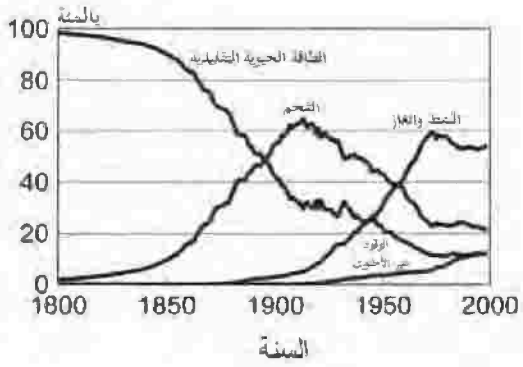
الفصل الثالث

عصر الوقود الأحفوري
THE FOSSIL FUEL ERA

(٣,٠) خلفية تاريخية
Historical Perspective

قد يقال إن عصر الوقود الأحفوري بدأ عندما اكتشفت النار في فترة ما قبل التاريخ. وكثيراً ما يقال إن عصر الوقود الأحفوري بدأ مع قدوم الثورة الصناعية في القرن الثامن عشر. بالرغم من أن الخشب كان أول وقود قابل للاحتراق مستخدم للطاقة الحرارية بعد اكتشاف النار، وبالرغم من أنه بقي مستخدماً لعدة آلاف من السنين، فإن استخدام وقود ذي طاقة نوعية أعلى أصبح أمراً مرغوباً فيه بحلول القرن الثالث عشر لإنتاج الفحم. ازداد استخدام الفحم بشكل ثابت خلال السنوات الأربعمائة التالية وكان أول وقود أحفوري يستخدم بكميات كبيرة. تعتبر الصورة العامة لاستخدام أنواع الوقود الأحفوري المختلفة في العالم منذ عام ١٨٠٠م موثقة بشكل جيد في المصادر المنشورة. ويوضح الشكل رقم (٣,١) تاريخ استهلاك الوقود الأحفوري، كل نوع على حدة [1]، منذ عام ١٨٠٠م حتى عام ٢٠٠٠م، مبيناً بجلاء انحسار استخدام المصادر الحيوية التقليدية، والتي يقصد بها المصادر الحيوية المتجددة والخشب على وجه الخصوص.



الشكل رقم (٣,١). حصة كل نوع من أنواع الوقود الأحفوري في الاستهلاك العالمي منذ عام ١٨٠٠ – ٢٠٠٠م [1] (مستقاة من بيانات إس فيتر عام ١٩٩٩م ومن اتصالات شخصية عام ٢٠٠٥م).

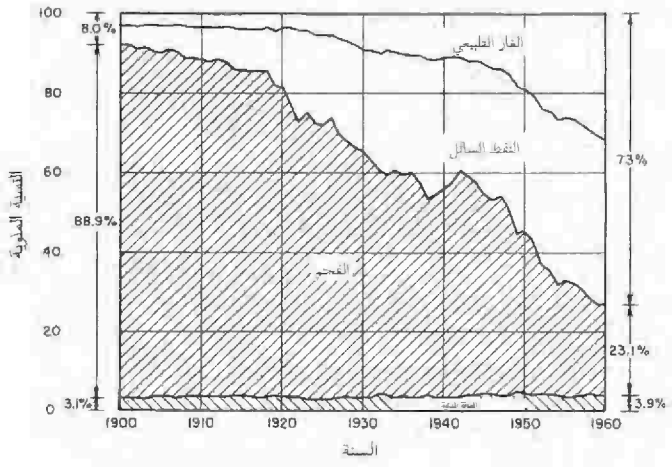
تظهر البيانات أن استهلاك الفحم تخطى استهلاك الخشب قبل عام ١٩٠٠م ووصل إلى أوجه في السنوات الأولى من القرن العشرين، في الوقت الذي زاد فيه الطلب على النفط والغاز الطبيعي بشكل سريع. ويرجع الارتفاع في استخدام الوقود غير الأحفوري بشكل تجاري بعد عام ١٩٢٠م بشكل أساسي إلى استخدام القدرة المائية، ويدل الازدياد الإضافي في استخدام الوقود غير الأحفوري منذ عام ١٩٧٠م على بداية عصر الطاقة النووية. توضح المعلومات أدناه [1] البيانات الخاصة بالأنواع الثلاثة من الوقود الأحفوري، منذ عام ١٧٦٥ – ١٩٩٥م [حيث كان إجمالي استهلاك الطاقة ١٢,٢٠٠ إكساجول]. ويلاحظ أن انبعاث ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي الذي رافق ذلك وصل إلى ٢٥٠ جيجا طن من الكربون (انظر الفصل الخامس).

الوقود الأحفوري	كمية الاستهلاك (بالإكساجول)
الفحم	٥٣٠٠
النفط	٤٨٠٠
الغاز	٢١٠٠

(٣,٠,١) استهلاك الوقود الأحفوري في الولايات المتحدة منذ عام ١٩٠٠م

Fossil Fuel Consumption in the United States since 1900

يتبع استهلاك الوقود الأحفوري في الولايات المتحدة نمطاً شبيهاً ببقية العالم. ويوضح الشكل رقم (٣,٢) توزيع استهلاك الوقود الأحفوري (كنسب مئوية) منذ عام ١٩٠٠ – ١٩٦٠م مقارنة بالقدرة المائية كما ذكر هبرت [2]. يلاحظ أن استهلاك الفحم قد انخفض في تلك الفترة من ٨٨,٩٪ عام ١٩٠٠م إلى ٢٣,١٪ عام ١٩٦٠م، بينما ارتفع استهلاك القدرة المائية خلال تلك الفترة من ٣,١٪ إلى ٣,٩٪.



الشكل رقم (٣,٢). حصة كل نوع من أنواع الوقود الأحفوري في الاستهلاك في الولايات المتحدة منذ عام ١٩٠٠ – ١٩٦٠م [2].

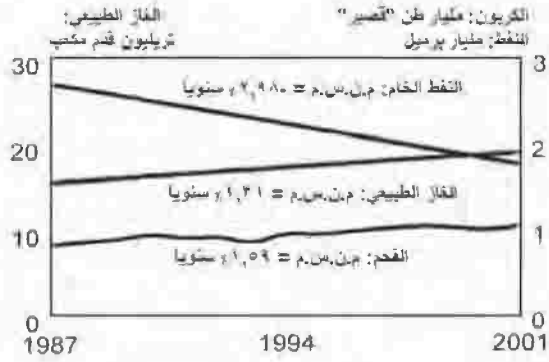
تم تجميع المعلومات التاريخية عن تنوع أشكال الوقود الأولي في الولايات المتحدة منذ عام ١٩٢٥ – ٢٠٠٠م من المصادر المنشورة، وبالأخص من مصادر وزارة الطاقة الأمريكية/وكالة معلومات الطاقة (DOE/EIA) على الإنترنت، وتم تصنيف المعلومات (كنسب مئوية) للموارد الأحفورية والنووية والمتجددة على فترات طولها ٢٥ سنة. يقدم الجدول رقم (٣,١) ملخصاً للبيانات، موضحاً عدة تغيرات مهمة خلال السنوات الخمس والسبعين تلك.

الجدول رقم (٣,١). تاريخ تنوع أشكال الوقود (بالنسبة المئوية) من ١٩٢٥ – ٢٠٠٠م.

الوقود	١٩٢٥م	١٩٥٠م	١٩٧٥م	٢٠٠٠م
الخشب	٧	٣	٠	٠
الفحم	٦٥	٣٧	٢١	٣٢
النفط	١٩	٣٩	٣٨	٢١
الغاز الطبيعي	٥	١٨	٣٢	٢٧
مجموع الوقود الأحفوري	٩٧	٩٧	٩١	٨١
الوقود النووي	٠	٠	٦	١١
الطاقة المتجددة	٣	٣	٣	٨
نسبة المستخدم للكهرباء من المجموع	< ١	~ ٢	~ ١٥	٣٨

قامت وزارة الطاقة الأمريكية/وكالة معلومات الطاقة بتصنيف البيانات الحديثة عن إنتاج الوقود الأحفوري في الولايات المتحدة منذ عام ١٩٨٧م، ويوضح الشكل رقم (٣,٣) هذه البيانات، حيث إن الوحدة المستخدمة للفحم هي مليار طن "قصير" والوحدة المستخدمة للنفط الخام هي مليار برميل أمريكي والوحدة المستخدمة للغاز الطبيعي هي تريليون قدم مكعب.

