المنظمة العربية
للتربية والثقافة والعلوم

جامعة البحرين

حقيبة تعليمية تدريبية في مجال الطاقات المتجددة

المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم
إدارة برامج العلوم والبحث العلمي

سلسلة الحقائب التعليمية التدريبية
في مجال الطاقات المتجددة

إشراف
الأستاذ الدكتور البهلول اليعقوبي

منسق المشروع
الدكتور أمين القلق

المحرر العلمي العام
الأستاذ الدكتور محمد المعالج

التدقيق اللغوي
الأستاذ الدكتور عبداللطيف عبيد

حقيبة تعليمية تدريبية في مجال الطاقات المتجددة

إعـــــداد

الأستاذ الدكتور وهيب عيسى الناصر
عميد كلية العلوم

الدكتور علي عباس القره غولي
مدير مركز أبحاث الطاقة

جامعة البحرين

تونـــــــس 2000

الفصل الأول

مصادر الطاقة

1 –1 مقدمـــة عـــن الطاقـــة
- الطاقة الحركية
- الحرارة و درجة الحرارة
- الطاقة الكامنة
- الطاقة الكهربائية
- الطاقة النووية

2-1 كفاءة تحويل الطاقة

3-1 الواقع الحالي لاستخدام الطاقة

4-1 مصادر الطاقة التقليدية
- النفط
- الغاز
- الفحم

5-1 المشاكل الناتجة عن استخدامات مصادر الطاقة التقليدية
- ارتفاع حرارة مناخ الكرة الأرضية
- الأمطار الحِمضيّة
- تلوث البحار
- الإشعاع والمخلفات النووية

6-1 استمرارية توفر مصادر الطاقة

1-1 مقدمة عن الطاقة

الطاقة هي أحد المقومات الرئيسية للمجتمعات المتحضرة ، وتحتاج إليها كافة قطاعات المجتمع بالإضافة إلى الحاجة الماسة إليها في تسيير الحياة اليومية ، إذ يتم استخدامها في تشغيل المصانع وتحريك وسائل النقل المختلفة وتشغيل الأدوات المنزلية وغير ذلك من الأغراض . وكل حركة يقوم بها الإنسان تحتاج إلى استهلاك نوع من أنواع الطاقة ويستمدَّ الإنسان طاقته لإنجاز أعماله اليدوية والذهنية من الغذاء المتنوع الذي يتناوله كل يوم ، إذ يتمّ حرق الغذاء في خلايا الجسم ويتحول إلى طاقة . ويمكن تعريف الطاقة بأنها قابلية إنجاز تأثير ملموس (شغل) . وهي توجد على عدة أنواع منها طاقة الريح ، وطاقة جريان الماء ومسا قطها . ويمكن أن تكون الطاقة مخزونة في مادة كالوقود التقليدي (النفط ، الفحم، الغاز) . ويمكن ، من الناحية التقنية ، تعريف الشغل بأنه تحريك جسم بقوه معينة مسافة معينة في اتجاه مواز لاتجاه القوة وعليه فإن :

$$\text{الشغل} = \text{القوه} \times \text{المسافة}$$

ووحدات القوه هنا هي النيوتن (N) ووحدات المسافة المتر (m) : وعليه ستكون وحدات الشغل هي (N.m) أو جول (Joule) حيث أن النيوتن يُعرف بأنه القوة التي تقوم بتسريع كيلوغرام واحد (kg) بمعدل 1 متر في الثانية لكل ثانية (ms^{-2}) .

والطاقة كمية محدودة مجموعها في الكون ثابت . والطاقة لا تفنى ولا تستحدث ، ولكنها تتحول من شكل إلى آخر مثل تحويل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية أو ميكانيكية ، أو تحويل الطاقة الكيميائية إلى حرارة . وإذا كانت كمية الطاقة الناتجة من عملية ما (الطاقة الكهربائية مثلاً) هي أقل من كمية الطاقة المستخدمة (كالوقود مثلاً) فهذا يعني أن بعض الطاقة قد تم فقده إذ تحول إلى شكل آخر (كالحرارة المهدورة) ، وهذا هو المبدأ الذي ينص على أن الطاقة دائماً محفوظة وهو ما يسمى بالقانون الأول لديناميكا الحرارة (First law of thermodynamic) . وإذا كانت كمية الطاقة ثابتة دائماً ، كما ذكرنا سابقاً، فكيف يمكن استهلاكها ؟ الجواب عن ذلك هو أننا لا نستهلك الطاقة وإنما نحولها من شكل إلى آخر . نحن نستهلك الوقود الموجود في الطبيعة ونقوم بحرقه في مكائن الاحتراق الداخلي، ويتم تحويل طاقته الكيميائية إلى حرارة ومن ثم إلى طاقة حركية لتحريك العربات. كما أن طاقة الرياح تقوم بتحويل طاقة الهواء الحركية إلى طاقة كهربائية تقوم بتشغيل المصابيح التي تشع طاقة ضوئية ، أو تنتج طاقة ميكانيكية كضخ المياه أو

طحن الحبوب . كما أن الغابات تنمو أيضاً بتحويل طاقة الإشعاع الشمسي إلى طاقة كيميائية تعمل على نمو خلايا النباتات .

وتتوفر الطاقة على أشكال مختلفة يمكن حصرها بأربعة مستويات رئيسية هي :

أولا : الطاقة الحركية (Kinetic Energy)

الطاقة الحركية الدافعة لأي جسم متحرك يمكن أن تمثل بالمعادلة التالية:

الطاقة الحركية = ½ × الكتلة × مربع السرعة ،

ووحدات الطاقة الحركية هي نفس الوحدة لكل أنواع الطاقة وهي "الجول" (Joule) ،

ووحدات الكتلة هي الكيلوغرام (Kg) ،

ووحدات السرعة هي المتر/الثانية (m/sec) .

$$\frac{1}{2} mV^2 = E_k$$

إن الطاقة هي التي تجعل الأشياء دافئة ، فالمواد تتكون من ذرات ، ومجموع الذرات تسمى الجزيئات . وفي غاز ، كالهواء المحيط بنا مثلاً ، فإن هذه الجزيئات تتحرك بحرية . ولكن في السوائل والمواد الصلبة فإن الحركة تكون مقيدة نسبياً . وكل جزء أو جسيم يتذبذب بشكل ثابت . والطاقة الحرارية (الحرارة) هي اسم أعطي للطاقة الحركية التي تنتج عن حركة الجزيئات العشوائية السريعة ، وكلما كانت الحرارة أكبر كانت السرعة أعلى .

الحرارة ودرجة الحرارة

يمكن توضيح معنى الحرارة بما يلي : عندما تتلامس جزيئات سريعة الحركة من مادة دافئة أو حارة مع جزيئات أقل منها سرعة من مادة أقل حرارة فإن التصادم بين هذه الجزيئات سيزيد من سرعة الجزيئات البطيئة ويقلل من سرعة الجزيئات السريعة ، وعليه يمكن توضيح الطاقة الحركية بأنها سريان حراري يتجه من الجزء الحار (ذي السرعة العالية) إلى الجزء البارد (ذي السرعة القليلة) . إن اتجاه سريان الحرارة يزودنا بإمكانية تعريف المقياس النسبي للحرارة أو ما يسمى بدرجة الحرارة (Temperature) . فدرجة الصفر في مقياس درجة الحرارة في سلم Celsus تتوافق مع السكون التام في حركة الجزيئات (جزيئات ساكنة) وهي موافقة لحالة

التجمد في الماء ، ودرجة 100 مئوية موافقة لحالة غليان الماء . إن الوحدات الشائعة الاستخدام في هذا المجال هي الدرجة المئوية (C^o) ودرجة كلفن (K^o) والعلاقة التي تربطهما هي :

درجة الحرارة (K^o) = درجة الحرارة المئوية (C^o) + 273

ثانيا : الطاقة الكامنة (Gravitational Energy Or Potential Energy)

وهي الطاقة المبذولة اللازمة لرفع جسم ، وذلك لكون الجاذبية الأرضية تعاكس هذا الفعل . فعند رفع أي جسم ، سواءً كان تفاحة ، لارتفاع معين ، أو عند رفع عدة آلاف الأطنان من الماء إلى مستوى أعلى ، فإنه سيتم خزن طاقة في ذلك ، وفي هذه الحالة يمكن تسميتها بطاقة الجاذبية الكامنة (وتسمى دائماً الطاقة الكامنة). إن قوة الجاذبية لسحب أي جسم إلى الأرض تسمى وزن الجسم ، ويساوي حاصل ضرب كتلته (m) في تعجيل الجاذبية الأرضية ($g = 9.81ms^{-2}$) . وعليه فإن الطاقة الكامنة اللازمة لرفع أي جسم إلى ارتفاع معين يمكن حسابها من المعادلة التالية :

الطاقة الكامنة = القوة × المسافة ،

= الوزن × الارتفاع ،

= mgh ،

ووحدات الطاقة هي الجول (J) ،

ووحدات القوه هي النيوتن (N) ،

ووحدات الكتلة هي الكيلوغرام (Kg) ،

ووحدات الارتفاع هي المتر(m) .

ثالثا : الطاقة الكهربائية (Electrical Energy)

إن قوى الجاذبية هي أكثر القوى وضوحاً عندنا ، فهي تؤثر في الأجسام بشكل ملموس ، لكنها ليست هي الوحيدة التي تنفرد بهذا الوضوح فالطاقة الكهربائية (Electrical Energy) هي قوة واضحة جداً ، وهي أكبر من الجاذبية تأثيراً بحوالي مئات المرات. فالقوى الكهربائية هي التي تربط الذرات والجزيئات للمواد ولكنها لا يمكن إدراكها بالعين المجردة . فكل ذرة تتكون من أجزاء مشحونة كهربائياً ،

فالإلكترونات تدور حول مركز النواة ، وعندما تجتمع الذرات لتكوين جزيئات أو مواد صلبة فان توزيع الإلكترونات يتغير . وفي معظم الأحيان يكون التغير كبيراً جداً ولهذا فإن الطاقة الكيميائية المنظورة على مستوى الذرات هي شكل من أشكال الطاقة الكهربائية . فعندما يتم حرق الوقود فإن الطاقة الكيميائية التي تحتويها ستتحول إلى طاقة حرارية. ومن البديهي أن الطاقة الكهربائية التي تتحرر نتيجة تبدل مواضع إلكترونات الذرة تتحول إلى طاقة حركية في جزيئات المنتج المحترق . والشكل المألوف من أشكال الطاقة الكهربائية هو القوه الكهربائية التي نستخدمها في حياتنا اليومية . فالتيار الكهربائي هو عبارة عن تيار منتظم من الإلكترونات في المادة ، وفي معظم الأحيان تكون هذه المادة معدناً (metal) ، والمعادن هي مواد يتم فيها تحرر إلكترون واحد أو اثنين من ذراتها . وبوجود هذه الإلكترونات المتحررة يمكن لهذه المعادن حمل التيار الكهربائي . ولضمان مرور تيار كهربائي بصورة دائمة فإنه ينبغي توفر طاقة مستمرة لأن الإلكترونات ستفقد طاقة عند اصطدامها . ولهذا فان ازدياد الطاقة الحركية في المعدن هو الذي يرفع درجة حرارة الأسلاك التي تحمل التيار الكهربائي . والبطارية تستخدم الطاقة الكيميائية المخزونة لتوفير الطاقة إلى الدوائر الكهربائية في الأجهزة .

وتحتاج محطات توليد الطاقة الكهربائية إلى عمليات متتالية في تحويل الطاقة . فإذا كان الوقود هو الطاقة المستخدمة فإن الخطوة الأولى ستكون حرقه واستخدام الحرارة الناتجة عنه لإنتاج بخار أو غاز ساخن ، وهذا البخار أو الغاز سيقوم بتدوير التوربينات (العنفات) التي بدورها تقوم بتدوير المولدات الكهربائية .

وهناك شكل آخر من أشكال الطاقة الكهربائية يكون على شكل إشعاع الكترومغناطيسي (كهرمغناطيسي) أو ما يسمى بالطاقة الكهرمغناطيسية ، وهي على شكل إشعاع شمسي يصل إلى سطح الأرض . وتشع الطاقة الكهرمغناطيسية من كل جسم متوهج كالشمس بكمية كبيرة أو قليلة ، وتنتقل على شكل موجات تحمل طاقة خلال الفراغ . وطول الموجة يوضح مقدار طاقتها ونوعها . وهذه الموجات الحاملة للطاقة تتضمن التالي : الأشعة السينية (X-rays) ، والأشعة فوق البنفسجية (Ultraviolet) ، والأشعة تحت الحمراء (Infrared radiation) ، والأمواج المايكروية أو الدقيقة (Microwaves) ، والأمواج الراديوية (Radio waves) ،

بالإضافة إلى حزم قليلة من الأمواج التي تستطيع العين المجردة إبصارها (رؤيتها)، والتي تسمى بالأشعة المرئية (Visible Waves) .

رابعا : الطاقة النووية (Nuclear Energy)

هذا النوع من الطاقة هو ما يتعلق بمركز النواة والذي يسمى بالطاقة الذرية أو النووية . لقد تم تطوير هذه التكنولوجيا خلال الحرب العالمية الثانية لأغراض عسكرية . وتستخدم الآن أيضاً لأغراض سلمية مثل توليد الطاقة الكهربائية . وتعمل محطات الطاقة الكهربائية التي تستخدم الوقود النووي بنفس الطريقة التي تعمل بها محطات الوقود التقليدي مع فرق يتمثل في أنّ أفران حرق الوقود يتم استبدالها بمفاعل نووي لتوليد الحرارة .

