الفصل الرابع

استدامة موارد الطاقة
SUSTAINABILITY OF ENERGY RESOURCES

(٤,٠) التنمية الاقتصادية المستدامة
Sustainable Economic Development

كما طرح في الفصول الثلاثة السابقة فإن هناك نمواً مستمراً في الطلب على الطاقة، وهو ناتج عن النمو السكاني والتنمية الاقتصادية، فقد زاد الناتج المحلي الإجمالي بمعدلات تراوحت بين ٢٪ - ٥٪ / السنة. ويثير هذا النمو تساؤلاً عما إذا كان يمكن أن يستمر البحث عن الطاقة الوفيرة لمدة طويلة في المستقبل. ويصبح هذا التساؤل أكثر أهمية مع تسارع النمو الاقتصادي في العالم بأسره. إن أحد العوامل المهمة في دراسة هذه القضية هو إمكانية استدامة موارد الطاقة على المدى الطويل. وأصبحت هذه القضية أكثر تعقيداً مع حدوث تغيرات اجتماعية في تعريف التنمية الاقتصادية. كان التعريف المتفق عليه للتنمية الاقتصادية المستدامة منذ جيل مضى هو أنها التنمية التي يمكن أن تدوم إلى أجل غير مسمى دون أن تمر دورات من الرخاء والكساد. أما اليوم فتعريف التنمية الاقتصادية يتضمن بالإضافة إلى ذلك شرطاً وهو ألا يكون لها تأثير على وعينا البيئي والاجتماعي وألا تشكل عبئاً على الأجيال القادمة.

وقد أدى الوعي البيئي والاجتماعي، الذي يأخذ في الاعتبار الأهمية الإستراتيجية للطاقة، إلى عدد من الحلول التي تضمن توفر إمدادات كافية من الطاقة

تتسم بالاستدامة وبإمكانية التحكم فيها بطرق *معقولة*. وتفاوتت هذه الحلول من الملكية الخاصة المطلقة لإمدادات الطاقة إلى الاحتكار الحكومي المطلق. وكانت نتائج هذه الحلول متفاوتة بشكل ملحوظ، ففي بعض الحالات حدثت تغيرات متكررة بين الفلسفتين مع تغيرات الحكومات الناتج عن تناوب أحزاب سياسية معارضة لبعضها بعضاً على الحكم. وظهر توجه جديد في العديد من الدول اليوم يدعو إلى فلسفة "السوق التنافسي"، حيث يتقلص الدور الحكومي، إلا أن الطرق المثلى لضمان إمدادات طاقة مستدامة في عالمنا واسع التنوع لم يتم تحديدها بعد.

ويكمن التعقيد في بحثنا عن الطاقة الوفيرة من العدد الكبير من العوامل التي يجب أخذها في الاعتبار (ويجب كذلك الاتفاق عليها). ومن هذه العوامل: المشكلات التقنية، والقيود الاقتصادية، والاعتبارات البيئية، والمطالبة بالعدالة الاجتماعية. إن النظر في المشكلات التقنية أمر سهل نسبياً، فهي تغطي الجوانب الخاصة بإمدادات الطاقة، والتي تشمل تقنية دورة الوقود التي تضمن وصول كميات كافية من الطاقة للمستفيدين عند الطلب. كما تتضمن هذه الجوانب تحديد أنواع الوقود المتوفرة من حيث قاعدة الموارد والاحتياطيات المؤكدة وعمليات التحويل المثلى ومعدلات الإنتاج المستدام والكفاءات الأعلى. أما القيود الاقتصادية، التي بحثتها الأوساط المالية، فإنها تؤثر على اختيار ما يستحق القيام به، فهي تتضمن جوانب خاصة بالبنية التحتية لدورة الوقود وعلاقات التكلفة بالسعر (cost-price) التي تتأثر بالقيمة النقدية والضرائب وسياسات الدعم الحكومي وإدارة الشركات والأنظمة الحكومية. أما الاعتبارات البيئية، وهي موضوع الفصل الخامس، والتي تنتج عن الرغبة في العيش في مسكن مبهج وفي حياة من الراحة والسهولة، فقد أدت إلى بحث مستفيض في تأثيرات الأنشطة الإنسانية من حيث حجمها وشدتها وكذلك البحث في طرق التحليل المستخدمة لدراسة التأثيرات النسبية لكل مورد من موارد الطاقة الذي نستطيع اختياره على مدى دورة الوقود بأكملها. وأدت المطالبة بالعدالة الاجتماعية إلى طرح العديد من التساؤلات حول مفاهيم المسؤولية والنزاهة، وهذا هو أكثر العوامل استعصاءً على الحل.

(٤,٠,١) مؤشرات التنمية المستدامة للطاقة

Indicators for Sustainable Energy Development

تتمثل الصعوبة في تحديد ما ينبغي أن تكون عليه مستويات الطاقة المستدامة في طريقة حساب الكمية اللازمة من خيارات معينة للطاقة عند معدل نمو معين، مما يشكل خليطاً معقداً من الاحتياجات. وقد تصدت العديد من الحكومات والمؤسسات للإجابة على هذه التساؤلات. فقد بادرت الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) عام ١٩٩٩م بمشاركة من وكالة الطاقة الدولية (IEA) التابعة لمنظمة التعاون الاقتصادي والتنمية (OECD) وبمساعدة من الأمم المتحدة أيضاً، بإطلاق مشروع شاركت فيه مجموعة من المؤسسات. تمت من خلال هذا المشروع دراسة الطرق اللازمة لتقييم الجوانب الاقتصادية والبيئية والاجتماعية لهذه المشكلة. وركز المشروع على إعداد مجموعة شاملة من المعايير القابلة للقياس (المؤشرات) واللازمة لتحقيق التنمية المستدامة للطاقة. وأدرج تقرير للوكالة الدولية للطاقة الذرية ووكالة الطاقة الدولية [1] ٤١ مؤشراً بيئياً واجتماعياً واقتصادياً (socioeconomic) لتنمية الطاقة، كما يقدم نموذجاً لعلاقة هذه المؤشرات مع بعضها بعضاً.

تعتبر بعض المؤشرات البيئية هامة فيما يتعلق بالمشكلات البيئية الكبرى مثل: التغير العالمي في المناخ وتلوث الهواء في المدن، وهي أمور ستتم مناقشتها في الفصل الخامس. فعلى سبيل المثال، فإن ثلاثة من المؤشرات البيئية هي كميات انبعاث الغازات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري (greenhouse gas emissions)، وكميات انبعاث ملوثات الهواء، وقيم تركيز الملوثات في أجواء المناطق المدنية. أما المؤشرات الاجتماعية الاقتصادية فتتضمن تعداد السكان، والناتج المحلي الإجمالي، وأنواع الطاقة المستخدمة، والاستهلاك، والكثافة، والأسعار، وجوانب النقل المتعلقة بحركة المرور على الطرق لكل فرد.

(٤,٠,٢) الإمدادات المستدامة للطاقة Sustainable Energy Supply

يتطلب الوصول إلى إمدادات مستدامة وطويلة الأجل للطاقة وجود توازن بين القطاع الصناعي (الخاص) والقطاع الاجتماعي (الحكومي) من قطاعات الاقتصاد.

ولطالما كانت هذه مشكلة صعبة بسبب الاختلافات الجوهرية في أهداف هذين القطاعين. فمن ضمن ما يأمله الناس هو أن تؤدي المنافسة الصناعية إلى تحفيز الابتكار وزيادة الإنتاجية وتحسين تخصيص الموارد (resource allocation) وتحسين كفاءة تحويل الطاقة مما يؤدي إلى تخفيض الأسعار على المستهلكين. تمثل هذه الآمال والنتائج مشكلة محيرة في قطاع الطاقة، لأن استخدام الوقود بكفاءة أعلى يفيد الاقتصاد والبيئة، لكن في الوقت نفسه فإن الأسعار الأرخص لا تشجع المستهلكين على ترشيد استخدام الطاقة، أي أن التبذير في استخدام الطاقة لا ينسجم مع الأهداف البيئية. وأحد الأمثلة على هذه المشكلة المحيرة هو انبعاث الغازات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري، فقسوة التغير المناخي تبعث على الخوف من التأثيرات السلبية على البيئة، إلا أن التغير المناخي يعتبر قضية غير جوهرية (externality) في قطاع إمدادات الطاقة، فتفادي التأثيرات السلبية للتغير المناخي أمر غير ذي قيمة في هذه السوق لأن الفائدة المجنية من تفادي الاحتباس الحراري تنتمي إلى طائفة "المشكلات التي يتم تفاديها" بدلاً من "السلع القابلة للتسويق التي يتم استحداثها". قد يكمن حل هذه المشكلات المحيرة في وجود توازن طويل المدى بين المنافسة (من خلال تخفيض الأسعار من قبل القطاع الخاص) وبين الأنظمة (من خلال وضع الترشيد موضع التنفيذ من قبل الحكومة).

