

الفصل الرابع

الإمداد بالطاقة

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

- ١- تكنولوجيات مختلفة مطلوبة لمقابلة احتياجات متباينة، وأحد أمثلتها التكنولوجيات المطلوبة للنهوض بالقوى الكهربائية لحمل الأساس base load power بالتباين مع القوى الكهربائية لحمل الذروة peak power، أو لمقابلة الطلب المكثف على الكهرباء في المدن المليونية megacities في مقابل القوى الكهربائية خارج الشبكة للمستهلكين الصغار بالمناطق النائية.
- ٢- تطور الإمداد بالطاقة غير متكافئ، والتكنولوجيات الجديدة تحل محل القديمة منها في نوبات وابتداءات.. وفي 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 الطاقة لديها على نحو متزامن.. فقط لتحافظ بمواكبتها للطلب المتنامي على الطاقة لديها.

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

وتعتبر المقايضات أو التوازنات فيما بين القضايا المتعددة كمخاطر الحوادث الكبرى، والكهرباء الرخيصة، والتلوث، وفرص العمل، والاعتماد على الاستيراد، والتغير المناخي.. هي، سلى الأقل جزئياً، مسألة أفضليات شخصية ووطنية؛ ولذا فهي جوانب للاختلافات القانونية حتى لو تعين على كل فرد أن يتفق بشأن كل 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 فهناك 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 تشغيلاً بالولايات المتحدة الأمريكية تجديداً لتراخيصهم أو تقدموا لطلب التجديد أو أقروا باعترامهم 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 إتاحة 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 للتتظيمات القائمة، ولذا فأى تغيير 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 الكهربائية 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

منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية/ وكالة الطاقة الذرية/ الوكالة الدولية للطاقة	معهد بحوث الطاقة الكندي (كندا) (١)	وزارة الاقتصاد والتجارة والصناعة (اليابان) (٢)	وزارة الاقتصاد والمالية والصناعة (فرنسا) (٣)	الأكاديمية الملكية للهندسة (بريطانيا) (٤)	جامعة شيكاغو (٥)	معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا MIT (٦)	
سنت أمريكي/ كيلوات ساعة (٧)	سنت أمريكي/ كيلوات ساعة (٨)	سنت أمريكي/ كيلوات ساعة (٩)	سنت أمريكي/ كيلوات ساعة (١٠)	سنت أمريكي/ كيلوات ساعة (١١)	سنت أمريكي/ كيلوات ساعة (١٢)	سنت أمريكي/ كيلوات ساعة (١٣)	التكلفة المسواة (١٤)
6.9-2.1	7.5-4.4	5.0	3.6	4.2	7.1-4.1	6.7	النوية
6.9-1.6	4.9-4.0	5.3	4.4-4.1	6.4-4.6	4.1-3.3	4.2	الفحم
6.4-3.8	6.3-6.0	5.8	4.5	5.2-4.1	4.5-3.5	5.6-3.8	الغاز الطبيعي
-	-	10.0	-	-	-	-	النفط
24.2-4.0	-	-	-	-	-	-	القوى الهيدروكهربائية
-	-	-	-	12.5	-	-	سبلة الدواجن
14.4-3.1	-	-	-	9.9-6.8	-	-	الرياح السطحية
12.3-5.2	-	-	-	13.3-10.1	-	-	الرياح البحرية
-	-	-	-	12.2	-	-	الأمواج/قوة البحر
137.6-12.1	-	-	-	-	-	-	الفوتوفولطيات الشمسية
دولار أمريكي/ كيلوات	دولار أمريكي/ كيلوات	دولار أمريكي/ كيلوات	دولار أمريكي/ كيلوات	دولار أمريكي/ كيلوات	دولار أمريكي/ كيلوات	دولار أمريكي/ كيلوات	التكلفة الراهنة لوحدة القدرة المركبة (١٥)
2510-1074	2491-1968	2614	1823	2119	1800-1200	2000	النوية
2347-719	1341	2548	1419-1290	1511-1345	1460-1182	1300	الفحم
1292-424	596	1536	652	553	700-500	500	الغاز الطبيعي
-	-	2520	-	-	-	-	النفط
6985-1541	-	-	-	-	-	-	القوى الهيدروكهربائية
-	-	-	-	1390	-	-	سبلة الدواجن
1634-976	-	-	-	1364	-	-	الرياح السطحية
2622-1637	-	-	-	1695	-	-	الرياح البحرية
-	-	-	-	2580	-	-	الأمواج/قوة البحر
10164-3363	-	-	-	-	-	-	الفوتوفولطيات الشمسية

(١) معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا MIT (2003) .