ويبين الشكل رقم (٣,٣) كذلك معدلات النمو السنوي المتوسط خلال تلك الفترة. كانت هناك زيادات ثابتة في تلك الفترة في استهلاك الفحم والغاز الطبيعي (وكلاهما يستخدم لزيادة إنتاج القدرة الكهربائية) وكان هناك انخفاض هائل في استهلاك النفط الخام (يدل على النسبة المتزايدة من النفط المستورد الذي استخدم في قطاع النقل).



الشكل رقم (٣,٣). إنتاج الوقود الأحفوري في الولايات المتحدة منذ ١٩٨٧ – ٢٠٠١م [3].

(٣,١) أنواع الوقود الأحفوري

Fossil Fuels

يدل مصطلح "الوقود الأحفوري" على أن هذه الأنواع من الوقود قديمة جداً. ومن المتفق عليه عالمياً أن الوقود الأحفوري مورد غير متجدد للطاقة. ولعل التعريف المناسب هو الآتي: الوقود الأحفوري هو ناتج التحلل اللاهوائي لنباتات ترسبت جيولوجياً وحدث لها تحول عبر العصور الجيولوجية تحت تأثير ضغط الصخور ودرجة الحرارة. الفحم والنفط الخام هما أكثر أنواع الوقود الأحفوري أهمية في الاستخدامات الصناعية واسعة النطاق التي تستخدم طاقة الاحتراق الحرارية للوقود، وانضم إليهما مؤخراً الغاز الطبيعي. وفيما يأتي استعراض قصير للخواص الأساسية لهذه الأنواع من الوقود الأحفوري.

(٣,١,١) الفحم Coal

يمكن وصف الفحم على أنه معدن يتكون في معظمه من عنصر الكربون، ويوجد في كل قارة من قارات العالم. توجد أكبر موارد الفحم في ٣٧ ولاية من الولايات الأمريكية الخمسين (حوالي ٢٣٪)، وفي دول الاتحاد السوفيتي السابق (حوالي ٢٣٪) وفي الصين (حوالي ١١٪)، وتعتبر الصين أكبر مصدر للفحم تليها الولايات المتحدة. يستخدم الفحم بشكل أساسي في إنتاج الكهرباء بالتوربينات البخارية وفي عملية التكويك (تحويل الفحم إلى كوك) في صناعة الحديد والصلب.

يوجد الفحم بأشكال جيولوجية كثيرة التنوع وبمستويات عديدة من الجودة، والأهم من ذلك هو أنه يوجد بمستويات عديدة من القيمة الحرارية النوعية (specific heating value). ويمكن تصنيف أنواع الفحم في سلسلة مستمرة تبدأ من الخث (peat) يليه اللجنيت (الفحم البني) (lignites) ثم الفحم القاري (bituminous) (الفحم الطري)، وأخيراً الأنثراسايت (anthracite) (الفحم الصلب) والجرافيت. يورد الجدول رقم (٣,٢) التصنيف الأمريكي للفحم بناءً على التركيب وعلى القيمة الحرارية.

الجدول رقم (٣,٢). التصنيف الأمريكي للفحم.

نوع الفحم	التركيب (٪)				القيمة الحرارية (وحدة حرارية بريطانية/رطل)
	الثابت		المتطاير		
	الكربون	نسبة الماء	المادة	الرماد	
الأنثراسايت	٨١,٨	٤,٤	٤,٨	٩,٠	١٣١٣٠
الفحم القاري					
منخفض التطاير	٦٥,٨	٢,٣	١٩,٦	١٢,٣	١٣٢٢٠
متوسط التطاير	٦٣,٦	٣,١	٢٣,٤	٩,٩	١٣٥٣٠
عالي التطاير	٤٦,٥	٥,٩	٤٣,٨	٣,٨	١٣١٥٠
الفحم تحت القاري	٤١,٠	١٣,٩	٣٤,٢	١٠,٩	١٠٣٣٠
	٣٨,٤	٢٥,٨	٣١,١	٤,٧	٨٥٨٠
اللجنيت	٣٠,٢	٣٦,٨	٢٧,٨	٥,٢	٦٩٥٠

(٣,١,٢) القيمة الحرارية للفحم Heating Value of Coal

تُعد القيمة الحرارية إحدى أهم خصائص الفحم، وهي تعبر عن كمية الطاقة المنبعثة من حرقه كوقود. بما أن معظم طاقة الاحتراق تنتج عن تأكسد الكربون، فإن الكربون هو المكوِّن الأهم في الفحم. لكن بما أن عنصري الهيدروجين والكبريت الموجودين في الفحم لهما طاقة احتراق عالية فإنهما يسهمان بشكل ملحوظ في رفع القيمة الحرارية. تنتج القيمة الحرارية لتصنيفات الفحم المختلفة من حرارة الاحتراق، ΔH_c، الخاصة بتفاعلات التأكسد للعناصر الثلاثة الرئيسة (يعبر عنها هنا بالوحدات الحرارية البريطانية لكل رطل):

$C + O_2 \Rightarrow CO_2$	$\Delta H_c = 14{,}500$ Btu/lb
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \Rightarrow H_2O$	62,000 Btu/lb
$S + O_2 \Rightarrow SO_2$	4,000 Btu/lb

لذا فإن القيمة الحرارية للفحم المبنية على النسب المقاسة لتركيز العناصر الثلاثة الرئيسة تكون:

$$HV(coal) = (14500[C] + 62000[H] + 4000[S]) / 100 \qquad (٣,١)$$

(حيث إن HV(coal) هي القيمة الحرارية للفحم، بينما [C] و[H] و[S] هي قيم تركيز الكربون والهيدروجين والكبريت على التوالي).

(٣,١,٣) النفط الخام Crude Oil

يُضخ النفط الخام من الأرض على شكل بترول، وهو عبارة عن هيدروكربونات أليفاتية (دهنية) معظمها ألكانات تحمل الصيغة الكيميائية C_nH_{2n+2} ومعها بعض الشوائب أهمها الكبريت. يسمى النفط ذو المحتوى الكبريتي المنخفض خاماً "حلواً"، بينما يسمى النفط ذو المحتوى الكبريتي المرتفع خاماً "حامضاً". وتصنف الهيدروكربونات بناءً على

أطوال سلسلتها، ويشكل عام فإن الهيدروكربونات ذات السلاسل الأقصر تكون درجات غليانها أقل مما يسمح بفصلها عن طريق التقطير في محطات التكرير. تصنف الهيدروكربونات بناءً على عدد ذرات الكربون C_n فيها كما يأتي :

الغازات C_1 إلى C_4 أكثرها وفرة الميثان (CH_4) وهو المكون الرئيس في الغاز الطبيعي.

النافثا C_5 إلى C_7 تستخدم كمذيبات (للمنتجات سريعة التجفيف).

البنزين C_8 إلى C_{11} C_8H_{18} هو الأوكتان وهو الأساس في التصنيف الأوكتاني.

الكيروسين C_{12} إلى C_{15} يتبع هذه المجموعة وقود الديزل وزيوت الوقود الثقيلة.

زيوت التشحيم C_{16} إلى C_{19} تتبخر هذه الزيوت عند درجات حرارة مرتفعة.

المواد الصلبة C_{20} فما فوق تكون هذه المواد صلبة عند درجة حرارة الغرفة.

تُعد زيوت التشحيم مهمة في مجال النقل، إذ يمكن لزيت المحرك أن يعمل طوال اليوم عند درجة حرارة ٢٥٠ فهرنهايت (١٢٠ مئوية) دون أن يتبخر. تتفاوت هذه الزيوت من الخفيف (مثل الزيت التجاري المسمى ٣-في-١) مروراً بزيوت محركات ذات كثافات متنوعة، إلى زيوت علب التروس الغليظة والشحوم شبه الصلبة مثل هلام البترول (الفازلين). يتزايد عدد ذرات الكربون في الزيوت الصلبة بدءاً بالبارافين مروراً بالقطران وانتهاءً بالقار الأسفلتي الذي يستخدم في الطرق الأسفلتية.