(٤,١) استدامة الطلب على الطاقة الكهربائية
Sustainability of Electric Energy Demand

يتمثل النمو التاريخي للطلب على الطاقة الكهربائية النظيفة وسهلة الاستخدام (انظر الجدول رقم ٢,٦) في الأجهزة التي تقلل الجهد، بدءاً من فرش الأسنان الكهربائية وانتهاءً بمصاعد ناطحات السحاب. ويشكل هذا النمو في حد ذاته مصدر قلق حول تيسر وجود الطاقة الكهربائية الوفيرة لسكان أعدادهم آخذة في التنامي. إلا أن استخدامات التقنيات الجديدة النهمة للطاقة الكهربائية قد أصبحت الآن هي الأكثر وضوحاً للعيان.

ويمكن موازنة زيادة الطلب جزئياً ببذل جهود أكثر صرامة في اتجاه الترشيد التقني (من خلال ابتكار ما هو أفضل)، والترشيد الاجتماعي للكهرباء (من خلال القبول بعدم استخدام الكهرباء أحياناً)، وذلك في دائرة صغيرة من الاستخدامات.

وإذا كان من الممكن التكهن بمعدل نمو الطلب في إطار الاستهلاك التقليدي (business-as-usual) (B.a.U) ونتائج النمو في إطار الاستهلاك الترشيدي (Cons)، فإنه يمكن التوقع بزيادة الطلب على الطاقة الكهربائية (ΔED) كما يأتي:

$$\Delta ED = \int_{now}^{later} (B.a.U)_0 e^{gt} dt - \int_{now}^{later} (Cons)_0 e^{ct} dt \qquad (٤,١)$$

حيث إن:

g = معدل نمو الاستهلاك التقليدي من الزمن t_0 = now إلى الزمن t = later

c = معدل نمو الاستهلاك الترشيدي

وينبغي تعديل معدل نمو الاستهلاك التقليدي ليأخذ في الاعتبار الطلب الجديد على الكهرباء الناتج عن النمو المتوقع في *أسلوب الحياة الإلكتروني*، وإمكانية بناء شبكة أمريكية فائقة التوصيل على مستوى القارة، والزيادة الكبيرة المتوقعة في الاستهلاك واللازمة لإنتاج الهيدروجين في عصر وقود الهيدروجين القادم.

(٤,١,١) أسلوب الحياة الإلكتروني The Electronic Way of Life

يمكن القول إن أسلوب الحياة الإلكتروني بدأ في أوائل القرن العشرين مع تطوير البث التجاري للإذاعة وتطوير التلفون وصناعة السينما. وحدث تسارع كبير في أسلوب الحياة هذا خلال الحرب العالمية الثانية وبعدها مع ابتكار أنابيب راديو وترانزيستورات وكليسترونات أقوى. إلا أن الطلب على الطاقة الكهربائية من هذه الصناعات قد يبدو صغيراً مقارنة بالنمو القادم في صناعات الإلكترونيات الحديثة، والتي تتضمن أجهزة الكمبيوتر (تقنية المعلومات)، والتلفونات الخلوية المتنقلة ومنظومات إدارة المنازل وأمن الطيران والأمن القومي. ومقدار الطلب طويل المدى

على القدرة الكهربائية الإضافية اللازمة لتزويد هذه الاستخدامات الحديثة بالكهرباء قد يشكل جزءاً لا يستهان به من الطلب الحالي التقليدي على الطاقة ويصعب تقديره في الوقت الحالي.

(٤,١,٢) شبكة كهرباء فائقة التوصيل للقارة

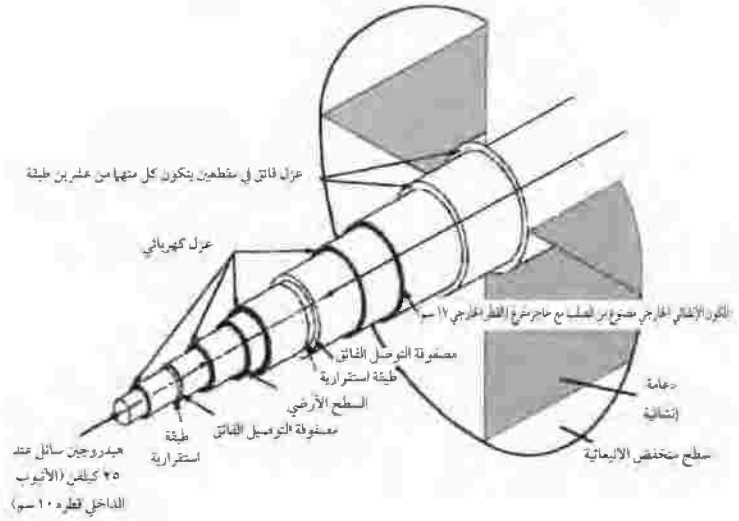
A Continental Superconducting Grid

تم تقسيم منظومة توزيع الكهرباء في الولايات المتحدة (بما في ذلك كندا وجزء صغير من شمال المكسيك) إلى عدد من المنظومات الإقليمية التي تعمل بتوجيه من مجلس أمريكا الشمالية لاعتمادية الكهرباء (NERC) لضمان استمرارية توصيل الإمدادات إلى مسافات مقبولة اقتصادياً. وكان من المؤمل توفر شبكة وطنية واحدة على المدى الطويل، لكن الهدر الكبير في القدرة الكهربائية بسبب النقل لمسافات طويلة جعل هذا الأمل أمراً غير اقتصادي لنقل الأحمال الكهربائية عبر دولة شاسعة فيها أربع مناطق توقيت. كانت فكرة شبكة الكهرباء فائقة التوصيل للقارة موضع التفكير لما يقرب من ٤٠ سنة بحيث تكون طريقة لتعزيز الشبكة القائمة على طول الولايات المتحدة. أدت التكلفة العالية للمواد فائقة التوصيل الأولى إلى جعل الفكرة مكلفة للغاية من ناحية عملية. وقد اقترح معهد أبحاث القدرة الكهربائية (EPRI) مؤخراً استخدام مادة ثاني بوريد المغنيزيوم (MgB_2) فائقة التوصيل ومنخفضة التكلفة لجعل الفكرة مجدية في هذا القرن [2].

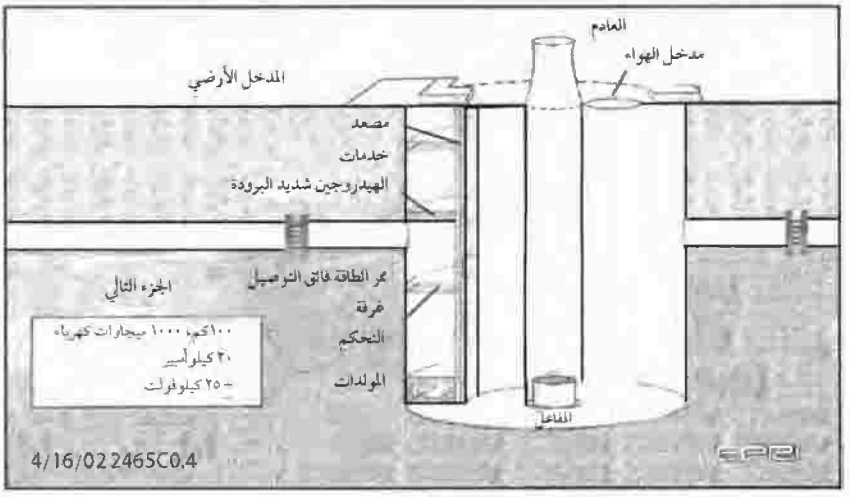
تكمن فكرة هذا المقترح في شق ممر (corridor) للنقل تحت الأرض يغطي الولايات المتحدة من المحيط إلى المحيط ويحتوي على خط نقل تستخدم فيه مادة ثاني بوريد المغنيزيوم فائقة التوصيل ومنخفضة التكلفة ويتم تبريدها بواسطة الهيدروجين السائل (LH_2). وستترك مسافات مثلى بين محطات توليد الكهرباء على طول هذا الممر بحيث يتم إنتاج الكهرباء وكذلك الهيدروجين السائل المستخدم لتبريد هذا الخط إلى درجة حرارة ٢٥ كيلفن التي يتحقق عندها التوصيل الفائق. يُظهر

الشكل رقم (٤,١) مقطعاً في خط النقل، كما يُظهر الشكل رقم (٤,٢) مقطعاً في ممر النقل الأرضي.