(٢) جامعة شيكاغو (٢٠٠٤).

(٣) الأكاديمية الملكية للهندسة (٢٠٠٤) .

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

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

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

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

(٧) منظمة التعاون الاقتصادي 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 المسواة للكهرباء هي السعر على قضبان التوصيل (موصلات التوزيع العمومية) المطلوب لتغطية تكاليف التشغيل مضافا إليه الحصة السنوية من التكلفة الرأسمالية لمحطة القوى الكهربائية.

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

(١٠) تكلفة الأسم the Overnight Cost هي المبلغ الذي يدفع إذا جرت جميع النفقات الرأسمالية في آن واحد، وهي لا تتضمن تكلفة (مصروفات) الفائدة على رأس المال.

المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية، 2006.

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

الدولة	معدل الخصم	الاستثمار (%)	التشغيل والصيانة (%)	الوقود (%)	التكلفة الإجمالية سنت/كيلوات 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 هي تلك التكاليف التي يعانيتها العامة (مثل تكاليف الرعاية الصحية بسبب محطة قوى كهربية شديدة التلوث) التي لا يتعين على المستفيدين المباشرين (من توليد الكهرباء كمالكي المحطة وعملاتهم) أن يدفعوها .

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

ورغم التقدم المنوه عنه توأ 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 لإحرازه في حالة غازات الدفيئة (GHGs)^(١) لمقابلة غايات الاتفاقية الإطارية للأمم المتحدة المعنية بتغير المناخ UNFCCC التي تقضى بتثبيت التركيز الجوي لغازات الدفيئة "عند مستوى يتسنى بمقتضاه منع التداخل الأنثروبولوجي الخطير مع النظام المناخي".

ورغم أن مستثمري القطاع الخاص يتخذون قراراتهم على نطاق واسع بالتأسيس على التكاليف المستدخلة فإن المستثمرين الحكوميين وصانعي السياسات ربما يرغبون في اتخاذ قراراتهم تأسيساً على التكاليف المستدخلة مضافاً إليها أية تكاليف خارجية متبقية. بيد أن التكاليف الخارجية قد يكون من الصعب تكيمها 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 في 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 كبيرتين أجريتا تحت المشروع البحثي "إكستيرن-إي" Extern-E (معهد بول شيرر ٢٠٠١، والمفوضية الأوروبية ٢٠٠٣، وفريدريش ٢٠٠٥).^(٥)

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

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

المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية، ٢٠٠٦.

جدول رقم (٦) - ملخص للتكاليف الخارجية بجمهورية ألمانيا تأسيساً على التكنولوجيات المتوقع أن تكون متاحة عام ٢٠١٠ (وفقاً لفريدريش Fredrich عام ٢٠٠٦)

التكنولوجيا	قوى الرياح البحرية	القوى الهيدرو كهربية	الالات الترددية	الخلايا الفوتو فلطية	بالترينيك الغازية	الدورة المركبة	للحرارة والكهرباء	التوليد المشترك	خلايا الوقود	تكاملية بالليجنيت	تكاملية بالبحر	دورة مركبة منفردة	دورة مركبة منفردة	محطات القوى بالفحم ذات السعة المعبدة
التكلفة الخارجية (يورو سنت/ كيلوات ساعة)	٠,٢	٠,٢٥	٠,٣	٠,٤٥	١,١	١,٦	١,٦	١,٩٥	٢,٥	٢,٥	٢,٥	٢,٥	٢,٣	

المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية، ٢٠٠٦.

