الفصـــل الرابـــع

الإمـــداد بالطـــــاقـــة

من المهم عند التبصر فى كيفية مقابلة الاحتياجات المتصاعدة من الطاقة عالمياً أن يوجد إدراك بأن كل دولة تستخدم مزيجاً من إمدادات الطاقة، وأن جميـــع الـــدول تختلف عن بعضها البعض فى استخدام هذا المزيج.. فكل دولة تستخدم مزيجاً من إمدادات الطاقة نظراً لأن:

١- تكنولوجيات مختلفة مطلوبة لمقابلـــة احتياجـــات متباينـــة، وأحـــد أمثلتهـــا التكنولوجيات المطلوبة للنهوض بالقوى الكهربية لحمل الأســـاس base load power بالتباين مع القوى الكهربية لحمل الـــذروة peak power، أو لمقابلـــة الطلب المكثف على الكهرباء فى المدن المليونية megacities فى مقابل القوى الكهربية خارج الشبكة للمستهلكين الصغار بالمناطق النائية.

٢- تطور الإمداد بالطاقة غير متكافئ، والتكنولوجيات الجديدة تحل محل القديمة منها فى نوبات وابتداءات.. وفى تراكبات أو التحامات أو تداخلات.

٣- مستثمرين عديدين يختارون تكنولوجيات مختلفة استناداً إلى متطلبات متباينة ورؤى متغايرة بشأن الربحية والمخاطر.

٤- الدول سريعة النمو مثل الصين ربما تحتاج أن توسع جميع مصادر الطاقـــة لديها على نحو متزامن .. فقط لتحتفظ بمواكبتها للطلب المتنامى على الطاقة لديها .

يضاف إلى ذلك أن المزيج الصحيح للطاقة يختلف لكل دولة عن نظيرتها، وهـــو يعتمد جزئياً على السرعة التى ينمو بها الطلب على الطاقة فى الدولة، وكذا علـــى مصادر الطاقة بالدولة وبدائلها أو مرادفاتها، وأيضا على خيارات التمويل المتاحة وما إذا كانت الاستثمارات تتم فى سوق محررة تعطى الاعتبار للعائدات السريعة، وأخيراً على الأفضليات والأولويات القومية وفقاً لما تعبر عنه السياسات الوطنية.

وتعتبر المقايضات أو التوازنات فيما بين القضايا المتعـــددة كمخـــاطر الحـــوادث الكبرى، والكهرباء الرخيصة، والتلوث، وفرص العمل، والاعتماد على الاستيراد، والتغير المناخى .. هى، على الأقل جزئياً، مسألة أفضليات شخصية ووطنية؛ ولذا فهى جوانب للاختلافات القانونية حتى لو تعين على كل فرد أن يتفق بـــشأن كـــل الوقائع.

الخصائص الاقتصادية للقوى النووية والتكنولوجيات البديلة للتوليد الكهربى

■ تكلفة التوليد الكهربى

ينظر إلى محطات القوى النووية العاملة على النحو المعتاد عموماً بوصفها مصدراً تنافسياً للكهرباء مدراً للربح. والسبب فى ذلك يكمن فى أنه بينما تكون هذه المحطات مكلفة نسبياً فى تشييدها تبقى غير مكلفة نسبياً فى تشغيلها. فبمجرد ما تستهلك تكلفة تشييد المحطة النووية بكاملها تكون عندئذ فى أفضل مراحل ربحيتها عموماً. وحيثما تتساوى العناصر الأخرى فهنالك حافز اقتصادى لتشغيل المحطة إلى المدى الذى تكون فيه آمنة لإحراز ذلك، على نحو ما يشاهد من الإجراءات المستمرة لتجديدات التراخيص.

وفى الولايات المتحدة الأمريكية، وفقاً للوضع الراهن فى أول أبريل ٢٠٠٦، وافقت اللجنة التنظيمية النووية للولايات المتحدة الأمريكية على ٣٩ تجديداً لتراخيص يمتد كل منها إلى ٢٠ عاماً قادمة، وذلك لمجمل عمر مرخص قدره ٦٠ عاماً لكل مفاعل. وحتى ذلك التاريخ تلقى مالكو ما يقرب من ١٠٤ مفاعلاً شغالاً بالولايات المتحدة الأمريكية تجديداً لتراخيصهم أو تقدموا لطلب التجديد أو أقروا باعتزامهم التقدم لطلبه. والوضع مشابه لذلك فى دول أخرى، رغم أن تجديد التراخيص خارج الولايات المتحدة الأمريكية يتواتر أكثر بصفة عامة للفترات الأقصر، أو يأخذ شكل "التجديدات الدوارة" أو "التجديدات التكرارية" .

على أنه لا توجد بشأن المفاعلات النووية المشيدة الجديدة إجابة عالمية موحدة أو جامعة للسؤال: "هل القوى النووية اقتصادية؟" .. فحسبما تمت الإشارة إليه أعلاه تعتمد إتاحية وملاءمة خيارات الإمداد بالدرجة الأولى على الظروف الوطنية المحلية، كما تعتمد كذلك على بنية السوق، والبيئة التنظيمية، ومناخ الاستثمار، فى الدولة المعنية.

ويلخص الجدول رقم (٣) تقديرات تكلفة التشييد الجديد، وتكاليف الإنتاج المسوّاة levelized production costs وفقاً لسبع دراسات أجريت فى السنوات القليلة الماضية. ففيما عدا حالة التوليد الكهربى بالنفط (الذى تم تقديره فى واحدة فقط من الدراسات السبع) يبلغ الطرف الأعلى لكل مدى للتكلفة ١٠٠% أعلى، على الأقل، من الطرف الأدنى، وتوجد بعض الترجحات بسبب الفروض التكنولوجية المتباينة فى الدراسات السبع، لكن الكثير منها كذلك يرجع للعوامل الوطنية المحلية. وتتأسس هذه التكاليف على الإذعان للتنظيمات القائمة، ولذا فأى تغير تنظيمى يسفر عن إضافة تكاليف زائدة، أو خصم تكاليف قائمة، على نحو مؤثر يتسبب حتماً فى إزاحة الأرقام وإبدالها.