ومن مميزات هذه الفكرة: (١) قدرة الشبكة المقترحة على أن تكمّل شبكات القدرة الكهربائية الإقليمية، (٢) توفير الطاقة الناتجة من معادلة الحمل (load leveling) عبر مناطق التوقيت الأربعة في الولايات المتحدة، (٣) إمكانية دمج الطاقة المتجددة والطاقة النووية كمصادر نظيفة مستدامة لإمدادات القدرة الكهربائية، و(٤) الفائدة المركبة من نقل الهيدروجين السائل المستهلك في عملية التبريد إلى السطح لبيعه على شكل وقود هيدروجين غازي (GH_2) للاستخدام في المركبات التي تعمل على خلايا الوقود. وبالمقابل فإن أحد عيوب هذه الفكرة ستكون الجهد الكبير للبدء في البنية التحتية الجديدة حتى يتم تحقيق الفكرة بطريقة سلسة واقتصادية.



الشكل رقم (٤,١). مقطع في خط نقل الكهرباء الثابتة فائق التوصيل المصنوع من ثاني بوريد المغنيزيوم (MgB_2) (معهد أبحاث القدرة الكهربائية).



الشكل رقم (٤,٢). مقطع في ممر الشبكة العملاقة لنقل الكهرباء (معهد أبحاث القدرة الكهربائية).

(٤,١,٣) عصر وقود الهيدروجين The Hydrogen Fuel Era

دائماً ما كانت أكثر التغيرات في التطور الاجتماعي تعطشاً للطاقة هي ظهور التقنيات الجديدة الكبرى، مثلما حصل عندما جاء الحصان الحديدي (القطار) بعد عربة كونيستوجا (العربة المغطاة) أو عندما جاءت الطائرة بعد القطار أو السيارة بعد عربة الحصان. تطلبت كل من هذه التقنيات استخدام شكل جديد من الوقود: الفحم بدلاً من الشوفان أو وقود الطائرات بدلاً من الفحم أو البنزين بدلاً من الشوفان. مع التطورات الجارية في محركات خلايا الوقود والتي يرجح أن تحل محل محركات الاحتراق الداخلي خلال السنوات الخمسين القادمة، فإن استخدام وقود النقل سيحدث فيه تحول جذري مرة أخرى، هذه المرة سيكون التحول من الوقود الأحفوري السائل إلى الهيدروجين. ومن المؤكد أن عملية البحث عن الطاقة الوفيرة سيضاف عليها عبء

كبير بسبب الطلب الإضافي على الكهرباء الذي سيصاحب إنتاج وقود الهيدروجين بكميات كبيرة وكافية باستخدام عدة طرق تتطلب في حد ذاتها الكثير من الطاقة. وهذه القضية ستكون موضوع الفصول الثلاثة الأخيرة من هذا الكتاب، باعتبارها قضية كبيرة في موضوع نمو الطاقة المستدامة.

الخلاصة هي أن التوقع للطلب المستقبلي على الطاقة يعتبر شديد العرضة للتأثر باختيار الإطار الزمني لا سيما وأن التوقع في حد ذاته فيه الكثير من عدم الدقة. فالحكومات الأمريكية المتعاقبة لا تهتم إلا بالسنوات الأربع المقبلة، بينما تنظر بعض المؤسسات الحكومية القومية والمؤسسات على مستوى الولايات إلى فترات تتراوح بين ٥-٢٠ سنة مقبلة، إلا أن أحداً منهم لا ينظر مطلقاً إلى فترة ٣٠-٥٠ سنة مقبلة، وهو الزمن اللازم لكي تصبح أي تقنية جديدة جزءاً طبيعياً من الحياة اليومية. لذا فإن استخدام وقود جديد في تقنية جديدة سيواجه على الأرجح صعوبة في القبول في بداياته. إلا أن عملية البحث عن الطاقة الوفيرة ستجعل ذلك يحدث في نهاية المطاف.

(٤,٢) الغاز الطبيعي في إمدادات الطاقة المستدامة
Natural Gas in Sustainable Energy Supply

أصبح الغاز الطبيعي، الذي يغلب عليه الميثان (CH_4)، الوقود الأحفوري المفضل، فهو رخيص نسبياً ويحترق على شكل شعلة زرقاء ذات سخونة عالية ومن السهل نقله في أنابيب إلى المصانع والمنازل، مما يجعله الوقود المريح والسهل الذي نرغب فيه. يمتلك الميثان أعلى نسبة هيدروجين/كربون (H/C) ضمن الغازات الألكانية (C_xH_{2x+2})، حيث إن قيمة هذه النسبة هي H/C=٤، مما يسهل استخدامه صناعياً كمادة كيميائية خام لإنتاج الهيدروجين ويجعل له أيضاً فائدة بيئية من حيث الانخفاض النسبي لانبعاث ثاني أكسيد الكربون منه إلى الجو خلال عملية احتراقه كوقود أحفوري.

إن الخواص الجيدة للغاز الطبيعي والنمو السريع في استخدامه كوقود (انظر الفصل الثالث) يزيد من القلق حول استدامته بحيث يمكن أن يلبي الطلب عليه من قبل استخداماته العديدة واسعة النطاق والتي تتبارى على الاستئثار بأكبر قدر منه. ويشتمل الجدول رقم (٤,١) على بعض الأسئلة المطروحة حول استخدامات الغاز الطبيعي المرغوبة والكثيرة وحول العوامل التي تدخل فيها قضايا التنمية الاقتصادية المستدامة المتعلقة وهي الخيارات التقنية والجدوى الاقتصادية وحماية البيئة والوعي الاجتماعي.

الجدول رقم (٤,١). العوامل التي تطرح تساؤلات حول استدامة الطلب على الغاز الطبيعي.

الاستخدامات التي تتبارى على الاستئثار بالغاز الطبيعي
الاستغلال الكيميائي مقابل الاستغلال على شكل طاقة
سبب النمو السريع في استغلال الغاز الطبيعي
النمو في الاستهلاك الذي تغذيه الإمدادات أم الطلب
تقديرات موارد الغاز الطبيعي واحتياطياته
ما كمية الغاز الطبيعي المتوفرة وإلى متى ستستمر؟
استخدام الغاز الطبيعي في إنتاج القدرة الكهربائية
كيف سيتمكن أحفادنا من تدفئة منازلهم؟
الغاز الطبيعي كمورد للطاقة
إنتاج الكهرباء و/أو إنتاج وقود الهيدروجين؟

وفيما يأتي تتم دراسة أكثر تفصيلاً لهذه العوامل. يمكن تصنيف استخدامات الغاز الطبيعي العديدة إلى أربع فئات عامة :

١- لقيم بتروكيماوية تستخدم في التركيب الكيميائي (chemical synthesis).

٢- وقود قابل للاحتراق يستخدم في مجال التدفئة والتبريد المنزلي والتجاري.

٣- وقود قابل للاحتراق لإنتاج الطاقة الكهربائية.

٤- لقيم تحويرية (reformer) تستخدم لإنتاج وقود الهيدروجين.

(٤,٢,١) استخدام الغاز الطبيعي في الصناعات البتروكيماوية

Petrochemical Use of Natural Gas

يعد الغاز الطبيعي أحد المكونات المهمة في صناعة البتروكيماويات في العالم والمبنية على استخدام الهندسة الكيميائية في تطوير عملية تكرير النفط. وفيما يأتي عرض عام لمعالجة النفط والغاز الطبيعي كمادة خام ليصبحا بتروكيماويات أولية (تستخدم فيما بعد لعمليات تركيب كيميائية أخرى). يستخدم الغاز الطبيعي كلقيم بتروكيماوي أيضاً في إنتاج النشادر والأسيتيلين واليوريا بالإضافة إلى العديد من المنتجات العضوية التجارية الأخرى.

لقيم المادة الخام	المركب	المادة البتروكيماوية الأولية
الغاز الطبيعي		الميثانول (CH_3OH)
	الإيثان	الإيثيلين (C_2H_4)
	البروبان	البروبيلين (C_3H_6)
النفط	النافثا	البيوتادين (C_4H_6)
		البنزين (C_6H_5)
		التولين (C_6H_5-CH_3)
		الزايلين (C_4H_4-$2CH_3$)

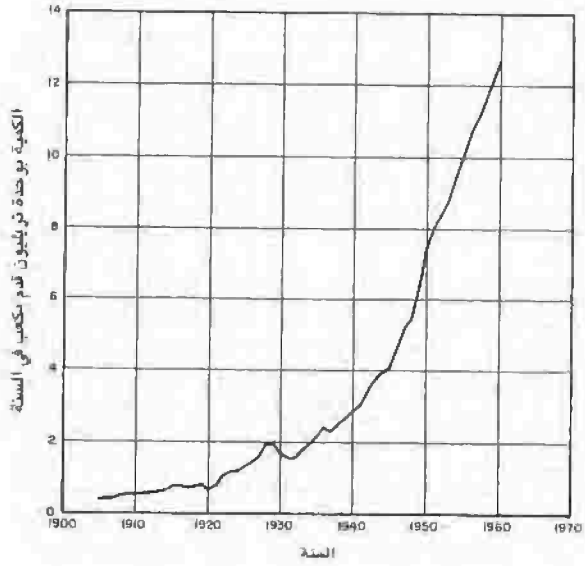
أحد الجوانب المهمة في التنافس على استخدام الغاز الطبيعي هو الفرق بين استخدامه كمادة كيميائية لتصنيع مواد أخرى وبين حرقه كوقود يستخدم مرة واحدة للاستفادة من طاقته الحرارية. وبما أن الغاز الطبيعي يعتبر مورداً محدوداً يتطلب فترات زمنية جيولوجية للتشكل بكميات كبيرة، فإن الحكمة تقتضي أن يكون استخدامه طويل المدى مركزاً على قيمته الكيميائية بدلاً من قيمته كمصدر للطاقة الحرارية. بالإضافة إلى ذلك، فبما أن الغاز الطبيعي مورد محبب للطاقة الحرارية في البيئة المنزلية،

فإن استخدامه للتدفئة ينبغي أن يكون مركزاً على الاستخدام المنزلي بدلاً من استخدامه لإنتاج الكهرباء.