2-1 كفاءة تحويل الطاقة :

عندما يتم تحويل الطاقة من شكل إلى آخر لسبب معين فإن الطاقة الناتجة والمفيدة سوف لا تكون مساوية للطاقة المتوفرة أو المجهزة ، والنسبة بين الطاقة الناتجة والطاقة المتوفرة تدعى الكفاءة . ويمكن أن تكون الكفاءة عالية حتى تصل إلى أكثر من 90% ، كما هو الحال في العنفة المائية أو في محرك كهربائي جيد الصنع ، أو تكون أقل من ذلك بكثير فتتراوح من 10% إلى 20% في مكائن الاحتراق الداخلي وأجهزة الطاقة الشمسية وتحديداً الخلايا الفولطاضوئية ، أو تتراوح بين 35% و 40% في محطات توليد الطاقة الكهربائية التي تستخدم الفحم كمصدر للطاقة أو محطات تحويل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية أو ميكانيكية . ويمكن التفريق بين أنظمة التحويل عالية الكفاءة وأنظمة التحويل منخفضة الكفاءة بأن الأخيرة تتضمن التحويل من حرارة إلى طاقة ميكانيكية أو كهربائية . فالحرارة ، كما عرفناها سابقا ، هي الطاقة الحركية للجزيئات التي تتحرك بصورة عشوائية ، وهي نوع من الحركة غير المنتظمة ، ولا توجد ماكنة أو آلة تستطيع تحويل الطاقة غير المنتظمة إلى طاقة منتظمة كالطاقة الميكانيكية أو الكهربائية بدون خسائر كما ينص على ذلك القانون الثاني لديناميكا الحرارة (Second law of thermodynamic) وهو "أن هناك كفاءة محدودة للماكنة

الحرارية ، وأن قسماً من الطاقة يجب أن يطرح خارجاً كحرارة (الفاقد) ذات درجة حرارة منخفضة" .

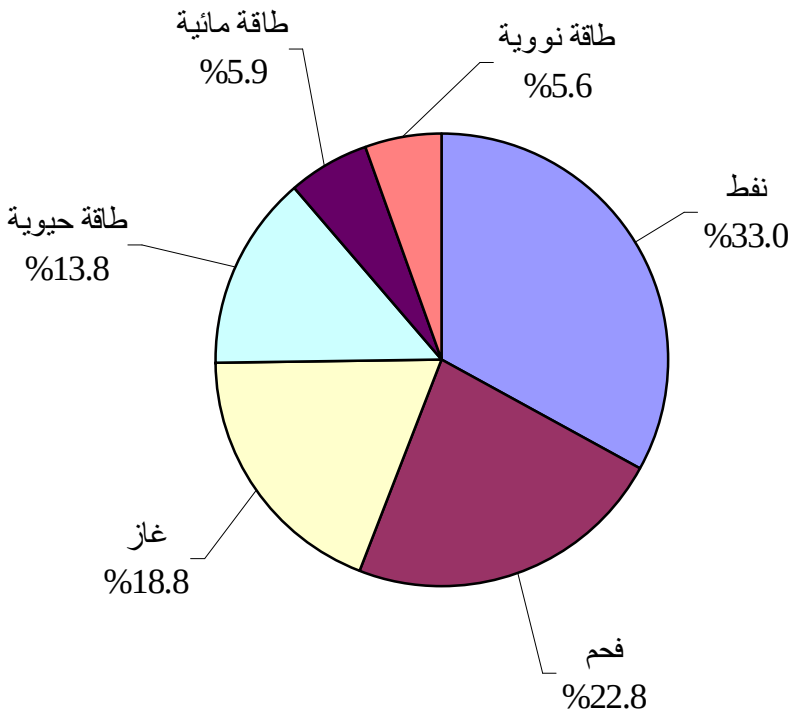
لقد تمكن الإنسان منذ القدم من استغلال طاقة الرياح في تحريك السفن في الأنهار والبحار ، واستخدامها في إدارة بعض طواحين الهواء لرفع المياه أو طحن الحبوب وغير ذلك من الاستخدامات . كما تمكن من استغلال الفرق في منسوب المياه من أجزاء بعض الأنهار في إدارة بعض السواقي ، وتشغيل الآلات . وقد عرف الإنسان الفحم منذ أن اكتشف النار ولاحظ أن بعض الأحجار السوداء الموجودة في الطبيعة تقبل الاشتعال . وقد استخدم الإنسان الفحم بعد ذلك كمصدر من مصادر الطاقة إلى أن تم اكتشاف النفط ، وما يصاحبه من غاز طبيعي. وقد ازداد استخدام النفط والغاز في هذه الأيام وأصبح النفط أهم مصادر الطاقة في الوقت الحاضر، ويعدّ توفره أساسياً في تلبية متطلبات التنمية الاقتصادية والتقدم الصناعي . إن أكثر من 40% من الطاقة المستهلكة في العالم يتم توفيرها من منطقة الخليج العربي الذي يحتوي على أكثر من ثلثي مخزون العالم ، وهذا يوضح الأهمية الكبرى التي توليها الدول الكبرى لهذه المنطقة والتعاون معها وأحياناً السيطرة عليها .

ولفهم الطاقة بصورة واضحة يجب معرفة أنواعها ، ومصادرها ، ومحدداتها، والتأثيرات البيئية الناجمة عن استخدامها ، والاعتبارات الاجتماعية والتكنولوجية المتعلقة بها . وللحفاظ على النمو الاقتصادي وتحسين نوعية حياة الإنسان في القرن المقبل يجب أن يوجد تخطيط محكم لاستخدام الكمية المحدودة من مصادر الطاقة التقليدية وتطوير مصادر بديلة.

3-1 الواقع الحالي لاستخدام الطاقة :

تعتمد المجتمعات المتقدمة على مصادر الطاقة المختلفة في كافة مرافق الحياة. وغالبية المصادر المستخدمة حالياً هي مصادر الوقود الأحفوري . وقد كانت النسب المئوية لاستهلاك مصادر الطاقة المختلفة في عام 1992 (الشكل 1-1) كما يلي : النفط 33% ، والفحم 22.8% ، والغاز 18.8% ،

ومصادر الكتلة الحيوية 13.8% ، والمحطات المائية 5.9% ، والمحطات التي تعمل بالطاقة النووية 5.6% .



نفط : 3128 مليون طن نفط مكافئ (131 اكسا جول)
فحم : 2164 مليون طن نفط مكافئ (91 اكسا جول)
غاز : 1781 مليون طن نفط مكافئ (75 اكسا جول)
طاقة حيوية : 1310 مليون طن نفط مكافئ (55 اكسا جول)
طاقة مائية : 561 مليون طن نفط مكافئ (24 اكسا جول)
طاقة نووية : 532 مليون طن نفط مكافئ (22 اكسا جول)
المجموع : 9476 مليون طن نفط مكافئ (398 اكسا جول)

شكل (1-1): النسب المئوية لاستهلاك الطاقة من المصادر المختلفة في عام 1992

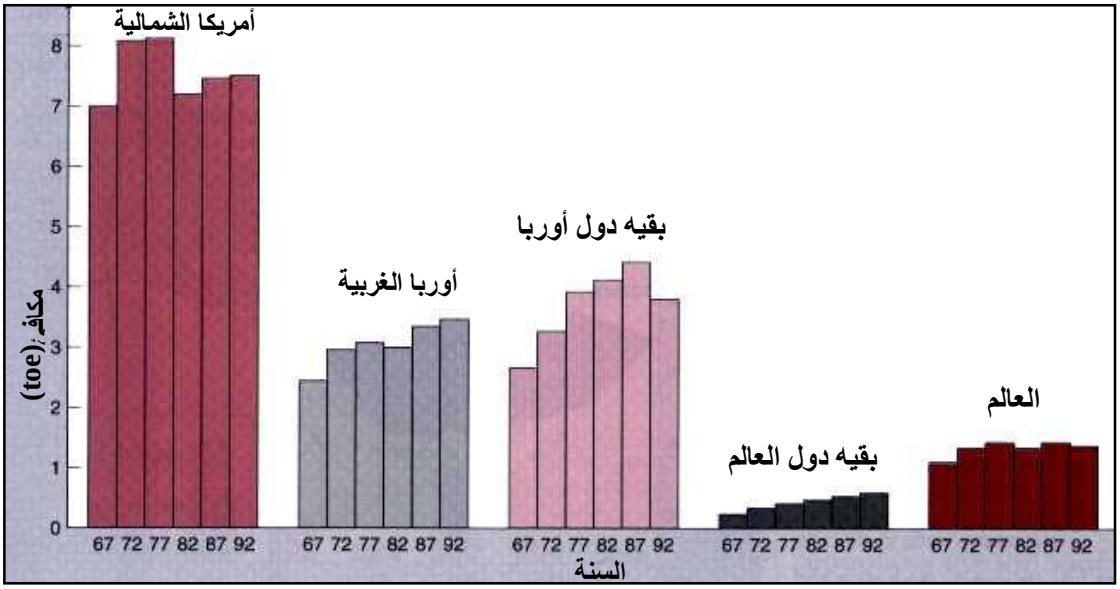
الجدول (1-1) يبين كمية الطاقة المستهلكة خلال الأعوام من 1990 وإلى غاية 1998 لكل من الدول العربية وبقية الدول النامية والدول المتقدمة والمجموع العالمي للاستهلاك . ويلاحظ من الجدول أن استهلاك الدول العربية عام 1998 كان حوالي 3.6% من مجموع الاستهلاك العالمي وذلك لكونها دولاً نامية وغير صناعية ، بينما وصل الاستهلاك في أمريكا الشمالية (الولايات المتحدة ، وكندا ، والمكسيك) إلى حوالي 30% . وقد كان الاستهلاك في الولايات المتحدة ، وهي تمثل 5% من مجموع سكان العالم ، حوالي 25% من

الاستهلاك العالمي . ويوضح الشكل (1-2) معدل الاستهلاك السنوي للشخص الواحد في مختلف مناطق العالم ، والمعدل العالمي السنوي لاستهلاك الفرد .

جدول (1-1) استهلاك الطاقة في الدول العربية ودول العالم الأخرى
(مليون برميل مكافئ نفط يومياً)

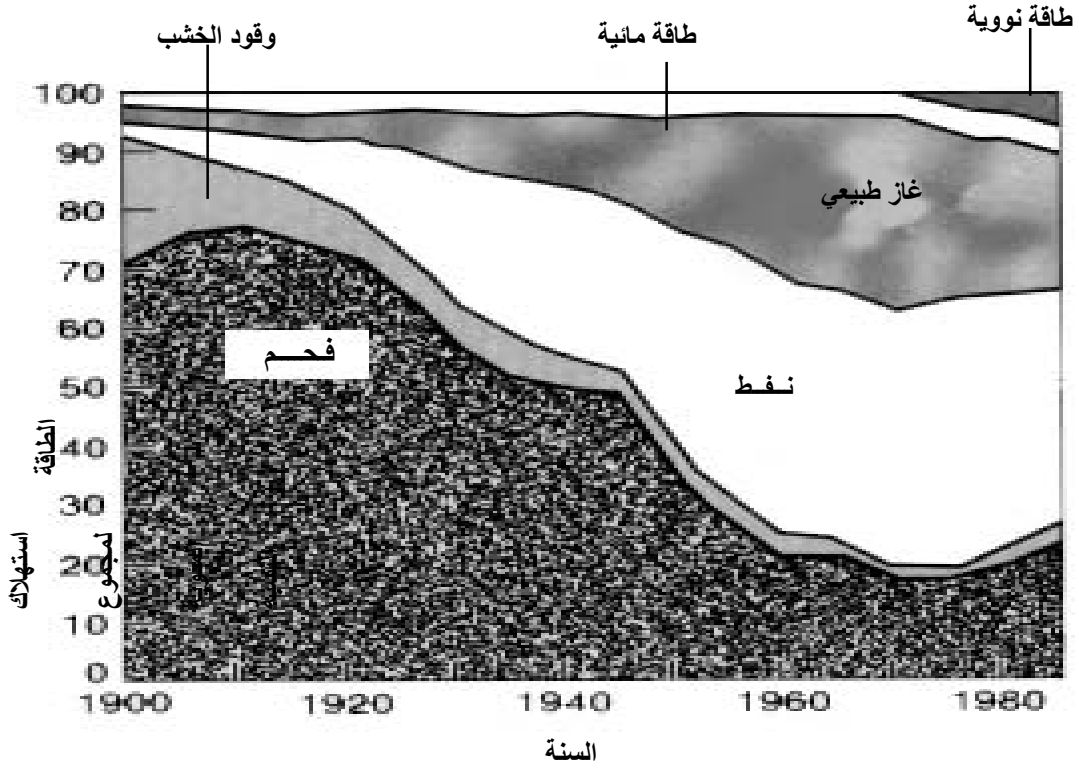
السنة	1990	1995	1996	1997	1998
الأوابك	3.9	4.9	5.2	5.4	5.5
الدول العربية الأخرى	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6
مجموع الدول العربية	4.3	5.4	5.7	5.9	6.1
امريكا الشمالية*	44.8	48.1	49.6	50.0	50.0
أمريكا اللاتينية	5.4	6.5	6.8	7.1	7.2
أوروبا الشرقية	33.9	24.4	23.8	22.9	22.6
أوروبا الغربية	29.2	29.9	30.9	30.9	31.3
الشرق الأوسط	5.1	6.4	6.9	7.1	7.4
إفريقيا	4.3	4.8	5.0	5.1	5.3
آسيا والشرق الأقصى	33.1	41.8	44.2	44.8	44.1
أوقيانوسيا	2.0	2.2	2.3	2.3	2.3
إجمالي العالم	**157.8**	**164.1**	**169.5**	**170.3**	**170.3**

* لا تشمل المكسيك



شكل (1-2): الاستهلاك الفردي للطاقة في مناطق العالم المختلفة ومعدل الاستهلاك العالمي للفرد

إن أولى بئر نفطية حديثة هي التي حفرت في ولاية بنسلفانيا الأمريكية عام 1859 . وباكتشاف مكائن الاحتراق الداخلي بعد عام 1870 ازداد عدد المكائن وزاد استخدام النفط لكونه مصدراً نظيفاً ومرغوباً بيئياً أكثر من الفحم ، وبدأ بذلك استبدال الفحم في الصناعة وتوليد الطاقة بمصادر الطاقة الأخرى كالنفط والغاز . ويبين الشـــكل (1-3) النسب المئوية للطاقة المستخدمة في الولايات المتحدة ، وهي أكبر دولة مستهلكة في العالم ، خلال 100عام . ويلاحظ فيه الانخفاض الكبير في استهلاك الفحم والخشب والارتفاع المتزايد في استهلاك النفط والغاز وخاصة بعد الحرب العالمية الثانية .



