# ترويض الأشباح

## قصة الإشعاع المؤين والطاقة النووية

تأليف
دكتور / هشام الزيات

١٤٤٢ هـ - ٢٠٢١م

**العنـوان :ترويض الأشباح «قصة الإشعاع المؤين والطاقة النووية»**
**المؤلف دكتـور / هشـام الزيـات**

**الموضـــــــوع : بيئي**
**عـــــدد الصفحات : 592 صفحة**
**قيـــاس الصفحة : 17 - 24 سم**
**عـــــدد النســخ : 1000 نسخة**

**التصنيف العمـري : E**
**إذن طباعة رقم : 2648494 - 01 - 03 - MF**
**الرقم الدولي للسلسلة : 978-9948-8793-0-5 : (ISBN)**

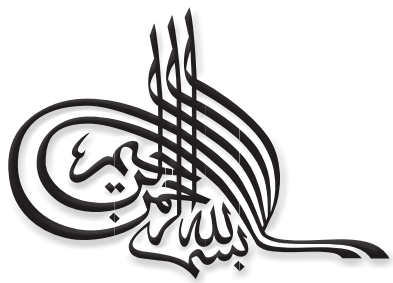
**الطبعة الأولى**
**1442 هـ - 2021م**

**® جميع الحقوق محفوظة**
**يمنع نسخ هذا الإصدار أو أجزائه بكل الطرق، كالطبع، والتصوير، والنقل، والترجمة، والتسجيل المرئي، والمسموع والإلكتروني، إلا بإذن خطي من «مؤسسة زايد الدولية للبيئة»**

**تم تصنيف وتحديد الفئة العمرية التي تلائم محتوى الكتب وفقاً لنظام التصنيف العمري الصادر عن المجلس الوطني للإعلام»**

**ص. ب: 28399 دبي - الإمارات العربية المتحدة**
**برج العلي - شارع الشيخ زايد - رقم (50°4)**
**هاتف : 3326666 4 971+ - فاكس : 3326777 4 971+**
**البريد الإلكتروني : cta@zayedprize.org.ae**
**الموقع الإلكتروني : www.zayedprize.org.ae**

الآراء الواردة في هذا الكتاب
لا تعبر بالضرورة عن رأي «**مؤسسة زايد الدولية للبيئة**»، ولا تتحمل أي مسؤولية مهما كانت طبيعتها ناشئة أو متصلة بمحتويات هذا الكتاب


بسم الله الرحمن الرحيم

# تقديم

تواصل مؤسسة زايد الدولية للبيئة إصدار سلسلة كتاب عالم البيئة كجسر يربط بين العلماء والخبراء المتخصصين وبين فئات المجتمع التي تحتاج للمعلومات العلمية بصورة مبسطة يمكن استخدامها بواسطة الإعلام لنشر الوعي والثقافة البيئية، والمعلم الذي يود توصيل المعلومات لطلابه، ومتخذ القرار الذي يود اتخاذ قرار مستنير. هذا هو الكتاب رقم 28 ويتحدث عن الاشعاع المؤيّن.

وفي هذا الكتاب يأخذنا الدكتور هشام الزيات في رحلة شيقة ومدهشة بين ذرات وجزيئات المواد المشعة التي نستخدمها في تطبيقات كثيرة تخدم المجتمع في مختلف المجالات مثل الطاقة والطب، وهي في نفس الوقت يمكن أن تتحول إلى تطبيقات خطيرة وضارة جداً بصحة الإنسان والبيئة إن لم تُستخدم بطريقة علمية وبيئية سليمة. وبهذا يكون الكتاب مهماً ومفيداً لجميع فئات المجتمع، خاصة العاملين في مجالي الطاقة النووية والطب.

نتقدم بالشكر الجزيل للدكتور هشام الزيات الذي قام بتأليف كتاب السلسلة رقم 11 بعنوان «الإدارة البيئية» (2010)، وشارك مع الأستاذ الدكتور شريف قنديل في تأليف الكتاب رقم 23 بعنوان "«رحلة الماء من المالح إلى العذب» (2018). وهذا كتابه الثالث الذي نعتبره إضافة هامة للمكتبة العربية المرجعية.

إننا ندعو الخبراء والباحثين العرب للمساهمة معنا في نشر العلم والثقافة البيئية على أوسع نطاق في الوطن العربي وبين المهاجرين العرب أينما كانوا. الرجاء الاطلاع على شروط النشر في نهاية الكتاب وتعبئة استمارة مقترح كتاب.

أيضاً نتقدم بالشكر والتقدير إلى المحكمين والمدقق اللغوي وهيئة تحرير السلسلة الذين بذلوا جهوداً مقدّرة لإخراج هذا الكتاب.

تمنياتنا لكم بقراءة ممتعة، آملين أن يُستفاد من هذا الكتاب لإحراز تقدم ملموس في مجالات استخدام الذرة والطاقة والاشعاع المؤين للأغراض السلمية المفيدة المختلفة بوطننا العربي الكبير.

**أ. د / محمد أحمد بن فهد**

رئيس تحرير سلسلة كتاب عالم البيئة

رئيس اللجنة العليا لمؤسسة زايد الدولية للبيئة

# تعليقـــات القـــراء

(حسب تاريخ ورودها)

- **كتاب رائع مكتوب بأسلوب عربي راقي، ويغطي فجوة معرفية في المكتبة العربية. موضوع الكتاب في غاية الأهمية لأنه يخص الإنسان على كافة المستويات وأينما كان أو ذهب.**

**أ د إبراهيم هنداوي**، أستاذ الفيزياء البيئية، معهد الدراسات العليا، جامعة الإسكندرية، الإسكندرية، مصر

- **كتاب جميل يتحدث عن الذرة والإشعاع، التاريخ والسياسة، الحكمة والحياة. يجمع بين بساطة العرض وعمق المضمون. تشعر وأنت تتنقل بين فقراته كأنك تقرأ حكاية مصورة شيقة. لا يليق باسم هذا الكتاب سوى «ترويض الأشباح».**

**م. وسام جابر**، باحثة بجهاز شئون البيئة المصري، الإسكندرية، مصر

- **كتاب شيق وجذاب يقدم المعلومات العلمية بأسلوب سلسل وبسيط. يفيد المتخصصين وغير المتخصصين. نحتاج إلى المزيد من هذه الكتب لإثراء اللغة العربية بالمصطلحات العلمية وتقديم محتوى قيم للقارئ العربي.**

**أ. سمر أشرف**، باحثة وصحفية علمية، الإسكندرية، مصر

- كتاب فريد، يأخذك في جولة سياحية إلى أهم المعالم على طريق التقدم البشري في مجال الذرة والإشعاع. تشاهد خلالها ليس فقط ما هو ظاهر على المسرح، إنما أيضا ما هو مخفي وراء الكواليس. كتاب يشدك إلى القراءة ويدفعك إلى التفكير في وقت واحد.

**أ. رباب سلام**، باحثة علمية وبيئية، الإسكندرية، مصر

- كتاب ممتع، سهل الطرح، عميق المحتوى، ثري بالمعلومات القيمة، يتطرق لموضوع مهم في الساحة العلمية...فألف مبروك للأستاذ الفاضل هشام الزيات على إصدار هذا الكتاب، والذي أشعل به شمعة علم جديدة مشرقة في بحر المعرفة، وأزال به خطوة جهل سائرة في طريق الظلام...نفع الله به أمته دائما وأبدا، وبارك الله في جهوده الطيبة.

**د. منى القحطاني**، أستاذ مشارك، كلية الصحة العامة، جامعة الإمام عبدالرحمن بن فيصل، الدمام، المملكة العربية السعودية

- هذا الكتاب أكثر من رائع: المحتوى غني بالمعلومات القيمة، مقدمة بطريقة مبسطة ليسهل على غير المتخصص فهمها. السرد مشوق، الجمع بين المصطلحات العربية والإنجليزية يجعله قريبا من الذهن. تحتاج الفيزياء إلى من هم مثل الدكتور هشام الزيات ولن تشتهر بالتعقيد بعد ذلك. كل الاحترام والتقدير لك، ووفقك الله في نشر العلم وأثابك.

**د. يسرا سعيد**، صيدلانية وباحثة علمية، الإسكندرية، مصر

- يطرح هذا الكتاب مفاهيم علمية هي صعبة على الفهم عادة. أسلوبه السلس، الممتع، والمتدرج يجعله مناسبا للقراء على كافة المستويات. توصل

مادته العلمية بين النظرية والتطبيق من خلال شرح موسع عن العوامل التاريخية، الجغرافية، والاجتماعية المتداخلة والمؤثرة على التطبيق العملي والمشاريع المقامة دوليا.

**أ. د. نيڤين حمزة،** أستاذ العمارة والطاقة، كليه العمارة، التخطيط العمراني، والمناطق الخضراء، جامعة نيوكاسل، نيوكاسل، المملكة المتحدة

❊ ❊ ❊

# إهداء

إلى روح الصديق الوفي

والإنسان النقي

الأستاذ الدكتور أحمد الفطاطري

# شُكرٌ وتقدير

يتقدم الكاتب بخالص آيات الشكر والعرفان للمسؤولين عن محطتي «بتسناو Beznau» و«چوسچن Gösgen» النوويتين السويسريتين لتفضلهم بتنظيم جولة تعليمية باللغة الإنكليزية للكاتب داخل هاتين المحطتين وإمداده بالمواد الإعلامية عنهما. كما يتوجه بالشكر الخاص إلى كل من السيدتين «Alexandra Spuler» و«Gudrun Thomsen»، في المحطة الأولى، والسيدة «Sabrina Kohler»، في المحطة الثانية.

أوجه خالص الشكر والتقدير للسيدات والسادة المحررين، المحكمين، والمدققين اللغويين لمجهوداتهم الكبيرة واقتراحاتهم البصيرة التي أدت إلى خروج هذا الكتاب على أفضل شكل.

# إخلاء مسؤولية

- جميع المعلومات والأشكال التي يتضمنها الكتاب هي من مصادر عامة متاحة للجميع. الهدف الوحيد منها هو التوعية والتعليم، ولا يترتب عليها أية مسؤولية قانونية أو أخلاقية، تجاه الكاتب، المحرر، الناشر، أو أي من المنظمات المذكورة في هذا الكتاب. الآراء الواردة في الكتاب لا تعبر بالضرورة عن وجهة نظر مؤسسة زايد الدولية للبيئة ولا أي جهة أخرى ذات صلة بنشر هذا الكتاب.

# مُقَدِّمَة

الإشعاع حقيقة حية، وهو موجود في كل مكان من حولنا. ضوء الشمس وأشعتها الحرارية ضروريان لحياتنا. تتواجد المواد المشعة طبيعيا في البيئة وبداخل أجسامنا. لقد تبدت الحياة على كوكبنا وتطورت في وجود هذا الإشعاع.

منذ اكتشاف أشعة أكس والمواد المشعة قبل أكثر من مائة عام والإنسان ينتج الإشعاع والمواد المشعة اصطناعياً. كان الاستخدام الأول لهذا الاكتشاف مفيداً. جرى استخدام أشعة أكس في غضون أشهر قليلة من اكتشافها في 1895. لكن سرعان ما تكشفت أيضاً أضرارها على الأطباء والجراحين الذين تعرضوا دون احتياط لجرعات زائدة من هذه الأشعة. ومثل سائر الاكتشافات العلمية، يستطيع الإنسان استخدام الإشعاع والمواد المشعة في الأغراض النافعة والمدمرة أيضاً.

عادة ما يصنف العلماء الإشعاع حسب التأثير الذي يحدثه في المادة إلى *إشعاع مؤين ionizing* و*غير مؤين nonionizing*. يشمل النوع الأول كل من الأشعة الكونية، أشعة أكس، والإشعاع المنبعث من المواد المشعة. يضم الإشعاع غير المؤين الأشعة الحرارية، موجات الراديو، والموجات القصيرة. أما الأشعة فوق البنفسجية فتقع بين هذين النوعين.

**يتناول هذا الكتاب موضوعي الإشعاع المؤين، والذي يشار إليه عادة بلفظ «الإشعاع» مجرداً، والطاقة النووية.**

**لمن كتب هذا الكتاب؟ إلى مجموعة متنوعة من القراء:**

- صانعوا السياسات والقرارات المتعلقة بالطاقة وحماية البيئة الذين يبغون معرفة شاملة وميسرة في آن معا بموضوعي الطاقة النووية والحماية من الإشعاع؛
- البصراء من عامة الناس الذين لا يبغون أن يصبحوا خبراء في الإشعاع والطاقة النووية، لكن يسعون إلى معرفة مؤثرة بالموضوع؛ هؤلاء الذين يحتاجون لفهم «لماذا» كي يستطيعون استخدام المعلومات بشكل صحيح؛
- المتخصصون في المجالات المختلفة حديثي العهد بموضوع الإشعاع والطاقة النووية، الذين قد يجرى استدعائهم للخدمة في حالات الطوارئ ذات الصلة بالإشعاع؛
- طلبة المدارس الثانوية والسنوات الأولى الجامعية الذين يرغبون في معرفة أعمق بالموضوعات التي يدرسونها في كتبهم الدراسية بشكل مكثف ولكن مجتزأ من سياقه التطبيقي، الاجتماعي، والتاريخي؛
- المهنيون المتخصصون الذين يرغبون في العمل في محطات الطاقة النووية، ويرغبون في الحصول على نظرة شاملة على كافة الأنشطة المتعلقة بهذا العمل؛
- والمترجمون الفنيون في مجالات الطاقة النووية والحماية من الإشعاع.

لقد حاولت أن يكون هذا الكتاب مرجعاً باللغة العربية لتاريخ الطاقة النووية في العالم، والمنطقة العربية بشكل خاص. أدرك تماماً أن إعداد مثل هذا الكتاب هو تحدٍ كبير، وآمل أن يحقق القدر الأكبر من توقعات القراء المهتمين.

لقد سعيت، بالإضافة إلى شرح المعارف الأساسية عن الإشعاع، إلى إيضاح كيف أمكن الوصول إلى هذه المعارف كلما كان ذلك ممكناً دون الدخول في تفاصيل

فنية معقدة على القارئ غير المتخصص. لقد فوجئت أن تفاصيل الاكتشافات العلمية، مثلها مثل سائر الأحداث التاريخية، تتباين من رواية إلى أخرى. حاولت قدر المستطاع أن أصل إلى الحقيقة باتباع أساليب البحث التاريخي.

ليس هذا بكتاب علمي تقليدي؛ إنه كتاب عن العلم، التاريخ، والحياة الاعتيادية للعلماء والباحثين. لذلك، سيلاحظ القارئ أن لغة الكتاب تمزج بين اللغة العلمية المنضبطة الصارمة واللغة الروائية التصويرية الحرة. على كل حال، تحريت الدقة العلمية الفائقة في كل ما ورد بالكتاب من معلومات، سواء كانت علمية أم تاريخية. لكني فضلت أحياناً استبعاد بعض التفاصيل الفنية الدقيقة كي لا أثقل على عموم القراء.

يربط الكتاب في مناسبات عديدة بين المعارف العلمية والحكمة الشعبية، وهو ترابط بدأ يتأكد في العلوم الإنسانية في الفترة الأخيرة. حاولت أيضاً أن أجمع في الكتاب بين مزايا الدراسات الأكاديمية الدقيقة المتأنية والتحليلات الصحافية الخبيرة المتحررة.

إن التباين من سنن الحياة. ليس من أغراض هذا الكتاب الترويج لاستخدام الطاقة النووية ولا معارضته، فقط عرض المعلومات العلمية المحايدة حتى يستطيع كل قارئ أن يكون رأيه الخاص بصورة أكثر موضوعية.

أخيراً، وليس آخراً، نتمنى لكم رحلة فكرية وثقافية ممتعة.

# توضيح حول
# أسلوب الكتاب المتبع

للكتابة العلمية أسلوبها الخاص، أسلوب يناسب طبيعة موضوع هذا النوع من الكتابة: العلم. لقد تطور هذا الأسلوب في اللغة الإنجليزية كثيرا منذ بداية الثورة العلمية الأوربية في منتصف القرن 16، ومازال يتطور باستمرار. من أهم خصائص هذا الأسلوب الوضوح، الدقة، والإيجاز. دفعت هذه الخصوصية بعض الكتاب العلميين إلى القول بأن ما هو محمود في الكتابة الأدبية هو مزموم في الكتابة العلمية.

لقد حاولت جاهدا في هذا الكتاب أن أطور من أسلوب الكتابة العربية العلمية كي يواكب نظيره في اللغة الإنجليزية؛ فأنا أؤمن أن اللغة كائن حي: إن لم تتطور تموت. لم أجد مفرا خلال مسعاي هذا من مخالفة بعض الآراء والقواعد التقليدية التي مازال يتمسك بها بعض اللغويين العرب. فيما يلي بيان بأهم هذه "المخالفات" والابتكارات:

- فضلت استخدام الجمل القصيرة، بعكس المعتاد في الكتابة العربية التقليدية، لأنها أسهل على الفهم والاستيعاب. من المتوقع أن يبدو ذلك في البداية غريباً وغير بليغاً، ولكن من المتوقع كذلك، أو المأمول على الأقل، أن يعتاد القارئ العربي مع مرور الوقت على هذا الأسلوب، ويقدر فائدته.
- فضلت أيضاً استخدام صيغ المبني للمعلوم، على عكس المتبع في الكتابة التقليدية، وهو ما توصي به مدارس الكتابة العلمية الحديثة، لأنه يسهل الفهم ويحد من اللبس.
- لا استخدم حرف الواو عند ذكر قائمة من الكلمات المتتالية إلا عند

الضرورة، وفيما يلي مثال على ذلك: «ميز الإنسان منذ القدم بين نوعين من الأشياء: واحد يشغل حيزاً في الفراغ، مثل الصخور، النباتات، والحيوانات، وآخر لا يشغله، مثل الضوء، الحرارة، والصوت».

- لا أبدأ جملة بحرف الواو، على عكس ما يفعل أغلب الكتاب العرب، إلا إذا كانت «واو الاستئناف» هذه ضرورية للمعنى.
- اختصرت عبارة «ثمانينيات القرن العشرين» على النحو التالي: «*80*ات*19*»، وتقرأ «ثمانينات الألف وتسعمائة» أو «ثمانينات (القرن) العشرين»، واتبعت هذا النظام مع التواريخ المشابهة.
- استغنيت عن علامات الوقف غير الضرورية. مثال على ذلك، أوردت المصطلح الإنچليزي مباشرة بعد ترجمته العربية دون وضعه بين قوسين: «عادة ما يصنف العلماء الإشعاع حسب التأثير الذي يحدثه في المادة إلى *إشعاع مؤين ionizing وغير مؤين nonionizing*».
- في ضوء عدم وجود دليل شامل وواضح لاستخدامات علامات الوقف المختلفة في اللغة العربية، استعرت بعض القواعد من اللغة الإنچليزية. ولا أرى غضاضة في ذلك، فأغلب هذه العلامات هي أصلاً "مستوردة" من هذه اللغة.
- كتبت المصطلح العلمي أو التقني بـ *حروف مائلة italics* عند ذكره لأول مرة، كما هو متبع في الكتب المتخصصة الإنچليزية.
- عند كتابة الكلمات الأجنبية بالخط العربي، استعملت حروف "چ"، "ڤ"، و"پ" شبه العربية كمقابل لحروف "v"، "g"، و"p" الإنچليزية، على التتابع، مع استثناء الأسماء الأجنبية الشهيرة.
- حرصت على كتابة أسماء الأشخاص والبلاد بلغة أولئك الأشخاص وساكني تلك البلاد كلما كان ذلك ممكناً.

يلاحظ المتابع لتطور أسلوب الكتابة العلمية في اللغة الإنجليزية أنه في اتجاه الاقتصاد في استخدام الحروف وعلامات الوقف. أعتقد أن مثل هذا التوجه، علاوة على كونة مناسبا للتفكير العلمي، هو أيضا موفرا للموارد الطبيعية وحامياً للبيئة.

بهذه المناسبة، أتقدم بخالص الشكر والتقدير لمؤسسة زايد الدولية للبيئة على أخذها زمام المبادرة ورعايتها لمشروع هام ورائد من أجل إعداد دليل شامل وعصري لعناصر الأسلوب في الكتابة العلمية العربية. كما أود أن أشير إلى وأشيد بمجهودات سعادة الدكتور غازي العتيبي، نائب مدير جامعة الإمام عبدالرحمن بن فيصل (الدمام سابقاً) للشؤون الأكاديمية، في سبيل إدماج علوم "الإعلام التقني Technical Communication" ضمن البرامج الأكاديمية لهذه الجامعة الرائدة في العلوم الحديثة.

❊ ❊ ❊

# المحتويات


- **كشف المحجوب:** طبيعة المادة والطاقة ..... ٢٧
- **الإشعاع المؤين** ..... ١٢٩
- **إطلاق المارد:** تسخير الطاقة النووية ..... ١٧٩
- **محطات الكهرباء النووية** ..... ٢٤٥
- **استخدامات الإشعاع النافعة الأخرى** ..... ٢٨٥
- **النفايات المشعة** ..... ٣١١
- **حوادث الإشعاع** ..... ٣٢١
- **إدارة الطوارئ الإشعاعية** ..... ٣٩٧
- **الطاقة النووية في العالم العربي** ..... ٤٧٥
- **تلخيـــص** ..... ٥٥١
- **المراجع والقراءات الأخرى** ..... ٥٥٩
- **ملحـــق** ..... ٥٦٩

# الاختصـــارات

| | |
|---|---|
| إڤ | إلكترون ڤولت |
| بك | بيكريل |
| تبك | تيرابيكريل |
| ج** | جول |
| چ* | چرام |
| چوس | چيچاوات-ساعة |
| چي | چراي |
| ج/ث | جول في الثانية |
| ربم | رطل على البوصة المربعة |
| س | ساعة |
| سڤ | سيڤرت |
| سم | سنتيمتر |
| قم | قبل الميلاد |
| كإڤ | كيلو إلكترون فولت |
| كبا | كيلوپاسكال |
| كڤ | كيلوڤولت |
| كچ | كيلوچرام |
| كچي | كيلوچراي |

| | |
|---|---|
| كط | كيلوطن |
| كم | كيلومتر |
| كو | كيلووات |
| كوس | كيلوواتـ ساعة |
| لفد | لفة في الدقيقة |
| م | متر |
| مإف | مليون إلكترون ڤولت |
| مپا | ميچاپاسكال |
| مچ | ميليچرام |
| مج | ميچاجول |
| مسف | مليسيڤرت |
| مط | ميچاطن |
| مم | مليمتر |
| مممم | مفاعل ماء مضغوط |
| مو | ميچاوات |
| م/ث | متر في الثانية |
| م/ث$^2$ | متر في الثانية المربعة |
| ن | نيوتن |
| هز | هيرتز |
| و | وات |

| | |
|---|---|
| °س | درجة مئوية |
| µ أو µچ | ميكرون أو ميكروچرام |
| µسف | ميكروسيڤرت |

* استخدمت الحرف "چ" للإشارة إلى حرف الجيم كما ينطق باللهجة المحلية في القاهرة والإسكندرية.

** استخدمت في الاختصارات حروف خط "تاهوما Tahoma" الكبيرة كمقابل للحروف الإنچليزية الكبيرة (capital letters).

# كشف المحجـــوب

## طبيعة المادة والطاقة

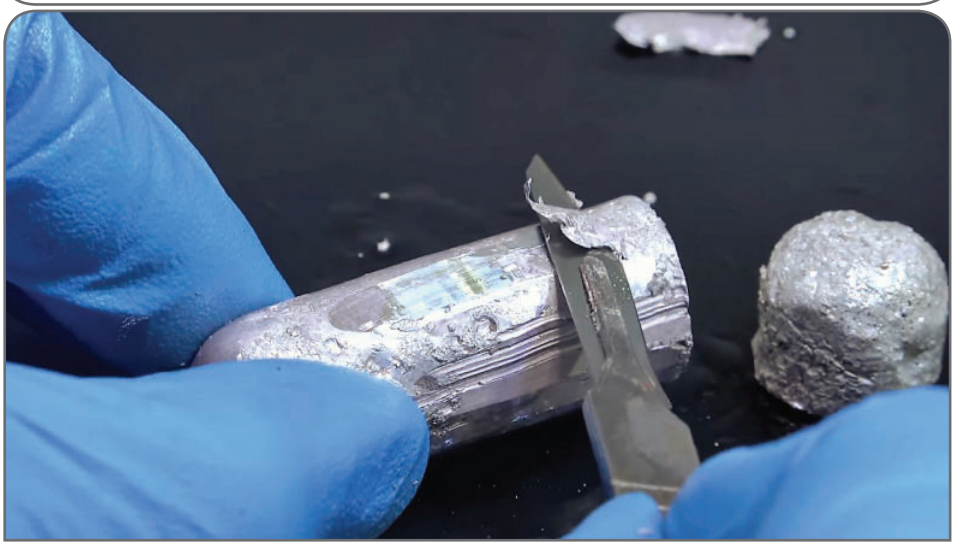
# كشف المحجوب
## طبيعة المادة والطاقة

ميز الإنسان منذ القدم بين نوعين من الأشياء: واحد يشغل حيزا في الفراغ، مثل الصخور، النباتات، والحيوانات، وآخر لا يشغله، مثل الضوء، الحرارة، والصوت. نطلق على النوع الأول اسم "المواد"، أو نقول إنه يتشكل من *المادة matter*. أما النوع اللامادي الآخر، فقد احتار الإنسان زمنا طويلا حول طبيعته.

تتشكل ملايين المواد المتنوعة الموجودة في الكون من نحو 100 نوع أساسي من المواد يعرف باسم *العناصر الكيميائية chemical elements*، ومن *التفاعلات الكيميائية chemical reactions* التي تحدث فيما بينها. نادرا ما تتواجد المواد طبيعيا في أشكالها "العنصرية" الأصيلة، إذ تميل معظم العناصر الكيميائية إلى التفاعل مع غيرها، مكونة الملايين من *المركبات الكيميائية chemical compounds* حولنا. من أمثلة العناصر "الأكسجين oxygen" الذي نتنفسه من الهواء و"الذهب" الذي خلب ببريقه ألباب الخيميائيين القدماء. ومن أمثلة المركبات "الماء" و"ملح الطعام": يتكون الماء من الارتباط الكيميائي بين غازي "الهيدروجين hydrogen" والأكسجين، ويتكون ملح الطعام من الاتحاد الكيميائي بين غاز "الكلور chlorine" السام الحارق ومعدن "الصوديوم" الطري اللامع (الشكل 1)!

**الشكل 1 :**

**معدن الصوديوم المطاوع اللامع**



## الـــــذرة

ما هو أصغر جزء من مادة ما يحتفظ بخصائص تلك المادة؟ قبل أكثر من 2300 عام، أطلق اثنان من الفلاسفة الإغريق، "ليوكيبوس Leucippus" وتلميذه "ديموقريطوس Democritus" (الشكل 2 والشكل 3)، على هذا الجزء اسم "اللامُنقَّسِم ἄτομος": فقد ظنا أن مثل هذا الجزء لا يمكن أن يُقسَم.

**الشكل 2 :**

**ليـــوكيبـــــوس**

**الشكل 3 :**
**ديموقريطوس**

يعرف الجزء الأصغر من العنصر الكيميائي الآن باسم *الذرة atom*[1] وهو—على عكس ما ظن ليوكيبوس وديموقريطوس—يمكن أن يُقسَم أو ينقسم.

لقد كشف العلماء، خلال القرن الفائت، الكثير من أسرار الذرة. وقد أربك عالَم الذرة المتناهي في الصغر بقوانينه الغريبة عقول رواده الأوائل، حتى بدأ الكثير منهم يفقد إيمانه بوجود قوانين علمية تحكم سلوك أعضاء هذا العالم.

تُصَّور الذرات ككُرَيّات ذات أقطار 100 - 300 بيكومتر ($1-3 \times 10^{-7}$ مليمتر). لنتخيل مدى صغر الذرة، نفترض أن هناك 10 مليون ذرة هيدروجين متلاصقة جنبا إلى جنب في خط مستقيم، وسنرى أن صف الذرات هذا لا يتعدى في طوله المليمتر الواحد.

تتكون الذرة من ثلاثة أنواع أساسية من الجسيمات: *الإلكترونات electrons*، *البروتونات protons*، *والنيوترونات neutrons*. تتحرك الإلكترونات، وهي ذات شحنة كهربية سالبة، باستمرار وبسرعة فائقة حول *نواة nucleus* موجبة الشحنة. تتكون نواة الذرة من البروتونات موجبة الشحنة والنيوترونات متعادلة الشحنة.

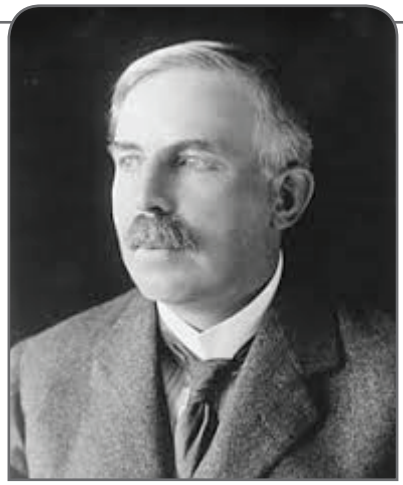
شحنة الإلكترون السالبة تعادل في القيمة شحنة البروتون الموجبة. وفي الظروف الاعتيادية، تحتوي الذرة على عدد من الإلكترونات السيارة مساو لعدد البروتونات في نواتها. أما كتلة البروتون، فهي 1840 ضعف كتلة الإلكترون، وتعادل تقريبا كتلة النيوترون. لذلك، تكمن كتلة الذرة في نواتها.

(1) لفظ "atom" الإنجليزي مشتق من اللفظ الإغريقي الذي استخدمه ليوكيبوس.

في البداية حاول العلماء تفسير نتائج تجاربهم العلمية من خلال تشبيه تركيب الذرة بالأشياء المرئية المعروفة لهم، فهذا ما يفعله عادة جميع البشر.

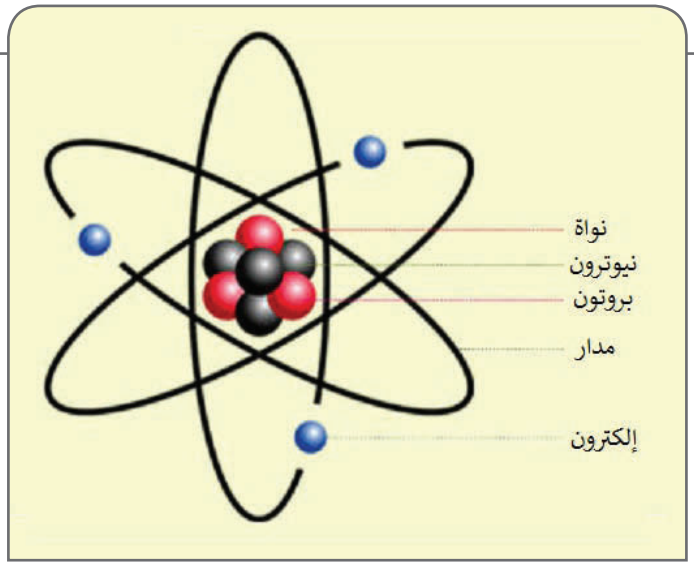
على سبيل المثال، اقترح البريطاني "إرنست رذرفورد Ernest Rutherford" (من نيوزيلندا؛ الشكل 4) في 1911 أن الإلكترونات تدور حول النواة كما تدور الكواكب حول الشمس (الشكل 5). وقد اتضح فيما بعد أن هذا التصور ليس صحيحاً.

**الشكل 4 :**
**إرنســت رذرفـــورد**



شيئاً فشيئاً، بدأ العلماء يتقبلون حقيقة أن لعَالَم الذرات قوانينه الخاصة الغريبة، وتوقفوا نهائيا عن محاولات التشبيه اليائسة.

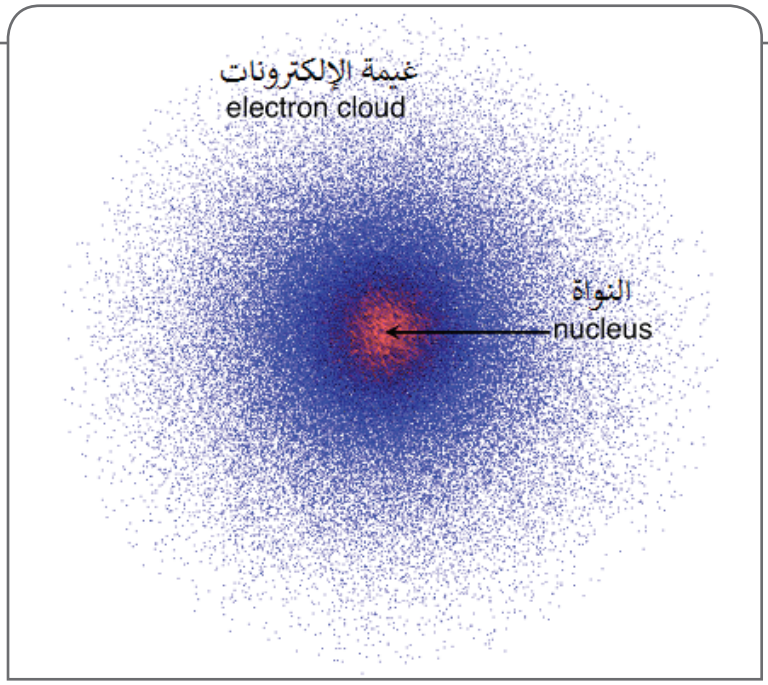
**الشكل 5 :**
**النموذج الكوكبي لبنية الذرة**



قد يتواجد الإلكترون في لحظة ما في أي مكان خارج النواة، ولكن باحتمال محدد. وإذا تخيلنا أن الإلكترون المرتحل دوما يترك أثرا مرئيا في كل موضع يمر به، فإنه يتكون لدينا سريعا "غيمة" متباينة الكثافة يطلق عليها اسم *غيمة الإلكترونات* *electron cloud* (الشكل 6).

تشير المناطق الكثيفة إلى المواضع التي يرتادها الإلكترون كثيرا، والعكس صحيح. لا يوجد لغيمة الإلكترونات حدود صارمة: ليس هناك موضع يستحيل وجود الإلكترون به (احتمال حدوثه يساوي صفراً كاملاً).[1]

**الشكل 6 :**
**تصوير تخيلي لغيمة الإلكترونات**




(1) يمكن لمن لا يستطيع التخلي نهائيا عن التشبيهات تخيل أن حركة الإلكترون حول نواة الذرة هي أقرب نوعاً ما إلى حركة الإنسان حول سريره: قد يبعد الإنسان عن سريره من بضعة أمتار حتى مئات الآلاف من الكيلومترات (إذا كان من رواد القمر، مثلاً)، ولكنه يرتاد كثيرا أماكن بعينها.

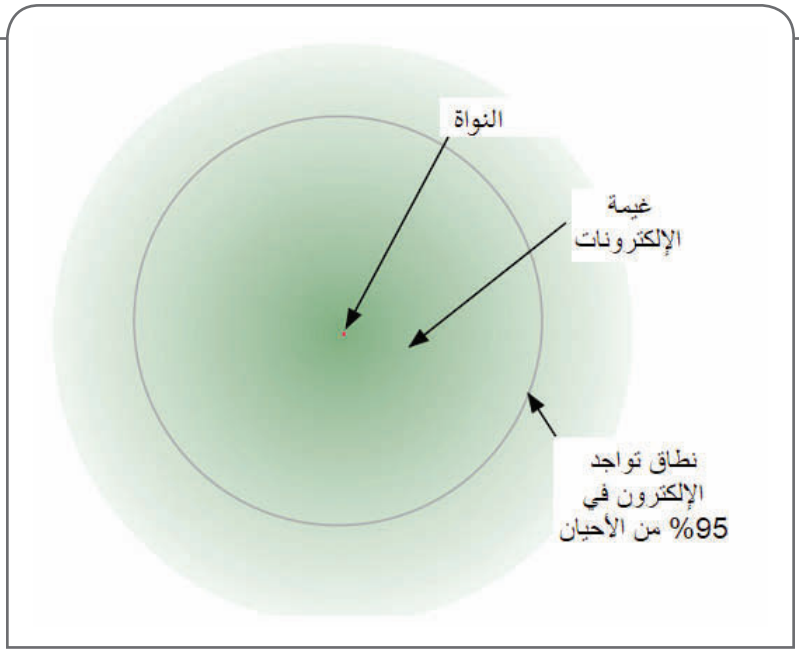
**الذرة خاوية:** تتجول الإلكترونات عادة في حجم يعادل نحو 100 ألف ضعف حجم النواة.[1] فإذا تخيلنا أن قطر النواة يعادل ارتفاع الهرم الأكبر (هرم خوفو)، فإن حجم الذرة سوف يتعدى حجم الكرة الأرضية (الشكل 7). لكن ماذا يعني "حجم" الذرة إذا كانت غيمة الإلكترونات ليس لها حدود قاطعة؟ هذا صحيح، ومع ذلك يمكننا أن نرسم حدا فاصلا يحيط بالمواضع التي يتواجد بها الإلكترون معظم أوقاته—95 % من الأحيان، مثلا (الشكل 8). يطلق على هذه المنطقة اسم *نطاق الإلكترون electron orbital* (الجمع: نُطُق). تأخذ نُطُق الإلكترونات أشكالا عجيبة متعددة (الشكل 9).

**الشكل 7 :**
**النسبة بين حجم الذرة ونواتها مثل النسبة بين حجم كوكب الأرض وحجم أهرامات الجيزة المصرية**

(1) لم يكن رذرفورد—كما هو شائع—بل "فيليب لنارد Philipp Lenard" هو أول من اكتشف أن الذرة "خاوية". في الحقيقة، كان رذرفورد يظن، مثل أستاذه جيه جيه ثومسون، أنها جسيم مصمت. لكن رذرفورد تميز بأنه كان يعدل سريعا من أفكاره وفقا لنتائج أبحاثه.

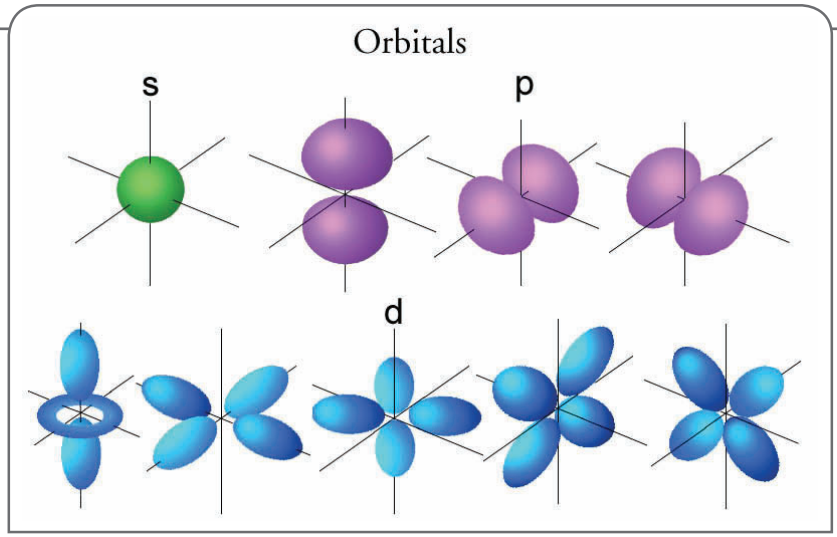
**الشكل 8 :**

**تصوير تخيلي لمفهوم النطاق الإلكتروني**




**الشكل 9 :**

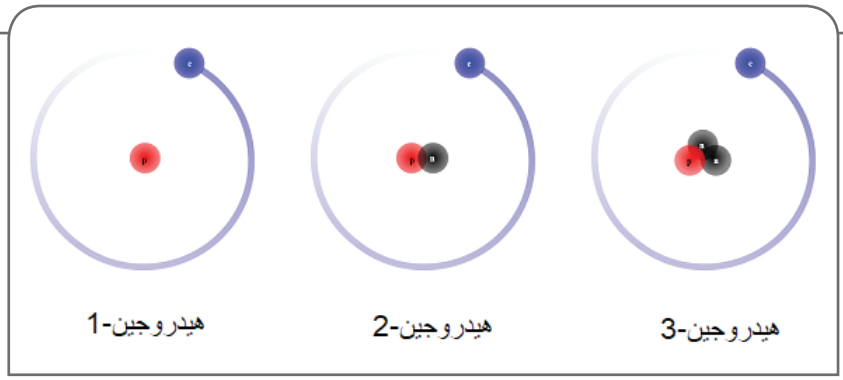
**تصوير تخيلي لأشكال النطاقات الإلكترونية المختلفة.**



تحتوي جميع ذرات العنصر الواحد على عدد محدد من البروتونات (والإلكترونات في الحالة العادية). على سبيل المثال، تحتوي ذرة الهيدروجين، وهو أخف العناصر، على بروتون واحد في حين تحتوي ذرة عنصر اليورانيوم (المشع) على 92 بروتونا. وما هو الحال بالنسبة للنيوترونات؟ لا تُغير أعداد النيوترونات داخل نوى الذرات من ماهية العناصر (خصائصها الكيميائية). فالذرة التي تحتوي على بروتون واحد تظل ذرة هيدروجين سواء لم تحوي أي نيوترون أو حوت واحدا منها أو اثنين؛ والتي بها 92 بروتونا هي ذرة يورانيوم بغض النظر عن عدد النيوترونات في نواتها، الذي قد يكون 146، 143، أو 142. تعرف هذه الذرات، أي ذرات العنصر الواحد التي تحتوي أعدادا مختلفة من النيوترونات، باسم *النظائر* *isotopes* (الشكل 10).

**الشكل 10 :**

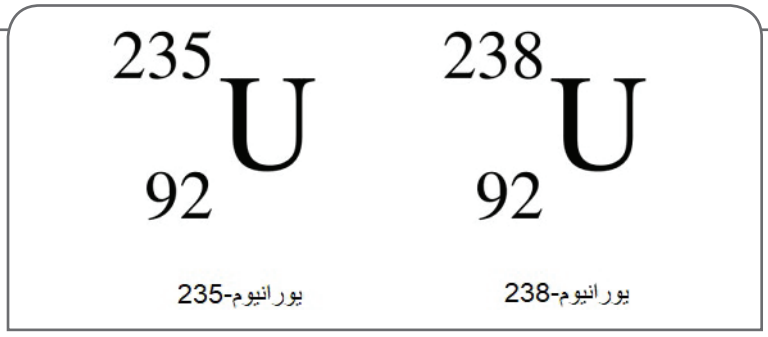
**نظائر عنصر الهيدروجين الثلاثة**




لقد ابتكر الكيميائيون رموزا أنيقة للتعبير عن العناصر والنظائر المختلفة. يرمز إلى العنصر الكيميائي بحرف لاتيني واحد أو اثنين. يُوضع بجانب الحرف عددين: (1) عدد البروتونات بالذرة و(2) عدد البروتونات والنيوترونات معا، بالطرف المقابل (الشكل 11). يُعرف العدد الأول باسم الرقم الذري atomic number (الرقم الذي يحدد عنصر الذرة)، والثاني برقم الكتلة mass number (الرقم الذي يحدد كتلة الذرة).

**الشكل 11 :**

**التعبير الكيميائي عن النظائر**




لمعظم العناصر الكيميائية بضعة نظائر، إحداها يكون سائدا والبقية نادرة. على سبيل المثال، يشكل اليورانيوم— 238 نحو 99.3 % من اليورانيوم الموجود بالطبيعة.

يستخدم العلماء كلمة *نويدة* nuclide للإشارة إلى نوع واحد محدد من نواة الذرة (ذات رقم كتلة معين)، ومن ثم، إلى نوع محدد من الذرة. هذا يعني أن النويدة تشير إلى نواة عنصر واحد ونظير واحد بعينه.

## العناصـــر

أمكن حتى الآن التعرف على 118 عنصرا كيميائياً—94 منها أمكن اكتشاف وجودها طبيعيا، والبقية تتكون اصطناعيا في المفاعلات النووية (سنتعرض لهذا الموضوع لاحقا). تضم المجموعة الأخيرة العناصر الثقيلة ذات الرقم الذري 95 - 118.

بدأ العلماء منذ بداية القرن السابع عشر ملاحظة وجود مجموعات من العناصر الكيميائية التي تتشابه فيما بينها في العديد من الخصائص. وفي 1869، ابتكر الكيميائي الروسي "ديميتري مندليف Dimitri Mendeleev" (الشكل 12) فكرة *الجدول الدوري* periodic table العبقرية.[1]

(1) لم يكن معروفا سوى 63 عنصرا فقط عندما نشر مندليف جدوله الشهير الخالد.

**الشكل 12 :**
**ديميتـــري مندليـــف**

كان مندليف يؤلف لتلاميذه كتاباً دراسياً في علم الكيمياء الحديث المزدهر، وأراد أن يضع نظاماً لتصنيف العناصر يُسهِّل على تلاميذه معرفة خصائص العناصر المختلفة. كان حدسه يخبره بوجود علاقة بين خصائص العناصر *وكتلتها الذرية atomic mass*.[1] قام مندليف بكتابة المعلومات الخاصة بكل عنصر (كتلته الذرية وخصائصه) على بطاقة ورقية منفصلة. ثم أخذ يرتب هذه البطاقات ويعيد ترتيبها محاولا أن يكتشف تلك العلاقة الخفية. أخيراً، وبعد الكثير من المحاولات المضنية، تفتق ذهنه عن رصها في أعمدة رأسية متجاورة بحيث تتوالى العناصر

(1) كان الكيميائيون يعتقدون في ذلك الوقت أن الذرة هي أصغر جزء من المادة. الكتلة الذرية هي مقياس لمقدار "المادة" في الذرة.

داخل الأعمدة الرأسية حسب كتلتها الذرية وتتجاور العناصر المتشابهة في صفوف أفقية (الشكل 13).[1] حينئذ اكتشف وجود علاقة دورية بين خصائص العناصر وكتلتها الذرية: لاحَظَ مندليف تكرار الخصائص بعد أعداد متقاربة من العناصر.

**الشكل 13 :**

**جـدول منديلـيـف الأصلـي**

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Ti = 50 | Zr = 90 | ? = 180. |
| | | | V = 51 | Nb = 94 | Ta = 182. |
| | | | Cr = 52 | Mo = 96 | W = 186. |
| | | | Mn = 55 | Rh = 104,4 | Pt = 197,1. |
| | | | Fe = 56 | Ru = 104,4 | Ir = 198. |
| | | | Ni = Co = 59 | Pl = 106,6 | O = 199. |
| H = 1 | | | Cu = 63,4 | Ag = 108 | Hg = 200. |
| | Be = 9,4 | Mg = 24 | Zn = 65,2 | Cd = 112 | |
| | B = 11 | Al = 27,1 | ? = 68 | Ur = 116 | Au = 197? |
| | C = 12 | Si = 28 | ? = 70 | Sn = 118 | |
| | N = 14 | P = 31 | As = 75 | Sb = 122 | Bi = 210? |
| | O = 16 | S = 32 | Se = 79,4 | Te = 128? | |
| | F = 19 | Cl = 35,6 | Br = 80 | I = 127 | |
| Li = 7 | Na = 23 | K = 39 | Rb = 85,4 | Cs = 133 | Tl = 204. |
| | | Ca = 40 | Sr = 87,6 | Ba = 137 | Pb = 207. |
| | | ? = 45 | Ce = 92 | | |
| | | ?Er = 56 | La = 94 | | |
| | | ?Yt = 60 | Di = 95 | | |
| | | ?In = 75,6 | Th = 118? | | |

Д. Менделѣевъ

يكمن جمال جدول مندليف في تنظيمه لكم العناصر المتنوعة في نُسُق مرتبة منطقيا. على سبيل المثال، يأتي مباشرة بعد عنصر لامعدني نشط معدن خفيف نشط جدا ثم معدن خفيف أقل نشاطاً.

(1) يُحكى أن مندليف رأى هذا الترتيب في منامه.

تتجلى العبقرية الحقيقية لمندليف في الاستنتاجات الحَدَسية التي بناها أثناء ترتيب جدوله. فقد توقع من بنية الجدول وجود خمسة عناصر لم تكتشف بعد، تاركا أماكنها شاغرة. وقد اكتُشفت تلك العناصر فيما بعد.

نلاحظ أيضاً أن مندليف قد وضع "التلوريوم tellurium (Te)" قبل "الأيودين iodine (I)" رغم أن الكتلة الذرية المسجلة للتلوريوم حينئذ (128) كانت أكبر من تلك الخاصة بالأيودين (127). كان مندليف يعرف أن الأيودين أشبه في خصائصه بالفلورين fluorine (Fl)، الكلورين chlorine (Cl)، والبرومين bromine (Br). ولذلك، وضعها معاً في المجموعة نفسها (الصف الأفقي نفسه)،[1] مفترضا أن هناك خطأ في حساب إحدى الكتلتين أو كلاهما. لم يكن افتراضه هذا صحيحاً، ومع ذلك كان محقاً فيما فعل.[2]

يحتوي الجدول الدوري الحديث على 118 عنصرا مرتبة في صفوف أفقية وأعمدة رأسية (الشكل 14). تتوالى العناصر من اليسار إلى اليمين، بدءا من العنصر الأخف (الهيدروجين)، في تسلسل حسب أرقامها الذرية. تحتوي الأعمدة على العناصر التي تتشابه في خصائصها، وتسمى *المجموعات groups*. أما الصفوف، فتعرف باسم *الدورات periods*.

ترجع أهمية الجدول الدوري إلى كونه دليلا موجزا (من صفحة واحدة) وشاملا لذرات جميع العناصر الموجودة في الكون. ومن نظرة سريعة على موضع العنصر في الجدول، يستطيع الدارس والباحث معرفة الكثير عن خصائص هذا العنصر وتفاعلاته مع العناصر الأخرى.

(1) في البداية، وضع مندليف مجموعات العناصر المتشابهة في الصفوف الأفقية، ثم عدل عن ذلك ووضعها في الأعمدة الرأسية (وهو النظام المتبع في الجدول الدوري الحديث).

(2) لم يكن تركيب الذرة معروفا في ذلك الوقت. في الجدول الدوري الحديث، ترتب العناصر حسب رقمها الذري لا كتلتها الذرية. ولذلك يأتي التلوريوم (رقمه الذري 52) قبل الأيودين (رقمه الذري 53).

يصنف الكيميائيون العناصر، كما يظهر من الجدول الدوري، إلى *فلزات metals* و*لافلزات nonmetals*، وهناك مجموعة ثالثة من العناصر تظهر بعضا من صفات كلتاهما تعرف باسم *أشباه الفلزات metalloids*. الفلزات هي بصفة عامة عناصر صلبة، موصلة للكهرباء، وطَيِّعة (يمكن طرقها دون أن تتهشم). من أمثلة الفلزات الحديد، النحاس، والفضة. أما اللافلزات، فهي غالبا ما تكون باهتة المظهر وغير طيعة على الإطلاق. كثيرا ما توجد اللافلزات في الصورة السائلة أو الغازية تحت درجات الحرارة المعتادة، بعكس الفلزات التي تكون في الحالة الصلبة تحت الحرارة نفسها (باستثناء فلز الزئبق). يُعد الأكسجين عديم اللون، غاز الكلور الأخضر السام، والبروميد البني السائل من اللافلزات الشائعة.

## الجـــزيء

كما هو الحال مع سائر البشر، تخشى معظم الذرات أن تبقى وحيدة دون مؤانسة، وتفضل أن ترتبط بعلاقات "حميمة" مع من "ترتاح" معها من الذرات الأخرى.[1] ربما كان الفرق الأهم في هذا التشابه هو أننا نعرف ما الذي يجعل الارتباطات الذرية تنجح، على عكس الحال مع العلاقات الإنسانية المعقدة. يطلق على الكيان الجديد المتحد اسم *الجزيء molecule*. والجزيء، كما تعرفون أو تتوقعون، هو الجزء الأصغر من **المركب** الكيميائي الذي يظل محتفظا بخصائص هذا المركب.

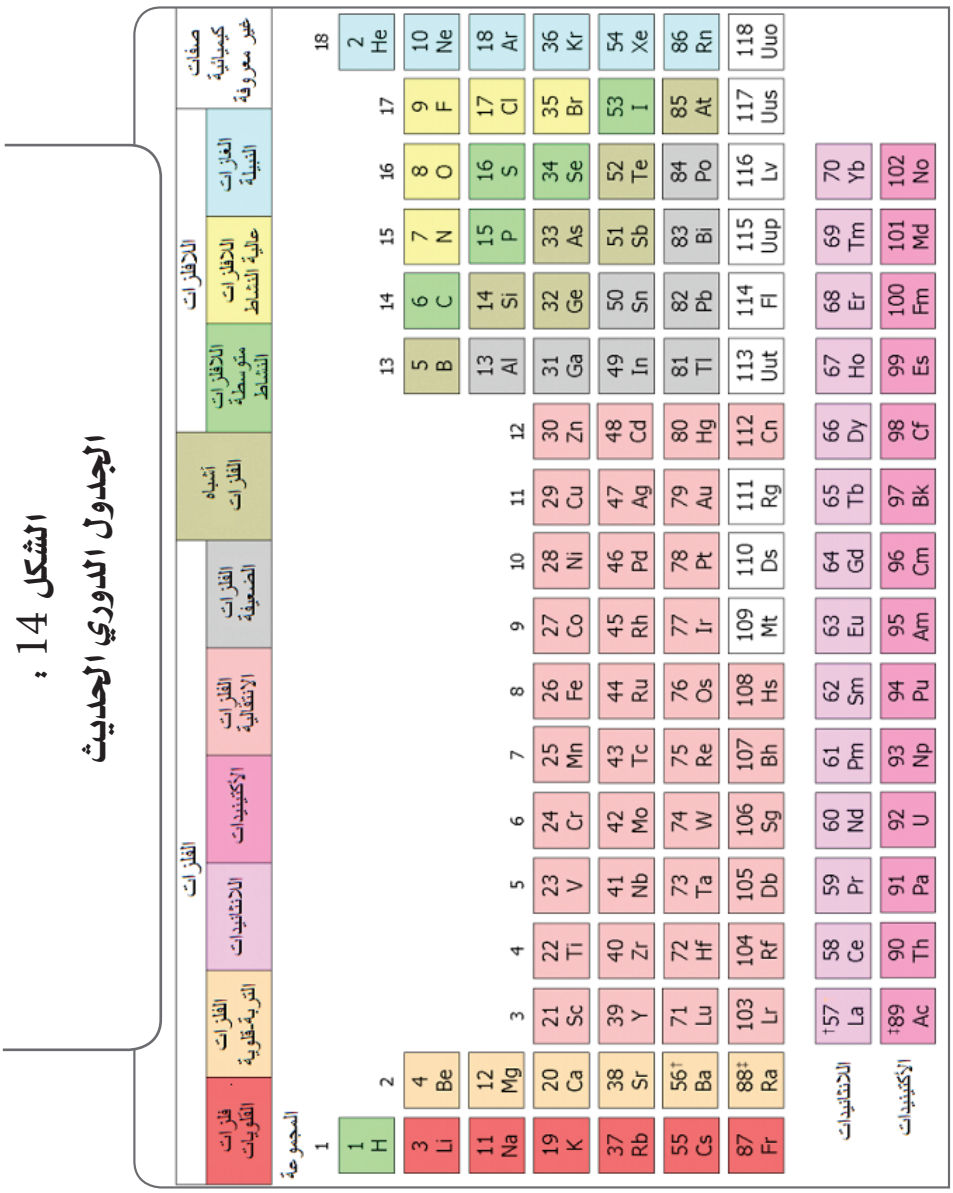
الارتباط الكيميائي صنفان رئيسان: *ارتباط أيوني ionic bonding* و*ارتباط تعاوني أو تساهمي covalent bonding*.

في الحالة الأولى، يتنازل شريك للآخر عن أحد إلكتروناته البعيدة، فيصبح

(1) ذرات مجموعة الغازات النبيلة *noble gases* تفضل أن تبقى بحالها منفردة.

المانح موجباً في شحنته الكهربية والمستقبل سالباً فيها. وكما هو معروف تتجاذب الأضداد إلى بعضها. تعرف الذرات الحاملة لشحنة كهربية غير متعادلة، موجبة كانت أم سالبة، باسم *الأيونات ions*. تُميَّز الأيونات الموجبة باسم *الكاتيونات cations*؛ السالبة بـ*الأنيونات anions*.

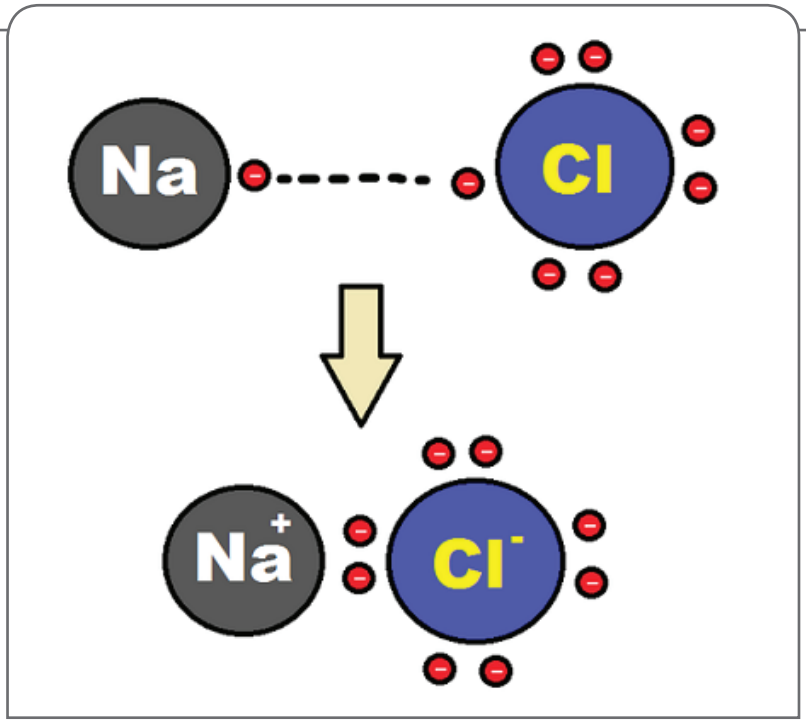
**الشكل 14 :**
**الجدول الدوري الحديث**



يعطينا الاتحاد بين ذرتي الصوديوم والكلور مثالا واضحا على هذا النوع (الشكل 15). تتخلى ذرة الصوديوم (Na) عن إلكترونها "الأبعد" الوحيد إلى شريكها الأيوني، ذرة الكلورين (Cl)، ذو السبعة إلكترونات في نُطُقه الإلكترونية البعيدة، لينجذب إليها على الفور كهربائياً.

**الشكل 15 :**

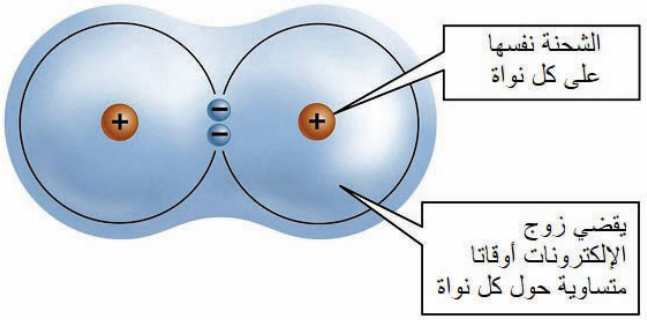
**الارتباط الأيوني بين الصوديوم والكلور**




النوع الثاني من الارتباط الكيميائي يبدو أكثر أناقة ولياقة. تساهم كلتا الذرتين المرتبطتين تعاونيا في إنشاء زوج من الإلكترونات المتصاحبة، والذي يقضي أوقات متساوية حول نواتي هاتين الذرتين. ولأن زوج الإلكترونات المتشاركة ينجذب إلى نواة كلتي الذرتين، فإنه يتواجد غالبا في المنطقة البينية (الشكل 16). باستثناء *مجموعة الغازات النبيلة noble gases*، تتواجد ذرات العناصر الغازية عادة في أزواج مرتبطة تعاونياً (الشكل 17).

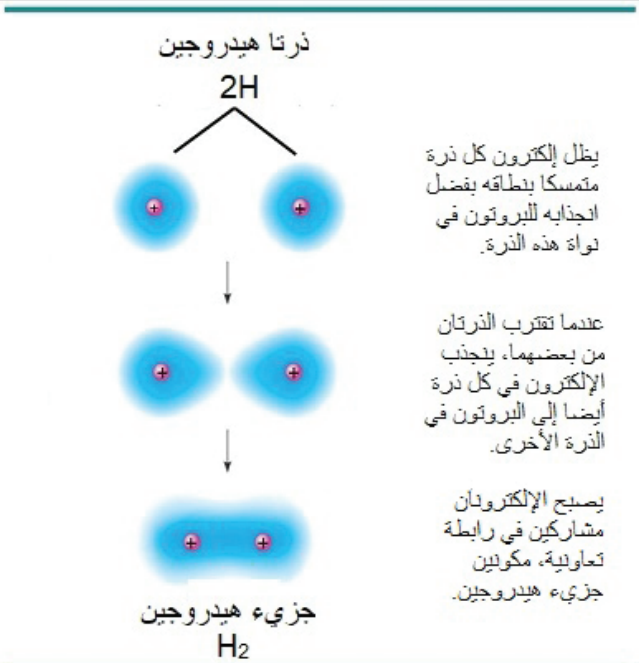
## الشكل 16 :

## الارتبـــاط التساهمـي




## الشكل 17 :

## الارتباط التساهمي بين ذرتي هيدروجين



# الطاقــة

ما هي الطاقة؟ ينطبق تماما على هذا السؤال وصف "السهل الممتنع". نحن ندرك أن "الطاقة" ضرورية لأي نشاط، من مجرد التكلم وحتى الوصول إلى القمر. لكن يصعب علينا، حتى على المتخصصين في الفيزياء منا، إعطاء تعريفا دقيقا لها. يقول البروفسور "ريتشارد فينمان Richard Feynman" (الشكل 18)، الحائز على جائزة نوبل الشهيرة في الفيزياء "الطاقة ليست شيئا يمكن إدراكه، وإنما هي كمية يلزم لحسابها استخدام مجموعة شاملة من القواعد."[1]

**الشكل 18 :**
**رتشـــارد فـيـنـمـــان**

## نحو تعريف دقيق ومفهوم للطاقة

اللغة العلمية لغة دقيقة وموجزة؛ فلكل مصطلح علمي معنى محدد تحديدا صارما، كما يندر أن توجد مرادفات لـ "المفردات" العلمية الأصيلة، إذ يشار إلى كل *مفهوم علمي scientific concept* بمصطلح (term) واحد في معظم الأحيان.

تُعَدُّ *الطاقة energy* مفهوماً محورياً في العلوم الطبيعية،[2] لكنها أيضاً مفهوم "مائع" ومتطور يصعب تعريفه بدقة في عبارات موجزة. يقول البروفسور "إيان

(1) انظر Feyman (1963).

(2) ربما يقابله مفهوم "النفوذ power" المحوري أيضا في العلوم الاجتماعية.

سفتن Ian Sefton"، أستاذ الفيزياء في "جامعة سدني الأسترالية University of Sydney" ، "لا يوجد في الحقيقةً مفهوم فريد، مطلق، أو عالمي للطاقة، وليس لها تعريف بسيط"، ويرى أن الحرص على إعطاء الأفكار العلمية تعريفات محددة هو أحد مظاهر "التعليم التلقيني".[1] في المقابل هناك من يفضل أن نبدأ بتعريف عملي مرتجل يساعدنا على إدراك المفهوم العلمي الصعب، ثم تغييره بعد أن يتضح لنا المعنى إلى التعريف الأكثرَ دقَّة. وهذه هي المقاربة التي اتبعناها عند كتابة هذا الجزء، فهكذا تتطور في الواقع معارفنا العلمية عن الكون.

سنحاول في الجزء التالي الوصول إلى "تصور عملي" للمفهوم العلمي للطاقة، متجنبين ما أمكن الخوض في مجادلات الفيزيائيين الفلسفية العميقة.[2] من أجل ذلك نحتاج إلى مراجعة بعض المفاهيم الفيزيائية ذات الصلة، وهي تحديداً مفاهيم *القصور الذاتي inertia*، *التسارع acceleration*، *القوة force*، *والشغل work*.

يجمع إسحاق نيوتن بين المفاهيم الثلاث الأولى ببراعة في "قوانين الحركة" الشهيرة التي حملت وخلدت اسمه:[3]

(1) انظر Sefton (2004).

(2) نتذكر هنا ما قاله زميل لنا ذات يوم ساخرا أنه كان يحب الموسيقى، وأراد أن ينمي معارفه العلمية عنها، فأخذ يقرأ عن *فيزياء الصوت sound physics* ليجد نفسه قد نسي تماما "موضوع الموسيقى" الذي من أجله قرأ أصلا في كتب "الفيزياء الحديثة"!

(3) عادة ما يحاول العالم الباحث تفسير *الحقائق facts* أو *الظواهر phenomena* التي يدرسها بفكرة أو مجموعة من *الأفكار ideas* المبدئية يطلق عليها اسم *الفرضية hypothesis*. وإذا ظلت تلك الفرضية تتفق مع النتائج التجريبية التي تختبرها تحولت إلى نظرية *theory* أو *قانون law*. القانون هو عبارة موجزة (أو معادلة بلغة الرياضيات) حول الحقائق التجريبية المشهودة، مثل قوانين الحركة لنيوتن التي نناقشها هنا. أما النظرية فهي مجموعة مترابطة من الأفكار التي تفسر بعض الظواهر الطبيعية أو النتائج التجريبية، مثل نظرية مركزية *الشمس the heliocentric theory* التي تقول إن الأرض تدور حول الشمس، والتي ينسب الفضل فيها عادة إلى الفلكي البولندي "نيكولاوس كوبرنيكس Nicolaus Copernicus" (1473 - 1543)، الذي وضعها بعد ملاحظته الطويلة لتحركات الكواكب ودراسته المستفيضة للنظريات السابقة من العصر الكلاسيكي والعالم الإسلامي.

**قانون نيوتن الأول (قانون القصور الذاتي):** يظل الجسم في حالته الثابتة (إما السكون التام أو الحركة في خط مستقيم بسرعة ثابتة) [1] ما لم تؤثر عليه قوة خارجية تغير من حالته.

- يقصد بالقوة هنا *القوة غير المتوازنة unbalanced* – أي التي لا يقابلها قوة أخرى معادلة لها في المقدار ومعاكسة لها في الاتجاه.
- لدى جميع الأجسام *قصور ذاتي* أو *جمود inertia* ("مقاومة داخلية" لتغيير حالتها الحركية)، وكلما زادت كتلة الجسم زاد قصوره الذاتي.
- **مثال 1**: تبقى التفاحة ساكنة على الشجرة ما دامت لم تؤثر عليها قوة غير متوازنة، لكنها تتحرك بفعل الريح وربما تسقط إذا كانت "قوة" الريح عالية (الشكل 19).

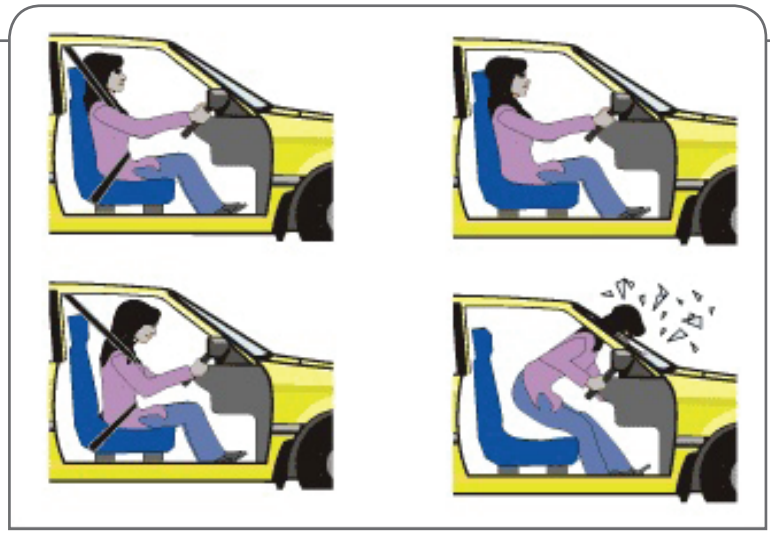
**الشكل «19»:**
**التفاحة وقانون القصور الذاتي**

(1) كتب الفيلسوف "أرسطو Aristotle" (384 – 322 ق م) أن جميع الأجسام تصل في النهاية إلى حالة طبيعية من السكون. وانتظر العالَم حتى أدرك "جاليليو Galileo" (1564 – 1642)، بعد أرسطو بقرون عديدة، أن الأجسام التي لا تتعرض لتأثيرات من الأجسام الأخرى تستمر في حركتها دون تغيير.

- **مثال 2**: إذا ما اصطدمت سيارة مسرعة بحاجز طريق أو سيارة أخرى واقفة فإن السائق يستمر في الحركة إلى الأمام، وقد يصطدم وجهه بعنف في زجاج سيارته إذا لم يكن رابطا حزام الأمان كما يجب (الشكل 20).

**الشكل 20 :**

**مثال من الحياة المعاصرة على قانون نيوتن الأول**



**قانون نيوتن الثاني (قانون التسارع)**: إذا أثرت قوة على جسم أكسبته تسارعا يتناسب طردياً مع القوة المؤثرة وعكسياً مع كتلة الجسم. ويُعبرَّ عن هذا القانون رياضياً كالتالي:

$$F = ma$$

***F***: force القـــــوة

***m***: mass الكتلـــــة

***a*** : acceleration التسارع

- التسارع هو تغير السرعة مع الزمن، وتسارع الجسم الساكن أو المتحرك بسرعة ثابتة يساوي الصفر.
- تُعَدُّ السرعة والتسارع والقوة *متجهات vectors*، أي لها *مقدار magnitude* و*اتجاه direction*. ويرمز للمتجهات بـ "حروف ثقيلة bold letters".
- تشير *الكتلة mass* إلى مقدار ما يحتويه الجسم من "مادة matter".
- تحتاج الأجسام ذات الكتلة الأكبر إلى قوة أكبر لتغيير سرعتها بالمقدار نفسه (حيث إن التسارع = القوة ÷ الكتلة).
- *الوحدات الدولية SI units* للمتغيرات الثلاثة في قانون نيوتن الثاني هي كالتالي:[1] التسارع = متر لكل ثانية مربعة (م/ث$^2$)، الكتلة = كيلوجرام (ك چ)، القوة = نيوتن Newton (ن)، حيث النيوتن الواحد هو القوة التي تعطي كتلة مقدارها كيلوچراما واحدا تسارعا مقداره "مترا واحدا في الثانية" كل ثانية (لاحظ أن القوة (ن) = الكتلة (كچ) × التسارع (م/ث$^2$) وَفْقا لقانون نيوتن الثاني).[2]
- **مثال 1**: يصعب تحريك الكتلة الأكبر (أي زيادة سرعتها عن الصفر) لأن ذلك يتطلب استعمال قوة أكبر (الشكل 21).
- **مثال 2**: في حالة السقوط الحر (أي لا توجد مقاومة من الغلاف الجوي) من الارتفاع نفسه عن سطح الأرض (أو القمر) فإن الأجسام الكبيرة (فيل مثلا) والصغيرة (ليكن أرنبا) تصل معا إلى مستوى السطح (الشكل 22)!

(1) يشار إلى وحدات القياس الدولية بالحرفين اللاتينيين "SI" اختصاراً للعبارة الفرنسية "le System international d'Unites"، وتعني "النظام الدولي للوحدات".

(2) نيوتن واحد = كيلوجرام-متر واحد لكل ثانية مربعة (كچ.م/ث2)

**الشكل 21 :**

**تحريك الكتلة الأكبر يتطلب استعمال قوة أكبر**

- **التوضيح:** كتلة الفيل أكبر من كتلة الأرنب، لذلك تجذب الأرض (أو يجذب القمر) الفيل بقوة أكبر. لماذا إذا يصل الاثنان معا إلى السطح؟ سؤال جميل، والإجابة تكمن في قانون نيوتن الثاني (قانون التسارع). وَفْقا لهذا القانون فإن التسارع (**a**) يتناسب طرديا مع القوة المؤثرة (**F**) وعكسياً مع كتلة الجسم المتحرك (m):

$$\mathbf{a} = \mathbf{F}/\mathrm{m}$$

وكأن الكتلة الأكبر للفيل تزيد من التسارع وتقاومه في الوقت ذاته: تزيد من التسارع بشكل غير مباشر لأنها تزيد من قوة جذب الأرض (أو القمر) له (تزيد من قيمة **F**)،[1] وتقاومه نتيجة لعلاقتها العكسية مع التسارع (المعادلة السابقة) بحيث تبقى قيمة *تسارع الجاذبية الأرضية* *acceleration of* (*earth*) *gravity* (أو القمرية) دائماً واحدة (9.8 م/ث/ث للأرضية و1.6 م/ث$^2$ للقمرية).

$$\mathbf{a}_e = 9.8\ \mathrm{m/s^2}\ \&\ \mathbf{a}_m = 1.6\ \mathrm{m/s^2}$$

(1) يطلق على قوة الجاذبية اسم *الوزن* *weight*.

**الشكل 22 :**

**تسارع الجاذبية مقدار ثابت**

## المفهوم الفيزيائي للشغل

ليس كل ما يعمله الإنسان يُعَدّ شغلا بالمفهوم الفيزيائي للكلمة—مهما كان المجهود الذي يبذله الشخص في أداء عمله. فلـ *الشُّغل work* في لغة الفيزياء معنى محدد تحديدا صارما: أن يتم التأثير على شيء بقوة معينة لمسافة ما، ومقداره هو حاصل ضرب القوة المؤثرة في المسافة التي قطعها هذا الشيء (في اتجاه القوة نفسه). لنأخذ المثال التالي: لنفترض أنك تريد تحريك خزانة كتبك الكبيرة إلى اليسار قليلا (الشكل 23). إذا نجحت في تحريكها ـ ولو قيد أنملة ـ فقد قمت بشغل ($W$) مقداره مضروب قوتك العضلية ($F$) في *الإزاحة displacement* أو المسافة التي حركت بها الخزانة ($d$).

$$W = F.d$$

أما إذا لم تنجح في تحريكها إطلاقا فأنت لم تقم بأدنى شغل (على الخزانة) مهما تعرَّقت أو تعبت ـ نستطيع أن نقول بلغة الرياضيات "إن ما قمت به من شغل يساوي صفرا" (لأن مضروب أي قيمة في الصفر يساوي صفرا)[1].

$$W = F.0 = 0$$

(1) ينظر البعض إلى الرياضيات mathematics باعتبارها نوعا من اللغات: لغة متخصصة دقيقة وموجزة.

الوحدة الدولية للشغل هي الـ "جول joule"، ويعرف بأنه الشغل الذي تقوم به قوة مقدارها نيوتن واحد عندما تُحَرَّك نقطة التأثير لمسافة متر واحد في اتجاه تأثير هذه القوة.

## ما هي الطاقة إذا؟

يختلف الفيزيائيون فيما بينهم عندما يتعلق الأمر بـ "التعريف الصحيح" للطاقة. هناك من يرى أنها ليست أكثر من "كيان entity" مجرد يمكن حسابه وَفْقا لمجموعة من القواعد التي يعمل على اكتشافها الفيزيائيون،[1] وأن أي تصوير آخر للطاقة لا يعد إلا تدخلا بشريا جزافيا قد يساعد على الفهم الصحيح لعلم الفيزياء أو يعوقه.[2] على كل حال، فإن التعريف الأكثر استخداماً في الكتب الدراسية هو "المقدرة على أداء شغل"، والوحدات المستخدمة للتعبير عن قيمة الطاقة هي نفسها وحدات الشغل (الجول مثلاً). يُعَدُّ هذا التعريف "مقبولاً مبدئياً" من الناحية العلمية. وسواء أكان هذا التعريف دقيقا ومفيدا أما لا،[3] لنعرف منه على الأقل أن هناك علاقة جوهرية بين الطاقة، الشغل، والقوة.

## نوعان من الطاقة

يتفق الفيزيائيون – لحسن الحظ – حول وجود نوعين أساسيين من الطاقة: *الطاقة الحركية kinetic energy وطاقة الوضع potential energy*.

الطاقة الحركية هي الطاقة التي يملكها جسم بسبب حركته. تتوقف قيمة هذه الطاقة $(E_k)$ على شيئين: كتلة الجسم المتحرك $(m)$ وسرعته $(v)$، وتساوي نصف حاصل ضرب كتلته في مربع سرعته:

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2$$

(1) سنفهم مغزى هذا التعريف بعد أن نتعرف على أهم خصائص الطاقة والقوانين التي تحكم سلوكها في الكون.

(2) انظر Sefton (2004).

(3) يعترض بعض الفيزيائيين على هذا التعريف الشائع لأسباب ستتضح تدريجيا فيما بعد.

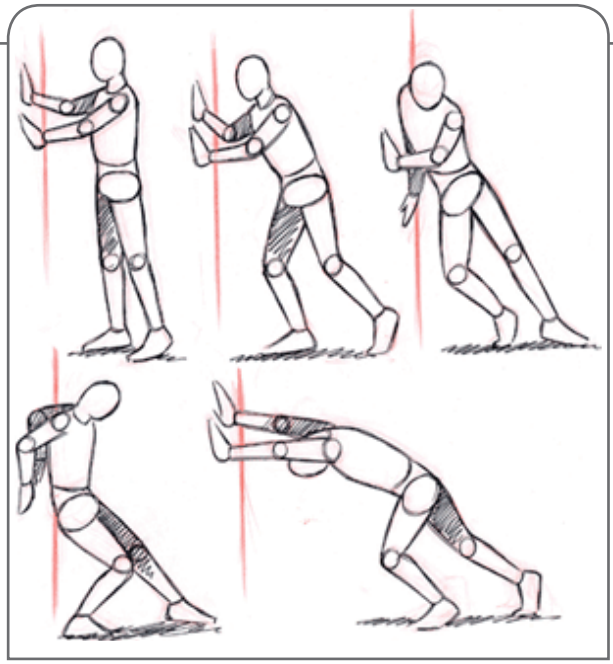
طاقة الوضع هي الطاقة (الكامنة) التي يكتسبها جسم ما بسبب وقوعه تحت تأثير قوة نابعة من شيء آخر (مثل جاذبية الأرض). نستطيع أن نحسب قيمة طاقة الوضع لجسم يقع على ارتفاع معين فوق سطح الأرض من حاصل ضرب كتلته ($m$) في تسارع الجاذبية الأرضية ($g$) في ارتفاعه عن الأرض ($h$):

$$E_p = mgh$$

**الشكل 23 :**

**مقدار الشغل يساوى صفراً**

**إذا لم يتحرك الجسم الذي تؤثر عليه بقوتك العضلية**



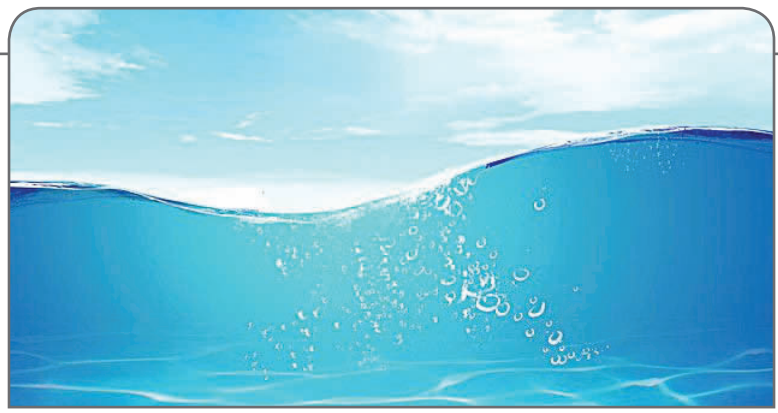
## السلوك الموجي

يصعب أن نجد الآن كتاب علمي لا يحتوي كلمة "موجة" أو جمعها "**موجات**": موجات الصوت، موجات الضوء، أو الموجات الكهرباء-مغناطيسية. لماذا نصف هذه

الظواهر (الصوت، الضوء، المغناطيسية، الكهرباء) بالموجات؟ أو بكلمات أخرى، ما هو السلوك الموجي؟ نحن لا نرى موجات الصوت أو الضوء، لكننا نرى موجات الماء (الشكل 24).

**الشكل 24 :**

**مـــوجـــات المـــــاء**



لنلاحظ الآن سلوك الموجات التي تَنتج عندما نلقي بحجر في بريكة ماء ساكنة (الشكل 25). تتكون موجة دائرية تنتشر من موقع سقوط الحجر للخارج. نلحظ هنا أن الاضطرابات الموجية هي التي تنتشر وليس الماء.

**الشكل 25 :**

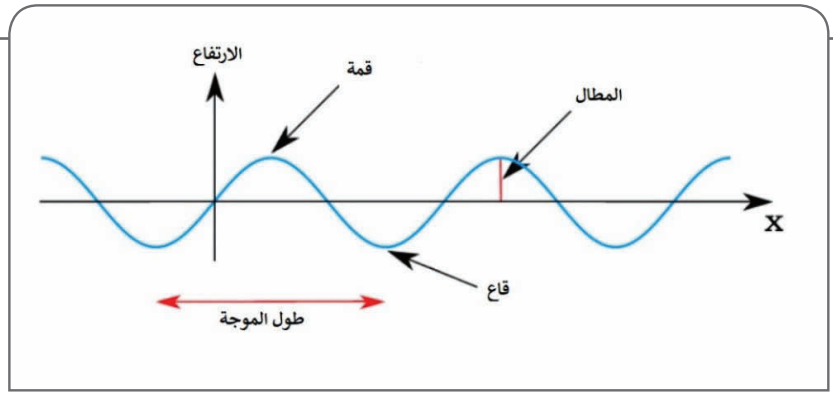
**الموجات التي تتكون عند سقوط حجر في بركة ماء**

أول ما يميز الموجات هو أنها نمط متكرر من مناطق مرتفعة ومناطق منخفضة.
فيما يلي تعريف بالمصطلحات الأساسية التي تستخدم في وصف الموجات (الشكل 26):

- ***القمم crests***: أعلى نقاط الموجة.
- ***القُعُور troughs***: أدنى نقاط الموجة.
- ***الدورة cycle***: الجزء من الموجة بين قمتين أو قعرين متجاورين.
- ***طول الموجة wavelength***: المسافة بين نقطتين متماثلتين في دورتين متجاورتين، ويرمز له بالحرف اليوناني "λ" (يلفظ "لامدا").
- ***الفترة period***: الوقت اللازم لإكمال دورة واحدة من الموجة.
- ***التردد frequency***: عدد الدورات في الثانية الواحدة. وحدة التردد هي الـ هيرتز (hertz (Hz) 1 هيرتز = 1 دورة في الثانية). يرمز لتردد الموجة بالحرف اليوناني "ν" (يلفظ "نيو"). التردد = 1/الفترة.
- ***المطال amplitude***: المسافة بين قمة/قعر الموجة وموضع الاستقرار.

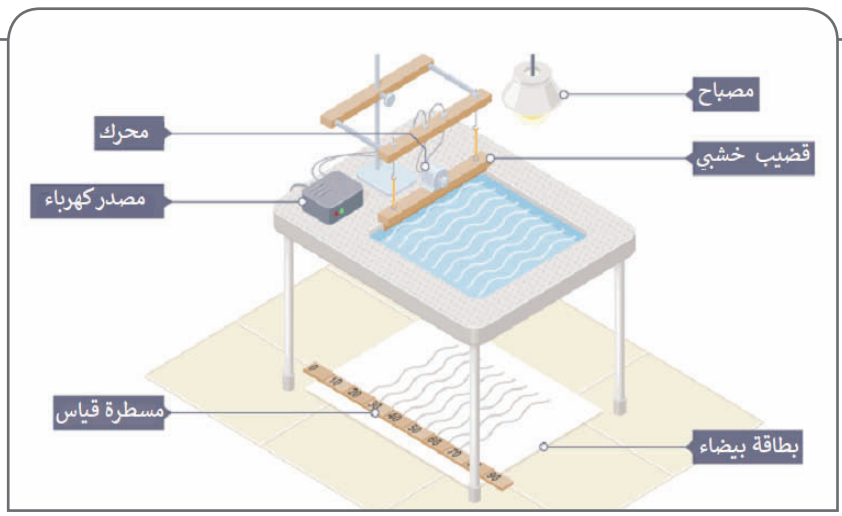
**الشكل 26 :**

**وصـــف الموجـــات**



يستخدم العلماء ما يسمى بـ "صهريج التموجات ripple tank" لدراسة سلوك موجات الماء (الشكل 27). يتكون صهريج التموجات من صينية شفافة ضحلة من الماء، فوقها مصباح كهربي وتحتها لوح أبيض. تظهر حركة موجات الماء في الحوض كخطوط متحركة على اللوح الأبيض. يمكن صنع الموجات بهز الماء باليد، لكن لتوليد الموجات المنتظمة يُستخدم قضيب خشبي يهتز بواسطة محرك.

**الشكل 27 :**
**تركيب صهريج التموجات.**



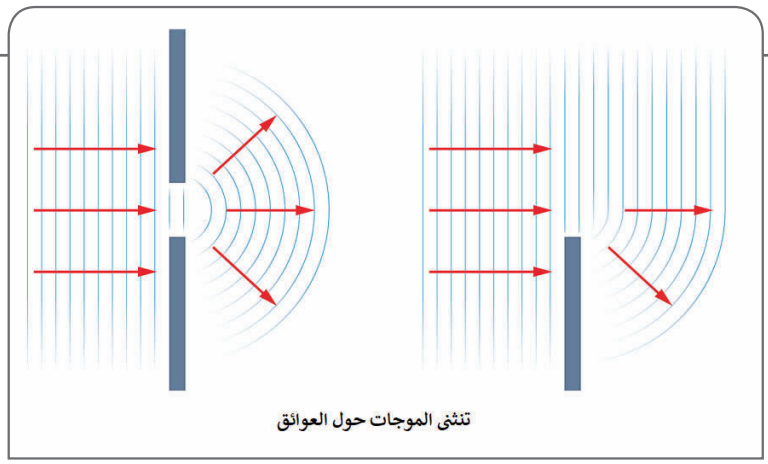

**سنناقش هنا أهم ظاهرتين مميزتين للموجات: الحيود والتداخل.**

عندما تواجه الموجة عائقاً فإنها بدلا من أن تستمر في خط مستقيم تنثني حول حافة العائق الذي تقابله (الشكل 28). يحدث نفس الشيء عندما تمر الموجة من فتحة صغيرة في العائق. تعرف هذه الظاهرة باسم *الحيود diffraction*.[1]

(1) «الحيود» في اللغة هو جمع «الحيد»، لكن تواتر استخدام هذا المصطلح الفيزيائي باعتباره مفرد.

**الشكل 28 :**

**رسم توضيحي لحيود الموجات**

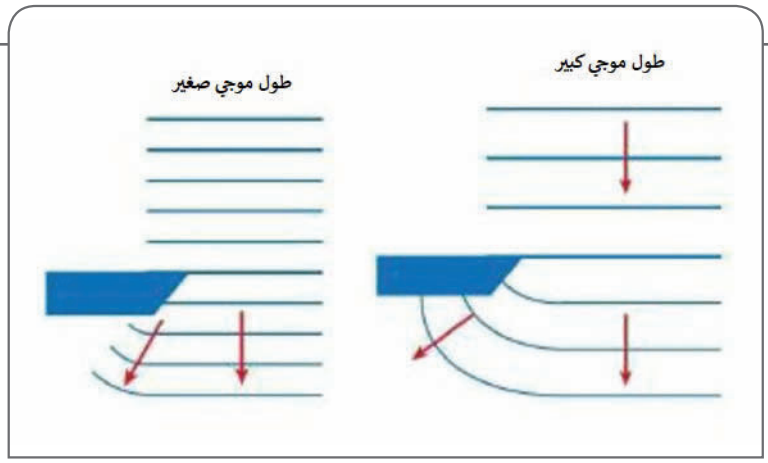


تنثنى الموجات حول العوائق

الحيود حول حواف العوائق يكون ملحوظاً أكثر مع الموجات الطويلة (الشكل 29). أما الحيود حول حواف الفتحات، فيكون كبيراً عندما يتساو طول الموجة مع وسع الفتحة (الشكل 30).

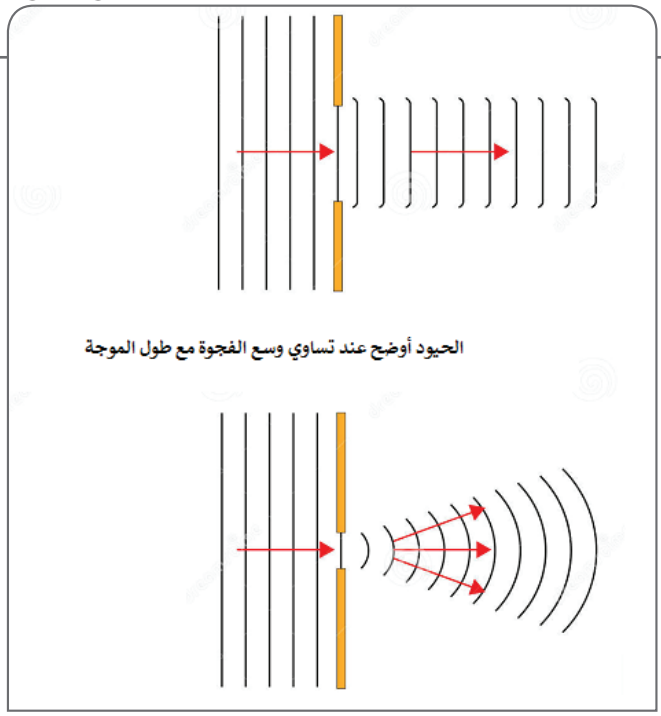
**الشكل 29 :**

**الحيود حول حواف العوائق**



**الشكل 30 :**

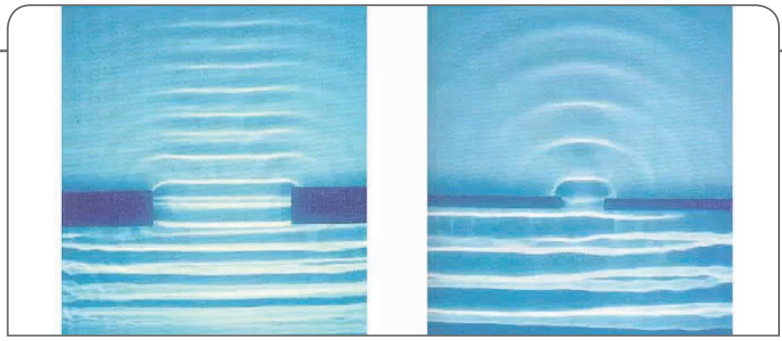
**يكون الحيود كبيراً عندما يتساوى طول الموجة مع وسع الفتحة**




- يمكننا ملاحظة حيود موجات الماء في صهريج التموجات (الشكل 31) أو في البحر (الشكل 32).

**الشكل 31 :**

**الحيود في صهريج التموجات**



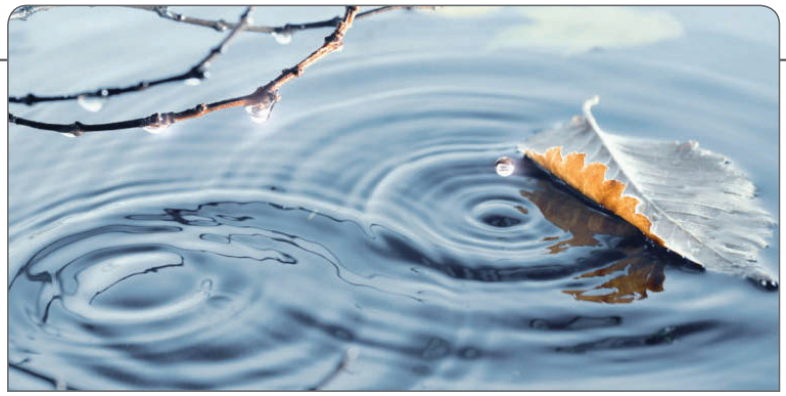
**الشكل 32 :**

**الحيـــود في موجـــات البحـــر**

لننتقل الآن إلى دراسة الظاهرة الثانية. ماذا يحدث عندما تتقابل الموجات (الشكل 33)؟

**الشكل 33 :**

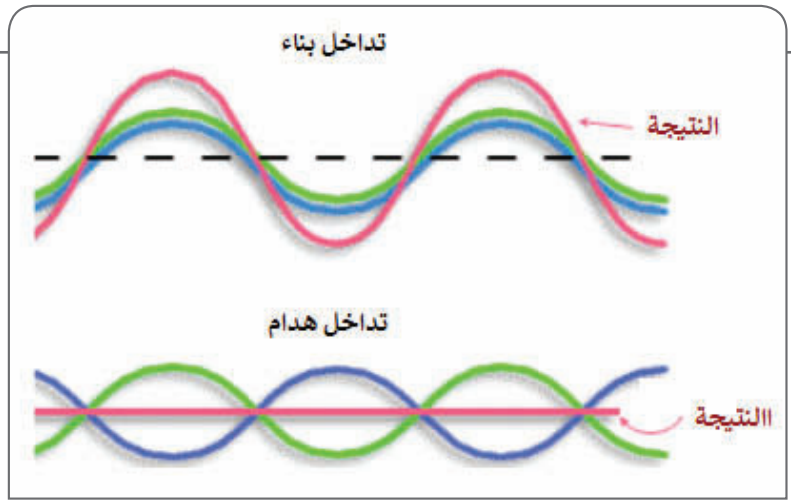
**التـداخـــل بـــين الموجـــات**



قد تلتقي الموجتين القمة بالقمة والقاع بالقاع. هنا نحصل على قمة موحدة أعلى من قمة أي من الموجتين، وقعر موحد أدنى من قعر أي من الموجتين. سأترك لك توقع ماذا يحدث عندما تتقابل قمة إحدى الموجتين بقعر الموجة الثانية (الشكل 34).

**الشكل 34 :**

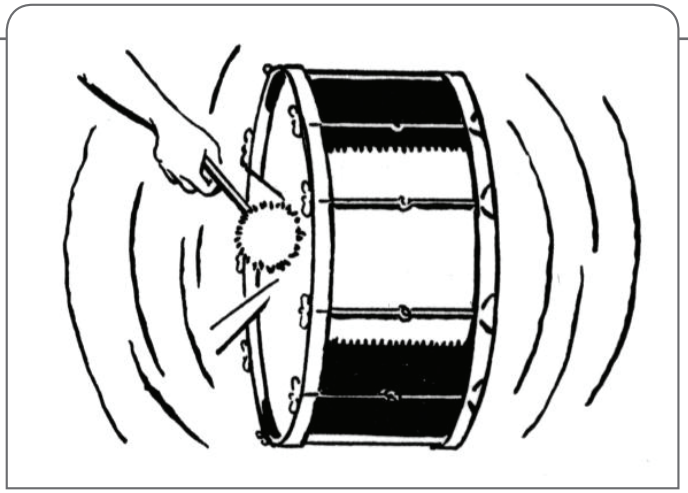
**التداخل البناء والتداخل الهدام بين الموجات**




## الصـــوت

يتكون الصوت عندما تهتز الأشياء، وهو إحدى الطرق التي تنتقل بها الطاقة بين الأشياء. عندما تقرع الطبول، على سبيل المثال، يهتز جلدها المشدود بسرعة عالية جدا (بحيث لا نتمكن عادة من رؤيتها)، مسببة اهتزاز الهواء من حولها أيضا (الشكل 35). ومع اهتزاز الهواء، تُبَث الطاقة من الطبلة في جميع الاتجاهات. وفي النهاية، يبدأ الهواء بداخل أذنيك في الاهتزاز —هنا يبدأ إحساسك بصوت الطبلة المهتزة. تنقسم الدراسة العلمية للصوت إلى شقين: الأول فيزيائي يتعلق بسلوك الصوت في الطبيعة، والثاني "نفس ـ أحيائي psychobiological" يتعلق بإدراكنا للصوت. سنركز في هذا الجزء على الشق الأول.

**الشكل 35 :**
**الاهتـــزاز والصـــوت**



عندما تهتز الأشياء، فأنها تضغط أو تخلخل جزيئات الهواء المحيط بها. يتكرر هذا النمط من *الانضغاطات compressions والتخلخلات rarefactions* على شكل موجات تنتشر في جميع الاتجاهات. لذلك، لا ينتقل الصوت في الفراغ (انعدام المادة). يطلق على المواد التي ينتقل خلالها الصوت (مثل الهواء، الماء، والزجاج) اسم *الوسائط media*.[1] من المهم أن نلحظ هنا أن الذي ينتشر من مصدر الصوت هو أنماط الانضغاطات والتخلخلات (الموجات) وليس جسيمات الهواء التي تظل تراوح مكانها. تُشَبَّه فكرة الموجات الصوتية عادة بحركة حلقات الزنبرك اللَّعوب (لعبة السلانكي، الشكل 36).

عندما نهز الزنبرك، تحدث ظاهرتان متصاحبتان: تتقارب اللفات وتتباعد بالتتابع على طول الزنبرك (الشكل 37).

(1) يسافر الصوت في الماء أسرع منه في الهواء.

**الشكل 36 :**

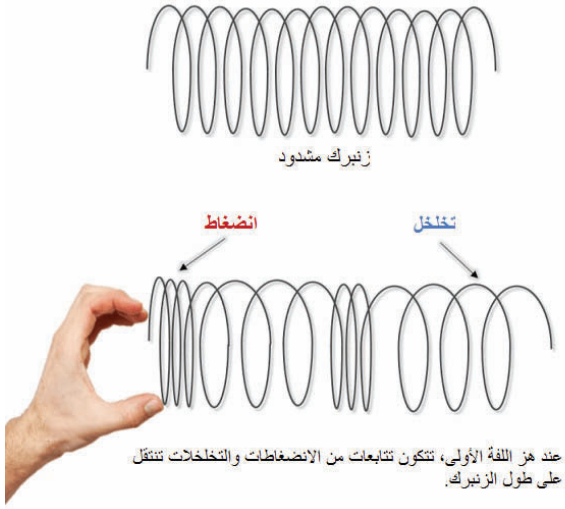
**لعبـــة الســلانكـــي**

توصف الموجات الصوتية (وموجات الزنبرك) بـ *الموجات الطولية* *longitudinal waves* حيث تتأرجح الموجة بين الانضغاط الأضيق والتخلخل الأوسع في اتجاه انتشار الموجة، وليس عموديا عليه كما هو الحال في *الموجات المستعرضة* *transverse waves* (مثل موجات الماء، الشكل 38).

**الشكل 37 :**

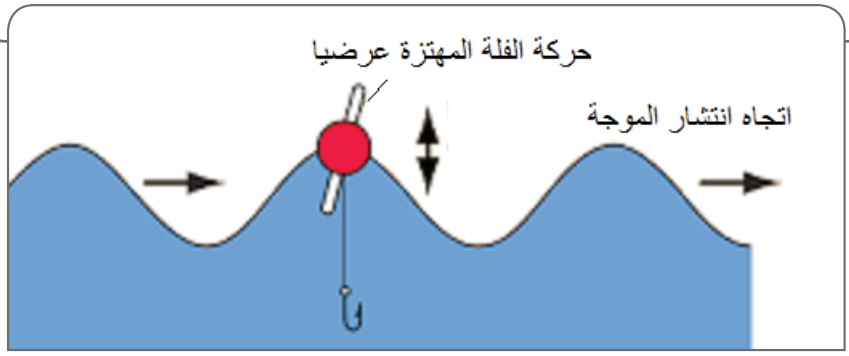
**تشبيه موجات الصوت بنمط من**

**الانضغاطات والتخلخلات المتتابعة في زنبرك**



**الشكل 38 :**

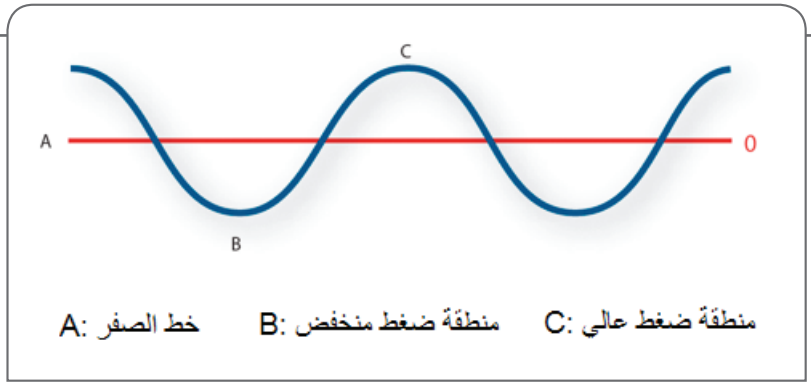
**تشبيه الموجات العرضية بحركة فلة الصيد المهتزة رأسيا**




يجرى تصوير الموجات الصوتية بيانياً بما يسمى الشكل الموجي waveform (الشكل 39). يمثل خط الصفر في هذا الشكل ضغط الهواء الساكن. يشير الجزء الصاعد من الخط المتموج إلى ضغط هوائي أعلى؛ الهابط، ضغط أدنى.

**الشكل 39 :**

**الرسم البياني لموجة الصوت**




**يبين الشكل الموجي مواصفات الصوت التالية:**

- **المطال/السعة amplitude** : يعبر عن أقصى زيادة في الضغط (قمة الموجة) عن الضغط المعتاد (خط الصفر). يكون الصوت ذو المطال العالي صاخباً؛ الواطي، هادئاً.

- **الدورة/النبرة cycle**. تصف دورة كاملة من التغير في الضغط، من خط الصفر إلى القمة، فالقاع، إلى خط الصفر مجددا.
- **التردد frequency**. يقصد به عدد الدورات المتكررة في الثانية الواحدة، والتي تعرف بالـ "هرتز (hertz (Hz"، تكريما للفيزيائي الألماني "هاينريش هرتس Heinrich Hertz". على سبيل المثال، الموجة الصوتية ذات الـ 1000 هرتز تكون 1000 دورة في الثانية الواحدة. كلما زاد تردد الموجة الصوتية كلما "رقَّت" *نغمة الصوت sound pitch*: الترددات العالية تعطي أصواتا حادة، مثل أصوات النساء وزقزقة العصافير؛ المنخفضة أصواتا غليظة، مثل أصوات الرجال وفرقعة المدافع.
- **الطور phase**. يشير إلى موضع الشكل الموجي خلال دورة كاملة. تقسم الدورة الكاملة إلى 360°: صفر° عند بداية الموجة، 90° عند قمتها، 180° عند منتصفها، و360° عند نهايتها.
- **طول الموجة wavelength**. هي المسافة بين نقطتين متشابهتين (لها درجة الطور ذاتها) على موجتين متواليتين.

تعد سرعة الصوت في الوسط نفسه ثابتة نوعا ما. لذلك، هناك علاقة عكسية بين طول الموجة الصوتية وترددها.

بصفة عامة، يستطيع الإنسان أن يسمع الترددات "الصوتية" ما بين 20-20 ألف هيرتز. ومع تقدمه في السن، يفقد الشخص قدرته على سماع الترددات العالية، حتى أنه يمكن تقدير عمر الإنسان من الترددات الأعلى التي يستطيع سماعها. على سبيل المثال، سيقل غالبا عمر الفرد الذي يستطيع سماع الترددات حتى 19 ألف هرتز عن العشرين عاما، وحتى 12 ألف هرتز عن الخمسين. لذلك، يجد كبار السن صعوبة في سماع بعض الحروف الساكنة مثل السين، الفاء، والهاء. تستطيع الكثير من الحيوانات، مثل القطط والكلاب، أن تسمع ترددات أعلى من التي يسمعها

الإنسان (حتى 60 ألف هيرتز بالنسبة للكلاب)[1]. أما الفيل، فهو الحيوان الذي يسمع أدنى الترددات (حتى 14 ـ 16 هرتز).

كيف نحصل على الطاقة من الصوت؟ عرفنا أن الصوت عبارة عن تتابع من مناطق الضغط العالي والمنخفض. في مناطق الضغط العالي، تتزاحم جزيئات الهواء وتتصادم بقوة مع بعضها؛ والعكس في مناطق الضغط المنخفض. وعندما تتجاور المنطقتان، تنتقل الجزيئات من المنطقة المزدحمة إلى الأقل ازدحاماً. هذه الحركة تنتج "قوة" تستطيع أن تؤثر على أي شيء في طريقها، وهذه هي فكرة أسطوانة الهواء المضغوط التي تستخدم في إزالة الأتربة من حاسوبك الشخصي.

## الكهرباء والمغناطيسية أو الكهرباء-مغناطيسية

ما هي أول ظاهرة كهربائية شاهدها الإنسان وخاف منها؟ إنها على الأرجح البرق. أما المغناطيسية، فتقول أسطورة شائعة أن راعيا من جزيرة كريت قد اكتشفها مصادفة قبل نحو 4000 عام في منطقة "ماجنسيا Magnesia" شمال اليونان. كان ذلك الشيخ يسوق أغنامه خلال المراعي عندما تفاجأ بمسامير نعليه وكعب عصاه الحديدي تلتصق بصخرة سوداء كان قد وطأها. نحن نطلق الآن على مثل هذه الصخرة اسم معدن الماجنتايت magnetite (الشكل 40)،[2] والذي تصنع منه أحجار المغناطيس lodestones.[3]

(1) استخدمت هذه الحقيقة في صنع صفارات خاصة لتدريب الكلاب. تُصدر تلك الصفارات أصوات عالية التردد يكاد لا يسمعها الإنسان (في أغلبها، موجات فوق صوتية *ultrasound*)؛ فلا تسبب الإزعاج للموجودين بالمكان.

(2) الماجنتايت هو أكسيد الحديد الأسود.

(3) كلمة "lodestone" تعني في الأصل الحجر الجاذب.

**الشكل 40 :**

**معـــدن المغناطيس (الماجنتايت)**

ورد ذكر حجر المغناطيس قبل أكثر من 2500 سنة في كتابات الفيلسوف الإغريقي القديم "طاليس Thales" من "ميلتس Miletus"[1] (546-620 ق م). أعتقد طاليس أن للمغناطيس روح لأنه يستطيع تحريك الأشياء. كما تَظهر القصص عن المغناطيسية في كتابات بعض الفلاسفة الرومان في القرن الأول قبل الميلاد. كتب الفيلسوف الروماني "پليني الأكبر Pliny the Elder"، على سبيل المثال، عن وجود تل بجوار نهر السند مصنوع كليا من صخر يجذب الحديد.

اعتقد القدماء أن للمغناطيسية قوى سحرية على البشر والحجر، مثل قدرتها على شفاء المرضى، طرد الأرواح الشريرة، وجذب وابتلاع السفن المصنوعة من الحديد.

ابتكر الصينيون البوصلة الملاحية قبل أكثر من 2000 عام. كانت أولى البوصلات تتكون من شظية من حجر المغناطيس تطفو على سطح الماء (الشكل 41).

(1) مكان بلدة "ميلت Milet" التركية الحالية.

**الشكل 41:**

**البوصلة الملاحية القديمة**

يفتخر البريطانيون بأن الطبيب الشخصي لملكتهم "إليزابيث Elizabeth"، الدكتور "وليام جيلبرت William Gilbert" (1540 - 1603)، كان أول من درس المغناطيسية بشكل علمي، وأدرك أن الأرض هي عبارة عن مغناطيس عملاق. نشر جيلبرت كتابه الخاص عن المغناطيسية، *المغناطيس De Magnete*، في 1600 (أي قبل وفاته بثلاث سنوات فقط)، وهو بالمصادفة العام نفسه الذي أعدم فيه "جياردينو برونو Giardino Bruno" حرقا على العامود في موطنه إيطاليا بسبب أرائه "العلمية" المخالفة في ذلك الوقت لمعتقدات الكنيسة الكاثوليكية الرومية عن الكون.

قصة الكهرباء طويلة وقديمة-حديثة. يبدو أن الإنسان قد اكتشف *الكهرباء الساكنة statistic electricity* منذ قديم الزمان، في حين أنه لم يكتشف *الكهرباء السارية current electricity* إلا في مطلع القرن التاسع عشر.

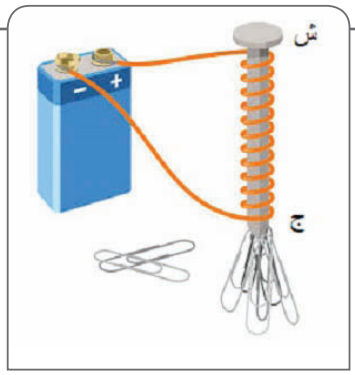
يحكى أن طاليس السابق ذكره كان يعمل في أحد أيام الشتاء بجوار طاولة عليها قطعة من العنبر قد غطاها الغبار. التقط طاليس قطعة العنبر ومسحها في معطفه ثم وضعها ثانية على الطاولة. لاحظ بدهشة أن قطعة العنبر قد جذبت إليها شظايا من الخشب كانت بجوارها. بعد ذلك بثلاثمائة عام، قام فيلسوف آخر اسمه "ثيوفراستوس Theophrastus" (371 - 287 ق م) بمتابعة تجارب طاليس مجربا حك أنواع متنوعة من الحجارة، وشاهد ظاهرة الجذب نفسها.

ظل الفلاسفة والعلماء يتعاملون مع المغناطيسية والكهرباء على أنهما ظاهرتان منفصلتان حتى العام 1820. في ذلك العام، لاحظ الأستاذ الدنماركي "هانس كريستيان أورستد Hans Christean Ørsted" (1777 - 1851) مصادفة أثناء درس عملي عن البطاريات الكهربية لتلاميذه في "جامعة كوبنهاجن"___لاحظ انحراف إبرة البوصلة المغناطيسية الموجودة بالصدفة تحت الدائرة الكهربية عن اتجاهها المعتاد (نحو الشمال).

بعد أن عرف العالم الفرنسي "أندريه ماري أمبير André Marie Ampère" (1775 - 1836؛ الشكل 42) باكتشاف أورستد السابق ذكره، قرر أن يحاول بنفسه فهم العلاقة بين الكهرباء والمغناطيسية. وفي غضون أشهر قليلة اكتشف أمبير فكرة *المغناطيس الكهربي electromagnet* (الشكل 43).

**الشكل 42:**
**أندريه أمبير**

**الشكل 43:**
**فكرة المغناطيس الكهربي**

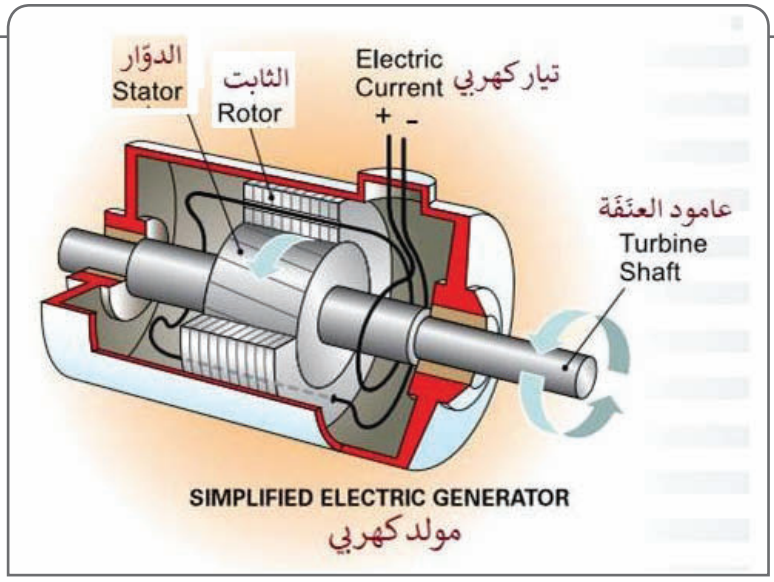


وضع أمبير *قانوناً علمياً scientific law* يعرف باسمه يلخص رياضياً هذه العلاقة بين الكهرباء والمغناطيسية.

بعد ذلك بعشر سنوات، اكتشف الإنكليزي "مايكل فاراداي Michel Faraday" (1791 - 1867) أن تحريك مغناطيس داخل ملف من السلك يولد تيارا كهربيا في هذا الملف (الشكل 44)،[1] وهذه هي فكرة مولد الكهرباء electric generator أو الدينامو dynamo الذي تعمل على أساسها جميع محطات الكهرباء الحالية حول العالم (باستثناء المحطات الضوء-جهدية).

**الشكل 44:**

**فكرة الحـــث الكهربـــي**




(1) لمزيد من المعلومات عن مايكل فاراداي، أنظر الملحق 2.

## التأثير عن بعد و"حيلة المجال"

من خبراتنا اليومية نعرف أننا لا نستطيع تحريك الأشياء التي من حولنا دون أن نلامسها. لذلك عندما نرى شيئا يؤثر على آخر عن بعد، نتساءل كيف يحدث هذا. وقد واجه نيوتن السؤال نفسه عندما قال بأن الأرض تشد القمر ناحيتها، فلم يجد لذلك جوابا. كان مثل هذا التساؤل الطبيعي الدافع وراء ابتكار مايكل فاراداي ومن بعده "جيمس ماكسويل James Maxwell" لفكرة، أو بالأحرى حيلة، المجالين المغناطيسي والكهربي. وقد قدمت هذه الحيلة، كما سيتضح لاحقا، نفعا كبيرا لتطور علم *الكهرباء-مغناطيسية electromagnetism*.

يقصد بـ *المجال المغناطيسي magnetic field* "منطقة التأثير" من حول المغناطيس. إذا ما وضعنا بوصلة أو شظية من الحديد في أي نقطة في مجال مغناطيسي فإنها سوف تتأثر بشكل محدد في هذا المجال. عادة ما يجرى تصوير المجال المغناطيسي بخطوط منحنية تخرج من أحد طرفي المغناطيس لتعود إليه من الطرف الآخر.

## الضـــــوء

احتار الإنسان طويلاً في معرفة طبيعة الضوء. في معمعة الثورة العلمية الأوروبية خلال القرن السابع عشر، كانت هناك نظريتين متنافستين عن طبيعة الضوء. تقترح الأولى أن الضوء عبارة عن جسيمات صغيرة وخفيفة تشع من مصدر الضوء في جميع الاتجاهات في مسارات مستقيمة. أما الثانية، فتؤكد أن للضوء صفات مثل الموجات.

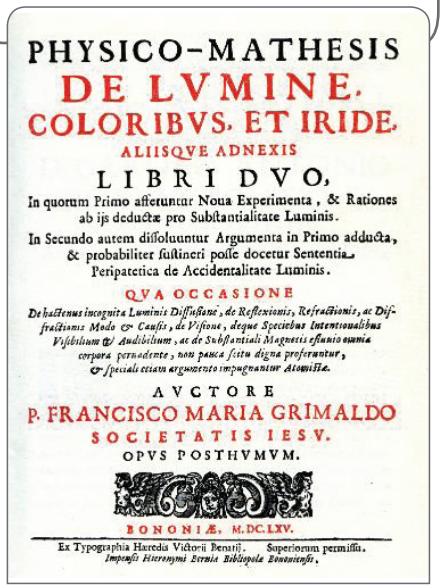
كان نيوتن الشهير من أصحاب النظرية الأولى، وقد أسماها في 1704 *النظرية الدقائقية للضوء corpuscular theory of light*. اللافت أن نيوتن كان على علم بتجارب الباحثين الآخرين التي اقترحت أن للضوء طبيعة "موجية"،

لكنه رفض بشدة تلك النظرية. برر نيوتن رفضه هذا على النحو التالي: "لدى أي شخص يؤمن بأن الضوء موجة مشكلتان. أولهما، ما هو الذي يتموج؟ ليست الموجة سوى تأثير. لذلك، تحتاج موجات الصوت وموجات الماء إلى وسيط لتؤثر عليه. ثانيا، إذا كان الضوء ينثني عند العوائق مثلما يفعل الصوت، لم أسمعك من وراء الأستر ولا أستطيع أن أراك؟"

كان "فرانشيسكو جريمالدي Francesco Grimaldi" (1618 - 1663؛ الشكل 45) قد سبق أن أوضح في كتابه الذي نشر في 1665 بعد مماته (الشكل 46) أن الضوء "يحيد" عند اصطدامه بعائق صغير أو مروره من فتحة صغيرة، مثلما تفعل موجات الماء المرئية.[1] وقد أعَطى هذه الظاهرة اسمها التي مازالت تُعرف به حتى الآن: *الحيود diffraction*.

**الشكل 45:**
**فرانشيسكو جريمالدي**

**الشكل 46:**
**كتاب جريمالدي**

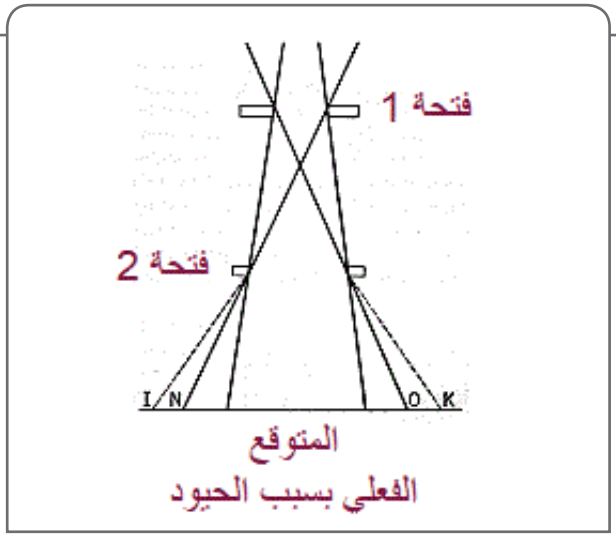


PHYSICO-MATHESIS
DE LVMINE.
COLORIBVS. ET IRIDE.
ALIISQVE ADNEXIS
LIBRI DVO,
In quorum Primo afferuntur Noua Experimenta, & Rationes ab ijs deductæ pro Substantialitate Luminis.
In Secundo autem dissoluuntur Argumenta in Primo adducta, & probabiliter sustineri posse docetur Sententia Peripatetica de Accidentalitate Luminis.
QVA OCCASIONE
*De hactenus incognita Luminis Diffusione, de Reflexionis, Refractionis, ac Diffractionis Modo & Causis, de Visione, deque Speciebus Intentionalibus Visibilium & Audibilium, ac de Substantiali Magnetis efluuio omnia corpora peruadente, non pauca scitu digna proferuntur, & speciali etiam argumento impugnantur Atomistæ.*
AVCTORE
P. FRANCISCO MARIA GRIMALDO
SOCIETATIS IESV.
OPVS POSTHVMVM.
BONONIÆ, M.DC.LXV.
Ex Typographia Hæredis Victorij Benatij. Superiorum permissu.
*Impensis Hieronymi Bernia Bibliopolæ Bononiensis.*

(1) وجد المؤلف نسخة أصلية قديمة من كتاب جريمالدي معروضة للبيع على شبكة الإنترنت بسعر 65 ألف دولار أمريكي.

مرر جريمالدي مخروطاً من الضوء عبر فتحتين متتاليتين إلى غرفة مظلمة، واستقبل الضوء النافذ على سطح أبيض. اندهش جريمالدي عندما وجد أن دائرة الضوء الساقط على السطح الأبيض كانت أكبر مما يجب أن تكون عليه لو افترضنا أن الضوء قد مر عبر حواف الفتحتين في خطوط مستقيمة (الشكل 47).

**الشكل 47:**
**تجربة جريمالدي على الضوء**




نتيجة لشهرة نيوتن ومكانته الرفيعة،[1] خاصة في الجزر البريطانية، لم يجرؤ سوى القليل على تحدي نظريته الدقائقية عن الضوء، وجرى تجاهل الأدلة التي تخالفها. هذا مثال نموذجي على ظاهرة قديمة-حديثة يمكننا تسميتها بـ "عمى التفوق excellence blindness"، وهي بالتأكيد إحدى صور التعصب الضارة. تتجلى هذه الظاهرة حاليا في تعالي العامة والنخبة في الدول المتقدمة على شعوب الدول النامية وازدراء الأولى لثقافات الثانية وأفكار نخبها.

(1) في 1705، منحت الملكة "آن Anne" نيوتن لقب "فارس Sir" تقديرا له على انجازاته العلمية. وهو نفس اللقب البريطاني الذي مُنح لجراح القلب المصري الأصل الدكتور "مجدي يعقوب Magdi Yacoub" في العام 1992.

ظلت نظرية نيوتن تحظى بقبول الأوساط العلمية حتى السنوات الأولى من القرن 19. أخيراً، جرى التخلي عنها بعد أن تكاثرت الأدلة المؤيدة للنظرية الموجية البديلة. وقد دفعت هذه الظاهرة المتكررة في تاريخ العلم "توماس كون Thomas Kuhn" الأمريكي (1922–1996) — الفيزيائي ومؤرخ وفيلسوف العلم — إلى طرح نظريته الشهيرة عن *تبدل الأطر الفكرية paradigm shift theory*.

جاء البرهان القاطع على الطبيعة الموجية للضوء في أوائل القرن 19 من تجربة العالم الإنجليزي "توماس يَنج Thomas Young" (1773–1829؛ الشكل 48) المشهورة باسم "تجربة الشق المزدوج double-slit experiment".[1]

**الشكل 48:**
**توماس ينج Thomas Young**

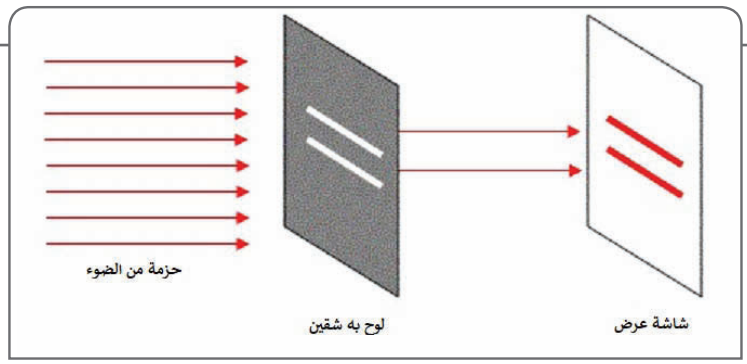
كان ينج يميل إلى الفرضيات التي تقول إن الضوء يتصرف كموجات، وأراد البرهان على ذلك. قام ينج بإمرار حزمة من ضوء الشمس خلال فتحة ضيقة، ثم قسم حزمة الضوء الضيقة المارة إلى نصفين بواسطة شقين ضيقين على لوح ورقي، واستقبل الضوء المار من الشقين على شاشة عرض. لم يكن ما ظهر على شاشة

(1) يعد توماس ينج، نفسه، هذا الاكتشاف أهم إنجازاته العلمية الكثيرة.

العرض خطين مضيئين كما هو متوقع بناء على النظرية الجسيمية (الشكل 49)، بل تتابع من البقع المضيئة والمناطق المظلمة (الشكل 50ج). قارن ينج ذلك بما يحدث عند تداخل موجات الماء كالتالي: تتكون البقع المضيئة عند حدوث التداخل البناء بين الموجات؛ المناطق الداكنة عند التداخل الهدام (راجع الشكل 34).

**الشكل 49:**

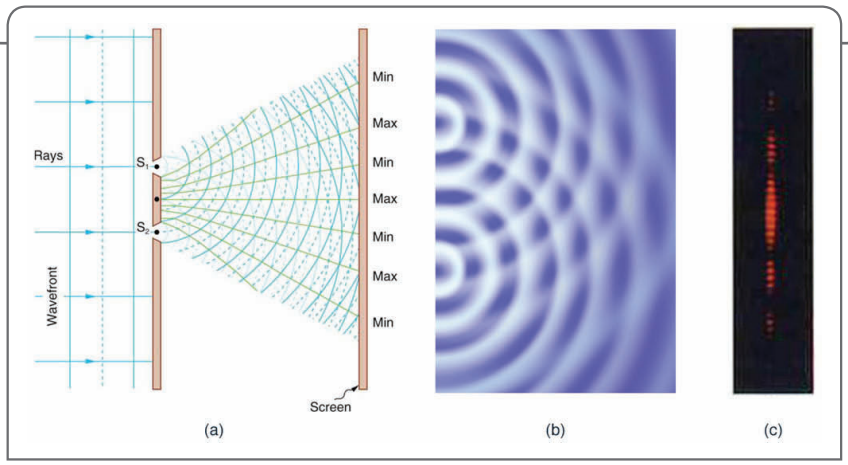
**النتيجة المتوقعة بناء على نظرية نيوتن الدقائقية للضوء**




يستخدم الآن الضوء أحادي اللون *monochromatic light* عند إجراء تجربة الشق المزدوج في المدارس والجامعات.

**الشكل 50:**

**النتيجة المشاهدة وتفسيرها وفقا للطبيعة الموجية للضوء**



# عصر الأشعة الخفية

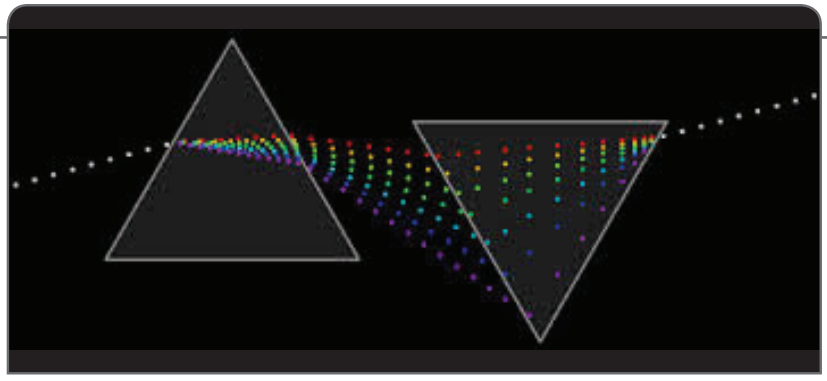
يمكننا تسمية القرن التاسع عشر بعصر الأشعة الخفية. ففي مطلع هذا القرن جرى اكتشاف *الأشعة تحت الحمراء* *infrared rays* (*IR*) *والأشعة فوق البنفسجية* *ultraviolet rays* (*UV*). وفي نهاية القرن ذاته جرى اكتشاف *الأشعة السينية* *X ray* *والمواد المشعة ذاتياً* *radioactive materials*. ولأنها أشعة غير مرئية، جرى اكتشافها جميعا بطريق الصدفة.

جرى اكتشاف الأشعة تحت الحمراء مصادفة في 1800 بواسطة العالم متعدد المواهب "ويليام هيرشل William Herschel" (1738 - 1822).[1] كان هيرشل يحاول ابتكار طريقة لتقليص السطوع المتكون عند النظر في المنظار إلى الشمس.

كانت مقدرة المنشور (أو الموشور) الزجاجي على توليد طيف من الألوان معروفة منذ القدم. لكن الفضل يعود إلى نيوتن في اثبات أن الضوء الأبيض يتشكل من كل تلك الألوان (الشكل 51)، أي أن اللون هو خاصية للضوء—لا المنشور، كما كان يَظن البعض سابقاً.

**الشكل 51:**

**تحليل الضوء وتجميعه بواسطة المنشور**



(1) للمزيد من المعلومات عن ويليام هيرش، أنظر الملحق.

كان هيرشل قد لاحظ عند تجربته لمرشحات ملونة مختلفة أن بعضها يسمح بمرور الحرارة أكثر من الأخرى. وقد جعله هذا يصمم تجربة لقياس حرارة ألوان الطيف الضوئي المختلفة. استخدم منشورا زجاجيا لتحليل ضوء الشمس إلى ألوانه المختلفة. ثم قاس درجة الحرارة عند ألوان الطيف المختلفة وخارجها (الشكل 52). ولدهشته، اكتشف وجود الحرارة الأعلى بعد الطرف الأحمر من الطيف، أي حيث لا يرى أي ضوء كان.

**الشكل 52:**
**ويليـــام هيـرشـــل**

أطلق هيرشل في البداية على هذه الحرارة اسم "الأشعة الحارة calorific rays"، وبعد مزيد من الفحص وجد أنها تتصرف تماما مثل "الضوء المرئي visible light". كانت هذه هي المرة الأولى التي يبرهن فيها إنسان على وجود نوع من الضوء اللامرئي. وهي نفس الأشعة التي يعتقد أن غاز ثاني أكسيد الكربون وغيره من غازات الصوبة (الدفيئة) تعمل على حبسها في الغلاف الجوي مسببة ارتفاع متوسط درجة الحرارة على الأرض (مشكلة *الاحترار العالمي global warming*).

تستخدم *الأشعة تحت الحمراء infrared rays* الآن في الكثير من المجالات الحيوية—من العلاج الطبيعي إلى الرؤية الليلية.

بعد ذلك بعام واحد، اكتشف الفيزيائي الألماني "جوهان ريتر Johann Ritter" (1776 – 1810؛ الشكل 53) نوع آخر من الأشعة اللامرئية: *الأشعة فوق البنفسجية ultraviolet rays*.[1]

**الشكل 53**

**جـوهــان ريتـــر**

في 1801، كان ريتر يجري بعض التجارب على كلوريد الفضة silver chloride، المعروف أنه يَغمَق مع تعرضه للضوء. في ذلك الوقت، كان معروفا أن الضوء الأزرق يُغَمِّق كلوريد الفضة بدرجة أكبر من الضوء الأحمر. قام ريتر بدراسة تأثير ألوان الطيف الضوئي المختلفة على هذا المركب، فوجد أن التأثير الضوئي هذا يزداد في الاتجاه من الأحمر إلى البنفسجي.

كان ريتر يعرف عن اكتشاف هيرشل للأشعة تحت الحمراء، فطرأ على

(1) ولد ريتر في بلدة "زاميتس Samitz" الألمانية، والتي هي الآن جزء من بولندا، وتوفي في ميونخ وعمره لم يتعدى 35 عاماً.

ذهنه أن يضع بعضا من كلوريد الفضة خارج الطيف الضوئي من ناحية الضوء البنفسجي، ويرى ماذا سيحدث. لدهشته، وجد أن كلوريد الفضة قد اغمَقَّ بدرجة أكبر مما يحدث عند أي لون آخر.

أطلق ريتر على هذا النوع الجديد من الأشعة اللامرئية اسم *الأشعة المؤكسدة oxidizing rays*، ثم غيره إلى *الأشعة الكيميائية chemical rays* تمييزا لها عن أشعة هيرشل الحرارية، لكنها تعرف الآن باسم الأشعة فوق البنفسجية.

جرى اكتشاف قدرة الأشعة فوق البنفسجية على قتل خلايا البكتيريا في 1878، ومن ثم يجرى استخدامها في تعقيم الأدوات الطبية والأغذية المحفوظة. وكما سنعرف لاحقا بالتفصيل تعد الأشعة فوق البنفسجية من الأشعة المُؤيِّنة التي قد تتسبب في الإصابة بشيخوخة أو سرطان الجلد عند التعرض الزائد لها.

## أشعة من صنع الإنسان

في منتصف القرن 18، بدأ بعض العلماء الأوربيين دراسة تأثير الكهرباء على الغازات.[1] لم تستمر هذه الدراسات طويلا، ومضى عليها نحو قرن من الزمان قبل أن تستأنف من جديد.

في 1836، بدأ مايكل فاراداي دراسة استمرت لعامين عن تأثير إمرار الكهرباء خلال مجموعة متنوعة من الغازات المخلخلة rarefied gases.

كان من المعروف في ذلك الوقت أن الهواء ليس ناقلا جيدا للكهرباء، وأن الشحنة الكهربية ترحل مسافات أكبر في الفراغ أو شبه الفراغ. لذلك كان يطلق

(1) مثل البولندي "چوتفريد جروميرت Gottfried Grummert" (1716 - 1762)، الفرنسي "أبيه نوليه Abbé Nollet" (1700 - 1770)، والبريطاني "ويليام واتسون William Watson" (1715 - 1787).