ويعطى الجدول رقم (٤) تكلفة إنتاج الكهرباء النووية فى بعض الدول حيث يتضح التفاوت الكبير فيما بينها، بما يؤكد تأثير الظروف الوطنية المحلية فى تحديد التكلفة النهائية لإنتاج الكهرباء من الخيارات المتاحة لمصادر الطاقة الكهربية على النطاق القومى. ويلاحظ أنه فى حالة معدل خصم مقداره ٥% تتضاءل تكلفة إنتاج الكهرباء النووية فى الدول جميعها حتى لتصبح -فى هذه الحالة- منافساً قوياً لمعظم المصادر التقليدية لتوليد الكهرباء.

جدول رقم (٣)- تقديرات التكلفة المقارنة مستخلصة من دراسات حديثة

	معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا MIT [١]	جامعة شيكاجو [٢]	الأكاديمية الملكية للهندسة[٣] (بريطانيا)	وزارة الاقتصاد والمالية والصناعة (فرنسا)[٤]	وزارة الاقتصاد والتجارة والصناعة (اليابان)[٥]	معهد بحوث الطاقة الكندى (كنـدا) [٦]	منظمة التعاون الاقتصادى والتنمية/ وكالة الطاقة الذرية/ الوكالة الدولية للطاقة[٧]
التكلفة المسوّاة[٨] لوحدة الطاقة المولدة	سنت أمريكى/ كيلووات ساعة[٩]	سنت أمريكى/ كيلووات ساعة[٩]	سنت أمريكى/ كيلووات ساعة[٩]	سنت أمريكى/ كيلووات ساعة[٩]	سنت أمريكى/ كيلووات ساعة[٩]	سنت أمريكى/ كيلووات ساعة[٩]	سنت أمريكى/ كيلووات ساعة[٩]
النووية	6.7	7.1-4.1	4.2	3.6	5.0	7.5-4.4	6.9-2.1
الفحم	4.2	4.1-3.3	6.4-4.6	4.4-4.1	5.3	4.9-4.0	6.9-1.6
الغاز الطبيعى	5.6-3.8	4.5-3.5	5.2-4.1	4.5	5.8	6.3-6.0	6.4-3.8
النفـط	-	-	-	-	10.0	-	-
القوى الهيدروكهربية	-	-	-	-	-	-	24.2-4.0
سَلّة الدواجن	-	-	12.5	-	-	-	-
الرياح السطحية	-	-	9.9-6.8	-	-	-	14.4-3.1
الرياح البحرية	-	-	13.3-10.1	-	-	-	12.3-5.2
الامواج/قوة البحر	-	-	12.2	-	-	-	
الفوتوفلطيات الشمسية	-	-	-	-	-	-	187.6-12.1
التكلفة الراهنة لوحدة القدرة المركبة[١٠]	دولار أمريكى/ كيلووات	دولار أمريكى/ كيلووات	دولار أمريكى/ كيلووات	دولار أمريكى/ كيلووات	دولار أمريكى/ كيلووات	دولار أمريكى/ كيلووات	دولار أمريكى/ كيلووات
النووية	2000	1800-1200	2119	1823	2614	2491-1968	2510-1074
الفحم	1300	1460-1182	1511-1345	1419-1290	2548	1341	2347-719
الغاز الطبيعى	500	700-500	553	652	1536	596	1292-424
النفـط	-	-	-	-	2520	-	-
القوى الهيدروكهربية	-	-	-	-	-	-	6985-1541
سَلّة الدواجن	-	-	1390	-	-	-	-
الرياح السطحية	-	-	1364	-	-	-	1634-976
الرياح البحرية	-	-	1695	-	-	-	2622-1637
الأمواج/قوة البحر	-	-	2580	-	-	-	-
الفوتوفلطيات الشمسية	-	-	-	-	-	-	10164-3363

(١) معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا MIT (2003) .

(٢) جامعة شيكاجو (٢٠٠٤).

(٣) الأكاديمية الملكية للهندسة (٢٠٠٤) .

(٤) الإدارة العامة للطاقة والمواد الخام بوزارة الاقتصاد والمالية والصناعة

General Directorate for Energy and Raw Materials (DGEMP) (٢٠٠٣).

(٥) وزارة الاقتصاد والتجارة والصناعة Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) (٢٠٠٤).

(٦) معهد بحوث الطاقة الكندى Canadian Energy Research Institute (CERI) (٢٠٠٤).

(٧) منظمة التعاون الاقتصادى والتنمية/ وكالة الطاقة النووية/ الوكالة الدولية للطاقة

Organization for Economic Cooperation and Development/ Nuclear Energy Agency/ International Energy Agency (OECD/ NEA/ IEA (2005)

(٨) التكلفة المسوّاة للكهرباء هى السعر على قضبان التوصيل (موصلات التوزيع العمومية) المطلوب لتغطية تكاليف التشغيل مضافا اليه الحصة السنوية من التكلفة الرأسمالية لمحطة القوى الكهربية.

(٩) العملات القومية المستخدمة فى الدراسات المختلفة تم تحويلها إلى دولارات أمريكية باستخدام أسعار التحويل المعلنة يوم ١١ نوفمبر ٢٠٠٤.

(١٠) تكلفة الأمس the Overnight Cost هى المبلغ الذى يدفع إذا جرت جميع النفقات الرأسمالية فى آن واحد، وهى لا تتضمن تكلفة (مصروفات) الفائدة على رأس المال.

المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية، 2006.

جدول رقم (٤)- تكلفة إنتاج الكهرباء النووية فى بعض الدول

الدولة	معدل الخصم	الاستثمار (%)	التشغيل والصيانة (%)	الوقود (%)	التكلفة الإجمالية سنت/كيلووات ساعة
كندا	٥%	٦٧	٢٤	٩	٢,٥
	١٠%	٧٩	١٦	٦	٤,٠
فنلندا	٥%	٥٩	٢١	٢٠	٣,٧
	١٠%	٧٣	١٤	١٣	٥,٦
فرنسا	٥%	٥٤	٢١	٢٥	٣,٢
	١٠%	٧٠	١٤	١٦	٤,٩
اليابان	٥%	٤٣	٢٩	٢٧	٥,٧
	١٠%	٦٠	٢١	١٩	٨,٠
جمهورية كوريا	٥%	٥٥	٣١	١٤	٣,١
	١٠%	٧١	٢٠	٩	٤,٨
أسبانيا	٥%	٥٤	٢٠	٢٦	٤,١
	١٠%	٧٠	١٣	١٧	٦,٤
تركيا	٥%	٦١	٢٦	١٤	٣,٣
	١٠%	٧٥	١٧	٩	٥,٢
الولايات المتحدة الأمريكية	٥%	٥٥	٢٧	١٩	٣,٣
	١٠%	٦٨	١٩	١٣	٤,٦

المصدر: Nuclear Energy Agency (NEA), OECD: Nuclear Energy in a Sustainable Development Perspective, 2000.

