الفصل السابع

موارد الطاقة المتجددة
RENEWABLE ENERGY RESOURCES

(٧,٠) الطاقة المتجددة
Renewable Energy

وضعت للطاقة المتجددة العديد من التعريفات على مدى السنوات الخمسين الماضية، وذلك بسبب تركيز الجهات المختلفة على مسببات اجتماعية وجوانب تقنية تختلف عن بعضها بعضاً. هناك تعريف عام، ينسب لحركة حماية البيئة منذ ستينيات القرن العشرين، أي مصدر للطاقة يدخل فيه يُعد "بديلاً" عن أنواع الوقود الأحفوري "التقليدية" (والوقود النووي في نظر البعض). ويشمل هذا التعريف الطاقة الجيوحرارية، التي لا تُعد في الحقيقة مورداً متجدداً، إذ إن إحلال الحرارة المستخلصة من المكامن الجيوحرارية من جديد يتطلب فترة تمتد لمئات أو آلاف السنين.

(٧,٠,١) أنواع الطاقة المتجددة Types of Renewable Energy

من الملائم أن تصنف موارد الطاقة الأولية إلى ثلاثة أنواع رئيسة:

١- أولية: وهي مصادر الحرارة التي نشأت مع تكون الكرة الأرضية. منذ العصور القديمة، كان الماء المغلي الذي يظهر من الينابيع الساخنة يستخدم للطهي. توجد اليوم الموارد الجيوحرارية (الهيدروحرارية والبتروحرارية)، وهي ترسبات

تحتوي على الحرارة، على مسافة قريبة من سطح الأرض لدرجة تسمح باستخلاصها بكميات تجارية من خلال آبار جيوحرارية.

٢- أحفورية: وهي مواد عضوية متحللة (تحتوي على الكربون)، ترسبت على مدار ملايين السنين، ويمكن استخلاصها باستخدام الطرق الصناعية لاستخراج المعادن.

٣- متجددة: ويتكون هذا النوع من الطاقة المتدفقة والمتوفرة بشكل يومي من المصادر الشمسية والقمرية التي تصل إلى الأرض.

ويمكن تصنيف الطاقة المتوفرة للإنسان بناءً على مصدرها إلى طاقة شمسية وقمرية وأرضية. وباستخدام الرسم البياني لتدفق الطاقة على الأرض (الشكل رقم ٢,١)، فإن الطاقة التي يمكن الحصول عليها من هذه الأنواع هي:

الطاقة الشمسية:	حرارية (حرارة وإشعاع)	٧٦ بيتاوات
	الطاقة المائية (الدورة الهيدرولوجية)	٤٠ بيتاوات
	حركية (طاقة الرياح)	٠,٣٧ بيتاوات
	حيوية (لأغراض الغذاء والطاقة)	٠,٠٤ بيتاوات
الطاقة القمرية:	طاقة المد والجزر (طاقة الأمواج الساحلية)	٣ تيراوات
الطاقة الأرضية:	الحرارة الجيوحرارية (مورد تقديري)	٤٠٠ إكساجول

إن الموارد المتجددة الهامة التي ستتم دراستها في أقسام مستقلة في هذا الفصل هي:

الطاقة الكهرومائية	القسم ٧,١
الطاقة الشمسية الحرارية والكهروضوئية	القسم ٧,٢
طاقة الرياح	القسم ٧,٣
الطاقة الحيوية (الوقود الحيوي)	القسم ٧,٤

(٧,٠,٢) استهلاك الطاقة المتجددة Consumption of Renewable Energy

سبق أن استعرضنا في القسم (٢,٣,١) البيانات الخاصة بالتوجهات في استهلاك الطاقة في الولايات المتحدة منذ عام ١٩٠٠م. كانت إحدى الملاحظات المهمة حينها هي

التناقص المستمر في معدل نمو الاستهلاك مع ازدياد المقدار الإجمالي لاستهلاك الطاقة. أدى الوعي الاجتماعي *بتقنيات الطاقة المناسبة* خلال السنوات الأربعين الماضية إلى رغبة اجتماعية متزايدة في التحول إلى موارد للطاقة تكون نظيفة بيئياً ولا تؤثر على البيئة سلبياً (green energy). ويوضح الجدول رقم (٧,١) مدى تحقيق هذه الرغبة خلال السنوات الخمس الماضية. تشتمل البيانات التي جمعتها وكالة معلومات الطاقة الأمريكية (EIA) على الطاقة الجيوحرارية على أنها طاقة متجددة. إلا أنه مما يجدر ذكره أن بيانات عام ٢٠٠٢م صنفت على أنها بيانات مبدئية.

الجدول رقم (٧,١). كمية الطاقة المتجددة المستهلكة في الولايات المتحدة (بالكواد) من ١٩٩٨ – ٢٠٠٢م [1].

نوع الطاقة	السنة					م.ن.س.م*
	١٩٩٨م	١٩٩٩م	٢٠٠٠م	٢٠٠١م	٢٠٠٢م	(٪ / سنة)
الكهرومائية	٣,٣٠	٣,٢٧	٢,٨١	٢,٢٠	٢,٦٧	-٨,١٩
الشمسية	٠,٠٧	٠,٠٧	٠,٠٧	٠,٠٧	٠,٠٦	-٢,٣٩
الرياح	٠,٠٣	٠,٠٥	٠,٠٦	٠,٠٧	٠,١١	٢٨,٥
الكتلة الحيوية	٢,٨٢	٢,٨٧	٢,٨٩	٢,٦٦	٢,٧٤	-١,٣٧
الجيوحرارية	٠,٣٣	٠,٣٣	٠,٣٢	٠,٣١	٠,٣٠	-٢,١٤
إجمالي الطاقة المتجددة	٦,٥٥	٦,٥٩	٦,١٥	٥,٣١	٥,٨٨	-٤,٣١
الإجمالي في الولايات المتحدة	٩٥,١٤	٩٦,٧٦	٩٨,٩٣	٩٦,٣١	٩٧,٥٥	٠,٤٥
نسبة الطاقة المتجددة	٦,٨٨	٦,٨١	٦,٢١	٥,٥١	٦,٠٣	-٤,٧٦

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

توضح البيانات الخاصة بتلك السنوات الخمس بعض التوجهات المثيرة للاهتمام، منها انخفاض حجم استخدام أربعة من خمسة أنواع من الطاقة المتجددة في الوقت الذي زاد فيه استهلاك الطاقة في الولايات المتحدة ببطء، والمعدل العالي للنمو في استخدام طاقة الرياح من مستواها الأصلي المنخفض، والانخفاض الأكبر نسبياً في

استخدام الطاقة الكهرومائية وهي النوع الرئيس من الطاقة المتجددة، وكذلك معدل النمو السلبي العالي نسبياً في استخدام الطاقة الشمسية كنسبة من الاستهلاك الإجمالي للطاقة في الولايات المتحدة. وأشارت وكالة معلومات الطاقة التابعة لوزارة الطاقة الأمريكية إلى أن الانخفاض الضئيل في نسبة استهلاك الطاقة المتجددة من ٧٪ عام ١٩٩٨م إلى ٦٪ عام ٢٠٠٢م يعكس استمرار ارتفاع تكلفة هذه التقنيات مقارنة بتكلفة التقنيات المنافسة لا سيما تلك التقنيات التي تستخدم الغاز الطبيعي.

تُستخدم معظم منشآت الطاقة المتجددة التي تنشأ الآن (لا سيما المنشآت الكهرومائية والجيوحرارية) في توليد الكهرباء، لذا فنسبة الطاقة المتجددة المستهلكة في إنتاج الكهرباء مقارنة بإجمالي الطاقة المتجددة المستهلكة كل سنة خلال مدة السنوات الخمس هذه بقيت ثابتة تقريباً عند حوالي ٦٦٪. يورد الجدول رقم (٧,٢) البيانات المستقاة من تقرير وكالة معلومات الطاقة [1] والخاصة بتوليد الكهرباء (بوحدة تيراوات-ساعة) من الطاقة المتجددة، وذلك بهدف المقارنة. وفي الواقع فإن معدلات النمو في استخدام موارد الطاقة الثلاثة التي تستخدم لإنتاج الكهرباء (الكهرومائية والرياح والجيوحرارية) بقيت كما هي. إلا أن الفرق يكمن في استخدام الطاقة الشمسية والحيوية بغرض إنتاج الطاقة الحرارية، لكن هذين الاستخدامين محدودان نسبياً، إذ إن استخدام الطاقة الشمسية آخذ بالنمو كمصدر مفضل للطاقة في القطاع المنزلي، وتستخدم الكتلة الحيوية ممثلة في الخشب في التدفئة واستخدامها يتزايد كمادة خام في قطاع النقل لإنتاج الإيثانول الذي يضاف إلى البنزين لزيادة كفاءة احتراقه ولتقليل الانبعاثات من عوادم السيارات.

تشير توقعات وكالة معلومات الطاقة التي يوضحها الجدول رقم (٧,٣) والخاصة بالنمو في استهلاك الطاقة المتجددة في الولايات المتحدة إلى معدل نمو سنوي متوسط أكبر يبلغ حوالي ٢,١٪ / سنة مقارنة بمعدل النمو السلبي البالغ -٤,٣٪ / سنة خلال الفترة ١٩٩٨م-٢٠٠٢م. وبنيت هذه التوقعات على الفرض بأن المطالب

الاجتماعية والتقنيات المحسَّنة ستجتمع لتجعل الطاقة المتجددة قادرة على المنافسة بشكل أكبر على مدى السنوات الخمس والعشرين القادمة، كما بنيت على الفرض بأن استخدام الطاقة المتجددة لإنتاج الطاقة الكهربائية سينمو بمعدل أكبر من معدل استخدامها لتطبيقات الطاقة الحرارية.

الجدول رقم (٧,٢). إنتاج الكهرباء في الولايات المتحدة من الطاقة المتجددة (بالتيراوات–ساعة) من ١٩٩٨ – ٢٠٠٢م [1].

نوع الطاقة	السنة					م.ن.س.م*
	١٩٩٨م	١٩٩٩م	٢٠٠٠م	٢٠٠١م	٢٠٠٢م	(٪ / سنة)
الكهرومائية	٣٢٣,٣	٣١٩,٥	٢٧٥,٦	٢١٧,٠	٢٦٣,٦	٧,٩٥–
الشمسية	٠,٥	٠,٥	٠,٥	٠,٥	٠,٥	٢,٥٣
الرياح	٣,٠	٤,٥	٥,٦	٦,٧	١٠,٥	٢٩,٠
الكتلة الحيوية	٥٨,٨	٥٩,٦	٦٠,٧	٥٧,٠	٥٩,٤	٠,٢٥–
الجيوحرارية	١٤,٨	١٤,٨	١٤,١	١٣,٧	١٣,٤	٢,٧٨–
إجمالي الطاقة المتجددة	٤٠٠,٤	٣٩٩,٠	٣٥٦,٥	٢٩٤,٩	٣٤٧,٥	٥,٨٦–

* م.ن.س.م: معدل النمو السنوي المتوسط.

الجدول رقم (٧,٣). التوقعات لاستهلاك الطاقة المتجددة حتى عام ٢٠٢٥م [2].

السنة	الطاقة الأولية			الطاقة الكهربائية		
	الطاقة المتجددة (كواد)	الإجمالي (كواد)	النسبة (٪)	الطاقة المتجددة (بيتاوات–ساعة)	الإجمالي (بيتاوات–ساعة)	النسبة (٪)
٢٠٠٠م	٥,٩٦	٧٢,٢	٨,٣	٠,٣١٦	٣,٤٦	٩,١
٢٠٠٥م	٦,٧١	٧٤,٦	٩,٠	٠,٣٧٨	٣,٦٨	١٠,٣
٢٠١٥م	٧,٧٥	٨٢,٣	٩,٤	٠,٤٠٥	٤,٥١	٩,٠
٢٠٢٥م	٨,٧٨	٨٩,٣	٩,٨	٠,٤٢٩	٥,٣١	٨,١
م.ن.س.م* (٪/سنة)	٢,١	٠,٩		٢,١	١,٩	

* م.ن.س.م: معدل النمو السنوي المتوسط.

