أكثر من التراكيز العادية، وخاصة في المناطق المحصورة مثل السفائف والطوابق السفلية. ويمكن أيضاً أن يكون موجوداً في بعض مياه الينابيع والينابيع الساخنة.

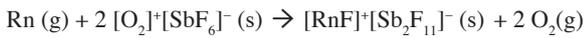
أظهرت الدراسات الوبائية وجود صلة واضحة بين استنشاق تراكيز عالية من غاز الرادون وحدوث سرطان الرئة. وهكذا، يُعدُّ

الرادون عنصر كيميائي رمزه Rn وعدده الذري 86، وهو غاز نبيل. كما أنه نشط إشعاعياً وعديم اللون والرائحة والمذاق، موجود في الطبيعة بصفته مُنتجاً مباشراً لاضمحلال اليورانيوم والثوريوم. يُعدُّ <sup>222</sup>Rn أهم نظائر الرادون المستقرة، بعمر نصف قدره 3.8 أيام. ويُعدُّ الرادون من أكتف المواد التي تكون في الحالة الغازية في الشروط العادية من الضغط ودرجة الحرارة. وهو أيضاً الغاز الوحيد الذي يمتلك نظائر نشطة إشعاعياً في الشروط العادية، ويُعدُّ خطراً من الناحية الصحية بسبب هذا النشاط الإشعاعي. كما أن نشاطه الإشعاعي الكثيف يعيق تنفيذ الدراسات الكيميائية عليه، وهو ما يفسر ندرة ما عرف من مركباته حتى الآن.

يتشكل الرادون في مرحلة متوسطة من سلسلة اضمحلال النشاط الإشعاعي الطبيعي لكل من الثوريوم واليورانيوم، ويؤدي هذا الاضمحلال إلى تشكل الرصاص في نهاية السلسلتين. يُعدُّ كل من الثوريوم واليورانيوم أكثر العناصر المشعة شيوعاً على الأرض، وهما موجودان منذ أن تشكلت الأرض، ولنظائرها الطبيعية أعمار نصف طويلة جداً، من مرتبة بلايين السنين. يضمحل كل من الثوريوم واليورانيوم ويعطيان الراديوم، واضمحلال هذا الأخير يعطي الرادون، الذي يستمر تشكله خلال عشرات ملايين السنين وبتراكيز مماثلة لما يحصل حالياً. ونظراً لأن الرادون نفسه يضمحل أيضاً،

الذوبان في الماء، ولكنه أكثر قابلية للذوبان من الغازات النبيلة الأخرى منه. يذوب الرادون بشكل ملحوظ في السوائل العضوية أكثر من ذوبانه في الماء. وقد خلصت الدراسات في وقت مبكر إلى أن استقرار هدرات الرادون ينبغي أن تكون من نفس مرتبة استقرار هدرات الكلور (Cl<sub>2</sub>) أو ثنائي أكسيد الكبريت (SO<sub>2</sub>)، وأعلى بكثير من مرتبة استقرار هدرات كبريت الهيدروجين (H<sub>2</sub>S).

ونظراً لتكلفته العالية ونشاطه الإشعاعي، نادراً ما تُجرى البحوث الكيميائية التجريبية على غاز الرادون، وبالتالي هناك عدد قليل جداً من مركبات الرادون المعروفة، وجميعها تنتمي إلى فلوريداته أو أكاسيده. يمكن أكسدة غاز الرادون بعدد قليل من عوامل الأكسدة القوية مثل الفلور، ليتشكل بنتيجة ذلك ثنائي فلوريد الرادون. يتحلل هذا المركب إلى عناصره في درجات الحرارة الأعلى من 250 °C، ويتمتع بتطايرية ضعيفة، وكان يعتقد أنه RnF<sub>2</sub>. ولكن بسبب عمر النصف الصغير للرادون والفعالية الإشعاعية لمركباته، فإنه لم يكن بالإمكان دراسة أي من تفصيلات هذا المركب. تنبأت الدراسات النظرية لهذا الجزيء بطول رابطة في الجزيء Rn-F مساوٍ لـ 2.08 أنغسترومات، وأن الاستقرار الديناميكي الحراري لهذا المركب أكبر مما هو عليه في حالة مقارنته مع مركب أخف منه، XeF<sub>2</sub>. كان من المتوقع أن يكون لهذا الجزيء الثماني السطوح RnF<sub>6</sub> محتوي حراري أقل من المحتوى الحراري لـ RnF<sub>2</sub>. هذا، وقد ادعى بوجود فلوريدات أعلى، مثل RnF<sub>4</sub> و RnF<sub>6</sub>، ولكن يُشك في كونها قد صُنعت بالفعل. ويُعتقد بوجود تفاعل يؤدي إلى تشكل الأيون [RnF]<sup>+</sup>:



تعد أكاسيد الرادون من بين عدد قليل غيرها من مركبات الرادون المعروفة، وثلاثي الأكسيد فقط هو الذي جرى التأكيد منه. حدث التنبؤ بوجود كربونيل مستقر للرادون، RnCO، وأن له هندسة جزيئية خطية. كما وجد أن جزيئات Rn<sub>2</sub> و RnXe تستقر بشكل كبير بفعل اقتران المدار السبين spin-orbit coupling. وقد اقترح وجود الرادون داخل قفص الفوليرين بصفته دواءً لعلاج الأورام.

### نظائره

لا يوجد للرادون نظائر مستقرة تماماً. ومع ذلك، فقد عُرف له 36 نظيراً مشعاً، بكتل ذرية تقع بين 193 وحتى 228. يُعد <sup>222</sup>Rn النظير الأكثر استقراراً، وهو نتاج اضمحلال <sup>226</sup>Ra، الناتج عن اضمحلال <sup>238</sup>U. ومن بين وليدات <sup>222</sup>Rn النظير <sup>218</sup>Rn غير المستقر إلى حد كبير.

غاز الرادون ملوثاً مهماً يؤثر في مواصفات الهواء في جميع أنحاء العالم. ووفقاً لوكالة حماية البيئة الأمريكية، يُعد غاز الرادون المسبب الثاني لسرطان الرئة الأكثر شيوعاً؛ إذ يُعد تدخين السجائر المسبب الأول، حيث إنه يسبب 21000 حالة وفاة بسرطان الرئة سنوياً في الولايات المتحدة، غير أن حوالي 2900 من هذه الوفيات تحدث بين الناس الذين لم يدخنوا قط. وفي حين أنه السبب الثاني لسرطان الرئة الأكثر شيوعاً بشكل عام، إلا أنه السبب الأول بين غير المدخنين، وفقاً لتقديرات وكالة حماية البيئة.

### خصائصه

#### الفيزيائية

الرادون هو غاز عديم اللون والرائحة، لذا لا يمكن كشفه بواسطة حواس الإنسان وحدها. وفي درجة الحرارة والضغط العياريين، يكون الرادون غازاً أحادي الذرة وبكثافة مقدارها 9.73 كغ/م<sup>3</sup>، أي حوالي 8 أضعاف كثافة هواء الغلاف الجوي البالغة (1.217 كغ/م<sup>3</sup>) عند مستوى البحر. يُعد الرادون واحداً من أكثر الغازات في درجة حرارة الغرفة والأكثر بين الغازات النبيلة. ومع أنه عديم اللون في درجة الحرارة والضغط العياريين، إلا أنه يبعث تالفاً إشعاعياً ساطعاً عند تبريده إلى ما دون نقطة التجمد (71- °C)، ويتدرج ضوءه من اللون الأصفر إلى الأحمر البرتقالي مع انخفاض درجة الحرارة. يضيء الرادون خلال التكتف بسبب الإشعاع الذي ينبعث منه.

#### الكيميائية

نظراً لكونه من الغازات النبيلة، فهو ضعيف الفعالية الكيميائية. ومع ذلك، إن عمر النصف للرادون-222 يساوي 3.8 أيام، مما يجعله مفيداً في العلوم الفيزيائية بصفته قففاً طبيعياً natural tracer.

يُعد الرادون واحداً من العناصر العديمة التكافؤ والتي تسمى الغازات النبيلة. فهو خامل تجاه التفاعلات الكيميائية الأكثر شيوعاً، مثل الاحتراق، وذلك لاحتواء طبقة التكافؤ الخارجية له على ثمانية إلكترونات. يؤدي ذلك إلى حالة استقرار، وتكوين طاقة التشكل في حدها الأدنى الذي تكون فيه الإلكترونات الخارجية مرتبطة بإحكام، إذ يتطلب استخلاص إلكترون واحد من الطبقة الخارجية لذرتة ما قيمته 1037 كيلو جول/مول (وهو ما يُعرف أيضاً باسم طاقة التأين الأول). مع ذلك، ووفقاً لخاصية الدورانية في ترتيب العناصر، يتمتع الرادون بكهرسلبية أقل من كهرسلبية العنصر الذي يسبقه في الدور (الكزنيون)، وهو بالتالي أكثر فعالية منه. يُعد الرادون ضعيف

التوازن مع الرادون، ولكن، إذا ما سمحت الظروف البيئية بتراكم الغبار خلال مدة طويلة من الوقت، فإن الرصاص-210 ومنتجات اضمحلاله قد تساهم في جميع سويات الإشعاع أيضاً.

وبسبب شحناتها الكهروساكنة، تلتصق نساءل الرادون على السطوح أو على جسيمات الغبار، في حين أن الرادون لا ينطبق عليه ذلك. وعادة ما يسبب تناقصها في الهواء انخفاض عامل التوازن في الجو إلى أقل من 1. كما ينخفض عامل التوازن بفعل حركة الهواء أو بفعل تجهيزات فلتر الهواء، ويرتفع بفعل جسيمات الغبار المحمول جواً، بما في ذلك دخان السجائر. وفي التراكم العالية، تساهم نظائر الرادون المحمولة بالهواء مساهمة كبيرة في المخاطر الصحية لدى البشر. وقد وجد في الدراسات الوبائية أن قيمة عامل التوازن هي 0.4.

### قصته وأصول تسميته

كان الرادون العنصر الخامس المكتشف من قبل فريدريك إرنست دورن Friedrich Ernst Dorn في العام 1900، بعد اليورانيوم والثوريوم والراديوم والبولونيوم. نشر دورن في العام 1900 بضع تجارب كان قد لاحظ فيها أن مركبات الراديوم تُصدرُ غازاً مشعاً سمّاه الإصدار الراديومي Radium Emanation. وقبل ذلك، في العام 1899، لاحظ كل من بيير وماري كوري Pierre and Marie Curie أن الغاز الذي يبعثه الراديوم يبقى نشطاً إشعاعياً لمدة شهر كامل. وبنهاية ذلك العام، لاحظ روبرت ب. أونز Robert B. Owens وإرنست رذرفورد Ernest Rutherford تغيراً عندما حاولوا قياس الإشعاع الصادر عن أكسيد الثوريوم. ولاحظ رذرفورد أن مركبات الثوريوم تُصدرُ باستمرار غازاً مشعاً يحتفظ بنشاطه الإشعاعي لدقائق عدة، وسمّى هذا الغاز الإصدار emanation، وفيما بعد سمّاه الإصدار الثوريومي Thorium Emanation. وفي العام 1901، بين أن هذه الإصدارات نشطة إشعاعياً، لكنه أرجع اكتشاف العنصر إلى العائلة كوري. وفي العام 1903، لاحظ أندريه لويس ديبييرن Andre-Louis Debierne الإشعاعات نفسها من الأكتينيوم وسمّيت الإصدار الأكتينيومي.