■ **استدخال التكلفة الخارجية**

التكاليف الخارجية هى تلك التكاليف التى يعانيها العامة (مثل تكاليف الرعاية الصحية بسبب محطة قوى كهربية شديدة التلويث) التى لا يتعين على المستفيدين المباشرين (من توليد الكهرباء كمالكى المحطة وعملائهم) أن يدفعوها .

ولقد أمكن فى العقود الأخيرة إحراز تقدم كبير فى استدخال العديد من التكاليف الخارجية البيئية والصحية السابقة من خلال القواعد التنظيمية للتحكم فى التلوث، والأمان النووى، وأمان المناجم، وتشغيل ناقلات النفط، على سبيل المثال،.. وأكثر حداثة الأسواق الجديدة للابتعاثات الكربونية التى أبدِعَت بدخول بروتوكول كيوتو حيز النفاذ. وبمجرد أن تُستَدْخَل مثل هذه التكاليف فإنها تؤخذ فى الاعتبار لدى اتخاذ القرارات الاستثمارية بالقطاع الخاص .. وفى خيارات المستهلكين.

ورغم التقدم المنوه عنه توا دعت العديد من المؤسسات البحثية واتحادات صناعة الطاقة إلى بذل جهود إضافية لاستدخال التكاليف الخارجية لدعم التنمية المستدامة.

بيد أنه لا يزال الكثير من التقدم مطلوباً إحرازه فى حالة غازات الدفيئة GHGs(*) لمقابلة غايات الاتفاقية الإطارية للأمم المتحدة المعنية بتغير المناخ UNFCCC التى تقضى بتثبيت التركيز الجوى لغازات الدفيئة "عند مستوى يتسنى بمقتضاه منع التداخل الأنثروبولوجى الخطير مع النظام المناخى" .

(*) Greenhouse Gases = GHGs

ورغم أن مستثمرى القطاع الخاص يتخذون قراراتهم على نطاق واسع بالتأسيس على التكاليف المستدخلة فإن المستثمرين الحكوميين وصانعى السياسات ربما يرغبون فى اتخاذ قراراتهم تأسيسا على التكاليف المستدخلة مضافا إليها أية تكاليف خارجية متبقية. بَيْدَ أن التكاليف الخارجية قد يكون من الصعب تكميمها والتعبير عنها بقيم مالية، فأية عملية تقييمية لاحتساب القيمة أو الثمن تظل تقديرية عبر وجهات نظر شخصية أو ذاتية بما يجعل النتائج تختلف عبر الدول. على أنه رغم كل اللاتيقنيات والاختلافات القومية فى تسعير التكلفة الخارجية وتقدير قيمتها عمدت العديد من الدراسات المهمة إلى تقدير التكاليف الداخلية والخارجية الكلية المرتبطة بالتكنولوجيات المختلفة لتوليد الكهرباء، ويستعرض الجدولان رقم (٥) ورقم (٦) نتائج دراستين كبريين أجريتا تحت المشروع البحثى "إكستيرن-إى" Extern-E (معهد بول شيرر ٢٠٠١، والمفوضية الأوربية ٢٠٠٣، وفريدريش ٢٠٠٥)[*].

جدول رقم (٥)- ملخص للتكاليف الخارجية مأخوذ عن الدراسات المؤسسة على التكنولوجيات المتاحة عام ١٩٩٩، ويلاحظ أن التكاليف الصحية والبيئية متضمنة ومعبر عنها باليوروسنت/ كيلووات ساعة (المفوضية الأوربية European Commission ٢٠٠٣)

التكنولوجيا	قوى الرياح	الخلايا الفوتوفلطية	القوى الهيدروكهربية	الكتلة الأحيائية	القوى النووية	الغاز الطبيعى	النفط	فحم المستنقعات	الفحم والليجنيت
التكلفة الخارجية (يورو سنت/ كيلووات ساعة)	٠,٤	٠,٨	- ٠,٢ ١,٢٥	- ٠,٢ ٣,٤	- ٠,٥ ٠,٩٥	- ١,٢ ٤,٢	- ٣,٢ ١١,١	- ٢,٤ ٥,٢	- ٢,٣ ١٥,٢

المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية، ٢٠٠٦.

جدول رقم (٦)- ملخص للتكاليف الخارجية بجمهورية ألمانيا تأسيسا على التكنولوجيات المتوقع أن تكون متاحة عام ٢٠١٠ (وفقا لفريدرش Fredrich عام ٢٠٠٦)

التكنولوجيا	قوى الرياح البحرية	القوى الهيدرو كهربية	الآلات الترددية	الخلايا الفوتو فلطية	الدورة المركبة بالتربينات الغازية	التوليد المشترك للحرارة والكهرباء	خلايا الوقود	دورة مركبة مغوزة تكاملية بالليجنيت	دورة مركبة مغوزة تكاملية بالفحم	محطات القوى بالفحم ذات المهد المميوع
التكلفة الخارجية (يورو سنت/ كيلووات ساعة)	٠,٢	٠,٢٥	٠,٣	٠,٤٥	١,١	١,٦	١,٩٥	٢,٥	٢,٥	٣,٣

المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية، ٢٠٠٦.

(*) (PSI 2001; EC 2003; Friedrich 2005)

والواقع أن التأثيرات البيئية غير المسعرة لا تمثل وحدها فقط التكاليف الخارجية محل الاعتبار، فالتخوفات الراهنة حول أمن الإمداد بالطاقة تستدعى اهتمامات مماثلة كانت محط الاهتمام خلال برامج التوسعات النووية لكل من فرنسا واليابان فى زمن الصدمات النفطية أثناء السبعينيات. فالمضار (الخسارات) والهموم المرتبطة بالإمداد القومى غير المؤمن للطاقة تشكل تكلفة خارجية غير مرئية على نطاق واسع لأى مستثمر فى سوق طاقة محررة. ولمعظم الدول يزيد التوسع فى القوى النووية من تنوعية إمداداتها بالطاقة، ويزيد بالتالى أمن هذه الإمدادات.. بل أكثر من ذلك تحتاز القوى النووية خاصتين مميزتين تزيدا فى مرونتها:

أولاهما: أن تكاليف إنتاج الكهرباء النووية أقل حساسية للتغيرات فى أسعار الوقود مما لتكاليف توليد الكهرباء المنتجة بالوقود الأحفورى، فلقد أسفر التضاعف الأخير لأسعار اليورانيوم إلى ثلاثة أمثال ما كانت عليه عن فارق 2-3 % فقط فى تكاليف التوليد للقوى النووية.