شكل (1-3): النسب المئوية للطاقة المستخدمة في الولايات المتحدة خلال القرن الماضي

ويتم حالياً استخدام مصادر الطاقة في أربعة مجالات رئيسية هي : النقل ، والصناعة ، والسكن (دور منفردة وعمارات سكنية) ، والقطاع التجاري (مكاتب، مدارس ، مخازن .... الخ) . وإنّ جزءاً كبيراً من الطاقة المستهلكة يُستخدم كحرارة وليس لإنتاج شغل ، ويُمثل نسبة مقدارها حوالي 50% من الطاقة المستهلكة كخسائر حرارية ، وأكثر ما يحدث ذلك عند محطات توليد الطاقة الكهربائية حيث تساوي نسبة الضياع على شكل حرارة 64% من الطاقة المستهلكة (الداخلة) مقابل 36% من الطاقة الكهربائية المنتجة أو المفيدة أي أن الكفاءة تساوي 36% فقط .

4-1 مصادر الطاقة التقليدية

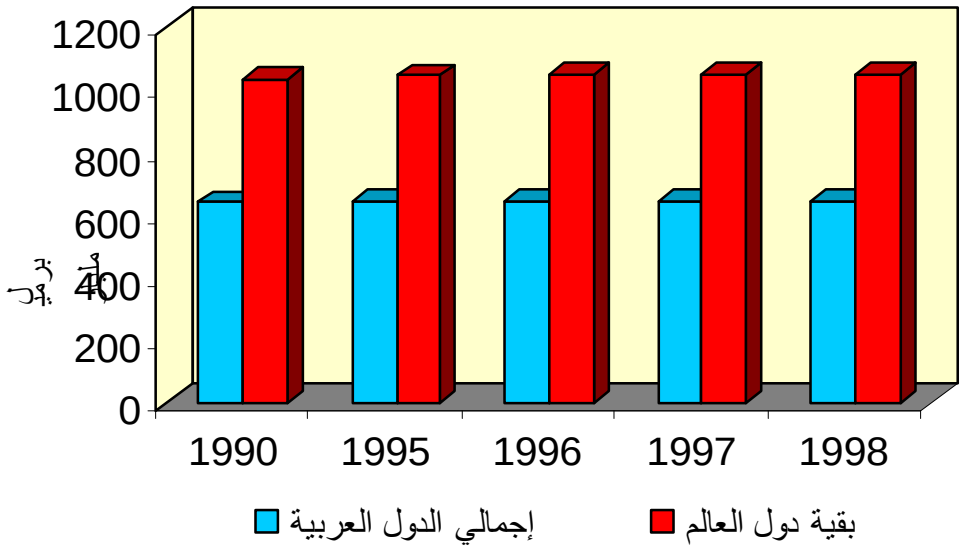
لفهم الطاقة يجب معرفة مصادرها ، وحدودها ، واستخداماتها . ولتكوين سياسة جيدة وفاعلة تجاه الطاقة يجب أن نعرف كمية مصادر الطاقة ومدى ديمومتها واستمراريتها . والإجابة عن مثل هذه الأسئلة ليست سهلة لأنها تعتمد على التقنيات المستقبلية لاستخراج هذه المصادر ، وأسعار الطاقة ، ونمو الاستهلاك .

إن تقدير كميات الفحم أسهل من تقدير كميات النفط والغاز وذلك لكون حقول النفط والغاز موجودة في مناطق متباعدة وعلى أعماق تتراوح من مئات الكيلومترات إلى عدة كيلومترات ، ولا يمكن معرفة مكانها إلا بطرق استكشاف مكلفة جداً . والجدول (1-2) والشكل (1-4) يبينان الاحتياطي النفطي العالمي واحتياطي دول المنطقة العربية على الترتيب ، إذ يتبين واضحاً أن احتياطي الدول العربية من النفط كان 643.6 مليار برميل في عام 1998 ، وهذا يمثل أكثر من 63% من الاحتياطي العالمي ، ومنه يمكن القول أن الدول العربية وخاصة دول الخليج العربي ستبقى المصدر الرئيسي لتمويل الطاقة في العالم .

جدول (1-2) احتياطيات النفط الخام في الدول العربية ودول العالم الأخرى (مليار برميل)

السنة	1990	1995	1996	1997	1998
الأوابك	631.7	633.8	633.6	634.2	634.0
الدول العربية الأخرى	8.6	9.4	9.5	9.4	9.6
مجموع الدول العربية	640.3	643.2	643.1	643.6	643.6
أمريكا الشمالية*	32.0	27.4	27.2	26.9	27.5
أمريكا اللاتينية	122.1	130.6	135.7	137.3	137.3
أوروبا الشرقية	58.9	59.2	59.1	59.1	59.1
أوروبا الغربية	14.4	15.6	18.4	18.1	18.7
الشرق الأوسط	673.5	678.2	677.2	677.7	674.9
إفريقيا	82.0	89.6	89.4	89.6	91.1
آسيا والشرق الأقصى	48.2	42.5	40.4	40.3	40.0
أوقيانوسيا	1.8	1.7	1.9	1.9	3.0
اجمالي العالم	**1032.9**	**1044.6**	**1049.3**	**1050.8**	**1051.6**

* لا تشمل المكسيك



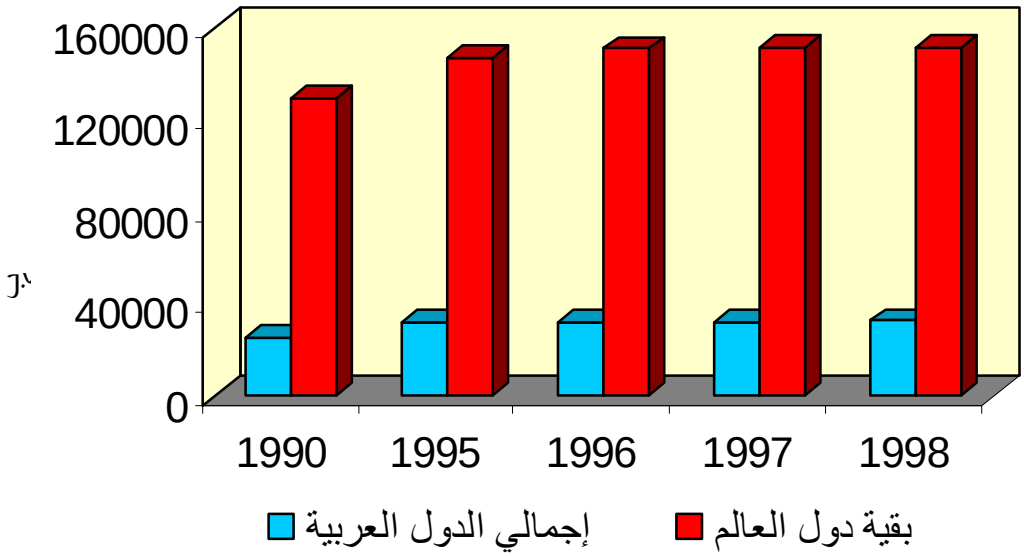
شكل (1-4): احتياطيات النفط الخام في الدول العربية وبقية مناطق العالم الأخرى

أما بالنسبة إلى الغاز الطبيعي فالوضع مختلف . ففي الوقت الحاضر بلغ احتياطي الدول العربية في عام 1998 ، وكما هو موضح بالجدول (1-3) والشكل (1-5) ، ما مقداره 32708 مليار متر مكعب ، وهو ما يعادل 22% من الاحتياطي العالمي .

جدول (1-3) احتياطيات الغاز الطبيعي في الدول العربية ودول العالم الأخرى (مليار متر مكعب)

السنة	1990	1995	1996	1997	1998
الأوابك	25399	30585	31121	31143	31329
الدول العربية الأخرى	481	1302	1381	1351	1379
مجموع الدول العربية	25880	31887	32502	32494	32708
أمريكا الشمالية*	7464	6605	6555	6589	6544
أمريكا اللاتينية	7159	7980	7909	8056	8002
أوروبا الشرقية	52466	58144	56933	56412	56697
أوروبا الغربية	5598	6317	6265	6935	6971
الشرق الأوسط	37862	45414	49497	49507	49515
إفريقيا	8580	10007	10218	10206	10335
آسيا والشرق الأقصى	8605	10190	10634	11149	10812
اوقيانوسيا	2524	3078	3323	3339	3339
إجمالي العالم	**130258**	**147735**	**151334**	**152193**	**152215**

* لا تشمل المكسيك



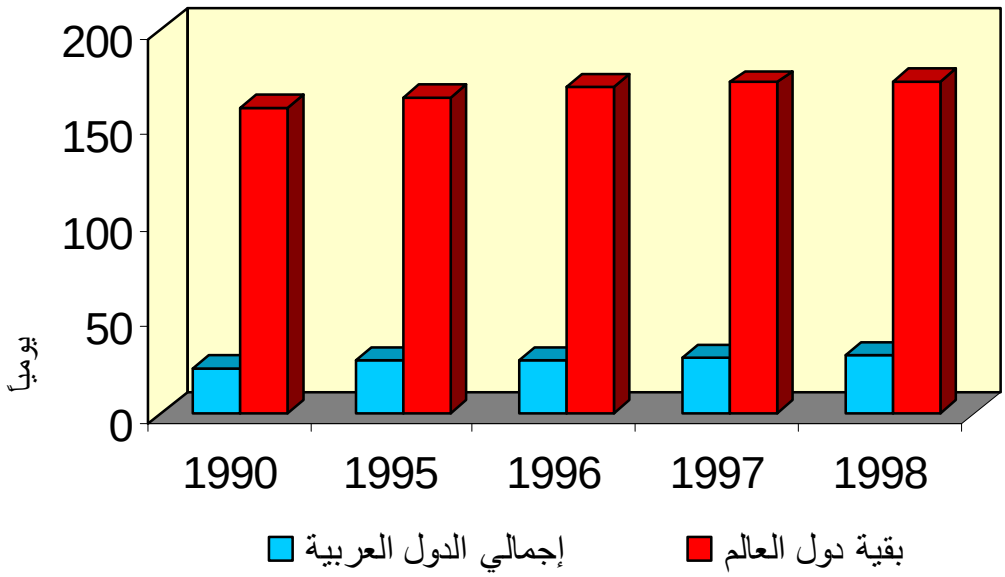
شكل (1-5): احتياطيات الغاز الطبيعي في الدول العربية وبقية مناطق العالم الأخرى

إن إنتاج الدول العربية من إنتاج الطاقة الكلي في عام 1998 ، وكما هو مبين بالجدول (1-4) والشكل (1-6) ، كان 30.6 مليون برميل مكافئ نفط يومياً ، وهو يمثل نسبة 17.6% من مجموع الإنتاج العالمي . وهذه النسبة ستزداد مع مرور الوقت ، وسيزداد الاعتماد العالمي على مصادر الطاقة العربية ، حسب ما هو متوقع ، عند النظر إلى كمية الاحتياطات الضخمة الموجودة في المنطقة العربية من هذه المصادر .

جدول (1-4) إنتاج الطاقة في الدول العربية والمناطق الأخرى
(مليون برميل مكافئ نفط يومياً)

السنة	1990	1995	1996	1997	1998
الأوابك	22.4	25.8	26.3	27.8	28.8
الدول العربية الأخرى	1.1	1.6	1.7	1.8	1.8
مجموع الدول العربية	23.6	27.5	28.0	29.6	30.6
أمريكا الشمالية*	41.5	43.2	44.1	44.5	44.8
أمريكا اللاتينية	6.8	8.6	9.2	9.8	10.0
أوروبا الشرقية	37.4	28.1	28.0	27.2	27.1
أوروبا الغربية	17.3	18.8	19.7	19.7	19.4
الشرق الأوسط	19.1	22.1	22.9	24.0	25.3
إفريقيا	9.8	10.8	11.3	11.8	11.7
آسيا والشرق الأقصى	24.6	29.8	31.6	31.5	31.1
أوقيانوسيا	3.2	3.7	3.8	4.1	4.2
إجمالي العالم	**159.7**	**165.1**	**170.6**	**172.6**	**173.7**

* لا تشمل المكسيك



شكل (1-6): إنتاج الطاقة في الدول العربية وبقية مناطق العالم

5-1 المشاكل الناتجة عن استخدامات مصادر الطاقة :

أ - ارتفاع حرارة مناخ الكرة الأرضية

معظم المشاكل الناتجة عن الاستخدام المتزايد لمصادر الطاقة التقليدية هي مشاكل بيئية وأهمها ارتفاع درجة حرارة المحيط الذي نعيش فيه . ويعتقد معظم العلماء أن درجة الحرارة ترتفع بمعدل 0.3 درجة مئوية في كل عقد وذلك نتيجة لزيادة تركيز بعض الغازات في الجو . ويزعم بعض الباحثين أن أكثر الغازات سبباً في رفع درجة الحرارة هو غاز ثاني أو كسيد الكربون (Co_2) الذي يتحرر نتيجة حرق الوقود التقليدي . إلاّ أن هناك نظريات حديثة تشير إلى أن الأشعة الكونية المرتبطة بدورة النشاط الشمسي هي أحد الأسباب الرئيسية لارتفاع مناخ الأرض ، وأن حرارته ستشهد انخفاضاً يليه ارتفاع ودواليك .

