وبدافع من متطلباتها الزهيدة من الوقود تشارك القوى الكهربية النووية فى تنويع الإمداد، وفى تأمين الإمداد كذلك، بيد أن التخوفات العامة حول الغزو الاقتصادى، وأمان المفاعل، ونقل وتصريف المخلفات المشعة، بل وانتشار الأسلحة النووية، قد أدت إلى كبح تنمية الطاقة النووية فى العديد من الدول، فحادثة نووية فى أى مكان من العالم أو مصادفة انتشار عارض مرتبطة بالقوى الكهربية النووية من شأنها أن تعمق تقليص الدعم المطلوب لبرامج القوى الكهربية النووية، مع فقدان طويل المدى للتنويع فى مزيج الإمداد بالطاقة. غير أنه إذا أمكن -بصفة عامة- أن توجد استجابات مقبولة للتخوفات السابقة، سيكون بمستطاع الطاقة النووية أن تسهم بفعالية فى تأمين إنتاج الكهرباء بأجزاء عديدة من العالم.

ويتعرض الأفراد والأعمال التجارية أيضاً للتأثر عكسياً بالتشرذم فى الإمداد بالطاقة، وعلى حين أدى الاتجاه نحو تحررية أسواق الطاقة إلى تعظيم أمن الطاقة بصفة عامة عن طريق تقديم خيارات أكثر، وإمدادات أوفر، وتنافسية أكبر، فقد أبرز كذلك تخوفات حول أولئك المعوزين والمفتقرين الذين سوف يهملون تماماً خارج السياق مما يسفر عن انعدام مستمر لأمن الطاقة لأعداد غفيرة من البشر.

موارد الطاقة والخيارات التكنولوجية

مصادر الطاقة

يشير التحليل الحصيف للإتاحية طويلة المدى لموارد الطاقة بدءاً بالمعتاد وغير المعتاد من النفط والغاز إلى أن هذه الموارد قد تدوم 50 – 100 عام أخرى – وربما لأعوام أطول – بالتكنولوجيات المعروفة للتنقيب والاستخراج، والتقدم التقنى المتوقع فى عمليات المنبت أو المنشأ (أى جانب الموارد). وتعتبر موارد الفحم والمواد النووية وفيرة جداً لدرجة أنهما بالإمكان أن يظلا باقيين، على الترتيب، لقرون أو لآلاف السنين؛ علاوة على ذلك، رغم أن أسعار الوقود الأحفورى ربما ترتفع ببطء على مر الزمن، فإن الزيادات الكبرى المساقة بالتكلفة فى أسعار الطاقة، والتى برزت فى

السبعينيات والثمانينيات، لن تحدث فى المستقبل المنظور. بيد أنه كما تبين من جراء ارتفاع أسعار النفط فى شتاء 2000/1999، تبقى الأسعار دائماً عرضة للتصعيد، وقد يقع ذلك – على سبيل المثال – إذا ما أقرت اتحادات المنتجين أسعاراً مستقلة عن تكاليف الإنتاج، كذلك يمكن توقع بعض الترجحات أو التقلبات فى الأسعار، على الأخص خلال الانتقال إلى الاستخدام واسع النطاق للموارد غير المعتادة للنفط والغاز، إذ قد لايتناظر توقيت الاستثمارات فى القدرات الإنتاجية فى جانب المنبت مع الطلب؛ وقد تبرز عوامل أخرى رافعة للأسعار من استخراج الموارد غير المعتادة للنفط على نحو بيئى أكثر تحدياً.

وتعتبر الموارد المتجددة للطاقة أكثر توازنا فى توزعها من الموارد الأحفورية والنووية، كما أن تدفقات الطاقة من الموارد المتجددة تربو على ثلاثة أضعاف الاستخدام العالمى الراهن للطاقة، غير أن الإمكانية الاقتصادية للمتجددات تتأثر بمحددات عديدة، بما فى ذلك الاستخدامات التنافسية للأرض، وكمية وتوقيت التشعع الشمسى، والاعتبارات البيئية، وطبائع الرياح.