(٥) (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 تستدعي اهتمامات مماثلة كانت محط الاهتمام خلال برامج التوسعات النووية لكل من فرنسا واليابان في زمن الصدمات النفطية أثناء السبعينيات. فالمضار (الخسارات) والهموم المرتبطة بالإمداد القومي غير المؤمن للطاقة تشكل تكلفة خارجية غير مرئية على نطاق واسع لأي مستثمر في سوق طاقة محررة. ولمعظم الدول يزيد التوسع في القوى النووية من تنوعية إمداداتها بالطاقة، ويزيد بالتالي أمن هذه الإمدادات.. بل أكثر من ذلك تحتاز القوى النووية خاصيتين مميزتين تزيدا في مرونتها:

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

وثانيتها: أن الوقود الأساسي - اليورانيوم - متاح في طائفة متنوعة من الدول المنتجة، بينما كميات ضئيلة هي المطلوبة فقط بما يجعل من الأيسر تأسيس مخزونات استراتيجية لليورانيوم. وفي 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 نسبياً يبقى متاحاً للدول التي تجدها ذا أهمية لديها.

■ مصادر الوقود النووي

يعتبر المدى الذي توجد فيه مصادر الطاقة محدوداً جزئياً بالطبيعة.. وجزئياً بالبراعة البشرية والاقتصاديات. و"المخزونات" أو "الاحتياطيات" Reserves هي ذلك الجزء الذي يمكن الوصول إليه من مصادر الطاقة بالأسعار القائمة والتكنولوجيا الراهنة. ولذا تعتمد المخزونات بصفة رئيسية على المدى الذي 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 "مناً محايداً" neutral stuff أو "سلعة متعادلة"؛ وعلى ذلك تستعاد المخزونات ثانية على نحو مستمر ليس بسبب إبداع مواد جديدة ولكن من خلال الطلب المتنامي، والتكاليف المتناقصة للإنتاج التي تحول "المتاع المحايد" إلى مخزونات.. وذلك حقيقياً لكل من المصادر المتناهية والمتجددة على السواء. غير أنه للمصادر المتناهية finite resources، خلافاً للمتجددة، يوجد حد نهائي يتم التوقف عنده.

وتشمل المصادر النووية كلا من اليورانيوم والثوريوم، حيث يوجد الأخير بوفرة تعادل ثلاثة أضعاف ما يوجد 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 لا تتجاوز 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 يضيف 10.1 مليون طن أخرى من اليورانيوم. ويلخص الجدول رقم (٧) الأمد 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 أعلى سعراً، أن الوقود المستخدم يعاد تدويره فى نهاية الاستخدام، بواسطة التكنولوجيات المتاحة اليوم، لاستخراج أكثر ما يمكن 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 تتراد عندئذ، على نحو كبير، جميع الأرقام الواردة فى الجدول رقم (٧)، إذ تشمل 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 إتاحة مخزون اليورانيوم العالمي للقوى النووية
(2006، IAEA-NEA/OECD)*

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

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 عقدي 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.

لا توجد 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.

واحدة من كبريات الاهتمامات بشأن التنمية المستدامة هى تجمع ثانى أكسيد الكربون CO₂ وغيره من غازات الدفيئة (GHGs) فى الغلاف الجوى، واحتمال حدوث التغير المناخى لجو الأرض بما ينذر به من عواقب وخيمة. وغازات الدفيئة الرئيسية هى ثانى أكسيد الكربون CO₂، والميثان CH₄، وأكسيد النيتروز N₂O.

■ الخصائص البيئية

■ ابتعاثات غازات الدفيئة

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

وقد بقيت جميع هذه الغازات عند تركيزات ثابتة نسبياً في الجو حتى بداية عصر الثورة الصناعية الأولى حوالي عام ١٧٥٠ ، عندما بدأت تركيزات ثاني أكسيد الكربون CO₂ في الزيادة في جو الأرض على نحو دراماتيكي .