على مثل هذه الدراسات اسم "التصريف الكهربي في الغازات المخلخلة electric discharge in rarefied gases".[1]

كان الباحثون في مجال التصريف الكهربي يستخدمون جهازا يعرف باسم "البيضة الكهربية" (الشكل 54). يتكون هذا الجهاز من انتفاخ زجاجي بيضاوي الشكل. يوجد داخل هذه "البيضة الزجاجية" قضيبان معدنيان مثبتان بطرفي البيضة بحيث يمكن تقريب أو إبعاد أحدهما عن الآخر. تملأ البيضة بالغاز المراد دراسة تأثير الكهرباء عليه، يوصل القضيبان المعدنيان بمجموعة من البطاريات الكهربية، ثم تفرغ تدريجيا من الهواء (أو الغاز) بواسطة *مضخة تفريغ vacuum pump* حتى الوصول إلى الضغط الداخلي المطلوب (الضغط الأقل يعني كميات أقل من الغازات في الداخل وفراغ أكبر).

**الشكل 54:**
**جهـاز البيضـة الكهربيـة**

(1) البرق ما هو إلا تصريف كهربي يحدث تلقائيا في الغلاف الجوي.

وقد لاحظ فاراداي من تجاربه تلك تكون وهج ملون بين قطبي الكهرباء مع انخفاض الضغط داخل أنبوب التصريف.

بحلول 1858، كان مركز ثقل أبحاث التصريف الكهربي قد انتقل إلى ألمانيا، وتحديداً فيما بين الثلاثي "يوليوس پلوكر Julius Plücker" (1801 – 1868؛ الشكل 55)، "هاينريش چايسلر Heinrich Geißler" (1814 – 1879؛ الشكل 56)، و"ويلهلم هيتورف Wilhelm Hittorf" (1824 – 1914).

كان پلوكر يعمل أستاذاً للرياضيات في جامعة بون منذ 1836. وفي 1847، قرر هجر تخصصه والتحول إلى مجال الفيزياء التجريبية experimental physics. وقد أبدى پلوكر اهتماما كبيرا بتجارب فاراداي على التصريف الكهربي.[1]

**الشكل 55:**

**يوليوس پلوكر Julius Plücker**

في 1850، قرر هاينرش چايسلر، صانع الا

حيث افتتح ورشته الخاصة لصنع الأدوات، واشتغل بوظيفة "ميكانيكي" في جامعة بون. لم يكن چايسلر مجرد صانع أدوات ماهر فحسب، بل ومخترعا ذكيا. ومع أنه لم يتلقى تعليما رسميا في العلوم، إلا أنه كان باحثا علميا بالهواية.

(1) كان بلوكر من أشد المعجبين بفاراداي. وقد توفي بعد سنة واحدة من وفاة فاراداي.

**الشكل 56:**

**هاينريش چايسلر Heinrich Geißler**

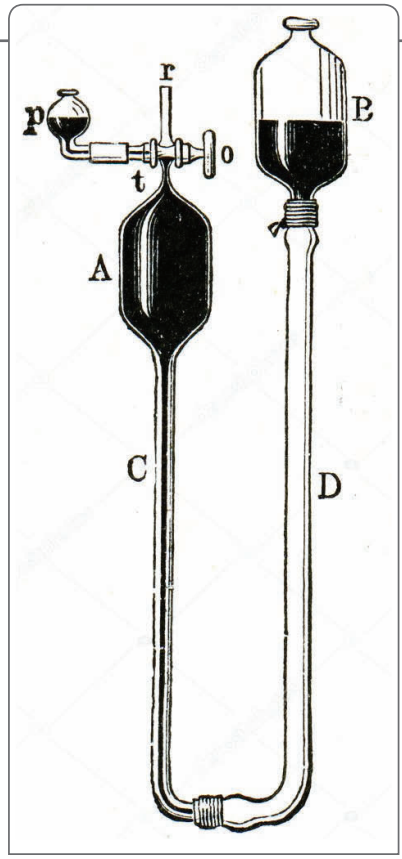
نشأت علاقة عمل متكاملة بين الاثنين: پلوكر بمعلوماته العلمية وخبرته الأكاديمية، وچايسلر باختراعاته العملية ومهاراته التجريبية.[1]

كان چايسلر قد اخترع مضخة تفريغ تعمل بالزئبق (الشكل 57)، وكانت أقوى من مضخات التفريغ المعتادة في ذلك الوقت (مضخات الهواء). وكان صديقه "هاينرش رومكورف Heinrich Rühmkorff" (1803 – 1870) يبيع جهازا، يسمى ملف الحث *induction coil*، يستطيع أن ينتج جهداً كهربياً عالياً جداً (الشكل 58). باستخدام مضخة الزئبق، ملف الحث، وأنابيب التصريف *discharge tubes* الزجاجية (الشكل 59)، وفر چايسلر لزميله پلوكر أفضل الأجهزة اللازمة لدراسة التصريف الكهربي في الغازات المخلخلة.

(1) كتب "جوهان هيتورف Johann Hittorf"، تلميذ پلوكر، "لم يحرز پلوكر البراعة اليدوية كمجرب. ومع ذلك، كان لديه دائما إدراك واضح لما هو مطلوب، وأمتلك مقدرة عالية على جعل الآخرين يتبنون أفكاره ويعملون بحماس على تنفيذها."

الشكل 57:

مضخة چايسلر الزنبقية




الشكل 58:

ملـف الحـــث

**الشكل 59:**
**أنبوب التصريف الكهربي**

بعد عام من العمل المشترك مع چايسلر، نشر پلوكر منفرداً في 1858 ورقة علمية بعنوان "حول تأثير المغناطيس على التصريف الكهربي في الغازات المخلخلة". لاحظ پلوكر انبعاث وهج ملون (أخضر مصفر) من طرف الكاثود عند تضاؤل ضغط الغاز داخل الأنبوب، كما وجد أنه يمكن تغيير مواضع التوهج بتحريك قطعة من المغناطيس بالقرب من الوهج المتولد. وبناء على ذلك، استنتج أن هذا الوهج—كيفما كان مصدره—لابد وأن يكون مشحونا كهربيا.

كان "ويلهلم هيتورف Wilhelm Hittorf" تلميذ پلوكر ومعاونه أثناء عمل الأخير مع چايسلر. اشتغل هيتورف بعد تخرجه فيزيائيا في "أكاديمية مونستر Akademie Monüster". كان هيتورف يضطر أن يصنع الكثير مما يحتاجه من أدوات بنفسه، بسبب عدم توفرها وضعف التمويل في الأكاديمية. وقد اكتشف وجود عيب في تصميم أنابيب چايسلر: كان يَحدث تسريب لبخار الماء من مضخة الزئبق إلى داخل أنبوب التصريف. أصلح هيتورف هذه المشكلة، واستخدم الجهاز المعدل في أبحاثه حول التصريف الكهربي التالية. وقد حصل بسبب هذا التطوير في 1869 على نتائج مدهشة: لقد بدا وكأن هناك ضوء يأتي من القطب السالب

(الكاثود)،[1] وأن هذا الضوء يخبط الطرف المقابل من الأنبوب الزجاجي مسببا توهجه (بالأخضر أو الأزرق وفقا لنوع الزجاج المستخدم). وقد أثبت ذلك بصنع أنبوب تصريف على شكل الحرف اللاتيني "L" ليجد أن التوهج قد ظل في الموضع المقابل مباشرة للقطب السالب. كما لاحظ تكون ظل محدد في الموضع ذاته لأي شيء يوضع أمام القطب السالب في طريق هذه الأشعة. ولأنها تسبب وميض الزجاج التي تسقط عليه، افترض هيتورف أنها نوع آخر من الأشعة فوق البنفسجية.

كان هيتورف شخصاً خجولاً، ولم يكن متكلماً جيداً. لذلك، لم يَعرِف كثيرون عن أبحاثه.

لنعد ثانية إلى بريطانيا، حيث تمكن "ويليام كروكس William Crookes" (1832 – 1919؛ الشكل 60) في سبعينات ذلك القرن من خفض الضغط داخل الأنابيب الزجاجية حتى $10^{-8} \times 10^{-6}$-5 ضغط جوي (ض ج)،[2] مستخدما مضخة التفريغ المحسنة التي طورها له مساعده "تشارلز جِمنهام Charles Gimmingham". عند تعريض هذه الأنابيب لجهد كهربي عال، حصل كروكس على نتائج مشابهة لما حصل عليها هيتورف. كما لاحظ تكون منطقة مظلمة في الهواء المتوهج بالقرب من الكاثود عند شفط المزيد من هواء الأنبوب. مع زيادة التفريغ، امتدت هذه المنطقة (وتعرف الآن باسم *فراغ فاراداي المعتم Faraday dark space*) عبر الأنبوب، بينما توهج الجدار الزجاجي المواجه للكاثود بلون أخضر ساطع.

(1) كان مايكل فاراداي هو من استحدث المصطلحين الكاثود (القطب السالب) والأنود (القطب الموجب). «كاثود» تعني من حيث تأتي الكهرباء؛ «أنود» إلى حيث تذهب.

(2) لم يكن التفريغ في أنابيب چايسلر كبيرا (نحو $10^{-3}$ ض ج).

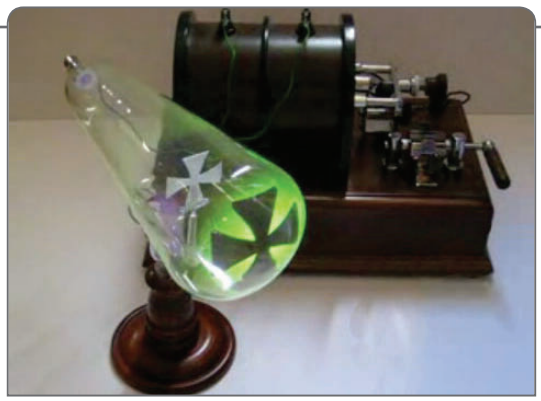
**الشكل 60:**

**ويليام كروكس William Crookes**

عدل كروكس من شكل الأنبوب ليصبح مخروطيا، ونقل القطب الموجب (الأنود) إلى جانب الأنبوب. كما وضع أمام الكاثود شريحة معدنية على شكل "صليب مالطا Maltese Cross"، ليحصل عند "كهربة" الأنبوب على صورة صليب أسود وسط دائرة من اللون الأخضر الساطع (الشكل 61).

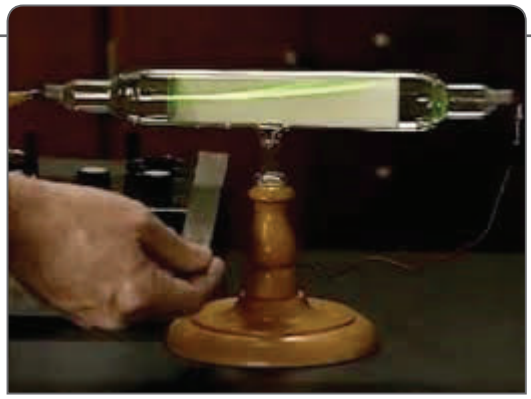
**الشكل 61:**

**أنبـــوب كروكـــس**



**الشكل 62:**

**تأثير المغناطيس على التصريف الكهربي**



بعكس هيتورف، كان كروكس متحدثا مفوها، وكان له وجهة نظر مختلفة حول ما كان يحدث داخل الأنبوب: كان يعتقد أن هذه الأشعة هي حزم من الجسيمات المشحونة التي تستطيع أن تجعل الأشياء تومض. وكما لاحظ پلوكر مع أنابيب چايسلر، كان يمكن تحريك موضع الأشعة في أنابيب كروكس بواسطة المغناطيس (الشكل 62). وكان معروفاً أن المغناطيس يستطيع تحريك الأسلاك الحاملة للتيار الكهربي، لكنه لا يحرك حزم الضوء.

**الشكل 63:**

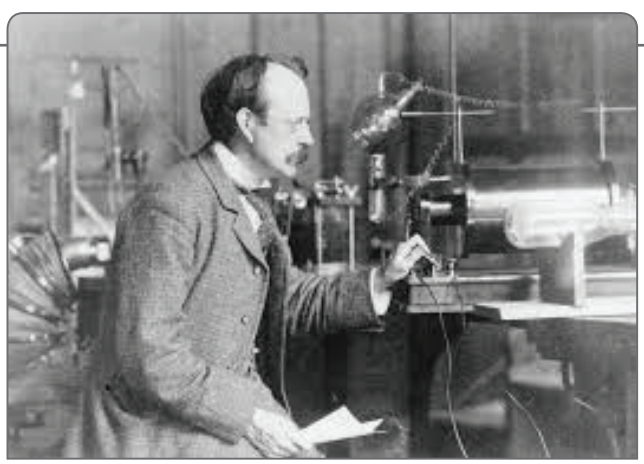
**أنبوب التصريف ذو العجلة**

لإثبات وجهة نظره، وضع كروكس في داخل أحد الأنابيب عجلة صغيرة محمولة بين قضيبين متوازيين، ليجد أنها تتحرك مبتعدة عن الكاثود عند كهربة الأنبوب (الشكل 63). أرجع كروكس هذه الحركة إلى ضغط جزيئات المادة المشحونة (سيتضح بعد ذلك أنها لم تكن جزيئات، بل جسيمات أصغر من الذرة).

في 1897، يبرهن "جيه ثومسون J. Thomson" (1856 – 1940؛ الشكل 64)، أستاذ الفيزياء في جامعة كامبردج، أن أشعة الكاثود عبارة عن حزم من جسيمات مشحونة بشحنة سالبة، وأن كتلة الجسيم منها أصغر بنحو 1800 مرة من كتلة ذرة الهيدروجين (أخف العناصر)، ويَطلق على هذه الجسيمات اسم *الإلكترونات electrons*.[1]

**الشكل 64:**

**جيه ثومسون J. Thomson في معمله**



(1) يحصل ثومسون في 1906 على جائزة نوبل في الفيزياء تقديراً له على أبحاثه على التوصيل الكهربي بواسطة الغازات.

## توحيد المفاهيم

لم تكتمل الصورة العلمية الكلاسيكية عن الضوء إلا في العام 1864، عندما توقع الفيزيائي الأسكتلندي "جيمس ماكسويل James Maxwell" (1831 - 1879؛ الشكل 65)[1] بصورة نظرية تماما أن الضوء عبارة عن موجات كهربية ومغناطيسية متصاحبة. هنا، لدينا ثلاثة خيارات:

- **الأول، أن نكتفي بالجملة السابقة؛**
- **الثاني، أن ندرس التحليل الرياضي الذي قام به ماكسويل**، وهذا غير واقعي لأنه يتطلب معرفة متقدمة بالرياضيات العليا، خاصة المتعلقة بتحليل/تفاضل المتجهات vector analysis/calculus؛
- **الثالث، وهو الحل الوسط الذي اخترناه**، أن نحاول فهم المغزى العام لما قام به ماكسويل دون الخوض في أعماق بحر الرياضيات.

**الشكل 65:**

**جيمس ماكسويل James Maxwell**

(1) مات جيمس ماكسويل مريضاً بالسرطان عن عمر لا يتعدى الـ 48 عاماً.

كان ماكسويل، الأستاذ بـ "كلية الملك King's College"، عبقرياً في الفيزياء والرياضيات في آن معاً، ومهتما بدراسة العلاقة بين الكهرباء والمغناطيسية. قام ماكسويل بتلخيص كل المعرفة المتوفرة عن الظاهرتين في مجموعة من المعادلات الرياضية "الرشيقة" (الشكل 66).[1]

**الشكل 66:**
**معادلات ماكسويل الأربعة**

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

البند الذي أضافه ماكسويل

**فيما يلي المعنى العام لمعادلات ماكسويل الأربعة الشهيرة:**

1. تتبع خطوط المجال الكهربي من على الشحنات الموجبة وتنتهي على الشحنات السالبة. يقصد بالمجال الكهربي عند نقطة ما *القوة force* المؤثرة على *شحنة اختبار test charge* (شحنة موجبة صغيرة جداً) موجودة عند هذه النقطة ومحسوبة للوحدة الواحدة من هذه الشحنة. ترتبط شدة هذه القوة مع المقدار الثابت "$\varepsilon_0$".

2. خطوط المجال المغناطيسي مستمرة، ليس لها بداية أو نهاية؛ فلا وجود لقطب مغناطيسي منفرد. ترتبط شدة القوة المغناطيسية مع المقدار الثابت "$\mu_0$".

(1) هذه المعادلات هي في الحقيقة "إصدار مطور" من النسخة الأصلية.

3. يتسبب المجال المغناطيسي المتغير (المغناطيس المتحرك، على سبيل المثال) في *قوة محركة كهربية* (*emf*) *electromotive force*، ومن ثم مجال كهربي. وهذه هي فكرة المولد الكهربي التي اكتشفها فارادي كما عرفنا سابقاً.

4. يتولد المجال المغناطيسي من الشحنة المتحركة (قانون أمبير) أو من المجال الكهربي المتغير (فكرة ماكسويل).

تتجلى عبقرية ماكسويل بصفة خاصة في فكرته التالية: إذا كانت الكهرباء والمغناطيسية وجهان لعملة واحدة فإن تغير المجال الكهربي لابد وأن ينتج عنه مجال مغناطيسي. وعليه، اضاف ماكسويل بندا بهذا المعنى على قانون أمبير السابق ذكره (المعادلة الرابعة). بعد أن قام ماكسويل بإجراء بعض "المناورات" والحسابات على معادلاته العتيدة، ظهرت له نتيجة مثيرة: أن "الشبح الكهرباء-مغناطيسي" الذي افترضه سينتشر في الفراغ، حتى مع غياب التيار الكهربي ($J=0$ في المعادلة الأخيرة)، على شكل *موجات كهرومغناطيسية* *electromagnetic waves* (تموجات من المجالين المغناطيسي والكهربي) بسرعة تعادل 300 مليون متر في الثانية الواحدة – سرعة الضوء!

لم يأتي الدليل التجريبي على حقيقة تنبؤات ماكسويل إلا بعد 22 عاماً. حدث ذلك عندما اكتشف الفيزيائي الألماني الشاب "هاينرش هيرتس Heinrich Hertz" (1857 – 1894؛ الشكل 67) في 1886 طريقة لصنع الموجات الكهرباء-مغناطيسية.

## صـدق النبـوءة

في 1878، يلتحق شاب اسمه "هاينرش هيرتس Heinrich Hertz" بجامعة برلين لدراسة الفيزياء. ولحسن حظه، يعمل تحت إشراف الأستاذ "هيرمن فون هلمهولتس Hermann von Helmholtz"، أشهر العلماء الألمان (البروسيين) في ذلك الوقت. في 1879، يشجعه أستاذه على محاولة الحصول على الجائزة التي خصصتها أكاديمية العلوم ببرلين للشخص الذي يستطيع أن يثبت نظرية ماكسويل عن الموجات الكهرباء-مغناطيسية. يضع هيرتس هذا الموضوع في ذهنه، لكنه يقرر تأجيل البحث فيه والتركيز على الأبحاث التي كان يجريها للحصول على درجة الدكتوراة من الجامعة نفسها.

في 1880، ينال هاينرش درجة الدكتوراة (بعد وقت قياسي)، ويعمل مساعدا لأستاذه. في 1883، ينتقل الدكتور هيرتس إلى جامعة كيل ليعمل محاضرا في الفيزياء الرياضية، ويبدأ في دراسة نظريات الكهرباء-مغناطيسية بتعمق.

في 1885، يصبح هيرتس أستاذا للفيزياء في "بوليتيكنيك كارلزرُويه Karlsruhe Polytechnic"، ويركز أبحاثه هناك على محاولة اثبات وجود الموجات الكهرباء-مغناطيسية تجريبيا. بعد عام واحد، ينجح البروفسور هيرتس في صنع موجات كهرومغناطيسية في معمله (الشكل 68). بعد ذلك، يتمكن من قياس طول تلك الموجات وسرعة انتشارها، ليجد أنها تتصرف تماما مثل الضوء المرئي والحرارة. لفترة من الوقت، كانت تلك الموجات تعرف باسم *الموجات الهيرتسية Hertzian waves* على اسم مخترعها. أما اليوم، فتعرف باسم *موجات الراديو radio waves*.

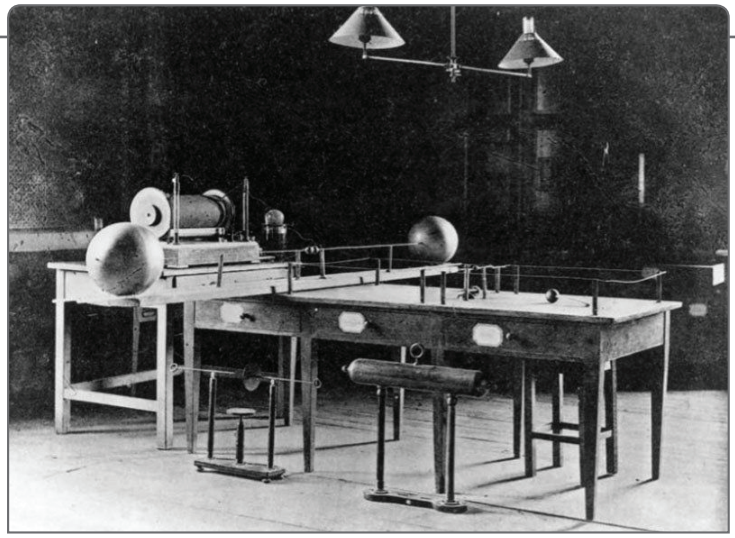
**الشكل 67:**

**هاينرش هيرتس Heinrich Hertz**

الغريب أن هيرتس لم يتوقع الأهمية العملية الهائلة لاكتشافه؛ في 1890، كتب ما يلي: "لا أتوقع أن يكون للموجات اللاسلكية التي اكتشفتها أي تطبيق عملي." مات هيرتس مريضا بعد سبع سنوات من اكتشافه، عن عمر لم يناهز 36 عاماً، ولم يرى أيا من التطبيقات الرائعة لموجاته الطويلة الخفية.

**الشكل 68:**

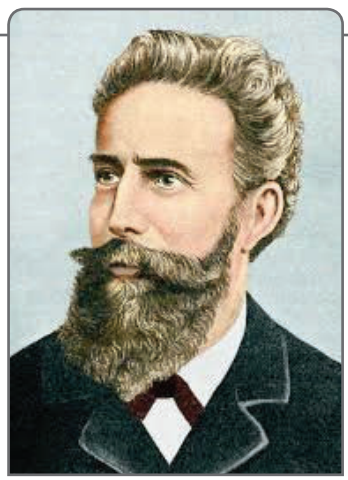
**جهاز هيرتس لبث واستقبال موجات الراديو**



## الأشعة البدون

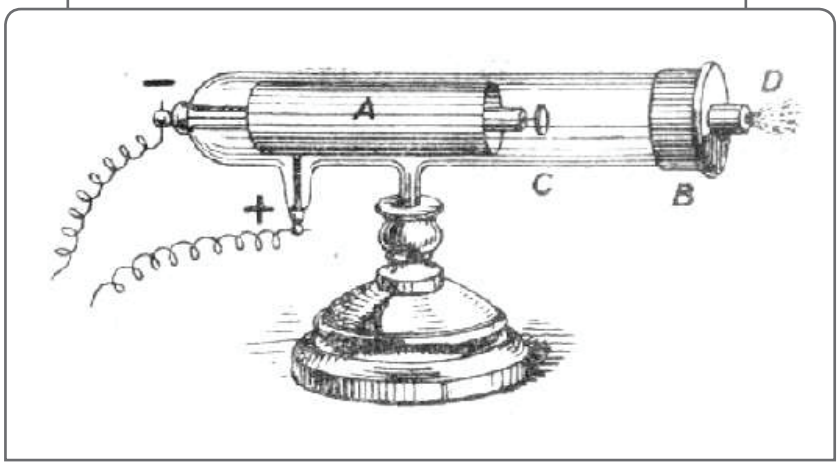
كان "ويلهلم رونتچن Wilhelm Röntgen" (1845 – 1923؛ الشكل 69) مهتما بالأبحاث على أشعة الكاثود، خاصة تلك الخاصة بصديقه هاينرش هيرتس ومساعد هيرتس "فيليپ لنارد Philipp Lenard".

**الشكل 69:**
**ويلهلم رونتچن Wilhelm Röntgen**



كان هيرتس قد اكتشف في 1892 أن أشعة الكاثود تستطيع اختراق شريحة رقيقة من االفلزات. وبعد ذلك ذلك بسنتين، صنع مساعده فيليپ لنارد أنبوب تصريف ذي نافذة من الألومنيوم تسمح لأشعة الكاثود بالنفاذ من الأنبوب عبر هذه النافذة (الشكل 70). وقد أوضح لنارد ذلك بالتجربة التالية: (1) غطى الأنبوب كله، فيما عدا نافذته الألومنيوم، بورق أسود سميك؛ (2) وضع لوحا فوسفوريا خارج الأنبوب أمام نافذته الألومنيوم؛ (3) أظلم الغرفة؛ ثم (4) قام بتشغيل الأنبوب على جهد عال، ليجد أن اللوح الفوسفوري قد توهج بالأخضر الساطع.

**الشكل 70 :**
**أنبـــوب فيليـب لنـارد**




أوضح لنارد أن أشعة الكاثود الخارجة من الأنبوب تضعف سريعا وتتوقف بعد بضعة سنتيمترات من نافذة الأنبوب المعدنية.[1]

في 8 نوفمبر 1895، كان رونتچن يجري في معمله المتواضع بعض التجارب على أشعة الكاثود مستخدما أنبوب لنارد السابق وصفه. كان يريد أن يختبر تأثير أشعة الكاثود على نوع جديد من الألواح الفوسفورية (مغطاة بمادة *سيانيد الباريوم البلاتيني barium platino cyanide*).

عندما قام رونتچن بتشغيل الأنبوب كما في تجربة لنارد السابقة، لاحظ بطرف عينه توهجا على لوح فوسفوري كان موضوعا على طاولة في ناحية بعيدة من المعمل. وحيث أن الأنبوب كان محجوبا بالورق الأسود السميك، أدرك رونتچن أن هذا الوميض لم يكن بسبب أشعة الكاثود. كرر رونتچن التجربة عدة مرات، وحصل

(1) حصل فيليب لنارد على جائزة نوبل في الفيزياء لسنة 1905 على أبحاثه حول أشعة الكاثود واكتشافه الكثير من خصائصها. كان لنارد نازيا متحمسا؛ وقد ندد علنا بالعلم "اليهودي"، ومنه النظرية النسبية لألبرت أينشتاين.

على النتيجة نفسها. تأكد حينها أنه قد اكتشف نوعا جديدا من الأشعة الخفية. لم يسعفه خياله باسم مناسب لهذه الأشعة، فأشار إليها بالحرف اللاتيني "أكس X"، والذي يستخدم في الرياضيات للدلالة على مقدار مجهول.[1]

في سرية كاملة، أمضى رونتچن عدة أسابيع يجري التجارب في معمله على هذه الأشعة. وقد اكتشف أن أشعة أكس *x-rays* (أو الأشعة السينية، كما تترجم إلى العربية) تستطيع أن تنفذ من أشياء كثيرة، وأن هذه القدرة تتوقف أساسا على كثافة المواد التي تتكون منها هذه الأشياء. وذات مرة، أراد رونتچن أن يختبر قدرة أشعة أكس على اختراق مادة الرصاص، فأمسك بقرص صغير منه ووضعه بين مصدر للأشعة ولوح فوسفوري، ليتفاجأ بصورة من الظلال القاتمة للقرص ولعظام يده وسط ظلال أفتح لأنسجة يده الطرية.[2]

نشر رونتچن اكتشافه في 8 ديسمبر 1895 تحت عنوان "حول نوع جديد من الأشعة". وبعد ثمانية أيام من الصمت، أصبح الجميع يتحدثون عن اكتشافه الخطير.

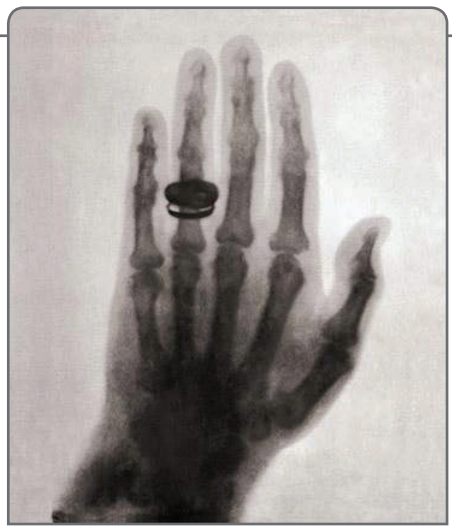
كان رونتچن هاويا للتصوير الفوتوغرافي، فوثق كل اكتشافاته بالصور. كما وجد أن أشعة أكس الخفية تُسَوّد الألواح الفوتوغرافية، كما يفعل الضوء المرئي والأشعة فوق البنفسجية. أراد رونتچن أن يُري زوجته "برتا Bertha" ما كان يشغله عنها في تلك الفترة، فاصطحبها ذات مساء إلى معمله، وهناك أخذ ليدها صورة فوتوغرافية بأشعة أكس. وقد اشتهرت هذه الصورة في جميع أرجاء العالم منذ ذلك الحين (الشكل 71).[3]

(1) كان رونتچن عالما زاهدا؛ لم يسمي الأشعة التي اكتشفها على اسمه، كما سيفعل بعده هنري بيكريل عندما يكتشف أشعة اليورانيوم. مع ذلك، يشار إلى أشعة أكس في النرويج وبعض الدول باسم إشعاع رونتچن Röntegen radiation.

(2) كان "ويليام چودسبيد William Goodspeed" هو أول من أنتج صورة بالأشعة في 1890، لكن عمله لم يعترف به إلا بعد اكتشاف رونتچن للأشعة السينية بعد خمس سنوات.

(3) يقال إن زوجته فزعت عندما رأت الصورة وقالت، "لقد رأيت موتي."

**الشكل 71:**
**أول صورة بأشعة أكس ليد زوجة رونتچن**



- **من أين تأتي أشعة أكس، وما تكوينها؟**

لوحظت أشعة أكس أول مرة من على جانب الأنبوب، ولكن وجد أنها تكون أقوى أمام مقدمة الأنبوب. وقد لاحظ رونتجن أنه بحرف مسار أشعة الكاثود داخل الأنبوب بواسطة المغناطيس، تتغير النقطة التي تنبعث منها أشعة أكس بحيث تكون دائما نقطة تلاقي أشعة الكاثود بجدار الأنبوب. وعليه، استنتج رونتچن بشكل صحيح أن هذه الأشعة تتشكل من اصطدام أشعة الكاثود بمادة صلبة. كما وجد أنها لا تزاح بالمغناطيس، مثلها مثل الأشعة فوق البنفسجية والضوء المرئي. لذلك استنتج أن أشعة أكس هي نوع من الموجات الكهرباء-مغناطيسية، وليست جسيمات مشحونة كما هو الحال في أشعة الكاثود.

يحصل رونتجن على جائزة نوبل في الفيزياء في 1901 تقديرا له على اكتشاف أشعة أكس.[1] وقد لاحظ مقدم الكلمات في حفل توزيع الجوائز "أن كنة هذه الأشعة مازالت غير معروفة." ومع أنه كان فقيرا، تبرع رونتجن بأموال جائزته للأعمال

(1) كانت أولى جوائز نوبل التي تمنح في الفيزياء.

الخيرية، كما رفض أن يسجل براءة اختراع لاكتشافه. يموت هذا العالم الزاهد بعد الحرب العالمية الأولى في فقر مدقع![1]

## المواد المشعة ذاتيا

**سننتقل الآن إلى العاصمة الفرنسية، باريس، في نهاية القرن 19.**

في 20 يناير 1896، يحضر "هنري" الأنيق محاضرة عن اكتشاف أشعة أكس الشهير في أكاديمية العلوم الفرنسية.[2] لم يكن "هنري بيكريل Henri Becquerel" (1852–1908؛ الشكل 72) يولي المحاضرة سوى اهتمام ضئيل حتى أتى المتحدث على ذِكْرِ *مقياس الفسفرة phosphoroscope*–الجهاز الذي اخترعه والد هنري في 1857. كما ذكر المحاضر وجود ارتباط ما بين انبعاث أشعة أكس وظهور نوع من *الفسفرة phosphorescence* على الجدار الزجاجي لأنبوب التصريف الكهربي.[3] حينئذ، قرر بيكريل أن يدرس أشعة أكس.

شغل كل من جد ووالد هنري منصب مدير متحف التاريخ الطبيعي في باريس. وقد خدم هنري في معمل المتحف المجهز جيداً (أولاً كمساعد لوالده ثم خلف له بعد وفاته في 1891). وفي غضون شهر واحد، كان قد أعاد تجارب رونتچن، وحصل على أشكال الظل نفسها. أراد هنري بعد ذلك أن يختبر ما إذا كانت المواد الفسفورية يمكن أن تعطي أشعة أكس دون الحاجة إلى أنبوب التصريف.[4]

(1) يستلم رونتچن في 1902 دعوة من معهد كارنيچي في واشنطن العاصمة لإجراء الأبحاث بمعامله، لكنه يرفض الدعوة.

(2) حصل بيكريل على عضوية هذه الأكاديمية المرموقة في 1989.

(3) كان رونتجن قد ذكر أن أشعة إكس تبث من أنابيب أشعة الكاثود عند البقعة التي تومض نتيجة لاصطدام أشعة الكاثود مع جدار الأنبوب الزجاجي.

(4) المواد الفوسفورية هي نوع من المواد الضواءة، التي تومض ذاتيا بعد تعرضها للأشعة فوق البنفسجية دون الحاجة لتسخينها إلى درجة حرارة عالية.

**الشكل 72:**

**هنري بيكريل Henri Becquerel**

كان معمل المتحف مجهزاً جيداً بعينات من مختلف المواد. بدأ بيكريل باختبار أحد أملاح اليورانيوم الفوسفورية (مركب كبريتات يورانيل البوتاسيوم potassium uranyl sulfate، الشكل 73).[1]

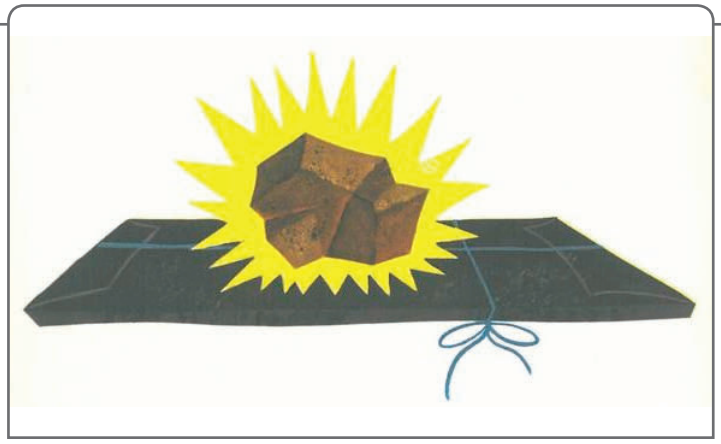
**الشكل 73:**

**كبريتات يورانيل البوتاسيوم (الملح الخام)**

(1) كان بيكريل يعرف أن أملاح اليورانيوم، مثل كبريتات البوتاسيوم اليورانية، تومض بعد تعرضها فترة كافية للأشعة فوق البنفسجية في ضوء الشمس.

تراءى لبيكريل أنه إذا كانت أشعة أكس تصدر من الوميض الضعيف المتكون في نهاية أنبوب اشعة الكاثود فلربما أستطاع أن ينتج مقدارا أكبر من هذه الأشعة بواسطة *المواد الضواءة luminescent*. ولاختبار هذه الفرضية، وضع بيكريل قطعة من خام هذا الملح فوق لوح فوتوغرافي ملفوف بإحكام في ورق أسود، ثم عَرَّضَّها عدة ساعات لضوء الشمس (الشكل 74).[1] وعندما قام بإظهار (تحميض) اللوح الفوتوغرافي، اتضحت عليه صورة ظلية ("عفريتة" في العامية المصرية) لقطعة الملح. فرح هنري بهذه النتيجة معتقدا أنها تبرهن على أن نظريته كانت صائبة. وخلال اجتماع أكاديمية العلوم في 24 فبراير 1896، أفصح بيكريل عن نتائج تجاربه الأولية.

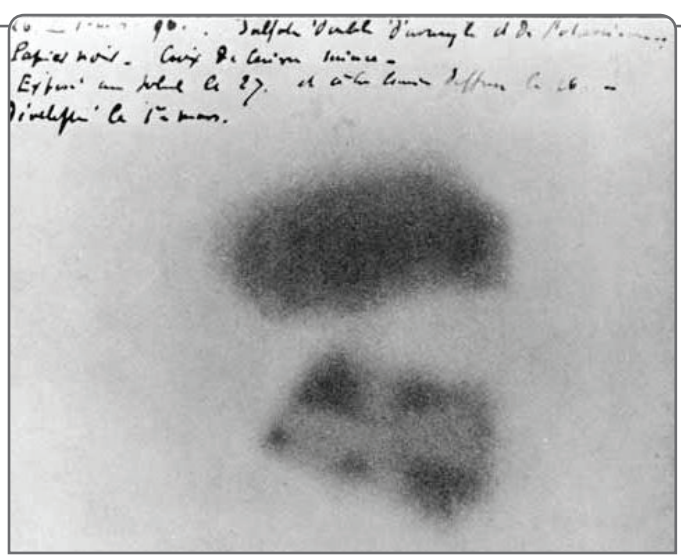
**الشكل 74:**
**تجربة بيكريل على كبريتات يورانيل البوتاسيوم**



(1) يتكون اللوح الفوتوغرافي من لوح زجاجي مفرودا عليه معلق جيلاتيني جاف من بروميد الفضة *silver bromide*، الذي يَسوَدّ عند تعرضه لضوء الشمس. وقد ابتكره "ريتشارد مادوكس Richard Maddox" في 1871. تحفظ الألواح غير المستخدمة عن طريق لفها في ورق اسود سميك يحجب عنها الضوء.

في 26 فبراير 1896، قرر هنري أن يكرر تجربته السابقة، واضعا هذه المرة فيما بين اللوح الفوتوغرافي المحجوب والملح الفوسفوري صليب نحاسي صغير. افترض بيكريل أن ظهور صورة الصليب على اللوح الفوتوغرافي المظهر ستبرهن على أن المواد الضواءة قادرة على بث أشعة أكس عند تعرضها لضوء الشمس. لحسن حظه، كان الطقس في ذلك الوقت سيئا، واستمرت السماء تمطر وغطتها الغيوم لعدة أيام أخر. قرر هنري إلغاء التجربة، وخزن اللوح الفوتوغرافي بما عليه في أحد الأدراج المظلمة. بعد حين، ومن باب الفضول، قرر بيكريل أن يُظهر اللوح الفوتوغرافي، متوقعا أن تكون الصورة المتكونة جد باهتة (لأن أملاح اليورانيوم لم تتعرض بشكل كاف لضوء الشمس). كانت المفاجأة أن ظهرت للصليب صورة ظلية واضحة (الشكل 75).

**الشكل 75:**
**صورة الصليب المتكونة من تأثير "أشعة بيكريل"**



بحكم معرفته القوية بالمواد الضواءة،[1] أدرك هنري أنه لا يمكن إرجاع الصورة المتكونة إلى الفسفرة لأنها بعد تعرضها للضوء بـ 1/100 جزء من الثانية تصبح ضعيفة جدا بحيث لا يمكن ملاحظة أثرها. وبعد مجموعة من التجارب الإضافية، أيقن بيكريل أنه قد اكتشف نوعا أخرا من الأشعة يخرج من معدن اليورانيوم وأملاحه،[2] وسماها على اسمه: "أشعة بيكريل Becquerel rays".[3]

أخبر بيكريل الأكاديمية عن اكتشافه، وقام بنشر ست مقالات عن أشعته في السنة التالية. تخلى بعد ذلك عن دراسة هذه الأشعة ظنا منه أن قد اعتصر كل ما يمكن استخلاصه من هذه الموضوع.[4] على كل حال، لم يكن بيكريل يستطيع أن يتقدم كثيرا في هذا المجال اعتمادا على الألواح الفوتوغرافية.

لم تحدث أشعة بيكريل عند اكتشافها الأثر الكبير الذي أحدثته أشعة أكس، ولم يرى سوى قلة من العلماء جدوى في متابعة دراسة هذه الأشعة. على كل حال، سرعان ما اكتشف أولئك العلماء استحالة قياس هذه الأشعة بالطرق المتوفرة.

(1) حصل بيكريل على درجة الدكتوراة من جامعة باريس في 1888، وكانت رسالة الدكتوراة خاصته "حول تأثير *الاستقطاب polarization* على *الاستضاءة luminescence*".

(2) على سبيل المثال، وجد بيكريل أن أشعة اليورانيوم تنحني بواسطة المغناطيس بينما أشعة إكس لا تفعل.

(3) من المفارقات التي ربما لا تكون من قبيل الصدفة أن العلماء عادة ما يشيرون إلى أشعة إكس باسم أشعة رونتچن، وإلى اشعة بيكريل باسم إشعاع اليورانيوم.

(4) بحلول 1898، تحول اهتمام بيكريل إلى دراسة تأثير زيمان *Zeeman effect* (الذي اكتشفه الفيزيائي الهولندي "بيتر زيمان Pieter Zeeman" في 1896).

# اكتشاف المواد المشعة

## وقصة امرأة حديدية

وُلِدَت "مانيا سكلادوفسكا Manya Skłodowska" (1876 – 1934؛ الشكل 76) في وارسو البولندية، الخاضعة حينئذ لسيطرة الإمبراطورية الروسية. كان حكم بولندا منذ هزيمة نابليون النهائية في 1814 مقسماً بين ثلاث ممالك أوربية: روسيا، بروسيا، والنمسا. وبعد "مؤتمر ڤيينا Congress of Vienna" (نوفمبر1814– يونيو 1815)، أصبح القيصر الروسي يلقب كذلك بـ "ملك بولندا".

في 1891، تنتقل مانيا إلى باريس لتدرس بجامعتها المرموقة، وتغير اسمها إلى "ماري Marie" – المقابل الفرنسي لاسمها البولندي.[1]

في يوليو 1895، تتزوج ماري من زميلها، الفيزيائي "بيير كوري Pierre Curie" (1859 – 1906)، في زواج يبدو أنه كان عمليا. كان بيير يكبرها بثمانية سنوات، وكان ذو سمعة عالمية.

في 1897، تبدأ مدام كوري أبحاثها لنيل درجة الدكتوراة من جامعة السوربون حول الأشعة التي اكتشفها قبل أشهر معدودات أستاذها المشرف/المرشد: أشعة بيكريل.[2] كانت ماري مأخوذة بأشعة أكس، مثل العلماء الآخرين. لكن بيير يقترح عليها أن تدرس أشعة بيكريل، التي أُهملت في معمعة الانبهار بأشعة رونتچن العجيبة،[3] وهي نصيحة سيثبت سريعا أنها كانت عالية القيمة.

(1) كما يفعل حاليا بعض المهاجرين العرب في أمريكا الشمالية وأوروبا "الجديدة".

(2) يشار في الإنكليزية إلى الأستاذ المشرف على رسائل طلبة الدراسات العليا البحثية باسم "المرشد advisor"، وهي في رأيي تسمية أنسب من "المشرف supervisor" لأنها توحي بتمتع الطلاب-الخريجين (طلاب الدراسات العليا) بقدر أعلى من الاستقلالية.

(3) لم يكن قد مضى على زواج ماري بپيير أربعة أشهر عندما أعلن رونتچن عن اكتشافه.

**الشكل 76:**

**ماري كوري Pierre Curie**

بدأت ماري أبحاثها من حيث انتهى مرشدها؛ أرادت أن تعرف هل هناك مواد أخرى، غير مركبات اليورانيوم، لها القدرة على بث أشعة بيكريل. اللافت أن ماري لم تكن تتوقع أن تكون هذه القدرة، والتي أسمتها بـ*النشاط الإشعاعي radio-activity*، حكرا على نوع من المواد دون غيرها. فقد كتبت في رسالتها للدكتوراة "قمت بإجراء التجارب لاكتشاف ما إذا كانت هناك مواد مشعة غير مركبات اليورانيوم والثوريوم thorium.[1] لقد قمت بهذا البحث وفكرتي هي أنه من غير المحتمل أن يكون النشاط الإشعاعي خاص بنوع معين من المادة دون سائر الأنواع الأخرى." وقد قامت بصبر

(1) بعد أيام قليلة من دراستها لإشعاع اليورانيوم، اكتشفت ماري أن الثوريوم يعطي نفس الأشعة كاليورانيوم، وأطلقت على هذه الظاهرة اسم النشاط الإشعاعي. اكتشف الثوريوم في 1829 نرويجيا هاويا لدراسة المعادن اسمه «مورتن أسمارك Morten Esmark"، وحدد «هويته الكيميائية» الكيميائي السويدي «جون بارسيليس Jöns Berzelius". وقد اسماه على اسم "ثور" (Error! Reference source not found.)، إله الرعد عند الشماليين Norse (الوصف الذي كان يستخدمه الساكسون Saxons، أسلاف الإنكليز، للإشارة إلى أسلاف السويديين والنرويجيين الذين كانوا يشنون هجمات وغزوات بحرية على الساكسون في أواخر القرن التاسع الميلادي، والمشهورين حاليا باسم "الفايكنج Vikings").

وإصرار عجيب بفحص مجموعة كبيرة ومتنوعة من المواد: فلزات metals، أملاح salts، أكاسيد oxides، ومعادن خام minerals.

لم تكن الألواح الفوتوغرافية مناسبة لهذه المهمة الصعبة. كان على ماري أن تجد وسيلة أكثر دقة لكشف النشاط الإشعاعي وقياسه في المواد التي تفحصها، وهنا تظهر همة زوجها بيير جاهزة.

في الوقت الذي بدأت فيه ماري تجاربها، كان جيه جيه ثومسون قد اكتشف أن أشعة الكاثود تتكون من جسيمات "تحت ذرية subatomic" (أصغر من الذرة) مشحونة، سماها الإلكترونات electrons، وكان بيكريل قد بين بعد فترة قصيرة من اكتشافه أن أشعة اليورانيوم تجعل الأشياء المكهربة تفقد شحنتها.[1]

كان بيير وأخيه "جاك Jacques" قد اخترعا قبل 15 عاما جهازا لقياس التيارات الكهربية الضعيفة (مقياس الكهرباء electroscope). بدأت ماري تحدد شدة الإشعاع في المواد المختبرة عن طريق قياس قدرة هذه المواد على إحداث التوصيل الكهربي في الهواء، وكانت تقيس الأخيرة بالجهاز الذي ابتكره زوجها. في البداية، لم تكن النتائج التي تحصل عليها أفضل من نتائج من سبقوها. كانت المشكلة، كما سيتضح فيما بعد، أن التيارات الكهربية التي تنشأ نتيجة تأثير أشعة بيكريل هي جد ضعيفة (في حدود الواحد على بليون أمبير). أمضى بيير 15 يوما يعدل في مقياس الكهرباء، وينجح في تصميم جهاز يناسب احتياجات زوجته البحثية. كان استخدام هذا الجهاز صعبا ويتطلب صبرا ومهارة عالية، وهما ملكتين لم تكن ماري تفتقر إليهما. أمضت ماري عشرين يوما تتدرب على استخدام الجهاز تحت إشراف زوجها.

جلست ماري بصبر نادر تعمل يوماً بعد يوم على أجهزتها. لم تكن تترك

(1) لم تكن هوية أشعة الكاثود قد عرفت بعد عندما اكتشف بيكريل اشعة اليورانيوم. ما كان معروفا هو أنها تنبعث من الكاثود (القطب السالب) تجاه الأنود (القطب الموجب) في الطرف الآخر من أنبوب التفريغ عند تعريض القطبين لجهد كهربي عال (30 ألف فولت)، وكانت تسبب وميضا فسفوريا في الجدار الزجاجي المقابل للكاثود.

المكان إلا إذا آلمها ظهرها. كانت عملية مضجرة حتى في وصفها. وعندما سئلت ابنتها "هيلين Hélène" ما إذا كانت تستطيع القيام بهذه العملية المعقدة، أجابت كالتالي: "مستحيل! لا أحد في المعهد يمتلك خفة اليد أو التركيز الكافيين لعمل ذلك. وفي الحقيقة، لا أعرف أحدا من الأحياء يمتلك هذه الخبرة."

بعد وقت قصير من بداية بحثها، اكتشفت ماري أن الثوريوم مثل اليورانيوم قادر على بث الإشعاع ذاتيا. بعد فحص كل العناصر المعروفة في ذلك الوقت، لم تجد ماري أيا منها مشعا - غير اليورانيوم والثوريوم.

من المعروف أن مركبات العنصر الواحد عادة ما تتباين في خواصها الفيزيائية والكيميائية؛ فبينما يعطينا كلوريد الصوديوم sodium chloride ملح الطعام، يُصنع من كلورات الصوديوم sodium chlorate مطهر ومبيض حام. اكتشفت ماري أن النشاط الإشعاعي، على عكس معظم الخصائص الفيزيائية والكيميائية، لم يكن يعتمد على نوع المركب المدروس، إنما يرتبط فقط بكمية اليورانيوم أو الثوريوم الموجود. ومن ثم، استنتجت أن خاصية الإشعاع لابد وأن تكون "ذرية atomic"، أي مرتبطة بطبيعة ذرة اليورانيوم أو الثوريوم.

**الشكل 77: رسم لـ "ثور"، إله الرعد عند "الشماليين".**

حتى أواخر القرن 19، لم يكن الثوريوم سوى معدن يستخدم أكسيده لجعل عباءة (فتيلة) مصابيح الغاز أسطع (الشكل 78)، أما اليورانيوم فكان يستخدم منذ زمن الرومان في تلوين الزجاج بالأصفر.

**الشكل 78:**
**مصابيح الغـــاز القديمة**

كانت فكرة ماري التالية هي قياس النشاط الإشعاعي في البيتشبلند pitchblende، وهو أحد الخامات التي يستخرج منها اليورانيوم.[1] وقد اتضح أنها فكرة نيرة؛ فقد وجدت ماري أن نشاطه الإشعاعي كان أكبر بأربعة إلى خمسة أضعاف من النشاط المتوقع من كمية اليورانيوم الذي يحتويه! ولما كانت ماري قد قاست النشاط الإشعاعي في كل العناصر المعروفة في ذلك الوقت، فقد توقعت أن يكون سبب هذا النشاط الكبير عنصرا غير معروف من قبل موجودا في البيتشبلند.

(1) يحتوي البيتشبلند على الثوريوم أيضاً، ولكن بكميات ضئيلة.

بحلول 1898، توفر لماري وبيير أدلة مقنعة على وجود عنصرين مشعين غير معروفين من قبل. أطلقت ماري على الأول اسم *البولونيوم polonium*، إعزازا لبلدها الأم بولندا، وعلى الثاني الأشد إشعاعا اسم *الراديوم radium* (المعدن المشع). ولإثبات وجود هاتين العنصرين بشكل لا يقبل الشك، كانا في حاجة إلى أن يكون بحوزتهما كمية كافية منهما لتحديد *وزنهما الذري atomic weight*.

استطاع الزوجان الحصول على أطنان من بقايا الخام من أحد المناجم. كانا بحاجة إلى مكان فسيح من أجل العمل المضني الذي أمامهما، وقد تفضل عليهما من أجل ذلك مدير المدرسة الصناعية التي كان يعمل فيها بيير بسقيفة كبيرة كانت مهجورة داخل المدرسة.

بدأت ماري على الفور، ودون كلل أو ملل، بعمليات الفصل الكيميائي المضنية. كانت تعمل في كل مرة على 20 كيلو من بقايا البيتشبلند دفعة واحدة. وقد كتبت تقول، "كنت اضطر أحيانا إلى قضاء كامل اليوم في تقليب كتلة الخام المغلي بقضيب ثقيل من الحديد في حجم جسمي."

أخيراً، وبعد آلاف عمليات الفصل والتنقية، استطاع الزوجان فصل 0.1 جرام من كلوريد الراديوم النقي. وبعد ذلك حددا وزن الراديوم الذري بـ 225.

- **ثلاثـــة في واحـــد**

في العام ذاته الذي تزوجت فيه ماري من بيير كوري، يصل التيوزيلاندي أرنست رذرفورد إلى جامعة كامبردج لإجراء بعض الدراسات العليا في معمل كافندش ذائع الصيت، تحت إشراف مدير المعمل في ذلك الوقت، جيه جيه ثومسون (مكتشف الإلكترونات السابق ذكره).

في 1896، بعد اكتشاف رونتچن لأشعة أكس، يدعو ثومسون رذرفورد للمشاركة في بحث حول استحداث التأين في الغازات بواسطة أشعة رونتچن. يمتد

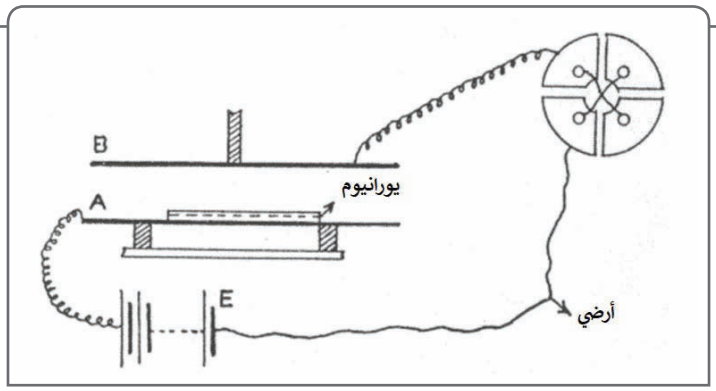
ذلك البحث بعد ذلك ليشمل التأيين الذي تحدثه أشعة بيكريل. وفي 1898، وهو مازال في كامبردج قبل أن ينتقل إلى "مونتريال Montreal" في كندا بقليل، يقرر رذرفورد توجيه أبحاثه إلى دراسة النشاط الإشعاعي والمواد المشعة.

بحلول 30 مارس 1896، كان هنري بيكريل قد اكتشف أن أشعته، أشعة اليورانيوم، لم تكن تمتص في الألواح المعدنية بشكل متساو، مما يوحي بأنها مكونة من أصناف متباينة. أراد راذرفورد أن يتأكد من ذلك؛ فقد كان لبيكريل أراء أخرى ثبت أنها غير صحيحة. وقد أكد رذرفورد صحة ذلك بالتجربة التالية:

- قام بفرد طبقة متماثلة من مركب من اليورانيوم على اللوح "A" (الشكل 79)، فتعمل الأشعة المنبعثة من اليورانيوم على "تأيين" الغاز الموجود بين اللوحين "A" و"B"؛
- استخدم مقدار التيار الكهربي الساري بين اللوحين كدلالة على شدة الأشعة المنبعثة من اليورانيوم؛
- وقام بعد ذلك بتغطية مركب اليورانيوم بشرائح ألومنيوم متنوعة السمك، محددا تأثيرها على شدة الإشعاع المؤين للغاز بين اللوحين.

**الشكل 79:**

**تجربة رذرفورد على إشعاع اليورانيوم**



كان المتوقع إذا كان إشعاع اليورانيوم مكون من نوع واحد فقط أن تنخفض شدة الإشعاع بشكل منتظم مع زيادة سمك غطاء الألومنيوم. يجرى التعبير عن هذه العلاقة بين شدة الإشعاع وسمك غطاء الألومنيوم في لغة الرياضيات بالمعادلة التالية:

$$r = \exp(-\lambda d)$$

r: شدة الإشعاع النافذ من الغطاء/شدة الإشعاع بدون الغطاء

d: سمك غطاء الألومنيوم

$\lambda$: ثابت التناسب (معامل الامتصاص)

Exp (...): العدد 2.71828 مرفوع للأس ...

وقد وجد رذرفورد أن معامل الامتصاص ($\lambda$) لم يبقى ثابتا سوى لبضعة كسور مئوية من المليمتر ثم انخفض فجأة لقيمة أخرى.[1] استنتج رذرفورد من ذلك أن هناك نوعان على الأقل من الأشعة المنبعثة من اليورانيوم. وقد أطلق على النوع الأول اسم أشعة ألفا *$\alpha$-rays*، وعلى الثاني الأكبر قدرة على النفاذ من الألومنيوم اسم *أشعة بيتا $\beta$-rays*.[2]

أمكن معرفة كنة النوع الأول، أشعة ألفا، سريعا. فقد أوضح "إف جيزل F. Giesel" في 1899 أنه يمكن بسهوله حرف أشعة بيتا في الاتجاه نفسه الذي تنحرف إليه أشعة الكاثود، ما يُظهِر أنها سيل من الجسيمات الحاملة لشحنة سالبة.[3] اكتمل الدليل على أن أشعة بيتا هي عبارة عن إلكترونات على يد بيكريل في 1900،[4] عندما بين أن جسيمات بيتا لها نفس الكتلة الصغيرة للإلكترونات، وأنها تنطلق بسرعة مناظرة لسرعة الضوء.

(1) يجب أن يظل معامل التناسب ثابتا إذا كان هناك نوعا واحدا من الأشعة.

(2) الحرفان "ألفا" و"بيتا" هما الحرفان الأولان في الأبجدية اليونانية.

(3) إنحناء الأشعة بواسطة المغناطيس هي علامة دامغة على أنها مكونة من جسيمات مشحونة.

(4) عاد بيكريل إلى دراسة النشاط الإشعاعي بعد أن بدأ الفيزيائيون الآخرون يهتمون بدراسته.

في إبريل 1900، يكتشف العالم الفرنسي "بول ڤيلار Paul Villard" نوعا ثالثا من الإشعاع الذاتي أكثر نفاذية من النوعين السابقين. كان ڤيلار يدرس الإشعاع المنبعث من عينة من الراديوم محفوظة في وعاء منيع والقادر على اختراق طبقة رقيقة من الرصاص (المعروف أنه يمنع مرور أشعة ألفا) تغطي فتحة صغيرة في الوعاء الحافظ. وقد وجد ڤيلار أن أشعته هذه لا يمكن حرفها بالمجال المغناطيسي (على عكس الحال مع أشعة ألفا وبيتا)، مما يدل على أنها ليست جسيمات مشحونة كهربيا. كان ڤيلار مثل رونتچن رجلا متواضعا فلم يطلق اسما على هذه النوع الخاص الجديد من الأشعة، والتي سيطلق عليها رذرفورد في 1903 اسم "أشعة چاما γ-rays"،[1] متبعا نظام التسمية ذاته الذي اتبعه في تسمية النوعين اللذين اكتشفهما في 1899.

لم يحظى اكتشاف ڤيلار في البداية باهتمام المجتمع العلمي، ربما لأنه لم يتوافق مع الصورة السائدة بين العلماء في ذلك الوقت عن الطبيعة "المادية" للإشعاع الذري.

في 1898، يرشح الأستاذ ثومسون تلميذه النيوزيلندي الموهوب، أرنست رذرفورد، لشغل وظيفة أستاذ الفيزياء بـ "جامعة مكجيل McGill University" في مدينة مونتريال الكندية.[2] عمل رذرفورد تسع سنوات بهذه الجامعة، حتى العام 1907 حينما قرر الانتقال للعمل بـ "جامعة مانشستر University of Manchester" الإنكليزية. في مكجيل، توفر لرذرفورد الأجهزة الضرورية والتمويل الجيد. فقام بمجموعة من الأبحاث الهامة على تحلل العناصر وكيمياء المواد المشعة، والتي سينال عنها جائزة نوبل في الكيمياء لسنة 1908.

ركز رذرفورد، أكثر من أي باحث آخر، دراساته على خصائص أشعة ألفا

(1) الحرف "چاما γ" هو الحرف الثالث في الأبجدية اليونانية.

(2) تقع مدينة مونتريال في مقاطعة "كيبك Quebec" فرنسية الأصل.

وطبيعتها. أظهرت التجارب الأولى أن أشعة ألفا تمر خلال المجالين الكهربي والمغناطيسي دون أن تنحرف، ما يشير إلى أنها *متعادلة neutral* (لا تحمل شحنات كهربية).

في آخر 1902، عندما توفرت "تجهيزة preparation" عالية الإشعاع من الراديوم، تمكن رذرفورد من إثبات إنحناء هذه الأشعة في المجال المغناطيسي، ولكن بدرجة طفيفة جدا مقارنة بأشعة بيتا. أمكن كذلك حرف أشعة ألفا بالمجال الكهربي. من مقدار الانحراف، استنتج رذرفورد أن سرعة الجسيمات الأسرع كانت نحو 2.5×910 سنتيمتر في الثانية، أي 1/12 جزء من سرعة الضوء.

يقترح رذرفورد من المعلومات المتوفرة في ذلك الحين "أن كتلة جسيم ألفا "ذرية" (في حدود كتلة الذرة)، وأنه قد يتضح لاحقا أنه عبارة عن ذرة هيدروجين، هيليوم، أو عنصر خفيف آخر لم يعرف بعد." بعد نحو خمسة أعوام، يثبت رذرفورد وزميله "آر دي رويدز R. D. Royds" بطريقة بسيطة ولكنها "فنية" أن جسيمات ألفا هي عبارة عن ذرات هيليوم فقدت إلكتروناتها.

## سباق العباقرة

في نهاية القرن 19 وبداية القرن 20، كان هناك على ما يبدو تنافس قوي بين جهابذة الفيزياء على من يكون السباق في اكتشاف الجديد في عالم الأشعة الخفية. وقد عبر رذرفورد عن ذلك دون مواربة في إحدى رسائله إلى أمه في 1902 على النحو التالي: "لابد أن أنشر بحثي الحالي بأسرع ما يمكن لأتمكن من الحفاظ على مكاني في السباق. وأفضل المتسابقين على درب الدراسة هم بيكريل وآل كوري في باريس، الذين أنجزوا عملاً عظيماً وهاماً في موضوع الأجسام النشطة إشعاعياً."[1]

(1) أنظر Eve (1939: 80 & 81).

كان الباحثون في النشاط الإشعاعي يكررون تجارب بعضهم، وفي أحيان متعددة كانوا يتوصلون إلى الاكتشافات نفسها في أوقات متقاربة. ففي الوقت الذي أكتشفت فيه ماري كوري النشاط الإشعاعي للثوريوم (1898)، توصل الفيزيائي الألماني "جيرهارد شمدت Gerhard Schmidt" إلى الاكتشاف نفسه. عندما حصل رونتچن على جائزة نوبل في 1901، أعرب فيليب لنارد عن استيائه مدعيا أن الفضل يعود إليه قبل رونتچن في اكتشاف أشعة أكس. وفي 1903، أشار في الوقت ذاته الثنائي رذرفورد وسودي في مونتريال والثنائي بيير كوري و"لابورد Laborde" في باريس إلى أن الطاقة المتحررة أثناء انحلال اليورانيوم كانت هائلة مقارنة مع تلك الناتجة من عمليات *الاحتراق الكيميائي chemical combustion*. وقد أدت تلك الاكتشافات إلى ثورات تقنية غيرت إلى الأبد من حياتنا اليومية.

## الخيميائيون الجـدد

في 1900، يكتشف رذرفورد أن مركبات الثوريوم تبث باستمرار "جسيمات particles" مشعة من نوع ما، وأن هذه الجسيمات تحتفظ بقوتها الإشعاعية لعدة ساعات. يطلق رذرفورد على هذه المادة المشعة اسم "البَثُق emanation".

في العام نفسه، يُعيَّن كيميائي إنكليزي شاب، اسمه "فردريك سودي Fredrick Soddy" (1877–1956)، "معيدا demonstrator" في جامعة مكجيل. في مارس 1901، يحدث جدل علمي بين رذرفورد وسودي في جمعية مكجيل للفيزياء McGill's Physics Society. كان رذرفورد يقترح أن الطاقة المنبعثة من المواد المشعة تأتي من انكسار الذرة. يعلق سودي عليه ويقنع الحاضرين بأسلوبه اللاذع أن لا أدلة كافية على ذلك. بعد ذلك ببضعة شهور، ينشأ بين الاثنين تعاون علمي مثمر ينتج عنه تسع ورقات علمية هامة، مع أنه لم يستمر سوى 18 شهرا فقط (من أكتوبر 1901 إلى مارس 1903).

في 1902، يستنتج رذرفورد وسودي أن بثق الثوريوم هو غاز من عائلة

*الغازات النبيلة noble gases*، ويقترحان نظرية *التحول بالنشاط الإشعاعي transformation theory of radioactivity*: الأجسام المشعة هي في حالة من التحول، ونتيجة لذلك تنتج عن النشاط الإشعاعي مواد جديدة متمايزة في خواصها الكيميائية والفيزيائية عن "العنصر الأب parent element". يتذكر سودي الموقف عندما تكشف لهما ذلك: استدار سودي إلى رذرفورد صارخا، "إنه التحول: يتفكك الثوريوم ويتحول إلى غاز الأرجون." رد رذرفورد، "باللّه عليك يا سودي لا تقل تحول، وإلا سيقطعون رقابنا باعتبارنا خيميائيين."[1]

## نظرية التحول

يحاول العلماء باستمرار "تفسير" الظواهر التي يدرسونها من خلال ما يعرف بـ *النظريات theories*، فما هي النظرية العلمية؟ هي "وجهة نظر" تؤيدها نتائج أبحاث علمية متكررة.

نظرية التحول هي النظرية السائدة حاليا التي تفسر ظاهرة النشاط الإشعاعي. تقول هذه النظرية أن نوى العناصر المشعة غير *مستقرة unstable*، وأنها تسعى نحو الاستقرار من خلال تحولها إلى نوى عناصر أخرى أكثر استقرارا عن طريق إطلاقها للإشعاع.

## أعمار العناصر

اكتشاف تحول العناصر المشعة عن طريق الإشعاع يعني أن لذرات العناصر المشعة أعمار.[2] وكما هو الحال في البشر، لا نستطيع أن نعرف مسبقا في أي عمر "ستموت" (تتحول) ذرة عنصر مشع بعينها. لكننا نستطيع أن نتوقع بدقة نسبة "الوفيات" بين هذه الذرات بعد زمن ما.

(1) أنظر Howarth (1958: 84).

(2) ربما كانت أعمار ذرات العناصر الثابتة (غير المشعة) طويلة جدا بحيث لا نعرفها.

يطلق العلماء على الوقت الذي خلاله تتحول نصف ذرات العنصر المشع اسم عمر *النصف half-life*، وهو بالضرورة الوقت نفسه اللازم كي ينخفض النشاط الإشعاعي الصادر من كمية ما من هذا العنصر إلى النصف.

تتباين العناصر المشعة تبايناً هائلاً في أعمار النصف، ما بين جزء ضئيل من الثانية وبلايين السنين. هو 8 أيام للأيودين 131(iodine-131)؛ 30 سنة، السيزيوم-137 (caesium-137)؛ 5730 سنة، الكربون-14 (carbon-14) ؛ 24 ألف سنة، البلوتونيوم-239 (plotunium-239) ؛ 4470 مليون سنة، اليورانيوم-238 (uranium-238).

مع بعض التمعن في المفاهيم السابقة، نستطيع أن ندرك العلاقة العكسية بين النشاط الإشعاعي وعمر النصف: العناصر الأطول عمرا هي (لحسن الحظ) الأقل نشاطا إشعاعيا.

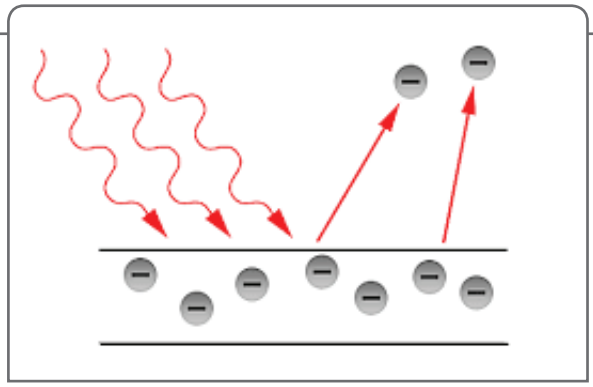
## الضوء من جديد

عرفنا أن الفلاسفة والعلماء ظلوا لقرون يعتقدون أن الضوء عبارة عن سيل من الجسيمات متناهية الصغر. بعد تزايد الأدلة خلال القرن 19 على خصائص الضوء الموجية، تخلى العلماء عن الاعتقاد السابق وتبنوا النظرية التي تقول إن الضوء عبارة عن موجات كهرومغناطيسية.

ظلت النظرية الموجية للضوء هي السائدة والمقبولة حتى اكتشاف التأثير *الضوء-كهربي photoelectric effect* : عند تسليط الضوء على معدن، قد تنبعث إلكترونات من سطح هذا المعدن (الشكل 80). توصف هذه الإلكترونات بـ *الإلكترونات الضوئية photoelectrons*، وهي لا تختلف في شيء عن غيرها من الإلكترونات.

**الشكل 80:**

**التأثير الضـــوء-كهربـــي**



كان هاينرش هيرتس هو أول من لاحظ هذه الظاهرة في 1887 أثناء عمله على الموجات الكهرباء-مغناطيسية (موجات الراديو التي اكتشف كيف يصنعها).

في 1902، أوضح فيليب لنارد أن هناك جسيمات مشحونة تتحرر من سطح المعدن عند إضاءته، وأن هذه الجسيمات تماثل الإلكترونات التي اكتشافها جيه جيه ثومسون في 1897.

**حاول الفيزيائيون، في البداية، تفسير التأثير الضوء-كهربي وفقا للنظرية الموجية على النحو التالي:**

- يؤدي المجال الكهربي المتذبذب لموجة الضوء الساقط إلى تسخين الإلكترونات الموجودة على سطح المعدن.
- ينتج عن التسخين اهتزاز الإلكترونات ثم تحررها من سطح المعدن.

**وفقاً لهذا التفسير، توقع العلماء ما يلي:**

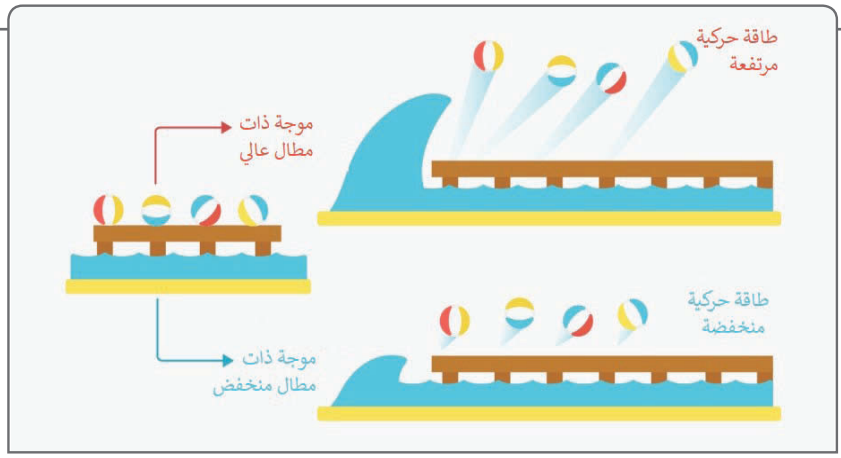
- تكون طاقة الضوء موزعة بالتساوي عبر مقدمة الموجة ومرتبطة فقط بشدة الشعاع الضوئي. وعليه، سوف تزداد الطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية مع زيادة شدة الضوء (المطال الموجي الأعلى).

- بما أن طاقة الضوء تتوقف حسب هذه النظرية على شدة الضوء، لابد من مرور بعض الوقت قبل أن يتمكن الضوء منخفض الشدة من طرد الإلكترونات الضوئية (الوقت اللازم كي تحصل هذه الإلكترونات على طاقة تكفي لتحريرها من قبضة ذرات المعدن).
- يستطيع أي نوع من الضوء كيفما كان تردده أن يتسبب في قذف الإلكترونات الضوئية من سطح المعدن.
- يزيد معدل انبعاث هذه الإلكترونات مع تردد الموجة الضوئية.

لفهم أساس هذه التوقعات، دعنا نشبه موجة الضوء بموجة الماء، ونتخيل بعضا من كرات البحر موضوعة على "لسان" خشبي يمتد داخل البحر (الشكل 81). يمثل اللسان الخشبي سطح المعدن؛ الكرات الإلكترونات. نتوقع أن تقذف موجة البحر الكبيرة (ذات المطال الأعلى) الكرات بعنف مقارنة بالتموجات الصغيرة، وإن تزيد موجات الماء المتقاربة (ذات التردد الأكثر) من عدد الكرات المقذوفة خلال زمن معين.

**الشكل 81:**

**التأثير المتوقع لمطال الموجة على طاقة الإلكترونات المقذوفة من سطح المعدن**



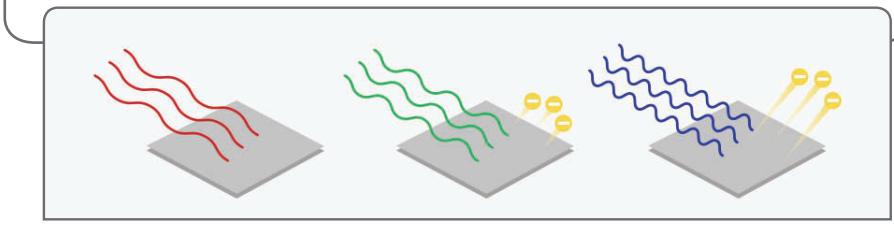
**جاءت النتائج التجريبية على العكس تماماً من هذه التوقعات:**

- تتزايد الطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية مع تردد الضوء الطارد، ولا تتأثر إطلاقاً بشدة هذا الضوء!
- تنبعث الإلكترونات الضوئية على الفور، مهما انخفضت شدة الضوء المسلط على المعدن!
- يزداد معدل قذف الإلكترونات مع شدة الضوء، ولا يتأثر بتاتا بتردد الضوء!

كما لاحظ العلماء أن الضوء الذي يقل تردد موجته عن حد معين، خاص بكل معدن، لا يتسبب في طرد أي إلكترونات من سطح هذا المعدن، مهما كانت شدته (الشكل 82). يعرف هذا التردد الأدنى باسم *التردد الفارق threshold frequency*.

**الشكل 82:**

**التـــردد الموجـــي الفـــارق**



## الضوء ذو الوجهين

في 1905، ينشر فيزيائي شاب، اسمه "ألبرت أينشتاين Albert Einstein" (1879 – 1955؛ الشكل 83)، ورقة علمية تقدم تفسيرا لظاهرة التأثير الضوء-كهربي. كان أينشتاين في ذلك الوقت يعمل كاتبا في مكتب لتسجيل براءات الاختراع في "برن Bern" (سويسرا).[1]

(1) يحصل أينشتاين على جائزة نوبل في الفيزياء لسنة 1925 بسبب هذا العمل.

**الشكل 83:**

**ألبـــرت أينشـتايــن**

افترض أينشتاين أن الإشعاع الكهرومغناطيسي (الضوء) ينتقل في الفضاء على شكل حزمات أو رزم منفصلة من الطاقة. أطلق أينشتاين على رزمة الطاقة هذه اسم *الكوانتم quantum* لكنها تعرف الآن باسم *الفوتون photon*.[1]

**تتصف الفوتونات بالآتي:**

- تتصرف مثل الجسيمات والموجات في آن معا. تتناسب طاقة "الفوتون الجسيم" مع تردد موجة الضوء؛ يحدد تردد موجة الضوء طاقة "الفوتون الجسيم".
- تتحرك في الفراغ بسرعة الضوء (2.9979×810 م/ث).
- كتلتها تساوي الصفر عند السكون (لكنها لا تكون ساكنة أبدا).
- مع أنها عديمة الكتلة (عند السكون) إلا أنها تحمل *طاقة وزخم momentum* يتوقفا على تردد موجة الضوء.
- تستطيع أن تؤثر على الجسيمات الأخرى (مثل الاصطدام بإلكترونات الذرة).
- ليس لها شحنة كهربية.

(1) كان العالم "جيلبرت لويس Gilbert Lewis" هو أول من استخدم مصطلح الفوتون.

- تتصف بأنها متماسكة stable (لا تنحل إلى أجزاء أصغر).
- يمكن أن تفنى (مثلما يحدث عندما يُمتص الضوء) وأن تخلق من جديد (عندما تصدر المادة الضوء).

**تعبر المعادلة الرياضية التالية عن العلاقة بين طاقة الفوتون وتردد موجة الضوء:**

$$E = h\nu$$

h: Planck constant ثابت بلانك

ν: Light wave frequency تردد موجة الضوء

عندما يسقط الضوء على سطح المعدن، ينقل الفوتون كامل طاقته إلى الإلكترون الذي "يصطدم" به. ينفق الإلكترون جزءا من هذه الطاقة في سبيل أن يتحرر من ذرة المعدن، ويحتفظ بالباقي على هيئة طاقة حركية. يطلق على الطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون من سطح المعدن اسم *دالة الشغل work function*، وهي خاصة بكل معدن. نستطيع التعبير عن هذه العلاقات بلغة الرياضيات على النحو التالي:

$$E = \Phi + E_k$$

$$h\nu = \Phi + E_k$$

$$E_k = h\nu - \Phi$$

$E$: Photon energy طاقة الفوتون

$\Phi$: Work function معادلة الشغل

$E_k$: Kinetic energy of the photoelectron طاقة الإلكترون الضوئي الحركية

- عندما تساوي طاقة الفوتون معادلة الشغل ($h\nu = \Phi$) فإن الإلكترون بالكاد يتحرر من سطح المعدن دون أن يمتلك أي طاقة حركية ($E_k = 0$). يعرف تردد الفوتون حينئذ باسم *التردد الفارق threshold frequency*، ويرمز إليه بـ "$\nu_0$".

تلاشي الحدود

- ينجذب أي جزء من المادة على الأرض إلى مركز الكرة الأرضية بفعل *قوة الجاذبية force of gravity*. يوصف هذا الانجذاب—كما أشرنا من قبل—بـ الوزن *weight*.

لقد ظن العلماء لسنوات كثيرة أن المادة والطاقة (وسنميزها مؤقتاً بـ *الطاقة الشعاعية radiant energy*) شيئان مختلفان جوهريا: المادة لها كتلة؛ الطاقة الشعاعية ليس لديها مثل هذه الكتلة. لقد ظل هذا هو المعتقد حتى أشار "ألبرت أينشتاين" في بداية القرن العشرين إلى أن الكتلة نسبية، وأن للضوء زخم. كما أنه ينجذب للمادة عبر قوة الجاذبية. وقد تحقق الفلكيون من ذلك عندما وجدوا أن الشعاع الضوئي الآتي من نجم بعيد عن الأرض ينحني تجاه الشمس عند مروره بالقرب منها. كما اكتشفوا أن لأشعة الشمس تأثير «ضاغط» على حركة *الكويكبات asteroids* الشمسية (كواكب صغيرة تتحرك حول الشمس). يُنظَر الآن إلى الضوء المرئي وكل أشكال الإشعاع الموجي (الموجات الكهرباء-مغناطيسية) على أنها ذات خصائص موجية وجسيمية في آن معا.

كان يُظن أيضاً أن "المادة لا تفنى ولا تستحدث"، وإنما يمكن فقط تحويلها من شكل لآخر. لكن اكتشاف المواد المشعة ودراسة طبيعة الإشعاع النووي بَيَّنا أن المادة (على الأقل جزءا ضئيلا منها) قد تتحول إلى طاقة شعاعية، والطاقة الشعاعية إلى مادة. وتعطينا معادلة أينشتاين الشهيرة العلاقة بين مقدار معين من الطاقة وكمية المادة التي تقابلها:

$$E = mc^2$$

$E$: energy (ج) الطاقة

$m$: mass (ك چ) الكتلة

$c$: velocity of light (م/ث) سرعة الضوء

ولذلك يَعُدُّ بعض العلماء المادة شكلاً من الطاقة.

**أشكال ليست كالأشكال**

**معظمنا يعرف أن الطاقة تظهر بأشكال مختلفة (أو هكذا سمعنا):**

- الطاقة الحرارية *thermal energy*
- الطاقة الكيميائية *chemical energy*
- الطاقة الكهربية *electrical energy*
- طاقة الضوء *light energy*
- الطاقة النووية *nuclear energy*

**ونعرف أيضاً أن الطاقة تستطيع التنقل بين هذه الأشكال المختلفة:**

- ترتفع حرارة بشرتنا عندما نستلقي تحت أشعة الشمس: تتحول طاقة الضوء إلى طاقة حرارية في أجسادنا.
- وعندما نلقي بشيء من فوق جُرُفٍ فإنه يسقط بسرعة متزايدة: تتحول طاقة الجاذبية الوضعية إلى طاقة حركية.
- تُضاء الغرفة (وترتفع حرارتها أيضا) عندما نفتح زر الإضاءة: تتحول الطاقة الكهربية إلى ضوء وحرارة.

- ندفئ أيدينا في الجو البارد بفركها معا: تتحول الطاقة الكيميائية في عضلاتنا إلى حركة ثم إلى حرارة من خلال *الاحتكاك friction*.

يتحفظ بعض الفيزيائيين على استخدام عبارة "أشكال الطاقة forms of energy"، لأنها قد توحي بأن هناك عدة "طاقات"، وأن لهذه الطاقات خصائص مختلفة. ويفضلون استبدالها بعبارة "حاملات الطاقة carriers of energy":

- **باختصار:** لا يُعَدُّ التدريس حول أشكال الطاقة عدا الطاقة الحركية وطاقة الوضع___وإن لم يكن خاطئا تماماً)___لا يُعَدُّ مفيدا أو منيرا بشكل كبير. (1)

يحاج المعترضون في تحفظهم هذا بإن الطاقة ليست "شيئاً" وإنما هي "حالة" (أو "ظرف") توجد عليها (أو فيه) الأشياء.

## متاهة التعريفات

يتحفظ بعض الفيزيائيين أو يعترض حتى على تعريف الطاقة الأكثر شيوعا في كتب الفيزياء الدراسية (المقدرة على أداء شغل). هناك من يراه غير كامل ويعدله إلى الآتي: "الطاقة هي خاصية للمادة يمكن تحويلها إلى شغل، حرارة، أو إشعاع. ويراه البعض غير مفيد عمليا فضلا عن كونه غير دقيق علميا: فالطاقة هي إحدى مقاييس حالة (أو ظرف) الجسم أو "المنظومة"، والشغل لا يعني الطاقة **وإنما هو العملية التي تغير طاقة الجسم أو المنظومة.**

لنتخلَّى ولو مرحليا عن محاولة وضع تعريف دقيق ومفهوم للطاقة، ونحاول عوضا عن ذلك أن نَعرفها ونفهمها من خلال معرفة أهم خصائصها والقوانين التي تحكم سلوكها في الكون.

(1) انظر Sefton (2004: 6).

## خصائص الطاقة وقوانينها

تلخص قوانين "الديناميكا الحرارية (أو الحراك الحراري) thermodynamics" الأولى أهم خصائص الطاقة وسلوكها في الطبيعة.[1] وتُعَدُّ موضوعات الديناميكا الحرارية من الموضوعات الصعبة حتى بالنسبة لطلاب العلوم الطبيعية والهندسية، كما يتطلب فهم أصولها خلفية جيدة في الرياضيات. ولأن كتابنا هذا ليس كتابا مدرسيا حول الديناميكا الحرارية أو الرياضيات، سنكتفي هنا بشرح مضمون هذه القوانين بلغة مبسطة.

يقول القانون الأول للديناميكا الحرارية (بشكل تقريبي) إن مقدار الطاقة الإجمالي يبقى دائما كما هو. قد يتغير بين "أشكال" الطاقة المختلفة، ولكنه يبقى دائما في مجمله ثابتا. يطلق الفيزيائيون على هذا القانون اسم *مبدأ بقاء أو انحفاظ الطاقة conservation of energy*،[2] وتتوافق كل القوانين الفيزيائية المعروفة مع هذا المبدأ. على سبيل المثال، تتغير الطاقة الحركية للسيارة عند توقفها عند إشارة حمراء إلى حرارة (أو طاقة حرارية) بواسطة الاحتكاك. وسنجد إذا ما قمنا بحساب مقدار الطاقة الإجمالي قبل التوقف وبعده أنه ظل ثابتا دون تغير.

ألا يبدو هذا متناقضا مع ما نسمعه كثيرا من ضرورة "الحفاظ على الطاقة" وترشيد استخدامها؟ نأمل أن يتلاشى هذا التناقض الظاهري حالا، بعد أن نتعرف على مضمون **القانون الثاني للديناميكا الحرارية**. يقول هذا القانون إن جزءا من الطاقة يصبح أقل فائدة بتحولها (أو انتقالها) بين الأشكال (أو الحاملات) المختلفة للطاقة. لنأخذ كمثال ما يحدث عندما تدير سيارتك لتنطلق بها إلى عملك (إذا كنت لا تفضل أو لست مضطرا لاستعمال المواصلات العامة). بداية، تكون الطاقة

(1) المقطع الأول (thermo) من كلمة "thermodynamics" يعني "الحرارة"؛ الثاني (dynamics) "الحركة".

(2) قد يبدو هذا المبدأ متناقضا مع الدعوات البيئية المتكررة للحفاظ على الطاقة، وسوف نفهم أسباب هذا التناقض الظاهري في الجزء القادم.

على "شكل" طاقة كيميائية "مخزنة" (أو بالأحرى محمولة) في الجازولين. بعد انطلاق السيارة يكون لدينا طاقة كيميائية محمولة في نواتج احتراق الجازولين، الطاقة الحركية للسيارة، والحرارة التي تتشتت بواسطة *مشعاع radiator* السيارة. يمكننا التعبير عن ذلك بلغة الرياضيات كالتالي:

$$(CE)R_{before}R = (CE)R_{after}R + (KE)R_{car}R + Heat$$

$(CE)_{\text{before}}$ : طاقة كيميائية (قبل الانطلاق)

$(CE)_{\text{after}}$ : طاقة كيميائية (بعد الانطلاق)

$(KE)_{\text{car}}$ : الطاقة الحركية للسيارة

$Heat$ : حرارة تتشتت

عندما نرفع قدمنا عن دواسة الوقود تبطئ السيارة حتى تتوقف في النهاية، وقد "تآكلت" طاقتها الحركية بالاحتكاك وتشتت على شكل حرارة. لقد بدأنا بطاقة كيميائية في وقود الجازولين وانتهينا بحفنة من الحرارة إضافة إلى طاقة كيميائية في نواتج الاحتراق. من الواضح أن الطاقة التي بدأنا بها كانت أفيد من تلك التي انتهينا بها. وهذا هو ما يحدث دائما عند استعمال الطاقة (مضمون القانون الثاني للديناميكا الحرارية).

## مقاييس الطاقة وأخواتها

عرفنا أن الشغل والطاقة يقاسا في نظام الوحدات الدولية بالجول، وأن الجول هو مقدار الشغل الذي تقوم به قوة مقدارها نيوتن واحد (ن) عندما تحرك نقطة التأثير لمسافة متر واحد. تبلغ قوة الجاذبية الأرضية لكيلوجرام واحد من المادة 9.8 ن؛ وعليه فإن الجول الواحد هو كمية الطاقة المطلوبة لرفع جسم كتلته 102 جـ لارتفاع

مقداره متر واحد. يمكننا أيضاً قياس هذا المقدار من الشغل (أو الطاقة اللازمة لإنتاجه) بـ *السُعرات الحرارية calories*. السُعر هو كمية الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة جرام واحد من الماء درجة واحدة سلسيوس أو مئوية (مثلاً من 13.5 إلى 14.5°س)، ويعادل السُعر الواحد 4.18 جول.

إن **الوقت** اللازم لبذل كمية معينة من الشغل (أي معدل إنتاج أو استخدام الطاقة) هو عامل مهم في كثير من الحالات. على سبيل المثال، قد يستطيع رجل واحد أن يحمّل عربة نقل بـ 40 حجرا كتلة الواحد منها 25 كيلوجراما إذا ما رفعها حجرا تلو الآخر. لكنه لن يتمكن أبدا من رفعها دفعة واحدة (1000 كيلوجرام) إذا ما فكر في ذلك، رغم كون الشغل المبذول في الحالتين متساويا تقريبا. يطلق على مقدار الشغل المبذول في وحدة الزمن اسم القدرة power، ويجري قياسها في النظام الدولي بالـ وات (و) watt. يعادل الوات الواحد جولا في كل ثانية (ج/ث). وفي الحقيقة نحن نطبق مفهوم "القدرة" بشكل بديهي كثيراً في حياتنا اليومية (الشكل 84).

**الشكل 84:**

**الحمل الذي لا تقدر على رفعه دفعة واحدة قد تستطيع ذلك لو جزأته**

تميل شركات الكهرباء إلى حساب الطاقة المنتجة أو المستخدمة بوحدة القدرة (وات) مضروبة في فترة الإنتاج أو الاستخدام. ستجد على سبيل المثال أن استهلاكك في فاتورة الكهرباء محسوبا بالكيلووات-ساعة (ك**و**س؛ الشكل 85):

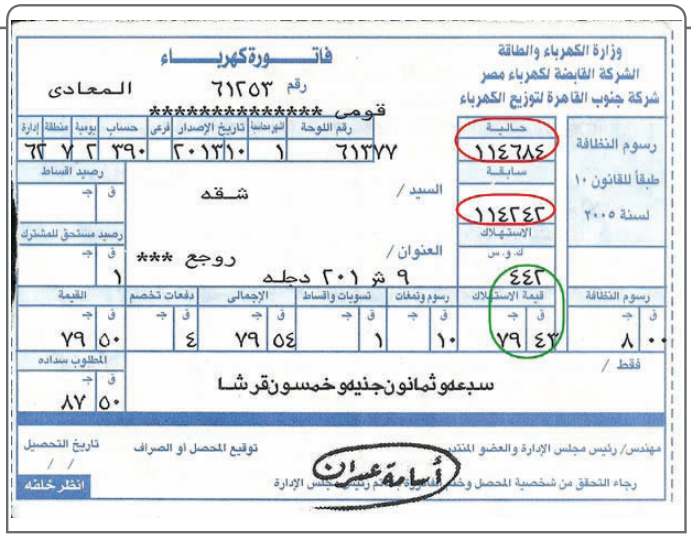
ك**و**س = 1000 وات لمدة ساعة = 1000 "جول كل ثانية" × 1 ساعة

= 1000 جول/ثانية × (60 × 60) ثانية = 36 × $10^5$ جول = 3.6 ميجاجول (**مج**)

**الشكل 85:**

**استهلاك الكهرباء**

**محسوب بالكيلووات. ساعة (ك و س)**


وزارة الكهرباء والطاقة
الشركة القابضة لكهرباء مصر
شركة جنوب القاهرة لتوزيع الكهرباء

فاتورة كهرباء

رقم ٦١٢٥٣

المعادى

قومى **********

| إدارة | منطقة | يومية | حساب | فرعى | تاريخ الإصدار | الدورة | رقم اللوحة |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ٦٣ | ٧ | ٢ | ٣٩٠ | | ٣٠/١٢/١٠ | ١ | ٦١٢٣٧٧ |

| | |
|---|---|
| حالية | ١١٤٦٨٤ |
| سابقة | ١١٤٢٤٢ |
| الاستهلاك ك. و. س | ٤٤٢ |

رسوم النظافة طبقاً للقانون ١٠ لسنة ٢٠٠٥

السيد / شقه

العنوان / ٩ ش ٢٠١ دجله

روجع ***

رصيد الشباط ق ١

رصيد مستحق للمشترك ق ١

| قيمة الاستهلاك | رسوم وتمغات | تسويات وأقساط | الإجمالى | دفعات تخصم | القيمة | رسوم النظافة |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ٧٩ ٤٣ | ١٠ | ١ | ٧٩ ٥٤ | ٤ | ٧٩ ٥٠ | ٨ ٠٠ |

المطلوب سداده ق ٨٧ ٥٠

فقط / سبعه و ثمانون جنيه و خمسون قرشا

مهندس/ رئيس مجلس الإدارة والعضو المنتدب

توقيع المحصل او الصراف

تاريخ التحصيل / /

انظر خلفه

رجاء التحقق من شخصية المحصل وختم [illegible] رئيس مجلس الإدارة

تقاس قدرة محطات توليد الكهرباء الحديثة بالميجاوات (**مرو**). تبلغ قدرة أكبر محطة لتوليد الكهرباء في العالم 22 500 **مرو**، وهي محطة "سد المرات الثلاثة Three Gorges Dam" الكهرومائية في شرق الصين (الشكل 86). أما أكبر محطة لتوليد الكهرباء من زيت النفط فهي "محطة الشعيبة لتحلية المياه المالحة وتوليد الطاقة الكهربائية" على الساحل الغربي للسعودية، والتي تنتج 600 5 **مرو** (الشكل 87).

يستعمل *الحصان horsepower* في بلدان كثيرة لقياس القدرة، ويمثل تقليديا "قدرة" الحصان، أي 7.5 ضعف قدرة الإنسان.

1 حصان = 745.7 وات

يبذل الإنسان الطاقة بمعدل 100 وات في المتوسط (قدرة لمبة إضاءة متوسطة)، ويتراوح هذا المعدل ما بين 85 واتا أثناء النوم و800 وات أو أكثر عند ممارسته للتمارين الرياضية المكثفة.[1]

**الشكل 86:**

**سد الممرات الثلاثة في الصين**

(1) الكيلووات يعادل تقريبا قدرة عشرة رجال.

الشكل 87:

محطة الشُّعَيْبة لتحلية المياه المالحة

وتوليد الطاقة الكهربائية

# الإشعاع المؤين

## التأيين
## وإيداع الطاقة

# الإشعاع المؤين

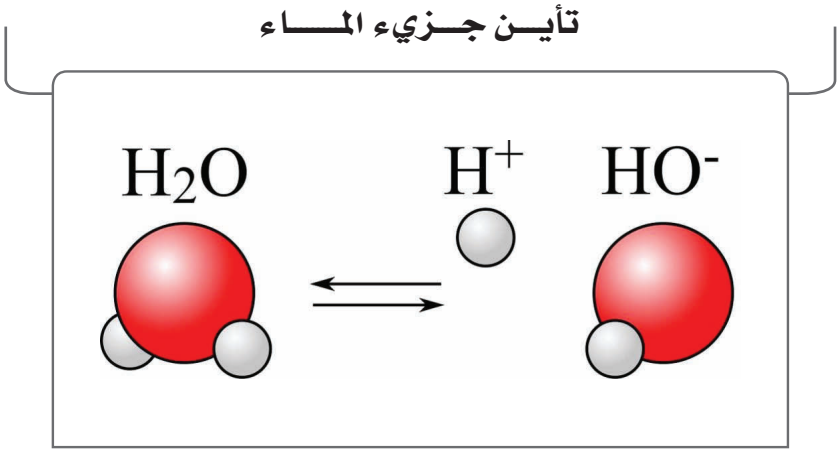
## التأيــين وإيــداع الطاقــة

ينقل الإشعاع طاقته إلى المادة التي يمرر خلالها. يتباين تفاعل الإشعاع مع المادة وفقا لنوع الإشعاع والمادة. تنقل أشعة ألفا وبيتا، وهي جسيمات مشحونة كهربياً، طاقتها من خلال *التفاعلات الكهربية electrical interactions* مع إلكترونات المادة (السالبة كهربياً). تضع أشعة جاما وأكس، وهي موجات كهرومغناطيسية، طاقتها في المادة بطرق متعددة، لكنها جميعاً تتضمن تحرير بعض الإلكترونات من قبضة ذرات المادة المعنية. تنقل هذه الإلكترونات المتحررة الطاقة من خلال التفاعلات الكهربية مع الإلكترونات الأخرى. النيوترونات (المتعادلة كهربياً) تفقد طاقتها بأساليب متنوعة أيضاً، أهمها من خلال الاصطدام بالنوى (الحاوية لبروتونات موجبة كهربياً). نتيجة لهذه الاصطدامات تتحرك البروتونات (المشحونة كهربيا) ناقلة طاقتها إلى المادة من خلال تفاعلات كهربية. وعليه، تُحدِث جميع أنواع الإشعاع في النهاية تفاعلات كهربية في المواد التي تسقط عليها.

قد يحصل أحد إلكترونات المادة من الإشعاع على طاقة كافية للهروب من الذرة أو الجزيء الموجود به، فتصبح هذه الذرة أو ذلك الجزيء أيوناً موجباً، وتعرف هذه العملية بـ *التأيين ionization*. يوضح الشكل 88 كيف تحدث هذه العملية في جزيء ماء. يحتوي جزيء الماء (المتعادل) على 10 بروتونات (موجبة) و10 إلكترونات (سالبة). بعد هروب أحد الإلكترونات بفعل الإشعاع، يصبح جزيء الماء حاملاً لشحنة موجبة واحدة (غير متعادلة)، أي يصبح أيوناً موجباً.

**الشكل 88:**

**تأيــن جــزيء المـــاء**




### أنــواع الإشــعاع المؤيــن

يمكننا تصنيف الأشعة المؤينة إلى قسمين رئيسين حسب طبيعة هذه الأشعة: (1) الجسيمات تحت-الذرية subatomic particles، و(2) الموجات الكهرباء-مغناطيسية electromagnetic waves.

### الأشــعة الجسيميــة

نحن نعرف الآن أن العناصر المشعة هي في حالة من التحول، حيث تنحل نوى ذراتها عن طريق الإشعاع متحولة إلى عناصر أخرى أخف وزنا. هناك بضعة طرق مختلفة تنحل بها المواد المشعة، أو ما يعرف اختصارا بـ *الانحلال المشع radioactive decay*. تطلق هذه المواد خلال انحلالها الأشعة الجسيمية التالية: أشعة ألفا (موجبة الشحنة)، أشعة بيتا السالبة، أشعة بيتا الموجبة، والنيوترونات (المتعادلة).

يتكون جسيم ألفا من بروتونين ونيوترونين ملتحمة معا (أي من نواة الهيليوم). أشعة بيتا السالبة هي سيل من الإلكترونات. أما أشعة بيتا الموجبة، فهي عبارة

عن سيل من جسيمات تشبه الإلكترونات تماماً عدا أنها موجبة الشحنة (تسمى *البوزيترونات positrons*). يحمل جسيم ألفا ضعفي الشحنة التي يحملها جسيم بيتا. أما كتلة جسيم ألفا، فهي تعادل تقريباً أربعة أضعاف كتلة النيوترون، و7,294 ضعف كتلة جسيم بيتا.

### الأشعــة الموجيـة

نعرف أن الضوء المرئي هو نوع من الموجات الكهرباء-مغناطيسية (لها خواص كهربية ومغناطيسية). وهناك أنواع أخرى غير مرئية من الموجات الكهرباء-مغناطيسية. الشكل 89 يوضح الأنواع المختلفة للموجات الكهرباء-مغناطيسية. تزداد طاقة الموجات الكهرباء-مغناطيسية كلما زاد تردد هذه الموجات أو قصر طول موجاتها، وفقا للمعادلة التالية (تعرف باسم *معادلة بلانك Planck equation*):

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$E$ : Energy الطاقة

$h$ : Planck's constant

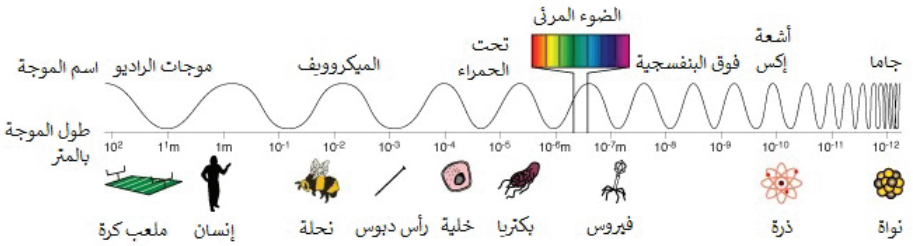
$\nu$ : Frequency التردد

$c$ : Speed of light سرعة الضوء

$\lambda$ : Wavelenght طول الموجة

**الشكل 89:**

**أنواع الموجات الكهرباء-مغناطيسية**




يتشابه الإشعاع الكهرومغناطيسي تماماً في بعض خصائصه مع إشعاع الجسيمات. تشمل الأشعة الموجية المؤينة الأنواع التالية: أشعة جاما، أشعة أكس، والأشعة فوق البنفسجية عالية الطاقة.

## الإشـــعاع والمجـــال

يتكون الإشعاع الكهرومغناطيسي من موجات من المجالين الكهربي والمغناطيسي، ولكن ليست كل تشكيلات هذين المجالين تعد إشعاع. ولا يطلق على *المجالات الساكنة static fields*، مثل مجال الأرض المغناطيسي، اسم "الإشعاع".

بلغة تقريبية، يُنظر إلى المجال الكهرومغناطيسي كإشعاع عندما "ينفصل" عن مصدره وينتشر بذاته عبر الفراغ. تقول إحدى معادلات ماكسويل أن المجال المغناطيسي المتغير ينتج مجالاً كهربياً متغيراً. وتقول أخرى أن المجال الكهربي المتغير ينتج مجالاً مغناطيسياً متغيراً. نتيجة لهاتين العمليتين، تتشكل موجة كهرومغناطيسية (أي طاقة إشعاعية) تستمر في الانتشار بعيداً عن مصدرها.

ترتبط قدرة الإشعاع على اختراق المواد وتأثيره عليها بنوع هذا الإشعاع وطاقته. لدينا الآن فكرة جيدة عن أنواع الإشعاع المؤين. لنتعرف إذا على طاقة هذه الأنواع.

تقاس طاقة "جسيم" الإشعاع بوحدة تسمى *الإلكترون فولت electron volt*، ورمزها "إف eV". الإلكترون فولت وحدة صغيرة جدا (تعادل $1{,}6\times10^{-19}$ ج). يبين الجدول 1 الطاقة المعتادة لأنواع الإشعاع المختلفة.

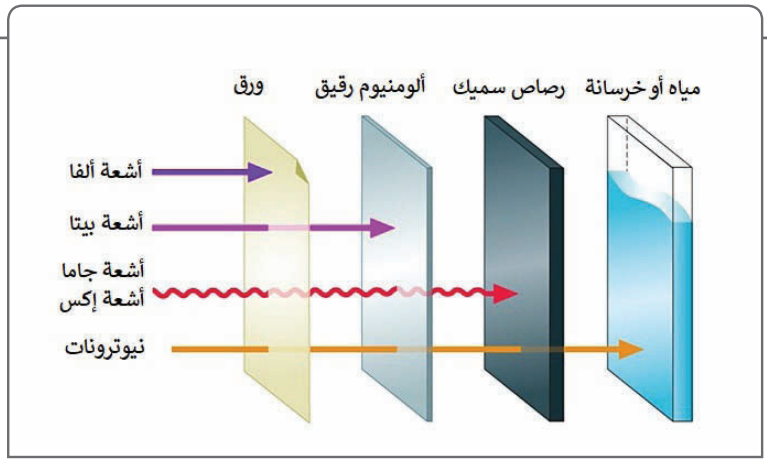
## الجدول 1 :
## الطاقة المعتادة لأنواع الإشعاع المؤين

| نوع الإشعاع | الجسيم المنبعث | الطاقة المعتادة |
|---|---|---|
| ألفا | نواة هيليوم ($He^{2+}$) | 5 مإف |
| بيتا السالبة | إلكترون ($e^-$) | 1 مإف |
| بيتا الموجبة | بوزيترون ($e^+$) | 1 مإف |
| جاما | فوتون ($\gamma$) | 1 مإف |
| النيوترونات | نيوترون ($n$) | 1 - 6 مإف |
| أكس | فوتون ($\gamma$) | 100 إف – 100 ك إف |

يتوقع أن يقضي الجسيم البطيء وقتا أطول نسبيا بجوار الذرات التي يمر بها. وعليه، تزيد فرصة تفاعل هذا الجسيم مع تلك الذرات. يتفاعل الإشعاع في النهاية مع المادة من خلال القوى الكهرباء–مغناطيسية. لذلك تتفاعل الأشعة ذات الشحنة الكهربية الأعلى (مثل جسيمات ألفا) مع ذرات المادة بتكرار أكبر، وتفقد طاقتها أسرع (ومن ثم تقل قدرتها على النفاذ خلال المادة، الشكل 90).

**الشكل 90:**

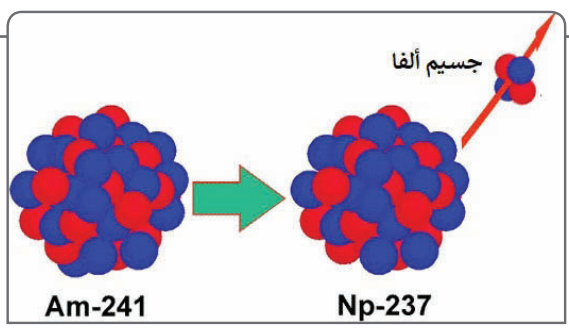
**درجة نفاذية أنواع الإشعاع النووي المختلفة**




### جسيمات ألفـــا

يتكون جسيم ألفا—كما سبق وعرفنا—من بروتونين ونيوترونين، أي من أيون الهيليوم. تنتج هذه الجسيمات من انحلال نوى عناصر مشعة معينة، أساساً تلك الثقيلة. من أمثلة تلك العناصر *الأمريسيوم-241 (Am-241) americium-241* اليورانيوم-*238* (*U-238*)، والثوريوم-*230* (*Th-230*). على سبيل المثال، تطلق إحدى ذرات الأمريسيوم-*241* جسيم ألفا، متحولة إلى ذرة *نبتونيوم-237* (*Np-237*) *neptunium-237* (الشكل 91).

**الشكل 91: انحـــلال ألفـــا**



يغادر جسيم ألفا النواة بسرعة فائقة (16,000 كم/ث). يتوقف جسيم ألفا بعد أن يفقد طاقته الحركية، ويجذب إلكترونين من مجتمع الإلكترونات الحرة حوله متحولا إلى ذرة هيليوم عادية.

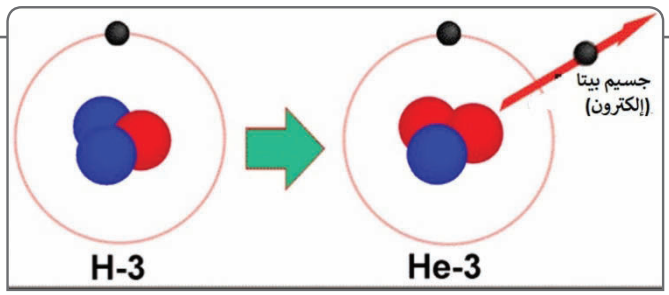
**ليس لأشعة ألفا نفاذية كبيرة:** تتوقف في الهواء بعد 1 – 2 سم، ويمكن للبشرة أو شريحة من الورق امتصاصها تماما. لذلك تتمثل خطورتها عند دخولها الجسم من خلال الاستنشاق أو البلع، فتتعرض لأضرارها بطانة الرئة أو المعدة.

## جسيمات بيتا

**هناك نوعان من جسيمات بيتا:** جسيمات بيتا السالبة، ويرمز لها بـ "$\beta^-$"، وجسيمات بيتا الموجبة، ورمزها "$\beta^+$". على سبيل المثال، ينحل التريتيوم إلى الهيليوم مطلقا جسيمات بيتا السالبة (الشكل 92).

تتشابه أشعة بيتا السالبة مع أشعة الكاثود ولكن سرعتها أعلى كثيراً، فهي عبارة عن سيل من الإلكترونات السريعة (تقترب من سرعة الضوء). جسيمات بيتا أصغر كثيراً من جسيمات ألفا، ولذلك فهي أكثر نفاذية منها. يمكن امتصاص جسيمات الفا تماماً بشريحة من البلاستك، الزجاج، أو الفلز. لا تنفذ أشعة بيتا عادة إلى أبعد من الطبقة العلوية من الجلد. لكن التعرض الكبير لأشعة بيتا عالية الطاقة يمكن أن يسبب حروق الجلد. وقد تشكل المواد المشعة لجسيمات بيتا خطراً عند استنشاقها أو بلعها.

**الشكل 92: انحلال بيتا**



### أشعـة النيـوتـرونـات

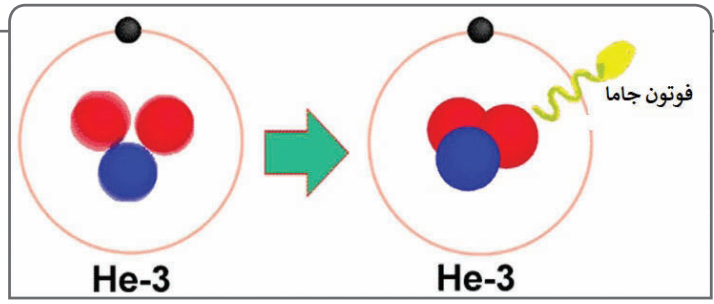
تطلق نوى بعض المواد المشعة نيوترونات سريعة عند انشطارها. العناصر التي تطلق أشعة النيوترونات نادرة جدا، وهي بشكل عام عناصر ثقيلة جدا (رقمها الذري أكبر من 90). المصدر الرئيس لهذا النوع من الإشعاع هو *الأشعة الكونية cosmic rays* و*المفاعلات النووية nuclear reactors*.

النيوترونات هي كما نعرف جسيمات غير مشحونة كهربيا. لذلك، تكون أكثر نفاذية من جسيمات ألفا وبيتا.

### أشعـــة جـامـــا

تصدر أشعة جاما من بعض العناصر المشعة (تصاحب عادة أشعة بيتا؛ الشكل 93). وهي ذات طاقة ونفاذية عالية: لا يمكن إيقاف أشعة جاما إلا بواسطة "دروع shields" من المواد الكثيفة مثل الصلب والرصاص. يستطيع إشعاع جاما النفاذ إلى الأعضاء الداخلية في جسم الإنسان والإضرار بها.

**الشكل 93: انبعاث أشعـة جامـا**




### أشعـة أكـــس

عرفنا أن أشعة أكس (أشعة رونتجن) تنتج من اصطدام أشعة الكاثود (الإلكترونات) بالأجسام الصلبة. يجرى عادة انتاج أشعة أكس عن طريق إطلاق

شعاع من الإلكترونات على "هدف" معدني، عادة من التنجستين tungstine. تمتص إلكترونات المعدن الطاقة من شعاع الإلكترونات (أشعة الكاثود)، وتصبح "مثارة excited". تعود هذه الإلكترونات ثانية إلى وضعها الطبيعي مطلقة كم الطاقة التي امتصتها على شكل أشعة أكس. تصدر أشعة أكس، كما نلاحظ، من إلكترونات الذرة بعد إثارتها بمؤثر خارجي، وليس من نواتها (كما هو الحال في النشاط الإشعاعي)، ويتوقف بثها بمجرد غلق الجهاز الذي يصنعها.

تتشابه أشعة أكس مع أشعة جاما في طبيعتها وخواصها، وتغطي تقريباً مدى الترددات نفسه ($30 \times 10^{15} - 30 \times 10^{18}$ هرتز). ومثل أشعة جاما، تستطيع الوصول إلى الأعضاء الداخلية في جسم الإنسان حتى عند التعرض خارجيا لها.

### الأشعة فوق البنفسجية

الأشعة فوق البنفسجية هي موجات كهرومغناطيسية ذات ترددات أعلى من تلك الخاصة بالضوء المرئي ($8 \times 10^{14} - 30 \times 10^{15}$ هرتز). تمتلك هذه الأشعة من الطاقة ما يمكنها من طرد أحد إلكترونات الذرة من مساره. لذلك، تعد من الأشعة المؤينة. اكتشف هذا التأثير الفيزيائي الأمريكي "آرثر كومپتون Arthur Compton" (1892 - 1962)، ليحصل عن هذا الاكتشاف على جائزة نوبل للفيزياء في 1927.

تستطيع هذه الأشعة قتل الكثير من الميكروبات. ولذلك تستخدم في تعقيم الأدوات والمعدات الطبية، تطهير مياه الشرب، وتنقية الجو. وقد يسبب تعرض الإنسان الزائد لها حروق الجلد، شيخوخة الجلد، الطفرات الوراثية، وحتى سرطان الجلد.

تعمل جزيئات الأوزون الموجودة في طبقة *الستراتو stratosphere* من الغلاف الجوي على حجب الجزء الأكبر من هذه الأشعة وتمنع وصوله إلى سطح الأرض. تعمل بعض ملوثات الجو على تناقص تركيز هذا الأوزون، أو ما درج على تسميته

"تآكل طبقة الأوزون" أو "ثقب الأوزون". لذلك، يخشى أن ينتج عن تفاقم هذه المشكلة زيادة احتمال الإصابة بالتأثيرات الضارة للأشعة فوق البنفسجية.

## قيـــاس الإشعـــاع

لا نستطيع كشف الإشعاع بحواسنا، لكننا نستطيع كشفه وقياسه بطرق أخرى. لنتذكر كيف استخدم الرواد الأوائل لعالم الإشعاع، من أمثال رونتچن وبيكريل، الألواح الفوسفورية والتصويرية في اكتشاف أشعة أكس واشعة اليورانيوم.

عند دراسة تأثير الإشعاع على الإنسان نحتاج أن نفرق بين مقدار الإشعاع الموجود في البيئة، ويشار إليه بـ *الشدة intensity*، ومقدار الإشعاع الذي يتعرض له جسم الإنسان، ويسمى الجرعة *dose*.

## الجـــرعـــة

يطلق على مقدار الطاقة التي يودعها الإشعاع المؤين في وحدة الكتلة mass unit من مادة ما، مثل الأنسجة البشرية، اسم *الجرعة المتصة absorbed dose*. يُعَبَّر عن الجرعة المتصة بوحدة تسمى الـ *چراي gray*، واختصارها "چي Gy". الجرعة ذات الچراي الواحد تعني أن الإشعاع قد أودع طاقة مقدارها جول واحد في الكيلوجرام من المادة.

تتفاعل الأنواع المختلفة من الإشعاع مع الأنسجة الحية بطرق مختلفة أيضاً، بحيث أن الضرر الناتج من جرعة ممتصة من نوع ما يختلف عن الضرر الذي تسببه جرعة ممتصة مساوية من نوع آخر. على سبيل المثال، يكون الچراي الواحد من إشعاع ألف أضَّر على النسيج الحي من الچراي الواحد من إشعاع بيتا. وقد فسر العلماء ذلك بأن جسيم ألفا الأبطأ والحامل لشحنة كهربية مضاعفة يودع طاقته سريعا عند مروره خلال النسيج الحي مسببا ضررا مُرَكَّزا لهذا النسيج. لذلك،

نحتاج إلى مقياس آخر يعبر عن مقدار الضرر الذي تسببه جرعة معينة من الإشعاع للأنسجة الحية بصرف النظر عن نوع هذا الإشعاع. يعرف هذا المقياس المعدل باسم *الجرعة المكافئة equivalent dose*، ويعبر عنها بوحدة *السيفرت sivert*، واختصارها "**سڤ** *Sv*".

نحصل على الجرعة المكافئة من مضروب الجرعة الممتصة (بالچراي) في مقدار يعبر عن الضرر النسبي لكل نوع من الإشعاع. يطلق على هذا المقدار اسم *عامل الترجيح الإشعاعي radiation weighting factor*.

**الجرعة المكافئة = الجرعة الممتصة × عامل الترجيح الإشعاعي**

عامل الترجيح الإشعاعي لكل من أشعة جاما، أكس، وبيتا يساوي الواحد. ومن ثم، لا فرق بين الجرعة الممتصة والجرعة المكافئة لهذه الأنواع. أما عامل الترجيح لجسيمات ألفا، فهو يساوي 20؛ النيوترونات 5 – 20 وفقاً لطاقتها.

## الإشعـاع الطبيعـــي

ليس لدى الإنسان إحساس بالإشعاع المؤين. وقد دفعت هذه الحقيقة ببعض العلماء إلى القول إن المقادير الطبيعية من الإشعاع لا تشكل أي خطر على صحة الإنسان. لذلك، يجب تقييم التعرض إلى المصادر الاصطناعية للإشعاع مقارنة بالمستويات الطبيعية.

يتعرض الإنسان في المتوسط إلى 2.5 **مرسڤ** كل عام من الإشعاع الطبيعي. بالطبع، يختلف مقدار التعرض من منطقة لأخرى، لكنه لا يقل عن 2 **مرسڤ** لأي شخص.

يبلغ معدل الجرعة المعتاد للإنسان نتيجة للإشعاع الطبيعي نحو 0.3 **للمرسڤ** كل ساعة.

**يتناول علماء الإشعاع المصادر الطبيعية للإشعاع تحت أربعة أقسام:**

- الأشعة الكونية؛
- الأشعة الأرضية (من قشرة الأرض)؛
- الأشعة الداخلية أو الذاتية؛
- والأشعة من غاز الرادون.

## الأشعـة الكـونيـــة

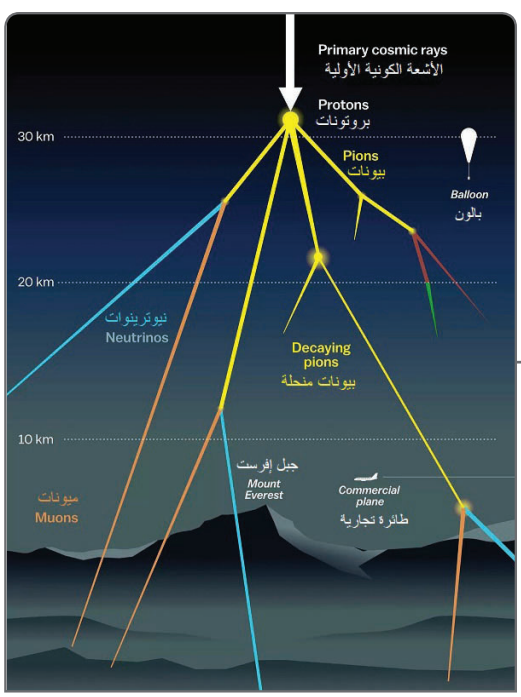
في أغسطس 1912، نجح فيزيائي نمساوي شاب، اسمه "فيكتور هس Victor Hess"، في التحليق بالمنطاد إلى ارتفاع 5300 متر وقياس معدل الإشعاع هناك (الشكل 94)، ليجد أنه يبلغ ثلاثة أضعاف مقداره عند مستوى البحر. يستنتج هس من ذلك وجود مصدر خارج الأرض لهذا الإشعاع. يحصل هس، تكريما له على اكتشاف الأشعة الكونية، على جائزة نوبل في الفيزياء لعام 1936 (مناصفة مع فيزيائي آخر).

**الشكل 94: فيكتور هس يستعد للتحليق بالمنطاد**

تتكون الأشعة الكونية أساساً من البروتونات—نوى الهيدروجين (89 %)، أخف العناصر وأكثرها انتشاراً في الكون. لكنها تحتوي أيضاً على نوى الهيليوم (10 %)، والنوى الأثقل (1 %) وصولا إلى اليورانيوم. تنتقل هذه الجسيمات في الفضاء بسرعات هائلة تقترب من سرعة الضوء.

يقينا الغلاف الجوي من الكثير من الأشعة الكونية. لذلك تشتد هذه الأشعة مع الارتفاع عن سطح الأرض. تصطدم جسيمات الأشعة الكونية عند دخولها الغلاف الجوي مع نوى الغازات الموجودة فيه، مكونة شلالات من الجسيمات تحت الذرية، أغلبها جسيمات تسمى *البيونات pions* (الشكل 95). تنحل هذه البيونات سريعا إلى نوع آخر من الجسيمات يسمى *الميونات muons*. تنفذ البيونات خلال الغلاف الجوي إلى سطح الأرض وتحته. يصل معدل تساقط البيونات على سطح الأرض إلى واحد كل ثانية في المساحة التي تشغلها رأس الإنسان. تتشابه الميونات في بعض خصائصها مع الإلكترونات، لكنها أثقل بمائتي مرة وغير مستقرة.

يبلغ المتوسط العالمي للتعرض إلى الأشعة الكونية نحو 0.4 مرسف/سنة.




**الشكل 95:**
**الأشعة الكونية**

### الأشعة الأرضيـة

تحتوي صخور الأرض على مواد مشعة طبيعياً، مثل البوتاسيوم-40 potassium-40، اليورانيوم-238، الثوريوم-232، والروبيديوم-87 rubidium-87. هذه النظائر المشعة توجد بالطبع في مواد البناء المعتادة.

تتباين مستويات الأشعة الأرضية من مكان إلى آخر حسب تركيز العناصر المشعة في الأرض. يبلغ متوسط التعرض للأشعة الأرضية في أوروبا والولايات المتحدة نحو 0.5 **مرسڤ**/سنة. تتصف بعض المناطق في العالم بمستويات تعرض عالية، مثل "كرالا Kerala" على الساحل الغربي للهند (حتى 26 **مرسڤ**/سنة)، "چواراباري Guarapari" على الساحل الأطلنطي للبرازيل (حتى 120 مسڤ/سنة)، ومدينة "رامسار Ramsar" الإيرانية (حتى 260 **مرسڤ**/سنة). الجدير بالذكر، أن الدراسات التي أجريت على سكان تلك المناطق لم تثبت زيادة فرصة حدوث السرطان بينهم.

### الأشعة الداخلية أو الذاتية

يحتوي الماء، الغذاء، والهواء على نظائر مشعة، أهمها الهيدروجين-3 ($^{3}H$)، الكربون-14 ($^{14}C$)، البوتاسيوم-40 ($^{40}K$)، البولونيوم-210 ($^{210}Po$)، الراديوم-226 ($^{226}Ra$)، واليورانيوم-238 ($^{238}U$). تتراكم هذه العناصر المشعة في جسم الإنسان، فيصبح هو نفسه مشعا. تأتي أغلب جرعة الإشعاع الداخلي من البوتاسيوم المشع.

الموز هو أحد الأغذية ذات المحتوى المرتفع نوعا ما من الإشعاع. فالمعروف أن الموز غني بالبوتاسيوم، وبعض هذا البوتاسيوم هو من النوع المشع (البوتاسيوم-40).[1] لا يجب أن يسبب هذا أدني قلق لمحبي هذه الفاكهة. فالجرعة الناتجة من أكل أصبع واحد

(1) لذلك يعد الموز، وغيره من الأغذية الغنية بالبوتاسيوم، مثل البطاطا الحلوة، مفيدا لمرضى الضغط المرتفع hypertension.

من الموز لا تتعدي 0.1 **µسف**، ولن يسبب "الإشعاع الموزي"، إن جاز التعبير، أي خطر على الإنسان قبل أن يتناول آلاف "الموزات" في كل يوم. بالطبع، سيموت هذا الشخص من التخمة قبل أن يلحظ أي ضرر للإشعاع الذي تجرعه مع الموز.

تبلغ جرعة الإشعاع التي نحصل عليها من المواد المشعة داخل أجسامنا حوالي 0.3 **مرسف**/سنة.

### الأشعة من غاز الرادون

الرادون ($^{222}Rn$) radon هو غاز مشع منتشر بالطبيعة. ينتج الرادون من انحلال اليورانيوم. يتسرب الرادون من خلال الشقوق في صخور الأرض إلى التربة ومن ثم إلى الجو. يدخل الرادون إلى جسم الإنسان من خلال الاستنشاق، ويتركز تأثيره في الرئة. إذا قمنا بتحويل جرعة الإشعاع من الرادون على الرئة إلى ما يعادلها من جرعة على الجسم كله، نحصل على 1.1 **مرسف**/سنة.

### تأثيرات الإشعاع على الإنسان

**أشار بيير كوري في محاضرة نوبل (يونيو 1905) إلى مخاطر المواد المشعة:**

> لن يشعر الواحد بشيء على الإطلاق لو ترك قارورة صغيرة بها عدة سنتي-جرامات من الراديوم في جيبه. لكن بعد 15 يوماً سيظهر الاحمرار على البشرة، ثم قرحة، يصعب التئامها. يمكن أن يؤدي أطول من ذلك إلى الشلل والموت.

حذر بيير كذلك من خطورة الإشعاع إذا وقع في أيدي المجرمين، بل وتساءل عما إذا كانت معرفة أسرار الطبيعة نافعة فعلاً للإنسان.

راود بعض العلماء، من أمثال "توماس أديسون Thomas Edison" (1847

- 1931)، "نيقولا تسلا Nikola Tesla" (1856-1943)، و"ويليام مورتون William Morton" (1819 - 1868)، الشكوك حول وجود تأثيرات سلبية للإشعاع بعدما لاحظوها على أنفسهم بعد إجراء التجارب بأشعة أكس والمواد الضواءة.

يؤين الإشعاع أنسجة الكائنات الحية التي تتعرض له. عن طريق هذا التأيين والتغيرات الكيميائية الناتجة عنه، يحدث الإشعاع الضرر بالإنسان وغيره من الكائنات الحية.

*الخلية cell* هي اللبنة الأساسية التي تتكون منها الأنسجة الحية. يشكل الماء نحو 80 % من محتوى الخلية الحية؛ العشرون في المائة الباقية هي مركبات حياة-كيميائية معقدة.

يتسبب الإشعاع في تأين جزيئات ماء الخلايا الحية. تتكسر جزيئات الماء إلى أجزاء تعرف باسم الشوارد (أو *الشقائق*) *الحرة free radicals*، مثل شارد *الهيدروكسيل hydroxyl*. يتكون جزيء الهيدروكسيل (OH*) من ذرة أكسجين وذرة هيدروجين. تَكون الشوارد الحرة نشطة كيميائيا، وتستطيع التفاعل كيميائيا مع المركبات الحياة-كيميائية وتخريبها. يتكون جزيء الهيدروكسيل كالتالي:

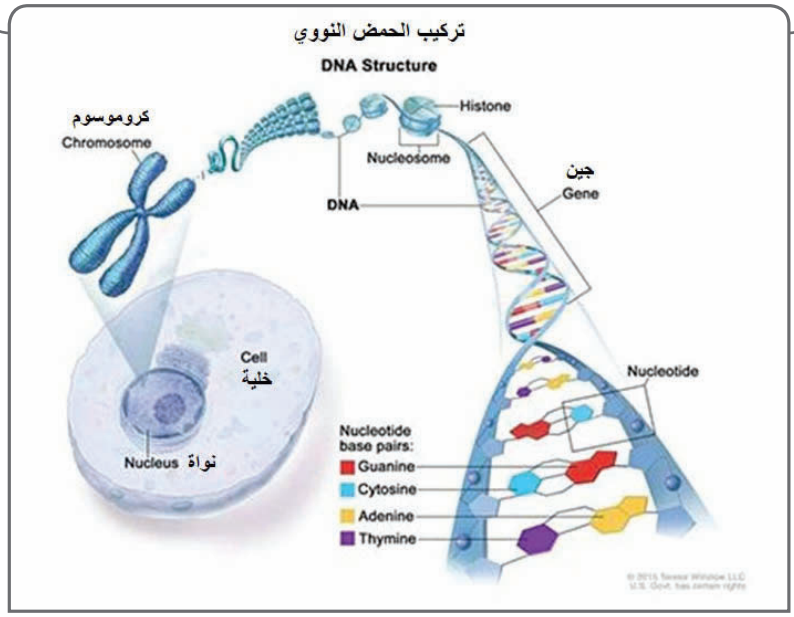
$$H_2O \text{ (in presence or radiation)} \rightarrow H_2O^+ + e^-$$

$$H_2O^+ + H_2O \rightarrow H_3O+ + OH^*$$

الحمض النووي، المشهور باسمه الإنكليزي المختصر: "دي إن ايه DNA"، هو أحد أهم المركبات الحياة-كيميائية في الخلية—إن لم يكن أهمها. ترجع أهمية الحمض النووي إلى أنه يعد عقل الخلية: يحدد بنية الخلية ووظائفها، كما أنه يحمل المعلومات الخاصة بالصفات الوراثية وينقلها إلى الأجيال التالية. يوجد الحمض النووي أساسا في نواة الخلية (الشكل 96). جزيئات هذا الحمض كبيرة، وتركيبها يوصف بـ "الحلزون المزدوج double helix".

**الشكل 96 :**

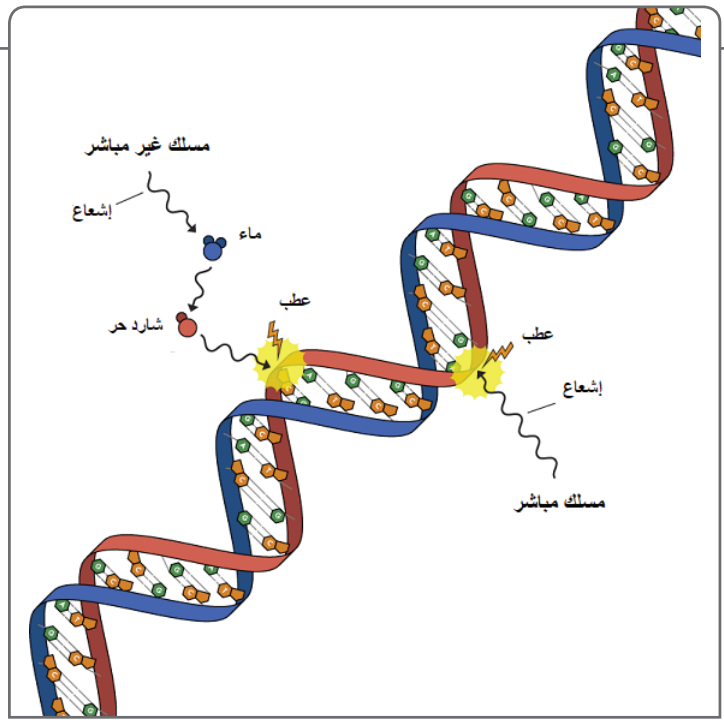
**موضع الحمض النووي في الخلية وتركيبه الكيميائي**




مازال العلماء لا يفهمون تماماً كل الطرق التي يؤذي بها الإشعاع الخلايا الحية، لكن الكثير منها يتضمن حدوث تغيير كيميائي في الحمض النووي. يمكن حدوث هذا التغيير بطريقتين: إما نتيجة لتأين الحمض النووي مباشرة بواسطة الإشعاع، أو بسبب تفاعل الحمض النووي مع شارد الهيدروكسيل الناتج عن تأين الإشعاع لجزيئات الماء في الخلية (الشكل 97).

**الشكل 97:**

**التأثير المباشر وغير المباشر للإشعاع على الحمض النووي**




قبل نحو 500 عام، وضع الطبيب والكيميائي السويسري "باراسلسوس Paracelsus" أول مبادئ علم السموم toxicology: "كل الأشياء سامة، ولا شيء بدون سم؛ فقط الجرعة هي ما تجعل الأشياء غير سامة."[1] يختصر هذا المبدأ عادة على الشكل التالي: "الجرعة تصنع السم." لذلك، يميز الأطباء وعلماء السموم بين نوعين رئيسين من التعرض للإشعاع (وأي عامل ضار آخر): التعرض الحاد acute والتعرض المزمن chronic. يقصد بالنوع الحاد التعرض لجرعة كبيرة من الإشعاع خلال فترة قصيرة (عدة ساعات)، والعكس بالنسبة للنوع الثاني. وكما نعرف الآن، فإننا جميعا نتعرض للإشعاع بشكل مزمن طوال حياتنا، بل حتى قبل أن نولد ونحن مازلنا أجنة في أرحام أمهاتنا.

(1) مقتبس من المرجع التالي: Temple (1979).

## متلازمة الإشعاع الحادة

*متلازمة الإشعاع الحادة acute radiation syndrome* هو الاسم الذي يطلق على مجموعة الأعراض المرضية والأضرار الصحية التي تحدث نتيجة للتعرض الحاد للإشعاع (أكبر من واحد چراي)، والتي تعرف أيضا بـ "تسمم أو مرض الإشعاع radiation sickness or poisoning". تتوقف شدة تلك الأعراض أساسا على مقدار جرعة الإشعاع، ولا تظهر إلا بعد التعرض لجرعة أكبر من مستوى معين يسمى "الحد الفارق threshold".