اقترحت أسماء عديدة لهذه الغازات الثلاثة: إكسراديو exradio وإكسثوريو exthorio وإكساكتينيوم exactinio في العام 1904، وفي العام 1918 سمّيت رادون radon وثورون thoron وأكتون akton، وفي العام 1919 سمّيت راديون radeon وثوريون thoreon وأكتينيون actineon، وأخيراً في العام 1920 سمّيت رادون radon وثورون thoron وأكتينيون actinon. قاد كل من تشابه أطيف هذه الغازات

هناك ثلاثة نظائر أخرى للرادون بأعمار نصف تزيد على الساعة:  $^{211}\text{Rn}$  و  $^{210}\text{Rn}$  و  $^{224}\text{Rn}$ . إن النظير  $^{220}\text{Rn}$  هو ناتج اضمحلال طبيعي لنظير الثوريوم الأكثر استقراراً ( $^{232}\text{Th}$ )، ويُشار إليه بـ الثورون (Tn). يبلغ عمر النصف لـ  $^{220}\text{Rn}$  55.6 ثوان، وهو يُصدر الأشعة ألفا أيضاً. وبالمثل، يُشتق  $^{219}\text{Rn}$  من نظير الأكتينيوم،  $^{227}\text{Ac}$ ، الأكثر استقراراً، وهو باعث لجسيمات ألفا بعمر نصف قدره 3.96 ثانية. لا توجد نظائر ملحوظة للرادون حاصلة من اضمحلال سلسلة النبتونيوم ( $^{237}\text{Np}$ ).

### نساءله (ذريته)

يعود النظير  $^{222}\text{Rn}$  إلى سلسلة اضمحلال الراديوم واليورانيوم-238، وله عمر نصف قدره 3.8235 يوماً. تتمتع منتجاته الأربعة الأولى بأعمار نصف قصيرة جداً، مما يعني أن التفككات المقابلة ذات دلالة فيما يخص تفكك الرادون البدئي. ينتج عن اضمحلال  $^{222}\text{Rn}$  التسلسل التالي:

- $^{222}\text{Rn}$ ، بعمر نصف 3.8 يوماً، معطياً اضمحلال ألفا ليشكل ...
- $^{218}\text{Po}$ ، بعمر نصف 3.10 يوماً، معطياً اضمحلال ألفا ليشكل ...
- $^{214}\text{Pb}$ ، بعمر نصف 26.8 يوماً، معطياً اضمحلال بيتا ليشكل ...
- $^{214}\text{Bi}$ ، بعمر نصف 19.9 ثانية، معطياً اضمحلال بيتا ليشكل ...
- $^{214}\text{Po}$ ، بعمر نصف 0.1643 ملي ثانية، معطياً اضمحلال بيتا ليشكل ...
- $^{210}\text{Pb}$ ، بعمر نصف 22.3 سنة، معطياً اضمحلال بيتا ليشكل ...
- $^{210}\text{Bi}$ ، بعمر نصف 5.013 يوماً، معطياً اضمحلال بيتا ليشكل ...
- $^{210}\text{Po}$ ، بعمر نصف 138.376 يوماً، معطياً اضمحلال ألفا ليشكل ...
- $^{206}\text{Pb}$ ، وهو مستقر.

يتعين عامل توازن الرادون من النسبة بين نشاط جميع نساءل الرادون القصيرة الأعمار (المسؤولة عن معظم الآثار البيولوجية للرادون) والنشاط الذي سيحصل عند التوازن مع سلف الرادون.

وإذا ما تراكم الرادون باستمرار في حيز مغلق، سيزداد تركيز النظائر القصيرة الأعمار إلى أن يحصل التوازن عند تساوي معدل اضمحلال كل منتج للاضمحلال مع معدل اضمحلال الرادون ذاته. ويكون عامل التوازن مساوياً 1 عندما تتساوى قيمتا النشاطين، مما يعني أن منتجات الاضمحلال تبقى مجاورة للرادون السلف لمدة تكفي للوصول إلى حالة التوازن، وذلك خلال ما يقارب الساعتين. يأخذ اضمحلال الرصاص-210 مدة أطول بكثير للوصول إلى حالة

الثوريوم) هو مشابه للمعدل الوسطي لإنتاج  $^{222}\text{Rn}$  تقريباً، إلا أن كمية  $^{220}\text{Rn}$  في البيئة أقل بكثير من كمية  $^{222}\text{Rn}$  فيها، وذلك بسبب عمر النصف القصير لـ  $^{220}\text{Rn}$  (دقيقة واحدة في حالة  $^{220}\text{Rn}$  مقابل 4 أيام في حالة  $^{222}\text{Rn}$ ).

عادة ما يُقاس تركيز الرادون في الغلاف الجوي بالبكريل في المتر المكعب (بكريل/م<sup>3</sup>)، وهي وحدة مشتقة من النظام الدولي SI derived unit. يكون التعرض السكني التقليدي بحدود 100 بكريل/م<sup>3</sup> ضمن المباني، وبين 10 و20 بكريل/م<sup>3</sup> خارج المباني. وغالباً ما يُقاس بالبيكوكوري/لتر (pCi/L) في الولايات المتحدة، حيث 1 بيكوكوري/لتر = 37 بكريل/م<sup>3</sup>.

وفي الصناعة المنجمية، يُقاس التعرض عادة بسوية العمل working level month (WLM)، وبسوية العمل الشهرية working level month (WLM)، إذ إن كلَّ WLM تعادل  $10 \times 2.08 \times 10^{-5}$  جول/م<sup>3</sup> من الهواء. يُعبّر عن وحدة النظام الدولي للتعرض التراكمي بدلالة جول-ساعة بالمتر المكعب (جول-ساعة/م<sup>3</sup>)، وإن مقداراً واحداً من WLM يساوي  $3.6 \times 10^{-3}$  جول-ساعة/م<sup>3</sup>. وكلَّ تعرض لـ WLM خلال شهر من العمل (170 ساعة) يساوي تعرضاً تراكمياً مقداره واحد WLM.

كما أن تعرضاً تراكمياً لواحد WLM يعادل تقريباً العيش سنة واحدة في بيئة تركيز الرادون فيها يساوي 230 بكريل/م<sup>3</sup>.

يضمحل الرادون ( $^{222}\text{Rn}$ )، عند انبعاثه في الهواء ليعطي  $^{210}\text{Pb}$  ونظائر أخرى، ويمكن لسوية  $^{210}\text{Pb}$  أن تخضع للقياس. يتعلق معدل ترسّب هذا النظير المشع بشروط المناخ.

إن تراكيز الرادون الموجودة في البيئات الطبيعية صغيرة لدرجة أنه لا يمكن كشفها بالطرائق الكيميائية. إذ إن التركيز 1000 بكريل/م<sup>3</sup> (عالٍ نسبياً) يقابل 0.17 بيكوغرام/م<sup>3</sup>. التركيز الوسطي للرادون في الغلاف الجوي هو حوالي  $6 \times 10^{-20}$  ذرّة من الرادون في كل جزيء من الهواء، أو حوالي 150 ذرّة في كل مليمتر من الهواء. يرجع النشاط الإشعاعي لرادون الغلاف الجوي للأرض إلى بضع عشرات من الغرامات من الرادون، التي تُعوّض دائماً باضمحلال كميات أكبر من الراديوم واليورانيوم.

### وجوده في الطبيعة

ينتج الرادون من الاضمحلال الإشعاعي للراديو-226 الموجود في مناجم اليورانيوم (الصخور الفسفاتية والغضارية والصخور النارية والتحولية مثل الغرانيت وأخرى أقل أهمية في الصخور الشائعة مثل الصخور الكلسية). ففي كلَّ 2.6 كم<sup>2</sup> وبعمق 15 سم

الثلاثة مع أطياف الأرجون والكربتون والكزينون، وخمولها الكيميائي الملحوظ، قادا السير وليام رامزي Sir William Ramsay لاقتراحه في العام 1904 بأن الإصدارات قد تحوي عنصراً جديداً من عائلة الغازات النبيلة.

في العام 1910، قام رمزي وروبرت ويتلو غراي Robert Whytlaw Gray بعزل الرادون، وحدداً كثافته، وقررا أنه الغاز الأثقل بين الغازات المعروفة. في العام 1923، اختارت اللجنة الدولية للعناصر الكيميائية والاتحاد الدولي للكيمياء البحتة والتطبيقية (IUPAC) اسماً من بين الأسماء الثلاثة، الرادون (Rn) والثورون (Tn) والأكتينون (An). وفيما بعد، عندما اعتمدت أرقام النظائر بدلاً من تسمياتها، أخذ العنصر اسم أكثر النظائر استقراراً، وهو الرادون radon، في حين أخذ Tn الاسم الجديد  $^{220}\text{Rn}$  وأخذ An الاسم الجديد  $^{219}\text{Rn}$ . وفي العام 1962 جرى تصنيع فلوريد الرادون، بصفته أول مركب مصنع يدخل فيه الرادون.

عُرف خطر التعرض العالي للرادون منذ فترة طويلة في المناجم، حيث تصل التعرضات إلى 1000000 بكريل/م<sup>3</sup>. ففي العام 1530، وصّف بارازيليسوس Paracelsus مرضاً مدمراً لدى عمال المناجم، the mala metallorum، وأوصى جورج أغريكولا Georg Agricola بتهوية المناجم لتجنب هذه الكوارث. وفي العام 1879، حدّد هذا المرض من قبل هرتنغ Herting وهيس Hesse بمرض سرطان الرئة. أُجريت الدراسات الأساسية الأولى حول علاقة الرادون بالصحة في إطار برنامج استثمار مناجم اليورانيوم.

وُثّق وجود الرادون في هواء الأماكن المغلقة في بداية عام 1950. وفي بداية خمسينيات القرن الماضي بدأ البحث للتوجه نحو مصادر الرادون داخل المباني، وتحديد التركيز والآثار الصحية وتحديد مقاربات تخفيفه. وخلال مراقبة روتينية في محطة طاقة نووية في بنسلفانيا، وجد تلوث بنشاط إشعاعي لدى أحد العاملين، وحدّد التركيز المرتفع للرادون في منزله بأنه مسؤول عن عملية التلوث.

### وجوده

#### وحدات التركيز

يتشكل  $^{210}\text{Pb}$  من اضمحلال  $^{222}\text{Rn}$ . لوحظ في اليابان أن معدل الترسّب النموذجي لـ  $^{210}\text{Pb}$  بدلالة الزمن يعود إلى تغيّرات في تركيز الرادون.

تستند جميع المناقشات حول تراكيز الرادون في البيئة إلى نظيره  $^{222}\text{Rn}$ . ورغم أن المعدل الوسطي لإنتاج  $^{220}\text{Rn}$  (من سلسلة اضمحلال

الرادون ووليداته. يمكن للكبريتات المتصاعدة من بئر نفطي أن تكون غنية بالراديوم، في حين تحوي المياه والنفط والغاز عنصر الرادون. يضمحل الرادون مشكلاً نظائر مشعة صلبة تكسو الجدار الداخلي لأنابيب التشغيل.

### تراكمه في المنازل

اكتشفت ظاهرة زيادة تلوث المنازل بالرادون صدفة في العام 1985 بعد اختبار إشعاعي صارم نُفذ عند مدخل محطة طاقة نووية، حيث ظهر أن أحد المهندسين الداخلين إلى المحطة كان ملوثاً بمواد مشعة. تبلغ التعرضات المنزلية التقليدية حوالي 100 بكريل/م<sup>3</sup> في الداخل. يتعلق تراكم الرادون في الأقبية وأماكن السكن بكيفية إنشاء البناء وبتنويرته. يمكن للرادون أن يتسرب إلى الوسط الداخلي أيضاً عبر التشققات في السطوح ووصلات البناء وتشققات الجدران والفجوات في السطوح المعلقة والفجوات حول أنابيب الخدمة والتجويفات الجدارية والمياه المستعملة. يمكن أن تتبدل تراكيز الرادون في الموقع نفسه بمعدل الضعف خلال فترة ساعة من الزمن. كما يمكن للتركيز أن يتغير بشكل ملحوظ بين غرفة وأخرى تجاورها في البناء نفسه.