(٧,١) الطاقة الكهرومائية
Hydroelectric Power

الطاقة المائية هي طاقة المياه المتحركة (المتساقطة). وقد استخدمت النواعير لآلاف السنين لطحن الحبوب وتوزيع مياه الري. أما الاستخدام الرئيس للطاقة المائية اليوم فهو لتوليد الكهرباء. تشير الجمعية الوطنية للطاقة المائية (National Hydropower Assoication) إلى أن الطاقة المائية هي مصدر طاقة نظيف ومتجدد ويمكن الاعتماد عليه وهو مصدر يخدم البيئة الوطنية وأهداف سياسة الطاقة (انظر "الحقائق التي ينبغي أن تعرفها عن الطاقة المائية" Facts You Should Know about Hydropower في http://www.hydro.org/). كما تشير الجمعية إلى أن الطاقة الاستيعابية الحالية الإجمالية لمحطات القدرة الكهرومائية في الولايات المتحدة تزيد عن ١٠٠ جيجاوات (بما في ذلك القدرة الاستيعابية للتخزين الضخي)، وهذا يشكل ثلثي القدرة الحالية القصوى البالغة ١٤٨ جيجاوات كما قدرها هبرت [3] في ستينيات القرن العشرين. لقد كانت القدرة الاستيعابية العاملة عام ٢٠٠٠م هي ٧٩,٤ جيجاوات [1]، وتم التوقع بأنها ستكون ٧٨,٧ جيجاوات عام ٢٠٢٥م.

تنتج القدرة الكهرومائية واسعة الاستخدام في محطات القدرة الكهرومائية، عن طريق السماح للماء بالتساقط بمعدل تدفق يتم التحكم فيه من خزان تكوّن بفعل تشييد سد على نهر، ويمر الماء من خلال بوابة الخزان (أنبوب) ليصل إلى التوربين ومن ثم المحول الكهربائي الموجودين على مسافة معينة أسفل البوابة. ويعرض الشكل رقم (٧,١) رسماً توضيحياً لنموذج محطة قدرة كهرومائية.

تحكم كمية القدرة الكهربائية الناتجة ثلاثة عوامل رئيسة تدخل تصميم المحطة، هي :

١- الارتفاع (head) : المسافة العمودية لتساقط الماء المتدفق (h، وتقاس بالمتر).

٢- التدفق : معدل التدفق الحجمي للماء (Q، ويقاس بالمتر المكعب/ثانية).

٣- معامل التحويل، F، لمعدات التوربين والمحول الكهربائي.

ويعطى مقدار الطاقة الكامنة (potential energy) (PE، وتقاس بوحدة الجول) الخاصة بمجرى ماء متساقط بالمعادلة الآتية :

$$PE = m\,g\,h \qquad (٧,١)$$

أما القدرة المنتجة (P، وتقاس بالكيلووات) فإنها تعطى بالمعادلة الآتية :

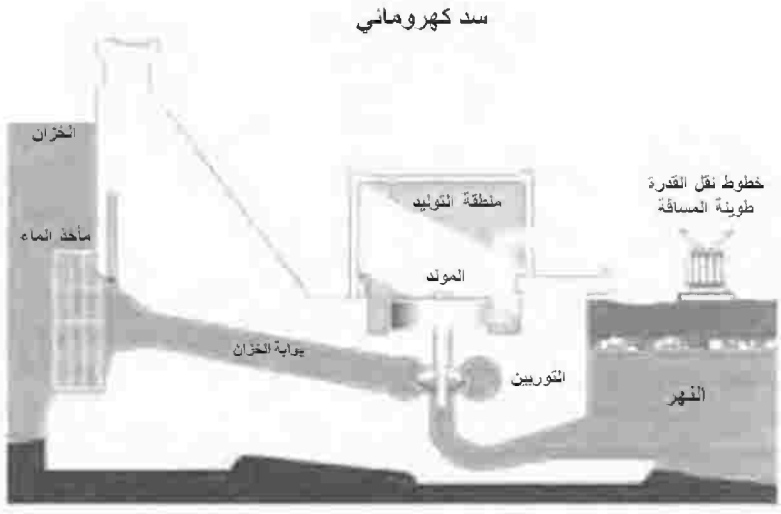
$$P = F\,(\rho Q)\,g\,h \qquad (٧,٢)$$

حيث إن :

ρ = كثافة الماء (كجم/م^٣)

$\rho\,Q$ = تدفق الكتلة (m، ويقاس بوحدة كجم/ثانية)

g = تسارع الجاذبية الأرضية (م/ثانية^٢)



الشكل رقم (٧,١). مقطع في محطة قدرة كهرومائية نمطية [4].

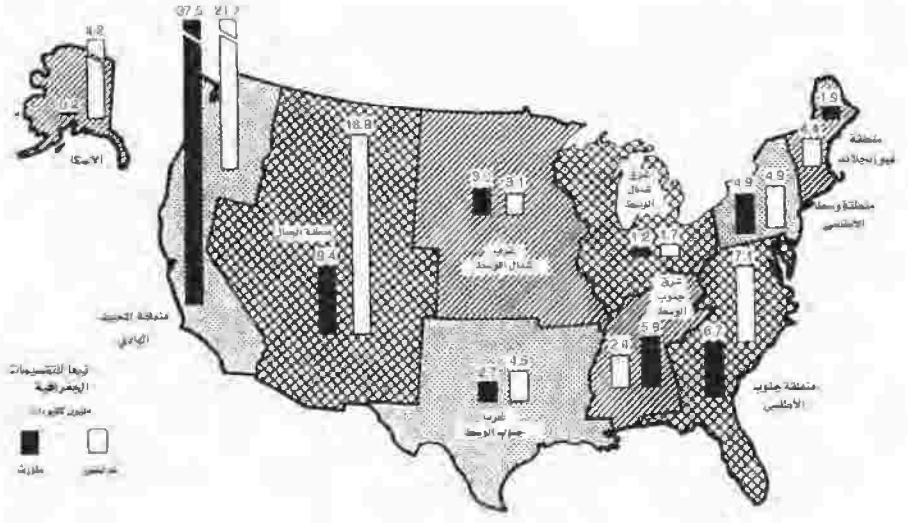
تصنف محطات القدرة الكهرومائية إلى نوعين بناءً على ارتفاع الماء:

١- الارتفاع العالي: حيث يكون h ≥ ٢٠-١٠٠٠م، مثل محطة سد هوفر (Hoover Dam) في ولاية نيفادا.

٢- الارتفاع المنخفض: حيث يكون h ≥ ٥-٢٠م.

يمكن في المنشآت ذات الارتفاع العالي تخزين الماء عند ارتفاع متوسط خلال فترات التدفق القوي ليستخدم لاحقاً في الفترات الجافة لمعادلة معدل إنتاج الطاقة بشكل جزئي. أما في المحطات ذات الارتفاع المنخفض فلا يمكن تخزين الماء بشكل اقتصادي، الأمر الذي يجعل القدرة المنتجة منها تتفاوت مع التساقط الموسمي للأمطار.

وتدخل موارد القدرة الكهرومائية في الولايات المتحدة ضمن اختصاص هيئة تنظيم الطاقة الفيدرالية (FERC). وقد قامت الهيئة عام ١٩٩٢م بجمع المعلومات الخاصة بالقدرة الاستيعابية لمحطات القدرة الكهرومائية ونشرها [5] وهي موضحة في الشكل رقم (٧,٢).



الشكل رقم (٧,٢). الطاقة الإنتاجية للقدرة الكهرومائية في الولايات المتحدة [5].

وتعتبر الطاقة الكهرومائية مهمة بشكل خاص في الولايات الغربية من الولايات المتحدة. توجد منظومة رئيسة لإنتاج القدرة الكهرومائية قائمة على نهر كولومبيا في الشمال الغربي. وتنتج محطة بونيفيل الموجودة هناك أكثر من مليون كيلووات، ومع أخذ المحطات الأخرى الموجودة على النهر في الاعتبار فإن إجمالي إنتاج القدرة يفوق ٨,٤ مليون كيلووات. كما أن توقعات وكالة معلومات الطاقة بالزيادة الضئيلة المتوقعة في القدرة الاستيعابية لإنتاج الطاقة الكهرومائية على مدى السنوات العشرين القادمة، تجعل الطاقة الكهرومائية مورداً مهماً ولكن غير مثير للحماس في المستقبل. ومن وجهة النظر البيئية تعتبر الطاقة الكهرومائية واحدة من أكثر موارد الطاقة نظافة، إلا أن فكرة اعتبارها مصدراً *متجدداً* يواجه تحدياً، نظراً لأن ترسب الطمي في الخزانات العلوية والسفلية يحصر العمر الافتراضي للمحطات في نطاق ٥٠ إلى ٢٠٠ عام فقط.

(٧,٢) الطاقة الشمسية
Solar Energy

تزود الشمس الأرض بالطاقة اللازمة للحياة. ولكون الشمس مفاعلاً نووياً اندماجياً يعمل بشكل مستمر تصل درجة الحرارة في داخله إلى عدة ملايين من درجات كيلفن، فإنها تشع الطاقة إلى كل أرجاء المجموعة الشمسية. ويعبر عن العلاقة بين تدفق الطاقة الإشعاعية (الانبعاثية، ε) ودرجة الحرارة من خلال معادلة ستيفان-بولتزمان (Stefan-Boltzmann):

$$\varepsilon = \sigma T^4 \qquad (٧,٣)$$

حيث إن:

ε = الانبعاثية من السطح (بوحدة وات/م^٢)

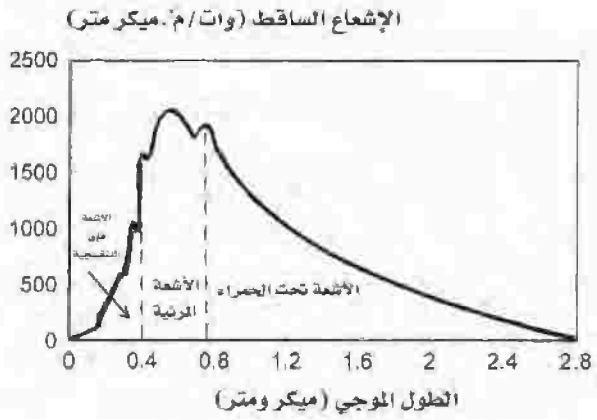
σ = ثابت ستيفان-بولتزمان ($٥,٦٧ \times ١٠^{-٨}$ وات/م^٢ كيلفن^٤)

T = درجة الحرارة التي يحصل عندها الإشعاع (بوحدة كيلفن مرفوعة إلى القوة الرابعة)

يشع هذا التدفق من الطاقة بشكل متجانس (يتناسب مع معكوس مربع المسافة، $1/R^2$) من سطح الشمس، الذي تبلغ درجة حرارته حوالي ٦٠٠٠ درجة كيلفن ويصل إلى الأرض (على مسافة $R = 1,5 \times 10^8$ كم)، حيث متوسط درجة حرارة السطح هي ٢٨٨ درجة كيلفن (أي ١٥ درجة مئوية)، وهي درجة الحرارة التي تجعل الحياة النباتية والحيوانية ممكنة على وجه الأرض (وهي مناسبة على وجه الخصوص في المناطق ذات المناخ المعتدل).

(٧,٢,١) الثابت الشمسي The Solar Constant

يبدو أن الطاقة الشمسية التي تصل للأرض ظلت ثابتة على مدى فترة تاريخ الإنسان، وهي موزعة على نطاق من الأطوال الموجية. يوضح الشكل رقم (٧,٣) علاقة تعرض الأرض للإشعاع الشمسي الطيفي بالطول الموجي (λ، بوحدة الميكرومتر).



الشكل رقم (٧,٣). توزيع الطول الموجي للطاقة الشمسية على الأرض.