ورغم أنه لاتوجد تحديدات فعلية على إتاحية الطاقة المستقبلية، من وجهة نظر الموارد، فإن وجود الموارد ليس ذا علاقة سوى على نحو واهن إذا لم تؤخذ فى الاعتبار الكيفية التى بمستطاع هذه الموارد أن تسهم بها فى الإمداد (جانب المصب) بخدمات الطاقة. والأحرى فإن الاعتبارات أو الهموم الرئيسية هى: هل يمكن للتكنولوجيات أن تستخرج وتجمع وتحول (إلى كهرباء) هذه الأرصدة الشاسعة للطاقة، وأن تطور تدفقاتها فى موعدها؟ وهل سيكون لهذه العمليات تضمينات مضادة أو معاكسة؟.. هل خدمات الطاقة المنتجة فى خاتمة المطاف من هذه الموارد يمكن أداء مقابلها؟ فالدلالة التاريخية تفترض أن هذه الاهتمامات (أو التخوفات) قد يمكن معادلتها على الأقل جزئياً بواسطة التقدم التكنولوجى، بيد أن مثل هذا التقدم بحاجة إلى التشجيع – من خلال التنظيمات التى تحسن من الأداء الأسواقى، وصور الدعم المؤقت، والحوافز الضريبية أو الآليات الأخرى – إذا ما قدر له أن يتحقق فى توقيته الأمثل بالأسلوب الملائم.

كفاءة الاستخدام النهائى للطاقة

إن بلوغ أسعار النفط أربعة أضعافها فى السبعينيات، وتنامى الوعى بالتلوث المرتبط بالطاقة، واحتمالية التغير المناخى، أسهمت جميعها فى إعادة تقييم استخدام الطاقة، والنتيجة هى تحسين محرز فى الكفاءة التى تستخدم بها الطاقة فى الصناعة، وإنتاج الكهرباء، متلما فى الإضاءة، والأجهزة المنزلية، والنقل، وكذا فى تسخين وتبريد المبانى. وهذا الاستخدام الأكثر كفاءة للطاقة هو عامل رئيسى مساهم فى التحسينات فى كثافة الطاقة التى حدثت تاريخياً تقريباً فى جميع دول منظمة التعاون الاقتصادى والتنمية، وحدثت على نحو أكثر حداثة فى عديد من الاقتصادات الانتقالية (أو المتحولة) متلما فى بعض الدول النامية ذات النمو السريع كالبرازيل والصين.

وتبلغ كفاءة الطاقة العالمية اليوم لتحويل الطاقة الأولية إلى طاقة مفيدة حوالى الثلث، وبكلمات أخرى.. يتبدد ثلثا الطاقة الأولية فى عمليات التحويل، غالبا كحرارة منخفضة الدرجة، كما أن فقودات أخرى مهمة تحدث عندما تمنح الطاقة النافعة خدمات الطاقة لطالبيها. على أنه توجد فرص اقتصادية عديدة ومختلفة لتحسينات كفاءة الطاقة، على الأخص فى الخطوة النهائية لهذا التحول من طاقة نافعة إلى خدمات طاقة. والإفادة من مزية هذه الفرص التى لقيت انتباها يسيرا نسبيا تنطوى على أكبر إمكانية لتحسينات الطاقة ذات التكلفة الفعالة، ويعنى ذلك خدمات طاقة أقل تكلفة، وتلوث وابتعاثات مرتبطة بالطاقة أقل كذلك.

وعلى مدى العشرين عاما القادمة يمكن خفض كمية الطاقة الأولية المطلوبة لمستوى معين من خدمات الطاقة بفعالية تكلفة مقدارها 25-35 فى المائة فى الدول الصناعية (الرقم الأعلى يمكن بلوغه بواسطة سياسات أكثر فعالية)، وتكون هذه التخفيضات فى الغالب فى مرحلة تحويل الطاقة النافعة إلى خدمات طاقة فى القطاعات المنزلية والصناعية، وقطاع النقل، والقطاع العام والقطاع التجارى؛ حيث يتسنى الإدراك فعال التكلفة لتخفيضات تربو على 40 فى المائة فى الاقتصادات الانتقالية، كما تتراوح إمكانات التحسينات ذات التكلفة الفعالة فى معظم الدول النامية – التى تجنح إلى احتياز نمو اقتصادى مرتفع، مع استبقاء الرصيد العتيق للثروة (المنشآت والمعدات القديمة) ورصيد المركبات القديمة (السيارات المتقادمة) – من 30 إلى أكثر من 45 فى المائة، بالقياس إلى كفاءات الطاقة المحرزة برصيد الثروة القائم.

إن تحسينات بحوالى 2 فى المائة سنوياً يتم تضمينها بواسطة الأرقام أعلاه يمكن أن تتدعم بواسطة التغيرات الهيكلية فى الاقتصادات الصناعية والمتحولة من خلال ارتحالات نحو إنتاج صناعى أقل فى كثافة الطاقة، وبتأثيرات تشبعية فى القطاع المنزلى وقطاع النقل، وهذه التأثيرات المركبة المتأتية بواسطة تحسينات الطاقة والتغيرات الهيكلية من شأنها أن تقود إلى تخفيضات فى كثافة الطاقة بمقدار 2.5 فى المائة سنوياً. أما كم يمكن إدراكه من هذا الإمكان الكامن فيعتمد على فعالية الأطر والإجراءات السياساتية، والتغيرات فى التوجهات والسلوك، ومستوى النشاط الخاص على نطاق المشروعات الصغيرة فى ترشيد الطاقة.