ينزع توزع تراكيز الرادون ليكون متناظراً حول قيمة وسطية: تستحوذ التراكيز العالية على أهمية أعلى غير متناسبة. يفترض عادة أن يتبع تركيز الرادون في الداخل توزع سجل طبيعي في منطقة ما. وهكذا، يستعمل الوسطي الهندسي عادة لتقدير تركيز الرادون الوسطي في المنطقة، ويتراوح التركيز الوسطي بين أعلى من 10 بكريل/م<sup>3</sup> وأقل من 100 بكريل/م<sup>3</sup> في بعض الدول الأوروبية.

### إنتاجه الصناعي

يتم الحصول على الرادون صناعياً بصفته منتجاً ثانوياً لعملية تعدين فلز اليورانيوم المضاف إلى محاليل من حمض كلور الهيدروجين أو حمض بروم الهيدروجين. يستخلص المزيج الغازي، الحاوي على H<sub>2</sub> و O<sub>2</sub> و He و Rn و CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>O وهيدروكربونات، من المحاليل. يُنقى المزيج بتمريره فوق النحاس عند الدرجة 720 سلفيوس لإزالة H<sub>2</sub> و O<sub>2</sub>، ومن ثم يستعمل كلٌّ من KOH و P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> لإزالة الحموض والرطوبة بوساطة الامتزاز. يكتف الرادون بوساطة النتروجين السائل وينقى من البقايا الغازية بوساطة التصدّد.

تعدّ تجارة الرادون عملية منظمة، لكنه موجود أيضاً بكميات صغيرة لمعايرة منظومات قياس <sup>222</sup>Rn، وذلك بسعر 6000 دولار أمريكي لكلّ ملي لتر من مطول الرادون (الذي يحوي حوالي 15

من سطح التربة يوجد ما يقارب غراماً واحداً من الراديوم المصدر لكميات قليلة من الرادون في الغلاف الجوي. وفي المقياس الكوني، تقدر كمية الرادون المنبعث من التربة سنوياً بـ 90 ترليون بكريل.

يتغير تركيز الرادون بشكل كبير بتغير المكان. ففي الهواء المفتوح، يتراوح التركيز بين 1 و100 بكريل/م<sup>3</sup>، وأقل من 0.1 بكريل/م<sup>3</sup> فوق المحيط. وفي الكهوف والمناجم المهواة، أو في المنازل الضعيفة التهوية، يرتفع التركيز ليتراوح بين 20 و2000 بكريل/م<sup>3</sup>. يمكن لتراكيز الرادون أن تكون أعلى بكثير في الممرات المنجمية. تستعمل أنظمة التهوية في المناجم لتحافظ على تركيز الرادون دون سوية العمل (بسويات تصل إلى 546 بيكوكوري من <sup>222</sup>Rn في لتر من الهواء، علماً أن التركيز وصل بين عامي 1976 و1985 إلى 20.2 كيلو بكريل/م<sup>3</sup>).

يظهر الرادون (<sup>222</sup>Rn) عادة مع شلال اضمحلال سلاسل الراديوم واليورانيوم، وأحياناً مع سلسلة الثوريوم (<sup>220</sup>Rn). ينبعث العنصر بشكل طبيعي من التربة، ومن بعض مواد البناء، حول العالم بكامله، حيثما توجد آثار من اليورانيوم والثوريوم، وخاصة في مناطق الترب الحاوية على الغرانيت أو الغضار اللذين يحويان تراكيز عالية من اليورانيوم. ومع ذلك، ليست المناطق الغرانيتية كافة مهيأة لإصدارات عالية من الرادون. وكونه غاز نادر، فهو عادة قابل للترحال عبر الفوالق والشقوق الترابية، ويمكن أن يتراكم في الكهوف أو المياه. ونظراً لعمره القصير، يتناقص تركيز الرادون بسرعة كبيرة بتزايد بعد منطقة الإنتاج. كما يتغير تركيز الرادون بشكل كبير مع تغير الفصول والشروط المناخية.

يمكن إيجاد تراكيز عالية من الرادون في بعض مياه الينابيع والينابيع الساخنة. فعلى سبيل المثال، يوجد في اليابان ينابيع غنية باليورانيوم الذي يصدر الرادون. وتصنف المياه المعدنية بأنها محتوية على الرادون عندما يتجاوز نشاطه الإشعاعي 74 كيلو بكريل/م<sup>3</sup>. وقد يصل نشاط الرادون في المياه المعدنية إلى 4000 كيلو بكريل/م<sup>3</sup>، كما هو الحال في منطقة لوريسيا في إيطاليا.

وجد الرادون في بعض الأماكن النفطية. ونظراً لخضوع الرادون إلى منحنى الضغط والحرارة المماثل لما هو عليه في حالة البروبان، ولأن فصل المشتقات الكيميائية النفطية في المصفاة يعتمد على درجات حرارة الغليان، فإن الأنابيب الناقلة للبروبان المفصول حديثاً يمكن أن تصبح مشعة بسبب اضمحلال الرادون وازمحلل منتجاته.

غالباً ما تحتوي رسوبيات صناعة النفط والغاز الطبيعي على

التفاعل بين المياه الجوفية وتدفقاتها. فأى تركيز معتبر للرادون في المياه المتدفقة إلى السطح يشير إلى وجود مدخلات محلية إلى المياه الجوفية. كما يستعمل الرادون في تأريخ الترب الحاوية للنظ بـسبب الألفة العالية بين الرادون والمواد النفطية.

استعمل تركيز الرادون في التربة بطريقة تجريبية لتعيين التصدعات الجيولوجية المدفونة في المواقع تحت السطحية لأن التراكيز العالية تكون عادة فوق التصدعات. وبالمثل، فقد وجدت بعض الاستعمالات المحدودة في التنقيب عن التدرجات الحرارية.

استثمر بعض الباحثين تغيّرات تركيز الرادون في توقّع حدوث الهزات الأرضية. يتمتع الرادون بعمر نصف يقارب 3.8 أيام، مما يعني أنه يمكن أن يوجد مباشرة بعد إنتاجه في سلسلة الاضمحلال الإشعاعية. ولهذا السبب، فقد افترض أن الزيادات في تركيز الرادون تشير إلى تولّد تشققات جديدة تحت أرضية من شأنها أن تسمح بزيادة حركة المياه الجوفية، وطرد غاز الرادون خارجاً. إن تولّد شقوق جديدة قد لا يسبق بشكل أكيد حدوث هزات أرضية رئيسية. ففي سبعينيات وثمانينيات القرن الماضي، أشارت القياسات العلمية لانبعاثات الرادون قرب التشققات إلى أن الهزات الأرضية غالباً ما تحصل بغياب إشارات من الرادون، وغالباً ما ظهر الرادون دون أن تتبعه هزات أرضية. يُعدّ الرادون واحداً من الملوثات المنبعثة من محطات الطاقة الحرارية، رغم أنه يتشتت بسرعة، وليس هناك دليل على أي خطر إشعاعي في التحقيقات المختلفة. تتجه محطات الطاقة الحرارية نحو إعادة حقن جميع الانبعاثات في الأعماق الأرضية، إذ إن ذلك سيرجع انخفاض المخاطر الأخرى للرادون. استعمل الرادون في خمسينيات القرن الماضي في التصوير الشعاعي الصناعي.

### وجوده في الهواء ومخاطره الصحية

#### في هواء المناجم

جمعت المخاطر المنسوبة لوفيات سرطان الرئة بفعل التعرض التراكمي (سوية عمل شهري) لمنتجات اضمحلال الرادون من البيانات الحاصلة لدى أحد عشر عاملاً في مناجم الصخور القاسية تحت الأرضية. ومع أن التعرضات العالية (الأكبر من 50 سوية عمل شهرية) تسبّب زيادة سرطانية ملحوظة إحصائياً، فإن التعرضات الصغيرة (10 سويات عمل شهرية) تؤدي إلى نتيجة غير حاسمة وتظهر فائدة قليلة في هذه الدراسة.

صنّف الرادون-222 من قبل الوكالة الدولية لبحوث السرطان بأنه

بيكو غرام من الرادون في لحظة معينة). يتم إنتاج الرادون بواسطة محلول من الراديوم-226 (ذي عمر النصف 1600 سنة). يضمحل الراديوم-226 من خلال إصدار جسيمات ألفا، معطياً الرادون الذي يتجمع فوق عيّنات الراديوم-226 بمعدل يقارب 1 مم<sup>3</sup>/يوم لكل غرام من الراديوم، ويتم التوازن سريعاً لينتج الرادون بتدفق ثابت، مع نشاط يساوي نشاط الراديوم (50 بكريل). ينفذ <sup>222</sup>Rn الغازي (بعمر نصف قدره حوالي أربعة أيام) عبر الكبسولة بالانتشار.

### تطبيقاته

#### الطبية

تمثّل أحد أشكال الشعوذة والدجل في بداية القرن العشرين بمعالجة المرضى بالتوريوم المشع. وكان ذلك يحدث في غرفة مغلقة يتعرض فيها المرضى للرادون من أجل تأثيراته الطبية. ترجع الطبيعة المسرطنة للرادون إلى إشعاعه المؤيّن الذي اكتشف فيما بعد. استعمل النشاط الإشعاعي المُدمّر لجزء الرادون من أجل قتل الخلايا السرطانية. لكنه لم يغير من صحة الخلايا السليمة. في الحقيقة، يؤدي الإشعاع المؤيّن إلى تشكّل جذور حرّة تحدث ضرراً جينياً وتدميراً لخلايا مختلفة، مما يسبّب زيادة في معدلات المرض، بما فيه السرطان.

اقترح التعرض للرادون من أجل تخفيف أمراض المناعة الذاتية مثل التهاب المفاصل. ونتيجة لذلك، جذبت إدارة الصحة المنجمية في نهاية القرن العشرين وبداية القرن الحادي والعشرين الأشخاص الذين يعانون من مشاكل مرضية مثل التهاب المفاصل للخضوع إلى تعرّضات محدودة لمياه المناجم المشعة وغاز الرادون. ولكن هذا التطبيق أُحبط فيما بعد بسبب التقارير المثبتة عن التأثيرات المرضية للتعرضات العالية للإشعاع.

أنتج الرادون تجارياً لاستعماله في العلاج الإشعاعي، ولكن جزءاً كبيراً من الرادون استبدل بنويدات مشعّة مصنّعة في المسرّعات والمفاعلات النووية.

#### العلمية

يتغيّر انبعاث الرادون بتغيّر نمط التربة وتغيّر محتوى التربة السطحية من اليورانيوم. وهكذا، يمكن، بشكل محدود، استعمال تراكيز الرادون في التكتلات الهوائية بهدف تعقب مصادر هذا الهواء. استثمرت هذه الظاهرة من قبل بعض علماء الغلاف الجوي. وبسبب فقدان السريع لغاز الرادون من الهواء واطمحلاله السريع نسبياً، استعمل الرادون في الأبحاث الهيدرولوجية التي تدرس

بالسرطان لدى التعرض للرادون المنزلي (5 بيكو كوري بالتر، أي ما يقارب 200 بكريل/م<sup>3</sup>). تفتقر هذه الدراسة إلى رقابات حول السوية الفردية للتدخين وسوية التعرض للرادون، وتفتقد بالتالي إلى الإمكانية الإحصائية من أجل استخلاص استنتاجات نهائية. وبسبب ذلك، فإن محددات الخطأ (التي تعكس ببساطة تقلبات البيانات الخام) ربما هي صغيرة جداً. ومن بين أفرقة الخبراء الأخرى، استنتجت الوكالة الدولية لبحوث السرطان التابعة لمنظمة الصحة العالمية أنه يمكن رفض هذه التحاليل.