(٤,٢,٢) النمو في استهلاك الغاز الطبيعي في الولايات المتحدة

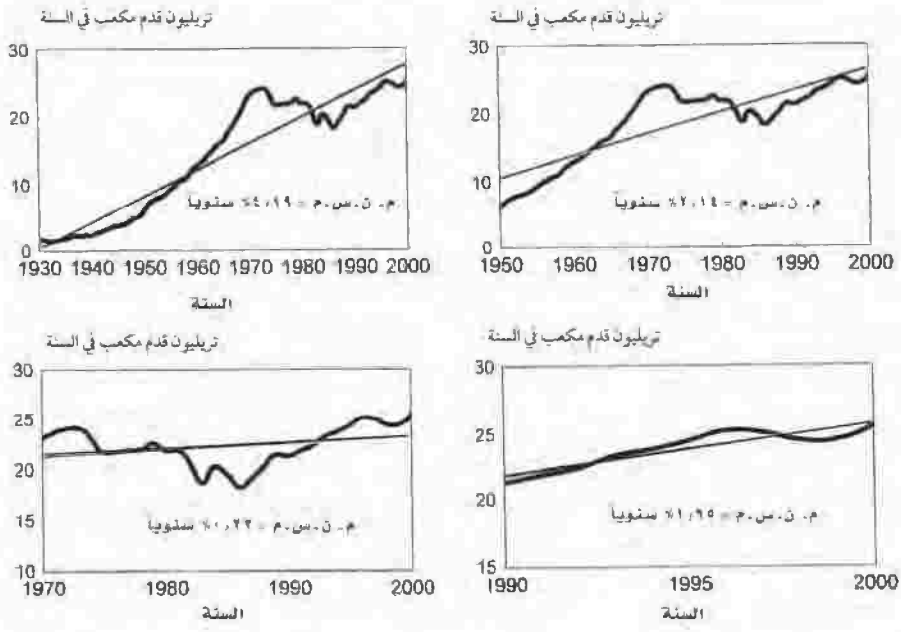
Growth of Natural Gas Consumption in the United States

تم في الفصل الثالث من هذا الكتاب رسم صورة عامة عن النمو في استهلاك الوقود الأحفوري كمورد للطاقة. إلا أن هناك حاجة لصورة أكثر تفصيلاً عن النمو في استهلاك الغاز الطبيعي على وجه الخصوص لتقييم المنافسة الحادة على هذا الوقود الأحفوري في المستقبل. ازداد الإنتاج السنوي للغاز الطبيعي في الولايات المتحدة بشكل سريع من كمية بلغت حوالي ١٠٠ مليار قدم مكعب في السنة في أوائل القرن العشرين إلى ما يزيد على ١٢ تريليون قدم مكعب في السنة بحلول عام ١٩٦٠م. يوضح الشكل رقم (٤,٣) معدل النمو الحاد في الغاز الطبيعي الذي تم تسويقه خلال هذه الفترة (كما بينه هبرت [3]).



الشكل رقم (٤,٣). إنتاج الغاز الطبيعي الذي تم تسويقه في الولايات المتحدة منذ ١٩٠٠ – ١٩٦٠م [3].

وتضاعف هذا المعدل إلى حوالي ٢٣,٥ تريليون قدم مكعب في السنة بحلول عام ٢٠٠٠م [4]. وقد شهد استخدام الغاز الطبيعي منذ عام ١٩٣٠م تاريخ نمو غير متوازن خلال فترة السبعين عاماً التالية، إذ يقدم الشكل رقم (٤,٤) صورة مركبة للتباين في معدل النمو السنوي المتوسط على مر تلك العقود. يلخص الجدول رقم (٤,٢) البيانات المدخلة لهذه الفترة (بما فيها الصادرات) والتي تم الحصول عليها من وكالة معلومات الطاقة التابعة لوزارة الطاقة الأمريكية (DOE/EIA) [5].



الشكل رقم (٤,٤). معدل النمو السنوي المتوسط للغاز الطبيعي في الولايات المتحدة منذ ١٩٣٠ – ٢٠٠٠م [2].

الجدول رقم (٤,٢). استهلاك الغاز الطبيعي في الولايات المتحدة من ١٩٣٠ – ٢٠٠٠م [5].

الفترة	الاستهلاك (تريليون قدم مكعب/سنة)	معدل النمو السنوي المتوسط (٪ / سنة)
١٩٣٠ – ١٩٥٠م	٦,٠٢-١,٨٧	٦,٦٧
١٩٥٠ – ١٩٧٠م	٢٣,١-٦,٠٢	٦,٢٠
١٩٧٠ – ١٩٩٠م	٢١,٣-٢٣,١	٠,٩٨-
١٩٩٠ – ٢٠٠٠م	٢٥,٥-٢١,٣	١,٦٥

(٤,٢,٣) التوقعات لاستهلاك الغاز الطبيعي حتى عام ٢٠٢٥م

Forecast of Natural Gas Consumption Through 2025

يوضح الجدول رقم (٤,٣) توقعات وكالة معلومات الطاقة التابعة لوزارة الطاقة الأمريكية (DOE/EIA) [4] لاستهلاك الغاز الطبيعي في الولايات المتحدة في الفترة من ٢٠٠٠ – ٢٠٢٥م. صنفت البيانات إلى أربعة قطاعات استخدام هي: القطاع المنزلي، والقطاع التجاري الصناعي، وقطاع إنتاج الكهرباء، وقطاع النقل. يتوقع النموذج نمواً ثابتاً في قطاع النقل مقداره ١٠,٤٪/السنة فقط لاستخدام الغاز الطبيعي المضغوط كوقود للسيارات. ولا تشير التوقعات إلى أي زيادة ملحوظة في الطلب على الغاز الطبيعي كلقيم للإنتاج التحويري للهيدروجين كوقود للنقل. وستتم دراسة هذا الجانب من الطلب على الغاز الطبيعي في معرض مناقشة الموارد الأولية لوقود الهيدروجين في الفصل الثامن.

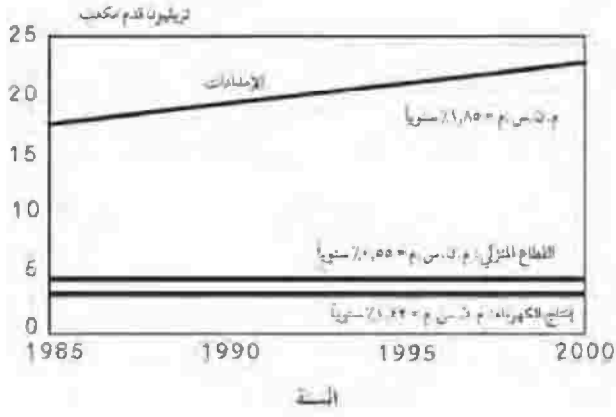
الجدول رقم (٤,٣). توزيع استهلاك الغاز الطبيعي في الولايات المتحدة حتى ٢٠٢٥م [4].

القطاع						م.ن.س.م*
	٢٠٠٠م	٢٠٠٥م	٢٠١٠م	٢٠١٥م	٢٠٢٠م	٢٠٢٥م	(٪/سنة)
المنزلي	٤,٩٨	٥,٣٠	٥,٥٠	٥,٦٩	٥,٩٦	٦,٢٢	١,١
التجاري/الصناعي	١١,٥	١١,٧	١٢,٥	١٣,٤	١٤,٣	١٥,٣	١,٥
إنتاج الكهرباء	٥,٢٣	٥,٦٩	٦,٨٠	٨,٠١	٩,٣٩	١٠,٦	٢,٩
النقل (الغاز الطبيعي المضغوط)	٠,٠١	٠,٠٣	٠,٠٦	٠,٠٨	٠,١٠	٠,١١	١٠,٤
الإجمالي	٢٣,٥	٢٤,٨	٢٧,١	٢٩,٥	٣٢,١	٣٤,٩	١,٨

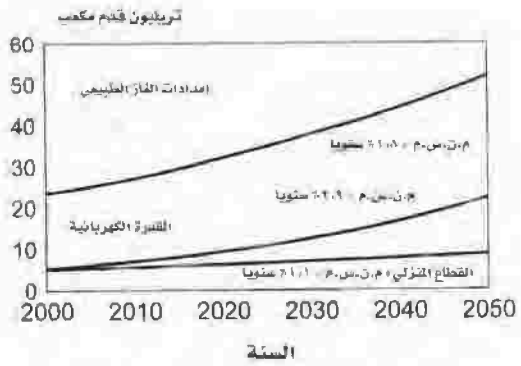
* م.ن.س.م : معدل النمو السنوي المتوسط.