يبلغ التعرض للإشعاع (وهو تدفق القدرة لكل وحدة من الطول الموجي، ويقاس بوحدة وات/م^{٢}-ميكرومتر) ذروته عند الطول الموجي الواقع في نطاق الضوء المرئي والبالغ ٠,٥ ميكرومتر. يمثل ناتج التكامل، وهو المساحة تحت المنحنى، *الثابت الشمسي* والذي يساوي ١,٣٥ كيلووات/م^{٢}. يمكن تقسيم الطيف الشمسي إلى ثلاث مناطق رئيسة حسب الطول الموجي ووفرة الإشعاع من كل منها كما يأتي:

الإشعاع	الطول الموجي (ميكرومتر)	الوفرة (٪)
فوق البنفسجي	٠,٤ >	٩
الضوء المرئي	٠,٤ - ٠,٧	٤٥
تحت الأحمر	٠,٧ <	٤٦

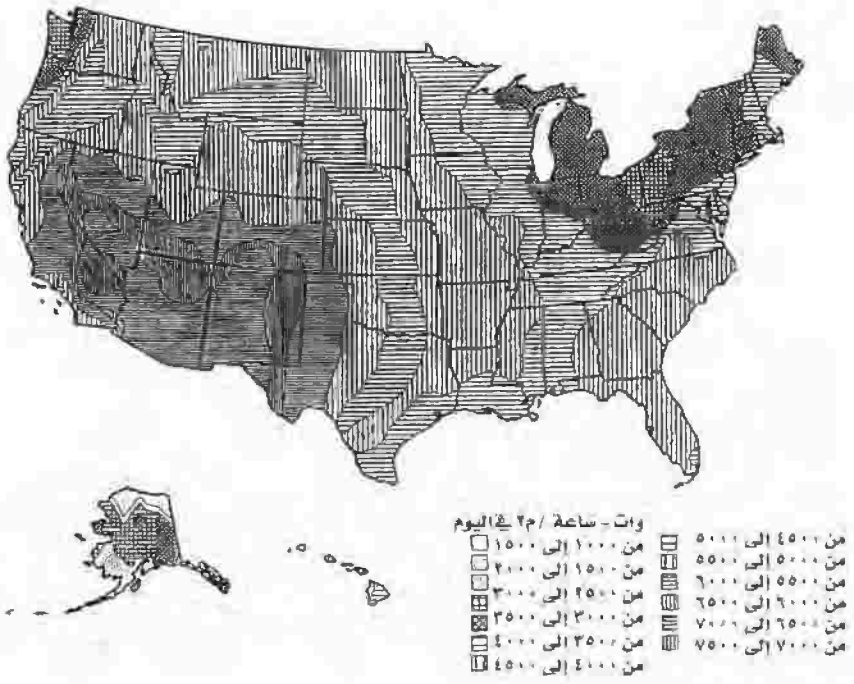
يشكل طيف الإشعاع ذي الطول الموجي القصير الأساس لموارد الطاقة الشمسية (resource base) البالغة ١٧٨ بيتاوات وهو موضح في الشكل رقم (٢,١). يشكل الأليبدو (albedo) (انعكاس الإشعاع المباشر بعيداً عن الأرض) حوالي ٣٥٪ من الطاقة ذات الطول الموجي القصير التي تدخل الغلاف الجوي. لذا فإن الأساس لموارد الطاقة الشمسية التي تصل فعلياً إلى سطح الأرض يصبح حوالي ١١٦ بيتاوات والنسبة الصالحة للاستخدام من هذه الطاقة ضئيلة.

(٧,٢,٢) "مخزونات" الطاقة الشمسية "Solar Energy "Reserves

هناك بعض الطاقة الشمسية المتوفرة يومياً في كل مكان على وجه الأرض. والأشكال المستخدمة من هذه الطاقة هي:

- الإشعاع الحزمي (beam) المباشر (الحراري) والذي يمكن تركيزه في مجمِّع.
- الإشعاع الانتشاري (diffuse) (الحراري) الذي تشتته السحب ولا يمكن تركيزه.
- الأشكال الثانوية التي يتم تحويلها إلى كتلة حيوية (وقود) وطاقة رياح وطاقة مائية.

تسمى الطاقة التي تستقبلها وحدة من المساحة على الأرض في كل يوم "*التعرض اليومي للشمس*" (daily insolation) (H، وتقاس بوحدة كيلووات-ساعة/م^2-يوم). تتفاوت هذه الكمية حسب خط العرض وحسب فصول السنة وحسب الجو. تتفاوت القيم في الولايات المتحدة [6] من حوالي ١ إلى ٧,٥ كيلووات-ساعة/م^2-يوم، حيث تحظى بالقيم الأكبر الولايات الجنوبية الغربية المسماة بحزام الشمس (sunbelt)، كما هو موضح في الشكل رقم (٧,٤).



الشكل رقم (٧,٤). الإشعاع الشمسي المباشر اليومي في الولايات المتحدة [6].

وإذا استثنينا التسخين المباشر، فإن هذه المخزونات اليومية تحتاج لأن تحول إلى أشكال أخرى نافعة باستخدام تقنيات تحويل معينة. وتشمل هذه الاستخدامات ما يأتي:

١- الاستخدام الحراري المباشر مثل البيوت المحمية وتجفيف المحاصيل والاستحمام الشمسي (sunbathing). قيمة الطاقة التي يتم امتصاصها في هذه الحالة هي:

$$E\ (kJ/kg) = m\ C_p\ \Delta T \qquad (٧,٤)$$

حيث إن:

m = الكتلة (كجم)

C_p = الحرارة النوعية (ك.ج/كجم-درجة مئوية)

ΔT = الزيادة في درجة الحرارة (درجة مئوية)

٢- التسخين والتبريد باستخدام المجمعات ذات الألواح المستوية (flat plate collectors). قيمة الطاقة المستهلكة في هذه الحالة هي:

$$E\ (kJ/kg) = \varepsilon\ A_p\ H \qquad (٧,٥)$$

حيث إن:

ε = الكفاءة الحرارية (حوالي ١٥٪)

A_p = المساحة المتعامدة على الشمس ($م^٢$)

H = التعرض اليومي للشمس (كيلووات-ساعة/$م^٢$-يوم)

٣- توليد الكهرباء باستخدام المجمعات الكهروضوئية (photovoltaic collectors). قيمة الطاقة التي تمتصها رقاقة السيليكون شبه الموصلة p.n هي:

$$E\ (eV) = V\ e\ (n\ \mu_n + p\ \mu_p) \qquad (٧,٦)$$

حيث إن:

V = فرق الجهد المستخدم (فولت)

e = شحنة الإلكترون (إ.ف)

$n\ \mu_n$ = التركيز العددي للإلكترونات (العدد/م^3) في نطاق التوصيل، وذلك بحركية إلكترونية مقدارها μ_n (العدد/م^2-ثانية)

$p\ \mu_p$ = التركيز العددي للثقوب الموجبة (عدد الثقوب/م^3) في نطاق التوصيل، وذلك بحركية للثقوب مقدارها μ_p (عدد الثقوب/م^2-ثانية).

(٧,٢,٣) إنتاج الكهرباء من الشمس Solar Electricity

يمكن إنتاج الكهرباء من الشمس على نطاق واسع (بالميجاوات من الكهرباء) بتقنيتي تحويل رئيستين: التقنية الحرارية الشمسية، والتقنية الكهربائية الشمسية. تتحقق الطريقة الأولى بتركيز طاقة الإشعاع الشمسي الواصلة، بحيث يستقبلها *حامل للحرارة* ومن ثم تحول حرارة حامل الحرارة إلى كهرباء. أما الطريقة الثانية فتتضمن التحويل المباشر للإشعاع الشمسي إلى كهرباء عن طريق خلايا كهروضوئية جامدة.

إحدى المشكلات الرئيسة في إنتاج الكهرباء من الشمس هي قلة تدفق الإشعاع الشمسي الحزمي المباشر لكل وحدة مساحة سطحية. وكما يشير تيدويل وواير [7]، فلو استخدم مجمع واحد، مخروطي الشكل، يتبع حركة الشمس (حتى وإن كان قطره ٣٠ متراً وموجوداً في منطقة يبلغ تعرضها للشمس ١ كيلووات/م^2) فسوف يستقبل على الأكثر طاقة حرارية مقدارها ٧٠٠ كيلووات (حرارية). وإذا كانت كفاءة التحويل من حرارة إلى كهرباء تبلغ ٢٠٪، فإن هذا المجمع سينتج حوالي ٢٠٠ كيلووات (كهرباء) وهي كمية قليلة جداً بالنسبة لشبكات الكهرباء الكبيرة. لذا فإن برامج الأبحاث والتطوير الحالية تركز على زيادة كفاءات التحويل الخاصة بالمنظومات التي تستخدم تركيز الإشعاع، وذلك لتقليل حجم حقول التجميع القادرة على إنتاج كميات من الطاقة الكهربائية تصل إلى مستوى الميجاوات.

إنتاج الكهرباء من الشمس حرارياً

توجد في المنشآت التي تستخدم تقنية إنتاج الكهرباء من الشمس حرارياً مجمعات موزعة، تصنف إلى ثلاثة أنواع من منظومات القدرة، حسب الطريقة التي

تجمع بها الطاقة الشمسية، ويعطيها برنامج وزارة الطاقة الأمريكية لتقنيات الطاقة الشمسية الأسماء الآتية: المجمعات حوضية الشكل، والأطباق، وأبراج الطاقة. تتألف منظومة المجمعات حوضية الشكل من مجمعات منحنية بشكل قطع مكافئ وتأخذ شكل الحوض. تركز هذه المجمعات إشعاع الشمس على أنبوب يحتوي على مادة حاملة للحرارة كالزيت، تحمل الحرارة إلى المولد. ويبين الشكل رقم (٧,٥) منظومة مجمعات حوضية الشكل موجودة في صحراء موهافي في جنوب كاليفورنيا تم بناؤها في ثمانينيات القرن العشرين. توجد تسعة من هذه المنظومات في تلك المنطقة تنتج طاقة كهربائية تصل إلى ما يتراوح بين ١٤ إلى ٨٠ ميجاوات من الكهرباء.

الشكل رقم (٧,٥). منظومة مجمعات حوضية الشكل موزعة لإنتاج الكهرباء (المصدر: وزارة الطاقة الأمريكية).

منظومات الأطباق هي مجمعات تستخدم المرايا لعكس الإشعاع الشمسي الذي يصلها وتركيز الطاقة المتدفقة في مساحة صغيرة في المستقبل الحراري. ينقل المستقبل

الحرارة بعد ذلك إلى مائع حامل للحرارة يقوم بتشغيل المولد الكهربائي. هناك عدة منشآت تجريبية قيد الإنشاء لتطوير هذه المنظومات.

منظومات أبراج الطاقة هي محطات توليد مركزية محاطة بحقل من مجمعات الطاقة الشمسية تركز الطاقة المنعكسة في مائع حامل للحرارة (كأن يتم على سبيل المثال تحويل الماء إلى بخار) موجود في البرج بحيث يستخدم كمائع تشغيل في محطة القدرة لتحويل الحرارة إلى كهرباء. ويبين الشكل رقم (٧,٦) فكرة برج الطاقة من خلال صورة للمنشأة الاختبارية التابعة لشركة إديسون بجنوب كاليفورنيا والموجودة في مدينة بارستو وتبلغ طاقتها الإنتاجية ١٠ ميجاوات (كهرباء). أنتجت هذه المنشأة أكثر من ٣٨ جيجاوات-ساعة من الطاقة الكهربائية خلال ست سنوات من التشغيل في ثمانينيات القرن العشرين. تعكس كل مرآة من المرايا التي يبلغ عددها ١٨١٨ الإشعاع المباشر إلى المرجل الموجود في أعلى البرج لإنتاج بخار يستخدم لتشغيل التوربين والمحول الكهربائي التابعين للمنظومة.

الشكل رقم (٧,٦). إحدى المنشآت الأولى لإنتاج الكهرباء من الأبراج الشمسية (١٩٨٢ – ١٩٨٨م) (المصدر: شركة إديسون جنوب كاليفورنيا).