إن معظم نماذج التعرض للرادون المنزلي المستندة إلى دراسات في المناجم، وعلى تقديرات مباشرة للمخاطر التي يتعرض لها سكان المنازل ستكون أكثر قبولاً. مع ذلك، ونظراً لصعوبات قياس مخاطر الرادون بالنسبة إلى غيرها من المساهمين مثل التدخين، فإن نماذج تأثيراتها تُعتمد في كثير من الأحيان.

اعتبرت وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة أن الرادون هو السبب الثاني لسرطان الرئة، وقد توصلت كل من المملكة المتحدة وفرنسا إلى استنتاجات مماثلة. يمكن أن تساهم بعض تشكيلات الصخور تحت السطحية بزيادة التعرض للرادون في المنازل والمكاتب، ويمكن أيضاً أن تلعب بعض مواد البناء (بعض صخور الصوان، على سبيل المثال) الدور نفسه. ينشأ أكبر خطر للرادون في المباني المعزولة عن الهواء الطلق، والضعيفة التهوية، إضافة إلى المباني ذات الأسس التي تسمح بتسرب الهواء من تربة الأقبية.

#### في العمل والمستوى المرجعي

أوصت منظمة الصحة العالمية في العام 2009 بمستوى مرجعي لتركيز الرادون (المستوى المرجعي الوطني)، وقيمتها 100 بكريل/م<sup>3</sup> في حالة الرادون المنزلي. وتقول التوصية أيضاً أنه حيث لا يكون ذلك ممكناً، ينبغي أن يتم اختيار المستوى 300 بكريل/م<sup>3</sup> بصفته أعلى قيمة. لا ينبغي أن يكون المستوى المرجعي الوطني محدوداً، غير أنه ينبغي ألا يتجاوز الحد الأعلى المقبول لتركيز الرادون الوسطي السنوي في المنزل.

يختلف التركيز الفعّال للرادون في منزل ما تبعاً للمنظمة المحددة للتوصية، وعلى سبيل المثال، تشجع الوكالة الأمريكية لحماية البيئة العمل بتركييزات منخفضة تصل إلى 74 بكريل/م<sup>3</sup>، ويوصي الاتحاد الأوروبي بالعمل عندما تكون التراكمات دون 400 بكريل/م<sup>3</sup> في البيوت القديمة ودون 200 بكريل/م<sup>3</sup> في البيوت الحديثة.

مُسرطنٌ للبشر. ونظراً لكونه بالحالة الغازية في الشروط الطبيعية فهو قابل للاستنشاق ويشكل قلقاً للأشخاص المعرضين لسويات عالية منه خلال فترات مديدة من الزمن. ففي أربعينيات وخمسينيات القرن الماضي، حيث لم تطبق معايير السلامة اللازمة لتهوية المناجم، رُبط التعرض للرادون بسرطان الرئة بين غير المدخنين من عمال مناجم اليورانيوم والفلزات الصخرية القاسية الأخرى.

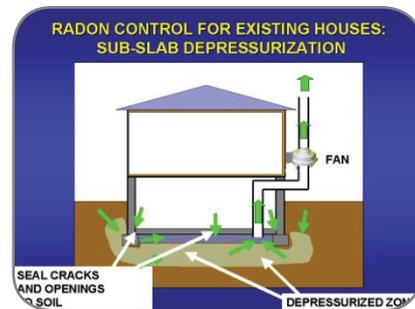
ومنذ تلك الفترة، استعملت التهوية والإجراءات الأخرى للتخفيف من سويات الرادون في المناجم الخاضعة لاستثمار مستمر. وفي السنوات الأخيرة، انخفض الوسطي السنوي لما يتعرض له عمال مناجم اليورانيوم إلى مستويات مماثلة لسويات استنشاقه في بعض المنازل. خُفّف ذلك من خطر السرطان المهني المحرّض بالرادون، رغم أن المشاكل الصحية قد تستمر لدى هؤلاء الذين يوظفون حالياً في المناجم غير الخاضعة للمراقبة، كما هو حال الذين وظفوا فيها سابقاً.

أبرز العديد من الباحثين إمكانية زيادة نظرية لخطر الإصابة بسرطان الدم التي يسببها غاز الرادون، ولكن لم يدعم هذا الادعاء باختبارات تجريبية.

#### في هواء المنازل

رُبط التعرض للرادون (التعرض لذريته) بالإصابة بسرطان الرئة من خلال دراسة حالات شواهد عديدة جرت في الولايات المتحدة وأوروبا والصين. هناك 21000 حالة وفاة سنوياً في الولايات المتحدة الأمريكية بسبب سرطان الرئة الناجم عن غاز الرادون.

وجدت إحدى الدراسات الأكثر شمولية الجارية في الولايات



المتحدة زيادة خطر حالات السرطان بنسبة 50% حتى في حالات التعرض المديد لسويات عمل أقرتها وكالة حماية البيئة (4 بيكو كوري بالتر). دُعمت هذه النتائج بالتحاليل المشتركة المتواصلة في أمريكا الشمالية وأوروبا.

تظهر دراسة وبائية جدلية انخفاضاً في مخاطر الإصابة

## لدى المدخنين

الدراسة الأوربية المشتركة تجعل من غير الممكن استبعاد أن يكون مثل هذا التأثير التآزري قادراً على تفسير الزيادة المحدودة في الخطر الناجم عن الرادون الذي ذكر لدى غير المدخنين.

أظهرت دراسة في العام 2011 شملت 436 حالة (لم يشارك فيها المدخنون المصابون بسرطان الرئة)، إضافة إلى مجموعة مراقبة (1649 لم يدخنوا قط) أن التعرض للرادون يزيد خطر سرطان الرئة لدى الذين لم يدخنوا قط. ولكن يبدو أن المجموعة التي تعرضت للتدخين السلبي في المنزل تظهر لديها زيادة المخاطر بأكملها، في حين أن الذين لم يتعرضوا للتدخين السلبي لم يظهروا أية زيادة في الخطر مع زيادة سوية الرادون.

تحتاج هذه النتيجة إلى دراسات إضافية. وعلى الرغم من النتائج المذهلة لدراسة العام 2011، هناك دراسات جديدة لم تكتمل بعد.

### الرادون في مياه الشرب ومخاطره الصحية

لا توجد بيانات واضحة حول تأثيرات تناول الرادون مع الماء أو الغذاء، غير أن الدراسات تشير إلى أن عمر النصف للرادون في الجسم يتراوح بين 30 و70 دقيقة، وأن 90% منه يخرج من الجسم خلال 100 دقيقة. وفي العام 1999 جرى تحقيق حول مسألة الرادون في مياه الشرب، واعتبرت مخاطر الرادون في مياه الشرب لا تكاد تذكر في غالب الأحيان.

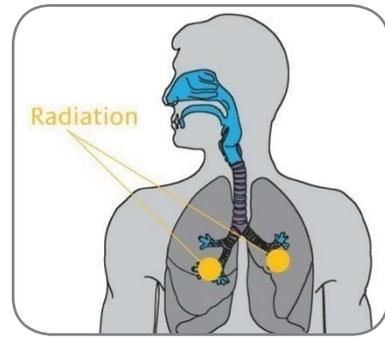
وفي الوقت الذي يتم فيه بلع الرادون عن طريق مياه الشرب، لا بد من الإشارة إلى أن الرادون يتحرر من المياه مع تزايد درجة الحرارة وانخفاض الضغط، وكذلك مع تهوية المياه. يمكن لتركيز 104 بيكو كوري/لتر من الرادون في الماء أن يزيد تركيز الرادون داخل المنزل بمقدار 1 بيكو كوري/لتر ضمن الشروط النظامية من استعمال المياه.

ويمكن أن تكون تراكيز الرادون مرتفعة في هواء المحطات الحاوية خزانات مياه أرضية، مثل محطات معالجة مياه الشرب.

### اختباره وتخفيف آثاره

هناك اختبارات بسيطة نسبياً للكشف عن غاز الرادون. تجري هذه الاختبارات في بعض البلدان بشكل منهجي في مناطق الأخطار المنتظمة المعروفة. توجد أجهزة تجارية متاحة لكشف الرادون، كما توجد أجهزة اختبار غير مكلفة تستعمل لأغراض الفحص القصير الأجل. هناك بروتوكولات مهمّة جداً لإجراء اختبارات الرادون قصيرة الأجل ومن الضروري اتباعها بدقة. تشمل هذه التجهيزات مُجمَعاً يعلقه القائم بالاختبار في الطابق الأقل ملائمة للعيش في

تشير نتائج الدراسات الوبائية إلى أن خطر الإصابة بسرطان الرئة يتزايد مع تزايد التعرض للرادون المنزلي. ومع ذلك، هناك دائماً شكوك كبيرة في هذه الدراسات. ففي حين أن التدخين هو عامل كلاسيكي ومعروف تماماً بكونه مصدراً أكيداً لسرطان الرئة، يقدر الغرب أن دخان التبغ هو المسبب لما يقارب 90% من جميع سرطانات الرئة. وهناك ميل لافتراض مخاطر أخرى لسرطان الرئة تتداخل مع خطر التدخين. لذا، يجب دائماً تفسير نتائج الدراسات الوبائية بحذر شديد.



وفقاً لوكالة حماية البيئة، تُعدّ مخاطر الإصابة بسرطان الرئة لدى المدخنين مهمة، وذلك بسبب التأثيرات المتآزرة لغاز الرادون والتدخين. وفي فئة المدخنين، هناك ما يقارب 62 شخصاً بين كل 1000 شخص يموتون بسبب سرطان الرئة مقارنة مع موت 7 أشخاص من أصل 1000 من الأشخاص الذين لم يدخنوا قط. ومع ذلك، لا يمكن استبعاد أن الخطر على غير المدخنين يجب أن يكون في المقام الأول مُفسّراً بتأثير مشترك لغاز الرادون والتدخين السلبي (انظر أدناه).

والرادون، مثل غيره من عوامل الخطر الخارجية المعروفة والمشتبه بها لسرطان الرئة، فهو تهديد للمدخنين والمدخنين السابقين. وقد تجلّى ذلك بوضوح من خلال دراسة أوربية مشتركة. نذكر هنا التعليق الذي أشارت إليه الدراسة: "إنه من غير المناسب الحديث ببساطة عن وجود خطر من غاز الرادون في المنازل. والخطر هو من التدخين مصحوباً بتأثير تآزري للرادون في حالة المدخنين. وبدون التدخين، يبدو التأثير صغيراً لدرجة أنه غير معتبر".

### الرادون والتدخين السلبي

هناك سؤال مهم وهو ما إذا كان بإمكان التدخين السلبي أيضاً أن يلعب دوراً في مثل هذا التأثير التآزري مع الرادون المنزلي. لم يُدرس هذا الموضوع بالشكل الكافي. وإن البيانات الأساسية في

10 بكريل/م<sup>3</sup>، وقد تتراوح بين 1 و100 بكريل/م<sup>3</sup>).

يمكن خفض مستويات غاز الرادون في الهواء الداخلي بطرائق عديدة، والطرائق الرئيسية الأربعة لتخفيض كمية غاز الرادون المتراكم في المنزل هي:

- تخفيض ضغط الهواء في التربة القائم عليها المبنى (شفط الهواء).
- تحسين تهوية المبنى وتجنب نقل الرادون من الأرض عبر غرف المعيشة.
- تثبيت منظومة حوض للرادون في الطابق السفلي.
- إحداث ضغط إيجابي أو منظومة تهوية إضافية.