**تضم الأعراض المحتملة ما يلي:**

- الغثيان والقيء
- الإسهال
- الصداع
- الحمى
- الدوار والارتباك
- الضعف والإعياء
- سقوط الشعر
- القيء والبراز الدموي (من النزيف الداخلي)
- انخفاض ضغط الدم

الأعراض الأولى للتسمم الإشعاعي القابل للعلاج هي عادة الغثيان والقيء. وتعد الفترة الزمنية المنقضية بين التعرض للإشعاع وبدء التقيؤ مؤشراً على مقدار الإشعاع الذي تعرض له الشخص المصاب.

قد يمر الشخص المصاب، بعد الظهور الأول للأعراض، بفترة وجيزة من الراحة تختفي فيها الأعراض، لتعود ثانية وبشكل أشد وطأة.

مرض الإشعاع هو بالطبع خطير، والتسمم بجرعات عالية مميت. لكنه نادر الحدوث. وقد حاول الخبراء تلخيص أعراض التسمم الإشعاعي حسب الجرعة التي يتعرض لها "الإنسان المتوسط" كالتالي:

**0.05 - 0.2 سڤ**

لا توجد أعراض ظاهرة

**0.2 - 0.5 سڤ**

ينخفض عدد كرات الدم البيضاء مؤقتا.

**0.5 - 1 سڤ**

إحساس خفيف بالغثيان مصحوب بصداع. يزداد خطر العدوى نتيجة لاختلال الجهاز المناعي. قد يحدث عقم ذكري مؤقت.

**1 - 2 سڤ**

غثيان خفيف إلى متوسط مع التقيؤ أحيانا. يتبع ذلك فترة كمون تمتد من 10 إلى 14 يوما تختفي فيها أعراض الغثيان. يظهر بعد فترة الكمون شعور عام بالسقم والأعياء. يضعف الجهاز المناعي، وقد تحدث العدوى. يحتمل حدوث عقم ذكري مؤقت. قد يحدث إجهاض في السيدات الحوامل أو يولد الجنين ميتا. تكون هذه الأعراض احتمالية (50 % عند 2 **سڤ**). يُعد التعرض لجرعة 2 **سڤ** مسببا للتسمم الإشعاعي الخفيف، وهو مميت بعد 30 يوما في 10 % من الحالات.

**2 - 3 سڤ**

يبدأ الغثيان بعد التعرض الحاد بثلاثة إلى ست ساعات، ويستمر حتى يوم كامل. يعقب ذلك فترة كمون من سبعة إلى 14 يوماً. بعد الكمون، يكون هناك تساقط للشعر من على الجسم كله، سقم عام، وإعياء. يُدمر الجهاز المناعي فعلياً،

مع فقدان كبير لكرات الدم البيضاء. يصبح خطر العدوى كبيراً. كما يمكن أن يحدث عقم ذكري مستديم. من الضروري، أن يقضي المصاب فترة نقاهة لا تقل عن الشهر. يصنف هذا المستوى من الإصابة باعتباره تسمم إشعاعي متوسط، وهو قاتل في 35 % من الحالات بعد 30 يوماً من المرض. من المؤكد حدوث الغثيان عند 3 **سڤ**. يرتفع احتمال السقم العام إلى 50 %.

### 3 - 4 سڤ

بالإضافة إلى الأعراض المذكورة أعلاه، يحدث بعد فترة الكمون نزيف يصعب إيقافه في كل من الفم، تحت الجلد، وفي الكليتين. تُعد الإصابة بهذه الجرعة تسمم إشعاعي شديد. عند 4 سڤ، يبلغ احتمال حدوث الأعراض المميزة 50 %.

### 4 - 6 سڤ

تبدأ كل الأعراض الخاصة بالمستوى السابق (3 - 4 **سڤ**) بعد ساعة واحدة إلى ساعتين من التعرض للإشعاع، وتبقى حتى يومين. تختفي الأعراض خلال فترة كمون من سبعة إلى 14 يوماً. بعدها، تعود الأعراض نفسها ولكن بصورة أقسى. يستغرق الشفاء نحو السنة. من المحتمل حدوث عقم أنثوي. يُعد هذا تسمم إشعاعي حاد، وهو مميت في 60 % من الحالات بعد 30 يوما. يكون سبب الوفاة عادة النزيف الداخلي والعدوى التي لا يمكن علاجها بعد أسبوعين إلى 12 أسبوعا من التعرض.

### 6 - 10 سڤ

تتضرر أنسجة المعدة والأمعاء ونخاع العظم على نحو خطير. تبدأ الأعراض بعد التعرض بـ 15 – 30 دقيقة، وتدوم حتى يومين. تتقلص فترة الكمون إلى 5 – 10 أيام، تحدث بعدها الوفاة في جميع الحالات تقريباً. قد ينجو قليل من المصابين مع العناية الطبية المكثفة، بما فيها نقل نخاع العظم. يستغرق الشفاء في هذه الحالات سنوات عدة، ولا يكون على الأغلب كاملاً.

### 10 - 50 س‌ف

هذه الجرعة قاتلة تماما بعد سبعة أيام. تظهر الأعراض مباشرة بعد من خمسة إلى 30 دقيقة، وهي الغثيان الفوري والإعياء الشديد. يتبعها عدة أيام من التحسن النسبي. يطلق على فترة الكمون تلك اسم "مرحلة الأشباح السائرة walking ghost phase". يحدث بعد هذه الفترة جفاف كبير، إسهال شديد، ونزيف في الأمعاء (بسبب موت الخلايا المبطنة للقناة الهضمية). يصاحب الاحتضار هذيان وغيبوبة. لا يمكن علاج هذه الحالة. يتطلب التعرض لمثل هذه الجرعات الهائلة الاقتراب الشديد من كتلة من اليورانيوم المكشوف في حالة من التفاعل المسلسل.

### أكثر من 50 س‌ف

هناك حالتان مسجلتان فقط لمثل هذا التعرض. الأولى لعامل في مصنع لمعالجة الوقود النووي في "رود أيلاند Rhode Island". تعرض هذا العامل في يوم 24 يوليو 1964 إلى 100 **س‌ف**، ومات بعد 49 ساعة. الثانية لعامل في منشأة لمعالجة الوقود النووي في "لوس ألاموس Los Alamos"، ولاية "نيو مكسيكو New Mexico" الأمريكية. تعرض ذاك العامل في 30 سبتمبر 1958 إلى 180 **س‌ف**، وتوفى بعد 36 ساعة. تُعد الحادثتين من النوع الذي يطلق عليه حوادث *الحراجة criticality*. يُعتقد أن رجال الإطفاء الذين قاوموا الحريق في كارثة مفاعل تشيرنوبيل سيئة الصيت تعرضوا لجرعات تزيد عن 300 **س‌ف**، ولكن لم تكن هناك أجهزة تستطيع قياس هذه الجرعات الهائلة.

### التعرض للإشعاع والإصابة بالسرطان

توجد أدلة على وجود علاقة بين التعرض لجرعات حادة من الإشعاع واحتمال الإصابة بأنواع متعددة من السرطان (مثل سرطان الدم، الثدي، والمثانة). أغلب

هذه الأدلة جاءت من الدراسات التي أجريت على الناجين من قصف مدينتي "هيروشيما" و"ناجاساكي" اليابانيتين بالقنبلة الذرية في نهاية الحرب العالمية الثانية.

في المقابل، لا توجد أدلة على أن التعرض لجرعات منخفضة (أقل من 100 مرسف) من الإشعاع يزيد من مخاطر الإصابة بالسرطان. على سبيل المثال، لم تُظهر هذه العلاقة الدراسات التي أجريت على العاملين في مجال الإشعاع، والذين يتعرضون بحكم عملهم إلى جرعات منخفضة من الإشعاع لكنها أعلى من "خلفية الإشعاع الطبيعية natural radiation background". بل يحتاج بعض العلماء في أن التعرض لجرعات ضئيلة من الإشعاع ربما يكون مفيدا.

مع ذلك، يفترض المتخصصون في الحماية من الإشعاع، من باب الاحتياط، أن أي كمية من الإشعاع، مهما صغرت، تزيد من مخاطر الإصابة بالسرطان والتأثيرات الوراثية (أي التي تظهر في النسل)، وأن هذه المخاطر تزداد مع زيادة الجرعة التي يتعرض لها الإنسان.

**سنناقش التأثيرات الصحية للإشعاع بمزيد من التفصيل في الجزء الخاص بتقييم المخاطرة الإشعاعية.**

## الوقايــة من الإشعــاع

شكل اكتشاف أشعة أكس في 1895 حدثا علميا كبيرا. بعد ذلك بنحو أربعة أشهر فقط، جرى اكتشاف النشاط الإشعاعي. كان العلماء سريعون في إدراك منافع الإشعاع، ولكن أبطأ كثيراً في فهم تأثيراته الضارة. ففي غضون سنة واحدة من اكتشاف أشعة أكس، كان الأطباء في أوروبا والولايات المتحدة يستخدمونها في تحديد مواضع الطلقات النارية، كسور العظام، حصوات الكلى، والأشياء المبتلعة.

انتشر استخدام الإشعاع في البداية دون مبالاة بأضراره المحتملة، حتى وصل الأمر إلى استخدام اشعة أكس في محلات الأحذية خلال ثلاثينات وأربعينات القرن الماضي كي يرى الزبائن عظام أقدام أطفالهم وهي داخل الأحذية الجديدة التي يرغبون في شرائها لهم (الشكل 98).

**الشكل 98:**

**جهاز اختبار مقاس الأحذية**

شيئاً فشيئاً، بدأت الأضرار المرتبطة بالتعرض للإشعاع تتضح للعلماء. كان أخصائيو الأشعة الطبية هم الفئة الأكثر تعرضاً للإشعاع، وبدأت ترتفع نسبة الإصابة بسرطان الدم leukemia بينهم.

يعود الاهتمام العالمي بالحماية من الإشعاع إلى 1928، حين تأسست "اللجنة الدولية للوقاية من أشعة أكس والراديوم International X-ray and Radium Protection" خلال "المؤتمر الدولي الثاني لعلم الإشعاع Second International Congress of Radiology"، والذي عقد بالعاصمة السويدية

"أستوكهولم". شُكلت تلك اللجنة استجابة للقلق المتنامي حول تأثيرات الإشعاع السلبية على المجتمع الطبي. عُدل اسم ذلك الكيان العلمي في 1950 إلى اسمه الحالي: "الهيئة الدولية للوقاية من الإشعاع International Commission on Radiological Protection (ICRP)". هيئة الوقاية هذه هي منظمة دولية غير حكومية تستمد تأثيرها من مؤهلات وجدارة أعضائها العلمية.

ترتكز منظومة الوقاية من الإشعاع التي توصي بها الهيئة الدولية للوقاية من الإشعاع، والتي تتبنها أغلب دول العالم، على ثلاثة مبادئ أساسية مترابطة: *مسوغ الممارسة justification of practice، تجويد الوقاية optimization of protection، وتحديد الجرعات limitation of doses.*

## مسـوغ الممـارسـة

لا يسمح بأي تعرض للإشعاع ما لم يزيد النفع المتوقع منه (للفرد المتعرض للإشعاع أو المجتمع) على الضرر المحتمل حدوثه. لنأخذ بعض الأمثلة التي قد توضح هذه الفكرة.

يتعرض مريض السرطان الذي يخضع للعلاج بالإشعاع إلى جرعات إشعاعية عالية فعلا، لكن لا يستطيع عاقل أن يعارض هذا الإجراء إذا كان هو العلاج المأمول الوحيد لمثل هذا المرض الخبيث. في المقابل، جرى تحريم استخدام أشعة أكس في اختبار ملائمة الأحذية الجديدة لأقدام الأطفال (التي كانت شائعة في أربعينات القرن الماضي)، بعد إدراك المخاطر الصحية الكبيرة لهذا الإجراء غير الضروري.

## تجويـد الوقايـة

يجب خفض التعرض للإشعاع إلى أدنى قدر يمكن تحقيقه بحصافة. يعرف هذا المبدأ اختصارا باسم "ألارا ALARA"، وهي الحروف الأولى من العبارة

الإنكليزية *ذات المعنى ذاته*: "*As Low As Reasonably Achievable*". يقصد بالحصافة هنا ألا تتعدى التكاليف الإجمالية للإجراءات المطلوبة لخفض التعرض قيمة المنفعة الناتجة. على سبيل المثال، لا يعد من الحصافة أن تُصرف موارد طائلة على تخفيض مصدر للإشعاع هو أصلا ضئيل.

يبدو هذا المبدأ منطقياً تماماً من الناحية النظرية، لكن يصعب على أرض الواقع المقارنة بين قيمة إنقاذ حياة إنسان أو صحته، في كفة، وتكاليف الإجراءات المطلوبة، في الكفة الأخرى.

يطبق مبدأ "ألارا" فعليا بطريقتين. الأولى هي تشجيع استخدام "أفضل تقنية متاحة best available technology"، أي التقنية المعروف في الوقت الراهن أنها تعطي أفضل المنافع بأقل قدر من الأضرار. الأسلوب الثاني هو السعي الدائم نحو خفض تعرض الإنسان للإشعاع—لا مجرد الالتزام بالحدود التي ينص عليها القانون.

## تحديد الجرعات

يجب ألا يزيد تَعرُض الإنسان للإشعاع، من جميع مصادره باستثناء التشخيص والعلاج الطبي، بأي حال من الأحوال عن الحدود المقررة. قدرت الـ "أي سي آر پي" هذه الحدود على النحو التالي: 1 **مسڤ**/سنة لعموم الناس و20 **مسڤ**/سنة للمشتغلين بالإشعاع (كمتوسط خلال فترة خمس سنوات بشرط ألا تزيد الجرعة عن 50 **مسڤ** خلال أي عام).

وضعت هذه الحدود على أساس ضآلة مخاطر الإصابة بالسرطان والأضرار الوراثية التي تسببها هذه الجرعات. من المهم هنا أن ندرك أن هذه الجرعات لا تشكل حدوداً فاصلة بين جرعات الإشعاع الضارة وتلك الآمنة (تفترض منظومة الوقاية أن الجرعة الإشعاعية مهما صغرت قد تُنتج بعض التأثيرات الضارة).

نلاحظ أن حد الجرعة المعين للمشتغلين بالإشعاع هو أعلى من الحد المقرر لعموم الناس. مبرر ذلك أن العاملين بالإشعاع يقبلون تلك المخاطر طواعية، ويجنون في المقابل المنافع الخاصة (الراتب الأعلى، مثلاً)، على عكس الوضع بالنسبة لعموم الناس. على كل حال، لا تزيد المخاطرة المتوقعة للمشتغلين بالإشعاع (في ضوء الجرعات المحددة لهم) عن المخاطرة المقبولة في المهن الأخرى (من مختلف الأخطار المرتبطة بهذه المهنة أو تلك).

الجدير بالذكر هنا أن مبدأ ألارا يتمتع بالغلبة على المبدأين الآخرين (مسوغ الممارسة وتحديد الجرعة).

تركز جهود الوقاية من الإشعاع على أشعة جاما وأشعة أكس: نحن نعرف أن أشعة ألفا وبيتا لا تستطيع أن تنتقل بعيدا عن مصادرها، ولا تتولد على الأغلب النيوترونات الحرة عالية الطاقة إلا داخل المفاعلات النووية.

يمكن بشكل عام خفض الجرعة الإشعاعية التي يتعرض لها الإنسان بثلاثة أشياء: قصر الوقت المقضي بجوار مصدر الإشعاع، البعد عنه، ووضع الحواجز بين الاثنين.

### الـــزمـــــن

تتوقف الجرعة المتراكمة على الزمن الذي يبقى خلاله الفرد في مجال الإشعاع. يُعبر عن هذه العلاقة بالمعادلة الحسابية البسيطة التالية:

$$D = R \times t$$

$D$ : Dose (mSv) الجرعة

$R$ : Dose rate (mSv/hr) معدل الجرعة

$t$ : time (hr) الزمن

نحتاج أحياناً إلى معرفة الفترة الزمنية القصوى التي يمكن للإنسان البقاء خلالها ضمن مجال إشعاعي ما دون أن يتعدى تعرضه للإشعاع حداً مقرراً. يطلق على هذه الفترة اسم *زمن البقاء stay time*. يحسب زمن البقاء من الصيغة التالية:

$$T_S = L \div R$$

$T_S$: Stay time (hr) زمن البقاء

$L$: Dose limit (mSv) حد الجرعة

$R$: Dose rate (mSv/hr) معدل الجرعة

مثال: كم من الوقت يستطيع أحد العاملين بالإشعاع البقاء في مجال إشعاعي ذي 15 مسف/ساعة دون أن يتعرض لأكثر من 1.0 **مسف؟**

زمن البقاء = 1 ÷ 15 = 0.067 ساعة = 4 دقيقة

**المسافة**

تنخفض الجرعة سريعاً بالابتعاد عن مصدر الإشعاع.

تعرف العلاقة الحسابية التي تربط بين شدة الإشعاع عند نقطة ما وبعد هذه النقطة عن مصدر الاشعاع—تعرف بـ*قانون التربيع العكسي inverse square law*:

$$I = \mathrm{K}\frac{1}{d^2}$$

$I$: Radiation intensity شدة الإشعاع

$K$: Unknown constant ثابت غير معلوم

$d$: distance from source البعد عن المصدر

بناءً على ذلك، نستطيع عند معرفة شدة الإشعاع عند نقطة ما أن نحسب شدته عند أي موضع آخر:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

$I_1$: شدة الإشعاع عند النقطة الأولى

$I_2$: شدة الإشعاع عند النقطة الثانية

$d_1$: بعد النقطة الأولى عن المصدر

$d_2$: بعد النقطة الثانية عن المصدر

مثال: إذا كان معدل التعرض على بعد 30 سم من المصدر هو 500 ملي-رونتجن/ساعة، ما هو معدل التعرض على بعد 90 سم من هذا المصدر؟

$$I_1 = 500 \text{ mR/hr}, d_1 = 30 \text{ cm}, \text{ and } d_2 = 90 \text{ cm}$$

$$d_2 = \frac{I_1 d_1^2}{d_2^2} = \frac{\left(500 \frac{\text{mR}}{\text{hr}}\right)(30 \text{ cm})^2}{(90 \text{ cm})^2}$$

$$= \frac{500 \text{ mR/hr}}{9} = 55.6 \text{ mR/hr}$$

نلاحظ أن زيادة المسافة من المصدر أضعافا ثلاث (من 30 سم إلى 90 سم) أدى إلى خفض معدل التعرض بنحو تسعة أضعاف (من 500 مليرونتچن إلى 55.6 مليرونتچن).

## الـوقـــــاء

يقصد بـ "الوقاء shielding" استخدام المواد المناسبة لعزل مصادر الإشعاع.[1]

(1) الترجمة الشائعة للكلمة الإنجليزية "shielding" هي "التدريع"، لكنني أفضل عليها كلمة "الوقاء".

يسهل الوقاء من أشعة ألفا وبيتا. بالنسبة للنوع الأول، تكفي شريحة رقيقة من الورق أو عدة سنتيمترات من الهواء لوقف جسيمات هذه الأشعة. لذلك لا تشكل جسيمات ألفا خطرا إشعاعيا خارجيا. تُعد جسيمات بيتا أكثر نفاذية من جسيمات ألفا. تصنع أوقية بيتا من البلاستيك، الألومنيوم، النحاس، وغيرها من العناصر ذات الأرقام الذرية المنخفضة، وذلك للحد من تولد إشعاع *برمزشترالُنج bremsstrahlung radiation*.

ينتج إشعاع برمزشترالنج عند امتصاص جسيمات بيتا عالية الطاقة (كما في حالة الفوسفور-32 والسترانشيوم-90) بواسطة مواد ذات أرقام ذرية عالية. تتمتع هذه الأشعة الموجية بنفاذية أعلى من جسيمات بيتا التي ولدتها.

فيما يتعلق بالإشعاع الموجي (أشعة جاما وأكس)، ترتبط فعالية الوقاء بثلاثة عوامل رئيسة: طاقة الإشعاع، كثافة المادة الوقائية، وسمك الوقاء. يمكن التعبير عن هذه العلاقات بصورة تقريبية على النحو التالي:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

$I$: شدة الإشعاع بعد المرور من الوقاء

$I_0$: شدة الإشعاع الأصلية

$\mu$: معامل يعتمد على طاقة الإشعاع وكثافة المادة الوقائية

$x$: سمك الوقاء

على عكس الحال مع جسيمات ألفا وبيتا، لا يستطيع أي وقاء أن يوقف تماماً جميع فوتونات الأشعة الموجية. لكن الوقاء السميك من مادة كثيفة يضعف بشكل كبير هذه الأشعة.

تستخدم مواد كثيرة للوقاء من أشعة جاما وأكس. الرصاص من أول المواد

التي استخدمت كوقاء من الإشعاع الموجي، ومازال هو الأكثر شيوعا لهذا الغرض. يعود ذلك إلى كثافته العالية، كلفته المنخفضة، وسهولة العمل به. الحالة الوحيدة التي لا يمكن فيها استخدام الرصاص كمادة وقائية هي عند الحاجة إلى قياس النشاط الإشعاعي بدقة بالغة (على سبيل المثال، التأريخ بالكربون carbon dating): الرصاص الطبيعي هو خليط من أربعة نظائر غير مشعة بالإضافة إلى آثار من الرصاص-210 المشع، والذي يبث أشعة جاما ذات طاقة 0.0465 **مإف**. مع أن قطعة الرصاص الطبيعي تعمل مثل "وقاء ذاتي self-shielding" ضد أشعة جاما، فإن بعضاً من هذه الأشعة يهرب من سطح القطعة.

عمر النصف الخاص بالرصاص-210 هو 22.3 سنة. لذلك، يستخدم الرصاص القديم المستخرج قبل أكثر من 300 سنة (أي الذي مر عليه نحو 13 عمرا نصفيا) كوقاء في عمليات حساب النشاط الإشعاعي فائقة الدقة.

لنأخذ بعض الآن بعض الأمثلة التي توضح كيف يجرى الاعتماد على عوامل الزمن، المسافة، والوقاء لتوفير أفضل حماية ممكنة للمشتغلين بالإشعاع.

مثال 1: يوفر وقاء من الرصاص ذو سمك 10 سم الحماية الجيدة للمشتغلين بمصدر ذو نشاط إشعاعي $1.85 \times 1010$ بيكريل، ويبث أشعة جاما ذات طاقة 1.8 مليون إلكترون ڤولت، إذا كانوا يتعرضون لهذا المصدر لفترة لا تتجاوز الأربعة أيام من على بعد 50 سم من هذا المصدر.

مثال 2: توفير الحماية الكاملة للمشتغلين بمصدر ذو 3.7 **بك**، يصدر أشعة جاما ذات 1.5 **مإف**، ثماني ساعات في اليوم، على مسافة متر واحد من المصدر المشع، يتطلب وقاءً من الرصاص لا يقل سمكه عن 16.25 سم.

يستخدم الماء كمادة وقائية في محطات الطاقة النووية ووحدات التعقيم الطبي وحفظ الأطعمة بالإشعاع. يتميز وقاء الماء بأنه شفاف يظهر المصدر المشع كما أنه يحيط بانطباق حول المصدر المراد الاتقاء ضده.

## تقييم المخاطرة الإشعاعية

كم من الإشعاع يعد آمنا؟ للإجابة على مثل هذا السؤال طور العلماء وسائل موضوعية تعرف باسم *تقييم المخاطر الصحية البيئية environmental risk assessment*. فما هي المخاطرة *risk*، وكيف يجرى تقييمها علميا؟

يستخدم المتخصصون في إدارة المخاطر البيئية كلمتي *خطر hazard* و*مخاطرة risk* للدلالة على مفهومين متمايزين وإن كان مرتبطين (الشكل 99). يقصد بالأخطار الأشياء الموجودة بالبيئة التي قد تتسبب في تأثيرات ضارة على صحة الإنسان إذا ما تعرض لها، مثل وجود الإشعاع والكيماويات السامة. أما المخاطرة، فيقصد بها فرصة أو احتمال حدوث هذه التأثيرات وشدتها، مثل احتمال حدوث الوفاة أو الإصابة بالسرطان المميت بسبب التعرض للإشعاع. ينطوي مفهوم المخاطرة بهذا المعنى على عنصرين: شدة الضرر (مثل احمرار الجلد، الإصابة بالسرطان، أو الموت) واحتمال حدوثه (مستبعد، محتمل، أو مرتقب).

لا تخلو الحياة من المخاطرة، بل ويرى الكثيرون أن الحياة بلا مخاطرة هي حياة فقيرة، مملة، وعقيمة. بل قد يسعى الناس إلى المخاطرة سعيا إذا كانت ضرورية لتحقيق شيء مهم لهم (الشكل 100). في المقابل، لا يحب الناس تحمل المخاطرة التي تُفرَض عليهم، خاصة عندما لا يصاحبها منفعة هامة لهم (الشكل 100).

بمناسبة الحديث عن إدراك المخاطرة، يسود بين عموم الناس الاعتقاد بأن الإنسان يجازف أكثر وهو في ريعان شبابه، وأن الأولاد والرجال هم بشكل عام أكثر ميلا للمجازفة من الصبايا والنساء. ربما يكون ذلك، لو صح، واحدا من العوامل التي تساهم في حدوث الفجوة الأزلية بين الأجيال وتلك التي بين "أهل المريخ" و"أهل الزهرة".[1] حاولَت دراسات علمية متعددة اختبار هذه الآراء، لكن توضيح نتائجها يطول، وقد يبدو هنا "خارجا عن السياق".

(1) الكناية مستقاة من كتاب "جون جراي John Gray" الشهير بعنوان "الرجال من المريخ، النساء من الزهرة Men Are from Mars, Women Are from Venus".

لا تهدف إدارة المخاطر البيئية إلى إزالة المخاطرة تماما، ولا يمكن لها، بل تخفيضها إلى *المستوى المقبول أو المحتمل acceptable or tolerable level*. ما هي إذ مستويات المخاطرة المقبولة؟ لا توجد إجابة "واحدة تناسب الجميع" لهذا السؤال، بل لا توجد إجابة "علمية بحتة" له. نحن نعرف جيدا أن ما هو "مقبول" في مجتمع ما قد لا يكون كذلك في مجتمع آخر. يفترض أن يجرى تحديد المستويات المقبولة لمختلف المخاطر البيئية من خلال النقاش العام بين كل *أصحاب الشأن stakeholders* في المجتمع، وهناك تتدخل جميع العوامل المجتمعية—اقتصادية كانت أو سياسية.

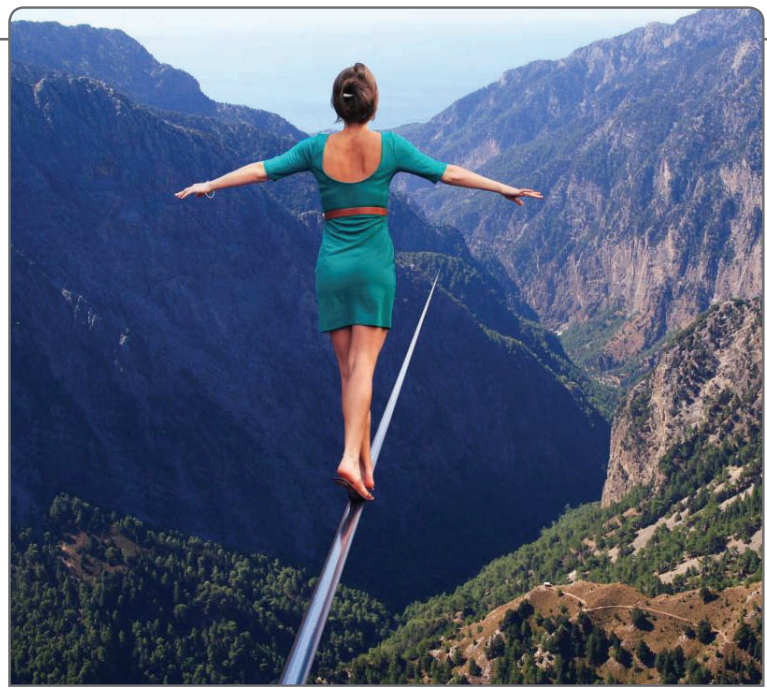
**الشكل 99:**

**الفرق بين مفهوم الخطر والمخاطرة**

تتضمن عملية إدارة مخاطر الصحة البيئية المراحل التالية: إدراك المخاطرة risk perception، تقدير المخاطرة risk estimation، تقييم المخاطرة risk evaluation، ضبط المخاطرة risk control، والإعلام عن المخاطرة risk communication.

الشكل 100:

يتقبل الناس المخاطرة التي من اختيارهم وتحقق شيئاً مهماً لهم



الشكل 101:

التدخين السلبي هو أحد أمثلة المخاطرة القسرية

يميز الأطباء، كما نعلم، بين صورتين من المرض: الحادة والمزمنة. كذلك، يقسم العلماء المخاطر البيئية إلى صنفين رئيسين: *المخاطر الحادة acute risks* و*المخاطر المزمنة chronic risk*.

تشير المخاطرة الحادة إلى الأضرار الصحية التي قد تحدث للإنسان بسبب التعرض لجرعات عالية من العامل الضار (الإشعاع، مثلا) ضمن فترة زمنية محدودة. تقع هذه الأضرار، في العادة، بعد فترة قصيرة من التعرض. في المقابل، تشير المخاطرة المزمنة إلى تلك الأضرار التي تقع بسبب التعرض لجرعات صغيرة من العامل الضار لكنه يتكرر خلال فترة زمنية ممتدة (ربما طوال حياته). غالبا ما تظهر الأضرار المزمنة بعد فترة طويلة من بداية التعرض. يعرف النوع الأول من تأثيرات الإشعاع الصحية باسم *التأثيرات الحتمية deterministic effects*؛ الثاني باسم *التأثيرات الاحتمالية stochastic effects*. يطلق على الوقت المنقضي بين التعرض للإشعاع وظهور التأثيرات، حتمية كانت أو احتمالية، اسم *فترة الكمون latency period*.

## التأثيـــرات الحتميـــة

**تضم التأثيرات الحتمية للإشعاع كل ما يلي:**

**العـــين** Eye

- عتمة العين الملحوظة Detectable opacities؛
- تكون الساد Cataract؛

**الجـــلد** Skin

- أحمرار الجلد Skin redness؛
- سقوط الشعر المؤقت Temporary hair loss؛
- موت الجلد وتندبه Skin death and scarring؛

**الخصيــة** Testis

- العقم المؤقت Temporary sterility؛
- العقم الدائم Permanent sterility؛

**المبيــض** Ovary

- العقم الدائم Permanent sterility؛
- الأمعاء والمعدة Gastrointestinal
- فقدان البطانة المخاطية Mucosal lining؛
- نخاع العظم Bone marrow
- وانخفاض انتاج خلايا الدم blood cells.

تحدث التأثيرات الحتمية من الجرعات التي تسبب موت الخلايا الحية. ما المقصود هنا بموت الخلية؟

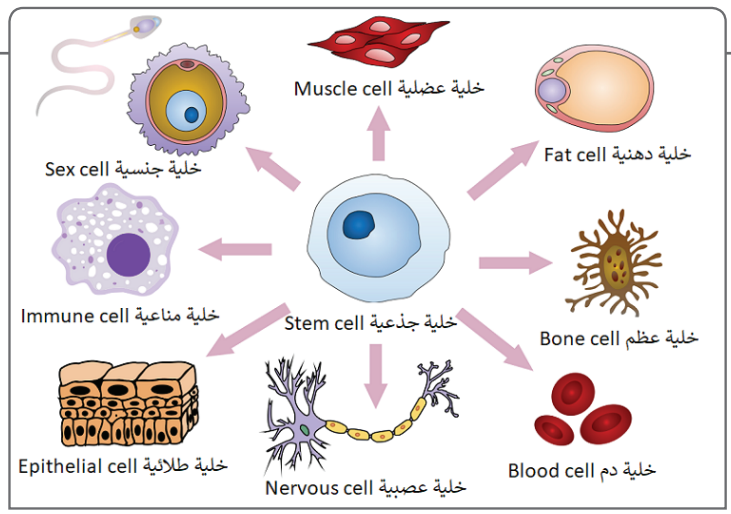
يقسم العلماء الخلايا الحية إلى نوعين رئيسين: الخلايا المتشكلة differentiated cells والخلايا غير المتشكلة undifferentiated cells (الشكل 102).

تشير الخلايا المتشكلة إلى الخلايا التي تقوم بوظائف متخصصة في الجسم، مثل خلايا الدم، الخلايا العصبية، والخلايا الجنسية (الحيوانات المنوية والبويضات). لذلك يشار إليها أيضا باسم *الخلايا المتخصصة specialized cells*. في المقابل، يقصد بالخلايا غير المتشكلة تلك الخلايا الناشئة التي لم تتخصص بعد. تعرف الخلايا غير المتشكلة أيضا باسم *الخلايا الجذعية stem cells*. توجد الخلايا الجذعية في الأجنة وأغلب أعضاء الجسم. للخلايا الجذعية وظيفتان رئيستان: (1) التحول إلى الخلايا المتخصصة من خلال العملية التي تسمى *التشكل differentiation* (الشكل 103)؛ (2) "التكاثر proliferation" من أجل النمو وتعويض الخلايا الميتة والمصابة من خلال *عملية الانقسام الخلوي*

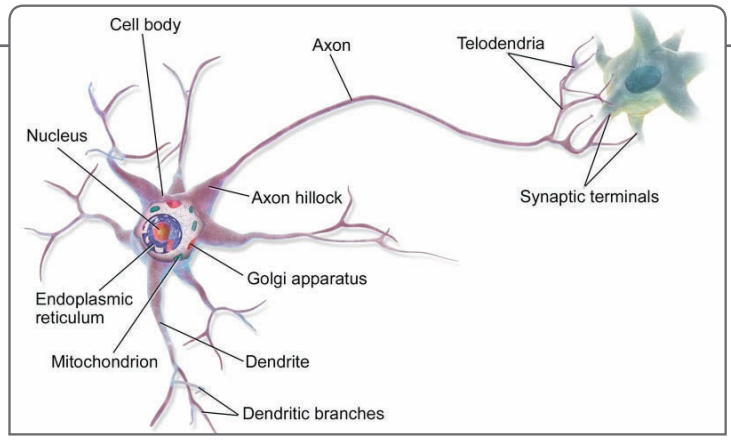
*cell division*. ولأن الخلايا المتخصصة تتكون من تشكل الخلايا الجذعية، توصف الأولى بـ "*الناضجة mature*" والأخيرة بـ "*غير الناضجة immature*". يجدر بالذكر أن الكثير من الخلايا المتشكلة لا تتكاثر، كذلك هو حال بعض الخلايا الجذعية، مثل *خلايا عضلة القلب cardiac muscle cells*.

**الشكل 102 :**

**أمثلة من الخلايا المتشكلة وغير المتشكلة**




**الشكل 103 : التركيب الدقيق للخلية العصبية**



تموت الخلية الحية عندما تفقد قدرتها على أداء وظائفها (المتخصصة في حالة الخلايا المتشكلة، التكاثر بالانقسام في الخلايا غير المتخصصة).

لدى الخلايا الحية آليات لإصلاح الأضرار. يعتقد العلماء أن التأثيرات الحتمية لا تظهر إلا إذا زادت جرعة العامل المضر، مثل الإشعاع، عن حد معين، يعرف باسم العتبة أو *الحد الفارق threshold*، وتزداد شدة هذه التأثيرات مع زيادة الجرعة الممتصة. الجدول 2 يوضح الحدود الفارقة وفترات الكمون لأهم تأثيرات الإشعاع الحتمية.

## الجـــدول 2:

### الجرعات الفارقة وفترات الكمون لبعض تأثيرات الإشعاع الحتمية

| النسيج | الجرعة الفارقة | فترة الكمون |
|---|---|---|
| **عدسة العين** | | |
| عتمة العين الملحوظة | 2 - 0.5 | أقل من سنة |
| تكون الساد | 0.5 | أقل من سنة |
| **الجلد** | | |
| احمرار الجلد | 6 - 3 | 1 - 4 أسبوع |
| سقوط الشعر المؤقت | 4 | 2 - 3 أسبوع |
| موت الجلد وتندبه | 10 - 5 | 1 - 4 أسبوع |
| **الخصية** | | |
| العقم المؤقت | 0.15 | 3 - 9 أسبوع |
| العقم الدائم | 6 - 3.5 | 3 أسبوع |
| **المبيض** | | |
| العقم الدائم | 6 - 2.5 | أقل من أسبوع |
| **المعدة والأمعاء** | | |
| فقدان البطانة المخاطية | 6 | 6 - 9 أيوم |
| **نخاع العظم** | | |
| انخفاض إنتاج خلايا الدم | 0.5 | 1 - 2 شهر |

* معدل حدوث 1 % بناء على منشور ICRP رقم 103 (2007)

## التأثيــرات الاحتماليــة

تشمل التأثيرات الاحتمالية (1) إحداث السرطان و(2) التغيرات الوراثية. تحدث التأثرات الاحتمالية نتيجة لإحداث الإشعاع لتغيرات في تركيب الحمض النووي لا تؤدي إلى موت الخلية. يعرف مثل هذا التغير باسم *الطفرة mutation*. تنتقل تلك الطفرات إلى الخلايا الناتجة من انقسام الخلية الأم التي حدثت بها الطفرة. فإذا ما حدثت الطفرة في الخلايا التي تنتج الحيوانات المنوية أو البويضات فإنها قد تنتقل إلى النسل.

توصف هذه التأثيرات بالاحتمالية لأننا لا نستطيع أن نحدد أي الأفراد ستظهر بهم هذه التأثيرات، لكننا نستطيع أن نعرف احتمال حدوثها (أي نسبة الأفراد الذين سيعانون من هذه التأثيرات عند جرعة إشعاعية محددة).

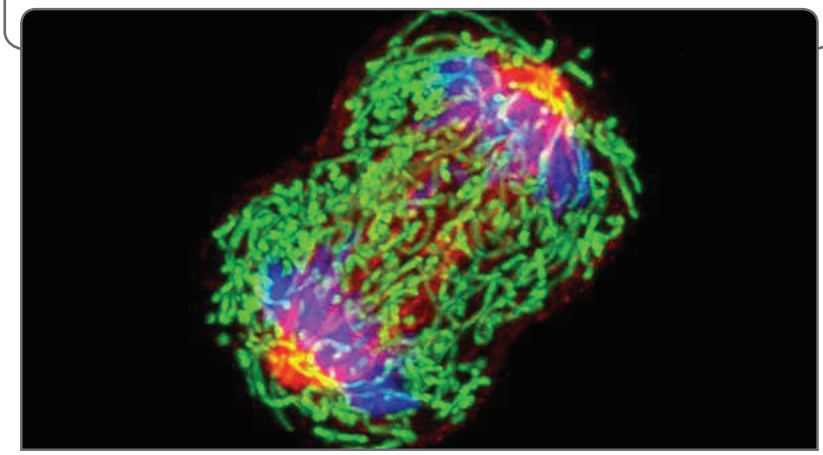
## إحــداث الســرطــان

### ما هو السرطان؟

في حالتها الطبيعية، تنقسم خلايا الجسم لتعويض الخلايا التي تموت. يشير السرطان إلى مجموعة من الأمراض التي تنشأ بسبب انقسام مجموعة من الخلايا الحية دون ضابط (الشكل 104). بالإضافة لذلك، تختلف تلك الخلايا السرطانية عن الخلايا المحيطة من عدة نواحي. على سبيل المثال، تكون الخلايا السرطانية أقرب في شكلها إلى الخلايا غير المتشكلة. قد يؤدي تكاثر الخلايا السرطانية إلى تكون *ورم خبيث malignant tumor* (الشكل 105). يوصف هذا الورم بالخبيث لأنه يستطيع غزو الأنسجة المجاورة. كما أنه قد يدفع الخلايا الطبيعية لتكوين أوعية دموية لتمده بالمغذيات والأوكسجين وتخلصه من النفايات. تستطيع بعض الخلايا السرطانية "الاختباء" من الجهاز المناعي في جسم الإنسان.

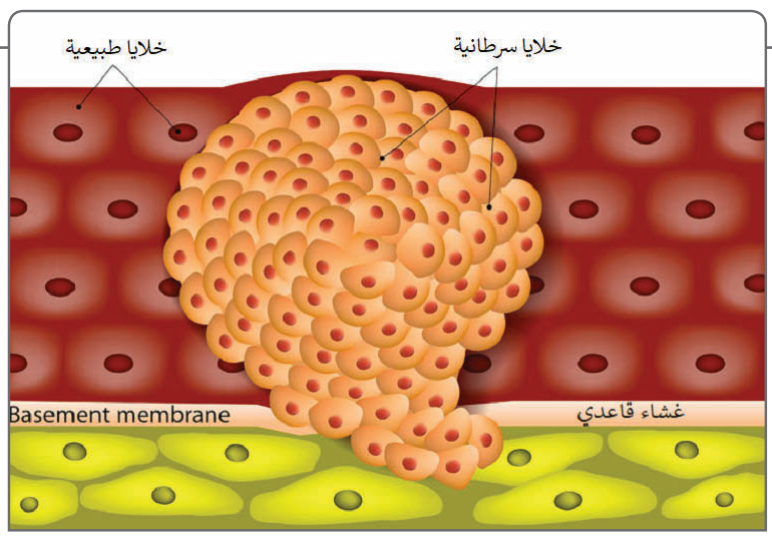
**الشكل 104 :**

**إحدى خلايا سرطان الثدي أثناء الانقسام**



يمكن أن يحدث السرطان تقريباً في أي جزء من الجسم، وقد ينتقل من مكانه الأصلي إلى أماكن أخرى. هناك أكثر من 100 نوع من السرطان. تسمى أنواع السرطان عادة على اسم العضو أو النسيج الذي يحدث به السرطان. على سبيل المثال، سرطان الرئة يبدأ في خلايا الرئة، وسرطان المخ يبدأ في خلايا المخ.

**الشكل 105 : الـورم الخبيـــث**



يعتقد العلماء أن السرطان يحدث نتيجة لحدوث طفرات في الجينات *genes* الخاصة بنمو وانقسام الخلية. ومن ثم فإن العوامل التي تغير في تركيب الحمض النووي، مثل دخان السجائر والإشعاع، تستطيع أن تحدث السرطان.

يعرف العلماء أن الجرعات الكبيرة من الإشعاع المؤين تزيد من فرصة الإصابة بالسرطان في الإنسان والحيوان. ليس مقبولا بالطبع تعريض الإنسان عن قصد للإشعاع المؤين من أجل دراسة تأثيراته الضارة، فكيف عرف العلماء بقدرة الجرعات الكبيرة من هذا الإشعاع على إحداث السرطان في الإنسان؟ من خلال ملاحظة الزيادة في نسبة الإصابة بالسرطان في المجموعات التي تعرضت للإشعاع المؤين لسبب أو آخر. تشمل هذه المجموعات ما يلي:

- الناجين من القنبلتين الذرتين اللتين ألقيتا على هيروشيما وناجاساكي في 1945؛
- المرضى الذين تعرضوا للإشعاع الخارجي من أجل علاج أو تشخيص بعض الأمر اض؛
- أهل "جزر مارشال" ممن تعرضوا للإشعاع الناتج من اختبارات الأسلحة النووية؛
- الساكنين الذين تعرضوا لمستويات عالية من الرادون داخل منازلهم؛
- العاملين في صناعة الدهان المضيء ممن تعرضوا للراديوم- 226؛
- ومرضى العظام الذين عولجوا بالراديوم- 224.

مستويات المخاطرة بالسرطان المقدرة من هذه الدراسات هي مبنية بشكل كبير على التعرض لجرعات عالية من الإشعاع خلال فترات قصيرة. لكن معظم الناس يتعرضون لجرعات صغيرة على مدار فترة ممتدة من الوقت أو حتى طوال حياتهم.

لا توجد أدلة علمية حاسمة عن تأثير الجرعات المنخفضة من الإشعاع. لذلك تفترض الهيئات المسؤولة عن الحماية من الإشعاع، من باب الاحتياط، أن العلاقة بين جرعة الإشعاع واحتمال حدوث السرطان المحسوبة من البيانات الخاصة بالجرعات الكبيرة "تنسحب" على أدنى الجرعات. تعرف هذه العلاقة الرياضية باسم *النموذج الخطي دون فارق* (خدف) *linear non-threshold model* (LNT) (الشكل 106). يفترض هذا النموذج أن أي جرعة من الإشعاع مهما صغرت تزيد من احتمال حدوث السرطان في الأشخاص الذين يتعرضون لها، وأن الزيادة في الجرعة بقدر ما (10 مسف، مثلا) تزيد من هذا الاحتمال بمقدار محدد لا يتغير سواء كانت الجرعة كبيرة أو صغيرة (قدرت هذه المخاطرة بـ 1/20000).[1]

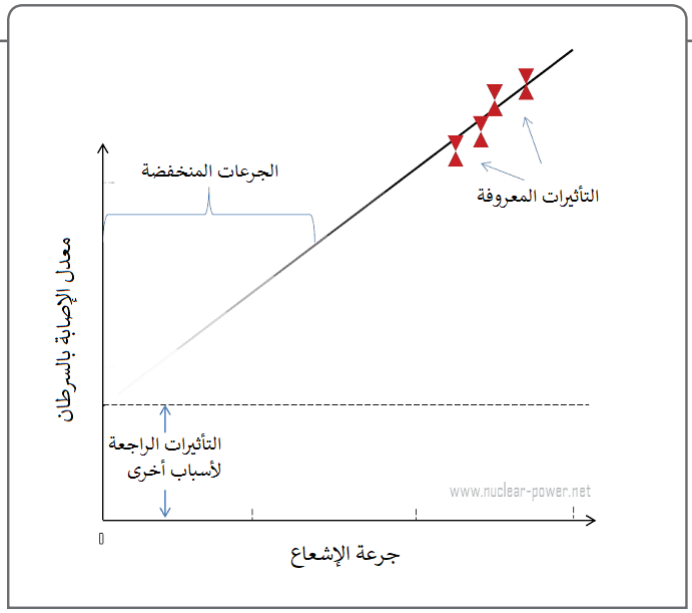
النموذج الخطي دون فارق هو محل جدل كبير بين العلماء. يقول المعارضون أن الفرق بين الجرعات الكبيرة المعروف أنها تسبب السرطان والجرعات الضئيلة التي يتعرض لها الإنسان عادة هو فرق هائل (اضعاف مضاعفة). كما يشيرون إلى أن الناس الذين يعيشون في مناطق ذات خلفية إشعاعية عالية (مثلا، في "جبال روكي Rocky Mountains" بالولايات المتحدة) لا تزيد بينهم أضرار الإشعاع عن أولئك الذين يعيشون في المناطق منخفضة الإشعاع (في مستوى البحر، على سبيل المثال). في المقابل، يحاج المؤيدون لنظرية خدف أن "ضربة" مفردة للحمض النووي تستطيع أن تسبب الطفرة بالخلية الحية، ومن ثم إحداث السرطان في مرحلة لاحقة. على كل حال، ما زالت الهيئات المسؤولة عن الحماية من الإشعاع تتبنى هذه النظرية، وفيما يلي أهم هذه الهيئات:

- اللجنة العلمية للأمم المتحدة لتأثيرات الإشعاع الذري United Nation Scientific Committee of the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)؛

(1) لا يستخدم العلماء عند دراسة العلاقة بين الجرعة الإشعاعية واحتمال حدوث السرطان وحدة الچراي (الجرعة الممتصة) وإنما وحدة السيڤرت (الجرعة المكافئة).

- لجنة التأثيرات البيولوجية للإشعاع المؤين Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR)؛
- المفوضية الدولية للحماية الإشعاعية International Commission on Radiological Protection (ICRP)؛
- والمجلس الوطني للحماية من الإشعاع وقياساته (الولايات المتحدة) US National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP).

**الشكل 106 : العلاقة المفترضة بين الإشعاع والإصابة بالسرطان وفقا للنموذج الخطي دون فارق**




بناء على الافتراضات السابقة، قدر العلماء أن الجرعة الإشعاعية التي مقدارها 10 **ملي**سف من شأنها أن تزيد من مخاطرة الإصابة بالسرطان المميت بنحو واحد في 2,000,000. هذا يعني أنه في مجتمع من أربعة ملايين شخص، يتوقع أن يموت منهم في النهاية نحو مليون شخص بالسرطان (لمختلف الأسباب

غير المحددة). أما إذا ما تعرض كل واحد من هؤلاء الأربعة ملايين لجرعة إضافية من الإشعاع المؤين مقدارها 10 μسڤ، فإننا نتوقع أن يموت شخصان إضافيان بالسرطان نتيجة لهذا التعرض. قد نتفق جميعا على أن مثل هذه الزيادة في المخاطرة هي بالطبع ضئيلة أو مقبولة (مقابل الفوائد المصاحبة لهذا التعرض).

القياس الدقيق للجرعة الإشعاعية هام جدا في عملية تقدير مخاطر الإشعاع. نحن نعرف الآن أن المخاطرة بالسرطان بسبب التعرض للإشعاع تحسب بناء على البيانات المتوفرة عن الناجين من القصف النووي لهيروشيما وناچاساكي و"سحب extrapolation" العلاقة الرياضية على جميع الجرعات (فرضية خدڤ). لكن بعض أنسجة الجسم أكثر حساسية للإشعاع من البعض الآخر. كيف إذ نحسب المخاطرة بشكل دقيق في حالة التعرض غير المتجانس للإشعاع (كما هو الحال أثناء الاستخدامات الطبية)؟ في 1975، ابتكر "ولفچانچ جاكوبي Wolfgang Jacobi" لهذا الغرض *مفهوم الجرعة الفعالة effective dose*. عملية حساب الجرعة الفعالة معقدة نوعا ما. لذلك، سنكتفي هنا بإيضاح الفكرة الرئيسة.

لحساب الجرعة الفعالة، قسم العلماء جسم الإنسان إلى مجموعة من الأعضاء والأنسجة، وأعطوا كل واحد من هذه الأنسجة نسبة أو كسراً يسمى *عامل الترجيح النسيجي* ($W_T$) *tissue weighting factor*. تتناسب قيمة عامل الترجيح لكل نسيج مع مساهمة ذلك النسيج في مجمل الضرر الإشعاعي الناتج من تعرض الجسم كله لقدر معين من الإشعاع بشكل متجانس. المثال التالي يوضح مفهوم عامل الترجيح النسيجي. تتسبب جرعة قدرها 30 مسڤ لكامل الجسم احتمال ما لإحداث السرطان؛ تسبب جرعة قدرها 1000 مسڤ للغدة الدرقية thyroid gland نفس القيمة العددية لاحتمال إحداث سرطان الدرقية. يجعل هذا قيمة عامل الترجيح للغدة الدرقية 0.03. تضبط عوامل الترجيح النسيجي بحيث يكون مجموعها يساوي واحداً صحيحاً. الجدول 3 يبين قيم عوامل الترجيح النسيجي التي أقرتها المفوضية الدولية للحماية الإشعاعية في 1977 ثم عدلتها في1990.

## الجدول 3:
## عوامل الترجيح النسيجية المقررة
## من المفوضية الدولية للحماية الإشعاعية

| العضو أو النسيج | عامل الترجيح النسيجي | |
|---|---|---|
| | 1977 | 1990 |
| الغدد التناسلية Gonads | 0.25 | 0.20 |
| نخاع العظم الأحمر Red bone marrow | 0.12 | 0.12 |
| القولون Colon | | 0.12 |
| الرئة Lung | 0.12 | 0.12 |
| المعدة Stomach | | 0.12 |
| المثانة Bladder | | 0.05 |
| الثدي Breast | 0.15 | 0.05 |
| الكبد Liver | | 0.05 |
| البلعوم Esophagus | | 0.05 |
| الدرقية Thyroid | 0.03 | 0.05 |
| الجلد Skin | 0.01 | 0.01 |
| سطح العظم Bone Surface | 0.03 | 0.01 |
| المتبقي Remainder | 0.30 | 0.05 |

**تحسب متوسط الجرعة المكافئة لكل نسيج أو عضو من المعادلة التالية:**

$$H_T = \sum W_R \cdot D_{T,R}$$

$H_T$: Equivalent dose الجرعة المكافئة

$W_R$: Radiation weighting factor عامل الترجيح الإشعاعي

$D_{T,R}$: Average absorbed dose to tissue $T$ متوسط الجرعة الممتصة للنسيج

**المعادلة السابقة تعني بشكل مبسط ما يلي:**

الجرعة المكافئة لنسيج معين = الجرعة المكافئة لهذا النسيج من أشعة ألفا + الجرعة المكافئة من أشعة بيتا + الجرعة المكافئة من أشعة جاما + الجرعة المكافئة من أشعة إكس + الجرعة المكافئة من النيوترونات

**ثم تحسب الجرعة الفعالة من المعادلة التالية:**

$$E = \sum W_T \cdot H_T$$

$E$: Equivalent dose الجرعة المكافئة

$W_T$: Tissue weighting factor عامل الترجيح النسيجي

$H_T$: Average absorbed dose to tissue T متوسط الجرعة المكافئة للنسيج

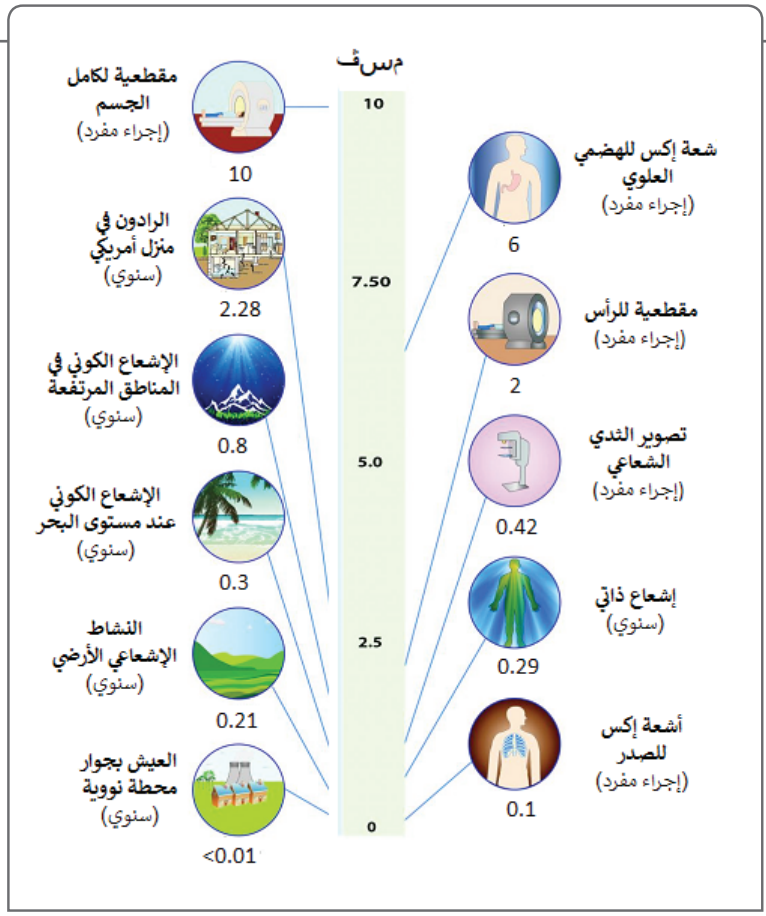
**يمكن ترجمة المعادلة السابقة كالتالي:**

الجرعة الفعالة = (الجرعة المكافئة للنسيج الأول × معامل الترجيح للنسيج الأول) + (الجرعة المكافئة للنسيج الثاني × معامل الترجيح للنسيج الثاني) + ... + (الجرعة المكافئة للأنسجة المتبقية × معامل الترجيح للأنسجة المتبقية)

الشكل 107 يوضح بعض الأمثلة على الجرعات الإشعاعية التي يتعرض لها الإنسان خلال حياته.

**الشكل 107 :**

**أمثلة على الجرعات الإشعاعية التي يتعرض لها الإنسان**



# إطلاق المارد

## تسخير
## الطاقة النووية

# إطلاق المارد
# تسخير الطاقة النووية

**الإنشطـــار النـــووي**

بدأت تجارب قصف نوى ذرات العناصر بالجسيمات تحت الذرية في بداية ثلاثينات القرن الماضي، أولا بجسيمات ألفا ثم بالبروتونات. ولكون الجسيمات المستخدمة موجبة الشحنة، كانت تقابل مقاومة كبيرة من النوى المستهدفة (الموجبة الشحنة أيضا). حتى عالية السرعة منها لم تكن تنجح في ضرب أهدافها إلا مرة من كل مليون محاولة. أما أغلبها، فكان يتلافى هذه النوى.

في 1932، اكتشف الفيزيائي البريطاني "جيمس تشادويك James Chadwick" (1891 - 1974) النيترون (عديم الشحنة). بعد ذلك بسنتين، جاءت إلى الفيزيائي الإيطالي "إنريكو فيرمي Enrico Fermi" (1901 - 1954) **فكرة نيرة:** استخدام النيوترونات في استحداث تحولات نووية اصطناعياً، بديلاً عن جسيمات ألفا والبروتونات (موجبة الشحنة) التي كانت تستخدم من قبل في مثل هذه التجارب. ظن فيرمي أن النيوترونات ستتمكن بسهولة من اختراق النوى دون مقاومة لكونها عديمة الشحنة.

قام فيرمي وزملاؤه بقصف أغلب العناصر المعروفة في ذلك الوقت بالنيوترونات. كان اليورانيوم، أثقل العناصر المعروفة في ذلك الوقت، أحد العناصر التي قام فيرمي بقصفها. تمكن فيرمي وزملاؤه من تحويل اليورانيوم إلى عنصر أو بضعة عناصر أخرى. اعتقد فيرمي أن اليورانيوم قد تحول نتيجة للقصف بالنيوترونات إلى عناصر أثقل منه (*عناصر ما بعد يورانية transuranic*). لكن بعض الفيزيائيون المعاصرون شككوا في إمكانية وجود مثل تلك العناصر. كما اكتشف

هان وزملاؤه أن "النيوترونات البطيئة" كانت تعطي أفضل النتائج.[1] أرجعوا ذلك إلى أن النيوترونات البطيئة تمضي فترة أطول بجوار النوى مما يزيد من فرصة "ابتلاعها" بواسطة تلك النوية. وقد وجدوا أن الهيدروجين والكربون مفيدان في إبطاء النيوترونات.

نال فيرمي في 1938 جائزة نوبل على اكتشافه هذا. كانت زوجة فيرمي، "لورا كابون Laura Capon"، يهودية.

في آخر 1938، أراد الكيميائي الألماني "أوتو هان Otto Hahn" (1879 - 1968) حسم هذا الخلاف؛ فقام، بمساعدة زميله وصديقه الكيميائي الألماني "فريتس شتروسمان Fritz Straußmann" (1902 - 1980)، بإعادة تجارب فيرمي على اليورانيوم. على غير المتوقع، اكتشف هان أن قصف اليورانيوم بالبروتونات أنتج نظائر الباريوم barium، الذي تحوي نواته 56 بروتونا وتعادل في حجمها نصف حجم نواة اليورانيوم (رقمه الذري 92). بذلك، يعد أوتو هان أول من اكتشف الانشطار النووي *nuclear fission*، وقد منح على اكتشافه هذا جائزة نوبل في 1944.

لم يستطع هان (الكيميائي) تفسير هذه النتائج من الناحية الفيزيائية، فطلب مساعدة زميلته السابقة الفيزيائية النمساوية "ليزا مايتنر Lise Meitner" (1878 - 1968).

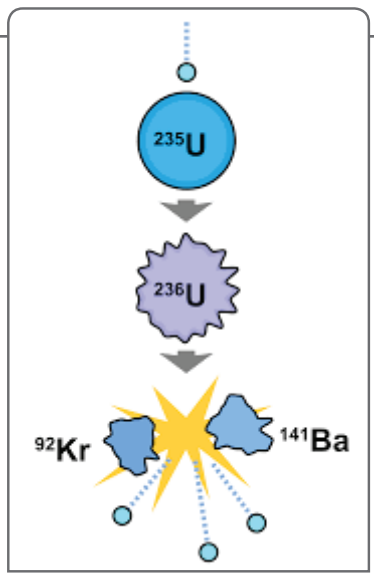
في فبراير 1939، نشرت ليزا مايتنر، بالاشتراك مع ابن أخيها، الفيزيائي "أوتو فريش Otto Frisch"، ورقة علمية تفسر فيها النتائج التي حصل عليها هان. اقترحا أن نواة اليورانيوم التقطت بروتونا، وهو أمر سبق ملاحظته في تحولات أخرى. لكن النواة الناتجة لم تكن مستقرة، وانشطرت إلى نصفين: نواة باريوم

(1) يقصد بالنيترونات البطيئة هنا تلك التي تتعادل طاقتها الحركية مع متوسط طاقة جسيمات المادة المحيطة، وتصل سرعتها إلى نحو 2,200 متر في الثانية، أي أسرع بكثير من الطلقات النارية.

(رقم ذري 56) ونواة كريبتون krypton (رقم ذري 36)، والذي لم يتمكن هان من ملاحظته لأنه غازي (في درجة حرارة الغرفة)، وقد تسرب من أجهزة التجربة (الشكل 108).

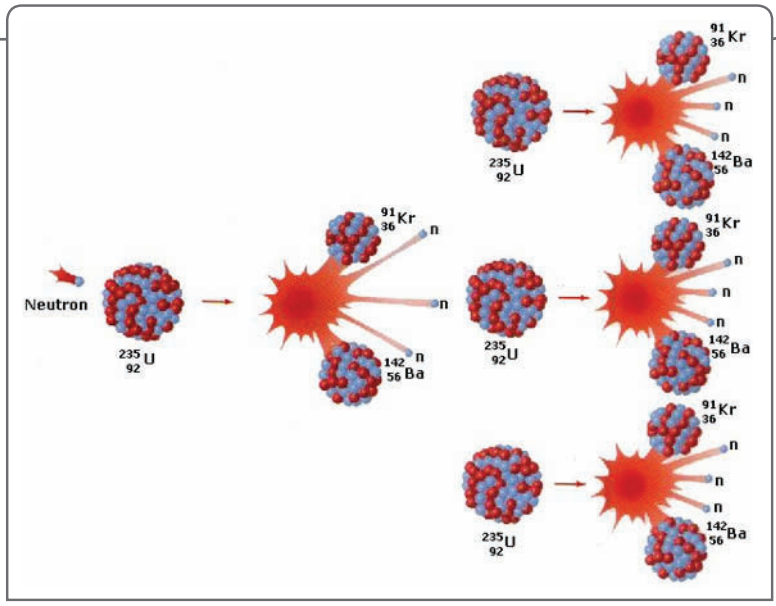
**الشكل 108:**

**انشطار نوى اليورانيوم عند قصفها بالنيوترونات**




بعد الإعلان عن انشطار اليورانيوم بوقت قصير، تبين انطلاق نيوترونات قليلة أثناء الانشطار. جعل هذا كثيرا من العلماء يدركون إمكانية استغلال الطاقة النووية من خلال *إحداث تفاعل مسلسل chain reaction*، يقوم فيه أحد هذه النيوترونات بشطر نواة أخرى، وهكذا (الشكل 109).

**الشكل 109 : تفاعل الانشطار المسلسل**




إذا أمكن التحكم في هذا التفاعل المسلسل بحيث أن كل انشطار يؤدي إلى انشطار واحد فقط في "الجيل" التالي، فإننا نستطيع أن نحصل على مستوى مستقر من الطاقة يمكن استخدامها في توليد الكهرباء. يوصف هذا الوضع بـ*الحرج* أو *الحاسم critical*، أو يقال إن *الحراجة* أو *الحسومة criticality* قد تحققت. أما إذا أمكن الحصول على زيادة سريعة جدا في عدد الانشطارات، يصبح لدينا انفجارا نوويا مهولا، ويطلق على هذا الوضع اسم فوق-الحراجة أو *فوق-الحسومة supercriticality*.

يتذكر مكتشف الانشطار النووي، أوتو هان، حديثا دار بينه وبين زميله فريتس شتراسمان حول مخاوفهما من احتمال بناء قنبلة نووية. يذكر هان أنهما قد واسيا نفسيهما بأن امتلاك مثل هذا السلاح لن يكون ممكنا قبل عشرين عاماً، ومن ثم لا فرصة لاستخدامه في الحرب الدائرة.[1] لم يكن هذا هو رأي أقران هان من العلماء

(1) تزعم بعض الروايات الأمريكية أن هان خدم في الجيوش الألمانية خلال الحرب العالمية الأولى في فرق الغازات السامة.

الأوربيين الذين هاجروا إلى الولايات المتحدة، وسيثبت التاريخ أن هان وشتراسمان لم يكنا محقين في اطمئنانهما. وكما قال هان نفسه بعد عدة سنين من انتهاء الحرب العالمية الثانية باستخدام القنبلة الذرية، "في وقت الحرب، تأخذ كل الوسائل التي يمكن استخدامها لإضعاف أو تدمير العدو الأولوية على التطبيقات النافعة."

سرعان ما تبين أن إحداث الانشطار في اليورانيوم والحفاظ على تفاعل مسلسل ليس أمراً سهلاً كما بدى في الأول.

**كان معروفاً أن اليورانيوم يوجد له طبيعيا ثلاثة نظائر:** اليورانيوم-238 ($^{238}U$)، اليورانيوم-235 ($^{235}U$)، واليورانيوم-234 ($^{234}U$). الفرق بين هذه النظائر الثلاثة، كما نعرف، هو عدد النيوترونات الموجودة في النواة. يمتلك U-238 أربعة نيوترونات أكثر من U-235 وثلاثة أكثر من U-234. يتكون اليورانيوم الطبيعي أساساً من U-238 (99.27 %) مع كمية أقل كثيرا من U-235 (0.72 %). أما U-234، فنسبته لا تذكر (0.005 %).

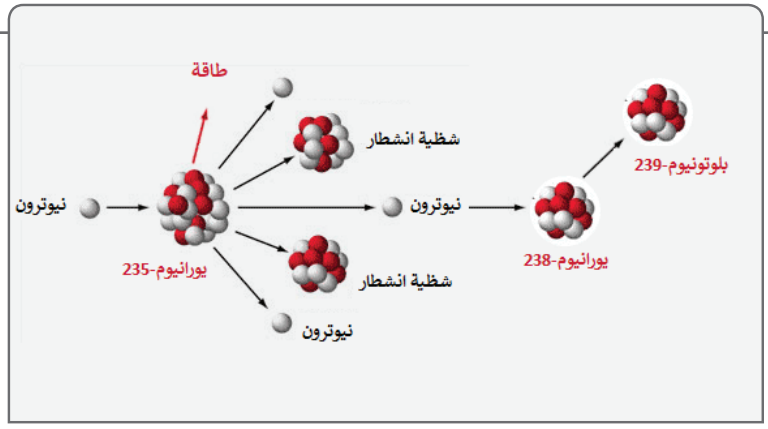
يميل اليورانيوم-238 إلى امتصاص النيوترونات دون أن ينشطر، ولا يحدث الانشطار فيه إلا نادراً بالنيوترونات عالية الطاقة (مليون إلكترون فولت أو أكثر). لا يمكن الحفاظ على تفاعل مسلسل في أي كمية من اليورانيوم-238 لسببين رئيسين: (1) احتمال حدوث هذا الانشطار هو جد ضئيل؛ (2) طاقة النيوترونات الناتجة من الانشطار ليست عالية بالدرجة المطلوبة، أقل من 1 **مإف** (أي ما يقابل سرعة قدرها 14000 كم/ث تقريباً). على النقيض، يميل اليورانيوم-235 إلى الانشطار عند قصفه بالنيوترونات، خاصة البطيئة منها. كما أنه يطلق اثنين أو ثلاثة نيوترونات عند انشطاره (2.5 نيوترون في المتوسط لكل انشطار). من ثم، يمكن الحصول على تفاعل مسلسل في اليورانيوم الطبيعي لو استطاع واحد على الأقل من هذه النيوترونات احداث الانشطار في نواة يورانيوم-235 أخرى. لذلك، يعرف اليورانيوم-235 بأنه *انشطاري fissile*. لكن ندرة هذا النظير تحول دون

حدوث تفاعل مسلسل في اليورانيوم الطبيعي بشكل تلقائي. كانت هذه هي العقبة الرئيسة أمام استغلال طاقة النواة.

عرفنا أن اليورانيوم-238 ليس انشطاري، ولذلك لا يمكن احداث تفاعل مسلسل فيه. مع ذلك، اكتشف العلماء أنه يمتص بعض النيوترونات المنطلقة أثناء التفاعل المسلسل في اليورانيوم-235 ويتحول إلى اليورانيوم-239. ينحل هذا النظير الاصطناعي في غضون ساعات قليلة إلى النبتونيوم-239 neptunium-239 بإطلاقه جسيمات بيتا. يبث النبتونيوم-239 بدوره جسيمات بيتا (هذه المرة خلال عدة أيام) متحولا إلى البلوتونيوم-239 plutonium-239، وهو انشطاري مثل اليورانيوم-235 (الشكل 110).

**الشكل 110:**

**تكون البلوتونيوم أثناء انشطار اليورانيوم**




سنعرف في الجزء التالي كيف استطاع العلماء تسخير طاقة النواة الهائلة لأغراض البشر—أولاً في الحرب، وبعد ذلك في الأغراض السلمية (توليد الكهرباء أساساً).

## مشروع "مانهاتن" السري

"مشروع مانهاتن" هو الاسم الرمزي لبرنامج حكومة الولايات المتحدة أثناء الحرب العالمية الثانية لبناء القنبلة الذرية. يرجع الفضل في ولادة هذا المشروع ونجاحه في تحقيق غايته إلى مجموعة من العلماء المهاجرين. بلغت تكلفة هذا المشروع الضخم نحو اثنين مليار دولار أمريكي (ما يعادل قيمة 23 بليون دولار أمريكي في 2018).

سنناقش في الجزء القادم تاريخ هذا المشروع بشيء من التفصيل لما يتضمنه من دروس وعبر مفيدة للقارئ العربي.

في وقت الإعلان عن الانشطار النووي (أول 1939)، كان يوجد بالولايات المتحدة زمرة من كبار علماء الذرة الأوربيين، هاجروا إليها هربا من النازية والفاشية، أو خوفا على أنفسهم وعوائلهم من الاضطهاد المتنامي ضد اليهود في ألمانيا "الهتلرية" ودول أوربية أخرى. حافظ أولئك العلماء، وأغلبهم ذو أصول يهودية، على تواصل وطيد فيما بينهم. من أمثال هؤلاء العلماء المجري "ليو زيلارد Leo Szilard" والإيطالي إنريكو فيرمي، اللذان كانا يعملان بـ "جامعة كولومبيا Columbia University" المرموقة. كان من الطبيعي أن يدرك هؤلاء العلماء سريعا بعد هذا الاكتشاف إمكانية استغلال الطاقة النووية في صنع سلاح خطير، وأن يخشوا امتلاك عدوهم النازي اللدود لمثل هذا السلاح.

كانت ألمانيا قد أعادت تسليح نفسها، مخالفة بذلك شروط "معاهدة فرساي Treaty of Versailles" المفروضة عليها بعد هزيمتها في الحرب العالمية الأولى، كما كان زعيمها النازي، "أدولف هتلر Adolf Hitler"، عازما على الثأر سريعا لتلك الهزيمة المذلة.

يعود أول اتصال بين العلماء المهاجرين والإدارة الأمريكية إلى مارس 1939،

حينما التقى الإيطالي أنريكو فيرمي بمسؤولين في البحرية الأمريكية ليشرح لهم التطبيقات العسكرية المحتملة للانشطار النووي. كان الهدف من هذا اللقاء هو إشراك الحكومة الأمريكية في الأبحاث النووية والحصول على الدعم المالي لها.

لم تأتي زيارة فيرمي بالنتيجة المرجوة، لكنه لم يرجع إلى جامعته الجديدة خالي الوفاض تماماً؛ بفضل حماس أحد العلماء الشبان من "مكتب الأبحاث البحري Naval Research Office"، كان ضمن من استمعوا إلى محاضرة فيرمي، منحت البحرية جامعة كولومبيا مبلغ 1,500 دولار لدعم تلك الأبحاث.

كان أحد العلماء المهاجرين، وهو المجري ليو زيلارد، مصرا على أن يكسب موطنه الجديد السباق النووي من ألمانيا النازية (التي اُكتشف فيها الانشطار النووي). كان زيلارد من النوع الذي لا "يهمد" (كما يقول المصريون) حتى يحقق مبتغاه، فقرر، بعد أن فشلت محاولة زميله الإيطالي، أن يتولى المهمة بنفسه. كان مع زيلارد فيزيائيان مجريان يساعدنه في مساعيه: "يوجين ويچنر Eugene Wigner" و"أدوارد تيلر Edward Teller". كان ويچنر أستاذا في "جامعة برينستون" (ولاية "نيو جيرسي New Jersey")، تيلر في "جامعة جورج واشنطن George Washington University" (واشنطن العاصمة).[1] الجدير بالذكر أن هؤلاء المجريين الثلاث كانوا قد حصلوا على تعليمهم العالي في ألمانيا.

ترددت الإشاعات أن الألمان كانوا يشترون خامات اليورانيوم الكونغولية من البلجيكيين.[2] قرر الفريق المجري الكتابة إلى ملكة بلجيكا راجين منها أن تحث

(1) يستخدم المؤرخون الأمريكيون تعبير "المريخيين Martians" للإشارة إلى مجموعة العلماء المجريين البارزين الذين هاجروا إلى الولايات المتحدة في النصف الأول من القرن 20.

(2) كانت الكونغو (إفريقيا الاستوائية) منذ عهد الملك "ليوبولد الثاني Leopold II" مستعمرة بلجيكية (المستعمرة الوحيدة في العالم لمملكة بلجيكا).

رعاياها على وقف تجارة اليورانيوم مع ألمانيا النازية (أنظر االشكل 111).[1] لم يكن أحد من الفريق يعرف الملكة، لكن زميل مهاجر كان يعرفها. كان ألبرت أينشتاين قد التقى بها في 1929، ومنذ ذلك الحين كانا الاثنان على تواصل دائم. كان أينشتاين عالما مشهورا عالميا، وقد ترك وطنه الألماني مهاجرا إلى الولايات المتحدة، ليعمل أستاذا بـ "معهد برينستون للدراسة المتقدمة Princeton Institute for Advanced Study" (ولاية نيو جيرسي)، منذ 1933 وحتى وفاته في 1955.

**الشكل 111:**

**فظائع البلجيكيين في الكونغو**

**(عهد الملك "ليوبولد الثاني Leopold II")**[2]

(1) استثمرت الشركات الأوربية والأمريكية الخاصة كثيرا في الكونغو البلجيكية بعد الحرب العالمية الأولى. أقامت تلك الشركات مزارع المحاصيل والماشية الكبيرة (القطن، نخيل الزيت، البن، الكاكاو، والمطاط). كما جرى استخراج الذهب، الماس، النحاس، القصدير، الكوبالت، والزنك). عمل الأفارقة في المزارع والمناجم بالسخرة لمدة تتراوح ما بين أربع وسبع سنوات وفقا لقانون بلجيكي صادر في 1922. أصبحت الكونغو البلجيكية مصدرا هاما لليورانيوم من أجل الولايات المتحدة خلال الحرب العالمية الثانية.

(2) اعتبر ليوبولد الثاني (1835 – 1909)، ملك البلجيكيين (منذ 1865 وحتى وفاته)، أراضي الكونغو اقطاعية خاصة ملك له، وأنه يستطيع أن يفعل بـ "عبيده" الأفارقة ما يريد. في الفترة من 1885 – 1908، مارس المستعمرون الأوربيون مع السكان الفارقة كل صنوف الأفعال الوحشية (التعذيب، قطع الأيدي، والقتل دون محاكمة). في 1909، بعد تزايد الغضب الدولي من فظائع البلجيكيين

في يوم الأحد، 16 يوليو 1939، ذهب زيلارد وويچنر لمقابلة أينشتاين في منزله الصيفي في "لونج أيلاند Long Island" (مدينة نيويورك). لم يتعلم زيلارد القيادة أبدا، فَوَقَع على عاتق ويچنر مهمة القيادة. كان أينشتاين قلبا وقالبا مع الفكرة، لكنه لم يرى من المناسب إشغال الملكة بأمر بعض المبيعات إلى ألمانيا، واقتراح عوضا عن ذلك إرسال إحاطة بهذا الشأن إلى السفير البلجيكي في الولايات المتحدة. كان لدي ويچنر فكرة عن المراسم الدبلوماسية فرأى من غير اللائق أن يخاطبوا في بلد المهجر سفيرا أجنبيا بشكل مباشر. بناء عليه، قرر المجتمعون إرسال الإحاطة مع "خطاب تغطية cover letter" إلى الخارجية الأمريكية. أمضى الفيزيائيون الثلاث كل اليوم في العمل على المسودات (الشكل 112).

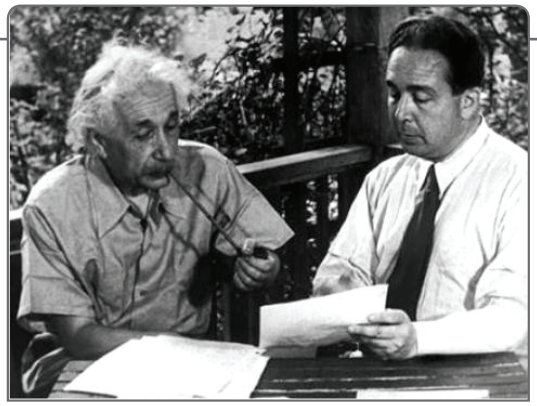
بعد عودة زيلارد إلى منزله، وصلته رسالة من دكتور "ألكسندر زاكس Alexander Sachs". كان زاكس مستشارا شخصيا للرئيس الأمريكي (فرانكلين روزفلت Franklin Roosevelt) وصديقا مقربا له. علم زاكس عن مساعي المجريين من صديق مشترك له ولزيلارد، ورغب في المساعدة. فضل زاكس أن يكتب زيلارد وزملاؤه رسالة حول مخاوفهم تلك إلى الرئيس مباشرة، ووعد بأن يقوم بإيصالها بنفسه إلى يد روزفلت.

في يوم الأحد، 30 يوليو 1939، عاد زيلارد ثانية إلى أينشتاين لصياغة الرسالة الجديدة، هذه المرة بصحبة تيلر في سيارة الأخير (كان ويچنر يقضي عطلته بكاليفورنيا).

---

هناك، نقل البرلمان البلجيكي إدارة الكونغو إلى الحكومة البلجيكية (لمزيد من المعلومات عن تلك الفترة، راجع الكتاب التالي: شبح الملك ليوبولد: قصة عن الجشع، الرعب، والبطولة في إفريقيا الاستعمارية King Leopold's Ghost: A Story of Greed, Terror, and Heroism in Colonial Africa). استمرت الكونغو مستعمرة بلجيكية إلى أن نالت استقلالها في العام 1960. الغريب، أنه عندما بدأت فرنسا وبريطانيا تتفاوض بعد الحرب العالمية الثانية على منح الاستقلال لمستعمراتها "التعيسة"، ظل البلجيكيون يصورون الكونغو على أنها مستعمرة آمنة سعيدة. لم تعتذر بلجيكا عن ماضيها الاستعماري في الكونغو إلا في يونيو 2020، على لسان ملكها "فيليب Philippe".

**الشكل 112 : زيلارد وأينشتاين في لونج أيلاند**



**تبدأ الرسالة التاريخية الشهيرة كالآتي (الشكل 113):**

حضرة المحترم (Sir):

تقودني الأعمال الحديثة التي اطلعت عليها لكل من إي فيرمي (E. Fermi) وإل زيلارد (L. Szilard) إلى توقع إمكان تحويل عنصر اليورانيوم إلى مصدر جديد وهام للطاقة في المستقبل الداني. تستدعي بعض التداعيات للوضع الذي نشأ الانتباه وربما، عند الضرورة، العمل السريع من جانب الإدارة...

**الشكل 113 :**

**رسالة أينشتاين الشهيرة إلى الرئيس الأمريكي روزفلت**

Albert Einstein
Old Grove Rd.
Nassau Point
Peconic, Long Island

August 2nd, 1939

F.D. Roosevelt,
President of the United States,
White House
Washington, D.C.

Sir:

Some recent work by E.Fermi and L. Szilard, which has been communicated to me in manuscript, leads me to expect that the element uranium may be turned into a new and important source of energy in the immediate future. Certain aspects of the situation which has arisen seem to call for watchfulness and, if necessary, quick action on the part of the Administration. I believe therefore that it is my duty to bring to your attention the following facts and recommendations:

In the course of the last four months it has been made probable - through the work of Joliot in France as well as Fermi and Szilard in America - that it may become possible to set up a nuclear chain reaction in a large mass of uranium,by which vast amounts of power and large quantities of new radium-like elements would be generated. Now it appears almost certain that this could be achieved in the immediate future.

This new phenomenon would also lead to the construction of bombs, and it is conceivable - though much less certain - that extremely powerful bombs of a new type may thus be constructed. A single bomb of this type, carried by boat and exploded in a port, might very well destroy the whole port together with some of the surrounding territory. However, such bombs might very well prove to be too heavy for transportation by air.

-2-

The United States has only very poor ores of uranium in moderate quantities. There is some good ore in Canada and the former Czechoslovakia, while the most important source of uranium is Belgian Congo.

In view of this situation you may think it desirable to have some permanent contact maintained between the Administration and the group of physicists working on chain reactions in America. One possible way of achieving this might be for you to entrust with this task a person who has your confidence and who could perhaps serve in an inofficial capacity. His task might comprise the following:

a) to approach Government Departments, keep them informed of the further development, and put forward recommendations for Government action, giving particular attention to the problem of securing a supply of uranium ore for the United States;

b) to speed up the experimental work,which is at present being carried on within the limits of the budgets of University laboratories, by providing funds, if such funds be required, through his contacts with private persons who are willing to make contributions for this cause, and perhaps also by obtaining the co-operation of industrial laboratories which have the necessary equipment.

I understand that Germany has actually stopped the sale of uranium from the Czechoslovakian mines which she has taken over. That she should have taken such early action might perhaps be understood on the ground that the son of the German Under-Secretary of State, von Weizsäcker, is attached to the Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin where some of the American work on uranium is now being repeated.

Yours very truly,
A. Einstein
(Albert Einstein)

يمضي الخطاب موضحاً أن إحداث تفاعل نووي مسلسل في كمية كبيرة من اليورانيوم سيصبح ممكناً في المستقبل الداني، وأن ذلك يمكن أن يؤدي إلى إنتاج قنبلة مدمرة من نوع جديد. بعد ذلك، يحدد الخطاب الملامح الرئيسة للخطة التي سوف تتبناها الإدارة، لتصل بعد ست سنوات من تاريخه إلى القنبلة الذرية: توفير التمويل الحكومي للأبحاث النووية، وبناء تواصل دائم بين الإدارة الأمريكية ومجموعة العلماء المشتغلين بهذه الأبحاث في أمريكا. في الخاتمة، تحذر رسالة أينشتاين من أن ألمانيا قد أوقفت بيع اليورانيوم من تشيكوسلوفاكيا بعد أن استولت عليها، ومن أن الفيزيائيون الألمان منهمكون في أبحاث اليورانيوم.

سلم زيلارد الخطاب الموثق بتوقيع أينشتاين إلى زاكس في 15 أغسطس. مرت الأسابيع ولم يستلم زيلارد جوابا؛ أراد زاكس أن يناقش الأمر مع رئيسه الصديق في الوقت المناسب، لكن الأوضاع في أوروبا كانت تستحوذ على جل انتباه الرئيس الأمريكي (كانت أوروبا على شفا حرب ضروس: الحرب العالمية الثانية).

في الصباح الباكر من الأول من سبتمبر 1939 (الساعة 4:45)، يغزو 1.5 مليون من القوات الألمانية بولندا، مما يدفع بريطانيا وفرنسا بعد يومين إلى إعلان الحرب على ألمانيا. هكذا تبدأ حرب ستشمل أنحاء العالم وتستمر لنحو ست سنوات، حاصدة أرواح ملايين البشر (70 – 85 مليون).

جاءت الفرصة المنتظرة في 11 أكتوبر 1939؛ قابل زاكس الرئيس روزفلت في البيت الأبيض، وسلمه الخطاب مصحوبا بملخص عما فهمه من زيلارد. قرأ الرئيس الملخص ثم قال لصديقه، "ألكس، ما تسعى إليه هو أن تتأكد أن النازيين لن يفجروننا." أجاب زاكس، "بالضبط." استدعى الرئيس مساعده وأعطاه الخطاب قائلا، "هذا يتطلب العمل."

هكذا بدأ أكبر بحث علمي وبرنامج تطوير في التاريخ؛ سينمو التمويل الحكومي لمشروع إنتاج القنبلة الذرية بأكثر من 300.000 ضعف، من استثمار أولي

بمبلغ 6،000 دولار في خريف 1939 إلى أكثر من اثنين بليون دولار مع نهاية الحرب العالمية الثانية.

كان رد فعل المسؤولين الأمريكيين في البداية حذرا. لم يكن أحدا في ذلك الوقت متأكدا من إمكانية الحصول على القنبلة الذرية. كان التفاعل النووي المسلسل مجرد فكرة نظرية لم يَثْبُت بعد أنها قابلة للتحقيق فعليا.

كلف روزفلت أمين سره، الجنرال "أدوين واطسون Edwin Watson"، بأن يكون هو حلقة الوصل في "البيت الأبيض The White House"، وأن يعمل مع مدير "المكتب الوطني للمواصفات القياسية National Bureau of Standards"، "لايمان برِجز Lyman Briggs"، على تشكيل لجنة استشارية لهذا الموضوع.

تقابل زاكس مع برجز في اليوم التالي، وشكلا "اللجنة الاستشارية حول اليورانيوم Advisory Committee on Uranium"، والتي أصبحت مشهورة بـ "لجنة اليورانيوم Uranium Committee".

تكونت لجنة اليورانيوم في بدايتها من برجز واثنين من خبراء التسليح (واحد من الجيش وآخر من البحرية). سوف يتغير اسم اللجنة، أعضاؤها، هيكلها التنظيمي، ومسؤولياتها خلال الحرب عدة مرات.

في 21 أكتوبر 1939، عقدت اللجنة أولى اجتماعاتها في مكتب المواصفات القياسية. حضر الاجتماع، بناء على طلب برجز، كل من أنريكو فيرمي، ليو زيلارد، أدوارد تيلر، ويوجين ويجنر. قررت البحرية في هذا الاجتماع المساهمة بمبلغ 6,000 دولار لدعم أبحاث فيرمي في جامعة كولومبيا.

أرسلت اللجنة تقريرها الأول، المكون من صفحتين، إلى الرئيس روزفلت في 1 نوفمبر 1939. بعد ملخص عن عملية الانشطار، يذكر التقرير أن هناك احتمال للحصول على تفاعل مسلسل، وهو ما قد يوفر مصدر طاقة جديد للغواصات. يشير

التقرير بعد ذلك إلى أن الحصول على تفاعل مسلسل انفجاري سوف يمكن من صنع "قنابل ذات قدرة تدميرية أضخم كثيرا من أي شيء معروف حاليا." أوصى التقرير كذلك بضم عدد من الخبراء إلى اللجنة، من بينهم زاكس وأينشتاين.[1]

بحلول مارس 1940، بات معروفا أن اليورانيوم-235 هو النظير الطبيعي الوحيد الذي قد يصلح للحصول على تفاعل مسلسل مستديم، أي النظير الانشطاري الوحيد الموجود في الطبيعة (راجع الجزء الخاص بالانشطار النووي). لكن اليورانيوم-235 نادر جداً (يشكل نحو 0.7 % فقط من اليورانيوم الطبيعي).

نحن نعرف أن نظائر العنصر الواحد لها الخصائص الكيميائية ذاتها. لذلك، لا يمكن فصل اليورانيوم-235 عن اليورانيوم-238 (النظير الشائع) بطرق الفصل الكيميائية المعروفة. فكر العلماء الأمريكان والبريطانيون في محاولة فصلهما استنادا إلى الفروق في خصائصها الفيزيقية (اليورانيوم-238 أثقل قليلاً عن اليورانيوم-235)، وهذا سيكون بالتأكيد صعباً ومكلفاً كثيراً.

في الوقت نفسه تقريبا، اكتشف الكيميائي "چلن سيبورچ Glenn Seaborg"، في "جامعة كاليفورنيا في بيركلي University of California in Berkley"، أثناء دراسته لنواتج انشطار اليورانيوم، اكتشف تكون عنصر مشع لم يعرف من قبل، البلوتونيوم-239 239-plutonium، وأن هذا العنصر الاصطناعي الجديد يستطيع أن يديم تفاعلا مسلسلا بشكل أكبر من اليورانيوم-235 (يصاحب انشطار نواة البلوتونيوم-239 عددا أكبر في المتوسط من النيوترونات الحرة—2.88).

بحلول ربيع 1941، أصبح الفيزيائيون يعتقدون أن تحرير الطاقة النووية على نطاق كبير يمكن أن يَحدث بطريقتين: (1) فصل عينة من اليورانيوم-235 من خامات اليورانيوم الطبيعية، واستخدامها لإحداث تفاعل تفجيري بالنيوترونات

(1) لم توافق السلطات المسؤولة على ضم أينشتاين إلى طاقم المشروع بسبب توجهاته السياسية: كان أينشتاين يعلن أنه إنسان، يهودي، مناوئ للقومية، وصهيوني.

السريعة؛ (2) تخليق البلوتونيوم في مفاعل نووي، واستخدامه مثل اليورانيوم-235 في صنع القنبلة الفائقة.

**الشكل 114:**

**تمثيل للهجوم الياباني على "بيرل هاربر** Pearl harbor"

**الشكل 115:**

**توقيع الرئيس الأمريكي إعلان الحرب على اليابان في 8 ديسمبر 1941.**

في 7 ديسمبر 1941، تشن الطائرات اليابانية هجوما مباغتا على قاعدة البحرية الأمريكية في "ميناء بيرل Pearl Harbor" ("هاواي Hawaii"، المحيط الهادي؛ الشكل 114). تسبب القصف في مقتل 2,300 من الأمريكيين. في اليوم التالي، تعلن الولايات المتحدة الحرب على اليابان (الشكل 115).

### انطـــلاق القطـــار

في أواخر 1942، بعد أن باتت الولايات المتحدة منغمسة كلية في الحرب، اتخذ مشروع القنبلة الذرية منحى جديدا، واكتسب زخما هائلا. عقدت القيادة الأمريكية العزم على الحصول على تلك القنبلة في أسرع وقت ممكن. وُضِع المشروع تحت الإدارة المباشرة لسلاح المهندسين بالجيش الأمريكي US Army Corps of Engineers. أنشَأ السلاح "منطقة مانهاتن الهندسية Manhattan Engineer District" خصيصا لهذا المشروع، تحت إمرة الجنرال "لزلي جروفز Brigadier General Leslie Groves". أدار جروفز "منطقة مانهاتن العسكرية" كشركة إنشاءات هائلة.

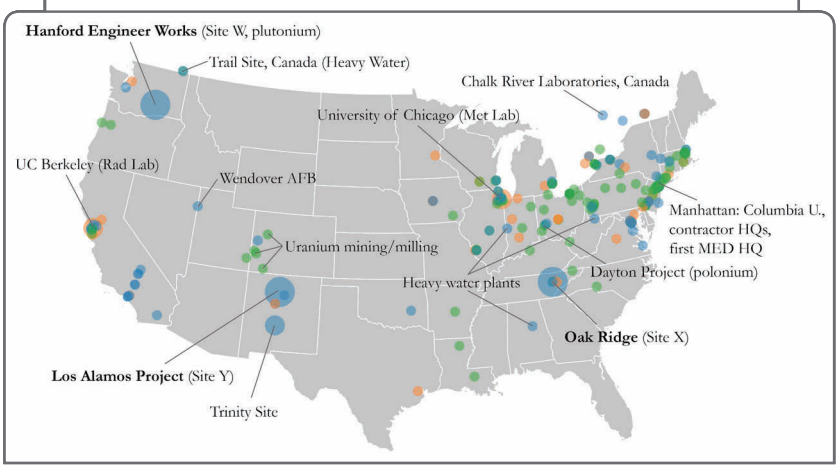
في منتصف 1943، يوقع روزفلت مع تشرشل (رئيس الوزراء البريطاني في ذلك الحين) "اتفاقية كيبك Quebec Agreement" السرية، والتي ترتب عليها دمج الأبحاث النووية البريطانية في مشروع مانهاتن الأمريكي.[1]

(1) "كيبك Quebec" هي المقاطعة الناطقة بالفرنسية في كندا الحالية، وعاصمتها «مدينة كيبك Quebec City". بعد انتصار البريطانيين على الفرنسيين في "معركة كيبك Battle of Quebec"، أصبحت "كندا الفرنسية French Canada" مستعمرة بريطانية (رسميا في 1763). كان «الكنديين-الإنكليز» يعاملون «الكنديين-الفرنسيين» باحتقار، وإذا سمعوا أحدهم يتحدث بالفرنسية، كانوا يقولون له على سبيل الإهانة «تحدث كأبيض Speak White"، اي تحدث لغة المتحضرين. لقد ظلت الكنائس الفرنسية في كيبك حتى وقت ليس ببعيد تحث رعاياها على كثرة الإنجاب حفاظا على الثقافة الفرنسية ضد "الغزو البريطاني". مازال الكثير من كبار السن في كيبك يُعرِّفون أنفسهم على أنهم كنديون-فرنسيون. حاول هؤلاء خلال أكثر من استفتاء الانفصال عن بقية كندا، لكنهم فشلوا في ذلك بفارق بسيط.

كان القائمين على مشروع مانهاتن على استعداد لاستثمار مئات الملايين من الدولارات على عمليات تكنولوجية لم تُختَبَر من قبل. مع نهاية الحرب، كان چروفز وطاقمه قد أنفقوا ما يزيد عن اثنين بليون دولار، على ورش إنتاجية، مدن صناعية، ومعامل بحثية منثورة في أنحاء البلاد (الشكل 116). بسبب سرية المشروع والخشية من وقوع الحوادث الكبيرة، وضعت منشآت المشروع في المواقع النائية.

لتقليص احتمالات الفشل، تقرر التقدم في كلا الطريق المحتملين إلى القنبلة النووية في آن واحد: سكة اليورانيوم-235 وسكة البلوتونيوم-239.

**الشكل 116:**
**منشآت مشروع مانهاتن الكثيرة**




توزعت أنشطة مشروع مانهاتن على المحاور الثلاث التالية: فصل اليورانيوم-235، إنتاج البلوتونيوم-239، وتصميم القنبلة الذرية وإنتاجها.

### فصل اليورانيوم

بعد أن أصبح واضحاً أن الانشطار النووي يمكن أن يستخدم في صنع قنبلة مدمرة، واكتشف (في مارس 1940) أن اليورانيوم-235 هو المسؤول الرئيس عن

عملية الانشطار، توجه اهتمام علماء المشروع إلى كيفية فصل هذا اليورانيوم عن النظير السائد في الخامات الطبيعية (اليورانيوم-238).

لا يمكن فصل نظائر اليورانيوم (أو أي عنصر آخر) عن بعضها بالطرق الكيميائية المعتادة، ولابد من ابتكار طرق فصل جديدة تعتمد على الفروق الضئيلة في الكتلة (نواة النظير الشائع، اليورانيوم-238، تحوي ثلاثة نيوترونات أكثر من النظير الانشطاري، اليورانيوم-235). يختلف نظيرا اليورانيوم في الكتلة بأقل من 1% (235÷238)، ويتواجد اليورانيوم-235 بنسبة ضئيلة في اليورانيوم الطبيعي (1: 139)، وهذا يجعل فصلهما عن بعضهما بالطرق الفيزيقية أمرا غاية في الصعوبة وباهظ التكلفة.

أراد الجنرال چروفز اختبار أكبر عدد من طرق الفصل الممكنة، ووفر الموارد اللازمة لاختبارها جميعا في آن معا. تطلب ذلك ألاف الساعات من العمل وملايين الدولارات.

في البداية، استخدمت طريقتان لفصل اليورانيوم: *الانتشار الغازي gaseous diffusion* و*الكهرباء-مغناطيسية electromagnetic*.

وضع چروفز مرافق فصل اليورانيوم-235 وإنتاجه في "محمية كلينتون Clinton reservation" (ولاية "تنيسي Tennessee"). سيشتهر هذا الموقع بعد الحرب باسم "أوك ريدج Oak Ridge".

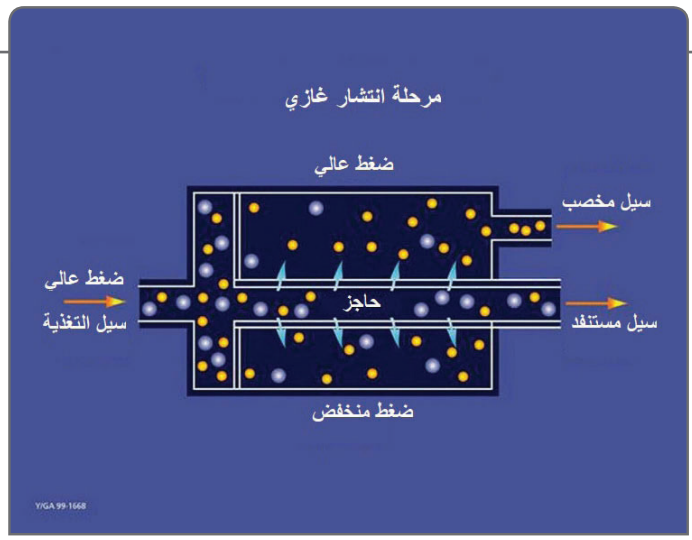
### الانتشـــار الغـــازي

تعتمد هذه الطريقة على الفكرة التالية: عند ضخ مركبات اليورانيوم الغازية خلال *أغشية شبه نفاذة semipermeable membranes*، تمر جزيئات النظير الأخف، اليورانيوم-235، بمعدل أسرع قليلا من تلك الخاصة بالنظير الأثقل، اليورانيوم-238 (الشكل 117). بتكرار هذه العملية في "تعاقب cascade" مئات المرات (الشكل 118)، يمكن أن نحصل في النهاية على نوعين من اليورانيوم:

*المخصب enriched والمستنفد depleted*. اليورانيوم المخصب هو القسم الذي يحوي اليورانيوم-235 بالنسبة المطلوبة؛ المستنفد لا يحوي سوى نسبة جد ضئيلة من النظير نفسه (أقل من 0.7 %، نسبة وجوده في اليورانيوم الطبيعي).

**الشكل 117:**

**فكرة عمل تخصيب اليورانيوم بالانتشار الغازي**



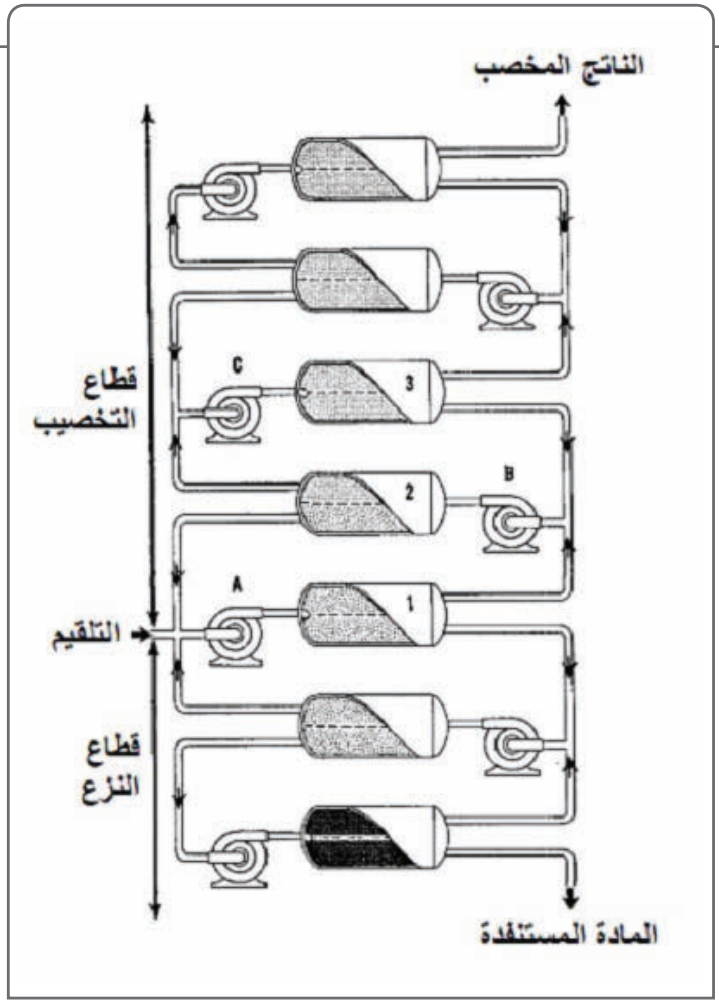

واجه تطبيق هذه الفكرة على نطاق صناعي صعوبات جمة. كان التحدي الأصعب هو الحصول على غشاء فصل ذي كفاءة وفعالية.

أمر چروفز ببناء المصنع المطلوب، والذي أُعطِي الاسم الرمزي "K-25"، في الطرف الجنوب-غربي من أوك ريدج. كان هذا قرارا جريئا جدا؛ بدء إنشاء هذا الصرح الهائل، واكتمل بناء ثلثه، قبل الوصول إلى حل لمشكلة الغشاء الصعبة (بدأ الإنشاء في يونيو 1943، واكتمل في أوائل 1945). [1]

(1) ساهمت كل من جامعة كولومبيا، "كلكس Kelex"، و«يونيون كارباید Union Carbide" في حل هذه المشكلة.

**الشكل 118 :**

**التخصيب المتدرج بالانتشار الغازي**




بني المصنع (الشكل 119)، الذي بلغ طوله نحو الميل (1.6 كيلومتر) وعرضه نحو 400 قدم (120 مترا)، على مساحة 44 أكرا (178.062 م$^2$). بلغت تكلفة إنشائه 512 مليون دولار (ما يعادل 6.5 بليون دولار في 2010).

**الشكل 119 :**

**مصنع تخصيب اليورانيوم في أوك ريدج**

كان غاز سادس فلوريد اليورانيوم uranium hexafluoride الآكال corrosive يمرر على أغشية الفصل في 3000 مرحلة متعاقبة. وقد تتطلب هذا طلاء مئات الأميال من الأنابيب والمعدات بمواد خاصة مقاومة للتآكل. كانت العملية كلها معزولة بإحكام؛ فأي تلامس بين الغاز الآكال وأقل قدر من الرطوبة من شأنه أن يتسبب في تفاعل عنيف.

كان "K-25" هو أول مصنع "آلي بالكامل fully automated" يبنى في العالم. مع ذلك، استخدم مصنع K-25 أكثر من 9,000 موظف يعملون نهارا وليلا (على ثلاث مناوبات)، فقط من أجل مراقبة عمل الآلات.

استمر "K-25" بعد الحرب في تخصيب اليورانيوم المطلوب لمحطات الطاقة النووية حول العالم حتى 1985.

## الطريقة الكهرباء-مغناطيسية

كانت الفصل الكهرباء-مغناطيسي هو التقنية الأكثر تطورا عند بدء مشروع مانهاتن. بيَّن "أرنست لورانس Ernest Lawrence"، من جامعة كاليفورنيا في بيركلي، أن الذرة المشحونة تسلك مسارا منحنيا عند وجودها في مجال مغناطيسي معين، وأن قطر *radius* هذا المسار يتناسب طرديا مع كتلة الذرة. اليورانيوم-235 سيسلك مسارا أضيق (لأنه أخف من اليورانيوم-238)، ويمكن فصله بوضع "جيوب تجميع" في مساره المتوقع. يجرى ذلك بداخل جهاز يعرف الآن باسم "الكاليوترون Calutron".

بني المجمع الصناعي "Y-12" في أوك ريدج (شمال ولاية تنيسي) من أجل تطبيق فكرة لورانس على نطاق صناعي.

شرع في بناء المجمع في 18 فبراير 1943. احتوى المصنع على 1,520 جهاز فصل. كان الكاليوترون يشبه في شكله حرف "D" اللاتيني، وكانت تصف في أشكال بيضاوية أطلق عليها اسم "مضامير السباق racetracks" (الشكل 120).

**الشكل 120: مضامير السباق في مصنع Y-12**

لم يتوفر النحاس اللازم لصنع الملفات المغناطيسية-الكهربائية، فأستعيض عنه باستخدام الفضة الموجودة في مستودعات "الخزانة الأمريكية U.S. Treasury" (جرى استخدام 14,700 طن منها).

بسبب ظروف الحرب، شحت الأيدي العاملة. لجأت إدارة المشروع إلى توظيف الفتيات، وأغلبهن من خريجات المدارس الثانوية والعاملات في المزارع المحلية. لم تكن الفتيات العاملات يعرفن ما ينتجه المصنع الذي يعملن به (للتمويه، أطلق على المجمع اسم "مؤسسة تنسي إيستمان Tennessee Eastman Corporation"). كن يعملن أمام "مقصورات cubicles" (كان مصطلح الكاليوترون يعد في ذلك الوقت سرا)، وكان يطلق عليهن اسم "صبايا المقصورات Cubicle Girls" (الشكل 121).

**الشكل 121:**
**صبايا المقصورات أثناء عملهن في مصنع Y-12**

استخدم مصنع Y-12 كميات هائلة من الطاقة والعمالة (22,000 موظفة وموظف). رغم ابتلائه بالمشكلات دائما، نجح المجمع في إنتاج اليورانيوم المخصب المطلوب لصنع القنبلة الذرية الأولى.

في ديسمبر 1946، أغلقت جميع وحدات المجمع باستثناء بضع عشرات استخدمت في إنتاج النظائر المطلوبة في علاج السرطان، التشخيص الطبي، وتطبيقات أخرى. توقف الإنتاج تماما في 1998.

لم تستخدم الطريقة الكهرباء-مغناطيسية ثانية بعد الحرب بسبب تكلفتها الباهظة، لكنها لعبت دورا هاما في تطوير الطب النووي.

**إنتـــاج البلوتونيـــوم**

في 16 ديسمبر 1942، توجهت اللجنة التي شكلت لهذا الغرض إلى الساحل الشمال-غربي Pacific Northwest وجنوب كاليفورنيا south California لفحص مواقع الإنتاج المحتملة. كان المطلوب موقعا تتوفر فيه المواصفات التالية:

- مساحته لا تقل عن 225 ميلاً مربعاً، كي يستوعب ثلاثة أو أربعة مفاعلات نووية (لتخليق البلوتونيوم) ومصنع أو اثنين للفصل الكيميائي (فصل البلوتونيوم المتكون عن وقود اليورانيوم المستخدم).
- مناخه معتدل حتى يسمح بموسم إنشاءات طويل.
- بعيدا عن العمران (المدن، الطرق السريعة، والسكك الحديدية) بعدة أميال، للحفاظ على السرية من ناحية، ولتجنب الأضرار الكبيرة في حال وقوع الحوادث في المفاعلات النووية أو مصانع الفصل الكيميائية.
- لكن قريبا من مصادر وفيرة للمياه، لتوليد الكهرباء المائية.

بعد فحص اللجنة لستة مواقع في "واشنطن Washington"، "أوريجون Oregon"، و"كاليفورنيا California"، اتفقت اللجنة أن الخيار الأفضل هو المنطقة حول بلدة "هانفورد Hanford"، واشنطن.

تقع هانفورد على نهر كولومبيا الجميل. كان سَدَا "چراند كولي Grand Coulee"

و"بونفيل Bonneville" يوفران القدرة *الماء-كهربية hydroelectric*، بينما قدمت التضاريس المنبسطة الصخرية قاعدة ممتازة لأبنية إنتاج البلوتونيوم الضخمة (الشكل 122). كان الموقع الفسيح (500,000 أكر) نائيا كما تتطلب اعتبارات الأمن والسرية، في حين يمكن تطوير وسائل النقل اللازمة واستقدام العمالة المطلوبة.

**الشكل 122 :**

**موقع انتاج البلوتونيوم في هانفورد**

في 16 يناير1943، اعتمد الجنرال جروفز منطقة هانفورد موقعا لـ "أشغال هانفورد الهندسية Hanford Engineer Works"، الاسم المعلن لمشروع إنتاج البلوتونيوم السري (الشكل 123). سمي المشروع رمزيا "الموقع دبليو Site W".

أُعطِي السكان في المناطق المتأثرة مهلة 90 يوما للإجلاء عن المنطقة. جرى تعويض الملاك بعد تثمين منازلهم. رفض الكثير منهم العروض الأولية، وقاضوا الجيش في المحاكم المختصة. فضلت إدارة المشروع التسوية خارج المحاكم دائماً؛ كان الوقت بالنسبة لهم هو السلعة الأغلى.

جرى كذلك ترحيل القبائل الأصلية، وجُرِدوا من حق استخدام مناطق الصيد التقليدية.

**الشكل 123 :**
**لوحة أمام موقع "أشغال هانفورد الهندسية"**

بعد اتخاذ قرار إنتاج البلوتونيوم في هانفورد، أرادت الحكومة الاستفادة من مواهب وموارد الشركات الأمريكية لإنجاز المهمة. أوكلت إدارة المشروع الصناعية إلى شركة "دوبونت DuPont"، كبرى شركات الكيماويات والذخائر.

شكلت المهمة تحدياً كبيراً لمدراء دوبونت. كان المطلوب إنشاء مفاعل نووي أكبر من "كومة فيرمي" التجريبية في شيكاغو ألاف المرات. بقيت الكثير من المسائل الفنية لم تحل بعد، من تبريد المفاعلات النووية إلى فصل البلوتونيوم من قضبان الوقود النووي المستنفذ. لم يتوفر الوقت للفحوص المحكمة أو العمل على نطاق تصنيعي متدرج. كان على مهندسي دوبونت الاعتماد على أفضل تقديراتهم والمضي قدما دون تمهل.

سعت دوبونت والجيش إلى استقدام العمالة من أنحاء البلاد. لم تكن هانفورد بالمكان الجذاب للعاملين، وعاني المشروع دائما من نقصهم، رغم الفائض المعروف حينئذ في الساحل الشمال-غربي. تحسنت الظروف كثيرا في النصف الأخير من

عام 1943 بعد إنشاء المرافق الترفيهية هناك، وانخفض معدل *تبدل العمالة labor turnover* بشكل ملحوظ.

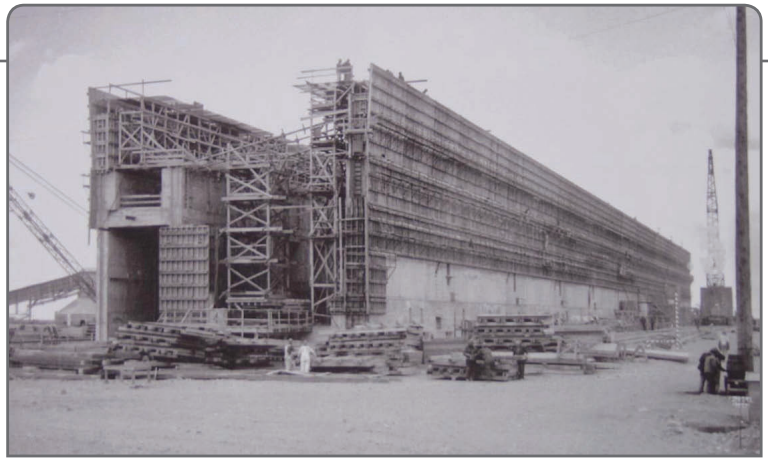
كان المهمة الصعبة هي إنشاء ثلاثة "أكوام piles" (الاسم المستخدم حينئذ للمفاعلات النووية) لتخليق البلوتونيوم (من قصف اليورانيوم-238 بالنيوترونات) بالإضافة إلى أربعة معامل (مصانع) لفصل البلوتونيوم كيميائيا. أشير إلى المفاعلات النووية تلك بالأكوام "بي B"، "دي D"، و"أف F"، وإلى مرافق الفصل بالمعامل "تي T"، "يو U"، "بي B"، و"سي C" (لم يبنى أبدا المعمل سي).

شُرِع في تجهيز التربة لـ "الكوم بي Pile B" في 27 أغسطس 1943، قبل استسلام إيطاليا للحلفاء بنحو أسبوعين. أما الشغل على الكوم نفسه، فبدأ في فبراير من العام التالي. أكتمل بناء الكوم "بي B" ومعمل الفصل "تي T" في صيف 1944 (الشكل 124 والشكل 125).

**الشكل 124: "الكوم بي" في هانفورد**

**الشكل 125:**

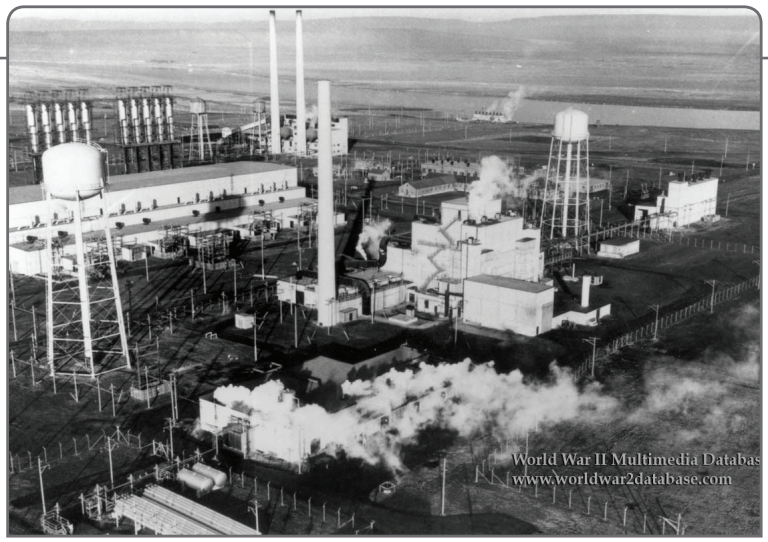
**معامل فصل البلوتونيوم قيد الإنشاء**



بحلول سبتمبر 1944، اكتمل بناء المجمع الصناعي لإنتاج البلوتونيوم (الشكل 126). أرسل المجمع أول إنتاجه من البلوتونيوم إلى لوس ألاموس، موقع تصميم وإنتاج القنبلة، في 2 فبراير 1945.

**الشكل 126:**

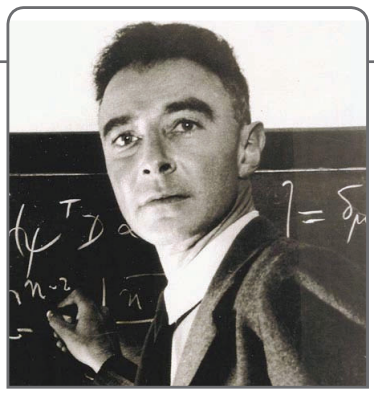
**مصنع إنتاج البلوتونيوم في هانفورد**



في يونيو 1942، عين جروفز البروفسور "روبرت أوبنهايمر Robert Oppenheimer"، الأستاذ في جامعة كاليفورنيا في بيركلي، "مديرا علميا Scientific Director" للمشروع. كان أوبنهايمر أحد كبار الفيزيائيين النظريين في العالم (الشكل 127).

**الشكل 127:**

**روبرت أوبنهايمر، المدير العلمي لمشروع مانهاتن**



قبل عشرين عاماً من تاريخ التعيين، نجا الطالب روبرت أوبنهايمر بأعجوبة من إصابة خطيرة بمرض الدوسنطاريا. أرسله والداه في صيف 1922 إلى صحراء "نيو مكسيكو New Mexico" ليتعافى هناك. أقام روبرت في مزرعة لصديق تبعد نحو 24 ميلا عن بلدة "سانتا فيه Santa Fe". كان روبرت يقضي وقته هناك في التجول بالبرية والتخييم في الجبال. زرعت هذه التجربة في قلب أوبنهايم عشق ذلك المكان.

اقترح أوبنهايمر عند تعيينه المدير العلمي للمشروع "مدرسة مزرعة لوس ألاموس Los Alamos Ranch School" كموقع مثالي للمعمل المركزي للمشروع. في أوائل 1943، استلم الجيش أرض المدرسة البالغة 800 أكر (3.2 مليون متر مربع) لتصبح بعد ذلك موقع "مشروع لوس ألاموس" أو "المشروع واي

Project Y" (الشكل 128). كان لهذا المشروع غرض واحد: تصميم القنبلة الذرية وإنتاجها.

**الشكل 128:**
**المدخل الرئيس لمشروع لوس ألاموس**

ارتفعت بسرعة أبنية المعامل الضخمة على امتداد الحافة الجنوبية لـ "بركة أشلي Ashley Pond"، واصطفت الشقق السكنية ناحية الغرب في مواجهة الجبال. نشرت الأرصفة الخشبية لترفع السكان عن الوحل الذي كان يملأ الموقع عند ذوبان جليد الشتاء أو سقوط أمطار الصيف.

عاش العلماء وعملوا في الموقع العسكري مع عائلاتهم (الشكل 129). كان عليهم الحصول على موافقة السلطات العسكرية لأي شيء يحتاجونه. لم يسمح لهم بإخبار زوجاتهم وأطفالهم عما كانوا يشتغلون عليه. تواصلوا مع العالم الخارجي

فقط من خلال الرسائل المراقبة. للحفاظ على السرية، كان العنوان البريدي الوحيد للمدينة كلها هو "ص ب 1663، لوس ألاموس". لم يستطيعوا زيارة الأقارب إلا في الحالات الاستثنائية، وهنا كان عليهم التزام الكتمان التام حتى فيما يتعلق بالتفاصيل البسيطة لحياتهم.

**الشكل 129:**

**غسيل الملابس في لوس ألاموس**

أتاحت طبيعة المكان الجبلية للعلماء فرصة الاسترخاء والتمتع بالمنظر الطبيعي، التنزه، التزلج، والسباحة. لكنهم كانوا يقضون جل أوقاتهم في معاملهم، يتغلبون على التحديات التي تواجههم، واحدة تلو الأخرة، حتى انجزوا مهمتهم كاملة بعد 27 شهرا فقط، وصنعوا ثلاث قنابل نووية: "العُدَّة Gadget"، "الفتى الصغير Little Boy"، و"الرجل البدين Fat Man".

مفتاح التصميم الفعال للقنبلة الذرية هو خلق تفاعل مسلسل والحفاظ عليه حتى ينتج الطاقة التفجيرية المرغوبة قبل أن يتمزق قلب القنبلة أو ينصهر بفعل الطاقة النووية المتحررة. على سبيل المثال، تتحرر 99.9 % من طاقة قنبلة نووية من عيار 100 كيلوطن (1 كيلوطن = 1000 طن من مادة تي أن تي TNT) في آخر

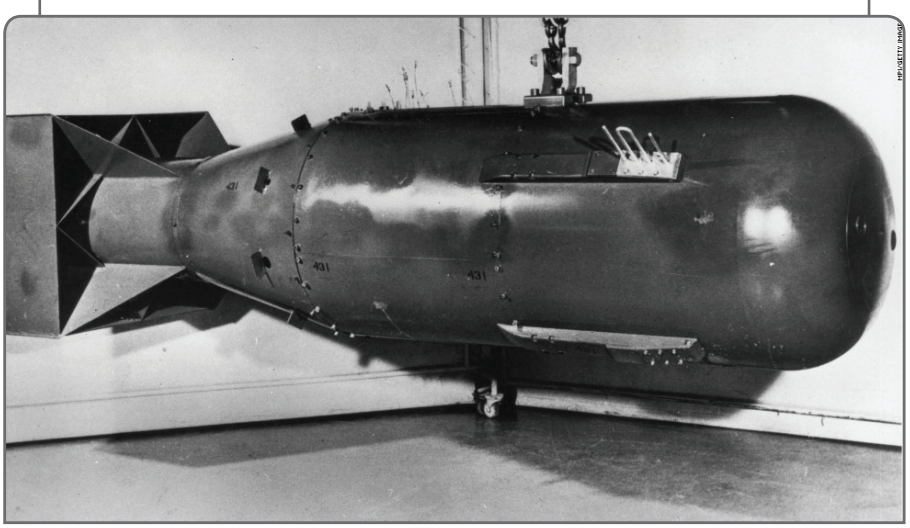
سبعة أجيال انشطارية من أصل أكثر من 50. يحدث ذلك خلال 0.07 ميكروثانية (1 ميكروثانية = 1/مليون جزء من الثانية).

لاختصار الحكاية، اعتمد فريق لوس ألاموس في النهاية تصميمين اثنين للقنبلة المأمولة: "طراز-المدفع gun-type" و"طراز-الهَور أو الكبس implosion-type".

## الفتـــى الصغيـــــر

"الفتى الصغير" هو الاسم الرمزي للقنبلة الذرية الأولى، والتي أُلقيت على هيروشيما في 6 أغسطس 1945 قبل نهاية الحرب العالمية الثانية (الشكل 130).

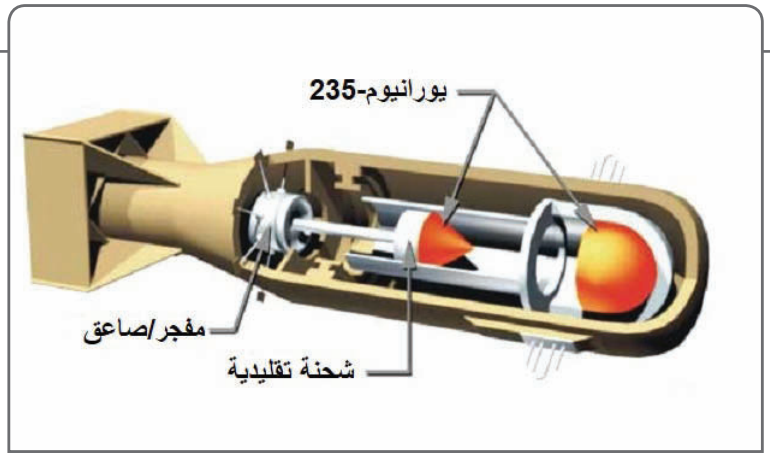
**الشكل 130:**
**نموذج لقنبلة "الصبي الصغير"**



تتلخص فكرة هذه القنبلة في دمج قطعتين من اليورانيوم-235 معا بسرعة فائقة، كلاهما تحت-حاسمة. تصبح القطعة الجديدة على الفور فوق-حاسمة نتيجة *لزيادة الكتلة mass والكثافة density* بُعَيد الاندماج، ويحدث الانفجار النووي (الانفجار نتيجة لتفاعل الانشطار المسلسل).

كان لابد وأن يحدث الاندماج بسرعة فائقة وإلا تسببت الحرارة الناتجة في بداية التفاعل المسلسل في تفجير متسرع وضعيف للقنبلة، أي قبل أن ينشطر جل كمية اليورانيوم-235 المستخدمة (يعرف هكذا انفجار في اللغة العسكرية بـ "الفرقعة fizz"). لتحقيق ذلك، جرى تصميم القنبلة بحيث يحدث الدمج عن طريق "إطلاق" إحدى القطعتين (القذيفة) على الأخرى (الهدف) خلال ماسورة مدفع مثبت داخل جسم القنبلة (لذلك، عرف هذا التصميم باسم "طراز المدفع").[1] صنعت القطعة "المستهدفة" بها تخويف في الوسط، القطعة المقذوفة لها بروز في المقدمة (الشكل 131)، بحيث يَلِج هذا البروز في ذلك التجويف عند التقاء القطعتين معا ("عاشق ومعشوق"، كما يقول الحرفيون المصريون).

**الشكل 131:**
**مخطط مبسط لتركيب قنبلة "الفتى الصغير"**



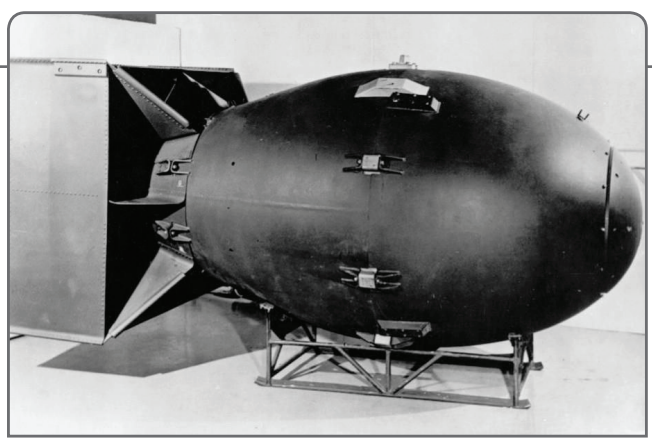

وَثِقَ خبراء المشروع في تصميم طراز المدفع، ولم يروا ضرورة لاختباره. على كل حال، لم يكن الاختبار ممكنا، لأن "الفتي الصغير" استحوذ على كل اليورانيوم-235 المنتج.

(1) طول الماسورة ستة أقدام، وقطرها ثلاث بوصات.

## الـرجـــل البـديـــــن

هو الاسم الرمزي لقنبلة البلوتونيوم الثانية، والتي ألقيت في 9 أغسطس 1945 على مدينة ناجاساكي اليابانية، منهية الحرب العالمية الثانية (الشكل 132). أما أختها التوأم، قنبلة "العُدَّة"، فقد فُجِرت على سبيل الاختبار في صحراء نيو مكسيكو الأمريكية في 16 يوليو 1945 (بعد استسلام ألمانيا رسمياً في شهر مايو من العام ذاته).

**الشكل 132:**
**نموذج لقنبلة "الرجل البدين"**

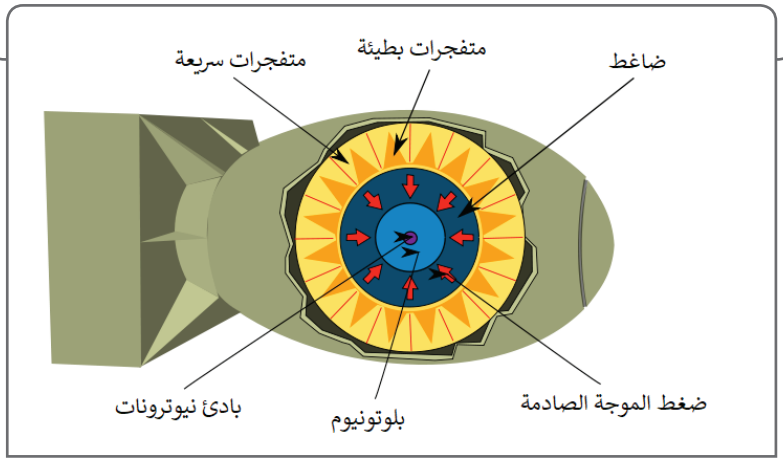


في البداية كان المزمع استخدام "تصميم طراز-المدفع" السابق ذكره مع قنبلة البلوتونيوم أيضا. لكن خبراء المشروع اكتشفوا في صيف 1944أن البلوتونيوم المنتج في مفاعلات هانفورد، والذي سيستخدم في صنع القنبلة، كان يحتوي على آثار من البلوتونيوم-240، وهو نظير ينشطر تلقائياً بسرعة. خشي العلماء أن تؤدي النيوترونات المنطلقة أثناء الانشطار التلقائي في نوى البلوتونيوم-240 إلى إحداث تفاعل مسلسل في أي من قطعتي الوقود النووي (القذيفة أو الهدف) قبل أن يندمج معاً، فيحدث تفجير متسرع وانفجار ضعيف (فرقعة). تسببت هذه المشكلة العويصة في تأخر إنتاج قنبلة البلوتونيوم، ودفعت أوبنهايمر إلى التفكير في الاستقالة من منصبه.

اقترح "سث ندماير Seth Neddermeyer"، أحد علماء لوس ألاموس، فكرة استخدام شحنة متفجرة لكبس كرة من وقود البلوتونيوم بسرعة مفرطة لتصبح فوق-حاسمة، وينتج الانفجار النووي المطلوب. كانت هذه الفكرة جديدة تماما، ولم يكن أحد من الفريق العلمي يستطيع أن يضمن نجاحها.

يتكون قلب قنبلة الرجل البدين مما يلي (الشكل 133): كرة مجوفة من البلوتونيوم، غلاف خارجي من المتفجرات، وبادئ نيتروني.

**الشكل 133:**
**مخطط مبسط لتركيب قنبلة "الرجل البدين"**




**يحدث الانفجار النووي في قنبلة الرجل البدين على النحو التالي:**

1. تُشعَل المادة المتفجرة المحيطة بالمادة الانشطارية (البلوتونيوم-239 أساسا).
2. تضغط الموجات الارتجاجية المتولدة على سطح كرة البلوتونيوم، على جميع النقاط في آن واحد.
3. تصبح كتلة البلوتونيوم فوق-حاسمة نتيجة انضغاطها (زيادة كثافتها) بفعل الموجات الارتجاجية.

4. يَطلِق البادئ حينئذ وابلا من النيوترونات لتعزيز التفاعل المسلسل (تجاوز الكثير من "أجيال" الانشطار" الأولى).

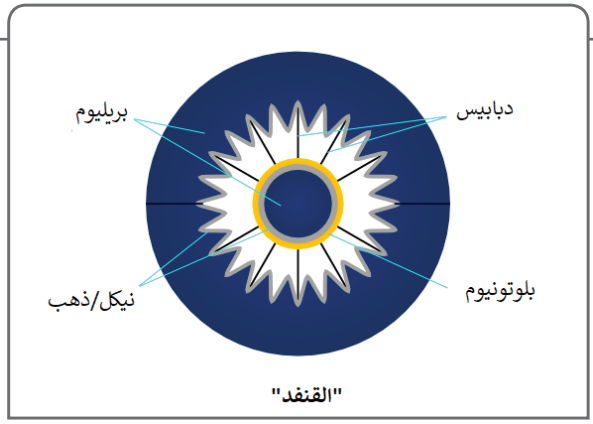
5. يستمر التفاعل المسلسل حتى يصبح الضغط تجاه الخارج المتولد من الطاقة النووية المتحررة أعلى من ضغط الموجات الارتجاجية نحو الداخل.

6. بينما يتحطم جسم القنبلة، تنتقل الطاقة المتحررة إلى الأشياء المحيطة بالانفجار.

وظيفة البادئ الحيوية هي إمطار قلب القنبلة بوابل من النيوترونات في التوقيت الصحيح (لتحرير أكبر قدر ممكن من الطاقة النووية قبل تحطم القنبلة تحت وطأة الضغط الداخلي المتزايد). أطلق على تصميم البادئ النيوتروني اسم "القنفد urchin" أو "الأحمق screwball" (الشكل 134). يتكون البادئ القنفد من قوقعة كروية من البريليوم beryllium، جدارها الداخلي محزز. القوقعة بداخلها حبة مستديرة من البريليوم أيضا، متمركزة في التجويف بواسطة دبابيس متصلة بالقوقعة. الحبة محاطة بقشرة من البولونيوم polonium. تُغطي جدار القوقعة المحزز وسطح الحبة المستدير طبقة من الذهب والنيكل.

**الشكل 134:**

**البادئ النيوتروني من طراز القنفد**



البريليوم والبولونيوم عنصران مشعان. يبث البولونيوم جسيمات ألفا. عند قصف البريليوم بهذه الجسيمات يتحول إلى الكربون وتنطلق النيوترونات الحرة.

**بريليوم + جسيم ألفا ← كربون + نيوترون**

لا يحدث هذا التفاعل في القنبلة غير المُفَجَّرة لأن طبقة النيكل والذهب تمتص جسيمات ألفا المنبعثة من البولونيوم. يختلط البريليوم بالبولونيوم لحظة تفجير قلب القنبلة، فينطلق فيض من النيوترونات الحرة.