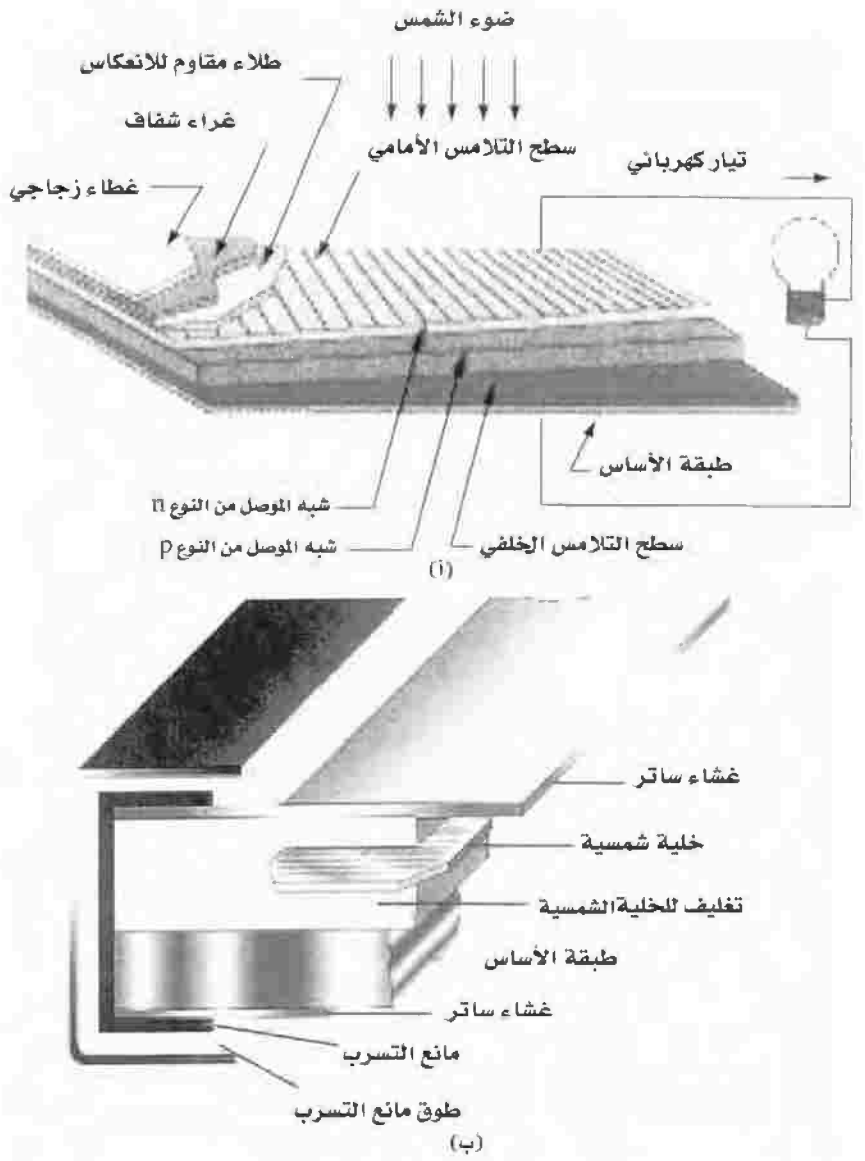
إنتاج الكهرباء من الشمس كهروضوئياً

يتفادى تحويل إشعاع الشمس الذي يصل بشكل حزمي مباشرة إلى كهرباء القيود على الكفاءة الناتجة من تحويل الطاقة الشمسية أولاً إلى طاقة حرارية ومن ثم تحويل الطاقة الحرارية إلى كهرباء. سيجعل هذا التحويل المباشر في الغالب إنتاج الكهرباء استخداماً رئيساً وواسع النطاق للطاقة الشمسية. ولكون الطاقة الشمسية مورداً ذا طاقة نوعية منخفضة فإنها مناسبة للاستخدامات التي تتطلب طاقة نوعية منخفضة مثل تدفئة المباني المستقلة وتبريدها. ومع إمكانية استخدام التحويل المباشر للطاقة الشمسية لتزويد مبنى بالطاقة الكهربائية فلنا أن نتصور أن أنظمة الهندسة المدنية ستشترط في المستقبل المنظور أن تكون جميع مشاريع التشييد مغطاة بأسطح كهروضوئية. ويظهر في الشكل رقم (٧,٧) منظومة تعمل حالياً لتحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء في منزل بولاية كاليفورنيا دمجت من خلاله ألواح كهروضوئية في مظلة تطل على الحديقة الخلفية مما يوفر الكهرباء للمنزل والظل للشرفة الخلفية في آن واحد.

الشكل رقم (٧,٧). منظومة خلايا كهروضوئية تعمل كمظلة تطل على الحديقة الخلفية بينما تنتج الكهرباء للمنزل (المصدر: وزارة الطاقة الأمريكية).

تعمل الخلية الكهروضوئية طبقاً لمبادئ فيزياء الأثر الكهروضوئي (photoelectric effect)، وهو إحدى الطرق التي يتفاعل فيها الإشعاع المؤيِّن مع المادة. في حالة تحلل أشعة جاما الذي سبق شرحه في القسم (٦,١,٧)، فإن طاقة أشعة جاما (Q) بوحدة ميجا إ.ف هي أعلى بكثير من طاقة طيف الإشعاع الشمسي (بوحدة إ.ف والتي تعرف من خلال طيف الطول الموجي الظاهر في الشكل رقم ٧,٣) وتتفاعل هذه الطاقة مع الذرات المجاورة بفعل عملية تشتيت كومبتون (Compton scattering process). في هذه العملية، تتسبب أشعة جاما عالية الطاقة في إطلاق عدد كبير من الإلكترونات من المواد التي تصادفها في مسارها مما يؤدي إلى إبطاء سرعتها، ثم تطلق إلكتروناً أخيراً قبل أن تختفي بطاقة سكون تساوي صفراً. إن حدوث الأثر الكهروضوئي من جراء الإشعاع الشمسي يشبه ذلك التفاعل الأخير والذي يزال فيه إلكترون من ذرة، إلا أنه في كثير من المواد ترتفع طاقة الإلكترون في المدار الخارجي الذي ينتقل إليه مما يجعله يبعث طاقته تلك شكل فوتون.

يمكن في المواد شبه الموصلة مثل السيليكون، التي تكوِّن فيها الذرات بنية شبكية بلورية، تحرير الإلكترونات من حالة ارتباطها بذراتها عن طريق الإشعاع بشرط أن تصل طاقة هذا الإشعاع إلى مستوى إ.ف بحيث يتم عبور فجوة الطاقة (energy gap) (في حالة السيليكا فجوة الطاقة حوالي ١,١ إ.ف). إذا تم ذلك فإن الإلكترونات تنتقل إلى نطاق توصيل يمكنها أن تتحرك بفعل فرق جهد يفرض عليها. في حالة الخلية الكهروضوئية، وهي جهاز يسمح بامتصاص إشعاع الشمس لينتج منه تيار كهربائي، فإن فرق الجهد المفروض ينتج من "إشابة" (doping) الطبقات المتلاصقة بشوائب n وp والتي تؤدي إلى وجود فائض في عدد الإلكترونات في شبه الموصل من نوع n وعجز في عدد الإلكترونات ("ثقوب") في شبه الموصل من نوع p. وينتج التيار عبر الخلية الكهروضوئية من تحرك الإلكترونات الفائضة في طبقة شبه الموصل n وعبورها للحد الفاصل ووصولها إلى طبقة شبه الموصل p. يظهر في الشكل رقم (٧,٨) رسم لأشباه الموصلات من نوع n وp في خلية كهروضوئية وموقع الخلية في اللوح الكهروضوئي.



الشكل رقم (٧,٨). رسم توضيحي للوح كهروضوئي: يظهر في الرسم العلوي ترتيب أشباه الموصلات p,n ويظهر في الرسم السفلي موقعها في اللوح الكهروضوئي.

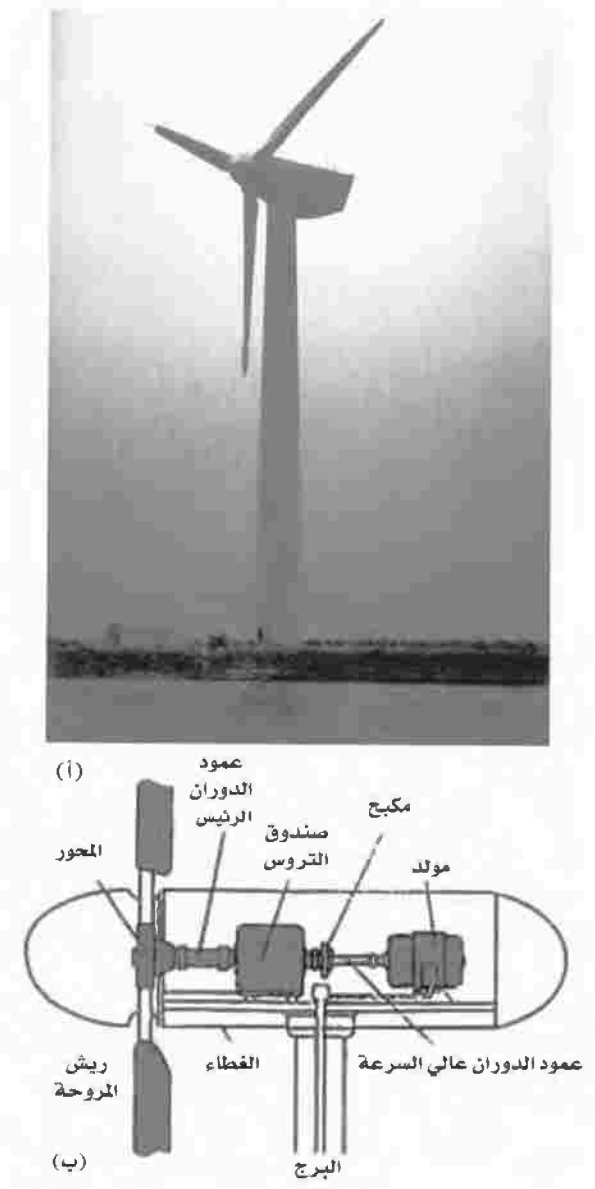
سبق أن تم الإشارة إلى كمية الطاقة التي تمتصها رقاقة السيليكون شبه الموصلة p,n في المعادلة رقم (٧,٦). ويحدد كمية الكهرباء الناتجة حجم الخلايا الكهروضوئية وعددها في الجهاز. وتعبر المعادلة الآتية عن كفاءة التحويل (كنسبة مئوية):

$$\varepsilon = ١٠٠ \times \text{الكهرباء المنتجة} / \text{الطاقة الشمسية الممتصة} \qquad (٧,٧)$$

حيث إن الطاقة الكهربائية التي تنتجها المصفوفة تقاس بوحدة وات-ساعة. تتفاوت نسبة الطاقة الشمسية التي يتم امتصاصها حسب التصميم الهندسي لمصفوفة المجمعات الكهروضوئية وحسب التعرض اليومي للشمس (بوحدة وات-ساعة/م^{٢}-يوم). وتقع كفاءات وحدات الخلايا الكهروضوئية المصنعة بكميات تجارية في نطاق ١٠٪ - ١٥٪ تقريباً، وتتراوح كفاءات المصفوفات المكونة من عدد منها بين ٦٪ و١٢٪.

(٧,٣) طاقة الرياح
Wind Energy

يتم إنتاج الكهرباء من طاقة الرياح بأن تقوم قوة الرياح بإدارة مروحة لها ريش (rotor-blade propeller) مثبتة على عمود دوران في برج للرياح مما يؤدي إلى إدارة توربين رياح. يمكن الاستفادة من طاقة الرياح من خلال برج واحد للرياح أو من خلال حقل من الأبراج التي تشكل ما يسمى مزرعة الرياح. تتراوح الطاقة الإنتاجية لأبراج الرياح الحديثة، كتلك التي تظهر في الشكل رقم (٧,٩أ)، من ٥٠٠ كيلووات إلى ٢ ميجاوات وتتراوح ارتفاعات الأبراج من ٤٠ - ٦٠ متراً، بينما تتراوح أقطار المراوح من ٤٠ - ٧٥ متراً. يبين الرسم في الشكل رقم (٧,٩ب) الأجزاء الرئيسة لمنظومة توربين الرياح.



الشكل رقم (٧,٩). (أ) برج رياح حديث، (ب) رسم توضيحي لمكونات توربين رياح.

(٧,٣,١) معدل قدرة الرياح Wind Power Rate

تعتمد كمية طاقة الرياح التي ينتجها توربين رياح على عدة عوامل من أهمها :

كثافة الهواء (ρ، بوحدة كجم/م^3)

المساحة التي تغطيها ريش المروحة (A، بوحدة م^2)

سرعة الرياح (V، بوحدة م/ثانية)

الزمن (t، بوحدة الثانية) ومعامل كفاءة التحويل

والطاقة اللحظية المنتجة بالكيلووات هي معدل القدرة (P، بوحدة الكيلووات) مضروباً في المدة الزمنية اللحظية (بالثانية)، كما هو موضح أدناه :

$$dE = P\,dt \qquad (٧,٨)$$

وتعبر المعادلة الآتية عن كمية الطاقة الحركية التي ينتجها توربين الرياح :

$$KE = \tfrac{1}{2} m V^2 \qquad (٧,٩)$$

بحيث إن معدل تدفق الكتلة للهواء، $\dot{m}$ (كجم/ثانية)، يعبر عنه كما يأتي :

$$m = \rho A V \qquad (٧,١٠)$$

وعليه فإن المعادلة العامة لمعدل القدرة التي ينتجها توربين رياح هي :

$$P = \tfrac{1}{2} (\rho AV) V^2 = \tfrac{1}{2} \rho A V^3 \qquad (٧,١١)$$

ويمكن تحديد قيمة كثافة الهواء في موقع ما في ظل ظروف الضغط ودرجة الحرارة السائدة فيه كما يأتي :

$$\rho = \rho_o (288B/760T) \qquad (٧,١٢)$$

حيث إن:

ρ_o = كثافة الهواء الجاف عند درجة الحرارة والضغط القياسيين ١,٢٢٥ كجم/م^3 عند ٢٨٨ درجة كيلفن (١٥ درجة مئوية، وهي متوسط درجة حرارة سطح الأرض) وضغط ٧٦٠ ملم زئبق.