ومن المحتمل أن تشهد العقود القليلة القادمة عمليات صناعية جديدة، ونظم محركاتية (موتورية)، ومواد، ومركبات، وأبنية، تصمم أساساً لتقليص الطلب على الطاقة النافعة. كذلك حيث من المتوقع أن ينمو الطلب على السيارات سريعاً فى العالم النامى، فإن اكتساب كفاءات أكبر فى هذا المجال سيكون مهماً للغاية، فضلاً عن أن الدول سريعة التصنيع (المتحولة سريعاً إلى "صناعية") يمكنها أن تفيد على نحو كبير من إدخال التكنولوجيات الجديدة والأكثر كفاءة جذرياً فى هياكل البنية الأساسية القائمة لديها لمعاملة المواد بطريقة مكثفة للطاقة. وحيث أن هذه الدول لاتزال تشيد الهياكل الفيزيقية لبنيتها الأساسية فهى تنطوى على طلب متنامى على المواد الأساسية، مما يتيح الفرصة لتجددية كفاءات الإنتاج وتحسينها على الأخص فى الدول التى تعانى مخاض التشكل الأسواقى، والفرص أكبر عند منعطف الاستثمار الجديد بالقياس إلى إعادة التأهيل.

وعلى المدى الطويل تصير المكاسب الإضافية والدراماتيكية فى الكفاءة ممكنة فى كل مراحل تحويل الطاقة، على الأخص من الطاقة النافعة إلى خدمات الطاقة، ويظهر التحليل أن التكنولوجيات الراهنة لم تقارب بعد الوصول إلى حدودها النظرية، وأن التحسينات ذات الرتبة الأعلى لمجمل منظومة الطاقة قد يتسنى إحرازها فى النهاية.

ولعديد من الأسباب، فإن الإمكانات التقنية والاقتصادية الكامنة لكفاءة الطاقة، وكذا تأثيراتها الإيجابية على التنمية المستدامة، قد قدرت -تقليدياً- بأقل من قيمتها الفعلية. والواقع أن إحراز كفاءة استخدام نهائى أعلى يتضمن تنوعاً كبيراً من الخيارات التقنية والأطراف المشاركين. كذلك فمن حيث هى نشاط غير مركزى وانتشارى ومتشعب تصبح حقاً قضية يصعب تنظيم المساندة والدعم اللازم لها، ولكونها غير محسوسة أو ذات منظورية ضئيلة أيضاً لاتشكل كفاءة الطاقة عموماً علة شعبية أو اهتماماً جماهيرياً لدى السياسيين ووسائل الإعلام، أو الأفراد الذين يتطلعون إلى حظوة الاعتبار والمكانة. يضاف إلى ذلك أن حواجز خطيرة – التشوهات الأسواقية فى الأساس التى يمكن قهرها بالوسائل السياساتية المستهدفة – تعوق إدراك الكفاءات الأكبر للاستخدام النهائى، وتتضمن هذه الحواجز اللاتيقنية حول أداء الاستثمارات فى التكنولوجيات الجديدة والكفء من زاوية الطاقة، والتكلفة الابتدائية الكبيرة الملحوظة فى للتكنولوجيات الأكثر كفاءة، وأنماط وعادات المستهلكين، والمشغلين، وصانعى القرار، التى قد تتأثر بعوامل عديدة بما فى ذلك تصورات المكانة الاجتماعية، والقواعد المهنية.

إن إدراك الإمكانات فعالة التكلفة لكفاءة الطاقة سوف يكون مفيدا ليس فقط لمستهلكى الطاقة المنفردين، ولكن أيضا للاقتصاد ككل؛ وعلى سبيل المثال يمكن استخدام تكاليف الطاقة التى يتسنى توفيرها لإنتاج بضائع وخدمات محلية موفرة للطاقة، وكلما أدركت تحسينات الطاقة ذات التكلفة الفعالة سيستمر إيجاد فرص ربحية إضافية للتحسينات كنتيجة للبحث والتطوير، وخبرات التعلم، واقتصاديات الحجم. ويعنى ذلك أن التحسينات فعالة التكلفة لكفاءة الطاقة يمكن توقعها. وتعتبر سياسات كفاءة الطاقة التى تستخدم آليات سعرية مباشرة أو غير مباشرة (مثل إلغاء أشكال الدعم وتضمين العوامل الخارجية) فعالة فى تخفيض توجهات الاستهلاك فى القطاعات والتطبيقات ذات الحساسية السعرية. ولكن حتى بدون تغيير البيئة السعرية الإجمالية فإن سياسات كفاءة الطاقة يلزم السعى إليها والجد فى طلبها لتوضيح الإخفاقات الأسواقية. وعلى سبيل المثال يمكن لإماميات (المواصفات القياسية) الكفاءة، وبطاقات توصيف الأجهزة والمنتجات، والاتفاقات الطوعية، والتدريب