(٤,٢,٤) إمدادات واحتياطيات الغاز الطبيعي Natural Gas Supply and Reserves

كان من المسَلّم به عموماً حتى نهاية عام ٢٠٠٠م أن إمدادات (وسعر) الغاز الطبيعي سيظل على ما هو عليه لمدة طويلة في المستقبل. أدرج تقرير وكالة معلومات الطاقة التابعة لوزارة الطاقة الأمريكية (DOE/EIA) [5] كميات إمدادات الغاز الطبيعي منذ عام ١٩٨٥ - ٢٠٠٠م والتي كانت تزداد بمعدل نمو سنوي متوسط مقداره ٢,١١٪/السنة، كما أورد تقرير وكالة معلومات الطاقة التابعة لوزارة الطاقة الأمريكية (DOE/EIA) [6] كميات الإمدادات في الفترة من ١٩٨٨ - ١٩٩٩م، حيث ازدادت بمعدل نمو سنوي متوسط مقداره ١,٨٥٪/السنة. يظهر في الجدول رقم (٤,٣) توقع لمعدل قيمته ٢,٩٪/السنة. ويوضح الشكل رقم (٤,٥) كيف أن نمو الإمدادات يفوق نمو الطلب على الغاز الطبيعي للاستخدام المنزلي ولإنتاج الطاقة الكهربائية على حد سواء. ومع نمو الطلب الخاص بالطاقة الكهربائية بمعدل ٢,٩٪/السنة مقارنة بنمو الطلب الخاص بالاستخدام المنزلي بمعدل ١,١٪/السنة بحيث يكون معدل النمو الإجمالي ١,٨٪، فإن الصورة تتغير بشكل واضح حتى عام ٢٠٥٠م، كما يبين الشكل رقم (٤,٦)، على ألا يستخدم الغاز الطبيعي لإنتاج وقود الهيدروجين.



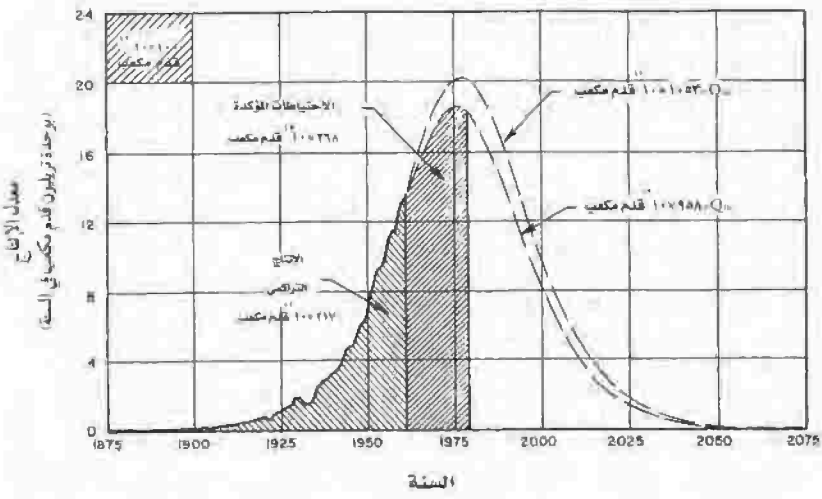
الشكل رقم (٤,٥). نمو إمدادات الغاز الطبيعي في الولايات المتحدة منذ ١٩٨٨ - ١٩٩٩م [6].



الشكل رقم (٤,٦). نمو القدرة الكهربائية واستخدام الغاز الطبيعي في القطاع المنزلي مقارنة بالإمدادات.

يشير التقدير الاستقرائي (extrapolation) حتى عام ٢٠٥٠م إلى أنه في حالة ثبات معدلات النمو فإن نسبة الغاز الطبيعي المستخدمة في إنتاج الطاقة الكهربائية، بمعدل نمو سنوي متوسط يمثل ضعف معدل الفترة من ١٩٨٨ - ١٩٩٩م، قد تقترب من ٤٠٪ من إمدادات الغاز الطبيعي. وبالمقابل فإن كمية الغاز الطبيعي المستخدمة في القطاع المنزلي حتى عام ٢٠٥٠م ستظل تشكل أقل من ١٥٪ من إمدادات الغاز الطبيعي. يؤدي هذا التباين إلى التساؤل المطروح في الجدول رقم (٤,١): كيف سيستطيع أحفادك تدفئة منازلهم؟

تعتمد استدامة إمدادات الغاز الطبيعي على الزيادة المستمرة في احتياطيات الغاز الطبيعي. وسبقت الإشارة في الفصل الثالث إلى أن نتائج التحليل المبكر الذي قام به هبرت [3] بينت أن الكمية القصوى لموارد الغاز الطبيعي تبلغ حوالي ١٠٠٠ تريليون قدم مكعب، وأن الاحتياطيات المؤكدة حتى الآن تبلغ حوالي ٢٧٠ تريليون قدم مكعب. يوضح الشكل رقم (٤,٧) البيانات التي أدت إلى هذه النتائج. بناءً على معدل الإنتاج السائد وقت إعداد التقرير والبالغ ١٣,٣ تريليون قدم مكعب في السنة فإن نسبة الاحتياطيات إلى الإنتاج R/P كانت حوالي ٢٠ سنة.



الشكل رقم (٤,٧). التقديرات الأولى لموارد الغاز الطبيعي في الولايات المتحدة والاحتياطيات المؤكدة [3].

تشير التقديرات الحالية لاحتياطيات الغاز الطبيعي ونسب R/P، الواردة في الجدول رقم (٣,٧)، إلى أن الاحتياطيات تبلغ ١٨٤ تريليون قدم مكعب وأن نسبة R/P هي ٩,٦ سنة. ومما لا شك فيه فإنه ستكون هناك اكتشافات جديدة لمخزونات من الغاز الطبيعي في السنوات القادمة، مع تزايد الطلب ومن دون شك فسوف يرتفع استيراد الغاز الطبيعي (على شكل غاز طبيعي سائل LNG) مع استمرار ارتفاع سعر الغاز الطبيعي. إن استخدام الغاز الطبيعي السائل كوقود في مركبات المستقبل قد يصبح مهماً في الوقت الذي يستمر فيه ازدياد المخاوف الاقتصادية والبيئية من أنواع الوقود النفطية.

(٤,٣) الغاز الطبيعي المخصص لإنتاج الطاقة الكهربائية
Natural Gas Commitment for Electric Power Generation

يمكن اعتبار أن المنافسة بين قطاعات الاقتصاد على الغاز الطبيعي قد بدأت مع الزيادة السريعة في تركيب توربينات غازية تلبي الطلب على الكهرباء في أوقات الذروة. وكما أشرنا في القسم (٤,٢) فإن نسبة الغاز الطبيعي المستهلك في إنتاج الكهرباء عام ١٩٨٥م كانت أقل من نسبة الغاز الطبيعي المستهلك في الاستخدامات المنزلية، لكن معدل نموه كان أكبر بثلاث مرات خلال ذلك العقد. وتضمنت التوقعات الصادرة عام ٢٠٠٢م عن وكالة معلومات الطاقة التابعة لوزارة الطاقة الأمريكية توقعاً بأن الغاز الطبيعي سيكون الوقود المفضل في عملية النمو خلال السنوات العشرين القادمة، بمعدل نمو مقداره ٢,٥٪/السنة، حيث إن حصته من الإنتاج الإجمالي ستزيد من ١٥,٦٪ إلى ٣٢,٧٪. إذا أردنا الاعتماد بشكل موسع على الغاز الطبيعي لإنتاج الكهرباء على المدى الطويل فإن أحد الاعتبارات الرئيسة هي الاستثمار في تركيب التوربينات الغازية والذي يتطلب استهلاكاً طويل الأجل للديون (amortization). يمكن التعبير عن الغاز الطبيعي المخصص لإنتاج الكهرباء كما يأتي :

$$NGC = \sum N_{S,A}\, S_A\, CF\, (L_S - A) \qquad (٤,٢)$$

حيث إن :