هناك طريقة أدرجتها وكالة حماية البيئة في الدليل الخاص بالحد من الرادون، حيث يستعمل فيها في المقام الأول أنابيب تنفيس ومروحة تسحب الرادون من تحت المنزل وتطرده إلى الخارج، وهو ما يُسمى لوح فرعي لتخفيف الضغط sub-slab depressurization، أي التخفيض الفعّال لضغط التربة، أو شفط الهواء من التربة. وبشكل عام، توصي الوكالة بطرائق تتجنب دخول الرادون إلى غرف المعيشة، وذلك عن طريق سحب الرادون من أسفل المنزل وإرساله عبر أنبوب إلى الهواء الخارجي.

المنزل لمدة 2 إلى 7 أيام، ومن ثم يقوم بإرساله إلى مختبر التحليل. تشمل تجهيزات الاختبار على المدى الطويل مُجمّعات تصل مدة تعليقها إلى سنة واحدة، وهي متوفرة أيضاً. يمكن لجهاز اختبار الأراضي المفتوحة اختبار انبعاثات غاز الرادون من الأرض قبل بدء البناء عليها.

تتقلب مستويات غاز الرادون بشكل طبيعي، ويرجع ذلك إلى عوامل مثل الظروف الجوية العابرة. لذلك فإن الاختبار الأولي قد لا يكون إجراءً تقييماً دقيقاً لمستوى غاز الرادون المنزلي الواسطي. تكون مستويات غاز الرادون بعدها الأقصى خلال الجزء الأبرد من اليوم عندما تكون فروق الضغط على أشدها. لذلك، تُبرّر النتيجة المرتفعة (أكثر من 4 بيكو كوري/لتر) تكرار الاختبار قبل ازدياد تكلفة تنفيذ مشروع البناء. تستدعي المستويات بين 4 و10 بيكو كوري/لتر وجود اختبار طويل الأجل لغاز الرادون.

ولأن عمر النصف للرادون يساوي 3.8 أيام، فإن إزالة مصدر الرادون أو عزله يقلل كثيراً من المخاطر في غضون أسابيع قليلة. والطريقة الأخرى لخفض مستويات غاز الرادون هي تعديل التهوية للمبنى. وعموماً، إن تركيزات غاز الرادون في الأماكن المغلقة تزداد معدلاتها بانخفاض التهوية. ففي مكان جيد التهوية، يميل تركيز الرادون إلى التحالف مع قيمته في الهواء الطلق (التي تكون عادة

### موقعه في الجدول الدوري وتصنيفه

H																	He														
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne														
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar														
K	Ca	Sc											Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
Rb	Sr	Y											Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo
المعادن القلوية		المعادن القلوية الترابية			الثنائيات			الأكتينيدات			المعادن الانتقالية			معادن أخرى			أشباه المعادن			لامعادن أخرى			الهالوجينات			الغازات النبيلة					

# ورقات علمية

ملخص

استخرجت تجريبياً القيمة المنتجة لضجيج الفلطة لمضخم شحنة مبني على أساس JFET (ترانزستور أثر الحقل الوصلي). أجريت عملية موازنة لهذه القيم بحسب بعض نماذج منابع ضجيج JFET. واستخرجت قيم كثافات الضجيج الطيفية للتيار والتوتر تبعاً للنموذج الذي يعطي أفضل توافق بين المنحنيات التجريبية والمحاكية. جرى تحليل منابع الضجيج الذاتية وكذلك المنابع الناجمة عن التشعيع بأشعة غاما والنترونات. رُسمت منحنيات الكثافة الطيفية الكلية ومساهمة كل منبع.

الكلمات المفتاحية: كثافة طيفية، ضجيج JFET، تشعيع، موازنة.

**Key Words:** Spectral density, noise, JFET, irradiation, fitting.

• نشرت هذه الورقة في مجلة: *Microelectronics Reliability*, 2013.

## التحقق من صلاحية قياسات مطيافية غاما الحقلية ومطيافية غاما المخبرية لتعيين $^{226}\text{Ra}$ , $^{40}\text{K}$ و $^{137}\text{Cs}$ في التربة

Validation of in situ and laboratory gamma spectrometry measurements for determination of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in soil

د. محمد سعيد المصري، أحمد وائل دبل

قسم الوقاية والأمان

ملخص

قورنت طريقتا مطيافية غاما المخبرية ومطيافية غاما المحمولة وصلاحيتهما لتعيين  $^{226}\text{Ra}$  و  $^{40}\text{K}$  و  $^{137}\text{Cs}$  في التربة. شملت معاملات الاعتماد التحليلية كلاً من حدود الكشف الدنيا والتكرارية وقابلية إعادة. أوضحت النتائج أن محتوى التربة من الرطوبة يخفض من نتائج القياسات الحقلية مقارنة بالقياسات المخبرية. كما قورنت وقدرة ترتيبات قياس كلتا التقنيتين. كان الارتياح الناجم عن الرطوبة (55%) في القياس الحقلية هو المساهم الرئيس في الارتياح الكلي، في حين كان التعداد الصافي (71%) باستخدام القياسات المخبرية هو المساهم الأكبر لقيمة الارتياح الكلي.

الكلمات المفتاحية: اعتماد طريقة، مطيافية غاما الحقلية، مطيافية

## إصدار حاملات الشحنة من العيوب في السليسيوم اللابلوري المهدرج الذاتي التطعيم مدروسة بطرق سعة الوصلة

Carrier emission from defects in intrinsic hydrogenated amorphous silicon studied by junction-capacitance methods

د. رامي درويش

قسم الفيزياء

ملخص

قيست الوسعية الانتقالية لعينات من السليسيوم اللابلوري المهدرج الذاتي التطعيم. وجد أن اضمحلال الوسعية في مجال واسع من درجات الحرارة وعرض النبضة لا يمكن ملاحظته وفق قانون قوة (Power law) (كما هو الحال في عينات مشابهة من النوع n) أو بمجموع قانون قوة مع تابع أسّي ممتد (stretched exponential) كما هو الحال في عينات مشابهة من النوع p، ولكن الملاحظة كانت مع تابع مشكل من حاصل جمع تابع أسّي ممتد مع تابع أسّي مضغوط (squeezed exponential). عزي هذا الاضمحلال بالوسعية إلى انتقالات لحاملات الشحنة من حالات متموضعة تقع بالقرب من نهايتي زيل عصابتي الناقلية والتكافؤ. واقترح أن تكون هذه الحالات المتموضعة عائدة إلى بنية خيطية مشكلة على سطوح فجوات ضمن هذه المادة.

الكلمات المفتاحية: سليسيوم لابلوري، عيوب، وسعية انتقالية.

**Key Words:** Amorphous silicon, Defects, Capacitance transient.

• نشرت هذه الورقة في مجلة: *Journal of Non-Crystalline Solids* 2013.

## استخراج كثافات الطيف الضجيجي (المساهمات الذاتية والناجمة عن التشعيع) لمضخم شحنة مبني على أساس ترانزستور JFET

Extraction of noise spectral densities (intrinsic and irradiation contributions) of a charge preamplifier- based on JFET

د. جمال الدين عساف

قسم الخدمات العلمية

بمحتوى  $As_2O_3$  و  $Ga_2O_3$  في طبقة GaAs المسامي. بالإضافة إلى ذلك، أظهرت قياسات الانعكاس أن طبقات GaAs المسامي تسلك سلوك طبقات مانعة للانعكاس في المجال الطيفي (500-1100 نانومتر).

الكلمات المفتاحية: GaAs المسامي، تآلق فوتوني، مجهر إلكتروني ماسح، انعراج الأشعة السينية، مطيافية الإلكترون الضوئي للأشعة السينية، مطيافية رامان، انعكاسية.

**Key Words:** Porous GaAs, Photoluminescence, SEM, XRD, XPS, Raman spectroscopy, reflectance.

• نشرت هذه الورقة في مجلة: *J. of Mterial Science: Materials in Electronics*.

## تأثير طلي النيكل اللاكهربائي المتعدد على خشب الزان: تحضير وتوصيف

Influence of multiple electroless nickel coatings on beech woods: preparation and characterization

د. جمال عامر

قسم الكيمياء

ملخص

تعديل سطح رقائق خشب الزان يكون بغسلها أولاً بالماء المقطر، تتبع هذه الخطوة بتفعيل سطح خشب الزان بالنيكل المعدني الذي يحضر على سطح الخشب بإرجاع شوارد النيكل  $Ni^{+2}$  إلى شكلها المعدني باستخدام شوارد البورو هيدريد  $BH_4^-$  بوصفه عاملاً مرجعاً في وسط قلوي  $PH=11$ . في النهاية يتم ترسيب النيكل بطريقة الطلي اللاكهربائي باستخدام عدة حمامات متتالية يفصل فيما بينها بعملية تجفيف عند درجة حرارة 100 درجة مئوية لزمان قدره 24 ساعة. تم توصيف كل من الخواص النسيجية والبنوية باستخدام كل من المجهر الماسح الإلكتروني SEM وتقنية الانعراج لأشعة X-XRD. تظهر نتائج المجهر الإلكتروني الماسح بأن سماكة طبقة النيكل المحضرة بعد أربعة حمامات طلي متعاقبة تتراوح بين 2.9 و 3 مايكرو متر. برهنت تقنية الانعراج لأشعة X- بأن طبقة النيكل المرسب على الخشب له حجم بلوري يتراوح بين 83.38 و 149.95 أنغستروم وأثبتت النتائج بأن حجم بلورات النيكل يزداد بشكل واضح مع ازدياد عدد حمامات الطلي أو الترسيب.

الكلمات المفتاحية: خشب الزان، معالجة، طلي النيكل اللاكهربائي، ترسيب متعدد.

**Key Words:** beech wood; pretreatment; electroless nickel coating; deposition run

• نشرت هذه الورقة في مجلة: *Composite Interface*.

غاما المخبرية، تربة، ارتياب القياسات.

**Key Words:** Method validation; In situ gamma ray spectrometry; Laboratory gamma-ray spectroscopy; Soil; Uncertainty of measurements.

• نشرت هذه الورقة في مجلة: *Applied Radiation and Isotopes*.