(٣,١,٤) الغاز الطبيعي Natural Gas

يوجد الغاز الطبيعي، الذي يغلب عليه الميثان (CH_4)، في الصخور الرسوبية في وجود النفط الخام عموماً ويسمى عندها الغاز "الرطب" (الغاز المرافق) وقد يوجد الغاز الطبيعي مستقلاً عن النفط ويسمى عندها الغاز "الجاف" (الغاز غير المرافق). يحتوي الغاز الرطب عموماً على غازات هيدروكربونية أخرى عديدة وبعض الغازات الشائبة التي تُزال قبل توزيعه تجارياً. أما الغاز الجاف فلا يحتوي عموماً على العديد من الغازات الأخرى غير الميثان. ويصنف الغاز الطبيعي على أنه غاز حامض إذا كان تركيز

غاز كبريتيد الهيدروجين (H_2S) فيه أعلى من الحد الأدنى المسموح به. يتفاوت تركيب الغاز الطبيعي حسب النوع والمكمن ويورد الجدول رقم (٣,٣) المكونات المعتادة للغاز الطبيعي.

الجدول رقم (٣,٣). تركيب الغاز الطبيعي.

المادة المكونة	مدى التركيب (٪)
الميثان	٩٠-٧٠
الإيثان، البروبان، البيوتان	٢٠-٠
كبريتيد الهيدروجين	٥-٠
النيتروجين والأوكسجين وثاني أكسيد الكربون	٢-٠
الغازات النادرة: الهيليوم والأرجون والكريبتون	قيم ضئيلة للغاية

تعتمد القيمة الحرارية للغاز الطبيعي أيضاً على التركيب الكيميائي. تساوي طاقة الاحتراق الخاصة بالميثان الخالص نتيجة التفاعل الآتي:

$$CH_4 + 2O_2 \Rightarrow CO_2 + 2H_2O + 891\text{kJ} \qquad (٣,٢)$$

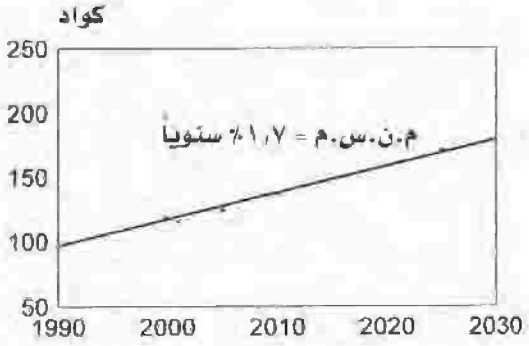
٥٥,٧٠٠ كيلوجول/كجم. وتساوي القيمة الحرارية المتوسطة للغاز الطبيعي الجاف ١٠٢٧ وحدة حرارية بريطانية/قدم مكعب.

(٣,٢) التوقعات لاستهلاك الطاقة في الولايات المتحدة حتى عام ٢٠٢٥م

Forecast of U.S. Energy Consumption Through 2025

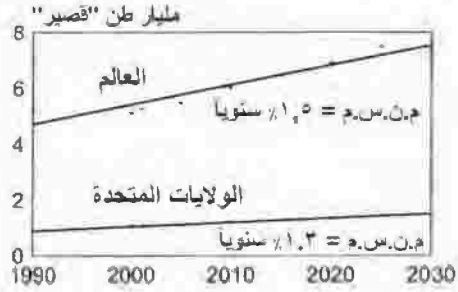
يحتوي التقرير السنوي لوزارة الطاقة الأمريكية على تقديرات الطلب على الطاقة للسنوات العشرين إلى الخمس والعشرين القادمة [3,4]. وتشير هذه التقديرات (وكذلك التقديرات الخاصة بالمؤسسات الأخرى المدعومة حكومياً) إلى التوجهات

المرجحة في إنتاج واستهلاك الطاقة في الولايات المتحدة والعالم. يحتوي تقرير عام ٢٠٠٤م عن استهلاك الطاقة في الولايات المتحدة [3] على القيم الفعلية للاستهلاك (بوحدة الكواد) منذ عام ١٩٩٠م إلى نهاية عام ٢٠٠١م، كما يحتوي على القيم المتوقعة حتى عام ٢٠٢٥م، ويوضح الشكل رقم (٣,٤) هذه المعلومات.

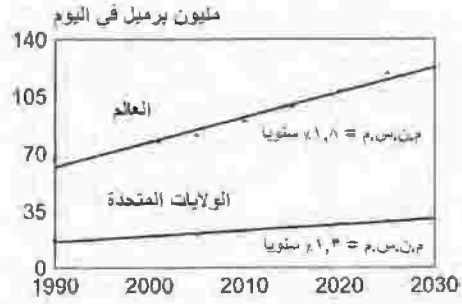


الشكل رقم (٣,٤). استهلاك الطاقة التاريخي والمقدر في الولايات المتحدة منذ ١٩٩٠ – ٢٠٢٥م [3].

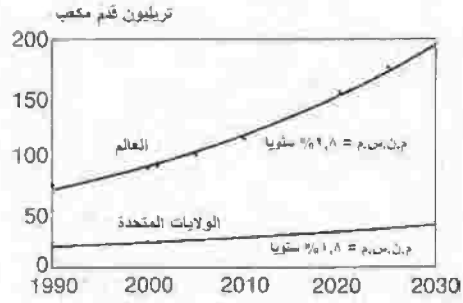
تقدر وكالة معلومات الطاقة التابعة لوزارة الطاقة الأمريكية (DOE/EIA) أن الوضع المرجح هو النمو الأسّي (السريع) الثابت بمعدل نمو سنوي متوسط مقداره ١,٧٪/سنة (انظر الجدول رقم ٢,١١) مما يدل على قناعة الوكالة بأن المطالبة الشعبية بزيادة استخدام الوقود غير الأحفوري لن تؤتي ثمارها بشكل ملحوظ خلال السنوات العشرين إلى الخمس والعشرين المقبلة. تقدم الأشكال من رقم (٣,٥ – ٣,٧) مقارنة بين استهلاك الوقود الأحفوري في الولايات المتحدة واستهلاكه في بقية العالم [4] تشمل الفحم (ببلايين الأطنان "القصيرة") والنفط (بملايين البراميل لكل يوم) والغاز الطبيعي (بتريليونات الأقدام المكعبة) على التوالي.



الشكل رقم (٣,٥). استهلاك الفحم المقدر في الولايات المتحدة وبقية العالم حتى عام ٢٠٢٥م [4].



الشكل رقم (٣,٦). استهلاك النفط المقدر في الولايات المتحدة وبقية العالم حتى عام ٢٠٢٥م [4].



الشكل رقم (٣,٧). استهلاك الغاز الطبيعي المقدر في الولايات المتحدة وبقية العالم حتى عام ٢٠٢٥م [4].

(٣,٣) كم من الوقت سيبقى الوقود الأحفوري؟

How Long Will Fossil Fuels Last?

يلخص الجدول رقم (٣,٤) توقعات استهلاك الطاقة في الولايات المتحدة والعالم حتى عام ٢٠٢٥م.

الجدول رقم (٣,٤). تقديرات استهلاك الطاقة في الولايات المتحدة وبقية العالم من ٢٠٠٠ – ٢٠٢٥م [4].