إن درجة حرارة المحيط تتحدد بواسطة عملية الموازنة بين الإشعاع القادم من الشمس والإشعاع المنبعث من الأرض . وبما أن الشمس هي أكثر حرارة من الأرض (درجة حرارة سطح الشمس تقدر بحوالي 6000 درجة مئوية) فإن الإشعاع المنبعث منها يكون بذبذبات عالية (موجات قصيرة) من الضوء المرئي . أما درجة حرارة سطح الأرض فتقدر بـ15 درجة مئوية في المتوسط ، وأن الإشعاع المنبعث يكون ذا ذبذبات قليلة (موجات طويلة) من

الأشعة تحت الحمراء . فالتعادل بين الإشعاع الداخل والخارج يتأثر بالامتصاص والانعكاس اللذين يحدثان في المحيط الخارجي . فمثلاً تعكس السحب التي تغطي المحيط جزءاً كبيراً من أشعة الشمس قبل أن تصل إلى سطح الأرض ، وبهذا تنخفض درجة حرارة سطح الأرض . كما أن هناك غازات لها القدرة على امتصاص الأشعة تحت الحمراء ومنها دون ذلك فعلى سبيل المثال جزيئات الأوكسجين (O_2) والنيتروجين (N_2) ، التي يتكون منها معظم الغلاف الجوي (إذ تتكون كل منها من ذرتين فقط) لا تمتص الموجات الطويلة ، ولكن معظم الجزيئات المعقدة كثاني أو كسيد الكربون (CO_2) والماء (H_2O) وغاز الميثان (CH_4) وكربونات الفلورين (CFCS)، ومواد كيميائية أخرى تحتوي على عدة ذرات كلها تمتص الأشعة تحت الحمراء . وبصورة عامة فإن الجزيئات الأكثر تعقيداً لها قابلية أكثر على الامتصاص من الجزيئات الأخرى غير المعقدة . وزيادة تركيز الغازات المعقدة في الجو تساعد على ارتفاع حرارة المحيط إذ تسمّى هذه الظاهرة بظاهرة البيت الزجاجي (Greenhouse Effect) أو الاحتباس الحراري لأنها تقوم بنفس عمل البيوت الزجاجية في حبس الحرارة داخل الحيز . والغازات المتسببة في رفع هذه الحرارة تسمى بغازات البيت الزجاجي أو غازات الصوبه أو الغازات المحتبسة .

وتوجد أنواع مختلفة من الوقود تنتج كميات متباينة من غاز ثاني أكسيد الكربون بالنسبة إلى وحدة الطاقة المتحررة . فالفحم عبارة عن كربون وحرقه ينتج ثاني أكسيد الكربون . أما عند حرق الغاز الطبيعي (الميثان) فإن الناتج هو بخار ماء وثاني أكسيد الكربون ، وهو يبث كمية أقل من ثاني أكسيد الكربون بالنسبة إلى وحدة الطاقة . أما النفط فإنه يقع في الوسط بين الفحم والغاز بالنسبة إلى انبعاث ثاني أكسيد الكربون لأنه يتكون من خليط من الهيدروكربونات ، ولهذا السبب يتم حالياً التحول إلى استخدام الغاز الطبيعي بدلاً من الفحم والنفط في محطات توليد الطاقة الكهربائية بالرغم من وفرة الفحم بكميات كبيرة . وكانت نسبة غاز ثاني أكسيد الكربون في المحيط الخارجي تساوي حوالي 280 جزءاً بالمليون قبل النهضة الصناعية وذلك عام 1800 ميلادية لكن وصلت الآن إلى 350 جزءاً بالمليون . ونصف

هذه الزيادة حدثت بعد عام 1960 ميلادية . وإذا استمر انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون بنفس الوتيرة فإن التركيز سيتضاعف في عام 2100 ميلادية. وتقدر زيادة معدل الانبعاث السنوي الحالي بمقدار 1.5 جزء بالمليون سنوياً. والغاز الآخر الرئيسي من غازات البيت الزجاجي (أو ظاهرة الصوبة الحرارية) ، هو غاز الميثان (CH_4) الذي ينتج من احتراق الكتلة الحيوية والفحم أو من تسرب الغاز الطبيعي المصاحب للنفط إلى الجو، ويتحرر أيضاً من فضلات الحيوانات ، ومن تحلل المواد العضوية في المستنقعات وحقول الرز . فالتركيز الحالي لغاز الميثان هو 1.7 جزء بالمليون ، وقد كان هذا التركيز حوالي 0.8 جزء بالمليون قبل النهضة الصناعية علماً بأن غاز الميثان له القدرة على احتباس الحرارة بعشرات المرات مقارنة بثاني أكسيد الكربون .

مما ورد أعلاه يتبين أن النشاطات البشرية لها تأثير كبير في زيادة تركيز غازات البيت الزجاجي في المحيط . وقد تمت دراسة التوقعات المستقبلية حول تأثير هذه الغازات على الظروف الجوية في المستقبل . وتوصل بعض العلماء بأنه في عام 2050 ميلادية يمكن أن يصل تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون أو الغازات الأخرى الموجودة إلى ضعف الكمية الحالية وذلك سيسبب زيادة درجة الحرارة ما بين 1.5 إلى 4.5 درجة مئوية . ومن المحتمل أيضاً أن تزداد الأمطار ، ويقل الثلج في البحار ، ويقل سقوط الثلوج الموسمية أيضاً . وسيكون لهذا تأثير على المناطق الزراعية في العالم لأن ذلك سيزيد من مخاطر الجفاف الذي يعتبر أكبر المشاكل التي تواجه الزراعة حالياً . وسيكون هنالك أيضاً ارتفاع في مستوى ماء البحر الذي سيؤدي إلى غمر مئات الآلاف من الكليومترات المربعة في المناطق الساحلية المنخفضة .

ب - الأمطار الحِمضيّة

من المخاطر الجانبية لحرق الوقود هو تساقط الأمطار الحمضية . فبعض الغازات التي تتحرر عند احتراق الوقود ، وبالأخص ثاني أكسيد الكبريت وأكسيد النيتروجين ، تتحد مع الماء في الجو مكونة حامض الكبريتيك

وحامض النتريك . ونتيجة لهذا فإن أي مطر يتساقط على منطقة ما ستكون حامضاً ويسبب ذلك تلفاً للنباتات وتعطيلاً لنمو الغابات ، وتفتيت بعض أجزاء الأبنية وصدأ للمعادن .

ومعظم غاز ثاني أكسيد الكبريت ينبعث من المحطات الكهربائية التي تستخدم الفحم وقوداً . وتوجد عدة تقنيات يمكن استخدامها في هذه المحطات لتقليل انبعاث ثاني أكسيد الكبريت . والطريقة الشائعة الاستخدام هي امرار الغازات الخارجة خلال خليط من كاربونات الكالسيوم والماء التي تمتص الكبريت لإنتاج كبريتات الكالسيوم أو ما يسمى بالجبس . وهذه الطريقة لها مساوئ جانبية منها تقليل كفاءة إنتاج الطاقة الكهربائية ، وزيادة انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون ، وزيادة كلفة الإنتاج. وهنالك طريقة أخرى هي بدفع الهواء خلال غرفة حرق الفحم وبوجود بعض الأحجار الكلسية .

أما الغاز الآخر الذي يسبب الأمطار الحمضية فهو أكسيد النيتروجين (NO_x). وينتج هذا الغاز من عمليات الاحتراق ذات الدرجات الحرارية العالية وذلك نتيجة لوجود بعض المواد النيتروجينية في الوقود مثل الفحم والخشب أو تتكون جزئياً بواسطة أكسدة النيتروجين في الهواء . ويتحرر أكسيد النيتروجين بكميات كبيرة من مكائن شاحنات النقل والسيارات ومن محطات الطاقة الكهربائية .

جـ - تلوث البحار بواسطة النفط

إن محطات توليد الطاقة الكهربائية ، ومصافي النفط ، والمصانع الكبيرة يمكنها أن تكون أكثر الملوثات المنظورة ، وذلك بسبب روائحها المميزة. وليست كل الملوثات الضارة بالبيئة سببها حرق الوقود ، ولكن هنالك مسببات أخرى مثل نقل الوقود عبر البحار . إن معظم الطاقة المصدرة من الدول المنتجة تنقل بواسطة البحار والمحيطات إلى البلدان المستهلكة . وقد تطور أسلوب النقل وأصبحت الناقلات ذات سعة كبيرة جداً . وبقطع النظر عن الحوادث فإن هذه الناقلات تساهم بدرجة كبيرة في تلوث البحار إذ أنه عند عودتها إلى مكان التصدير، بعد تفريغ شحنتها ، تملأ بالماء لغرض

الموازنة ، وعند تفريغ الماء تخرج معه كمية من النفط المتبقي . وبالرغم من أن أساليب النقل في الوقت الحاضر أصبحت أكثر أماناً وضماناً فإنه عند حصول حادثة ما سيكون التأثير كبيراً . ففي الفترة ما بين 1970 و 1985 وقعت 186 حادثة تسرب في كل منها أكثر من 1300 طن من النفط . وفي عام 1989 تسرب من إحدى الناقلات 39000 طن من النفط وغطى مساحة 1600 ميل مربع في ولاية الآسكا الأمريكية .

د - الإشعاع والمخلفات النووية

كان من المتوقع أن تكون الطاقة النووية أحد المصادر الرئيسية في إنتاج الطاقة الكهربائية ولكن هذا لم يتم بسبب المعارضة الواسعة التي تواجه نصب هذه المحطات في مختلف أنحاء العالم . هذه المحطات تنتج حالياً 6% من الطاقة الكهربائية في العالم . وبعد حادثة تشرنوبل في الاتحاد السوفيتي السابق عام 1986 أصبح نصب مثل هذه المحطات محدوداً . ومن المشاكل المتعلقة بمحطات الطاقة النووية أن المواد المستخدمة في الانشطار النووي ذات إشعاع عالٍ جداً ، وقسم منها يبقى مشعاً إشعاعاً نووياً لعشرات الآلاف من السنين . كما أن طرق التخلص من النفايات النووية غير مضمونة ، وبالإضافة إلى ذلك فإن تفكيك المحطات التي انتهت أعمارها يسبب تسرب إشعاع نووي أيضاً . وأن أخذ أقصى درجات الحيطة والحذر في عدم تسرب الإشعاع أدى إلى استخدام أجهزة معقدة وعالية الكلفة ، ولهذا السبب فإن كلفة إنشاء هذه المحطات أعلى من كلفة محطات توليد الطاقة بواسطة الوقود ، وإن كلفة إنتاج الطاقة الكهربائية في هذه المحطات أعلى من المحطات الاعتيادية .

6-1 استمرارية توفر مصادر الطاقة :

إن وضع الطاقة في الوقت الحاضر يختلف عما كان عليه في العقدين الماضيين . فانخفاض الأسعار ، وتوفر كميات كبيرة من الوقود في الأسواق أدّيا إلى الإسراف في استهلاك الطاقة ، وعدم الالتزام بترشيده ، وعدم البحث عن مصادر جديدة .

إن كمية الطاقة الموجودة في باطن الأرض محدودة ، ومن غير الممكن بقاؤها لفترة طويلة جداً . ولكن تقدير فترة بقائها ليس سهل أيضاً . فاحتياطي العالم من النفط ارتفع من 540 بليون برميل عام 1969 ميلادية إلى أكثر من 1000 بليون برميل في الوقت الحاضر . وهذا الارتفاع في الاحتياطي لا يعني أنه غير محدود . فلقد تم مسح مكامن الأرض بصورة مفصلة من قِبل شركات النفط واكتشفت الحقول السهلة والحقول ذات تكلفة الإنتاج القليلة . وهنالك حقول صعبة تحتاج إلى حفر عميق أو ذات طبيعة استخراج صعبة جداً وتحتاج إلى مواد وجهود كبيرة ، وقسم منها يحتاج إلى طاقة وأحياناً تكون الطاقة اللازمة للاستخراج مساوية أو أكثر من الطاقة المستخرجة. وفي هذه الحالات سيكون استخراج الطاقة بدون فائـدة .

من الأرقام المفيدة والمهمة جداً في هذا المجال نسبة الاحتياطي إلى المنتج . فإذا تم تقسيم الاحتياطي المضمون في نهاية كل سنة على الإنتاج في تلك السنة فإن الناتج سيمثل طول عمر الاحتياطي . وهذا الرقم سيدلّ على توفر الطاقة في منطقة معينة من العالم . فمثلاً لقد كان هذا الرقم في عام 1992 هو 10 أعوام لنفط غربي أوربا ، و 25 عاماً لأمريكا الشمالية بينما كان أكثر من 100 عام لمنطقة الشرق الأوسط . ويمتلك الشرق الأوسط أكثر من 60% من احتياطي العالم من النفط ، وتمتلك المملكة العربية السعودية وحدها أكثر من 25% من الاحتياطي .

ويختلف الأمر بالنسبة إلى الغاز الطبيعي . فإن الاحتياطي الأكبر يقع في دول الاتحاد السوفيتي السابق إذ تحتوي هذه المنطقة على أكثر من 40% من احتياطي العالم ، وتحتوي دول الأوبك على حوالي 40% أيضاً من الغاز. أما الباقي فإنه يتوزع على أنحاء مختلفة من العالم . وإن نسبة الاحتياطي إلى المنتج في الوقت الراهن بالنسبة إلى الغاز الطبيعي هي حوالي 65 عاماً .

أما بالنسبة إلى الفحم الحجري فإن الاحتياطي العالمي كبير وموزع على مناطق واسعة ومختلفة . ويبلغ مقدار الاحتياطي إلى المنتج بالنسبة إلى الفحم أكثر من 200 عام ، ولكن كما نعلم فإن للفحم مساوئ كثيرة ، حتى وإن قورنت بالنفط والغاز . وأهم هذه المساوئ هو انبعاث ثاني أكسيد

الكربون وأكسيد الكبريت وأكسيد النيتروجين . وبالرغم من إمكانية تحويل الفحم إلى سائل لغرض تقليل مشاكله البيئية فإن سعر كلفة التحويل سيمثل عقبة لكونه عالياً .

مما تقدم أعلاه يتبين أنه إذا كان هدفنا هو تقليل كمية الوقود التقليدي الذي يتم حرقه لغرض إطالة عمره ولتقليل المخاطر البيئية التي يسببها فإنه يتوجب علينا البحث عن مصادر جديدة غير ناضبة وصديقة للبيئة ، وتطوير كفاءتها ، وتقليل أسعار منظوماتها . وهذه المصادر هي مصادر الطاقة المتجددة التي سنتحدث عنها بالتفصيل في الفصول اللاحقة .

