التلوث الإشعاعي

Radioactive Pollution

مقدمة:

يُعد التلوث الإشعاعي من أخطر ملوثات العصر الحديث، وينجم عن تسرب المواد المشعة الصلبة أو السائلة أو الغازية من أوعية تخزينها نتيجة ثقوب أو تشققات أو انفجارات. تندمج هذه المواد بعد تسربها مع عناصر البيئة المتمثلة في الماء والتربة والهواء، ثم تنتقل إلى الإنسان عبر سلاسل غذائية معقدة.

يهتم علم البيئة الإشعاعية (Radioecology) بدراسة سلوك ومصير العناصر المشعة المحررة في البيئة منذ لحظة انبعاثها، مروراً بتحديد مسارات نقلها عبر الهواء والماء والتربة والكائنات الحية، وصولاً إلى تقدير الجرعات التي يتلقاها الإنسان.

وقد تزايد في السنوات الأخيرة انتشار المواد المشعة في الغلاف الجوي بشكل كبير، مما جعل التلوث الإشعاعي يشكل خطراً حقيقياً على الصحة العامة على المستوى المحلي والعالمي. من أبرز الأمثلة كارثة مفاعل تشرنوبيل عام 1986 التي أدت إلى تلوث مليوني هكتار من الأراضي الزراعية في روسيا وبيلاروسيا وأوكرانيا بتراكيز إشعاعية تراوحت بين 5 و80 كوري لكل كيلومتر مربع، مما أجبر السلطات على إخراج هذه الأراضي من الإنتاج الزراعي. كما لا يمكن نسيان القصف الذري لمدينتي هيروشيما وناغازاكي في آب عام 1945، حيث تجلت التأثيرات المدمرة للإشعاع على البشر بشكل لم يسبق له مثيل. ومن اللافت أن كوارث الطاقة النووية لا تعترف بالحدود، فقد انتشرت السحابة المشعة الناتجة عن تشرنوبيل فوق أوروبا بأكملها، ملوثة التربة والمحاصيل الزراعية في دول بعيدة عن موقع الانفجار.

الأساسيات الذرية والنظائر المشعة:

لفهم التلوث الإشـعاعي لا بد من العودة إلى تركيب الذرة. تتألف الذرة من نواة صـغيرة تحوي بروتونات موجبة الشـحنة ونيوترونات متعادلة، تدور حولها إلكترونات سـالبة الشـحنة. لكل ذرة عدد كتلي يعبر عن مجموع عدد البروتونات والنيوترونات، وعدد ذري يعبر عن عدد البروتونات فقط وهو الذي يحدد هوية العنصـــر الكيميائي. وتســـمى الذرات التي تمتلك العدد الذري نفســـه ولكنها تختلف في عدد النيوترونات **بنظائر العنصر**. فمثلاً للأوكسـجين (العدد الذري: 8) ثلاثة نظائر هي: O^{18}, O^{17}, O^{16}. وبصـورة عامة يوجد لكل عنصـــر عدد من النظائر قد تصـــل أحياناً إلى خمســـين نظير للعنصـــر الواحد. تحتوي بعض النظائر على نوى غير مستقرة، فتتحلل تلقائياً بفعل النشـاط الإشـعاعي، وتطلق طاقة على شـكل جسـيمات ألفا أو بيتا أو أشعة غاما. ويستمر هذا الانبعاث حتى تتحول جميع النوى غير المستقرة إلى نظائر مستقرة.

وحدات قياس التلوث الإشعاعي:

لتقييم التلوث الإشعاعي والتعرض البشري، وضع العلماء عدة وحدات قياس محددة:

- **البيكريل (Bq)** هو وحدة النشاط الإشعاعي ويعبر عن تفكك واحد في الثانية.
- **الغراي (Gy)** فهو وحدة الجرعة الممتصة، ويعبر عن الطاقة الممتصة لكل كيلوغرام من المادة، حيث أن 1 Gy يساوي 1 جول لكل كيلوغرام.
- **السيفرت (Sv)** هو وحدة الجرعة المكافئة التي تأخذ في الاعتبار التأثير البيولوجي المتباين لأنواع الإشعاع المختلفة.
- بالإضافة إلى وحدات قديمة التي لا توال مستخدمة في بعض المراجع العلمية القديمة: مثل **الراد** ($1\ rad = 0.01\ Gy$) و**الكوري** ($1\ Ci = 3.7\times10^{10}\ Bq$).