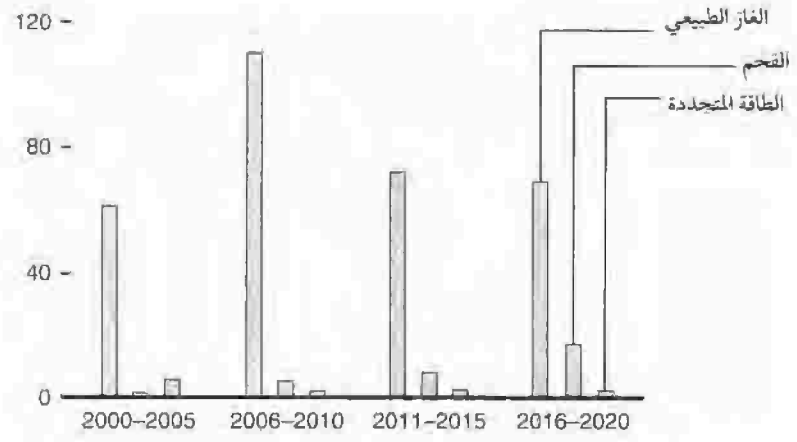
NGC = الغاز الطبيعي المخصص لإنتاج الكهرباء (جيجاجول)

N = عدد محطات توليد الكهرباء ذات الحجم S (ميجاوات) والتي عمرها A (سنة)

L_S = متوسط العمر الافتراضي للمحطة ذات الحجم S (سنة)

CF = معامل التحويل لمعامل المحطة (PF) (جيجاجول/ميجاوات-معامل المحطة)

تظهر كمية الغاز الطبيعي المخصص لإنتاج الكهرباء من خلال البيانات الخاصة بتوقعات إضافات في الطاقة الاستيعابية لإنتاج الكهرباء (انظر الشكل رقم ٤,٨) والتي تم الحصول عليها من تقرير لوكالة معلومات الطاقة التابعة لوزارة الطاقة الأمريكية [7]. وأشار التقرير إلى أنه من المتوقع أن تشكل وحدات توليد الكهرباء التي تعمل بالغاز الطبيعي غالبية الإضافات الجديدة للطاقة الاستيعابية مقارنة بالوحدات التي تعمل على الفحم والطاقة المتجددة.



الشكل رقم (٤,٨). الإضافات المتوقعة للطاقة الاستيعابية لإنتاج الكهرباء بالجيجاوات من ٢٠٠٠ – ٢٠٢٠م [7].

يوضح الجدول رقم (٤,٤) الإضافات في الوحدات التي تعمل بالغاز الطبيعي خلال فترات طول الفترة الواحدة منها خمس سنوات، مصنفة حسب استهلاك الغاز الطبيعي، وباستخدام معامل لمحطة التوليد مقداره ٠,٩ ومعامل تحويل للطاقة مقداره ٣,٣٤٥ معامل تحويل/كيلووات-ساعة.

الجدول رقم (٤,٤). الاحتياجات من الغاز الطبيعي بالنسبة للزيادات المتوقعة في الطاقة الاستيعابية.

الفترة	جيجاوات من الغاز الطبيعي	بيتاوات–ساعة / سنة	تريليون قدم مكعب / سنة
٢٠٠٠ – ٢٠٠٥م	٦٠,٤	٠,٤٨	١,٦
٢٠٠٦ – ٢٠١٠م	١٠٩,٣	٠,٨٦	٢,٩
٢٠١١ – ٢٠١٥م	٧١,٩	٠,٥٧	١,٩
٢٠١٦ – ٢٠٢٠م	٦٩,١	٠,٥٤	١,٨
المجموع	٣١٠,٧	٢,٤٥	٨,٢

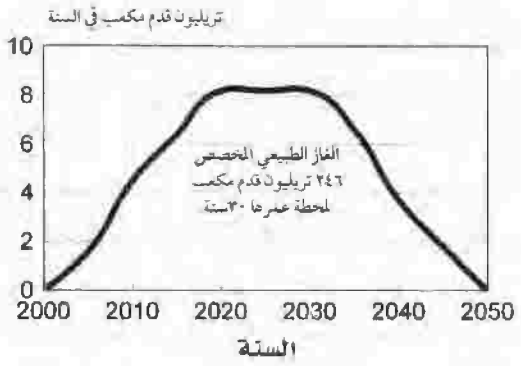
تم احتساب كمية الغاز الطبيعي المخصصة لإنتاج الكهرباء حتى عام ٢٠٥٠م والخاصة بإضافات الطاقة الاستيعابية فقط ، وذلك على شكل جدول بيانات (الجدول رقم ٤,٥) لوحدة عمرها الافتراضي هو L = ٣٠ سنة ، خلال فترات السنوات الخمس المتتالية.

الجدول رقم (٤,٥). الغاز الطبيعي المخصص للزيادات المتوقعة في الطاقة الاستيعابية.

الفترة	الغاز الطبيعي المخصص لإنتاج الكهرباء (تريليون قدم مكعب لكل فترة خمس سنوات)	تريليون قدم مكعب في السنة
٢٠٠٠ – ٢٠٠٥م	١,٦	١,٦
٢٠٠٦ – ٢٠١٠م	٢,٩ + ١,٦	٤,٥
٢٠١١ – ٢٠١٥م	١,٩ + ٢,٩ + ١,٦	٦,٤
٢٠١٦ – ٢٠٢٠م	١,٨ + ١,٩ + ٢,٩ + ١,٦	٨,٢
٢٠٢١ – ٢٠٢٥م	١,٨ + ١,٩ + ٢,٩ + ١,٦	٨,٢
٢٠٢٦ – ٢٠٣٠م	١,٨ + ١,٩ + ٢,٩ + ١,٦	٨,٢
٢٠٣١ – ٢٠٣٥م	١,٨ + ١,٩ + ٢,٩	٦,٦
٢٠٣٦ – ٢٠٤٠م	١,٨ + ١,٩	٣,٧
٢٠٤١ – ٢٠٤٥م	١,٨	١,٨
٢٠٤٦ – ٢٠٥٠م		٠,٠
المجموع لكل خمس سنوات		٤٩,٢

الكمية المخصصة الإجمالية = ٢٤٦ تريليون قدم مكعب

يوضح الشكل رقم (٤,٩) إجمالي الغاز الطبيعي المخصص لإنتاج الكهرباء للإضافات في الطاقة الاستيعابية التي تتوقعها وكالة معلومات الطاقة التابعة لوزارة الطاقة الأمريكية (DOE/EIA) [٧] من عام ٢٠٠٠ – ٢٠٢٠م على اعتبار أن العمر الافتراضي مقداره ٣٠ سنة لكل وحدة. مما يثير الاهتمام أن نقارن الغاز الطبيعي المخصص لإنتاج الكهرباء لمدة ٥٠ سنة للوحدات الإضافية المتوقع تركيبها من عام ٢٠٠٠ – ٢٠٢٠م (٢٤٦ تريليون قدم مكعب) مع الاحتياطيات المؤكدة في الوقت الراهن في الولايات المتحدة (١٨٤ تريليون قدم مكعب ؛ انظر الجدول رقم ٣,٧).



الشكل رقم (٤,٩). كمية الغاز الطبيعي المخصصة للعدد المقدر من الوحدات الإضافية لإنتاج الكهرباء في الولايات المتحدة من ٢٠٠٠ – ٢٠٢٠م.

(٤,٤) استدامة الغاز الطبيعي كمورد للطاقة

Sustainability of Natural Gas as an Energy Source

تتضمن التوقعات للطلب على الغاز الطبيعي المستعمل في الاستخدامات الحالية كمية صغيرة من الغاز الطبيعي المضغوط (CNG) والغاز الطبيعي السائل (LNG) اللذين يستخدمان كوقود للنقل. إلا أن التوقعات لا تخصص حصة للطلب واسع النطاق على الغاز الطبيعي الذي سيستخدم كلقيم، إذا أصبح تحوير الغاز الطبيعي مصدراً رئيساً

لإنتاج الهيدروجين كوقود لـمَركبات خلايا الوقود. بالرغم من أنه ستتم دراسة استخدام الهيدروجين كوقود للنقل في الفصول الثلاثة الأخيرة من الكتاب، إلا أنه من المناسب هنا أن نقارن بين خصائص الغاز الطبيعي والهيدروجين كوقودين للنقل. يشتمل الجدول رقم (٤,٦) على مقارنة للطاقة النوعية والحجمية (volumetric) لهذين الوقودين في شكليهما المضغوط والسائل.

الجدول رقم (٤,٦). طاقة احتراق الغاز الطبيعي والهيدروجين.