## سُحُب مروعة

في مايو 1945، انهزمت ألمانيا أمام الحلفاء. وفي 7 مايو، وقع ممثل القيادة العليا الألمانية، الجنرال "ألفرد يودل Alfred Jodl" على وثيقة استسلام القوات العسكرية الألمانية. كان ذلك قبل اكتمال صنع القنبلة النووية بشهرين. لكن الحرب استمرت مع اليابان.

قبل بزوغ شمس 16 يوليو 1945، جرى اختبار أول قنبلة نووية في منشأة عسكرية بصحراء نيو مكسيكو. كان الاسم الرمزي لهذا الاختبار هو "الثالوث الأقدس Trinity".[1] تَبَعَ الضوء الباهر للانفجار المروع ارتفاع سحابة على شكل الفطر (المَشْرُوم) من أرضية الصحراء (الشكل 135). من هول الانفجار النووي، تحطمت نوافذ المنازل التي كانت تبعد عن موقع الانفجار بأكثر من 80 كيلومترا.

يطلق على القدرة التدميرية للقنابل النووية اسم الحصد yield، وتقاس

(1) يُحكى أن تشبيه «الثالوث الأقدس» اُستُخدِم كذلك للإشارة إلى الثلاثية Troika المجتمعة في "مؤتمر يالطا Yalta Conference" (الاتحاد السوفيتي، 1 – 4 فبراير 1945)، لمناقشة مستقبل أوروبا ما-بعد-الحرب: روزفلت، تشرشل، وستالين. يقال إن ستالين علق على ذلك مازحا، "تشرشل دائما في الجو، فليأخذ هو وصف 'الروح القدس'."

بكمية المتفجرات من نوع TNT المطلوبة لإحداث تدمير مماثل (يطلق تفجير طن من مادة TNT طاقة مقدارها $4184 \times 10^9$ ج). بلغ حصد قنبلة نيومكسيكو نحو 22 كيلوطن (كط).

**الشكل 135:**

**أول تفجير نووي (صحراء نيو مكسيكو)**

استقبل الرئيس الأمريكي، "هاري ترومان Harry Truman"، أخبار نجاح تجربة القنبلة الذرية بينما هو يشارك في اجتماع لزعماء دول التحالف بمدينة "بوتسدام Potsdam" الألمانية (مؤتمر بوتسدام Potsdam Conference، 16 يوليو – 2 أغسطس 1945؛ الشكل 136).[1] كانت الرسالة الرمزية المتفق عليها التي وصلت ترومان في بوتسدام هي "لقد ولد الطفل بنجاح."[2] في اليوم التالي، أخبر ترومان رئيس الوزراء البريطاني "ونستون تشرشل Winston Churchill" عن نجاح التجربة، واتفق الاثنان على ألا يقولا شيئا "الآن" عن السلاح الجديد

(1) توفي الرئيس الأمريكي فرانكلين روزفلت مريضا في 12 إبريل 1945.

(2) الملفت أن "كلاوس فوكس Klaus Fuchs"، الفيزيائي الذي كان يسرب أسرار القنبلة الذرية الأمريكية إلى السوفييت، قال ذات مرة لرجل الاستخبارات المتواصل معه، معلقا على بعض المعلومات التي طلبها علماء الذرة السوفييت، "سيولد طفل، وسيسمع صوته قريبا."

للزعيم السوفياتي "جوزيف ستالين Joseph Stalin".[1] كان ترومان يريد الحصول على تعهد من ستالين بمشاركة الاتحاد السوفيتي إلى جانب الحلفاء في الحرب على اليابان بالمحيط الهادي.[2]

في 25 يوليو، بعد الحصول على التعهد المطلوب، أخبر ترومان ستالين بشكل عابر أن الولايات المتحدة لديها "سلاح جديد ذو قوة تدميرية غير معتادة." الطريف، أن ستالين لم يبدي أي اهتمام خاص، ولم يسأل ترومان التوضيح— ربما لأنه كان يعرف تماما طبيعة هذا السلاح؛ تبين بعد انتهاء الحرب أن الاتحاد السوفيتي كان لديه جواسيس، وأشهرهم الفيزيائي الألماني "كلاوس فوكس Klaus Fuchs"، داخل مشروع مانهاتن "السري".[3]

في 26 يوليو 1945، أصدرت كل من الولايات المتحدة، بريطانيا، والصين إنذارا نهائيا لليابان يدعوها إلى الاستسلام غير المشروط (والذي أصبح يعرف بـ "بيان بوتسدام Potsdam Declaration").[4] حدد البيان البنود الرئيسية

(1) يظن بعض المؤرخين الروس أن البريطانيين والأمريكيين لم يكونوا صادقين كثيراً مع حلفائهم السوفييت. يبرهنون على ذلك بأن الاستخبارات البريطانية كانت تعطي العسكريين السوفييت معلومات مغلوطة عن تحركات القوات الألمانية. كما حدث أن قَصَف الطيران الأمريكي فيلقاً من القوات السوفيتية في البلقان («نيش Niš"، صربيا) في نوفمبر 1944، مما تسبب في مقتل قائد الفيلق، الجنرال "كوتوف Kotov"، ومقتل وإصابة الكثير من رجاله (31 قتيلاً و37 مصاباً). كان التبرير "الأنجلو-أمريكي" لهذه الحوادث هو، كالمعتاد حالياً، "الأخطاء الاستخباراتية".

لطالما أثارت فضولي علاقات "التماهي" الواضح بين بريطانيا "العظمى" ومستعمراتها السابقة في "العالم الجديد" (الولايات المتحدة، كندا، أستراليا، ونيوزيلندا). أحد التفسيرات الوجيه، التي قدمها لي زميل هندي، وتستحق التمعن والتحليل، إنه "حب الإنسان الغريزي للانتماء إلى شيء عظيم."

(2) لم يكن ترومان، بعكس روزفلت، على علاقة طيبة بستالين.

(3) وفقاً لشهادات رجال الاستخبارات السوفييت، لم يكن كلاوس فوكس يقبل أية أموال نظير خدماته التجسسية، إنما كان يقدمها بالمجان من باب إيمانه العميق بالشيوعية.

(4) لم يكن ستالين طرفاً في هذا الإنذار لأن الإتحاد السوفيتي لم يكن قد أعلن رسمياً بعد الحرب على اليابان.

للاستسلام المطلوب، والتي شملت نزع كامل لسلاح اليابان، احتلال أجزاء منها، وإنشاء حكومة جديدة تتمتع بالمسؤولية. لكن البيان وعد أيضا بأن اليابان لن "تستعبد كعرق أو تدمر كأمة." انتهى البيان بالوعيد بـ "تدمير فوري وتام" في حال رفض الاستسلام.

جاء الرد على لسان رئيس الوزراء الياباني "سوزوكي كانتارو Suzuki Kantaro" خلال مؤتمر صحفي بكلمة يابانية واحدة: "موكوساتسو mokusatsu". ثار الجدل حول ترجمة هذه الكلمة، والتي قد تعني "لا تعليق". على كل حال، لم يصدر تعليق (آخر) من اليابان حتى يوم 6 أغسطس 1945.

**الشكل 136:**

**اجتماع قادة الحلفاء في بوتسدام**

بعد انتهاء "مؤتمر بوتسدام Potsdam Conference" وعودة الرئيس الأمريكي إلى بلاده، بدى للقيادة الأمريكية أن اليابان مصممة على الاستمرار في الحرب، وأنه لابد من غزو عسكري شامل لليابان لدفعها إلى قبول الاستسلام غير المشروط. حذر المستشارون العسكريون رئيسهم الجديد من أن تكلفة مثل هذا الغزو ستكون موت عشرات أو مئات الألاف من شباب القوات المسلحة الأمريكية.

في 6 أغسطس 1945، ألقت القاذفة الأمريكية "إنولا جاي Enola Gay" قنبلة "الفتى الصغير" على مدينة هيروشيما اليابانية.[1] كان الجو صحوا فوق المدينة، وتمكن طاقم القاذفة من رؤية نقطة التصويت بوضوح: جسر "أيواي Aioi" القريب من مركز المدينة. حُددت نقطة التفجير لتكون فوق الجسر بمسافة 168 مترا فقط لإحداث أكبر قدر من التدمير. تسببت القنبلة في تخريب جل المدينة وفي مقتل نحو 140,000 من سكانها. بلغ حصد القنبلة 12.5 ك‌ط.

في اليوم التالي، يطالب الرئيس الأمريكي مجددا اليابان بالاستسلام، وترفض اليابان ثانية.

في 8 أغسطس (بعد إلقاء "الفتى الصغير" على هيروشيما بيومين)، أعلن الاتحاد السوفيتي رسميا الحرب على اليابان.

في 9 أغسطس، تلقي القاذفة الأمريكية "سيارة بوك Bock's Car" القنبلة الذرية الثانية على "ناجاساكي Nagasaki" اليابانية—هذه المرة، قنبلة "الرجل البدين". كان الهدف الأصلي هو مدينة الأسطول الياباني: "كوكورا Kokura"، لكن سوء الأحوال الجوية فوق المدينة دفع قائد المهمة إلى الانتقال إلى الهدف البديل (ناجاساكي). لم تخلو سماء ناجاساكي من السحب، لكن مَلّاح المقاتلة نجح في تحديد الهدف اعتماداً على الرؤية والرادار معاً. تسببت قنبلة "الرجل البدين" في قتل نحو 70,000 من السكان، وهو أقل كثيرا من ضحايا "الفتى الصغير"، رغم قوتها التدميرية المضاعفة (22 ك‌ط)، وذلك بسبب التلال القائمة حول المدينة.

تسببت القنبلتان في قتل نحو 210,000 من المدنيين.

أخيراً، تذعن اليابان وتعلن استسلامها رسمياً في 15 أغسطس 1945. أشار

(1) في 6 أغسطس 2020، أحيت مدينة هيروشيما ذكرى ضربها بالقنبلة الذرية بعد مرور 75 عاماً على ذلك.

الإمبراطور الياباني في خطابه إلى شعبه أن الأمريكيين قد "بدأوا في استخدام قنبلة جديدة فائقة الوحشية، ولا يمكن حساب قدرتها على التدمير"، وأن ذلك مع "أوضاع الحرب" كان السبب في قبوله شروط الاستسلام.

يحاول بعض الكتاب والمؤرخون تبرئة ساحة الرئيس ترومان من وازرة استخدام السلاح النووي ضد المدنيين بالقول إنه وافق على ذلك بعدما اقتنع أنه سيقتصر الحرب وينقذ أرواح مئات الألاف—أمريكان ويابانيين، عسكريين ومدنيين.[1] أيا كان دافع ترومان الحقيقي، فإن التاريخ يُعلمّنا مجددا أن في وقت الحرب، يصبح كل شيء مباحا، وأن المنتصر هو وحده من يحدد—ليس فقط قواعد "السلام" بل أيضا "أخلاقيات" الحرب. عندما سُئل الملاح الذي ألقى القنبلة الذرية الأولى، بعد 65 سنة من تاريخه، "هل كنت لتفعلها ثانية؟" أجاب واثقا، "تحت نفس الظروف... نعم، كنت سأفعلها مجدداً."

أُنهي مشروع مانهاتن رسميا في 1946، وأصبحت منشآته، بعد جدل شديد، جزءا من "مفوضية الطاقة الذرية Atomic Energy Commission" الأمريكية.

### الجـــربـــوع الأزرق

كثيرة هي الكتابات التي تتناول الآثار البيئية لتجارب السلاح النووي الأولى على الأراضي الأمريكية. في المقابل، لا يعرف سوى القليل من الناس (من غير الجزائريين) شيئا عن التجارب الفرنسية المماثلة في أراضي الجزائر (المحتلة فرنسيا في ذلك الزمن).

"الجربوع الأزرق" (بالفرنسية "Gerboise Bleue") هو الاسم الرمزي لأول تجربة تفجير نووي فرنسية. جرى تفجير قنبلة البلوتونيوم هذه في الصحراء

(1) يقال كثيراً أن "التاريخ يكتبه المنتصرون."

الكبرى بالقرب من بلدة "رقان" الجزائرية في 13 فبراير 1960. في ذلك الوقت، كانت الجزائر ما تزال تحت وطأة الاحتلال الفرنسي الغاشم.

في الساعة 7:04 (بتوقيت الجزائر) فجرت القنبلة النووية الفرنسية الأولى على برج من الصلب بارتفاع 100 متر. ابتعد مقر قيادة العملية عن موقع التفجير بـ 16 كيلومترا. لم يسمح للصحفيين بحضور التفجير. تقول رواية شاهد العيان التي قدمت للصحافة الفرنسية ما يلي: "لقد أضيئت الصحراء بوميض شاسع. أعقب ذلك بعد 45 ثانية موجة ارتجاجية ملحوظة. مهدت كرة هائلة من النار المزرقة الصادرة من مركز أحمر-برتقالي—مهدت الطريق على سحابة عيش الغراب المشهورة."

بنجاح تجربة الجربوع الأزرق، أصبحت فرنسا القوة النووية الرابعة، بعد الولايات المتحدة، الاتحاد السوفيتي، والمملكة المتحدة. بلغت قوة القنبلة الفرنسية التدميرية 70 كط، أي أقوى من القنابل الثلاثة التالية مجتمعة: "الثالوث" الأمريكية (20 كط)، "جوي 1" السوفيتية (22 كط)، و"إعصار" البريطانية (25 كط).

في فرنسا الاستعمارية، المجروحة في كبريائها خلال الحرب العالمية الثانية، قوبلت أخبار نجاح الجربوع الأزرق بالرضا والفخر. أعرب الرئيس الفرنسي حينئذ، الجنرال شارل ديجول، عن هذا الشعور قائلاً، "هنيئاً لفرنسا! منذ هذا الصباح أصبحت أقوى وأكثر فخراً."[1]

في المقابل، أعلنت الدول الأفريقية المستقلة حديثاً حينئذ عن غضبها من

(1) في 22 يونيو 2020، قال وزير قدماء المحاربين في الجزائر، الطيب زيتوني، أن بلاده ماضية في سن قانون لـ"تحريم الاستعمار" الفرنسي للبلاد بين سنتي 1830 و1962. جاءت تصريحات الوزير الجزائري خلال جلسة برلمانية لمناقشة مرسوم رئاسي يجعل 8 مايو عيداً وطنياً سنوياً لتخليد ذكرى عشرات آلاف الشهداء الذين سقطوا برصاص جيش الاحتلال الفرنسي عام 1945.

التجربة النووية الفرنسية على الأراضي الأفريقية. جمدت غانا جميع الأصول الفرنسية، حتى يتم التعرف على آثار الجربوع الأزرق. سحبت المغرب سفيرها في باريس بعد يومين فقط من الحدث. عبرت دول أفريقية أخرى عن مخاوفها من التداعيات الإشعاعية على سلامة مواطنيها.

استمرت تجارب فرنسا النووية في الصحراء الكبرى (في بلدة رقان وبعد ذلك في منطقة "عين عكر" الجبلية) حتى عام 1966 (الشكل 137).[1]

وفقاً لأحد التقارير الأمريكية، "كان التطور في العلوم والتكنولوجيا النووية في فرنسا وإسرائيل مرتبطاً ارتباطاً وثيقاً في أوائل الخمسينات." علاوة على ذلك، "كان هناك العديد من المراقبين الإسرائيليين في التجارب النووية الفرنسية، وتمتع الإسرائيليون بإمكانية الوصول غير المقيد إلى بيانات التجارب النووية الفرنسية."

**الشكل 137:**
**التجارب النووية الفرنسية في الصحراء الكبرى**

(1) مازالت الجزائر تطالب فرنسا حتى اليوم بتسليمها خرائط مواقع النفايات الكيماوية والمشعة التي دفنها الفرنسيون في الجزائر أثناء احتلالهم الفرنسي لها.

## تطـور السـلاح النـــووي

لم تتوقف ابتكارات الإنسان التدميرية عند قنبلتي الفتى الصغير والرجل البدين، بل وصلت إلى اختراع قنبلة تتعدى مقدرتها التدميرية 700 ضعف تلك الخاصة بقنبلة الفتى الصغير. تعرف هذه القنبلة المروعة باسم *قنبلة الاندماج fusion bomb*، *القنبلة الهيدروجينية hydrogen bomb*، أو *القنبلة الحرارة-نووية thermonuclear*.

## الانـدمـــاج النـــــووي

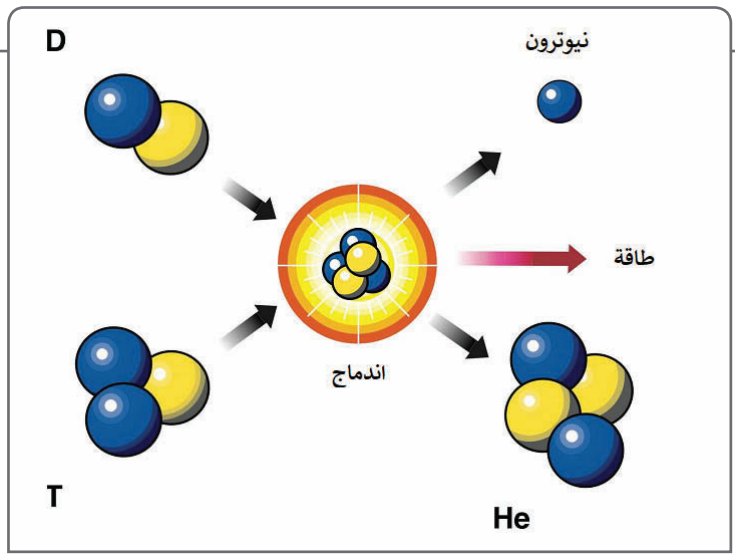
عرفنا أن انشطار نوى بعض العناصر الثقيلة المشعة (مثل اليورانيوم-235 والبلوتونيوم-239) ينتج الطاقة النووية. اكتشف العلماء بعد ذلك أن اندماج نوى بعض العناصر الخفيفة، مثل الهيدروجين، يطلق أيضا الطاقة النووية. يطلق على هذه العملية اسم *الاندماج النووي nuclear fusion*. يحدث الاندماج النووي باستمرار في الكون. داخل قلب الشمس، حيث تصل درجة الحرارة إلى 10 - 15 مليون درجة مئوية، تندمج أزواج من نوى الهيدروجين معاً إلى نوى الهيليوم، وتنطلق الطاقة الشمسية التي تعول الحياة على كوكبنا.

بحث العلماء لعقود إنتاج الطاقة النووية، للأغراض العسكرية والمدنية، عن طريق دمج نواتي الديوتيريوم والتريتيوم (تفاعل D-T).

الديوتيريوم والتريتيوم هما نظيران لعنصر الهيدروجين (أخف العناصر الكيميائية). تحتوي نواة الديوتيريوم على بروتون ونيوترون؛ التريتيوم على بروتون ونيوترونين. تحت درجات الحرارة الهائلة يندمج النظيران مكونين عنصر الهيليوم، يتحرر نيوترون، وتنطلق طاقة هائلة (الشكل 138).

**الشكل 138 :**

**تفاعل الاندماج بين الديوتيريوم والتريتيوم**




في درجات الحرارة الهائلة المطلوبة لحدوث الاندماج النووي تتحول المادة إلى حالة البلازما plasma، حيث تتواجد النوى والإلكترونات "سابحة" في فضاء من الحرارة العالية. التحدي الرئيس الذي يواجه استخدام الاندماج النووي لتوليد الكهرباء تجاريا هو كيفية احتواء هذه البلازما هائلة الحرارة.

أمكن استخدام الاندماج النووي في صنع القنبلة الهيدروجينية، ولكن لم يتمكن من توظيفه حتى الآن في إنتاج الطاقة تجارياً.

### القنبلة الهيدروجينية

توظف القنبلة الهيدروجينية عمليتي الانشطار والاندماج النوويين في إحداث انفجار نووي هائل. قدرتها التدميرية أعلى بألاف المرات من تلك الخاصة بالقنبلة الذرية، لكن صنعها وصيانتها يتطلب قدرات تكنولوجية عالية للتغلب على التحديات التالية:

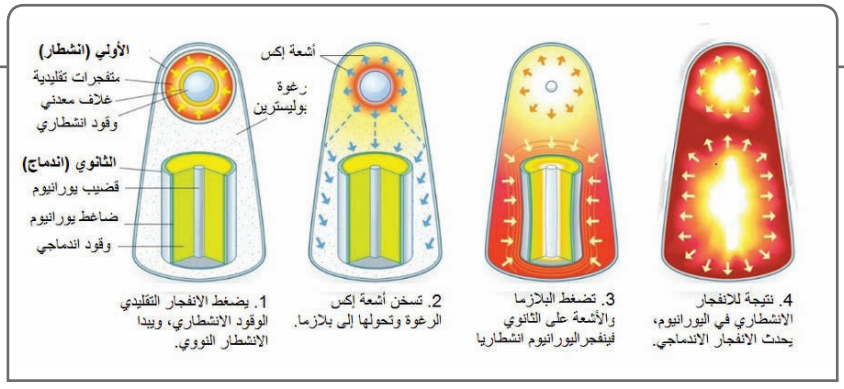
- الديوتيريوم والتريتيوم، وقود القنبلة الهيدروجينية، غازان، ما يجعل تخزينهما صعباً.
- التريتيوم نادر جداً في الطبيعة، ولذلك يجب تحضيره صناعياً. كما أن عمره النصفي قصير.
- يجب أن يكون وقود القنبلة تحت ضغط وحرارة هائلين كي يحدث الاندماج النووي.

جرى التغلب على أول مشكلتين عن طريق توليد الديوتيريوم والتريتيوم داخل القنبلة قبيل الانفجار من مركب ديوتيريد الليثيوم lithium deuteride (ملح صلب). يجرى الحصول على الحرارة والضغط العاليين من خلال تفجير نووي انشطاري (قنبلة ذرية مصغرة).

لنتعرف الآن على التركيب الأساسي للقنبلة الهيدروجينية وطريقة عملها. تتكون هذه القنبلة من جزئين رئيسين: واحد انشطاري (قنبلة ذرية)، يسمى *الأولي the primary*، وآخر اندماجي، يسمى *الثانوي the secondary* (الشكل 139). يفصل بين الجزئين حشوة من مادة لدنة (Styrofoam).

**الشكل 139:**

**فكرة عمل القنبلة الهيدروجينية**



المكون الأول هو عبارة عن قنبلة ذرية مصغرة لا تختلف كثيرا في تكوينها عن قنبلة "الرجل البدين". المكون الثاني أو الثانوي عبارة عن أسطوانة من اليورانيوم مملوءة بديوتيريد الليثيوم، الوقود الرئيس للقنبلة الهيدروجينية، وفي قلبها قضيب مجوف من البلوتونيوم.

تفجير المكون الأول يولد مقدار هائل من الإشعاع، شاملا أعداد هائلة من النيوترونات. تحول هذه الأشعة المادة اللدنة على الفور إلى بلازما. يزداد الضغط على الجزء الثاني من القنبلة (الثانوي)، المكون في معظمه من ديوتيريد الليثيوم،[1] بفعل الإشعاع والبلازما، وترتفع حرارته إلى ملايين الدرجات المئوية، فيحدث تفاعل الاندماج النووي السابق ذكره، كما يلي:[2]

- تتفاعل النيوترونات مع الليثيوم (في مركب ديوتيريد الليثيوم)، مكونة التريتيوم والهيليوم. نلاحظ أن هذا التفاعل ينتج التريتيوم في حينه، ومن ثم لا حاجة للاحتفاظ بغاز التريتيوم داخل القنبلة الهيدروجينية.
- يندمج التريتيوم مع الديوتيريوم (في المركب)، وينتج الهيليوم، مزيد من النيوترونات، وطاقة الاندماج النووية.

تتسبب النيوترونات الناتجة من الاندماج النووي في ديوتيريد الليثيوم في انشطار نووي في كل من أسطوانة اليورانيوم وقضيب البلوتونيوم، فيزداد الضغط، الحرارة، وفيض النيوترونات داخل الثانوي، مسببة مزيد من تفاعلات الاندماج. وهكذا حتى ينفجر الجسم الحاوي، وتنطلق الطاقة الهائلة.

تأتي القوة التدميرية للقنبلة الهيدروجينية من الطاقة النووية المنطلقة من تفاعلات الانشطار والاندماج قبل تحطم جسم القنبلة. لا تستغرق عملية تفجير

(1) ينضغط ديوتيريد الليثيوم بنحو 30 ضعفاً.

(2) للإشعاع قوة ضغط على الأسطح التي يسقط عليها، لكننا لا نلاحظها في حياتنا اليومية لأنها ضئيلة بالنسبة للقوى الأخرى (مثل الجاذبية).

القنبلة الهيدروجينية سوى 600 على مليار جزء من الثانية (550 جزء للأولي؛ 50 جزء للثانوي). بلغت القوة التدميرية لأول قنبلة هيدروجينية في العالم (الولايات المتحدة، 1952) 10,000 كيلوطن (10 ميجاطن)، أي أقوى بـ 700 ضعف من انفجار "الفتى الصغير".

من الناحية النظرية، لا حدود لقوة القنبلة الهيدروجينية: كلما زاد الوقود، كلما كبر الانفجار. القنبلة الروسية "تسار بومبا Tsar Bomba" (تعني في الروسية "قنبلة القيصر") هي أكبر قنبلة هيدروجينية صنعت في العالم (الشكل 140). بلغت قوتها التدميرية 57 مط، وقد جرى اختبارها سرا في 30 أكتوبر 1961 (الشكل 141). يجدر بالذكر أن الروس السوفييت كانوا ينون اختبار قنبلة تبلغ قوتها التدميرية 100 مرط، لكنهم عدلوا عن ذلك خشية من الدمار الذي قد ينتج عن اختبار مثل هذه القنبلة.

**الشكل 140:**
**نموذج هيكلي لقنبلة "تسار بومبا"**

**الشكل 141 :**
**انفجار "قنبلة القيصر" الهيدروجينية**

### سباق التسلح النووي

بعد الحرب العالمية الثانية، دخلت الولايات المتحدة مع الاتحاد السوفيتي في سباق تسلح نووي. هكذا بدأت الحرب الباردة بينهما، والتي استمرت قرابة النصف قرن. في 1948، اختبرت الولايات المتحدة في المحيط الهادي قنبلة نووية جديدة أكبر من قنبلتي هيروشيما وناجاساكي. بحلول 1949، امتلك الاتحاد السوفيتي قنبلته النووية الأولى. ردا على ذلك، انكبت الولايات المتحدة على تطوير سلاح نووي جديد أخطر بألاف المرات من القنبلة الذرية: القنبلة الهيدروجينية.

اختبرت الولايات المتحدة سلاحها الهيدروجيني الجديد في نوفمبر 1952، أياما قليلة قبل أن يكسب "دوايت أيزنهاور Dwight Eisenhower" الرئاسة الأمريكية. أدى عصف انفجار القنبلة إلى إزالة الجزيرة التي جرى عليها الاختبار: جزيرة "ألوجلاب Elugelab"، مسببة حفرة قطرها 1,500 ياردة (1,372 متراً) تحت الماء (بلغت قوتها التدميرية 10 مط).

أنتج في السبعين سنة الماضية أكثر من 128,000 سلاح نووي، 98% منها أنتجت في الولايات المتحدة والاتحاد السوفيتي السابق. مازال أعضاء النادي النووي التسعة يمتلكون حوالي 27,000 سلاح نووي عامل. يضم النادي النووي كل من الولايات المتحدة، المملكة المتحدة، فرنسا، الهند، باكستان، الصين، إسرائيل، وكوريا الشمالية. هناك 15 دولة أخرى لديها من اليورانيوم عالي التخصيب ما يكفي لصنع سلاح نووي.

أغلب الأسلحة النووية الموجودة حاليا هي من نوع القنابل الهيدروجينية، لأنها أكثر تدميرا وأصغر حجما.

### الـــذرة من أجـــل الســـــلام

في 8 ديسمبر 1953 (أوج الحرب الباردة)، تقدم الرئيس الأمريكي أيزنهاور، في خطاب فصيح أمام الجمعية العامة للأمم المتحدة، بمبادرة لتوظيف التكنولوجية النووية في الأغراض السلمية. اشتهرت هذه المبادرة باسم "الذرة من أجل السلام Atom for Peace" (الشكل 142).

> ... تتعهد الولايات المتحدة أمامكم، ومن ثم أمام العالم، عزمها على أن تساعد في حل المعضلة النووية المخيفة—أن تكرس كل قلبها وعقلها لإيجاد السبيل الذي به لن يخصص إبداع الإنسان المعجزة إلى موته، وإنما ينذر لحياته.

**الشكل 142 :**

**الرئيس الأمريكي، دوايت أيزنهاور، يقدم للأمم المتحدة خطابه "الذرة من أجل السلام"**

يعد المحللون خطاب "الذرة من أجل السلام" نقطة التحول إلى الاستخدام السلمي للطاقة النووية. مازال الجدل يثار حتى الآن حول الدافع الحقيقي وراء مبادرة أيزنهاور السلمية. يرى البعض أن أهوال الحرب التي خبرها أيزنهاور، الجنرال ذو الأربعة نجوم أثناء الحرب العالمية الثانية، حولته إلى رجل سلام (الشكل 143). في حين يرى البعض الآخر أنه كان امتصاص ردة فعل الناس الغاضبة تجاه الخراب النووي الذي انتهت به الحرب العالمية الثانية.[1] أيا كان دافعه الحقيقي، لا ننسى أن في 1953 لم تعد الولايات المتحدة تحتكر السلاح النووي؛ كان الاتحاد السوفيتي قد اختبر بالفعل عدة قنابل نووية، من بينها واحدة على الأقل هيدروجينية.

(1) شغل الجنرال أيزنهاور أثناء الحرب العالمية الثانية منصب "القائد الأعلى لقوات الحلفاء في أوروبا Supreme Commander of the Allied Expeditionary Force in Europe"، منذ أواخر 1943 وحتى نهاية الحرب في صيف 1945.

**الشكل 143 :**

**الجنرال أيزنهاور يتحدث إلى بعض أفراد الجيش الأمريكي في 5 يونيو 1944 قبل إسقاطهم بالمظلات في فرنسا**

لقد رسم خطاب الذرة من أجل السلام ملامح السياسة النووية الدولية من تاريخه وحتى الآن. تبع الخطاب تكون برامج عديدة للاستخدام السلمي للطاقة النووية في الطب، الزراعة، إنتاج الكهرباء، ومجالات أخرى عديدة.

### الوكالة الدولية للطاقة الذرية

هي وكالة "بين-حكومية intergovernmental" مستقلة، مقرها فيينا (النمسا). أنشأت الوكالة الدولية للطاقة الذرية بواسطة ممثلين لأكثر من 80 دولة في أكتوبر 1956، قرابة ثلاث سنوات بعد خطاب أيزنهاور. دخل قانون إنشاء الوكالة حيز التنفيذ في 29 يوليو 1957. تضم عضوية الوكالة الآن 172 دولة.

**تشمل أهم أنشطة الوكالة ما يلي:**

- البحث في تطبيقات الطاقة الذرية السلمية؛
- تنظيم المؤتمرات، برامج التدريب، والمنح الدراسية ونشر الدراسات من أجل تنشيط تبادل المعلومات والمهارات الفنية؛
- تقديم الدعم الفني، خاصة للدول الأقل تطورا؛
- تحديد معايير الحماية من الإشعاع؛

بعد عقد معاهدة منع الانتشار النووي في 1968، أعطت الوكالة سلطة متابعة البرامج النووية والتفتيش على المرافق النووية في "الدول غير النووية" الأطراف في المعاهدة.

**تعود فكرة إنشاء الوكالة الدولية للطاقة الذرية إلى خطاب أيزنهاور السابق ذكره:**

> تعرف الولايات المتحدة أنه لو أمكن عكس التوجه المخيف نحو الاستفحال العسكري الذري، فإن أعظم القوى التدميرية هذه يمكن تنميتها إلى نعمة كبيرة، لصالح البشرية جمعاء.
>
> ...
>
> يجب على الحكومات المنخرطة أن تبدأ الآن وتستمر في تقديم الاسهامات المشتركة من مخزونها من اليورانيوم الطبيعي والمواد القابلة للانشطار إلى وكالة دولية للطاقة الذرية.

يعقد مؤتمر الوكالة العام، الذي يشمل كل الأعضاء، كل سنة للموافقة على ميزانية الوكالة والبرامج، ومناقشة سياساتها العامة. كما أنه مسؤول عن تعيين المدير العام وقبول الأعضاء الجدد.

يضم مقر الوكالة الأقسام التالية: الطاقة النووية، السلامة النووية، العلوم والتطبيقات النووية، الضمانات (ضمانات عدم انتشار السلاح النووي)، والتعاون الفني.

لم تصبح الوكالة الدولية أبدا مصرفا للمواد القابلة للانشطار، كما طالب في خطابه الشهير أيزنهاور، لكنها ما زالت ذات تأثير كبير في عدم الانتشار النووي وتنمية الطاقة النووية السلمية.

في عام 2005، حازت الوكالة ومديرها العام، محمد البرادعي في ذلك الوقت، على جائزة نوبل للسلام (الشكل 144).

**الشكل 144:**

**دكتور محمد البرادعي**

**يتسلم جائزة نوبل للسلام في ديسمبر 2005**

### معاهـدة عـدم الانتشـار النـووي

وقعت "المعاهدة حول منع انتشار الأسلحة النووية Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons"، المعروفة أيضاً بـ "معاهدة عدم الانتشار النووي Nuclear Non-Proliferation Treaty"، في يوليو 1968 كل من الولايات المتحدة، الاتحاد السوفيتي، المملكة المتحدة، و95 دولة أخرى (الشكل 145). دخلت الاتفاقية الدولية حيز التنفيذ في 5 مارس 1970، لمدة 25 عاماً. في 1995، مُددت المعاهدة بالإجماع في مقر الأمم المتحدة إلى الأبد وبدون شروط (موافقة 174 دولة). يبلغ عدد أطراف المعاهدة حتى الآن 190 دولة (بدون كوريا الشمالية).

**الشكل 145:**
**الرئيس الأمريكي، ل. جونسون L Johnson**
**(أقصى اليمين)، ينظر إلى وزيره للخارجية، د. رسك D Rusk،**
**وهو يوقع المعاهدة في 1968**

تهدف هذه الاتفاقية الدولية كما هو واضح من اسمها إلى الحد من انتشار الأسلحة النووية. تتكون المعاهدة من ثلاثة عناصر رئيسة: (1) منع الانتشار النووي، (2) نزع السلاح النووي، و(3) تنمية الاستخدام السلمي للطاقة النووية.

1. لن تحرز الدول غير النووية (ليس لديها أسلحة نووية قبل توقيعها على المعاهدة) هذه الأسلحة؛
2. سوف تسعى الدول النووية إلى نزعها؛
3. يحق لجميع الدول الأطراف الوصول إلى التكنولوجيا النووية السلمية، تحت الضمانات الكافية.

هذه المعاهدة هي فريدة من نوعها في القانون الدولي، حيث تقنن احتكار خمسة أطراف فقط للسلاح النووي، هي الولايات المتحدة، روسيا (بديلا عن الاتحاد السوفيتي المنحل)، الصين، المملكة المتحدة، وفرنسا. تعرف هذه الأطراف باسم "الدول ذات السلاح النووي nuclear-weapon states (NWSs)"، وتعرف جميع الأطراف الأخرى بـ "الدول بلا سلاح نووي non-nuclear-weapon states (NNWSs)".

وافقت الأطراف الأخرى على الانضمام إما لأنها لم تكن تملك الإمكانيات الضرورية لصنع السلاح النووي أو لم يكن لديها النية لذلك. في مقابل هذا الحق الخاص، تعهدت الدول النووية الخمسة بأنها سوف تساعد الأطراف غير النووية في تطوير برامجها النووية السلمية (رغم عدم وضوح الحد الفاصل بين التكنولوجيا النووية المدنية والعسكرية)، وأن تعمل على نزع السلاح النووي من العالم. يجادل البعض أن الدول الخمسة ذات السلاح النووي هي التي لا تلتزم في الواقع بهذه المعاهدة؛ فبعد مرور نحو 50 عاماً على إقرار المعاهدة، لم تنزع تلك الدول سلاحها النووي.

تشمل المعاهدة الآن كل العالم عدا إسرائيل، الهند، باكستان، كوريا الشمالية، وجنوب السودان. رفضت إسرائيل، الهند، وباكستان الانضمام إلى المعاهدة. أما كوريا الشمالية، فقد انسحبت منها في 2003.[1]

مع أن إسرائيل لا تعلن أبدا امتلاكها السلاح النووي أو تنفيه، يعتقد الكثيرون أنه لديها هذا السلاح منذ أواخر 1966. تظهر الوثائق الرسمية الأمريكية التي أزيل عنها طابع السرية وجود قبول ضمني للإدارات الأمريكية المتتابعة لهذا الأمر الواقع.

تمكنت الهند وباكستان من أن تصبح قوتين نوويتين في 1998 دون عقاب دولي جاد، بل حصلت الهند في 2008 على اتفاقية مع الولايات المتحدة تسمح لها بشراء الوقود والتكنولوجيا النوويتين من الولايات المتحدة وبيعهما لها.

**استندت كوريا الشمالية في قرارها الانسحاب على البند 10 الفقرة 1 في المعاهدة:**

> سيحق لكل طرف ضمن ممارسة السيادة الوطنية الانسحاب من المعاهدة إذا قرر أن أحداث استثنائية، ذات صلة بموضوع المعاهدة، قد عرضت للخطر المصالح العليا لبلاده. سوف يخطر بمثل هذا الانسحاب كل الأطراف الأخرى في المعاهدة ومجلس الأمن للأمم المتحدة قبل ثلاثة أشهر. سوف يتضمن مثل هذا الإخطار بيانا بالأحداث الاستثنائية التي يعدها تعرض للخطر مصالحه العليا.

(1) انضمت كوريا الشمالية إلى المعاهدة كدولة دون سلاح نووي في 1985. في 10 يناير 2003، أعلنت كوريا الشمالية أنها منسحبة من المعاهدة بداية من اليوم التالي. وفقا لبنود المعاهدة، على الدولة التي ترغب في الانسحاب من المعاهدة تقديم إنذار بذلك قبل ثلاثة أشهر من تاريخ الانسحاب. ذكرت كوريا الشمالية أنها استوفت هذا المتطلب لأنها قد سبق أن أعلنت عن قرارها بالانسحاب في 12 مارس 1993 (مع انها تراجعت عنه بعد ذلك). لا يوجد قول فصل حتى الآن في الوضع القانوني لكوريا الشمالية فيما يتعلق بالمعاهدة.

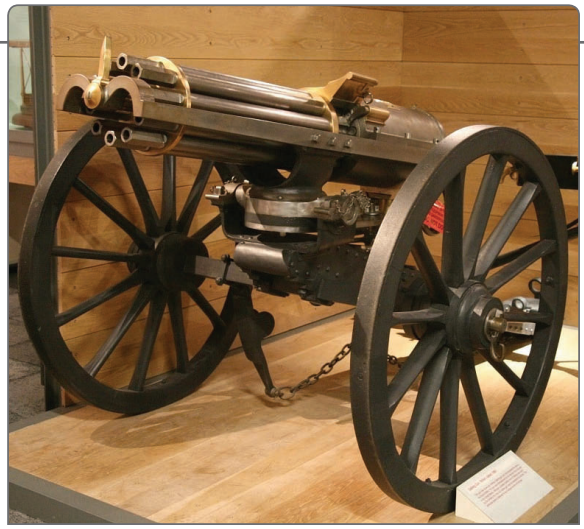
## للعرض فقط أم الاستخدام

مضى نحو 75 عاما عن أول استخدام للقنبلة النووية، وآخر استخدام حتى الآن. خلال هذه المدة، لم ينشأ صراع مسلح مباشر بين القوى العالمية الكبرى. لذلك، يسود الآن فيما بين الخبراء وعامة الناس الاعتقاد بأن الأسلحة النووية هي "للعرض" فقط، وليست للاستخدام، أن استخدامها يُعد ضمنيا من المحرمات الدولية، وأن من "فوائدها الجانبية" كبح جماح الحروب العالمية. لنناقش الآن متانة الأسس التي يعتمد عليها هذا الاعتقاد أو تلك النظرية.

يفترض أصحاب نظرية "للردع فقط" أن "الدمار الشامل" الذي تسببه الأسلحة النووية يثني الجميع عن استخدامها في الحروب. لا يؤيد التاريخ هكذا افتراض. عندما اُخترع الرشاش الآلي machine gun في النصف الثاني من القرن 19، اعتقد البعض أن قوته القتالية الهائلة ستجعل أي حرب قادمة أمرا عقيما لا طائل من ورائه، لكنه استخدم في الحربين الأكثر تدميرا في تاريخ البشر (الشكل 146).

**الشكل 146:**

**الرشاش الآلي الذي اخترعه**
**"ريتشارد جاتلينج Richard Gatling" في 1861**



تقول الحكمة الشهيرة المعروفة باسم "قانون ميرفي Murphy's Law" أن "أي شيء في إمكانه السير في الاتجاه الخاطئ سوف يسير في الاتجاه الخاطئ." يعتقد المؤمنون بهذه الحكمة أن امتلاك الأسلحة النووية في حد ذاته يعني أن هذه الأسلحة سوف تستخدم بشكل خاطئ. لنحلل الأمر بطريقة علمية.

**يرى أحد الكتاب أن الأسلحة النووية تتميز بخاصية تجعلها أعصى على الحظر من الأسلحة الكيميائية والبيولوجية:**[1]

> الأسلحة الكيميائية والبيولوجية ليست فعالة ضد الجيوش الحديثة المجهزة، لكنها فعالة في إرهاب المدنيين. على العكس من ذلك، تعد الأسلحة النووية وسائل فعالة ضد الجيوش القوية: يمكنها بتكلفة بسيطة إحباط الهجمات واسعة النطاق بالأسلحة التقليدية، خاصة تلك الهجمات التي تتطلب "ابتعاث القوة force projection" بعيدا،[2] ومن ثم قواعد جوية، موانئ إنزال، مراكز تجهيز، ومنشآت أخرى غير حصينة ومكلفة.

ما الأسباب التي قد تمنع أي دولة من المبادرة باستخدام الأسلحة النووية التي لديها؟ واحد أو أكثر من الأسباب التالية:

- الخوف من رد نووي مدمر من الدولة المهاجَمة أو حلفائها النوويين؛
- الخوف من تأثير هذا الهجوم النووي على الدولة المهاجِمة أو حلفائها المقربين؛
- الخوف من عقاب دولي قاسي بسبب فعلتها شبه المحرمة.

الرادع الأول لن يتحقق إذا كانت الدولة المهاجَمة، أو حلفاؤها المقربين، لا

(1) أنظر May (2007).

(2) ابتعاث القوة مصطلح عسكري يشير على قدرة الدولة على نشر قواتها المسلحة والمحافظة عليها خارج أراضيها. تعد هذه القدرة عنصراً هاماً لحضور الدولة في العلاقات الدولية.

يمتلكون أسلحة نووية. الرادع الثاني لن يتحقق إذا جرى استخدام الأسلحة النووية منخفضة الحصد low-yield nuclear weapons. بالنسبة للرادع الأخير، نعلم من دروس التاريخ القديم والحديث أن الوازع الأخلاقي لم يكن أبدا عائقا أمام شن الحروب—نووية كانت أم حجرية، وأن المعتدين لا يعدمون أبدا الحجج والأعذار "الأخلاقية" لتبرير دوافعهم الحقيقية وأكاذيبهم غير الأخلاقية.[1]

الصين هي القوة النووية الوحيدة التي تتعهد صراحة بأنها لن تكون أول من يستخدم الأسلحة النووية (ما يعرف باسم "عدم الاستخدام الأول no-first-use") وأنها لن تستخدمها ضد أي دولة غير نووية (ما يعرف بـ الضمانات الأمنية السلبية *negative security assurances*). لقد قررت الولايات المتحدة، روسيا، المملكة، وفرنسا أن أسلحتها النووية ليست فقط من أجل الردع المطلق، لكن أيضا لردع ومعاقبة أي دولة تساعد "الإرهاب" بـ أسلحة الدمار الشامل *mass destruction weapons* (MDWs). كما تخلت هذه الدول عن تعهداتها الخافتة بعدم الاستخدام الأول للأسلحة النووية. ليس لدى الهند عقيدة تمنع الاستخدام الأول ولم تتعهد بعدم استخدام الأسلحة النووية ضد الدول غير النووية. العقيدة النووية الباكستانية غير واضحة، لكنها ستكون في الأغلب انعكاسا للهندية. تتمسك إسرائيل بسياسة "الغموض النووي"، وترفض امتلاك أي دولة عربية أو إسلامية لقدرات نووية متطورة، حتى ولو كانت سلمية.

يقسم العسكريون الأسلحة الهجومية إلى نوعين متقابلين: *الاستراتيجية strategic والتكتيكية tactical*. تصمم الأسلحة الاستراتيجية للاستخدام ضد مدن العدو، مصانعه، وغيرها من الأهداف واسعة المساحة. "المهمة mission"

(1) على سبيل المثال، يعد "May ماي" (2007) خضوع اليابان للاحتلال الأمريكي فقط، وليس للاحتلالين الأمريكي والسوفيتي كما حدث في ألمانيا—يعد ذلك من ضمن "منافع" استخدام الولايات المتحدة السلاح النووي ضد اليابان في نهاية الحرب العالمية الثانية.

النهائية من هذه الأسلحة هي تدمير قدرة العدو على شن الحرب.[1] تشير الأسلحة *النووية التكتيكية*، أو *غير الاستراتيجية nonstrategic*، إلى الأسلحة النووية التي تصمم من أجل الاستخدام في ساحة المعركة أو مسرح العمليات. لذلك تسمى أحيانا بـ*أسلحة ساحة المعركة* أو *المسرح battlefield or theatre weapons*.

لا توجد حدود واضحة وعالمية بين الأسلحة النووية الاستراتيجية وتلك التكتيكية. يخلط البعض خلال النقاش العام بين الأسلحة النووية الاستراتيجية وتلك ذات الحصد العالي. لقد ربطت معاهدات الحد من الأسلحة الاستراتيجية بين الولايات المتحدة وروسيا (أو الاتحاد السوفيتي سابقاً) بين صفة "الاستراتيجية" والمدى التي يمكن أن تصل إليه الأسلحة النووية: إذ تنطبق هذه المعاهدات حصرياً على الأسلحة العابرة للقارات intercontinental. لا ينطبق هذا التعريف على كل الدول الأخرى المسلحة نوويا؛ فبعضها لا يمتلك أسلحة عابرة للقارات على الإطلاق.

تشير الأسلحة النووية التكتيكية tactical nuclear weapons (TNWs) عادة إلى الأسلحة قصيرة المدى. في السياق الأمريكي-الروسي، تشمل هذه الأسلحة الصواريخ المنصوبة على اليابسة التي يقل مداها عن 500 كم والصواريخ المطلقة من الجو والبحر التي يقل مداها عن 600 كم. لا تنطبق هذه التعريفات عالمياً. تصنف فرنسا جميع أسلحتها النووية الحالية على أنها استراتيجية. كما تضع الصين في الخانة نفسها الكثير من أسلحتها النووية التي تعد في المفهوم الأمريكي-الروسي تكتيكية.

يحاج البعض أن طبيعة الأسلحة النووية تجعل من الصعب، إن لم يكن من المستحيل، وضع حدود فاصلة بين النوعين: فالأسلحة النووية الاستراتيجية يمكن استخدامها بشكل تكتيكي، كما أن أي استخدام للأسلحة النووية، مهما صغر حصدها وقصر مداها، سيترتب عليه عواقب استراتيجية واسعة النطاق.[2]

(1) بهذا التعريف، تعد قنبلتي "الفتى الصغير" و"الرجل البدين" من ضمن الأسلحة الاستراتيجية.

(2) المرجع السابق.

لقد انخفض بدرجة كبيرة مخزون الأسلحة النووية التكتيكية في كل من الولايات المتحدة وروسيا من 20,000-30,000 في أواخر 80ات19 إلى أقل من 2,500 فقط اليوم، إلا أن هذه الأسلحة تعاود البزوغ مجددا في التخطيط العسكري بأغلب البلدان النووية.[1] يُرجع الخبراء هذا الهبوط إلى انخفاض التوتر بين القوى الكبرى بعد انتهاء الحرب الباردة وارتفاع قدرات الأسلحة التقليدية بشكل جعلها قادرة على أداء الكثير من مهام الأسلحة النووية التكتيكية.[2] على كل حال، يرى البعض إمكانية استخدام الأسلحة النووية التكتيكية في بعض الأحيان في ساحة المعركة أو مسرح العمليات ضمن القوات التقليدية (غير النووية).

(1) أنظر Kristensien and Korda (2019).

(2) المرجع السابق.

# محطات
# الكهرباء النووية

# محطـات
# الكهـربـاء النوويــة

**"الطاقة جزء من عملية تاريخية، بديل عن جهد البشر. طالما تنمو تطلعات البشر، ينمو كذلك الطلب على الطاقة واستخدامها."**

—David Lilienthal in Atomic Energy: A New Start

تستخدم الطاقة النووية في إنتاج الكهرباء منذ خمسينات القرن الماضي، ويوجد حالياً 422 مفاعل طاقة نووية في العالم، تنتج نحو 10% من الكهرباء.

عند إدارة مغناطيس بداخل ملف من السلك، تتولد الكهرباء داخل هذا الملف (راجع الشكل 44). هذه هي الفكرة الأساسية التي تقوم عليها جميع محطات توليد الكهرباء في العالم باستثناء محطات "الألواح الشمسية" (أو ما يعرف علميا بـ الخلايا *الضوء-جهدية photovoltaic cells*). يعرف الجزء الذي يقوم بإدارة المولد الكهربي باسم الـ *عنفة turbine*.

الهدف من تصميم المفاعلات النووية على اختلافها واحد: الحصول على تفاعل مسلسل قابل للاستمرار ومتحكم به. لذلك يحتوي المفاعل النووي على المكونات الأساسية التالية: *الوقود fuel*، *المهدئ moderator*، *المُبرِّد coolant*، *وقضبان التحكم control rods*.

## الـــوقـــــود

الوقود النووي هو المادة المشعة التي يحدث بها تفاعل الانشطار النووي المسلسل. يصنع الوقود المستعمل في جميع المفاعلات النووية تقريباً من أكسيد اليورانيوم.

يوجد اليورانيوم في الطبيعة، كما سبق وعرفنا، في صور ثلاثة (نظائر): اليورانيوم- 238، 235، و234. يتكون اليورانيوم الطبيعي أساسا من النظير 238 (أكثر من 99 %)، نسبة ضئيلة من النظير 235، وآثار من النظير 234. اليورانيوم-235 هو النظير الانشطاري الوحيد (أي الذي يمكن للنيوترونات السريعة والبطيئة أن تشطر نوى ذراته)، لكن ندرته في الطبيعة تحول دون الحصول على تفاعل مسلسل مستديم في الوقود المصنع من اليورانيوم الطبيعي. لذلك، يجرى رفع نسبة اليورانيوم-235 في خليط اليورانيوم المستخدم كوقود في جميع المفاعلات النووية (باستثناء المفاعلات الكندية)، من النسبة الطبيعية (0.7 %) إلى 2 - 5 %، من خلال عملية التخصيب المكلفة.

ماذا يحدث إذا لبقية الوقود النووي، المكون في أغلبه (95 - 98 %) من اليورانيوم-238؟ قد "ينشطر" اليورانيوم-238 عند ضربه ببعض النيوترونات السريعة (ذات طاقة معينة). لكن نوى هذا النظير تميل إلى امتصاص النيوترونات دون أن تنشطر، متحولة في النهاية إلى البلوتونيوم-239 الانشطاري. يتزايد البلوتونيوم -239 تدريجيا في الوقود النووي مساهما عند انشطاره في توليد الطاقة الكهربية المنتجة (حتى 30 %).

تستخدم بعض المفاعلات ما يسمى بـ وقود *الأكسيد المخلط mixed-oxide fuel*، وهو خليط من أكسيد اليورانيوم وأكسيد البلوتونيوم. يعد الوقود المخلط نوعا من *تدوير recycling وقود اليورانيوم المستهلك spent fuel*.

## المهـــــدئ

لنتذكر أن النيوترونات البطيئة هي الأوفر حظا في شطر نوى اليورانيوم-235 (أو البلوتونيوم-239). لكن النيوترونات المنطلقة أثناء الانشطار النووي تكون فائقة السرعة. لذلك يحتوي المفاعل على وسيلة لإبطاء النيوترونات تسمى المهدئ.

أفضل وسيلة من الناحية الفيزيائية لإبطاء النيوترونات هي جعلها تصطدم بجسيمات تماثلها من حيث الكتلة، مثل ذرات الهيدروجين. لكن بعض جزيئات الماء العادي تمتص النيوترونات، متحولة إلى جزيئات ما يعرف بـ الماء الثقيل heavy water.[1]

لتجنب هذه المشكلة، تستخدم بعض المفاعلات، مثل مفاعلات "كاندو CANDU" الكندية، الماء الثقيل كمهدئ للنيوترونات. إنتاج الماء الثقيل عملية مكلفة وتتطلب كميات هائلة من الماء العادي، لكن استخدامه كمهدئ يجعل هذا النوع من المفاعلات قادرا على استخدام اليورانيوم الطبيعي كوقود دون الحاجة إلى تخصيبه.

## المبـــــرد

دور المبرد هو امتصاص الحرارة الناتجة من الانشطارات النووية ونقلها. وهو دور محوري في المفاعلات النووية: أولا، يوظف هذه الطاقة في انتاج الكهرباء، وثانيا، يبرد الوقود النووي مانعا انصهاره.

يستخدم الماء العادي كمبرد (ومهدئ في آن معاً) في معظم المفاعلات الحديثة. من ضمن المواد الأخرى التي استعملت في تبريد المفاعلات الماء الثقيل، الغازات، مثل ثاني أكسيد الكربون أو الهيليوم، والفلزات المصهورة، مثل الصوديوم أو الرصاص.

(1) يعرف هذا النوع من التصادم باسم التصادم المرن flexible collision، وأقرب مثال عليه هو التصادم الذي يحدث بين كرات لعبة البلياردو.

## قضبـــان التحكـــم

تصنع قضبان التحكم من مواد قادرة على امتصاص النيوترونات، مثل البورون boron، الفضة silver، الإنديوم indium، الكاديوم cadmium، والهافنيوم hafnium. يمكن من خلال إدخال قضبان التحكم في قلب المفاعل (الوقود النووي والتراكيب التي تحفظه) أو إخراجها منه ضبط مستوى الطاقة المنتجة أو إنهاء التفاعل المسلسل تماماً عند الضرورة.

## مفـاعـــل المـــاء المضغـــوط

سنتعرف الآن بشيء من التفصيل على أحد أنواع المفاعلات النووية: *مفاعل الماء المضغوط* *pressurized water reactor* (PWR)، وهو النوع الأكثر استخداما في المحطات النووية الحديثة (بما فيها محطة بَراكة الإماراتية ومحطة الضَبعَة المصرية).

يستخدم هذا النوع من المفاعلات الماء المضغوط كمهدئ ومبرد في آن معاً. نحن نعرف أن الماء يغلي عند 100°م في ظروف الضغط الجوي العادية، لكن الماء في مفاعل الماء المضغوط (مم م) يظل سائلا رغم حرارته الزائدة (تصل إلى 288°م) لأنه يقع تحت ضغط شديد. يبلغ ضغط الماء على جدار الوعاء الحاوي نحو 14000 كيلوپاسكال (كپا) أو 138 ضغطا جويا.

فقاعات البخار هي فراغات هوائية في الماء السائل، وخلو ماء المفاعل منها يزيد من فعاليته كمهدئ للنيترونات. لذلك، نلاحظ أن قلب مفاعل الماء المضغوط يكون أصغر حجما من نظيره في مفاعل الماء المغلي.

يستخدم اليورانيوم المخصب إلى 3- 5% في مفاعلات الماء المضغوط المدنية، وإلى 50% في مفاعلات الغواصات التي تعمل بالطاقة النووية. يبقى الوقود الأعلى

تخصيبا صالحا لفترة أطول في قلب المفاعل، مما يقلل الوقت الضائع أثناء إعادة التزويد بالوقود.

يمر الماء المضغوط على الوقود النووي في مسار مغلق يعرف باسم *دائرة المبرد الأولي primary coolant circuit*. يدخل الماء المفاعل وحرارته 290°م، ويخرج وحرارته 325°م. ينقل المبرد الأولي الحرارة التي اكتسبها من الوقود النشط إلى مبرد مائي آخر في دائرة منفصلة (*دائرة المبرد الثانوي secondary coolant circuit*). يتبدل طور phase الماء في الدائرة الثانية بين البخار، عند اكتساب هذا الماء الحرارة من المبرد الأولي فيما يعرف بـ*المبادل الحراري heat exchanger* (أو *مولد البخار steam generator*)، والسائل، بعد مروره على *المكثف condenser*. يستخدم البخار المتولد في إدارة عنفة المولد الكهربي.

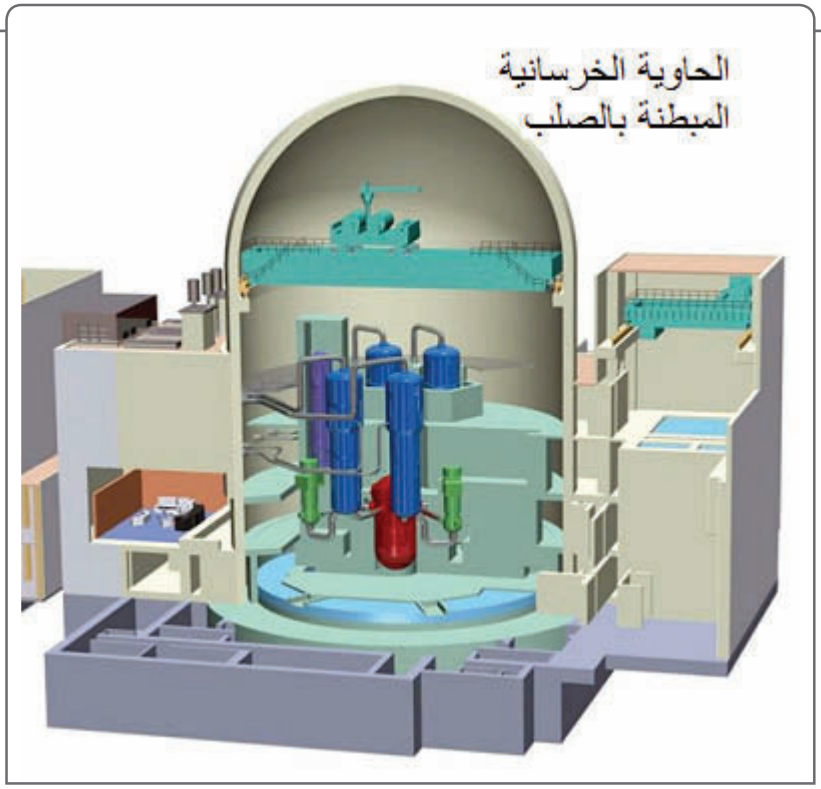
يجرى تكثيف البخار الخارج من العنفة بأسلوبين: الأول، باستخدام مصدر متجدد من المياه الباردة، مثل نهر أو بحر، والثاني، بإعادة استخدام الماء المُبَرَّد فيما يعرف بـ *برج التبريد cooling tower*.

### المفاعـــل عن كثـــب

لنتعرف الآن ببعض التفصيل على المكونات الرئيسة في مفاعل الماء المضغوط (الشكل 147).

**الشكل 147 :**

**قطاع عرضي في مبنى مفاعل الماء المضغوط**




يصنع وقود مفاعل الماء المضغوط من أكسيد اليورانيوم، لأنه لا ينصهر حتى 2,800°م (يمكن أن تصل حرارة الوقود إلى 2,650°م). كما أنه ليس عرضة للاشتعال في الهواء (مثلما هو الحال مع اليورانيوم الفلز).

يُكبَس أكسيد اليورانيوم على هيئة حبات أسطوانية صغيرة تعرف باسم *خرزات الوقود fuel pellets* (الشكل 148). تُرَص المئات من خرزات الوقود فوق بعضها داخل مواسير رفيعة طويلة (نحو أربعة أمتار)، لتكون ما يعرف باسم قضبان *الوقود fuel rods*. تُصنع أنابيب الوقود هذه من سبيكة زركونيوم zirconium alloy متينة ومقاومة للحرارة. تُجَمَّع القضبان معاً في حزم مربعة تعرف باسم

جوامع أو *مجامع الوقود* *fuel assemblies*. يحتوي مجمع الوقود الواحد على 200-300 قضيب وقود، مثبتة في أماكنها بواسطة فواصل من سبيكة الزركونيوم أيضاً. تُلَقَّم مجامع الوقود رأسياً في داخل وعاء المفاعل. يحتوي المفاعل المعتاد على 150 - 250 مجمع وقود، أي من 80 - 100 طن من اليورانيوم. بهذه الكمية من الوقود النووي، يستطيع المفاعل توفير بليون وات من الكهرباء لسنين.

**الشكل 148 : مجامع وخرزات الوقود**

الوقود الجديد قليل الإشعاع، ويمكن التعامل معه دون وقاء (الشكل 149).

**الشكل 149 :**
**فحص لجوامع الوقود النووي الجديدة قبل استخدامها**

يوجد ما بين 20 - 64 قضيب تحكم في قلب ممم. تصمم هذه القضبان بحيث تلج المسافات فيما بين مجامع الوقود.

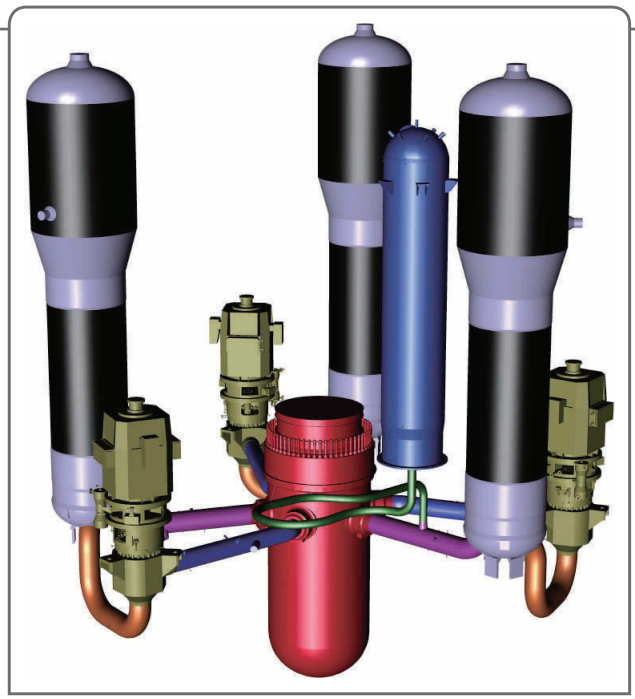
يمكن إنزال كل قضيب منها بمفرده داخل قلب المفاعل أو إخراجه منه، يجرى ذلك آليا عن بعد من *غرفة التحكم control room*. إيلاج قضبان التحكم في قلب المفاعل يقلص فيض النيوترونات وتفاعلات الانشطار، ويحدث العكس عند إخراجها. للحفاظ على مستوى ثابت من الطاقة المتحررة رغم استهلاك الوقود مع مرور الوقت، تسحب قضبان التحكم تدريجيا على مر الشهور. لإيقاف المفاعل تماما، تدرج قضبان التحكم كاملة في القلب.

تصنع قضبان التحكم من مادة ممتصة للنيوترونات. استخدمت مواد متنوعة في قضبان التحكم، أكثرها استخداما سبيكة الفضة-الإنديوم-الكادميوم silver-indium-cadmium، مغلفة بطبقة من صلب لا يصدأ للحماية من التآكل بفعل المياه شديدة السخونة.

تستخدم قضبان التحكم لإيقاف المفاعل عند الحاجة أو في حالة الطوارئ، وكذلك لضبط كثافة النيوترونات في قلب المفاعل في مواضع محددة. ومع ذلك، فإن معظم ضبط النيوترونات يأتي من حامض البوريك boric acid، الماص للنيوترونات، الذي يذاب في مياه دورة التبريد الأولية.

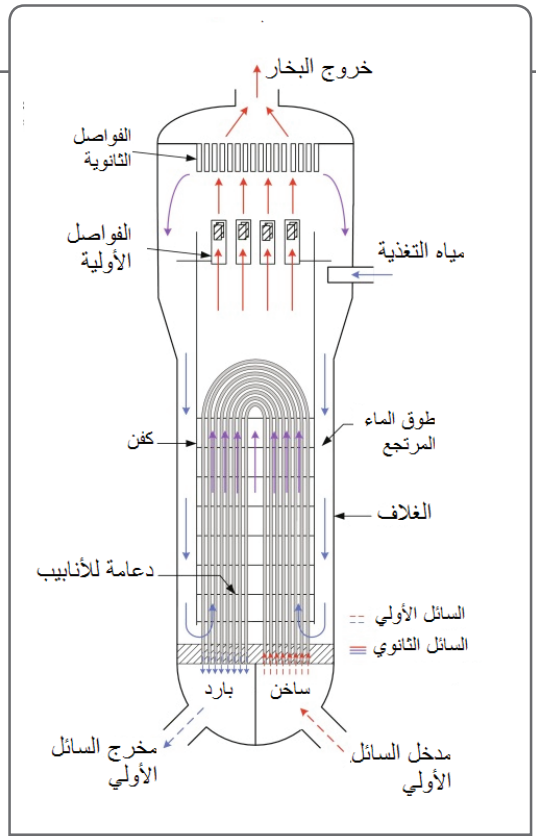
يمرر الماء المضغوط الساخن على *المراجل boilers* أو *مولدات بخار steam generators* (الشكل 150). خلال المرجل، تستخدم حرارة مياه دائرة التبريد الأولى في غلي مياه دائرة التبريد الثانية وتحويلها إلى بخار، دون حدوث أي تلامس مباشر بين مياه كلا الدائرتين. تعد مولدات البخار نوعاً من *المبادلات الحرارية heat exchangers*.

**الشكل 150 : منظومة المبرد الأولي مبينة وعاء المفاعل، مولدات البخار، الضغاط، والمضخات**



الشكل 151 يبين التركيب الداخلي للمبادل الحراري من طراز الأنابيب المعطوفة U-tube. يصل مُبرِّد المفاعل reactor coolant إلى المبادل من المدخل الأولي primary inlet (الطرف السفلي الأيمن في الشكل 151)، ثم يمر خلال حزمة الأنابيب المعطوفة (تصل إلى 16000 أنبوب في المرجل الواحد، قطر كل منها 19 مم)، ليغادر عائدا ثانية إلى المفاعل من المنفذ الأولي primary outlet. يدخل ماء التغذية (المُبرِّد الثانوي secondary coolant) من فتحة في جانب المبادل، وينساب حول الجدار إلى الأسفل. يَسخَن الماء في داخل المبادل ويغلي. يمر خليط البخار والماء على فواصل separators لتفرقة البخار عن الماء. يعاد الماء المفصول إلى قاع المبادل، بينما يرتفع البخار إلى المجففات driers، ثم يخرج من أعلى إلى العنفات.

**الشكل 151 : مولد البخار**




يدير البخار الآتي من المراجل (تحت ضغط 6200 كپا وبحرارة 275°م) العنفات المتصلة بالمولدات، وتنتج الكهرباء. يُبَرَّد البخار الخارج من العنفات في الجزء المسمى بـ *المكثف condenser* ليتحول إلى ماء سائل، يضخ من جديد إلى مولد البخار، وهلم جرا.

يعمل المكثف كمبادل حراري معكوس: يحول البخار إلى ماء سائل. يسحب المكثف الماء في أنابيبه باردا، ويخرج منها ساخنا، نتيجة لتكثف البخار الساخن على تلك الأنابيب. في الكثير من المحطات النووية، يحصل المكثف على مياه التبريد مباشرة من مصدر طبيعي مجاور (نهر أو بحيرة). بينما تعيد بعض المحطات

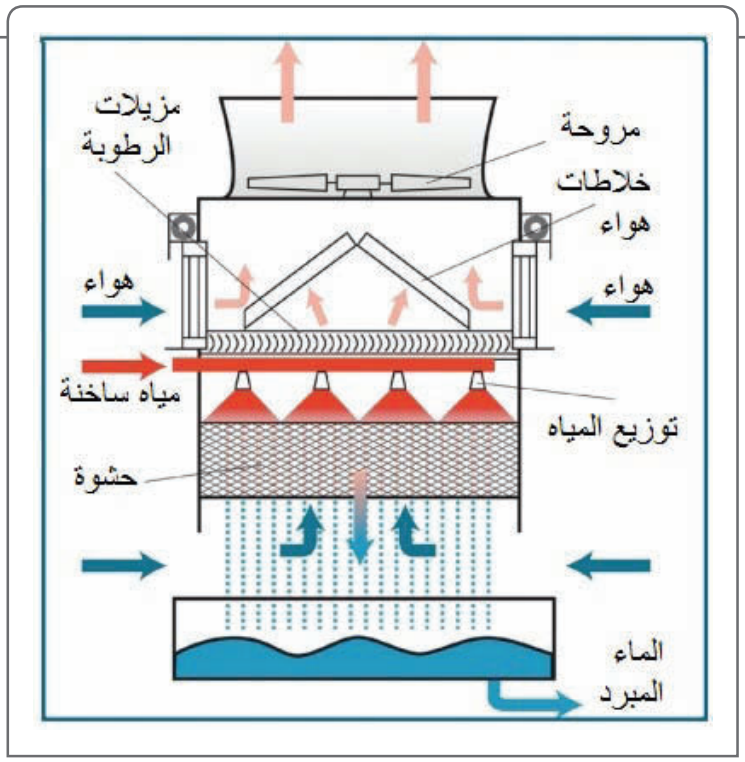
الأخرى استخدام مياه المكثف، وذلك بعد تبريدها في أبراج شاهقة مخصصة لهذا الغرض. يصل ارتفاع أبراج التبريد هذه إلى 200 متر، ويمكن عادة رؤيتها من على بعد (الشكل 152).

**الشكل 152:**
**أبراج التبريد في محطة طاقة نووية**

تحتوي أبراج التبريد في داخلها على مراوح تضخ الهواء في قاع البرج وتسحبه من أعلاه. يخلق هذا تياراً قوياً من الهواء نحو الأعلى (الشكل 153). يُرَش الماء الساخن الآتي من المكثف في الجزء السفلي من البرج (على ارتفاع 10 % من طول البرج). يبرد الماء المرشوش بينما يسقط بفعل تيار الهواء الصاعد داخل البرج. يفقد نحو 2 % من هذا الماء على شكل بخار يتصاعد من فوهة البرج. يتجمع الباقي في حوض أسفل البرج، ليستخدم من جديد في تغذية المكثف.

**الشكل 153 :**

**بنية برج التبريد الداخلية**




## "احتـــراق" الـوقـــود النـــووي

**لنرصد الآن ما يحدث للوقود داخل المفاعلات النووية.**

أثناء تشغيل المفاعل، تنشطر نوى اليورانيوم-235 إلى نوى عناصر أخف. تعرف هذه النوى/العناصر باسم *شظايا الانشطار fission fragments*. معظم الطاقة الناتجة من عملية الانشطار تكون في البداية طاقة حركية (نتيجة لانطلاق شظايا الانشطار بسرعة عالية). تتحول هذه الطاقة الحركية سريعا إلى طاقة حرارية مع اصطدام شظايا الانشطار بجزيئات الوسط.

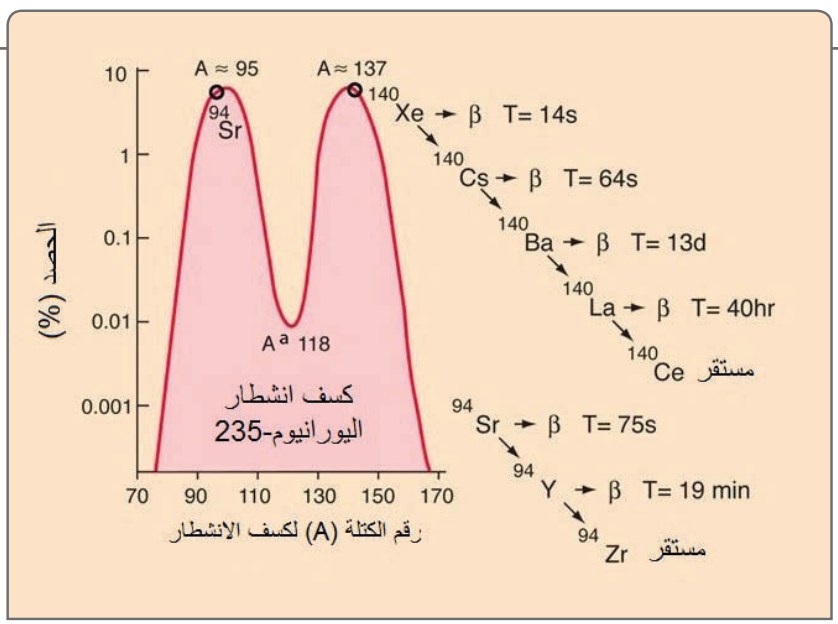
عادة ما تكون شظايا الانشطار متقاربة في الكتلة؛ تقع كتلة أغلب الشظايا حول رقمي 95 و137 (الشكل 154). معظم هذه الشظايا مشعة بشدة، وبعضها، مثل السيزيوم-137 cesium-137 والسترونتيوم-90 strontium-90، تكون فائقة الخطورة عند تسربها إلى البيئة. على سبيل المثال، ينشطر اليورانيوم -235 في أحيان كثيرة إلى الزينون-140 (Xe 140-xenon) والسترونشيوم-94 (Sr):

$$^{235}U + n \rightarrow {}^{236}U\times \rightarrow {}^{140}Xe + {}^{94}Sr + 2n$$

يمر كل من الزينون-140 والسترونشيوم-94 خلال سلسلة من انحلال بيتا ليخلفا في النهاية عنصرين ثابتين: السيزيوم-140 والزركونيوم-94 zirconium-94 (الشكل 154).

**الشكل 154:**

**كسف ونواتج الانشطار النووي**



يطلق على شظايا الانشطار والعناصر الناتجة من سلسلة الانحلال في نوى تلك الشظايا اسم *نواتج الانشطار fission products*. نواتج الانشطار السائدة هي نظائر اليود iodine، السيزيوم، السترونشيوم، والباريوم barium.

تميل بعض نواتج الانشطار، مثل الزينون-135 والساماريوم-149 samarium-149، إلى امتصاص النيوترونات. يطلق على مثل هذه العناصر اسم "سموم النيوترونات neutron poisons" (ربما "سموم الانشطار" تكون أفضل). تخفض سموم النيوترونات معدل الانشطار، ويمكنها أن توقف التفاعل إذا تراكمت بشكل كبير.

تلتقط بعض نوى اليورانيوم-238 النيترونات المتحررة، متحولة إلى عنصر البلوتونيوم. كل نظائر البلوتونيوم مشعة وعرضة للانشطار بالنيوترونات السريعة (قابلة للانشطار). البلوتونيوم-239 والبلوتونيوم-241 هما فقط النظيران اللذان يمكن شطرهما بالنيوترونات البطيئة (انشطاريان)، ومن ثم يشاركان في التفاعل المسلسل في مفاعلات الطاقة. أكبر من ثلث الطاقة المنتجة في مفاعلات الماء الخفيف تأتي من انشطار اليورانيوم (اليورانيوم-239، أساساً).[1]

بالإضافة إلى البلوتونيوم، تتكون في قلب المفاعل عناصر *بعد-يورانية transuranic elements* أخرى بمقادير ضئيلة.

الشكل 155 يلخص التغيرات التي تحدث مع استهلاك الوقود في أحد مفاعلات الطاقة. يتكون الوقود النووي المستهلك من الآتي:

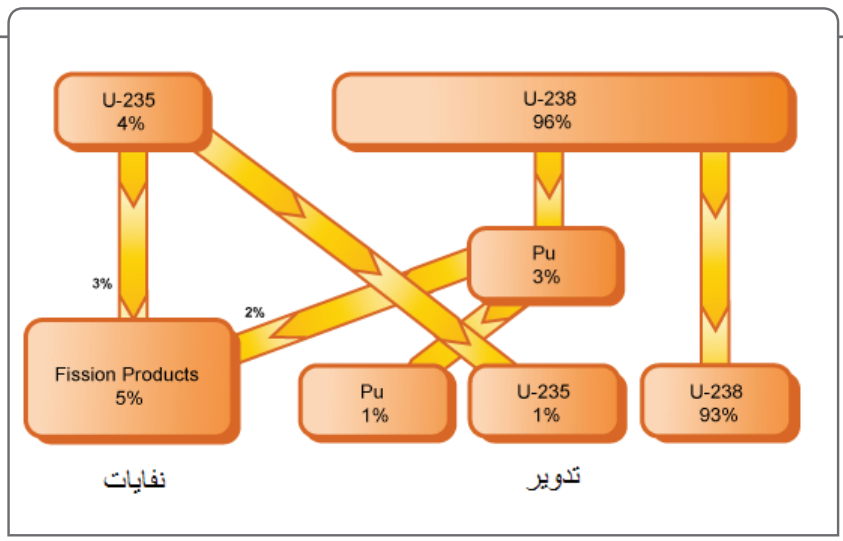
- 93,4 % يورانيوم (0.8 % يورانيوم- 235)؛
- 5.2 % نواتج انشطار؛
- 1.2 % بلوتونيوم؛

(1) يعد البلوتونيوم - 239 مصدر طاقة حيوي لمهمات سبر الفضاء العميق.

- و0.2% عناصر بعد-يورانية صغرى (نبتيوم neptium، أمَرِسيوم americium، وكيوريوم curium).

**الشكل 155:**

**التفاعلات الحادثة في الوقود النووي.**




يستهلك ربع إلى ثلث حمولة المفاعل من الوقود كل 12 - 18 شهرا، ويستبدل بها وقود جديد.

### ضبـط الانشطـار النـــووي

نحصل على الطاقة النووية من انشطار نوى اليورانيوم-235 الشحيح. يحتاج الانشطار الواحد نيترونا واحدا، وينتج عنه في المتوسط 2.43 نيوترونا (أي ينطلق من كل 100 انشطار 243 نيترونا). بناء عليه، فإن العاملين الأساسين في تحديد مستوى *النشاط التفاعلي reactivity* (والطاقة المنتجة) هما: مقدار النوى الانشطارية (نوى البلوتونيوم- 235، وفيما بعد، البلوتونيوم-239) والنيترونات البطيئة المشاركة في عمليات الانشطار.

مقدار النوى الانشطارية تحدد أساساً بكمية اليورانيوم في المفاعل ونسبة تخصيبه (نسبة اليورانيوم-235 فيه)، وتنخفض تدريجيا مع تشغيل مفاعل الطاقة (رغم تكون نوى البلوتونيوم الانشطارية). أما مقدار النيوترونات المشاركة في التفاعل، فيمكن خفضه أو زيادته بوسيلتي تحكم رئيستين: (1) إدخال قضبان التحكم في قلب المفاعل أو إخراجها منه و(2) إضافة سموم النيوترونات، مثل حامض البوريك boric acid، إلى ماء المفاعل أو إزالتها منه.

من أهم وظائف مفاعل الطاقة النووية، توفير القدرة على ضبط عملية الانشطار وتثبيتها عند مستوى معين. يحدث ذلك عندما يقابل كل نيترون ينتج في أحد أجيال الانشطار واحداً يفقد في إحداث الجيل الثاني. إذا زاد ما ينتج من نيوترونات عما يفقد، فإن معدل التفاعل (وإنتاج الطاقة) يزداد على نحو متسارع، إلى أن يخرب قلب المفاعل إذا لم يتم ضبط *فيض النيوترونات neutron flux*. أما إذا ما حدث العكس، وقل ما ينتج عما يفقد، فإن تفاعل الانشطار يخفت ويموت.

يطلق على النيوترونات التي تصاحب الانشطار، أي تتحرر في خلال $10^{-14}$ ثانية من الانشطار، اسم *النيوترونات الفورية prompt neutrons*. بالإضافة إلى النيوترونات الفورية، تنطلق بعض النيوترونات خلال انحلال نواتج الانشطار. على سبيل المثال، ينحل البرومين-87 bromine-78، وهو من نواتج الانشطار الشائعة، إلى الكريبتون-87 kryptone-87 مطلقا جسيم بيتا سالب ($\beta^-$). ينحل الكريبتون-87 بدوره إلى الكريبتون-86 الثابت، مطلقا نيوترون واحد. تسمى النيوترونات التي تلفظ من انحلال نواتج الانشطار، بعد حدوث الانشطار ببضع ملي-ثواني إلى عدة دقائق، *النيوترونات المتأخرة delayed neutrons*. هذه النيوترونات قليلة مقارنة بالنيوترونات الفورية (تشكل نحو 0.7% فقط من النيوترونات المنتجة في مفاعل الماء المضغوط).

بفضل النيوترونات المتأخرة، رغم نسبتها الضئيلة، يمكن الحفاظ على مستوى ثابت من الطاقة المنتجة دون تقلبات كبيرة؛ التغيرات في أعداد النيوترونات

الفورية تفوق في سرعتها استجابة وسائل التحكم فيها ("التحكمات controls"، اختصاراً).

تحتوي المفاعلات على وقود يكفي لتشغيلها بالقدرة الكاملة لمدة سنة كاملة على الأقل قبل الحاجة لتغيير الوقود.

## إعادة التزويد بالوقود

يعاد تزويد المفاعل بالوقود كل 24-18 شهرا. يزال ثلث مجامع الوقود، عادة من وسط قلب المفاعل. تنقل المجامع الطرفية إلى الوسط (يظل الوقود النووي لست سنوات في مفاعل الماء المضغوط)، وتوضع المجامع الجديدة في الأماكن الخالية.

يوقف المفاعل تماماً خلال إعادة التزويد. تستمر "قُطَاعَة (عطلة) إعادة التزويد refueling outage" نحو الشهر، وتحتاج كمية كبيرة من الموارد. تتطلب، مثلا، ما يقرب من 2,000 من العاملين المؤقتين المدربين جيداً. لخفض التكاليف، يحاول مشغلو المحطات النووية تقليص فترة التعطيل. وقد نجحت عدة محطات أمريكية في خفضها إلى ما دون العشرين يوما.

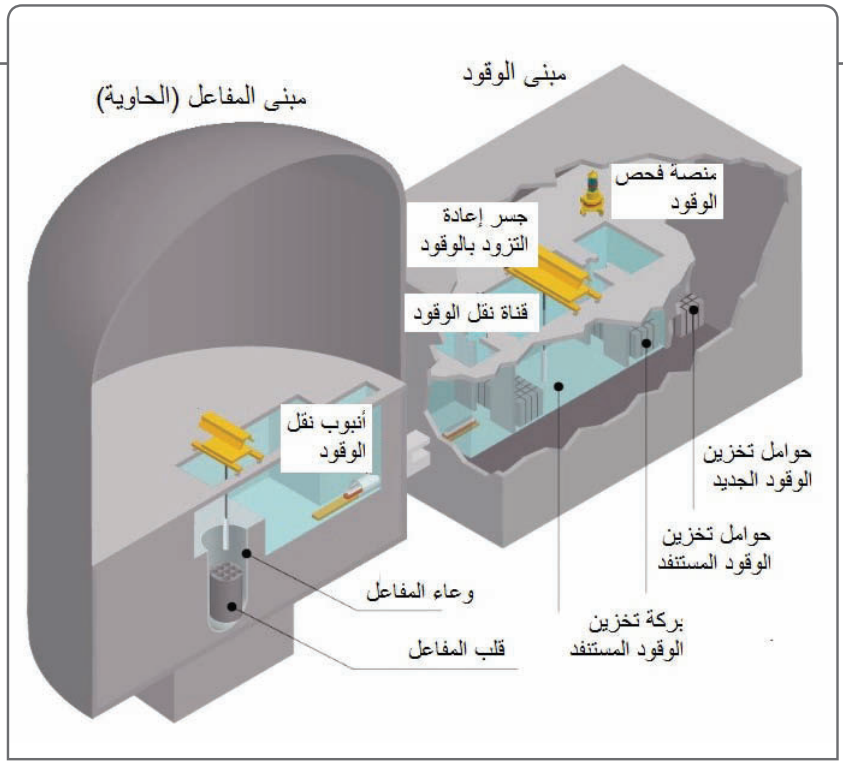
عادة ما تجرى إعادة التزويد خلال الربيع أو الخريف، عندما يكون الطلب على الكهرباء منخفضا. يتيح تعطيل المفاعل للعاملين فرصة الوصول إلى أماكن في المفاعل يصعب الوصول إليها خلال التشغيل الاعتيادي، مثل الأماكن القريبة من قلب المفاعل. لذلك، تستغل هذه الفترة للفحص الروتيني للأجهزة الموجودة في تلك الأماكن وصيانتها أو إصلاحها، مثل المضخات والصمامات.

تخضع جميع العمليات التي تجرى أثناء قطاعة لرقابة مفتشي السلطات المختصة المقيمين في الموقع، للتأكد من أدائها بالطريقة الآمنة.[1]

(1) السلطة المختصة في دولة الإمارات هي الهيئة الاتحادية للرقابة النووية.

يطلب الوقود الجديد قبل البدء في أنشطة إعادة التزويد، وتخزن بعد فحصها في أقبية أو أحواض الوقود الجديد (الشكل 156). الإشعاع الصادر من الوقود الجديد ضعيفا، وينقل هذا الوقود إلى المحطة النووية بواسطة الشاحنات الاعتيادية.

**الشكل 156 : مبنـــى الوقـــود**



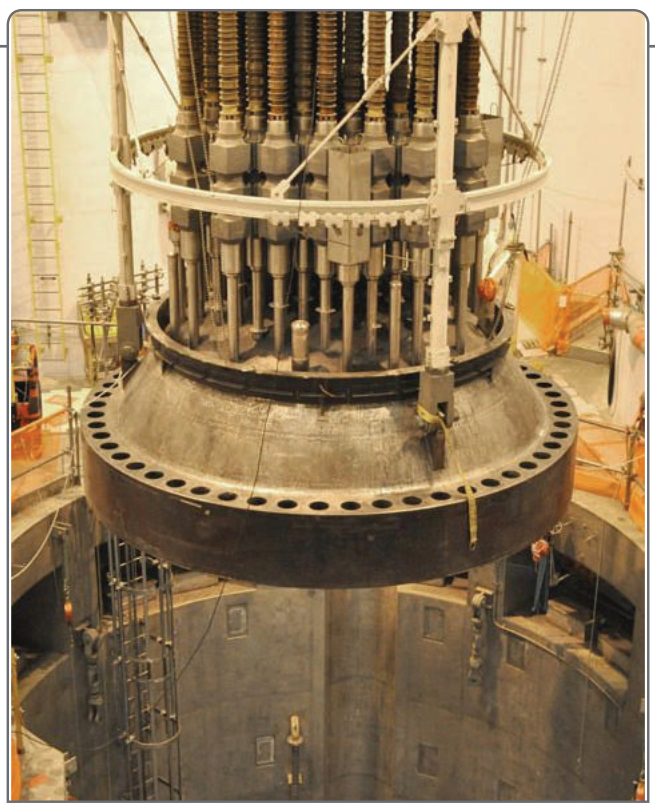

تفك الصواميل التي تربط غطاء المفاعل بواسطة مفاتيح كهربية، يرفع الغطاء الثقيل (يزن في المتوسط 150 طناً) بواسطة رافعة متنقلة موجود في مبنى المفاعل (الشكل 157)، يوضع الغطاء والصواميل في حوامل مخصصة لها بجوار وعاء المفاعل، ثم يغمر وعاء المفاعل وتجويف إعادة التزويد بالماء refueling cavity (الشكل 158).

تجويف إعادة التزويد هو حوض كبير من صلب لا يصدأ يحيط بفوهة وعاء المفاعل. يحتوي هذا التجويف عند ملئه نحو 750 مترا مكعبا من الماء، والذي يصل ارتفاعه إلى أكثر من 12 مترا.

توجد أحواض الوقود المستعمل، في أغلب المفاعلات، في بناية أخرى غير مبنى المفاعل. تُنقَل مجامع الوقود المستعمل من قلب المفاعل إلى أحواض التخزين أفقيا تحت الماء عبر قناة تربط بين المبنيين (الشكل 159).

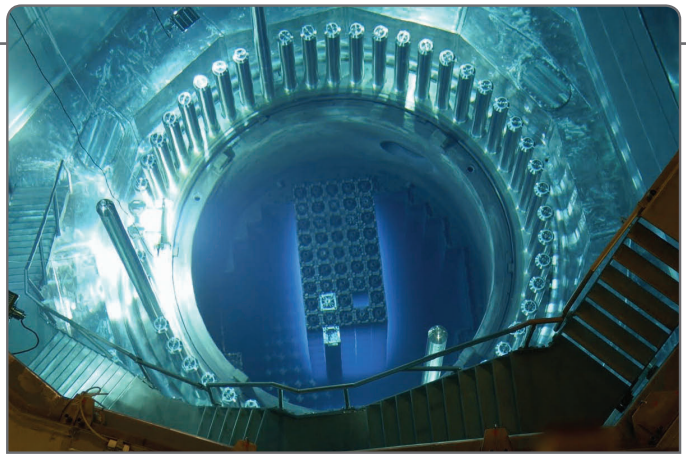
**الشكل 157:**

**رفع غطاء المفاعل تمهيدا لإعادة التزويد بالوقود**



**الشكل 158 :**

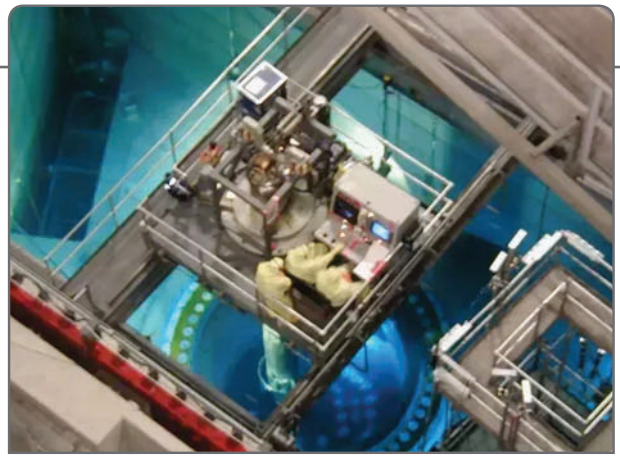
**وعاء المفاعل المفتوح والمغمور بالماء**



في مفاعلات الماء المضغوط، يزال كل الوقود من قلب المفاعل، ويوضع في حوض الوقود المستعمل. الوقود المستعمل يكون شديد الإشعاع عالي الحرارة، ولا بد من التعامل معه بحرص كبير. مجامع الوقود الجديدة تكون لامعة، لكنها تتأكسد خلال فترة وجودها في قلب المفاعل، وتصبح داكنة. لا يوجد أي فرق ملحوظ في الحجم أو الوزن بين مجامع الوقود المستعمل والجديد.

تجرى أعمال الصيانة والتحسينات في المفاعل المفرغ، وبعد انتهائها، تعاد مجامع الوقود إلى قلب المفاعل بعد استبعاد الوقود المستهلك واستبداله بوقود جديد.

**الشكل 159 : رفع الوقود المستعمل**



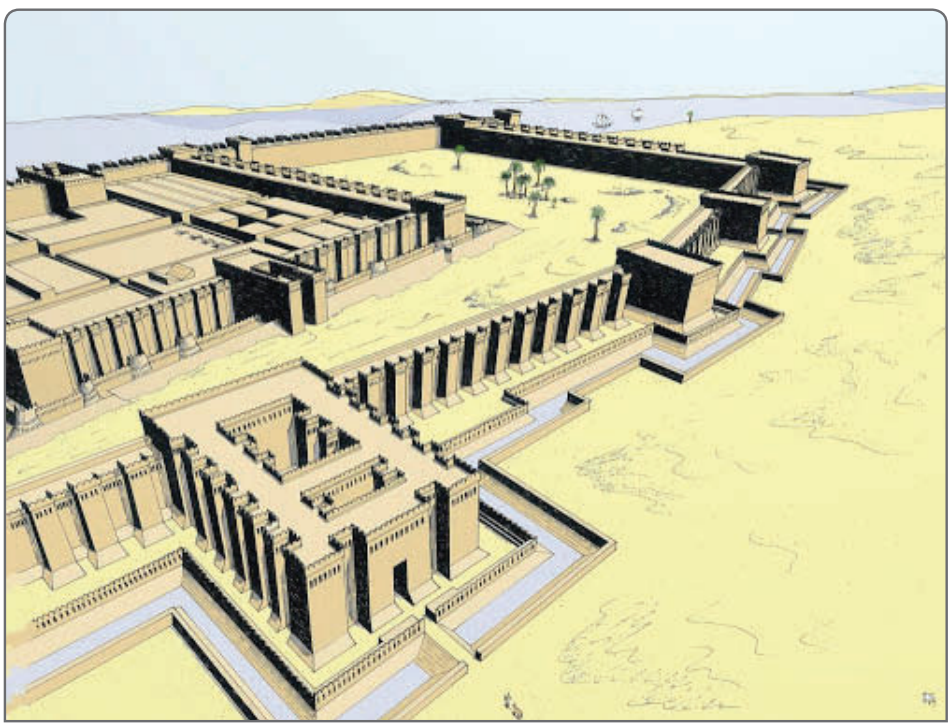
### الحمـايـــة في العمـــق

كلنا نعرف مغزى المقولة الشهيرة "لا تضع كل بيضك في سلة واحدة"، أي لا تعتمد كلية على مورد واحد أو وسيلة واحدة. تشكل هذه الحكمة العتيقة جوهر الفلسفة أو الإستراتيجية المتبعة في توفير عنصر السلامة لمحطات الطاقة النووية، والمعروفة باسم *الحماية في العمق* *Defense in Depth* (DiD).

ما هي أسوأ الحوادث التي يخشى من وقوعها في محطة نووية؟ بالطبع، هي تلك التي تؤدي إلى حصول تسرب إشعاعي (من الإشعاع أو المواد المشعة) خطير من المفاعلات النووية. لذلك، تهدف استراتيجية الحماية في العمق إلى الحيلولة دون وقوع ذلك، وإلى تقليص الأضرار الناجمة في حالة حدوثه، من خلال *إنشاء خطوط دفاع* *lines of defense* متعددة، متنوعة، ومستقلة. يقصد بـ "المستقلة" هنا أن "سقوط" أي من هذه الدفاعات المتعددة لا يؤثر على فعالية البقية.

الحماية في العمق مفهوم قديم جدا؛ كانت القلاع الحربية تحصن بوسائل كثيرة ومتنوعة، مثل قنوات المياه، المتاريس، والأسوار (الشكل 160).

**الشكل 160: صورة تخيلية لحصن "بوهين" العملاق على نهر النيل (2686 - 2181 ق م). يحتوي الحصن على عدة متاريس وقنوات مائية لحماية ساكنية من هجمات الغزاة. مساحة الحصن 13،000 م$^2$، وارتفاعه 150 م.**

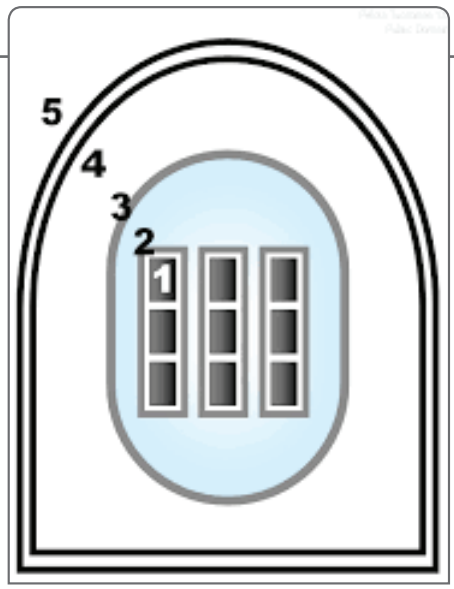


لنأخذ الآن بعض الأمثلة على تطبيق مفهوم الحماية في العمق في محطات الطاقة النووية.

يحول بين الوقود النووي المشع وبين وصول الإشعاع إلى البيئة المحيطة مجموعة من الحواجز المتتابعة (الشكل 161): (1) أسطح خرزات الوقود الخزفية، (2) جدران قضبان الوقود المعدنية، (3) وعاء الضغط الصلب، و(4) البناية الخرسانية الحاوية مزدوجة الجدار.

**الشكل 161 :**

**طبقات الحماية في مفاعل الماء المضغوط**




أحياناً ما يشبه مفهوم الحماية في العمق بدميات التعشيش الروسية الشهيرة (الشكل 162).

**الشكل 162 : دميات التعشيش الروسية الشهيرة**

يظل قلب المفاعل ساخنا ونشطا إشعاعيا حتى بعد توقف التفاعل المسلسل تماما في الوقود النووي. ولذلك، لا بد من الاستمرار في تبريد المفاعلات النووية حتى بعد إيقافها. يجعل هذا من توقف منظومة التبريد عن أداء وظيفتها أسوأ ما يخشاه مشغلو المحطات النووية. لاستبعاد حدوث هذا الأمر، تجهز المحطات النووية بمصادر متعددة لمياه التبريد وللطاقة اللازمة لتشغيل أنظمة التبريد، على أن يتحقق في هذه المصادر المتطلبات التالية: *الوفرة redundancy*، التنوع *diversity*، *والفصل separation*.

- **مبدأ الوفرة:** يقصد بمبدأ الوفرة أن تزيد قدرة أنظمة السلامة المتعددة عن المطلوب بعدة مرات. مثال: يتوافر بالمحطات النووية مصادر متعددة للمياه والطاقة، أساسية واحتياطية.
- **مبدأ التنوع:** تُستخدَم معدات من أنواع مختلفة للقيام بالوظيفة نفسها. يقلل هذا من فرصة أن تؤدي العيوب الخاصة بالنوع إلى فشل مجمل المنظومة في أداء وظيفتها. مثال: يتوفر بالمحطات النووية مصادر متنوعة للطاقة: الكهرباء من الشبكة العمومية، المولدات، والبطاريات.
- **مبدأ الفصل:** يُجرى الفصل بين الوسائل الوفيرة والمتنوعة بحيث لا ينتج عن الحريق أو الحوادث المشابهة توقف المنظومة الحيوية عن أداء وظيفتها. مثال: تُوضَع مصادر الطاقة السابق ذكرها في أماكن متباعدة داخل المحطة النووية.

### التعامل مع الوقود المستهلك

يتباين كثيراً مقدار الوقود النووي المستهلك في السنة وفقاً لنوع المفاعل، حجمه، والخبرة التشغيلية.

يحتوي الوقود المستهلك على مواد يمكن إعادة استخدامها في إنتاج الطاقة،

لكن لا بد من إعادة معالجته أولا في منشآت مخصصة لذلك. لا تقوم الولايات المتحدة بإعادة معالجة الوقود المستهلك، لكن بعض الدول، مثل فرنسا، تفعل ذلك.

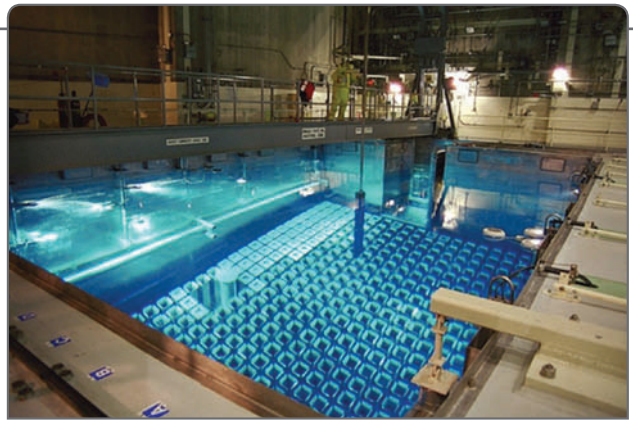
كان هناك مصنع واحد يعالج النفايات "التجارية" في "وست فالي West Vally"، نيويورك، في الفترة من 1966 إلى 1972. لكن أغلق هذا المصنع بعد أن أصبح تشغيله غير مجدي اقتصادياً.

يكون النشاط الإشعاعي للوقود المستهلك وحرارته مرتفعان عند إزالته من المفاعل، وذلك بسبب انحلال النويدات المشعة قصيرة العمر short-lived nuclides، خاصة تلك التي تتراوح أعمارها النصفية ما بين ساعات وأيام.[1]

تخزن مجاميع الوقود المستنفد تحت ستة أمتار من الماء في حوض خاص (لحماية المشتغلين بالقرب من هذا الحوض)، يعرف هذا الحوض باسم بركة *الوقود المستهلك spent fuel pool* (الشكل 163). ينخفض النشاط الإشعاعي للوقود المستنفد وحرارته أثناء التخزين تحت الماء.

**الشكل 163:**

**حوض تخزين الوقود المستهلك في مفاعل الماء المضغوط**



(1) يستخدم العلماء كلمة نويدة nuclide للإشارة إلى نوع واحد محدد من نواة الذرة (ذات رقم كتلة معين).

قد ينقل هذا الوقود فيما بعد إلى مرافق خاصة بتخزين الوقود المستنفد خارج المحطة النووية (الشكل 164).

**الشكل 164:**

**أحد مرافق التخزين المؤقت للوقود النووي المستهلك**

**زيارة قصيرة لمحطة نووية**

**سنقوم خلال هذا الجزء بزيارة لإحدى المحطات النووية السويسرية.**

تقع سويسرا الجميلة ضمن سلسلة جبال الألب. هي اتحاد بين 26 كانتونا (إقليما).[1] للبلد أربع لغات قومية: الألمانية السويسرية، الفرنسية السويسرية، الإيطالية السويسرية، و"الرومانشية Romansh". مع أنك قد تسمع هذه اللغات الأربعة في أي مكان من سويسرا، إلا أنها خاصة بمناطق معينة (الشكل 165).[2]

(1) بسبب الطبيعة الجبلية الجميلة والصعبة في آن معا، عانى قدماء السويسريين من الظلف قبل الثورة الصناعية، وهاجر الكثيرون منهم للعمل في البلاد الأخرى.

(2) تختلف الألمانية السويسرية الدارجة بشكل ملحوظ عن الألمانية القياسية، لكن السويسريون المتحدثون بهذه اللهجات يدرسون في المدرسة اللغة الألمانية القياسية ويتحدثون بها في المناسبات

**الشكل 165:**

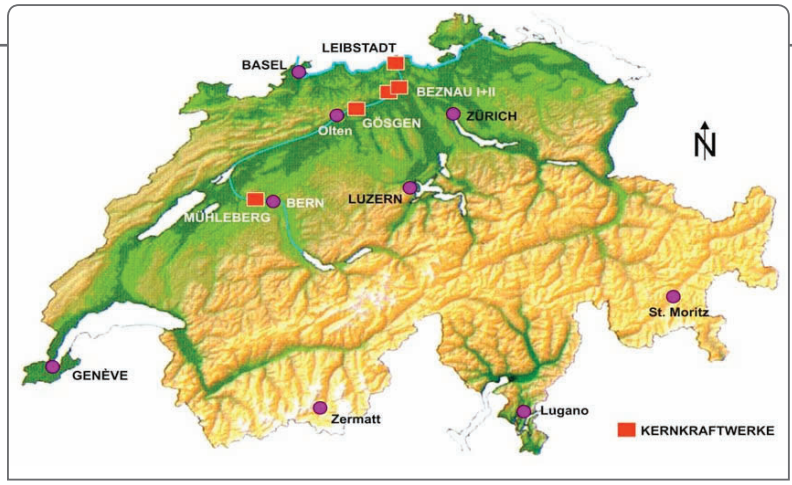
**مناطق تركز اللغات السويسرية الأربعة**

**لدى سويسرا أربع محطات طاقة نووية عاملة (خمسة مفاعلات نووية):** "بتسناو Beznau I+II 2+1"، "مولَبرج Mühleberg"، "چوسچن Gösgen"، و"ليبشتادت Leibstadt"، جميعها تقع في المنطقة المتحدثة بالألمانية (الشكل 166). تنتج هذه المحطات 40% من كهرباء سويسرا.

الرسمية. يتحدث الرومانشية 37,000 نسمة فقط، وهي لغة رسمية في كانتون «جريزون Grisons" الجنوب-الشرقي (منذ 1996). حافظت هذه اللغة على وجودها بسبب ميل المتحدثين بها إلى العيش في المناطق الجبلية النائية بجنوب شرق سويسرا. الرومانشية هي إحدى اللغات الرومنسية Romance Languages (مثل الإسبانية والفرنسية). تطورت من اللاتينية السوقية، لكنها استعارت كثيرا من مفردات وتراكيب اللغة الألمانية. هناك بعض التشابه فيما بين الرومانشية والرومانية.

**الشكل 166 :**

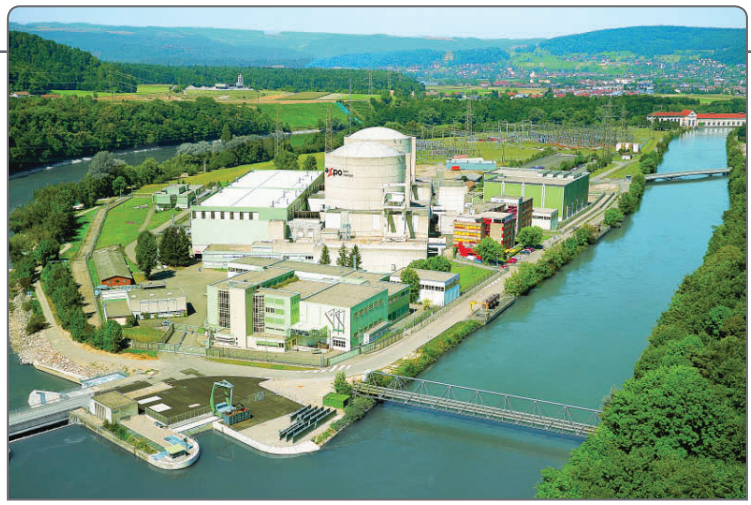
**مواقع المحطات النووية السويسرية**




ليبشتادت هي المحطة الوحيدة التي تستخدم مفاعل الماء المغلي. أما المحطات الثلاثة الأخرى فتستعمل مفاعلات الماء المضغوط.

**سنزور الآن محطة بتسناو للطاقة النووية (الشكل 167).**

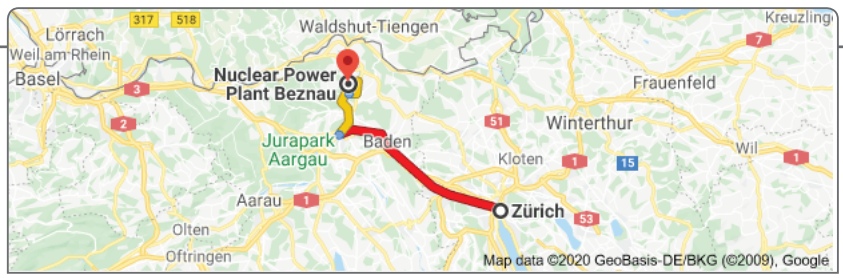
**الشكل 167 : محطة بتسناو النووية**



أقيمت المحطة النووية على جزيرة مصطنعة وسط مجرى "نهر ارا Aara River"، في منطقة ريفية هادئة على بعد 3.5 كيلومتر من بلدة "دوتنِچن Döttingen" (بالقرب من الحدود الألمانية). يستطيع الزائر الوصول إلى المحطة بالمواصلات العامة (القطار والحافلة) من مدينة زيورخ في ساعة ونصف، أو بالسيارة في وقت أقل (المسافة بينهما 40 كيلومتراً تقريباً؛ الشكل 168).

**الشكل 168:**

**الوصول إلى محطة بتسناو النووية من مدينة زيورخ**




بالمناسبة، يوجد "منتجع تسورتساخ Zurzach الصحي" الشهير على بعد 11 كيلومترا من المحطة النووية. يحوي المنتجع حمامات كبيرة من مياه الينابيع الساخنة (الشكل 169).

**الشكل 169: حمامات تسورتساخ الحرارية**

تبدأ زيارتنا من مركز الزائرين. يعد المركز بمثابة معرض تعليم-ترفيهي عن الطاقة النووية (الشكل 170). يوجد بجوار هذا المركز مباشرة فندق ذو أربعة نجوم.

**الشكل 170:**

**داخل مركز الزوار بمحطة بتسناو النووية**

لا توجد احتياطات أمنية خاصة لدخول مركز الزائرين، لكن الزائر للمحطة نفسها يمر بسلسلة من الإجراءات الأمنية التي تشبه كثيرا تلك المتبعة حاليا في المطارات. تتضمن هذه الإجراءات الكشف عن آثار المواد المستخدمة في صنع المتفجرات من على وجه الزائر، يديه، وملابسه.[1] علاوة على ذلك، يجرى الكشف عن مستوى الإشعاع من جسم الزائر قبل دخول المحطة والخروج منها (الشكل 171).

(1) لدواعي أمنية، تحظر الحكومات على الشركات المصنعة لهذه الأجهزة نشر معلومات مفصلة عن المواد المتفجرة التي تستطيع أن تكشفها أجهزتهم.

**الشكل 171 :**

**أحـد أجهـزة رصـد إشـعاع الجسـم**

محطة بتسناو هي أقدم محطة نووية أوروبية عاملة. كما أنها واحدة من ثلاث محطات نووية في العالم تعمل منذ أكثر من 50 سنة. تحتوي المحطة على وحدتين (مفاعلين) متماثلتين من طراز الماء المضغوط، قدرة كل منها 365 ميجاوات من الكهرباء (565 ميجاوات من الحرارة).[1] الوحدتان من تصميم شركة "وستنجهاوس Westinghouse". دخلت الوحدة الأولى الخدمة التجارية في ديسمبر 1969، وبدأ تشغيل الوحدة الثانية في 1972. تملك المحطة وتديرها شركة "اكسپو Axpo" العامة.

تستطيع الوحدتين توليد 6,000 **چ‌وس** من الكهرباء في السنة، أي تقريباً

(1) لا يمكن تحويل كل الحرارة المنتجة إلى كهرباء (راجع الجزء الخاص بقوانين الطاقة).

ضعف الكهرباء التي تستهلكها مدينة زيورخ. تمد المحطة كذلك بمياه التدفئة منطقة "رفونا Refuna" في وادي نهر ارا الأدنى.

استأنفت الوحدة الأولى العمل في مارس 2018 بعد توقف لمدة ثلاث سنوات لتعزيز سلامة وعاء المفاعل. بلغ إنتاج المحطة في العام نفسه 5،541 **جوس**.

يوجد كل مفاعل داخل بناية حاوية أسطوانية ذات جدران مزدوجة. ارتفاع البناية الحاوية 66.5 م، وقطرها 38 م. جدار الحاوية الخارجي مصنوع من الخرسانة بسمك 90 سم وبطانة من الصلب بسمك 0.6 سم. أما الغلاف الحاوي الداخلي الصلب فهو بسمك 3 سم.

يحوي قلب كل مفاعل على 121 مجمع وقود موضوعة داخل وعاء ضغط من الصلب بسمك 17 سم. ارتفاع وعاء المفاعل 10.7 م وقطره 3.3 م.

تضم البناية الحاوية مضختين لمياه التبريد ومولدين للبخار. يتجه البخار المتولد إلى مبنى العنفة المجاور حيث توجد العنفات-المولدات التي تدور بسرعة 3،000 لفة في الدقيقة (**لفد**).

تولد المحطة الكهرباء بجهدية 15.5 كيلوفولت (**كڤ**)، ترفع إلى 220 **كڤ** بواسطة المفاعلات من أجل نقلها إلى الشبكة العمومية grid.[1]

تستخدم المحطة 40 م$^3$ من المياه في الثانية عند تشغيلها بالقدرة الكاملة. تسحب المحطة هذه المياه من نهر ارا. لا توجد أبراج تبريد بمحطة بتسناو؛ تعمل المكثفات في المحطة بنظام الدائرة المفتوحة (تسحب مياه التبريد من النهر، وتصرف المياه الساخنة عليه ثانية.[2]

(1) تنتج الكهرباء عادة بعيدا عن أماكن استخدامها. يفقد جزء من الطاقة الكهربائية على شكل حرارة بفعل مقاومة خطوط التوصيل. يتزايد المقدار المفقود مع اشتداد التيار. يؤدي رفع فرق الجهد بالمحولات إلى خفض شدة التيار، ومن ثم، المفقود من الطاقة الكهربائية أثناء النقل.

(2) يفضل بعض السكان السباحة في النهر بالقرب من المحطة بسبب دفئها.

بحلول 2018، كانت اكسبو قد أنفقت 1.9 مليون جنيه إسترليني على تطوير المحطة وصيانتها.

- اُستبدلت مولدات البخار في الوحدتين في 1993 و1999، تبعاً.
- حُدثت منظومة حماية المفاعلين والتحكم فيهما في 2001.
- طورت منظومة التحكم في العنفات وحمايتها لتعمل بالأسلوب الرقمي.

في 2015 (بعد حادثة فوكوشيما في اليابان)، اُستبدل غطاء المفاعل في الوحدتين. كما أُضيفت منظومة مقاومة للزلازل والفيضانات لتوفير الكهرباء للمحطة عند الطوارئ. تعتمد هذه المنظومة على أربع ماكينات تعمل بالديزل.

## تحلية مياه البحر بالطاقة النووية

جرت تجربة استخدام الطاقة النووية في تحلية ماء البحر منذ عشرات السنين، مع أكثر من 200 "مفاعل-سنة" من الخبرة التشغيلية بأنحاء مختلفة من العالم،[1] منها أكثر من 170 مفاعلا-سنة في اليابان وحدها.[2]

المثال الأقدم على *التحلية النووية nuclear desalination* هو وحدة التحلية الحرارية التي عملت في محطة "أكتاو Aktau" النووية (كازاخستان) في الفترة من 1973 إلى 1999 (الشكل 172).[3] استَخدمت تلك المحطة مفاعلاً نووياً سوڤيتياً من النوع "BN-350"، وهو *مفاعل سريع مُبرد بالصوديوم sodium-cooled fast reactor*. بدأ إنشاء المفاعل في 1964، وبدأت المحطة في إنتاج الكهرباء في 1973 (بإنتاج وصل إلى 125 ميچاوات).[4] تُعَدُّ محطة أكتاو شكلا مبكرا

(1) الخبرة التشغيلية العالمية للمفاعلات النووية = مجموع حواصل ضرب كل مفاعل في سنوات تشغيله.

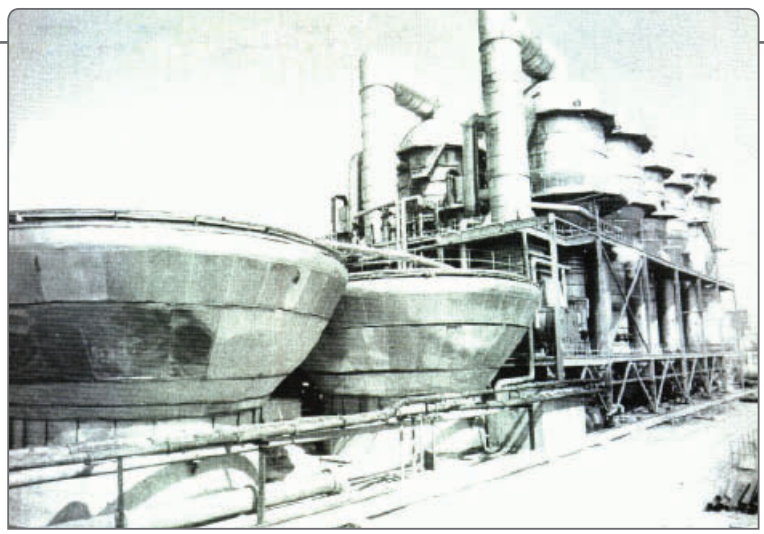
(2) انظر Khamis & Tewari (2007).

(3) الاسم السابق لمدينة "أكتاو Aktau" هو «شفتشنكو Shevchenko".

(4) انظر سامر مخيمر وخالد حجازي (1996: 166).

للمحطات النووية متعددة الأغراض؛ فإضافة إلى توليد الكهرباء اُستخدمت تلك المحطة في إنتاج البلوتونيوم plutonium وتحلية المياه (بالتقطير اللحظي والتقطير متعدد التأثير، وبسعة 800.000 م$^3$/يوم).[1]

**الشكل 172:**
**وحدة التحلية الحرارية في مفاعل "أكتاو" بكازاخستان**



حديثاً، أنشأت كل من الهند وباكستان مشروعات توضيحية للتحلية في مفاعلاتها النووية القائمة (وهي من نوع مفاعلات الماء الثقيل المضغوط).

ويظهر الشكل 173 محطة التحلية النووية في بلدة "كالپكام Kalpakkam" الهندية.

(1) لمزيد من المعلومات عن تقنيات التحلية، أنظر الزيات وقنديل (2018).

**الشكل 173 :**

**محطة التحلية (تقطير لحظي مع تناضح عكسي)**
**في "كالپاكام" بالهند**

لقد أطلقت روسيا مؤخرا مشروعا لتشييد منشأة للإنتاج المشترك (كهرباء ومياه) في مدينة "سڤرودڤينسك Severodvinsk" تعتمد على المفاعلات النووية الطافية (محمولة على بارجة؛ الشكل 174). قد يكون هذا النوع من المحطات مفيدا بصفة خاصة في الاستجابة السريعة للطلبات الطارئة على المياه الصالحة للشرب.

تشير دراسات الجدوى الاقتصادية إلى أن تكاليف المياه المنتجة من التحلية النووية لماء البحر تقع بشكل عام في المدى الخاص بالتحلية التقليدية نفسِه (المعتمدة على الوقود الأحفوري—إن لم تكن أقل، رغم أن التكلفة الاستثمارية لمحطات التحلية النووية هي عامة أعلى.[1]

الجدير بالذكر أن أغلب الدول التي تعاني من ندرة المياه لا تمتلك التكنولوجيا

(1) انظر Misra & Khamis (2014: 109 & 110).

**الشكل 174:**

**رسم تصويري لمجمع الطاقة والتحلية النووي المزمع إنشاؤه في مدينة "سفرودفينسك" (روسيا)**

النووية، ليس لديها محطات نووية، ولا يتوافر لديها البنية التحتية اللازمة للاستفادة من الطاقة النووية. لقد أبدت الكثير من الدول النامية اهتماما واضحا بتكنولوجيا الطاقة النووية. في المقابل لا تثق الدول الصناعية الكبرى التي تمتلك التكنولوجيا النووية في النوايا الحقيقية، الاستقرار السياسي، القدرات المالية، أو المؤسسات الرقابية بمعظم هذه الدول النامية. على كل حال سوف يكون من الأفضل للطرفين أن تعمل الدول النامية على توفير البنية التحتية المناسبة وتطوير مؤسساتها الرقابية والمالية إذا ما أرادت فعلا الاستفادة **الآمنة** من التكنولوجيا النووية، وفوق كل ذلك نشر "ثقافة الأمان safety culture" بين مواطنيها وفي مؤسساتها الوطنية.

تجدر الإشارة هنا إلى أن دول شمال إفريقيا الخمسة (مصر، ليبيا، تونس، الجزائر، والمغرب) كانت قد طلبت في بداية تسعينات القرن الماضي من "الوكالة الدولية للطاقة الذرية International Atomic Energy Agency (IAEA)" المساعدة في إجراء دراسة عن الجدوى التقنية والاقتصادية لاستخدام الطاقة النووية

في تحلية مياه البحر بهذه الدول. أجريت تلك الدراسة في الفترة من 1991 - 1994 على خمسة مواقع مختارة (واحد في كل بلد) على أساس احتياجاتها التقديرية من المياه المحلاة في العام 2005.

**تقع جميع المواقع المختارة على البحر مباشرة، وهي كالتالي:**

- الضبعة (مصر): 000 240 م$^3$/يوم؛
- طرابلس (ليبيا): 000 720 م$^3$/يوم؛
- جرجيس (تونس): 000 60 م$^3$/يوم؛
- وهران (الجزائر): 000 120 م$^3$/يوم؛
- والعيون (المغرب): 000 24 م$^3$/يوم.

نُشرت نتائج تلك الدراسة في تقرير للوكالة الدولية للطاقة الذرية صدر في 1996.[1] **وفيما يلي ملخص لأهم ما جاء في هذا التقرير المكتوب بلغة دبلوماسية حـذرة:**

- قدرت تلك الدراسة أن عجز المياه في منطقة شمال إفريقيا يمكن أن يصل بحلول 2025 إلى 40 مليون متر مكعب يوميا.
- تتقارب تكلفة التحلية باستخدام الوقود النووي مع تكلفتها باستخدام الوقود الأحفوري، إذ تراوحت تكلفة المتر المكعب من المياه المحلاة من 0.70 - 1.00 دولار بالنسبة للأحفوري، ومن 0.73 - 0.91 دولار للنووي، وَفْقاً لحجم المحطة.
- سيكون من الصعب تمويل المشروعات النووية في دول شمال إفريقيا من مصادر دولية، وسيكون على هذه الدول الاعتماد على مواردها الذاتية.

(1) انظر IAEA (1996).

- تستطيع دول شمال إفريقيا الحصول على التكنولوجيا النووية، المفاعلات النووية، والوقود والمواد والمعدات النووية من الموردين الأجانب فقط إذا استطاعت توفير دليل كاف على استخدامها حصرياً في الأغراض السلمية.
- يعد استخدام الطاقة النووية في دول شمال إفريقيا لتوليد الكهرباء وتحلية ماء البحر—يعد ممكناً من الناحية التقنية ومنافساً من الناحية الاقتصادية، وذلك للوحدات المتوسطة إلى الكبيرة المدمجة في أنظمة شبكات الكهرباء بهذه الدول.
- فيما يتعلق بالجدوى الفنية لا توجد موانع لاستخدام المفاعلات النووية في توفير الطاقة لمحطات التحلية. ومع ذلك، ونتيجة لطبيعة الطاقة النووية الخاصة، هناك "أمور مؤسساتية" يجب حلها لضمان التنفيذ المناسب للمشروعات وفي النهاية التشغيل الآمن والفعال للمحطة النووية.

وقد قامت السعودية في ذلك الوقت تقريبا بإجراء دراسة مماثلة لمنطقة الخليج العربي، بالاستعانة أيضا بالوكالة الدولية.[1] ولكن، وكما هو معروف، لم يبدأ استخدام الطاقة النووية على نطاق صناعي في المنطقة العربية إلا في 2021، بعد تشغيل المفاعل الأول في محطة براكة النووية الإماراتية.

استخدامات الإشعاع النافعة الأخرى

(1) انظر سامر مخيمر وخالد حجازي (1996: 166).

# استخدامات الإشعاع النافعة الأخــرى

# استخدامات
# الإشعاع النافعة الأخرى

اكتشف الإشعاع والمواد المشعة قبل أكثر من قرن. جذبت هذه الأشعة الخفية اهتمام العلماء والعامة. تخلى الكثير من العلماء عن اهتماماتهم البحثية من أجل دراسة هذه الأشعة العجيبة. امتلأت الجرائد ووسائل الإعلام بشتى أصناف "الفتاوى" عن الاستخدامات الممكنة لهذه الأشعة.

في البداية، لم يكن هناك اهتماما بالعواقب غير المرغوبة التي قد تحدث من استخدام الأشعة الخارقة، مما أدى إلى كوارث متعددة. كان مثل هذا التجاهل أمرا متوقعا؛ من كان سيشك في وجود مشاكل مع أشعة لا تُرى أو تُحس؟ الواقع، اعتقد الكثيرون أن التعرض لها قد يكون جيدا. مرت خمسون سنة قبل أن يدرك الناس أضرار الإشعاع والاحتياطات الواجبة.

أدى الاستخدام المنتشر للإشعاع في النهاية إلى إصابات خطيرة، وولد علما كاملا للحماية تحت اسم "فيزياء الصحة health physics". تعود هذه التسمية إلى أيام مشروع مانهاتن السري؛ لم يرغب علماء المشروع الذين ساهموا كثيرا في تطوير هذا العلم—لم يرغبوا في ذكر كلمة "الإشعاع" محافظة على سرية المشروع.

في الوقت الراهن، يستخدم الإشعاع والمواد المشعة بشكل يومي في جميع مناحي الحياة، من حفظ الأغذية إلى علاج الأورام السرطانية. سنتعرف خلال هذا الجزء على الاستخدامات المتنوعة للإشعاع والمواد المشعة. اخترنا بدلا من سرد الاستخدامات الكثيرة أن نوضح ببعض التفصيل الفكرة وراء بعض التطبيقات المختارة.

## الاستخدامـات الطبيـة

استخدمت أشعة أكس في الطب خلال وقت قصير، ربما أسابيع، من اكتشافها في 1895. وفي الحقيقة، استخدمت هذه الأشعة حتى قبل أن تعرف باسمها.

كانت المصابيح التي اخترعها "إيفان بولوي Ivan Puluj" (1845 - 1918)، الفيزيائي الأوكراني، تصنع بكميات كبيرة أوكرانيا منذ 1881، وتستخدم في الكشف عن كسور العظم. كانت هذه المصابيح تصدر ما أصبح معروفا باسم أشعة أكس.[1]

## التشـخيـص بالإشعـاع

في الوقت الراهن، يستخدم الإشعاع في تصوير الأوعية، العظام، والأنسجة الرخوة في جميع أجزاء الجسم تقريباً.

تعود أول صورة *إشعاعية radiograph* إلى نهاية العام 1895 حين قام رونتچن، مكتشف أشعة أكس، بتصوير يد زوجته، "برتا"، في معمله بالأشعة التي اكتشفها قبل أيام معدودة. كان رونتجن قد اكتشف أن هذه الأشعة تمر خلال أغلب الأشياء، عدا العظم والمعدن.

انتشر استخدام الصور الإشعاعية في أوروبا والولايات المتحدة في غضون شهر واحد من ابتكارها. وبعد بضعة شهور أخرى، استخدمت هذه الصور في الخطوط الأمامية للمعارك الحربية كوسائل مساعدة في تحديد مواضع الكسور والطلقات النارية في الجنود المصابين.

طوال الحرب العالمية الأولى، عملت ماري كوري، مكتشفة المواد المشعة، بمساعدة أبنتها "إرَن Irène" (1897 - 1956)، على تجهيز وحدات متنقلة وثابتة للتشخيص بأشعة أكس (الشكل 175)، كما دربت السيدات الصغيرات على استخدام هذه التقنية.

(1) كانت أوكرانيا في ذلك الوقت جزءاً من الإمبراطورية النمساوية.

**الشكل 175 :**

**ماري كوري تقود إحدى عربات أشعة أكس**

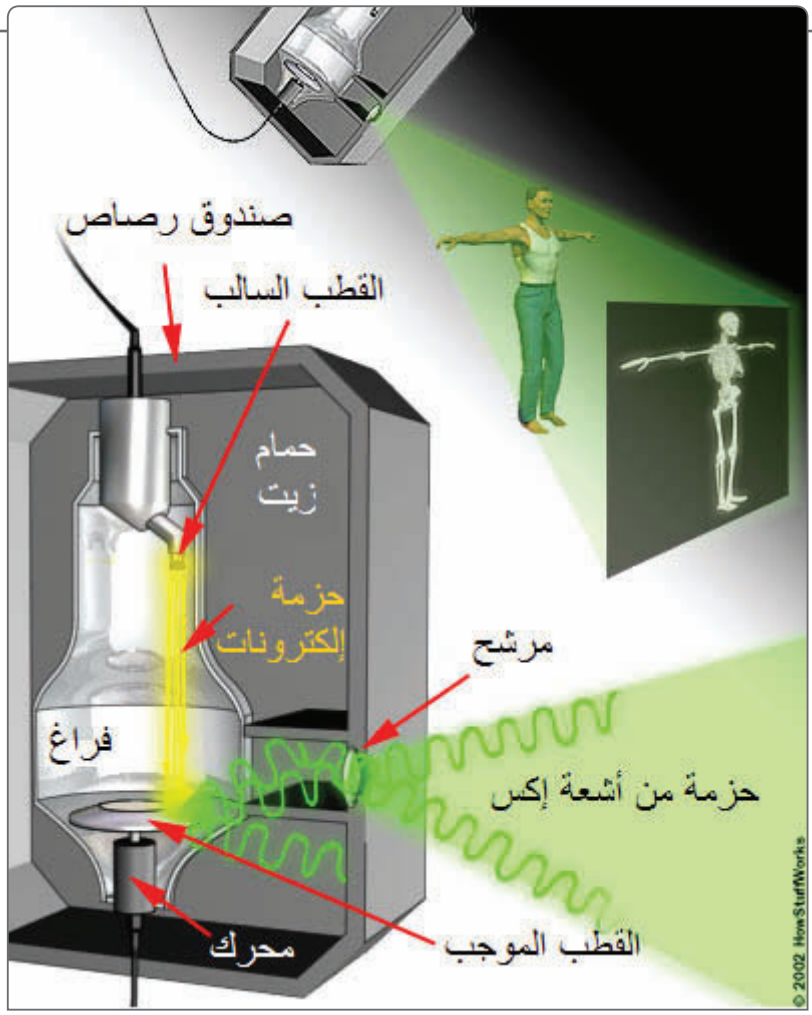
**خلال الحرب العالمية الأولى**

في حالة التصوير بأشعة أكس، يوضع الجسم المراد تصويره بين مصدر الأشعة وكشافها (الفيلم الحساس، تقليديا؛ الشكل 176). يتكون جهاز أشعة أكس في جوهره من زوج من الأقطاب الكهربية بداخل أنبوب زجاجي مفرغ. القطب السالب، أو *الكاثود cathode*، عبارة عن فتيل يسخن بالكهرباء (مثل الذي يوجد في المصباح الكهربي التقليدي)؛ القطب الموجب، أو *الأنود anode*، قرص مسطح من التنجستن tungsten.

عند تشغيل الجهاز، يمر تيار كهربي في الفتيلة ويسخنها. تعمل الحرارة على طرد الإلكترونات من سطح الفتيلة. تنجذب الإلكترونات المتحررة إلى القطب الموجب. بسبب فرق الجهد الكبير بين القطبين تنطلق هذه الإلكترونات بقوة خلال الأنبوب المفرغ. تتولد أشعة أكس من اصطدام الإلكترونات المتسارعة مع ذرات التنجستن في القطب الموجب.

**الشكل 176:**

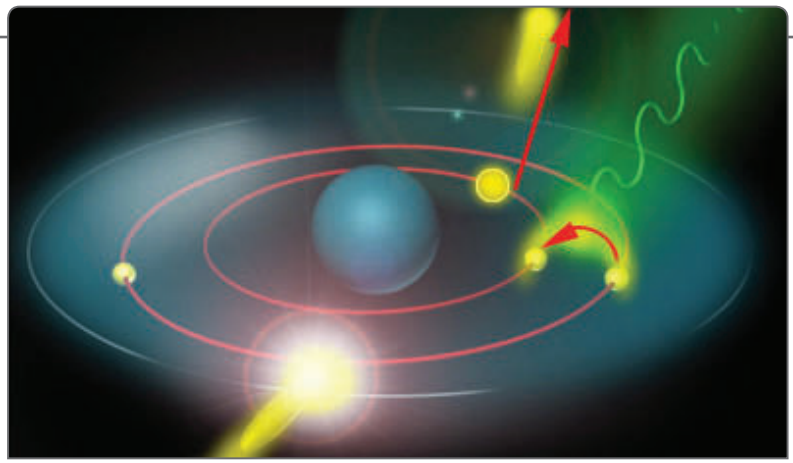
**جهاز التصوير الطبي بأشعة إكس**




يبين الشكل 177 والشكل 178 تفاصيل ما يحدث عند اصطدام الإلكترونات مع ذرات التنجستن في القطب الموجب. قد يطرد الإلكترون الصادم أحد الإلكترونات منخفضة الطاقة في ذرة التنجستن. يستتبع ذلك انتقال إلكترون عالي الطاقة إلى موضع الإلكترون المطرود ويفقد الفرق في الطاقة على شكل فوتون من أشعة أكس (الشكل 177).