وتبلغ التركيزات الحالية لثاني أكسيد الكربون CO₂ في الغلاف الجوي حوالي ٣٨٠ جزءاً في المليون (ppm) ، وهي مستمرة في الزيادة، ولذا تتغيا الاتفاقية الإطارية للأمم المتحدة المعنية بتغير المناخ UNFCCC تثبيت تركيزات غازات الدفيئة " عند مستوى يتسنى بمقتضاه منع التداخل الأنثروبولوجي الخطير مع النظام المناخي" (UNFCCC ، ١٩٩٢).

ومن بين البدائل المتاحة لتوليد القوى الكهربائية تقف التكنولوجيات الموقدة بالمصادر الأحفورية (الفحم والنفط والغاز الطبيعي) بين أعلاها في معدلات ابتعاثات ثاني أكسيد الكربون CO₂ لكل كيلووات ساعة، وهي تُكوّن غالبية ابتعاثات غازات الدفيئة المرتبطة بإنتاج الطاقة. ويظهر الجدول رقم (٨) معدلات الابتعاثات لمجمل دورة الوقود بما في ذلك مرفق الكهرباء ذاته، وتصنيع المعدات، واستخراج المصادر، والنقل، والمعالجة والتحويل.

جدول رقم (٨) - معدلات ابتعاثات ثاني أكسيد الكربون CO₂ لبدائل توليد القوى الكهربائية

التكنولوجيا	النوية	قوى الرياح	كهربة الهيدرو القوى	القوت فطرية الخلايا	الأحيائية الكتلة	التخزين .	المغز الفحم	الدورة المرجبة الغازية	بالغاز البخارية	بالنفط البخارية	بالفحم البخارية	البجبت
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 بالضحخ، تخزين الهواء المضغوط، افتناص الكربون وتخزينه.

المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية، ٢٠٠٦.

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

ويوضح الجدول رقم (٨) أن تثبيت تركيزات ثاني أكسيد الكربون CO₂ في الغلاف الجوي سيتطلب انخفاضات جسيمة في الانبعاثات من محطات القوى الكهربائية الموقدة بالمصادر الأحفورية، إما بتقليص انبعاثاتها مباشرة، بالاستخدام الأكثر كفاءة للطاقة، أو بالاعتماد بشكل أكبر على التكنولوجيات المتجددة والقوى النووية.

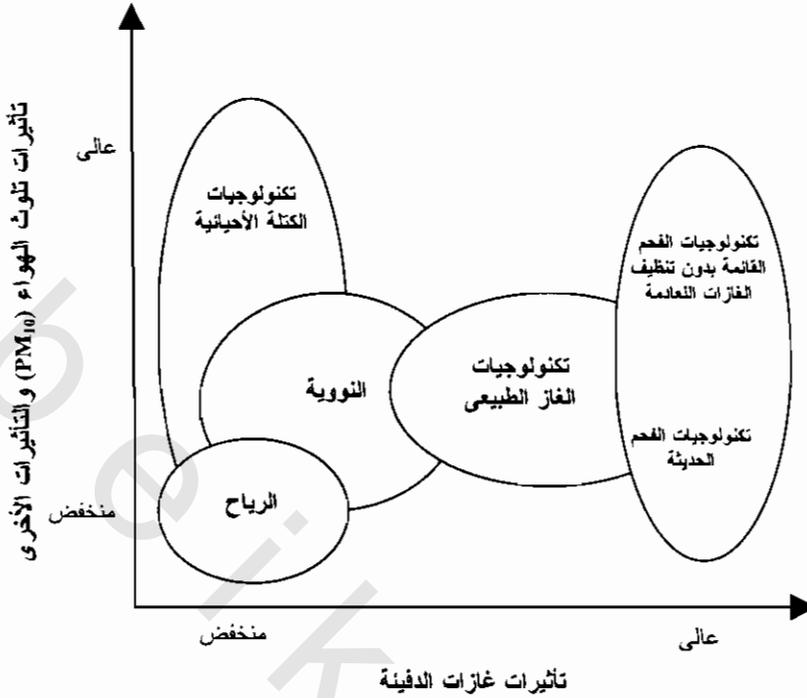
■ تلوث الهواء

لا يُتَّعَت عن مفاعلات القوى النووية - بصفة جوهرية - أي من الملوثات لتقليدية للهواء المصاحبة لاحتراق الوقود الأحفوري، لاسيما ثاني أكسيد الكبريت (SO₂)، وأكاسيد النيتروجين (NO_x)، والمواد الجزيئية العالقة (PM). ولا يُتَّعَت عنها كذلك أية مكونات - ولو غير محسوسة - من المعادن الثقيلة Heavy Metals، كالزرنينغ والزرنيق المصاحبين لاحتراق الفحم.