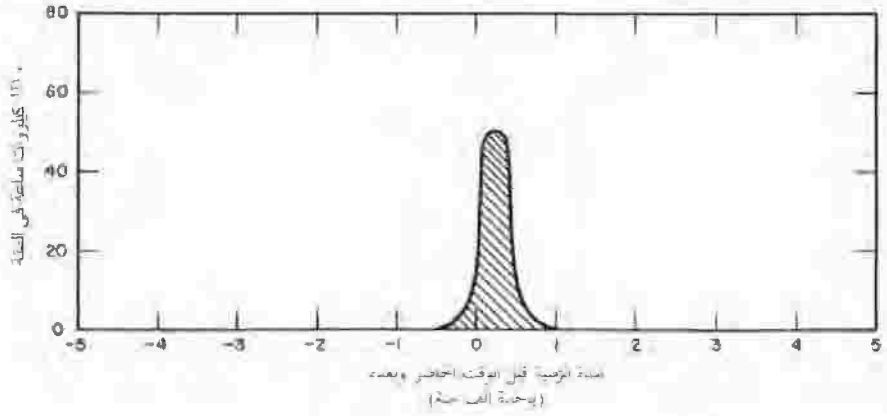
مصدر الطاقة	الولايات المتحدة			بقية العالم		
	٢٠٠٠م	٢٠٢٥م	م.ن.س.م*	٢٠٠٠م	٢٠٢٥م	م.ن.س.م*
الفحم (الطن البريطاني)	١,٠٨	١,٤٤	١,٣	٥,١٢	٧,٤٨	١,٥
النفط الخام (مليون برميل/اليوم)	١٩,٧	٢٩,٢	١,٧	٧٦,٩	١١٩	١,٨
الغاز الطبيعي (تريليون قدم مكعب)	٢٣,٥	٣٤,٩	١,٨	٨٨,٧	١٧٦	٢,٨
الطاقة النووية (بيتاوات-ساعة)	٠,٧٥	٠,٨١	٠,٢	٢,٤٣	٢,٧٤	٠,٣
الطاقة المتجددة (كواد)	٦,٤	٨,٩	٢,٠	٣٢,٨	٥٠,٠	١,٩
الإجمالي (كواد)	١١٩	١٧١	١,٧	٤٠٠	٦٤٠	١,٩

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

تشير التوقعات إلى تزايد مستمر في اعتماد العالم على أنواع الوقود الأحفوري الثلاثة الرئيسة (بمعدل نمو سنوي متوسط يتراوح بين ١,٥ إلى ٢,٨٪ / سنة). ومع اتجاه الدول النامية إلى أن تصبح أكثر صناعية، فإنه من المرجح أن يصاحب ذلك طلب متزايد على أنواع من الوقود ذات طاقة نوعية أعلى. يطرح هذا الأمر سؤالاً : ما كمية الوقود الأحفوري القابل للاستخراج الموجودة فعلياً في الأرض؟ وإلى متى يستطيع العالم الاعتماد على وجود وقود أحفوري كافٍ بأسعار مناسبة؟

ينبع السؤال عن الاحتياطيات القصوى لموارد الوقود الأحفوري من حقيقة معروفة منذ زمن طويل وهي أن الوقود الأحفوري (مثل الفحم والنفط والغاز الطبيعي)

احتاج إلى ملايين السنين للترسب في مكامن جيولوجية. مع ازدياد استخلاص مصادر الطاقة تلك، كل في وقته، ومع ازدياد معالجتها والاستفادة منها ازدياداً أسّياً، كانت هناك قناعة بأن مصادر الطاقة ستستمر إلى الأبد أو على الأقل ستستمر لفترة طويلة جداً. وبدأ القلق يتزايد بسرعة مع حلول خمسينيات القرن العشرين حول كون مصادر الطاقة هذه في الواقع موارد محدودة وأن النمو الأسّي السريع في استهلاكها سيؤدي إلى نضوبها المبكر. قام هبرت [2] عام ١٩٦٢م بوضع تصور لما سيكون عليه عصر الوقود الأحفوري على مر الأزمنة الجيولوجية (انظر الشكل رقم ٣,٨).



الشكل رقم (٣,٨). عصر الوقود الأحفوري بالنسبة للعصور الجيولوجية كما يصوره هبرت [2].

(٣,٣,١) تقدير احتياطيات الوقود الأحفوري Estimation of Fossil Fuel Reserves

يعد تحديد الكمية المتوفرة في الأرض من مورد طبيعي قابل للنضوب بهدف تقدير مدة بقائه من أصعب المشكلات في صناعات استخلاص المعادن. يصعب جداً تقدير الاحتياطيات الموجودة في مكمن معدني قائم والأصعب من ذلك تقدير احتياطيات دولة

برمتها أو العالم. إلا أن الجوانب المالية في صناعة استخلاص المعادن تتطلب مثل هذه التقديرات لأغراض التسعير والضرائب ورضا العملاء وغيرها. الجيولوجيون هم الذين يضعون التقديرات عموماً بناءً على طرق فيزيائية مختلفة ونماذج إحصائية طورها مهندسو التعدين ومهندسو النفط. بنيت المحاولات الأولى لتقدير الموارد الموجودة على اعتبارات خاصة بحجم الموارد ومبنية على القياسات السطحية وعلى أي بيانات حفر متوفرة. وبحلول خمسينيات القرن العشرين كان أسلوب حساب الاحتياطيات الذي يستخدم نماذج رياضية مبنياً على منحنى لوجستي على شكل حرف S خاص بالإنتاج التراكمي (كما يشير هبرت [2]) وعلى منحنى جرسي الشكل خاص بمعدل الإنتاج.

(٣,٣,٢) مخطط ماكيلفي The McKelvey Diagram

إحدى الطرق الأولى لوصف الاحتياطي المحتمل في مكمن معدني والتي تعرف اليوم بمخطط ماكيلفي كانت قد طورت بواسطة هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية. وأسهمت هذه الطريقة منذ عام ١٩٧٢م في صياغة المصطلحات الخاصة باحتياطيات الثروة المعدنية، حيث قدمت تعاريف لثلاثة مستويات من قابلية استخلاص الموارد المكتشفة وغير المكتشفة وهي: قابل للاستخلاص، وذو قابلية محددة للاستخلاص، وذو قابلية غير محددة للاستخلاص. وقد بني هذا المفهوم على ما يأتي:

١- أساس المورد، وهو تقدير جيولوجي للكمية الإجمالية للمورد في الأرض والقابلة للاستخلاص بتقنية ما مهما كانت التكلفة.

٢- الاحتياطيات، وهي تقدير معين للموارد القابلة للاستخلاص من مكامن مكتشفة باستخدام التقنيات الحالية بالأسعار الحالية.

وهكذا فإن الاحتياطيات في مكمن ما يمكن تقديرها كحاصل ضرب أساس المورد ومعامل قابلية الاستخلاص الذي يتم تحديده بناءً على التقنية المستخدمة والسعر. ويوضح الشكل رقم (٣,٩) هذا المفهوم.

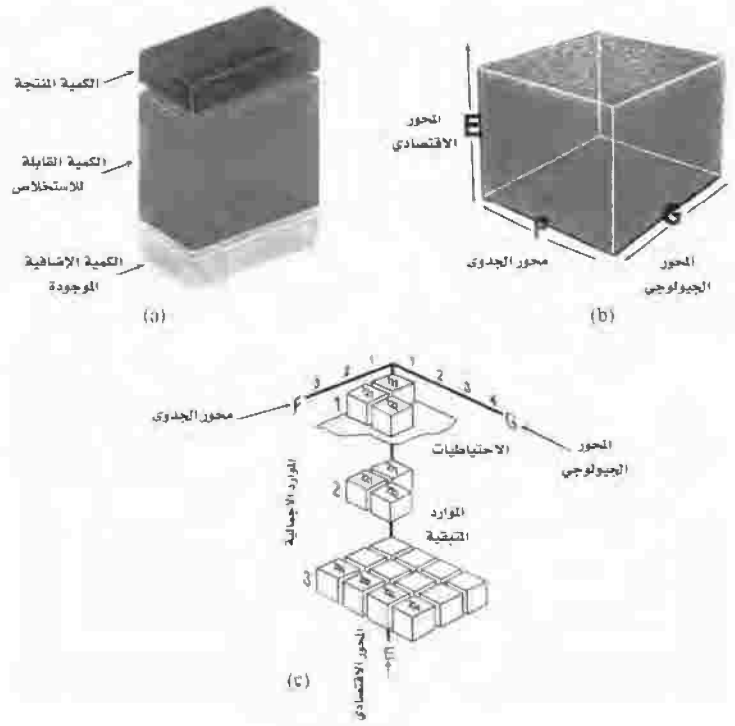
	تم التعرف عليه	غير مكتشف
ذو قابلية للاستخلاص	الاحتياطيات	تتطلب مزيداً من التنقيب والبحث والتطوير
ذو قابلية محددة للاستخلاص	قابل للاستخلاص بأسعار تزيد عن الحالية بمرة ونصف	يتطلب كذلك حوافز اقتصادية
ذو قابلية غير محددة للاستخلاص	قابل للاستخلاص مع حدوث تقدم في تقنية الاستخلاص	مجال للتخمين البحت

الشكل رقم (٣,٩). مخطط ماكيلفي لتقدير احتياطيات الثروة المعدنية.