شكل الوقود	الطاقة النوعية (كيلووات–ساعة / كجم)	الطاقة الحجمية (كيلووات–ساعة / نيوتن–م^3)
الغاز الطبيعي :		
المضغوط (CNG)	١٣,٩	٣,٣٨
السائل (LNG)	١٣,٩	٥,٨٠
الهيدروجين :		
المضغوط (GH2)	٣٣,٣	٠,٦٤
السائل (LH2)	٣٣,٣	٢,٣٦

توضح هذه البيانات أن الهيدروجين ينتج طاقة احتراق لكل كيلوجرام تزيد بمرتين ونصف تقريباً عن الغاز الطبيعي. إلا أن البيانات توضح أيضاً أن الهيدروجين، وهو أخف الغازات في الجدول الدوري، لديه محتوى طاقة شديد الصغر إذا نظرنا إليه على أساس حجمي. إن هذا العائق شديد الأهمية في أخذنا الهيدروجين المضغوط في الاعتبار كوقود للمركبات، إذ أن ذلك يعني أننا سنحتاج إلى وجود خزان ضخم جداً في المركبة لتتم قيادتها للمسافة ذاتها التي يغطيها ١٠ أو ٢٠ جالوناً من البنزين. لذا سيكون من الضروري أن تزود المركبات بوقود الهيدروجين إما على شكل وقود سائل وإما بوضعه في خزانات تحت ضغط مرتفع جداً. ولكن هل من المعقول أن يتم تحوير الغاز الطبيعي إلى هيدروجين بالرغم من الفارق في محتوى الطاقة لكل منهما؟

يتم تحوير الغاز الطبيعي إلى هيدروجين (والذي سيتم شرحه في الفصل الثامن) عن طريق التفاعل الكلي الآتي:

$$CH_4 + 2H_2O \Rightarrow 4H_2 + CO_2 \qquad (٤,٣)$$

وهو التفاعل الذي يبين، على أساس الكتلة الجزيئية، أن ١٦ كجم من الميثان تنتج ٨ كجم من الهيدروجين. وعليه فإن حرارة الاحتراق الجزيئية المصاحبة لذلك ستكون ٢٢٢ كيلووات-ساعة-حرارة للميثان و٢٦٦ كيلووات-ساعة-حرارة للهيدروجين كوقود. وتطرح هذه البيانات تساؤلاً: لماذا نقوم بتحوير ١٦ كجم من الميثان لننتج ٨ كجم من الهيدروجين ونحصل على زيادة ٢٠٪ في طاقة النقل بدلاً من أن نستخدم الميثان مباشرة كوقود للنقل؟

وهناك اهتمام كبير على مستوى العالم بموضوع إمكانية تحوير الغاز الطبيعي إلى هيدروجين يستخدم في مَركبات خلايا الوقود لتحل محل مَركبات محركات الاحتراق الداخلي على مدى السنوات الخمسين القادمة. وستتم مناقشة الطرق اللازمة لتقدير كمية الغاز الطبيعي المطلوب لذلك في الفصول القادمة من الكتاب، لكن هذه الكمية تكاد لا تذكر في الوقت الراهن وقد تزداد إلى ١٩,٥ تريليون قدم مكعب في السنة بحلول عام ٢٠٥٠م. بالنظر إلى هذه القيمة وإلى البيانات المستخلصة من تقرير وكالة معلومات الطاقة التابعة لوزارة الطاقة الأمريكية (DOE/EIA) [7] حتى عام ٢٠٢٠م، فإن الجدول رقم (٤,٧) يوضح بإيجاز وضع استدامة الغاز الطبيعي على المدى الطويل في الولايات المتحدة، وذلك بمقارنة الطلب (بوحدة تريليون قدم مكعب في السنة) بالإمدادات مع معدل نمو سنوي متوسط ثابت حتى عام ٢٠٥٠م.

وتشير البيانات في الجدول رقم (٤,٧) إلى أنه بناءً على الفرضيات المستخدمة، فإن إمدادات الغاز الطبيعي ستكون كافية لتلبية الطلب حتى عام ٢٠٢٠م ولكن النمو

السريع في صناعة مَركبات خلايا الوقود بعد عام ٢٠٥٠م سيخلق طلباً إضافياً مقداره ١٩,٥ تريليون قدم مكعب في السنة، وهي قيمة أقل من العجز المحسوب البالغ حوالي ٣٠ تريليون قدم مكعب في السنة، والذي يمثل الفارق الذي تم استقراؤه بين الطلب والإمدادات. لذا سيكون من الضروري في وقت ما بين عام ٢٠٢٠ – ٢٠٥٠م أن تنمو إمدادات الغاز الطبيعي بشكل ملحوظ، وإلا فإنه ستكون هناك حاجة لتخفيض الطلب حتى في غياب استخدام الغاز الطبيعي لإنتاج الهيدروجين أو في غياب استخدامه المباشر كبديل لأنواع الوقود النفطية (البنزين، والديزلو ووقود الطيران، ...إلخ).

الجدول رقم (٤,٧). استقراء الطلب على الغاز الطبيعي وإمداداته حتى ٢٠٥٠م.

القطاع	البيانات المنشورة		م.ن.س.م*	القيمة المستقرأة
	٢٠٠٠م	٢٠٢٠م[١]	(٪ / سنة)	(٢٠٥٠م[٢])
التجاري – الصناعي[٣]	١٣,٦	١٧,٤	١,٢	٢٥,١
المنزلي	٥,٠	٦,٠	٠,٩	٧,٩
النقل (CNG)	٠,٠٢	٠,١٤	٩,٨	٢,٦
القدرة الكهربائية	٤,٢	١٠,٣	٤,٥	٤٠,٠
إنتاج الهيدروجين[٤]	٠,٠	٠,٠٢	٢,٢	١٩,٥
الطلب الإجمالي	٢٢,٨	٣٣,٨	٣,٤	٩٥,١
الطلب المتوقع[١]	٢٢,٧	٣٤,١	٢,١	٦٤,٤

[١] مستقاة من بيانات وزارة الطاقة الأمريكية/وكالة معلومات الطاقة

[٢] تم استقراؤها بناءً على معدل نمو سنوي متوسط ثابت

[٣] يتضمن الاستخدام كلقيم بتروكيماوي

[٤] الهيدروجين المنتج بالكامل بطريقة تحوير بخار الماء وليس بالتحليل الكهربائي

* م.ن.س.م: معدل النمو السنوي المتوسط

ينبغي أن يكون هذا النقاش المقتضب لاستدامة الغاز الطبيعي كمصدر مرغوب بيئياً للطاقة سبباً كافياً للحكومة للنظر إلى ما بعد عام ٢٠٢٥م في تخطيطها لتأمين إمدادات الطاقة بكفاءة لاستمرار تنمية الاقتصاد الأمريكي. المصادر الوحيدة الأخرى للطاقة الوفيرة بخلاف الوقود الأحفوري هي الطاقة النووية والطاقة المتجددة، وستتم مناقشة هذه الأشكال من الطاقة في الفصلين السادس والسابع بعد إلقاء نظرة على الآثار البيئية لاستغلال الطاقة في الفصل الخامس. ولكن لنلقِ أولاً نظرة سريعة على إمكانية استخدام الوقود غير الأحفوري حتى عام ٢٠٢٥م.

(٤,٥) موارد الطاقة غير الأحفورية
Nonfossil Energy Resources

إن التراجع في استخدام الوقود الأحفوري للحصول على الطاقة الحرارية بسبب نضوب الموارد والاقتصاد القومي والاعتبارات البيئية يتطلب استبداله بموارد بديلة للطاقة (غير أحفورية). إن المصدرين الرئيسين للوقود غير الأحفوري هما الطاقة النووية (المستخلصة من الثوريوم واليورانيوم وعناصر ما بعد اليورانيوم transuranic) والطاقة المتجددة (المستخلصة من الإشعاع القادم من الشمس، وهي بالدرجة الأولى الطاقة المائية الناتجة من الدورة المائية ثم طاقة الرياح الناتجة من الطاقة الحرارية الجوية والطاقة الحيوية الناتجة من التمثيل الضوئي). وسيتم شرح هذه المصادر في الفصلين السادس والسابع، حيث إنها أصبحت حالياً مصادر مهمة في إنتاج الطاقة الكهربائية.

(٤,٥,١) نمو استخدام الطاقة البديلة (غير الأحفورية)
Growth of Alternative (Nonfossil) Energy Use

بدأ الإنتاج التجاري للكهرباء باستخدام القدرة النووية في خمسينيات القرن العشرين، وقد ازداد عدد محطات القدرة النووية في الولايات المتحدة بثبات إلى نهاية

الثمانينيات من القرن نفسه، عندما أدت المخاوف الشعبية من القدرة النووية إلى توقف طلبات بناء محطات جديدة من قبل شركات توليد الكهرباء. تنتج اليوم ١٠٤ محطات قدرة نووية ما يشكل حوالي ٢٠٪ من إمدادات الكهرباء في الولايات المتحدة. وبالرغم من تردد عدد من الدول في بناء محطات للقدرة النووية فإن التطور العالمي في مجال استخدام الطاقة النووية على مستوى تجاري مستمر حتى الآن. وبحلول عام ٢٠٠٠م كانت هناك ٤٢٥ محطة قدرة نووية في ٣١ دولة تنتج ما يزيد على ٣ بيتاوات-ساعة/السنة، وهو ما يمثل ٧,٤٪ من الطاقة الأولية المستهلكة و٢٠٪ من إنتاج الكهرباء السنوي في العالم.