التخصصى أو إبرام التعاقدات، أن تزيد نمو الناتج المحلى الإجمالى عن طريق تحسين الأداء البيئى والاقتصادى باستخدام قدْر معين من الطاقة. والواقع أن الإماميات القانونية، والمستهلكين المزودين بالمعلومات على نحو جيد، والمخططين، وصانعى القرار، والمشغلين ذوى الدافعية العالية، ونظم المدفوعات الكافية للطاقة.. تعتبر جميعها أموراً مركزية للتنفيذ الناجح لتحسينات كفاءة الطاقة.

تكنولوجيات الطاقة المتجددة

تحمل مصادر الطاقة المتجددة (بما فى ذلك الكتلة الأحيائية، والشمس، والرياح، وحرارة باطن الأرض، والقوى المائية) التى تستخدم الموارد المحلية إمكانات كامنة للإمداد بخدمات طاقة ذات ابتعاثات صفرية أو مقاربة للصفر لكل من ملوثات الهواء وغازات الدفيئة، وتوفر المصادر المتجددة للطاقة حالياً 14 فى المائة من إجمالى الطلب العالمى على الطاقة، وهو إمداد تغلب عليه الكتلة الأحيائية التقليدية التى تستخدم للطهى والتسخين على الأخص فى المناطق الريفية بالدول النامية.

وتوفر القوى المائية ذات المقياس الكبير 20 فى المائة من الكهرباء العالمية، ويعتبر مداها المنظور للتوسع محدوداً فى الدول الصناعية، نظراً لبلوغها سعتها الاقتصادية تقريباً، بينما لاتزال توجد أمامها فى الدول النامية إمكانية جديرة بالاعتبار، إلا أن المشروعات الهيدروكهربية الكبرى قد تواجه بمحددات تمويلية وبيئية واجتماعية عديدة.

ولقد ساهمت مصادر الطاقة المتجددة الجديدة جميعها مجتمعة بمقدار 2 فى المائة من الاستهلاك العالمى للطاقة عام 1998، مشتملة فى ذلك على 7 إكساجول (إكساجول = 10^{18}) من الكتلة الأحيائية الحديثة، و 2 إكساجول لجميع المتجددات الأخرى (طاقة حرارة باطن الأرض، وطاقة الرياح، والطاقة الشمسية، وطاقة البحار، والقوى المائية المصغرة). وتتنامى الفوتوفلطيات الشمسية، والقدرات المركبة لقوى الرياح المرتبطة بالشبكات الكهربية بمعدل 30 فى المائة سنوياً، ورغم ذلك فستمر عقود على الأرجح قبل أن تضيف هذه المتجددات الجديدة جزءاً رئيسياً للاستهلاك العالمى للطاقة، إذ تمثل حالياً نسبة مئوية ضئيلة كالمذكورة أعلاه.

ولقد أسفرت التقليصات السعرية الجسيمة فى العقود القليلة الماضية عن جعل بعض المتجددات منافسة مع الوقود الأحفورى فى عدد من التطبيقات فى الأسواق المتنامية، فالأشكال الحديثة الموزعة من الكتلة الأحيائية ترى على وجه الخصوص واعدة بموجب إمكاناتها فى إمداد المناطق الريفية بأشكال نظيفة من الطاقة، استناداً إلى استخدام موارد الكتلة الأحيائية التى طالما استخدمت تقليدياً بطرق غير كفء وملوثة، فالكتلة الأحيائية يمكن إنتاجها اقتصادياً بالحد الأدنى من التأثيرات البيئية أو حتى بتأثيرات بيئية موجبة من خلال المحاصيل المعمرة، كذلك تبدو قوى الرياح فى المناطق الساحلية وغيرها من الأماكن التى تنشط فيها الرياح واعدة هى الأخرى.