عمر النصف وأهميته البيئية:

عمر النصف هو الخاصية المميزة لكل نظير مشع، و**يعرف بأنه** الزمن اللازم لتحول نصف كمية أنوية عنصر مشع إلى أنوية عنصر آخر. وهو ثابت لا يتغير بتغير أي ظروف فيزيائية أو كيميائية.

ويمكننا استنتاج نصف العمر T من قانون التفكك الإشعاعي:

$$N = No * e^{-\lambda t}$$

حيث أن: No= عدد الأنوية الأصلي عند بدء زمن الملاحظة $t = 0$.

N= عدد الأنوية المتبقي (غير المتفكك إشعاعيا) بعد فترة زمنية t.

λ= ثابت التفكك الإشعاعي النوعي وهو ثابت من أجل كل عنصر.

ومن السهل أن نجد T من العلاقة: $T = \frac{0.693}{\lambda}$ (نصف العمر).

وبعد زمن (nT) تنخفض الفعالية الإشعاعية إلى $(1/2)^n$.

تتباين أعمار النصف تبايناً هائلاً بين العناصر المشعة. من المهم من الناحية البيئية أن ندرك أن النظائر شديدة القصر في العمر (ثوان إلى أيام) تتفكك بسرعة ولا تسبب تلوثاً طويل الأمد، والنظائر طويلة العمر جداً (أكثر من ألف سنة) تكون فعاليتها الإشعاعية منخفضة نسبياً، ولكن أخطر النظائر بيئياً هي تلك المتوسطة العمر مثل السيزيوم-137 والسترونتيوم-90، فهي تدوم فترة كافية لتنتشر في البيئة وتصل إلى البشر عبر السلاسل الغذائية، وفي الوقت نفسه تمتلك نشاطاً إشعاعياً كبيراً يسبب أضراراً صحية جسيمة.

جدول (1): يوضح عمر النصف لبعض العناصر المشعة ومصدرها:

العنصر المشع	المصدر	عمر النصف	الخاصية / الملاحظة
الرادون-222(^{222}Rn)	الهواء (من اضمحلال الراديوم)	3.82 أيام	يتفكك بسرعة، لا يسبب تلوثاً طويل الأمد
البريليوم-7(^{7}Be)	الغلاف الجوي العلوي (من الأشعة الكونية)	53.2 يوماً (أقل من شهرين)	يتكون في الغلاف الجوي العلوي
الهيدروجين-3 (تريتيوم)	الغلاف الجوي (من الأشعة الكونية)	12.3 سنة	يدوم فترة كافية للانتشار
السيزيوم-137(^{137}Cs)	البيئة، التربة، الماء (منتج انشطاري صناعي)	30 سنة	الأخطر بيئياً - نشاط إشعاعي كبير، ينتشر عبر السلاسل الغذائية
السترونتيوم-90(^{90}Sr)	البيئة، التربة، الماء (منتج انشطاري صناعي)	29~ سنة	الأخطر بيئياً - يشبه الكالسيوم، يتركز في العظام
الراديوم-226(^{226}Ra)	مياه الينابيع والتربة (من اضمحلال اليورانيوم)	1600 سنة	نشاط إشعاعي ملحوظ
الكربون-14(^{14}C)	الهواء (من الأشعة الكونية)	5730 سنة	موجود طبيعياً في دورة الكربون
البلوتونيوم-239(^{239}Pu)	النفايات النووية (منتج صناعي)	24000 سنة	خطير بسبب طول عمره وسميته الكيميائية
البوتاسيوم-40(^{40}K)	مياه البحار والمحيطات (طبيعي)	1.25 مليار سنة	فعالية إشعاعية منخفضة نسبياً (بطء التفكك)
اليورانيوم-238(^{238}U)	مياه الينابيع والتربة (طبيعي)	4.47 مليار سنة	فعالية إشعاعية منخفضة، لكنه مصدر للنظائر الوليدة
الثوريوم-232(^{232}Th)	مياه الينابيع والتربة (طبيعي)	14 مليار سنة	أطول عمر نصف، أقل نشاطاً إشعاعياً