وثانيتهما: أن الوقود الأساسى – اليورانيوم – متاح فى طائفة متنوعة من الدول المنتجة، بينما كميات ضئيلة هى المطلوبة فقط بما يجعل من الأيسر تأسيس مخزونات استراتيجية لليورانيوم. وفى الممارسة العملية كان الاتجاه العام عبر السنين بعيداً عن المخزونات الاستراتيجية لتأمين الإمداد استناداً إلى سوق متنوعة فاعلة على نحو جيد لليورانيوم، وخدمات الإمداد بالوقود. غير أن خيار المخزونات الاستراتيجية منخفضة التكلفة نسبيا يبقى متاحاً للدول التى تجده ذا أهمية لديها.

■ **مصادر الوقود النووى**

يعتبر المدى الذى توجد فيه مصادر الطاقة محدوداً جزئياً بالطبيعة.. وجزئياً بالبراعة البشرية والاقتصاديات. و"المخزونات" أو "الاحتياطيات" Reserves هى ذلك الجزء الذى يمكن الوصول إليه من مصادر الطاقة بالأسعار القائمة والتكنولوجيا الراهنة. ولذا تعتمد المخزونات بصفة رئيسية على المدى الذى يعتزم الناس فيه أن يدفعوا مقابل حصولهم على خدمات الطاقة، وعلى التكنولوجيا المتاحة لاستخراج المصادر وتحويلها إلى خدمات. أما المصادر غير المطلوبة من قبل السوق فينظر إليها فقط بوصفها "متاعاً محايداً" neutral stuff أو "سلعة متعادلة"؛ وعلى ذلك تستعاد المخزونات ثانية على نحو مستمر ليس بسبب إبداع مواد جديدة ولكن من خلال الطلب المتنامى، والتكاليف المتناقصة للإنتاج التى تحول "المتاع المحايد" إلى مخزونات.. وذلك حقيقى لكل من المصادر المتناهية والمتجددة على السواء. غير أنه للمصادر المتناهية finite resources، خلافاً للمتجددة، يوجد حد نهائى يتم التوقف عنده.

وتشمل المصادر النووية كلاً من اليورانيوم والثوريوم، حيث يوجد الأخير بوفرة تعادل ثلاثة أضعاف مايوجد من اليورانيوم، لكن المخزونات أو الكميات التى يمكن تحصيلها تعتمد -كما تمت الإشارة إليه أعلاه- على أحوال السوق والتكنولوجيا، فضلاً عن جيولوجية الرسوبيات أو المستودعات المختلفة. ويعتبر اليورانيوم فى الوقت الراهن هو الأكثر طلباً على الإطلاق.

وتعمل جميع مفاعلات القوى النووية الشغالة فى العالم الآن، البالغ عددها 443 مفاعلاً، بوقود اليورانيوم؛ كذلك ستكون المفاعلات البالغ عددها 26 مفاعلاً تحت التشييد الآن. وتقدر المصادر التقليدية المثبتة لليورانيوم حالياً بما يبلغ 4.7 مليون طن من اليورانيوم بأسعار لاتتجاوز 130 دولاراً/ كيلوجرام. وكأساس مرجعى بلغ سعر السوق الحاضرة فى نهاية يناير 2006 حوالى 94 دولاراً/ كيلوجرام، وقدرت المصادر التقليدية الإضافية فيما يجاوز تلك المثبتة فعلاً بما يضيف10.1 مليون طن أخرى من اليورانيوم. ويلخص الجدول رقم (٧) الأماد الزمنية التى يمكن أن تعيشها المصادر التقليدية لليورانيوم بمعدلات الحرق الحالية فى المفاعلات. ويفترض الصف الأول من الأرقام بالجدول أن المفاعلات المستقبلية للقوى النووية تستخدم نفس التكنولوجيا كما لمفاعلات اليوم التى يمكنها أن تستخدم فقط أقل من 2% من الطاقة الكامنة فى اليورانيوم الطبيعى، بينما يفترض الصف السفلى من الأرقام بالجدول، حيثما يصبح اليورانيوم أغلى سعراً، أن الوقود المستخدم يعاد تدويره فى نهاية الاستخدام، بواسطة التكنولوجيات المتاحة اليوم، لاستخراج أكثر مايمكن من الطاقة المتاحة. ونظراً لأن جميع الأرقام فى الجدول مؤسسة على معدلات الاستهلاك الحالية لليورانيوم، فإنها عرضة للتناقص جميعها بالتناسب مع أية توسعات فى القوى النووية.

وإذا ما أخذنا الموارد غير التقليدية لليورانيوم فى الحسبان تتزايد عندئذ، على نحو كبير، جميع الأرقام الواردة فى الجدول رقم (٧)، إذ تشتمل الموارد غير التقليدية لليورانيوم على حوالى 22 مليون طن من اليورانيوم توجد فى الرسوبيات الفوسفاتية، بالإضافة إلى ما يقارب 400 مليون طن من اليورانيوم محتواة فى ماء البحر. وتعتبر تكنولوجيا استخراج اليورانيوم من الفوسفات ناضجة الآن رغم ارتفاع التكاليف نسبياً عند مستوى 60-100 دولار/كيلوجرام من اليورانيوم. أما تكنولوجيا استخراج الموارد الهائلة لليورانيوم الممزوجة بماء البحر فقد بلغت طور الإظهار المعملى laboratory demonstrated فقط، وقدرت تكاليف استخراجها بحوالى ٣٠٠ دولار/ كيلوجرام يورانيوم (UNDP, 2000). على أن الأثر الذى يبلغه أى ارتحال نهائى إلى مصادر اليورانيوم ذات التكلفة الأعلى على تكاليف التوليد النووى للكهرباء سيكون محدوداً باعتبار أن تكلفة الوقود هى جزء أقل من تكاليف إنتاج الكهرباء النووية (٢%) مما هى عليه فى تكلفة التوليد الكهربى بالوقود الأحفورى (٤٠-٧٠%).