وعلى خلاف القوى المائية، والمصادر المعتادة للقوى الحرارية، فإن الرياح والمصادر الحرارية الشمسية أو الكهربية الشمسية هى مصادر متقطعة؛ ومع ذلك فهى بإمكانها أن تكون مصادر مهمة للطاقة فى المناطق الريفية حيثما يكون تمديد الشبكات أمرا مكلفا، كما أنها بمستطاعها أن تسهم فى إمدادات الكهرباء المرتبطة بالشبكة فى تكوينات مزدوجة أو مختلطة ملائمة. على أن المتجددات المتقطعة يمكنها أن توفر – على نحو يعول عليه – 10-30 فى المائة من الإمدادات الكلية للكهرباء إذا تم تشغيلها بالترابط مع القوى الهيدروكهربية أو مقترنة بالقوى المولدة من أساس وقودى. وتقدم الإمكانات البازغة والاستراتيجيات الجديدة لتشغيل الشبكات وعدا بأن دور التكنولوجيات المتقطعة يمكن أن يكون أكبر بكثير.

وتقف فى طريق التنمية المعجلة للتكنولوجيات المتجددة حواجز رئيسية، يمكن مجاوزتها بأطر العمل والسياسات الملائمة، وتشمل هذه الحواجز المخاطر الاقتصادية، والعقبات التنظيمية، والإتاحية المحدودة للمنتجات، والفجوات المعلوماتية والتكنولوجية، والافتقار إلى الاستثمار. على أن أكبر التحديات هو التحدى التمويلى، رغم أن التكاليف مالت إلى الانخفاض بدرجة كبيرة على مدى عدة العقود الماضية.

وتعتبر العديد من التكنولوجيات المتجددة، من واقع مقياسها (حجمها) الصغير وموديوليتها (نمطيتها)، مرشحا جيدا لاستقطاعات مستمرة فى التكلفة كنتيجة

للخبرة الحقلية، وهذه التخفيضات لتكلفة السلع المصنعة، والتى تكون - طبقا للحالة النمطية - سريعة فى البداية ثم تتضاءل ببطء حتى تستقر كلما تعمقت الصناعة ونضجت قد أسفرت عن انحدارات فى التكاليف على اتساع الصناعة بحوالى 20 فى المائة لكل ازدواج (تضاعف) تراكمى لإنتاج الفوتوفلطيات الشمسية، ومولدات الرياح، والتربينات الغازية - بموجب تأثيرات التعلم، والتحسينات التكنولوجية الحدية، واقتصاديات الحجم (أى المقياس الكبير)، كذلك من المتوقع حدوث انحدارات مشابهة للطاقات المتجددة (المتجددات) الأخرى على المقياس الصغير.

إن توسعا عاجلا لنظم الطاقة ذات الأساس المتجدد يتطلب بالضرورة إجراءات لحفز السوق فى هذا الاتجاه، وهذا التوسع من المستطاع إحرازه باكتشاف الطرق التى تساق بمقتضاها التكلفة النسبية للمتجددات فى الاتجاه الهابط فى مراحلها المبكرة للتحسن والانتشار التجارى، فى الوقت الذى يستمر فيه الأخذ بميزة الكفاءة الاقتصادية لعالم التجارة (أى للسوق)، إذ سيؤدى التسعير المؤسس على التكاليف الكلية لمصادر الطاقة المعتادة (مشتملة على اسقاط الدعم واستدخال تكاليف المؤثرات/ العوامل الخارجية) إلى جعل المتجددات أكثر تنافسية، ونظرا لأن استدخال التكلفة الخارجية ربما يبقى مثيرا للجدل لفترة، فإن التسعير "الأخضر" للكهرباء والحرارة (الذى من شأنه أن يوجه المستهلكين ليدفعوا أكثر لإمدادات الطاقة الحميدة بيئيا إذا قدر لهم أن يختاروا) قد يكون خيارا فوريا فى الدول الصناعية.

التكنولوجيات المتقدمة للطاقة

- **الطاقة الأحفورية**

تشير أغراض المستدامية إلى أهمية تطور تكنولوجيات الطاقة الأحفورية تجاه الهدف طويل المدى الذى يتغيا تلوث هواء وغازات دفيئة مقاربة للصفر بدون تكنولوجيات تحكم طرفية معقدة، ويتوجب أن تدعم التكنولوجيات والاستراتيجيات قريبة المدى هذه الغاية على المدى الطويل.