أسئلة تقويمية

1. ما هي الطاقة ؟ وما هي وحداتها ؟
2. نص القانون الأول لديناميك الحرارة على أن الطاقة محفوظة . ما هو المقصود بذلك ؟ أذكر أمثلة ؟
3. ما هي العلاقة بين المادة والطاقة ؟
4. ما هي أشكال الطاقة ؟ وكيف يتم تحويلها من شكل إلى آخر ؟
5. ما المقصود بكفاءة تحويل الطاقة ؟ وما هي حدود كفاءة الطاقة ؟
6. ما هي أنواع الطاقة المستخدمة حالياً ؟ وما هي نسب تواجدها وإنتاجها واستهلاكها ؟
7. ما هي أسباب الاستهلاك المنخفض لمصادر الطاقة في الوطن العربي مع كونه يمتلك على أكثر من 60% من احتياطي الطاقة في العالم ؟
8. ما هي الملوثات الناتجة عن استخدام الوقود الأحفوري ؟ وكيف يمكن تقليل انبعاثها ؟
9. ما هي المشاكل الناجمة عن استخدام الطاقة من النواحي المناخية والصحية ؟
10. ما هي الأساليب التي يمكن اتباعها لضمان توفر استمرارية مصادر الطاقة ؟

الفصل الثاني

الطاقة الشمسية الحرارية

2-1 مقدمة عن مصادر الطاقة

2-2 الطاقة الشمسية

2-3 طبيعة الإشعاع الشمسي

2-4 الإشعاع الشمسي المباشر والمنتشر

2-5 قياس الإشعاع الشمسي

2-6 زاوية الميل والاتجاه

2-7 طـرق انتقـــال الحـــــرارة
- انتقال الحرارة بالتوصيل
- انتقال الحرارة بالحمـــل
- انتقال الحرارة بالإشعاع

2-8 استخدامات الطاقة الشمسية في التكييف وتسخين المياه
- تسخيـــن الميـــــــاه
- المجمعات الشمسيـــــة
- التدفئة بالطاقة الشمسيــة
- منظومات التدفئة الفعّالـة
- منظومات التدفئة السلبية
- التبريد بالطاقـة الشمسية
- منظومات التبريد الفعالـة
- منظومات التبريد السلبية

2-9 توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية الحرارية

2-10 استخدام البرك الشمسية في توليد الطاقة الكهربائية

2-11 استخدام الطاقة الشمسية في تحلية المياه

2-12 استخدام الطاقة الشمسية في الزراعة
- بيوت الزراعة المحمية
- تجفيف المحاصيل الزراعية

2-13 استخدام الطاقة الشمسية في الطبخ

1-2 مقدمة عن مصادر الطاقة

إنّ مصادر الطاقة المتجددة هي المصادر التي تتولد بصورة طبيعية وبصفة مستديمة أي تتجدد كل يوم مادامت الشمس باقية. وهذا النوع من الطاقة مفيد للإنسان. ويمكن الاستفادة من هذه المصادر بدون التأثير على البيئة . والمصدر الرئيسي لهذه الطاقات هو الشمس، والجاذبية ، ودوران الأرض . فمعظم مصادر الطاقات المتجددة كالطاقة الشمسية ، وطاقة الرياح ، وطاقة الكتلة الحيوية ، وطاقة الأمواج ، وطاقة حرارة المحيطات منبعها ومصدرها الأساسي هو الإشعاع الشمسي . أما طاقة المد والجزر فإنها تتولد نتيجة جذب الشمس والقمر للأرض . وأما طاقة الحرارة الجوفية فإنها تتولد من حرارة باطن الأرض . ويصنف العلماء تلك الطاقة الآتية من الفضلات ضمن الطاقات المتجددة . وسنتطرق فيما يلي وبالتفصيل إلى جميع مصادر الطاقة المتجددة ، والإمكانيات التقنية المتاحة لاستغلالها، وجدواها الاقتصادية .

2-2 الطاقة الشمسية :

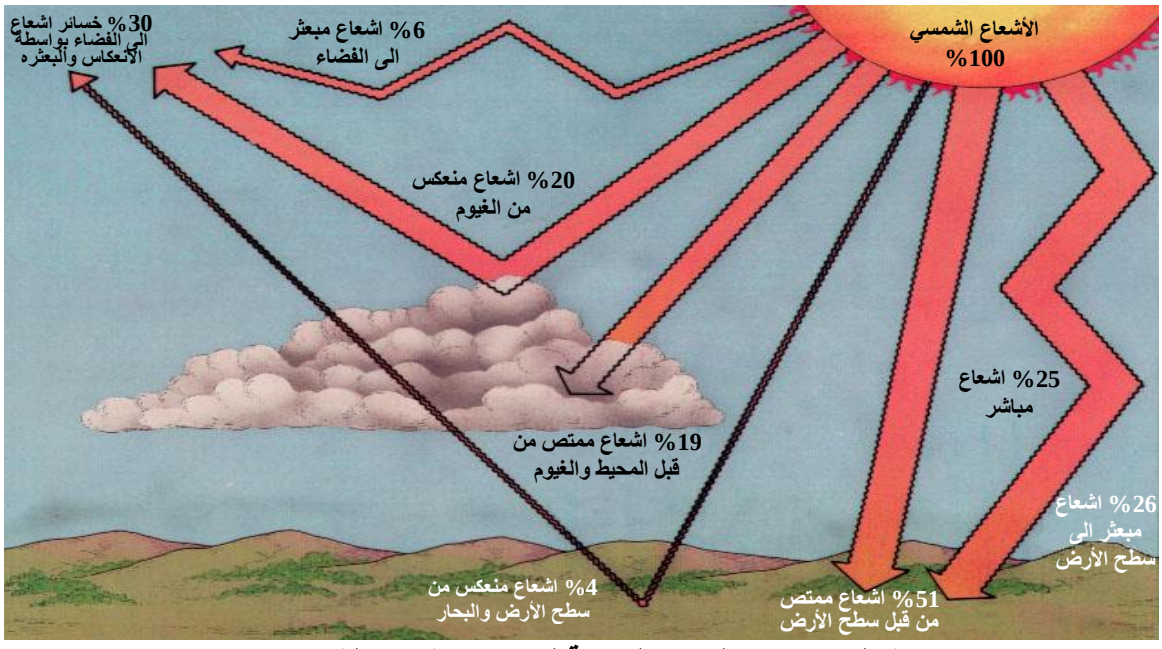
تعتبر الطاقة الواردة إلينا من الشمس من أهم أنواع الطاقات التي يمكن للإنسان استغلالها ، فهي طاقة دائمة لا ينتج عن استخدامها غازات أو نواتج ثانوية ضارة بالبيئة مقارنة بمصادر أخرى ، ولا تترك مخلفات على درجة من الخطورة مثل النفايات المشعة التي تتخلف عن استعمال الطاقة النووية .

وفكرة استخدام الطاقة الشمسية في التسخين أو في تحريك الآلات ليست جديدة على الإطلاق. ويحدثنا التاريخ بأن أرخميدس الذي عاش في القرن الثالث قبل الميلاد قد استخدم أشعة الشمس في إحراق بعض سفن العدو في إحدى المعارك الحربية ، ومن المعتقد أنه استخدم بعض المرايا لتركيز أشعة الشمس على صواري هذه السفن .

لقد أصبحت للطاقة الشمسية مكانتها اللائقة بين المصادر الأخرى الطاقة في الوقت الحاضر، واعتمدت ميزانيات كبيرة في أغلب الدول لاستغلال هذه الطاقة، كما تعددت الطرق المقترحة للاستفادة منها مثل استخدام المرايا العاكسة لتجميع ضوء الشمس أو ابتكار طرق لتجميع حرارة الشمس وامتصاصها أو تحويل ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية بواسطة الخلايا الشمسية وغيرها من الاستخدامات .

3-2 طبيعة الإشعاع الشمسي :

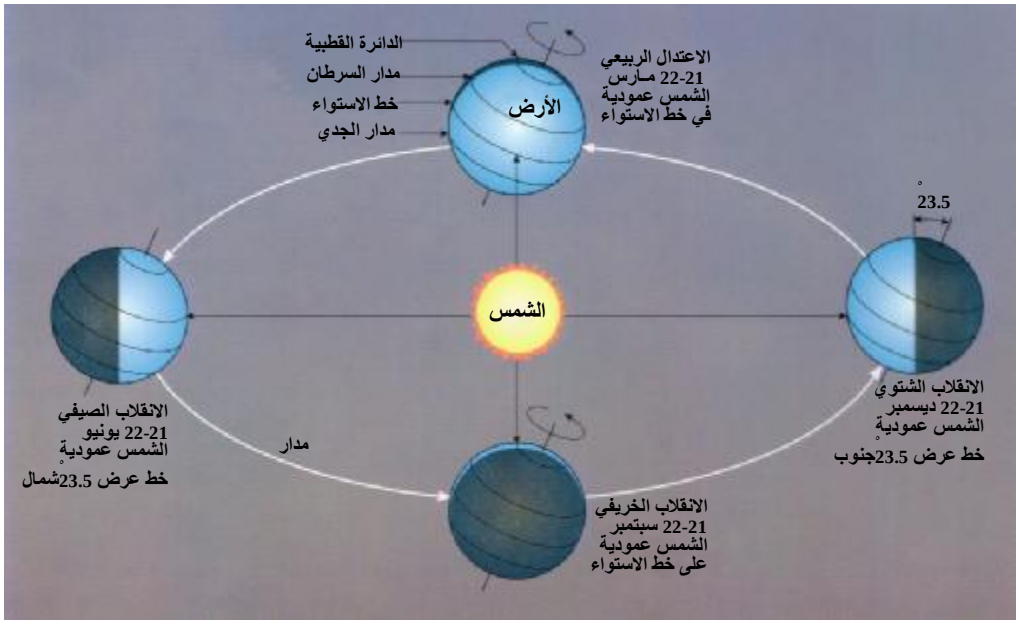
الشمس هي مصدر الحياة على كوكب الأرض ، وهي عبارة عن كرة غازية يبلغ قطرها 696 مليون متر، وكتلتها حوالي $2x10^{29}$ طن، ودرجة حرارة سطحها حوالي 6000 درجة مئوية. ومكوناتها الأساسية هي غاز الهيدروجين (حوالي75 %) وغاز الهليوم (حوالي 25%) ، بالإضافة إلى كميات ضئيلة من بعض العناصر الأخرى كالحديد والسليكون والنيون والكربون . وتتولد الطاقة الشمسية نتيجة التحول المستمر لكل أربع ذرات من الهيدروجين إلى ذرة واحدة من الهليوم في تفاعل اندماجي نووي . ولما كانت كتلة ذرة الهليوم الناتجة من التفاعل أقل من مجموع كتل ذرات الهيدروجين الداخلة فيه فإن فرق الكتلة هذا يتحول إلى ضوء وحرارة تنتقل على هيئة أشعة يبلغ معدل انبعاثها 3.8×10^{23} كيلو واط . وتشع هذه الكمية في جميع الاتجاهات ، ولا يصل منها إلاّ مقدار ضئيل يتناسب مع مساحة الأرض ومع المسافة بين الأرض والشمس . وترسل الشمس أشعتها على شكل تيار من الجسيمات تدعى "الفوتونات". وتنطلق الأشعة الشمسية على شكل حزم موجيّة متوازية مختلفة الأطوال . ومن هذه الأشعة المرئي وغير المرئي. فالإشعاع المرئي له أطوال موجية بين 0.35 و 0.75 ميكرومتر ، والأشعة تحت الحمراء (غير مرئية) من 0.75 إلى 100 ميكرومتر، والأشعة الراديوية (غير مرئية) أكثر من 100 ميكرومتر . أما الأشعة التي يقلّ طولها الموجي عن طول أمواج الضوء المرئي (ذات طاقة أكبر) فتسمى بالأشعة فوق البنفسجية ، والأشعة السينية ، وأشعة غاما ، والأشعة الكونية . وعلى الرغم من أن الإشعاع الشمسي الساقط على الغلاف الجوي يتكون من مدى عريض من الحزم الموجية إلاّ أن ما يقارب 98 % منه يتكون من ثلاثة أنواع من الأشعة هي : الأشعة البنفسجية (8%) ، والأشعة المرئية (47%) والأشعة تحت الحمراء (43%) . لذا فإن أعلى شدة للإشعاع الشمسي تقع في مدى الضوء المرئي . وتبلغ قيمة معدل الإشعاع الشمسي الساقط على المحيط الخارجي للأرض 1367 واط لكل متر مربع وهو ما يُعرف **"بالثابت الشمسي"** ، ويتعرض أثناء مساره خلال الغلاف الجوي إلى سطح الأرض إلى حالات من الانتشار والامتصاص من قِبل مكونات الغلاف الغازي المحيط بالكرة الأرضية أذ تعمل هذه المكونات ، ومنها الغازات المختلفة وذرات الغبار والماء العالقة بالهواء ، على امتصاص وانكسار جزء من الأشعة الشمسية الواصلة إلى سطح الأرض. ويبين الشكل (2-1) النسب المئوية لتوزيع الإشعاع الشمسي .