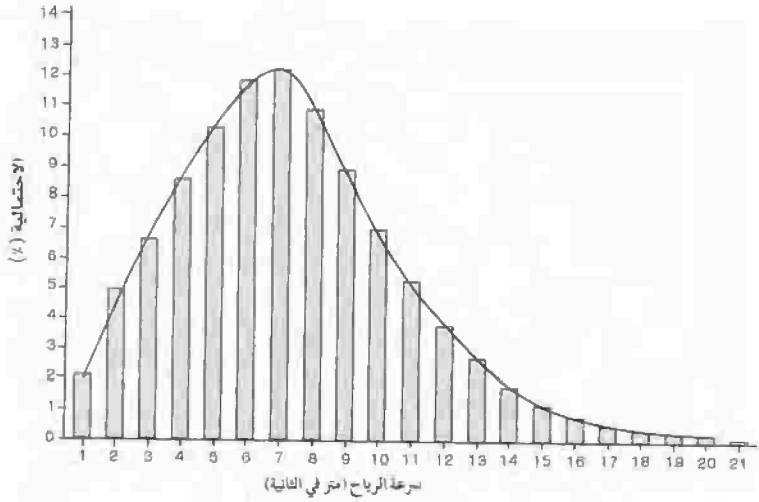
B = الضغط البارومتري (ملم زئبق)

T = درجة الحرارة السائدة (درجة كيلفن)

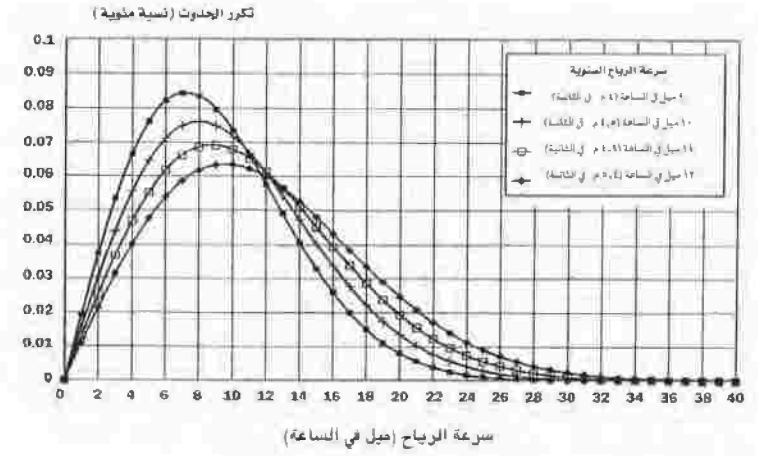
(٧,٣,٢) كفاءة تحويل توربينات الرياح Wind Turbine Conversion Efficiency

معدل القدرة P هو إجمالي الطاقة في الهواء الجاري لكل ثانية، إلا أن نسبة صغيرة فقط من هذه الطاقة يمكن تحويلها إلى طاقة كهربائية في توربين رياح. لقد حسب الحد النظري الأقصى لهذه النسبة، والذي تم تقديره عام ١٩٢٠م تقريباً، وكانت قيمته حوالي ٥٩٪. تصل كفاءة تحويل توربينات الرياح حديثة التصميم إلى حوالي ٤٠٪.

أما الأمر الثاني المهم الذي يحد من معدل القدرة فهو التفاوت الكبير والمستمر في سرعة الرياح. يعد هذا التفاوت ذا أهمية خاصة لأن معدل القدرة يتناسب مع مكعب سرعة الرياح، أي أن تغير السرعة بمقدار الضعف يؤدي إلى تغير القدرة الناتجة بمقدار ثمانية أضعاف (انظر المعادلة رقم ٧,١١). لذا فإن المشكلة الرئيسة في تقدير الإنتاج السنوي لتوربين رياح (بالكيلووات-ساعة) هو التفاوت الزمني لمتوسط سرعة الرياح على مدى سنة كاملة. إن الإحصاءات طويلة المدى عن الرياح لموقع مقترح لمزرعة رياح تتبع بشكل عام دالة وايبل الاحتمالية (Weibull probability function) (انظر الشكل رقم ٧,١٠) وهي تستخدم لتقدير متوسط عدد الساعات السنوي لكل نطاق من نطاقات السرعة. وترسم البيانات على شكل توزيع رايلي التواتري لسرعة الرياح (Rayleigh wind speed frequency distribution) (انظر الشكل رقم ٧,١١).



الشكل رقم (٧,١٠). دالة وايبل الاحتمالية لسرعة الرياح (مدرج تكراري بفترات مدى كل منها متر واحد في الثانية) [10].



الشكل رقم (٧,١١). توزيع رايلي التواتري لسرعة الرياح [11].

(٧,٣,٣) مورد طاقة الرياح The Wind Energy Resource

يقتضي تقدير مدى إمكانية استغلال طاقة الرياح على نطاق العالم تقدير متوسط سرعة الرياح على الأراضي الصالحة للسكنى على سطح الأرض. تتوفر هذه البيانات على شكل أطالس للرياح تتفق في شكلها العام، وذلك للعديد من المناطق المأهولة في دولة معينة. في عام ١٩٩٤م قدر مجلس الطاقة العالمي [12] أن سرعة الرياح على ٢٧٪ من سطح اليابسة تزيد على ٥,١ متراً في الثانية على ارتفاع ١٠ أمتار عن السطح. وتمت الإشارة عام ١٩٩٧م [10] إلى أن ٤٪ فقط من المساحة يمكن أن تكون صالحة لإنتاج الكهرباء من خلال مزارع للرياح بسبب عدم ملاءمة التضاريس أو لوجود تجمعات حضرية أو لكونها مستخدمة لزراعة المحاصيل أو لأنها مستخدمة في استخدامات أخرى. على افتراض أن طاقة الإنتاج هي ٨ ميجاوات/كم^2 وأن معامل القدرة الاستيعابية هو ٢٣٪، فقد تم تقدير مدى إمكانية استغلال طاقة الرياح لإنتاج القدرة على مستوى العالم بقيمة مقدارها ٢٠ بيتاوات-ساعة في السنة، علماً بأن الاستهلاك العالمي للكهرباء قُدّر عام ٢٠٠١م بقيمة ١٣,٩ بيتاوات-ساعة.

والطاقة الاستيعابية لإنتاج القدرة من الرياح آخذة في النمو في الولايات المتحدة إذ وصلت إلى ٤٦٨٥ ميجاوات عام ٢٠٠٢م [13]، لتشكل حوالي ٢٪ من استخدام الطاقة المتجددة التي وفرت حوالي ٧٪ (أي ٢٦٣ تيراوات-ساعة) من الكهرباء المستهلكة في الولايات المتحدة والبالغة ٣,٥ بيتاوات-ساعة. يوضح الشكل رقم (٧,١٢) توزيع الطاقة الاستيعابية لإنتاج القدرة من الرياح [13].

(٧,٣,٤) التكلفة التقديرية لطاقة الرياح Estimated Cost of Wind Power

تعتمد الجدوى الاقتصادية من التوسع في استخدام مزارع الرياح على نطاق واسع لإيجاد قدرة إنتاجية ملموسة للكهرباء على تقليل تكلفة توربينات الرياح

(دولار/كيلووات) وتكلفة الكهرباء (سنت/كيلووات-ساعة) مقارنة بتكلفة أنواع الوقود المنافسة (مثل الوقود الأحفوري والنووي والطاقة الشمسية). تقدر تكاليف بناء توربينات الرياح وتركيبها على نطاق واسع في الوقت الحالي بحوالي ١٠٠٠ دولار/كيلووات، وذلك لتوربين رياح قدرته ١٥٠٠ كيلووات وقطر مروحته ٧٧ متراً، وذلك مقارنة بتكلفة إنتاج الكهرباء عن طريق الغاز الطبيعي والتي تقدر بحوالي ٦٠٠ دولار/كيلووات [14]. تم في عام ٢٠٠١م التطرق إلى صيغة تستخدم لتقدير الإنتاج السنوي من الطاقة بناءً على المتوسطات الخاصة بالبيانات القائمة [15]، وذلك على النحو الآتي:

$$E = 8760\ P\ (0.087V - P/D^2) \qquad (٧,١٣)$$

حيث إن:

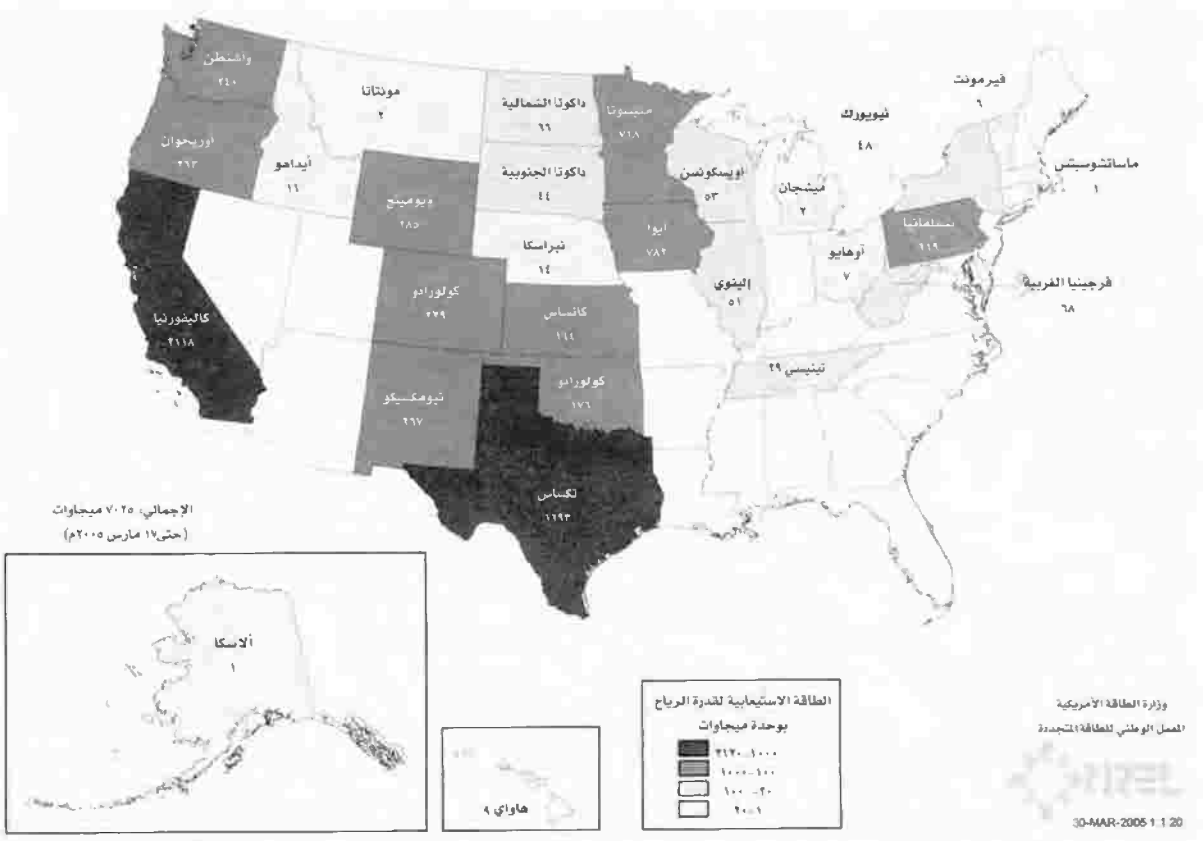
P = السعة المقدرة للقدرة

V = السرعة المتوسطة للرياح في السنة (متر/ثانية) عند ارتفاع المروحة (حوالي ٥٠ متراً)

D = قطر المروحة (متر)

8760 = عدد الساعات في السنة الواحدة

وعليه فإنتاج الكهرباء السنوي التقديري لتوربين قدرته ١٥٠٠ كيلووات وقطر مروحته ٧٧ متراً عند سرعة رياح متوسطة تتراوح بين ٧ و٧,٥ متر/ثانية [15] ستكون ٤,٧ - ٥,٢ جيجاوات-ساعة/سنة، بينما تكون تكلفة الكهرباء بين ٣ - ٤ سنت/كيلووات-ساعة.