## تأثير زمن التتميش في الخواص الضوئية والبنوية الجديدة لزننخيد الغاليوم المسامي (porousGaAs) المتشكل بطريقة التتميش الأنودي ل $n^+$ -GaAs في الكهرليت $HF:C_2H_5OH:HCl:H_2O_2:H_2O$

Novel optical and structural properties of porous GaAs formed by anodic etching of  $n^+$ -GaAs in a  $HF:C_2H_5OH:HCl:H_2O_2:H_2O$  electrolyte: Effect of etching time

د. منذر ذراف، د. معين سعد

قسم الفيزياء

ملخص

جرى تشكيل طبقات من زننخيد الغاليوم (GaAs) المسامي بواسطة التتميش الأيوني لركائز من GaAs (100) من النوع  $n^+$  في المحلول الكهربائي  $HF:C_2H_5OH:HCl:H_2O_2:H_2O$ . وُجد أن هناك تأثيراً كبيراً لزمان التتميش على الخواص الضوئية والبنوية لطبقة GaAs المسامية، وكشفت السمات النانوية والمكروية لطبقات GaAs بالتصوير بالمجهر الإلكتروني الماسح (SEM). أظهرت جميع العينات قمتي تآلق فوتوني (PL) عند درجة حرارة الغرفة تقعان في المجالين: «أزرق-أخضر» و «أخضر-أصفر». وجد أن الاختيار المناسب لزمان التتميش يؤدي إلى تشكل طبقة بلون أبيض بدلاً من اللون الرمادي الغامق المعتاد لطبقة GaAs المسامي. وُجد أن هذا يؤدي إلى تحسن كبير في شدة التآلق الفوتوني المرئي في طبقة GaAs المسامي. أكدت دراسات التركيب الكيميائي والتوصيف البنيوي بواسطة مطيافية الإلكترون الضوئي للأشعة السينية (XPS) وانعراج الأشعة السينية (XRD) ومطيافية رامان المكروية أن هذه الطبقة تتميز بغناها بمركب  $\beta-Ga_2O_3$  الأحادي الميل. دُرس التعديل في الخواص البنوية والكيميائية لطبقة GaAs المسامي، الناتج بفعل زمن التتميش، ورُبط بسلوك التآلق الفوتوني للطبقة. ويستنتج أن التآلق «أزرق-أخضر» في طبقة GaAs المسامي يمكن أن يرتبط بدرجات مختلفة للحصص الكمومي في بلورات GaAs النانوية، بينما يتأثر التآلق الفوتوني «أخضر-أصفر» بشكل كبير

في مجال مراقبة التعرض المهني. جرى تطبيق هذه الطريقة من أجل المراقبة الدورية لعمال مناجم الفسفات في سورية لمدة سنتين. وقد أظهرت نتائج الدفعة الأولى من العينات وجود نشاط مرتفع من اليورانيوم 238 في بعض عينات البول، ويُعزى ذلك لتلوث العينات من بيئة العمل. وأظهرت نتائج الدفعة الثانية أن نشاط اليورانيوم 238 كان أقل من حدِّ الكشف، ومع ذلك، كان هناك تعرض لبعض العمال ولكن الجرعة المحسوبة كانت أقل من حدِّ الجرعة المهني أو ضمنها.

الكلمات المفتاحية: مناجم الفسفات، عينات البول، مطيافية ألفا، جرعة فعالة مودعة، سورية.

**Key Words:** Phosphate mines; Urine samples; Alpha-spectrometry; Committed effective dose, Syria.

• نشرت هذه الورقة في مجلة: Nuclear Instruments & Methods In Physics Research. Section A

## تَشكُّل البنية المسامية على سطح السليكون المعالج بجهاز البلازما المحرقة

Porous Structure Formation on Silicon Surface Treated by Plasma Focus Device

د. مثنى أحمد

قسم الكيمياء «مخبر المسرع الأيوني»

د. شريف الجواط، د. محمد عاقل

قسم الفيزياء

ملخص

لُوحظ تشكل مسامات على سطح السليكون، مستحثة بواسطة المعالجة بالبلازما المحرقة. بيّنت قياسات مطيافية المجهر الإلكتروني الماسح وجود مسامات ذات حجوم مختلفة تُقاس بأبعادها من الميكرو إلى النانومتر. كما تبين وجود تابعة مكانية في توزيع المسامات وفقاً لأبعادها المكروية أو النانوية. وهذا التوزيع غير عشوائي وقابل للتكرار. تعتمد نسبة تشكل المسامات النانوية إلى المكروية على الشروط التجريبية (المسافة عن المصدر وعدد الرشقات من البلازما المحرقة). نُوقشت ديناميكية تشكل المسامات وسبب توزيعها باقتراح وجود آلية الطور السائل. هذا وقد ترسَّب النحاس المقتلع من المصدر بكمية ملحوظة على سطح السليكون. وجرى تقصي التوزيع السطحي وانتشار النحاس في ركازة السليكون باستعمال تقنية مطيافية التبعثر المرند لردفوردي.

الكلمات المفتاحية: بلازما محرقة، سليكون مسامي، تشكل

## تأثير قناة ارتباط متجه الأيزو على الجزء الجهري لطاقة الارتباط النووي

Effect of the isovector coupling channel on the macroscopic part of the nuclear binding energy

د. سامي حداد

قسم الفيزياء

ملخص

يحدد تأثير قناة ارتباط متجه الأيزو للتأثر النووي في الجزء الجهري لطاقة الارتباط النووي، وذلك باستخدام تقريب توماس-فيرمي النسبوي والمتعلق بالكثافة، ويدرس أيضاً تعلق هذا التأثير بأعداد النوترونات والبروتونات في النواة. تؤدي قناة ارتباط متجه الأيزو إلى ازدياد في طاقة الارتباط النووي، ويزداد هذا التأثير مع ازدياد عدد النوترونات في النواة مقارنة بعدد البروتونات.

الكلمات المفتاحية: قناة ارتباط متجه الأيزو، الجزء الجهري لطاقة الارتباط النووي، تقريب توماس-فيرمي النسبوي، نظائر الرصاص، متساويات النوترون  $N=126$ .

**Key Words:** Isovector coupling channel, Macroscopic part of the nuclear binding energy, Relativistic Thomas-Fermi approximation, Lead isotopes, Isotones  $N=126$ .

• نشرت هذه الورقة في مجلة: Pramana Journal of Physics

## تحديد اليورانيوم 238 في عينات البول لعمال الصناعة الفسفاتية باستعمال مطيافية ألفا

Determination of uranium 238 in urine samples for workers in the phosphate industry using alpha spectrometry

د. محمد حسان خريطة، د. عبد القادر بيطار، خالدية سخيطة

قسم الوقاية والأمان

ملخص

تم تطوير واعتماد طريقة باستعمال مطيافية ألفا لتحديد الجرعة الإشعاعية الداخلية الناجمة عن نظائر اليورانيوم لعمال مناجم الفسفات ويمكن بهذه الطريقة قياس مستويات إلى حدِّ أدنى قدره 2 mBq/L.

ومع أن نتائج الاعتماد أظهرت أن متوسط الخطأ النسبي بلغ حوالي 20%، إلا أن هذه الطريقة تبدو ملائمة ومناسبة لاستعمالها

الكلمات المفتاحية: تقنية بلازما انفرغ القوس الكهربائي، خليطة التيتانيوم-الألمنيوم-الفاناديوم،  $TiAlV$ ، أثر الحرارة على أغشية، جودة التبلور.

**Key Words:** Vacuum Arc Deposition,  $TiAlV$  Films, Substrate Temperature Effect, crystalline quality.

• نشرت هذه الورقة في مجلة: *Acta Physica Polonica A*.

مسامات، مسامات مكروية، مسامات نانوية،  $SEM$ ،  $RBS$ .

**Key Words:** Plasma focus; Porous silicon; Pores formation, Micropores; Nanopores;  $SEM$ ;  $RBS$ .

• نشرت هذه الورقة في مجلة: *J. of Fusion Energy*.

## امتصاص الـ $^{226}Ra$ من محاليل نفايات النفط على مبادلات كاتيونية صناعية

Sorption of  $^{226}Ra$  from oil effluents onto synthetic cation exchangers

د. لبنا العطار، محمد بسام صافية

قسم الوقاية والأمان

ملخص

شكل تزايد الوعي البيئي حافزاً للتخلص الآمن من المياه الملوثة بالراديو-226 والناتجة من الصناعة النفطية. جرت دراسة إزالة الراديو-226 بواسطة البرنسايت وسيليكات الأنتيمون وأشكالهما الكاتيونية باستعمال طريقة الدفعات، في شروط معينة تجريبياً هي زمن التماس ونسبة سائل-صلب وتركيز الـ  $^{226}Ra$ . عُبِّرَ عن النتائج بمعاملات التوزع. ولمعرفة آلية امتصاص الـ  $^{226}Ra$ ، أُجريت تجارب الامتصاص في محاليل مختلفة التركيز من حمض النتريك. بيّن تغير مقدار كفاءة امتصاص المواد للـ  $^{226}Ra$  في محاليل مرتفعة التركيز من  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$  أنّ البوتاسيوم أشد العناصر منافسةً بينما الصوديوم أقلها.

فُسِّرَت نتائج امتصاص الـ  $^{226}Ra$  من عينات مياه مرافقة للنفط حقيقية، جُمعت من شركتي دير الزور والفرات للنفط (AFPC & DEZPC)، اعتماداً على الخصائص التبادلية للمواد ومواصفات المياه الملوثة. اتضح أنّ انتقائية المواد المبادلة تعتمد بشكل كبير على درجة حموضة محاليل النفايات المعالجة مقارنةً مع باقي المتغيرات المدروسة.

الكلمات المفتاحية: راديوم، برنسايت، سيليكات الأنتيمون، صناعة نفطية، امتصاص، معالجة النفايات.

**Key Words:** radium, birnessite, antimony silicate, oil industry, sorption, waste treatment

• نشرت هذه الورقة في مجلة: *J. Environmental Management*.

## دراسة أثر الحرارة على أغشية رقيقة من خليطة التيتانيوم-الألمنيوم-الفاناديوم ( $TiAlV$ ) الموضوعة بتقنية بلازما انفرغ القوس الكهربائي

Characterization of  $TiAlV$  Films Prepared by Vacuum Arc Deposition: Effect of Substrate Temperature

د. بسام عبد الله

قسم الفيزياء

د. عمر مراد، د. إياس إسماعيل

قسم الكيمياء

ملخص

قمنا بدراسة ثلاثة أغشية رقيقة من خليطة التيتانيوم-الألمنيوم-الفاناديوم  $TiAlV$  باستخدام تقنية بلازما انفرغ القوس الكهربائي (Vacuum Arc Discharge) موضوعة عند درجات الحرارة 300-400 درجة مئوية.

تم استخدام أربعة منابع من القوس الكهربائي لهدفين من معدن التيتانيوم وهدف من معدن الألمنيوم وهدف من معدن الفاناديوم، لقد استخدمت تقنية انعراج الأشعة السينية XRD لتحديد الأطوار الموجودة في الأغشية الرقيقة، طور مكعب وطور سدس، ولتحديد التوجهات البلورية فيها وحساب حجم الحبيبات. تم تحديد نسب العناصر باستخدام تقنية الأشعة السينية المحثثة بالبروتونات proton induced X-ray emission (PIXE)، ووجد أنّ نسبة التيتانيوم تزداد بازدياد درجة الحرارة وتم قياس المساواة المكروية باستخدام تقنية فيكروز. لوحظ تناقص في مساواة الأغشية بزيادة درجة الحرارة.

تمت دراسة التركيب الكيميائي لسطوح الأغشية باستخدام مطيافية الإلكترون الضوئي X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)، حيث تبين وجود طبقة سلبية أو خاملة (passive layer) مكونة بشكل رئيس من مادة ثنائي أكسيد التيتانيوم  $TiO_2$  وذلك بتحليل أطيف الألمنيوم  $Al_{2p}$  والتيتانيوم  $Ti_{2p}$  والفاناديوم  $V_{2p}$ .

العينات باستخدام محطة معالجة تجريبية وكانت الطريقة فعّالة ونتائجها مقارنة للنتائج المخبرية لمعظم العناصر المدروسة. الكلمات المفتاحية: طحالب حمراء، أيونات العناصر الثقيلة، نكليد، أوساط مائية، امتزاز حيوي.