**الشكل 177 :**

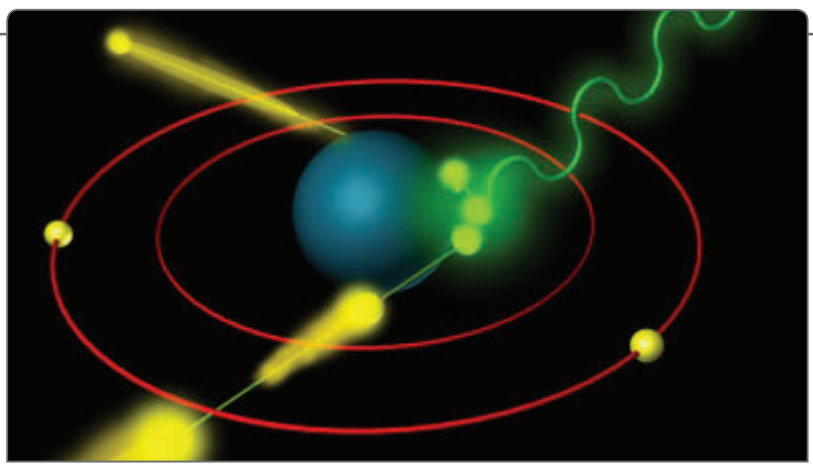
**انبعاث أشعة إكس من اصطدام الإلكترون بذرة التنجستن**



قد يمر الإلكترون الصادم بالقرب من نواة ذرة التنجستن دون أن يصطدم بأي من إلكترونات الذرة. تجذب النواة الموجبة الإلكترون السالب ناحيتها فيبطء من سرعته ويغير اتجاهه. ينتج عن هذا الفعل الكابح انطلاق فرق الطاقة على شكل فوتون من أشعة أكس (الشكل 178).

**الشكل 178 :**

**انبعاث أشعة إكس من اصطدام الإلكترون بذرة التنجستن**



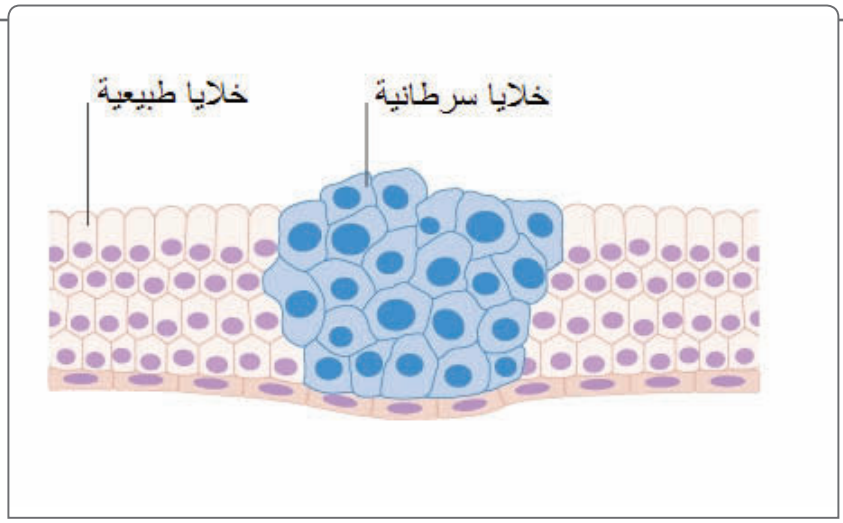
لم يتغير التصوير الإشعاعي كثيراً في جوهرة منذ ابتكاره في مطلع القرن العشرين. لكن التطورات التكنولوجية المتتالية سمحت باستخدام معدات أخف وقادرة على إنتاج صور عالية الجودة.

### العـــلاج الإشـــعاعـــي

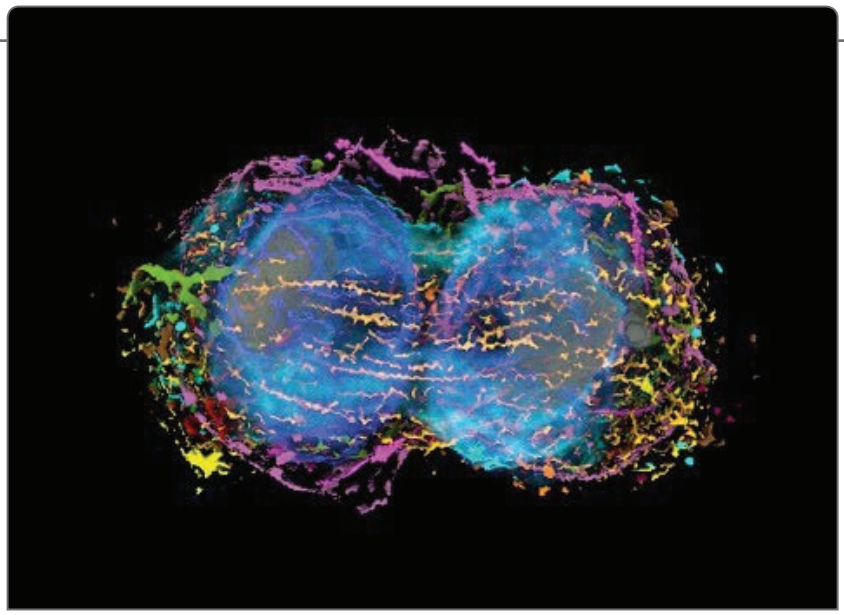
استخدم الراديوم مبكراً بعد اكتشافه في علاج بعض الحالات المرضية، مثل مرض الذئبة lupus الجلدي، السرطان، والأمراض العصبية.

السرطان يشير إلى مجموعة كبيرة من الأمراض التي تنتج من نمو غير طبيعي للخلايا في الجسم يؤدي إلى تكون كتلة كبيرة من الأنسجة، تسمى ورم (الشكل 179). يحدث النمو والانقسام في خلايا الجسم بشكل طبيعي (الشكل 180). لكن السرطان يبدأ عندما يحدث خلل بالخلية يجعلها تنقسم دون رقيب.

**الشكل 179 : بداية تكون الورم السرطاني**



**الشكل 180 : انقسام إحدى الخلايا البشرية**



تحتوي الخلايا السليمة على بروتينات معينة تَشِر إلى الخلية بالتوقف عن الانقسام والنمو عندما لا يكون ذلك ضروريا. يحدث السرطان عندما تتضرر إشارات التوقف هذه. قد يحدث هذا الخلل نتيجة لعيوب موروثة (عوامل داخلية) أو التعرض للإشعاع والكيماويات من البيئة (عوامل خارجية).

نحن نعرف أن التعرض الشديد للإشعاع قد يحدث السرطان. كيف إذا يستخدم الإشعاع في علاج السرطان نفسه؟

من حسن الحظ، تتضرر الخلايا السرطانية من الإشعاع بشكل أكبر من الخلايا السليمة. بشكل عام، تكون الخلايا التي تنقسم بسرعة أكثر حساسية للإشعاع من تلك التي لا تنقسم أو تنقسم ببطء. يعتمد العلاج بالإشعاع على الموازنة بين تدمير الخلايا السرطانية وتقليل الضرر على الخلايا السليمة.

يخرب الإشعاع الحمض النووي في الخلايا السرطانية. إذا كان الضرر الناتج كبيراً فإن الخلية تموت أو تتوقف عن الانقسام. لا يقتل الإشعاع الخلايا السرطانية دائماً على الفور. لذلك، قد يستغرق العلاج الإشعاعي أيام أو أسابيع حتى تبدأ الخلايا في الموت، وتستمر هذه الخلايا في الموت لأشهر بعد انتهاء العلاج. تتضرر من العلاج الإشعاعي الخلايا السليمة المجاورة للورم، لكن أغلبها يستطيع إصلاح حمضها النووي المتضرر، وتعود طبيعية.

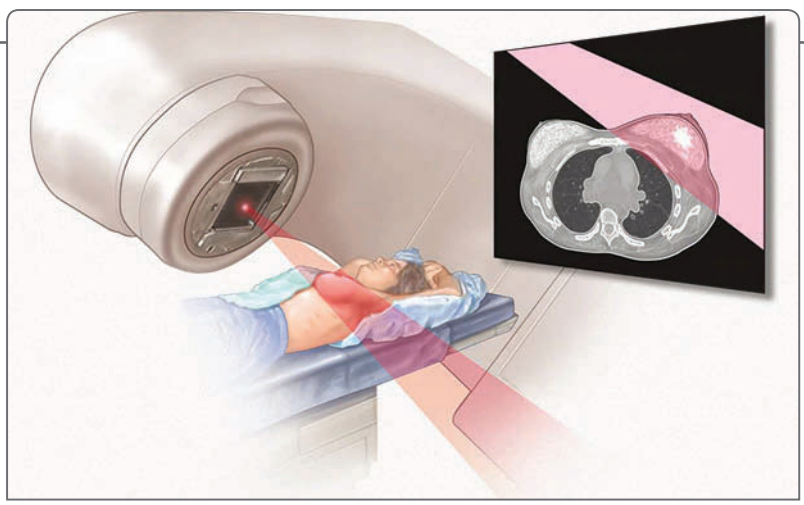
تتأثر بالإشعاع سريعاً الأنسجة التي تنقسم بسرعة، مثل الجلد، نخاع العظم، وبطانة الأمعاء. العكس يحدث مع الأعصاب، الثدي، المخ، وأنسجة العظم.

**هناك نوعان رئيسان من العلاج الإشعاعي:** الخارجي والداخلي.

في النوع الأول، يصدر الإشعاع من جهاز كبير، ويوجه إلى موضع الورم السرطاني (الشكل 181). يمكن إدارة مصدر الإشعاع حول جسم المريض لكنه لا يلمسه (الشكل 182). لذلك، يطلق عليه اسم *المداواة عن بعد teletherapy*.

**الشكل 181:**

**توجيه الإشعاع إلى موضع الورم السرطاني**



**الشكل 182 :**

**جهاز للعلاج الإشعاعي عن بعد**

في النوع الثاني، يوضع مصدر الإشعاع بداخل الجسم. يكون مصدر الإشعاع إما صلباً أو سائلاً. يدعى العلاج الداخلي بمصدر مشع صلب *المداواة القصيرة brachytherapy*، لأنه علاج *موضعي topical* (يستهدف جزء محدد من الجسم). في هذا النوع، يوضع المصدر المشع الصلب بداخل الجسم بالقرب من الورم أو فيه (في كبسولة مثلاً).

يعد العلاج بمصدر إشعاعي سائل *مداواة جهازية systemic therapy*. يرتحل الدواء المشع عبر الدم إلى أنسجة الجسم المختلفة باحثا عن الخلايا السرطانية ليقتلها. يتناول المريض الدواء بالابتلاع أو الحقن. تظل مشعة لبعض الوقت إفرازات المريض المعالج بهذه الطريقة، مثل البول، العرق، واللعاب.

يجدر بالذكر أن شركة روساتوم النووية الروسية المملوكة للدولة أعلنت في يوليو 2020 أنها تعتزم إنشاء مصنع لإنتاج الأدوية المشعة التي تستهدف مباشرة الخلايا السرطانية ولا تؤثر على الخلايا السليمة.

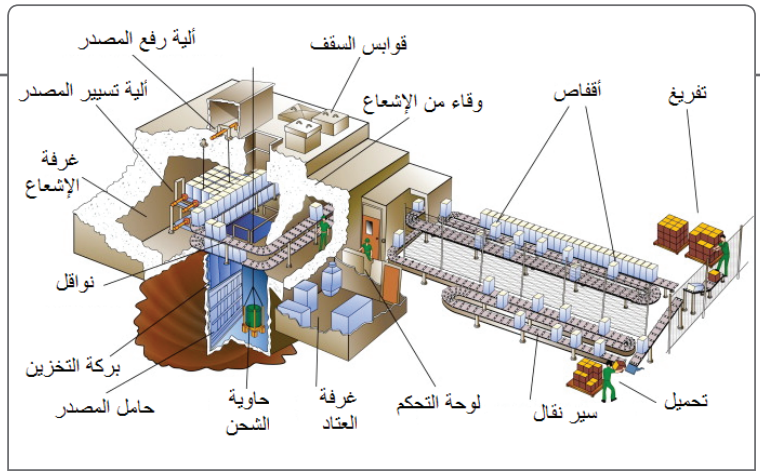
## التعقيـــم الطبـــــي

لابد من تعقيم أي أداة طبية تدخل جسم الإنسان من الميكروبات. هناك وسائل متنوعة لهذا التعقيم، مثل البخار، الكحول، الأوزون، والإشعاع.

يتميز التعقيم بالإشعاع بأنه "غير تدميري nondestructive"، أي لا يعطل الأشياء المراد تعقيمها، كما انه يصلح لتعقيم الأدوات الطبية بعد تعبئتها أو تغليفها.

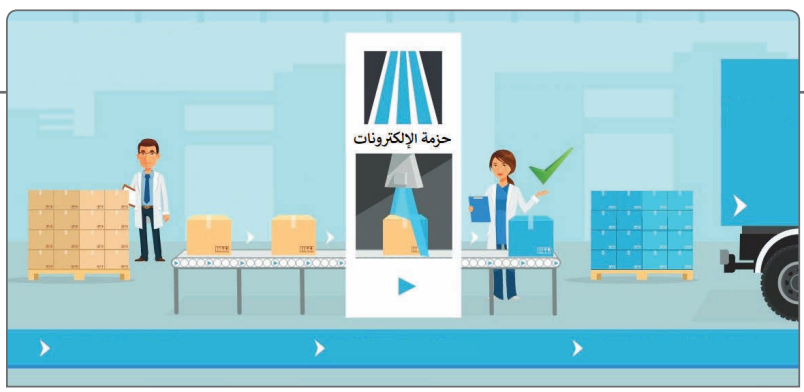
يستخدم في التعقيم الإشعاعي كل من حزم الإلكترونات، أشعة أكس، أشعة جاما، والجسيمات تحت الذرية المعجلة accelerated subatomic particles. الطريقة الأكثر شيوعا هي استعمال أشعة جاما من مصدر يحوي الكوبالت-60 (الشكل 183). المشكلة الرئيسة في هذه الطريقة، وفي كل الطرق التي تعتمد على المواد المشعة، هو أن المصدر المشع يظل نشطا طوال الوقت، حتى بعد استهلاك الجهاز الذي يحتويه والاستغناء عنه. لذلك، يجب متابعة المعقمات بأشعة جاما حتى بعد انتهاء صلاحيتها للاستعمال. كما يجب استخدام وقاء سميك لحماية المشتغلين بهذه الأجهزة.

**الشكل 183 : مصنع تعقيم بالكوبالت - 60**



تستخدم أشعة جاما أيضاً في تقيم الأدوات الطبية استعمال المرة الواحدة disposable، مثل المحاقن، الإبر، ومغذيات العقاقير cannulas. يمكن استخدام حزم الإلكترونات بدلاً من أشعة جاما في التعقيم (الشكل 184). إحدى مزايا استخدام حزم الإلكترونات أن الإشعاع يتوقف عند غلق الجهاز المعقِم. لا يشكل جهاز التعقيم بالإلكترونات خطراً إشعاعياً بعد الاستغناء عنه. كما توفر هذه الأجهزة معدلات جرعة أعلى من تلك التي تنتج من الكوبالت-60. هذا يعني أن الفترة اللازمة للتعقيم سوف تقصر، مما يحد من بَلي الأجزاء البلاستيكية في الأدوات الطبية بسبب التعقيم. في المقابل، تكون المعقمات بحزم الإلكترونات أكثر تكلفة وتعرضا للتلف، مثلها مثل سائر الأجهزة الإلكترونية المعقدة.

**الشكل 184 : خدمة التعقيم بحزم الإلكترونات**




في بداية القرن 21، أُستُخدم الإشعاع في الولايات المتحدة في تعقيم البريد الوارد للمكاتب الحكومية في واشنطن. تستخدم هذه الإجراءات المشددة لقتل بكتيريا الجمرة الخبيثة anthrax bacteria التي قد ترسل إلى المسؤولين عبر البريد. بدأ هذا الإجراء المكلف في نوفمبر 2001، بعد أن أرسلت مثل هذه الطرود إلى بعض المسؤولين الحكوميين والإعلاميين.

## حفـــظ الأغـــذيـــــة

يمكن أن يؤدي تعريض الأغذية للإشعاع إلى قتل الميكروبات، الحشرات، والطفيليات الموجودة بالأغذية، وإلى تثبيط إنبات الأبصال والدرنات وتأخير نضج الفواكه. كما وجد أن "التشعيع irradiation" يزيد من عصير الفواكه وامتصاص الماء في الفواكه المجففة. كل هذا يزيد من جودة، سلامتها الأغذية، و"عمرها على الأرفف shelf age" (الشكل 185).

**الشكل 185:**
**مقارنة بين الفراولة المشعة (على الشمال)**
**والعادية (على اليمين)**

بدأ استخدام الإشعاع في حفظ الأغذية في أوائل 20ات19. في50ات و60ات19، أجرى الجيش الأمريكي أبحاثا حول تشعيع المؤن الحربية. حث ذلك دراسات مشابهة في دول أخرى، وازداد الاهتمام بتشعيع الأغذية منذ ذلك الحين.

يسمح حالياً بتشعيع الأغذية في أكثر من 40 دولة، وتقدر كمية الأغذية المشعة في العالم بنحو 500,000 طن كل عام.

أثيرت التساؤلات حول سلامة الأغذية المشعة لاستهلاك البشر بسبب التغيرات الكيميائية التي قد يحدثها الإشعاع في تلك الأغذية. أجريت بحوث كثيرة على هذا الموضوع. كما قامت لجان مشتركة من خبراء الوكالة الدولية للطاقة الذرية، منظمة الصحة العالمية، ومنظمة الأغذية والزراعة بمراجعة هذه الدراسات وتقييمها. خلص هؤلاء الخبراء إلى أن عملية التشعيع لا تشكل أي خطر زائد عما يحدث في الطرق التقليدية لمعالجة الأغذية.

على الرغم من مرور أكثر من نصف قرن على ممارسة تشعيع الأغذية، يظل الكثير من المستهلكين قلقين منها. لذلك، تفرض القوانين في الولايات المتحدة وضع علامة خاصة على الأغذية المشعة (الشكل 186).

**الشكل 186:**
**علامة "رادورا Radura"**
**التي توضع على الأغذية المشعة**

يستخدم في تشعيع الأغذية أشعة جاما (من الكوبالت-60 والسيزيوم-137)، شُعَع الإلكترونات (ذات طاقة حتى 10 مإف)، أو أشعة أكس (ذات طاقة حتى 5 مإف).

عادة ما تشعع الأغذية بأشعة جاما من الكوبالت-60. تتلخص العملية في مرور عبوات الأغذية المحمولة على سير ناقل أو منصات متحركة بجوار ألواح من الكوبالت-60 لفترة تحدد حسب الجرعة الإشعاعية المطلوبة (من دقائق قليلة إلى ساعات).

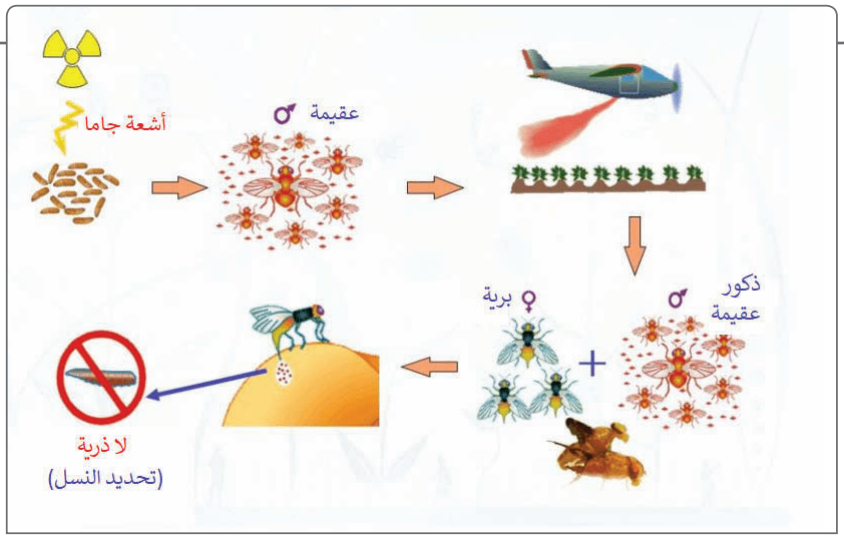
**يقسم تشعيع الأغذية إلى ثلاثة مستويات:** جرعة منخفضة (حتى كيلوچراي واحد)، متوسطة (1 - 10 كچي)، عالية (حتى 10 كچي)، كل مستوى يناسب غرضاً معيناً.

لا تختلف عملية تشعيع الأغذية في جوهرها عن عملية تعقيم الأدوات الطبية. بسبب الطلب الشديد على الأدوات الطبية في زمن وباء الكورونا، قام مركز ستيرون الروسي، التابع لـ "وكالة روساتوم"، بتحويل نشاطه في أبريل 2020 من تشعيع الأغذية إلى تعقيم الكمامات الطبية وأنابيب اختبار الكورونا.

### مكافحة الحشرات الضارة

تُعدُّ *تقنية الحشرة العقيمة sterile insect technique* أسلوباً ملائماً من الناحية البيئية لمكافحة الآفات الحشرية. تنطوي هذه التقنية على التربية المكثفة لذكور الآفة المستهدفة وإعْقَامِها باستخدام الإشعاع بحيث تظلُّ قادرة على منافسة الذكور البرية جنسيًّا دون أن تتناسل. تتطلق الذكور العقيمة في الجو على نطاق واسع فوق مناطق محددة. تتزاوج هذه الذكور مع الإناث البرية دون أن تتناسل، وهو ما يُفضي إلى تناقص أعداد الآفة المستهدفة (الشكل 187).

**الشكل 187 : فكرة عمل تقنية الحشرة العقيمة**




تصنِّف الاتفاقية الدولية لوقاية النباتات الحشرات العقيمة على أنّها كائنات حية نافعة. تختلف تقنية الحشرة العقيمة من عدة أوجه عن المكافحة البيولوجية التقليدية التي تنطوي على إدخال عناصر مكافحة بيولوجية دخيلة على البيئة. **تتمثل أهم أوجه الاختلاف فيما يلي:**

- الحشرات العقيمة لا تتكاثر، ومن ثمّ فليس من الممكن أن تصير موجودة بصفة دائمة في البيئة.
- عملية كسر الدورة التناسلية للآفة، والتي تُعرف بالمكافحة عن طريق قطع النسل، بحكم تعريفها قاصرة على نوع بعينه من الكائنات الحية.
- لا تنطوي تقنية الحشرة العقيمة على إدخال أنواع دخيلة من الكائنات الحية إلى النظام البيئي.

استُحدثت تقنية الحشرة العقيمة للمرة الأولى في الولايات المتحدة الأمريكية، ويجري استخدامها بنجاح منذ أكثر من 60 عاماً. تُطبّق التقنية حاليًّا في ست قارات.

من خلال التكامل مع أساليب مكافحة أخرى، حقّقت تقنية الحشرة العقيمة النجاح في مكافحة عدد من الآفات الحشرية البارزة، بما في ذلك ذباب الفاكهة (ذبابة الفاكهة المتوسطية، ذبابة الفاكهة المكسيكية، ذبابة الفاكهة الشرقية، وذبابة البطيخ)؛ ذبابة تسي تسي؛ الدودة الحلزونية؛ العثث (دودة التفاح، دودة القطن الوردية، دودة التفاح الكاذبة، دودة الصبار، دودة التفاح الأسترالية ذات العثة الملونة)؛ والبعوض. بيّنت دراسات التقييم الاقتصادي بأثر رجعي في عدّة بلدان طُبِّقت فيها هذه التكنولوجيا أنّها تكفل عائدا استثماريًّا مرتفعاً للغاية .

## كواشف الدخان

كواشف الدخان smoke detectors هي من أروع الاختراعات. فهي غير غالية (بعضها بأقل من 10 دولارات) ولكنها تنقذ ألاف الأرواح كل عام.

تفرض قوانين البناء في بعض الدول تركيب كاشف الدخان في كل وحدة سكنية. تثبت هذه الكواشف بالأسقف (الشكل 188).

**الشكل 188 : كاشف الدخان**

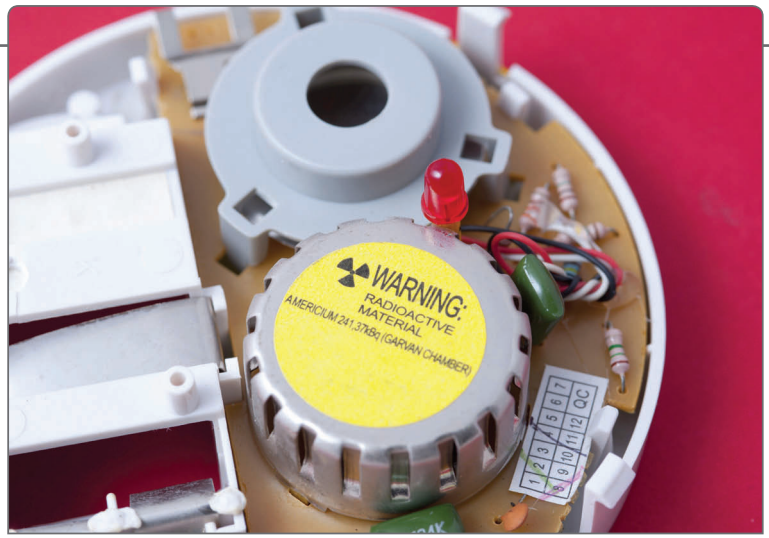
تتكون جميع أنواع كواشف الدخان من جزئين رئيسين: مستشعر يحس بالدخان وبوق صاخب كي يوقظ الناس. هناك نوعان رئيسان من هذه الكواشف: التي تعمل بالخلية الضوء-كهربية والتي تعمل بالإشعاع.

سنفحص في هذا الجزء النوع الذي يعمل بالإشعاع. هذا النوع هو الأكثر شيوعا بسبب تكلفته المنخفضة وقدرته على كشف الكميات القليلة من الدخان.[1]

يحتوي كل جهاز على كمية صغيرة من الأمريسيوم-241 (1/5000 من الجرام).[2] العمر النصفي لعنصر الأمريسيوم-241 هو 432 سنة، وهو يصدر جسيمات ألفا (طاقة كل جسيم أكثر من 5 مإف)، بالإضافة إلى أشعة جاما منخفضة المستوي (الشكل 189).

**الشكل 189 :**

**كاشف دخانيعمل بالأمريسيوم- 241**




(1) تحتوي 93 % من المنازل في الولايات المتحدة على كاشف دخان واحد على الأقل، نصف هذه الأجهزة من النوع الذي يعمل بالإشعاع.

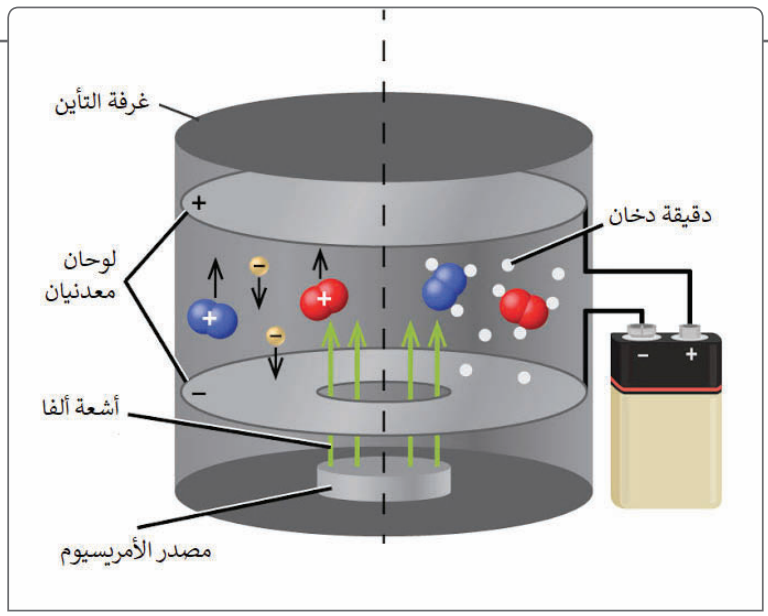
(2) تصدر هذه الكمية 33,300 جسيم ألفا في الثانية الواحدة.

يوجد المصدر المشع فيما يسمى بغرفة التأين ionization chamber. تحتوي غرفة التأين، بالإضافة إلى المصدر المشع، على شريحتين بينهما فرق جهد. يؤين الإشعاع الهواء بداخل غرفة التأين، فيمر تيار كهربي صغير بين الشريحتين (الشكل 190).

مع بدأ الحريق تتصاعد حبيبات الدخان وتدخل غرفة التأين. تعادل هذه الحبيبات الأيونات المتكونة، فيهوي التيار الكهربي بين الشريحتين. تحس الدوائر الإلكترونية في الكاشف بهبوط التيار الكهربي، وتطلق البوق المنبه.

**الشكل 190 :**

**فكرة عمل كاشف الدخان الإشعاعي**




اكتشفت قدرة حبيبات الدخان على كبح التأين في أواخر 1930ات مصادفة بواسطة الفيزيائي السويسري "ڤالتر ويچَر Walter Jager". كان ويچر يحاول ابتكار جهاز لكشف أحد الغازات السامة. جرب ويچر الجهاز السابق وصفه، ولم يحس الجهاز بالغاز السام. انتاب ويچر الإحباط، فأشعل سيجارة ليدخنها. كانت المفاجأة أن "تنبه" جهازه التجريبي فورا لدخان السيجارة.

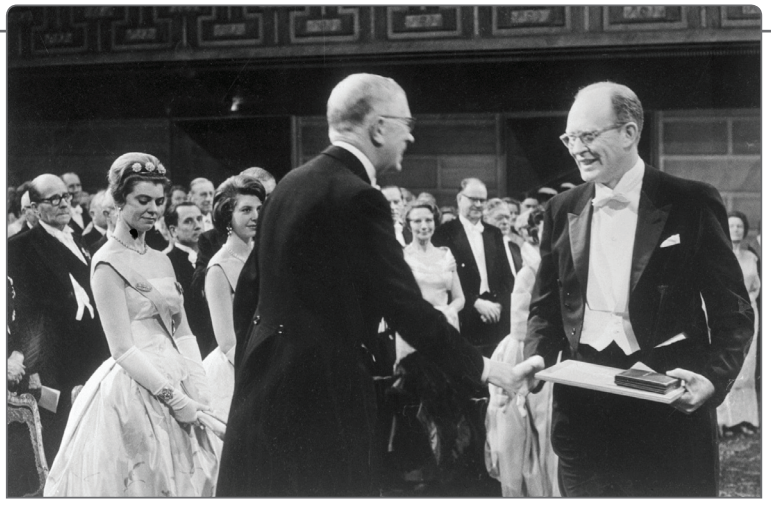
يستهلك كاشف الدخان بالإشعاع قبل أن يتلاشى الإشعاع بداخله (العمر النصفي للأمريسيوم-241 هو 432 سنة). من الناحية النظرية، تظل الأجهزة الهالكة مصدرا للإشعاع لمئات السنين. لكن "المفوضية التنظيمية النووية Nuclear Regulatory Commission" بالولايات المتحدة لا تعتبر هذه الأجهزة خطراً إشعاعياً. كما لا يوجد برنامجاً منظماً لإعادة تدوير الوحدات المستهلكة.

### التأريـــخ بالكربـــون المشـــع

ابتكر الكيميائي الأمريكي "ويلارد ليبي Willard Libby" (1908-1980) وزملاؤه خلال منتصف القرن 20 طريقة لتحديد عمر الحفريات التي تحتوي على مواد عضوية (من بقايا الكائنات الحية) باستخدام الكربون المشع (الكربون-14). تعرف هذه الطريقة باسم "التأريخ بالكربون-14 "، وقد نال عليها ويلارد جائزة نوبل في الكيمياء لسنة 1960 (الشكل 191). سنشرح الآن كيف تعمل هذه الطريقة.

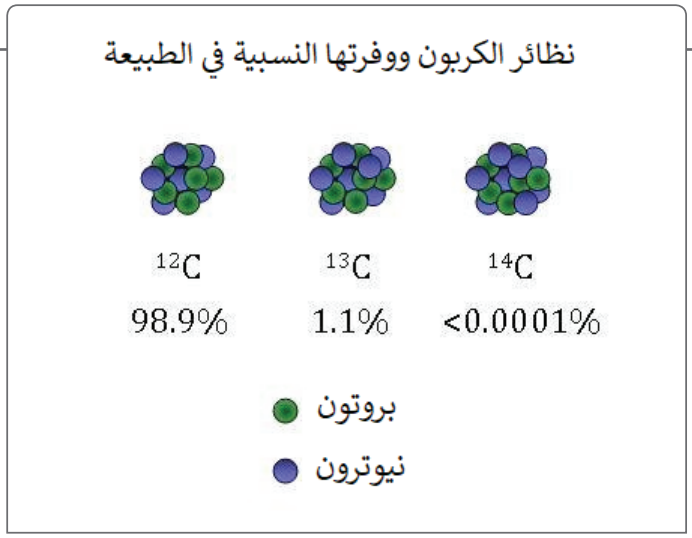
**الشكل 191 :**

**ويلارد ليبي في احتفال جائزة نوبل**



تحتوي ذرة الكربون على ستة بروتونات. توجد ثلاثة نظائر للكربون في الطبيعة: الكربون-12، الكربون-13، والكربون-14 (الشكل 192). النظير السائد هو الكربون-12 (98.9 %). الكربون-12 والكربون-13 هما نظيران مستقران، أما النظير الثالث والأندر، الكربون-14، فهو مشع.[1]

**الشكل 192 : نظائر الكربون في الطبيعة**




العمر النصفي للكربون-14 هو 5,730 سنة، وهو قصير بالنسبة لعمر الأرض (يقدر بـ 4.5 بليون سنة). لماذا إذا يوجد الكربون-14 في الأرض؟ السبب هو أنه يتكون باستمرار في الغلاف الجوي من تفاعل النيوترونات الموجودة في الإشعاع الكوني مع نوى النتروجين الجوي.

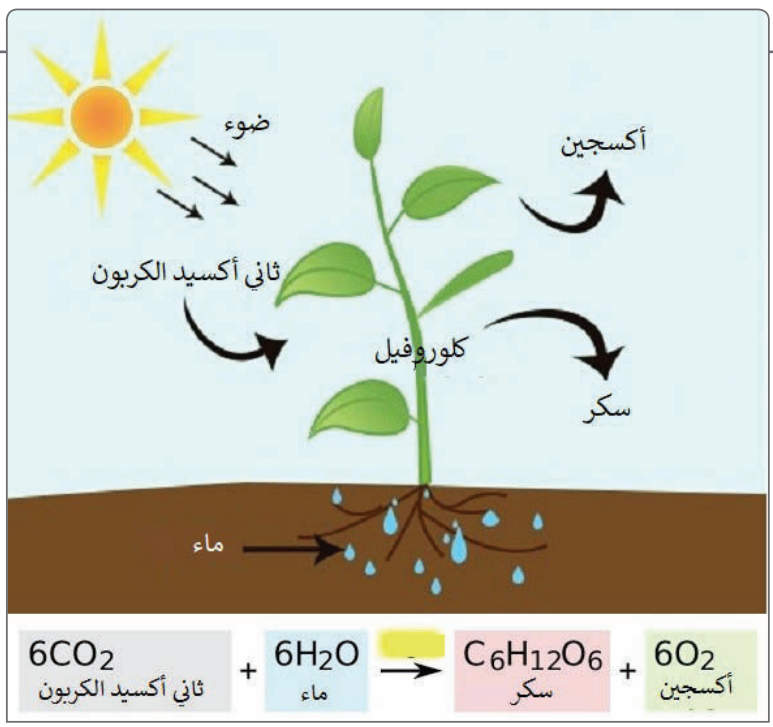
$$^{14}_{7}N + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{14}_{6}C + {}^{1}_{1}H$$

يوجد الكربون (مستقر أو مشع) في الغلاف الجوي على شكل غاز ثاني أكسيد

(1) من بين تريليون (مليون مليون) ذرة كربون، هناك واحدة فقط من الكربون14- (لو رصصنا تريليون ورقة بنكنوت في صف واحد، لأمتد هذا الصف ما بين الأرض والشمس).

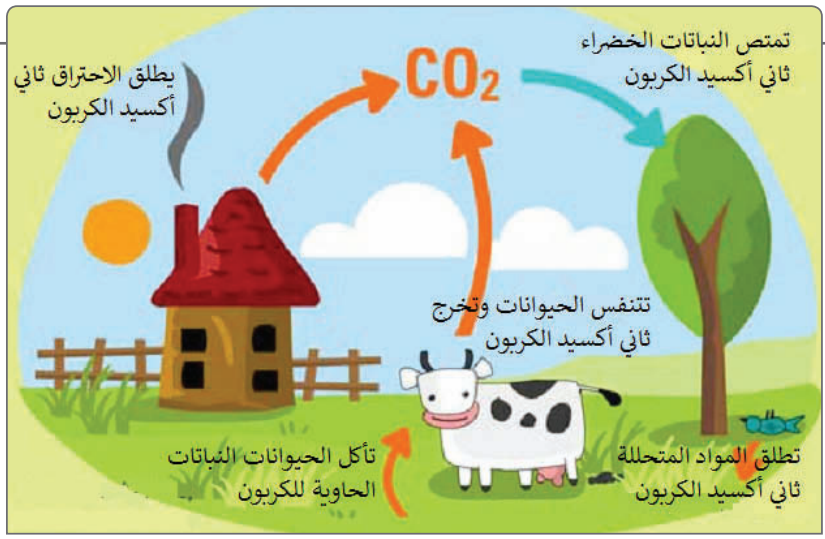
الكربون. يدخل الكربون إلى أجسام النباتات من خلال *عملية التمثيل الضوئي* *photosynthesis* (الشكل 193)، وينتقل إلى سائر الكائنات الحية من خلال الغذاء (أو *السلسلة الغذائية* *food chain* باللغة العلمية).

**الشكل 193 : عملية التمثيل الضوئي**




افترض ليبي أن نسبة الكربون-14 تظل ثابتة في الغلاف الجوي، وبالتالي، في اجسام الكائنات الحية حتى موتها. تنخفض نسبة الكربون-14 (إلى الكربون-12) في الأجزاء الميتة مع مرور الوقت نتيجة لانحلال الكربون-14 المشع (الشكل 194).

**الشكل 194 : دوران الكربون في البيئة**

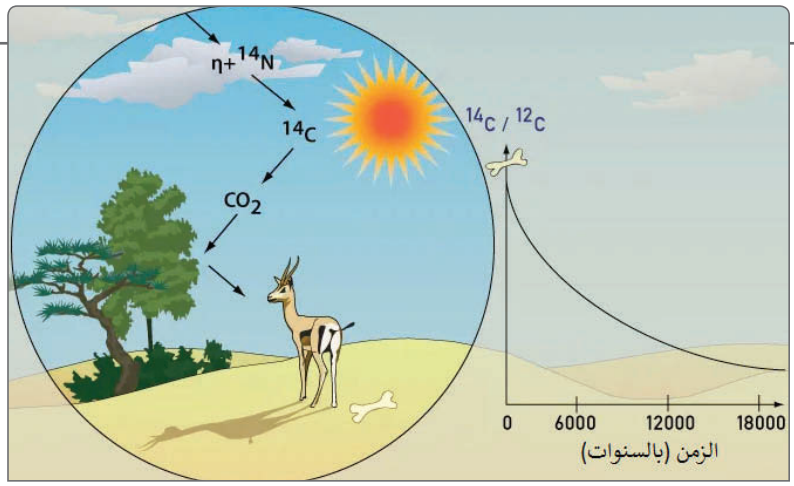



قام ليبي وزملاؤه بتجارب كثيرة من أجل تحديد نسبة الكربون-14 إلى الكربون-12 في أجسام الكائنات الحية، ووجدوا أن متوسط هذه النسبة هو 15.3 انحلال في الدقيقة لكل جرام من الكربون (أي 0.255 بيكريل لكل جرام أو 255 ب ك/ك ج).

من مستوى الكربون المشع في الحفريات وعمره النصفي (5730 سنة) يمكن تقدير وقت الوفاة (الشكل 195).

لتقييم دقة هذه الطريقة، قام ليبي وزملاؤه بالقياسات والحسابات المطلوبة على عينات قديمة معلوم عمرها من المصادر التاريخية. استخدموا في ذلك عينات من مصر زمن الأسرة الفرعونية الأولى (منذ 5000 سنة مضت) ومن "بومبي Pompeii" الرومانية (جنوب شرق إيطاليا). توافقت بشكل رائع نتائج التأريخ بالكربون-14 مع الأعمار المعروفة تاريخيا.

**الشكل 195 : التأريخ بالكربون- 14**




تحتاج طريقة التأريخ بالكربون-14 لعينات كبيرة نوعا ما (بضع عشرات الجرامات) للحصول على نتائج مرضية. فالعمر النصفي للكربون-14 طويلاً نسبياً، وهذا يعني معدلاً صغيراً من النشاط الإشعاعي. كما أن جسيمات بيتا المنبعثة أثناء الانحلال المشع للكربون-14 تكون طاقتها صغيرة نسبياً (لا تزيد عن 156 ك‌إ‌ف).

أدخلت عدة تحسينات على الطريقة الأصلية لزيادة دقتها وحساسيتها. طريقة التأريخ بالكربون-14 مفيدة في تقدير الأعمار حتى 60,000 سنة، أي 10 أعمار نصفية (10×5730). لا يمكن استخدامها مع الحفريات الأقدم من ذلك، بسبب تلاشي الكربون المشع عملياً.

# النفايات المشعة

# النفـايـات المشـعـة

*النفايات المشعة أو النووية* *nuclear or radio- waste* هي تلك التي تحتوي نويدات مشعة (عناصر أو نظائر مشعة)، ولا يعرف لها استخداما أو فائدة. قد تكون هذه النويدات طبيعية، مثل الراديوم- 226، أو من صنع الإنسان، مثل السيزيوم- 137.

مصدر الخطورة الرئيسة في النفايات المشعة هو النشاط الإشعاعي، الذي يمكن أن يحدث الوفاة أو الإصابة البالغة في الجرعات العالية ويزيد من مخاطر الإصابة بالسرطان على المدى الطويل في الجرعات المنخفضة. رغم استمرار الجدل حول تأثير الجرعات المنخفضة جداً من الإشعاع، فإن القاعدة المتبعة تفترض أن مخاطر الإصابة بالسرطان تزداد بمعدل يتناسب مع مقدار التعرض ولا وجود لجرعة آمنة مهما صغرت. بعض العناصر المشعة، مثل اليورانيوم، سامة كيميائياً. لكن سمية النفايات المشعة الكيميائية عادة ما تكون أقل كثيراً في خطورتها من نشاطها الإشعاعي.

تتولد النفايات المشعة ليس فقط من صنع الأسلحة النووية ومحطات الطاقة النووية، ولكن أيضاً من المستشفيات، مراكز البحوث العلمية، والصناعات غير النووية. النفايات الأكثر إشعاعاً هي الوقود النووي المستهلك، نفايات محطات إعادة معالجة هذا الوقود، ونفايات المفاعلات التي تنتج البلوتونيوم للأسلحة النووية. النشاط الإشعاعي للنفايات النووية الأخرى أقل كثيراً، ولذلك، تعد هذه النفايات أقل خطورة.

## تصنيف النفايات المشعة

تصنف النفايات المشعة بناء على عدة أسس، أهمها مستوى النشاط الإشعاعي فيها، نوع الأشعة التي تبثها، والأعمار النصفية للعناصر المشعة التي تحتويها.

بداية، يمكن تصنيف النفايات المشعة إلى عسكرية ومدنية.

لقد انتهي إنتاج بلوتونيوم الأسلحة في الولايات المتحدة وأوروبا، على الأقل حتى الوقت الراهن. مع ذلك، لم تتوقف نفايات الأسلحة النووية لأن بعض الدول مازالت توسع من ترسانتها النووية. على كل حال، لم يعد إنتاج نفايات الأسلحة النووية هو المشكلة الرئيسة بل كيفية التخلص بشكل آمن من تلك الموجودة، وتنظيف المناطق الملوثة بها. الاهتمام الأكبر موجه حاليا إلى نفايات محطات الطاقة النووية، لأن كمياتها أكبر ومستمرة.

تضم النفايات المدنية النفايات المتولدة من محطات الطاقة النووية، مرافق إعادة معالجة الوقود النووي المستهلك، ومن الاستخدامات المتنوعة الأخرى للنظائر المشعة والإشعاع (مثل الطبية، البحثية، والصناعية). لا يعد الوقود المستهلك نفايات في الدول التي تقوم بإعادة معالجته، مثل فرنسا.

النشاط الإشعاعي للنفايات المدنية الأخرى غير المحطات النووية هو عادة منخفض لأنها لا تحتوي على نواتج الانشطار.

من المهم عملياً التمييز بين النفايات المشعة حسب نشاطها الإشعاعي، نوع أو أنواع الإشعاع الذي تبثه، و"أعمار" ما تحتويه من عناصر مشعة. لنتذكر هنا بعض المعلومات العلمية التي ناقشناها عن خصائص العناصر المشعة. أولاً، العناصر أو النظائر النشطة إشعاعياً تولد حرارة كبيرة أثناء نشاطها الإشعاعي (حرارة الانحلال). ثانياً، هناك علاقة عكسية بين النشاط الإشعاعي للعنصر أو النظير

المشع وعمره النصفي. هذا يعني أن الأعمار النصفية للعناصر أو النظائر النشطة إشعاعيا تكون قصيرة، والعكس صحيح.

لا يوجد نظام عالمي واحد لمثل هذا التقسيم. سنبدأ بمناقشة النظام المتبع في الولايات المتحدة لأنه الأبسط للقارئ غير المتخصص.

يميز النظام الأمريكي بين ثلاثة أنواع رئيسة: منخفضة المستوى low-level، بعد-اليورانية transuranic، وعالية المستوى high-level.

تأتي النفايات منخفضة المستوى من بعض العمليات في المفاعلات النووية، ومن مؤسسات عديدة أخرى مثل المستشفيات، المراكز البحثية، والمصانع. يكون نشاطها الإشعاعي عادة منخفضا، ولا تحتوي عمليا على عناصر بعد-يورانية (رقمها الذري أكبر من 92، الرقم الذري لليورانيوم). لا تحتاج أغلب النفايات منخفضة المستوى إلى وقاء، ويمكن التعامل معها مباشرة ودفنها بالقرب من سطح الأرض. لكن هناك جزء منها متوسط الإشعاع بحيث يحتاج إلى معالجة وصرف خاصين.

النفايات بعد-اليورانية هي تلك التي تحتوي على عناصر بعد-يورانية أكبر من 10 بك لكل جرام من النفايات.[1] تتكون هذه النفايات من عمليات إنتاج الكهرباء النووية، تصنيع الأسلحة النووية، وإعادة معالجة الوقود النووي المستهلك. يلزم إدارة النفايات بعد-اليورانية بشكل منفصل، مع أن نشاطها الإشعاعي منخفض بشكل عام، وذلك لأنها تحتوي على نظائر مشعة طويلة العمر. تضم هذه النظائر التالي: البلوتونيوم-239، عمر النصف 24.13 سنة؛ الأمريسيوم-241، 432 سنة؛ الأمريسيوم-243، 737 سنة؛ الكيوريوم-244، 18.1 سنة؛ الكيوريوم-245، 8537 سنة. تضم أيضاً عنصر النبتونيوم-237 neptunium، الذي يبلغ عمره النصفي 2.14 مليون سنة.[2]

(1) نلاحظ هنا أننا نعبر عن مقادير المواد المشعة بنشاطها الإشعاعي.

(2) نلاحظ هنا العلاقة العكسية بين العمر النصفي للعنصر المشع ونشاطه الإشعاعي.

لا ينبعث من النفايات بعد-اليورانية سوى القليل من الحرارة، ويتعامل مع أغلبها بالطرق المعتادة التي لا تتطلب تحكما عن بعد. في الماضي، كانت الولايات المتحدة تدفن هذه النفايات في خنادق ضحلة، لكنها اخذت منذ 1972 تخزنها في مستودعات تسمح بإمكانية استعادتها من جديد.

تنتج النفايات عالية المستوى من إعادة معالجة وقود المفاعلات المستهلك (مدنية وعسكرية). تتكون هذه النفايات أساسا من نواتج الانشطار، لأن أغلب اليورانيوم والبلوتونيوم الموجود فيها يستخلص في عمليات إعادة المعالجة. يتبقى في هذه المخلفات مقادير صغيرة من البلوتونيوم وعناصر بعد-يورانية أخرى لم تفصل أثناء إعادة المعالجة.

تصنف الوكالة الدولية للطاقة الذرية النفايات المشعة في الفئات الثلاثة التالية: (1) النفايات المعفاة exempt waste (EW)، (2) النفايات منخفضة ومتوسطة المستوى low and intermediate-level waste (LILW)، و(3) النفايات عالية المستوى high-level waste (HLW).

- **النفايات المعفاة:** التي تستبعد من الرقابة القانونية على النفايات المشعة بسبب أن أخطارها الإشعاعية ضئيلة.
- **النفايات منخفضة ومتوسطة المستوى:** مستويات نشاطها الإشعاعي أعلى من تلك الخاصة بالنفايات المعفاة ولكن قدرتها الحرارية أقل من 2 ك**و**/م$^3$.[1] تصنف هذه النفايات في قسمين:
  - **النفايات قصيرة العمر** (LILW-SL): تحتوي أساساً على نويدات مشعة قصيرة العمر، ولايزيد متوسط تركيزات النويدات المشعة طويلة العمر فيها عن 400 ب**ك**/ج في عبوة النفايات.

(1) تستخدم حرارة الانحلال هنا كمقياس للنشاط الإشعاعي.

- **النفايات طويلة العمر** (LILW-LL): تحتوي على تركيزات من النويدات المشعة طويلة العمر تتعدى حدود النوع قصير العمر.
- **النفايات عالية المستوى:** تحتوي على تركيز من العناصر المشعة يكفي لتوليد حرارة أكبر من 2 **ك و/م**$^3$؛ تتراوح مستويات نشاطها الإشعاعي في المعتاد ما بين 5×10$^4$ و5×10$^5$ **ت ب ك**.

تتبع بعض الدول، مثل المملكة المتحدة، أنظمة أكثر تفصيلا في تصنيف النفايات المشعة.

### إدارة النفايات المشعة

تغطي النفايات المشعة تنويعة واسعة تمتد من النفايات التي يمكن وضعها بأمان في سلة المهملات إلى تلك التي تحتاج التعامل عن بعد، الوقاء السميك، والتبريد.

تنطبق القواعد العامة لإدارة النفايات على إدارة النفايات المشعة. لكن النفايات المشعة تبث الإشعاع، وهو ما يجعلها خطيرة بشكل خاص على صحة الإنسان والبيئة. تخضع النفايات المشعة، حسب فئتها، لمجموعة من المعاملات مثل الفرز sorting، المعالجة treatment، التكييف conditioning، التخزين storage، والصرف disposal.

### الفرز

يشمل الفرز فصل النفايات وفقا لخصائصها المختلفة، وخاصة الأعمار النصفية للنويدات المشعة التي تحتويها. يتضمن أيضا فصل النفايات التي يمكن دمجها، ترميدها، أو صهرها لتقليص حجمها.

## المعالجـــة والتكـييـــف

تخضع الأنواع المختلفة من النفايات لأنواع مختلفة من المعالجة (الترميد incineration، التكليس calcination، الصهر melting، الدمج compaction، التمليط cementing، الزججة vitrification، وغيرها). يختم عليها بعد ذلك في أوعية خاصة، والنتيجة هي ما يسمى "عبوات النفايات waste packages".

## التخـزيـــن والصـــــرف

تصمم مرافق التخزين لتستوعب عبوات النفايات فترة محدودة من الوقت. الصرف هو المرحلة الأخيرة في عملية إدارة النفايات، وتعني أن عبوات النفايات وصلت مستقرها الختامي أو، على الأقل، لا توجد نية لاسترجاعها. لابد أن تتخذ الإجراءات اللازمة لضمان حماية الناس والبيئة على المستوين القصير والطويل.

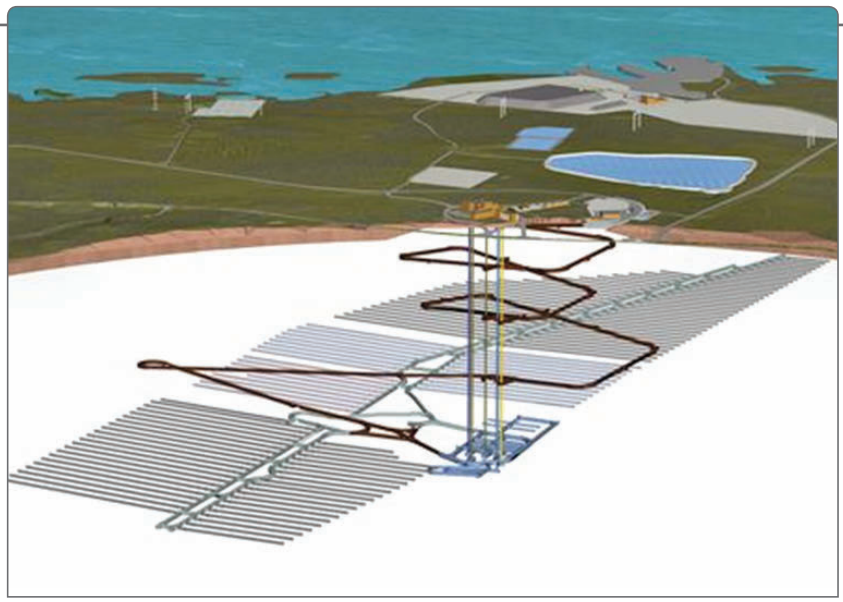
أغلب الدول التي بها مرافق للنفايات المشعة لديها القليل من المرافق "القريبة من السطح" للنفايات المشعة منخفضة ومتوسطة الإشعاع. لا يوجد حالياً مرافق عاملة في العالم لصرف النفايات عالية المستوى أو الوقود المستهلك.

تعالج أغلب النفايات عالية المستوى داخل المنشآت التي تولدها، وفي حالات كثيرة، تخزن داخل الموقع مؤقتاً لحين صرفها نهائياً. لذلك، يستقطع جزء من إيرادات محطات الطاقة النووية للإنفاق في المستقبل على المرافق التي ستبنى من أجل صرف تلك النفايات. لا تشكل النفايات عالية المستوى سوى 2 % تقريباً من نفايات الطاقة النووية، لكنها تحوي أغلب النشاط الإشعاعي (97 %).

يتفق أغلب الخبراء على أن أفضل طريقة لصرف النفايات عالية المستوى هي بدفنها عميقا في الأرض، أو ما يعرف اختصاراً بـ*الصرف الجيولوجي geological disposal* (الشكل 196). قد تحتاج الكثير من النفايات متوسطة المستوى طويلة العمر أيضاً إلى الصرف الجيولوجي العميق.

الشكل 196 :

رسم تخطيطي لمستودع "Olkiluoto" الفنلندي



# حـــوادث
# الإشـعـــــاع

# حـوادث الإشـعاع

- **تشيرنوبيل 24 : 01**

في سكون ليلة مقمرة، مع بداية يوم السبت 26 أبريل 1986، دوى انفجار مروع في محطة "تشيرنوبيل" النووية السوفيتية معلنا وقوع أسوأ كارثة في تاريخ الطاقة النووية حتى الآن.[1] نتج عن الانفجار انتشار الدخان والغبار المشعين فوق مساحات شاسعة من غرب الاتحاد السوفيتي السابق وأوروبا الغربية.

تقع هذه المحطة النووية على الضفة الجنوب-غربية من "نهر بريبيات Pripyat River" على بعد 14.5 كم من بلدة "تشيرنوبيل Chernobyl" الأوكرانية (الشكل 197). كانت أوكرانيا في ذلك الوقت إحدى جمهوريات الاتحاد السوفيتي.[2]

وقعت تلك الكارثة النووية في وقت كانت فيه "الحرب الباردة" مازالت مستعرة بين الولايات المتحدة و"الكتلة الغربية Western Bloc"، من ناحية، والاتحاد السوفيتي و"الكتلة الشرقية Eastern Bloc"، من ناحية أخرى. لم يقصر الخبراء الغربيون أثناء تحليلهم لأسباب الكارثة في انتقاد كل ما هو سوفيتي، سياسة كانت أم هندسة، بل والسخرية منه بطريقة وقحة في بعض الأحيان.

(1) كان القمر كاملاً في تلك الليلة.

(2) تشكل الاتحاد السوفيتي في ذلك الوقت من 15 جمهورية: روسيا Russia، أوكرانيا Ukraine، جورجيا Georgia، روسيا البيضاء Belorussia، أوزبكستان Uzbekistan، أرمينيا Armenia، أذربيجان Azerbaijan، كازاخستان Kazakhstan، قيرغيزستان Kyrgyzstan، مولدافيا Moldavia، تركمانستان Turkmenistan، طاجيكستان Tajikistan، لاتفيا Latvia، ليتوانيا Lithuania، واستونيا Estonia. يقال لا ثابت في السياسة سوى أنها متغيرة. نسمع في الأخبار الآن كثيرا عن العلاقات المتوترة والعدائية بين أوكرانيا المستقلة (بعد انحلال الاتحاد السوفيتي) وروسيا الاتحادية (وريثة هذا الاتحاد رسمياً).

**الشكل 197 : موقع محطة تشيرنوبيل النووية**

لم يغطى حدث في العالم إعلامياً وأكاديمياً مثلما جرى مع كارثة تشيرنوبيل. كُتبت عن الحادثة عشرات الكتب والمقالات، أُلفت حولها مقاطع الفيديو التعليمية والأعمال السنيمائية، كما تناولها مسلسل تليفزيوني شهير على مدار نحو خمس ساعات ونصف (330 دقيقة). كل هذا جعل الحقيقة عما حدث تختلط بالمبالغة والخيال.

سنركز هنا على شرح الجوانب الفيزيائية الضرورية لفهم أسباب الحادثة، خاصة التي قد يصعب على القارئ العادي فهمها من المسلسل التليفزيوني السابق ذكره.

- **محطة تشيرنوبيل النووية**

الاسم الرسمي للمحطة كان "محطة ڤلاديمير إليتش لينين للكهرباء النووية Vladimir Ilyich Lenin Nuclear Power Plant". تقع المحطة حوالي 130 كم شمال "كييف Kiev"، أوكرانيا، وحوالي 20 كم جنوب الحدود مع

روسيا البيضاء. تضم المحطة أربعة مفاعلات من طراز RBMK-1000. أنشأت الوحدتان 1 و2 بين 1970 و1977، بينما اكتملت الوحدتان 3 و4 في 1983.

على بعد نحو كيلومترين من المحطة النووية أقيمت مدينة "بريبيات Pripyat" من أجل العاملين في إنشاء وتشغيل تلك المحطة.

**لنتعرف الآن على المفاعل المستخدم في المحطة المنكوبة.**

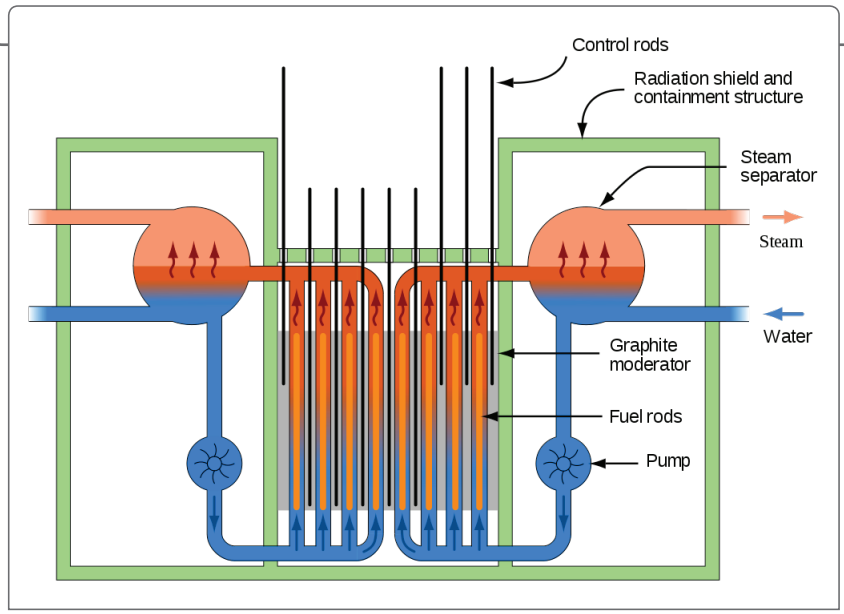
- **مفاعل RMBK**

"RBMK" هي الحروف الإنكليزية الأولى من اسم المفاعل باللغة الروسية، Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalny، ويعني "مفاعل القنوات عالي القدرة High-Power Channel Reactor". يستخدم هذا الطراز *الچرافيت graphite* كمهدئ والماء كمبرد. لذلك، يعرف أيضا باسم *مفاعل الماء الخفيف والچرافيت Light Water Graphite Reactor (LWGR)*. يعد هذا المفاعل فريد من نوعه، حيث لا توجد مفاعلات أخرى في العالم تستخدم هذا الثنائي (الچرافيت كمهدئ والماء كمبرد).[1]

الشكل 198 يوضح فكرة عمل هذا المفاعل. يُدفع الماء البارد نسبيا (باللون الأزرق) إلى قلب المفاعل. ترتفع حرارة الماء أثناء مروره في قلب المفاعل لتصل إلى 290°س. يغلي الماء الساخن (باللون الأحمر) فوق قمة المفاعل مولدا البخار. يُفصل البخار عن الماء في *أسطوانات أو فواصل البخار steam drums or separators*، ليُدفع إلى العنفات-المولدات، وتنتج الكهرباء. يكثف البخار بعد مروره على العنفات إلى ماء سائل ويُضخ ثانية إلى قلب المفاعل لتتكرر العملية.

(1) لدى الولايات المتحدة مفاعلات تستخدم الجرافيت كمهدئ والماء كمبرد ولكنها مفاعلات منخفضة القدرة ومخصصة لإنتاج بلوتونيوم الأسلحة فقط.

**الشكل 198 : فكرة عمل مفاعل RBMK**



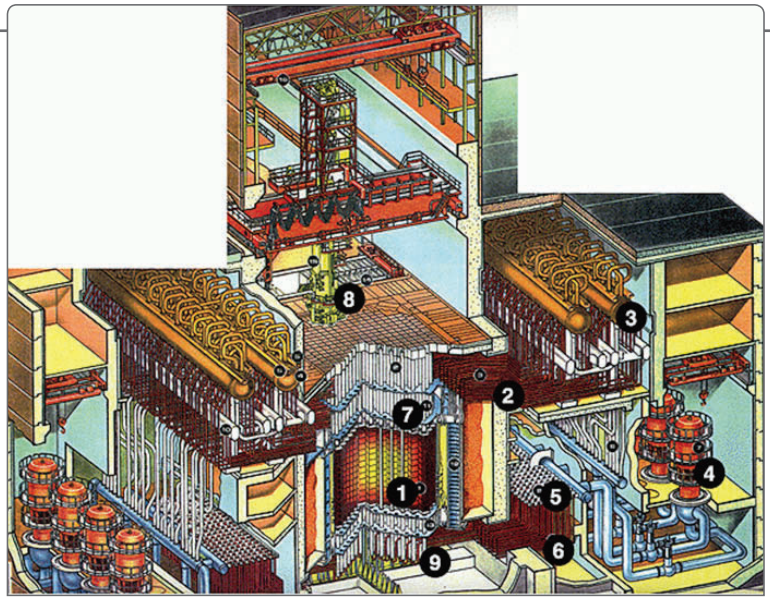

نلاحظ أن الماء ذاته يستخدم كمبرد وكسائل التشغيل working fluid (مصدر الذي يدير العنفة–مولد). لذلك، يصنف البعض مفاعل RBMK ضمن مفاعلات الماء المغلي.

تتكون الوحدة (وحدة توليد الكهرباء الذرية) من مفاعل كبير (في حجم منزل صغير)، أربعة فواصل للبخار، عنفتين–مولدين turbo–generators، وثمانية مضخات pumps (الشكل 199). يدور الماء في حلقتين، كما يتضح من الشكل 198. كل حلقة لها أسطوانتان بخار تغذيان عنفة واحدة.

فهم أسباب الكارثة يتطلب التعرف إلى بعض التفاصيل الخاصة بتركيب قلب المفاعل وطريقة "سواقة" هذا المفاعل.

**الشكل 199 :**

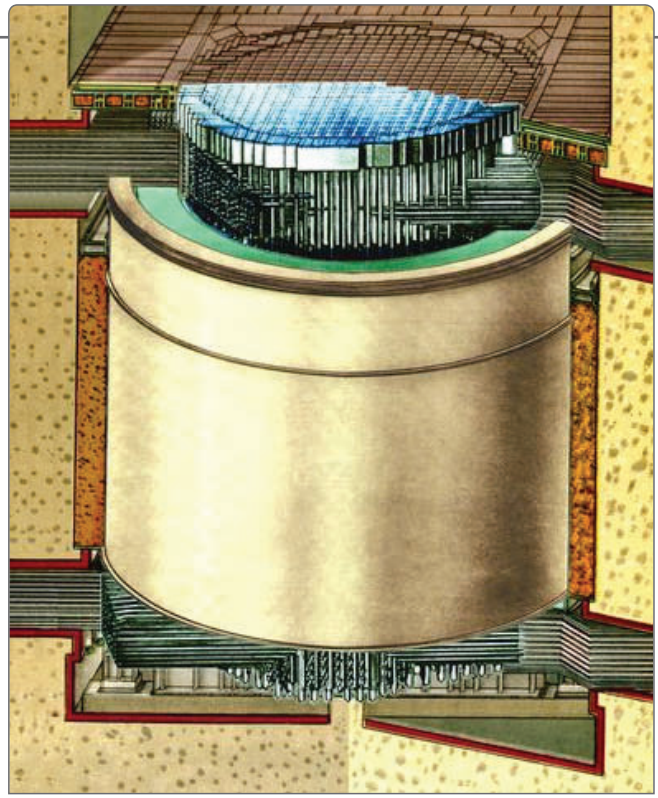
**مكونات وحدة توليد الكهرباء الذرية من طراز RMBK**



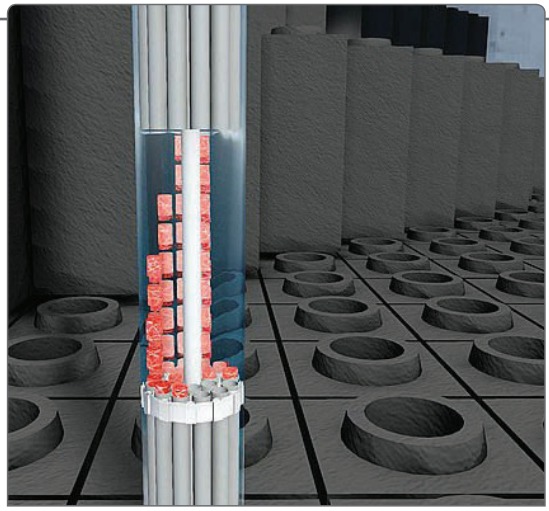

## • قلب المفاعل

يوجد قلب المفاعل داخل قبو من الخرسانة يحيط به صهريج أسطواني من الصلب (الشكل 200). يضم هذا الصهريج كتل ثقيلة من الچرافيت مثقوبة في المنتصف. الكتل متراصة داخل الصهريج بحيث تشكل الثقوب فيها أبار أو قنوات رأسية. تحوي أغلب هذه الآبار (1661 بئر) الوقود النووي (الشكل 201). الآبار الأخرى المتبقية تحوي أجهزة القياس أو تولج فيها قضبان التحكم (211 قضيباً).

الشكل 200 : قلب المفاعل RBMK

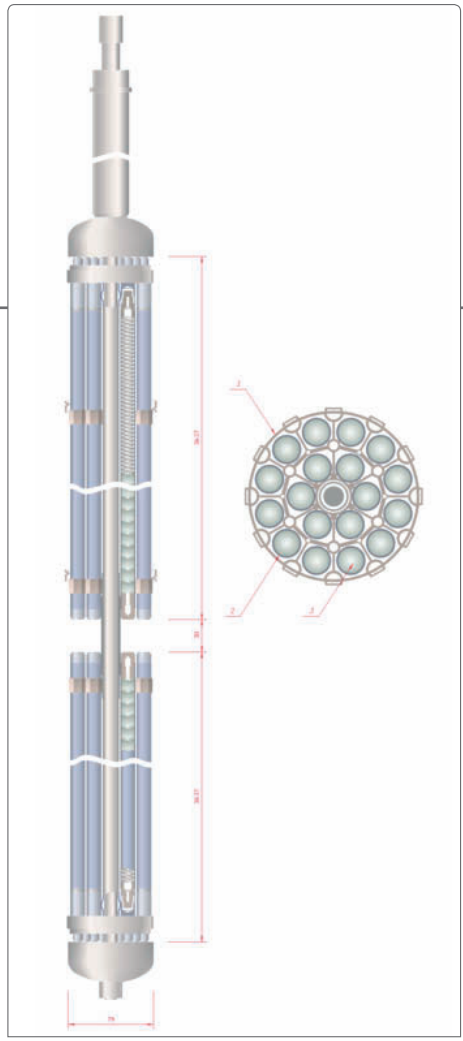


الشكل 201 : كتل الچرافيت والوقود النووي



## • الـوقـــود

الوقود النووي عبارة عن خرزات من أكسيد اليورانيوم المخصب قليلا (2 %)، تُحشى بها قضبان الوقود، وهي أنابيب مصنوعة من سبيكة زركونيوم. يحزم 18 قضيب وقود معاً فيما يعرف باسم *تحت-مجمع الوقود fuel sub-assembly*. يوضع تحت-مجمعان فوق بعضهما معاً فيما يعرف باسم *أنبوب الضغط pressure tube* (الشكل 202).



**الشكل 202:**
**حامل قضبان الوقود**

## • قضبـــان التحكـــم

يوجد بالمفاعل أنواع متنوعة من قضبان التحكم: آلية، يدوية، وثابتة. يجرى إدخال أغلب قضبان التحكم من الأعلى؛ 24 قضيب تحكم قصير يجرى إدخالها من الأسفل. يجرى إدخال قضبان التحكم الآلية أو إخراجها من غرفة التحكم (الشكل 203).

**الشكل 203: غرفة التحكم في الوحدة 3 (وليس 4)**

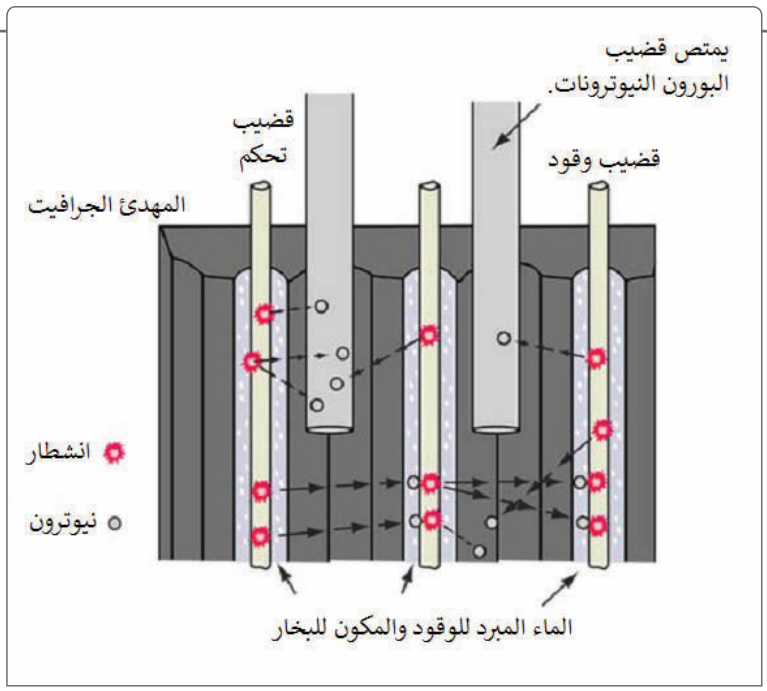
باستثناء 12 قضيب آلي، يتكون قضيب التحكم من جزئين: الأساسي مصنوع من كاربيد البورون boron carbide، الطرف من الچرافيت، ويسمى بـ *الزائح الچرافيت graphite displacer*. يفصل بين الجزئين أنبوب متداخل (telescopic).

سنعرف لاحقا أن طرف الچرافيت هذا لعب في الكارثة دور "القشة التي قصمت ظهر البعير". لذلك، من المهم أن نعرف هنا فكرة عمل هذا النوع من قضبان التحكم.

البورون من العناصر التي تمتص النيوترونات بشراهة. لذلك، كلما امتد ولوج قضيب البورون في قلب المفاعل كلما امتص القضيب أعدادا أكبر من النيوترونات

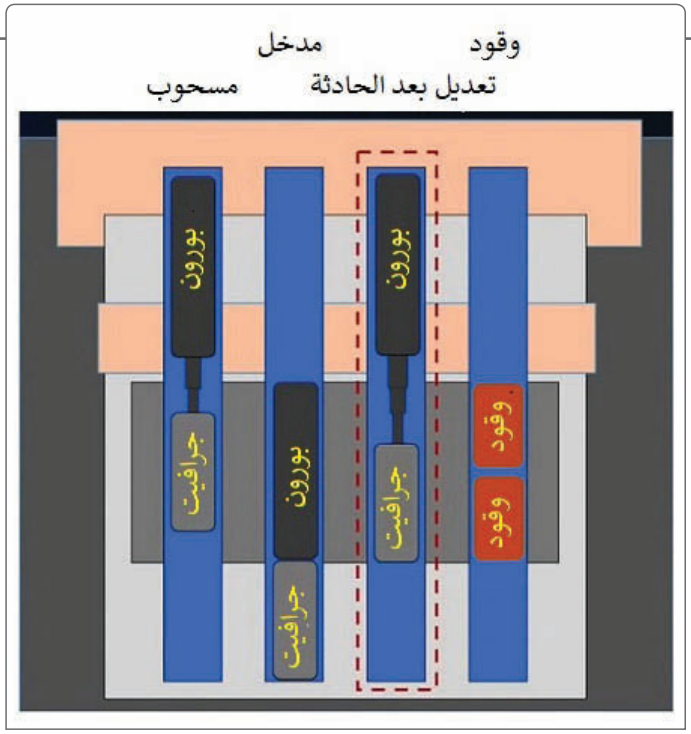
"الهائمة" في قلب المفاعل (الشكل 204)، بطأ معدل الانشطار النووي في الوقود النووي، وانخفض معدل توليد الكهرباء من المفاعل. يحدث العكس عند إخراج هذا القضيب من قلب المفاعل. ما فائدة طرف الچرافيت إذ؟

**الشكل 204: فكرة عمل قضبان التحكم**




معروف أن جزيئات الماء العادي (الماء الخفيف) تمتص بعض النيوترونات وتهدئ البعض الآخر. أما الچرافيت، فهو مهدئ قوي للنيوترونات ولا يمتصها إلا نادرا. لو كان قضيب التحكم مصنوع من البورون فقط، فإن إخراجه من قلب المفاعل، بغرض زيادة التفاعلية و"القدرة power"، يجعل الماء يحل محله في قناة الچرافيت، وهذا كان لينقص التفاعلية (عكس المطلوب). ابتكر مصممو المفاعل فكرة الطرف الچرافيت لزيادة فاعلية التحكم: عند إخراج الجزء المصنوع من البورون من القلب، يحل محله الجزء الجرافيت، والذي يعمل على تهدئة المزيد من النيوترونات ومن ثم زيادة التفاعلية (الشكل 205).

**الشكل 205 : قضبان التحكم في مفاعل RBMK**

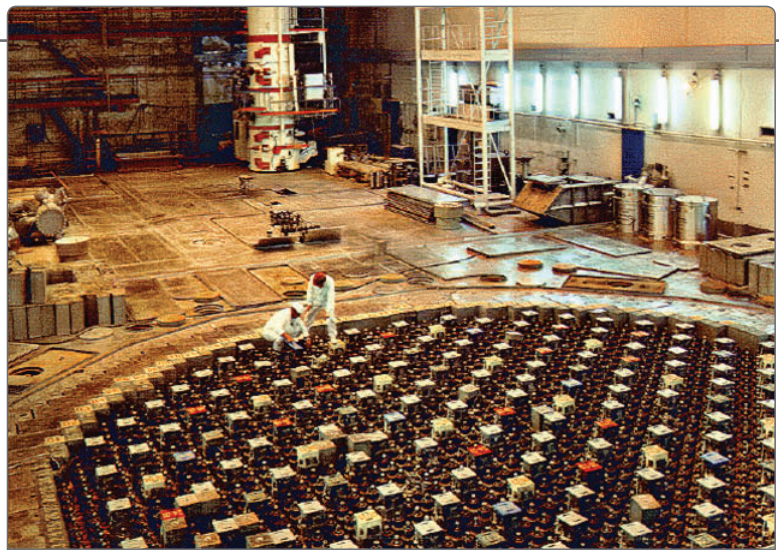



سيتضح لاحقا أن هذا الطرف كان أحد المتواطئين، أو على الأقل المتهمين، في كارثة تشيرنوبيل المروعة.

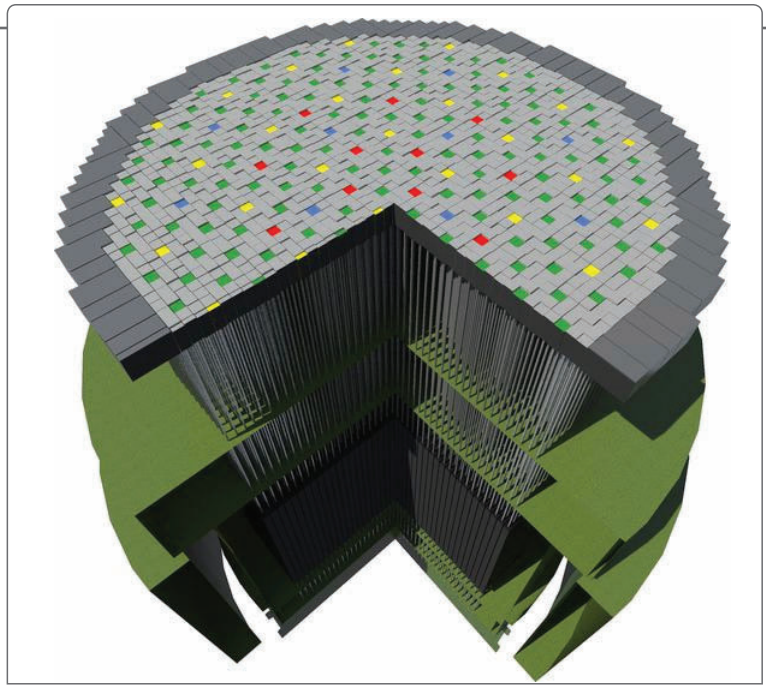
تُعد أنابيب الضغط في مفاعل RMBK بمثابة وحدات مستقلة، ويمكن فصل بعضها واستبدالها بأخرى (إعادة التزويد بالوقود) بينما يعمل المفاعل. يُجرى ذلك من غرفة فوق قلب المفاعل، تعرف باسم *صالة المفاعل reactor hall* (الشكل 206). تعلم مواضع القنوات المختلفة الموجودة في قلب المفاعل أسفل الصالة بأغطية ذات ألوان محددة، يزن كل منها نحو 350 كچ (الشكل 207). تبدو هذه الأغطية عندما تكون في أماكنها، وكأنها جزء من أرضية صالة المفاعل (الشكل 208).

الشكل 198 هو رسم مبسط جدا؛ أما المفاعل الحقيقي، فيحتوي على عدة مئات الأنابيب (الشكل 209).

الشكل 206 : صالة المفاعل RBMK

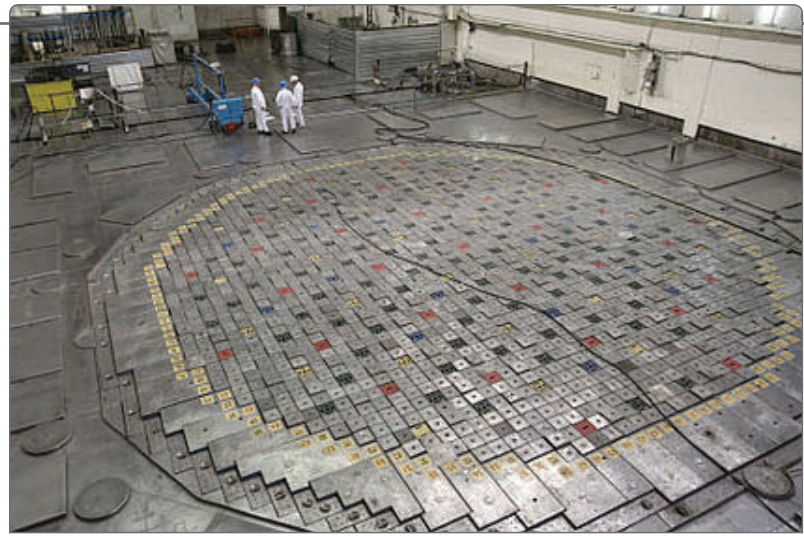


الشكل 207 : قطاع في قلب المفاعل RMBK

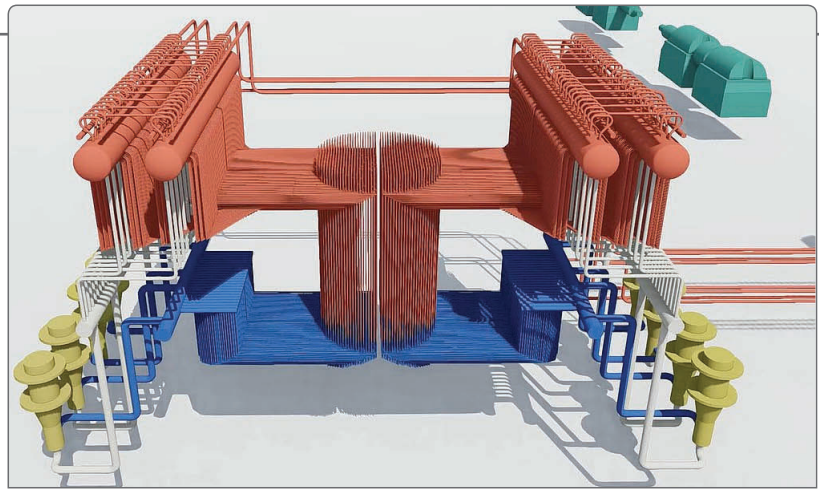


الشكل 208 :

أغطية قنوات الوقود في صالة المفاعل RBMK



الشكل 209 : رسم الأنابيب في مفاعل RMBK



## • الـ 24 ساعة الأخيرة قبل الكارثة

من المفارقات الصارخة أن كارثة تشرنوبل حدثت أثناء إجراء اختبار يتعلق بسلامة المحطة.

لنتذكر أن الوقود النووي يظل ساخنا ومشعا حتى بعد إيقاف المفاعل (إيقاف تفاعلات الانشطار في الوقود). تستمر مفاعلات RBMK، مثل تلك المستخدمة في محطة تشرنوبل، في إخراج نحو 7 % من قدرتها الحرارية بعد إغلاقها احتياطياً[1] لذلك، يجب الاستمرار في تبريدها حتى بعد الإغلاق.

تزود محطات الكهرباء النووية بمولدات احتياطية تعمل بالديزل لإمداد مضخات المياه بالكهرباء التي تحتاجها في حالة انقطاع الكهرباء الخارجية (الآتية من الشبكة العمومية). الوحدة التي وقعت بها الكارثة، الوحدة 4، كانت لديها ثلاثة مولدات ديزل احتياطية. تبدأ تلك المولدات في العمل بعد 15 ثانية، ولكنها تستغرق 60 - 75 ثانية كي تصل إلى سرعتها الكاملة وإنتاج الـ 5.5 **مرو** المطلوبة لتشغيل المضخات. شَكّل بقاء المضخات دون كهرباء خلال هذه الدقيقة مخاطرة غير مقبولة على أمان المحطة. لحل هذه المشكلة، أُقترح استخدام الطاقة الدورانية المتبقية في إحدى العنفتين بعد غلق المفاعل لتوفير الكهرباء المطلوبة.[2] أوضحت الحسابات أن *الزخم momentum* وضغط البخار المتبقيين قد يكونا كافيين لإدارة المضخات خلال فترة الـ 45 ثانية المنقضية بين انقطاع الكهرباء ووصول مولدات الديزل الاحتياطية إلى قدرتها الكاملة. كان المطلوب هو التأكد من نجاح هذا الإجراء

(1) يطلق على غلق المفاعل فجأة في حالة الطوارئ لفظ "scram"، ويمكن ترجمته إلى "الرزع"، كما تستخدم هذه الكلمة في اللغة الدارجة، أو "الطرح"، في الفصحى. يُجرى الرزع أو الطرح عن طريق إدخال جميع قضبان التحكم في قلب المفاعل.

(2) بعد فصل العنفة عن المفاعل، تظل العنفة في الدوران لبعض الوقت بفعل ضغط البخار المتبقي والقصور الذاتي inertia.

عمليا. تقرر إجراء هذا الاختبار على الوحدة 4 في نهاية شهر أبريل 1986، قبيل إغلاقها لأعمال الصيانة الدورية.[1]

قد يلاحظ القارئ أننا نهتم هنا ببعض التفاصيل التي تبدو غير ذي أهمية، لكن أهميتها ستضح لاحقا عندما نبدأ في تحليل أسباب الحادثة واستخلاص الدروس والعبر. ألفت انتباه القراء، بالمناسبة، إلى وجود بعض الاختلاف، كما هو متوقع ومعتاد، بين الروايات المختلفة.

كانت الجمعة، 25 أبريل 1986، هي اليوم المحدد لإجراء هذا الاختبار. كان لدى مدير المحطة، "ڤيكتور بريوخانوف Viktor Bryukhanov" (الشكل 210)، اجتماع في كييف مع قادة الحزب في اليوم السابق. لذلك، كلف بريوخانوف نائب كبير المهندسين، "أناتولي دياتلوف Anatoli Dyatlov"، بالإشراف على المفاعل 4 أثناء الاختبار.

**الشكل 210:**

**مدير المحطة، ڤيكتور بريوخانوف، في غرفة التحكم**

(1) دخلت هذه الوحدة إلى الخدمة في 27 مارس 1984.

**كان الاختبار في الحقيقة بسيطا:**

1. جعل المفاعل يعمل بقدرة منخفضة، بين 700 **مروح** و800 موح.
2. جعل العنفة – المولد يدوران بسرعة كاملة.
3. عند تحقق تلك الشروط، توقف تغذية البخار إلى العنفة.
4. يُسجل أداء المولد البخاري للتأكد ما إذا كان دورانه "الحر" يستطيع توفير الكهرباء المطلوبة لمضخات التبريد حتى تعمل مولدات الديزل الاحتياطية بكامل قوتها.
5. بعدما تصل مولدات الديزل الاحتياطية إلى كامل قدرتها، يسمح للعنفة-المولد بالتوقف.

لنتتبع الآن زمنيا، بتوقيت أوروبا الشرقية Eastern Europe Standard Time (EEST)، ما جرى خلال يومي 25 و26 قبل وقوع الكارثة.

- **25 أبـريـــل**

**01:06**

بدأ مشغلو المفاعل 4 في تخفيض قدرته تدريجيا كما هو مقرر من أجل الاختبار.

**13:47**

وصلت قدرة المفاعل إلى 50 % (1600 موح) بعد 12 ساعة من بدء التخفيض. غُلقت إحدى العنفتين.

**14:00**

جرى عزل منظومة تبريد القلب عند الطوارئ Emergency Core

Cooling System (ECCS). كان هذا جزءا من إجراءات الاختبار لمنعها من إعاقة الاختبار فيما بعد.

طلب المسؤول عن شبكة الكهرباء في كييف من مشغلو المفاعل الاستمرار في توليد الكهرباء من المحطة.[1] أدى هذا إلى تأجيل التجربة، وظل المفاعل يعمل بقدرة 50 % لقرابة تسع ساعات قادمة.

**23:10**

يُستأنف خفض القدرة كي تصل إلى 720 موح حسبما تنص إجراءات الاختبار.[2]

**24:00**

تغيرت مناوبة العمل.

26 أبريل

**00:05**

انخفض مستوى القدرة إلى 720 موح، واستمر في الانخفاض.

**00:28**

جرى تشغيل التحكم الآلي بعد وصول مستوى القدرة إلى 500 موح. تبع هذا انخفاض حاد في مستوى القدرة إلى 30 موح فقط.

(1) تتباين الروايات حول سبب هذا الطلب. هو وفقا لإحدى الروايات تعطل إحدى محطات الكهرباء الأخرى.

(2) في بعض الروايات، أُستؤنف خفض القدرة بعد استلام المناوبة الليلية العمل (أي بعد الساعة 24:00).

**01:20 - 01:00**

ينجح مشغلو المفاعل في تثبيت القدرة عند 200 موح عن طريق رفع أغلب قضبان التحكم في مخالفة صارخة لقواعد تشغيل المفاعل.[1]

**01:22**

يقرر دياتلوف الاستمرار في إجراء الاختبار.

**01:23:04**

يبدأ الاختبار مع قطع التغذية بالبخار عن العنفة الدائرة.

**01:23:40**

تبدأ القدرة في المفاعل في الارتفاع فجأة. يقوم المشغل بالضغط على زر "AZ-5"، الذي يسبب "رزع أو طرح المفاعل reactor scramming".[2]

**01:23:43**

تظهر إشارة حدوث زيادة سريعة في القدرة. تتعدى القدرة 530 موح وتستمر في الارتفاع.

**01:24:00 - 01:23:44**

سُجلت الملحوظة الأخيرة في دفتر تشغيل المفاعل: "صدمات عنيفة، توقفت قضبان التحكم عن التحرك قبل أن تصل إلى الحد الأدنى..." ترتفع القدرة إلى 100 مرة ضعف القدرة الاعتيادية، يحدث انفجار مروع يقذف بغطاء المفاعل الذي

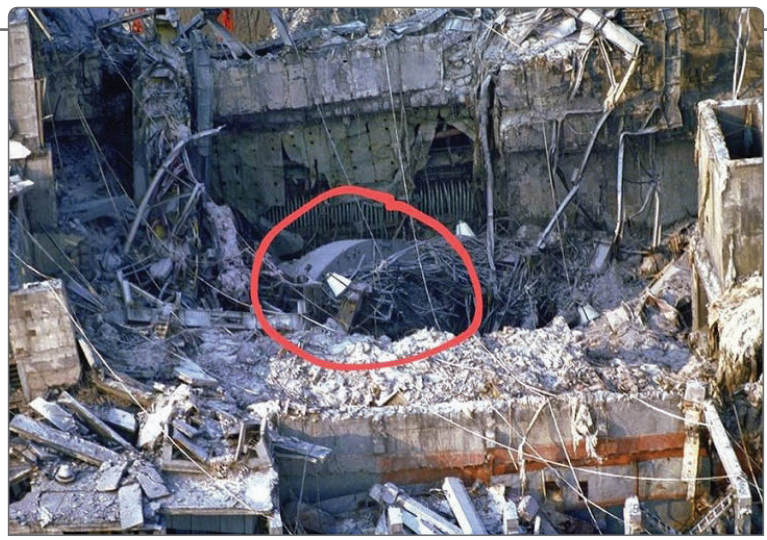
(1) تنص قواعد التشغيل على ضرورة الإبقاء على حد أدني من قضبان الوقود داخل المفاعل في جميع الأوقات. من المؤكد أن مشغلو المفاعل تجاوزوا هذا الحد.

(2) هناك روايتان حول توقيت بداية العلو المفاجئ في القدرة: واحدة أنه كان قبل ضغط زر الرزع، الثانية أنه كان بعده.

يزن 1000 طن بما يحمله من معدات عاليا، يتحطم سقف المبني الذي يحوي المفاعل، ويسقط غطاء المفاعل فوق ما تبقى من قلب المفاعل (الشكل 211).

**الشكل 211:**

**غطاء المفاعل وسط أنقاض المفاعل المدمر**



**يصف "مدڤيدف Medvedev" من أقوال شهود العين الانفجار كالتالي:**

تطايرت ألسنة اللهب، الشرر، وقطع المواد المحترقة في الهواء فوق الوحدة 4. كانت هذه أجزاء ملتهبة من الوقود النووي والجرافيت، سقطت بعضها فوق سقف صالة العنفات وأشعلت فيه النار. تبخر 50 طناً من الوقود النووي وأُطلق في الغلاف الجوي بفعل الانفجار...علاوة على ذلك، قُذف قرابة 70 طناً جنباً من محيط القلب، لتمتزج مع كومة من حطام المبنى، على السطح... وأيضاً على أرضيات المحطة.

## • تحليل أسباب حدوث الكارثة

يقوم الخبراء بتحليل كل حادثة نووية لمعرفة أسبابها، واستخدام هذه المعرفة لمنع مثل هذه الحوادث في المستقبل، وقد استحوذت كارثة تشيرنوبيل على اهتمام الخبراء حول العالم. خلص هؤلاء الخبراء إلى أن الأسباب **المباشرة** للكارثة كانت خليطا من الأخطاء البشرية وعيوب التصميم. لفهم تلك الأسباب، نحتاج لمراجعة بعض المفاهيم النووية وخصائص مفاعلات RBMK.

كما نعرف، تنتج المحطات النووية الكهرباء من الحرارة المنطلقة أثناء تفاعلات الانشطار في الموقود النووي، أساسا في اليورانيوم-235. يصاحب انشطار نواة اليورانيوم-235 انطلاق نيوترونين أو ثلاثة (بمتوسط 2.4 ن). إذا استطعنا تهيئة الظروف في المفاعل بحيث يستطيع **واحد فقط** من هذه النيوترونات شطر نواة يورانيوم-235 أخرى، فإن التفاعل يستمر بمعدل ثابت، وكذلك قدرة المفاعل. يوصف هذا الوضع بـ*الحاسم critical* (الشكل 212). يستمر التفاعل أيضا، ولكن بمعدل متزايد، إذا استطاع النيوترونان أو الثلاثة الناتجة من كل انشطار المشاركة في التفاعل المسلسل. ينعت هذا الوضع بـ*فوق-الحاسم supercritical* (الشكل 213). أما إذا تناقصت أعداد النيوترونات "الشاطرة" تلك، جيل بعد جيل، فإن التفاعل النووي يخبو ويموت في النهاية (ما يعرف بالوضع *تحت-الحاسم subcritical*).

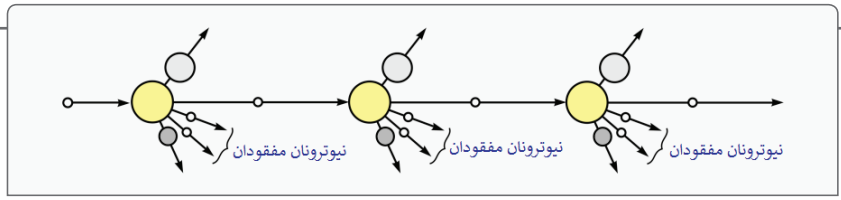
يستخدم العلماء النوويون ما يعرف باسم عامل المضاعفة multiplication factor، ورمزه K، للتعبير عن أوضاع الحسومة بطريقة كمية. يُعَرَّف عامل المضاعفة بأنه النسبة بين عدد النيوترونات في أحد الأجيال إلى عددها في الجيل السابق. وعليه، يكون الآتي:

$K < 1$: تحت الحاسم (القدرة تتناقص)

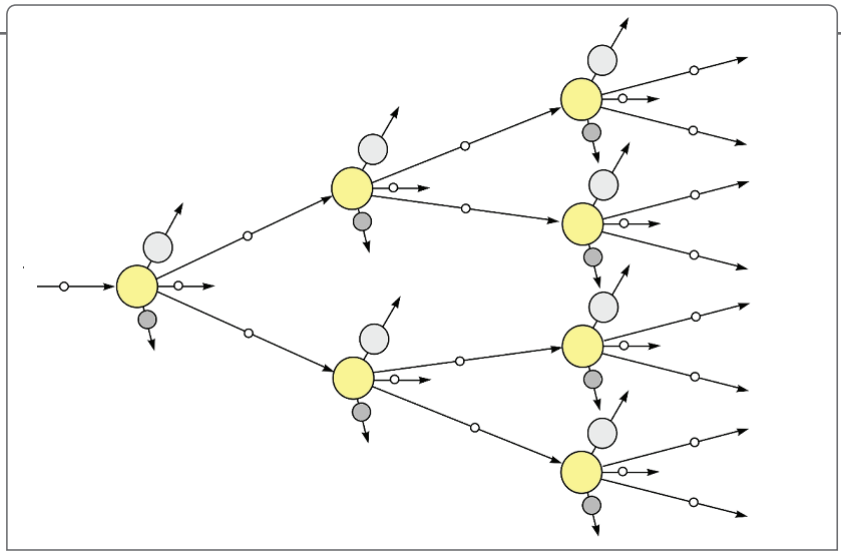
$K = 1$: الحاسم (القدرة ثابتة)

$K > 1$: فوق-الحاسم (القدرة تتزايد)

**الشكل 212: الوضـــع الحاســـم**




**الشكل 213: الوضع فـوق-حاســم**



يستخدم هؤلاء العلماء مفهوم آخر مرتبط بعامل المضاعفة، وهو *التفاعلية reactivity*، ورمزها الحرف الإغريقي ρ (يلفظ رو)، لقياس الانحراف عن الوضع الحاسم:

$$\rho = (K-1)/K$$

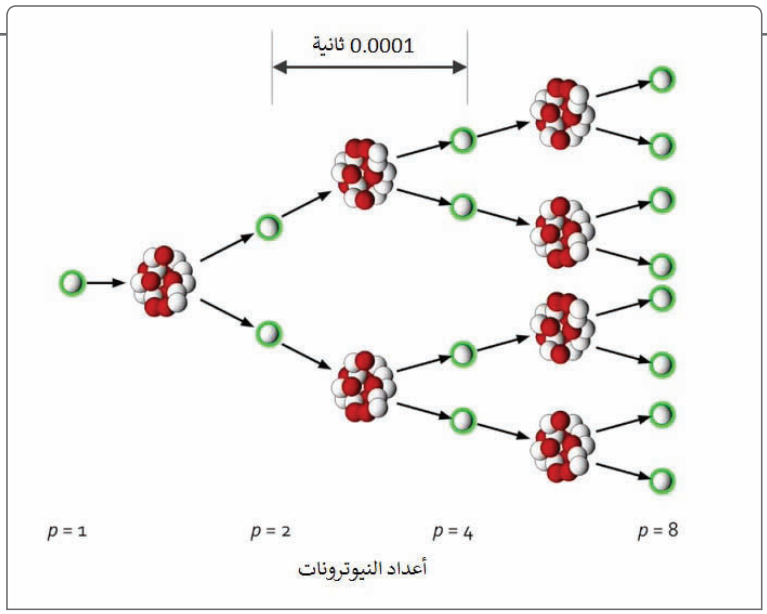
$\rho = 0$ : لا انحراف عن الوضع الحاسم

$\rho > 0$ : Negative reactivity تفاعلية سالبة

$\rho < 0$ : Positive reactivity تفاعلية موجبة

يجدر بالذكر أن الفترة الزمنية بين جيل وآخر في التفاعل المسلسل هي جد ضئيلة، نحو 0.0001 ثانية (الشكل 214).

**الشكل 214: سرعة التفاعل المسلسل**




التحكم في أعداد النيوترونات القادرة على المشاركة في تفاعلات الانشطار النووي هو الفكرة المركزية في قواعد تصميم و"سواقة" المفاعلات النووية. هناك بعض الأشياء التي تزيد من أعداد هذه النيوترونات وأخرى تخفض منها. للتبسيط، سنكتفي هنا بالقول إن كل ما **يمتص** النيوترونات هو يخفض من معدل التفاعل النووي وقدرة المفاعل (المكابح breakers)، وأن كل ما **يهدئ** النيوترونات هو يزيد من هذا التفاعل وتلك القدرة (المسرعات accelerators).[1] في مفاعلات RMBK، يعمل البورون (في قضبان التحكم) ولحد ما ماء التبريد (السائل) على امتصاص النيوترونات، بينما يعمل الجرافيت (المكون للب المفاعل ولأطراف قضبان الوقود) على تهدئتها.

(1) في الحقيقة، الأشياء التي تهدئ النيوترونات هي أيضا تمتصها ولكن بدرجة مختلفة. المحصلة النهائية قد تكون الامتصاص أو التهدئة.

- **التصميم المنيع والتصميم المعيب**

اشتهرت صورة "قدر القهوة للمازوشيين coffeepot for masochists" بعدما استخدمها "دونالد نورمان Donald Norman" غلافاً لكتابه الشهير عن سيكولوجية التصميم (الشكل 215). بالطبع، تُصنع هذه القدر على سبيل الدعابة ولغرض التزيين. لكننا جميعا سبق أن عانينا من قدور الشاي التي تسكب بعض ما تحويه خارج أكواب الشراب. بالمثل، قد يصمم المهندسون مفاعلات نووية تساهم في وقوع الحوادث أو تمنعها.

أحد عيوب التصميم في مفاعل RBMK هو ما يعرف باسم *معامل الفراغات الموجب positive void coefficient*. ما المقصود من ذلك، ولماذا يُعد عيباً تصميمياً؟

**الشكل 215: قـدر القهـوة للمازوشيين**

إن أخطر ما قد يحدث في محطة الكهرباء النووية هو أن ينفجر قلب المفاعل النووي. يحدث ذلك عند تبخر مياه التبريد داخل قلب المفاعل الملتهب.

عرفنا أن الماء في مفاعل RMBK يعمل كماص للنيوترونات. عندما يغلي الماء الموجود في قلب المفاعل تتكون فقاعات البخار، الفراغات voids، في داخله

(الشكل 216). هذه الفراغات لا تمتص النيوترونات بنفس كفاءة الماء السائل.[1] زيادة فيض النيوترونات في قلب المفاعل يعني زيادة تفاعلات الانشطار، التي تزيد من غليان الماء. هكذا تتشكل دائرة مغلقة من الزيادة المستمرة في حرارة الوقود النووي لا تتوقف حتى ينفجر المفاعل. هذا هو المقصود بمعامل الفراغات الموجب.

**الشكل 216: تكون "الفراغات" في الماء اثناء غليانه**

من الجيد أن مفاعلات الماء المضغوط (الأحدث) لديها معامل فراغات سالب. يعمل الماء في هذه المفاعلات كمبرد للوقود النووي ومهدئ للنيوترونات (أي منشط للتفاعلية) في آن معا.[2] عندما ترتفع حرارة ماء التبريد كثيرا (لخطأ ما)، تزداد فقاعات البخار، التي تقل عن الماء السائل في قدرتها على تهدئة النيوترونات، ومن ثم تنخفض التفاعلية في قلب المفاعل (النيوترونات السريعة لا تحدث الانشطارات

(1) الماء السائل أكثر فاعلية في تهدئة النيوترونات من البخار والفراغات، لكن تهدئة النيوترونات تحدث في مفاعلات RMBK أساسا بواسطة الجرافيت. لذلك، تكون المحصلة النهائية لغليان الماء في هذا النوع من المفاعلات هي زيادة التفاعلية.

(2) في مفاعلات الماء المضغوط، يمتص الماء بعض النيوترونات أيضا. لكن التأثير الأهم في هذه المفاعلات هو التهدئة، حيث لا يوجد بها مهدئ آخر، ويعوض عن نسبة النيوترونات المتصة استخدام اليورانيوم الأعلى تخصيبا كوقود نووي.

في اليورانيوم-235). أي أن مفاعلات الماء المضغوط تقاوم بطبيعتها، أو بالأحرى "تصميمها"، الارتفاع الحاد في "القدرة power".

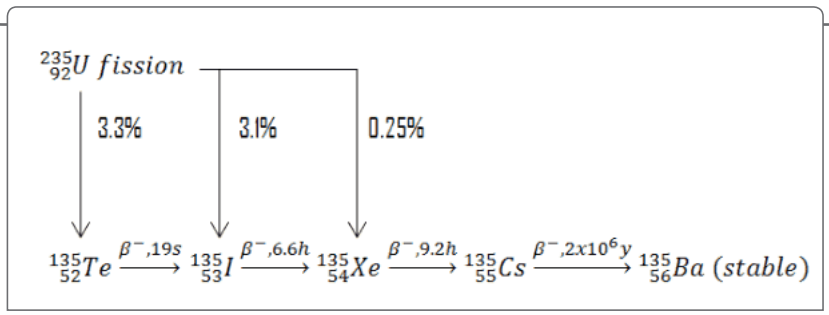
من السهل أن ننتقد الآن عيوب التصميم في مفاعل RMBK. لكن لنتذكر أن مفاعلات الماء المضغوط (الشائعة حاليا) تحتاج إلى يورانيوم أعلى تخصيبا، وأكثر تكلفة، وأن الاتحاد السوفيتي لم يكن لديه في ذلك الوقت الإمكانيات الصناعية والمالية اللازمة لتخصيب اليورانيوم بالكميات التي تحتاجها المحطات النووية.[1]

- **تسمم المفاعلات**

نعلم أن الانشطار المستحدث في نوى اليورانيوم ينتج عنه، بالإضافة إلى الحرارة والنيوترونات المنطلقة، عناصر جديدة أخف من اليورانيوم، أطلقنا عليها اسم كسف أو شظايا الانشطار. هذه العناصر هي أيضاً مشعة أو غير مستقرة، وتنحل بدورها إلى عناصر أخف وأكثر استقراراً.

الزينون-135 xenon-135 هو أحد نواتج الانشطار (الشكل 217). لهذا الزينون أهمية قصوى في تشغيل المفاعلات النووية، لأنه "يلتهم" (يمتص) بشراهة النيوترونات، وقد "يسمم" (يعطل) المفاعل النووي إذا ما تراكم بكثرة داخله.

**الشكل 217: الزينون هو أحد نواتج الانشطار**




(1) المفاعلات الروسية الحديثة هي من طراز الماء المضغوط ذات معامل الفراغات السالب.

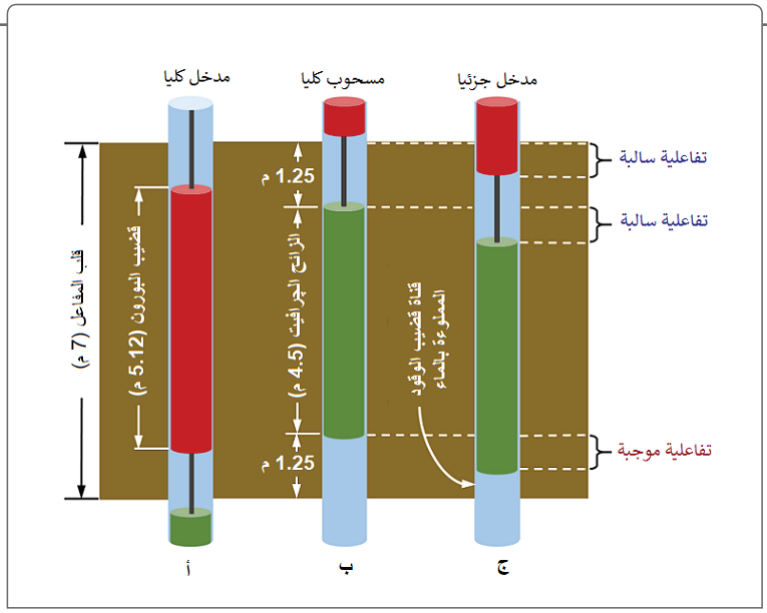
## • تأثيـــر النهـايـــة

الزائح الچرافيت مصمم بحيث يكون أقصر من عمق قلب المفاعل، وعند إخراج قضيب التحكم تماما من قلب المفاعل، يكون هناك عامود من الماء طوله 1.25 م أسفل الزائح الچرافيت وفوقه (الشكل 218ب).

عند إدخال قضيب التحكم إلى قلب المفاعل يحل الطرف الچرافيت (الذي يهدئ النيوترونات) محل الماء أسفله (الذي يمتص النيوترونات)، وهذا يخلق تفاعلية موجبة مؤقتاً في الجزء السفلي من قناة القضيب (الشكل 218ج). يعرف هذا التأثير اختصاراً بـ "تأثير النهاية/الطرف end/tip effect".

**الشكل 218:**

**التفاعليات المتكونة أثناء إدخال قضيب التحكم في قلب المفاعل**



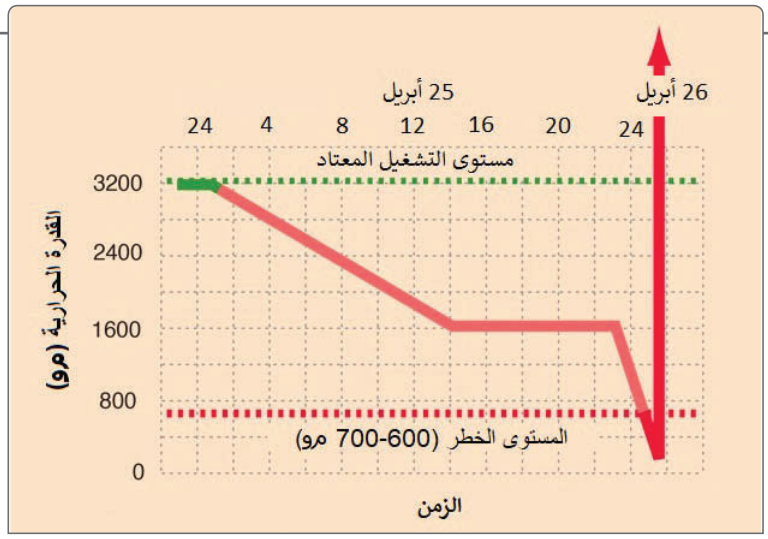
ترتب على تأخير إجراء الاختبار لمدة عشر ساعات سلسلة من العواقب السيئة. أولاً، تعب فريق المهندسين. ثانياً، استبدلت، أثناء الاختبار، مناوبة الليل، التي كانت أدنى، بمناوبة المساء. احتوت هذه المناوبة على عدد أقل من المشغلين ذي الخبرة، والذين لم يجرى إعدادهم للاختبار.

"أتشيير رازاتشكوف Achier Razachkov"، "يوري تريجوب Yuri Tregub"، و"أ يوسكوف A Uskov" كانوا المشغلين المنوط بهم إجراء الاختبار خلال المساء، وقد أعلنوا خلال مقابلة بعد الكارثة أن إجراءات الاختبار شُرحت لمناوبتي النهار والمساء فقط.[1]

حدث انفجار المفاعل بعد ثوان قليلة من ضغط زر "AZ-5"، المفترض أنه يوقف التفاعل النووي تماما. لتفسير هذه النتيجة الغريبة، قام الخبراء بمراجعة التغيرات في قدرة المفاعل خلال يوم كامل قبل الكارثة (الشكل 219).

**الشكل 219:**

**التغيرات في قدرة المفاعل خلال يوم قبل الانفجار**

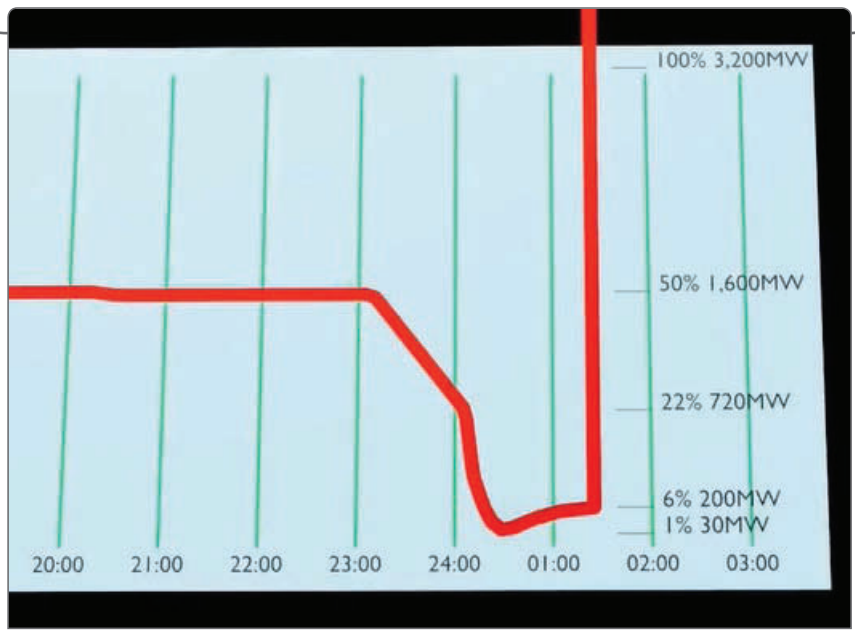



(1) بقي تريجوب في المحطة لمساعدة مناوبة الليل.

نلاحظ وقوع شيئين غريبين: (1) انخفاض قدرة المفاعل بحدة إلى 30 **مروح** فقط، بعد استلام مناوبة الليل تشغيل المفاعل؛ (2) ارتفاع قدرة المفاعل بشكل هائل ومفاجئ بعد ضغط زر الرزع (الزر AZ-5)، المفترض أنه يوقف التفاعل تماماً خلال ثوان معدودات (الشكل 220).

**الشكل 220:**

**التغيرات في قدرة المفاعل قبيل ساعات من الانفجار**

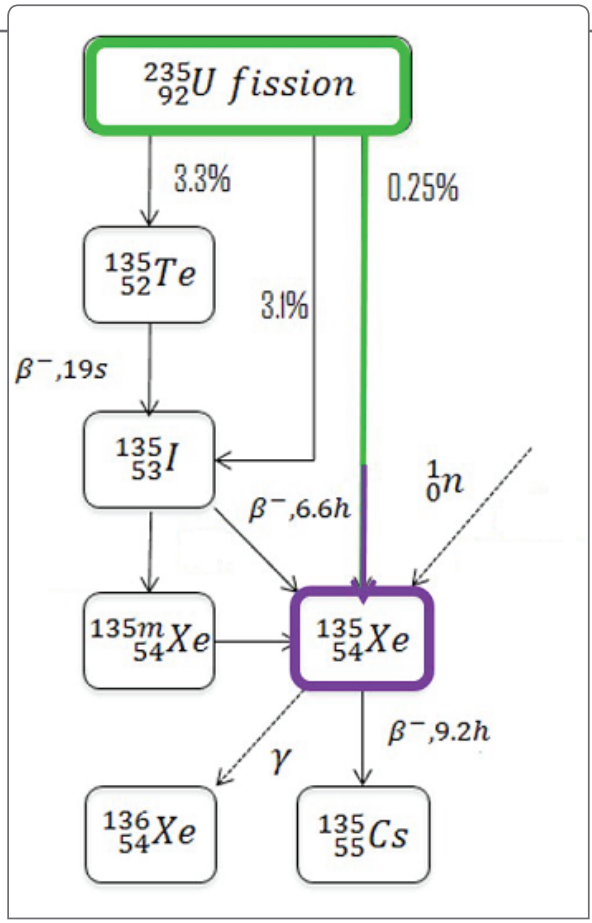



يُنتج 95% من الزينون في داخل المفاعل من انحلال اليود-135 بعمر نصفي مقداره 6.6 س، ويتلاشى بطريقتين: الأولى أن ينحل نووياً/إشعاعياً إلى السيزيوم-135 بعمر نصفي مقداره 9.2 ساعة، والثانية، وتعرف اختصاراً بـ "الاحتراق burnout"، أن يمتص أحد نيوترونات الانشطار ويتحول **فوراً** إلى الزينون-136، غير السام للمفاعل النووي (الشكل 221). أي أن الزينون-135 ينتج بمعدل يتوقف على قدرة المفاعل قبل عدة ساعات، ويتلاشى بمعدل يتناسب

مع قدرة المفاعل الآنية.[1] لذلك، يعتقد المحللون أن تشغيل المفاعل 4 بنصف قدرته لنحو 19 ساعة، وخفض قدرته سريعاً بعد ذلك، قد أديا في النهاية إلى تسممه بالزينون-135، وهو ما سبب الانخفاض السريع في القدرة إلى 30 مروح.

**الشكل 221:**

**تكون وإزالة الزينون داخل المفاعل النووي**




(1) زيادة القدرة تعني زيادة النيوترونات المنطلقة، والتي "تحرق" الزينون- 135.

## • الطريــق إلى الكارثــة

تنص قواعد تشغيل المفاعلات النووية على غلق المفاعلات المسمومة والانتظار لفترة كافية لتلاشي الزينون-135، قرابة 24 ساعة، قبل إعادة تشغيلها تدريجياً. في مخالفة لهذه القاعدة، أمر دياتلوف باستكمال إجراءات الاختبار.

منذ هذه اللحظة، كان المشغلون يتعاملون مع مفاعل هو خارج السيطرة، ويرتكبون المزيد من الأخطاء القاتلة.[1] خلال محاولاتهم المستميتة (بالمعنى المجازي والحرفي للكلمة) لرفع قدرة المفاعل إلى مستوى 720 موح، المفترض أن يبدأ الاختبار عنده، قام المشغلون بسحب جل قضبان التحكم من قلب المفاعل، في مخالفة صريحة أخرى لقواعد التشغيل. لم يتبقى من قضبان التحكم في قلب المفاعل سوى ما يعادل ثمانية قضبان فقط، من أصل 211 قضيب (الشكل 222).

ينجح مشغلو المفاعل في تثبيت القدرة عند 200 موح. مع هذه القدرة المنخفضة، لم يكن لينجح الاختبار لعدم وجود بخار كاف لإدارة العنفات. يصر دياتلوف، مع ذلك، على الاستمرار في الاختبار.

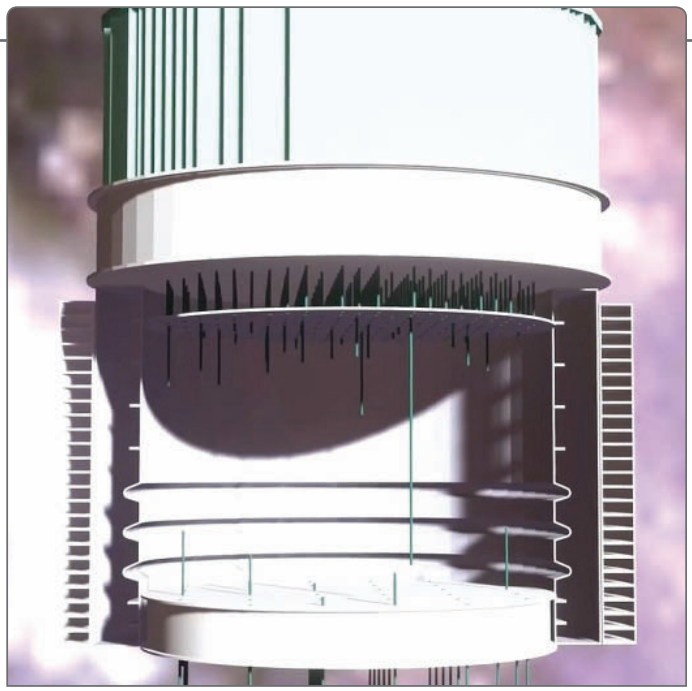
مع بدء الاختبار، يضعف تدفق الماء إلى قلب المفاعل. يتلاشى الزينون الذي كان يسمم المفاعل. لم يعد حينئذ في قلب المفاعل شيء يكبح جماح تنامي تفاعل الانشطار النووي، فتزداد القدرة في الحال. يقوم "أكيموف Akimov" بالضغط على الزر AZ-5 لـ "طرح" المفاعل (إيقافه على الفور).[2]

(1) سنكتفي هنا بهذا القول، لتجنب الخوض في الكثير من التفاصيل الفنية التي قد ترهق القارئ غير المتخصص. يمكن للمهتمين بهذه التفاصيل الرجوع إلى الكتابات المتخصصة الكثيرة عن الحادثة.

(2) "ألكسندر أكيموف Alexandre Akimov" هو المهندس المشرف على غرفة التحكم عند وقوع الحادثة.

**الشكل 222:**

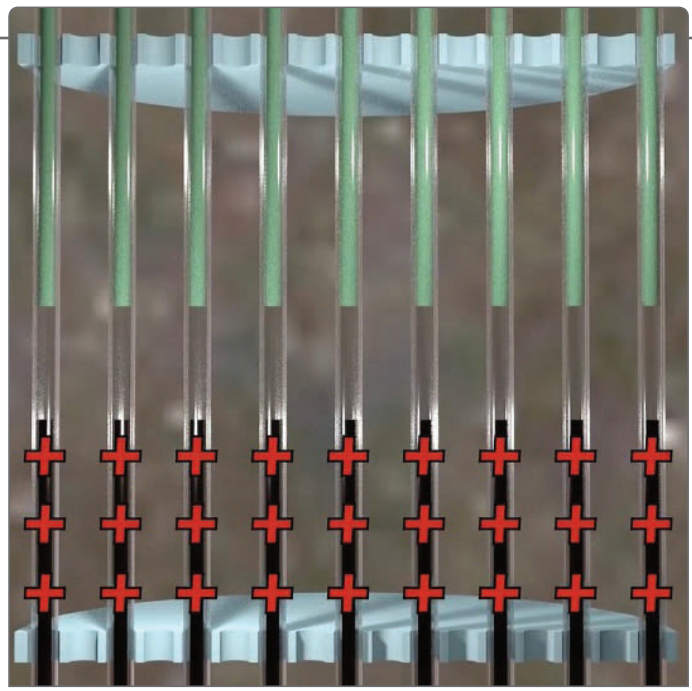
**محاكاة لحالة قضبان التحكم قبيل الضغط على زر الرزع**



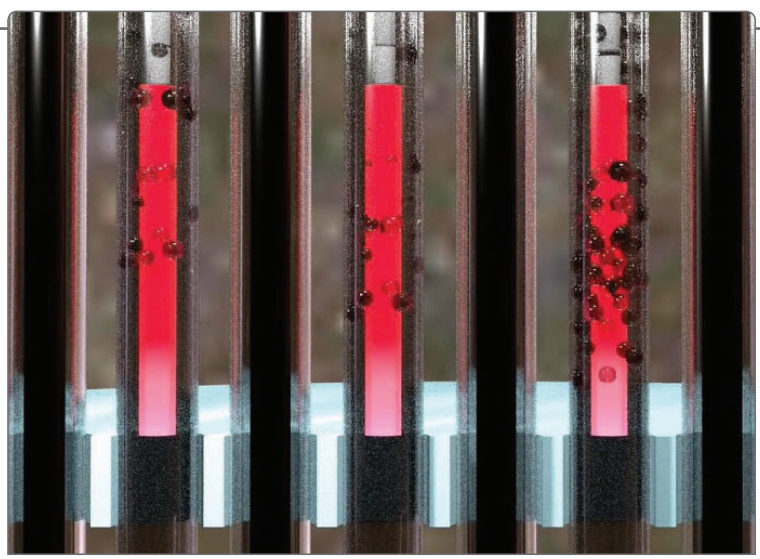
بضغط زر AZ-5 بدأت جميع قضبان التحكم العلوية تنزل في آن واحد خلال قلب المفاعل. أزاحت أطراف الجرافيت الماء الذي تحتها، وولدت تفاعلية موجبة في قاع المفاعل (تأثير النهاية؛ الشكل 223). ارتفعت درجة حرارة الماء وأخذ يغلي (الشكل 224). غليان الماء أضاف بدوره المزيد من التفاعلية الموجبة (الفقاعات المتكونة عند الغليان، أي "الفراغات voids"، لا تمتص النيوترونات مثل الماء السائل). وهكذا تصاعدت القدرة سريعاً من عال إلى أعلى. أدى الارتفاع المفاجئ في حرارة الوقود إلى تبخر الماء في التو واللحظة وانفجار قلب المفاعل بعد ثماني ثوان من ضغط زر AZ-5. مع انكشاف الچرافيت الموجود في قلب المفاعل وتعرضه للهواء الجوي، اشتعلت فيه النيران.

الشكل 223:

تكون التفاعلية الموجبة في قاع قلب المفاعل



الشكل 224: غليان الماء في قاع قلب المفاعل



## • ما بعـــد الانفجـــار

وصل مكافحو الحريق إلى موقع الحدث في دقائق وهم يعتقدون أنهم سيتعاملون مع حريق عادي. سيموت كثير منهم بسبب تعرضهم الحاد للإشعاع. وفقا لشهود العيان، عبر هؤلاء عن شعورهم بمذاق معدني في أفواههم وبألآم تشبه شكات الدبابيس في وجوههم.

بحلول الفجر، قرابة أربع ساعات ونصف بعد الانفجار، أمكن إخماد حرائق الجرافيت على أرض المحطة. أما الحريق الرئيس في داخل بنية المفاعل، فاستمر لعدة أيام تالية. لم يعرف رجال الإطفاء طبيعة هذا اللهيب الذي لا ينتهي، واستمروا يحاولون إخماده بالطريقة التي يألفونها: صب المزيد من المياه فوقه. لم ينجم عن ذلك شيء سوى تكون سحب هائلة من بخار الماء المشع، حملتها الريح إلى بلدة پريپيات المجاورة.

أرسلت الحكومة السوفيتية إلى المحطة المنكوبة لجنة من الخبراء برئاسة "ڤاليري ليچاسوف Valeri Legasov"، النائب الأول لمدير "معهد كورتشاتوف Kurchatov Institute". وصل ليچاسوف وزملاؤه إلى پريپيات مساء يوم الكارثة.

باستثناء منظر الشاحنات التي تغسل الشوارع بالرغوة، استمرت الحياة كالمعتاد في پريپيات لمدة يوم بعد الانفجار. لم يبدأ إخلاء البلدة من سكانها الـ 50,000 إلا في اليوم التالي (27 أبريل، الشكل 225). قيل لهم أن هجرتهم لن تطول عن أيام قليلة، فلم يأخذوا من أمتعتهم سوى القليل، لكن أغلبهم لن يروا منازلهم ثانية.

**الشكل 225: عملية إخلاء سكان پريپيات**

لم يغلق المفاعل الثالث إلا في اليوم التالي عند الساعة الخامسة صباحا. وبعد نحو 24 ساعة، أُغلق المفاعلان 1 و2.

بقي في قبو المفاعل زهاء 50 طنا من الوقود النووي و800 طن من چرافيت المفاعل، حيث شكلت هوة تذكر بفوهة البركان. لإطفاء هذه النيران، قامت المروحيات بإلقاء أطنان من الرمل المخلوط بالبورون فوق ما تبقى من قلب المفاعل، كما أوصى ليچاسوڤ.

## • المُخَلِّصـــون

جندت السلطات السوفيتية مئات الألاف من الناس للمشاركة في احتواء الكارثة وتنظيف ما خلفته. اشتهر هؤلاء باسم "المخلصون" أو "المصفون liquidators". ضم المخلصون في صفوفهم تنويعة كبيرة من البشر، مثل مكافحي الحريق، جنود الاحتياط، وعمال المناجم.

عمل المخلصون في ظروف صعبة للغاية بسبب مستويات الإشعاع العالية (الشكل 226). أُعتبروا من الأبطال، وكرمتهم السلطات السوفيتية والأوكرانية بالنياشين والأوسمة (الشكل 227).

الشكل 226: صورة لأحد مخيمات المخلصين

الشكل 227:
مجموعة من المخلصين يحيون في 2018
الذكرى الـ 32 لكارثة تشيرنوبيل

لاحتواء المواد المشعة المتبقية، أحيط المفاعل المتضرر بناووس من الصلب والأسمنت (الشكل 228). استغرق تصميم وبناء هذا الناووس نحو سبعة شهور، من مايو إلى نوفمبر 1986.

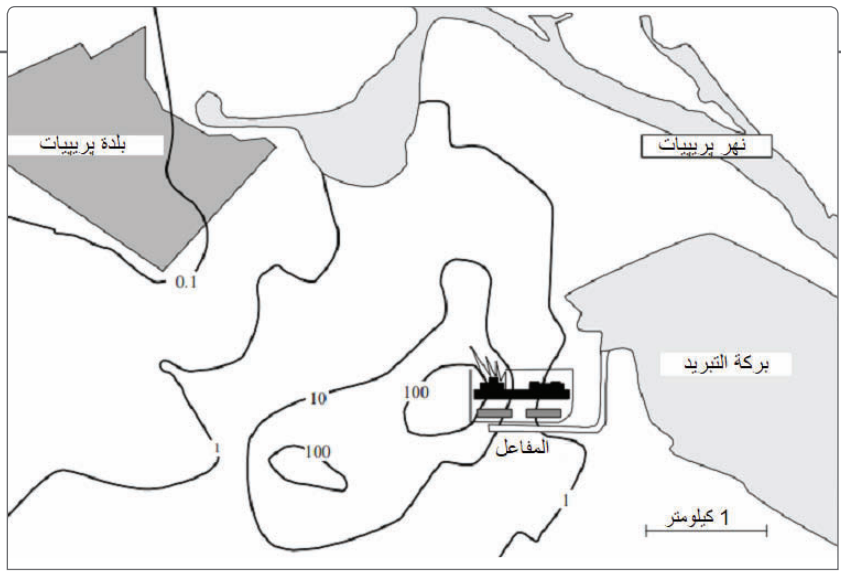
**الشكل 228: الناووس المبني حول المفاعل 4**

كان لابد من تنظيف سطح مبنى المفاعل 3 من الحطام المشع الذي سقط عليها، وكانت مستويات الإشعاع هناك عالية جدا (الشكل 229). في البداية، حاول المسؤولون استخدام روبوتات ألمانية، يابانية، وسوفيتية، لكن الآلات لم تتحمل مستويات الإشعاع الشديدة، فقررت السلطات استخدم البشر (الشكل 230). عمل المنظفون في مناوبات كثيرة متتابعة، ولم يكن يسمح لأي منهم بالبقاء في بعض المناطق لأكثر من 40 ثانية.

**الشكل 229 :**

**معدلات التعرض للإشعاع في الهواء (بالرونتچن)**

**ول المحطة في 26 أبريل**




**الشكل 230 : المخلصون فوق سطح المفاعل 3**

## • آثـــار الكـارثـــــة

من الصعب، أن لم يكن من المستحيل، تقييم آثار الكارثة بشكل شامل ودقيق. سنكتفي هنا بعرض المعلومات المؤكدة ونتائج بعض الدراسات الموثوقة، ونلخصها في النقاط التالية:

- قُدر النشاط الإشعاعي المتسرب بما يعادل 400 "هيروشيما".[1]
- مات في أعقاب الكارثة 31 شخصا وعانى من التسمم الإشعاعي الحاد 299. كان من بين الضحايا أغلب رجال الإطفاء الذين وصلوا إلى موقع الحادث بعد دقائق من الانفجار واشتعال الحرائق.
- في أعقاب الحادثة، حددت السلطات "نطاق محظور exclusion zone" بمسافة 30 كيلومترا حول المحطة (راجع الشكل 197). غطى النطاق المحظور مساحة 2,634 كيلومتر مربع. وُسِّع النطاق المحظور فيما بعد، ليشمل مساحة قدرها 4,143 كيلومتر مربع (الشكل 231).
- تسببت مستويات الإشعاع العالية في تحول أوراق ألاف الأشجار القريبة إلى لون الصدأ، فأصبحت تعرف باسم "الغابة الحمراء" (الشكل 232). قام المخلصون باقتلاع الأشجار والمزروعات المشعة. كما أُمرت فرق من المجندين السوفييت بقتل الحيوانات الشاردة في النطاق المحظور. دفنت تلك الأشجار والحيوانات في مقابر من الأسمنت المصبوب.
- بحلول يونيو 1986، بلغت أعداد الذين هُجِّروا من المناطق الأسوأ نحو 150,000 شخص.
- مازالت هناك مناطق تبلغ مساحتها نحو 2,000 كيلومتر مربع لا تعتبر آمنة لمعيشة البشر، ولا يمكن استخدامها في زراعة المحاصيل أو الحصول على الأخشاب بسبب تلوثها.