مصادر الإشعاع:

1. المصادر الطبيعية:

تشكل الإشعاعات الطبيعية حوالي 68% من مجموع الإشعاعات التي يتعرض لها الإنسان (مع ملاحظة أن النسبة المئوية قد تختلف قليلاً باختلاف المصادر المرجعية)، وتنقسم إلى ثلاثة مصادر رئيسية:

أ. **الأشعة الكونية**: وهي بروتونات عالية الطاقة وجسيمات ألفا تنبعث من الشمس والمجرة وتصل الغلاف الجوي للأرض، وتتراوح طاقتها بين 1 و10 آلاف ميغا إلكترون فولت. تزداد كمية هذه الأشعة مع الارتفاع عن سطح البحر لانخفاض سمك الغلاف الجوي الذي يقوم بدور الدرع الواقي، كما تتأثر بخط العرض بسبب انحراف الحقل المغناطيسي للأرض للأشعة، فالأحياء عند ارتفاع 1.5 كيلومتر في العروض العليا تتلقى ضعف الجرعة مقارنة بسكان المنطقة الاستوائية عند مستوى سطح البحر. تتفاعل الأشعة الكونية مع غازات الغلاف الجوي لتنتج نويدات مشعة مثل التريتيوم والكربون-14 والبريليوم-7. يتكون الكربون-14 من النتروجين الجوي بفعل النيوترونات الكونية، ثم يتأكسد إلى ثاني أكسيد الكربون ويدخل في دورة الكربون البيوجيوكيميائية، فيمتصه النبات بالبناء الضوئي ويصل إلى المحيطات بالامتصاص.

ب. **الأشعة الأرضية:** الناتجة عن ثلاثة عناصر مشعة رئيسية في القشرة الأرضية: البوتاسيوم-40 (تركيزه حوالي 3 ppm)، والثوريوم-232 (10-15 ppm في صخور الغرانيت)، واليورانيوم بنظائره المختلفة حيث يشكل اليورانيوم-238 حوالي 99.27% واليورانيوم-235 نحو 0.72% واليورانيوم-234 نحو 0.0056%. تضاف إليها نظائر أخرى كالراديوم-226 والرصاص-210. قدرت لجنة الأمم المتحدة العلمية لدراسة آثار الإشعاع الذري أن متوسط مكافئ الجرعة الفعال السنوي من الإشعاع الأرضي يبلغ 0.35 ميلي سيفرت. توجد في العالم مناطق معروفة بمستويات إشعاعية مرتفعة، مثل منطقة ماسيف سنترال في فرنسا، ومنطقة بوكوس دي كالداس في البرازيل حيث تصل الجرعة السنوية إلى 250 ميلي سيفرت، أي 800 ضعف المعدل العالمي.

ج. **غاز الرادون:** وهو المصدر الطبيعي الأهم من حيث نسبة المساهمة في الجرعة البشرية وهو غاز مشع عديم اللون والرائحة ينشأ من اضمحلال الراديوم في سلاسل اليورانيوم والثوريوم. ينطلق الرادون من التربة والصخور المثقبة ويمر عبر تيارات الهواء والماء إلى الغلاف الجوي السفلي. يشكل الرادون ومنتجاته نحو 37% من مجموع الإشعاعات الطبيعية والصناعية التي يتلقاها الإنسان. يختلف تركيز الرادون في المساكن تبعاً لنوع التربة ومواد البناء، فالغرانيت وجبس الفوسفات المستعمل في بعض مواد البناء غنيان باليورانيوم والراديوم. كما أن سوء التهوية يزيد من تراكم الرادون، ولهذا تسجل بلدان الشمال الأوروبي مثل السويد تراكيز عالية خاصة في فصل الشتاء. وضعت هيئة الحماية من الإشعاع في بريطانيا حداً أقصى للتركيز المسموح به هو 200 بيكريل لكل متر مكعب، وعند تجاوزه يوصى باتخاذ تدابير علاجية كتحسين التهوية واستخدام المراوح وأجهزة الترسيب الإلكترونية.

2. المصادر الصناعية (البشرية المنشأ):

تشكل المصادر الصناعية الناتجة عن النشاط البشري النسبة المتبقية من الإشعاعات، وتنقسم إلى فعاليات مدنية وعسكرية.