ويساهم كل من ثاني أكسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين في مرضانية البشر وفنائيتهم، كما يساهمان كذلك في تقليص إنتاجية المحاصيل، حيث أنهما معا المسبب الرئيسي للأمطار الحمضية. وبدورها تدمر الأمطار الحمضية الغابات، والنظم البيئية الأوسع، والغلات الزراعية، ومواد البناء، والعمائر والأبنية المشيدة. وتعتبر أكاسيد النيتروجين هي طليعة الأوزون الأرضي ونذيره التي لها تأثيرات صحية مضافة. والمواد الجزيئية التي تُتَّعَت على نحو مباشر، والتي تتكون كذلك في الهواء نتيجة لانبعاثات ثاني أكسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين، تزيد على نحو مباشر في مرضانية البشر وفنائيتهم .

ولقد تقلصت مستويات انبعاثات هذه الملوثات في العقود الأخيرة من جراء التحسينات التكنولوجية ومن خلال اقتناص الانبعاثات الملوثة واحتجازها من غازات المداخن.

ويعطى المقياس الرأسي للشكل رقم (١) مقارنة كيفية (وصفية) للتكنولوجيات المختلفة المستخدمة حالياً في الاتحاد الأوربي European Union .

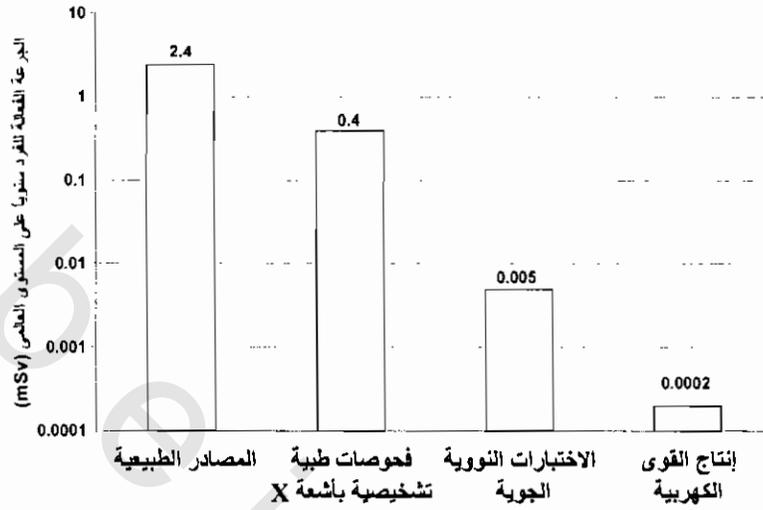


شكل رقم (١) - مقارنة نسبية للتأثيرات البيئية الناتجة عن ابتعاثات مختلف تكنولوجيات توليد القوى الكهربائية (الاتحاد الأوربي، ٢٠٠٣)

■ الإشعاع

يرتبط الإشعاع بمحطات القوى الكهربائية النووية والمحطات الكهربائية 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 الذي يعيش في نطاق ٥٠ ميلاً من محطة لتوليد القوى الكهربائية تدار بوقود الفحم جرعة متوسطة مقدارها ٠,٣ ميكرو Sv، بينما يتلقى الشخص الذي يعيش في نطاق ٥٠ ميلاً من محطة لتوليد الكهرباء بالقوى النووية ما مقداره ٠,٠٩ ميكرو Sv، وكلاهما أقل بكثير من ألف مرة من متوسط الجرعة التي يتلقاها الناس في الولايات المتحدة الأمريكية من أشعة إكس X-rays والإجراءات الطبية الأخرى، وأقل بكثير من عشرة آلاف مرة من متوسط الجرعة التي يتم استقبالها من الإشعاع الطبيعي المحيط Natural Background Radiation .