(1) أنظر IAEA (1996: 8).

الشكل 231: المنطقة المحظـــورة

الشكل 232:

مروحية عسكرية ترش مادة لزجة لتثبيت

المواد المشعة ومنع انتشارها

آثرت عدم الخوض في متاهة الآراء الكثيرة حول الآثار الصحية بعيدة الأمد للكارثة؛ فهي جد متباينة، ولن يستفيد عموم القراء كثيرا من مجرد سردها.

## • النقائـص الثقافيـة

يحمل الخبراء والسياسيون الغربيون النظام السوفيتي مسؤولية الكارثة. كتب الفيزيائي الألماني-أمريكي "هانز بيته Hans Bethe"، الحائز على جائزة نوبل، ما يلي في هذا الخصوص: "لقد أكدنا، زملائي وأنا، أن كارثة تشيرنوبيل تخبرنا عن نقائص النظام السياسي والإداري السوفيتي بأكثر مما تخبرنا به عن مشاكل الكهرباء النووية." أعتبر المفاعل مفخرة للصناعة السوفيتية، وأذيع أنه لا يمكن أن ينفجر أبدا.

لا يعد مفاعل RMBK جيدا من ناحية التصميم الهندسي. لكنه كان قويا، رخيصا، سهل التنفيذ بالإمكانات الوطنية، وسوفيتيا خالصا (لم يكن له شبيهاً غربياً). علاوة على ذلك، تميز هذا المفاعل بقدرته على استخدام اليورانيوم الطبيعي، أو المخصب قليلا (2 % فقط)، كوقود نووي. لم تكن الصناعة السوفيتية في ذلك الوقت تمتلك القدرات اللازمة للتخصيب العالي لليورانيوم، وكانت تكاليف مثل هذا التخصيب هائلة.

ظهرت عيوب المفاعل RMBK من قبل، وجرى التغاضي عنها. على سبيل المثال، حدثت في 1983 مشكلة بسبب تأثير النهاية في "محطة إيجنالينا النووية Ignalina Nuclear Power Plant" (ليتوانيا). أوصى المحققون في تلك الحادثة بإجراء تعديلات على تصميم المفاعل، ولم تنفذ تلك التعديلات إلا بعد كارثة تشرنوبل.

بالإضافة لعيوب التصميم، نتجت الكارثة بسبب مخالفة المسؤولين عن المحطة قواعد التشغيل أكثر من مرة. يقال إن دياتلوف هدد المهندسين الموجودين أثناء إجراء الاختبار بالعقاب الشديد إذا لم ينفذوا دون اعتراض أوامره.

لم يصدق المسؤولون عن المحطة في البداية أن المفاعل هو الذي انفجر، وواسوا أنفسهم بأن الانفجار قد حدث على الأغلب في نظام تبريد الطوارئ، وأن الوضع مازال تحت السيطرة.

وفقاً للكتابات الغربية، لم يكن رجال الإطفاء مدربين على التعامل مع الحوادث النووية. لم يكن أولئك الذين وصلوا فوراً إلى مسرح الحادثة يرتدون أي ملابس أو كمامات واقية من الإشعاع.

حاولت الحكومة السوفيتية التكتم على الحادثة. لكن المسؤولون عن محطة نووية سويدية في ستوكهولم اكتشفوا مستويات عالية من الاشعاع من خارج محطتهم، فطالبت الحكومة السويدية من نظيرتها السوفيتية تفسيراً لذلك. أخيراً، أصدر الكرملين في 28 أبريل بيانا بأن حادثة قد وقعت في محطة تشيرنوبيل، وأن السلطات تتعامل معها.

في نهاية محاكمة المسؤولون في محطة تشيرنوبيل، أشار القاضي إلى سوء إدارة المحطة: "كان هناك جو من غياب الرقابة والمسؤولية...كان العمال أثناء الخدمة يلعبون الورق والدومينو أو يكتبون الرسائل."

- **مجرمون، أبطال، أم ضحايا**

مات أكيموف و"توپتونوف Toptunov" خلال أقل من ثلاثة أسابيع متأثرين بالتسمم الإشعاعي.[1] في يوليو 1987، حكم على بريوخانوف، "فومين Fomin"، وديالتوف، بالسجن عشر سنوات في معسكر أشغال لمخالفتهما قواعد السلامة، بعد محاكمة استمرت لثلاثة أسابيع (الشكل 233).[1] حكم على بريوخانوف بخمسة

(1) "ليونيد توپتونوف Leonid Toptunov" هو المهندس المسؤول عن قضبان التحكم عند وقوع الحادثة. كان عمره 25 سنة، ولم تتعدى خبرته الوظيفية أربعة أشهر.

(2) «نيكولاي فومين Nicolai Fomin" كان رئيس المهندسين بالمحطة.

سنوات متزامنة أخرى لإساءة استخدام السلطة. أفرج عن دياتلوف وفومين ضمن عفو عام في 1990، وعن بريوخانوف في 1991.

كان دياتلوف هو المتهم الرئيس؛ فهو من أدار غرفة التحكم تلك الليلة وأعطى الأوامر. كان دياتلوف في أواخر حياته المهنية، وكان شخصا جلفا، كريها، ومتعجرفا. بعد الإفراج عنه، كتب دياتلوف مقالة علمية، نشرت في 1991 في *مجلة الهندسة النووية الدولية Nuclear Engineering International*، وكتاب، نشر باللغة الروسية في 1995، يدعي فيهما أن السبب الرئيس في الكارثة كان التصميم السيء للمفاعل وليس طاقم التشغيل الذي كان يرأسه. مات دياتلوف في 13 ديسمبر 1995 عن عمر 64، بقصور في القلب (يرجح أن يكون من أسبابه التسمم الإشعاعي الذي تعرض له).

**الشكل 233:**
**خبر الحكم على بريوخانوف، فومين،**
**وديا تلوف بعشر سنوات في معسكر أشغال**

The New York Times

U.S. ACTS TO RUSH COPTERS TO SWEEP MINES IN THE GULF

India Signs Pact With Sri Lanka; Sends Soldiers

1,500 Arrive as a Peace Force Under Accord

MEESE SAYS NORTH LIED EITHER TO HIM OR TO COMMITTEES

A RELUCTANT CONCESSION

Chernobyl Officials Sentenced to Labor Camp

Algae Tides Again Afflict L.I., And Scientists Still Wonder

Official Urged Meese to Widen Staff in Inquiry

في 27 أبريل 1988، يوم واحد بعد الذكرى الثانية للكارثة، انتحر ليچاسوف بشنق نفسه في منزله. اختلفت الروايات حول الدافع وراء انتحاره. يربط البعض بين انتحاره وما شاهده واكتشفه خلال تحقيقه في أسباب الكارثة. على كل حال، كان

ليچاسوف قد حاول الانتحار في العام السابق بتناول جرعة مميتة من حبوب منومة، لكن الأطباء تمكنوا من انقاذ حياته حينئذ.

## • ثقـــافـــة الســـلامـــة

"السلامة أولاً" عبارة نقرأها كثيراً في كل المنشآت الصناعية. لكنها سهلة على اللسان، صعبة في التنفيذ. من أهم الدروس المستفادة من كارثة تشيرنوبيل أنها أوضحت الأهمية القصوى لثقافة السلامة في الصناعة النووية، من ناحية، وصعوبة تحقيق هذه الثقافة على أرض الواقع، من ناحية أخرى.

يُرجع المحللون جذور كارثة تشيرنوبيل إلى هذا المزيج المميت من الخوف، الجهل، والكبر الذي كان سائدا في محطة تشيرنوبيل النووية. تجنب هذا الثلاثي هو في الحقيقة جوهر ثقافة السلامة الجيدة.

تباهى الكثير من الخبراء الغربيين أن مثل هذه الكارثة لا يمكن أن تقع في بلدانهم. ربما نجح هذا الغرب فعلاً في التخلص من عنصري الخوف والجهل، ولكن هل يُدرِك هذا المجتمع فعلا خطورة ما يعتريه هو نفسه من كبر؟

يستطيع القراء الآن مشاهدة العرض التليفزيوني الشهير عن الحادثة ولديهم فهم جيد لأغلب الأمور الفنية التي ذكرت فيه.

## • بعد 25 عاما من الكارثة

**أغلقت المحطة كلية منذ العام** 2000.

في ديسمبر 2017، أعلنت شركة أوكرانية-ألمانية، "تشيرنوبيل الشمسية Solar Chernobyl"، عن إنشاء محطة ضخمة للطاقة الشمسية في الأراضي المهجورة. بنيت المحطة التي قدرتها واحد ميجاوات على مقربة من المحطة المنكوبة. وزودت بـ 3,800 *لوح شمسي* (*photovoltaic panels*).

يقبع المفاعل المنكوب منذ 2018 تحت قبة هائلة (الشكل 234). يعد الناووس الجديد أكبر مبنى متحرك تم بناؤه في العالم حتى الآن. لتجنب تعرض العاملين للإشعاع، جرى إقامته بعيدا عن المفاعل، ثم تحريكه فوق قضبان حديدية حتى يصبح فوق المفاعل. يبلغ ارتفاعه 106 م، عرضه 257 م، وطوله 162 م. أما وزنه، فيبلغ 36,000 طن. لاحظ الصحفيون الذين زاروه أنه يساع أربعة ملاعب لكرة القدم. استغرق بناء هذا القوس نحو ستة أعوام، وتكلف 1.5 مليار يورو. صُمم الناووس الحامي بحيث يظل يؤدي وظيفته لمدة 100 عام.

**الشكل 234:**

**القبة الجديدة فوق المفاعل المنكوب**

في يوليو 2019، أعلن رئيس الأوكراني أنهم سوف يجعلون النطاق المحظور بأكمله موقعا سياحيا رسميا. حاليا، تنظم العديد من شركات السياحة الأوكرانية الرحلات إلى موقع الكارثة (الشكل 235 والشكل 236).

**الشكل 235:**

**كشك المعلومات عن رحلات تشيرنوبيل**

**الشكل 236: منتزه پريپيات المهجور**

في غياب الإنسان، ازدهرت الحياة البرية، وبدأت البيئة الطبيعية تطغى على البيئة المبنية (الشكل 237). عموما، لا تختلف الحيوانات الموجودة هناك عن تلك الموجودة في المناطق الأخرى (الشكل 238).

مازالت توجد 10 مفاعلات RMBK عاملة حتى الآن في ثلاثة مواقع بروسيا، يتوقع أن يعمل آخرهم حتى 2030 (الشكل 239). جرى تعديل كل مفاعلات RMBK لتلافي عيوب التصميم التي أظهرتها الحادثة.

**الشكل 237:**

**صورة لحصان بري من نوع مهدد بالانقراض**

**الشكل 238: صورة لكلبين في المنطقة المحظورة**

**الشكل 239:**

**المفاعلات العاملة في روسيا الاتحادية**

- **كارثة فوكوشيما**

اليابان هي أرخبيل يمتد من المنطقة شبه-الشمال-قطبية إلى المنطقة شبه-الاستوائية (الشكل 240). يحتوي الأرخبيل الياباني على أكثر من 6,000 جزيرة. لكن هناك أربعة جزر رئيسة هي من الشمال إلى الجنوب "هوكايدو Hokkaido"، "هونشو Honshu"، "شيكوكو Shikoku"، و"كيوشو Kyushu".

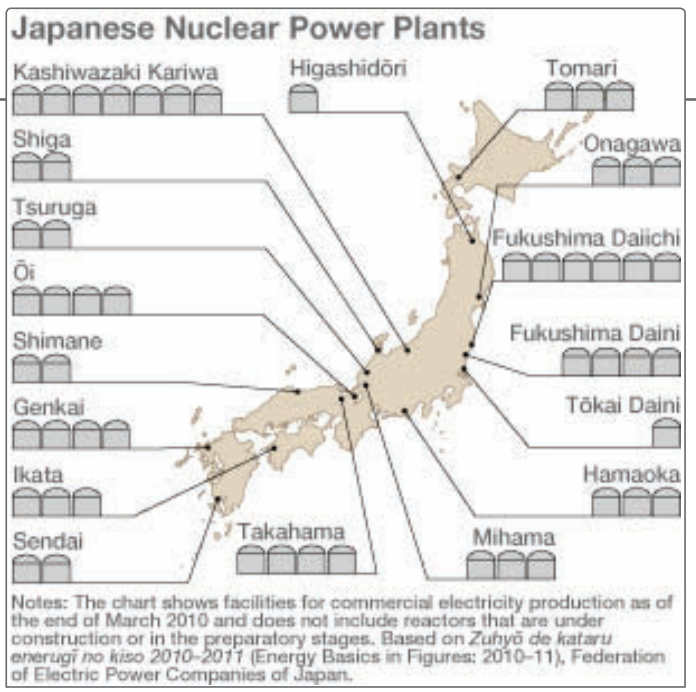
**الشكل 240:**

**أرخبيل الجزر اليابانية**

في 11 مارس 2011، كان يوجد في اليابان 55 محطة نووية توفر نحو 30% من القدرة الكهربية للبلاد (الشكل 241). محطة "فوكوشيما دايشي Fukushima Daichi" هي إحدى هذه المحطات.

**الشكل 241:**

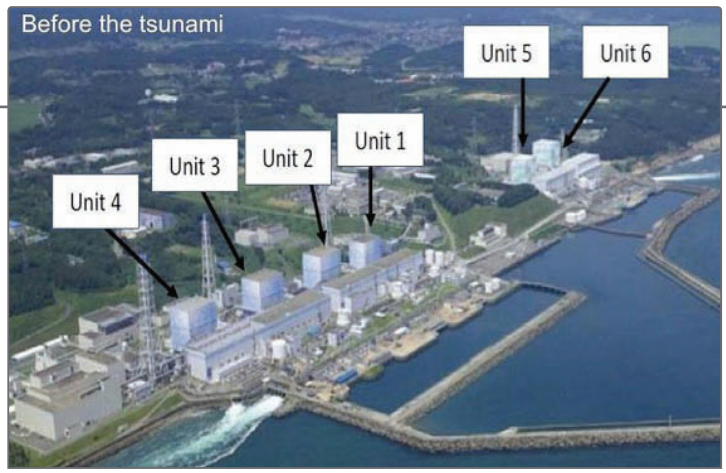
**محطات اليابان النووية قبل حادثة فوكوشيما**



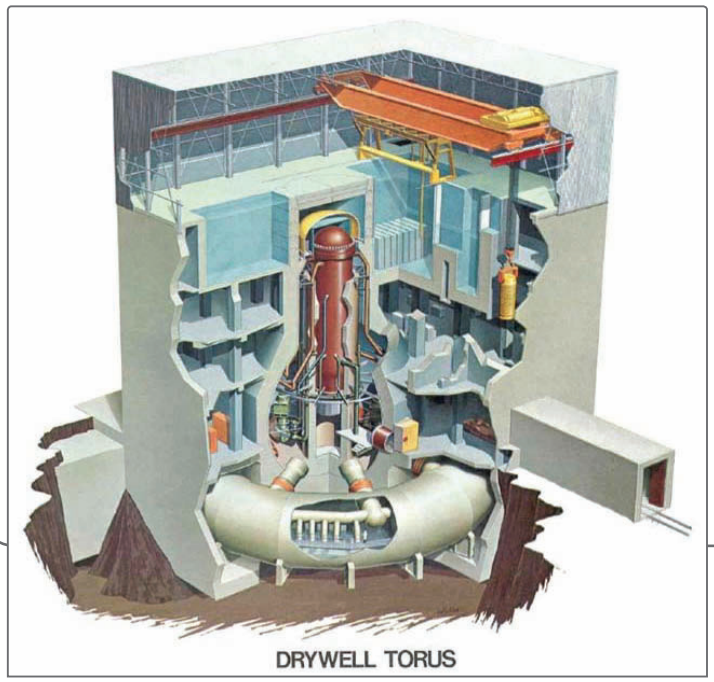

تقع محطة فوكوشيما النووية على الساحل الشرقي لجزيرة هونشو، أكبر الجزر اليابانية (الشكل 242)، بالقرب من بلدة "فوتابا Futaba"، محافظة "فوكوشيما Fukushima". تحتوي المحطة على ستة مفاعلات ماء مغلي، دخلت الخدمة تباعا في الفترة من 1971 (المفاعل 1) إلى 1979 (المفاعل 6).

**الشكل 242:**

**محطة فوكوشيما النووية قبل الزلزال والتسونامي**




الوحدات 1 - 5 هي من صنع شركة "جنرال إلكتريك" الأمريكية، الطراز المعروف باسم "مارك 1 Mark I" (الشكل 243).




**الشكل 243:**

**رسم توضيحي لإحدى وحدات محطة فوكوشيما النووية**

المصدر:
http://www.nrc.gov/

في ظهيرة ذلك اليوم، ضرب زلزال قوي (بقوة 9.1) الجزر اليابانية (بدا في 14:46 بتوقيت اليابان). وقع مركز الزلزال على بعد 70 كيلومترا فقط من محطة فوكوشيما النووية (الشكل 244). تسببت هزات الزلزال في إغلاق 11 محطة نووية آلياً، من بينها محطة فوكوشيما. في ذلك الوقت، كانت نصف مفاعلات المحطة الستة تعمل (الوحدات 1، 2، و3)، والنصف الآخر متوقف لأعمال الصيانة الدورية (الوحدات 4، 5، و6). كان المفاعل 4 خاليا من الوقود (الذي نقل إلى أحواض الوقود المستعمل)؛ المفاعلان 5 و6 "موقوفين على البارد".

تسببت الهزات الأرضية في انقطاع امدادات الكهرباء من الشبكة العمومية عن المحطة، وبدأت مولدات الديزل الاحتياطية تعمل كما هو مخطط لها في مثل هذه الظروف.

**الشكل 244:**

**مركز زلزال 2011 ومواقع المحطات النووية اليابانية**

المصدر: Nuclear Energy Institute

بعد أقل من ساعة واحدة من حدوث الزلزال، ضربت أولى موجات التسونامي المدمرة الساحل الياباني. وصل ارتفاع الموجات إلى 40 متراً حسب المكان (الشكل 245).

**الشكل 245: تسونامي 2011 في اليابان**

كانت المحطة مجهزة بجدار بحري لصد موجات التسونامي ارتفاعه 10 أمتار (الشكل 246). استطاع هذا الجدار صد موجة التسونامي الأولى التي وصلت المحطة. لكن الموجة الثانية كانت أعلى من الجدار بأربعة أمتار (الشكل 247). تسبب الفيضان في غرق وخراب مولدات الطوارئ (العاملة بالديزل).

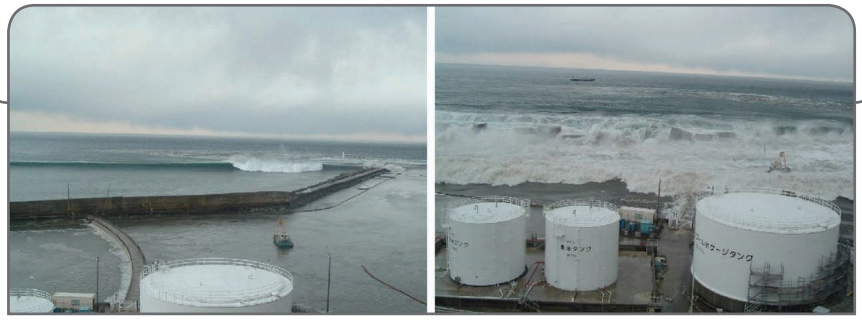
**الشكل 246:**

**صورة تبين الجدار البحري أمام**

**محطة فوكوشيما داييتشي (قبل الكارثة)**

**الشكل 247:**

**موجات التسونامي تضرب محطة فوكوشيما داييتشي**



أدى تعطل جميع منظومات التبريد في النهاية إلى انصهار قلوب المفاعلات الثلاث. عند هذه الحرارة الهائلة، تفاعل الزركونيوم (الذي تصنع منه قضبان الوقود) مع البخار، مما أنتج كميات كبيرة من غاز الهيدروجين (890، 460، 810 كيلوجراما في الوحدات 1، 2، و3، تباعا). اضطر المسؤولون في المحطة إلى تنفيس أوعية الضغط لمنع انفجارها. أدى هذا إلى خروج الهيدروجين إلى مبنيي المفاعلين 1 و3 وانفجاريهما (نتيجة لتفاعل الهيدروجين انفجاريا مع أكسجين الهواء؛ الشكل 248). انفجرت الوحدة 4، رغم خلوها من الوقود النووي، نتيجة لتسرب الهيدروجين إليها من الوحدة 3 المجاورة. فسر الخبراء حدوث ذلك على النحو التالي: يشترك المفاعلان 3 و4 في مدخنة العادم. بقيت صمامات العادم مفتوحة بعد فقدان مصادر الكهرباء. عندما نُفِّسَت الحاوية في الوحدة 3، حصل ارتجاع للهيدروجين وغازات أخرى من المدخنة المشتركة إلى الوحدة 4. أدى تراكم الهيدروجين داخل بناية الوحدة 4 إلى انفجارها.

لم يحدث انفجار هيدروجيني في الوحدة 2 لأن إحدى الشظايا الناتجة من انفجار الوحدة 1 تسببت في إعطاب صمام التنفيس في الوحدة 2. مع ذلك، يعتقد أن الضغط الهائل في هذه الوحدة قد تسبب في تضرر الجزء السفلي من المفاعل، وأن الوحدة 2 هي المسؤولة الكبرى عن التسرب الإشعاعي في الاتجاه الشمال-غربي من المحطة (حتى 40 كيلومترا).

**الشكل 248:**

**صورة لمحطة فوكوشيما داييتشي بعد الكارثة**

- **عواقب الحادثة**

تسبب تسرب المواد المشعة من قلوب المفاعلات المتضررة في مستويات إشعاع عالية بأنحاء المحطة والمناطق المحيطة. نتج أغلب التلوث من تنفيس الحاويات والانفجارات الهيدروجينية. أصبحت كميات كبيرة من المياه المضخة والمرشوشة ملوثة بشدة، وصرفت أو تسربت إلى البحر.

في يوم التسونامي، صدر قرار بإخلاء احترازي للسكان في نطاق ثلاثة كيلومترات من المحطة. رُصِدَت معدلات جرعة عالية في اليوم التالي عند حدود المحطة، واتسع نطاق الإخلاء إلى 10 كيلومترات ثم 20 كيلومترا. مع تدهور الأوضاع في المفاعلات، زادت معدلات الجرعة سريعاً حتى وصلت في 16 مارس إلى 10.85 مسف/ساعة. بلغت معدلات الجرعة 400 ضعف هذا المستوى داخل المحطة، مما صعب كثيراً عمليات الإصلاح. يتضح حجم هذا التلوث الإشعاعي عند مقارنة هذه الأرقام بحد الجرعة المعتمد عالمياً، وهو واحد ميلي-سيفرت فقط في العام الكامل.

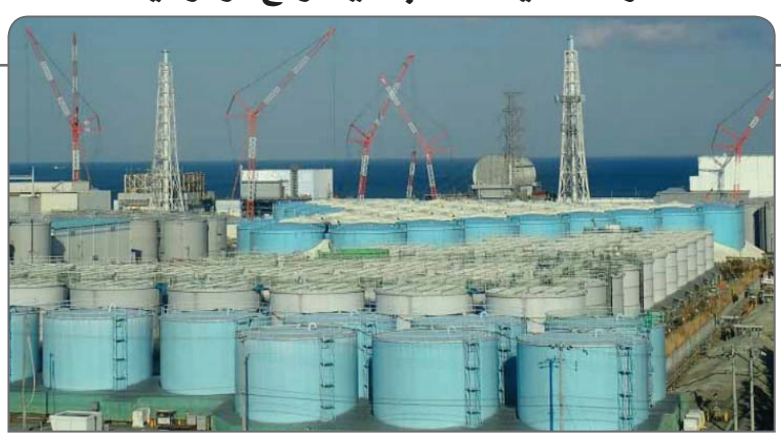
سببت الحادثة قلقاً عالمياً بعدما رُصِدَت مستويات عالية من النشاط الإشعاعي

في مياه ميناء المحطة (على المحيط الهادي) في 2 أبريل. وفقاً لأحد التقارير، تراكمت المياه الملوثة في غرفة العنفات، سالت في خندق، وتسربت إلى الميناء، مسببة نشاط إشعاعي مقداره $4.81 \times 10^6$ جيجا بيكريل.[1] أثارت السلطات اليابانية جدلا كبيرا عندما سمحت للشركة المالكة للمحطة بصرف أكثر من 10,000 متر مكعب من المياه بها تركيزات منخفضة نسبيا من النشاط الإشعاعي على البحر، لتوفير المكان لتخزين المياه عالية الإشعاع. أنشأت مرافق المعالجة في الموقع لإزالة المواد المشعة من المياه المخزنة، لإعادة استخدام المياه المعالجة في تبريد المفاعلات.

يعالج الماء الملوث في الموقع بطريقة تعرف باسم "منظومة المعالجة السائلة المتقدمة Advanced Liquid Processing System (ALPS)"، وهي تزيل معظم التلوث المشع، باستثناء التريتيوم. بحلول 12 مارس 2020، بلغ حجم المياه المعالجة 1.19 مليون متر مربع، محفوظة في 979 خزانا في موقع المحطة (الشكل 249).

**الشكل 249:**

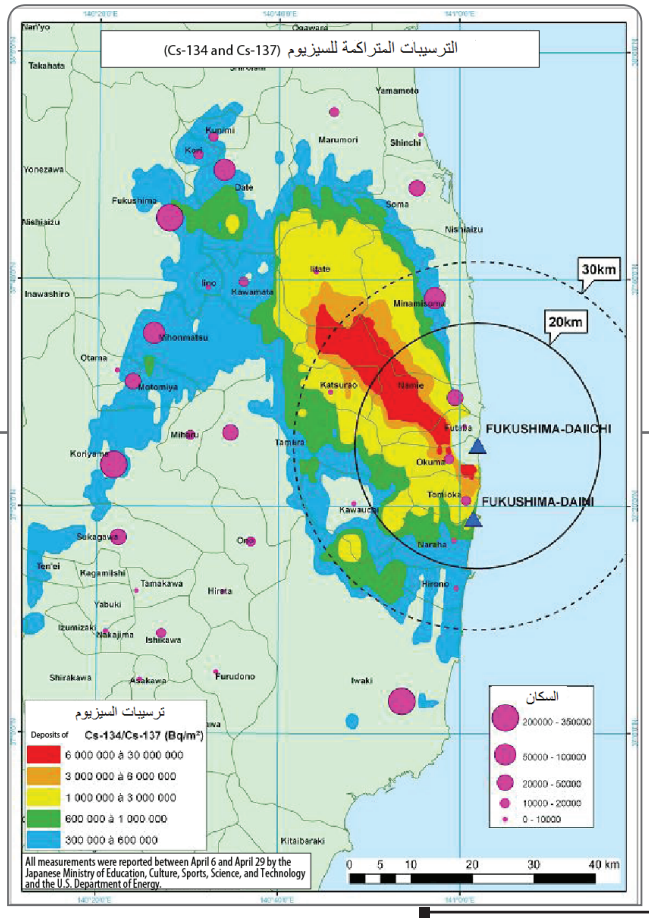
**خزانات المياه المعالجة في موقع فوكوشيما**



- **المصدر:** "شركة طوكيو للقدرة الكهربية Tokyo Electric Power Company".

(1) تقرير لـ "معهد عمليات الكهرباء النووية Institute of Nuclear Power Operations"، وهو منظمة أمريكية تهتم بسلامة المحطات النووية أنشأت بعد حادثة "ثري مايل أيلاند Three Mile Island" النووية.

بسبب تلوث التربة، أصبحت مناطق كبيرة حول المحطة غير صالحة للسكن. تركز التلوث في الاتجاه الشمال-غربي، بسبب تبدل اتجاه الرياح السائدة من صوب المحيط إلى الشمال-غرب لفترة يومين في منتصف مارس، ثم غسلت الأمطار الشديدة المواد المشعة من الهواء ونقلتها إلى التربة (الشكل 250). وفقا لأحد التقارير،[1] كانت ترسبات السيزيوم المشع متقاربة مع تلك الحادثة في المناطق الأكثر تلوثا حول محطة تشرنوبل المنكوبة. لكن مقدار الأرض التي زاد السيزيوم فيها عن 600,000 بيكريل في المتر المربع لم تتعد 8.5 % من مقدارها في تشيرنوبيل.




**الشكل 250: ترسبات السيزيوم حول محطة فوكوشيما**

• المصدر:

Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire (IRSN)

(1) تقرير لـ "معهد الحماية من الإشعاع والأمان النووي Institute de Radioprotection et de Surete Nuclaire (IRSN)" (فرنسا).

بحلول إبريل، أجلي قرابة 84,000 فرد في نطاق الـ 20 كيلومتر من المحطة؛ وفي منتصف مايو، 15000 آخرون من المنطقة الشمال-غربية الملوثة فيما بين 20- 40 كيلومترا. أعلنت الحكومة اليابانية عن خطط لإزالة التلوث من المنطقة، وخفض الجرعة الإشعاعية من الحادثة إلى ميلي-سيفرت واحدا، حد الجرعة المعتمد عالميا، في المدى الطويل.

في العام السابق (2020)، سمحت السلطات اليابانية بفتح جزء من بلدة فوتابا التي أُغلِقت بعد كارثة فوكوشيما النووية (الشكل 251).

**الشكل 251:**

**عودة الحياة إلى جزء من بلدة فوتابا اليابانية**

في العام نفسه، طلبت الحكومة اليابانية من الوكالة الدولية للطاقة النووية مراجعة للأساليب المقترحة لإدارة تلك المياه. نُشر تقرير المراجعة في 2 أبريل 2020. تقول الوكالة فيه أن الطريقتين المقترحتين، الصرف البخاري والتصريف على البحر، كلاهما ممكنان.

## • الدروس المستفادة والعبر

الحوادث تعلمنا، هكذا يقول المختصون في علوم السلامة. لذلك يعكف هؤلاء المختصون على دراسة كل حادثة جديدة، متسائلين ما الذي كان يمكن عمله لمنع تلك الحادثة أو التلطيف من أضرارها.

بدأت حادثة فوكوشيما بكارثة طبيعية: زلزال 11 مارس 2011 وموجات التسونامي التابعة. تحتوي جزيرة هونشو التي ضربها الزلزال والتسونامي على أربع محطات نووية أخرى غير فوكوشيما دايتشي: "هيجاشي Higashi"، "فوكوشيما داييني Fukushima Daini"، "توكاي داييني Tokai Daini"، و"أوناچاوا Onagwa". تضررت أربعة من هذه المحطات الخمسة بفعل هذه الكارثة الطبيعية، لكن الضرر الأكبر كان من نصيب فوكوشيما دايتشي. وُضعت حادثة فوكوشيما دايتشي في المستوى 7 على المقياس الدولي للحوادث الإشعاعية (INES)،[1] وهو المستوى الأخطر على الإطلاق، فوكوشيما داييني في المستوى 3، وأوناچاوا في المستوى 1. أما توكاي داييني، فقد وضعت "أسفل المقياس" (المستوى صفر).

محطة أوناچاوا هي الأقرب لمركز الزلزال (على بعد 80 كم منه). مع ذلك، كانت هي الأقل تضررا من من الكارثة (الزلزال والتسونامي). يرجع ذلك للأسباب التالية:

- كان لدى المحطة خمسة خطوط كهرباء خارجية (من خارج الموقع offsite)، واحدة منها نجت من الزلزال. وعليه، لم تفقد المحطة كل التغذية الخارجية.
- يرتفع موقع المحطة 14.8 م فوق منسوب سطح البحر، ولم يغرق أثناء التسونامي.
- تقع مضخات مياه البحر في بؤر على بعد 100 م من ميناء المحطة، ومحركات المضخات مرفوعة داخل هذه البؤر لحمايتها من الفيضان.

(1) لمزيد من المعلومات عن INES، أنظر الجزء الخاص بذلك.

حصلت وحدات محطة فوكوشيما داييتشي الستة على تصاريح الإنشاء فيما بين 1966 - 1972. قدرت شركة كهرباء طوكيو، مالكة المحطة، أعلى تسونامي محتمل عند موقع المحطة بـ 3.1 م، بناء على المعلومات المستقاة من زلزال تشيلي الكبير في 1960 (Great Chilean Earthquake).

لم يستطع الجدار البحري الواطي (نحو ستة أمتار فقط) أمام فوكوشيما داييتشي حمايتها من الغرق تحت موجات المياه الهائلة (بلغت 14 مترا في موقع المحطة). يجدر بالذكر هنا، أن إحدى دراسات السلامة التي أجريت قبل الحادثة (في 2008) توصلت إلى نتيجة مفادها أن موجات التسونامي الناتجة عن الزلازل القوية التي قد تحدث في المنطقة قد يصل ارتفاعها إلى 10.2 م عند موقع المحطة. لكن المسؤولون في المقر الرئيس للشركة تجاهلوا هذه المخاطرة باعتبارها غير واقعية.[1]

بناء على ما سبق، فإن أولى الدروس المستفادة هي ضرورة تحديث المعلومات الخاصة بالأخطار التي قد تهدد سلامة المحطات النووية واتخاذ إجراءات الحماية اللازمة على وجه السرعة.

فقدت المحطة النووية جراء الزلزال والتسونامي جميع خطوط الكهرباء الخارجية وكل مولدات الطوارئ العاملة بالديزل عدا واحدة (12 من 13 مولدا). وُصِل المولد الناجي دون عناية بالوحدتين 5 و6. تركت الوحدات الأخرى على قوة البطاريات، التي بقيت لنحو ثماني ساعات أخرى. فقد التبريد في الوحدة 1 بعد عدة ساعات، في الوحدة 2 بعد نحو 71 ساعة، وفي الوحدة 3 بعد نحو 36 ساعة. لم يستطع المسؤولون إعادة الكهرباء الخارجية إلى المحطة المنكوبة إلا بعد نحو 10 أيام من وقوع الكارثة.

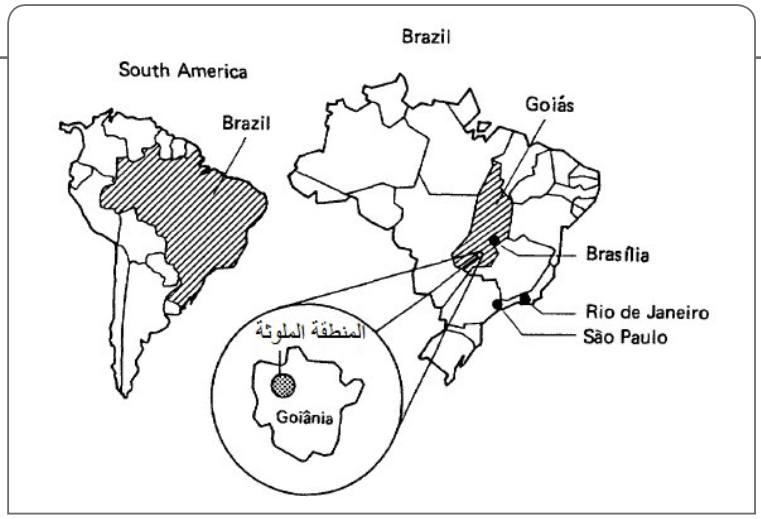
(1) نحيل القارئ المهتم بمزيد من المعلومات عن هذه الكارثة إلى الدراسات التالية: Synolakis and Kânoğlu (2015)، و National Research Council (2014)، و The National Diet of Japan (2012).

- لدى بعض المحطات النووية مصدر احتياطي (للطوارئ) لمياه التبريد يمكن صرفه إلى المحطة بفعل الجاذبية، حتى في حالة الفقدان الكامل للكهرباء الخارجية. لم تتوفر هذه الإمكانية في محطة فوكوشيما دايتشي، التي اعتمدت فقط على وجود مصادر احتياطية للكهرباء يمكن استخدامها في ضخ مياه التبريد إلى المفاعلات أثناء الحالات الطارئة. تعرف وسائل الأمان التي تعمل دون مصدر خارجي للكهرباء باسم *أنظمة السلامة السالبة passive safety systems*. بعد الحادثة، أصبحت الشركات المصنعة تحرص على أن تتوفر مثل هذه الأنظمة في مفاعلاتها النووية الجديدة.

- **حادثــة جويَّانيــا**

"جويَّانيا Goiânia" هي عاصمة ولاية "جويَّاس Gioas" البرازيلية (الشكل 252). يسكن المدينة الآن نحو 1.5 مليون نسمه، وبها جامعة ومطار مشغول. في 1971، افتتحت عيادة لعلاج السرطان بالإشعاع في مركز طبي خاص بالمدينة (سنطلق عليه اختصارا اسم "اي جي ار IGR"). استخدمت تلك العيادة أحدث طرق العلاج الإشعاعي في ذلك الوقت، وهو جهاز يزن عدة أطنان، ويستطيع أن يُعرِّض الورم المراد علاجه إلى جرعة محددة بدقة من أشعة جاما. كان المصدر المشع في الجهاز هو 74 تيرابيكريل (تب‌ك) من السيزيوم-137، على هيئة كلوريد السيزيوم موضوع داخل أسطوانة من الرصاص والصلب بها منفذ للإشعاع من الراديوم radium (سنطلق على الجزء المحتوي على كلوريد السيزيوم المشع اسم كبسولة السيزيوم أو "الكبسولة").

**الشكل 252: موقع حادثة جويانيا**




بحلول 1978، أصبحت أجهزة العلاج الإشعاعي تستخدم الكوبالت-60 بديلا عن السيزيوم-137. اشترى المركز الطبي جهاز الكوبالت الجديد. في ديسمبر 1985، انتقل المركز الطبي إلى مكان آخر. هدم أغلب المبنى الذي كان به المركز. نشأ خلاف قضائي حول ملكية مبنى العيادة ومحتوياته، فترك جهاز السيزيوم في الموقع المهجور (الشكل 253).

**الشكل 252:**

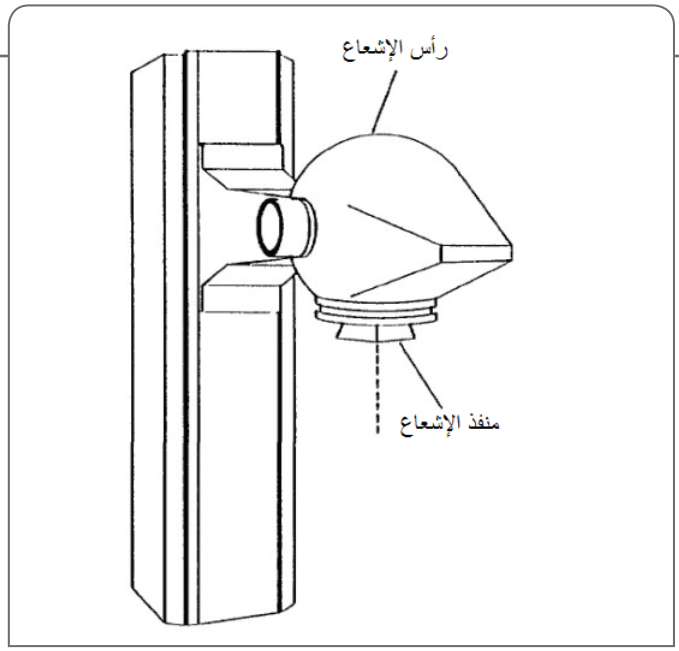
**رسم تصويري لغرفة العلاج الإشعاعي المهجورة**

في 13 سبتمبر 1987، تسلل اثنان من الأفراد إلى داخل المبنى المهجور (سنشير لهما لاحقا بالحروف الأولى من اسميهما: "ار ايه R A" و"دبليو پي W P"، ليسرقا كل ما يستطيعان حمله.

لم يكن في أطلال المبنى سوى جهاز السيزيوم الجسيم (الشكل 254). بدى لهما الجزء الصلب اللامع الذي يحوي المصدر المشع قيما (المجمع الدوار في الشكل 255)، واستطاعا فكه من الماكينة. نقل السارقان المجمع الدوار على عربة يدوية إلى منزل ار ايه على بعد نصف كيلومتر من العيادة.

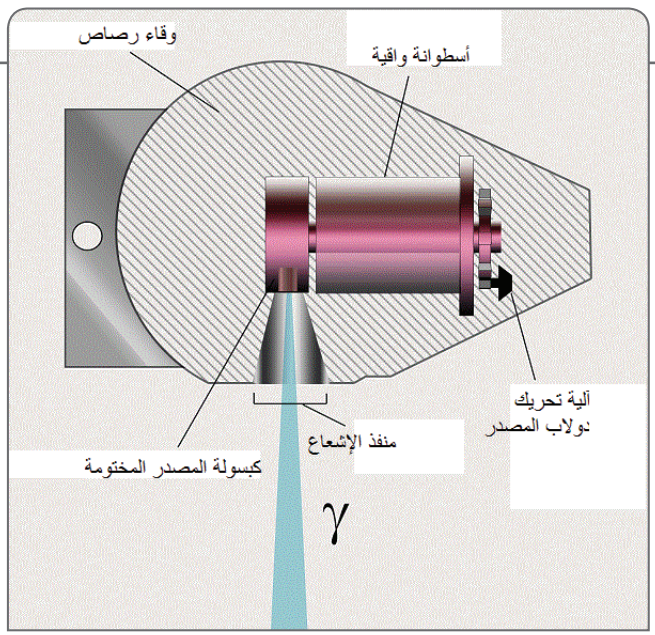
**الشكل 254:**

**رسم تخطيطي لجهاز العلاج بالإشعاع**



**الشكل 255 :**

**المجمع الدوار في وضع التعريض للإشعاع**

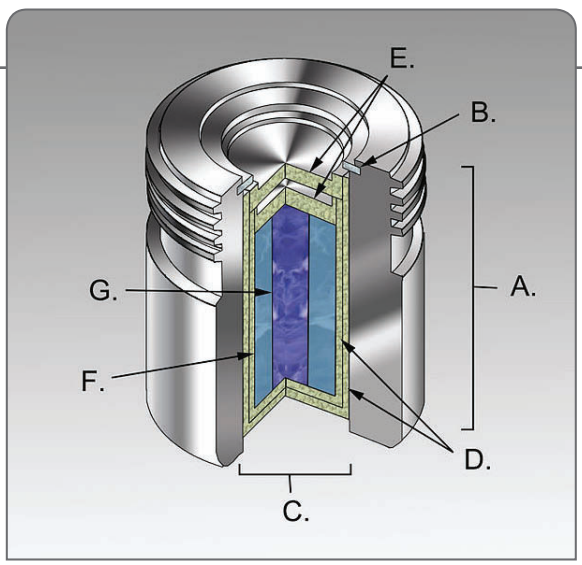



أصيب الرجلان ببعض الحروق التي يسببها التعرض الحاد للإشعاع، لكنهما لم يربطاها بما فعلاه. عان أيضا من القيء لعدة أيام، لكنهما اعتقدا أن سبب ذلك شيء أكلاه. في اليوم التالي، أصيب دبليو پي بالإسهال وشعر بالدوخة، كما تورمت إحدى يداه. في 15 سبتمبر، ذهب دبليو بي إلى المستوصف، حيث شخص مرضه على أنه حساسية تجاه شيء أكله، ونصح بالراحة في المنزل.

عمل ار ايه من وقت لآخر على تفكيك المجمع الدوار. خرم منفذ المصدر المشع بالمفك أثناء ذلك، وأخرج بعضاً من كلوريد السيزيوم المشع. نجح أخيراً في تفكيكه في 18 ديسمبر، وباع الرجلان ما لديهما إلى أحد تجار الخردة مقابل ما يعادل 25 دولاراً.

ذهب تاجر الخردة في المساء إلى المرأب الذي وضعت فيه القطع المشتراة، ولاحظ التوهج الأزرق من كبسولة السيزيوم (الشكل 256). أعجب بهذا التوهج، فأخذ الكبسولة إلى منزله، مما أدى إلى تعرض التاجر وزوجته عن قرب إلى السيزيوم المشع. خلال الأيام الثلاثة التالية، دعا التاجر الأقارب، الجيران، والمعارف إلى منزله لرؤية الكبسولة العجيبة.

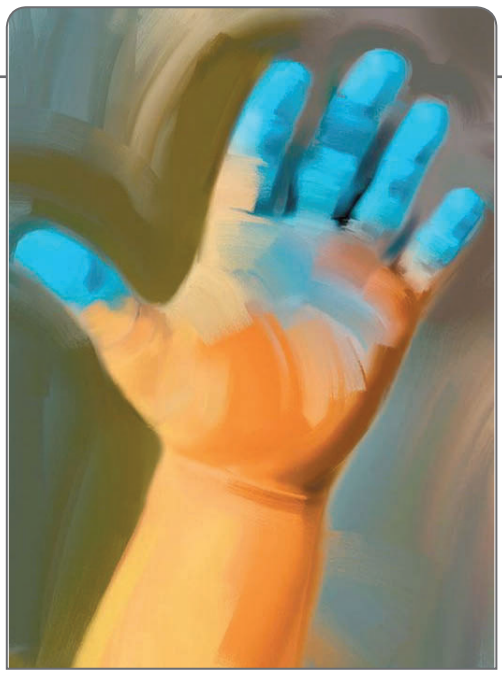
**الشكل 256: كبسولة السيزيوم- 137**




في 21 سبتمبر، قام تاجر الخردة وصديق له بتفتيت بعضا من المادة الزرقاء المتوهجة، وتوزيعها على الأقارب. استخدم بعضهم كلوريد السيزيوم المشع في التزيين مثل البودرة المستعملة في المهرجانات (الشكل 257).

في الفترة من 21 - 23 سبتمبر، عانت زوجة التاجر من القيء والإسهال، فذهبت إلى مستشفى "ساو لوكاس Sao Lucas" لتلقي العلاج. شخص الطبيب حالتها، كما حدث مع دبليو پي، على أنها حساسية تجاه شيء أكلته، ونصحها بالراحة في المنزل.

**الشكل 257: تعبيرفني عن الواقعة**



في 24 سبتمبر، باع التاجر بقايا المجمع الدوار إلى ساحة خردة أخرى.

بحلول 28 سبتمبر، مرض عدد ملحوظ من الناس الذين تعاملوا مع تلك البودرة الزرقاء. اقتنعت زوجة التاجر أن هذه البودرة كانت السبب. جمعت في شنطة، بمساعدة أحد العاملين عند زوجها، ما تبقى من الخردة المرضة، وذهبا بها إلى الرقابة الصحية (Vigilância Sanitária). وضعت الزوجة الشنطة على مكتب الدكتور "بي أم P M" قائلة، "إنها تقتل أسرتي." ترك د بي أم الشنطة لبعض الوقت على مكتبه، لكنه نقلها إلى فناء المؤسسة، وتركها على مقعد هناك بعدما تسرب القلق إلى قلبه.

أرسلت الزوجة والعامل إلى إحدى الوحدات الصحية لتلقي العلاج. شخصت حالتهما هناك على أنها إصابة بمرض استوائي، وحولا إلى "مستشفى الأمراض

الاستوائية Tropical Disease Hospital". تواجد بتلك المستشفى عدة أشخاص آخرون ممن تعرضوا للخردة المشعة نفسها وعُدوا مصابين بمرض استوائي.

شك أحد أطباء المستشفى، الدكتور "ار پي R P"، في أن تكون حروق الجلد بالمرضى بسبب التعرض للإشعاع. اتصل بزميل له، الدكتور "ايه أم"، كان يعمل أيضا كمشرف على "مركز معلومات السموم Toxicological Information Centre". سبق أن تلقى د ايه أم مكالمة من د پي أم (مؤسسة الرقابة الصحية) حول الشنطة المريبة. قرر الطبيبان بعد إعادة فحصهما للمرضى أن الأمر يحتاج لمزيد من التحري، فاتصلا بالدكتور "جيه پي J P" بـ "قسم البيئة لولاية جوياس Department of the Environment of Goias State". اقترح الأخير أن يقوم أحد الفيزيائيين الطبيين بفحص تلك الشنطة المريبة. كان أحد هؤلاء بالمصادفة في زيارة إلى جويانيا، وكان د جيه بي يعرفه.

**تسارعت الأحداث في اليوم التالي (29 سبتمبر). سنلخصها فيما يلي على مدار الساعة:**

## 8:00

أمكن الاتصال بالفيزيائي الطبي ("دبليو أف W F")، والذي وافق على فحص الشنطة. ذهب دبليو أف إلى مكتب الوكالة الحكومية المسؤولة عن التنقيب عن اليورانيوم (NUCLEBRAS) ليستعير منه أحد أجهزة قياس الإشعاع. استطاع بعد لأي أن يحصل على جهاز يقيس معدل الجرعة في المدى من 0.02 إلى 30 μچي/ساعة (المناسب للقياسات الجيولوجية)، وتوجه بالجهاز على الفور إلى مؤسسة الرقابة الصحية. فتح الفيزيائي الطبي الجهاز وهو مازال بعيدا عن المؤسسة، ليتفاجأ بمؤشر الجهاز يقفز على الفور إلى نهاية التدريج. اعتقد الخبير أن الجهاز خَرِب، فعاد إلى مكتب الوكالة وجلب جهاز بديل.

## 10:20

شغل دبليو أف الجهاز البديل فور مغادرته المكتب، وذهب من جديد إلى الموقع. أدرك عند وصوله هناك وجود مصدر قوي للإشعاع. في هذه الأثناء، استدعى د پي أم (في مؤسسة الرقابة الصحية) المطافئ بعدما تزايد قلقه من تواجد الشنطة المشبوهة في الجوار. وصل دبليو أف في وقته قبيل أن يقوم الإطفائيّون بالتقاط الشنطة المشعة وإلقائها بالنهر.

## 11:00

أقنع دبليو أف المسؤولون بإخلاء المؤسسة. أشرف ضباط الشرطة والإطفاء على ذلك، ومنعوا الوصول إلى الموقع.

## 12:00

ذهب د پي أم مع دبليو أف إلى ساحة الخردة الأولى، فوجدوا مستويات عالية من الإشعاع. أقنعا بصعوبة صاحب الساحة وجيرانه بإخلاء المكان.

## 13:00

ذهب دبليو أف مع آخرين إلى مكتب وزير صحة الولاية لاطلاعه على الأمر الخطير. تشكك المسؤولون هناك—كما هو متوقع—في الرواية. بعد إصرار من دبليو أف، سمحوا له بمقابلة الوزير واطلاعه على خطورة الوضع.

## 15:00

أبلغ الأمر إلى المسؤول عن الطوارئ النووية، مدير "قسم المنشآت النووية" بـ "المفوضية الوطنية للطاقة النووية National Nuclear Energy Commission (CNEN)". اقترح هذا المسؤول الاتصال بالفيزيائي الطبي في المركز الطبي الخاص (صاحب جهاز العلاج بالإشعاع)، لمعرفة طبيعة الحادث والاستعانة بالأجهزة التي لديه.

## 20:00 - 16:00

**اتخذت عدة إجراءات في الوقت نفسه تقريبا:**

- أبلغ مستشفى الأمراض الاستوائية أن لديه بعض المرضى الملوثين بالإشعاع.
- وضعت في حالة التأهب عناصر قوات الحماية المدنية (الشرطة، الإطفاء، الإسعاف، والمستشفيات).
- بناء على أمر من وزير صحة الولاية، وضعت الخطط لاستقبال الأشخاص الملوثين بالإشعاع في استاد المدينة. عرفت وسائل الإعلام بالحادث.

## 22:00

شكل فريق لرصد المناطق الملوثة بالسيزيوم-137. قام فريق الرصد باستجواب المتورطين في الحادث، تحديد بؤر التلوث، وإجلاء الأشخاص الملوثين من المناطق الملوثة.

في ليلة 29 - 30 سبتمبر، جرى تحديد 22 شخصا من الملوثين بالمادة المشعة وعزلهم في خيام بعيدا عن الاخرين. جرى الفرز على أساس مستويات التلوث والأعراض المرضية.

### • عواقب الحادثة

بينت الفحوص انتشار المواد المشعة على مساحات كبيرة بفعل الريح والمطر. رصد بعض التلوث بالسيزيوم-137 على بعد 100 كيلومتر من جويانيا، ربما عن طريق المتنقلين من وإلى العاصمة.[1]

فُحص 122,800 فرد للتلوث بالإشعاع (الشكل 258). وُجد أن 239 فردا

(1) أنظر المرجع التالي: Amaral et al. (1991).

تعرضوا للإشعاع خارجيا و129 على الأقل داخليا (من خلال استنشاق البودرة المشعة أو/وابتلاعها). تراوحت الجرعة المكافئة التي تعرضوا لها ما بين عدة ملي-سيفرات إلى سبعة سيفرات.[1]

أرسل 49 شخصا إلى المستشفى. احتاج 21 منهم إلى العناية الطبية المركزة. حاول الأطباء تسريع تخلص جسم المريض من السيزيوم-137 عن طريق دفع الجسم إلى التعرق وإعطاء المرضى "أزرق بروسيا Prussian Blue" ومدرات البول. مات أربعة مرضى، من بينهم زوجة تاجر الخردة وبنت أخيه، التي تناولت كميات صغيرة من بودرة السيزيوم (تعرضت لجرعة مقدارها 6 **سڤ**). وجب عزل كفن البنت الصغيرة بالرصاص والخرسانة.

**الشكل 258:**

**فحص التلوث بالإشعاع بعد حادثة جويانيا**

(1) لنتذكر أن الجرعة الأعلى من 1سڤ يمكن أن تسبب مرض الإشعاع الحاد، 5 سڤ تؤدي إلى وفاة نصف المرضى، و10 سڤ تعد مميتة.

أثارت الفزع بين سكان جويانيا الحكايات التي نشرتها وسائل الإعلام عن الحادثة، وهرع الألاف إلى غرف الطوارئ في المستشفيات مصابين بأعراض نفس-جسمية psychosomatic.

بدأت إجراءات إزالة التلوث في نوفمبر 1987. اشتملت هذه الإجراءات على هدم منازل، إزالة التلوث من شوارع وميادين كاملة، إزالة التربة، وتغطية الأرض بالخرسانة لعزل الإشعاع المتبقي (الشكل 259 والشكل 260).

**الشكل 259:**

**هدم أحد المنازل الملوثة بالمادة المشعة**

استطاعت فرق إزالة التلوث بصعوبة بالغة استعادة نحو 87 % من السيزيوم المنثور. بلغ حجم النفايات الناتجة 3500 متر مكعب. يفترض الحفاظ على تخزين النفايات الملوثة داخل حاويات من الرصاص حتى أكثر من 80 عاما (المدة المطلوبة كي يمر على السيزيوم-137 ستة أعمار نصفية).

**الشكل 260:**

**ساحة الخردة التي احتوت على كبسولة السيزيوم بعد تغطيتها بالخرسانة**

**المصور:** Ycaro Gouveia Ribeiro

أوضحت دراسة أجريت في 2001 بقاء مستويات زائدة من النشاط الإشعاعي حتى 40-10 سم تحت سطح التربة، مما يلقي بظلال من الشك على فعالية مجهودات إزالة التلوث.[1]

- **تقدير الجرعات الإشعاعية في المصابين**

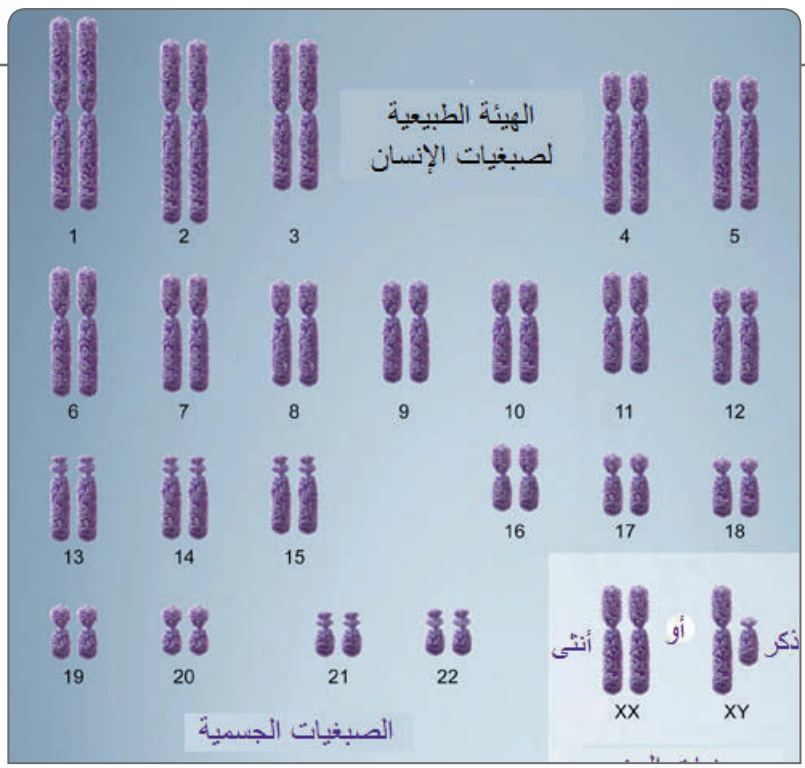
يحمل العاملين في مجال الإشعاع أثناء عملهم مقياس للجرعة الإشعاعية، لمعرفة مقدار الإشعاع الذي تعرضوا له. في حادثة جويانيا، لم يكن الناس الذين تعرضوا للإشعاع يحملون مثل هذه الأجهزة، كيف إذا أمكن تقدير الجرعات التي تعرضوا لها؟ الإجابة هي من خلال *تحليل الصبغيات chromosomes* في خلاياهم.

(1) أنظر المرجع التالي: Facure et al. (2001).

تحتوي خلايا الإنسان، باستثناء الحيوانات المنوية والبويضات، على 23 زوجا من الصبغيات، التي تحمل الصفات الوراثية (الشكل 261). ينتج عن تعرض الإنسان للإشعاع *حدوث تشوهات aberrations* بأشكال هذه الصبغيات (الشكل 262). بدراسة مقدار هذه التشوهات في خلايا الأشخاص المصابين، يمكن تقدير الجرعات الإشعاعية التي تعرضوا لها.

**الشكل 261:**

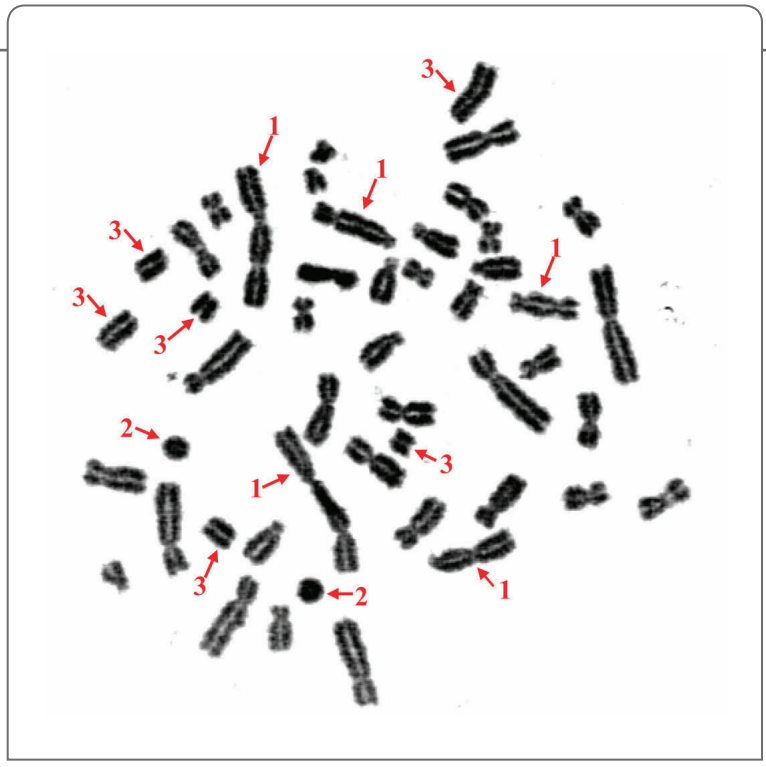
**رسم توضيحي لأشكال صبغيات الإنسان**



**الشكل 262:**

**أمثلة لثلاثة أنواع من تشوه الصبغيات**

**نتيجة التعرض للإشعاع**




- **بعض حوادث الإشعاع في المنطقة العربية**

مع انتشار تطبيقات الإشعاع المتعددة، تقع حوادث الإشعاع في كل مكان من العالم. فيما يلي وصف موجز لبعض حوادث الإشعاع التي شهدتها المنطقة العربية.

## • حادثة 1978 في الجزائر

في مايو 1978، وقع مصدر مشع من الإرديوم-192 كان يستخدم في التصوير الصناعي أثناء نقله في شاحنة. وجد طفلان، عمرهما ثلاث وسبع سنوات، المصدر (قدر نشاطه بـ 0,92 تب‌ك)، واحتفظا به عدة أيام قبل أن يعطياه لجدتهما. احتفظت الجدة بالمصدر المشع في مطبخها، فتعرض أربع نساء أخريات من الأسرة للإشعاع. اكتشف الأطباء تعرض الأسرة للإشعاع فقط بعد 38 يوما من بداية التعرض. ماتت الجدة بعد 53 يوماً بفعل التسمم الإشعاعي، الذي تسبب في حروق خطيرة وفشل التنسج aplasia. تعرض الطفلان إلى جرعات إشعاعية ما بين 1 - 1,4 سڤ على كل الجسم، وجرعات محلية استدعت بتر الأصابع وزراعة الجلد skin grafting. تعرضت النساء الأربعة الأخريات، 20-14 سنة، إلى إصابات إشعاعية متنوعة؛ تعرضت واحدة منهن إلى الإجهاض، وأخرى أصيبت بسرطان الدرقية في 1994 وسرطان الثدي بعد ذلك.

## • حادثة 1984 في المغرب

نشأت هذه الحادثة في موقع للإنشاء حيث كانت مصادر مشعة من الإرديوم-192 تستخدم لفحص اللحامات. انفصل المصدر المشع من قلس الدفع ولم يعاد إلى الحاوية الواقية (آلة التصوير). مع فصل الأنبوب المرشد من آلة التصوير، سقط المصدر المشع على الأرض دون أن يتنبه لذلك العامل المشغل. لاحظ عامل مار القضيب المعدني اللامع وأخذه إلى بيته. مات بسبب ذلك خلال أقل من شهرين ثمانية أشخاص: العامل، كل أفراد أسرته، وبعض الأقارب. ظن الأطباء في البداية أن سبب الوفيات كان تسمما أدى إلى "نزيف رئوي". فقط بعد موت آخر فرد في تلك الأسرة، بدأ الشك في الإشعاع، واستعيد المصدر المشع المسؤول في يونيو 1984.

## • حادثة 2000 في مصر

في يونيو 2000، وجد رجل أحد المصادر المشعة التي تستخدم في التصوير الشعاعي للحام أنابيب الغاز، وأخذه إلى منزله في قرية ميت حلفا (بمحافظة القليوبية، على بعد 20 كيلومترا من القاهرة)، ظناً منه أنه قيم. بعد نحو الشهر، مرض ابنه ذو التسع سنوات ومات. مرض بقية أفراد العائلة (الأب، الأم، وأربعة أطفال آخرين). مات الأب بعد ابنه قبل أن تكتشف السلطات أن العائلة أصيبت بالتسمم الإشعاعي. تعرض نحو 200 شخص من الأصدقاء والجيران لجرعات إشعاعية معتبرة، قبل أن تقوم السلطات باستعادة المصدر المشع.

# إدارة الطوارئ الإشعاعية

# إدارة الطوارئ الإشعاعية

الهدف من إدارة الطوارئ أو الكوارث emergency/disaster management هو تجنب حدوث الكوارث، والتقليل من اضرارها في حال وقوعها. قد تكون الكوارث طبيعية، مثل الزلازل والفيضانات، أو من صنع الإنسان، مثل الانفجارات في مصانع الكيماويات أو غرق ناقلات البترول.

نعرف الآن الاستخدامات المتنوعة للإشعاع والطاقة النووية، وأن الحوادث التي من شأنها تعريض الإنسان والبيئة لجرعات زائدة من الإشعاع لا تقتصر فقط على تلك التي تقع في محطات الطاقة النووية. يستخدم البعض عبارتي "الطوارئ الإشعاعية radiological emergencies" و"الطوارئ النووية nuclear emergencies" كمترادفتين، بينما يفضل المتخصصون في أمن وسلامة محطات الطاقة النووية استخدام عبارة "الطوارئ النووية" للإشارة إلى الحوادث التي تقع في تلك المنشآت. هناك فريق ثالث يقصر استخدام العبارة الأخيرة على التفجيرات النووية (أي استخدام الأسلحة النووية) باعتبار أن الدمار الهائل الذي تخلفه لا يقارن بأضرار الحوادث الإشعاعية الأخرى. على كل حال، **تُنَاقَش حالات الطوارئ الإشعاعية عادة تحت الأقسام التالية:**

- حادثة في محطة طاقة النووية؛
- القنبلة القذرة – جهاز يستخدم المتفجرات التقليدية لنشر مواد مشعة؛
- المصدر اليتيم – حيث يخرج مصدر مشع من تحت الرقابة المفروضة ويعرض الناس للإشعاع بينما هم يمارسون أنشطتهم التقليدية؛
- حادثة صناعية؛
- إعادة دخول قمر اصطناعي نووي؛

- القنبلة الذرية؛
- وحادثة الحسومة.

- **مبـــادئ عـامـــة**

في جميع حالات الطوارئ الإشعاعية، تعتمد حماية العامة على تقليص زمن التعرض، الابتعاد عن المصدر، واستخدام الوقاء، فور وقوع الحدث، وإزالة التلوث الناجم عن الحدث، بعد السيطرة على مصدر الإشعاع.

- **مراحل إدارة الطوارئ**

يقول المثل الشعبي، "هناك وقت للصيد، وهناك وقت لإصلاح الشباك." عملا بهذه الحكمة يقسم المتخصصون عملية إدارة الطوارئ إلى المراحل أو الأطوار التالية: (1) المنع والتخفيف/التلطيف prevention and mitigation؛ (2) التأهب preparedness؛ (3) الاستجابة response؛ و(4) التعافي recovery (الشكل 263).

**الشكل 263: مراحل إدارة الطوارئ**

- **المنع والتلطيف:** تشير هذه المرحلة إلى الإجراءات التي تتخذ من أجل منع الأخطار من التسبب في كوارث، وتخفيف أضرار هذه الكوارث في حال وقوعها. مثال: تزويد المحطات النووية بمولدات احتياطية تعمل بالديزل لإمداد المحطة بالكهرباء الضرورية لسلامة المفاعلات في حال انقطاع خطوط الكهرباء الخارجية.
- **التأهب:** تشمل تجهيز الأنشطة التي سوف تتخذ عند وقوع الكارثة والتدريب على تنفيذها. مثال: التدرب على خطط الإخلاء في حالة حدوث تسرب إشعاعي كبير من محطة نووية.
- **الاستجابة:** يجرى خلالها تعبئة خدمات الطوارئ في منطقة الكارثة. مثال: الدفع على وجه السرعة بالإطفائيتين المدربين والمسعفين إلى موقع الحريق في محطة نووية.
- **التعافي:** الهدف منها محاولة إعادة المنطقة المنكوبة إلى حالتها قبل الكارثة. مثال: إزالة التربة السطحية الملوثة بالسقط أو التساقط المشع من حادثة نووية.

**يتضح مما سبق أن إدارة الطوارئ هي عملية مستمرة لا تنتهي.**

- **التـــريـــــاج**

يقصد بـ "التراج triage" في المجال الطبي عملية الفرز السريع للمصابين حسب شدة إصاباتهم وفرصة نجاتهم. كلمة "triage" فرنسية الأصل، وهي مشتقة من الكلمة اللاتينية "tris" التي تعني "ثلاثة". لذلك يمكن تعريبها إلى "التثليث".

التثليث هو إجراء شائع حالياً في مجال العناية الصحية، وبخاصة طب الطوارئ. فالوقت عامل حاسم في حالات الطوارئ. قد يأتي، مثلاً، إلى المستشفى في نفس الوقت شخصاً تبدو عليه أعراض تشبه الإنفلونزا وآخر ينزف بشدة. سوف

يعطي المسعفون الأولوية للمريض الذي ينزف لأن حالته أكثر خطورة، وقد تتسبب في وفاته إذا لم يعالج بسرعة. أما المريض الآخر، فيمكنه الانتظار دون مخاطرة معتبرة على حياته.

الهدف الرئيس من التثليث هو إنقاذ أكبر عدد ممكن من الحيوات، لكنه يتطلب أيضاً اتخاذ القرارات القاسية إنسانيا، مثل ترك الحالات الميؤوس منها تواجه وحدها مصيرها المحتوم.

يلجأ الأطباء والمسعفون إلى التثليث في أوقات الطوارئ حين تتجاوز أعداد المصابين سعة مرافق الرعاية الطبية وأجهزتها. لقد أصبح التثليث إجراء مألوفاً لعموم الناس بسبب جائحة كورونا التي هزت العالم.

يرجع المؤرخون بداية ممارسة التثليث الطبي إلى زمن حروب نابليون، وينسب الفضل في ذلك إلى الطبيب الفرنسي "دومينيك-جان لاري Dominique-Jean Larrey" (1766 - 1842؛ الشكل 264).[1] كان البارون لاري (Baron Larrey) الجراح المسؤول عن رعاية حرس نابليون الإمبراطوري طبياً في أوائل

**الشكل 264:**
**الجراح الفرنسي**
**دومينيك-جان لاري**

(1) لم يستخدم مصطلح الترياج بمعناه الطبي المعاصر إلا في الحرب العالمية الأولى.

القرن التاسع عشر. كان دكتور لاري قد لاحظ أن بعض الرجال الذين يموتون في المعارك كان يمكن انقاذهم لو كانت إصاباتهم قد عولجت على وجه السرعة.

كان الهدف من فرز المصابين قبل مبادرة لاري الإنسانية هو إعادة الجنود ذي الإصابات البسيطة سريعاً إلى أرض المعركة. في ذلك الوقت، كانت الجيوش المتقاتلة تتشابك بالأسلحة وجهاً لوجه مع بعضها البعض، وكانت الغلبة عادة من نصيب القوة الأكبر.

حول لاري العربات إلى مستشفيات متنقلة عرفت باسم "الإسعاف الطائر Ambulance Volante" (الشكل 265)، وكان يتقدم هو وزملاؤه أثناء المعارك وينتشل المصابين ممن يمكن إنقاذ حياتهم بالجراحات الطبية السريعة (مثل البتر). كان المصاب (blessé) ينقل إلى أولى ما كان يسمى بـ "صالات التثليث Salles de Triage"، حيث ترسله نظرة فاحصة من الجراح إلى واحدة من صالتي التثليث الأخريين: "المصابون الصغار Petits Blessés" و"المصابون الكبار Grands Blessés".[1]

**الشكل 265: رسم لعربات الإسعاف الطائر زمن نابليون**

(1) أنظر Hutchinson (1918). ربما كانت هذه الصالات الثلاثة وراء تسمية عملية الفرز الطبي بالتثليث.

## • خطورة الوقائع النووية والإشعاعية

نتيجة لكارثة تشيرنوبيل (1986)، ومن قبلها حادثة ثري مايل أيلاند (1979)، سعت الوكالة الدولية للطاقة الذرية إلى وضع مقياس دولي لخطورة الوقائع النووية. صدر هذا المقياس الدولي في 1990، بالتعاون مع "وكالة الطاقة النووية Nuclear Energy Agency" لـ "منظمة التعاون والتنمية الاقتصاديتين Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)".[1] في الأصل، وضع هذا المقياس من أجل تصنيف الوقائع في محطات الطاقة النووية، ثم وُسع ليشمل جميع منشآت الطاقة النووية المدنية. عدل المقياس ثانية ليُطبَق في التواصل حول درجة خطورة كل الأحداث المتعلقة باستخدام، تخزين، ونقل المواد المشعة ومصادر الإشعاع. الاسم الحالي لهذا المقياس هو "المقياس الدولي للوقائع النووية والإشعاعية International Nuclear and Radiological Event Scale (INES)".

يقسم مقياس INES الوقائع النووية والإشعاعية في سبعة مستويات حسب درجة خطورتها (الشكل 266). الواقعة في مستوى ما من هذه المستويات السبع تتساوى في خطورتها مع 10 اضعاف خطورة الواقعة في المستوى الأدنى.[2] تقيم خطورة الواقعة النووية أو الإشعاعية وفقا لأثرها على (1) الناس والبيئة؛ (2) الحواجز والرقابة الإشعاعية؛ و(3) مبدأ الحماية في العمق.

(1) تأسست هذه المنظمة في 1961، ومقرها باريس، من أجل تحفيز التقدم الاقتصادي والتجارة العالمية. بلغ عدد أعضاء المنظمة حاليا 37 دولة (أحدثها كولومبيا، وإحداها إسرائيل). لا تضم المنظمة في عضويتها أي دولة عربية وسوى دولة إسلامية واحدة، هي تركيا. كان من حظ الكاتب المشاركة في إحدى مؤتمرات المنظمة حول "الجوانب الاقتصادية لضمان الانصياع للقوانين البيئية Economic Aspects of Environmental Compliance Assurance" في ديسمبر 2004.

(2) يطلق المتخصصون على مثل هذه المقاييس وصف المقاييس اللوغاريتمية *logarithmic scales*.

**الشكل 266:**

**المقياس الدولي لخطورة الوقائع الإشعاعية**

توضع الأحداث ذات الخطورة الأدنى في المستويات 1 - 3، ويطلق عليها اسم الوقائع *incidents*. في حين تصنف الأحداث ذات الخطورة الأعلى ضمن المستويات 4 - 7، وتعرف باسم *الحوادث accidents*. يشار إلى الأحداث التي لا تؤثر على السلامة معنويا بأنها "أسفل المقياس Below Scale" أو من "المستوى صفر Level 0". **فيما يلي وصف موجز للمستويات الأربع الأخطر:**

- الحوادث الكبرى Major Accidents (المستوى 7): هي الحوادث النووية التي ينتج عنها تسرب كبير للمواد المشعة، وتتسبب في تأثيرات صحية واسعة النطاق.
- الحوادث الخطيرة Serious Accidents (المستوى 6): تلك الحوادث التي ينتج عنها تسرب معتبر للمواد المشعة.
- الحوادث ذات العواقب الأوسع Accidents with Wider Consequences (المستوى 5): تسبب هذه الحوادث تسرب محدود من المواد المشعة، وينتج عنها عدة وفيات على الأقل من الإشعاع.

- الحوادث ذات العواقب المحلية Accidents with Local Consequences (المستوى 4): الحوادث التي يصاحبها تسرب صغير من المواد المشعة وحدوث وفاة واحدة على الأقل من الإشعاع.

تحث الوكالة الدولية الدول الأعضاء على مشاركة المعلومات حول الوقائع من المستوى 2 فما فوق وتلك التي تنال الاهتمام العام عالميا، وذلك من خلال المنظومة التالية على الوب: IAEA-supported Nuclear Events Web-based System (NEWS).

في 2011، نشرت جريدة "الجارديان" قائمة بـ 33 واقعة نووية خطيرة في محطات الطاقة النووية. لقد وضعت حادثتي تشيرنوبيل وفوكوشيما الشهيرتين في المستوى الأخطر (المستوى 7) من المقياس الدولي، بسبب التسرب الإشعاعي المعنوي الذي نتج عنهما.

## • حادثة في محطة طاقة نووية

سنناقش الآن التأهب للطوارئ في محطات الطاقة النووية وفقا للنظام الأمريكي.[1] اخترنا النظام الأمريكي لسببين: (1) أغلب محطات الطاقة النووية العاملة في الولايات المتحدة، إن لم يكن جميعها، هي من طراز مفاعلات الماء الخفيف المفضلة حاليا في العالم؛ (2) تتوفر المعلومات عن منظومة التأهب للطوارئ في المحطات الأمريكية على الإنترنت باللغة الإنجليزية.

هناك خطوتان اساسيتان في التأهب للطوارئ في المحطة النووية. أولا، اتخاذ كل ما يلزم للحفاظ على سلامة المحطة النووية. ثانيا، تحديد مقدما ما يجب فعله في حال وقوع طارئ يتطلب الاستجابة السريعة.

(1) تخصص بعض الدول، مثل روسيا الاتحادية، وزارة كاملة لإدارة الطوارئ.

تفرض القوانين الأمريكية على كل محطة نووية أن تعد خطط للطوارئ لضمان اتخاذ التدابير الوقائية المناسبة عند وقوع حادثة بالمحطة، وأن تتدرب على تنفيذها. تتضمن هذه الخطط التدابير اللازمة "في الموقع onsite" و"خارج الموقع offsite".

تتشارك الإشراف على التأهب للطوارئ الإشعاعية كل من "مفوضية الرقابة النووية Nuclear Regulatory Commission (NRC)" و"الوكالة الفيدرالية لإدارة الطوارئ Federal Emergency Management Agency (FEMA)".

لا بد أن تحصل المفوضية قبل أن تسمح بتشغيل المحطة النووية على ضمانات كافية بأن التدابير الوقائية المناسبة سوف تتخذ في حالات الطوارئ الإشعاعية. علاوة على ذلك، يجب على المحطات العاملة ومنظمات الإغاثة المعنية أن تبرهن خلال تدريبات دورية مقيمة على قدرتها على تنفيذ خطط الطوارئ المُحَدَّثة. على المحطة النووية أن تجري تدريباً كاملاً على تنفيذ خطة الطوارئ مرتين على الأقل كل عام. تشارك في التدريب الكامل السلطات الحكومية المختصة. هذا إلى جانب تدريبات إضافية تجريها المحطة بين التدريبات الكاملة. يجرى تحديث خطط الطوارئ بصورة دورية، كما يجب أن تتمتع بالمرونة لتناسب الظروف المتغيرة في أحداث المحطات النووية.

تتولى الوكالة الفيدرالية لإدارة الطوارئ مبدئياً مراجعة وتقييم التأهب للطوارئ خارج الموقع، بينما تراجع مفوضية الرقابة النووية التأهب في الموقع. توصل الوكالة (FEMA) تقييمها وقراراتها إلى المفوضية (NRC). بناء على نتائج التقييم الشامل، تتخذ المفوضية القرارات المناسبة، وهي تملك سلطة إغلاق المحطات التي لا تبرهن على استعدادها الكامل للتعامل المناسب مع حالات الطوارئ.

جرى تطوير قواعد التأهب للطوارئ الإشعاعية في عام 1978 من قبل لجنة

فيدرالية شكلت من أجل هذا الغرض. ضمت هذه اللجنة ممثلين من "NRC"، "FEMA"، وكالة حماية البيئة Environmental Protection Agency"، بالإضافة المتطوعين و"المنجدين الأوائل first responders".

- **نطاقات التخطيط للطوارئ في المحطة النووية**

استنتجت اللجنة الفيدرالية السابق ذكرها أن المقيمين فيما بعد 10 أميال من موقع المحطة النووية ليسوا عرضة لمخاطر التعرض المباشر للمواد المشعة التي قد تتسرب في الجو خلال الحوادث في المحطة. بناء على ذلك، حددت مفوضية الرقابة النووية نطاقين رئيسين لإدارة الطوارئ في المحطات النووية: نطاق العشرة أميال، ونطاق الخمسين ميلا (الشكل 267).

يمتد النطاق الأول بنصف قطر 10 أميال حول موقع المحطة. ينصب الاهتمام الرئيس للمسؤولين عن إدارة الطوارئ على الحد من تعرض العامة ضمن هذا النطاق للإشعاع بسبب استنشاق المواد المشعة المحمولة في الهواء.

يضم النطاق الثاني المناطق الواقعة ضمن دائرة نصف قطرها 50 ميلا حول المحطة. تتركز التدابير الوقائية ضمن هذا النطاق على منع تناول المياه، الأغذية، والمشروبات الملوثة بالمواد المشعة.

الهدف من هذا التقسيم هو بالطبع تركيز مجهودات الحماية على المقيمين في المناطق الأكثر تعرضا للتلوث الإشعاعي.

- **تصنيف الطوارئ في المحطة النووية**

لضمان اتخاذ التدابير الوقائية المناسبة دون تأخير، وضعت مفوضية الرقابة النووية مقياسا موحدا لتصنيف الطوارئ المختلفة التي قد تحدث بالمحطة النووية. يصنف هذا المقياس الطوارئ المحتملة حسب خطورتها في أربعة مستويات.

- "إشعار بحدث غير معتاد Notification of Unusual Event": مستوى الخطورة الأدنى، يعني أن حدث طفيف قد وقع لكن لا يتوقع حدوث تسرب من المواد المشعة خارج المحطة يتطلب التدخل لحماية المقيمين بجوار المحطة.
- "إنذار Alert": يعني انخفاض فعلي أو مرتقب في مستوى سلامة المحطة أو حدث أمني يمكن أن يهدد سلامة العاملين أو يتلف معدات المحطة. لا يرتقب سوى تسرب ضئيل للإشعاع.
- "طارئ في نطاق الموقع Site Area Emergency": تعطل فعلي أو مرتقب في معدات هامة للسلامة. يرتقب تسرب إشعاعي طفيف لا يتعدى الحدود الموضوعة من قبل وكالة الحماية البيئية (EPA).[1]
- "طارئ عام General Emergency": هو المستوى الأخطر. يعني وقوع تلف فعلي أو وشيك في قلب المفاعل من المرتقب أن يؤدي إلى تسرب إشعاعي خارج المحطة يتعدى الحدود التي وضعتها وكالة الحماية البيئية.
- **لم تعلن حالة "الطارئ العام" في الولايات المتحدة إلا مرة واحدة** بسبب حادثة 1979 الشهيرة في محطة "ثري مايل أيلاند Three Mile Island" (ولاية بنسيلفانيا Pennsylvania State). أعلنت حالة "طارئ في نطاق الموقع" بضع مرات، كانت أحدثها في 1996.

يفرض القانون على الشركة المشغلة للمحطة النووية أن تقوم بتصنيف الأحداث التي قد تقع بها وفقا للمقياس السابق ذكره، وأن تبلغ بها المنظمات الحكومية المسؤولة في خلال 15 دقيقة من اكتشاف الحدث. يلزم القانون أيضاً المسؤولين بالمحطة باقتراح تدابير الحماية المناسبة على تلك المنظمات الحكومية. تفرض القواعد المتبعة أن تضع كل محطة نووية 200 موظف على الأقل تحت الطلب في حالة الطوارئ.

(1) المعلومات عن هذه الحدود متاحة على موقع الوكالة على الإنترنت: www.epa.gov.

تتأكد المنظمات الحكومية المسؤولة عن إدارة الطوارئ النووية من خطورة الحدث وتحدد التدابير اللازمة لحماية المقيمين في نطاق العشرة أميال من المحطة. يجب على هذه المنظمات أن تكون قادرة على تفعيل منظومة الإشعار في خلال 15 دقيقة من علمها بالحالة.

- **تدابيـــر الحمايـــة**

تتضمن تدابير الحماية التي تتخذ في حالة الطوارئ النووية الإجلاء evacuation، الاحتماء sheltering، والاستخدام الوقائي ليوديد البوتاسيوم potassium iodide (PI).

- **الإخـــلاء والاحتمـــاء**

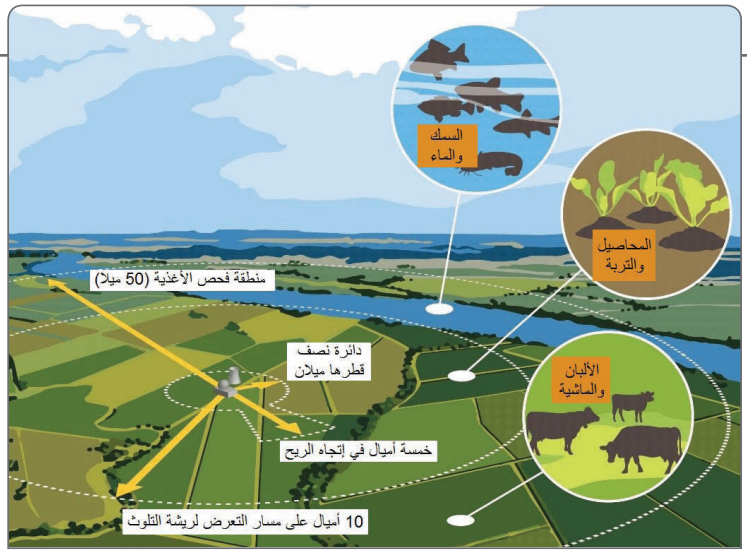
الإخلاء (أو الإجلاء) هو إبعاد الناس عن المحطة النووية المنكوبة لتقليل تعرضهم للإشعاع، وهو الإجراء المفضل تحت أغلب الظروف.

في اغلب حالات الطوارئ النووية، تتحرك المواد المشعة المتسربة المحمولة في الهواء في اتجاه الريح السائد وقت الحدث. يتوسع "عامود التلوث pollution plume" مع البعد عن المصدر، ويخف تركيز المواد المشعة فيه.

لذلك، يجرى الإخلاء في حالة "الطارئ العام" دائما للمنطقة حول المحطة بمسافة ميلين بالإضافة إلى المنطقة التي تنتشر فوقها سحابة التلوث حتى مسافة خمسة أميال (تأخذ منطقة الإخلاء شكل فتحة المفتاح). غالبا ما يطلب من بقية المقيمين في نطاق العشرة أميال الاحتماء داخل المنازل والأبنية الأخرى ومتابعة إشعارات الطوارئ.

**الشكل 267:**

**نطاقات الطوارئ حول محطة الطاقة النووية**




الاحتماء بالمباني يمكن أن يخفض كثيراً من جرعة الإشعاع التي يتعرض لها الشخص. قد يكتفى بالاحتماء في بعض حالات الطوارئ، على سبيل المثال إذا كانت المواد المشعة المتسربة قصيرة العمر أو تحت تحكم المسؤولين عن تشغيل المحطة.

- **الاستخدام الوقائي لحبوب اليود**

يحتاج جسم الإنسان كميات ضئيلة من اليود. اليود مهم لتكوين هرمونات الدرقية thyroid hormones. يحصل الإنسان على ما يحتاجه من عنصر اليود من بعض الأغذية، مثل الأسماك ومنتجات الألبان. يتراكم اليود الذي يتناوله الإنسان في الغدة الدرقية thyroid gland. يؤدي عوز اليود إلى مشاكل صحية خطيرة (مثل الإعاقات الذهنية والجسدية)، وقد يسبب تضخم الغدة الدرقية، أو ما يعرف باسم "الدراق goiter".[1]

(1) لهذا السبب، تضيف بعض الشركات اليود إلى ملح الطعام (كلوريد الصوديوم)، يعرف هذا الملح باسم "الملح المُيَّود iodized salt".

يمكن أن يتسرب اليود المشع إلى الجو أثناء الحادثة في المحطة النووية. إذا تعرض الإنسان لهذا اليود، فإنه يتراكم، مثل نظيره المستقر، في الغدة الدرقية. يزيد تواجد اليود المشع في الغدة الدرقية من مخاطر الإصابة بالأضرار الحادة والمزمنة التالية: التهاب الدرقية thyroiditis (في التركيزات العالية)، خمول الدرقية hypothyroidism، عقيدات الدرقية thyroid nodules، وسرطان الدرقية thyroid cancer (في المدى الطويل).

إذا تناول الإنسان حبوب يوديد البوتاسيوم potassium iodide (PI) بالجرعة المضبوطة وفي الوقت المناسب (قبل التعرض لليود المشع المتسرب)، فإن الغدة الدرقية تتشبع به فلا يجد اليود المشع مكانا له فيها (الشكل 268).[1] لا تفيد حبوب يوديد البوتاسيوم في الحماية من المواد المشعة الأخرى ولا في التعرض الخارجي لليود المشع.

**الشكل 268:**

**حبوب يوديد البوتاسيوم الوقائية**

(1) يوديد البوتاسيوم هو ملح، يشبه ملح الطعام. يضاف يوديد البوتاسيوم وأملاح يود أخرى إلى "ملح الطعام المِيَوَّد iodized table salt".

يجب على الشركة المشغلة للمحطة أن توصى باستخدام يوديد البوتاسيوم عند الحاجة، لكن السلطات الحكومية هي من تقرر التخزين الاحتياطي له واستخدامه.

- **مسؤولية مفوضية الرقابة النووية أثناء الطوارئ**

تتحمل مفوضية الرقابة النووية مسؤولية الإشراف على سلامة محطات الطاقة النووية في الولايات المتحدة. تقيم المفوضية أداء المحطة النووية من خلال التفتيش المتكرر وتحليل البيانات الخاصة بـ 18 مؤشرا للأداء. تختص ثلاثة من هذه المؤشرات بالتأهب للطوارئ:

- الأداء المتعلق بالتأهب للطوارئ والتدريب عليه؛
- النسبة المئوية من منسوبي منظمات الإغاثة عند الطوارئ المشاركين في التدريب؛
- وعمل أنظمة التنبيه والإنذار خلال الاختبارات الدورية.

ينوب كل محطة نووية في السنة ما لا يقل عن 2500 ساعة من التفتيش من قبل المفوضية، جزء منها يخصص لمراجعة توافق المنشأة مع القوانين الخاصة بالتأهب للطوارئ. تنشر نتائج عمليات التفتيش على موقع المفوضية على الإنترنت: www.nrc.gov.

تدير المفوضية (NRC) مركزا للاستجابة للطوارئ يعمل 24/7. على رئيس المفوضية أو ما ينوب عنه أن يكون تحت الطلب في جميع الأوقات لتنسيق استجابة المفوضية. عند الحاجة، توضع الموارد الفيدرالية في خدمة منظمات الإغاثة المحلية.

الجدير بالذكر، أن المسؤولين الحكوميين استفادوا من خطط الاستجابة للطوارئ النووية في حالات الطوارئ الأخرى.

- **التأهب للطوارئ النووية أثناء الكوارث الأخرى**

قد تتسبب بعض الكوارث الطبيعية، مثل الزلازل وتبعاتها، في وقوع الحوادث بالمحطات النووية، مثلما حدث في محطة فوكوشيما اليابانية في 2011. كما قد تتسبب الكوارث البيئية، مثل الأوبئة، والهجمات الإرهابية في تعقيد عمليات الاستجابة للطوارئ النووية.

تبنى المحطات النووية بحيث تتحمل الكوارث والهجمات المرتقبة. لكن، وكمال يقال دائما، الحذر لا يمنع القدر، والحوادث تقع. هذا بالطبع لا يعني بتاتا عدم جدوى التدابير الاحترازية. على سبيل المثال، أثر "إعصار كاترينا Katrina Hurricane" في 2005 بشكل مباشر على محطتين نوويتين في "ولاية لويزيانا Louisiana" وواحدة في "ولاية ميسيسبي Mississippi"، ولم تصب أي واحدة منها بضرر خطير.

يجدر بالذكر هنا، أن إنتاج الكهرباء من المحطات النووية لا يتأثر بتوقف طرق النقل أثناء الكوارث والحوادث الكبرى، على عكس الحال في محطات الكهرباء التقليدية، لإن إعادة تزويد المحطات النووية بالوقود يجرى على فترات طويلة (18 - 24 شهراً).

دفع انشغال العالم بجائحة كورونا الوكالة الدولية للطاقة الذرية إلى تنسيق تمرينا دوليا تحت اسم "ConvEx-26" في الفترة من 24 إلى 26 مارس 2020، بهدف تدريب المشاركين من الدول والجهات الدولية على الاستعداد للطوارئ النووية المصاحبة لكوارث طبيعية، أوبئة، أو أزمات كبرى أخرى. شارك في هذا التمرين 35 دولة واثنان من المراكز الإقليمية المتخصصة للمنظمة العالمية للأرصاد الجوية World Meteorological Organization.

## • القنبلـة القــذرة

"القنبلة القذرة dirty bomb" هي جهاز يستخدم المتفجرات التقليدية لنشر المواد المشعة. لذلك تعد إحدى أجهزة نثر الإشعاع radiological dispersal devices (RDDs)".[1] تبنى القنبلة القذرة بوضع بعض المواد المشعة مع المواد المتفجرة (مثل مادة TNT). الفكرة من تفجير هذه القنبلة هي نشر المواد المشعة مع عصف الانفجار، مما يؤدي إلى نشر الخوف والذعر بين المواطنين، تَعَسُّر عمليات النجدة والإنقاذ، وزيادة حجم الأضرار الناجمة (الشكل 269). لذلك، يطلق على القنبلة القذرة كناية وصف "سلاح الإزعاج الشامل weapon of mass disruption". من المهم أن نلاحظ هنا أن القنبلة القذرة ليست بأي حال قنبلة ذرية.

**الشكل 269:**
**فكرة عمل القنبلة القذرة**

(1) يستخدم البعض المصطلحين كمترادفتين.

لم تفجر أي قنبلة قذرة من قبل، لكن الخبراء الغربيون يضعون خطط الاستجابة لمثل هذه الحوادث تحسبا لتمكن إحدى الجماعات المعادية من صنع قنبلة قذرة وتفجيرها.

لصنع قنبلة قذرة وتفجيرها، يحتاج الفاعل الحصول على المواد، المعدات، والمعرفة الفنية اللازمة (مواد متفجرة، مواد مشعة، ووسيلة تفجير)، دون أن يلفت انتباه السلطات الأمنية المختصة. تستخدم المواد المشعة في منشآت كثيرة متنوعة (المستشفيات، المصانع، مراكز الأبحاث العلمية، وغيرها). يصعب الحصول على هذه المواد لأنها تخضع عادة لرقابة صارمة. كما أنها توجد عادة في أشكال يصعب انتشارها (معدنية، خزفية، أو داخل كبسولات مغلقة). لا يستطيع المخربون العبث بمصادر المواد المشعة القوية دون أن يصابوا سريعاً بالتسمم الإشعاعي جراء التعرض عن قرب للأشعة.

- **التأثيرات الناجمة عن تفجير القنابل القذرة**

**سوف ينجم عن تفجير قنبلة قذرة في مكان عام العواقب الرئيسة التالية:**

- الأضرار المعروفة من التفجيرات التقليدية، بما فيها من إصابات ووفيات بشرية؛
- التأثيرات النفسية على الأفراد بسبب الخوف الشائع من الإشعاع؛
- والتكاليف الاقتصادية، خاصة بسبب نقل الأفراد وتنظيف المناطق الملوثة بالمواد المشعة.

الهدف الأساسي من استخدام قنبلة قذرة هو نشر الخوف والذعر بين الناس. من غير المتوقع أن تسبب المواد المشعة المستعملة في القنبلة القذرة تعرضاً خطيراً للإشعاع، اللهم إلا في الناس القريبين جداً من موقع التفجير، سيتسبب التفجير نفسه في ضرر صحي أكبر من انتثار المواد المشعة.

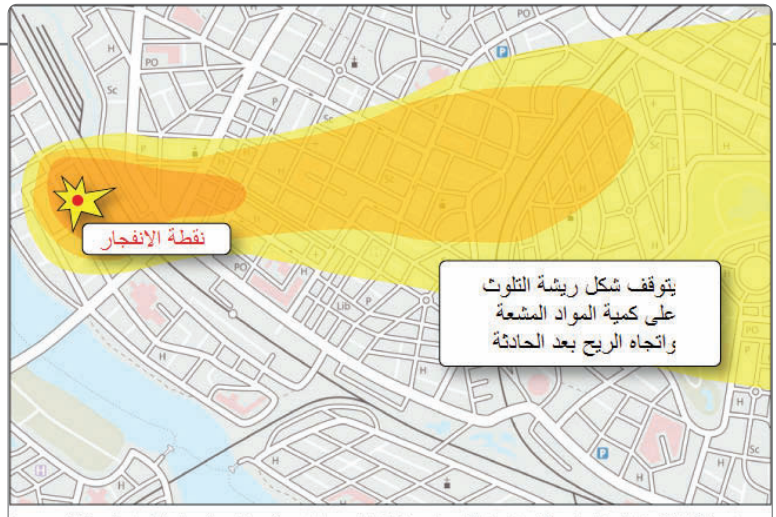
بالطبع، يمكن للتفجيرات الكبيرة أن تسبب الإصابات الخطيرة والموت للإفراد القريبين، بالإضافة إلى تحطيم المباني، العربات، والمنشآت المجاورة. سوف تتشابه هذه الأضرار مع تلك التي نجمت عن التفجيرات الإرهابية الشهيرة، مثل تفجير مبنى "Murrah Federal Building" في "مدينة أوكلاهوما Oklahoma City" في 19 أبريل 1995، والذي أودى بحياة 168 شخصا وأصاب مئات الآخرين (الشكل 270).

**الشكل 270:**
**تفجير أوكلاهوما الشهير (1995)**

ستتطاير المواد المشعة في جميع الاتجاهات بفعل الانفجار، ملوثة الأشياء الموجودة حوله. قد تذري الرياح الغبار المشع فوق مساحة تمتد إلى عدة أميال، لكن تركيز المواد المشعة سيتضاءل مع البعد عن مركز الانفجار. يطلق على الشكل الذي تنتشر به سحابة التلوث الناتجة اسم "ريشة التلوث pollution plume" (الشكل 271). تتلوث البيئة عند سقوط هذه المواد من الجو. ستوجد المستويات العالية من الإشعاع بالقرب من موقع الانفجار وفي مهب الريح السائدة.

**الشكل 271:**

**ريشة التلوث المشع الناجم عن تفجير قنبلة قذرة**




Sources: GAO analysis of Nuclear Regulatory Commission and U.S. Department of Homeland Security data; VectorStock® (map).
GAO-19-468

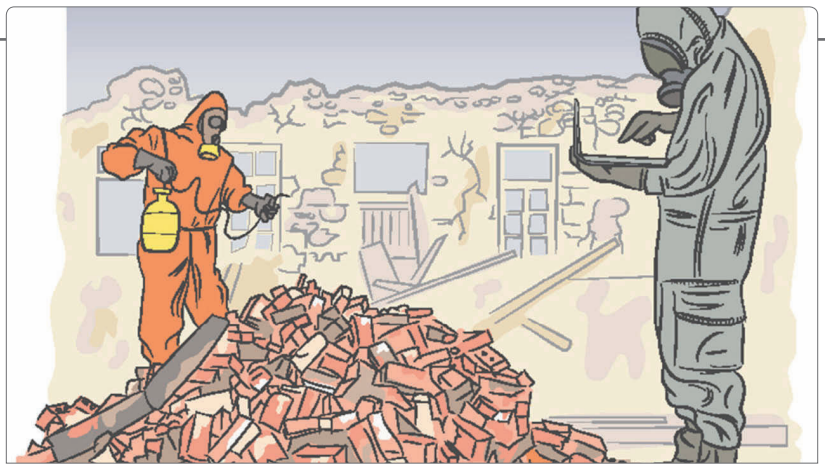
سوف يتلوث الكثير من الأفراد بالمواد المشعة خارجياً (على البشرة والملابس). لكن لا يرتقب أن يسبب هذا التلوث التسمم الإشعاعي الحاد، اللهم إلا في عدد قليل من الأفراد القريبين جدا من الانفجار. سيمكن علاج هذه الحالات ما لم يكن مستويات التعرض للإشعاع عالية جداً. إحدى المخاطر الرئيسة للتلوث الخارجي هو انتقال المواد المشعة إلى داخل الجسم من خلال الاستنشاق، الابتلاع، والجروح. قد يحدث تلوثا إشعاعيا داخليا في بعض المصابين من جراء الشظايا الملوثة بالمواد المشعة المنغرسة في أجسادهم. قد يزيد التلوث الداخلي الكبير من مخاطر الإصابة بالسرطان على المدى الطويل (كما عرفنا سابقاً).

- **الاستجابة لحوادث القنابل القذرة**

لن يدرك أحد فور وقوع الانفجار أن القنبلة كانت "قذرة" (تحوي مواد مشعة) ما لم يعلن المفجرون عن ذلك. يستطيع المنجدون الأوائل معرفة ذلك بسهولة من خلال قياس مستويات الإشعاع في منطقة التفجير بأجهزة رصد الإشعاع

المحمولة. يجب على هؤلاء المنجدين استخدام الملابس والمعدات التي تحميهم من الإشعاع، كما يجب رصد تعرضهم للإشعاع بصورة مستمرة لضمان عدم تجاوزه حدود المسموح به (الشكل 272).

**الشكل 272:**
**يجب على المنجدين الأوائل**
**استخدام الملابس والمعدات الحامية من الإشعاع**



يجرى رصد مستويات الإشعاع لتحديد المناطق الملوثة ومستويات النشاط الإشعاعي فيها. سيكون هذا التقدير تقريبيا في المراحل الأولى، لكنه سيزداد دقة مع مرور الوقت وأخذ قياسات أكثر. وفقا لإرشادات الوكالة الدولية للطاقة الذرية تحدد المناطق التي يزيد فيها معدل الجرعة عن 100 **مرسڤ**/ساعة، ولا يجرى داخل هذه المناطق إلا الأنشطة الخاصة بإنقاذ الحياة، على إلا تزيد فترة تواجد المنقذ داخلها عن 30 دقيقة. توصي الوكالة الدولية كذلك بتحديد منطقة حول المصدر المشع حيث تؤخذ الاحتياطات الضرورية لحماية المنجدين الأوائل والعامة من التعرض الخارجي للإشعاع والتلوث بالمواد المشعة. تعرف هذه المساحة باسم

"المنطقة الداخلية المطوقة". تحدد المنطقة المطوقة بحيث لا يزيد معدل الجرعة عند حدودها عن 0.1 مرسف/ساعة.[1]

التوصية الأهم التي تقدم للمنجدين الأوائل في هذه الحوادث هي إقامة مركز مراقبة على مسافة من موقع التفجير وبعيدا عن مهب الريح، ونقل الناس بعيدا عن مكان الحادث، مع إعطاء الأولوية للموجودين قريبا من موقع الانفجار وفي مهب الريح.

يأتي الخطر الوشيك من عصف الانفجار. لذلك، يجب أن تعطى الأولوية لإنقاذ حياة المصابين بجروح خطيرة، وتقديم الرعاية الصحية للمصابين الآخرين والمارة المرعوبين. بعد ذلك تأتي عملية تنظيف الأشخاص من الملوثات المشعة.

في الحوادث التي ينتج عنها تلوث أعداد كبيرة من الأفراد بالمواد المشعة، يجري المسؤولون عن الصحة العامة ما يسمى "الرصد المجتمعي population monitoring" في أماكن تُخصص لذلك.[2] ستقوم هذه المراكز بالمهام التالية:

- إزالة التلوث الخارجي؛
- تحويل الحالات الخطرة للمراكز الطبية المختصة؛
- تقديم الرعاية الطبية والمعنوية السريعة؛
- وتقديم المعلومات والمشورة.

سيصنف المسؤولون عن إدارة الطوارئ المناطق المتأثرة بالحادثة إلى قسمين: مناطق الإخلاء ومناطق الاحتماء.

قد يطلب مسؤولو إدارة الطوارئ إخلاء المناطق القريبة من الانفجار إذا ما

(1) يطبق هذا الإجراء في جميع الحوادث الإشعاعية وليس فقط مع القنابل القذرة.

(2) يطلق عليها في ولاية "ميزوري Missouri State" الأمريكية "مراكز الاستقبال المجتمعية Community Reception Centers (CRCs)".

تبين لهم أن مستويات الإشعاع عالية إلى درجة خطيرة بها، ومن الأفراد الموجودين في المناطق الأبعد أن يتخذوا من المباني السليمة وقاء من الإشعاع لحين إخبارهم بإمكانية الخروج أو ترتيب نقلهم منها (بعد انقشاع سحابة الملوثات المشعة). سينصح هؤلاء بغلق الأبواب، النوافذ، وأجهزة التكييف. من المتوقع أن تتغير حدود مناطق الإخلاء والاحتماء مع توفر المزيد من المعلومات عن مستويات الإشعاع والعوامل الأخرى ذات الصلة (مثل تغيرات الطقس).

الأماكن التي سيجرى بها عمليات إزالة التلوث من الأفراد المتأثرين بالحادث ستعتمد على عدة عوامل، مثل عدد الأفراد الذين تعرضوا للإشعاع وتوفر الموارد اللازمة.

في الحوادث الكبيرة، من المحتمل أن تفوق أعداد المصابين، الملوثين بالمواد المشعة، والقلقين من تضررهم من الإشعاع سعات مراكز الإنقاذ والمستشفيات المحلية (التي عادة ما تمتلئ غرف الطوارئ بها حتى في الظروف الاعتيادية). تحسبا لهذه الأوضاع، تحتوي خطط الاستجابة للطوارئ الحصيفة معايير لتحديد الأولويات وتدابير للتواصل الفعال مع المجتمعات المتضررة، وتوفير المأوى المؤقت للمشردين.[1]

قد يؤدي التفجير إلى تضرر بعض المستشفيات المجاورة، مما يزيد من الضغط على تلك العاملة. من الدروس المستفادة من انفجار بمرفأ بيروت الرهيب (في 4 أغسطس 2020) أن تزامن حدوث انفجار كبير مع كارثة أخرى أو أكثر (مثل جائحة كورونا في مثال بيروت) يمكن أن يؤدي إلى عجز مفاجئ في أجهزة الحماية الشخصية ومستلزمات الإسعاف الطبية.[2]

(1) على غرار ما جرى في بعض الدول عند التعامل مع المصابين أثناء جائحة كورونا.

(2) بلغت حصيلة ضحايا انفجار مرفأ بيروت إلى أكثر من 100 قتيل و4000 جريح، هذا بالإضافة إلى عدد غير معروف من المفقودين تحت الأنقاض والآلاف المشردين بسبب تحطم منازلهم.

ليست هناك خطورة ملحة تهدد الحياة على الأشخاص السليمين من وجود غبار التفجير على بشرتهم وملابسهم. لذلك، قد يطلب من الأشخاص غير المصابين والمحتمل تلوثهم بالمواد المشعة الذهاب إلى منازلهم، إزالة ملابسهم الملوثة وتغليفها، الاغتسال بالماء الدافئ والصابون، ومتابعة الأخبار على محطات الإذاعة والتلفزيون المحلية لمعرفة أي إجراءات أخرى قد تكون مطلوبة. يتوقع أن يزيل هذا الإجراء البسيط جل الملوثات المشعة.

لا يتوقع أن يشكل المصابون من جراء تفجير القنبلة القذرة خطراً صحياً على من يعالجهم. أحد الاستثناءات الممكنة أن يكون لدى بعض المصابين شظايا مشعة داخل جروحهم. يمكن اكتشاف هذه الشظايا بأجهزة رصد الإشعاع المحمولة يدوياً، والمتوفرة في أغلب المستشفيات الكبرى. يجب إزالة هذه الشظايا عن بعد، وعزلها في صناديق مبطنة بالرصاص، أو حفظها بعيد عن الناس إذا لم تتوفر مثل هذه العبوات الواقية. بعد علاج المصابين واستقرار أحوالهم يجري فحصهم لأي تلوث داخلي بالمواد المشعة.

يعمل جسم الإنسان على التخلص من المواد المشعة التي تدخله من خلال العمليات الحيوية المتنوعة (على سبيل المثال، التبول). قد تُتَّخذ إجراءات طبية للمساعدة على ذلك. من المهم أن ندرك هنا، أن مثل هذه المساعدات الطبية ليست مطلوبة لكل من تعرض لقدر من التلوث الداخلي، خاصة إذا كان مستوى هذا التلوث ضئيلاً جداً.

من الأهمية بمكان أن يقوم المسؤولون عن الاستجابة للطوارئ والصحة العامة بتوفير المعلومات المحدثة للمجموعات المعنية المختلفة: العامة، مقدمي الرعاية الصحية، المسؤولين الحكوميين، وغيرهم.

## • ما بعد حالة الطوارئ

في مرحلة التعافي، يجرى تنظيف المنطقة المتأثرة و"إزالة التلوث" منها، حتى تنخفض مستويات الإشعاع بالبيئة إلى الحدود المقبولة، ويستطيع الناس العودة إلى منازلهم وأعمالهم. قد تستغرق هذه المرحلة شهورا او حتى سنوات كي تكتمل، وهي مكلفة.

تتخذ القرارات الخاصة بعمليات إزالة التلوث بالتشاور بين الأطراف المتعددة (المسؤولين الحكوميين، الخبراء الفنيين، والأهالي المتضررون) بهدف حماية الصحة العامة والبيئة بأكثر الطرق فعالية بالنسبة للتكلفة.

في هذه المرحلة، قد يعاد نقل المقيمين في المناطق ذات المستويات غير المقبولة من الإشعاع إلى أماكن أفضل، لتجنيبهم الآثار الضارة المحتملة من التعرض الإشعاعي طويل الأمد. قد يسمح أحيانا للأفراد المنقولين بالدخول مؤقتا إلى المناطق المحظورة بشروط منضبطة لاستعادة مقتنياتهم وأوراقهم الهامة.

قد يفرض حظر مؤقت على المنتجات والأنشطة الزراعية في المنطقة المتأثرة، وسيستمر أخذ العينات من المنتجات الزراعية في المنطقة لرصد مستويات الإشعاع بها.

قد يحتاج بعض الأفراد ممن تعرضوا لمستويات عالية من الإشعاع إلى المتابعة الطبية طويلة الأمد.

## • المصـــدر اليتـيـم

"المصدر اليتيم أو المفقود orphan or lost source" هو كمية من المواد المشعة التي خرجت من تحت الرقابة. هذه المواد قد تشكل مصدراً إشعاعياً قوياً، لكن التسمية تنطبق أيضاً على المصادر الضعيفة. هناك عدد من الحالات التي فقدت فيها مصادر قوية وتسببت في أضرار جسيمة. سجلت الوكالة الدولية للطاقة

الذرية 68 من مثل هذه الحالات، أشهرها حادثة جوانيا في 1985 التي تحدثنا سابقا بالتفصيل عنها.[1]

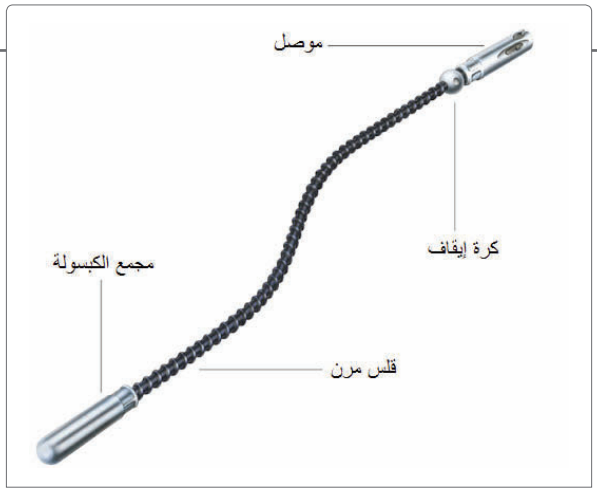
وقعت في المنطقة العربية حادثتان معروفتان بسبب المصادر المشعة المفقودة: الأولى في المغرب (1984)، والثانية في مصر (2000). كان المصدر المفقود المسؤول عن كلتي الحادثتين هو كبسولة من الإردیوم-192 التي تستخدم في التصوير الصناعي بأشعة جاما (بنشاط مقداره 1.1 و0,74 تبك، على التتابع). تسببت الحادثة الأولى في وفاة 8 أفراد من عائلة واحدة؛ الثانية في وفاة شخصان (الأب والابن)، إصابة سبعة بالتسمم الإشعاعي الحاد، وتعرض نحو 200 صديق وجار لجرعات إشعاعية معتبرة، قبل أن تستعيد السلطات المصدر المشع المفقود. سنكتفي هنا بوصف شكل مثل هذا المصدر، لأننا سنتعرف في الجزء القادم بشيء من التفصيل على أجهزة التصوير بأشعة جاما المستخدمة في القطاع الصناعي.

يكون المصدر المشع في أجهزة التصوير الشعاعي على شكل حبيبات صغيرة من المادة المشعة (لا يتعدى قطرها بضع مليمترات)، عادة من السيزيوم-137، الكوبالت-60، أو الإردیوم-192. توضع حبة أو بضع حبات مشعة في داخل كبسولة معدنية (الشكل 273). الكبسولة مربوطة بقضيب مرن يسمى "ذيل الخنزير pigtail" (الشكل 274). يخزن ذيل الخنزير، وبه كبسولة المصدر المشع، داخل آلة التصوير بأشعة جاما المترسة جيداً (الشكل 275 والشكل 276).

(1) أنظر IAEA (2012).

الشكل 273 : كبسولة المصدر المشع

الشكل 274 : وحدة المصدر المشع

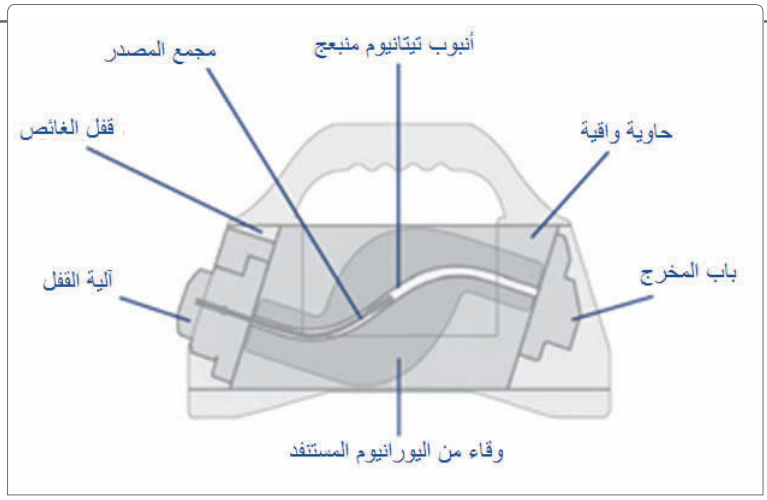



الشكل 275 :

أحد أجهزة التصوير الصناعي بأشعة جاما

**الشكل 276:**

**مسكن وحدة المصدر المشع داخل آلة التصوير الشعاعي**




يحدث أحياناً، نتيجة عدم اتباع إجراءات السلامة اللازمة، أن يُفقَد المصدر المشع المكشوف في موقع العمل، ثم يجده شخص عابر، فيلتقطه دون أن يعرف أنه يعرض نفسه ومن معه مباشرة لمصدر إشعاعي قوي (كما في حادثتي المغرب ومصر السابق ذكرهما). تسبب فقدان مثل هذه المصادر في إصابات كثيرة (مثل بتر الأصابع والأيدي) وعدد من الوفيات حول العالم.

تشكل المصادر المفقودة تحديا رئيسا لسلطات الرقابة الإشعاعية حول العالم (الشكل 277). يوجد في الولايات المتحدة لوحدها أكثر من 150,000 رخصة لاستخدام المواد المشعة وزهاء اثنين مليون جهاز يحتوي مواد مشعة موزعة تحت ترخيص عام. لا يشتمل هذا الرقم على كاشفات الدخان، التي يمكن توزيعها على الأفراد دون ترخيص.[1]

(1) تحتوي كاشفات الدخان على كمية صغيرة من الأمريسيوم- 241. لا تشكل هذه الكمية خطرا على الموجودين في المنازل.

**الشكل 277:**

**البحث عن المصادر اليتيمة في جمهورية جورجيا في يونيو 2002**

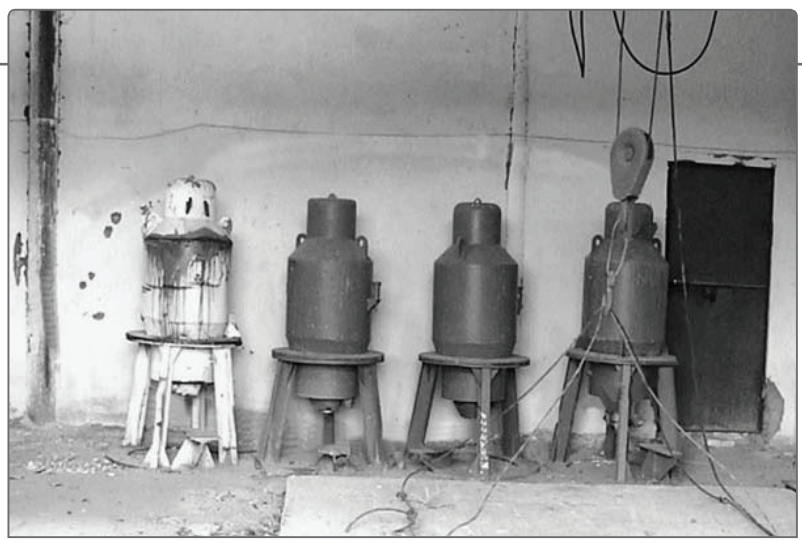
في الولايات المتحدة، لم تعد هناك حاجة لما يزيد على 500,000 جهاز يحتوي على بعض المواد المشعة. لا تشكل معظم هذه الأجهزة خطراً صحياً ملموساً. مع ذلك، قد تسبب بعض أنواع المصادر المشعة إصابات جسيمة—أو حتى الموت—إذا وضعت في المكان الخاطئ، وانتهى بها الأمر في أيادي من لا يعرفون خطرها الإشعاعي. سوف نناقش بعض الأمثلة على هذه الحالات لاحقا. هناك أيضاً مخاطرة من الاستخدام الإجرامي المقصود لهذه المصادر من أجل إحداث الأذى. قد يكون ذلك عن طريق استخدامها في صنع قنابل قذرة، كما عرفنا سابقا.

من أمثلة المصادر المفقودة عالية الإشعاع تلك التي استخدمت المواد المشعة في إمداد الفنارات والمنارات الملاحية بالطاقة في المناطق النائية بالاتحاد السوفيتي السابق. لقد جرى تخريب بعضها من أجل تخليص المعادن القيمة منها.

كما جرى استخدام المواد المشعة المستخلصة منها في صنع *مشعات البذور* *seed irradiators* (الشكل 278).

**الشكل 278:**

**مشعات السيزيوم التي استخدمت في البحوث الزراعية في الاتحاد السوفيتي السابق**



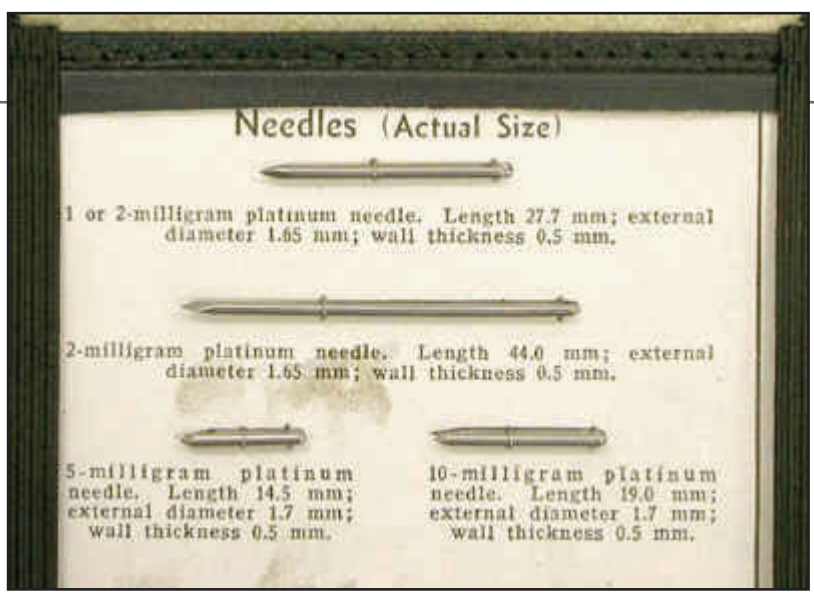
من غير العملي تأمين كل أنواع المصادر المشعة. لذلك، وضعت الوكالة الدولية للطاقة الذرية نظاما دوليا موحدا لتصنيف المصادر المشعة شائعة الاستخدام. يصنف هذا النظام المصادر المشعة حسب الخطر منها في خمس فئات، الفئة #1 هي الأكثر خطورة، الفئة #5 الأقل. يقع المصدر المشع المسؤول عن حادثة جوانيا الشهيرة، الذي بلغت قوته 5.9 تب‌ك، تحت الفئة #1.

تنتمي "إبر الراديوم radium needles" الموجودة في غير محلها إلى مجموعة المصادر اليتيمة أو المفقودة (الشكل 279). استخدمت هذه الإبر في العمليات الطبية عندما كان الراديوم هو الوحيد المستخدم في العلاج بالإشعاع

(الشكل 280). لم تكن هذه العمليات تجرى دائما تحت إشراف المتخصصين في العلاج الإشعاعي. بعد استخدام الأجهزة الأكثر تطورا والنظائر المشعة الأخرى، جرى التبرع بهذه الإبر أو تركها لمصيرها. بعد أن وافت المنية الكثير من أصحابها، ليس نادرا أن نجد الآن تلك الإبر في الخزائن المنزلية، أقبية البنوك، صناديق التخزين، مرائب السيارات، أو حتى في تركيب المجوهرات. قد يؤدي التعرض الطويل إلى إبر اليورانيوم إلى أضرار صحية.

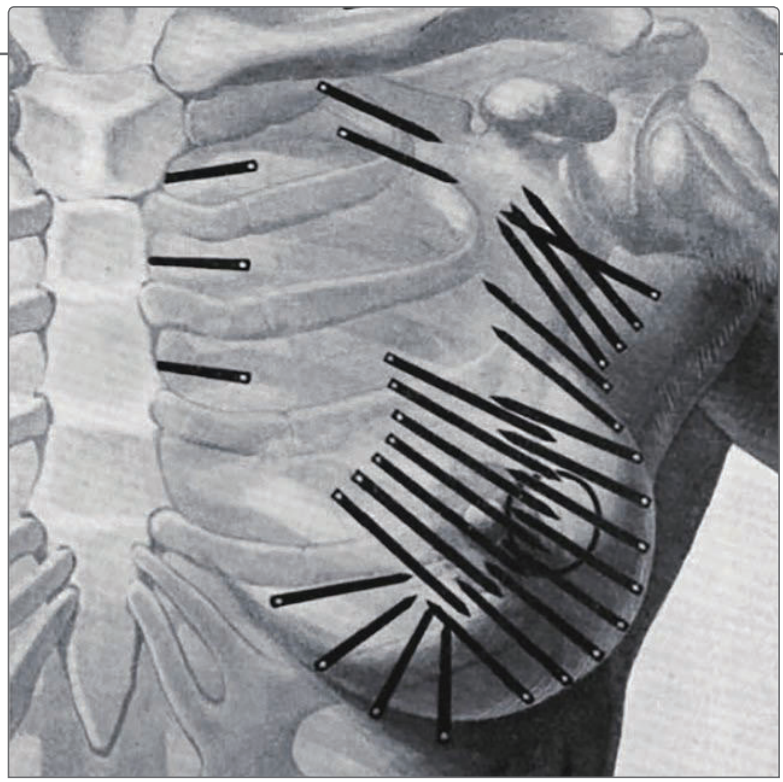
تفقد المستشفيات والعيادات من وقت لآخر بعض المصادر المشعة. يصل "مفوضية الرقابة النووية" (NRC) الأمريكية في كل عام نحو 200 تقرير عن مصادر وأجهزة مشعة قد فقدت، سرقت، أو أهملت. هذا عدا الحالات التي لا يبلغ عنها، إما لأن المالك لا يدري أنها فقدت أو أنه مطالب قانونيا بالإبلاغ عن ضياعها.

**الشكل 279: إبر الراديوم**



**الشكل 280:**

**استخدام إبر الراديوم في علاج سرطان الثدي في 1920**



تابعت إحدى الدراسات تقارير الفقد التي تصل إلى المفوضية الأمريكية لمدة شهرين.[1] وصلت إلى المفوضية في تلك الفترة القصيرة عدة تقارير من مرافق الرعاية الصحية. **شملت هذه التقارير فقدان كل ما يلي:**

- "حبة إرديوم- 192 للمعالجة الإشعاعية عن قرب irradium-192 brachytherapy seed"؛
- حبات يود- 125؛

(1) يمكن الوصول إلى تقارير المفوضية على الموقع التالي:

www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/event-status/event.

- "مكحال سترونشيوم90- strontium-90 eye applicator"؛
- "محقنة تكنشيوم99- technetium-99 syringe "؛
- كبريت35- وتريتيوم للاستخدام البحثي.
- شملت مبررات الفقد ما يلي:
- "يحتمل أنها نقلت بواسطة طاقم التنظيف"؛
- "صرفت في المجارير"؛
- "لم يعثر عليها"؛
- و"وضعت في غير محلها" و"ضائعة".

لحسن الحظ، لا تشكل الغالبية العظمى من هذه الحوادث مخاطرة صحية على الناس، وذلك بسبب النشاط الإشعاعي المنخفض في المصادر الضائعة، الأعمار النصفية القصيرة للنظائر المشعة الموجودة فيها، والاحتمال الضئيل لاتصال الناس بها.

يعد البريطانيون ما حدث في لندن عام 2006 أثناء اغتيال "ألكساندر ليتفينينكو Alexander Litvinenko" مثالا على الطوارئ الناتجة من تسرب مصدر يتيم.[1] دخل ليتفينينكو المستشفى في 3 نوفمبر وهو يعاني من القيء، الإسهال، وألام في المعدة (الشكل 281). احتار الأطباء فترة في معرفة سبب هذه الأعراض، ثم تقرر أنه قد تسمم بنحو جيجا بيكريل واحد من البولونيوم-210. يبث هذا النظير المشع جسيمات ألفا التي لا يمكن كشفها بواسطة كاشفات الإشعاع الاعتيادية. مع أنها كانت محاولة لاغتيال شخص واحد إلا أنها تطلبت تدابير كثيرة لتحديد الأشخاص الآخرين الذين تعرضوا للتسمم الإشعاعي وعلاجهم، والأماكن الملوثة لتنظيفها.

(1) ليتفينينكو كان ضابطا في الاستخبارات الروسية، ثم هرب إلى بريطانيا وعاش هناك.

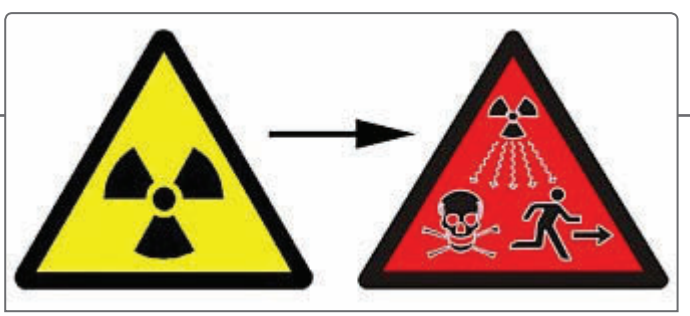
بعد حملة إعلامية عن الحادثة، تقدم 3837 شخص إلى مراكز الفحص خوفا من أن يكونوا قد تعرضوا للتلوث الإشعاعي. بعد استجوابهم، تقرر متابعة حالات 1844 شخص، وأخذ عينات بول من 753 آخرين. قدر المختصون أن 86 شخص قد تعرضوا لجرعات أقل من ميليسيفرت واحد، 36 بين 6-1 **مسڤ**، و17 أكثر من 6 **مسڤ**.

**الشكل** 281:

**ليتفينينكو في المستشفى بعد تسممه بالبولونيوم-** 210

من المفترض أن تكون المصادر المشعة المستخدمة تجاريا مُترسة بشدة لمنع انتشار المواد المشعة. لا يتوقع أن تسبب هذه المصادر أي خطر طالما لم تخرب (كما جرى في حادثة جوانيا). توسم المصادر المشعة بعلامات موحدة دوليا (الشكل 282)، ويجب الابتعاد عن الأشياء المتروكة في أماكن عامة وتحمل هذه العلامات.

**الشكل** 282: **علامتا المواد المشعة القديمة والحديثة**



قد يدل على وجود مصدر مشع قوي متروك في مكان عام ورود الناس إلى المستشفيات وعليهم أعراض التسمم الإشعاعي الحاد أو مصابين بحروق غير مفهومة.

لنتذكر دائما أن الحماية من الإشعاع تعتمد على ثلاثة إجراءات رئيسة: قصر الوقت المقضي بالقرب من المصدر المشع (الزمن)، الابتعاد عنه (المسافة)، وحجبه بالمواد الواقية (الوقاء).

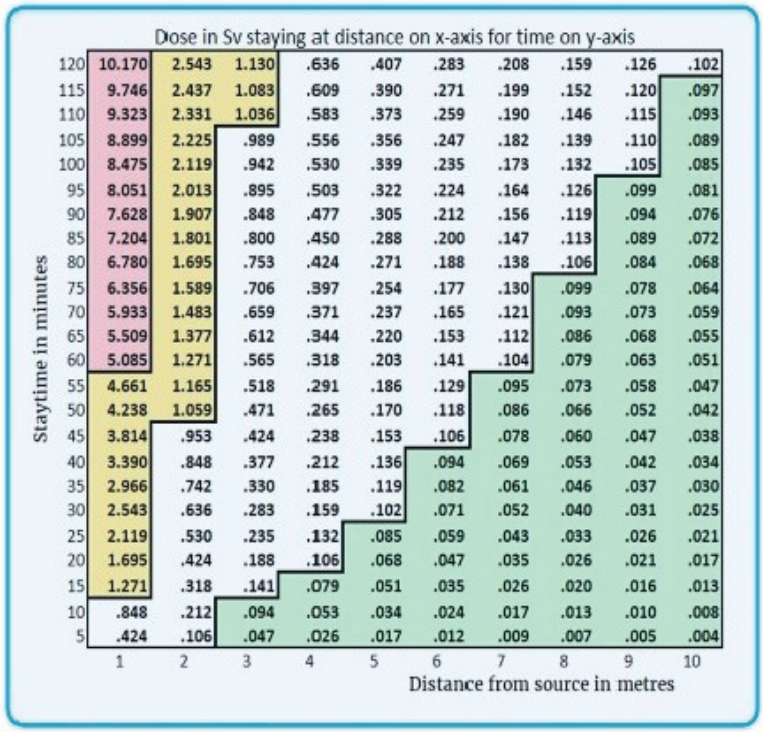
الشكل 283 يوضح الجرعات التي يسببها مصدر من السيزيوم-137 بقوة 50 **تبك** على أبعاد وبعد أزمنة مختلفة. تتراوح مدة التعرض، على المحور الرأسي، من خمس دقائق إلى ساعتين والمسافة، على المحور الأفقي، من متر واحد إلى 10 أمتار.

تزيد الجرعات في الركن العلوي الأيسر (الخلفية الوردية) عن 5 **سڤ**، وقد تكون قاتلة (تعرض طويل قريبا من المصدر). تقل الجرعات في الركن السفلي الأيمن (الخلفية الخضراء) عن 100 **مسڤ**، ولن تسبب على الأرجح أي من أعراض التسمم الإشعاعي الحاد. القسم "الأصفر" يشير إلى الجرعات ما بين 1 - 4 **سڤ**، المرجح أن تسبب التسمم، وقد تكون مميتة في الطرف العالي؛ القسم "الأبيض" من 100 **مسڤ** إلى سيڤرت واحد، ربما تسبب بعض الأعراض، لكن الشفاء مرجح مع العناية الطبية.