تشمل الفعاليات المدنية: إنتاج الطاقة الكهربائية من المفاعلات النووية وما يرافقها من معالجة للوقود النووي، مما ينتج نفايات تحتوي على نظائر خطيرة كالسيزيوم-137 والبلوتونيوم-239. كما تشمل الاستخدامات الطبية الواسعة، فالأشعة السينية تستخدم في التشخيص، حيث تعطي صورة شعاعية واحدة جرعة فعالة مكافئة تبلغ نحو 20 ميكروسيفرت، كما تستخدم النويدات المشعة مثل التكنيشيوم-99 لمسح العظام والدماغ. ويقدر المعدل العالمي للجرعة الطبية التشخيصية بنحو 0.4 ميلي سيفرت للشخص سنوياً. وتستخدم الأشعة أيضاً في علاج الأورام الخبيثة بتعريض الأنسجة لجرعات عالية بهدف قتل الخلايا السرطانية.

أما الفعاليات العسكرية: فتتمثل في التجارب النووية. فمنذ أول تجربة أجرتها الولايات المتحدة عام 1945 في صحراء نيومكسيكو، أجرت خمس دول (أمريكا وروسيا وبريطانيا وفرنسا والصين) نحو 423 انفجاراً جوياً وحوالي 1900 تجربة إجمالاً. تسببت هذه التجارب في ترسبات إشعاعية عابرة للقارات وتسمم للسكان والسلاسل الغذائية. ومنذ عام 1974 تجري فرنسا تجاربها تحت الأرض، وكانت آخر تجربة صينية أرضية عام 1980. كما تشمل المصادر العسكرية الحوادث النووية، وأبرزها حادث تشرنوبيل عام 1986 الذي أعلن وزير الدفاع الروسي عام 1994 أنه أودى بحياة 6000 شخص، وانبعثت منه نظائر السيزيوم-137 واليود-131 والبلوتونيوم-239.

أنواع الإشعاعات:

تصدر المواد المشعة إشعاعات متنوعة عند اضمحلال نوى الذرات غير المستقرة، وتستمر في الانبعاث حتى تتفكك جميع النوى.

1. أول هذه الإشعاعات وأثقلها هي أشعة ألفا(α) : وهي جسيمات تتكون من بروتونين ونيوترونين (أي نواة الهليوم) وتحمل شحنة موجبة +2 وكتلة تساوي 4 وحدات كتل ذرية. تنتقل بسرعة منخفضة تتراوح بين 12,000 و21,000 كيلومتر في الثانية (5-10% من سرعة الضوء) وقدرتها على الاختراق ضعيفة جداً، حيث توقفها ورقة عادية ولا تستطيع اختراق جلد الإنسان. لكنها خطيرة جداً إذا دخلت الجسم عن طريق البلع أو الاستنشاق، لأنها تمتلك قدرة تأين عالية جداً نتيجة شحنتها وحجمها، وتسبب أضراراً جسيمة للخلايا التي تلامسها.

2. أشعة بيتا (β) : فهي إلكترونات سريعة تنبعث من النواة عند تحول نيوترون إلى بروتون، وتحمل شحنة سالبة -1 وكتلة صغيرة جداً. تبلغ سرعتها نحو 40% من سرعة الضوء، وتستطيع اختراق الأنسجة إلى عمق يصل إلى حوالي 2 سنتيمتر (حسب الطاقة)، وتوقفها صفائح ألمنيوم بسماكة 1 مليمتر. قدرتها على التأين أقل من ألفا ولكنها لا تزال كافية لإحداث ضرر للخلايا الحية. عند تحلل بيتا يزداد العدد الذري للنواة بمقدار واحد بينما يبقى العدد الكتلي دون تغيير.