ولعل الثورة التكنولوجية المنجزة حاليا فى توليد القوى الكهربية، حيث تحل النظم المتقدمة محل تكنولوجيات التربينات البخارية، أن تدعم هذا الغرض طويل المدى، فالدورات المركبة الموقدة بالغاز الطبيعى التى تقدم تكاليف منخفضة، وكفاءة عالية، وتأثيرات بيئية متدنية، يتم اختيارها حيثما يتاح الغاز الطبيعى فعلا – فى بعض الدول حتى لو اقتضى الأمر العدول عن مشروعات القوى المائية الجديدة الكبرى، كذلك فالتوليد المشترك (للحرارة والكهرباء) هو أكثر فعالية من حيث التكلفة، وبإمكانه أن يؤدى دورا أكبر بكثير فى اقتصاد الطاقة – إذا ما تأسس على التربينات الغازية والدورات المركبة أكثر منه على التربينات البخارية.

وتعتبر الآلات الترددية، والتكنولوجيات البازغة للميكروتربينات وخلايا الوقود هى أيضا مرشحة بقوة للتوليد المشترك على المقياس الأصغر، بما فى ذلك الأبنية التجارية والسكنية. كذلك فإن تغويز الفحم بالأكسدة الجزئية مع الأكسجين لإنتاج السينغاز (أى الغاز المخلق المركب كيميائيا) (بصفة رئيسية أول أكسيد كربون وهيدروجين) يجعل فى الإمكان الإمداد بالكهرباء من خلال محطات دورة مركبة مغوزة تكاملية integrated gasifier combined cycle (IGCC) بابتعاثات ملوثات هواء منخفضة كنظيرتها فى الدورات المركبة بالغاز الطبيعى؛ واليوم صارت القوى الكهربية من محطات التوليد المشترك ذات الدورة المركبة المغوزة التكاملية تنافسية فى الأغلب مع القوى الكهربية من محطات الكهرباء البخارية بالفحم، سواء فى صور التوليد المشترك أو فى نظم إنتاج القوى الكهربية فقط.

ومن المحتمل أن تنجم الأسواق المتسعة أمام أنواع الوقود المختلفة النظيفة من تشديد تنظيمات وقوانين تلوث الهواء، كذلك سوف يتأسس الوقود المخلق المصنوع خلال التوليد المتعدد على الغاز الطبيعى إذا كان متاحا بالفعل، كما أن المقطرات الوسيطة المختلفة المنتجة هكذا من المحتمل أن تكون تنافسية حيثما يكون الغاز الطبيعى منخفض التكلفة متاحا (كما فى المواقع البعيدة بالدول النامية)، وقد تيسر التكنولوجيا استغلال حقول الغاز الطبيعى البعيدة الصغيرة نسبيا.

ويعتبر التوليد المتعدد المؤسس على تغويز الفحم فى المناطق المفتقرة للغاز الطبيعى ولكنها غنية بالفحم من الأمور الواعدة، فمثل هذه النظم قد تشتمل على إنتاج سينغاز زائد للتوزيع من خلال شبكات الأنابيب لنظم التوليد المشترك ذات المقياس الصغير فى المصانع والمبانى – فتجعل بذلك الاستخدام النظيف والكفء للفحم ميسورا على المقياسين الصغير والكبير سواء بسواء. وتجرى الفاعلية المتنامية للتوليد المتعدد سريعة بالفعل فى مجراها فى عديد من الدول تأسيسا على تغويز مخزونات التغذية البترولية منخفضة الجودة – وهى الفاعلية التى تعين على تعبيد الطريق للنظم ذات الأساس الفحمى.

أما الحواجز (العوائق) أمام الانتشار العريض الواسع للتوليد المشترك المتقدم ونظم التوليد المتعدد فهى مؤسسية بالدرجة الأولى؛ ومعظم النظم ستنتج كهرباء أكبر بكثير مما يمكن أن يستهلك فى الموقع ذاته، وبالتالى فإن إحواز اقتصاديات موائية يعتمد على توافر القدرة على بيع الكهرباء المنتجة تشاركيا بأسعار تنافسية للشبكات الكهربية، بيد أن سياسات مرافق الكهرباء طالما جعلت فى الأغلب تحقيق ذلك أمرا صعبا، ولكن تحت الظروف التنافسية للأسواق، التى تتطور النظم الكهربية صوبها فى مناطق عديدة، ينتظر أن تسير نظم التوليد المشترك والتوليد المتعدد غالبا سيرا حسنا.