شكل (2-1): النسب المئوية لتوزيع الإشعاع الشمسي

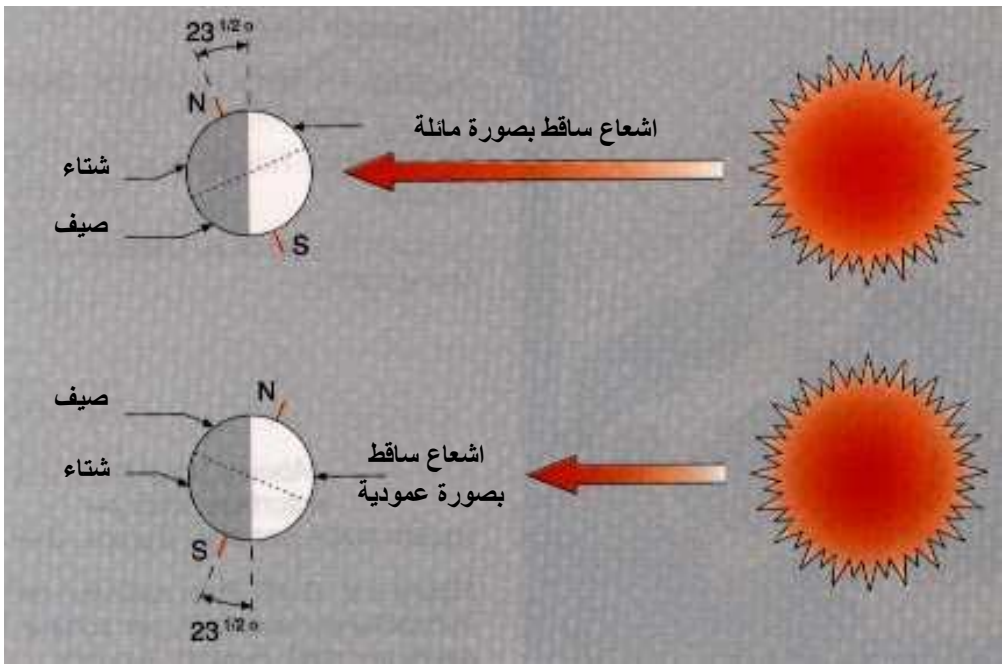
إن الوطن العربي يستلم – بفضل الله تعالى - أعلى قيم من الإشعاع الشمسي في العالم، أذ تسطع الشمس خلال العام قرابة 3300 ساعة في جميع أنحائه وبهذا تكون الدول العربية أكثر دول العالم تأهيلاً لاستغلال هذا المصدر الدائم النظيف الخصب .

إن الأرض تكمل دورة كاملة حول الشمس في 365 يوماً (سنة واحدة)، وينتج عن ذلك الفصول الأربعة (الشتاء ، والربيع ، والصيف ، والخريف). وخلال دورانها حول الشمس فإنها تدور حول محورها الذي يميل على محور مدارها حول الشمس بزاوية مقدارها 23^0 درجة كلّ 45 دقيقة لتكمل الدورة في 24 ساعة تقريباً، وينتج عنها تعاقب الليل والنهار. ويبين الشكل (2-2) العلاقة بين الشمس والأرض .



شكل (2-2): العلاقة بين الشمس والأرض

قد يتبادر إلى الذهن السؤال التالي: إذا كان الإشعاع الشمسي المنبعث ثابتاً فلماذا نستقبل إشعاعاً أكثر في الصيف ؟ والجواب عن ذلك هو أنه في شهر يونيو (حزيران) يكون القطب الشمالي للأرض مواجهاً للشمس ، وبهذا تنطلق الأشعة الشمسية إلى الجزء الشمالي من الكرة الأرضية بصورة عمودية . أما في شهر ديسمبر (كانون الأوّل) فإن القطب الشمالي ينحرف بعيداً عن الشمس ، وتسقط الأشعة الشمسية بصورة منحرفة وغير مباشرة باعثة أقل كثافة من الطاقة (تعرف كثافة الطاقة بأنها مقدار الكيلوواط – ساعة من الطاقة الساقطة على المتر المربع من سطح الأرض في زمن معين) ، ويمكن ملاحظة ذلك في الشكل (3-2). وهنالك عامل آخر يجب ملاحظته وهو أنه كلّما قل ارتفاع الشمس في السماء – بالنسبة إلى الراصد على الأرض – فإن الإشعاع يمر بطريق أطول خلال محيط الأرض ، وبذلك يزداد احتمال تبعثر الإشعاع ورجوعه إلى الفضاء مرةً أخرى . وعندما تكون الشمس بزاوية مقدارها 60 درجة من الوضع العمودي (سمت الرأس) فإن كثافة الطاقة التي تصل إلى الأرض تقل إلى الربع عن قيمتها عندما تكون عمودية .



شكل (2-3): ميلان محور الأرض وحلول فصلي الصيف والشتاء

4-2 الإشعاع الشمسي المباشر والمنتشر (Direct & Diffuse Solar Radiation)

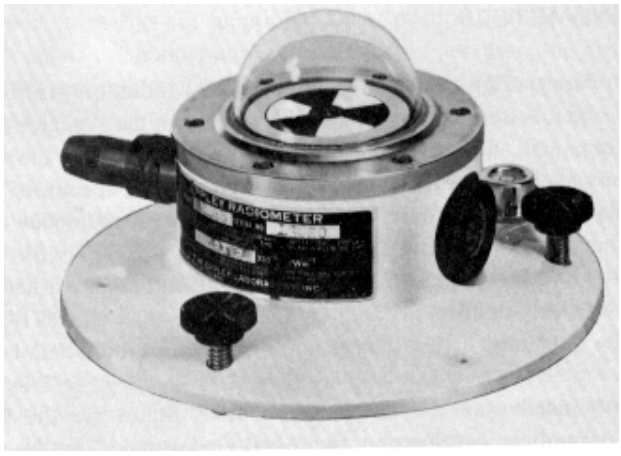
عندما تصل الأشعة الشمسية إلى الغلاف الجوي للأرض فإن قسماً من الإشعاع ينتشر، وكمية الإشعاع الشمسي المنتشر (diffuse radiation) تعتمد على كمية الغيوم الموجودة في الجو ، ويصل قسم منه إلى الأرض في كل الاتجاهات، وبدونه تبدو السماء سوداء

اللون . وعند شروق الشمس فإن قسماً من الإشعاع الضوئي يصل إلى الأرض من السماء على شكل خطوط مستقيمة ويسمى بالإشعاع المباشر (direct radiation) ، وهو الذي يرمي ظلاً على الأجسام . ومجموع الإشعاعين المباشر والمنتشر يسمّى الإشعاع الشمسي الكلي (Total Solar Radiation) . ففي الأيام الصافية يمكن أن تصل كثافة طاقة الإشعاع الشمسي إلى كيلوواط واحد على المتر المربع ($1kw \bullet m^{-2}$) . وتستقبل معظم الدول العربية كثافة إشعاع تقارب هذه القيمة لكونها تتمتع بجو صافٍ خالٍ من الغيوم معظم أيام السنة .

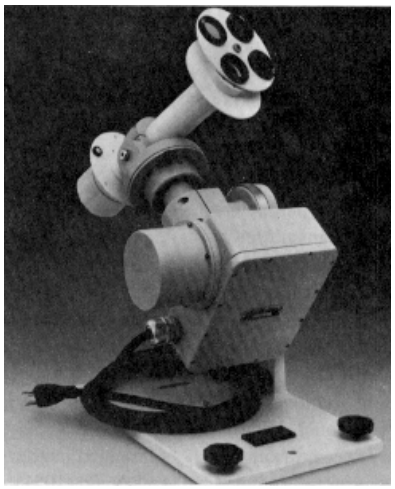
كلا النوعين من الإشعاع (المباشر والمنتشر) يمكن الاستفادة منه في التطبيقات الحرارية ، ولكن الإشعاع المباشر هو الوحيد الذي يمكن الاستفادة منه في المنظومات التي تعمل بدرجات حرارية عالية والمستخدمة حالياً في توليد الطاقة الكهربائية .

5-2 قياس الإشعاع الشمسي

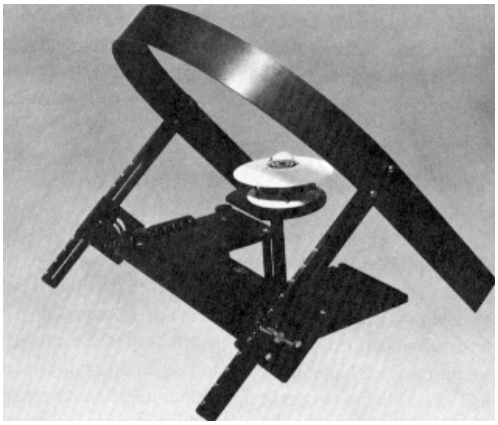
يقاس الإشعاع الشمسي الكلي بجهاز يدعى البايرونوميتر (Pyranometer) وهو عبارة عن جهاز يقيس الإشعاع من القبة السماوية (180 درجة) حيث يوضع على سطح مستوٍ ومرتفع عن سطح الأرض. ويقاس الإشعاع المباشر (العمودي) بجهاز يدعى البايروهليوميتر (Pyrhliometer) ، وهو جهاز شبيه بالمنظار الفلكي (التلسكوب) ، يوضع على جهاز يتبع الشمس في حركتها خلال اليوم . أما الإشعاع المنتشر فيقاس بنفس جهاز قياس الإشعاع الكلي بعد حجز الإشعاع المباشر عن عنصر القياس وذلك بواسطة تركيب شريط مقسم على شكل قوس لتوليد الظل على جهاز البايرونوميتر. وتوضح الأشكال (4a,4b,4c-2) هذه الأجهزة .



شكل (4a-2): جهاز قياس شده الإشعاع المباشر



شكل (4b-2): جهاز قياس شده الإشعاع الكلي



شكل (2-4c): جهاز قياس شده الإشعاع المنتشر

تساؤل :

إذا كان الإشعاع الشمسي المنبعث من سطح الشمس ثابتاً فلماذا يوجد فرق مقداره نسبـــة 2 :1 بين الإشعاع الكلي الواصل إلى المنطقة العربية والإشعاع الكلي الواصل إلى شمال أوربا ؟

هناك ثلاثة أسباب لذلك :

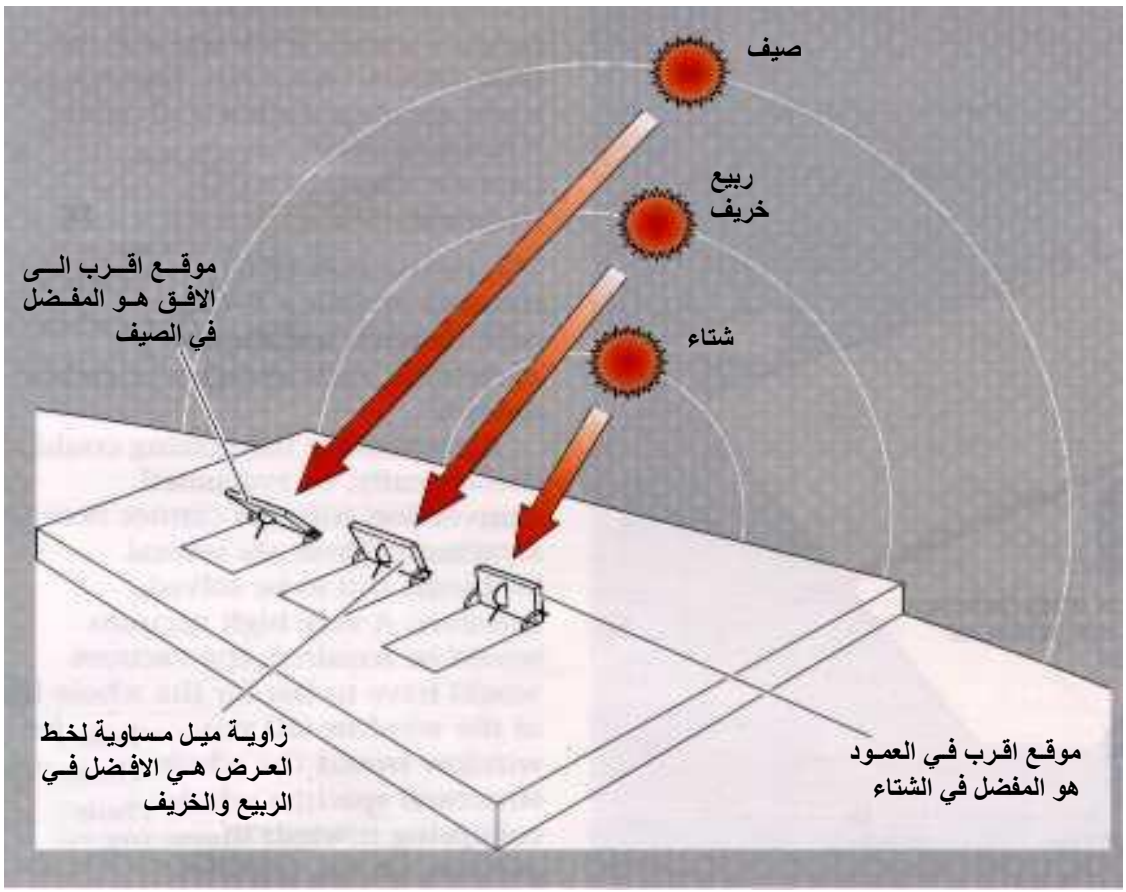
1 - منطقة شمال أوربا تستلم إشعاعاً شمسيّاً بزاوية منحرفة ، وموقع الشمس يكون أوطأ في السماء (الشمس تكون أكثر بعداً عن المنطقة) مقارنة بموقعها في المنطقة العربية (الشمس تكون أقرب إلى للمنطقة العربية مقارنة بالأوروبية) وبذلك يتوزع الإشعاع الشمسي على رقعة كبيرة .

2 - عندما تكون الشمس على ارتفاع منخفض فإن ذلك يعني أن الشعاع يقطع مسافة طويلة وبذلك يزداد تبعثره .

3 - السماء في شمال أوربا تكون ملبدة بالغيوم معظم الأوقات ، وبذلك يتم انعكاس كمية كبيرة من الإشعاع الشمسي إلى الفضاء ولا يصل إلى أراضي هذه المنطقة إلاّ القليل .

6-2 زاوية الميل والاتجاه

لجمع أكبر كمية من الإشعاع الشمسي يجب أن يتم توجيه السطح الشمسي باتجاه الشمس. وتعتمد الدرجة التي يميل فيها السطح الشمسي عن الأفق على خط العرض للمنطقة والوقت خلال أيام السنة . فإذا تم توجيه السطح الشمسي بزاوية مساوية لخط العرض فإن الإشعاع الشمسي يكون عمودياً وسط النهار (عند الظهيرة) خلال شهري مارس وسبتمبر (عند الاعتدال الربيعي والاعتدال الخريفي على التوالي) . ولجمع أكبر إشعاع ممكن خلال فصل الصيف يجب أن يتم توجيه السطح الشمسي باتجاه المستوى الأفقي بينما يتم توجيهه باتجاه المستوى العمودي خلال فصل الشتاء كما هو موضح بالشكل (2-5) . عادة يتم نصب السطوح بزاوية مقدارها خط عرض الموقع مطروحاً منها عشرة (خط العرض– 10^0) وذلك خلال فصل الصيف. أما خلال فصل الشتاء فإن السطوح تنصب لتكون زاوية ميلانها مساويةً لخط الأرض مضافاً إليها عشرة (خط العرض +10^0). أما اتجاه الأسطح الشمسية فيجب أن يكون باتجاه الجنوب دائماً.