3. أشعة غاما (γ) : فهي أشعة كهرومغناطيسية ذات أطوال موجية قصيرة جداً، متعادلة الشحنة وتنتقل بسرعة الضوء (300 ألف كيلومتر في الثانية). تمتلك طاقة عالية جداً وقدرة هائلة على النفاذ، حيث لا توقفها إلا طبقات سميكة من الرصاص أو الخرسانة. خلال عبورها الأنسجة الحية، تسبب تأيناً غير مباشر عبر قذف إلكترونات مدارية، مما ينتج جذوراً حرة. لا يؤدي انبعاث غاما إلى تغير في العدد الذري أو الكتلي، وغالباً ما يرافق أنواعاً أخرى من التفكك الإشعاعي. تشبه أشعة إكس (X-Ray) أشعة غاما في خواصها ولكنها أقل نفاذاً وتنبعث من خارج النواة (من إلكترونات المدارات)، وتستخدم في التشخيص الطبي والصناعي، وتوقفها بضع مليمترات من الرصاص.

4. النيوترونات: هي أخطر الإشعاعات على الإطلاق وهي جسيمات متعادلة لا تحمل شحنة وتنطلق من التفاعلات النووية والتفجيرات. قدرتها على الاختراق عالية جداً، ولا توقفها إلا حواجز سميكة من الخرسانة أو الماء. ونظراً لأنها متعادلة فإنها لا تتأثر بالحقول الكهرومغناطيسية، ويمكنها الوصول إلى أعماق كبيرة في الجسم محدثة أضراراً بالغة في الأنسجة والأعضاء الحيوية.

جدول (2): مقارنة أنواع الإشعاعات

الخاصية	أشعة ألفا(α)	أشعة بيتا (β)	أشعة جاما (γ)	أشعة إكس (X-Ray)	النيوترونات
الشحنة	موجبة (+2)	سالبة (-1)	متعادلة	متعادلة	متعادلة
الكتلة	كبيرة (4 وحدات كتل ذرية)	صغيرة (كتلة الإلكترون)	ليس لها كتلة سكونية	ليس لها كتلة	كتلة نيوترون (1 وحدة)
الطاقة	منخفضة	متوسطة	عالية جداً	متوسطة إلى عالية	عالية
قدرة النفاذ	ضعيفة جداً (توقفها ورقة)	متوسطة (توقفها ألمنيوم)	عالية جداً (توقفها رصاص سميك)	أقل من جاما (توقفها رصاص بضعة ملم)	عالية جداً (توقفها خراسانة سميكة أو ماء)
التأثير الضار	ضعيف إذا كانت خارج الجسم	متوسط	شديد جداً	شديد (لكن أقل من جاما)	شديد
المجالات الكهرمغناطيسية	تتأثر (لوجود شحنة)	تتأثر	لا تتأثر	لا تتأثر	لا تتأثر

تأثير التلوث الإشعاعي:

1. التأثيرات الحيوية على الكائنات الحية:

يمر التأثير الحيوي للإشعاع بأربع مراحل متسلسلة، ويعتمد في شدته على نوع الإشعاع والجرعة المتلقاة وفترة التعرض وحساسية العضو أو النسيج.

المرحلة الأولى هي **الفيزيائية**: حيث ينقل الإشعاع طاقته إلى جزيء الماء في الخلية فيؤدي إلى تأينه أي فقدانه إلكتروناً. المرحلة الثانية **فيزيوكيميائية**: حيث تتفاعل الأيونات الموجبة والإلكترونات السالبة مع جزيئات الماء الأخرى منتجة مركبات جديدة عالية التفاعل، من بينها فوق أكسيد الهيدروجين H_2O_2 وهو عامل مؤكسد قوي. المرحلة الثالثة **كيميائية**: حيث تتفاعل هذه المركبات النشطة مع المركبات العضوية في الخلية، وخصوصاً DNA والكروموسومات، مما يؤدي إلى تخريب تركيبها وكسر سلاسلها الجزيئية. المرحلة الرابعة **الحيوية:** حيث تظهر آثار هذه التغيرات الكيميائية على شكل موت فوري للخلية، أو منع انقسامها أو إيقافه، أو زيادة غير طبيعية في معدل النمو والانقسام تؤدي غالباً إلى تحول سرطاني، أو تغيرات دائمة في المادة الوراثية تنتقل إلى الخلايا الوليدة.

تختلف حساسية الأعضاء والأنسجة للإشعاع تبعاً لنشاطها الانقسامي ودرجة تمايزها. الترتيب التنازلي للحساسية يبدأ بالغدد التناسلية (المبيضين والخصيتين) نظراً لانقسام خلاياها المستمر، ثم الأعضاء المكونة للدم (النخاع العظمي، الطحال، العقد اللمفاوية)، يليها الجهاز الهضمي لسرعة تجدد خلايا بطانته، ثم الجلد، وأخيراً عدسة العين التي رغم حساسيتها العالية إلا أن تمايزها يقلل قليلاً من ترتيبها.