جدول رقم (٧)- سنوات إتاحية مخزون اليورانيوم العالمى للقوى النووية (2006،IAEA-NEA/OECD)*

المفاعل / دورة الوقود	السنوات من عام ٢٠٠٤ للتوليد الكهربى النووى العالمى بالمصادر التقليدية المثبتة	السنوات من عام ٢٠٠٤ للتوليد الكهربى النووى العالمى بالمصادر التقليدية الإجمالية
الدورة المباشرة الحالية للوقود بمفاعلات الماء الخفيف.	80	270
دورة الوقود النقى بالمفاعلات السريعة مع تدوير الوقود.	5600 – 4800	19000 - 16000

المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية، ٢٠٠٦.

ويتعين ملاحظة أن الجدول رقم (٧) يشير فقط إلى استخدامات اليورانيوم، أما المفاعلات النووية الموقدة بالثوريوم فقد تم تطويرها فى عقدى الستينيات والسبعينيات لكنها لم تستحوذ البتة على نصيب يذكر من السوق العالمية. والهند التى لديها مصادر الثوريوم أكبر بكثير جداً من مصادرها من اليورانيوم، هى واحدة من الدول المستمرة فى تطوير دورة وقود الثوريوم. ويوجد الثوريوم فى القشرة الأرضية بوفرة تبلغ ثلاثة أضعافها بالنسبة لليورانيوم. ورغم أن التقديرات الراهنة لمخزونات الثوريوم، مزيداً عليها المصادر الإضافية، تبلغ فى مجموعها أكثر من ٤,٥ مليون طن فإن مثل هذه التقديرات تعتبر متحفظة للغاية نظراً لأنها لا تغطى كل المناطق فى العالم، كما أن الطلب الضعيف تاريخياً على الثوريوم فى السوق قد حدّ من التنقيب عنه واستكشافه.

■ **الخصائص البيئية**

لاتوجد كيفية معينة لإنتاج الطاقة أو استخدامها دون تأثير بيئى، وذلك حقيقى لكل سلاسل الطاقة: من مصادر الاستخراج، وبناء المرافق اللازمة لمعاملتها، إلى نقل المنتجات خلال التحويل النهائى إلى خدمات طاقة نافعة. وتتحدد التأثيرات البيئية الرئيسية المرتبطة بالقوى النووية والتنمية المستدامة فى الإشعاع، وتلوث الهواء، وابتعاثات غازات الدفيئة، والنفايات المشعة.

■ **ابتعاثات غازات الدفيئة**

واحدة من كبريات الاهتمامات بشأن التنمية المستدامة هى تجمع ثانى أكسيد الكربون CO_2 وغيره من غازات الدفيئة Greenhouse Gases (GHGs) فى الغلاف الجوى، واحتمال حدوث التغير المناخى لجو الأرض بما ينذر به من عواقب وخيمة. وغازات الدفيئة الرئيسية هى ثانى أكسيد الكربون CO_2، والميثان CH_4، وأكسيد النيتروز N_2O.

* (منظمة التعاون الاقتصادى والتنمية / وكالة الطاقة النووية / الوكالة الدولية للطاقة الذرية ، ٢٠٠٦).

وقد بقيت جميع هذه الغازات عند تركيزات ثابتة نسبياً فى الجو حتى بداية عصر الثورة الصناعية الأولى حوالى عام ١٧٥٠ ، عندما بدأت تركيزات ثانى أكسيد الكربون CO_2 فى الزيادة فى جو الأرض على نحو دراماتيكى .

وتبلغ التركيزات الحالية لثانى أكسيد الكربون CO_2 فى الغلاف الجوى حوالى ٣٨٠ جزءاً فى المليون parts per million (ppm) ، وهى مستمرة فى الزيادة، ولذا تتغيا الاتفاقية الإطارية للأمم المتحدة المعنية بتغير المناخ UNFCCC تثبيت تركيزات غازات الدفيئة "عند مستوى يتسنى بمقتضاه منع التداخل الأنثروبولوجى الخطير مع النظام المناخى" (UNFCCC ، ١٩٩٢).

ومن بين البدائل المتاحة لتوليد القوى الكهربية تقف التكنولوجيات الموقدة بالمصادر الأحفورية (الفحم والنفط والغاز الطبيعى) بين أعلاها فى معدلات ابتعاثات ثانى أكسيد الكربون CO_2 لكل كيلووات ساعة، وهى تُكوِّن غالبية ابتعاثات غازات الدفيئة المرتبطة بإنتاج الطاقة. ويظهر الجدول رقم (٨) معدلات الابتعاثات لمجمل دورة الوقود بما فى ذلك مرفق الكهرباء ذاته، وتصنيع المعدات، واستخراج المصادر، والنقل، والمعالجة والتحويل.

جدول رقم (٨)- معدلات ابتعاثات ثانى أكسيد الكربون CO_2 لبدائل توليد القوى الكهربية

التكنولوجيا	النووية	قوى الرياح	القوى الهيدرو كهربية	الخلايا الفوتو فلطية	الكتلة الأحيائية	التخزين*	الفحم المغوز	الدورة المركبة الغازية	البخارية بالغاز	البخارية بالنفط	البخارية بالفحم	البيجنيت
معدل ابتعاثات الكربون (جرام كربون مكافئ/ كيلووات ساعة)	١-	٣-	١-	١٢-	٢٠-	٢٠-	٦٠ -	٦٠ -	١١٠	١٤٥-	٢٢٠-	٢٢٥-
	٦	١٠	١٥	٢٠	٣٥	٥٠	٧٠	٧٠	٢٢٠-	٣٣٠	٣٥٠	٤٦٠

* التخزين: البطاريات/ المائية بالضخ، تخزين الهواء المضغوط، اقتناص الكربون وتخزينه.

المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية، ٢٠٠٦.