وتم التوسع في استخدام هذه الطريقة لتشمل الاستخدامات التجارية لتقدير الاحتياطيات تحت ظروف اقتصادية أكثر قياسية يستفاد منها كأساس للتقديرات المالية وللضرائب. يتضمن الشكل خانات أخرى تربط بين تناقص درجة التيقن الجيولوجية وبين تناقص القابلية الاقتصادية للنمو.

وأدى تطوير منهجية مخطط ماكيلفي إلى تضافر عالمي للجهود، نتج عنه تصنيف الأمم المتحدة الهيكلي (UNCF) لموارد الطاقة والمعادن، والذي يهدف إلى هيكل عالمي لتقدير الاحتياطيات كجزء من إجمالي الموارد. قدم آلبرانت وزملاؤه [5] في أحد أبحاثهم شرحاً لنظام التصنيف الهيكلي للنفط والغاز والمعادن الصلبة. يقدم التقرير النهائي [6] للمفوضية الأوروبية الاقتصادية للأمم المتحدة (UNECE) تفاصيل عن نظام تصنيف الأمم المتحدة الهيكلي (UNCF).

وبنيت الإجراءات في هذا النظام على أساس ثلاثة عوامل تُعرِّف بدقة الخصائص الهامة للمورد في اقتصاديات السوق. يوضح الشكل رقم (٣,١٠) كيفية بناء هذا النموذج.



الشكل رقم (٣,١٠). البنية الأساسية مكعبة الشكل لنظام EFG الخاص بتصنيف الأمم المتحدة الهيكلي لتقييم الموارد [6].

ويؤخذ المورد الابتدائي الإجمالي (الموجود حالياً، كما في مخطط ماكيلفي) في الاعتبار باستخدام ثلاث كميات (الشكل رقم ٣,١٠أ)، هي:

١- الكمية التي تم إنتاجها.

٢- الكمية المتبقية المتوقعة والقابلة للاستخلاص.

٣- الكميات الإضافية التي قد تكون موجودة.

وبما أن الكمية المنتجة تعد معروفة والكميات الإضافية مجهولة فإن هذه الطريقة تركز على الكميات المتبقية القابلة للاستخلاص. وأساس التصنيف هو تقدير إجمالي المتبقي من المورد بناءً على ثلاثة معايير تعرف بنظام EFG والذي تعني حروفه :

E = القابلية الاقتصادية (economic) والتجارية للنمو.

F = حالة المشروع الميداني (field) وجدواه.

G = المعرفة الجيولوجية (geologic).

ويتطلب هذا النموذج معرفة تفاصيل عن المعلومات المتوفرة عن هذه المعايير الثلاثة باستخدام البنية التكعيبية الموضحة في الشكل رقم (١٠,٣ب).

يعطي الشكل رقم (١٠,٣ج) مثالاً عن طريقة الترميز ثلاثية الخانات للمواد الصلبة مثل الفحم، وخام اليورانيوم، بحيث يكون المكعب ١١١ أكثر أهمية بالنسبة لنا. يقتضي تصنيف الاحتياطيات أن تكون تقديرات الكميات لذلك المكعب هي: قابل للاستخلاص اقتصادياً وتجارياً في المتجه E1، قابليته للاستخلاص مبررة (عن طريق دراسة جدوى أو إنتاج فعلي) في المتجه F1، ومبني على معلومات جيولوجية مؤكدة في المتجه G1. أما التقديرات لبقية الموارد فيعبر عنها في فئات فرعية من المتجهات الثلاثة.

والطريقة الأكثر شيوعاً لتقدير الاحتياطيات الضخمة مبنية على أساس وضع نموذج منحنى لوجستي مزود ببيانات عن معدل الإنتاج والاكتشاف. يستخدم النموذج البيانات التاريخية للإنتاج السنوي التي تم تجميعها طوال فترة الاستخلاص ويستقرئ أقصى كمية يمكن استخلاصها من المورد باستخدام منحنى لوجستي على شكل حرف S، كما يقدر النموذج طريقة تغير معدل إنتاج مورد محدود كمنحنى جرسي الشكل، بحيث تكون المساحة تحت المنحنى مساوية لأقصى كمية يمكن استخلاصها. يُحسب المنحنى اللوجستي على ثلاث فترات زمنية، هي :

١- المبكرة: ويكون فيها النمو أسّياً حتى الزمن t (ببيانات السنة الحالية).

٢- المتوسطة: ويتم فيها تقدير نقطة انقلاب المنحنى عند المعدل الأقصى للاستخلاص عند الزمن t_m.

٣- المتأخرة: حيث يتقارب إجمالي الاستخلاص من أقصى كمية يمكن استخلاصها.

كانت هذه هي الطريقة التي استخدمها هبرت [2] لتقدير موارد الوقود الأحفوري في الولايات المتحدة والعالم. أما اليوم فهناك معلومتان أخريتان تستخدمان عملياً، إحداهما سنوية والأخرى تراكمية، وهما:

١- الموارد الإضافية المكتشفة.

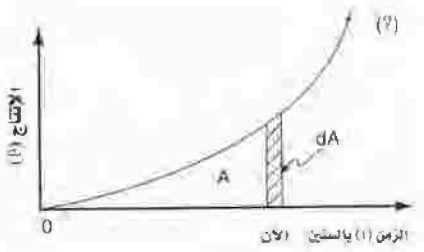
٢- التقدير المنقح للاحتياطيات المؤكدة الباقية.

(٣,٣,٣) إنتاج مورد محدود Production of a Finite Source

تتبع الإحصاءات الخاصة بالمرحلة المبكرة من الإنتاج التجاري الحديث والناجح لمورد أولي منحنى أسّياً سريع النمو، حيث يُعبّر عن معدل الإنتاج (P) بالمعادلة الآتية:

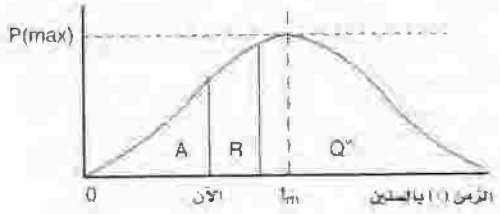
$$P = \frac{dQ}{dt} \qquad (٣,٣)$$

حيث إن dQ هي الكمية المنتجة في وحدة زمنية (سنة على سبيل المثال) كما هو موضح في الشكل رقم (٣,١١).



الشكل رقم (٣,١١). تاريخ معدل الإنتاج المبكر لمورد جديد.

تمثل المساحة تحت المنحنى التي تمتد إلى النقطة الزمنية "الآن" إجمالي الإنتاج Q(t) من الزمن t = 0 وحتى "الآن". تمثل المساحة متناهية الصغر dA أحدث ما تم إنتاجه في زمن مقداره dt. تعزز البيانات الأولية للإنتاج التوقع بأن المورد سيبقى إلى الأبد. إلا أن إجمالي إنتاج مورد محدود هو دائماً أقل من (أو في نهاية المطاف سيساوي) الكمية الإجمالية للمورد Q^{∞}. لذا من السهل افتراض أن المنحنى النهائي للإنتاج يشبه في شكله التوزيع جرسي الشكل الموضح في الشكل رقم (٣,١٢).



الشكل رقم (٣,١٢). منحنى معدل الإنتاج الإجمالي لمورد محدود تم استخلاصه بالكامل.