2. التأثيرات الحيوية على الإنسان:

تظهر **التأثيرات الحادة** خلال ساعات أو أيام من التعرض لجرعات عالية تتجاوز 1 غراي، وتُعرف مجتمعة بمتلازمة الإشعاع الحادة التي تشمل فقدان الشهية والغثيان والصداع والتقيؤ وتساقط الشعر.

تعتمد شدة المتلازمة ونوعية الوفاة على الجرعة:

- **1-5 غراي** يحدث الموت بسبب تلف الأنسجة المكونة للدم وفشل نخاع العظم.
- **5-10 غراي** يحدث الموت بسبب خلل حاد في الجهاز الهضمي يتمثل بإسهال ونزيف وفقدان سوائل.
- **أكثر من 10 غراي** يحدث الموت خلال أيام قليلة بسبب تلف الجهاز العصبي المركزي.

من التأثيرات الحادة الأخرى العقم عند الجنسين نتيجة تلف الخلايا المنتجة للبويضات والحيوانات المنوية، والتشوهات الخلقية للأجنة كصغر الرأس وتأخر النمو وضعف الصحة العامة. وقد تجسدت هذه التأثيرات بوضوح في ضحايا القنبلتين الذريتين عام 1945.

أما **التأثيرات المزمنة** فتنشأ من التعرض لجرعات منخفضة على فترات طويلة تمتد لأشهر أو سنوات، وتكمن خطورتها في عدم ظهور أعراض مبكرة مما يجعلها أشد خبثاً. أهم هذه التأثيرات:

- تحريض السرطان بفعل الطفرات التي تصيب الجينات المنظمة لنمو الخلايا.
- إعتام عدسة العين لأن عدسة العين بالغة الحساسية للإشعاع.

- تقصير العمر الافتراضي نتيجة الضرر المتراكم في الأنسجة والأعضاء المختلفة.
- التأثيرات الوراثية التي تنتقل إلى الأجيال القادمة عبر تغيير ترتيب الأحماض الأمينية فيDNA

وقد أكدت الدراسات الوبائية زيادة السرطان بين الناجين من هيروشيما وناغازاكي بعد أربعين عاماً، وزيادة سرطان الغدة الدرقية بين أطفال أوكرانيا بعد ست سنوات من حادث تشرنوبيل.

3. التأثيرات الحيوية على النظم البيئية:

لا يقتصر الضرر الإشعاعي على الإنسان، بل يمتد إلى النظم البيئية البرية والمائية بطرق معقدة. في منطقة الحظر حول تشرنوبيل، لوحظ انخفاض حاد في أعداد الحشرات والثدييات الصغيرة في السنوات الأولى بعد الكارثة، ولكن بعد عقدين من الزمن عاد التنوع البيولوجي بشكل مفاجئ، بل تجاوز في بعض المناطق ما كان عليه قبل الكارثة، وذلك بسبب غياب النشاط البشري (الصيد، الزراعة، العمران). هذا الأمر أثار جدلاً علمياً مثيراً حول ما إذا كانت المناطق المشعة يمكن أن تتحول إلى محميات طبيعية غير مقصودة، حيث يبدو أن غياب الإنسان يفوق ضرر الإشعاع المتوسط.

في النظم المائية تلعب الأشنيات البحرية مثل Fucus serratus دوراً فريداً كمؤشرات حيوية، فهي تراكم العناصر المشعة وتظهر بوضوح أنماط التلوث. وقد أظهرت الأسماك في بحيرة تشرنوبيل القريبة من المفاعل مستويات مرتفعة من السيزيوم-137 مما استدعى حظر صيدها لسنوات. في النظام المائي العذب، تنتقل النويدات المشعة من الماء إلى العوالق النباتية ثم إلى الأسماك الصغيرة ثم إلى الأسماك الكبيرة، في عملية تضخم حيوي تجعل تركيز النظائر المشعة في الكائنات المفترسة أعلى بآلاف المرات من تركيزها في الماء. هذا البعد البيئي يؤكد أن التلوث الإشعاعي ليس مجرد مسألة صحية بشرية، بل هو اضطراب بيئي شامل.