قد يستعين العاملون في الطوارئ بمثل هذه الجداول لتحديد الفترة التي يمكنهم البقاء خلالها بالقرب من المصدر لأداء أعمال الإنقاذ الضرورية دون أن يتعدوا الحدود القصوى المقررة لتعرضهم للإشعاع. كما يمكن زيادة هذا الوقت عن المحدد في الجدول إذا ما استعانوا بأوقية من الإشعاع. هذه الأرقام محسوبة نظريا، والأفضل طبعا الاعتماد على القياسات الفعلية كلما أمكن ذلك.

**الشكل 283:**

**الجرعات التي يسببها مصدر من السيزيوم - 137 بقوة 50 تبك**




| Staytime in minutes | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 120 | 10.170 | 2.543 | 1.130 | .636 | .407 | .283 | .208 | .159 | .126 | .102 |
| 115 | 9.746 | 2.437 | 1.083 | .609 | .390 | .271 | .199 | .152 | .120 | .097 |
| 110 | 9.323 | 2.331 | 1.036 | .583 | .373 | .259 | .190 | .146 | .115 | .093 |
| 105 | 8.899 | 2.225 | .989 | .556 | .356 | .247 | .182 | .139 | .110 | .089 |
| 100 | 8.475 | 2.119 | .942 | .530 | .339 | .235 | .173 | .132 | .105 | .085 |
| 95 | 8.051 | 2.013 | .895 | .503 | .322 | .224 | .164 | .126 | .099 | .081 |
| 90 | 7.628 | 1.907 | .848 | .477 | .305 | .212 | .156 | .119 | .094 | .076 |
| 85 | 7.204 | 1.801 | .800 | .450 | .288 | .200 | .147 | .113 | .089 | .072 |
| 80 | 6.780 | 1.695 | .753 | .424 | .271 | .188 | .138 | .106 | .084 | .068 |
| 75 | 6.356 | 1.589 | .706 | .397 | .254 | .177 | .130 | .099 | .078 | .064 |
| 70 | 5.933 | 1.483 | .659 | .371 | .237 | .165 | .121 | .093 | .073 | .059 |
| 65 | 5.509 | 1.377 | .612 | .344 | .220 | .153 | .112 | .086 | .068 | .055 |
| 60 | 5.085 | 1.271 | .565 | .318 | .203 | .141 | .104 | .079 | .063 | .051 |
| 55 | 4.661 | 1.165 | .518 | .291 | .186 | .129 | .095 | .073 | .058 | .047 |
| 50 | 4.238 | 1.059 | .471 | .265 | .170 | .118 | .086 | .066 | .052 | .042 |
| 45 | 3.814 | .953 | .424 | .238 | .153 | .106 | .078 | .060 | .047 | .038 |
| 40 | 3.390 | .848 | .377 | .212 | .136 | .094 | .069 | .053 | .042 | .034 |
| 35 | 2.966 | .742 | .330 | .185 | .119 | .082 | .061 | .046 | .037 | .030 |
| 30 | 2.543 | .636 | .283 | .159 | .102 | .071 | .052 | .040 | .031 | .025 |
| 25 | 2.119 | .530 | .235 | .132 | .085 | .059 | .043 | .033 | .026 | .021 |
| 20 | 1.695 | .424 | .188 | .106 | .068 | .047 | .035 | .026 | .021 | .017 |
| 15 | 1.271 | .318 | .141 | .079 | .051 | .035 | .026 | .020 | .016 | .013 |
| 10 | .848 | .212 | .094 | .053 | .034 | .024 | .017 | .013 | .010 | .008 |
| 5 | .424 | .106 | .047 | .026 | .017 | .012 | .009 | .007 | .005 | .004 |

- **الحادثــة الصناعية**

**للإشعاع تطبيقات متعددة في الصناعة، سنناقش أهمها في هذا الجزء.**

يستخدم التصوير الشعاعي radiography كثيراً في الفحوص الصناعية (لكشف عيوب اللحام في خطوط أنابيب الغاز، على سبيل المثال). يجرى التصوير الشعاعي بمولدات أشعة إكس أو بالمصادر المشعة (أشعة جاما). لا يختلف التصوير الصناعي بأشعة إكس في فكرته عن ذلك المستخدم في الطب والمعروف لنا جيداً.

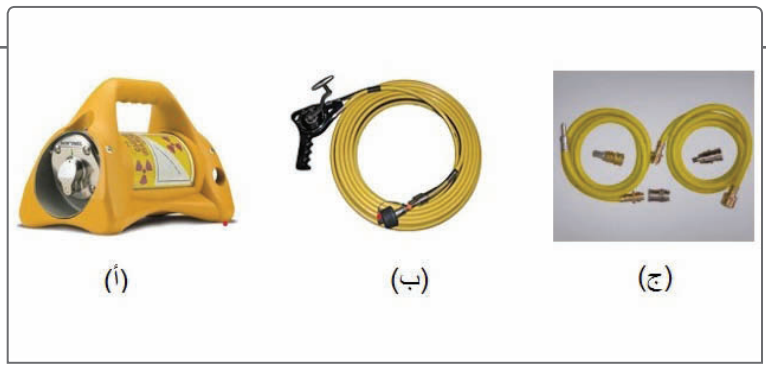
التصوير بالمصادر المشعة (أي بأشعة جاما) يناسب الحالات التي لا يمكن

فيها استخدام مولدات أشعة إكس (كبيرة الحجم)، مثل الأماكن الضيقة. يتكون جهاز التصوير بأشعة جاما من الأجزاء الرئيسة التالية (الشكل 284):

- جهاز العرض؛
- الأنبوب المرشد؛
- وقلس الدفع.

**الشكل 284:**

**مكونات منظومة التصوير بأشعة جاما: (أ) عارض المصدر، (ب) قلس الدفع، و(ج) الأنبوب المرشد.**




جهاز العرض projection device هو "مَسكَن" المصدر المشع، أي المكان الذي يحفظ فيه هذا المصدر في غير أوقات التشغيل، ويشار إليه اختصاراً بالكاميرا (الشكل 284أ). يكون المصدر المشع في أجهزة التصوير الشعاعي على شكل حبيبات صغيرة من المادة المشعة (لا يتعدى قطرها بضع مليمترات)، عادة من السيزيوم-137، الكوبالت-60، أو الأرديوم-192. توضع حبة أو بضع حبات مشعة في داخل كبسولة معدنية. الكبسولة مربوطة بقضيب مرن يسمى "ذيل الخنزير pigtail". يخزن ذيل الخنزير، وبه كبسولة المصدر المشع، داخل جهاز العرض المترس جيداً.

عند تشغيل آلة التصوير، يثبت الميزاء (في نهاية الأنبوب المرشد) فوق الجزء المراد تصويره وفي الجهة المقابلة يوضح الشريط الحساس للأشعة (الشكل 285). وظيفة الميزاء، والذي يصنع عادة من التنجستين، أنه يحجب الإشعاع المنبث من المصدر المشع إلا نحو الجزء المراد تصويره، كما أنه يُخرج الأشعة المنبعثة من المصدر متوازية (الشكل 286). يوصل الطرف الأخر من الأنبوب المرشد بالباب الأمامي بجهاز العرض. يربط قلس الدفع drive cable (راجع الشكل 284ب) بوحدة المصدر المشع من الباب الخلفي في جهاز العرض.[1] عند إدارة الذراع الدوار الموجود في مقبض القلس، يدفع القلس المصدرَ المشعَ خارج العارض ليمر خلال الأنبوب المرشد حتى يصل إلى الميزاء collimator (الشكل 287 - الشكل 289). بعد انقضاء وقت التعريض المطلوب (بضعة دقائق)، يسحب المصدر المشع ثانية إلى داخل جهاز العرض.

**الشكل 285:**

**تمثيل لمنظومة التصوير الشعاعي أثناء التشغيل**

(1) يستخدم قلس الدفع الآلية المرفقية crank mechanism، التي تحول الحركة الدائرية لذراع المقبض إلى حركة أمامية وخلفية للسلك المرن داخل القلس.

**الشكل 286:**

**أشكال ومقاسات مختلفة للميزاء**

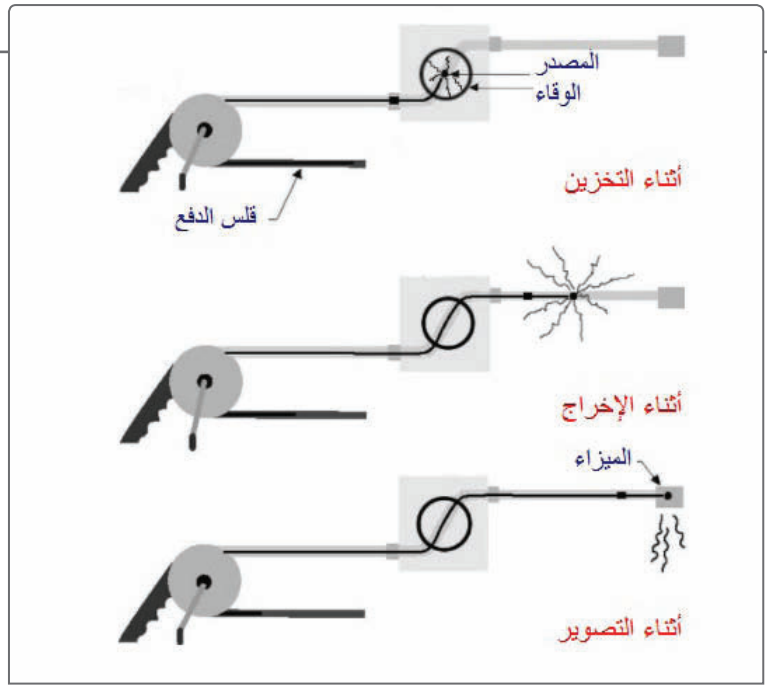
الشكل 289 يوضح كيفية تشكل صورة شعاعية لمنطقة اللحام بين حافتين. من دراسة الصورة الشعاعية المتكونة، يمكن تحديد أي عيوب داخل اللحام (الشكل 290).

لا تشكل أجهزة التصوير الشعاعي، إذا ما استخدمت بالطريقة الصحيحة، خطرا على صحة وسلامة المشغلين أو عامة الناس الموجودين في الجوار (الشكل 291).

لكن الأخطاء والحوادث تقع. قد يحدث أن تنفصل وحدة المصدر المشع عن قلس الدفع، وتظل داخل الأنبوب المرشد دون أن يدرك ذلك الفني المُشَغِّل. وعند فصل الأنبوب المرشد من جهاز العرض، قد تقع وحدة المصدر المشع على الأرض في موقع العمل، وتعرض من يلتقطها لجرعة عالية من الإشعاع دون أن يدري.

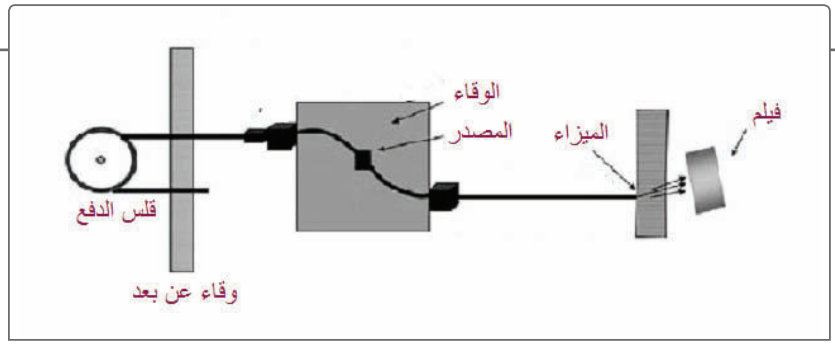
**الشكل 287:**

**إخراج المصدر المشع من الكاميرا إلى الميزاء**



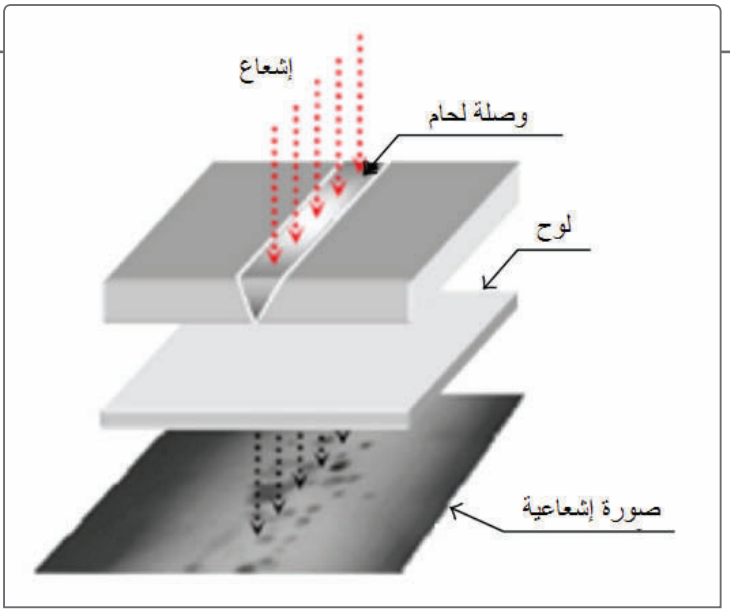

**الشكل 288:**

**فكرة عمل منظومة التصوير الشعاعي**



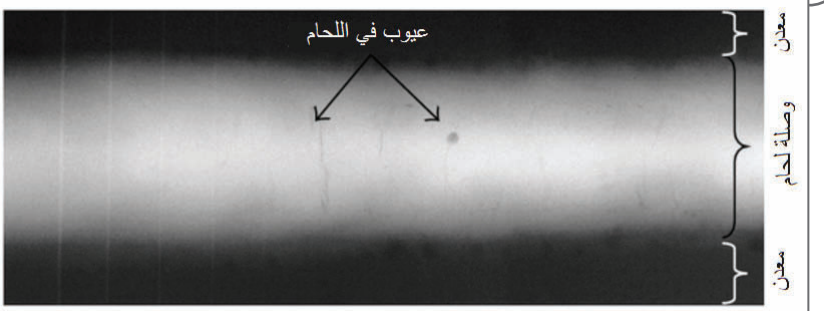
**الشكل 289:**

**كيفية الحصول على صورة شعاعية للحام**




**الشكل 290:**

**صورة شعاعية تظهر عيوب اللحام: مسام (دوائر دقيقة سوداء) وشروخ (خطوط رفيعة سوداء)**



تعرفنا في الجزء الخاص بالمصادر المفقودة على بعض الحوادث التي وقعت لعامة الناس بسبب المصادر المشعة المفقودة (حادثة 1984 في المغرب وحادثة 2000 في مصر). سنناقش هنا بعض الحوادث التي وقعت للمشغلين لأجهزة التصوير الشعاعي أو للعاملين في مواقع التصوير.

في يونيو 1979، أخفق عامل تصوير شعاعي في «لوس أنجلوس Los Angeles"، كاليفورنيا (الولايات المتحدة)، في تأمين المصدر المشع قبل مغادرة موقع العمل. سقط ذلك المصدر من آلة التصوير، والتقطه عامل آخر لم يعرف طبيعته. وضع العامل المصدر المشع في جيبه الخلفي وتركه به لنحو 45 دقيقة، قبل ان يسلمه لمديره. كانت هذه الفترة كافية لإحداث إصابات بالغة في أردافه. كما عانى أربعة عاملين آخرين إصابات إشعاعية في إياديهم.

وقعت الحوادث بسبب المصادر المشعة المستخدمة في الفحوص الصناعية مرات متعددة حول العالم (تشيلي، جنوب إفريقيا، إيران روسيا، الصين، الولايات المتحدة، وغيرها). دفع هذا الوكالة الدولية للطاقة الذرية إلى رعاية دراسة عن هذه الحوادث نشرت في 1998 بعنوان «الدروس المستفادة من الحوادث في التصوير الشعاعي الصناعي». قام فريق الدراسة بمراجعة مجموعة كبيرة مختارة من حوادث التصوير الصناعي التي سجلتها الهيئات الرقابية، الجمعيات المهنية، والمجلات العلمية. تكون فريق الدراسة من ممثلين للهيئات الرقابية، الشركات الصناعية، واختصاصيي السلامة. هدفت هذه الدراسة إلى تحديد الأسباب الأولية لحوادث التصوير الصناعي، والتدابير التي تمنع تكرار هذه الحوادث أو تخفف من عواقبها إذا ما وقعت. لن نعيد هنا سرد نتائج هذه الدراسة، وإنما سنحاول عوضاً عن ذلك أن نصل إلى «الجذور العميقة» لأغلب تلك الحوادث.

قد يجري المصور الصناعي ما يربو على مائة تعريض أسبوعياً. في كل مرة، ينبغي على القائمين على التصوير القيام بمجموعة من التدابير الاحترازية: (1)

تطويق منطقة العمل، ونصب أجهزة التنبية المرئية والمسموعة؛[1] (3) حجب موضع التعريض (التصوير) بمواد مانعة للاشعاع؛ (4) مسح إشعاعي حول آلة التصوير لضمان سلامتها وعدم وجود تسرب إشعاعي منها؛ (5) فحص بصري للأنبوب المرشد وقلس الدفع لضمان خلوهما من التلف والعيوب؛ (6) توصيل الأنبوب المرشد بجهاز العرض بالطريقة الصحيحة؛ (7) توصيل قلس الدفع بجهاز العرض، مد القلس بعيدا عن موضع التعريض، واتخاذ ساتر من الإشعاع؛ (8) إخراج المصدر المشع من جهاز العرض إلى محل التعريض (الميزاء)؛ (9) سحب المصدر المشع إلى داخل جهاز العرض بعد انتهاء فترة التعريض؛ (10) مسح إشعاعي حول جهاز العرض وفي اتجاه موضع التصوير لضمان عودة المصدر المشع إلى موضع التخزين داخل جهاز العرض؛ و(11) فصل الأنبوب المرشد وقلس الدفع من جهاز العرض، وغلق الجهاز من الأمام والخلف. الغرض من هذه الإجراءات الروتينية هو كشف أي عيب أو عطل تقني (في الأجهزة والمعدات) ومنع تطوره إلى حادثة ضارة.

تقوم بأعمال الفحص الصناعي تنويعة واسعة من الشركات، من الشركات المحلية الصغيرة إلى المؤسسات متعددة الجنسيات العملاقة. المنافسة قوية في هذا المجال، وخفض التكلفة هو مسألة حياة أو موت لبعض الشركات (خاصة، الصغيرة منها). جزء معتبر من هذه التكلفة يذهب إلى أجهزة وتدابير السلامة. قد يدفع هذا بعض الشركات إلى السعي لخفض التكاليف على حساب السلامة، كأن تستخدم عمالة غير مدربة أو أجهزة غير آمنة. على سبيل المثال، في 1982، وظفت شركة للفحوص الصناعية في بلد لم يكن لديه هيئة للرقابة الإشعاعية—وظفت فرد غير مدرب للقيام بالتصوير الشعاعي. حدث عطل بآلة التصوير التي كان يستخدمها هذا العامل، ولم يستطع العامل سحب المصدر المشع إلى داخل جهاز العرض. أبلغ العامل مشرفه عن العطل، لكن المشرف طلب منه الاستمرار في أعمال التصوير. بدأ

(1) تشترط أغلب قواعد السلامة الإشعاعية ألا يزيد معدل الجرعة في المناطق غير المحظورة unrestricted areas عن 2 مر/ساعة (مليرونتچن في الساعة).

العامل سريعا يعاني من أعراض التسمم الإشعاعي. سجل مؤشر الإشعاع الشخصي الذي يحمله العامل أنه قد تعرض لجرعة تبلغ 5 سف خلال فترة أسبوعين.

عادة ما يرتبط العائد المالي الذي يتحصل علية المصور الصناعي بعدد الصور الشعاعية التي يلتقطها.

تتضمن إجراءات السلامة المفروضة نقل بعض العتاد الثقيل إلى ومن موقع التصوير، مثل الحواجز المؤقتة، ألات الإنذار والتنبيه، معدات الطوارئ، مقاييس الإشعاع، وغيرها (الشكل 292).

**الشكل 291:**

**إعادة المصدر المشع إلى داخل جهاز العرض**

الحوادث الإشعاعية نادرة، وينبغي أن تزداد ندرة. بعدما يقوم المصورون الشعاعيون بتنفيذ التدابير الاحترازية "المفروضة" يوما بعد آخر، ولا تقع الحوادث، يتنامي لديهم شعور خاطئ بعدم أهمية هذه الإجراءات، بل وينظرون إليها كعبء زائد لا ضرورة له، ويبدأ التراخي في تطبيقها. تساعد على مثل هذا التراخي واللامبالاة عوامل أخرى متنوعة، مثل ظروف العمل الشاقة وانحصار اهتمام الإدارة على الإنتاجية ولو على حساب السلامة (أي ما يعرف بثقافة المنظمة orgnizational culture).

كل هذه العوامل السابق ذكرها تغري المصورين بالإسراع في العمل وتخطي الكثير من تدابير السلامة الاحترازية، خاصة إذا لم تكن سياسة الإدارة تحرم ذلك.

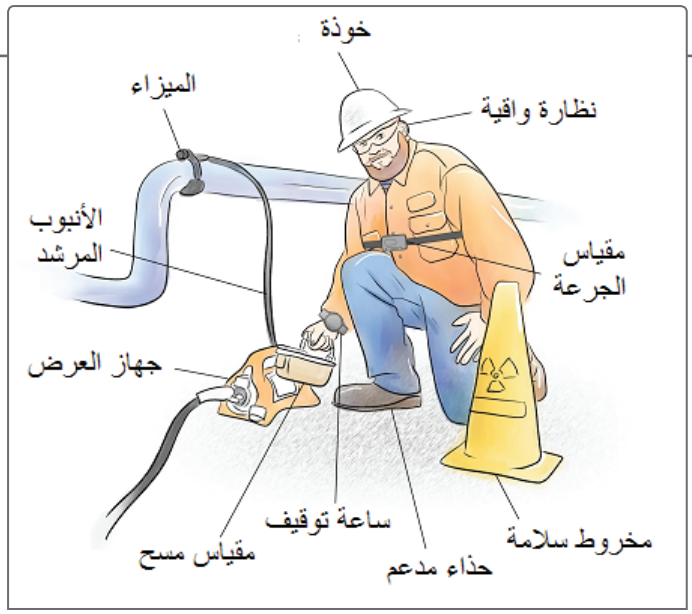
من ناحية أخرى، الأخطاء البشرية تقع. يزيد من فرصة حدوثها عوامل شخصية وأخرى تتعلق بالمنظمة، مثل الإرهاق، تعاطي الخمور والمخدرات، وبيئة العمل غير الصحية.

في غياب تدابير السلامة الاحترازية، سوف تؤدي الأعطال التقنية و/أو الأخطاء البشرية إلى وقوع الحوادث المؤسفة.

يتضح هنا أهمية المهام المنوط بالجهات الرقابية القيام بها، مثل التفتيش على تدريب العاملين على أسس السلامة الإشعاعية، التزام الشركات بتوفير أجهزة السلامة واتباع قواعد التشغيل الآمن لأجهزة الفحص الإشعاعي، وتوفر ظروف العمل المناسبة في مواقع التصوير الشعاعي.

**الشكل 292:**

**المعدات التي يستخدمها المصور الصناعي**




لن يستطيع أخصائيو الطوارئ فعل الكثير في الحوادث الصناعية عدا غلق مولدات أشعة إكس أو استعادة المصادر المشعة إلى مواضعها الآمنة؛ فالمصادر المشعة المستخدمة في الصناعة تكون مغلقة جيدا، ولن تسبب تلوثا إشعاعيا إلا في حالة تعرضها للتخريب الشديد.

- **التفجير النووي**

تتنوع كثيرا القوة التدميرية للأسلحة النووية المتاحة حاليا (الجدول 4).

## الجدول 4: التفجيرات النووية الشهيرة

| الاسم | الحصد المقدر (كط) | تفاصيل |
|---|---|---|
| «داڤيد كروكيت David | 0.01 | سلاح نووي تكتيكي أمريكي |
| هيروشيما (الفتى الصغير) "Crocket | 13-18 | أول هجوم نووي (6 أغسطس 1945) |
| ناجاساكي (الرجل البدين) | 18-23 | ثاني هجوم نووي (9 أغسطس 1945) |
| «إعصار Hurricane" | 25 | أول اختبار بريطاني (3 أكتوبر 1952) |
| «قلعة براڤو Castle Bravo" | 15،000 | أكبر اختبار أمريكي (1 مارس 1954) |
| «قنبلة القيصر Tsar Bomba" | 50،000 | أكبر تفجير نووي (الاتحاد السوفيتي، 31 أكتوبر 1961) |
| «اختبار رقم 6" | 3،300 | الصين، 17 يونيو 1967 |
| «سهيل Canopus" | 2،600 | فرنسا، 24 أغسطس 1968 |
| «پخران - 2 - Pakhran | 45-50 | الهند، 11 مايو 1998 |
| «تشاجاي-1 I-Chagai" II | 40 | باكستان، 28 مايو 1998 |
| كوريا الشمالية | 200-300 | اختبار، 3 سبتمبر 2017 |

تعتمد عواقب التفجير النووي على حصد القنبلة المنفجرة وموضع التفجير (الشكل 293). من الأرجح أن يكون حصد القنبلة المرتجلة صغيرا نسبيا، بينما تشكل القنبلة المسروقة من ترسانة إحدى القوى النووية مخاطرة أعظم كثيرا. أما الهجوم النووي من إحدى القوى العظمى، فهو أمر آخر تماما.

**الشكل 293:**
**في أعقاب التفجير النووي**

معظم المنشورات عن تأثير التفجير النووي هي من مصادر أمريكية. خلال الحرب الباردة، تركزت الدراسات الأمريكية على تأثير الهجمات النووية على الأهداف المعادية وعلى الحماية المدنية للأمة الأمريكية خلال حرب عالمية بالأسلحة الهيدروجينية. تضاءل هذا الاهتمام مع انحلال الاتحاد السوفيتي وتبدل الأوضاع العالمية. بعد هجمات الحادي عشر من سبتمبر، أصبح الشغل الشاغل لمخططي الاستجابة للطوارئ النووية في الولايات المتحدة هو كيفية التأهب لهجمات نووية "إرهابية". يجدر بالذكر في هذا السياق أن الجزء الصعب في سبيل صنع القنبلة

الذرية هو توفير المواد الانشطارية (اليورانيوم-235 أو البلوتونيوم) بالنوعية والكمية المطلوبة، أكثر منه في معرفة كيفية الصنع أو امتلاك القدرات التكنولوجية اللازمة لذلك.

في حالة المتفجرات التقليدية، يكاد يعود فعلها التدميري كلية إلى طاقة الموجة الصادمة shock wave المتولدة، أو ما يعرف بـ "عصف الانفجار blast". أما في حالة الانفجار النووي، فتتوزع الطاقة التدميرية أساسا بين عصف، حرارة، وإشعاع نووي.

العاملان الرئيسان في تحديد الطريقة التي تتوزع بها طاقة الانفجار النووي هما حصد القنبلة المنفجرة وموضع تفجيرها. سنلخص في هذا الجزء التأثيرات الناتجة من تفجير نووي لا تزيد طاقته التدميرية عن 10 كط في الجو فوق منطقة مكتظة بالسكان (وهو "الحوار" الأكثر دراسة في الوقت الحالي).

يشكل العصف في مثل هذا التفجير الشطر الأكبر من الطاقة التدميرية (50 %)، بينما لا يزيد نصيب الإشعاع، الذي يميز التفجيرات النووية، عن 15 % (الشكل 294). أما النسبة المتبقية (35 %)، فتكون على شكل حرارة. لذلك يمكن القول إن خطورة التفجير النووي تأتي في الأساس من اتساع مستوى التدمير (وليس بسبب الإشعاع المتولد). يبين الجدول 5 الأَمْدِيةَ (جمع مدى) التي تصل إليها هذه التأثيرات.

**الجدول 5:**

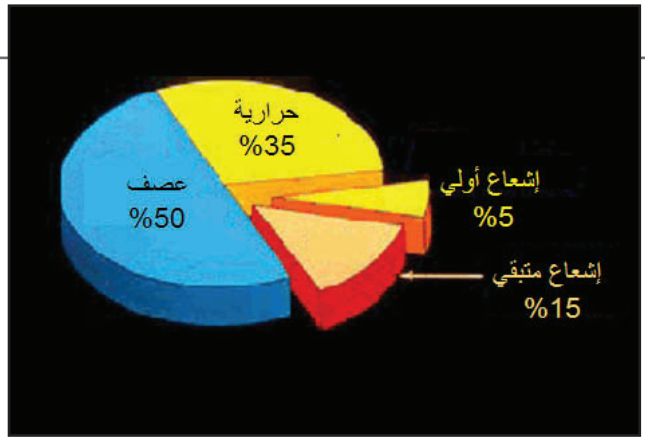
**المدى بالكيلومتر لتأثيرات التفجير النووي المعنوية.**

| الحصد (كط) | الموجة الصادمة (كم) | الحرارة (كم) | الإشعاع الأولي (كم) | إشعاع السقط (كم مع الريح) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.3 | 0.6 | 0.8 | حتى 6 |
| 10 | 0.6 | 1.8 | 1.3 | حتى 10 |

* التأثيرات المعنوية هي 50 % وفيات من الموجة الصادمة، الحرارة، أو 4 سڤ من الإشعاع النووي.

**الشكل 294:**

**توزيع الطاقة على تأثيرات التفجير النووي**




يشتهر الانفجار النووي في أذهاننا بصورة السحابة التي تشبه فطر الغابة المنطلقة عاليا نحو السماء (الشكل 295). لنحاول أن نفهم ماذا يحدث بشيء من التفصيل. يصاحب التفجير النووي عدد من الظواهر المميزة، بعضها مرئي، والبعض الأخر لا يظهر مباشرة. تتوقف بعض أوجه هذه الظواهر على ظروف التفجير، مثل موقع (التفجير، في الهواء، فوق سطح الأرض، أو تحتها).

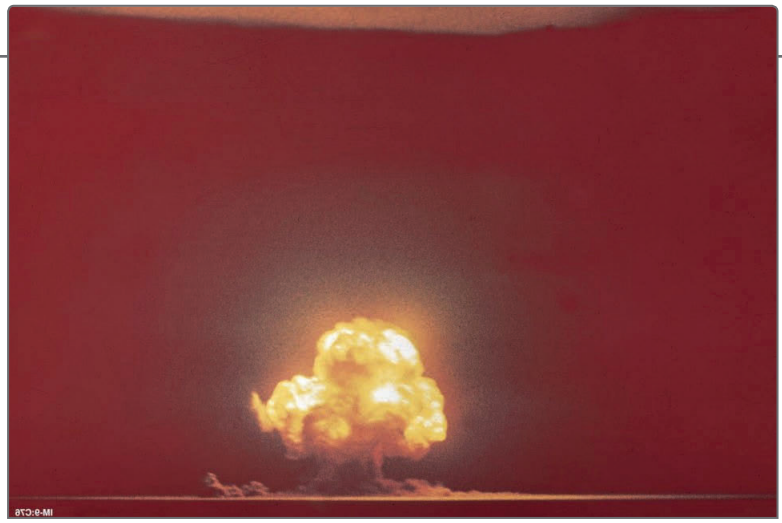
## • كـــرة الـنـــــار

كما عرفنا من قبل، تؤدي تفاعلات الانشطار النووي إلى تحرر كمية كبيرة من الطاقة خلال زمن قصير جدا وضمن كمية محدودة من المادة. نتيجة لذلك، ترتفع حرارة أجزاء السلاح النووي إلى درجات هائلة، تماثل ما في مركز الشمس[1]. بسبب الحرارة الحامية الناتجة من التفجير النووي (ملايين الدرجات)، تتحول كل المواد داخل القنبلة إلى الصورة الغازية. تشكل هذه الغازات لحظة التفجير ضغطا هائلا على كل ما يحيط بالقنبلة (أضعاف ملايين المرات الضغط الجوي). في

(1) أقصى حرارة داخل التفجيرات التقليدية لا تزيد عن $5000^{\circ}$م.

خلال أقل من 1 على مليون جزء من الثانية فور الانفجار، تشع بقايا القنبلة الحامية كميات ضخمة من الطاقة، أساسا على شكل أشعة إكس. تُمتص كل هذه الطاقة ضمن أمتار قليلة من الهواء المحيط، مكونة كرة النار fireball، وهي عبارة عن كتلة كروية مشتعلة من الهواء وبقايا السلاح المتبخرة (الشكل 295).

**الشكل 295:**
**صورة لأول تفجير نووي في 16 يوليو 1945**
**فوق صحراء نيومكسيكو**



## • الإشعـــاع الحـــراري

تنبعث مقادير كبيرة من الإشعاع الحراري thermal radiation (غير النووي) من سطح كرة النار خلال الدقيقة الأولى من الانفجار أو أدنى.[1] يتضمن هذا الإشعاع طيف واسع من الموجات الكهرباء-مغناطيسية: تحت الحمراء، المرئي، فوق

(1) الإشعاع الحراري (الحرارة والضوء) هو الموجات الكهرباء-مغناطيسية التي تبث من الأجسام بسبب حرارتها. تتباين أنواع الإشعاع الحراري في طول موجاتها من الأشعة تحت الحمراء الأطول موجة، مرورا بالضوء المرئي، إلى فوق البنفسجية الأقصر موجة.

البنفسجية، بالإضافة إلى بعض أشعة إكس "الناعمة soft" المنبثة لحظة الانفجار. تنطلق هذه الأشعة من كرة النار بسرعة الضوء (30,000 كم/ث). يكمن الخطر الرئيس من الإشعاع الحراري في إحداث الحروق وإصابات العيون فيمن يتعرضون له، والتي يمكن أن تؤدي إلى العمى والموت. قد تحدث هذه الإصابات حتى بعيدا عن مركز الانفجار، حيث تتضاءل تأثيرات عصف الانفجار والإشعاع النووي. كما يؤدي هذا الإشعاع إلى اندلاع الحرائق التي تنتشر بسرعة بين الحطام الذي يخلفه عصف الانفجار. يتزايد نطاق التأثير الحراري بشدة مع حصد القنبلة النووية.

**يمكن تصنيف الإصابات الناتجة من الإشعاع الحراري لقنبلة ذات حصد 10 كط كالتالي:**

- حروق من الدرجة الأولى (مشابهة لحروق الشمس السيئة) حتى 3,2 كم من موقع الانفجار؛
- حروق من الدرجة الثانية (البثور واحتمال حدوث الصدمة والوفاة) حتى 2.4 كم من موقع الانفجار؛
- حروق من الدرجة الثالثة (دمار الأنسجة وحدوث الصدمة والوفاة في غياب العلاج المتخصص) حتى 1 كم من موقع الانفجار.

### • الإشعاع النـــووي

يحدث التفجير النووي كما نعرف الآن من التفاعلات النووية في وقود القنبلة (الانشطار في نوى اليورانيوم-235 أو البلوتونيوم في حالة القنبلة الذرية، بالإضافة إلى الاندماج بين نواتين من الهيدروجين في القنبلة الهيدروجينية).

الحوار الذي نناقشه هنا هو تفجير قنبلة ذرية (انشطارية) بدائية. ينتج عن انشطار نوى وقود القنبلة الذرية (اليورانيوم-235 أو البلوتونيوم) "كسف نووية

nuclear fragments" تتحول إلى عناصر مشعة. كما تستطيع النيوترونات الناتجة أثناء تفاعل الانشطار المسلسل تحويل بعض العناصر التي تصطدم بأنويتها إلى عناصر مشعة.

ينبعث الإشعاع النووي أثناء الانفجار النووي وبعيدة. لذلك، يصنف هذا الإشعاع في قسمين: *الإشعاع الفوري prompt radiation*، *والإشعاع المتأخر أو المتخلف delayed or residual radiation*.

ينبثق في الدقيقة الأولى من الانفجار الإشعاع الفوري، المكون أساساً من أشعة جاما والنيوترونات. تقع أعلى مستوياته قريباً من مركز الانفجار، وتنخفض بسرعة مع البعد عنه. يستطيع هذا الإشعاع قتل الكائنات الحية وإعطاب العتاد الإلكتروني.

يستمر الإشعاع النووي في الانبعاث من المواد المشعة الموجودة في سحابة التلوث أو السقط النووي لفترة زمنية ممتدة (الإشعاع المتخلف).

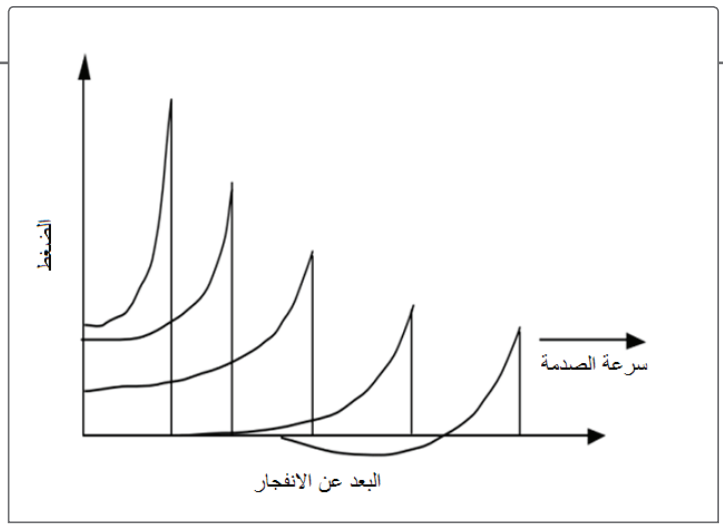
- **الموجة الصادمة**

يصاحب الانفجار موجة من التغييرات العنيفة في الضغط، تنتشر بسرعة فوق-صوتية في الأوساط المحيطة (الجو، اليابسة، والمياه). تعرف هذه الموجة العنيفة باسم الموجة الصادمة أو بالأحرى النبضة الموجية الصادمة shock wave pulse (الشكل 296 والشكل 297).[1]

(1) النبضة الموجية هي موجة غير دورية قصيرة تتكون من دفعة واحدة من الطاقة (غير متكررة). يقصد بالموجة الصادمة الدفعة المفاجئة من الضغط الهائل التي تنتج من الانفجار.

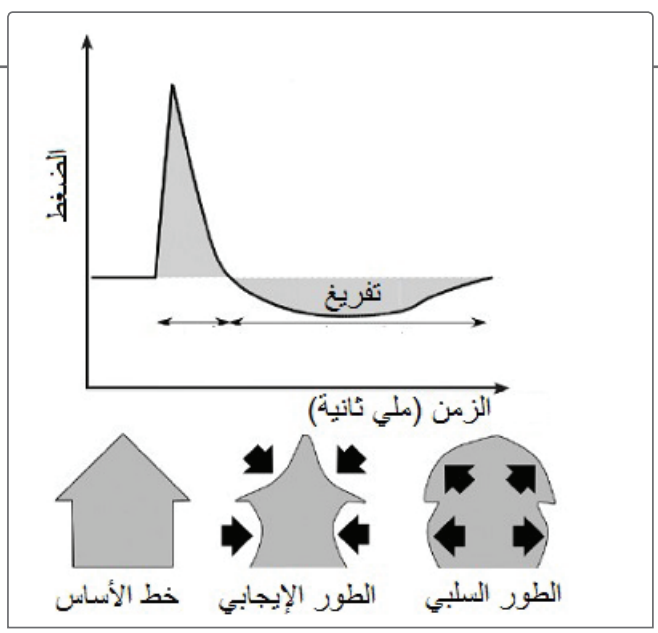
**الشكل 296:**

**انتشار الموجة الصادمة بسرعة فوق-صوتية**




**الشكل 297:**

**التغيرات في الضغط أثناء تكون وتبدد الموجة الصادمة**



كيف تتكون هذه الموجة أو النبضة الصادمة؟ تدفع الطاقة الهائلة المتولدة من الانفجار النووية البقايا الغازية والهواء من حول مركز الانفجار، مكونة فقاعة مفرغة ذات جبهة صادمة لافحة تتمدد بسرعة كبيرة في جميع الاتجاهات.[1] تتشكل هذه الجبهة من غازات مضغوطة بشدة ساخنة، تقاس شدة الموجة الصادمة بأضعاف الضغط الجوي، أي بـ *وحدة الغلاف الجوي* (atm) *atmosphere unit*،[2] وتبلغ من القوة أنها تسوي بالأرض كل ما يتواجد في طريقها. قد تدمر الموجة الصادمة الناتجة من التفجير القريب من السطح حتى المنشآت الموجودة تحت الأرض. تفقد الموجة الصادمة في النهاية طاقتها وتتبدد. يصاحب الموجة الصادمة رياح حارة عاتية، خارجة من موقع الانفجار ثم مرتدة إليه، تصل سرعتها إلى أكثر من 250 كم/ساعة.

يطلق على الموجة الصادمة التي تتكون في الهواء اسم عصف الانفجار blast (الشكل 298). يتسبب هذا العصف (الموجة الصادمة، أو *الضغط الجائر* *overpressure*، والريح المصاحب، أو *الضغط الحركي* *dynamic pressure*) في أغلب الدمار الناتج عن التفجير النووي (الضحايا والإصابات، انهيار الأبنية والمنشآت، تحطم النوافذ والواجهات الزجاجية؛ الشكل 299).

(1) قطعت الموجة الصادمة الناتجة من تفجيري هيروشيما وناجاساكي النوويين مسافة 11 كيلومترا في خلال 30 ثانية.

(2) وحدة الغلاف الجوي تعادل 101,325 پا (پسكال) أو 760 مم زئبق (mm Hg).

**الشكل 298 : تصوير لموجة العصف**

**الشكل 299 :**

**تأثير عصف تفجير هيروشيما على مبنى خرساني**

## • النبضة الكهرباء-مغناطيسية

تحدث نبضة *كهرباء-مغناطيسية* *electromagnetic pulse* لحظة التفجير وتنتهي سريعاً خلال ثوان قليلة. تستطيع هذه النبضة الكهرباء-مغناطيسية إعطاب العتاد الكهربائي والإلكتروني (الشبكة العمومية، أبراج المحمول، أطباق الاستقبال، أجهزة الرادار، وغيرها). وقد تسبب التشويش في الاتصالات اللاسلكية لبعض الوقت، حتى وإن لم تتلف المعدات نفسها.

قد يعطب التفجير النووي في الغلاف الجوي الأقمار الاصطناعية الواقعة في متناول الانفجار. يعد ذلك استخداما تكتيكيا للأسلحة النووية، حيث يعيق قدرة مجتمع العدو على العمل دون التسبب في الكثير من مشاكل التلوث الإشعاعي على نطاق جغرافي واسع ومدى زمني طويل.

الهواتف وأجهزة اللاسلكي المحمولة لديها هوائيات قصيرة. لذلك قد تنجو من تأثير النبضة الكهرباء-مغناطيسية إذا لم تكن متصلة بمصدر للكهرباء لحظة الانفجار. كما ستعمل أجهزة الإنقاذ التي ترسل إلى المنطقة المنكوبة إذا توفرت لها البنية التحتية اللازمة.

## • سحابة الفطر وريشة التلوث

بسبب الحرارة الهائلة المتولدة من الانفجار يتبخر كل شيء في كرة النار (شظايا القنبلة، التربة، وغيرها) ويحمل لأعلى على شكل "سحابة الفطر" المشهور بها الانفجار النووي. تذري الريح سحابة الفطر مكونة ما يسمى "ريشة التلوث contamination plume".

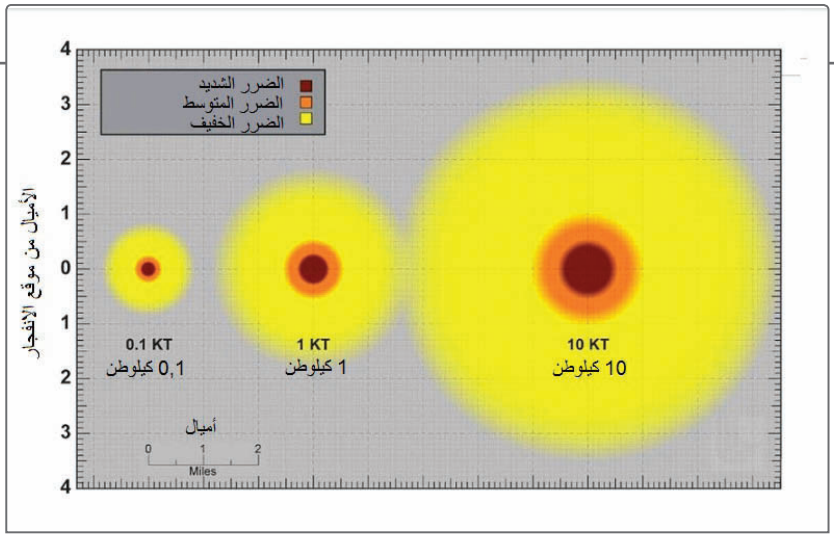
- **السقط النووي والإشعاع المؤين المتأخر**

تنتقل نواتج الانشطار والعناصر المستحدثة المشعة مع سحابة الانفجار حسب اتجاه الريح السائد. تبرد هذه المواد المشعة بمرور والوقت، تتكثف، وتسقط على الأرض، مكونة بقع ملوثة بالإشعاع. يستتبع ذلك انتقالها إلى الماء والغذاء.

- **نطاقات الضرر**

يقسم مخططو الاستجابة للطوارئ المنطقة المنكوبة بتفجير نووي إلى نطاقات حسب شدة الأضرار كالتالي: الضرر الخفيف light damage (LD)، الضرر المتوسط moderate damage (MD)، والضرر الشديد أو اللا-ذهاب severe damage or no-go (NG). الهدف من هذا التقسيم هو تعظيم العائد من جهود الإنقاذ من خلال توجيه الموارد المتاحة إلى المناطق التي تحتاجها.

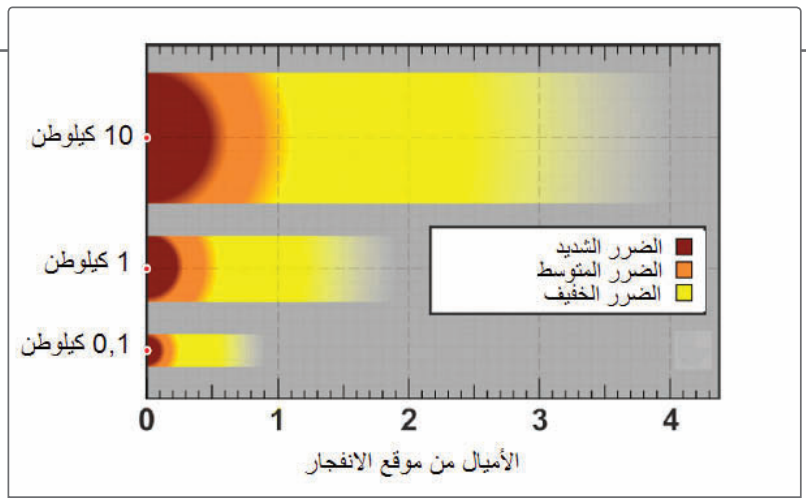
**الشكل 300:**
**نطاقات الضرر لتفجيرات نووية طاقتها 0.1، 1، 10 ك ط**



يوضح الشكل 300 والشكل 301 نطاقات الضرر الناتج من تفجيرات نووية طاقتها 0.1، 1، 10 كط. سنناقش الآن بشيء من التفصيل نطاقات الضرر لتفجير نووي طاقته 10 كط بالقرب من السطح في منطقة حضرية.

**الشكل 301:**

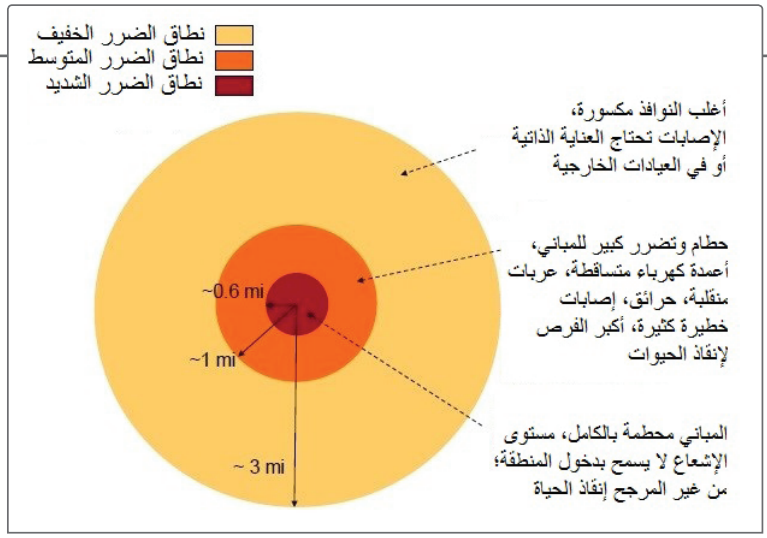
**امتدادات نطاقات الضرر لتفجيرات نووية طاقتها 0.1، 1، 10 كط**




لا توجد فواصل واضحة بين نطاقات الضرر الناتجة من تفجير نووي، لكن الخطوط المرسومة هي مجرد حدود تقريبية لمساعدة مخططي الاستجابة. بشكل عام، يتميز نطاق الضرر الخفيف بالنوافذ المحطمة والإصابات التي يمكن علاجها بسهولة؛ نطاق الضرر المتوسط بتضرر المباني الشديد، الأنقاض، خطوط المرافق والأعمدة الساقطة، المركبات المنقلبة، الحرائق، والإصابات الخطيرة؛ نطاق الضرر الشديد بالبنية التحتية المدمرة كليا ومستويات الإشعاع العالية التي تجعل من نجاة الضحايا أمرا غير مرجح (الشكل 302).

**الشكل 302:**

**نطاقات الضرر لتفجير طاقته 10 ك‌ط**




- **نطاق الضرر الخفيف**

- هي المنطقة الممتدة ما بين 3 أميال (4.8 كم) وميل واحد (1.6 كم) من موقع الانفجار.
- يحدث الضرر في هذا النطاق أساساً بفعل النبضات الموجية الصادمة، وهو يشبه ما يحدثه قصف الرعد، ولكن بصورة أشد. يتراوح الضغط الذي تسببه الموجات الصادمة ضمن هذا النطاق ما بين 0.5 ربم (رطل على البوصة المربعة [pound per square inch [psi) عند حدود النطاق الخارجية و2 – 3 ربم. تحدث الإصابات من الزجاج المتطاير بسبب زيادة الضغط.
- مع التقدم داخل هذا النطاق، سيجد المنقذون المزيد من النوافذ والأبواب مقتلعة ومزاريب الأمطار، أستر النوافذ، الأسقف، والمباني الخفيفة أكثر تضررا. سيزداد الركام، الحطام، والسيارات المنقلبة والمهشمة، مما يصعب من مرور مركبات الإنقاذ. سيشير الضرر الشديد في الأبنية إلى الدخول إلى النطاق التالي: نطاق الضرر المتوسط.

- **نطاق الضرر المتوسط**

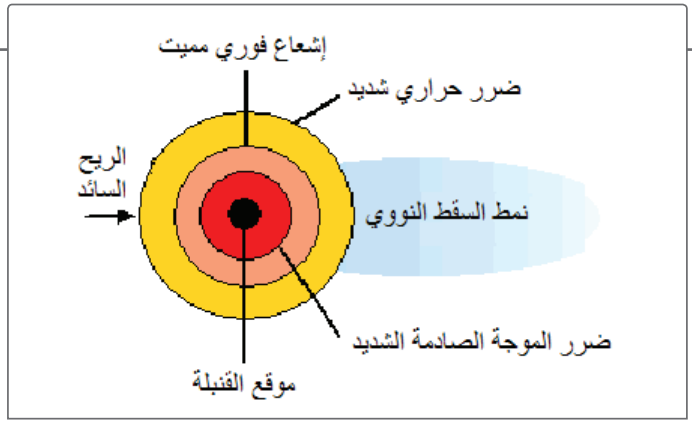
- هو المنطقة ما بين ميل واحد (1.6 كم) و0.6 ميل (0.8 كم) من مركز الانفجار. يتراوح ضغط العصف في هذا النطاق ما بين 3-2 ربم من الخارج و8 ربم ناحية الداخل.
- تشمل علامات هذا النطاق تضرر المنشآت بشدة، محتويات الأبنية المقذوفة، خطوط المرافق الساقطة، العربات المنقلبة، الأسقف المكسورة، بعض المباني المنهارة، والحرائق. ستميل بعض أعمدة التليفونات والإنارة. ستبقى المباني الأقوى قائمة، قد تسقط المباني السكنية والتجارية الأخف أو تصبح غير متماسكة، وستدمر الكثير من المباني الخشبية.
- من المتوقع أن تنسد الشوارع بالأنقاض والمركبات المهشمة والمنقلبة، مما يجعل مرور مركبات الإنقاذ صعبا أو مستحيلا بدون إخلاء الشوارع.
- يرجح مواجهة خطوط المياه، الغاز، الكهرباء، والاتصالات المكسورة والحرائق.
- سينجو الكثير من الضحايا في هذا النطاق، وهؤلاء الناجون هم الأكثر استفادة من العناية الطبية العاجلة.
- سيواجه المنجدون أخطار عديدة في هذا النطاق، مثل مستويات الإشعاع العالية، خطوط الكهرباء الحية الساقطة، خطوط الغاز المخرقة، المنشآت غير المستقرة، الأشياء المعدنية الحادة والزجاج المكسور، ومستودعات الوقود المفتوقة في المركبات.
- سوف تتعذر الرؤية في هذا النطاق لمدة ساعة أو أكثر بعيد الانفجار بسبب الغبار الذي تثيره الموجة الصادمة والأبنية المنهارة. سيعيق الرؤية أيضا دخان الحرائق الناشبة.
- سيواجه المنجدون الأوائل نطاق الضرر الشديد عندما تكون أغلب المباني محطمة بشدة أو منهارة.

- **نطـاق الضـرر الشديد**

- يبدأ هذا النطاق من حوالي 0.5 ميل (0.8 **كم**) من مركز الانفجار. يصل ضغط العصف الجائر في النطاق إلى 8-5 **ربم** وأعلى.
- لا يتوقع وجود أبنية سليمة أو حتى قائمة في هذا النطاق، إلا قليلا. لن ينجو سوى عدد قليل من الناس، مثل الموجودين في المنشآت القوية تحت الأرض (مثل مرائب السيارات تحت الأرض أو أنفاق المترو) أثناء الانفجار.
- سيواجه الناجون والمنجدون مخاطر هائلة في هذا النطاق. لذلك، لا يجب على المنجدين دخول هذا النطاق إلا لإنقاذ الناجين المعلومين وبعد اتخاذ كل إجراءات الحماية المطلوبة.
- سيمتلأ المكان بالأنقاض، ما يجعل وصول النجدة إلى من يحتاجها في الوقت المناسب أمرا غير مرتقب عمليا. مع الاقتراب من نقطة الصفر تكون كل الأبنية عبارة عن أنقاض، تصل عمقها إلى 30 قدما (9 أمتار).

**يوضح الشكل 303 أنماط الضرر العامة الناجمة من مثل هذا التفجير.**

**الشكل 303:**
**أنماط الضرر من تفجير نووي طاقته 10 كط**



## • التعافي أو معالجة التأثيرات البيئية

بعد تلاشي دخان الحوادث (انتهاء مرحلة الإنقاذ)، تبدأ مرحلة التعافي، والتي تشمل الإجراءات التي تتخذ في سبيل إعادة الحياة في المنطقة المنكوبة إلى الأوضاع التي كانت عليها قبل الحادثة. تتوقف تلك الإجراءات على مجمل الأثر البيئي لحادثة الإشعاع.

سنتعرف خلال هذا الجزء على التأثيرات للنشاط الإشعاعي على البيئة، وكيف يمكن التخفيف من التلوث الإشعاعي. بالطبع، قد لا يكون لبعض الحوادث إلا أثر محدود على البيئة، أو يكون أثرها مقصورا على مساحة محلية صغيرة. في المقابل، تؤدي أنواع أخرى من حوادث الإشعاع إلى تأثيرات بيئية مدمرة.

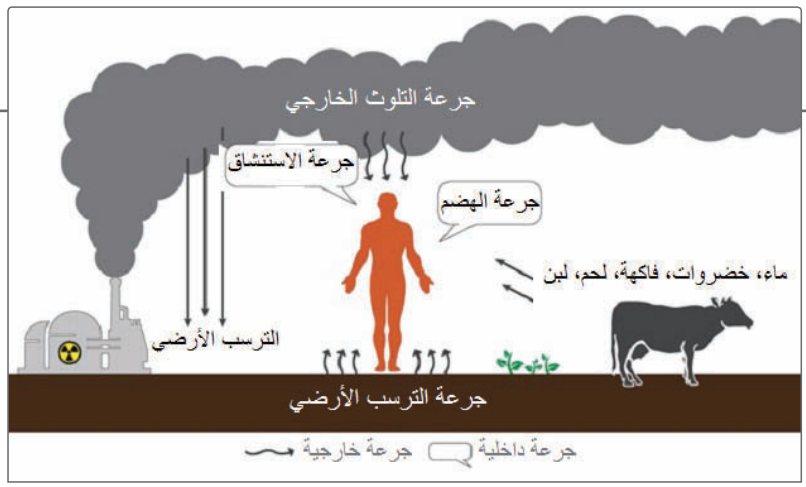
قد تنشر الحادثة كمية كبيرة من المواد المشعة في الجو، مسببة أخطار صحية لبعض الوقت، ويمكن أن تتلوث أسطح المباني والطرق.

قد يجعل تلوث المزارع المحاصيل غير صالحة للاستهلاك. يمكن أن تتلوث ألبان ولحوم المواشي التي تتغذى على العشب الملوث.

## • التأثير على البيئة

النشاط الإشعاعي، كما عرفنا من قبل، موجود فيما نتنفس، نأكل، ونشرب. يمكن لحوادث الإشعاع أن تضيف إلى كمية المواد المشعة الموجودة في البيئة. يتوقف الأثر الفعلي على الصحة والحياة على كمية النشاط الإشعاعي المضاف ومصيره في البيئة. يمكن للمواد المشعة أن تلوث الهواء، سطوح الأبنية، التربة، المياه السطحية، والمياه الجوفية؛ كما يمكنها أن تدخل السلسلة الغذائية من مسارات متعددة. سنستعرض في الجزء الحالي مسارات التعرض هذه (الشكل 304).

**الشكل 304 : الإشعاع والبيئة**




- **الـهـــــواء**

قد تتسرب المواد المشعة إلى الجو على شكل غاز أو جسيمات. يطلق على سحابة هذه الملوثات اسم "الريشة plume"، والتي قد تكون مرئية أو غير. بعض الغازات المشعة، مثل الزينون والكريبتون، خاملة، لها أعمار نصفية قصيرة، تتبدد سريعا، ولا تمثل خطرا بيئيا في المنظور البعيد. يتسرب اليود المشع أيضا على شكل غاز، لكنه يرتبط سريعا بكيماويات أخرى، ويبقى في البيئة فترة أطول. قد تلوث المواد المشعة الجو على شكل جسيمات معلقة. يمكن أن يحدث ذلك من المصادر التالية:

- مداخن المرافق الصناعية إذا ما جرى صهر مصدر مشع موجود ضمن الخامات؛
- تسرب لنواتج الانشطار من محطة طاقة نووية؛
- تفجير قنبلة قذرة أو شكل آخر من أجهزة النشر الإشعاعية؛
- أو تفجير سلاح نووي.

تنشر الجسيمات المشعة بواسطة الرياح، وتتساقط في النهاية على الأرض. انتشار الجسيمات المشعة ورسوبها هو موضوع معقد، ليس مجاله هذا الكتاب. لكن مدى الضرر البيئي، **بشكل عام، يتوقف على العوامل التالية:**

- كمية المواد المشعة المتسربة؛
- الخصائص الفيزيائية والكيميائية للجسيمات المشعة؛
- الارتفاع الذي تصل إليه هذه الملوثات عند انطلاقها؛
- الرياح السائدة على مختلف الارتفاعات؛
- تضاريس المنطقة المحيطة؛
- وحالة المطر.

- **أسـطح المـــواد**

تلوث الجسيمات المشعة أسطح المواد التي تترسب عليها (المباني، الشوارع، الأرصفة، إلخ). قد تصل هذه الجسيمات إلى داخل الأبنية عن طريقة التهوية أو مع أثر الأحذية. يمكن في العادة إزالة الكثير من هذا التلوث عن طريق المسح والغسل. قد يكون من الصعب إزالة الملوثات المستقرة في الشقوق والشروخ.

تحتوي البيئة الحضرية على تنويعة من المواد: الخرسانة، الأسفلت، الجرانيت، الرخام، الطوب، الصلب، الزجاج، الخشب، والبلاستيك. قد تتفاعل كيميائيا بعض المواد المشعة مع الأسطح التي تتواجد عليها، وتثبت بها. يتطلب إزالتها عندئذ استخدام أساليب أقسى مثل الصنفرة والحك.

يوصف في اللغة الفنية التلوث المشع الذي يمكن إزالته بالمسح والغسل بـ *التلوث السائب أو المتحرك loose or mobile contamination*؛ المتبقي بعد ذلك بـ *التلوث الثابت fixed contamination*.

تظل الملوثات السائبة عرضة للتطاير في الجو. يحد من ذلك هطول المطر. قد يلجأ المسؤولون عن إزالة التلوث إلى رش المياه على الأسطح الملوثة لتقليص تطايرها. يُصَعِّب التصاق الملوثات المشعة بالأسطح من عمليات إزالتها، لكنه في الوقت نفسه يحد من انتشارها في البيئة. قد تشكل الملوثات الثابتة خطرا على الأشخاص الذين يبقون فترة طويلة قريبا من السطح الملوثة.

في الحوادث الكبيرة، تحتاج السلطات المسؤولة إلى تحديد الأولويات فيما يتعلق بالمناطق التي تحتاج للتنظيف. تعطي هذه الأولوية للمناطق الملوثة بشدة أو التي يرتادها الناس كثيرا، خاصة الأطفال. كذلك المنشآت الحيوية، مثل المستشفيات، المرافق، والبنوك.

تتوقف الإجراءات المتبعة في التنظيف وإزالة التلوث على اعتبارات متنوعة. قد يكون من الأفضل في حالة الملوثات المشعة قصيرة العمر تطويق المنطقة الملوثة وحظرها حتى ينخفض النشاط الإشعاعي تلقائيا إلى حد مقبول. قد ينتج عن محاولات إزالة الملوثات المطلقة لجسيمات ألفا (ضعيفة النفاذية) إلى تطايرها في الجو، ودخولها إلى الجسم، مما يزيد من خطورتها (نتيجة للتعرض الداخلي لها). في تلك الحالة، قد يكون من الأحسن، كإجراء مؤقت، وضع طبقة من الطلاء على الأسطح الملوثة، لتثبيت الملوثات وحجب جسيمات ألفا. لابد من فحص هذا الطلاء بشكل دوري للتأكد من عدم تقشره، لحين تنظيف تلك الأسطح بشكل دائم أو انخفاض نشاط الملوثات الإشعاعي إلى مستويات مقبولة.

### • التـــربـــة

ستتلوث التربة بالمواد المشعة التي تتساقط عليها. ينحصر التلوث بداية في التربة السطحية. بمرور الوقت، وبفعل *عوامل التجوية* *weathering* المختلفة، تنتقل الملوثات المشعة إلى طبقات التربة الأعمق. مع هبوب الريح، قد تتطاير الملوثات

السطحية ثانية إلى الجو، مسببة خطرا تنفسيا (تعرض داخلي). قد تمتص جذور النباتات الملوثات السطحية. مع الوقت، تتنقل ملوثات التربة بفعل المطر، المياه الجوفية، والتعرية.

تجريف طبقات التربة السطحية من مساحات واسعة من الأراضي الملوثة قد لا يكون مجديا عمليا. لذلك، قد يجرى عوضا عن ذلك تقييد استخدام تلك الأراضي، وزرعها بالنباتات للحد من تحاتها. يمكن أيضا خفض الملوثات المشعة في التربة السطحية عن طريق الحرث العميق، الذي يخلط التربة السطحية الملوثة بالطبقات الأعمق الأقل تلوثاً.

**اقترحت الوكالة الدولية للطاقة الذرية، بعد دراسة مطولة لحادثة تشيرنوبيل، طريقة عملية وبسيطة لخفض التعرض للتلوث المشع من التربة:** [1]

- إزالة التربة السطحية الملوثة بعمق 5 – 10 سم من أفنية المنازل، حول الأبنية العامة، المدارس، ودور الحضانة؛
- حفر آبار في المواقع الملوثة كافية لاستيعاب كميات التربة المزالة؛
- تغطية المناطق المزال منها التلوث بالتربة المستخرجة من حفر الآبار؛
- ودفن التربة الملوثة داخل الآبار المحفورة.

**لا تتطلب هذه الطريقة نقل التربة الملوثة أو تخصيص أماكن مخصصة لتخزينها.**

## • المياه

يمكن أن تتلوث المسطحات المائية، مثل البحيرات والأنهار، من تساقط المواد المشعة من الجو، انجراف التربة الملوثة من المناطق المحيطة، أو تصريف السوائل الملوثة.

(1) أنظر IAEA (2006).

لنرى ماذا يمكن أن يحدث عند مرور سحابة التلوث فوق بحيرة كبيرة. قد يتساقط بعض من الملوثات المشعة على سطح البحيرة. مع اختلاط هذه الملوثات مع كميات كبيرة من مياه البحيرة، ينخفض تركيزها بدرجة معتبرة. لن تشكل مياه البحيرة نفسها خطرا على الملاحة.[1] لكن غالبا ما ستوضع بعض القيود المؤقتة على السباحة والصيد في هذه المياه الملوثة. سيزداد النشاط الإشعاعي في قاع البحيرة مع ترسب الملوثات المشعة عليه. في الأغلب، لن تكون إزالة الرواسب الملوثة مجدية عملياً.

قد تتلوث المياه الجوفية أيضا. يتوقف ذلك على عدة عوامل: الخصائص الكيميائية للتلوث، قدرته على الانتقال خلال التربة، وأماكن تواجد المياه الجوفية.

تؤدي عمليات معالجة مياه الشرب إلى إزالة كمية كبيرة من الجسيمات المشعة من المياه، مما يتسبب في زيادة النشاط الإشعاعي لـ *الحمأة sludge* الناتجة عن عمليات المعالجة. لا تزيل معالجة المياه الملوثات المشعة الذائبة. لذلك، يجب رصد الإشعاع في مصادر مياه الشرب أو عند دخولها إلى محطات المعالجة، واستخدام مصادر بديلة إذا زاد النشاط الإشعاعي في المصادر المعتادة عند الحدود المسموح بها.

## • الخضـــرة

ستتساقط المواد المشعة على أسطح الخضرة، مثلما هو الحال مع الأسطح الأخرى.[2] إذا كان هذا التساقط جافا (بدون مطر)، ستحتفظ "المناطق الخضراء" بالملوثات المتساقطة بشكل أكبر من المناطق المرصوفة. سيؤدي هطول

(1) قد تحمل الريح القادمة من خط الشاطئ الأتربة المشعة، مما قد يسبب خطرا على المبحرين في الطرق المائية.

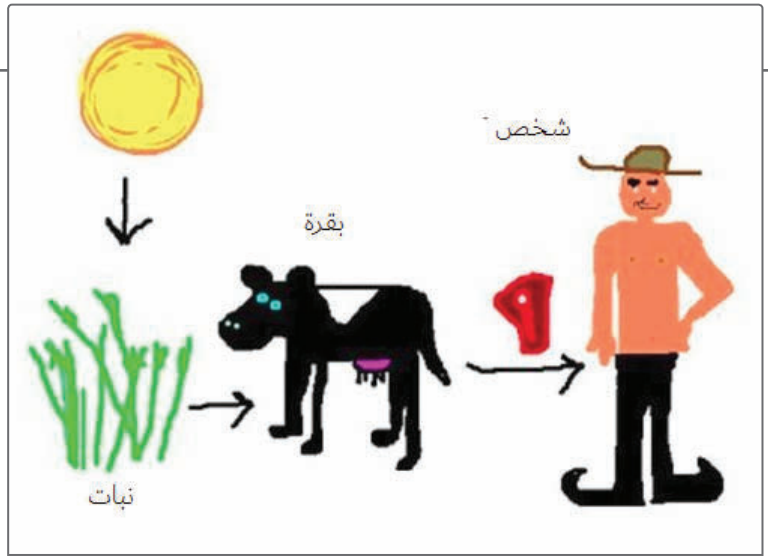
(2) تلتصق المواد المشعة الموجودة في الجو بأوراق التبغ العريضة اللزجة. تتطاير هذه المواد عند إشعال السجائر، وتدخل إلى أجسام المدخنين. يعتقد أن أبخرة البولونيوم المشع المنشوقة هي عامل رئيس في إحداث سرطان الرئة بين المدخنين.

المطر إلى "شطف" الكثير من هذا التلوث إلى التربة. ستنتقل المواد المشعة إلى داخل النباتات عند امتصاص جذورها المياه من التربة الملوثة. قد يقرر المختصون إزالة الأشجار الملوثة بشدة، أو ترك الخضرة للحد من انتشار التلوث بفعل العوامل الجوية (مثل الأمطار والرياح).

## • الغـــــذاء

يعد التلوث السطحي للنباتات والحيوانات مشكلة قصيرة المدى، في الأيام أو الأسابيع القليلة بعد الحادثة. أما الملوثات التي تدخل ضمن بنية الكائنات الحية، من خلال ما يعرف بـ *السلسلة الغذائية* *food chain* (الشكل 305)، فتشكل خطراً صحيا طويل الأمد.

**الشكل 305:**
**السلسلة الغذائية في النظم البيئية البرية**
**(رسوم أطفال)**



ستتعرض الخضروات والفواكه المخزنة في العراء إلى التلوث السطحي بالمواد المشعة. يفضل تجنب استهلاك هذه المنتجات إذا توفرت مصادر بديلة. أما إذا كان ولابد من استخدامها، فيجب غسلها جيدا، وتقشيرها إن أمكن.

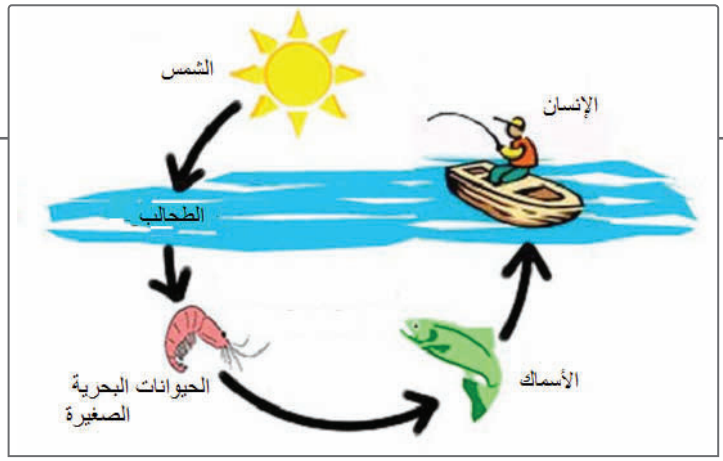
ستنتقل الملوثات المشعة إلى داخل النباتات من خلال جذور النباتات مع ماء التربة. تنتقل هذه الملوثات إلى ألبان ولحوم الحيوانات التي تتغذى على النباتات الملوثة. يحدث الانتقال خلال السلسلة الغذائية بشكل سريع.

تلوث الأغذية الداخلي لا يمكن غسله. لذلك، قد تصدر السلطات المختصة عند حدوث تسرب للمواد المشعة في البيئة تحذيرات للناس في المنطقة المنكوبة من استهلاك الخضروات والفواكه المنتجة محليا لحين تقييم مستويات النشاط الإشعاعي بهذه المنتجات.

يحدث الشيء نفسه في البيئات المائية (الشكل 306). تقوم الأحياء المائية بتركيز الملوثات الذائبة في الماء داخل أجسامها، فيما يعرف بـ *التركيز الأحيائي* bioconcentration *والتكبير الأحيائي* biomagnification.

**الشكل 306:**

**السلسلة الغذائية في النظم البيئية المائية**



## • نطاق التأثير

يتباين نطاق الأثار البيئية المترتبة على الطوارئ الإشعاعية من حادثة لأخرى. سنفحص في هذا الجزء الآثار البيئية المتوقعة من أنواع الحوادث الإشعاعية الرئيسة.

## • محطات الطاقة النووية

التسرب الإشعاعي من حوادث المحطات النووية قد يكون له آثار بيئية ضارة على مساحة كبيرة ولفترة طويلة من الوقت، مثلما حدث في تشيرنوبيل 1986. تسببت هذه الحادثة في تلويث مساحة تبلغ 150,000 كم$^2$ داخل الاتحاد السوفيتي السابق. شملت هذه المساحة نحو 20% من أراضي روسيا البيضاء. كما تلوثت قرابة 45,000 كم$^2$ في أوربا الشمالية والشرقية. أدت الحادثة إلى تلوث المحاصيل، المواشي، ومنتجات الألبان في مناطق جغرافية شاسعة. مازالت مستويات الإشعاع في المناطق التي تلوثت بشدة أعلى من المستويات الموصي بها بعد مرور هذه السنين على الحادثة. يجدر بالذكر أن الناس يمكنهم العيش في تلك المناطق التي ماتزال ملوثة طالما راعوا التحذيرات الصحية من استخدام مجموعة معينة من المواد الغذائية النامية محليا. تتواجد التركيزات الأعلى من السيزيوم-137 في المنتجات الغذائية المتحصل عليها من مناطق الغابات الملوثة، خاصة في فطريات عش الغراب، أنواع التوت، طيور الصيد، وأيائل الرنة. كما توجد في أسماك البحيرات التي لا تتجدد مياهها سريعا، خاصة إذا ما كانت ضحلة.

قد لا يستطيع سكان الريف تحمل كلفة المنتجات النظيفة المجلوبة من المناطق التي لم تتأثر بالحادثة. لقد وجدت مستويات زائدة من النشاط الإشعاعي في أجسام الأشخاص الذين استهلكوا المنتجات الغذائية الملوثة بالمواد المشعة، لكن لم يتضح بعد العواقب الصحية لذلك. قد يؤدي غلي اللحوم والخضروات والتخلص

من مياه الغلي قبل الطهي إلى خفض مستوى النشاط الإشعاعي بهذه الأغذية، لكن الأكثر أمنا هو تجنب استهلاك المنتجات الملوثة لو أمكن.

بعد حادثة "ثري مايل أيلاند Three Mile Island"، جمعت ألاف العينات من الهواء، الماء، الخضرة، التربة، والمنتجات الغذائية من حول ريف "بنسلفانيا Pensylvania" المحيط بالمفاعل المنكوب. على عكس الحال في حادثة تشيرنوبيل، لم تظهر تحليلات هذه العينات سوى نشاطا إشعاعيا منخفضا جداً. لم يكن لحادثة ثري مايل أيلاند أي أثر بيئي يذكر. ترجع هذه النتيجة السارة إلى انحجاز أغلب المواد المشعة داخل حاوية المفاعل وعدم تسربها إلى البيئة.

## • القنبلـــة القـــذرة

يتوقف الأثر البيئي لانفجار قنبلة قذرة على الظروف الخاصة بكل حادثة. أهم هذه الظروف هي نوع وكمية المادة المشعة الموجودة في القنبلة، تصميم المتفجرات، التضاريس المحيطة، والظروف الجوية وقت الانفجار (مثل الريح والمطر).

إذا ما حدث التفجير داخل منطقة حضرية، وكانت المادة المشعة المستخدمة قابلة للتطاير والانتشار، يرتقب أن تتلوث عدة كتل من الأبنية بمقادير معتبرة من النشاط الإشعاعي. سيصبح تنظيف الأماكن الملوثة في هذه الحالة أمرا صعباً ومكلفاً. لذلك، قد يتقرر ترك بعض التلوث الثابت كما هو بسبب كلفة إزالته الباهظة.

من الأرجح ألا تكون لمثل هذه الحوادث آثار زراعية طويلة الأمد، لعدة أسباب. القنبلة القذرة هي في الأساس أداة إرهاب: المقصود من تفجيرها بث الذعر بين المدنيين. يرتقب أن تحتوي مثل هذه القنابل على كميات محدودة من المواد المشعة (الكميات التي يتمكن الإرهابيون من سرقتها). إذا صممت القنبلة القذرة بغرض نشر المواد المشعة بها على أوسع نطاق، سيترتب على ذلك بالضرورة انخفاض تركيز تلك المواد في البيئة المحيطة. كما سيفضل الإرهابيون، لتحقيق

مأربهم، تفجير القنابل القذرة في المناطق الحضرية المكتظة بالسكان (أي بعيدا عن المناطق الزراعية).

على كل حال، يجب على السلطات الصحية إجراء الرصد البيئي اللازم واتخاذ الإجراءات الاحترازية حتى تتبين نتائج الرصد.

## • التفجيـــر النـــووي

في جزء سابق ناقشنا الأثر الفوري للتفجير النووي على حياة البشر، وعلاقة ذلك بالحصد التفجيري وارتفاع موقع التفجير (أي في الهواء أم على الأرض). تؤثر هذه العوامل ذاتها على امتداد الأثر البيئي للانفجار. في حالة التفجير السطحي (قريبا من سطح الأرض)، تلامس كرة النار اليابسة، مبخرة كمية كبيرة من التربة ومواد البناء. تُبتلع سحابة الفطر المتكونة هذه المواد المتطايرة. تتساقط هذه المواد فيما بعد على الأرض، مكونة ما يعرف اصطلاحيا بـ *التساقط النووي nuclear fallout*. يشكل التساقط النووي مصدرا للتلوث البيئي بعيدا عن موقع الانفجار.

تتساقط الجسيمات الكبيرة والأكثر إشعاعا خلال الساعات القليلة الأولى بعد الانفجار، وتحدد الظروف الجوية (الريح والمطر) أنماط التساقط. أما الجسيمات الأصغر، فتتشتت في التروبوسفير، تظل معلقة لفترة أطول، وترتحل لمسافات أبعد قبل أن تترسب هي أيضا على الأرض في غضون أيام.

في حالة التفجيرات النووية عالية الحصد (أكبر من 500 كط)، يخترق الحطام الستراتوسفير ليصبح مصدرا لتساقط نووي يدوم حول العالم لشهور كثيرة. يجدر بالذكر هنا أن كلما تأخر التساقط كلما زاد تشتت الجسيمات المشعة وانخفض نشاطها الإشعاعي. تعود مستويات السيزيوم المشع الضعيفة التي يمكن قياسها حاليا في أفنية المنازل إلى بقايا تجارب الأسلحة النووية التي أجريت في الغلاف الجوي قبل 60 عاماً خلت.

لا يتوقع أن يستطيع الإرهابيون صنع قنبلة نووية يزيد حصدها عن عدة كيلو أطنان. لن تستطيع كسف مثل هذه القنبلة الوصول على الستراتوسفير. مع ذلك، سيظل من الممكن رصد تأثيراتها البيئية على بعد ألاف الكيلومترات.[1]

قد يتركز التساقط النووي في بقع محددة، مثلما حدث بعد التجربة النووية فوق صحراء نيفادا في أبريل 1953. رصدت أعلى مستويات التساقط "تروي Troy"، نيويورك، بعيدا عن موقع الانفجار بنحو 4,000 كيلومتر. يعود السبب في ذلك إلى سقوط المطر فوق هذه المنطقة بعد الانفجار.[2]

يمكن للتساقط الذي يتبع التفجير النووي أن يحدث آثارا بيئية طويلة الأمد خارج منطقة الدمار الفوري، مثل تلك التي نتجت عن حادثة تشيرنوبيل: مساحات من التربة والمياه الملوثة بالمواد المشعة. قد تفرض القيود في هذه الحالات على استهلاك المنتجات الغذائية المحلية لعدة عقود.

## • الحوارات الأخرى

**سنناقش في هذا الجزء الطوارئ الأخرى التي تحدث بتكرار أكبر حول العالم.**

- **المصادر المفقودة أو اليتيمة.** لن يكون لحوادث المصادر المفقودة تأثير بيئي يذكر إلا إذا جرى تخريب المصدر المشع، مثلما جرى في حادثة جوانيا 1987. أدت هذه الحادثة إلى تلويث 46 مسكنا، ونتج عن أنشطة التنظيف 3500 م$^2$ من النفايات المشعة. على كل حال، تنحصر الآثار

(1) جرى تفجير القنبلة النووية الأولى (عملية الثالوث الأقدس) على ارتفاع 30 مترا من سطح الأرض في صحراء نيومكسيكو. لامست كرة النار الناتجة رمال الصحراء وتسببت في كمية معتبرة من التساقط.

(2) فجرت قنبلة نيفادا فوق ارتفاعه 300 قدم (90 مترا)، وبلغ حصدها 16 ك‌ط.

البيئية لحوادث المصادر المفقودة في مناطق جغرافية صغيرة. مع أنها تتسبب في معاناة كبيرة للمتأثرين بها، فإن عددهم يكون صغيراً نسبياً.

- **الحادثة الصناعية.** قد تؤدي الحوادث الصناعية إلى تسرب المواد المشعة من المداخن أو مصارف النفايات السائلة. يرجح أن تكون الجرعات الإشعاعية الفردية في هذه الحوادث منخفضة وغير خطيرة، لكن هذه الحوادث قد تؤثر على البيئة المحيطة. بشكل عام، تنحصر الآثار البيئية الناجمة في منطقة جغرافية صغيرة، وسيتكون عمليات التنظيف مجدية عمليا وإن كانت مكلفة اقتصاديا.

- **حوادث النقل.** تنقل المواد المشعة عالية المستوى في حاويات خاصة منيعة ضد الصدمات والحرائق. لا يرجح انكسار هذه الحاويات في حوادث النقل. في المقابل، تنقل النظائر المشعة الطبية بشكل معتاد في حاويات عادية. قد يحدث تسرب لهذه المواد أثناء حوادث النقل، لكن نشاطها الإشعاعي منخفضاً وأعمارها النصفية قصيرة (ساعات أو أيام). قد تنتشر المواد المتسربة لبعض المسافات، لكن تأثيرها البيئي سيكون ضئيلاً أو منعدما.

- **التطبيقات الطبية.** يترك المرضى الذين يتناولون العقاقير المشعة افرازاتهم وبعض الفضلات المشعة في الأماكن التي يرتادونها. لكن هذه البقايا ليس لها أثر بيئي يذكر.

# الطاقة النووية
# في
# الوطن العربي

# الطاقة النووية
# في العالم العربي

أبدت دول عربية كثيرة في فترات مختلفة اهتماما بتطوير برامج للطاقة النووية. لكن هذا الاهتمام القديم لم يؤدي إلى إنتاج الكهرباء النووية في العالم العربي إلا هذا العام (2020)، عند تشغيل محطة براكة النووية الإماراتية.

نحن نعرف أن استغلال الإنسان للطاقة النووية بدأ بصنع القنبلة الذرية الأمريكية واستخدامها في الحرب العالمية الثانية لإخضاع اليابان. لم تستخدم الطاقة النووية في توليد الكهرباء على نطاق صناعي إلا بعد نهاية تلك الحرب بعشر سنين.[1] لذلك حرصت الدول الكبرى المنتصرة والتي استطاعت الحصول على السلاح النووي خلالها (الولايات المتحدة) أو بعدها—حرصت على حصر هذا "الامتياز" أو التفوق في أيديها.

ربطت القوى الكبرى حصول الدول النامية على المساعدة الدولية أو الأجنبية في مجال الطاقة النووية السلمية بتخلي الأخيرة عن أي أنشطة قد تزيد من قدراتها على صنع أو امتلاك الأسلحة النووية. عملت هذه القوى على إنشاء الوكالة الدولية للطاقة الذرية في 1957 خصيصا لهذه المهمة.

يوجد ارتباطاً قوياً بين القدرات النووية السلمية وتلك الحربية. على سبيل المثال، يمكن استخدام الأجهزة نفسها لتخصيب اليورانيوم إلى المستويات الضرورية لوقود المفاعلات النووية (3 - 5 %) أو إلى المستويات العالية اللازمة لصنع الأسلحة النووية (80 – 90 %). كذلك، تتضمن عمليات إعادة معالجة الوقود المستهلك

(1) افتتحت الملكة "إليزابيث الثانية Elizabeth II" أول مفاعل نووي لتوليد الكهرباء على نطاق صناعي، "كولدر هول Calder Hall"، في 17 أكتوبر 1956.

استخراج البلوتونيوم المتكون فيه، والبلوتونيوم يمكن استخدامه أيضاً في صنع القنبلة الذرية (قنبلة ناجاساكي النووية كانت مصنوعة من البلوتونيوم).

كل هذا يجعل حصول الدول العربية على تكنولوجيا محطات الطاقة النووية أمرا صعبا وخاضعا لتقلبات السياسة الدولية. هناك أيضا فريق من الكتاب والمحللين يسعون دائما إلى تحذير الحكومات الغربية من مساعي أي دولة عربية لامتلاك تكنولوجيا الطاقة النووية السلمية.[1]

يشكك البعض في نية الدول العربية التي تسعى لامتلاك محطات الطاقة النووية بالقول أن استغلال الطاقة الشمسية هو أفضل لهذه الدول وأقل كلفة من الطاقة النووية. لكنهم يتغافلون عن حقيقة أنه لا يمكن الاعتماد كلية على الطاقة الشمسية في توفير ما يعرف هندسيا بالحمل الأساسي، على الأقل حتى الآن، وأن تخزين الطاقة الشمسية مازال مكلفا.

في الوقت الراهن، أدت الزيادة الكبيرة في الطلب على الطاقة إلى بعث اهتمام أغلب الدول العربية بالطاقة النووية من جديد. ويعد الكثير من القادة والمواطنين العرب النجاح في إقامة صناعة نووية مبعث فخر واعتزاز وطنيين، على اعتبار أن ذلك يدل على تقدم الدولة علميا وتكنولوجيا.

سنستعرض في هذا الجزء الإنجازات النووية السلمية لثلاث دول عربية هي الأكثر نشاطا حاليا في هذا المجال، وهي الإمارات، مصر، والسعودية.

## • الإمـــارات

تمتلك الإمارات أول محطة طاقة نووية تجارية في العالم العربي: محطة براكة النووية. يأتي اهتمام الإمارات بتطوير قدراتها النووية ضمن مساعيها لتنويع

(1) انظر، على سبيل المثال، المقالة التالية:

Joe Cirincione, "Selling Saudis the Nuclear Rope to Hang US," ***Lobelog***, March, 2, 2018.

مصادر الطاقة التي تستخدمها.[1] هذا التنويع له أهمية كبرى من نواحي عديدة: اقتصادية، أمنية، وبيئية.[2]

تُنتَج الغالبية العظمى من كهرباء الإمارات من حرق الغاز الطبيعي (98 % في 2012). مع أن الإمارات تمتلك سابع أكبر احتياطات الغاز الطبيعي في العالم، أصبحت في المحصلة مستوردا للغاز الطبيعي، وذلك نتيجة لارتفاع الطلب على الكهرباء مع النمو الاقتصادي السريع. توليد الكهرباء النووية سوف يحد من اعتماد قطاع الكهرباء على الغاز المستورد، كما سيمكنها من تصدير المزيد من النفط وزيادة مكاسبها منه (بدلا من حرقه لتوفير الكهرباء داخلياً).

تهدف الإمارات إلى الحصول على 50 % من احتياجاتها الكهربية من المصادر النظيفة بحلول 2050، 6 % منها نووية.

تعود بدايات البرنامج النووي الإماراتي الحديث إلى عام 2008. في أبريل من ذلك العام، أصدرت الحكومة الإماراتية وثيقة "سياسة دولة الإمارات العربية المتحدة المتبعة لتقييم وإمكانية تطوير برنامج للطاقة النووية السلمية في الدولة"، والتي عرفت واشتهرت بعد ذلك باسم "الورقة البيضاء The White Paper".

أعدت الورقة البيضاء بإتقان شديد، على اعتبار أنها الإعلان الأول للمجتمع الدولي عن اهتمام دولة الإمارات بخيار الطاقة النووية السلمية. وفقا لـ "جهاز الشؤون التنفيذية" الإماراتي، طلب صانعوا السياسات الإماراتيون المشورة من الأمم العريقة في الطاقة النووية والمنظمات الدولية ذات الصلة، وقد حصلوا على

(1) لمدير مشروع الإمارات لاستكشاف المريخ، عمران شرف، رأي ثاقب في هذا الأمر: يقول شرف، "لم ينتهي العصر الحجري بسبب نفاذ الحجر، ولن ينتهي عصر النفط بسبب نفاذ النفط، إنما بسبب التطور التكنولوجي."

(2) يأتي اهتمام الإمارات بتطوير التكنولوجيا النووية، وأيضا الفضائية، في إطار استراتيجية أوسع لتنمية "الاقتصاد المعرفي" بالدولة.

الإسهامات من الولايات المتحدة، المملكة المتحدة، فرنسا، كوريا الجنوبية، ألمانيا، اليابان، والوكالة الدولية للطاقة الذرية.

**ترتكز سياسة الإمارات في الطاقة النووية على ستة مبادئ إرشادية:**

1. الالتزام بالشفافية التشغيلية التامة؛
2. الالتزام باتباع أعلى معايير الحد من انتشار الأسلحة النووية؛
3. الالتزام بأعلى معايير السلامة والأمن؛
4. التنسيق المباشر مع الوكالة الدولية للطاقة الذرية، والالتزام بمعاييرها لبرامج الطاقة النووية السلمية؛
5. تنمية القدرات الوطنية في مجال الطاقة النووية السلمية من خلال الشراكة مع حكومات الدول المسؤولة ومساعدة المنظمات ذات الخبرة المناسبة؛
6. واتباع الأسلوب الذي يضمن استدامة برنامج الطاقة النووية على المدى البعيد.

اختارت الإمارات الحصول على الوقود النووي من موردين أجانب موثوق بهم، والامتناع عن إنشاء مرافق لتخصيب اليورانيوم أو إعادة معالجة الوقود المستهلك، وهما عمليتان يمكن استخدامهما من أجل صنع الأسلحة النووية. على كل حال، تشير بعض الدراسات أن شراء دول الخليج اليورانيوم المخصب من الخارج سيكون أرخص من تخصيبه في الداخل.[1]

وقعت الحكومة الإماراتية على جميع الاتفاقات الهامة المتعلقة بالإنتاج السلمي للطاقة النووية، مثل "اتفاق الضمانات safeguards agreement" مع

(1) انظر دراسة "معهد السياسات Policy Institute" بـ "الجامعة الأمريكية في بيروت American University in Beirut (AUB)" في أكتوبر 2016.

الوكالة الدولية للطاقة الذرية.[1] نجحت الإمارات في كسب دعم المجتمع الدولي لبرنامجها النووي وإعجابه بالأسلوب الذي اتبعته.[2]

- **القوانين والمؤسسات**

استغلال الطاقة النووية في بلد ما هو مهمة كبيرة يتطلب إنجازها مجموعة متكاملة من القوانين، المؤسسات، والمرافق، التي تُعرف إجمالا بـ *البنية التحتية النووية nuclear infrastructure*.

في أكتوبر 2009، أصدرت الحكومة الإماراتية القانون الذي ينظم برنامجها للطاقة النووية: "القانون الاتحادي رقم 6 لسنة 2009 بخصوص الاستخدامات السلمية للطاقة النووية". يجدر بالذكر أن القانون يحظر "تطوير، إنشاء، أو تشغيل مرافق تخصيب اليورانيوم أو إعادة معالجة الوقود المستهلك داخل حدود دولة الإمارات العربية المتحدة."

بالإضافة لقانون رقم 6 لسنة 2008، هناك القانون رقم 13 لسنة 2007 بشأن السلع الخاضعة لرقابة الاستيراد والتصدير، والذي يخول الحكومة الإماراتية أن "تحظر أو تقيد استيراد، تصدير، أو إعادة تصدير أي سلعة لأسباب تتعلق بالسلامة، الصحة العامة، البيئة، الموارد الطبيعية، الأمن الوطني، أو لأسباب تتعلق بالسياسة الخارجية لدولة الإمارات."

في أكتوبر 2012، أصدرت الإمارات تشريعاً يضع المسؤولية القانونية عن

(1) الضمانات هي الأنشطة التي من خلالها تستطيع الوكالة الدولية التحقق من أن الدولة المعنية تحافظ على التزاماتها بعدم استخدام برامجها النووية لتطوير الأسلحة النووية.

(2) يبدو أن استراتيجية الإمارات في تطوير برامجها للتكنولوجيا الحديثة، مثل النووية والفضائية، تقوم على الاستعانة بالخبرة الأجنبية الموثوقة وتطوير القدرات الوطنية في آن معا، وذلك لتقليل الوقت والتكلفة المطلوبين.

الأضرار التي قد تنتج بسبب المحطة النووية على عاتق "مشغل المحطة" حصريا. وفقا لهذا القانون، سوف يكون على مشغل المحطة التأمين على الأضرار بما لا تقل قيمته عن حوالي 694 مليون دولار (وهو أعلى بنسبة 50% عن الحد الأدنى المنصوص عليه في معاهدة فيينا المعدلة حول المسؤولية المدنية عن الضرر النووي Revised Vienna Convention on Civil Liability for Nuclear Damage). يفرض القانون على الدولة أن تقبل بالقيام بدور "المُؤمِّن insurer" كملاذ أخير. وفي يوليو 2014، اعتمدت الإمارات "معاهدة التعويضات الإضافية عن الضرر النووي Convention on Supplementary Compensation for Nuclear Damage".

## • الهيئة الاتحادية للرقابة النووية

تأسست الهيئة الاتحادية للرقابة النووية Federal Authority for Nuclear Regulation (FANR) وفقا للمرسوم الاتحادي رقم 6 لسنة 2009 بموجب قانون 6 لسنة 2008، باعتبارها السلطة المستقلة المسؤولة عن الرقابة على السلامة النووية في الدولة: "... تهدف إلى الرقابة على قطاع الطاقة النووية في الدولة وتشجيع أعلى معايير السلامة النووية، الأمن النووي، والحماية الإشعاعية." ووفقا لتصريح "كريستر فيكتورسن Christer Viktorsson"، المدير العام للهيئة الاتحادية، فإن أحد أدوار الهيئة الاتحادية "هو التأكد من أن البرنامج النووي لدولة الإمارات العربية المتحدة يتوافق مع جميع معايير ومتطلبات المجتمع الدولي."[1]

استعان المسؤولون الإماراتيون في تحديد الهيكل الإداري للهيئة الاتحادية ووظائفها بتوصيات الوكالة الدولية للطاقة الذرية في هذا الشأن.

يرأس الهيئة الاتحادية مجلس إدارة على غرار ذلك الخاص بالوكالة الدولية

(1) أنظر كلمة المدير العام على موقع المؤسسة الرسمي على الإنترنت: www.fanr.gov.ae.

للطاقة الذرية. يتكون هذا المجلس، والذي يرفع تقاريره إلى وزير الشؤون الرئاسية، من تسعة أعضاء بدوام جزئي (يختارون من الإماراتيون فقط منذ 2010). يقود المنظمة "مدير عام Director-General" يرفع تقاريره إلى مجلس الإدارة (الشكل 307). تتألف الهيئة من قسمين رئيسين: قسم الإدارة وقسم العمليات. الأول يشمل الشؤون الحكومية والدولية، الموارد البشرية، والإدارة والتشغيل؛ الثاني يضم السلامة النووية، السلامة الإشعاعية، الأمن النووي، الضمانات، والتعليم والتدريب.

**الشكل 307:**

**اجتماع لمجلس إدارة الهيئة الاتحادية مع مديرها العام**

لضمان سلامة المنشآت النووية، العاملين بها، المجتمعات المجاورة، والبيئة، هناك إجراءات مشددة يلزم اتباعها خلال كل الأنشطة التي تجرى في هذه المنشآت. لذلك، تتضمن مسؤوليات الهيئة الاتحادية الرقابة على الأمور التالية:

- جميع مراحل "حياة" المنشأة النووية، من اختيار موقع المنشأة وحتى إنهاء خدمتها؛
- جميع المعاملات على المواد النووية (استيراد، تصدير، نقل، تخزين، صرف، وغيرها)؛
- والإعداد لحالات الطوارئ في المنشأة النووية.

في أكتوبر 2010، كان لدى الهيئة 104 موظفا، 51 % منهم إماراتيون. تتبع الهيئة استراتيجية من ثلاث مراحل لتوطين قوة العمل فيها. تعتمد الهيئة في المرحلة الأولى على فريق أساسي من الخبراء الدوليين. في المرحلة الثانية، يستعان بفريق الخبراء الدوليين في تنمية كوادر ماهرة من الإماراتيين. أم الهدف النهائي، فهو الاعتماد على قاعدة من الخبراء الإماراتيين، مع الاستعانة بالمنظمات الدولية. وفقا لتقرير الهيئة السنوي، وصل العدد في 2019 إلى 244 شخصا، 76 % منهم إماراتيون.[1]

في هذا السياق، عقدت الهيئة اتفاقات ثنائية مع منظمات الرقابة والسلامة العريقة، مثل "مفوضية الرقابة النووية في الولايات المتحدة U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC)" و"المعهد الكوري للسلامة النووية Korean Institute of Nuclear Safety (KINS)". تهدف هذه الاتفاقات إلى تنمية قدرات الهيئة الاتحادية من خلال استعارة الخبراء الدوليين، تبادل المفتشين، وتدريب منسوبي الهيئة في هذه المنظمات الخبيرة.

تقوم الهيئة أيضاً بتدريب منسوبيها داخلياً على الضمانات، التفتيش، المراجعات، وثقافة السلامة.

- **مؤسسة الإمارات للطاقة النووية**

أنشئت "مؤسسة الإمارات للطاقة النووية Emirates Nuclear Energy Corporation (ENEC)" في 2009 لتقوم بمهمتين رئيستين: (1) تنفيذ البرنامج النووي الإماراتي من خلال إقامة، امتلاك، وتشغيل محطات الطاقة النووية؛ (2) عمل استثمارات استراتيجية في قطاع الطاقة النووية على الصعيدين المحلي والدولي.

(1) أنظر FANR (2019).

يعمـل بالمؤسسة حاليـاً 1200 موظف، يشكل الإماراتيون ذوي المهارات 63.4 % منهم. أرادت المؤسسة تقييم عملها بالمقارنة مع برامج الدول الأخرى، فأرسلوا مبعوثين إلى الصين وكوريا الجنوبية من أجل ذلك.

أصبحت المؤسسة في 2010 عضوا في "الجمعية العالمية للمشغلين النوويين World Association of Nuclear Operators (WANO)"، وهي جمعية غير حكومية تهدف إلى رفع سلامة وكفاءة محطات الطاقة النووية حول العالم. الجدير بالذكر، أن ذلك سوف يتيح للمحطات النووية الإماراتية تبادل المعلومات والخبرات مع جميع المحطات الأخرى العضوات في الجمعية. يقع مكتب الجمعية العالمية الرئيس في لندن، ولها أربعة مراكز إقليمية موزعة على باريس، موسكو، أتلانتا، وطوكيو.

في منتصف 2010، شكلت المؤسسة "مجلس مراجعة السلامة النووية" ليقوم بمراجعة سلامة وفعالية عمليات إنشاء، إعداد، وتشغيل المحطة النووية الإماراتية. تكون هذا المجلس من خمسة أعضاء ذوي خبرة عالية في كل مجالات الطاقة النووية المدنية في كل من كوريا الجنوبية، اليابان، والولايات المتحدة.

بالإضافة إلى المنظمات الحكومية السابقة، شكلت الحكومة الإماراتية في 2010 مجلسا استشاريا مستقلا من مجموعة منتخبة من الخبراء الدوليين في مجالات السلامة والأمن النوويين، حظر انتشار الأسلحة النووية، وتطوير الموارد البشرية. تكون "المجلس الاستشاري الدولي International Advisory Board (IAB)" من تسعة خبراء بقيادة "هانز بليكس Hans Blix"، المدير العام السابق للوكالة الدولية للطاقة الذرية.

كانت مهمة هذا المجلس، الذي دام عمله لثماني سنوات، هي تقديم التوصيات بشأن تطوير برنامج الإمارات للطاقة النووية. كان عليه تقديم تقارير نصف سنوية عن تقدم البرنامج النووي فيما يتعلق بالأمور التالية:

- السلامة النووية؛
- الأمن النووي؛
- حظر انتشار الأسلحة النووية؛
- شفافية البرنامج؛
- واستدامة البرنامج.

حصل المجلس الاستشاري، وفقا لميثاق عمله، على تعهد من الحكومة الإماراتية بعدم السعي إلى التأثير على أرائه وبنشر تقاريره دون تعديل.

عقد المجلس اجتماعه الأخير في أكتوبر 2017، وهو الموعد المحدد أصلا للبدء في تشغيل المفاعل النووي الإماراتي الأول، ليختتم أعماله بنشر تقريره السادس عشر والأخير.

- **التدريب والتعليم**

تتبع الإمارات نهجا متعدد الاتجاهات لتنمية الموارد البشرية المطلوبة لبرنامجها النووي. على المدى القريب، هناك "برنامج بعثات الإمارات الدراسية للطاقة النووية UAE Nuclear Energy Scholarship Program"، وهو مبادرة مشتركة من مؤسسة الإمارات للطاقة النووية، الهيئة الاتحادية للرقابة النووية، وجامعة خليفة للعلوم والتكنولوجيا والبحوث. يهدف البرنامج إلى تشجيع الطلاب الإماراتيين على دراسة الهندسة النووية، الكيميائية، الكهربائية، والميكانيكية، مستوى البكالوريوس، والهندسة النووية، مستوى الماجستير، في أرقى الجامعات في العالم. يوفر هذا البرنامج للمبعوث تكاليف الدراسة، راتبا شهريا، ومكافآت على التفوق. أطلق هذا البرنامج في 2009، وتم اختيار 38 طالبا في دورته الأولى (من أصل 500 متقدم). بدأ المبتعثون الدراسة في عدد من المؤسسات الرائدة في فرنسا، الولايات المتحدة،

والإمارات، مثل جامعة جورجيا للتكنولوجيا وجامعة باريس أورساي. يجدر بالذكر، أن جامعة خليفة بأبوظبي تقدم حاليا برنامج للماجستير في الهندسة النووية.

لإعداد المهنيين الإماراتيين المطلوبين للعمل في الصناعة النووية، أنشأ "معهد التكنولوجيا التطبيقية Institute of Applied Technology (IAT)" برنامج تعليم مهني بعد-ثانوي باسم "الدبلوم العالي في التكنولوجيا النووية Higher Diploma in Nuclear Technology (HDNT)". يُقدَم هذا البرنامج حاليا في "بوليتكنك أبو ظبي Polytechnic Abu Dhabi"، الوحدة التابعة للمعهد، والتي افتتحت عملها في 2011 بهذا البرنامج.[1] أُعد هذا البرنامج بالتنسيق مع مؤسسة الإمارات للطاقة النووية و"الشركة الكورية للطاقة الكهربائية (كيبكو) Korea Electric Power Company (KEPCO)". يجمع المنهاج الدراسي للبرنامج بين التعليم الأكاديمي في المعهد والتدريب على الوظيفة on-the-job training في المحطة النووية (محطة براكة الإماراتية أو محطة "شين كوري Shin Kori" الكورية).[2] يدرس الطالب باللغة الإنجليزية لمدة ثلاثة أعوام ويتخصص في إحدى المجالات التالية:

- التشغيل Operation؛
- الكيمياء Chemistry؛
- الحماية من الإشعاع Radiation Protection؛
- التكنولوجيا الميكانيكية Mechanical Technology؛
- التكنولوجيا الكهربائية Electrical Technology؛
- أو الأجهزة والتحكم Instrumentation and Control.

(1) لمزيد من المعلومات عن هذا البرنامج، أنظر موقع المعهد على الإنترنت: www.adpoly.ac.ae.

(2) تستخدم المحطتان، براكة وشين كوري، نفس نوع المفاعلات النووية.

**ترعى مؤسسة الإمارات للطاقة النووية هذا البرنامج، وتضمن للخريجين العمل بها.**

في 2011، تأسس "معهد الخليج لمنشآت الطاقة النووية (جني) Gulf Nuclear Energy Infrastructure Institute (GNEII)" داخل جامعة خليفة. أنشئ هذا المعهد بمبادرة مشتركة من الإمارات العربية المتحدة والولايات الأمريكية المتحدة لنشر "ثقافة الطاقة-النووية المسؤولة responsible nuclear-energy culture" بين المسؤولين في برامج الطاقة النووية بالإمارات والمنطقة. يشارك في دعم وتطوير المعهد العديد من المنظمات الإماراتية والأمريكية: من الإمارات الهيئة الاتحادية للرقابة النووية، مؤسسة الإمارات للطاقة النووية، جهاز حماية المنشآت الحيوية والسواحل، وجامعة خليفة؛ من الولايات المتحدة "مكتب حظر الانتشار والأمن الدولي Office of Nonproliferation and International Security" في وزارة الطاقة، برنامج "الشراكة من أجل الأمن النووي Partnership for Nuclear Security" في وزارة الخارجية، "معامل ساندیا الوطنية Sandia National Laboratories"، و"معهد علوم وسياسات الأمن النووي Nuclear Security Science and Policy Institute (NSSPI)" في "جامعة تكساس ايه-أند-أم Texas A&M University".

يعتمد المعهد في تحقيق رسالته على ثلاثة أعمدة رئيسة: التعليم، البحث، وتنمية القدرات. النشاط التعليمي هو الأكثر تقدما في الوقت الحالي. ينظم المعهد منذ 2014 مساقاً تدريبياً فريداً من نوعه تحت اسم "مساق أساسيات ضمانات، أمن، وسلامة الطاقة النووية، Nuclear Energy Safeguards، Security and Safety Fundamentals Course"، والذي يسمى اختصاراً بـ "مساق الأساسيات Fundamentals Course" أو "مساق الثلاث 3S Course".

يهدف هذا المساق إلى تدريب المشاركين على كيفية تطبيق ثقافة الطاقة

النووية المسؤولة في برامج بلدانهم. يبدأ المساق التدريبي بتعريف المشاركين بالأسس العلمية والتكنولوجية للاستفادة من الطاقة النووية. يتبع ذلك دروس تركز على جوانب السلامة safety، الأمن security، والضمانات safeguards النووية، مع التأكيد على تكامل المكونات الثلاث في منظومة متكاملة واحدة. يتضمن مساق الأساسيات المحاضرات، التمارين، والحالات الدراسية. إضافة لذلك، يشتمل المساق على مكون أساسي يطلق عليه اسم "المشروع المُتوِّج Capstone Project"، وهو بحث يقوم به المسؤول المشارك حول إحدى قضايا الطاقة النووية ذات الصلة.

يجرى اختيار المشاركين في المساق التدريبي من المسؤولين في المنشآت النووية في المستويات الوظيفية الوسطى. تشمل المؤهلات المطلوبة درجة البكالوريوس (أو ما يعادلها)، إجادة اللغة الإنجليزية، الدعم المالي من المؤسسة التي يعمل بها المشارك، والتوصية القوية من المشرفين عليه. فتح المعهد أبوابه في البداية للمهنيين الإماراتيين، ومنذ 2012 لمواطني دول مجلس التعاون الخليجي، ويعمل حاليا على مد خدماته لتشمل بقية الدول العربية.

كان تمويل المعهد يأتي من مكتب حظر الانتشار والأمن الدولي وبرنامج الشراكة من أجل الأمن النووي الأمريكيين وجامعة خليفة الإماراتية، لكنه أصبح إماراتيا صرفا منذ 2017، كما كان مخططا له منذ افتتاح المعهد.

أنشأت جامعة خليفة أيضا، بالتعاون مع الوكالة الدولية للطاقة الذرية، "بوابة للتعلم الإلكتروني e-learning Portal"، لتعزيز برامج التدريب في المجالات ذات الاهتمام المشترك.

## • الطريـــق إلى بـراكـة

لم يضيع الإماراتيون وقتا في سبيل تنفيذ برنامجهم للطاقة النووية؛ بدأت مؤسسة الإمارات للطاقة النووية فور إنشائها تستطلع استعداد الشركات النووية الكبرى للمشاركة في إنشاء وتشغيل محطة الإمارات النووية الأولى.

قررت الإمارات أن تتبع مع محطتها النووية "نموذج الأعمال business model" المستخدم فيما يعرف باسم مشروعات "منتجي الماء والكهرباء المستقلين Independent Water and Power Producers"، الصورة الخليجية من نموذج "شيد، تملك، وشغل build، own، and operate (BOO)".[1] كما فضلت استخدام تكنولوجيا مفاعلات الماء الخفيف من الجيل الثالث

- تواصلت المؤسسة الإماراتية في البداية مع تسع شركات نووية. وفي منتصف 2009، طلبت العروض من ثلاث مجموعات متنافسة:
- "أريفا Areva"، مع "سويز Suez" و"توتال Total"، عرضت مفاعلاتها النووية من طراز "EPR" (مفاعل ماء مضغوط)؛
- "جنرال ألكتريك-هيتاتشي GE-Hitachi" عرضت مفاعلاتها من طراز "ABWR" (مفاعل ماء مغلي)؛
- و"الشركة الكورية للطاقة الكهربائية (كيبكو) Korea Electric Power Corporation (KEPCO)"، في تحالف مع مجموعة من الشركات الكورية (يضم "سامسونج Samsung"، "هيونداي Hyundai"، و"دوسان Doosan")، عرضت مفاعلاتها من طراز "APR1400" (مفاعل ماء مضغوط).

في ديسمبر 2009، أعلنت مؤسسة الإمارات للطاقة النووية أنها منحت "كيبكو" عقدا لإنشاء أربعة مفاعلات من طراز "APR1400"، بالإضافة إلى الصيانة المطلوبة، الإمداد بالوقود النووي، والتدريب والتعليم. ادعت كيبكو فيما بعد أن الأسباب وراء اختيار التحالف الذي قادته كانت القدرة الأعلى المثبتة، تكلفة الإنشاء الأقل، ووقت الإنشاء الأقصر من بين المتنافسين الآخرين.

(1) تمتلك الحكومة الإماراتية 60 % من هذا المشروع، والـ 40 % الباقية للشريك أو الشركاء في الاستثمار المشترك.

اللافت أن المؤسسة استمرت في التفاوض مع المجموعتين اللتين خسرتا العقد، أريفا وجنرال ألكتريك-هيتاتشي، بخصوص التعاون في مجالات نووية أخرى.

وقع الاختيار على منطقة الظفرة، غرب أمارة أبو ظبي، ليكون موقع المحطة النووية المزمع إنشائها. اختير هذا الموقع من بين 10 مواقع مرشحة (منها الفجيرة على المحيط الهندي) بعد عملية تقييم استعانت بإرشادات الهيئات الوطنية، الأمريكية، والدولية ذات الاختصاص: الهيئة الاتحادية للرقابة النووية في الإمارات؛ "معهد الأبحاث القدرة الكهربية US Electric Power Research Institute"، مفوضية الرقابة النووية، الولايات المتحدة؛ والوكالة الدولية للطاقة الذرية.

في أبريل 2010، قدمت مؤسسة الإمارات للطاقة النووية طلبا بالترخيص بإنشاء محطة براكة النووية، مصحوباً بدراسة تقييم الأثر البيئي. بعد تقييم المشروع من قبل الهيئة الاتحادية للرقابة النووية وهيئة البيئة-أبوظبي، حصلت المؤسسة على ترخيص الإنشاء في يوليو 2012.

بدأت الأعمال الإنشائية للمشروع، الذي تكلف 24.4 مليار دولار، في 2012، وأصبحت المحطة جاهزة للتشغيل في مارس 2020، بعد أقل من 10 سنوات.

يبدو أن الإماراتيين يتمتعوا بمهارة كبيرة في التفاوض التجاري؛ فقد استطاعوا أن يحصلوا في النهاية على محطتهم النووية في وقت قياسي وبتكلفة أقل مما كان متوقعا.[1]

**استطاعت الإمارات إنجاز برنامجها النووي سريعا من خلال اتباع الاستراتيجية التالية:**

- تنفيذ عدة أشياء في الوقت ذاته؛

(1) تفاوض الإماراتيون في ظل موقف مالي قوي لدولة الإمارات، من ناحية، وأزمة مالية وركود اقتصادي دوليين، من ناحية أخرى.

- استخدام الخبراء الأجانب في البداية وبناء القدرات الوطنية مع مرور الوقت؛
- والاعتماد في بناء محطتها النووية، صيانتها، وتشغيلها على مقاول ذي خبرة كبيرة في بناء المحطات وفقا للجدول الزمني والميزانية المتفق عليهما.

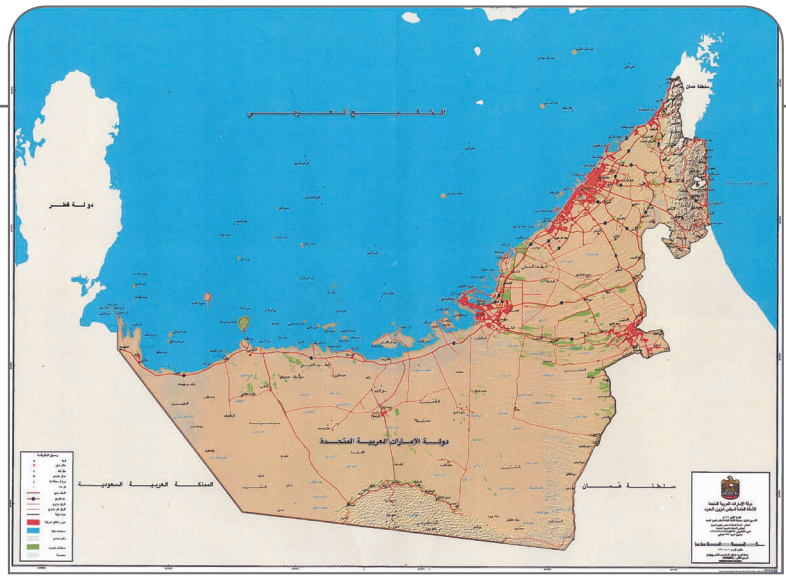
## • محطة براكة النووية

محطة براكة هي أول محطة كهرباء نووية في العالم العربي (الشكل 308). تقع المحطة على الخليج العربي في الطرف الغربي من إمارة أبو ظبي على بعد 53 كيلومترا من مدينة الرويس في منطقة الظفرة (الشكل 309).

**الشكل 308: محطة براكة النووية**

تحتوي المحطة على أربعة مفاعلات ماء مضغوط من طراز "APR-1400" الجنوب-كوري (الشكل 310)، تبلغ سعتها التشغيلية 5.6 جيجاوات (جو)، وهو ما يعادل ربع احتياجات دولة الإمارات من الطاقة الكهربية. بهذه السعة، تحتل محطة براكة المرتبة السادسة في قائمة كبريات المحطات النووية في العالم.

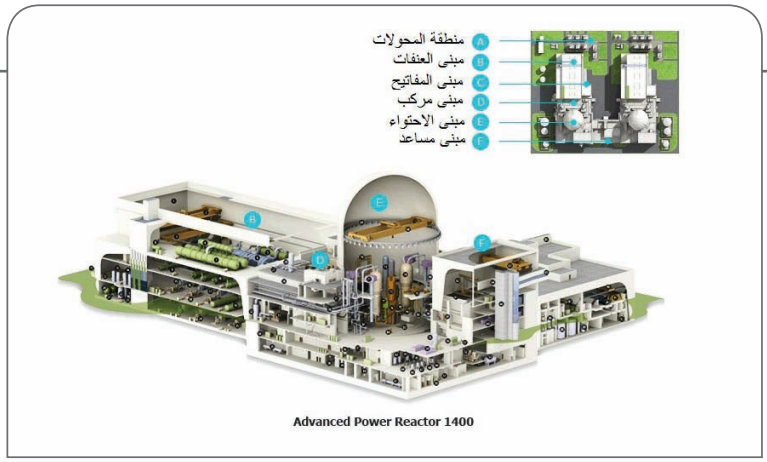
**الشكل 309: موقع محطة براكة النووية**




أعلنت مؤسسة الإمارات في بداية 2020 أن المفاعل الأول قد أصبح جاهزا للخدمة، بعد أن حصل على رخصة التشغيل من الهيئة الاتحادية للرقابة النووية (الشكل 311). الجدير ذكره أن تشغيل المفاعل الأول كان مقررا في 2017، لكنه تعرض للتأجيل عدة مرات لأسباب تتعلق بضمان السلامة. إحدى المشكلات التي وجدتها الهيئة الاتحادية في مراجعتها على المحطة في 2018 كانت حاجة الموظفين في المحطة إلى إجادة اللغة الإنجليزية باعتبارها لغة التواصل بين الموظفين العرب والخبراء الكوريين.

**الشكل 310:**

**بنية المفاعل النووي من طراز APR1400**




في 19 أغسطس 2020، أعلنت مؤسسة الإمارات للطاقة النووية، عن بدء إنتاج أول ميجاوات من كهرباء الإمارات من محطة براكة النووية، بعد نجاح الربط الأولي للمحطة بشبكة الكهرباء العمومية.

يحسب للمحطة أنها ستجنب البيئة انبعاثات من الغازات الكربونية بمقدار 21 مليون طن كل عام فيما لو أنتجت تلك الكهرباء من المحطات الاعتيادية (وهو ما يعادل سحب 3.2 مليون سيارة من الشوارع).

**الشكل 311: المفاعل الأول في المحطة**

تمتلك المحطة وتديرها مؤسسة الإمارات للطاقة النووية، في شراكة طويلة الأمد مع شركة كيبكو الكورية، المصممة للمفاعلات النووية. ثُبتت هذه الشراكة في 2016 بتأسيس شركتين تابعتين لإدارة وتشغيل المشروعات المشتركة: "شركة نواة للطاقة Nawah Energy Company" و"شركة براكة الأولى Barakah One Company" (الشكل 312). تمتلك المؤسسة الإماراتية 82 % من الشركتين؛ المؤسسة الكورية 18 %. تتولى "نواة" تشغيل وصيانة المحطة النووية، أما "براكة الأولى"، فترعى "المصالح التجارية والمالية" للمحطة (مثل إدارة تمويل المحطة وبيع الكهرباء المنتَجة). الجدير بالذكر في هذا السياق، أن شركة براكة الأولى وقعت في نوفمبر 2016 اتفاق مع شركة مياه وكهرباء أبو ظبي تشتري بموجبه الثانية من الأولى الكهرباء المولدة من المحطة النووية.

**الشكل 312:**
**توقيع اتفاقية الاستثمار المشترك في 2016**

يبلغ تمويل المشروع نحو 24.4 مليار دولار، ويشمل قروض بقيمة 19.6 مليار دولار وأصول بقيمة 4.7 مليار دولار مقدمة من مؤسسة الإمارات للطاقة النووية وكيبكو. تضم القروض 16.2 مليار دولار من وزارة المالية لأبو ظبي و2,5 مليار دولار من "البنك الكوري للتصدير والاستيراد Export-Import Bank of Korea (KEXIM)".

حاول البعض إثارة القلق حول سلامة محطة براكة النووية. سنناقش في الجزء التالي تلك الادعاءات وردود المسؤولين الإماراتيين وبعض الخبراء الأجانب عليها.

## أولاً - الادعـــاءات:

- لا تتضمن المفاعلات النووية من طراز "APR1400"، المستخدمة في المحطة، بعض ميزات السلامة الأكثر تطورا في الطرز الأخرى، مثل "لاقطة القلب core catcher" والجدار الإضافي لمبنى الاحتواء مثل الموجدين في المفاعلات الفرنسية من طراز "Areva EPR" (الشكل 313). لاقطة القلب هي حجرة خاصة توجد تحت وعاء المفاعل مصممة بحيث تحجز في داخلها الوقود النووي في حالة انصهاره واختراقه لقاع الوعاء، حيث يجرى تبريده بالمياه الغنية بالبورون (الشكل 314).
- ظهرت بعض الشروخ في أبنية الاحتواء في محطة براكة الإماراتية. كما تبين أن بعض صمامات الأمان التي ركبت في المحطة لا يعمل (تعرف هذه الصمامات باسم "pilot operated safety relief valves"، وهي أجهزة للحماية من الضغوط الزائدة).
- في 2013، أدين عدد كبير من مسؤولي السلامة في كيبكو بسبب تزييف مستندات سلامة تخص أجزاء مستخدمة في المفاعلات النووية العاملة في كوريا، وهذا يقوض مصداقية الشركة الكورية التي اعتمدت عليها الإمارات في تنفيذ برنامجها النووي.
- اختارت الإمارات تحالف كيبكو لإنشاء المحطة مقابل عقد بقيمة 20 مليار دولار، وهو أقل بكثير مما عرضته الشركات المتنافسة الأخرى. ربما يشير ذلك إلى أن التكلفة كانت العامل الحاسم في اختيار المقاول الرئيس للمشروع.

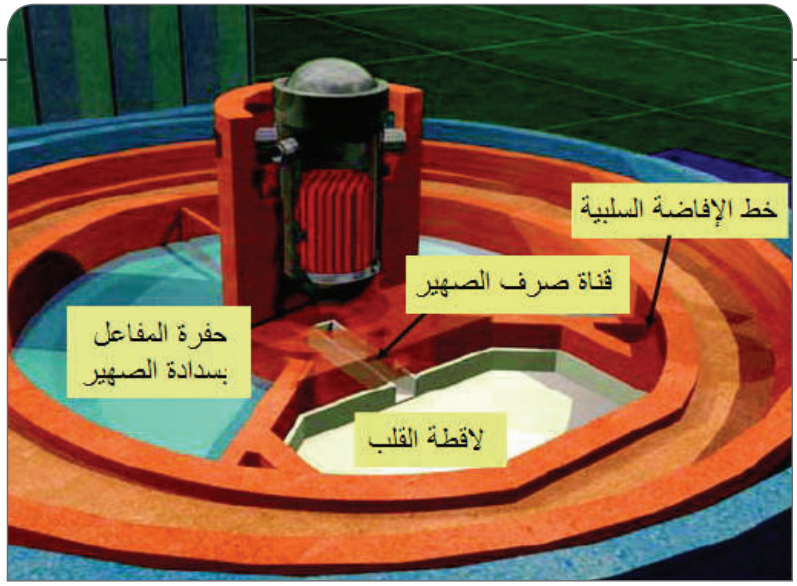
الشكل 313:

لاقطة القلب (7#) والجدار الإضافي (5#)

في المفاعلات من طراز "Areva EPR"

الشكل 314:

بنية لاقطة القلب في المفاعل "EPR"



## ثانياً - الـــــردود:

حرصت الإمارات على الاستفادة من الخبرات الدولية خلال جميع مراحل برنامجها النووي، ومنها خبرات الوكالة الدولية للطاقة الذرية والجمعية العالمية للمشغلين النوويين. لقد أقرت بعثة الوكالة الدولية إلى الإمارات في يناير 2011 أن الإمارات قد اتبعت إرشادات الوكالة الخاصة بتأسيس البنية التحتية النووية، كما أثنت على الممارسات الجيدة التالية: "التعاون، دون الإخلال بالاستقلالية، بين الجهات الرقابية والمرافق المنتجة، تنمية الموارد البشرية، منظومة الإدارة المشكلة جيدا، وثقافة السلامة القوية." انضمت كذلك مؤسسة الإمارات للطاقة النووية للجمعية العالمية للمشغلين النوويين للاستفادة منذ البداية من خدمات المراجعة من قبل الخبراء العاملين التي تقدمها الجمعية للأعضاء من أجل ضمان سلامة وأمان المحطة الإماراتية.

تخضع محطة براكة لفحص دقيق من قبل الهيئة الاتحادية للرقابة النووية، وهي منظمة مستقلة تضم خبراء دوليين من جنسيات متعددة متخصصين في مجالات السلامة والأمن النوويين، الحماية من الإشعاع، وحماية البيئة. تستوفي المحطة المعايير الرقابية الإماراتية وتتبع "أفضل الممارسات best practices" الدولية.

تستعمل المحطة تكنولوجيا "APR1400" الكورية التي طورتها كيبكو خلال الثلاثين سنة الفائتة، وهي تستوفي أعلى معايير الصناعة النووية من حيث السلامة، الأداء التشغيلي والبيئي، والعمر الإنتاجي (60 عاماً). ينتمي هذا الطراز إلى "الجيل ما بعد الثالث من المفاعلات النووية Generation III+ reactors"، وهو يتضمن منظومات للسلامة مصممة لمنع الحوادث الخطيرة أو التخفيف منها. الطراز "APR1400" معتمد من قبل "معهد كوريا للسلامة النووية Korea Institute of Nuclear Safety (KINS)"، الجهة المسؤولة في كوريا الجنوبية

عن الرقابة النووية، ومفوضية الرقابة النووية بالولايات المتحدة، كما أنه تطوير لتصميم "CE System 80+" المعتمد أيضا من المفوضية الأمريكية نفسها.

لاقطة القلب (الموجودة في المفاعلات من طراز EPR) ليست من متطلبات السلامة النووية في دولة الإمارات (ولا في دول عديدة أخرى، مثل الولايات المتحدة الأمريكية). كما تحتوي المفاعلات من طراز APR1400 على ميزات سلامة تعادل لاقطة القلب في الوظيفة.

نجحت إجراءات ضمان الجودة التي تتبعها مؤسسة الإمارات للطاقة النووية في اكتشاف "فراغات" في الخرسانة أثناء إنشاء الوحدة 3، وفراغات غير خطيرة في الوحدة 2. أبلغت المؤسسة ذلك إلى الهيئة الاتحادية للرقابة النووية كما تفرض القوانين الإماراتية. علاوة على ذلك، وضعت المؤسسة إعلان عام بهذا الخصوص على موقعها على الإنترنت، تأكيدا على التزامها بالشفافية.

وضعت المؤسسة مع كيبكو خطة إصلاح للوحدتين 2 و3. راجعت الهيئة الاتحادية للرقابة النووية خطة وأعمال الإصلاح وأقرتها. تمت أعمال الإصلاح المطلوبة وفقا لأعلى المعايير الدولية للسلامة، الأمن، والجودة.

في 2018، أعلنت المؤسسة عن "تعثر أداء non-performance" صمامات الأمان المعنية، ولم يتم تركيبها. في 2019، أعلنت المؤسسة اجتياز الصمامات المركبة كل اختبارات السلامة المتبعة، وأبلغت النتائج إلى الهيئة الاتحادية للرقابة النووية.

قصة إدانة مسؤولين في كيبكو تتعلق بتزييف مستندات في كوريا الجنوبية، وليس لها أي علاقة بالمحطة الإماراتية. يجدر بالذكر في هذا السياق أن اتهامات مشابهة طالت مسؤولين في شركة "اريفا Areva" النووية الفرنسية العملاقة.

تعمل مؤسسة الإمارات للطاقة النووية جنبا إلى جنب "هيئة حماية المنشآت

الهامة والسواحل" على تطوير وتنفيذ أعلى معايير السلامة والأمن عبر برنامجها النووي، وذلك وفقا لإرشادات الوكالة الدولية للطاقة الذرية وتحت مراقبة الهيئة الاتحادية للرقابة النووية.[1]

من المستبعد أن تكون التكاليف هي ما يقلق دولة الإمارات الغنية، خاصة عندما يتعلق الأمر بإنشاء أول محطة إماراتية للطاقة النووية. لقد جرت المفاوضات التجارية الخاصة بالمحطة النووية خلال أزمة مالية وركود اقتصادي عالميين، وربما شكل هذا ضغطاً على التحالف الكوري الفائز. كما قد يكون للشركات الكورية المشاركة أهدافاً بعيدة المدى أكثر أهمية لها من مجرد الربح في صفقة واحدة، مثل الدخول في شراكات طويلة الأمد مع دول مجلس التعاون الخليجي ومصر في مجال الطاقة والمياه.

- **ما بعـد بـراكـــة**

في نوفمبر 2013، أعلنت هيئة كهرباء ومياه دبي أنها تهدف أن تكون 12 % من إمدادات الكهرباء بها نووية بحلول 2030، أساساً من محطة براكة في أبوظبي بعد اكتمالها، وربما من محطة في دبي في مرحلة لاحقة. في يناير 2017، أعلنت الإمارات عن خطة جديدة، تتضمن استثمار بمقدار 163 مليار دولار بحلول 2050، لتنمية الطاقة وجعل نصفها نووية ومتجددة.

كان المجلس الاستشاري الدولي قد أوصى في أواخر 2010 بأن تقوم الإمارات مبكراً بتطوير استراتيجية متكاملة لدورة الوقود النووي، تشمل وسائل لتأمين إمدادات هذا الوقود على المدى الطويل وترتيبات لتغطية "إنهاء خدمة" المرافق النووية وإدارة الوقود المستهلك والنفايات النووية الأخرى. يجدر بالذكر

(1) في يوليو 2020، أثناء جائحة كورونا، قامت الحكومة الإماراتية بتغييرات في بنية الوزرات، منها دمج وزارتي الطاقة والبنية التحتية في وزارة واحدة.

أن "خريطة الطريق" احتوت بعض التوصيات بهذا الخصوص، مثل الاتفاق مع الموردين باستعادة الوقود المستهلك. تسعى الإمارات حثيثا نحو هذه الأهداف.

وفقاً للاتفاق المبرم بين مؤسسة الإمارات للطاقة النووية وشركة "كوريا للكهرباء المائية والنووية Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP)"، الشركة التابعة للشريك الكوري كيبكو، سوف تمد الشركة الكورية، مقابل تعاقد بـ 880 مليون دولار، شركة نواة بـ 400 موظف مؤهل للمساهمة في تشغيل وصيانة محطة براكة حتى 2030، بالإضافة إلى الوقود النووي الذي ستحتاجه المحطة لثلاث دورات (يجرى تغيير وقود المحطة كل ثلاث سنوات).

في 2008، أعلنت الإمارات تعهدها بدعم مبادرة تكوين "مصرف" دولي للوقود النووي بـ 10 ملايين دولار. في 2010، وافقت الوكالة الدولية للطاقة الذرية على تأسيس مثل هذا المصرف.

بحلول أغسطس 2012، أبرمت مؤسسة الإمارات للطاقة النووية ستة عقود متنوعة خاصة بالوقود النووي مع شركات من أنحاء العالم (كندا، المملكة المتحدة، فرنسا، وروسيا). تقدر هذه العقود بنحو ثلاثة مليارات دولار، وتمكن محطة براكة من إنتاج 450 مليار كيلووات-ساعة خلال 15 عاماً. كما أعلنت المؤسسة أنها سوف تعود للسوق مجددا للاستفادة من الظروف المواتية ولتأمين احتياجاتها من الوقود النووي.

الوقود المستهلك سوف يخزن داخل المحطة تحت الماء لمدة 20 عاما، ويمكن بعد ستة أعوام نقله إلى مخازن جافة. بعد العشرين عاما، سوف تنتقل المسؤولية عن الوقود المستهلك وملكيته إلى كيان مملوك للدولة ينشأ خصيصا لذلك. تدرس الإمارات جميع الخيارات المتاحة فيما يتعلق بإدارة الوقود المستهلك والنفايات المشعة، وتشمل رجوع الوقود المستهلك إلى الموردين، وإعادة معالجة الوقود المستهلك في إحدى الدول التي تقوم بذلك، مثل فرنسا.

تطور الإمارات برنامجاً وطنياً لإدارة الوقود المستهلك والنفايات المشعة، وفي الوقت ذاته تشارك بنشاط في المبادرات الدولية الواعدة.

في سبتمبر 2019، وقعت مؤسسة الإمارات للطاقة النووية، أثناء المؤتمر 63 للوكالة الدولية للطاقة الذرية، مذكرة تفاهم مع "اندرا ANDRA"، الوكالة الفرنسية لإدارة النفايات المشعة (الشكل 315).