يمثل R في هذا الشكل الاحتياطيات المؤكدة، بينما يمثل P(max) المعدل الأقصى للإنتاج عند الزمن t_m في المستقبل، ويمثل Q^{∞} أقصى ما يمكن استخلاصه من المورد والذي يعبر عنه بالمعادلة الآتية:

$$Q^{\infty} = \int_0^{\infty} P\,dt \qquad (٣,٤)$$

(٣,٣,٤) طريقة منحنى الإنتاج اللوجستي The Logistic Production Curve Method

تستخدم طريقة منحنى الإنتاج اللوجستي الميزتين الإضافيتين اللتين تمت الإشارة لهما في القسم (٣,٣,٢) وهما منحنى الموارد المكتشفة، والتقدير المنقح للاحتياطيات المؤكدة الباقية. وفيما يأتي سرد للمصطلحات الفنية الخاصة بهذه الطريقة:

$Q_P(t)$ = الإنتاج التراكمي حتى الزمن t

$Q_D(t)$ = الكمية التراكمية للاحتياطيات المكتشفة

$Q_D(t) - Q_P(t) = Q_R(t)$ = الاحتياطيات المؤكدة الباقية

Δt = الفارق الزمني بين اكتشاف موارد جديدة والبدء في الإنتاج منها

عندئذ يكون : $Q^\infty = Q_D(\infty) - Q_P(\infty)$ = أقصى كمية احتياطيات قابلة للاستخلاص

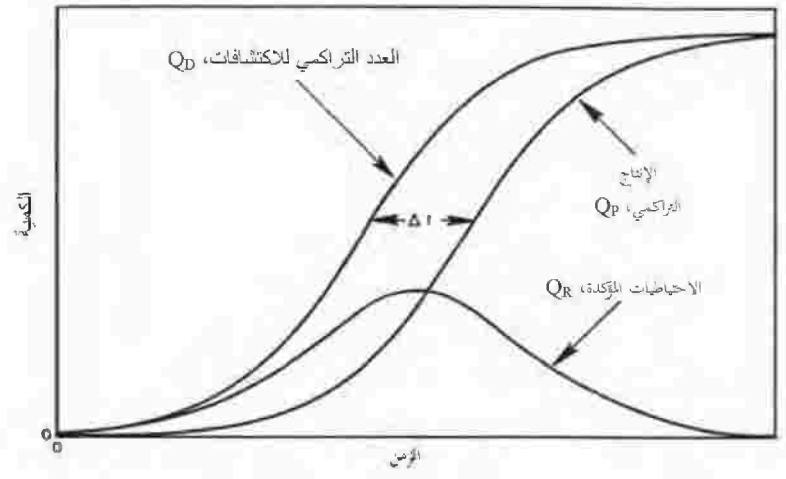
وفي حالة أن : $Q_D(t) - Q_P(t) = R$ (الاحتياطيات المؤكدة الباقية)

وأن : $P = dQ_P/dt$ = معدل الإنتاج السنوي

فإن : R/P = مدة بقاء المورد بناءً على معدل إنتاج حالي ثابت

ولكن ما هي قيمة Q^∞؟

يتبع منحنى الإنتاج التراكمي (الناتج عن تكامل منحنى الإنتاج المبين في الشكل رقم ٣,١٢) منحنى النمو اللوجستي طبقاً للمعادلة رقم (٢,١١) (انظر القسم ٢,٢,٤). ويبين الشكل رقم (٣,١٣) العلاقة بين العدد التراكمي للاكتشافات والإنتاج التراكمي والاحتياطيات المؤكدة.

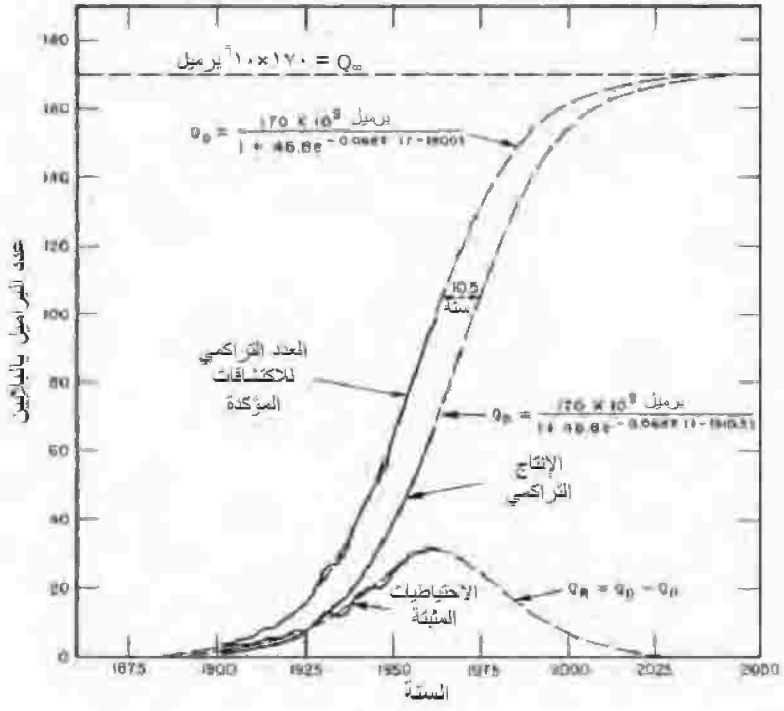


الشكل رقم (٣,١٣). الاكتشافات والإنتاج التراكمي والاحتياطيات المؤكدة [2].

يمكن تقدير الفارق الزمني Δt، والذي يتفاوت في حد ذاته مع الزمن، عن طريق توفيق المنحنيين اللوجستيين، وتستخدم أفضل قيمة لمتوسط Δt قرب نقاط انقلاب المنحنيين اللوجستيين للحصول على قيم a وb وQ∞ باستخدام المعادلتين الآتيتين:

$$Q_P = \frac{Q^{\infty}}{1+ae^{-(bt+\Delta t)}} \quad \text{و} \quad Q_D = \frac{Q^{\infty}}{1+ae^{-bt}} \qquad (٣,٥)$$

يعطي الشكل رقم (٣,١٤) مثالاً على الطريقة التي استخدمها هبرت [2] لتقدير أقصى كمية احتياطيات قابلة للاستخلاص من النفط الخام في الولايات المتحدة.



الشكل رقم (٣,١٤). طريقة المنحنى اللوجستي المستخدمة لبيانات النفط الخام في الولايات المتحدة الموجودة في هبرت [2].

ويضم الجدول رقم (٣,٥) ملخصاً لنتائج التحليل الذي قام به هبرت [2] لموارد الوقود الأحفوري في الولايات المتحدة والعالم، وذلك وفقاً للبيانات المتوفرة حتى ستينيات القرن العشرين. واستخدم في تقدير الحد الأقصى للاحتياطيات وحدة بلايين الأطنان المترية للفحم وبلايين الأطنان للنفط وتريليونات الأقدام المكعبة للغاز الطبيعي، أما الوحدات المستخدمة لمحتوى الطاقة الحرارية فهو إكساوات-ساعة (10^{18} وات-ساعة).

الجدول رقم (٣,٥). الاحتياطيات القصوى للوقود الأحفوري ومحتوى الطاقة بتقديرات ستينيات القرن العشرين [2].

	الولايات المتحدة		بقية العالم	
الوقود الأحفوري	الاحتياطيات	الطاقة	الاحتياطيات	الطاقة
الفحم (الطن البريطاني)	٨٧٥	٦,٨	٢٤٠٠	١٩,٦
النفط الخام (مليار برميل)	١٧٠	٠,٢٥	١٢٥٠	٢,٤
الغاز الطبيعي (تريليون قدم مكعب)	١٠٠٠ ~	٠,٢٥	٧٥٠٠ ~	٢,٤
الزيت الحجري (مليار برميل)	٨٥٠	١,٤	١٣٠٠	٢,٢
رمال القطران (مليار برميل)	٢,٦	٠,٠	٤٩٠ <	٠,٨
إجمالي الطاقة الحرارية (إكساجول-ساعة)		٨,٧		٢٧,٤

ونشر كاسيدي وجروسمان [7] جدولة عامة أخرى لموارد الوقود الأحفوري العالمية باستخدام بيانات منشورة تم تجميعها للفترة من ١٩٧٩ - ١٩٩٥م. ويضم الجدول رقم (٣,٦) هذه البيانات بعد إعادة ترتيبها ليظهر فيها أحدث معدل إنتاج P والاحتياطيات الباقية R ومدة البقاء المبنية على المعلومات الحالية R/P والحد الأقصى للمورد Q^{∞} والموارد غير المكتشفة الباقية ($Q^{\infty} - Q_D$).