المعالجة والتخلص من المخلفات الإشعاعية:

تهدف معالجة المخلفات الإشعاعية إلى هدفين رئيسيين:

1. منع وصول النظائر المشعة إلى البيئة والإنسان.
2. عزل المخلفات أو تخفيف تركيزها أو تدميرها.

الطريقة الأكثر تحقيقاً حتى اليوم هي **الدفن العميق**، حيث توضع النفايات المشعة داخل عبوات خاصة متعددة الطبقات (حاويات من الفولاذ المقاوم للصدأ مغلفة بالخرسانة أو الزجاج)، وتدفن في طبقات جيولوجية مستقرة كالصخور الطينية أو الغرانيت على عمق يتراوح بين 500 – 1000 متر تحت سطح الأرض. المبدأ الأساسي هو عزل النفايات عن المحيط الحيوي حتى تزول تماماً فعاليتها الإشعاعية، أي حتى تمر بعدة فترات عمر نصف. ولأن البلوتونيوم-239 يحتاج إلى أكثر من 24000 سنة ليصبح آمناً، فإن مستودعات الدفن العميق تصمم لعزل النفايات لمدة تصل إلى مئات الآلاف من السنين، وهو تحدٍ هندسي واجتماعي هائل.

بالإضافة إلى الدفن العميق ظهرت تقنيات حديثة واعدة:

- من أبرزها استخدام **الفطريات الراديوية** مثل *Cladosporium sphaerospermum* المكتشف في مفاعل تشرنوبيل، والتي تنمو على الإشعاع وتحوله إلى طاقة كيميائية عبر عملية تسمى التخليق الإشعاعي، وقد بدأت أبحاث لاستخدام هذه الفطريات في مفاعلات حيوية لتنظيف المواقع الملوثة.
- كما تم تطوير **مواد نانوية** مثل الجرافين المغناطيسي والبوليمرات المسامية القادرة على امتصاص النويدات المشعة من المياه الملوثة بفعالية عالية، وقد طبقت هذه التقنيات بنجاح في معالجة المياه في محطة فوكوشيما.
- طريقة أخرى هي **التحويل النووي** باستخدام مفاعلات سريعة تحول النويدات طويلة العمر إلى نظائر قصيرة العمر أو مستقرة، وهي ما زالت في المراحل التجريبية.
- **التخفيف** في المحيطات كان يمارس في الماضي لكنه غير موصى به اليوم بسبب انتقال التلوث إلى السلسلة الغذائية البحرية. ومن المؤسف أن بعض الدول الكبرى لجأت إلى التخلص من نفاياتها المشعة في دول نامية، مخالفة بذلك الاتفاقيات الدولية.

الأطر القانونية والاتفاقيات الدولية:

في مواجهة خطر التلوث الإشعاعي العابر للحدود، وضع المجتمع الدولي أطراً قانونية ملزمة للحد من هذا التلوث وإدارة مسؤولياته. من أهم هذه الصكوك معاهدة **الحظر الشامل للتجارب النووية** (CTBT) لعام 1996، والتي تهدف إلى حظر أي تفجير نووي تجريبياً، وإن لم تدخل حيز التنفيذ الرسمي بعد لعدم تصديق جميع الدول المالكة للسلاح النووي عليها، فهي تمثل ضغطاً سياسياً وأخلاقياً هائلاً. **واتفاقية الأمان النووي** (CNS) لعام 1994 والتي تلزم الدول بتشغيل محطات الطاقة النووية وفق أعلى معايير السلامة وإجراء تقييمات دورية للمواقع. **واتفاقية فيينا للمسؤولية المدنية عن الأضرار النووية** التي تحدد المسؤولية القانونية لمشغلي المنشآت النووية عن أي ضرر يحدث خارج حدود منشآتهم.

كما تلعب الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) دوراً محورياً في وضع معايير الأمان العالمية، وإجراء عمليات التفتيش على المنشآت النووية، ونشر المعرفة العلمية حول الحماية الإشعاعية. معرفة هذا الإطار القانوني أمر ضروري للطلاب الباحثين في السياسات البيئية والإدارة الدولية.