**Key words:** Heavy metal ion, Radionuclide, Red algae, Aqueous solution, Biosorption.

## استنسال وتوصيف مورثات أنزيمات اللاكتونيز من عزلات بكتيرية محلية تابعة للجنس *Bacillus sp.*

Cloning and characterizing of AHLs-lactonase encoding genes from local isolates of *Bacillus sp.*

د. عبد السمیع هنانو، د. حسان امونة

قسم البيولوجيا الجزيئية والتقانة الحيوية، هيئة الطاقة الذرية السورية

ملخص

أثبتنا في هذه الدراسة أن العزلة المحلية sy69a من بكتيريا *E. amylovora* تمتلك ظاهرة الـ (QS) عن طريق إنتاج نوع واحد على الأقل من جزيئات الهوموسيرين لاكتون (AHLs)، وهو المشتق المؤكسد من مركب الهوموسيرين لاكتون سداسي الكربون (3-oxo-AHL-C6). كما أثبتنا أن بعض العزلات البكتيرية (AH3c, AH155b, AH165a, AH184b, AH185b, AH195e) والتي عُرِفَت فيما بعد بكونها تابعة للبكتيريا *Bacillus simplex* تبدي تضادية حيوية عالية ضد الممرض النباتي *E. amylovora*، حيث تبين أن هذه العزلات تمتلك القدرة البيولوجية اللازمة لكبح ظاهرة الـ (QS) لبكتيريا *amylovora* عن طريق هدم المركب 3-oxo-C6-AHL.

الكلمات المفتاحية: أسيل-هوموسيرين لاكتون، *Bacillus simplex*.iiiA, *Erwinia amylovora* sy69، كشف حيوي لجزيئات AHLs II

**Key words:** N-acyl-L-homoserine lactonase, *Bacillus simplex*.iiiA, *Erwinia amylovora* sy69, Quorum sensing, AHLs-Biosensor.

## استخدام جفيف الطحالب الحمراء في معالجة المياه الملوثة بالنكليدات المشعة وبعض العناصر النزرة

The Use of Dried Red Algae for Treatment of Contaminated Water with Radionuclides and some Trace Elements

د. محمد سعيد المصري، سامر ماميش، يسر أمين، بشرى العاقل، تسييم الناعمة،

محمد بسام صافية

قسم الوقاية والأمان، هيئة الطاقة الذرية السورية

ملخص

استُعملت الطحالب الحمراء في إزالة U و Pb و Cd و Cu و Zn و Th و Po و Cs و Sr من الأوساط المائية باستخدام تقنية الدفعة الواحدة. دُرِس تأثير زمن التماس وحجم حبيبات المادة المازة وكميتها و pH المحلول المائي والتراكيز الأولية للعناصر المدروسة على كفاءة الامتزاز. ازدادت النسبة المئوية المزالة من Zn بازدياد حجم حبيبات الطحالب، في حين لم يُلاحظ أي تأثير للحجم الحبيبي على فعالية إزالة Cd و Po و Cs و Sr من المحاليل المائية. وكانت النسبة المئوية المزالة من U و Cu و Th و Pb عظمى من أجل الحبيبات الصغيرة. تناقصت النسبة المئوية المزالة من U و Sr بازدياد تركيزهما الأولي في المحلول، في حين بقيت هذه النسبة ثابتة مع ازدياد التركيز الأولي لكل من Pb و Cd و Cu و Th و Cs. تباين، من جهة أخرى، تأثير وجود الأيونات المختلفة بشدة على كفاءة الامتزاز تبعاً لنوع الأيون والعنصر المدروس. دلت العلاقة بين تركيز المادة الممتزة وكتلة الطحالب الحمراء على أن امتزاز U و Pb و Cd و Cu و Zn يتبع نموذج لانغمير، في حين دل تطبيق نموذج فريندليش على سيطرة آلية الامتزاز من أجل إزالة U و Th و Po و Cs و Sr من المحاليل المائية، وأن نتائج الامتزاز الحيوي الحركية تابع من الدرجة الثانية. وإضافة إلى ذلك، كانت جميع تفاعلات العناصر المدروسة باستثناء Cs و Th تفاعلات ناشرة للحرارة وعكوسة. تأثرت كفاءة إزالة العناصر المدروسة وفقاً لنوع المعالجة الفيزيائية أو الكيميائية المطبقة على الطحالب الحمراء. جرى تطبيق الشروط المثلى لإزالة المعادن على حجوم كبيرة من

## ملخص

تم في هذه الدراسة إنتاج دفعات عدة من البوليستريرات المشبعة وغير المشبعة مخبرياً مثل (بولي إيثيلين غليكول أديبات) و(بولي إيثيلين غليكول مالينات) على الترتيب، وتم كذلك تحديد الظروف المثلى لتصنيعها مخبرياً، مثل النسبة المولية للمونوميرات المتفاعلة، ومعدلات التسخين، ودرجة الحرارة البدائية والنهائية، وسرعة التحريك (الخلط)، وضخ غاز خامل كالأزوت ( $N_2$ ). وتم إجراء المعالجة الكيميائية (curing) بألية جذرية للبولى أستر غير المشبع (بولي إيثيلين غليكول مالينات) بإضافة مادة الستايرين له لإحداث تشابك مستعرض لسلسله البولييميرية بغية تحسين خواصه الكيميائية والميكانيكية.

تم أخذ عينات عدة من هذه الدفعات المحضرة حتى يتم توصيفها، وذلك بإجراء بعض الاختبارات الكيميائية والقياسات الفيزيائية لها مخبرياً، مثل الخواص الحرارية كدرجة الانصهار ودرجة حرارة الانتقال الزجاجي، ومقدار اللزوجة، وقرينة الانكسار، وقرينة اليود، والعدد الحمضي، بهدف دراسة إمكانية استخدامها لاحقاً في تحضير بعض المتراكبات البولييميرية (Composites) التي لها استخدامات تطبيقية عديدة في مجالات حياتية مختلفة.

الكلمات المفتاحية: بوليستر مشبع، بوليستر غير مشبع، بلمرة تكاثفية، متراكبات.

**Key words:** Unsaturated polyesters, saturated polyesters, polycondensation, composites.

## التوصيف الجزيئي لبعض الطرز الوراثية لنبات دوار الشمس باستخدام علامات الـ ISSRs والـ RAPDs

Characterization of some sunflower genotypes using ISSR markers

د. لبنى مقراني، عماد النابلسي، د. نزار ميرعلي

قسم البيولوجيا الجزيئية والتقانة الحيوية، هيئة الطاقة الذرية السورية

## ملخص

يعد دوار الشمس من المحاصيل الزيتية المهمة، ولزيت دوار الشمس أهمية كبرى من الناحية الغذائية، كما أن له استخدامات صناعية كثيرة بفضل خواصه الكيميائية لا سيما السيولة والثبات. يتم إنتاج بذاره من قبل شركات خاصة عالمية وتباع على شكل هجن. لم تجر من قبل أية دراسة سابقة على طرز دوار الشمس في سورية. لذلك كان الهدف من هذه الدراسة تعيين الطرز الوراثية لدوار الشمس المنتشرة في سورية، وذلك بالاعتماد على تقنيتي الـ ISSRs

## اعداد برنامج حاسوبي لتقدير الاستجابة الزلزالية في الأبنية - تطبيق على مبنى قسم الجيولوجيا

Preparation of a computer program for evaluation of the buildings seismic response - Application on the building of geology department

د. محمد خير عبد الواحد

قسم الجيولوجيا - هيئة الطاقة الذرية السورية

## ملخص

تم إعداد البرنامج الحاسوبي (BuldRes.exe) باستخدام لغة الفورتران 90 وبيئة التطوير (Microsoft Developer Studio) بحيث يكون متوافقاً مع نظام التشغيل (Windows XP). يسمح هذا البرنامج بتطبيق العديد من طرائق معالجة الإشارة على التسجيلات الاهتزازية المنفذة في الأبنية، مما يجعله أداة مفيدة في المجالات التطبيقية والتعليمية. وطرائق المعالجة هي: المعايرة، إعادة التقطيع، تصحيح الإزاحة والميل، حذف جزء من الإشارة، الاشتقاق والتكامل، التصفية، التثني والتصفية العكسية، الارتباط الذاتي والصلق. إضافة إلى ذلك، يسمح البرنامج بالحصول على نتائج المعالجة بيانياً ورقمياً، مثل الإشارة، الأطياف، النسبة الطيفية، وغيرها. ويمكن، أخيراً، أن يستخدم هذا البرنامج لتقدير الاستجابة الزلزالية في الأبنية بطريقة النسبة الطيفية والموقع المرجح وغيرهما بعملية بسيطة وسهلة وفعالة.

الكلمات المفتاحية: معالجة الإشارة، استجابة زلزالية، هندسة زلزالية.

**Key words:** Signal processing, Seismic response, Engineering seismology.

## الاصطناع العضوي لبعض البوليستريرات مخبرياً ودراسة خصائصها الفيزيائية والكيميائية لإمكانية استخدامها في تحضير بعض المتراكبات

Organic synthesis, characterization and properties of some polyesters resins for composite applications

د. زكي عجي، أمجد السقا

دائرة تقانات البولييميرات - قسم تكنولوجيا الإشعاع - هيئة الطاقة الذرية السورية

تقدير الاندخال المهني وأيضاً لمستخدمي المواد المشعة الذين تجرى لهم مراقبة روتينية وبحاجة لوقاية إشعاعية.

يقدم برنامج سورييس إمكانية الحصول على أنواع مختلفة من التقارير، وهو برنامج واضح وسهل الاستخدام. البيئة البرمجية المنفذ بها البرنامج هي مايكروسوفت فيجوال فوكس برو (Microsoft Visual Foxpro). يتم تشغيل هذا البرنامج ضمن نظام ويندوز مايكروسوفت XP ويوزع من قبل هيئة الطاقة الذرية السورية، وهو نظام ثنائي اللغة (العربية والإنكليزية) من حيث واجهات التخاطب والتقارير.

الكلمات المفتاحية: برنامج حاسوبي (سورييس)، تعرض مهني، اندخال إشعاعي، جرعة داخلية.

**Key words:** Computer program, Occupational exposure, Intake, Internal dose.

## تحري آليات التغذية في النظم الكارستية عبر دراسة علاقة المحتوى النظائري والكيميائي لبياه الأمطار والينابيع: دراسة حالة نبعي الفيحة وبردى

Recharge mechanism in karstic systems investigation through the correlation of chemical and isotopic composition of rain and spring-water (Case study: Figehe and Barada Springs)

د. عبد الرحمن شريدة

قسم الجيولوجيا، هيئة الطاقة الذرية السورية

ملخص

تشكل الطبقات المائية الكارستية أهم مصادر المياه الجوفية ليس فقط في سورية وإنما على مستوى العالم. المقاربات الهيدروجيولوجية لدراسة تلك الطبقات تطورت كثيراً خلال العقدين الأخيرين. ولعل من أهم تلك المقاربات هو استخدام المتفقيات الطبيعية للنظائر والهيدروكيميا لدراسة وتوصيف آليات التغذية والتفريغ، وتقدير نسب التغذية في نظم الطبقات الجوفية الكارستية. الحقل التطبيقي لهذا المشروع تمّ على الطبقات الجوفية الكارستية لنبعي الفيحة وبردى والتي تقع في محب الصخور الكربوناتيّة لسلسلة لبنان الشرقية.

تمتّ مكاملة نتائج النظائر البيئية ( $\delta^{18}O$ ,  $\delta D$ ) والهيدروكيميا في مياه الأمطار والمياه الجوفية على مدار ثماني سنوات من القياسات بهدف دراسة الخصائص الهيدروكيميائية والنظائرية وتوصيف التغيرات الزمنية وتقدير نسب التغذية وتحريّ آليات الجريان للمياه الجوفية

وال RAPD، بالإضافة إلى إيجاد معلمات وراثية خاصة ببعض الطرز الوراثية. تمّ تطبيق 24 مرئسة ISSRs و13 مرئسة RAPD على 29 طرازاً وراثياً لدوار الشمس المتوفرة بالهيئة العامة للبحوث العلمية الزراعية وكذلك المنتشرة بالأسواق المحلية ومناطق مختلفة من سورية (حلب-الغاب)، بالإضافة إلى عيّنتين من الأقحوان والقطفة كشاهدين بعيدين.