ويعطى الشكل رقم (٢) مقارنة عالمية، استناداً إلى بيانات اللجنة العلمية للأمم المتحدة المعنية بتأثيرات الإشعاع الذري United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)، تبين، على مقياس لوغاريتمي، أن الجرعة المتوسطة للإشعاع الصادر عن إنتاج القوى الكهربائية النووية هي 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 والأنتروبوجيني (أي الإشعاع من صنع الإنسان) (مأخوذة عن UNSCEAR ، ٢٠٠٠)

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

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

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

كانت إحداهما 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، في الوقت ذاته، نحو إحداث تغييرات كبرى، بما فيها تعميق أساسات "ثقافة الأمان" Safety Culture بالتحسينات المتواصلة، والتحليل الشامل المتعمق للخبرة المتحصلة، والتشارك في أفضل الممارسات best practices القائمة. ولقد تأسست الرابطة العالمية للمشغلين النوويين World Association of Nuclear Operators (WANO) على أثر تشرنوبيل، كما كوَّنت الوكالة الدولية للطاقة الذرية IAEA المجموعة الاستشارية الدولية للأمان النووي International Nuclear Safety Advisory Group وتساعد كلتاهما في نشر أفضل الممارسات، وتضيق (تشديد) إماميات الأمان، وترسيخ ثقافة الأمان في محطات القوى النووية حول العالم. كذلك فالاجتماعات الدورية لنظام وضع تقارير الأعراض الطارئة للوكالة الدولية للطاقة الذرية ووكالة الطاقة النووية التابعة لدول منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية IAEA-OECD/NEA - حيثما تناقش الأحداث الطارئة الراهنة أو المحتمل حدوثها وتحلل تفصيلاً- هي جزء آخر من هذه العملية العالمية لتبادل الخبرات. وتسعى الاتفاقية المعنية بالأمان النووي Convention on Nuclear Safety كذلك إلى تجميع الدول معاً لوضع تقارير حول الكيفية التي 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 للدرس المستفادة" lessons learned هي أقسام جوهرية من الحفاظ على التشغيل الآمن لمحطات القوى النووية وتقويته. وهناك شواهد تجريبية قوية على أن التعلم من الخبرة التشغيلية لمحطات القوى النووية قد قاد -وهو مستمر في القيادة- إلى تحسينات جمة في أمان المفاعلات. وهذه الثقافة الأمانية ما فتئت تدل على فعاليتها طوال ما يقرب من عقدين من الزمان. وإنه لذلك هو سجل الأمان الذي يزود بالأساس المتين تلك الدول التي تضع في اعتبارها حالياً تشييد محطات جديدة للقوى النووية.

■ التلخيص الأجل من النفايات

رُخصت المستودعات النهائية للنفايات ذات المستوى الإشعاعي الخفيض low level radioactive waste الصادرة عن محطات القوى النووية، والمتخلفة عن التطبيقات الطبية والبحثية وغيرها -وهي في التشغيل الفعلي حالياً- في عديد من الدول.. غير أنه لا يوجد مستودع في التشغيل الفعلي للتخلص النهائي من النفايات ذات المستوى الإشعاعي العالي (HLW) High Level Waste الصادرة عن المحطات المدنية للقوى النووية، رغم اتفاق المجتمعات العلمية والتقنية عموماً على أن مثال

هذه النفايات يمكن التخلص منها على نحو آمن في التكوينات الجيولوجية المستقرة Stable Geological Formations. وهناك مستودع جيولوجي 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. وتعتمد 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 كنفائيات ذات مستوى إشعاعى عالى، وذلك رغم أن الولايات المتحدة الأمريكية قد اقترحت وخرأ 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 تعتمد 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 لا يغطى 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 ولسير غور الحل الأكثر تفضيلاً وتحديدده 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 رجم 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 بطبقة 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 ترداد فيه القوى النووية عموماً البدائل والمرادفات. كذلك فالنفايات النووية صغيرة فى حجمها تُحجَز بإحكام وتُراقب 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.