شكل (2-5): اختيار الميل الأفضل للفصول المختلفة

مثـــال :

تصل الطاقة الشمسية على سطح الأرض بمعدل 1.4 كيلوواط على المتر المربع لسطح عمودي على اتجاه الشمس . إذا كان معدل نصف قطر مدار الأرض $1.5 \text{ X } 10^{11}$ متر ونصف قطر الشمس هو $7 \text{ X } 10^{8}$ متر . احسب :

1 - درجة حرارة سطح الشمس مع اعتبار الشمس تشع كجسم أسود .

2 - مقدار الكتلة التي تتسرب من الشمس في الثانية الواحدة .

الحـــل :

الطاقة التي تشعها الشمس تعادل الطاقة الواصلة من كرةٍ نصف قطرها يساوي نصف قطر مدار الأرض :

$$P = A \text{ X } P/A$$

$$= 4 \text{ X } \pi \text{ X } r^2 \text{ X } P/A$$

$$= 4 \text{ X } \pi \text{ X } (1.5 \text{ X } 10^{11})^2 \text{ m}^2 \text{ X } 1.4 \text{ X } 10^3 \frac{\text{واط}}{\text{م}^2}$$

$$= 3.96 \text{ X } 10^{26} \text{ واط}$$

الإشعاع الشمسي المنبعث من الشمس يعادل الطاقة المشعة على مساحة سطح الشمس :

$$R = \frac{\text{الطاقـــة المنبعثـــة}}{\text{مساحة سطح الشمس}} = \frac{3.96 \text{ X } 10^{26}}{(7 \text{X} 10^{8}) \text{X} \pi \text{X} 4} = 6.43 \text{ X } 10^{7} \frac{\text{واط}}{\text{م}^2}$$

ولكن $R = \epsilon \sigma T^4$ (من معادلة ستيفان – بولتزمن)

σ = معامل ستيفان بولتزمن ويساوي $5.67 \text{ X } 10^{-8} \frac{\text{واط}}{\text{م}^2 . \text{k}^4}$

$\epsilon = 1$ لجسم أسود

وعليه $T = \left(\frac{R}{\epsilon \sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$

$$= \left(\frac{6.43 \text{ X } 10^{7}}{(1)(5.67 \text{ X } 10^{-8})} \right)^{\frac{1}{4}} \text{ K}^{\circ}$$

$= 5.8 \text{ X } 10^3$ كلفن = 5800 درجة كلفن درجة حرارة سطح الشمس

لحساب مقدار الكتلة التي تتسرب من الشمس ويمكن استخدام علاقة انشتاين كما يلي :

الكتلة التي تخسرها الشمس = $\frac{\text{الطاقة المنبعثة من الشمس}}{\text{مربع سرعة الضوء}}$

$$= \frac{3.96 \times 10^{76} \text{ جول/ثانية}}{(3 \times 10^{8} \text{ م/ثانية})^2}$$

$$= 4.4 \times 10^{9} \text{ كغ/ثانية}$$

وبما أن كتلة الشمس تعادل 2×10^{29}كغ، فإنّ الكتلة التي تخسرها الشمس قليلة جداً ولا يوجد خطر من نقصان هذه المادة على المدى المنظور .

7-2 طرق انتقال الحرارة :

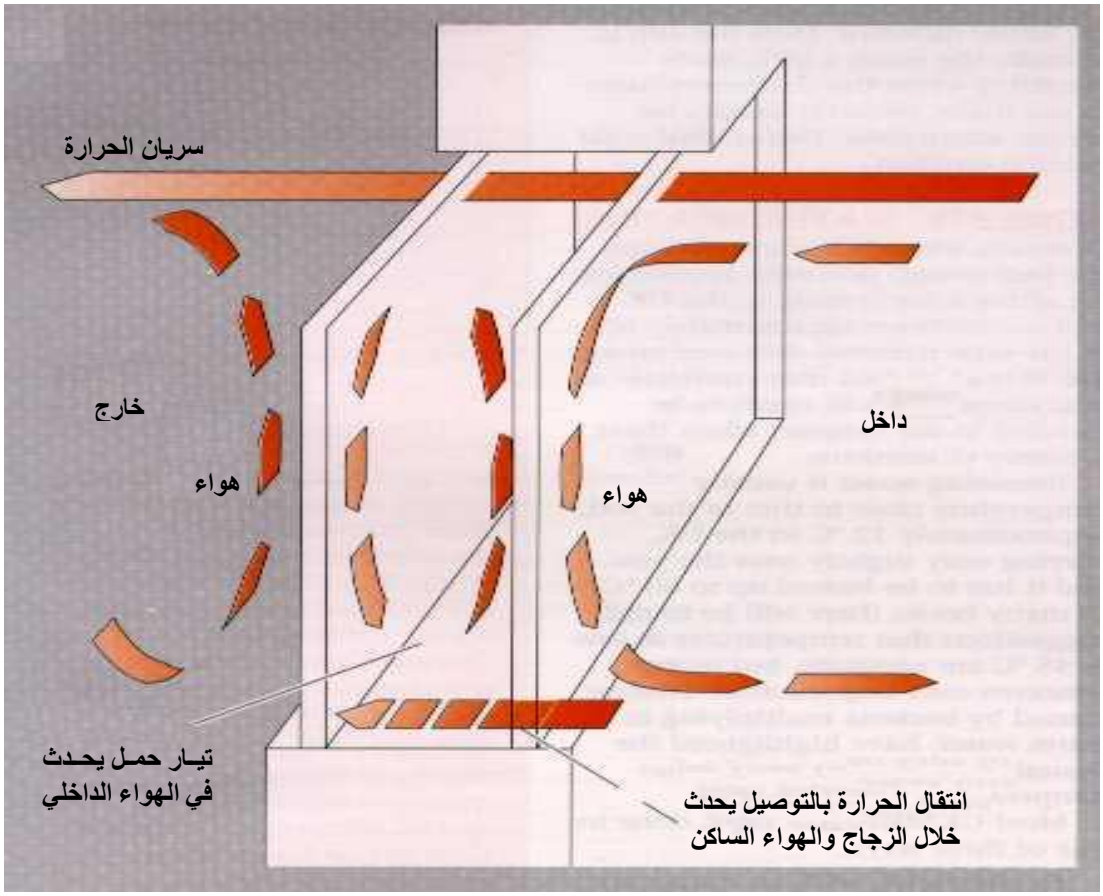
تنتقل الحرارة بواسطة ثلاث طرق هي : التوصيل ، والحمل ، والإشعاع . وسيتم التطرق بشكل مختصر ومبسط إلى هذه الطرق .

انتقال الحرارة بالتوصيل

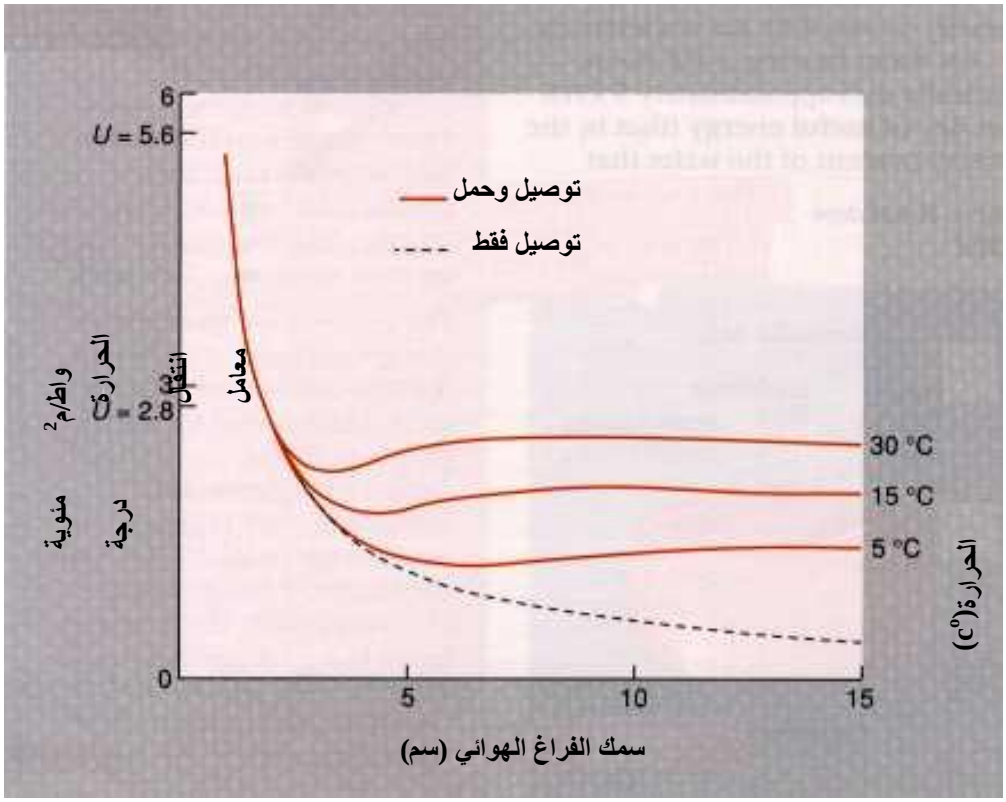
عند امتصاص الإشعاع الشمسي من قِبل جسم معتم فإن الطاقة تتوزع خلاله بواسطة التوصيل بين جزيئاته . ويتناسب الانتقال الحراري بين الجزيئات مع معامل التوصيل الحراري للمادة وفرق درجة الحرارة بين أطرافه . فالمعادن عامة لها قابلية توصيل عالية، لذا فإن لها القدرة على نقل كمية حرارة عالية حتى عند فرق درجات حرارية قليلة . أما العوازل فإنها تحتاج إلى فرق درجات حرارية عالية لنقل كمية قليلة من الحرارة . ويعتبر الهواء من المواد العازلة الجيدة ، ولهذا فإن معظم العوازل الجيدة تحتوي على طبقة من الهواء محصورة بين طبقتين من مادة .

انتقال الحرارة بواسطة الحمل

تنتقل الحرارة بين الموائع (غاز أو سائل) بواسطة عملية الحمل . وتنتقل الطاقة إلى جزيئات المائع الذي ينتقل من مكان إلى آخر حاملاً معه الطاقة . ونتيجة تسخين المائع فإنّه يتمدد مولداً تياراً يُعرف بالحمل الطبيعي . إن انتقال الحرارة بواسطة الحمل هو أحد طرق انتقال الحرارة عبر نوافذ المنازل إلى المحيط الخارجي كما هو موضح بالشكل (2-6a,6b) . وانتقال الحرارة يحدث بين الهواء والزجاج على السطحين الخارجي. والداخلي وفي حالة النوافذ المزدوجة يحدث انتقال للحرارة في الهواء داخل الفراغ بين طبقتي الزجاج .



شكل (2-6a): انتقال الحرارة من الشبابيك ذات الزجاج المزدوج



شكل (2-6b): تغيّر كمية الفقد الحراري مع تغيّر سمك العازل الهوائي في الشبابيك ذات الزجاج المزدوج

مثـــال :

ما هو أفضل سُمك للفراغ الهوائي في النوافذ المزدوجة (نوافذ لها سطحان متوازيان من الزجاج بينهما طبقة هواء) من ناحية تقليل انتقال الحرارة .

الحـــل :

إذا كان سُمك الزجاج قليلا جداً فإن انتقال الحرارة بواسطة الحمل يكون صعباً ، ولكن الانتقال بواسطة التوصيل يكون عالياً وذلك لتقارب جزيئات الهواء . أما إذا كان سُمك الزجاج كبير فإن تيارات الحمل تكون عالية. وقد ثبت بواسطة التجارب أن أقل انتقال للحرارة يحدث عندما يكون سمك الفراغ الهوائي بين 10 و 15 سم . يمكن أيضاً تقليل انتقال الحرارة بواسطة الحمل باستخدام غازات ثقيلة في الفراغ بين طبقتي الزجاج ومن هذه الغازات الأرجون وثاني أكسيد الكربون . ويمكن أيضاً تفريغ المسافة بين طبقتي الزجاج. من الهواء (أي يكون هناك فراغ) لتقليل انتقال الحرارة وذلك لأن تيارات الحمل لا يمكن أن تنتقل خلال الفراغ (Vacuum) ، ولكن ذلك يحتاج إلى دقة عالية في صنع هيكل النافذة لمنع دخول الهواء من المحيط الخارجي إلى الفراغ .

2-7-3 انتقال الحرارة بواسطة الإشعاع

تنتقل الطاقة الحرارية بواسطة الإشعاع من جسم إلى آخر وذلك بواسطة اختلاف درجات الحرارة . فكمية الحرارة المتنقلة تعتمد على درجة حرارة الجسم المشع، والمسافة بين الجسمين . فالسقف مثلاً يمكن أن يشع حرارة إلى المحيط الخارجي ، وكمية الحرارة تعتمد على درجة حرارته وشدة انبعاثية المادة التي يتكون منها هذا السطح . فمعظم المواد المستخدمة في المباني لها معامل انبعاث عالٍ يصل إلى 90% أي أنه يمكن أن يشع 90% من الحرارة التي يكتسبها بدرجة معينة . فإذا كان الفصل صيفاً ، فإن السقف يشع حرارته إلى داخل الغرف المكيفة بالمنزل ، وإذا كان الفصل شتاءً فإن السقف يشع دفء الغرف إلى الخارج عن طريق السقف .