لوحظ من خلال هذه الدراسة قلة التعددية الشكلية لنتائج الـ ISSR مقارنة مع دراسات سابقة على أنواع مختلفة أخرى. كما أظهرت الدراسة أحد عشر طرازاً متقارباً لم تتجاوز فيها نسبة عدم التوافق الـ 1% وهي: 7189-7191-7184-7183-443-441-غاب1 - غاب2 - غاب3 - غاب4 - غاب5 - مضع حلب - سرغايا4 - تركيبي قنيطرة. وكان الطرازان سرغايا4 وتركبي قنيطرة قريبين جزيئياً وهما الأقل من حيث الإنتاجية ولهما مواصفات شكلية متقاربة (طول النبات - عدد الأيام حتى الإزهار - عدد الأيام حتى النضج ووزن 100 حبة)، أما الطراز Hysum33 فهو عالي الإنتاجية ويعيد جزيئياً عن باقي الطرز المدروسة شكلياً. تمّ الحصول على بعض المعلمات الوراثية الخاصة بعدد من الطرز الوراثية.

الكلمات المفتاحية: دوار الشمس، زيت، RAPD، ISSRs.

**Key words:** Sunflower, Oil, ISSR, RAPD.

## برنامج نظام معلومات التعرض المهني الإشعاعي الداخلي في سورية (سورييس)

System Program Information of Internal Occupational Radiation Exposure in Syria (SORIES)

د. عبد القادر بيطار - ميسون المغربي

قسم الوقاية والأمان، هيئة الطاقة الذرية السورية

ملخص

يصف العمل الحالي برنامجاً حاسوبياً (سورييس) يمكن المستخدمين من تقدير الاندخال والجرعة الإشعاعية الداخلية للعاملين المعرضين مهنياً للإشعاع وذلك بالنسبة لجميع النكليات المشعة الموجودة في نشرة ICRP /78/ وبعض النكليات المشعة المهمة المستخدمة طبيياً.

يتضمن البرنامج أنظمة أساسية لأرشفة وتوثيق البيانات وتوثيقها، وهذا بدوره يسهل عملية تنظيم البيانات لمراقبة الأشخاص المعرضين مهنياً للمواد المشعة المفتوحة وتقييم نتائج المراقبة.

إن برنامج سورييس مناسب للمخابر التي تعمل في مجال

## ملخص

تم تصميم نظام متقدم للمعالجة التفرعية وتنفيذه بحيث يمكننا استخدامه في دعم البحوث التي تحتاج إلى قدرات حساب عالية في تطبيقات الرياضيات والفيزياء والكيمياء والعلوم الطبيعية وعلوم الهندسة والحاسوب.

بالإضافة لذلك، يسمح هذا النظام بخلق مجالات واسعة لأبحاث عالية المستوى ويشجع المساهمات الأكاديمية والبحوث المشتركة ضمن الهيئة وعلى مستوى القطر.

يؤمن النظام وسيلة لتطوير عمل الباحث في العديد من حقول العلم التي تتطلب أدوات حساب متقدمة من الناحية المادية والبرمجية. وتتخلص الأهداف المرجوة من استخدامه بما يلي:

- إدارة البحوث في مجال العلوم والهندسة. ويمكن للنظام في هذا المجال أن يعمل بوصفه وسيلة دعم للبحث يمكن استخدامها 24 ساعة باليوم، 7 أيام بالأسبوع.
- من المتوقع أن يخدم النظام الباحثين والمهندسين ضمن الهيئة ومن مختلف المؤسسات المخولة باستخدامه ضمن القطر.

الكلمات المفتاحية: نظام معالجة تفرعية، حسابات متوازية.

**Key words:** Cluster, Parallel Computing

## تقصي متبقيات المبيدات الكلورية العضوية في الرسوبيات وبعض الرخويات في ساحل طرطوس

Detection of Organochlorinated Pesticides residue sediments and some mollusks of Tartous coast

د. إياد غانم

قسم البيولوجيا الجزيئية والتقانة الحيوية، هيئة الطاقة الذرية السورية

## ملخص

دُرس تركيز ثمانية مبيدات كلورية هي: gamma HCH، Heptachlor epoxide، Aldrin، Dieldrin، 4,4,DDE، 4,4,DDD، 4,4,DDT في أنواع بعض الرخويات والرسوبيات في خمسة مواقع، كما يلي: مصب نهر السن (Monodonta turbinata، Brachidonta variabilis، and Patella caerulea)، مصب نهر جوير (Monodonta turbinata، and Patella caerulea)، محطة بانياس

المتدفقة من الينابيع الكارستية الكبيرة للفيجة وبردى، حيث يعد كلا النبعين من أهم الينابيع في لبنان الشرقية نظراً لغزارتهما العالية.

قيم  $\delta^{18}O$  لكل من الفيجة وبردى كانت على التوالي -8.9 و -7.7‰. الخط التراجعي لكل من الأمطار والمياه الجوفية المتدفقة من نبعي الفيجة وبردى تم توصيفه بالمعادلة:  $\delta D = 7.9 \delta^{18}O + 19.7$ ، والذي يظهر عدم وجود أي تبخر أثناء الهطول المطري، وأن مصدر المياه الجوفية يرتبط بالرشح المباشر للأمطار. تم حساب تدرج الأكسجين-18 مع الارتفاع بالقيمة -0.23‰ لكل 100م. وبناءً عليه، فإن القيم الوسطية لارتفاعات نطاقات التغذية تم تقديرها بـ  $2000 \pm 50$  و  $1350 \pm 50$  م مطلق فوق سطح البحر لكل من نبعي الفيجة وبردى على التوالي.

تم استخدام ميزان الكتلة للكلور (Chloride Mass balance CMB) من أجل التقييم الكمي للتغذية. أشارت النتائج إلى أن كمية التغذية على الحوض الصباب لنبع الفيجة تتراوح ما بين 190 إلى 825 م/م/سنة والتي تشكل ما قيمته 43-67% من كمية الهطول المطري السنوي. هذه القيم المحسوبة بطريقة ميزان الكتلة للكلور متقاربة إلى حد كبير مع القيم التي تم الحصول عليها بطرائق أخرى.

تركيز التريتيوم في المياه الجوفية منخفض وقريب جداً من القيم المقيسة في مياه الأمطار 4.5 وحدة تريتيوم (TU) في محطة بلودان المناخية. بمواصلة نموذج توزع زمني آسي، فإن زمن المكوث الرئيس للمياه الجوفية في ينابيع الفيجة وبردى تم تقديرها بـ 50 و 15 سنة على التوالي. قيمة الحجم الأعظمي لخزان المياه الجوفية لكل من نبعي الفيجة وبردى تم تقديرها بحوالي  $3.9 \times 10^9$  و  $470 \times 10^6$  متر مكعب على التوالي.

الكلمات المفتاحية: أمطار، طبقات مائية كارستية، نظائر، هيدروكيميائي، نسب التغذية، زمن المكوث، ينابيع الفيجة وبردى، لبنان الشرقية، سورية.

**Key words:** Precipitation, Karst aquifers, Isotope, Hydrochemical, Recharge rate, Residence time, Fige and Barada springs, Anti-Lebanon, Syria.

## تصميم نظام متقدم للمعالجة التفرعية وتنفيذه

Advanced System for Parallel Computing

د.علي محمد، علي طاهر حسن، سامر أغاوي، تمام البرازي  
قسم الخدمات العلمية، هيئة الطاقة الذرية السورية

الخلوية المختلفة. تتواجد هذه الخلايا في العديد من الأعضاء وخصوصاً الأعضاء المعروفة بسرعة تبدل مكوناتها مثل نقي العظم والأمعاء.

تجتمع في نقي العظم عند البالغين مجموعتان من الخلايا الجذعية: الخلايا الجذعية الدموية والتي من خلال تكاثرها وتمايزها توفر كل عناصر الدم، والخلايا الجذعية اللحمية المتوسطة والتي من خلال تكاثرها وتمايزها توفر البنية الداعمة للخلايا الجذعية الدموية. وقد أخذت الخلايا الجذعية اللحمية تسميات عدة في الأدب الطبي مثل خلايا الأرومة الليفية المكونة للمستعمرات، والخلايا الجذعية الداعمة في نقي العظم، والخلايا السليفة اللحمية المتوسطة، والخلايا الداعمة في نقي العظم. وتعدُّ الخلايا الجذعية اللحمية المتوسطة مصدراً مهماً للخلايا لسهولة الحصول عليها وسهولة التعامل معها.

تمت دراسة فعالية الخلايا الجذعية اللحمية المتوسطة في استعادة النقي لقدرته على تكوين الدم وفي تجديد العظم وفي حالات معالجة سوء تصنيع العظم وفي حالات الاحتشاء القلبي أو الأمراض المرتبطة بها بشكل جيد. ولذلك، فإن عزل هذه الخلايا من أنواع مختلفة، مثل الجردان، وإجراء تجارب ما قبل سريرية موسعة عليها يعدُّ أمراً مطلوباً. تمَّ تطوير عدد من التقنيات من أجل هذا الغرض. مثل تعريض الزرعات لمواد سامة، والزراعة ذات الكثافة العالية وعزل الخلايا، والتي سمحت بعزل الخلايا الجذعية اللحمية المتوسطة. ولكن لهذه الطرائق مساوئ، إذ إن الخلايا المعزولة بهذه الطرق تنخفض لديها القدرة على التكاثر والتمايز. ولذلك قمنا بمحاولة عزل هذه الخلايا باستخدام طريقة عمل بسيطة تعتمد على وسط الزرع وطريقة الزرع.

الكلمات المفتاحية: نقي العظم، خلايا جذعية دموية، خلايا جذعية لحمية متوسطة.

**Key words:** Bone marrow, Hematopoietic stem cells, Mesenchymal stem cells.

الحرارية (Monodonta turbinata Patella caerulea, Strombus persics, Trochus erithraes.) موقع الباصية (Monodonta turbinata, Patella caerulea, Brachidonta variabilis) ومرقية (Patella caerulea) ضمن ستة أزمنة جمع للعينات تمت خلال عامي 2006-2007.

وأشارت نتائج الدراسة إلى أن أعلى تلوث بالمبيدات الكلورية كان في مصب نهر السن، ومصب نهر جوبر، ومصب مرقية، حيث احتوت عينات الرخويات المدروسة على تراكيز مختلفة من جميع المبيدات الكلورية الثمانية المدروسة، أما موقع المحطة الحرارية، فقد اقتصر التلوث على مبيدي الـ Heptachlor و الـ Heptachlor epoxide بشكل رئيسي. في حين كانت درجة التلوث في موقع الباصية والذي عدُّ كمحطة مرجعية أقل من مواقع الدراسة الأخرى.

الكلمات المفتاحية: رخويات، رسوبيات، مبيدات الكلور العضوية، تلوث.

**Key words:** mollusks, sediments, organochlorinated pesticides, contamination

## عزل الخلايا الجذعية اللحمية المتوسطة من نقي عظم الجرذ وزراعتها

Isolation and culture of mesenchymal stem cells from rat bone marrow

د. خالد المحمد، فاطمة الشيخ

قسم الطب الإشعاعي- دائرة البيولوجيا الطبية- هيئة الطاقة الذرية السورية

ملخص

تعرف الخلايا الجذعية بأنها مجموعة من الخلايا الأولية التي تملك قدرة على تجديد نفسها باستمرار من خلال انقسامها المستمر وبأنها تملك إمكانية التمايز إلى مجموعة من النسائل

## تنويه

تعذر رئاسة هيئة تحرير مجلة عالم الذرة عن تأخر صدور العددين الحاليين (145 و 146)، لظروف فنية خارجة عن إرادتها