إن السعى قريب المدى للاستراتيجية المؤسسة على السينغاز قد يستحوذ على الطريق نحو الاستخدام الواسع للهيدروجين H2 كوسط حامل (ناقل) للطاقة، فالظاهر أنه لعقود عديدة قادمة ستكون أرخص الطرق لجلب الهيدروجين H2 هى السينغازات (الغازات المخلقة) المشتقة من الوقود ذى الأساس الأحفورى. وستيسر التنمية الناجحة لخلايا الوقود إدخال الهيدروجين H2 مجال الطاقة، إذ تستقطب خلايا الوقود يوما فيوما اهتماما زائدا، على الأخص فى مجال النقل، لأنها تقدم كفاءة عالية وابتعاث ملوثات هواء مقاربة للصفر. ويتسابق صناع السيارات لتطوير سيارة بخلايا الوقود يستهدف دخولها السوق خلال الفترة 2003-2005، حيث ستتنافس سيارة خلايا الوقود هذه على الفوز بدور "سيارة المستقبل" مع السيارة المدارة بطاقة مزيجة من آلة الاحتراق الداخلى والبطارية.

وتيسر استراتيجيات القوى المؤسسة على السينغاز مع إنتاج الهيدروجين H2 أيضا فصل وتخزين ثانى أكسيد الكربون CO2 من نظم الطاقة الأحفورية فتجعل من الحصول على طاقة نافعة بابتعاثات غازات دفيئة مقاربة للصفر أمرا ممكنا دون زيادات كبيرة فى تكاليف الطاقة. وترتأى البحوث الراهنة أن السعة العالمية لتأمين تصريف ثانى أكسيد الكربون CO2 فى خزانات جيولوجية يمكن أن تكون كافية للتخلص من ثانى أكسيد الكربون CO2 الناتج عن استخدام الوقود الأحفورى لمئات السنين، بيد أن بحوثا أكثر لاتزال مطلوبة للتأكد من ذلك.

على أن التكنولوجيات الأخرى المتقدمة (كالمحطات البخارية مفرطة الحروجة، والاحتراق فى المهد المميعة المضغوطة، والدورة المركبة المغوزة التكاملية الفحمية المؤسسة على الأكسدة الجزئية فى الهواء لتوليد القوى الكهربية، والتسييل المباشر للفحم لإنتاج أنواع الوقود المخلق) تتيح العديد من المزايا بالقياس إلى التكنولوجيات المعتادة، ولكن على خلاف التكنولوجيات المؤسسة على السينغاز فمثال هذه الخيارات قد لا تقدم فى الأمد القريب مسارات واضحة للهدف طويل المدى المعنى بابتعاثات مقاربة للصفر دون زيادات كبيرة فى تكاليف خدمات الطاقة.

• الطاقة النووية

تنهض الطاقة النووية على اتساع العالم بمقدار 6 فى المائة من الطاقة و16 فى المائة من الكهرباء، ورغم أنها تتسيد إنتاج الكهرباء فى بعض الدول فإن وعودها المبدئية لم تدرك بعد على نطاق واسع، ويقدر معظم المحللين أن مساهمة الطاقة النووية فى الطاقة العالمية لن تنمو – وربما تتضاءل خلال العقود الأولى للقرن الحادى والعشرين. وتبدو القوى الكهربية النووية أكثر تكلفة مما خطط لها فى الأصل، وتتزايد المنافسة أمامها كذلك من التكنولوجيات البديلة، وهناك دائما فقد فى الثقة العامة من جراء التخوفات المرتبطة بالأمان، وإدارة المخلفات المشعة، واحتمال انتشار الأسلحة النووية.

بيد أن القوى النووية بمستطاعها أن توفر طاقة دون ابتعاث ملوثات الهواء المعتادة وغازات الدفيئة، مما يجعلها تستحق الارتياد إذا أمكن للتكنولوجيا المتقدمة أن تطرح على نحو متزامن تكاليف أقل، وتعزيزا للثقة العامة فى

أمان المفاعلات النووية، وتأكيداً بأن البرامج النووية السلمية لا تكرس لخدمة الأغراض العسكرية، كما تظهر فى الوقت ذاته ممارسات فعالة لإدارة المخلفات النووية. وعلى خلاف المفاعلات طراز تشرنوبيل فإن مفاعلات الماء الخفيف LWRs التى تسود الطاقة النووية على المستوى العالمى لها سجل أمان جيد – رغم أن هذا السجل قد تم إحرازه بتكلفة جسيمة لبلوغ الحد الأدنى من مخاطر الحوادث.