الجدول رقم (٣,٦). الموارد المقدرة للوقود الأحفوري في العالم من ١٩٧٩ – ١٩٩٥م [7].

	الفحم		النفط الخام		الغاز الطبيعي	
	طن بريطاني/سنة	طن بريطاني السنوات	طن بريطاني/سنة	طن بريطاني السنوات	طن بريطاني/سنة	طن بريطاني السنوات
معدل الإنتاج (P)	٣,٥٣		٢٢		٧٣	
الاحتياطيات (Q_R)		١٠٣٨		١١٠٣		٤٩٨٠
مدة البقاء الحالية (R/P)		٢٩٤		٥٠		٦٨
المورد (Q^{∞})		~ ٥٣٨٠		٢٢٧٣		١١٥٦١
الباقي (Q^{∞}-Q_D)		~ ٥٤٠٠		٤٧١		٤٦٨٧

ويشتمل الجدول رقم (٣,٧) على تقديرات أحدث لاحتياطيات الوقود الأحفوري في الولايات المتحدة والعالم [8] تم تجميعها من تقارير لمجلس الطاقة العالمي ومن تقرير شركة بريتيش بيتروليوم الإحصائي عن الطاقة في العالم (*BP Statistical Review of World Energy*) ومن تقرير وكالة معلومات الطاقة التابعة لوزارة الطاقة الأمريكية (DOE/EIA). بالنسبة للفحم فالسنة الأولى في الجدول هي ١٩٩٧م بدلاً من ١٩٩٢م.

وتجدر الإشارة إلى أن التغيرات في تقديرات الوقود الأحفوري في العالم خلال فترة الأربعين عاماً التي حدث فيها تطوير مستمر لطرق ونماذج تقنية أكثر حساسية في تقديرها لإجمالي الموارد والاحتياطيات الباقية والأعمار النافعة لموارد الطاقة الأحفورية المحدودة. وتناقصت القيم الخاصة بالفحم بثبات من ٢٤٠٠ مليار طن متري عام ١٩٦٢م إلى ١٠٣٨ مليار طن متري عام ١٩٩٥م وإلى ٩٨٤ مليار طن متري عام ٢٠٠٢م. أما القيم المناظرة بالنسبة للنفط الخام فكانت ١٢٥٠ و١١٠٣ و١٠٤٧ مليار برميل. لا يزال من الصعب تقدير احتياطيات الغاز الطبيعي لقلة البيانات الشاملة عن إنتاجه وحرقه. وسيُغطى موضوع استغلال الغاز الطبيعي في الفصل الرابع، حيث ستتم دراسة استدامة الغاز الطبيعي بحيث يلبي الطلب الحالي والجديد على استخدامه كلقيم للصناعات الكيميائية واستخدامه للتدفئة والتبريد في المباني التجارية والسكنية وكمصدر للطاقة في إنتاج الكهرباء وكوقود للنقل.

(٣,٤) نمو الطلب على الوقود الأحفوري لإنتاج الكهرباء
Growth of Fossil Fuel Demand for Generation of Electricity

أصبحت الطاقة الكهربائية الشكل المهيمن من الطاقة في تصنيع (industrialization) الولايات المتحدة. وتمت الإشارة إلى النمو في إنتاج الكهرباء منذ عام ١٩٥٠م في الجدول رقم (٢,٩) في القسم (٢,٣,١). وكان الوقود الأحفوري هو الداعم الرئيس للنمو في هذه الفترة.

الجدول رقم (٣,٧). التقديرات الحالية لموارد الوقود الأحفوري في العالم [8].

		الفحم		النفط الخام		الغاز الطبيعي	
	(السنة)	الاحتياطيات (طن بريطاني)	مدة البقاء الحالية بالسنوات (R/P)	الاحتياطيات (مليار برميل)	مدة البقاء الحالية بالسنوات (R/P)	الاحتياطيات (تريليون قدم مكعب)	مدة البقاء الحالية بالسنوات (R/P)
الولايات المتحدة	١٩٩٢م	٢٤١	٢٤٤	٣٢,١	١٠	١٦٧	٩,٤
	٢٠٠٢م	٢٥٠	٢٥٢	٣٠,٤	١١	١٨٤	٩,٦
بقية العالم	١٩٩٢م	١٠٣١	٢١٩	١٠٠٧	٤٢	٤٨٩٠	٦٦
	٢٠٠٢م	٩٨٤	٢٠٤	١٠٤٧	٤١	٥٥٠٠	٦١

ويلخص الجدول رقم (٣,٨) بيانات إنتاج الكهرباء المأخوذة من وزارة الطاقة الأمريكية حسب اسم الوقود، بينما يلخص الجدول رقم (٣,٩) هذه البيانات بناءً على تصنيف الوقود. يوضح الشكل رقم (٣,١٥) توزيع الوقود الأحفوري والنووي وأنواع الوقود المتجدد خلال هذه الفترة. تراوحت نسبة إنتاج الكهرباء من الوقود الأحفوري بين ٦٩٪ و٨٠٪ خلال هذه الفترة وازداد إنتاج الكهرباء في العقد الأخير (من عام ١٩٩٠ - ٢٠٠٠م) من ٣,٠ إلى ٣,٨ بيتاوات-ساعة في السنة بمعدل نمو سنوي متوسط مقداره ٢,٣٦٪ / السنة.

ويمكن استنباط عدة نتائج من هذه البيانات. النتيجة الأولى هي أن النمو الثابت في عملية ربط الولايات المتحدة بالكهرباء منذ عام ١٩٥٠م كان معدله ٤,٧٨٪/السنة (أي أن الزمن اللازم للتضاعف هو ١٥ سنة). النتيجة الثانية هي أن النسبة المهيمنة (٧٠٪ - ٨٠٪) كانت من نصيب الوقود الأحفوري. وقد شهد استخدام الوقود الأحفوري لغرض إنتاج الكهرباء تغيرين ملحوظين، فقد كان الفحم هو الوقود الرئيس لإنتاج الكهرباء، وكان ينمو بثبات بمعدل نمو سنوي متوسط يقارب ٥٪/السنة، بينما استمرت نسبة استخدام النفط بالازدياد حتى عام ١٩٨٠م ثم انخفضت عندما أصبح يستخدم لقطاع النقل بشكل رئيس. أما الطاقة المتجددة فقد جاء معظم استخدامها خلال هذه الفترة من القدرة الكهرومائية. وتمت موازنة التناقص في نسبة استخدام الوقود الأحفوري منذ عام ١٩٨٠م بالنمو السريع في القدرة النووية منذ خمسينيات القرن العشرين وحتى الثمانينيات منه تقريباً، عندما أدت المشاعر الشعبية المعادية للطاقة النووية إلى عدم المضي قدماً في بناء محطات جديدة للقدرة النووية. استمرت هذه النسبة في الازدياد، إلى حد ما، في الوقت الذي ازدادت فيه كفاءة محطات القدرة النووية الموجودة بشكل ملحوظ.

تشير التوقعات التي قامت بها وكالة معلومات الطاقة بوزارة الطاقة الأمريكية عام ٢٠٠٤م [3] والخاصة بإنتاج الكهرباء إلى استمرار النمو إلى ٥,٢٥٢ بيتاوات-ساعة عام ٢٠٢٥م (الشكل رقم ٣,١٦) بمعدل نمو سنوي متوسط مقداره ١,٩٪/السنة، متوقعة أن تأتي معظم الطاقة الأولية من الوقود الأحفوري. وبالرغم من أن الفحم يظل يشكل نسبة كبيرة فإنه من المتوقع أن يكون هناك تسارع كبير في استغلال الغاز الطبيعي إلى عام ٢٠٢٥م، بينما سيظل استخدام الطاقة النووية ثابتاً بسبب عدم إنشاء محطات قدرة نووية جديدة مع تمديد التراخيص للعديد من المحطات الحالية لمدة ٢٠ سنة أخرى. تبين التوقعات أيضاً المزيد من التناقص في استخدام النفط لإنتاج الكهرباء، ونمواً بسيطاً في استغلال الطاقة المتجددة غير المائية.

الجدول رقم (٣,٨). إنتاج الكهرباء (بالبيتاوات-ساعة) في الولايات المتحدة حسب نوع الوقود من ١٩٥٠ - ٢٠٠٠م [3].