ويبتعث عن مجمل سلسلة القوى النووية، من استخراج المصدر النووى إلى التخلص النهائى من النفايات المتبقية، بما فى ذلك تشييد المفاعل ومرفق الكهرباء، ١-٦ جرامات فقط من مكافئ الكربون لكل كيلووات ساعة (gCeq/kWh)، وهى تناظر تقريباً الابتعاثات الكربونية من التوليد الكهربى بطاقة الرياح، والتوليد الهيدروكهربى، شاملة فى ذلك التشييد، وتصنيع المكونات. وتقل التكنولوجيات الثلاثة فى جملتها، مع القوى الشمسية solar power والكتلة الأحيائية biomass كثيراً جداً عن الفحم والنفط والغاز الطبيعى (٦٠-٤٦٠ جرام من مكافئ الكربون / كيلووات ساعة) حتى مع أخذ احتجاز الكربون وتخزينه فى الحسبان .

ويوضح الجدول رقم (٨) أن تثبيت تركيزات ثانى أكسيد الكربون CO_2 فى الغلاف الجوى سيتطلب انخفاضات جسيمة فى الابتعاثات من محطات القوى الكهربية الموقدة بالمصادر الأحفورية، إما بتقليص ابتعاثاتها مباشرة، بالاستخدام الأكثر كفاءة للطاقة، أو بالاعتماد بشكل أكبر على التكنولوجيات المتجددة والقوى النووية.

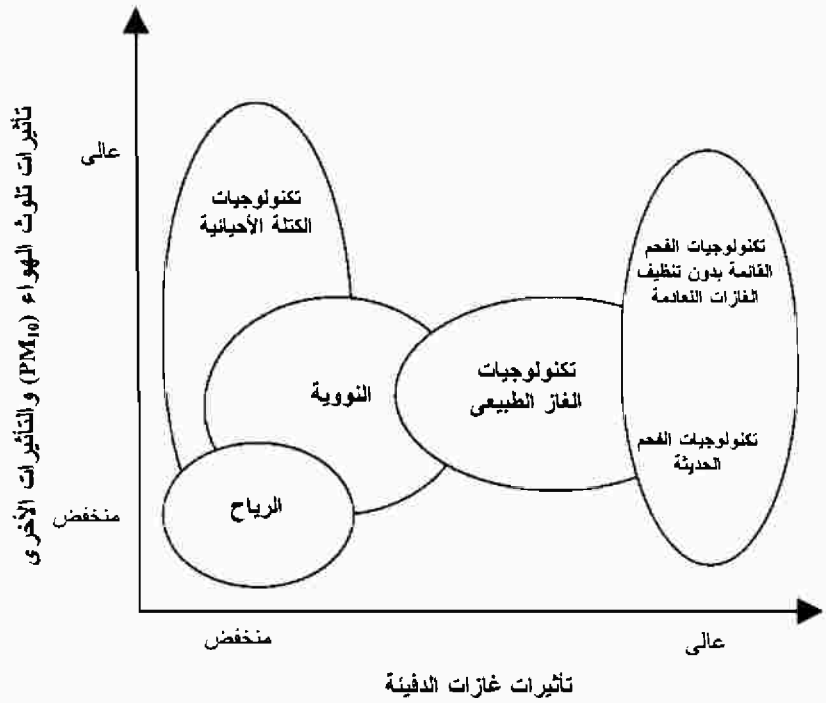
■ **تلوث الهواء**

لا يُبْتَعَث عن مفاعلات القوى النووية – بصفة جوهرية – أى من الملوثات لتقليدية للهواء المصاحبة لاحتراق الوقود الأحفورى، لاسيما ثانى أكسيد الكبريت (SO_2)، وأكاسيد النيتروجين (NOx)، والمواد الجزيئية العالقة (PM). ولا يُبْتَعَث عنها كذلك أية مكونات – ولو غير محسوسة – من المعادن الثقيلة Heavy Metals، كالزرنيخ والزئبق المصاحبين لاحتراق الفحم.

ويساهم كل من ثانى أكسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين فى مرضانية البشر وفنائيتهم، كما يساهمان كذلك فى تقليص إنتاجية المحاصيل، حيث أنهما معاً المسبب الرئيسى للأمطار الحمضية. وبدورها تدمر الأمطار الحمضية الغابات، والنظم البيئية الأوسع، والغلات الزراعية، ومواد البناء، والعمائر والأبنية المشيدة. وتعتبر أكاسيد النيتروجين هى طليعة الأوزون الأرضى ونذيره التى لها تأثيرات صحية مضافة. والمواد الجزيئية التى تُبْتَعَث على نحو مباشر، والتى تتكون كذلك فى الهواء نتيجة لابتعاثات ثانى أكسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين، تزيد على نحو مباشر فى مرضانية البشر وفنائيتهم .

ولقد تقلصت مستويات ابتعاثات هذه الملوثات فى العقود الأخيرة من جراء التحسينات التكنولوجية ومن خلال اقتناص الابتعاثات الملوثة واحتجازها من غازات المداخن.

ويعطى المقياس الرأسى للشكل رقم (١) مقارنة كيفية (وصفية) للتكنولوجيات المختلفة المستخدمة حالياً فى الاتحاد الأوربى Europeasn Union .

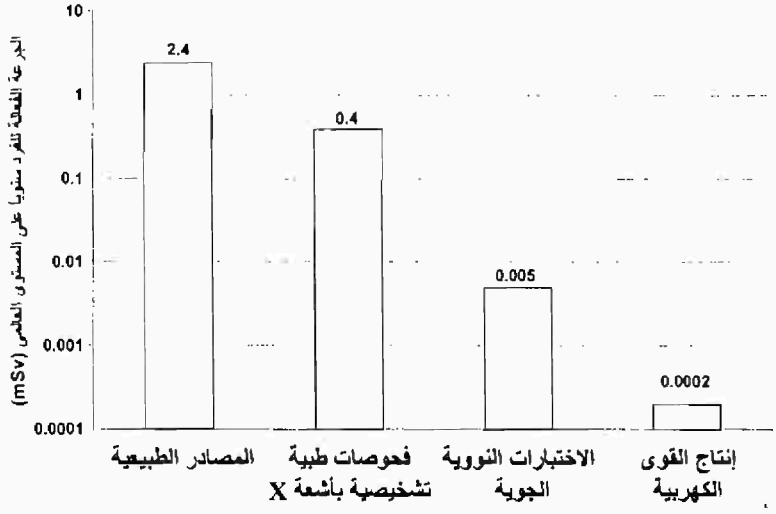


شكل رقم(١)- مقارنة نسبية للتأثيرات البيئية الناتجة عن ابتعاثات مختلف تكنولوجيات توليد القوى الكهربية (الاتحاد الأوربى، ٢٠٠٣)