أما الرباط المحتمل بين الاستخدامات السلمية والعسكرية للطاقة النووية فلقد تم إدراكه منذ فجر العصر النووى، والجهود التى بذلت لإبداع نظام غير انتشارى من خلال اتفاقية حظر الانتشار النووى وسلسلة الاتفاقيات الإقليمية، والقيود على الاتجار فى المواد والسلع النووية التى قد تستخدم للطموحات العسكرية المستقبلية، وحصر استخدام المواد النووية فى التطبيقات النووية السلمية، نجحت جميعها على نطاق كبير فى فصل الاستخدامات السلمية عن العسكرية. وإذا قدر أن يكون هنالك مستقبل طاقة تساهم فيه القوى النووية أخيراً على نحو أكبر بكثير مما فى الوقت الحاضر فإن إجراءات مؤسسية أكثر قوة ستكون مطلوبة للإبقاء على هذا الفصل، وهذه الإجراءات يتوجب إتمامها بتقدم تكنولوجى يستهدف تقليص فرص احتياز الأسلحة النووية فى هيئة تطبيقات سلمية للطاقة النووية، واستلاب المواد النووية القابلة للاستخدام فى الأسلحة النووية.

ولقد تضمنت مناشط تنمية المفاعلات فى المدى القريب كلاً من مفاعلات الماء الخفيف التطورية والتوجهات الجديدة. ويقدم صناع المفاعلات الآن عديداً من مفاعلات الماء الخفيف الارتقائية (التطورية) بسمات أمان محسنة وتصميمات منمذجة (موحدة المقاييس) يمكنها أن تستحوذ على وثوقية عالية فى أن مستهدفات الأداء والتكلفة يمكن مقابلتها. وتشتمل فعالية ارتقائية (تطورية) أخرى على تعديل مفاعلات الماء الخفيف لجعلها أكثر مقاومة للانتشار على مستوى التسلح النووى من خلال دورات وقود يورانيوم أو ثوريوم ذوى طبائع معدلة (أى تم تغيير خواصهما الطبيعية)، ويقدم توجه آخر تحت التهذيب والمراجعة حالياً، وهو المفاعل الموديولى ذو المهد الحصوى،

إمكانية عالية للأمان الذاتى دون الحاجة إلى ضوابط أمان معقدة مكثفة لـرأس المال، والذى يمكن تشغيله فى الوقت ذاته على دورة وقـود اليورانيـوم أو الثوريوم المعدلة طبيعتهما على النحو المقاوم للانتشار النووى.

ومن المرجح أن يحدد المدخل إلى واردات اليورانيوم منخفضة التكلفة تنميـة القوى النووية المؤسسة على مفاعلات الماء الخفيف؛ وجدير بالذكر أن مفاعل البلوتونيوم الولود الذى يتطلب معاملة الوقود المستنفد لاستعادة البلوتونيوم من أجل إعادة تدويره فى وقود طازج (جديد)، كان يعتقد أنه خيار حيوى للدلالـة على هذا التحدى، بيد أن تكاليف الكهرباء من المفاعلات الولود من المقدر أن تكون أعلى منها لمفاعلات الماء الخفيف، على الأقل حتى زمن متـأخر فـى القرن الحادى والعشرين. ويتلبس حظر الانتشار النووى بتحد أكبر بكثير مـع إعادة المعاملة، وإعادة تدوير البلوتونيوم، عنه مع مفاعلات المـاء الخفيـف المشغلة على دورات الوقود أحادية التخلل.

أما الخيارات الأخرى طويلة المدى لمعالجة محددات المصادر النووية فـهى منظورات المفاعلات الولود البديلة التى تشتمل علـى المفـاعلات المسـاقة بالمعجل الجسيمى، واليورانيوم من ماء البحـر، والاندمـاج الـثرمونووى. والواقع أن التكاليف المنتظرة، والأمان، وسمات المقاومة للانتشـار النـووى لمثال منظورات هذه المفاعلات الولود البديلة تعتـبر غـير متيقـن منـها، فالمنظورات أو التصورات أو الرؤى قد تستغرق عقوداً لتنميتها.

وترتأى البحوث الراهنة أنه ربما يكون من المجدى استخراج اليورانيوم مـن ماء البحر عند تكلفة منخفضة نسبياً، حيث يكون تركيزه خفيضـاً غـير أن الكميات الإجمالية له وافرة. أما إذا قدر للتكنولوجيا أن تنتشر على مقـاييس كبيرة عالمياً فقد يكون من المجدى تجنب الانخراط فى التزامات كبيرة لإعادة معاملة الوقود النووى وإعادة تدوير البلوتونيوم، كذلك فالاندماج النووى قـد يوفر إمداداً بالطاقة غير قابل للنفاد تقريباً، بيد أنه من المرجح ألا يكون متاحاً على المستوى التجارى قبل عام 2050.

ويلزم أن تعزل المستخرجات الثانوية للمخلفات المشـعة للطاقـة النوويـة، وبالتالى لا يتسنى عودتها مطلقاً للبيئة الإنسانية فى تركيزات قد يتسبب عنـها