وقبل أن تتزايد الرغبة الشعبية في استخدام طاقة نظيفة صديقة للبيئة في ستينيات القرن العشرين، كانت الطاقة الكهرومائية هي مورد الطاقة المتجددة الرئيس، والذي اقترب من مرحلة التشبع على شبكات الأنهار الكبرى في الولايات المتحدة وغيرها. أما الطاقة الجيوحرارية (والتي لا يمكن اعتبارها مصدراً للطاقة المتجددة إلا بعد مئات بل آلاف السنين من إعادة تسخين الترسبات الصخرية التي بردت بفعل التوصيل الحراري إلى القشرة الخارجية للأرض) فقد تم تطوير استخدامها في عشرينيات القرن العشرين من قبل إيطاليا ونيوزيلندا والولايات المتحدة واليابان وعدة دول أخرى تنعم بمخزونات يسهل الوصول إليها من الطاقة الحرارية في التكوينات الصخرية والمياه أو البخار المتوفر لإيصال هذه الحرارة إلى السطح من خلال حفر الآبار. أما اليوم فإن هناك تطورات سريعة في استخدام موارد الطاقة المتجددة مثل الإشعاع الشمسي وطاقة الرياح والطاقة الحيوية. ويبين الجدول رقم (٤,٨) تاريخ استخدام موارد الطاقة النووية والطاقة المتجددة في إنتاج الكهرباء في الولايات المتحدة مقارنة بإجمالي إنتاج الكهرباء. لقد كان السبب في زيادة إنتاج الطاقة النووية في تسعينيات القرن العشرين، بالرغم من عدم إنشاء محطات قدرة جديدة، يعود إلى زيادة كفاءة المحطات. أما تناقص نسبة إنتاج

الكهرباء من الطاقة المتجددة فهو يعود في المقام الأول إلى الوصول إلى التشبع في إنتاج الطاقة الكهرومائية في مقابل النمو الإجمالي في إمدادات الطاقة.

الجدول رقم (٤,٨). تاريخ إنتاج الكهرباء في الولايات المتحدة من الوقود غير الأحفوري [8].

السنة	الطاقة النووية		الطاقة المتجددة		الإجمالي
	بيتاوات–ساعة	٪	بيتاوات–ساعة	٪	بيتاوات–ساعة
١٩٨٠م	٠,٢٥١	١١,٠	٠,٢٨٥	١٢,٤	٢,٢٩٠
١٩٩٠م	٠,٥٧٧	١٩,٠	٠,٣٥٧	١١,٨	٣,٠٣٨
٢٠٠٠م	٠,٧٥٤	١٩,٨	٠,٣٥٧	٩,٤	٣,٨٠٢
م.ن.س.م* (٪/سنة)	٥,٥١		١,٨٢		٢,٨٢

* م.ن.س.م: معدل النمو السنوي المتوسط.

(٤,٥,٢) توقعات إمدادات الطاقة غير الأحفورية

Forecast of Nonfossil Energy Supply

وفقاً للتقرير السنوي عن مستقبل الطاقة الذي تصدره وزارة الطاقة الأمريكية، تم تعديل التوقعات الخاصة بالطاقة النووية شيئاً فشيئاً خلال السنوات القليلة الماضية، بدءاً من نظرة متشائمة مفادها أن الإنتاج التجاري للطاقة النووية في الولايات المتحدة سيتوقف بالتدريج بحلول عام ٢٠٢٠م ووصولاً إلى توقعات متحفظة تفيد بأن الطاقة الاستيعابية للقدرة النووية ستظل تقريباً ثابتة حتى عام ٢٠٢٥م. تم في تقرير عام ٢٠٠٣م [4] توقع نمو متواضع في استخدام مصادر الطاقة المتجددة (بخلاف الطاقة الكهرومائية)، ولكنه يظل يشكل نسبة متناقصة من إجمالي إمدادات الكهرباء. يقدم الجدول رقم (٤,٩) ملخصاً للنظرة المستقبلية للطاقة النووية والطاقة المتجددة في تقرير عام ٢٠٠٣م مقارنة بالقيم التاريخية من عام ٢٠٠١م.

الجدول رقم (٤,٩). توقعات إمدادات الطاقة من الوقود غير الأحفوري في الولايات المتحدة [4].

السنة	الطاقة النووية		الطاقة المتجددة		بيتاوات–ساعة
	بيتاوات–ساعة	٪	بيتاوات–ساعة	٪	(إجمالي)
٢٠٠١م	٠,٧٦٩	٢٢,٨	٠,٣٥٨	١٠,٦	٣,٣٧٠
٢٠٠٥م	٠,٧٩٣	٢١,٦	٠,٣٧٨	١٠,٣	٣,٦٧٧
٢٠١٠م	٠,٨٠٠	١٩,٥	٠,٣٩٣	٩,٦	٤,١٠٥
٢٠١٥م	٠,٨٠٥	١٧,٩	٠,٤٠٥	٩,٠	٤,٥٠٥
٢٠٢٠م	٠,٨٠٧	١٦,٥	٠,٤١٦	٨,٥	٤,٨٨٧
٢٠٢٥م	٠,٨٠٧	١٥,٢	٠,٤٢٩	٨,١	٥,٣٠٩
م.ن.س.م* (٪/سنة)	٠,٢		٢,١		١,٩

* م.ن.س.م: معدل النمو السنوي المتوسط.

(٤,٦) الخلاصة

Summary

تم في هذا الفصل النظر في إمكانية النمو الواسع في إمدادات الطاقة بهدف استدامة النمو الاقتصادي في الولايات المتحدة، لا سيما في ظل الطلب المتزايد باستمرار على الطاقة الكهربائية ووقود النقل. إن عصر الإلكترونيات في الولايات المتحدة (وبقية العالم) ليس إلا في بدايته، وسيتم تطوير العديد من الصناعات الجديدة ذات الاستهلاك العالي للطاقة. وسوف يتسارع الطلب على الطاقة، مع شعورنا بأن الحضارة معرضة لخطر الإرهاب، وأنه ستكون هناك حاجة إلى المزيد من الطاقة لتحقيق درجة عالية من الأمن للمواطنين وللمنشآت والتجهيزات. وتم في هذا الفصل تقديم تحليل لاستدامة الوقود الأحفوري، وبالأخص الغاز الطبيعي بوصفه الوقود المفضل بيئياً، لتلبية الطلب المتنامي على المزيد من الطاقة. وستصبح المشكلة حادة أكثر مع بداية استخدام وقود الهيدروجين، الذي يهدف إلى تقليل الاعتماد على أنواع الوقود

النفطي ذات السعر المتزايد، على مدى السنوات الخمسين القادمة. وإنتاج الكهرباء من الغاز الطبيعي والإنتاج المصاحب لوقود الهيدروجين من الغاز الطبيعي لا يبدوان واقعيين مقارنة باستخدامه في التركيب البتروكيماوي أو باستخدامه في القطاع المنزلي كمصدر نظيف للطاقة. وموارد الطاقة الأخرى الوحيدة واسعة النطاق والمتوفرة لتلبية الطلب المتنامي هي الطاقة النووية والطاقة المتجددة، وسوف يتم تناول هذين النوعين بالبحث في الفصلين السادس والسابع.

المراجع References

[1] International Atomic Energy Agency and International Energy Agency, *Indicators for Sustainable Development*, 2001. Available at http://library.iea.org/dbtw-wpd/textbase/2001/cds-9.pdf

[2] C. Starr, "National Energy Planning for the Century: The Continental SuperGrid." *Nuclear News*, February 2002, pp. 31-35.

[3] M. King Hubbert, *Energy Resources: A Report to the Committee on National Resources*. National Academy of Sciences-National Research Council Publication 1000-D. Washington, DC, 1962.

[4] U.S. Department of Energy, Energy Information Agency, *Annual Energy Outlook*. Report No. DOE/EIA-0383(2003). Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2004.

[5] U.S. Department of Energy, Energy Information Agency, *Natural Gas Annual 2000*. Report No. DOE/EIA-0130(00). Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2001.

[6] U.S. Department of Energy, Energy Information Agency, *Annual Energy Outlook*. Report No. DOE/EIA-0383(01). Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2000.

[7] U.S. Department of Energy, Energy Information Agency, *Annual Energy Outlook*. Report No. DOE/EIA-0383(02). Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2001.

[8] U.S. Department of Energy, Energy Information Agency, *Annual Energy Review*. Report No. DOE/EIA-0384(02). Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2003.