■ **الإشعاع**

يرتبط الإشعاع بمحطات القوى الكهربية النووية والمحطات الكهربية الموقدة بالفحم أو النفط أو الغاز أو حرارة جوف الأرض، فجميعها تستحضر المواد المشعة من القشرة الأرضية إلى سطحها. وتقدر وكالة حماية البيئة الأمريكية US-EPA أن يتلقى الشخص الذى يعيش فى نطاق ٥٠ ميلاً من محطة لتوليد القوى الكهربية تدار بوقود الفحم جرعة متوسطة مقدارها ٠,٣ ميكرو Sv، بينما يتلقى الشخص الذى يعيش فى نطاق ٥٠ ميلاً من محطة لتوليد الكهرباء بالقوى النووية ما مقداره ٠,٠٩ ميكرو Sv، وكلاهما أقل بأكثر من ألف مرة من متوسط الجرعة التى يتلقاها الناس فى الولايات المتحدة الأمريكية من أشعة إكس X-rays والإجراءات الطبية الأخرى، وأقل بأكثر من عشرة آلاف مرة من متوسط الجرعة التى يتم استقبالها من الإشعاع الطبيعى المحيط Natural Background Radiation .

ويعطى الشكل رقم (٢) مقارنة عالمية، استناداً إلى بيانات اللجنة العلمية للأمم المتحدة المعنية بتأثيرات الإشعاع الذرى Unitef Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)، تبين، على مقياس لوغاريتمى، أن الجرعة المتوسطة للإشعاع الصادر عن إنتاج القوى الكهربية النووية هى واحد على عشرة آلاف من الجرعة المناظرة الصادرة عن المصادر الطبيعية المحيطة Natural Background Radiation.



شكل رقم (٢)- متوسط الجرعة السنوية للفرد على نطاق العالم أجمع من الإشعاع الطبيعي والأنثروبوجيني (أى الإشعاع من صنع الإنسان)
(مأخوذة عن UNSCEAR ، ٢٠٠٠)

وتشمل المصادر المحيطة الأشعة الكونية cosmic rays، والمواد المشعة الموجودة طبيعياً فى الهواء (الرادون بصفة أساسية)، والطعام والماء (لاشتمالهما على البوتاسيوم). كذلك تتسبب الأنشطة البشرية على الأرض فى تعرض إضافى للإشعاع، على الأخص بواسطة أشعة إكس الطبية medical X-rays (كما يتضح بالشكل رقم ٢)، والإجراءات المتعلقة بالطب النووى nuclear medical procedures. على أن العيش فى بناء من الطوب أو الحجر أو الخرسانة، ومشاهدة التليفزيون أو استخدام الحاسب الآلى، والسفر على متن طائرة نفاثة، وارتداء ساعة يد مضيئة.. تضيف جميعها للجرعة. وعلى سبيل المثال .. تُقارَن الجرعة الجزئية من مكشاف الدخان المنزلى home smoke detector بتلك التى يمكن تلقيها من جراء العيش فى نطاق ٥٠ ميلاً من محطة قوى كهربية نووية .

و يتلقى العاملون فى بعض الأشغال تعرضات مهنية إضافية، على سبيل المثال، فى الأعمال الصناعية والطبية والبحثية حيثما يستخدم الإشعاع أو المواد المشعة فى التعدين، وفى تشغيل محطات القوى النووية، وفى الطيران النفاث على ارتفاعات هائلة بواسطة الطيارين وأطقم الطائرات. ويقارن المستوى المتوسط للتعرض المهنى occupational exposure فى مثل هذه الأشغال -فى المعتاد- بمستوى المتوسط العالمى للتعرض الطبيعى للإشعاع natural radiation exposure .

ولا ينتج عن محطات القوى الكهربية النووية من التأثيرات الصحية الخطيرة سوى ما يتسبب عن الحوادث الكبرى التى تسفر عن إطلاق الإشعاعات النووية، التى

كانت إحداها حادثة تشرنوبيل الشهيرة عام ١٩٨٦. وقد تسببت حادثة تشرنوبيل عن عيوب تصميمية جسيمة اقترنت بأخطاء تشغيلية فادحة. ولقد كانت حادثة كارثية دفعت ثمنها أرواح البشر، ونشرت المعاناة والتوجع والألم على نطاق واسع، لكنها دفعت، فى الوقت ذاته، نحو إحداث تغيرات كبرى، بما فيها تعميق أساسات "ثقافة الأمان" Safety Culture بالتحسينات المتواصلة، والتحليل الشامل المتعمق للخبرة المتحصلة، والتشارك فى أفضل الممارسات best practices القائمة. ولقد تأسست الرابطة العالمية للمشغّلين النوويين World Association of Nuclear Operators (WANO) على أثر تشرنوبيل، كما كوّنت الوكالة الدولية للطاقة الذرية IAEA المجموعة الاستشارية الدولية للأمان النووى International Nuclear Safety Advisory Group وتساعد كلتاهما فى نشر أفضل الممارسات، وتضييق (تشديد) إماميات الأمان، وترسيخ ثقافة الأمان فى محطات القوى النووية حول العالم. كذلك فالاجتماعات الدورية لنظام وضع تقارير الأعراض الطارئة للوكالة الدولية للطاقة الذرية ووكالة الطاقة النووية التابعة لدول منظمة التعاون الاقتصادى والتنمية IAEA-OECD/NEA – حيثما تناقش الأحداث الطارئة الراهنة أو المحتمل حدوثها وتحلل تفصيلاً- هى جزء آخر من هذه العملية العالمية لتبادل الخبرات. وتسعى الاتفاقية المعنية بالأمان النووى Convention on Nuclear Safety كذلك إلى تجميع الدول معاً لوضع تقارير حول الكيفية التى يمكن لكل منها أن ترقى بواسطتها إلى مستوى الالتزامات الواجبة للأمان وتتعايش معها، كما تسعى أيضاً لنقد وتحليل تقارير الآخرين.