الشكل رقم (٧,١٢). توزيع الطاقة الاستيعابية لإنتاج القدرة من الرياح في الولايات المتحدة عام ٢٠٠٥م [14].

أما بالنسبة للتكاليف البيئية لاستخدام طاقة الرياح بشكل واسع النطاق فهي غير محددة. إن إحدى أهم القوى التي تدفع إلى استغلال طاقة الرياح هي أن الآثار البيئية لتقنية طاقة الرياح قليلة الضرر نسبياً، "فالوقود" مجاني ولا يحتوي على كربون، كما أن التوربينات لا تحدث تغييراً في تركيز ثاني أكسيد الكربون في الجو. إلا أن هنالك جوانب سلبية محتملة لطاقة الرياح منها :

- تأثير الطيور وتوربينات الرياح على بعضها بعضاً.
- التشويه للمنظر الناتج من وجود توربينات مزارع الرياح بكثافة.
- الضجيج الصادر من توربينات الرياح.
- التداخل الكهرومغناطيسي.
- أثر منظومات طاقة الرياح على استخدام الأراضي.
- اعتبارات السلامة مثل سقوط المراوح وسقوط الجليد المتجمع على المراوح على الأرض وانهيار الأبراج ونشوب حرائق كهربائية.

عندما يتم التعرف على مقدار هذه الآثار وشدتها، فإنه من المفترض أن يتلو ذلك إجراء تحسينات تقنية للتقليل من تلك الآثار.

(٧,٤) طاقة الكتلة الحيوية
Biomass Energy

تأتي الكتلة الحيوية (والطاقة الحيوية التي يتم الحصول عليها منها) من الزراعة، وهي واحدة من أقدم مصادر الطاقة على الأرض، وقد تصبح واحدة من أهم مصادر الطاقة ذات الاستخدام واسع النطاق في المستقبل. وتنشأ الكتلة الحيوية من عملية التمثيل الضوئي والتي تعتبر جزءاً من الطاقة الشمسية الموزعة على الأرض، وتشمل الكتلة الحيوية جميع أنواع الحياة النباتية سواء البرية منها أو البحرية، كما تشمل جميع أجناس الكائنات في السلسلة الغذائية انتهاء إلى جميع الفضلات العضوية. هنالك تنوع

كبير في موارد الكتلة الحيوية كالخشب والمحاصيل والفضلات بأنواعها. إلا أن الخاصية الأساسية للكتلة الحيوية هي تركيبها الكيميائي الذي يظهر على هيئة السكر والنشاء والسيليولوز ونصف السيليولوز (hemicelluloses) والليجنين (lignin) والراتنجات (resins) والتانينات (tannins). هناك العديد من الدراسات العامة الممتازة عن الكتلة الحيوية كمورد للطاقة (منها [16] على سبيل المثال). تقدم وزارة الطاقة الأمريكية وصفاً على الإنترنت لبرنامج الكتلة الحيوية المنبثق من قسم كفاءة الطاقة والطاقة المتجددة التابع لها (DOE-EERE) [17].

يمكن تعريف الطاقة الحيوية على أنها الطاقة المستخلصة من الكتلة الحيوية لكي تحول إلى شكل مفيد من الطاقة يستخدم في التدفئة في المجال التجاري وفي الحصول على الكهرباء أو كوقود للنقل. وتوجد صفتان مميزتان أساسيتان للكتلة الحيوية وهما القيمة الحرارية، ومحتوى بخار الماء. يتم التعبير عن القيمة الحرارية عموماً بوحدة كيلوجول/كجم أو و.ح.ب/رطل للكميات الصغيرة وبوحدة جيجاجول/طن متري أو و.ح.ب/طن أميركي للكميات التجارية. أما محتوى بخار الماء للكتلة الحيوية فيعبر عنه كنسبة مئوية ويستخدم في تحديد العمليات الأكثر فائدة لتحويل الكتلة الحيوية إلى طاقة حيوية.

تتفاوت القيمة الحرارية للكتلة الحيوية مع التركيب الكيميائي للمكونات العضوية والوزن النسبي لها في الكتلة الحيوية. على سبيل المثال، النسبة المئوية للوزن الجاف للمكونات الثلاثة الأكثر أهمية في الكتلة الحيوية في الأشجار والحشائش هي ٤٠ - ٦٠٪ من السيليولوز و٢٠ - ٤٠٪ من نصف السيليولوز و١٠ - ٢٥٪ من الليجنين. إن القيمة الحرارية للخشب كما ذكر سابقاً في الشكلين رقم (١,٤ و١,٥) هي حوالي ١٥ - ١٦ ميجاجول/كجم. يتراوح محتوى بخار الماء في الكتلة الحيوية عموماً ما بين ١٠٪ - ٦٠٪ تقريباً، وهو يقاس من خلال وزن عينة معينة قبل تجفيفها وبعده. يعبر عن محتوى بخار الماء (كنسبة مئوية) بطريقتين: على أساس رطب، وعلى أساس جاف. يعطى محتوى بخار الماء على أساس رطب (MCWB) بالمعادلة الآتية:

MCWB = ١٠٠ × (الوزن الابتدائي – الوزن الجاف) / الوزن الابتدائي (٧,١٤)

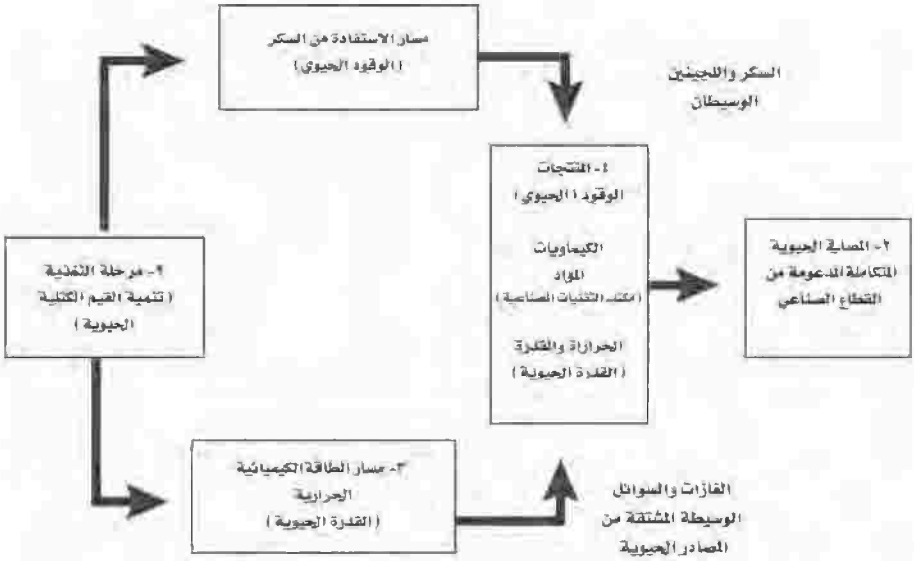
بالنسبة لاستخدامات الطاقة الحيوية، فإنه من الشائع التعبير عن محتوى بخار الماء على أساس جاف (MCDB) والذي يعطى بالمعادلة الآتية :

MCDB = ١٠٠ × (الوزن الابتدائي – الوزن الجاف) / الوزن الجاف (٧,١٥)

(٧,٤,١) مورد الكتلة الحيوية الشمسي The Solar Biomass Resource

بالرغم من أن إمكانية استخدام الطاقة الحيوية كبيرة، فإنها لا تمثل سوى جزء ضئيلا من الطاقة الشمسية التي تستخدم للقيام بعملية التمثيل الضوئي. فعلى سبيل المثال، إذا قمنا بزراعة محاصيل بغرض استخدامها في الحصول على الطاقة في مناطق ذات مناخ معتدل، حيث يبلغ متوسط طاقة الإشعاع الشمسي التي تصل لكل هكتار (١٠٠٠٠م^{٢} أو ٢,٤٧ فدان) من الأراضي الزراعية حوالي ٢ – ٥ كيلووات–ساعة/م^{٢} (انظر الشكل رقم ٧,٥ للولايات المتحدة) فإن متوسط كمية المحصول السنوي سيكون ١١ طناً متريا (جافاً) لكل هكتار (أي حوالي ٥ طن أميركي لكل فدان) يحتوي الطن الواحد منها على ١٥ جيجاجول، وعليه فإن صافي الطاقة المتوفرة هي حوالي ١٦٥ جيجاجول (حوالي ٠,٥٪ من الطاقة الشمسية الواصلة).

يصنف برنامج الكتلة الحيوية، المنبثق من قسم كفاءة الطاقة والطاقة المتجددة التابع لوزارة الطاقة الأمريكية (DOE-EERE)، موارد الطاقة الحيوية تبعاً لمسارين أساسيين يتميزان عموماً بأن الأول يشتمل على عمليات تحويل حيوية، بينما يشتمل الآخر على عمليات تحويل حرارية. يوضح الرسم الخاص ببرنامج الانتقال من الكتلة الحيوية إلى المصفاة الحيوية (الشكل رقم ٧,١٣) موقع كل مسار من المسارين في المنظومة الكلية.



الشكل رقم (٧,١٣). رسم توضيحي لبرنامج الكتلة الحيوية المنبثق من قسم كفاءة الطاقة والطاقة المتجددة التابع لوزارة الطاقة الأمريكية (DOE-EERE) [18].

يضم مسار الاستفادة من السكر معظم المواد الزراعية مثل محاصيل الطاقة البرية والبحرية وبقايا المحاصيل الزراعية التي تحتوي على السيليولوز ونصف السيليولوز واللجنين التي يمكن تكسيرها (كيميائياً) للحصول على مكوناتها السكرية. يمكن معالجة هذه السكريات بشكل بيولوجي لإنتاج الإيثانول وأنواع أخرى ممكنة من الوقود.

يشتمل مسار الطاقة الكيميائية الحرارية على تلك الأنواع من الكتلة الحيوية مثل خشب الأشجار ومخلفات الحصاد وبقايا عملية المعالجة مثل بقايا الغابات ومحاصيل الطاقة من الغابات والنفايات النباتية البلدية (مثل المنتجات الورقية وأوراق الشجر المتساقطة) والتي يمكن تحويلها من خلال عمليات حرارية وكيميائية لتنتج أنواعاً مختلفة من وقود الطاقة الحيوية لإنتاج القدرة الحرارية والكهربائية.

يتطلب كلا المسارين التعامل مع كميات كبيرة من الكتلة الحيوية، بحيث تكون موزعة بشكل عام على مناطق غابات ومناطق زراعية شاسعة مما يتطلب وجود بنية تحتية متطورة لجعل سلسلة الإمداد (supply chain) (الحصاد ثم التجميع ثم التخزين ثم النقل ثم المعالجة) ذات جدوى اقتصادية وبيئية. ويمكن التوصل إلى حلول تضافرية تقلل الجهد والتكلفة والتلوث، ومن الأمثلة على ذلك تقليل حقول ردميات النفايات الأرضية (landfills) والتخفيف من حدة تلوث الهواء والمياه وزيادة إمدادات الطاقة الإقليمية عن طريق الحد من نقل الوقود المستورد.

مخرجات مساري الكتلة الحيوية والتي تظهر في الشكل رقم (٧,١٣) باسم "المنتجات" هي لقيم تزود به المصافي الحيوية (biorefineries) التي تنتج منتجات الطاقة الحيوية من خلال طريقة مناسبة يتم اختيارها من ضمن العديد من عمليات التحويل المتوفرة.

(٧,٤,٢) عمليات تحويل الكتلة الحيوية Biomass Conversion Processes

تصنف عمليات تحويل الكتلة الحيوية عموماً إلى فئتين هما: التحويل الكيميائي الحيوي، والتحويل الكيميائي الحراري. يوضح الشكل رقم (٧,١٤) بعض العمليات وأشكال الاستخدامات التي تجتمع لتجعل من الطاقة الحيوية جزءاً هاماً من موارد الطاقة المتجددة.