**الشكل 315:**

**توقيع مذكرة التفاهم بين مؤسسة الإمارات للطاقة النووية والوكالة الفرنسية لإدارة النفايات المشعة**

تدرس "الشركة السويدية لإدارة الوقود والنفايات النووية Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB)" آفاق الصرف الجيولوجي في دولة الإمارات. كما تناقش الهيئة العربية للطاقة الذرية خيارات إدارة النفايات النووية على المستوى الإقليمي، على غرار ما جرى في الاتحاد الأوروبي.

عقدت شركة نواة اتفاقات طويلة الأمد مع شركات عالمية كبرى، مثل "ايه ديه أف EDF" و"دوسان Doosan"، لدعم أعمال التشغيل والصيانة في محطة براكة النووية.

تخطط شركة براكة الأولى للاستثمار في مشاريع الطاقة النووية خارج الإمارات. يقول رئيسها التنفيذي، السيد ناصر الناصري، بمناسبة توقيع مذكرة تفاهم مع كيبكو في سبتمبر 2019—يقول، "سوف نتعاون لتحديد الآفاق المرتقبة للمساعدة في تأسيس مشروعات الطاقة النووية في الدول الأخرى التي سوف تستفيد من المعرفة والمهارات الفريدة المتنامية في براكة خلال تطوير برنامج الإمارات للطاقة النووية السلمية."

## • مصـــــــر

اهتمام مصر بالطاقة النووية قديم قدم بداية الاستخدام السلمي للطاقة النووية في العالم. بدأ برنامج مصر النووي في 1955 مع إنشاء مفوضية للطاقة النووية المصرية ("هيئة الطاقة الذرية" فيما بعد). منذ ذلك الحين، قامت مصر بتطوير البنية التحتية النووية الخاصة بها. حاولت مصر عدة مرات إنشاء محطات للطاقة النووية، لكن هذه المحاولات المتكررة لم تحقق النجاح حتى 2013، لأسباب متنوعة.

في 1957، دخلت مصر في اتفاقية للتعاون النووي مع الاتحاد السوفيتي. بنى الاتحاد السوفيتي، كجزء من هذه الاتفاقية، أول مفاعل نووي بحثي في مصر بسعة 2 مو، "Experimental Training Research Reactor #1 (ETRR-1)"، والذي وصل إلى "الحراجة" في 1961.

نشطت مصر في تقوية برنامجها النووي في الجزء الأول من 60ات19. قد يكون ذلك ردا على اعتراف رئيس الوزراء الإسرائيلي في ذلك الوقت، "دافيد بن-جوريون David Ben-Gurion"، بامتلاك إسرائيل مفاعل ديمونة النووي (الشكل 316 والشكل 317). في 1963، أنشأت جامعة الإسكندرية قسماً للهندسة النووية بها (الشكل 318). في نفس العام، حاولت مصر شراء مفاعل فرنسي لتوليد الكهرباء، ولم يتم ذلك.

الشكل 316:

مفاعل ديمونة في صحراء النقب

الشكل 317: مفاعل ديمونة النووي

**الشكل 318:**

**مبنى كلية الهندسة، جامعة الإسكندرية**

سعت مصر منذ البداية للاستفادة من الطاقة النووية في توليد الكهرباء وتحلية المياه في آن معا. ففي 1964، نظمت مصر مناقصة دولية لإنشاء محطة نووية لإنتاج 150 مو من الكهرباء و20,000 م$^3$/يوم من المياه المحلاة. عُرِضَت العقود عل كل من "سيمنز Siemens" الألمانية و"وستنجهاوس Westinghouse" الأمريكية، ولم تثمر تلك المحاولة عن شيء.

في يوليو 1968 (بعد النكسة في 1967)، وقعت مصر "معاهدة عدم الانتشار Non-Proliferation Treaty"، على أمل أن يشكل ذلك ضغطا على إسرائيل للقيام بالمثل. أجلت مصر التصديق على المعاهدة لتقوية موقفها في مفاوضات خفض التسلح.

برز اهتمام مصر بالطاقة النووية إلى السطح مجددا في منتصف 70ات19. حينها رأى الرئيس أنور السادات أن الطاقة النووية حيوية لإعادة بناء الاقتصاد المصري، كما أخذت مصر تدعو إلى شرق أوسط خالي من الأسلحة النووية. قصد بذلك أساسا نزع أي سلاح نووي إسرائيلي، ولكن كما هو معروف لم تبدي إسرائيل أدنى استعداد لذلك.

في 1974، اتفقت الحكومة المصرية مبدئيا مع الاتحاد السوفيتي على إنشاء مفاعل 460 مرو. كما منحت وستنجهاوس الأمريكية عقداً آخر من أجل محطة نووية خارج الإسكندرية (منطقة سيدي كرير الساحلية). لم تبنى أية من المحطتين (فشل المشروع الثاني لأن مصر والولايات المتحدة لم يتفقا بشأن خطة تخزين الوقود المستهلك).

في 1976، تأسست هيئة المحطات النووية لتوليد الكهرباء. في 1978، أعلنت الحكومة المصرية انها سوف تمتلك 7,200 مو من الكهرباء النووية بحلول 1999. رسمت الخطط لإقامة 10 مفاعلات نووية في سيدي كرير، العريش، القاهرة، والصعيد. لم ينتج في هذا الخصوص شيء عن المفاوضات مع شركات فرنسية، ألمانية، نمساوية، وأمريكية. بعد عقد اتفاقية السلام مع إسرائيل وتوجه بوصلة السياسة الخارجية المصرية ناحية الغرب، صدقت القيادة المصرية على معاهدة عدم الانتشار في فبراير 1981.

سيظل مشروع مصر لتوليد الكهرباء النووية يراوح مكانه حتى العام 2013، رغم المحاولات المتكررة للتقدم فيه.

في مارس 1993، بدأت الأرجنتين في بناء المفاعل البحثي الثاني، Research Reactor #2 (ETRR-2) Training Experimental، في أنشاص (60 كم شمال غرب القاهرة؛ الشكل 319). أعلنت مصر عن بدء تشغيل هذا المفاعل في 1998. مفاعل أنشاص البحثي هو من "طراز البِركَة pool-type" بسعة 22 مرو. يحصل المفاعل على وقوده من مصنع تجريبي للوقود النووي. تحتوي المنشأة كذلك على "معمل ساخن hot laboratory" ومركز لإدارة النفايات المشعة عالية المستوى. تضم المنشأة كذلك، وفقاً لـ"اتحاد العلماء الأمريكان Federation of American Scientists" على "مجمع خلايا ساخنة hot cell complex" فرنسي الصنع لأبحاث استخلاص البلوتونيوم.

**الشكل 319:**

**المفاعل المصري البحثي الثاني في أنشاص**

- **الدرب الطويل الوعر إلى الضبعة**

بعد ارتفاع أسعار النفط في 1979 – 1980، عادت المحاولات المصرية لإنشاء مفاعلات الطاقة النووية. في 1983، وقع الاختيار على منطقة الضبعة (على بعد 170 كم غرب الإسكندرية) لتكون موقع المحطة النووية المنشودة. قَدَّمَت شركات "KWU"، "فراماتون Framatone"، ووستنجهاوس عروضا لتوريد المفاعلات النووية، كما وافقت كل من أستراليا والنيجر على توريد اليورانيوم. جرى التخلي عن هذا المشروع بعد حادثة تشيرنوبيل سيئة الصيت في 1986.

في الفترة من 1999 – 2001، أجرت هيئة المحطات النووية دراسة جدوى لمحطة توليد مشترك للكهرباء والمياه المحلاة، وحُدِّثَت في 2003. وُقعت اتفاقات جديدة للتعاون النووي مع روسيا في عامي 2004 و2008.

في أكتوبر 2006، أعلنت وزارة الطاقة عن نيتها بناء مفاعل 1,000 **مروك**

(ميجاوات كهرباء) في الضبعة بحلول 2015. في 2008، منحت وزارة الطاقة والكهرباء عقدا بـ 180 مليون دولار لشركة "بتشتل Bechtel" لتقديم مجموعة من الخدمات الاستشارية: اختيار تقنية المفاعل، اختيار موقع المحطة، تدريب المسؤولين على التشغيل، وتقديم الخدمات الفنية على مدى 10 سنوات. نقلت الحكومة المصرية في يونيو 2009 هذا العقد إلى شركة "ويرلي-بارسونز WorleyParsons" مقابل 160 مليون دولار خلال ثمانية أعوام من أجل المساعدة في تأسيس محطة نووية بسعة 1,200 **مروك**. تشمل هذه المساعدة تحديد المواقع المناسبة، ترتيب هذه المواقع حسب الأفضلية، وتحديد المواصفات الفنية للمحطة المرغوبة. أعلنت وزارة الطاقة في ذلك الوقت أن مصر تهدف إلى توليد الكهرباء النووية بحلول 2017. في 2010، أعلن الرئيس المصري بشكل نهائي أن مفاعل مصر الأول للطاقة النووية سوف يبنى في الضبعة، وتوسعت الخطة المقترحة إلى أربع وحدات (مفاعلات) بحلول 2025. حددت التكلفة المتوقعة للوحدة الأولى بأربعة مليارات دولار. في يونيو 2010، قال المدير العام للوكالة الدولية للطاقة الذرية أن الوكالة كانت "مسرورة بالتعاون مع مصر في مشروعها لإدخال الطاقة النووية." ألقت أحداث الثورة في فبراير 2011 وما تبعها من اضطرابات بظلال من الشك مجددا على مقدرة مصر على إنجاز مشروع الضبعة النووي.

في أبريل 2013، سعت مصر إلى تجديد اتفاقية التعاون النووي مع روسيا، مركزة على إنشاء محطة نووية في الضبعة وعلى التطوير المشترك لترسيبات اليورانيوم في مصر. في أكتوبر 2013، فعلت وزارة الطاقة خططها لمحطة الضبعة، وأعلنت تأسيس موقع لهيئة المحطات النووية هناك. في نوفمبر 2013، أعلن وزير الخارجية الروسي استعداد بلاده لتمويل إنشاء المحطة النووية المصرية. في يناير 2014، أعلنت وزارة الطاقة المصرية أنها سوف تعلن عن مناقصة لتوريد وحدتين بسعة 900 و1,650 **مروك**، على أساس "تسليم مفتاح turnkey basis" ومشاركة الموردين في تمويل المحطة. كانت الوزارة قد أعلنت أن موقع الضبعة مناسباً لإنشاء ثمانية مفاعلات.

في فبراير 2015، اتفقت وزارة الطاقة المصرية مع شركة روساتوم الروسية المملوكة للدولة على "إطلاق نقاش مفصل حول المشروع المرتقب. في يونيو 2015، قدمت روساتوم عطاءا لإنشاء أربعة مفاعلات 1200 **مروك** في الضبعة. في نوفمبر 2015، وقعت وزارة الكهرباء والطاقة المتجددة المصرية مع روساتوم اتفاقية لإنشاء وتشغيل محطة الضبعة لتوليد الكهرباء وتحلية المياه. يتضمن الاتفاق كذلك توريد الوقود النووي طوال حياة المحطة التشغيلية، تدريب الموظفين المصريين، المساعدة في تشغيل المحطة وصيانتها خلال العشر سنوات الأولى من المشروع، ونقل الوقود المستهلك. في 19 مايو 2016، نشرت الجريدة الرسمية المرسوم الرئاسي رقم 484 لسنة 2015 بالتصديق على الاتفاقية الموقعة بين مصر وروسيا.

بناء على الاتفاقية الموقعة بين وزارتي المالية المصرية والروسية، سوف تقوم روسيا بتمويل 85 % من تكلفة إنشاء المحطة من خلال قرض بحوالي 25 مليار دولار، بفائدة سنوية 3 %. سوف تقوم مصر بتوفير الـ 15 % الباقية من المستثمرين الخاصين. على مصر أن تبدأ في تسديد القرض بدء من تشغيل المحطة وخلال 22 عاماً.

سوف تتولى "أتومستروي للتصدير Atomstroyexport"، التابعة لروساتوم، مهمة "المقاول العام general contractor"، في حين اختيرت "أتومبريكت Atomproekt، JSC" باعتبارها المصمم العام general designer". يقدم مكتب "جولنج Gowling WLG" الاستشارات القانونية لعقود محطة الضبعة منذ نوفمبر 2015.

في ديسمبر 2017، زار الرئيس الروسي، فلاديمير بوتن، مصر ووقع اتفاقية للتعاون الاستراتيجي مع الرئيس المصري، عبد الفتاح السيسي، ودخلت اتفاقية بناء محطة الضبعة حيز التنفيذ (الشكل 320).

**الشكل 320:**

**توقيع اتفاقية التعاون الاستراتيجي بين مصر وروسيا**

في أبريل 2019، حصلت هيئة المحطات النووية على موافقة هيئة الرقابة النووية والإشعاعية على موقع الضبعة.

في 3 فبراير 2020، أكد رئيس هيئة المحطات النووية، محمد الخياط، في حديث لصحيفة "أخبار اليوم" أن روساتوم سوف تبدأ في بناء محطة الضبعة في أوائل 2020.

في 17 فبراير 2020، أعلنت أتومستروي أنها منحت عقوداً لثلاث شركات مصرية لبناء المرحلة الأولى من محطة الضبعة النووية. هذه الشركات الثلاثة هي: "بتروجت"، "حسن علام"، و"المقاولون العرب"، وقد جرى اختيارها من بين 10 شركات متنافسة.

## • القـوانـين والمـؤسـسـات

مع تاريخ طويل من الاهتمام بالطاقة النووية، بدأت مصر مبكرا في تطوير قوانينها ومؤسساتها النووية. صدر المرسوم الرئاسي رقم 288 لسنة 1957 لتأسيس "هيئة الطاقة الذرية"؛ سمح القانون رقم 59 لسنة 1960 باستخدام الإشعاع المؤين وفرض الحماية منه؛ أسس القانون رقم 13 لسنة 1976 "هيئة المحطات النووية لتوليد الكهرباء"؛ وأسس المرسوم الرئاسي رقم 152 لسنة 2006 "النظام الحكومي لحصر ومراقبة المواد النووية".

في الفترة الأحدث نسبياً، اتخذت مصر مجموعة من الإجراءات لتحسين الإطار القانوني للقطاع النووي ومؤسساته: صياغة قانون نووي جديد يحدد بشكل واضح دور كل مؤسسة وسلطاتها، العلاقات بين هذه المؤسسات؛ تشكيل هيئة مستقلة للرقابة النووية؛ وتنشيط التعاون مع الوكالة الدولية للطاقة الذرية من خلال المساقات التدريبية، ورشات العمل، والمهام الأخرى.

تضمنت عملية صياغة القانون، وفقا للوكالة الدولية للطاقة الذرية، تحليل تشريعات الدول الأخرى، فحص وثيقة "المعالم Milestones" وغيرها من وثائق الوكالة الدولية، ومراعاة التعديلات المقترحة من قبل الوكالة والخبراء الوطنيين على مسودة القانون. في 29 مارس 2010، صدق الرئيس المصري في ذلك الوقت، حسني مبارك، على القانون الجديد، القانون رقم 7 لسنة 2010 بشأن "تنظيم الأنشطة النووية والإشعاعية، بعد موافقة البرلمان عليه.

## • هيئة الرقابة النووية والإشعاعية (الطاقة الذرية سابقاً)

كانت هيئة الطاقة الذرية تاريخياً هي الكيان الرئيس للبحث النووي في مصر. أنشأت الهيئة من خلال المرسوم الرئاسي رقم 288 لسنة 1957 لتكون مسؤولة عن حماية العامة من خطر الإشعاع. كلفت الهيئة بعد ذلك بمهمة الرقابة

على تداول النظائر المشعة والمفاعلات النووية. تدير الهيئة أربع مراكز أبحاث ومفاعلين بحثيين، وتعمل عن كثب مع عدد من الجامعات المصرية لإجراء أبحاثها. ترتكز قواعد السلامة التي تتبعها الهيئة على "معايير الوكالة الدولية للطاقة الذرية للسلامة النووية IAEA Nuclear Safety Standards".

تمر عملية الترخيص للمحطات النووية في مصر بخمس مراحل: الموافقة على الموقع، إصدار ترخيص التشييد، الحصول على تصريح بتحميل الوقود النووي و"الدخول في الخدمة commissioning"، الحصول على رخصة التشغيل، وختاما الترخيص بـ "إنهاء الخدمة decommissioning".

في إطار تطوير البنية التحتية النووية، أنشأ القانون رقم 7 لسنة 2010 "هيئة الرقابة النووية والإشعاعية" كمؤسسة مستقلة قانونيا، ونقل إليها كل مهام وموظفي هيئة الطاقة الذرية.

- **هيئة المحطات النووية لتوليد الكهرباء**

أنشئت هيئة المحطات النووية من خلال القانون رقم 13 لسنة 1976، والمعدل بالقانون رقم 18 لسنة 1984. كما جرى توضيح سلطات الهيئة ضمن تشريعات أخرى متنوعة. تقع الهيئة تحت إشراف وزارة الكهرباء والطاقة، ويناط بها أربع وظائف رئيسة: إجراء دراسات الجدوى لمشروعات الطاقة النووية، تحديد المواصفات المطلوبة في المناقصات ومعايير التقييم للعطاءات، الإشراف على تنفيذ المشروعات، ومراقبة تشغيل وصيانة المحطات طوال حياتها الإنتاجية. الهيئة هي الكيان الوحيد الذي يحق له بناء وتشغيل المحطات النووية. تمتلك الهيئة السلطة لاختيار الموردين للمكونات والخدمات المطلوبة لبناء المحطات. كما تحدد المواد والخدمات التي يفضل استيرادها من الخارج وتلك التي يمكن شرائها محليا. بينت الهيئة أنها تنوي اتباع "دورة وقود مفتوحة open fuel cycle" (أي عدم إعادة معالجة الوقود النووي المستهلك).

- **المجلس الأعلى للاستخدامات السلمية للطاقة النووية**

أُنشِئَ المجلس في عام 1975، ويتشكل من رئيس الجمهورية، رئيس مجلس الوزراء، أغلب الوزراء، ورئيس المخابرات. يتولى المجلس وضع خطة الدولة لاستخدام الطاقة النووية في الأغراض السلمية، ويختص تحديدا بكل ما يلي:

- وضع الاستراتيجيات والخطط التي تحقق أهداف الدولة في مختلف المجالات السلمية للطاقة النووية؛
- إقرار المشروعات المتعلقة بالاستخدامات السلمية في مجالاتها المختلفة والتوجيه بتنفيذها؛
- إدارة المفاوضات السياسية المتعلقة بالتعاون الدولي في مجال النشاطات النووية السلمية؛
- دراسة الاتفاقيات التي تبرم مع الوكالة الدولية للطاقة وغيرها من المنظمات النووية؛
- دراسة الاتفاقات الدولية الثنائية أو الجماعية المتعلقة بالنشاطات؛
- إقرار برامج تأمين المنشآت النووية والحد من تأثيراتها السلبية على البيئة؛
- إصدار القرارات الخاصة بإنشاء وإعادة هيكلة الأجهزة التي تقوم بتنفيذ المشروعات الخاصة بالاستخدامات السلمية؛
- والنظر في جميع المسائل المتعلقة بالاستخدامات السلمية للطاقة النووية.

- **التعليـــم والتدريـــب**

تُقَدَّم برامج الدرجات الجامعية في مجالات الطاقة النووية في ثلاث جامعات، اثنان حكوميتان (جامعتي الإسكندرية والقاهرة) وواحدة خاصة (الجامعة المصرية الروسية). تعمل عدة مؤسسات علمية في الأبحاث المتعلقة بالطاقة النووية،

منها "أكاديمية البحث العلمي"، "المركز القومي لبحوث وتكنولوجيا الإشعاع"، و"مدينة البحث العلمي والتطبيقات التكنولوجية".

نتيجة لانخراط مصر منذ زمن طويل في البحث النووي، يتوفر لديها كوادر مؤهلة من المهندسين والعلماء في تكنولوجيا الطاقة النووية. لكن هذه الكوادر تفتقر إلى الخبرة الفعلية في بناء المحطات النووية، تشغيلها، صيانتها، والرقابة عليها. لاستكمال هذا النقص، عقدت مصر اتفاقات تدريبية مع الوكالة الدولية للطاقة الذرية والدول الأخرى، منها الصين، الأرجنتين، فرنسا، كوريا، روسيا، الولايات المتحدة، كندا، ألمانيا، وفرنسا.

في 2017، أنشأت مصر مدرسة الضبعة للتكنولوجيا النووية، وهي مدرسة ثانوية مهنية لتخريج الفنيين المؤهلين للعمل بمحطة الضبعة النووية. تقع المدرسة بجوار موقع المحطة، وهي مدرسة داخلية للبنين (يقيم بها الطلاب). مدة الدراسة بالمدرسة خمسة أعوام، يدرس خلالها الطالب العلوم الطبيعية والرياضيات؛ اللغات العربية، الإنكليزية، والروسية؛ بالإضافة إلى مسارات في التعليم الفني والتكنولوجيا النووية. يختار الطالب بعد اجتياز السنة الأولى التخصص في أحد الأقسام التالية: الكهرباء، الميكانيكا، أو الإلكترونيات. يوجد بالمدرسة حالياً 253 طالب (75 طالب كل عام × 3 أعوام). تعتزم الحكومة المصرية إرسال بعثات من الخريجين المتميزين لاستكمال تعليمهم في روسيا أو إحدى الدول الأخرى المساهمة في إنشاء المحطة.

- **محطة الضبعة النووية**

محطة الضبعة هي محطة الطاقة النووية الأولى في مصر. سيتم بناؤها في منطقة الضبعة الساحلية (محافظة مطروح). تقع الضبعة على ساحل البحر المتوسط، على بعد حوالي 130 كم شمال غرب القاهرة (الشكل 321). سوف تضم محطة الضبعة أربعة مفاعلات من طراز الماء المضغوط، سعة كل منها 1.2

جيجاوات من الكهرباء. اسم هذا النوع من المفاعلات الروسية هو "في في إي آر 1200 VVER-1200". "VVER" هي الحروف الإنكليزية المقابلة للحروف الروسية التالية: "ВВЭР"، وهي الحروف الأولى للعبارة الروسية التي تعني "مفاعل القدرة المائي-المائي" (أي مفاعل يستخدم الماء كمبرد ومهدئ في آن معا).[1]

**الشكل 321:**

**موقع محطة الضبعة النووية**

كان من المتوقع أن تبدأ عمليات الإنشاء في 2020، وأن يبدأ تشغيل الوحدة الأولى في 2026، وبقية الوحدات بحلول 2028 (الشكل 322).[2]

(1) يعرف التصميم الأساسي لمفاعلات "VVER" الروسية باسم "AES-2006".

(2) لم يستطع المؤلف التأكد من الوضع الفعلي للمشروع لندرة المعلومات المتاحة حوله.

**الشكل 322:**

**تجهيز موقع مفاعل الضبعة**

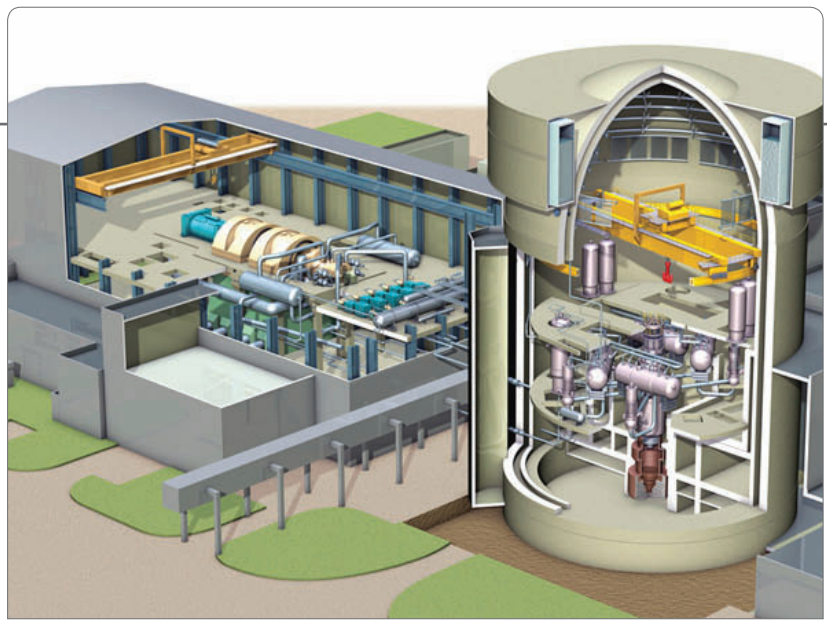
في 28 ديسمبر 2020، قال "أليكسي ليخاتشوف Alexei Lykhachov"، المدير العام لروساتوم، خلال اجتماع مع الرئيس المصري (الشكل 323)، أن روسيا تعطي أولوية لمحطة الضبعة وأنها حريصة على إكمالها وفقا للإطار الزمني المحدد وأعلى المعايير.

**الشكل 323:**

**اجتماع الرئيس المصري مع المدير العام لروساتوم في ديسمبر 2020**

المفاعل "VVER-1200" هو من مفاعلات الماء المضغوط "الجيل الثالث المطور +Generation III" (الشكل 324).

**الشكل 324:**
**مخطط المفاعل الروسي "VVER-1200"**



**تتسم مفاعلات الجيل الثالث المطور بالخصائص الآتية:**

- إجراء تحسينات على تصميم مفاعلات الجيل الثالث لتجنب أية أخطاء ظهرت على تصميمات مفاعلات الجيل الثاني والجيل الثالث أثناء التشغيل.
- تباعد فترات تزويد المفاعل بالوقود مما يؤدي إلى زيادة كفاءة المفاعل وبالتالي تقليل الانبعاثات الإشعاعية الناتجة منه.
- كفاءة حرارية عالية.
- تصميم معياري مما يسهل الحصول على التراخيص وتقليل المدة اللازمة للبناء.

- وجود أنظمة أمان سلبية ذاتية بالمفاعل فضلا عن أن هذا النوع من المفاعلات تم تصميمه لتحمل كافة الأخطار الداخلية والخارجية حيث روعي في تصميمه الدروس المستفادة من حادثة فوكوشيما.
- زيادة عمر المفاعل التشغيلي ليصل إلى 60 عاماً.

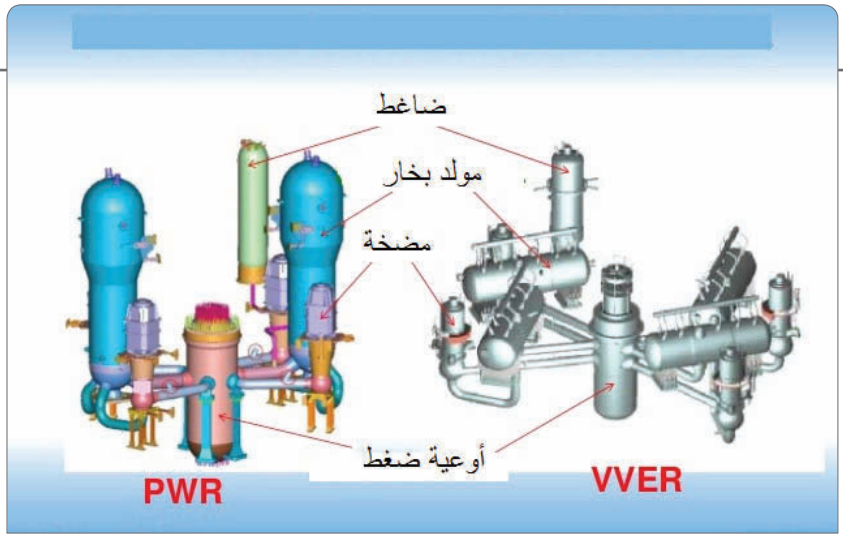
**هناك جملة من الخصائص التي تُميز هذا مفاعل "VVER-1200" عن بقية مفاعلات الماء المضغوط الأُخرى (الشكل 325):**

- الوضعية الأُفقية لمولدات البخار (الشكل 326)؛
- الشكل السداسي لمجموعات قضبان الوقود (الشكل 327)؛
- والسعة المائية العالية للضاغط، ما يتيح كمية مياه احتياطية أكبر للتبريد.

**الشكل 325:**

**مقارنة بين مفاعل "VVER"**

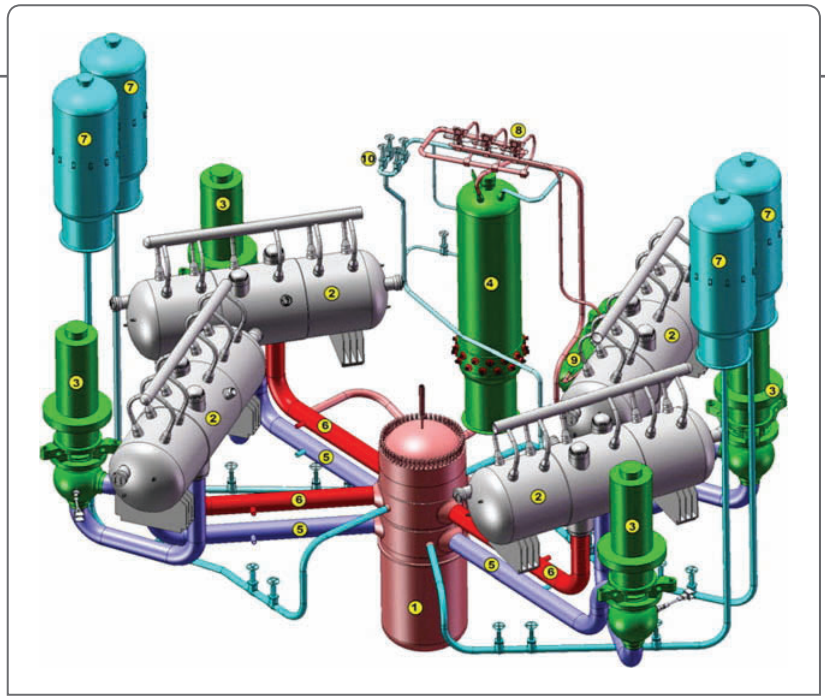
**ومفاعل الماء المضغوط التقليدي**



**الشكل 326:**

**مولدات البخار الأفقية (2# داخل دائرة صفراء)**

**في مفاعل** "VVER-1200"



يتوافق مفاعل "VVER" مع متطلبات السلامة الدولية وتوصيات الوكالة الدولية للطاقة الذرية بعد حادثة فوكوشيما. صمم هذا المفاعل بحيث يتحمل الصدم بطائرة 400 طن وزلزال بقوة حتى درجة 9 على "مقياس ريختر Richter Scale".

**الشكل 327:**

**الشكل السداسي لمجامع الوقود في مفاعل "VVER-1200"**

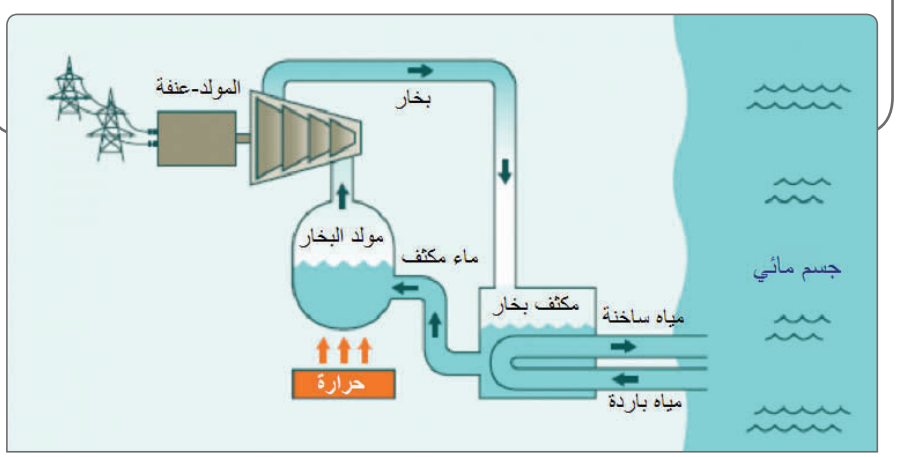
المفاعلات التي ستركب في الضبعة هي من النموذج "V-529"، وهو مطور من النموذج "V-491" المستخدم في "محطة لنينجراد النووية Leningrad II 2 Power Plant" الروسية (الشكل 328)، بعد تعديله لاستخدام مياه البحر الدافئة في تكثيف البخار الخارج من وحدات العنفات-المولدات، أو ما يعرف بالتبريد المفتوح أو "التبريد بالتمرير مرة واحدة once-through cooling" (الشكل 329).

**الشكل 328:**

**محطة لنينجراد 2 النووية المناظرة لمحطة الضبعة**

وفقاً للشركة المصنعة، سيولد كل مفاعل 3,200 ميجاوات من الحرارة، 1,190 ميجاوات من الكهرباء في حالة استخدامه لتوليد الكهرباء فقط. في حالة استخدام 432 **مروح** (ميجاوات من الحرارة) من دائرة التبريد الثانية لتحلية المياه (بطريقتي "التقطير متعدد التأثير multiple-effect distillation" و"النضح العكسي reverse osmosis")، كما هو الحال في مفاعلات الضبعة، سيكون الناتج الإجمالي من الكهرباء 1,050 **مروك**، والصافي 972 **مروك**.[1]

**الشكل 329: التبريد المفتوح بماء البحر**




انتهت وزارة الكهرباء والطاقة من الحصول على الموافقات البيئية المطلوبة، وتنتظر إذن بدء الإنشاء من هيئة الرقابة النووية والإشعاعية. الشكل 330 يوضح باختصار تاريخ المشروع.

وفقا لموقع هيئة المحطات النووية على الإنترنت، فإن نسبة مشاركة الشركات المصرية في إنشاء الوحدة الأولى تصل إلى 20 %، وسوف تزيد تباعا مع الوحدات التالية.

(1) لمزيد من المعلومات عن طرق تحلية المياه، أنظر هشام الزيات وشريف قنديل (2018).

كما هو الحال دائماً مع أي مشروع كبير، لم يَعدَم مشروع الضبعة المعارضين. سنستعرض في الجزء التالي أهم ادعاءات هؤلاء المعارضين أو المحذرين وردود المسؤولين، الخبراء، والمؤيدين للمشروع عليها.

الاعتراض الأول هو أن قرض الـ 25 مليار دولار سوف يفاقم من أعباء الديون الخارجية على مصر. تحذر الدكتورة يمن الحماقي، أستاذ الاقتصاد في جامعة عين شمس، من ذلك وتقول، "يشكل هذا القرض مخاطرة للمستقبل لأنه يثقل كاهل الدولة ويجب تسويته من ثروة الأجيال القادمة وأصولها الاقتصادية." تضيف، "أن لجوء مصر إلى الاستدانة كثيرا ينبئ بعجزها عن جذب الاستثمارات الأجنبية في وقت تستمر فيه عائدات السياحة في الانحدار." تستطرد الدكتورة يمن، "أثار هذا المشروع جدلا حادا ونال نصيبه من الانتقاد، على نحو بارز بسبب موقعة، الضبعة في مرسى مطروح، وهي منطقة سياحية يمكن أن تستغلها الدولة للمشروعات السياحية والاستثمارية بفضل موقعها على ساحل المتوسط في منطقة جد مميزة تمتد 60 كيلومتراً على طول الساحل الشمالي لمصر."

في المقابل، يحاج أيمن حمزة، المتحدث باسم وزارة الكهرباء والطاقة المتجددة المصرية، أن "قرض الـ 25 مليار دولار من روسيا لا يشكل عبء على مصر. مع أنه مبلغ ضخم، فإن مصر سوف تسدد قيمته من بيع الطاقة المنتجة من المفاعلات النووية، ولن يكلف هذا المشروع مصراً شيئاً." بدوره، يقول أمجد الوكيل، رئيس هيئة المحطات النووية المصرية، "أن مشروع الضبعة سوف يحقق لمصر إيرادات بقيمة 264 مليار دولار خلال ستين عاماً، فترة حياة المحطة النووية."

يجدر بالذكر في هذه المناسبة، أن لدى الكثيرون اعتقادا غير مُؤسَس أن بناء محطة طاقة نووية في منطقة ما يحول دون الاستخدامات الأخرى لهذه المنطقة. على سبيل المثال، تقع محطتا "بتسناو Beznau" و"چوسچن Gösgen" في قلب المناطق الريفية في سويسرا.

في مقالة منشورة في جريدة الشروق المصرية بتاريخ 31 أكتوبر 2017، عبرت الكاتبة "راجية الجرزاوي" عن قلقها الشديد من وضع الهيئة المسؤولة عن الرقابة النووية في مصر: "تشير الكثير من القرائن إلى قصور كبير في قدرات هيئة الرقابة النووية والإشعاعية، بوضعها الحالي، يعوقها عن القيام بمهامها في ضمان أمان الطاقة النووية." تُحَاج راجية الجرزاوي في غياب الشفافية وضمانات الاستقلالية في هذه الهيئة:

**... نكاد لا نعلم شيء تقريبا عن هذه الهيئة التي تعمل في إطار من غياب الشفافية العميق. إذ ليس معروفا للجمهور البنية المؤسسية لهيئة الرقابة النووية، ولا تشكيل مجلس الإدارة، ولا السلطة العليا فيها، ولا عدد العاملين أو الإمكانيات العلمية والخبرات المتوفرة لديهم ...**

**كما لا يوجد لهيئة الرقابة النووية والإشعاعية أي "موقع إلكتروني للتواصل العلني مع الجمهور"، أو أثر لأي نشاط في مجال "توعية الجمهور بالعملية التنظيمية للأنشطة النووية" أو في "إجراءات إشراك الجمهور في العملية التنظيمية"، ولا في مجال "اتخاذ التدابير اللازمة لنشر ثقافتي الأمن والأمان النووي"، رغم أن هذا كله من مهامها التي يُلزمها بها القانون واللوائح.**

...

**كما لا تلتزم هيئة الرقابة النووية أيضًا بنشر "تقارير ربع سنوية للجمهور عن الموقف الإشعاعي" بالجريدة الرسمية وبالصحف ووسائل الإعلام، ولا تلتزم بإتاحة ونشر ما يصدر عنها من "اشتراطات والتزامات ومعايير ونظم تتعلق بالترخيص**

**شاملة النماذج والجداول حول المعايير الفنية ومتطلبات الأمان الواجب اتباعها"، كما يلزمها القانون واللوائح...**

**ينص القانون على أن هيئة الرقابة النووية هيئة مستقلة إلا أن كثيرًا من ضمانات هذا الاستقلال تكاد تكون غائبة، فلا يوجد لهيئة الرقابة النووية مقر مستقل، لكنها تحتل حيزًا داخل مبنى هيئة الطاقة الذرية، وهو ما يسمح بتداخل الأعمال بين مختلف الإدارات، كما تعاني الهيئة من نقص في التمويل وغياب كادر مالي ملائم، كذلك لا ينص القانون على حماية منصب رئيس الهيئة من العزل العشوائي، ولا يتضمن أيضًا التأكيد على قدرة رئيس الهيئة على الوصول إلى أعلى سلطة في الدولة كما توصي المعايير الدولية.**

- **وفي الختام، تحذر الكاتبة من تجاهل هذه النواقص:**

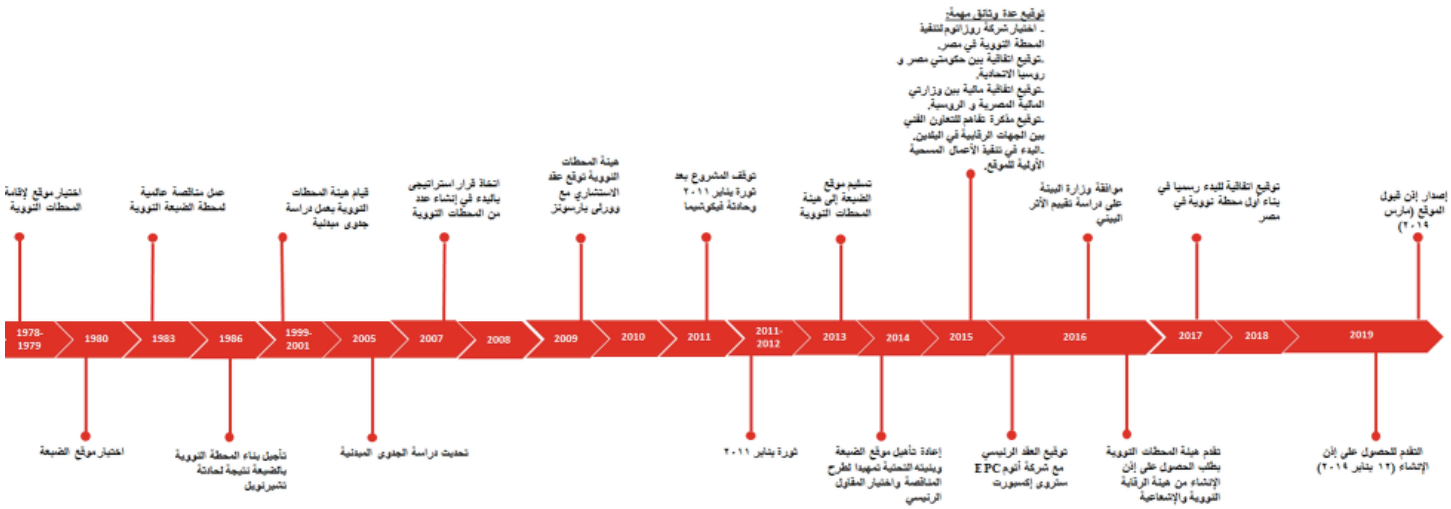
**... ومع ذلك فلا يبدو أن أولويات المسئولين عن القرار في الموضوع النووي تتبع التوصيات والمعايير الدولية، حيث يتوجه الحماس والاهتمام نحو الإسراع في البناء والتنفيذ عوضًا عن أو قبل أو حتى بالتوازي مع الإسراع في استكمال بناء القدرات التنظيمية والرقابية.**

**ويجب بناء هذه القدرات قبل السير حثيثا في بناء مفاعلات نووية، فهذا الأداء، في المجال النووي يؤدي إلى عواقب وخيمة.**

ربما يكون خوف المسؤولين المصريين من أن يلقى المشروع الحالي مصير التجارب العديدة السابقة هو الدافع وراء هذا "الإسراع في البناء والتنفيذ" الذي تحذر منه الكاتبة دون "استكمال بناء القدرات التنظيمية والرقابية". لقد قامت مصر في 2010 بتغييرات بنيوية في مؤسساتها النووية لجعل الهيئة المسؤولة عن

الرقابة النووية أكثر استقلالا من الناحية القانونية (راجع الجزء الخاص بالقوانين والمؤسسات)، ولا يوجد ما يمنع أن تقوم الحكومة المصرية بمزيد من التحسينات في هذا الشأن. يجدر بالذكر في هذا السياق أن مصر لم تتخلى حتى الآن، على الأقل رسميا، عن حقها في تصنيع الوقود النووي أو إعادة معالجة الوقود المستهلك، رغم الضغوط المستمرة لذلك من قبل الدول الغربية—على مصر وكل دولة عربية تريد استغلال الطاقة النووية في الأغراض السلمية. على كل حال، يمكن لمصر الاستفادة من الخبرة الجيدة لدولة الإمارات العربية في هذا الخصوص.

## الشكل 330:
## تاريخ مشروع الضبعة النووي



## • السعودية

- تعتزم السعودية بناء محطتين نوويتين كبيرتين على الأقل بحلول 2032. يتوقع أن توفر هاتان المحطتان 17 چيچاواتا.
- يتوقع المسؤولون السعوديون أن تولد المملكة 17 چوك من الطاقة النووية بحلول 2040، لتوفر 15 % من الكهرباء المطلوبة، مع أكثر من 40 چوك من الطاقة الشمسية.
- توجد خطط متقدمة على جبهتين لاستخدام المفاعلات النووية الصغيرة في تحلية المياه.

جددت المملكة العربية السعودية حديثا اهتمامها بتوليد الكهرباء النووية. وكما هو الحال في دولة الإمارات، ترى السعودية في الطاقة النووية وسيلة لتنويع مصادر الكهرباء التي تحتاجها وتوفير النفط والغاز الطبيعي للتصدير والاستخدامات الأخرى الأكثر قيمة، بدلا من استهلاكها في توليد الكهرباء داخليا. كما ترى السعودية، ومثلها الإمارات ومصر، في امتلاك محطات الطاقة النووية فرصة لتطوير قدراتها العلمية والصناعية في التكنولوجيا النووية السلمية.

توازى اهتمام السعودية صعودا وهبوطا بتوليد الكهرباء النووية مع التقلبات في سوق النفط. بدأت السعودية التعاون مع الوكالة الدولية للطاقة الذرية في 1978، عندما كان الاهتمام العالمي بالطاقة النووية في أوجه. فقد أدى تضخم أسعار النفط في 1973 - 1974 و1979 إلى زيادة الاهتمام بالطاقة النووية، كوسيلة لتقليل اعتماد الدول الصناعية على واردات النفط. جلبت هذه الأسعار للدول المصدرة للبترول عائدات لم تكن في الحسبان، الأمر الذي شجع السعودية على الاستثمار في مصادر الطاقة البديلة.

سعى اتفاق التعاون في 1978 إلى تطوير خطة للطاقة النووية من أجل

المنطقة، وعلى وجه الخصوص، إلى "إنشاء مؤسسات التدريب والبحث من أجل إدخال الطاقة النووية إلى البلد".

في 1988، أقيم "معهد بحوث الطاقة الذرية" ضمن مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتكنولوجيا، وهو بمثابة المركز الوطني للبحث والتطوير التقني. في الوقت نفسه، قام العلماء بفحص إمكانية إنشاء المحطات النووية في المواقع الصناعية بجده والدمام. في أوائل 90ات19، تعاونت جامعة الملك عبد العزيز مع معهد بحوث الطاقة النووية في فحص بعض المكونات الخاصة بالمحطات النووية، منها مضخات الطرد المركزي والوقاء الخرساني.

توقف نشر المحطات النووية في العالم في آواخر 80ات و90ات19، جزئيا بسبب انخفاض أسعار النفط وكارثة تشيرنوبيل النووية.

في 2003، خلصت دراسة أجرتها جامعة الملك سعود إلى أن مفاعلات "كاندو CANDU" الكندية، وهي من مفاعلات الماء الثقيل المضغوط، هي الأنسب لتوليد الكهرباء وتحلية المياه في المملكة. المفاجئ أن نائب مدير معهد بحوث الطاقة الذرية أعلن في فبراير 2004 أن السعودية لا تخطط لتطوير الطاقة النووية ولا كي تصبح قوة نووية.

في 2006، كانت السعودية المحرك الرئيس وراء إعلان مجلس التعاون الخليجي عن "برنامج مشترك في التكنولوجيا النووية للأغراض السلمية وفقا للمعايير الدولية" والترتيبات التالية في هذا الصدد.

في 2007 و2008، استلمت السعودية عروضاً بالتعاون الفني النووي من روسيا وفرنسا. وفي مايو 2008، وقعت السعودية والولايات المتحدة "مذكرة تفاهم حول التعاون في الطاقة النووية المدنية Memorandum of Understanding on Civil Nuclear Energy Cooperation". وفي أغسطس 2009، أعلنت الحكومة السعودية أنها تفكر في وضع برنامج للطاقة النووية خاص بها.

في 2010، تقدمت السعودية عدة خطوات في سبيل استغلال الطاقة النووية. في أبريل 2010، صدر المرسوم الملكي 35/ا، والذي جاء فيه "تنمية الطاقة الذرية ضروري لمقابلة احتياجات المملكة المتزايدة من الطاقة من أجل توليد الكهرباء، إنتاج المياه المحلاة، وتقليل الاعتماد على الموارد الهيدروكربونية الناضبة".[1] أقر المرسوم الملكي خطة لإنشاء "مدينة الملك عبد الله للطاقة الذرية والمتجددة" في الرياض، كي تحوي مفاعلات المملكة النووية وتمثل المملكة رسميا لدى الوكالة الدولية للطاقة الذرية (الشكل 331). كما عين المرسوم الدكتور هاشم يماني، وزير الطاقة والكهرباء ووزير الطاقة والصناعة الأسبق، مديرا للمدينة. بعد شهرين من ذلك، أعلنت السعودية أنها كلفت "بوري Pöyry" الأوربية، وهي شركة استشارية في الهندسة والطاقة لها مقر في كل من فنلندا وسويسرا، من أجل إعداد للمدينة التكنولوجية السعودية "رؤية وطنية واستراتيجية عليا في مجال الطاقة النووية والمتجددة" والمساعدة في تحديد "الأولويات على المديين القصير والأطول، المبادرات العاجلة، وخطة العمل".

**الشكل 331:**

**مدينة الملك عبد الله للطاقة الذرية والمتجددة**

(1) الاقتباس مترجم من النسخة الإنكليزية.

في يونيو 2011، أعلن منسق التعاون العلمي في مدينة الملك عبد الله أن المدينة تخطط لإنشاء 16 مفاعل للطاقة النووية خلال العشرين عاما القادمة، بتكلفة تصل إلى أكثر من 300 مليار ريال (80 مليون دولار)، لتوليد نحو 20% من كهرباء السعودية. في نوفمبر 2011، عينت المدينة شركة "ويرلي بارسونز WorelyParsons" للقيام بالمسح الضروري لتحديد المواقع المناسبة للمحطات النووية وترتيبها حسب الأفضلية، بالإضافة إلى وضع المواصفات الفنية لمكونات المشروعات النووية القادمة.

جرى تحديد 17 موقعاً محتملاً للمحطات النووية، تسعة منها بالقرب من ساحل البحر الأحمر، ستة على الخليج العربي، واثنان بداخل المملكة.

في أبريل 2013، توقعت المدينة أن تصل سعة المملكة الإنتاجية من الكهرباء بحلول 2032 إلى 123 جو، وأن تساهم الطاقة النووية والمتجددة في تغطية نصف هذه الكمية تقريباً على النحو التالي: 17 جو نووية؛ 16 جو شمسية ضوء-جهدية؛ 25 جو شمسية حرارية؛ 4 جو أرض-حرارية، رياح، ونفايات في حالة استثمار 108 مليار دولار في تطوير الطاقة الشمسية. بالإضافة لذلك، سوف تستخدم نحو 9 جو من قدرة الرياح في التحلية. أعلن أن بناء المفاعلات النووية سوف يبدأ في 2016. وفي سبتمبر 2013، ضمت القائمة المختصرة للمواقع المناسبة الجبيل (على الخليج)، تبوك، وجَزان (على البحر الأحمر؛ الشكل 332).[1] تكونت في العام نفسه "الشركة النووية القابضة".

(1) تحوي الجبيل المنطقة الصناعية الكبرى في المنطقة الشرقية من المملكة. أما تبوك، فستكون محل مشروع "نيوم NUME" العملاق، وهو مشروع لإنشاء منطقة استثمارية تجارية وصناعية على الساحل الشمال-غربي من البحر الأحمر. جاء الكشف عن المشروع خلال "مؤتمر مبادرة مستقبل الاستثمار" الذي عقد في الرياض في أكتوبر 2017. تبلغ كلفة المشروع الضخم 500 مليار دولار. يشمل مشروع نيوم أراضي بمساحة إجمالية تصل إلى 26500 كيلومتر مربع على البحر الأحمر وخليج العقبة. يمتد المشروع من شمال غربي المملكة، ويشتمل على أراض داخل الحدود المصرية والأردنية. من المخطط أن يعتمد هذا المشروع حصريا على مصادر الطاقة المتجددة.

**الشكل 332:**

**مواقع الجبيل، جزان، وتابوك**

يبدو أن الاستراتيجية النووية للسعودية قد تغيرت في 2015، وبدأت تركز على استخدام "المفاعلات الصغيرة المتراكبة small modular reactors (SMRs)"، مثل مفاعلات "سمارت SMART" الكورية، في التوليد المشترك (إنتاج الكهرباء وتحلية المياه).[1]

في 4 مارس 2015، قالت وكالة الأنباء السعودية الرسمية أن رئيسة كوريا الجنوبية، "پارك چيون هاي Park Geun-hye"، التقت بالعاهل السعودي، الملك سلمان، في إطار زيارة رسمية إلى الرياض (الشكل 333). وأضافت الوكالة أن المملكة وقعت مذكرة تفاهم مع كوريا الجنوبية بشأن التعاون في تطوير الطاقة

(1) "SMART" هو اختصار للعبارة الإنكليزية "Self-Monitoring Analysis and Reporting Technology". تهتم الأردن كذلك بالمفاعلات الصغيرة المتراكبة لأنها يمكن أن تُستخدم في توليد الكهرباء وتحلية المياه في الوقت ذاته، تتطلب رأسمال أقل، وتناسب المناطق الحضرية والنائية على حد سواء.

النووية، وذلك بعد اتفاق سابق وقعه الطرفان في 2011. ووفقا لبيان المكتب الرئاسي لكوريا الجنوبية، فإن مذكرة التفاهم تتضمن دعوة الشركات الكورية للمشاركة في تشييد ما لا يقل عن مفاعلين نويين من الحجم الصغير أو المتوسط في السعودية.

**الشكل 333:**

**زيارة رئيسة كوريا الجنوبية إلى السعودية في مارس 2015**

بناء على مذكرة التفاهم بين السعودية وكوريا الجنوبية، وقعت مدينة الملك عبدالله مع "المعهد الكوري لأبحاث الطاقة النووية Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)" اتفاقا لتقييم إمكانية بناء مفاعلين على الأقل من طراز سمارت. أضاف البيان، "في حالة المضي قدما في إنشاء الوحدتين، فستبلغ تكلفة العقد ملياري دولار." يجدر بالذكر، أن رئيس المدينة كان قد صرح في يناير 2015 أن تحقيق هدف الوصول إلى 17 جيجاوو من الكهرباء النووية سيستغرق على الأرجح حتى العام 2040. وبالمناسبة نفسها، وقعت «مجموعة شاكر» السعودية الخاصة مذكرة تفاهم غير ملزمة مع «إل جي إلكترونيكس L G Electronics" الجنوب-كورية بشأن التعاون في أنظمة التبريد المستخدمة في المفاعلات النووية.

في نفس الشهر، أعلنت وزارة التخطيط الأرجنتينية، أثناء زيارة لوفد مجلس الشورى السعودي، عن تأسيس «إنفانيا Invania"، شركة استثمار مشترك بين "إنڤاپ Invap" (Investigacion Aplicada) الأرجنتينية، المملوكة للدولة، و"تقنية Taqnia" السعودية، الذراع التكنولوجي لصندوق الاستثمار العام السعودي، لتطوير التكنولوجيا النووية من أجل برنامج السعودية للطاقة النووية (الشكل 334). تشكلت شركة إنفانيا بناء على اتفاق للتعاون النووي وقعه البلدان في 2011. يجدر بالذكر أن الأرجنتين لديها تاريخ طويل من البحث والتطوير في التكنولوجيا النووية، وتولد الآن نحو عشر إنتاجها من الكهرباء من ثلاثة مفاعلات نووية من طراز الماء الثقيل المضغوط. صممت الأرجنتين حديثاً مفاعلها الخاص "كارم CAREM"، وهو من المفاعلات الصغيرة المتراكبة (سعته 27 مروك).

**الشكل 334:**

**الرئيس الأرجنتيني يستقبل وفد مجلس الشورى السعودي في مارس 2015**

في سبتمبر 2015، وقعت عقود أخرى بين الجانبين السعودي والكوري بهدف بناء شراكة طويلة الأمد في مجال تكنولوجيا سمارت، مثل تصميم المفاعلات، بناءها، وصيانتها. منح المعهد الكوري شركة «كيبكو للهندسة والتشييد KEPCO Engineering & Construction" عقدا قيمته 130 مليون دولار للقيام بدراسات التخطيط والجدوى. تتولى شركة «سمارت للقدرة الكهربية SMART Power Ltd" مهمة المقاول الرئيس لأعمال «الهندسة، الاشتراء، والتشييد Engineering، Procurement، and Construction (EPC)".

في يناير 2016، وقعت مدينة الملك عبد الله اتفاقا مع "مؤسسة الهندسة النووية الصينية China Nuclear Engineering Corporation (CNEC)" لبناء مفاعل عالي الحرارة في المملكة، مثل المفاعل "HTR-PM" الذي أنشأته هذه المؤسسة حديثا في الصين. كما تقوم "CNEC" بدراسة جدوى عن استخدام هذه المفاعلات في تحلية المياه وصناعة البتروكيماويات.

في أبريل 2016، أُعلِن عن "رؤية السعودية 2030"، وهي بمثابة خطة استراتيجية إصلاحية للمملكة. تضم "الرؤية" 96 هدفاً استراتيجياً. وقد وضع مجلس الشؤون الاقتصادية والتنمية 13 برنامجاً تنفيذياً من أجل تحقيق هذه الأهداف. من ضمن أهداف الرؤية أو الخطة تنويع مصادر الدخل القومي، بناء القدرات البشرية السعودية، وتوفير فرص العمل للمواطنين.

في مارس 2017، عقدت مدينة الطاقة الذرية والمتجددة مع "CNEC" اتفاقية إضافية للتعاون النووي، تشمل تحديد سلسلة الإمداد وإجراء دراسة الجدوى. في مايو من نفس العام، بدأت مجموعة عمل مشتركة دراسة الجدوى. هناك أيضا دراسة جدوى من قبل الوكالة الدولية لاستخدام المفاعلات عالية الحرارة في صناعة البتروكيماويات السعودية.

تسعى السعودية إلى تطوير "سلسلة إمداد supply chain" محلية للوقود النووي. في مارس وأغسطس 2017، وقعت المساحة الجيولوجية السعودية مع "المؤسسة الوطنية النووية الصينية China National Nuclear Corporation" اتفاقات للتعاون في التنقيب عن ترسيبات اليورانيوم في السعودية، كجزء من "رؤية 2030". صرحت المؤسسة الصينية أنها سوف تستكشف تسعة مناطق واعدة في السعودية. الجدير بالذكر أن المؤسسة نفسها كانت تنقب عن اليورانيوم في الأردن. كما تسعى المملكة من خلال مدينة الملك عبدالله إلى تنمية التعاون في مجال الوقود النووي مع أطراف أخرى، مثل المجر وكازاخستان.

الجدير بالذكر في هذا السياق، أن السعودية وقعت "اتفاق الضمانات Safeguard Agreement" مع الوكالة الدولية للطاقة الذرية في 2009، ولكنها لم توقع حتى الآن (ومثلها مصر) على "البروتوكول الإضافي Additional Protocol". ويحذر بعض الباحثين الأمريكيين و"المتأمريكيين" (المهاجرين الحاملين للجنسية الأمريكية) من أن دخول الصين وروسيا إلى السوق النووي في المنطقة العربية يضعف من قدرة الولايات المتحدة على دفع الدول العربية، وخاصة السعودية، إلى التخلي عن حقوقها في تصنيع الوقود النووي: "...مع المنافسة المتنامية من روسيا والصين (اللتان تفرضان شروطا أقل صرامة من الولايات المتحدة فيما يخص عدم الانتشار، الأمن النووي، والسلامة النووية)، تواجه إدارة [الرئيس الأمريكي] ترمب ضغطا لتخفيف قيودها على التخصيب [المقصود تخصيب اليورانيوم] من أجل الانخراط التجاري للولايات المتحدة."[1]

أعلنت مدينة الطاقة النووية والمتجددة في العام نفسه (2017) أنها تطلب عروضا لإنشاء مفاعلات نووية بسعة 2,9 چوك، من كوريا الجنوبية، الصين، روسيا، واليابان.

(1) مقتبس من المرجع التالي: Mason and Bahgat (2019).

في يونيو 2017، صدر الأمر الملكي رقم 43309 الذي يقضي بإنشاء المشروع الوطني للطاقة الذرية في المملكة. سوف نستعرض ملامح هذا المشروع لاحقا. وفقا لموقع مدينة الملك عبدالله للطاقة الذرية والمتجددة، تضمن الأمر الملكي تخصيص موقعين على ساحل الخليج العربي من بين المواقع المرشحة بحيث يكون أحدهما أساسي، والثاني البديل في حال تبين عدم صلاحية الموقع المفضل من دراسات تربة الطبقات الأرضية السفلى.

كتبت مجلة "ميد MEED" في يناير 2018 نقلا عن مصادر لها أن السعودية تعمل على تقييم موقعين مرشحين لمحطتها النووية الأولى، وأن الموقعين هما "أم حويض" و"خور دويهن" على ساحل الخليج العربي بالقرب من الحدود الإماراتية والقطرية (الشكل 335 والشكل 336).[1] أضافت المجلة أنه تمت دعوة شركات استشارية لتقديم عروضها للفوز بعقد تنفيذ دراسات موقع المشروع، تقييم الأثر البيئي، وإعداد التقرير الأولي لتحليل سلامة الموقع، وذلك من أجل اختيار الموقع الأنسب للمشروع.

**الشكل 335:**
**موقع جبل "أم حويض" على الخريطة**

(1) يستخدم الشباب السعودي منطقة "أم حويض" النائية لصيد الأسماك وممارسة الغوص.

في نوفمبر 2018، منحت المدينة عقدا لشركة ويرلي بارسونز مجددا من أجل تقديم الخدمات الاستشارية لمشروع الطاقة النووية السعودي. يغطي هذا الاتفاق حوكمة المشروع، إدارة الموارد، خدمات المشروع، التدريب، والتوافق مع القوانين والمعايير خلال جميع مراحل المشروع.

**الشكل 335:**
**موقع جبل "أم حويض" على الخريطة**

في يناير 2019، سلمت الوكالة الدولية إلى السعودية التقرير النهائي عن بعثة "المراجعة المتكاملة للبنية التحتية النووية Integrated Nuclear Infrastructure Review (INIR)"، والذي خلص إلى أن "تقدما معتبرا" قد أحرز، ويشمل إنشاء إطار تشريعي وتطوير البنية التحتية النووية.

في أبريل 2019، نشرت وكالة "رويترز Reuters" للأنباء أن السعودية تخطط لإصدار طلب عروض في 2020 لإنشاء أول مفاعلين نوويين في المملكة، وأن السعودية تناقش المشروع مع الولايات المتحدة وموردين محتملين آخرين. تنقل رويترز عن ثلاثة مصادر مطلعة لم تسميها أن خطط المملكة هذه تجابه بالتمحيص من قبل واشنطن خوفا من احتمال الاستخدام العسكري للتكنولوجيا النووية. تستطرد رويترز أن شركات أمريكية، جنوب-كورية، صينية، وفرنسية

تجري المباحثات مع الرياض بخصوص توريد المفاعلين النوويين. في أكتوبر 2019، صرحت وزارة الطاقة السعودية، خلال أحد العروض في "مؤتمر مبادرة الاستثمار Future Investment Initiative Conference"، أنها تجري مباحثات مع خمس شركات موردة لتقنيات الطاقة النووية من أجل بناء المحطة النووية السعودية. هذه الشركات هي "كيبكو KEPCO" الجنوب-كورية، "روساتوم Rosatom" الروسية، "EDF" الفرنسية، "CNNC" الصينية، جميعها مملوكة للدولة، و"وستنجهاوس Westinghouse" الأمريكية.

كان وزير الطاقة السعودي، الأمير عبد العزيز بن سلمان، قد أعلن أن المملكة ترغب في تخصيب موارد اليورانيوم لديها من أجل برنامجها للطاقة النووية. لكن وزير الطاقة الأمريكي، "رِك بيري Rick Perry"، شكك، قبل أيام من إعلان نظيره السعودي، في قدرة المملكة على ذلك، بسبب نوعية وكمية خامات اليورانيوم الموجودة في السعودية.

يتوقع بعض المراقبون أن السعوديين لن يتمكنوا من الحصول على المعدات والخبرة النووية الأمريكية قبل أن توقع الرياض اتفاقاً مع واشنطن يضمن استخدام التكنولوجيا النووية حصرياً في الأغراض السلمية، كما يفرض "قانون الطاقة الذرية Atomic Energy Act" الأمريكي. وفقاً لما نشرته رويترز، ماتزال واشنطن تسعى لإقناع الرياض بالتوقيع على البروتوكول الإضافي للوكالة الدولية للطاقة الذرية، الذي يفرض ضمانات إضافية للتحقق من أن الطاقة النووية لن تستخدم إلا في الأغراض السلمية.

يبدو أن السعودية تتقدم بخطوات متأنية في برنامجها النووي، وتريد أن تحافظ على خياراتها مفتوحة في هذا المشروع. كان المسؤولون السعوديون قد أعلنوا أنهم يعتزمون اختيار المُوَرِّد الرئيس للمفاعلين النوويين الكبيرين في أواخر 2018، ثم عَدَّلوا ذلك إلى 2019. أثناء كتابة هذا الجزء، تقول بعض الأخبار أن طلب العروض سوف يصدر خلال 2020.

## • المشروع النووي الحديث

وفقاً لموقع الانترنت الخاص بمدينة الملك عبد الله للطاقة الذرية والمتجددة، يتشكل هذا المشروع من خمسة مكونات: (1) المفاعلات النووية الكبيرة، (2) المفاعلات النووية المدمجة الصغيرة، (3) دورة الوقود النووي، و(4) التنظيم والرقابة.

تتراوح قدرة المفاعلات النووية الكبيرة ما بين 1200 - 1600 **مو** للمفاعل الواحد. وقع اختيار السعودية على مفاعلات الماء الخفيف المضغوط (PWRs) لعدة أسباب، أهمها كفاءتها العالية وسهولة صيانتها. ستنشئ السعودية مفاعلين تقليديين كبيرين بسعة إجمالية مقدرها 2,8 **چ‌وك** في أولى محطاتها النووية. من المتوقع أن تتجاوز تكلفة بناء هذه المحطة 14 مليار دولار. لم يعلن رسميا بعد عن الموقع المختار للمحطة النووية السعودية الأولى، وإن كان المرتقب أن يكون موقعها على ساحل الخليج العربي.

المفاعلات الصغيرة المتراكبة/الوحدانية هي مفاعلات نووية صغيرة ذات سعة لا تزيد عن 300 **مروك**. يمكن استخدام هذه المفاعلات منفردة أو في تجمعات من أي عدد منها. تسعى السعودية ليس فقط إلى امتلاك هذه المفاعلات وإنما أيضاً امتلاك التقنية ذاتها (أو ما يعرف سعوديا بـ "توطين" التكنولوجيا)، وذلك من خلال عقد شراكات طويلة الأمد مع مصنعي هذه التقنيات. اختارت السعودية العمل على تطوير طرازين من المفاعلات الصغيرة، "سمارت" الجنوب-كوري و"HTR-PM" الصيني، كي تناسب الظروف والمتطلبات السعودية.

يقصد بـ "دورة الوقود النووي" المراحل المختلفة التي يمر بها الوقود النووي من استخراج خامات اليورانيوم وتنقيتها إلى إعادة معالجة الوقود المستهلك والتخلص النهائي من النفايات النووية، مروراً بتخصيب اليورانيوم وتصنيع الوقود النووي. تعمل السعودية على تحقيق الاكتفاء الذاتي في إنتاج الوقود النووي على المدى الطويل.

تتعاون مدينة الملك عبدالله وهيئة المساحة الجيولوجية السعودية في مشروع لتقدير موارد اليورانيوم والثوريوم في المملكة. كما عقدت السعودية مع الأردن شراكة استراتيجية في مجال استكشاف واستخلاص اليورانيوم. وفقا لهذه الشراكة يحق لمدينة الملك عبد الله الاستثمار في مشاريع التنقيب عن اليورانيوم واستخلاصه في الأردن.

- **القـوانــين والمؤسســات**

### مدينة الملك عبد الله للطاقة النووية والمتجددة

تأسست المدينة بالمرسوم الملكي 35/ا في أبريل 2010. يشرف على المدينة مجلس أعلى من 13 عضواً. حددت أهداف المدينة كالآتي:

- اقتراح السياسات الوطنية المتعلقة بالطاقة النووية والمتجددة، وضع الخطط والاستراتيجيات التنفيذية الضرورية، ورسم القوانين واللوائح ذات الصلة؛
- تنفيذ برامج البحث العلمي وتشجيع المشروعات البحثية ذات الصلة في القطاع الخاص والجامعات؛
- تقديم المنح الدراسية وتنفيذ البرامج التدريبية في المملكة من أجل تنمية الخبرات الوطنية في مجال الطاقة النووية والمتجددة؛
- الرقابة على صناعات الطاقة النووية والمتجددة؛
- والعمل بمثابة الوكالة المسؤولة قانونياً عن المعاهدات التي تشارك فيها المملكة، وتمثيل المملكة قبل الوكالة الدولية للطاقة الذرية والمنظمات الدولية ذات الصلة الأخرى.

نستنتج من الأهداف السابقة أن المدينة تعمل كمؤسسة قائمة بذاتها ومتكاملة رأسيا. يتوقع أن تضم المدينة المنظمات الأخرى ذات العلاقة بالطاقة النووية

والسابقة على تكوين المدينة، مثل معهد بحوث الطاقة الذرية. تبلغ ميزانية المدينة، وفقا للمرسوم الذي أسسها، نحو 133 مليون دولار. من أجل تشجيع الاستثمار في البرنامج النووي، تعفى المدينة من الضرائب والجمارك على المعدات والماكينات المستوردة من أجل أنشطتها العلمية.

تركزت أنشطة المدينة في السنوات الأولى من إنشائها على الطاقة المتجددة. فقد أعطت الحكومة السعودية الأولوية للطاقة الشمسية على الطاقة النووية، جزئيا بسبب تكاليفها المقدمة الأقل.[1] مع ذلك، يدرك المسؤولون السعوديون أن الطاقة الشمسية لن تكون كافية لتوفير كهرباء "الحمل الأساسي base load".

لم تفعل المدينة الكثير حتى الآن فيما يتعلق بالتنظيم القانوني للطاقة النووية، عدا القرار بأنها سوف تقوم بدور الهيئة الرقابية على الطاقة النووية في المملكة.

### معهد بحوث الطاقة الذرية

أنشأ معهد بحوث الطاقة الذرية في 1988 ضمن مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتكنولوجيا، من أجل "توظيف وتنمية التكنولوجيا النووية في خدمة التنمية الزراعية، الصناعية، الصحية، البحثية، الاقتصادية، والأمنية في المملكة العربية السعودية، مع حماية الحياة البشرية والبيئة من الإشعاع المؤين." منح المعهد عند إنشائه تفويضاً واسعاً يشمل تشكيل الإطار القانوني لتطبيقات التكنولوجيا النووية، تنمية القدرات الفنية، وتشجيع التعاون الدولي." المتوقع انتقال أغلب هذه الصلاحيات إلى مدينة الملك عبدالله للطاقة النووية والمتجددة، بعد إنشائها في 2010.

### المؤسسات الأخرى

منحت مدينة الملك عبدالله ولاية واسعة تشمل تقريبا كل جوانب تنمية الطاقة النووية، من البحث والتدريب إلى التنظيم القانوني وتمثيل المملكة في المحافل

(1) تنشئ السعودية محطة هائلة للطاقة الشمسية في "سكاكا" بشمال المملكة (برأس مال يبلغ 1،1 مليار ريال سعودي)، المتوقع أن تولد الكهرباء بأرخص الأسعار في العالم.

الدولية. يلقي هذا بظلال من الغموض على مسؤوليات المؤسسات الأخرى ذات الصلة بالبرنامج النووي السعودي. على كل حال، قد تساهم المؤسسات التالية في هذا البرنامج بناء على أدوارها الحالية في قطاع الكهرباء:

- وزارة المياه والكهرباء، المسؤولة عن تطوير موارد المياه والكهرباء؛
- هيئة تنظيم الكهرباء والإنتاج المزدوج، الجهة الرقابية المسؤولة عن تنظيم قطاع الكهرباء وتحديد أسعارها، ولكن تحت إشراف حكومي؛
- والشركة السعودية للكهرباء، المملوكة للدولة، المنتج الأكبر للكهرباء في السعودية.

### التدريب والتعليم

لا ترغب السعودية في الاعتماد بشكل كامل في تنفيذ برنامجها النووي على القدرات والخبرات الأجنبية، وإن أدى ذلك إلى تأخير التقدم في هذا البرنامج. يتضح مثل هذا التوجه من التطورات التي حدثت مع "أرامكو السعودية" و"سابك" (الشركة السعودية للصناعات الأساسية). تسعى السعودية إلى بناء برنامج للطاقة النووية مكتف ذاتيا من خلال استثمار موارد معتبرة في تنمية الكوادر الوطنية. كما تلجأ إلى اتفاقات التعاون الفني للاستفادة من خبرات الدول النووية الأخرى.

وفقاً للوكالة الدولية للطاقة الذرية، لا تمتلك السعودية حتى الآن مفاعلاً نووياً بحثياً. مع ذلك، لدى بعض العلماء والمهندسين السعوديين بعض الخبرة بجوانب محددة متعلقة بمحطات الطاقة النووية. على سبيل المثال، قضت جامعة الملك عبدالعزيز أعوام كثيرة تبحث في مواضيع الطاقة النووية، ولديها عدد من المشاريع البحثية في المجال، برمجيات تحاكي عمل محطة الطاقة النووية، دراسة عن تخطيط تحلية المياه بالطاقة النووية، ودراسة عن إدارة النفايات المشعة في السعودية.

أنشأت بعض المؤسسات السعودية برامج تدريبية وأكاديمية في بعض المجالات المتعلقة بالطاقة النووية، خاصة في مجال الأمان النووي. تقدم الجامعات السعودية بعض المساقات الأساسية في الأمان النووي، خاصة فيما يتعلق بالطب النووي، الزراعة، الكهرباء، والمياه.[1] وتمتلك مدينة الملك عبدالله للطاقة النووية والمتجددة "محاكيات معملية laboratory simulators" لمختلف التطبيقات النووية.

تركز استراتيجية السعودية الجديدة على تنمية الكوادر الوطنية في مجال الطاقة النووية. وقد وافقت "اريفا السعودية Areva Saudi Arabia" و"اولكتريه دو فرانس السعودية Electricité de France Saudi Arabia" على تدريب العاملين السعوديين في هذا المجال.

- **مفاعلات "سمارت" الكورية**

سمارت هو أول مفاعل صغير وحداني مرخص في العالم. رخصته في 2012 "مفوضية السلامة والأمن النوويين الكورية Korean Nuclear Safety and Security Commission". تقدر سعته بـ 330 **مروح** (100 **مروك**). وهو مفاعل مرن يمكن تعديله للاستخدامات المتنوعة (توليد الكهرباء والتطبيقات الحرارية مثل تحلية مياه البحر). على سبيل المثال، يستطيع المفاعل الواحد توليد الكهرباء وتحلية المياه لمائة ألف فرد.

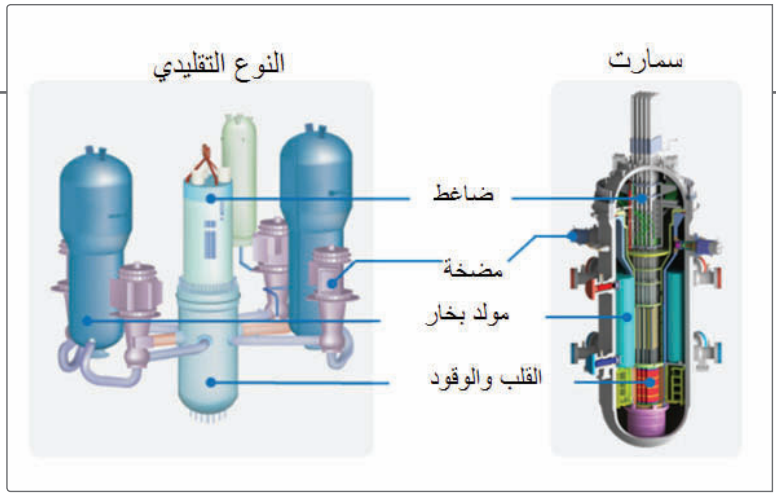
مفاعل سمارت هو مفاعل ماء مضغوط مدمج، وهذا يعني أن المكونات الرئيسة للمفاعل موجودة داخل وعاء ضغط المفاعل (الشكل 337 والشكل 338). يقلص تصميم سمارت من مقدار الأنابيب والوصلات الموجودة خارج وعاء المفاعل، ومن ثم من مخاطر وقوع "حادثة فقدان المبرد loss of coolant (LOC) accident".

(1) عمل الكاتب في جامعة الدمام في الفترة من 2011 – 2015، ويَعرف أن هذه الجامعة الرائدة في المجالات الحديثة والبينية كانت تقدم مساقا تعليميا في "الحماية من الإشعاع" ضمن برامج علوم الأشعة الطبية.

**الشكل 337:**

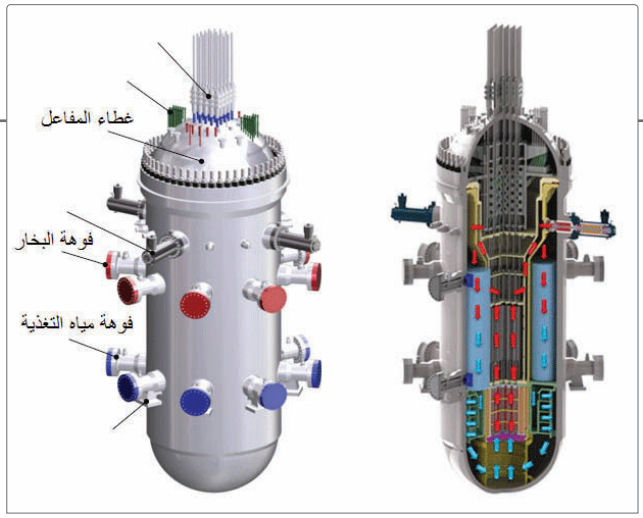
**مقارنة بين مفاعل الماء المضغوط التقليدي**

**ومفاعل سمارت الصغير الوحداني**




يحتوي مفاعل سمارت على ثمانية "مولدات بخار من طراز الانابيب اللولبية helical tube steam generators"، والتي تنتج البخار فائق التسخين داخل وعاء المفاعل.

**الشكل 338: مفاعل "سمارت" عن كثب**



يستغرق إنشاء مفاعل سمارت 36 شهرا، وهو أقل بكثير من الـ60 شهرا وأكثر اللازمة للمفاعلات الكبيرة. يُصَنَّف هذا المفاعل ضمن "مفاعلات الجيل الرابع Generation IV reactors".

### المفاعلات "HTR-PM" الصينية

المفاعلات الصينية من طراز "HTR-PM" هي "مفاعلات وحدانية عالية الحرارة modular high temperature reactors (MHTRs)". اسم المفاعل، "HTR-PM"، مقتبس من العبارة الإنكليزية "high-temperature gas-cooled reactor pebble-bed module"، وتعني "المفاعل عالي الحرارة المبرد بالغاز وحدة مرقد الجمرات". تستخدم هذه المفاعلات غاز الهيليوم في تبريد الوقود النووي، والجرافيت لتهدئة النيوترونات. جرى تصميم هذا النوع من المفاعلات في "معهد تكنولوجيا الطاقة النووية والجديدة Institute of Nuclear and New Energy Technology (INET)"، التابع لجامعة "تسِنجهوَ Tsinghua". مفاعل "" هو النسخة التجارية المطورة من مفاعل "HTR-10" التجريبي، الذي جربته الصين في توليد الكهرباء في 2003. الجدير بالذكر، أن الصين تعمل على تطوير تقنية المفاعلات عالية الحرارة المبردة بالغاز منذ منتصف 70ات19.

يتميز هذا النوع من المفاعلات بتعدد تطبيقاته، وتشمل التوليد المشترك للكهرباء والمياه المحلاة، الاستخدامات الحرارية للحرارة العالية، وإنتاج الهيدروجين.

يوضح االشكل 339 فكرة عمل مفاعل مرقد الجمرات. يمر غاز الهيليوم على قلب المفاعل الساخن وينقل الحرارة المكتسبة إلى الماء الآتي من المكثف (البخار المكثف بعد خروجه من العنفة) فيحوله إلى بخار مضغوط عالي الحرارة ليدير مجدداً العنفة.

يتكون مفاعل "HTR-PM" من الأجزاء الرئيسة التالية (الشكل 340): قلب المفاعل، مولد البخار، ومطوف/دوارة الهيليوم. يحوي قلب المفاعل على جمرات الوقود النووي (الشكل 341)، ويحتوي مولد البخار على 19 أنبوبة نقل حرارة لولبية (الشكل 342). تعمل دوارة الهيليوم على انتقال الهيليوم باستمرار ما بين قلب المفاعل ومولد البخار.

سعة المفاعل الواحد 250 موح، درجة حرارة الهيليوم عند مدخل/مخرج قلب المفاعل 250/750°م، ويخرج البخار من مخرج مولِّدَه بضغط 13,25 مرپا (ميچاپاسكال). يمكن ربط وحدتين بعنفة بخارية واحدة لتكوين محطة للطاقة النووية بسعة 210 مروك.

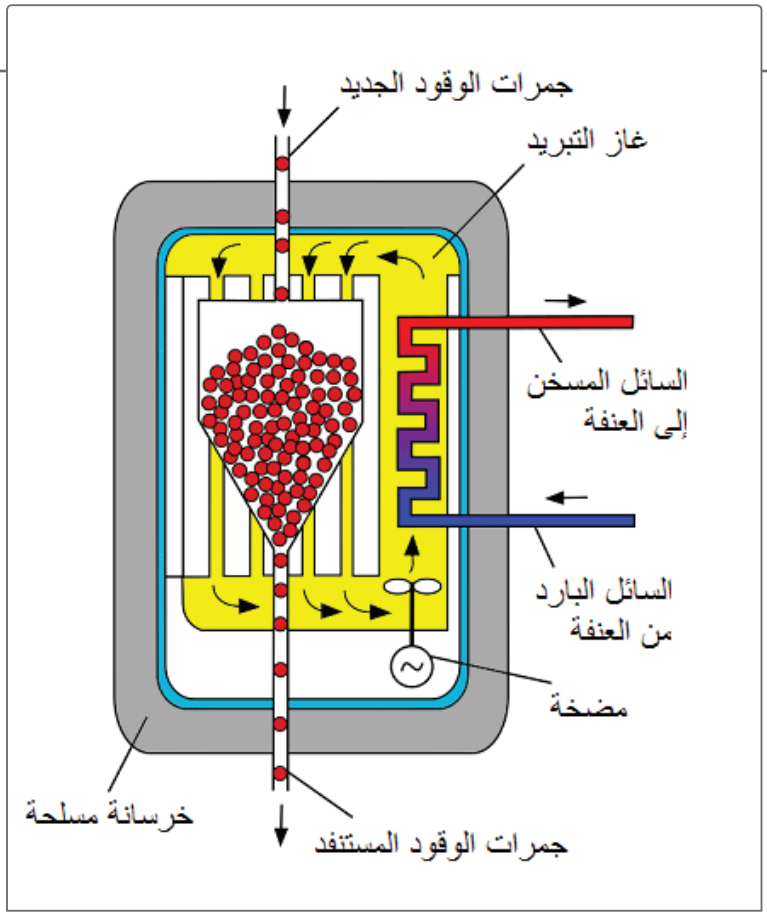
يتضح من المراجعة السابقة لوضع الطاقة النووية في الإمارات، مصر، والسعودية أن هناك فرص مواتية للتعاون المتكامل بين هذه الدول في مجال الطاقة النووية.

يلاحظ القارئ اللماح كثرة القرارات المتغيرة ودراسات الجدوى والسلامة التي أجريت. قد يرجع ذلك إلى الأسباب التالية.

- **أولاً**، تفرض هيئات الرقابة النووية اشتراطات صارمة تتعلق بضمان سلامة المنشآت النووية، الأمر الذي أدى حتى إلى ظهور مصطلحات فنية جديدة تستخدم بكثرة في المؤلفات النووية، مثل مصطلح "الأول من نوعه First-Of-A-Kind (FOAK)".
- **ثانياً**، يرتبط تداول تقنيات الطاقة النووية بشكل وثيق بالعلاقات السياسية المتغيرة. وكما عبر ببلاغة عن ذلك أحد ضيوف برنامج "نيران صديقة" على قناة "عربية Sky News"، فإن "الثابت الوحيد في السياسة هي أنها متغيرة."

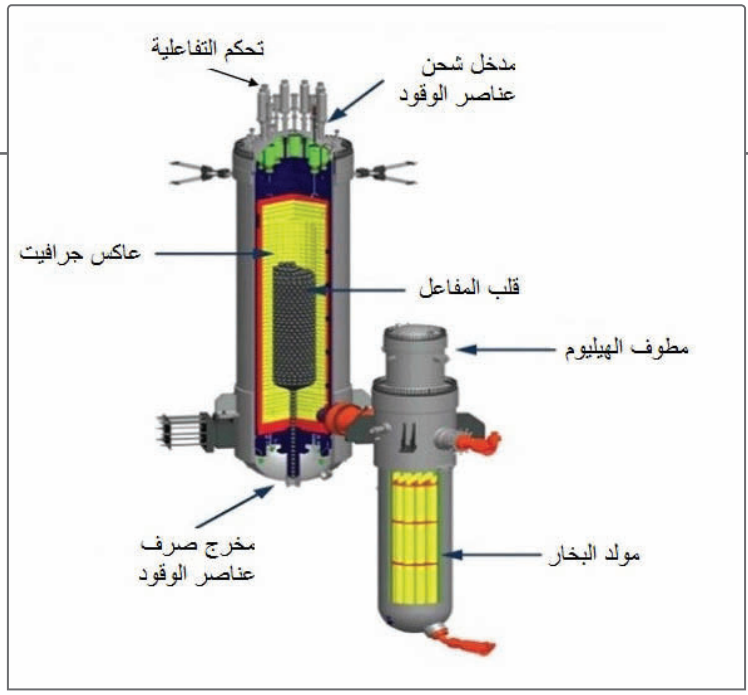
- **ثالثاً**، تُقابَل دائما مساعي الدول العربية لاستغلال الطاقة النووية بمعارضة وتشكيك أو اشتراطات زائدة من قبل الغرب. في الوقت ذاته، تزداد المنافسة على السوق النووي العربي من قبل الشركات الكورية، الصينية، الروسية، واليابانية.

**الشكل 339 : فكرة عمل مفاعل مرقد الجمرات**



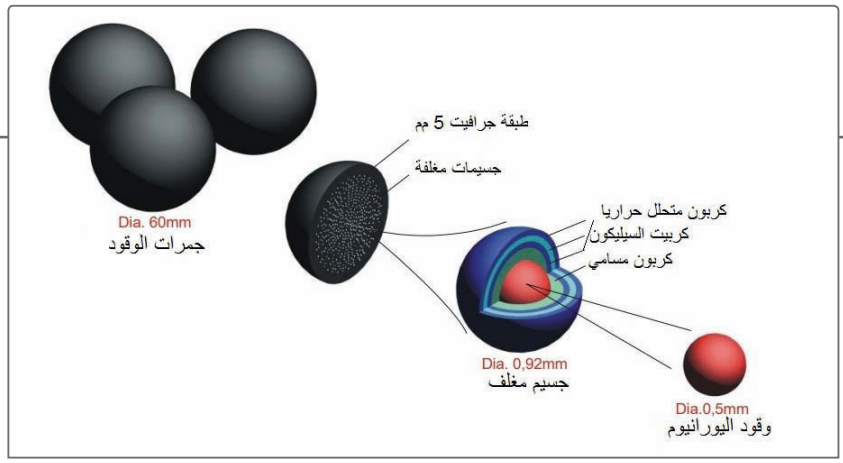
**الشكل 340:**

**المكونات الرئيسة لمفاعل "HTR-PM"**



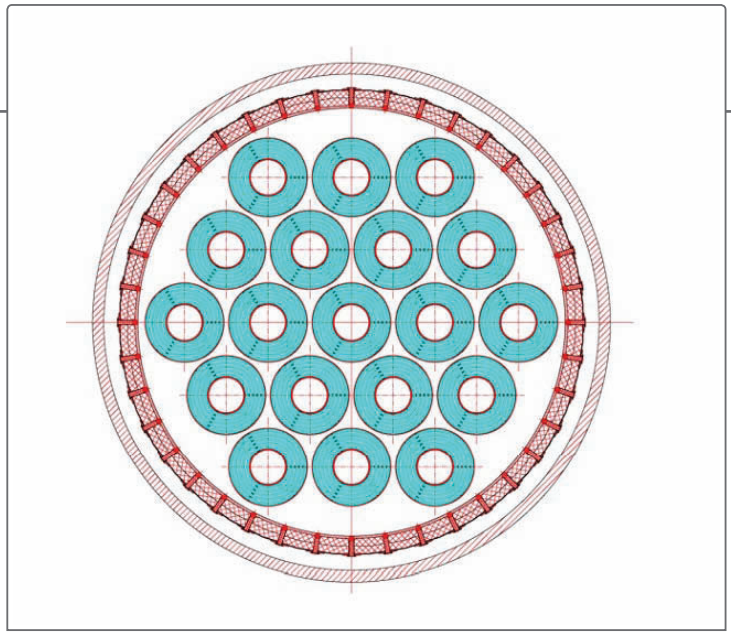

**الشكل 341:**

**عناصر الوقود الكروية في مفاعل "HTR-PM"**



الشكل 342:

قطاع عرضي في مولد البخار بمفاعل "HTR-PM"



# تلخيـص

# تلخيـــص

تناول هذا الكتاب مواضيع كثيرة، صعبة، وجدلية. لذلك، قد يكون من المفيد تلخيص ما ناقشناه هنا. كما أريد أن أوضح بعض الآراء والتأملات حول بعض تلك القضايا.

لا يستند أغلب خوف الناس من الإشعاع على أسس علمية قوية. يتعرض الناس في الأماكن المختلفة لجرعات من الإشعاع الطبيعي جد متباينة. ليس هناك أدلة كافية تشير إلى وجود أضرار صحية نتيجة للتعرض للإشعاع ضمن هذا المدى. يعني هذا أن لا داعي للقلق، كأفراد، من الفحص بأشعة إكس في المطارات أو التعرضات الأخرى ضعيفة المستوى للإشعاع.[1] فالمسافر بالطائرة ينال خلال رحلته الجوية جرعة من الإشعاع أعلى كثيرا مما في المطار.

حاول العلماء تفسير خوف الإنسان التلقائي من الإشعاع بالنظريات التالية.

الإنسان يخاف ما يجهله، وأغلب الناس لا يعرفون سوى القليل عن الطاقة النووية والإشعاع (مما اكتسبوه أثناء تعليمهم المدرسي المتأخر أو الجامعي المبكر). علاوة على ذلك، فإن أغلبنا غير معتاد على الموازنة الدقيقة بين المخاطر والمنافع المتعارضة عند الاختيار بين البدائل المتاحة. هذا ليس نقيصة شخصية، إنما يرجع إلى طبيعة عمل أدمغتنا. أولا، لقد اعتدنا على اتخاذ الكثير من قراراتنا بشكل تلقائي (لاشعوري) اعتمادا على الانطباعات الأولى السريعة، التي تتلون بالخبرات السابقة. يطلق علماء النفس والفلاسفة اسم "التخريط الرفيع thin-slicing" على هذه العملية.[2] ثانياً، إننا ننحاز في تفكيرنا للاعتبارات العاطفية على حساب تلك العقلانية.

(1) هذا لا يعني أن على المجتمع ككل أن يتجاهل تعرض عدد كبير من الأفراد لجرعات ضئيلة من الإشعاع.

(2) تحدث "مالكوم جلادويل Malcolm Gladwell" باستفاضة عن التخريط الرفيع في كتابه الشهير "طرفة عين Blink".

لقد أوضح العلماء الباحثون أن القرارات السريعة وليدة التخريط الرفيع لا تقل جودة في أكثر الأحيان عن القرارات المتأنية المدروسة، وربما تتفوق عليها. تعود أصول التخريط الرفيع إلى أيام حياة الإنسان البدائية وسط البرية، حيث يواجه هذه الإنسان "البري" يوميا مخاطر مصيرية، ولا توجد سوى لحظات معدودات ليقرر حركته التالية... كي لا يصبح، هو ومن معه، وجبة سريعة للنمر الجائع القادم إلى كهف العائلة الجبلي.[1] في العصر التكنولوجي الحديث، لم يعد التخريط الرفيع يكفي لوصول الإنسان إلى القرارات الصائبة، وعندئذ قد تكون العواقب غير محمودة أوحتى كارثية.

أسلوب بناء المخ البشري يعطي الغلبة للانفعال اللاشعوري السريع على المنطق الواعي المتريث: تستقبل اللوزة المخية amygdala، حيث يقبع الانفعال، المثيرات الآتية قبل القشرة المخية cortex، حيث نتدارس الأمور. علاوة على ذلك، عندما يصل الإنسان إلى حكم ما، فإنه يعمل تلقائيا على ترسيخ إيمانه بهذا الحكم، ويتجاهل لا شعوريا كل البراهين التي تدحض حكمه "العاطفي". المثير أن الحكمة الشعبية القديمة تشير إلى مثل هذا التحكم القوي للعاطفة في أحكام الإنسان: "حبيبك يبلع لك الظلط، وعدوك يتمنى لك الغلط."

تؤمن فئة معتبرة من الناس بأن كل ما هو طبيعي طيب، وكل ما هو صناعي خبيث. مصادر الطاقة غير النووية، مثل النفط، الشمس، والرياح، تبدو لهذه الفئة أكثر "طبيعية" من الوقود النووي. مثلهم مثل الذين يعتقدون أن الأعشاب الطبيعية أفضل من الأدوية المصنعة، مع أن الكثير من هذه الأدوية هو في الحقيقة مصنع من تلك الأعشاب أو مكوناتها الفعالة، كما لا توجد أدلة علمية كافية تدعم صحة مثل هذا الاعتقاد.

(1) وفرت العلوم العصبية الحديثة modern neurosciences التفسير البيولوجي لهذه النظريات السيكولوجية، من خلال دراسة تركيب وآلية عمل المخ.

تقبل الناس المخاطر المصاحبة للتكنولوجيا الجديدة مقابل المنافع والرفاهية التي تقدمها لهم هذه التكنولوجيا. لا يرى الكثير من الناس أن الطاقة النووية ضرورية للحفاظ على مستويات المعيشة المرغوبة؛ فالكهرباء يمكن توليدها بوسائل أخرى أكثر ألفة لهم.

ما يجب أن نهتم به هو نفسه ما يتجاهله معظمنا: التعرض المتكرر للإشعاع من الإجراءات الطبية. فهو يعادل في المتوسط نصف الجرعة الكلية التي نتعرض لها سنويا، وأن ثلث أو حتى نصف هذا المقدار غير ضروري أو مبرر. إذا كنت تعيش في منطقة بها نسبة مرتفعة من غاز الرادون، (المشع) فعليك أيضا أن تقيس مستويات الإشعاع في بيتك. غني عن القول، لو كنت تخشى من الإصابة بمرض السرطان، أمتنع عن التدخين. فالتدخين ليس فقط يعرضك للإشعاع، وإنما يساعد الإشعاع في إصابتك بالسرطان.

ماذا عن الطاقة النووية؟ مرة ثانية، ليس من بين أغراض هذا الكتاب الترويج لاستخدام لطاقة النووية أو معارضته، إنما حث القارئ على إجراء التقييم الدقيق والنقدي لمنافع ومخاطر كل مصادر الطاقة: النووية، الأحفورية، الكهرومائية، الشمسية، وغيرها. لقد حاولت أن أقدم للقارئ كل المعلومات التي يحتاجها لمعرفة المزايا والمخاطر الحقيقية من استخدام الطاقة النووية. أما موقفه النهائي منها، فهذا أمر يقرره بنفسه.

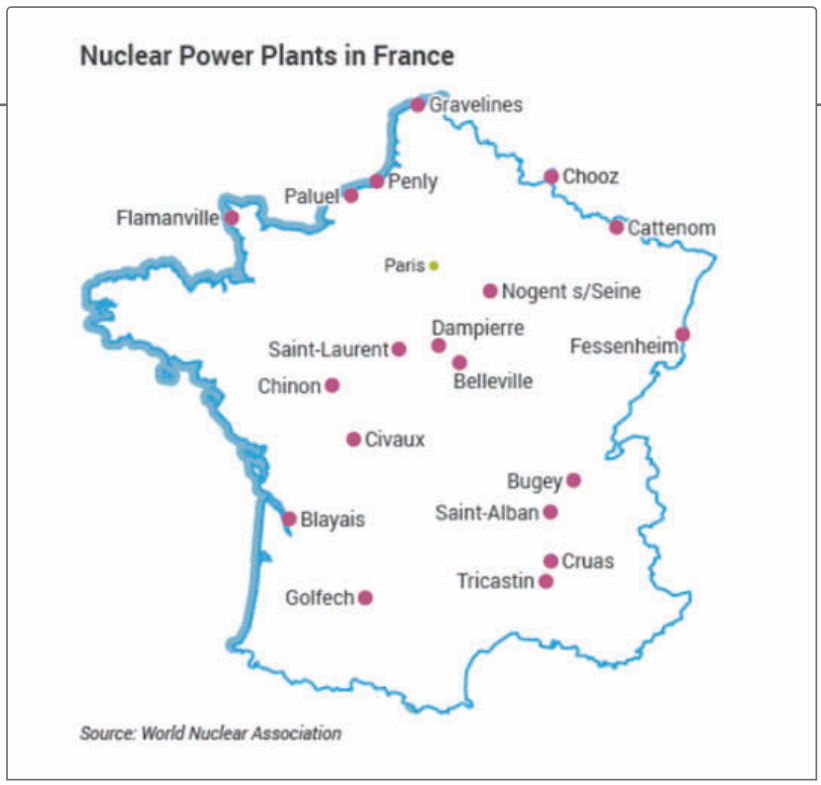
يتوقف قرار كل دولة فيما يتعلق باستخدام الطاقة النووية أو الامتناع عنه على عوامل كثيرة متنوعة، ليست فقط اقتصادية أو تتعلق باعتبارات السلامة والأمان، إنما أيضا سياسية، أمنية، وحتى عسكرية. على سبيل المثال، تستورد اليابان، الإمبراطورية الصناعية الكبرى، كل احتياجاتها تقريبا من الوقود الأحفوري، وهذا يعد تهديدا استراتيجيا لها. ربما يكون ذلك أحد العوامل الرئيسة التي دفعت اليابان إلى الاستعانة بـ "النووي nuke" لمقابلة احتياجاتها المتنامية من الطاقة. تعطل هذا

الاهتمام بشدة بعد حادثة فوكوشيما في 2011: انخفضت مساهمة الكهرباء النووية من نحو 30 % إلى أقل من 3 %.

دفعت الحادثة السابق ذكرها الدولة الألمانية إلى العمل على استبعاد جميع محطاتها النووية (17 محطة) بحلول 2022، والتي كانت تنتج قبل الحادثة 12% من كهرباء ألمانيا.[1] في المقابل، استمرت فرنسا في إنتاج 70 % من قدرتها الكهربائية من محطاتها النووية الكثيرة (الشكل 343).

**الشكل 343:**

**محطات الكهرباء النووية في فرنسا**




(1) وافق البوندستاج Bundestag (البرلمان الألماني) في نهاية يونيو 2011 على القرار بـ 513 مقابل 79 صوتا.

لا ترغب القوى النووية الكبرى، وخاصة الولايات المتحدة، أن تمتلك الدول الأخرى، وخاصة المعادية، قدرات وطنية متقدمة في التكنولوجيا النووية، حتى ولو كانت سلمية. تستخدم الولايات المتحدة وحلفاؤها الغربيون شعار "منع انتشار السلاح النووي" البراق لتحقيق أغراض سياسية لا علاقة لها بالأسلحة النووية. في المقابل، تحاول بعض الدول الناشئة المهدَدة امتلاك التكنولوجيا النووية السلمية، ربما من أجل تطوير قدراتها العسكرية النووية عند الضرورة، وترى في ذلك ضمانة استراتيجية لأمنها القومي.

يدعو بعض المواطنين بحسن نية حكوماتهم إلى الابتعاد عن الطاقة النووية، سلمية كانت أو حربية، لتجنيب بلدانهم متاعب العقوبات الاقتصادية أو حماية مواطنيهم من مخاطر الحوادث النووية. لكنهم ينسون أن ذلك لن يمنع هجمات أعدائهم الحربية، تقليدية كانت أم نووية، ولا يضمن الحماية من حوادث المحطات النووية الأجنبية القريبة. يعلمنا التاريخ مرارا وتكرارا أن القوي المنتصر هو من يحدد على أرض الواقع ما هو "أخلاقي" أو "غير أخلاقي" ومن هو "خير" أو "شرير".

تعد معالجة الوقود النووي المنفق إحدى صور إعادة التدوير المرغوبة بيئيا. لكن الولايات المتحدة تشترط على الدول التي تسعى إلى امتلاك تكنولوجيا الطاقة النووية الأمريكية أن تتنازل عن حقها في معالجة الوقود المنفق، خشية أن تحصل تلك الدول من عمليات المعالجة على ما يكفي من البلوتونيوم لصنع السلاح النووي.

نأتي الآن إلى قضية النفايات النووية. يعتقد الكثير من الخبراء أن التكنولوجيا الحالية تمكننا من التخلص الآمن من هذه النفايات، وأن تعطل حل المشكلة يرجع إلى الخلافات السياسية. تؤتي سياسات الطاقة أُكلها بعد عشرات السنين. هذا يعني أن أغلبنا لن يستفيد شخصيا من القرارات الصعبة التي يتوجب علينا الآن اتخاذها. يصبح السؤال هو إذا ما كان السياسيون ورؤساء شركات الطاقة لديهم الانضباط والشجاعة اللازمين لاتخاذ القرارات الصحيحة.

تقبع صور الحوادث النووية في أذهان الكثيرين منا، خاصة بعد حادثة تشيرنوبيل وفوكوشيما الكبيرتين. عواقب مثل هذه الحوادث هي بالطبع وخيمة، ولكنها لحسن الحظ نادرة. في هذا السياق، علينا أيضاً، كي نكون في أحكامنا منصفين، أن نتذكر الخسائر التي لا تتوقف من عمليات مثل التعدين، النقل، وحرق الفحم، وليس أقلها تلوث الهواء والاحترار العالمي.

يطالب البعض بإزالة الأسلحة النووية من العالم. بالطبع، لا يستطيع أحد أن يجادل في نبل هذا الطلب، لكننا لا نعيش في عالم مثالي. ما يلقى الأفواه الناصحة والآذن الصاغية في العالم الواقعي، حيث يحدد الأقوى من هو الخير أو الشرير، هي الدعوات بأن يحتكر "الأخيار"، أي الأقوياء، وأن يُمنع "الأشرار"، بالطبع أعداء الأقوياء اللدودين، من امتلاك مثل هذا السلاح المدمر.

# المراجع
# والقراءات الأخرى

# المراجع
# والقراءات الأخرى

## • بالعربيـــة


- سامر مخيمر وخالد حجازي (2016)؛ أزمة المياه في المنطقة العربية: الحقائق والبدائل الممكنة (سلسلة عالم المعرفة 209)؛ المجلس الوطني للثقافة والفنون والآداب، الصفاة، الكويت.
- ك جلادكوف (1969)؛ طاقة الذرة؛ دار مير للنشر، موسكو، روسيا، الاتحاد السوفيتي (سابقا).
- هشام الزيات وشريف قنديل (2018)؛ رحلة الماء من المالح إلى العذب، سلسلة عالم البيئة، العدد 21؛ مؤسسة زايد الدولية للبيئة، دبي، الإمارات العربية المتحدة.


## • بالإنكليزيـــة


- A Ansari (2010); *Radiation Threats and Your Safety;* CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- J U Burnham (2001); *Radiation Protection*; Point Lepreau Generating Station, St. Andrews, NB, Canada.
- C Ebinger, J Banks, K Massy, and G Avasarala (2011); *Models for Aspirant Civil Nuclear Energy Nations in the Middle East*; Energy Security Initiative, Brookings Institution, Washington, DC, USA.

- A S Eve (1939); *Rutherford: Being the Life and Letters of the Rt Hon. Lord Rutherford, O.M.*; Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- FANR (2019); *Annual Report 2019*; Federal Authority of Nuclear Regulation; FANR, Abu Dhabi, UAE.
- S Glasstone and P J Dolan (1977); *The Effects of Nuclear Weapons*; US Department of Defense and the Energy Research and Development Administration, Washington, DC, USA.
- B Goldsmith (2011); *Obsessive Genius: The Inner World of Marie Curie*; W. W. Norton & Company, New York, NY, USA.
- C Grupen and M Rodgers (2016); *Radioactivity and Radiation: What They Are, What They Do, and How to Harness Them*; Springer International Publishing, Switzerland.
- R Hantula (2010); *Energy Today: Nuclear Power*; Infobase Publishing, New York, NY, USA.
- M Howarth (1958); *Pioneer Research on the Atom: Rutherford and Soddy in a Glorious Chapter of Science: The Life Story of Frederick Soddy*; New World Publications, London, UK.
- W Hutchinson (1918); *The Doctor in War*; Houghton Mifflin Company, Boston, NY, USA.

- T Henriksen and H D Maillie (2003), *Radiation and Health*; Taylor & Francis, London, UK.
- I Hore-Lacy (2018); *Nuclear Energy in the 21st Century*, 4th Revised Edition; World Nuclear Association, London, UK.
- IAEA (2012); *Lessons Learned from the Response to Radiation Emergencies (1945-2010)*; International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA (2006); *Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Recommendations: Twenty Years of Experience*; International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA (2004); *Radiation, People, and the Environment*, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA (1996); *Potential for Nuclear Desalination as a Source of Low-Cost Potable Water in North Africa*; International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria. (Available on the Web)
- IAEA (1996); *Ten Years after Chernobyl: What Do We Really Know?*; International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria. (Available on the Web)
- W S Ingram (2005); The Chernobyl Nuclear Disaster; Facts On File, New York, NY, USA.

- M Irvine (2011); *Nuclear Power: A Very Short Introduction*; Oxford University Press, Oxford, UK.
- H M Kristensen and M Korda (2019); Tactical nuclear weapons, 2019; *Bulletin of the Atomic Scientists* 75(5): 252-261.
- J A Mahaffey (2012); *Nuclear Power: Fusion*; Facts On File, New York, NY, USA.
- J A Mahaffey (2012); *Nuclear Power: Nuclear Accidents and Disasters*; Facts On File, New York, NY, USA.
- J A Mahaffey (2012); *Nuclear Power: The Future of Nuclear Power*; Facts On File, New York, NY, USA.
- J A Mahaffey (2011); *Nuclear Power: Nuclear Fission Reactors*; Facts On File, New York, NY, USA.
- J A Mahaffey (2011); *Nuclear Power: Radiation*; Facts On File, New York, NY, USA.
- J A Mahaffey (2011); *Nuclear Power: The History of Nuclear Power*; Facts On File, New York, NY, USA.
- R Mason and G Bahgat (2019); *Civil Nuclear Energy in the Middle East: Demand, Parity, and Risk*; The Arab Gulf States Institute in Washington, Washington, DC, USA.
- E E Massey (1963); *Nuclear Weapons Effects*; Defense Research Board, Ottawa, Ontario, Canada.

- M May (2007); What are nuclear weapons for?; *Forum on Physics and Society of the American Physical Society* 36(4). (https://www.aps.org/units/fps/newsletters/2007/october/may.html)
- B M Misra and I Khamis (2014); A review of desalination plants coupled to nuclear power stations, In *Desalination: Water from Water*, J Kucera (Ed.); Scrivener Publishing, Beverly, MA, USA.
- R L Murray (1981); *Understanding Radioactive Waste*; Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA, USA.
- National Research Council (2014); *Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving Safety of U.S. Nuclear Plants*; The National Academies Press, Washington, DC, USA. (https://doi.org/10.17226/18294)
- OECD (2003); *Nuclear Energy Today*; Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris, France.
- K I Pearce (2019); *The Physics of the Chernobyl Accident*; Katwab Limited, Gloucestershire, UK.
- K I Pearce (2018); *Nuclear Emergency Response for Local Authority*: *An Introduction*; Katwab Limited, Gloucestershire, UK.
- B C Reed (2019); *The History and Science of Manhattan Project*, 2nd Edition; Springer-Verlag, Berlin, Germany.

- R Rhodes (1986); *The Making of the Atomic Bomb*; Simon & Schuster, New York, NY, USA.
- M H Risely (1987); Reactivity coefficient in nuclear reactors; *Europhysics News* 18(11/12): 133-137.
- UNEP (2016); *Radiation: Effects and Sources*; United Nations Environment Programme, Nairobi, Nigeria.
- J Siracusa (2008); *Nuclear Weapons*: *A Very Short Introduction*; Oxford University Press, Oxford, UK.
- C Synolakis and U Kânoğlu (2015); The Fukushima accident was preventable, Philosophical Transactions A 373: 20140379. (http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0379)
- J Tabak (2009); *Energy and the Environment*: *Nuclear Energy*; Facts On File, New York, NY, USA.
- E Teller and A Brown (1962); *The Legacy of Hiroshim*a; Doubleday & Company, Garden City, NY, USA.
- T Temple (1979); Controlling Toxics; *EPA Journal* 5(7): 12-16.
- The National Diet of Japan (2012); *The official report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission: Executive Summary*; The National Diet of Japan, Tokyo, Japan. (https://www.nirs.org/fukushima/naiic_report.pdf)

- C Tucker (2019); *How to Drive a Nuclear Reactor*; Springer Nature, Switzerland.
- World Nuclear Association (2020); *Nuclear Power in the United Arab Emirates*; World Nuclear Association, London, UK. (Available on the Web)
- World Nuclear Association (2020); *Nuclear Power Egypt*; World Nuclear Association, London, UK. (Available on the Web)
- World Nuclear Association (2019); *Nuclear Power in Saudi Arabia*; World Nuclear Association, London, UK. (Available on the Web)

# الملاحق

# ملحـــق

## سير حياة بعض الباحثين البارزين في مجال الإشعاع

### هاينرش چايسلر (1814 - 1879)

### نافخ الزجاج الباحث

ولد هاينرش چايسلر وترعرع في بلدة "إنجلشيب Ingelshieb"، وهي قرية صغيرة في منطقة غابات جبلية في وسط ألمانيا المعاصرة. كان أبوه نافخا للزجاج ومصنعا للخرز الزجاجي وبعض الأدوات الزجاجية، مثل مقاييس الضغط والحرارة. وكانت أمه بنتا لنافخ زجاج أيضا. كان هاينرش هو الأخ الأكبر بين 11 طفلا، مات منهم أربعة في سن صغيرة بسبب ظروف المعيشة القاسية.

دفعت ظروف العائلة الفقيرة هاينرش وإخوته للعمل منذ سن الخامسة في المهنة الوحيدة المتاحة لأغلب سكان القرية: نفخ الزجاج وإنشاء الأكواخ. كما دفعت ظروف القرية الصعبة الإخوة چايسلر، واحدا تلو الآخر، إلى ترك الموطن بحثا عن حياة أفضل في مكان آخر، واستمر بعضهم، مثل هاينرش، في العمل بالمهنة نفسها التي شاءتها الأقدار لهم.

## مايكل فاراداي (1791 - 1867)

### العالم العصامي

حياة مايكل فاراداي هي قصة إنسانية، جميلة، غنية بالعبر والدروس المفيدة. بفضل كفاحه وإصراره، استطاع الصبي الفقير أن يصبح واحدا من أعظم العلماء على مر التاريخ، في زمن ومكان كان فيه العلم حكرا على أعضاء الطبقة الثرية.

ولد مايكل فاراداي في 22 سبتمبر 1791 في عاصمة المملكة التي كانت تسمي نفسها بلا تواضع "بريطانيا العظمى". كان واحدا من ثلاثة أبناء لأب يعمل حدادا وأم عملت قبل الزواج خادمة. كان أبوه يتوقف عن العمل كثيرا بسبب اعتلال صحته.

لم يستطع مايكل أن يكمل تعليمه الرسمي؛ فقد اضطر إلى العمل "صبي تسليم errand boy" في محل لبيع وتجليد الكتب وهو في سن الثالثة عشر. بسبب كفاحه وإخلاصه في العمل، نال فاراداى تعاطف صاحب العمل فرقاه بعد نحو عام إلى "متدرب على تجليد الكتب apprentice book binder".

تملك مايكل شغف كبير بالمعرفة. كان يقضي ما توفر له من وقت بعد يوم طويل من العمل المضني في قراءة الكتب التي كان يجلّدها.

شيئا فشيء، أخذ فاراداي يركز على قراءة الكتب العلمية. لم يكتفي بمجرد القراءة وإنما أراد أن يتحقق بنفسه من الأمور التي كان يقرأ عنها، فكان يقتصد ما يستطيع من أجرته القليلة لشراء الكيماويات والأجهزة اللازمة.

أخيرا، بدأ الحظ يبتسم لفاراداي. في أحد الأيام عرض عليه أحد زبائن محل الكتب الذي كان يعمل به تذاكر لمحاضرات "هامفري داڤي Humphrey Davy"

في "المؤسسة الملكية Royal Institution". كان هامفري داڤي واحدا من أشهر العلماء في العالم. لم يفوت فاراداي بالطبع تلك الفرصة، وحضر محاضرات داڤي الأربعة عن أحدث المشاكل في الكيمياء حينئذ: تعريف الحموضة.

انتهت فترة تدريب فاراداي في أكتوبر 1812، بدأ بعدها عمله كمجلِّد كتب book binder في محل آخر. لم يجد فاراداي صاحب عمله الجديد شخصا لطيفا.

شاءت الأقدار أن يعمل فاراداي مع السير هامفري داڤي الذي حضر له محاضراته الأربعة السابق ذكرها. كان داڤي قد أصيب في انفجار حدث اثناء إحدى تجاربه الكيميائية، مما جعله عاجزا عن الكتابة بذراعه مؤقتا، فطلب من فاراداي أن يدون له أوراقه حتى يتعافى من إصابته. بعد ذلك بقليل جرى فصل أحد مساعدي داڤي في المؤسسة الملكية لسوء السلوك. بعث داڤي حينها إلى فاراداي يسأله إذا كان يرغب في العمل لديه كمساعد كيميائي محل الشخص المفصول.

بدأ فاراداي عمله بالمؤسسة الملكية في 21 مارس 1813، وهو في عمر الواحد والعشرين، واستمر يعمل بها حتى وفاته في 25 أغسطس 1867، عن عمر يناهز الـ 75 عاما. ترقى فاراداي سريعا داخل المؤسسة حتى أصبح أستاذ الكيمياء بها في عمر الـ 41. وقد عُرض عليه أن يتولى منصب رئيس المؤسسة الملكية في 1848، أي وعمره 54، ومرة ثانية في 1858، لكنه رفض العرضين.

هنا قد يتوارد إلى أذهاننا التساؤل، هل كان فاراداي سعيدا في بداية عمله بالمؤسسة الملكية؟ ربما لا يستطيع أحد-ولا حتى فاراداي نفسه-أن يجيب هذا التساؤل إجابة بسيطة.

كان راتب "المساعد الكيميائي" يعد جيدا بالنسبة لفاراداي، كما أنه حصل على غرفة في سندرة (علية) المؤسسة ليقيم بها. وبعد سبعة أشهر من عمله في المؤسسة الملكية، ذهب فاراداي مع هارڤي كأمين سر له في جولة أوروبية لمدة 18

شهرا. قابل فاراداي خلال هذه الجولة علماء مشهورين من أمثال "أندريه-ماري أمبير André-Marie Ampère" في باريس و"أليساندرو ڤولتا Alessandro Volta" في ميلانو. لكن، لم تكتمل سعادة فاراداي بهذه الجولة العلمية؛ كان يطلب منه أحيانا أن يعمل كخادم شخصي لزوجة هارڤي، والتي كانت تعامله بتعالي وتعتبره من طبقة اجتماعية أدنى.[1]

على كل حال، كان فاراداي مسيحيا مخلصا طوال حياته. لم يقبل عرضا بأن يدفن في "وستمِنستر أبي Westminster Abby" مع ملوك، ملكات، وكبار علماء بريطانيا، من أمثال إسحاق نيوتن.[2] مات وعمره 76 عاما، تاركا زوجته سارة بمفردها (لم يكن لهما أبناء)، راضيا بمرقد متواضع في "مدافن الباب العالي للندن London Highgate's Cemetery".[3]

(1) للأسف، مازال هناك بعض الأساتذة المصريين يتصرفون بهذا الشكل المجوج مع معاونيهم الأكاديميين، كأن يطلبوا منهم تحضير الشاي والقهوة أو حمل الحقائب والأغراض الشخصية.

(2) لم يمنح فاراداي لقب "فارس" كغيره من كبار العلماء البريطانيين، ومنهم رئيسه في المؤسسة السير هامفري داڤي، ولم يعرف المؤلف السبب في ذلك.

(3) مازال يمكن رؤية قبرهما هناك.

## ويليام هيرشل (1738 - 1822)

### الفلكي الموسيقار

ولِد ويليام هيرشل في "هانوفر Hanover" الألمانية. بدأ ويليام هيرشل حياته، مثل والده "إسحاق Issak" وأخيه "جاكوب Jakob"، موسيقار في الحرس الهانوفري Hanoverian Guards. في ذلك الوقت، كانا تاجا بريطانيا العظمى وهانوفر موحدين على رأس الإنكليزي "جورج الثاني George II". اندلعت حرب السنوات السبع (1756-1763) أثناء خدمة آل هيرشل في الحرس الهانوفري، وهي الحرب التي شملت كل القوى الأوربية الكبرى في ذلك الوقت (فرنسا وحليفاتها النمسا، ساكسونيا Saxony، السويد، وروسيا ضد بريطانيا وحليفتيها هانوفر وبروسيا Prussia).

بعد الغزو الفرنسي لهانوفر، خشي إسحاق هيرشل على ولديه فأرسلهما في نهاية 1757 إلى إنكلترا. لم يكن ويليام قد حصل على "تسريحا" من الحرس الهانوفري، على عكس الحال مع أخوه جاكوب، فصدر في حقه اتهاما بالهروب من الخدمة العسكرية، لكنه حصل على عفو من الملك "جورج الثالث George III" في 1782.

في إنكلترا، بدأ يكسب رزقه من العمل في المجال الموسيقي (ناسخا، مدرسا، عازفا، ثم مؤلفا). بعد ذلك، بدأ في دراسة الرياضيات. ومن الرياضيات تحول اهتمام هيرشل إلى علوم الفلك، التي استحوذت على عقله، وحولت حياته، فيصبح أحد أشهر الفلكيين في زمنه. وبسبب اكتشافه لكوكب أورانوس Uranus (الذي أراد أن يسميه في البداية باسم "جورج George")، منحه الملك جورج الثالث

في 1816 لقب "فارس Sir"، وعينه في منصب "فلكي البلاط Astronomer of the Court". وقد مكنه "المعاش" المصاحب للوظيفة من طي صفحة عمله الموسيقي وتركيز كل اهتمامه صوب السماء.

لم يتزوج ويليام هيرشل إلا وهو في الخمسين من عمره، وأنجب ابنه الوحيد بعد أربع سنوات من الزواج. كذلك لم تتزوج أخته "كارولين Caroline"، التي انتقلت في 1772 إلى إنكلترا، لتعيش معه وتعمل مساعدة له حتى وفاته.

## ماري كوري أو مانيا سكلادوفسكا

## (1867 - 1934)

### العبقرية الحديدية

وُلدَت "مانيا سكلادوفسكا Manya Skłodowska" في 1876 بمدينة وارسو البولندية، الخاضعة حينئذ لسيطرة الإمبراطورية الروسية. تتفوق مانيا في تعليمها المدرسي لكنها لا تستطيع الالتحاق بالجامعة في بولندا.

تقبل مانيا في جامعة السوربون الفرنسية المرموقة في 1891. تنتقل إلى باريس، وتغير اسمها إلى ماري الفرنسي.

ذهبت إلى باريس وعمرها 24سنة. وبعد سنتين في السوربون، حصلت على درجة جامعية في الفيزياء، وكانت الأولى على دفعتها. وبعد سنة أخرى، حصلت على درجة ثانية في الرياضيات، ولكنها جاءت هذه المرة في المرتبة الثانية.

في 1895، تتزوج ماري من بيير كوري، وتصبح مدام كوري.

في يونيو 1903، تدافع ماري بنجاح عن رسالتها تحت عنوان "بحث عن المواد المشعة". بعد أن عرضت ماري نتائج أبحاثها، عبرت لجنة المتحنين عن شديد إعجابها قائلة إنه أكبر اسهام علمي يحدث على الإطلاق خلال رسالة دكتوراة. وبعد ذلك بأقل من ستة شهور، يتلقى آل كوري إخطاراً رسمياً بفوزهما بجائزة نوبل في الفيزياء. منحت الجائزة للثلاثي العجيب مكتملاً، هنري-ماري-بيير، تقديرا لاكتشافهم النشاط الإشعاعي. وفي 10 ديسمبر 1903، لم يحضر حفل تسليم الجائزة سوى هنري بيكريل، كعادته متأنقاً.

في 1911، تحصل ماري ثانية على جائزة نوبل، هذه المرة في الكيمياء، تقديرا لجهودها التي أدت إلى اكتشاف عنصري البولونيوم والراديوم المشعين، وفصل وتنقية الراديوم.

في 1908، تعين ماري كأستاذ في جامعة السوربون، وهناك تعزل فلز الراديوم النقي. وهو فلز عجيب يتوهج في الظلام بلون أزرق ساطع.

**كانت ماري كوري امرأة وعالمة فريدة من نوعها:**

- أول امرأة تحصل على درجة الدكتوراة في فرنسا؛
- المرأة الوحيدة التي تحصل على جائزتين من جوائز نوبل؛
- الشخص الوحيد الذي يحصل على جائزتين من جوائز نوبل في فرعين من العلوم: الفيزياء والكيمياء.

ماتت ماري في 1934 مريضة بسرطان الدم leukemia.

## إرنست رذرفورد (1871 - 1937)

### الموهوب المحظوظ

ولد إرنست رذرفورد في 30 أغسطس 1871 في قرية "برايتوتر Brightwater" (وتعني المياه الساطعة) في الجزيرة الجنوبية لنيوزيلندا. كان والده مزارعاً من أسكوتلندا، وأمه مدرسة من إنكلترا. كان إرنست الأخ الرابع بين 12 طفلاً. كان شغوفا بالعلم منذ صغره. كما كان موهوباً في الرياضة، وخاصة الرجبي rugby.

حصل رذرفورد في 1895 على درجة البكالوريوس في الكيمياء والجيولوجيا من "كلية كانتربري Canterbury College" (جامعة كانتربري حاليا). عمل لفترة وجيزة مدرسا قبل ان يحصل على منحة دراسية ويذهب للدراسة في جامعة كامبردج University of Cambridge في معمل "جيه جيه ثومسون J.J. Thomson". كان رذرفورد قد اخترع مستقبلا لموجات الراديو وهو في نيوزيلاندا.

وصل رذرفورد كامبردج في 1895، وعمره 24 عاما، وظل بها حتى 1898. كان ثومسون معجبا جدا بشغل رذرفورد، وقد رشحه لوظيفة أستاذ في الفيزياء بـ "جامعة مكجيل McGill University" الكندية.

وصل إلى مكجيل 1898، وظل يعمل بها تسع سنوات. يحصل رذرفورد على جائزة نوبل في الكيمياء لسنة 1908 عن أبحاثه في تحلل العناصر وكيمياء المواد المشعة.

كان رذرفورد موهوباً ومجداً، لكنه كان أيضاً محظوظاً. وقد عبر عن ذلك

أحد الكتاب على النحو التالي: "بدى وكأن كل ما كان عليه أن يفعله هو أن يفتح باب معمله ليجد اكتشافا جديدا يخبطه في وجهه."

في 1907، يعود إلى المملكة المتحدة ليشغل كرسي الفيزياء في جامعة مانشستر University of Manchester. يمنح لقب "فارس Sir" في 1914. بعد 24 سنة من وصوله إنكلترا أول مرة، يحل رذرفورد محل أستاذه المتقاعد كمدير لـ "معمل كافندش Cavendish Laboratory" المرموق في جامعة كامبردج.

# نبـــذة عـــن
# الكاتب

## د. هشـام الزيـات

### الكاتـب

- يعمل حالياً بجامعة الإسكندرية (مصر)، وعَمِلَ سابقاً بجامعة الدَّمام (السُّعودية)؛
- زميل "برنامج هامفري Humphrey Fellowship Program" (الولايات المتحدة) و"سمنار سالزبورج العالمي Salzburg Global Seminar" (النمسا)؛
- تتركَّز اهتماماته الأكاديمية في المجالات التالية: الإدارة البيئية؛ الصِّحة والسَّلامة البيئية؛ تبسيط العلوم والتكنولوجيا؛ الإعلام التقني؛ والتصميم المُتمركِز حول الإنسان؛
- تمتَّع بالتعلُّم والتدرُّب واكتساب الخبرات المهنية والحياتية في بلدان—ومن ثقافات—متعدِّدة: مصر، إيطاليا، ألمانيا الشرقية سابقاً، تشيكوسلوفاكيا سابقاً، الولايات المتحدة، النمسا، فرنسا، أستراليا، النرويج، سويسرا، كندا، السُّعودية، إسبانيا، واليونان.

# سلسلة كتاب

## عالم البيئة

# سلسلة
# كتاب عالم البيئة

سلسلة عالم البيئة هي سلسلة كتب علمية ثقافية ربع سنوية تصدر عن مؤسسة زايد الدولية للبيئة – دبي – دولة الإمارات العربية المتحدة.

**طبيعة السلسلة:** كتابة المتخصصين لغير المتخصصين

## الأهـــداف:

تهدف هذه السلسلة إلى توفير المعلومة العلمية حول قضايا البيئة التى تهم المجتمع بأسلوب بسيط وسلس يساهم فى نشر الثقافة والتوعية البيئية ويساعد فى إتخاذ القرارات التى تتسق مع أسس التنمية المستدامة.

## الفئات المستهدفة:

تستهدف السلسلة متخذ القرار لمساعدته على اتخاذ القرارات الصديقة للبيئة والإعلامي والمعلم والمثقف العربي لمساعدتهم على نشر الوعي البيئي ومتابعة ما يهم الجمهور من ممارسات تؤثر سلبا أو إيجابا على البيئة. كما تستهدف الطلاب والباحثين الذين يودون الحصول على معلومات ومؤشرات.

## إدارة السلسلة:

رئيس التحرير/ المدير العام

**الأستاذ الدكتور/ محمد أحمد بن فهد**

رئيس اللجنة العليا لمؤسسة زايد الدولية للبيئة

مدير التحرير

**المهندس/ حمدان خليفة الشاعر – عضو اللجنة العليا**

المحرر

**د. عيسى محمد عبد اللطيف**

كبير المستشارين بمؤسسة زايد الدولية للبيئة

## قواعد النشر: (منشورة في آخر صفحات كل كتاب)

**ترحب سلسلة عالم البيئة بإقتراحات التأليف أو الترجمة فى المجالات المحددة أدناه وفقا للشروط التالية:**

1. تكون الأولوية للقضايا المُلحّة بالمنطقة العربية والأفكار القابلة للتطبيق
2. أن يكون الحجم فى حدود 200 – 300 صفحة من القطع المتوسط.
3. ألا يكون قد تم نشر الكتاب كاملاً أو فى أجزاء من قبل.
4. ألا يكون هناك نسْخ لنصوص من كتاب أو بحث آخر بإستثناء ما يشار إليه كإقتباس مع تسجيل كل المراجع التى استخدمت فى التأليف.
5. فى حالة الترجمة يُشار إلى صفحات الكتاب الأصلى المقابلة للنص المترجم وترفق نسخة باللغة الأصلية للكتاب المُترجم مع موافقة المؤلف.
6. الهيئة الإستشارية غير ملزمة بقبول كل الإقتراحات التى تقدم لها.
7. يكون نشر الكتاب المعين حسب الأولويات التى تحددها الهيئة الإستشارية وهيئة التحرير.
8. لا تُرد المسودات والكتب الأجنبية فى حالة الإعتذار عن نشرها.
9. أن ترسل أولا مذكرة بالفكرة العامة للكتاب وموضوعاته وأهميته على الإستمارة المرفقة لإقتراح كتاب للنشر مصحوبة بالسيرة الذاتية للمؤلف.
10. يرسل الكتاب إلى محكّمين متخصصين فى موضوعه لإبداء الرأى حول صلاحيته للنشر دون معرفتهم بإسم المؤلف. ويستحق المحكم مبلغ 3000 درهم اماراتي أو ما يعادلها تحول إلى حسابه بعد استلام كل التقارير واصدار الكتاب .

11. فى حالة إجازته من المحكمين والموافقة عليه من هيئة التحرير، يستحق المؤلف مبلغ 15,000 درهم اماراتى أو ما يعادلها يتم تحويلها للمؤلف بعد إكمال كل التعديلات المطلوبة وارسال نسخة عبر البريد الإلكتروني وبعد إصدار الكتاب

12. فى حالة قبول الترجمة والتعاقد يستحق المترجم مبلغ 10,000 درهم اماراتى أو ما يعادلها يتم تحويلها له بعد إكمال كل التعديلات المطلوبة وارسال نسخة عبر البريد الإلكتروني وبعد إصدار الكتاب

13. المترجم مسؤول عن حق الملكية الفكرية بالنسبة للمؤلف.

14. مؤسسة زايد الدولية للبيئة غير مسؤولة عن محتويات الكتاب والفكرة المنشورة تعبر عن رأى الكاتب.

15. لا يحق للمؤلف أو المترجم إعادة الطبع إلا بموافقة مكتوبة من مؤسسة زايد الدولية للبيئة التى تحتفظ بحقوق النشر.

16. أن يقوم المؤلف أو المترجم بتعبئة وتوقيع إستمارة المشاركة المرفقة أدناه

## مجالات السلسلة:

تدور مجالات السلسلة فى فلك الإطار الشامل لصون البيئة والموارد الطبيعية وفقا لأسس التنمية المستدامة التى تحقق التوازن بين التنمية الإقتصادية والتنمية الإجتماعية وحماية البيئة.

## إستمارة إقتراح كتاب للنشر

تهدى جائزة زايد الدولية للبيئة تحياتها لكل العلماء والخبراء والباحثين العرب فى مجالات البيئة والتنمية المختلفة وتدعوهم للمشاركة فى هذه السلسلة بالتأليف والترجمة مساهمة منهم فى توجيه التنمية فى بلادنا العربية نحو الإستدامة وحفظ حقوق الأجيال القادمة فى بيئة سليمة معافاة.

ولمن يرغب في المشاركة الرجاء الاطلاع على قواعد النشر أعلاه وتعبئة القسيمة أدناه وإرسالها بالبريد الإلكترونى إلى:


**هيئة تحرير سلسلة عالم البيئة**

مؤسسة زايد الدولية للبيئة

ص.ب. 28399 دبى – الإمارات العربية المتحدة

هاتف: 3326666 04 (971+)

البريد الإلكترونى: cta@zayedprize.org.ae


الإســـــــــم: .....

الدرجة العلمية: .....

الوظيفـــــــــة: .....

العنـــــــــوان: .....

.....

.....

الهاتف: ..... الفاكس: .....

البريد الإلكترونى: .....

**عنوان الكتـــاب:** .....

**نبذة مختصرة عن أهمية الكتاب ومحتواه:**

.....

.....

.....

.....

.....

## إقـــــرار:

- **أقر أنا الموقع أدناه** بأني قد اطلعت على قواعد النشر فى سلسلة عالم البيئة وأوافق على حفظ حقوق النشر وإعادة الطبع لمؤسسة زايد الدولية للبيئة حسب الشروط الموضحة فى آخر كل كتاب من السلسلة.

**التوقيع:** .....

**التاريخ:** .....

**الرجاء التكرم بإرفاق:**

- السيرة الذاتية للمؤلف،
- وقائمة المحتويات (أبواب وفصول)