هذه التبادلات الدولية لخبرات التشغيل، على الأخص الانتشار الواسع "للدروس المستفادة" lessons learned هى أقسام جوهرية من الحفاظ على التشغيل الآمن لمحطات القوى النووية وتقويته. وهنالك شواهد تجريبية قوية على أن التعلم من الخبرة التشغيلية لمحطات القوى النووية قد قاد -وهو مستمر فى القيادة- إلى تحسينات جمة فى أمان المفاعلات. وهذه الثقافة الأمانية ما فتئت تدلل على فعاليتها طوال ما يقرب من عقدين من الزمان. وإنه لذلك هو سجل الأمان الذى يزود بالأساس المتين تلك الدول التى تضع فى اعتبارها حالياً تشييد محطات جديدة للقوى النووية.

■ **التخلص الآجل من النفايات**

رُخّصَت المستودعات النهائية للنفايات ذات المستوى الإشعاعى الخفيض low level radioactive waste الصادرة عن محطات القوى النووية، والمتخلفة عن التطبيقات الطبية والبحثية وغيرها -وهى فى التشغيل الفعلى حالياً- فى عديد من الدول.. غير أنه لا يوجد مستودع فى التشغيل الفعلى للتخلص النهائى من النفايات ذات المستوى الإشعاعى العالى High Level Waste (HLW) الصادرة عن المحطات المدنية للقوى النووية، رغم اتفاق المجتمعات العلمية والتقنية عموماً على أن منال

هذه النفايات يمكن التخلص منها على نحو آمن فى التكوينات الجيولوجية المستقرة Stable Geological Formations. وهنالك مستودع جيولوجى واحد فى الخدمة للتخلص من النفايات ذات العدد الذرى أعلى من اليورانيوم طويلة البقاء المتولدة عن البحوث وإنتاج الأسلحة النووية، وتقع المحطة الريادية لعزل النفايات فى نيومكسيكو بالولايات المتحدة الأمريكية.

وتعاد معاملة الوقود المستنفد الناتج عن محطات القوى النووية التى فى التشغيل الفعلى حالياً أو يتم تخزينه. وتعمد إعادة المعاملة إلى استخلاص كل من اليورانيوم والبلوتونيوم القابلين للاستخدام من الوقود المستنفد لاستخدامهما فى وقود جديد، وما يتبقى هو النفايات ذات المستوى الإشعاعى العالى (HLW) التى تخزن حالياً توطئة للتخلص النهائى. وتعيد كل من الصين وفرنسا والهند واليابان والاتحاد الروسى معاملة معظم وقودها المستنفد، بينما اختارت كل من كندا وفنلندا والسويد الولايات المتحدة الأمريكية البديل ذى التخلص المباشر من الوقود المستنفد كنفايات ذات مستوى إشعاعى عالى، وذلك رغم أن الولايات المتحدة الأمريكية قد اقترحت وخراً مدخلاً ثالثاً يتم بمقتضاه إعادة تدوير الوقود المستنفد ليس لاستخلاص اليورانيوم والبلوتونيوم اللذين يمكن استخدامهما ولكن لحرق البلوتونيوم توأ وتقليص حجم وسمية النفايات التى تتطلب تخلصاً دائماً باقياً مستقراً. أما الدول التى لم تعمد بعد إلى اختيار استراتيجيتها بشأن التخلص من النفايات المشعة فهى تقوم حالياً بتخزين الوقود المستنفد، ومسايرة التطورات المرتبطة بالبدائل كافة.

ويوجد حالياً ما يربو على نصف قرن من الخبرة والتجربة مع تكنولوجيا تخزين الوقود المستنفد. وتعتبر كمية الوقود المستنفد صغيرة نسبياً: فالوقود المستنفد المنتج فى سنة واحدة بواسطة جميع المفاعلات الشغالة فى العالم ربما لايغطى سوى ملعب كرة قدم لعمق لا يتجاوز ١,٥ متر. ومن اليسير نسبياً إضافة قدرة تخزينية مزيدة، ولذا فليس هنالك سبب تقنى قوى للتعجيل بابتداع وتشغيل مستودع جيولوجى عميق. ولقد تكون هنالك أسباب سياسية ومعنوية جيدة لفعل ذلك، بيد أن التخزين يعنى أن السياسيين والجمهور لديهم الوقت لجدل لا ينقطع ولسبر غور الحل الأكثر تفضيلاً وتحديده لكل دولة. وحيثما يكون مقبولاً سياسياً يمكن النظر إلى التخلص تعددى الأوطان من النفايات المشعة بوصفه خياراً أكثر فعالية من حيث التكلفة على نحو محتمل، على الأخص للدول الصغيرة ذات البرامج النووية الخفيفة ومواقع الاستيداع المحدودة .

ولقد أحرزت برامج التخزين الفنلندية والسويدية والأمريكية أكبر تقدم حتى الآن لكن أحداً من غير المحتمل أن يكون لديه مستودع نفايات نووية فى التشغيل الفعلى قبل عام ٢٠٢٠ بكثير، فكل من هذه البرامج قد صممت لتعزل النفايات عن البيئة المحيطة عن طريق سلسلة من الحواجز المصممة هندسياً، والطبيعية، على نحو ما

يتضح فى البرنامج السويدى؛ فالغلاف أو الحاجز الأول هو بيت أو رَحِم النفايات وحزمة النفايات الأولية (كريات الوقود الصلبة فى الحالة السويدية، وغلاف أو كسوة قضيب الوقود)، والغلاف الثانى هو حواجز إضافية مشكلة هندسياً (علب نحاسية محكمة الغلق بحشوات حديدية مصبوبة ملفوفة بطينة خزفية تغلفها من جوانبها كافة)، أما الغلاف الثالث فهو التشكيل الجيولوجى المضيف (صخر القاع المتبلور فى حالة السويد) المختار لاستقرارية جيولوجية مؤكدة على مدى مئات الملايين من السنين، وخصائص جيوكيميائية مواتية (محبذة)، وحركية مياه محدودة.

والواقع أن تصريف النفايات النووية هو مجال ترتاد فيه القوى النووية عموماً البدائل والمرادفات. كذلك فالنفايات النووية صغيرة فى حجمها تُحْجَز بإحكام وتُرَاقب عن كثب، على خلاف النفايات الصلبة والسامة المتخلفة عن سلاسل الوقود الأخرى. يضاف إلى ذلك أن تكلفة احتواء وتخزين وتصريف النفايات النووية مشمولة فى غالبية الدول فى سعر الكهرباء المولدة. وتتضمن هذه النفقات المستدخلة تكلفة إدارة النفايات، وتصريفها فى مستودعات تخزين طويلة المدى، وكذا تكهين المحطة فى نهاية عمرها التشغيلى.