وعلى الأرجح فإن المعالجة واسعة النطاق للكتلة الحيوية من خلال عدة عمليات تحويل ستكون مركزة في محطات كبيرة تسميها وزارة الطاقة الأمريكية المصافي الحيوية المتكاملة. يعرض الشكل رقم (٧,١٥) رسماً توضيحياً للمنظومة كاملة. يبين العمود الأوسط تقنية مسار الاستفادة من السكر، بينما يبين العمود الأيسر تقنية مسار الطاقة الكيميائية الحرارية ويتبع الخط المقطع اتجاه تدفق الحرارة الداخلية والطلب على الطاقة وتشير الأسهم الكبيرة إلى منتجات المصفاة. يقدم هذا الرسم التوضيحي طريقة ممتازة لإدراك مدى إمكانية إنتاج الكتلة الحيوية بشكل واسع النطاق كمورد مفيد للطاقة والمنتجات التجارية.

العمليات الكيميائية الحرارية

- الاحتراق: استخدامات الحرارة المباشرة
- دورة البخار: إنتاج القدرة الكهربائية
- الإسالة: إنتاج الوقود الحيوي للنقل
- التحويل إلى غاز: استخدام الوقود الحيوي في الدورات المدمجة
- الحل الحراري: إنتاج الزيوت للاستخدام كوقود

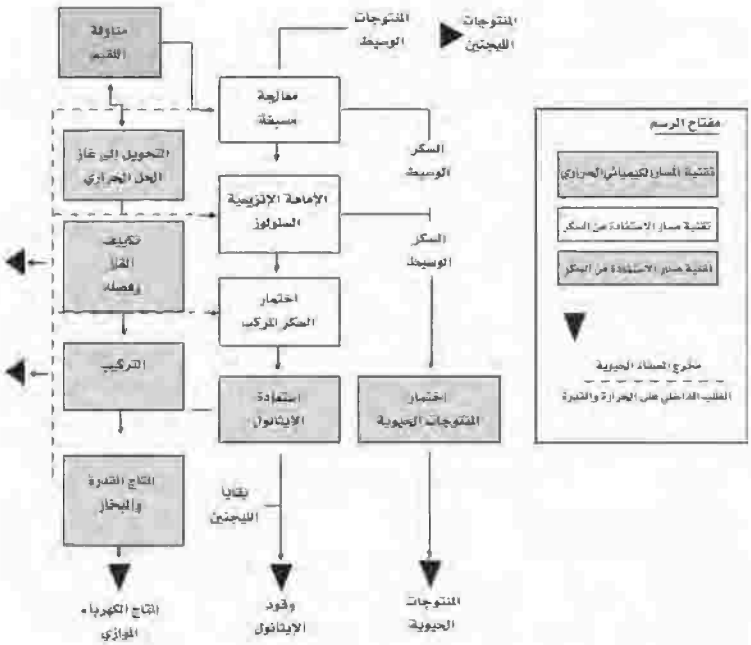
العمليات الكيميائية الحيوية

- الهضم في غياب الأوكسجين: الوقود الحيوي الغاز الخام

محطات الإنتاج المشترك: إنتاج الكهرباء والحرارة المستخدمة في العمليات المختلفة من وقود واحد.

وقود النقل: الإيثانول الحيوي والميثانول الحيوي والديزل الحيوي والزيوت الحيوية

الشكل رقم (٧,١٤). توضيح للعمليات المتوفرة لتحويل الكتلة الحيوية لاستخدامات الطاقة الحيوية والقدرة الحيوية والوقود الحيوي.



الشكل رقم (٧,١٥). رسم توضيحي لمصفاة حيوية متكاملة (من المرجع [18]).

(٧,٤,٣) الجوانب البيئية لوقود الطاقة الحيوية

Environmental Aspects of Bioenergy Fuels

إن التحول بشكل موسع إلى استخدام الكتلة الحيوية كمصدر بديل للطاقة في الاستخدامات واسعة النطاق (التي تزيد إمدادات القدرة فيها على حوالي ١٠٠ كيلووات) سوف يتطلب ألا تكون تكلفة إنتاج وقود الطاقة الحيوية منافسة للوقود الأحفوري وحسب بل منافسة لموارد الطاقة المتجددة الأخرى. بالإضافة إلى ذلك فإن كمية انبعاث الغازات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري وملوثات الهواء في المدن على مدى العمر الافتراضي لا بد أن تكون منافسة. فعلى سبيل المثال، فإن التشريعات الواردة في التعديلات على القانون الأمريكي للهواء النظيف (U.S. Clean Air Act Amendments) منذ تسعينيات القرن العشرين تتطلب استخدام أنواع الوقود الممزوج بالأوكسجين واستخدام البنزين معاد الصياغة عندما تتخطى حالة تلوث الهواء المعايير التي تسمح بها وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA). وأشار برنامج الكتلة الحيوية المنبثق من قسم كفاءة الطاقة والطاقة المتجددة (EERE) إلى تقرير وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA) [19] الذي يبين أن الديزل الحيوي (المصنع من الكتلة الحيوية – biodiesel) والديزل الإيثانولي (e-diesel) (حيث يخلط الإيثانول مع الديزل النفطي) قد خفضا من انبعاث ملوثات رئيسة للهواء من محركات المعدات الثقيلة المصممة للطرق السريعة (باستثناء أكاسيد النيتروجين)، كما يلخص ذلك الجدول رقم (٧,٤).

الجدول رقم (٧,٤). متوسط آثار الانبعاث الناتجة عن وقود الديزل الحيوي المستخدم في محركات المعدات الثقيلة المصممة للطرق السريعة*.

الملوِّث	الانخفاض الناتج عن استخدام خلائط الديزل الحيوي (كنسبة مئوية)	
	٪١٠٠	٪٢٠
أول أكسيد الكربون	-٤٧	-١٢
الهيدروكربونات	-٦٧	-٢٠
الأجسام الدقيقة العالقة	-٤٨	-١٢
أكاسيد النيتروجين	+١٠	+٢

* المعلومات مقتبسة من الشكل ES-A الخاص بوكالة حماية البيئة الأمريكية [19] نقلاً عن قسم كفاءة الطاقة والطاقة المتجددة بوزارة الطاقة الأمريكية.

وللوقود الحيوي عدة فوائد بيئية في مجال إنتاج القدرة الحرارية والكهربائية، من بينها تقليل انبعاث ثاني أكسيد الكبريت، حيث إن معظم أشكال الطاقة الحيوية تحتوي على كمية قليلة فقط من الكبريت. إن خلط الكتلة الحيوية مع الفحم، والذي قد يحتوي على نسبة كبريت تصل إلى ٥٪، يقلل من انبعاث ثاني أكسيد الكبريت من محطات القدرة بشكل ملحوظ مقارنة بتشغيل المحطة بالفحم وحده.

يُعد الانخفاض في انبعاث الكربون نتيجة استخدام الكتلة الحيوية ملحوظاً كذلك، حيث إنه يتم تحييد انبعاث ثاني أكسيد الكربون الناتج من دورة الوقود بثاني أكسيد الكربون الذي يعاد استخدامه لإنتاج كتلة حيوية جديدة. وهناك فوائد أخرى تظهر من استخدام النفايات البلدية الحيوية لإنتاج الطاقة الحيوية مثل تفادي تحللها وظهور الروائح الكريهة في ردميات النفايات الأرضية.

(٧,٥) الموارد المتجددة الأخرى
Other Renewable Resources

يوجد موردان آخران للطاقة المتجددة سيتم التطرق إليهما في هذا الاستعراض لمصادر الطاقة البديلة وهما: طاقة المد والجزر (والتي ينبغي أن تُسمى طاقة المحيطات وتتضمن إسهام القمر في طاقة المد والجزر)، والطاقة الجيوحرارية (والتي تتضمن إسهام باطن الأرض في الإمداد بالطاقة باستثناء العنصرين القابلين للانشطار: الثوريوم، واليورانيوم).

(٧,٥,١) طاقة المد والجزر Tidal Energy

تغطي المحيطات ثلثي سطح الأرض ويتغير مستوى المياه فيها مرتين في اليوم مما جعل فكرة إمكانية استغلال الطاقة من هذين التغيرين مثاراً للاهتمام الكبير وللأبحاث التي تنظر إلى المستقبل. تعتبر طاقة المد والجزر واعدة في مجال إنتاج الطاقة الكهربائية.

تأتي القدرة في استخلاص الطاقة من محيطات العالم على ثلاث صور، هي :

١- طاقة الأمواج : تؤدي الطاقة الحركية الناتجة من تأثير جاذبية القمر (بالإضافة إلى الشمس ولكن بنسبة أقل) على المحيطات، بينما تدور الأرض، إلى حدوث المد والجزر يومياً، مما يجعل هناك قابلية لاستغلال الطاقة الحركية للأمواج التي تصل إلى السواحل في مختلف القارات.

٢- طاقة تيارات المحيطات : تؤثر دورة الحرارة الناتجة من وصول الطاقة الشمسية إلى المناطق الاستوائية على المحيطات خلال دوران الأرض حول نفسها وتولد طاقة حركية يمكن استخدامها مباشرة لإدارة مولدات توربينة مغمورة تحت سطح الماء.

٣- الطاقة الحرارية : يؤدي التغير في درجة حرارة المحيطات كلما ازداد العمق إلى وجود فرق ملحوظ في درجة الحرارة على أعماق معقولة مما يسمح باستخلاص الطاقة الحرارية ولكن بكفاءة منخفضة.

يبدو مما تقدم أن طاقة الأمواج التي تصل إلى السواحل هي الطريقة الأرجح للوصول إلى إنتاج ملموس للكهرباء. ويقدم الموقع http://www.co-ops.nos.noaa.gov/restles1.html شرحاً مختصراً للعوامل الفلكية الأساسية التي تسبب المد والجزر وتيارات المحيطات. كما أن الموقع http://reslab.com.au/resfile/tidal/text.html يستعرض الطرق الهندسية التي يمكن من خلالها الاستفادة من طاقة المد والجزر. تشبه التقنية المستخدمة في ذلك تقنية الطاقة المائية، حيث إن ارتفاع المياه يحسب على أنه الفرق في الارتفاع بين مستويي المد والجزر. إلا أن الفرق الأساسي في التقنية يكمن في أن تدفق مياه الأنهار هو تدفق أحادي الاتجاه، بينما تدفق المياه من جراء المد والجزر ثنائي الاتجاه، فهو يتجه نحو الساحل (في حالة المد) وبعيداً عنه (في حالة الجزر). ويتطلب هذا الفرق استخدام توربينات يمكنها أن تتعامل مع تدفق المياه في الاتجاهين. إن أكثر المناطق ملاءمة لتشغيل محطات خاصة بطاقة المد والجزر هي الخلجان الكبيرة ذات المداخل الضيقة التي تسمح لبناء يشبه السد (ويسمى الخزان) للتحكم في تدفق المياه مع المد والجزر عبر بوابات وتوربينات.

لا يوجد في الوقت الحالي سوى منشأة تجارية واحدة فقط تستغل طاقة المد والجزر وهي تعمل منذ عام ١٩٦٦م، وهي محطة قدرة تنتج ٢٤٠ ميجاوات عند مصب نهر لارانس (La Rance estuary) شمال فرنسا. توجد بعض المشاريع التجريبية التي بدأت حديثاً حول العالم، إلا أن استغلال طاقة المد والجزر على نطاق واسع قد لا ينمو إلا في المستقبل البعيد.