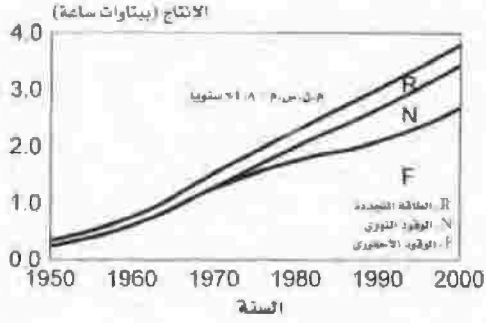
السنة	الفحم	النفط	الغاز الطبيعي	اليورانيوم	القدرة المائية	الأنواع الأخرى
١٩٥٠م	٠,١٥٥	٠,٠٣٤	٠,٠٤٥	٠,٠٠٠	٠,١٠١	٠,٠٠٠
١٩٦٠م	٠,٤٠٣	٠,٠٤٨	٠,١٥٨	٠,٠٠١	٠,١٤٩	٠,٠٠١
١٩٧٠م	٠,٧٠٤	٠,١٨٤	٠,٣٧٣	٠,٠٢٢	٠,٢٥١	٠,٠٠١
١٩٨٠م	١,١٦٢	٠,٢٤٦	٠,٣٤٦	٠,٢٥١	٠,٢٧٩	٠,٠٠٦
١٩٩٠م	١,٥٩٤	٠,١٢٧	٠,٣٧٣	٠,٥٧٧	٠,٢٩٣	٠,٠٦٤
٢٠٠٠م	١,٩٦٦	٠,١٢٥	٠,٦٠١	٠,٧٥٤	٠,٢٧٦	٠,٠٨١
م.ن.س.م* (٪/سنة)	٤,٩٥	٢,٧٨	٤,٤٢	٢٢,٨	٢,٠٥	غير متوفر

* م.ن.س.م: معدل النمو السنوي المتوسط.

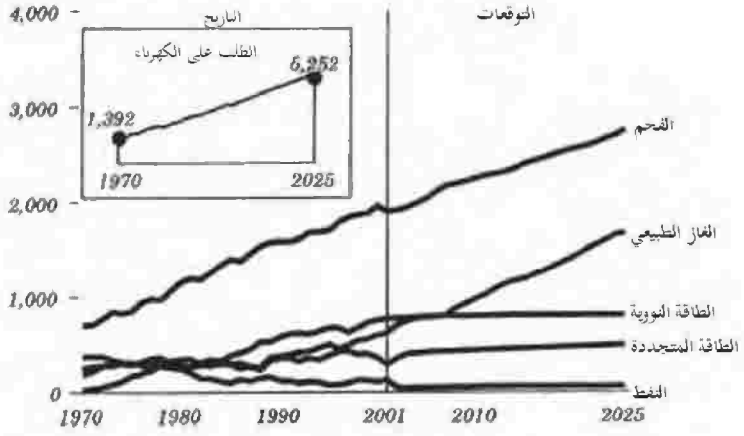
الجدول رقم (٣,٩). إنتاج الكهرباء في الولايات المتحدة حسب نوع الوقود من ١٩٥٠ - ٢٠٠٠م [3].

السنة	الوقود الأحفوري		الطاقة النووية		الطاقة المتجددة		الإجمالي
	بيتاوات-ساعة	(٪)	بيتاوات-ساعة	(٪)	بيتاوات-ساعة	(٪)	(بيتاوات-ساعة)
١٩٥٠م	٠,٢٣٣	٧٠	٠,٠٠٠	٠,٠	٠,١٠١	٣٠	٠,٣٣٤
١٩٦٠م	٠,٦٠٩	٨٠	٠,٠٠١	٠,١	٠,١٥٠	٢٠	٠,٧٦٠
١٩٧٠م	١,٢٦٢	٨٢	٠,٠٢٢	١,٤	٠,٢٥٢	١٦	١,٥٣٦
١٩٨٠م	١,٧٥٤	٧٧	٠,٢٥١	١١,٠	٠,٢٨٥	١٢	٢,٢٩٠
١٩٩٠م	٢,١٠٤	٦٩	٠,٥٧٧	١٩,٠	٠,٣٥٧	١٢	٣,٠٣٨
٢٠٠٠م	٢,٦٩٣	٧١	٠,٧٥٤	١٩,٨	٠,٣٥٧	٩	٣,٨٠٤
م.ن.س.م* (٪/سنة)	٤,٦٥		٢٢,٨		٢,٥٨		٤,٧٨٠

* م.ن.س.م: معدل النمو السنوي المتوسط.



الشكل رقم (٣,١٥). إنتاج الكهرباء حسب نوع الوقـود في الولايـات المتحـدة منـذ ١٩٥٠ – ٢٠٠٠م [3].



الشكل رقم (٣,١٦). توقعات وكالة معلومات الطاقة التابعة لوزارة الطاقة الأمريكية (DOE/EIA) لإنتاج الكهرباء حسب نوع الوقود [3].

(٣,٥) الخلاصة

Summary

تم في هذا الفصل دراسة دور الوقود الأحفوري في إمدادات الطاقة منذ الثورة الصناعية. واتضح استمرار التحول في هذه الإمدادات من استخدام الخشب كوقود أساسي إلى استخدام أنواع مختلفة من الوقود الأحفوري كانت تتغير بشكل دوري سائرة في اتجاه الطاقة النوعية الأعلى وفي اتجاه الراحة والسهولة، بدءاً بالفحم ومروراً بالنفط ثم الغاز الطبيعي. وتشير بيانات استهلاك الطاقة في الولايات المتحدة في القرن الماضي إلى أن متوسط النمو كان ثابتاً عند ٥٪/السنة تقريباً وكانت أنواع الوقود الأحفوري المختلفة تمثل حوالي ٨٠٪ من إجمالي استهلاك الطاقة. وقد ارتفع إنتاج الطاقة الكهربائية مع نهاية القرن ليمثل ٣٨٪ من استهلاك الطاقة الأولية. كما تمت دراسة الإجراءات المتبعة لتقدير كمية الوقود الأحفوري المتوفر للمستقبل ومدة بقائه بناءً على مستويات الإنتاج الحالية. وفي الغالب، فإن نمو السكان وارتفاع مستوى المعيشة في العالم سيقللان مدة بقاء الوقود الأحفوري إذا تناقص اكتشاف موارد جديدة. ويتضح من خلال نظرة مستقبلية إلى عام ٢٠٢٥م استمرار اعتماد الولايات المتحدة (والعالم بمجمله) على النمو المستمر لاستهلاك الوقود الأحفوري. وسيتم في الفصل الرابع من هذا الكتاب دراسة قضية استدامة استهلاك الطاقة، لا سيما كونها تؤثر على الطلب المتنامي بشكل سريع على الغاز الطبيعي باعتباره سلعة كيميائية ووقوداً للطاقة.

المراجع References

[1] S. Fetter, *Climate Change and the Transformation of World Energy Supply*. Center for International Security and Cooperation (CISAC) Report. Stanford, CA: Stanford University, May 1999

[2] M. K. Hubbert, *Energy Resources: A Report to the Committee on Natural Resources*. National Academy of Sciences-National Research Council Publ. 1000-D. National Academies Press, Washington, DC, 1962.

[3] U.S. Department of Energy, Energy Information Agency, *Annual Energy Outlook 2004*. Report No. DOE/EIA-0383(04) (and earlier years). Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2004.
[4] U.S. Department of Energy, Energy Information Agency, *International Energy Outlook 2003*. Report No. DOE/EIA-0393(03). Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2004.
[5] T. S. Ahlbrandt et al., *Updated United Nations Framework Classification for Reserves and Resources of Extractive Industries*. Paper SPE 90839, Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference, Houston, TX, September 26-29, 2004.
[6] United Nations Economic Commission for Europe, *Final Report on the United Nations Framework Classification (UNFC) for Energy and Mineral Resources*. Available at www.unece.org/ie/se/reserves.html, 2005.
[7] E. S. Cassedy and P. Z. Grossman, *Introduction to Energy*, 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1998.
[8] BP p.l.c., *BP Statistical Review of World Energy*, June 2005. Available at www.bp.com/statisticalreview2005.