(٧,٥,٢) الطاقة الجيوحرارية Geothermal Energy

الطاقة الجيوحرارية هي في الواقع حرارة الأرض. وقد كانت هذه الطاقة ظاهرة بوضوح على سطح الأرض على شكل براكين وفوارات الماء الساخن (geysers) والنافثات البركانية (fumaroles) والينابيع الساخنة منذ ظهور الإنسان على الأرض. وقد أشار استعراض لموارد الطاقة الجيوحرارية وطرق استخلاصها واستغلالها [20] إلى أن الطاقة الحرارية متوفرة في كل مكان في الكيلومترات العشرة العليا من قشرة الأرض، حيث يزداد متوسط درجة الحرارة مع العمق بمقدار يتراوح بين ٢٠ - ٣٠ درجة مئوية لكل كيلومتر عمق، وذلك بمتوسط تدفق حراري انبعاثي يبلغ حوالي ١,٥ ميكرو سعر حراري/سم^{٢}-ثانية. وبالرغم من ضخامة هذا المورد في الكيلومترات العشرة العليا إلا أن التركيز الحراري في الصخور (بوحدة كيلوجول/م^{٢}) مشتت بشكل يعيق استغلال هذا المورد على مستوى العالم. يمكن تعريف موارد الطاقة الجيوحرارية الملائمة للاستغلال التجاري على أنها مخزونات جيولوجية من الحرارة المركزة موجودة في مناطق معينة على أعماق يمكن الوصول إليها وفي حيز محصور بحيث تكون درجة الحرارة عالية بما يكفي لإنتاج الكهرباء (أعلى من ١٨٠ درجة مئوية) ولاستغلال الطاقة الحرارية (أعلى من ١٠٠ درجة مئوية). لقد وفرت الطبيعة أربعة أنواع من المخزونات (الموارد) الحرارية وهي مذكورة أدناه بدءاً من الأكثر سهولة في الاستخلاص:

١- المخزون الحراري المائي (hydrothermal): وهو البخار المحتبس أو الماء الساخن المحتوى في طبقات جيولوجية يمكن الوصول إليها بالحفر ويمكن استخراجه

لتشغيل مولد توربيني. هذا النوع هو فعلياً المورد الوحيد الذي تنتج منه الطاقة اليوم وله مستويان من الجودة:

(أ) مخزون يغلب عليه البخار: ويستخرج كبخار ماء جاف يوجه مباشرة إلى التوربين.

(ب) مخزون يغلب عليه السائل: ويستخرج كماء ساخن يتم تبخيره وميضياً (flashed) بفعل تقليل الضغط أو يوضع تحت ضغط مرتفع فيمر من خلال مبادل حراري ليبخر مائعاً عضوياً ذا نقطة غليان منخفضة.

٢- المخزون الحراري الصخري (petrothermal): وهو التكوينات الصخرية الجافة ذات درجة حرارة عالية [ويطلق عليها الصخور الجافة الساخنة (HDR) في معظم أرجاء العالم] التي يمكن الاستفادة منها بإحداث تصدعات في تلك الصخور بحيث تصبح ذات نفاذية تكفي لاستخلاص الطاقة عن طريق تبادل الحرارة مع المياه السطحية الباردة التي تضخ في دائرة مغلقة إلى أجهزة تحويل الطاقة الموجودة على السطح.

٣- المخزون الجيولوجي المضغوط (geopressured): وهو التكوينات الرسوبية التي تحتوي على ماء ساخن ذي ضغط عالٍ وعلى غاز طبيعي (الميثان) يمكن استخراجهما عن طريق الحفر. إن قيمة هذا المورد تتركز في معظمها في قيمة الغاز الطبيعي.

٤- الصُهارة (magma): وهي تكتلات من الحمم البركانية التي ارتفعت إلى عمق يمكن الوصول إليه (أقل من ٢٠ كم عن سطح الأرض) لتتبادل الحرارة مع مائع حامل للحرارة موجود في دائرة مغلقة.

والتقنية اللازمة لتحويل طاقة الموائع الجيوحرارية إلى طاقة كهربائية هي التقنية ذاتها المستخدمة للوقود الأحفوري، إلا أن الفرق الأساسي يكمن في خواص موائع التشغيل. إن البخار الجيوحراري، كما يصلنا من باطن الأرض، يحتوي على شوائب غازية مثل كبريتيد الهيدروجين والرادون والتي لا يسمح عموماً بإطلاقها إلى الغلاف الجوي. بالإضافة إلى ذلك فإن درجة حرارة البخار أقل بكثير من بخار المراجل التي

يستخدم فيها الوقود الأحفوري. وبالمقارنة بكفاءة تحويل التوربينات التي تستخدم الوقود الأحفوري والتي تتراوح تقريباً بين ٣٥٪ - ٤٠٪ فإن كفاءة التحويل للبخار الجيوحراري تبلغ حوالي ١٢٪ - ١٥٪ وتتطلب ثلاثة أضعاف كمية تدفق البخار. أما الموارد الجيوحرارية الأكثر وفرة وذات درجات الحرارة الأقل فإن كفاءة التحويل لها أقل من ذلك وقد يكون من الضروري تشغيلها في محطة قدرة مزدوجة الدورة (binary cycle power plant) بحيث يوضع المائع الجيوحراري تحت ضغط عالٍ لمنعه من الغليان ويستخدم لتبخير مائع آخر ذي درجة غليان أقل مثل الآيسوبيوتان (isobutane) لتشغيل توربين. وفي كلتا الحالتين يعاد ضخ المائع الجيوحراري إلى باطن الأرض لأسباب بيئية، وللمحافظة كذلك على ضغط المائع في الخزان ولاستخراج كميات إضافية من الحرارة من الصخور التي تحتوي عليها.

تُستخدم الطاقة الجيوحرارية في الدرجة الأولى في إنتاج الطاقة الكهربائية وفي استخدامات حرارية مثل تدفئة المباني والتسخين والتجفيف الصناعي وفي الحمامات العامة. يتركز الاهتمام الأكبر بالطاقة الجيوحرارية في الولايات المتحدة على إنتاج الكهرباء. يوضح الجدول رقم (٧,٥) الدور الذي لعبته الطاقة الجيوحرارية في الإمداد بالكهرباء عام ٢٠٠٢م والتوقعات لكمية الإنتاج والطاقة الاستيعابية المستقبلية إلى نهاية عام ٢٠٢٥م. وتتوقع وكالة معلومات الطاقة التابعة لوزارة الطاقة الأمريكية أن نسبة الطاقة الكهربائية المنتجة من مصادر حرارية مائية في الولايات المتحدة ستصل إلى ١٠٪ من حصة الطاقة المتجددة بحلول ٢٠٢٥م. في عام ٢٠٠٢م كان إنتاج الطاقة الجيوحرارية البالغ ١٣,٣٨ جيجاوات-ساعة يمثل ٠,٤٪ من إجمالي إنتاج الكهرباء البالغ ٣٣٩١ جيجاوات-ساعة في الولايات المتحدة. وستزداد هذه القيمة لتصل إلى ٠,٩٪ من إجمالي الإنتاج البالغ ٥٢٥٧ جيجاوات-ساعة عام ٢٠٢٥م.

الجدول رقم (٧,٥). الطاقة الجيوحرارية ضمن إمدادات الكهرباء في الولايات المتحدة [2].

السنة	الإنتاج		الطاقة الاستيعابية			
	الطاقة الجيوحرارية (جيجاوات–ساعة)	الطاقة المتجددة (جيجاوات–ساعة)	النسبة (٪)	الطاقة الجيوحرارية (جيجاوات)	الطاقة المتجددة (جيجاوات)	النسبة (٪)
٢٠٠٠م	١٣,٣٦	٣٠٨,٩	٤,٣	٢,٨٩	٩١,٧	٣,٢
٢٠٠٥م	١٤,٢٣	٣٨٣,٢	٣,٧	٢,٩٠	٩٤,٢	٣,١
٢٠١٥م	٣٢,٣١	٤٢٤,٥	٧,٦	٥,١١	١٠١,٢	٥,١
٢٠٢٥م	٤٦,٦٦	٤٦٤,٤	١٠,١	٦,٨٤	١١٠,١	٦,٢
م.ن.س.م* (٪/سنة)	٥,٦	١,٨		٣,٨	٠,٨	

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

هناك استعراض حديث (١٩٩٧م) لوضع الطاقة الجيوحرارية [20]، تناول مدى إمكانية استغلال موارد الطاقة الهائلة من الصخور الجافة الساخنة (المخزون الحراري الصخري). وقد ركز هذا الاستعراض على الأثر المحتمل للطاقة الجيوحرارية كمورد طاقة مستدام بيئياً. وتتوفر معلومات عن الوضع الحالي للطاقة الجيوحرارية على الإنترنت من خلال الموقعين الآتيين :

١- مجلس الموارد الجيوحرارية (Geothermal Resources Council) : www.geothermal.org (يوفر معلومات عن الولايات المتحدة)

٢- الجمعية الدولية للطاقة الجيوحرارية (The International Geothermal Association) : iga.igg.cnr.it/index.php (يوفر معلومات عن بقية العالم).

(٧,٦) الخلاصة

Summary

تم في هذا الفصل دراسة الدور المحتمل لموارد الطاقة المتجددة في توفير جزء معتبر من الطاقة التي يحتاجها العالم في الجيلين القادمين. إن الطاقة المتجددة المستخدمة حالياً

هي في معظمها الطاقة المائية، والطاقة الجيوحرارية. هناك تطورات متسارعة جارية في مجال الطاقة الشمسية لا سيما في إنتاج الكهرباء بالخلايا الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح وتقنيات الكتلة الحيوية. وتشير المعلومات المستقاة من العلوم الأساسية والمعلومات الهندسية الخاصة بهذه الموارد إلى أن كلاً منها قادر على الإسهام في توفير الطاقة للعالم. إن الميزة الكبرى لمصادر الطاقة هذه هي القبول العام لها باعتبارها موارد لا تؤثر على البيئة (بالرغم من أن كلاً منها يساهم في تلوث الجو عالمياً ومحلياً إذا نظرنا إلى فترة عمرها الافتراضي الكلي). أما العائق الأكبر فهو انخفاض محتوى الطاقة النوعية لهذه المصادر إذا نظرنا إلى استخدامها في تطبيقات واسعة النطاق تتطلب كميات كبيرة من الطاقة. إن هذا الاستعراض للأنواع الرئيسة لمصادر الطاقة المتوفرة (الأحفورية، والنووية، والمتجددة) يشير إلى أن مصادر الطاقة في المستقبل ستتغير مع الزمن ولكنها ستتضمن إسهاماً من كل واحد من هذه الأنواع.

المراجع References

[1] U.S. Department of Energy, Energy Information Agency, *Renewable Energy Annual*. Report No. DOE/EIA-0603(02), Washington, D.C.: DOE, November 2003.

[2] U.S. Department of Energy, Energy Information Agency, *Renewable Energy Outlook 2004*. Report No. DOE/EIA-0383(04), Washington, D.C.: DOE, January 2004.

[3] M. K. Hubbert, "Energy Resources." Chapter 2 in V. J. Yannacone, Jr., *Energy Crisis: Danger and Opportunity*. St. Paul, MN: West Publishing, 1974.

[4] Tennessee Valley Authority, Hydroelectric Dam, www.tva.gov/power/hydroart.htm (2005).

[5] Federal Energy Regulatory Commission, *Hydroelectric Power Resources in the United States Discovered and Undiscovered*. Washington, DC: FERC, 1992.

[6] Office of Technology Assessment, *Renewing our Energy Future*. Washington, D.C.: Congress of the United States, 1995.

[7] J. W. Twiddle and A. D. Weir, *Renewable Energy Resources*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1986.

[8] U.S. Department of Energy, Solar Energy Technologies Program: www.doe.gov/engine/content.do?BT_CODE=SOLAR, 2005.

[9] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind Energy Explained*. New York: John Wiley & Sons, 2002.

[10] J. F. Walker and N. Jenkins, *Wind Energy Technology*. New York: John Wiley & Sons, 1997.
[11] P. Gipe, *Wind Energy Basics*. White River Junction, VT: Chelsea Green, 1999.
[12] World Energy Council, *New Renewable Energy Resources*. London: Kogan Page, 1994.
[13] National Renewable Energy Laboratory, National Wind Technology Center, "2005 Installed Wind Power Capacity Map," private communication, 2005.
[14] J. Johnson, "Blowing Green," Chemical and Engineering News, February 24, 2002, pp. 27-30.
[15] M. Z. Jacobson and G. M. Masters, "Exploiting Wind versus Coal." *Science* 293:1438, 2001.
[16] R. E. H. Sims, *The Brilliance of Bioenergy in Business and in Practice*. London: James and James, 2002.
[17] Energy Efficiency and Renewable Energy Section: www.eere.energy.gov/biomass/index.html.
[18] U.S. Department of Energy, EERE, "Biomass Program Multi-Year Technical Plan." Draft for Review. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, November 2003.
[19] U.S. Environmental Protection Agency, "A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions." Draft, EPA-420-P-02-001, Washington, D.C.: EPA, October, 2002.
[20] P. Kruger, "Geothermal Energy." *Annual Review of Energy*, Vol. 1. Palo Alto, CA: Annual Reviews, 1976.
[21] J. E. Mock, J. W. Tester, and P. M. Wright, "Geothermal Energy from the Earth: Its Potential Impact as an Environmentally Sustainable Resource." *Annual Review of Energy and the Environment*. 22:305-356, 1997.