ولبعض السطوح قابلية انبعاث قليلة أذ تستخدم الآن طبقات من المواد القليلة الابتعاثية داخل النوافذ المزدوجة ، وذلك لتقليل خسائر فقد الطاقة الحرارية من الطبقة الداخلية للزجاج إلى الطبقة الخارجية عبر الفراغ الهوائي إلى المحيط الخارجي . ويطلق على معامل الانتقال الحراري الكلي خلال جزء معين من الأبنية ، والذي يتضمّن خليطاً من

انتقال الحرارة بواسطة التوصيل والحمل والإشعاع ، **بالمعامل الكلي لانتقال الحرارة (U)** ، وهو يعرف فيزيائياً على أنه كمية الحرارة المفقودة من مساحة معينة بدرجة حرارة معينة (واط/متر^2 درجة مئوية W/m^2-c) . ويتضمن الجدول (2-1) قيماً للمعامل الكلي لانتقال الحرارة لأنواع مختلفة من النوافذ .

جدول (2-1) : المعامل الكلي لانتقال الحرارة لأنواع مختلفة من النوافذ

نوع النافذة	المعامل الكلي ($Wm^{-2}\ ^0C^{-1}$)
نافذة ذات طبقة زجاج أحادية	6
نافذة ذات طبقتين من الزجاج مع طلاء قليل الابتعاثية	1.8
نافذة ذات طبقتين من الزجاج مع وجود غاز ثقيل	1.5
نافذة ذات طبقتين من الزجاج مع ثلاث طبقات بلاستيكية وغاز ثقيل	0.35

8-2 استخدام الطاقة الشمسية في التكييف وتسخين المياه

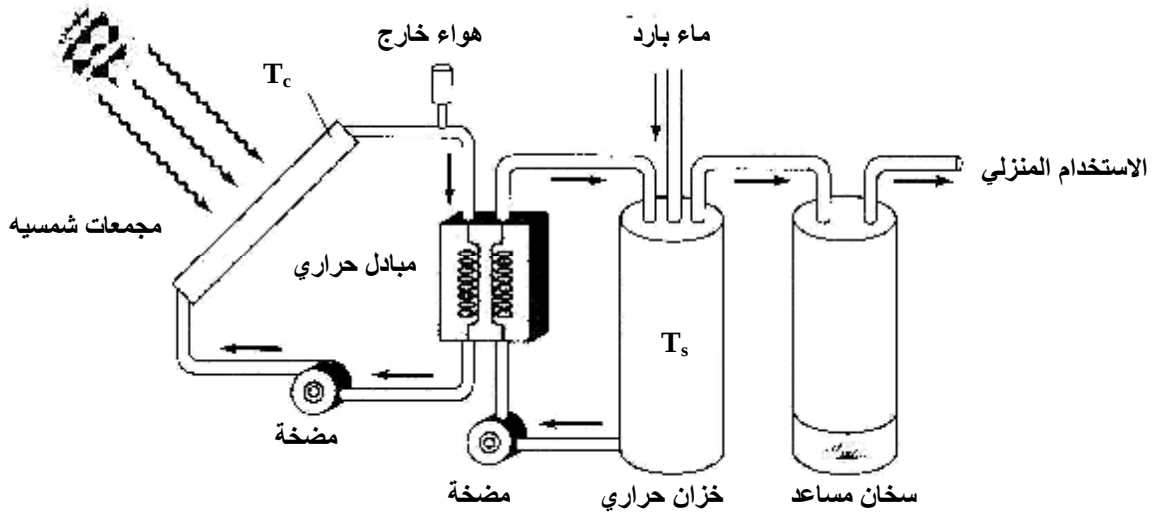
يتم حالياً استخدام الطاقة الشمسية في مجالات تسخين المياه والتدفئة والتبريد وتوليد البخار المستخدم في أغراض توليد الطاقة الكهربائية .

1-8-2 تسخين المياه

استخدام الطاقة الشمسية في تسخين المياه معروف منذ مدة طويلة. وقد زاد الاهتمام بتطوير منظومات التسخين منذ بداية القرن الحالي نتيجة الحاجة إليها في مناطق بعيدة عن مصادر الطاقة التقليدية. ومع الزمن زاد الاهتمام بالسخان الشمسي الذي يعتبر من أفضل تطبيقات الطاقة الشمسية في الوقت الحاضر، وذلك لسهولة صنعه وقلة تكاليفه . وقد انتشر استخدامه بصورة واسعة في العقود الماضية في مختلف بلدان العالم ومنها بعض الدول العربية .

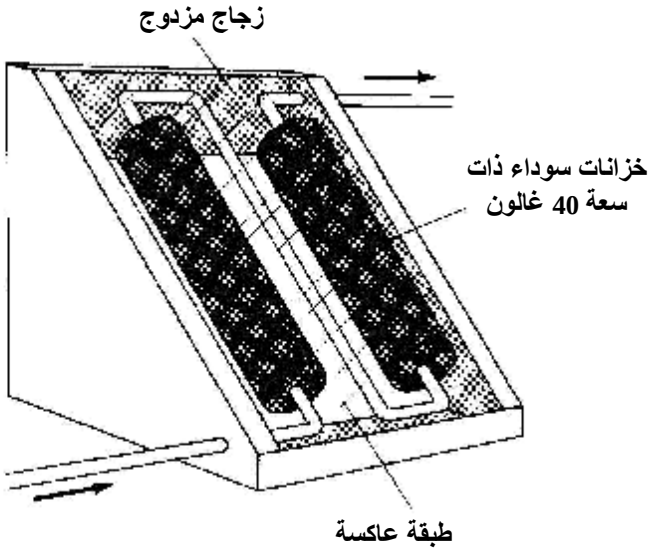
يمكن تقسيم منظومات تسخين المياه للأغراض المنزلية إلى ثلاثة أقسام:

- منظومة فعالة تتكون من مجمعات شمسية ومبادل حراري وخزان ماء حار بالإضافة إلى بعض المضخات اللازمة لتدوير الماء في المنظومة . ويوضح الشكل (2-7) نموذج هذه المنظومة .



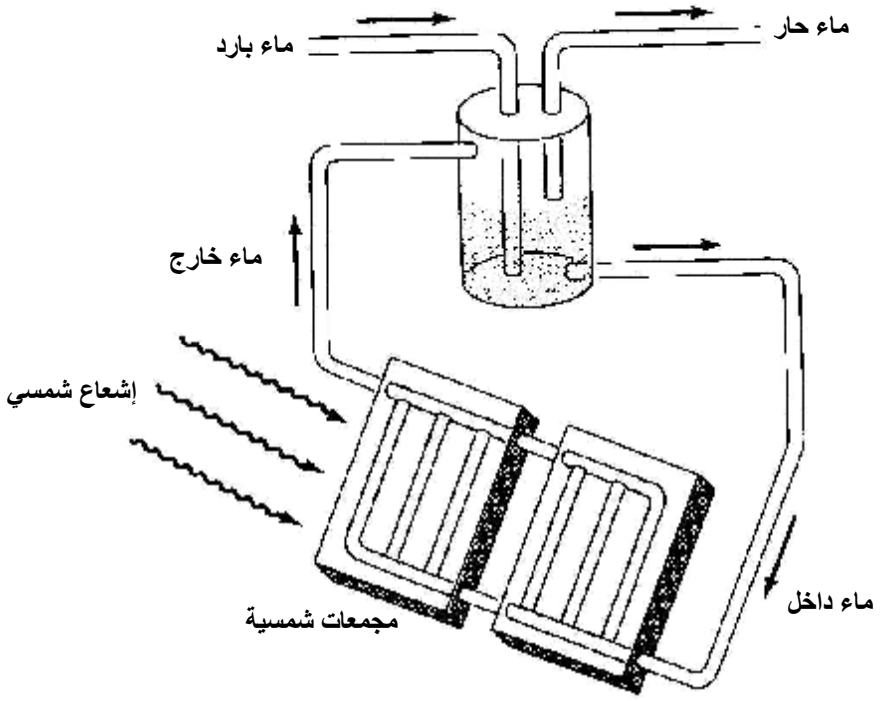
شكل (2-7): منظومة تسخين ماء فعّالة

- منظومة تسخين على شكل صندوق حراري تتكون من خزان مصبوغ بلون أسود وموضوع داخل صندوق معزول من الجوانب ومن أسفل سطحه العلوي مغّطى بطبقة من الزجاج . وعند الحاجة إلى ماء ساخن يتم فتح الصمام فيمر الماء البارد في الخزان الذي يقوم بتسخينه نتيجة امتصاص الأشعة الشمسية الساقطة على المجمع الشمسي . والماء الخارج من هذه المنظومة يحتاج عادة إلى المرور بسخان كهربائي مساعد لتسخينه إلى الدرجة المطلوبة . الشكل (2-8) يوضح منظومة من هذا النوع تحتوي على خزانين حراريين ويمكنها أن توفر الماء الساخن لعائلة ذات أربعة أشخاص .



شكل (2-8): منظومة تسخين ماء على شكل صندوق حراري

- منظومة تعمل بالدوران الطبيعي ، ويسري فيها الماء من المجمعات إلى الخزان نتيجة لاختلاف الكثافة . فعند امتصاص الإشعاع الشمسي من قِبل اللوح الماص في المجمع الشمسي ترتفع درجة حرارة الماء الموجود فيه وتقل كثافته فيرتفع إلى الخزان ويحل محله ماء بارد من أسفل الخزان، وهكذا يتم تسخين الماء ويمكن أن تصل درجة حرارة الماء في الخزان إلى أكثر من 60 درجة مئوية في يوم مشمس . ويبين الشكل (2-9) نموذجاً لهذه المنظومة .



شكل (2-9): منظومة تسخين ماء تعمل بالدوران الطبيعي

2-8-2 المجمعات الشمسية

تتكون المجمعات الشمسية من لوح ماص على شكل صفيحة خفيفة سوداء اللون ذات قابلية امتصاص عالية وتقوم بامتصاص الأشعة الشمسية . فالمائع الذي يكون عادة ماء أو هواء يكون بحالة تماس مع الصفيحة ، ويتم تدويره إما بطريقة الدوران الطبيعي أو بواسطة مضخة أو دافعة هواء لاستخراج الحرارة . يتم تغطية اللوح الماص بطبقة أو طبقتين من الزجاج لتقليل الخسائر الحرارية بواسطة الحمل والإشعاع . ويقوم الزجاج بعملين في المجمع هما منع خروج الإشعاع المنعكس من اللوح الماص ومنع حدوث الخسائر الحرارية بواسطة الحمل . ويسمح الزجاج لحوالي 90% من الأشعة الشمسية ذات الموجات القصيرة بالدخول إلى اللوح الماص بينما يمنع خروج الإشعاع ذي الموجة

الطويلة (الأشعة الحرارية المسئولة عن تسخين الماء) المنعكس من اللوح الماص . ويوضح الشكل (2-10) بعض هذه التصاميم . بالنسبة للمجمعات الشمسية المائية يجب أن يتم لحم الأنابيب التي يمر فيها الماء باللوح الماص أو تكون جزءاً من اللوح الماص. ومن المهم جداً أن تكون الأنابيب ملتصقة تماماً باللوح الماص . إن نوع مادة اللوح الماص لها تأثير على التبادل الحراري مع الماء . والمعادن المستخدمة في هذا المجال هي النحاس والألمنيوم والحديد . ويوضح الشكل أيضاً بعض المجمعات الشمسية الهوائية. ولكون الهواء ذا قابلية تبادل حراري أقل من الماء فإنه يجب أن تكون مساحة تماسه مع اللوح الماص أكبر للحصول على كمية حرارة مناسبة .

تعرف كفاءة المجمعات الشمسية بما يلي :

$$\text{الكفاءة} = \frac{\text{كمية الحرارة المفيدة}}{\text{كمية الإشعاع الشمسي الساقط}} \times 100\%$$

والمتغيرات التي تؤثر على كفاءة المجمع الشمسي هي :

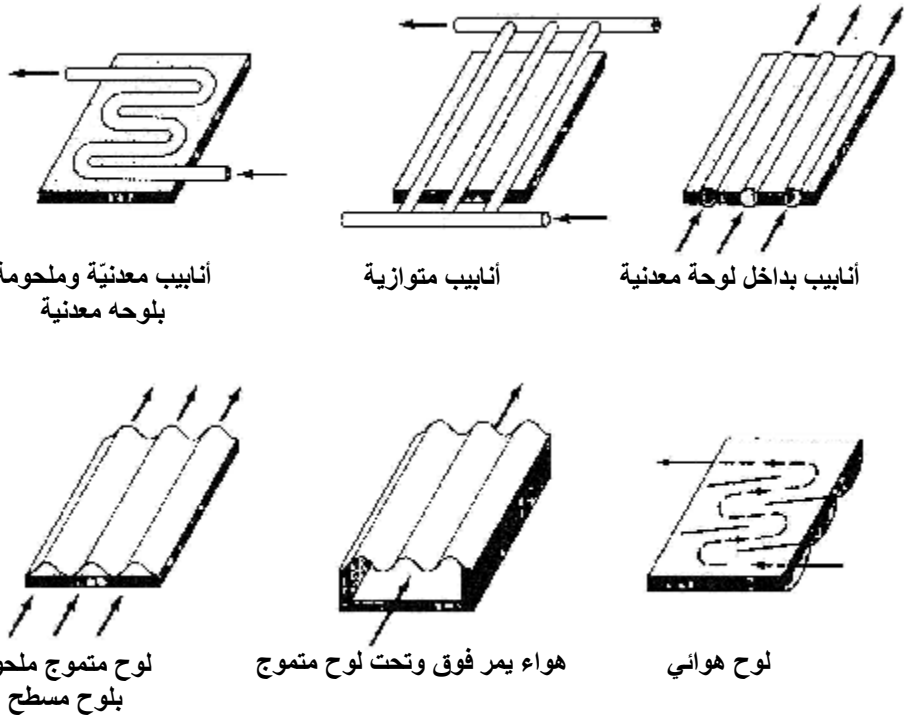
1 - درجة حرارة المائع الداخل .

2 - درجة الحرارة الخارجية للمحيط .

3 - كمية الإشعاع الشمسي .

4 - عدد ونوع الغطاء الزجاجي .

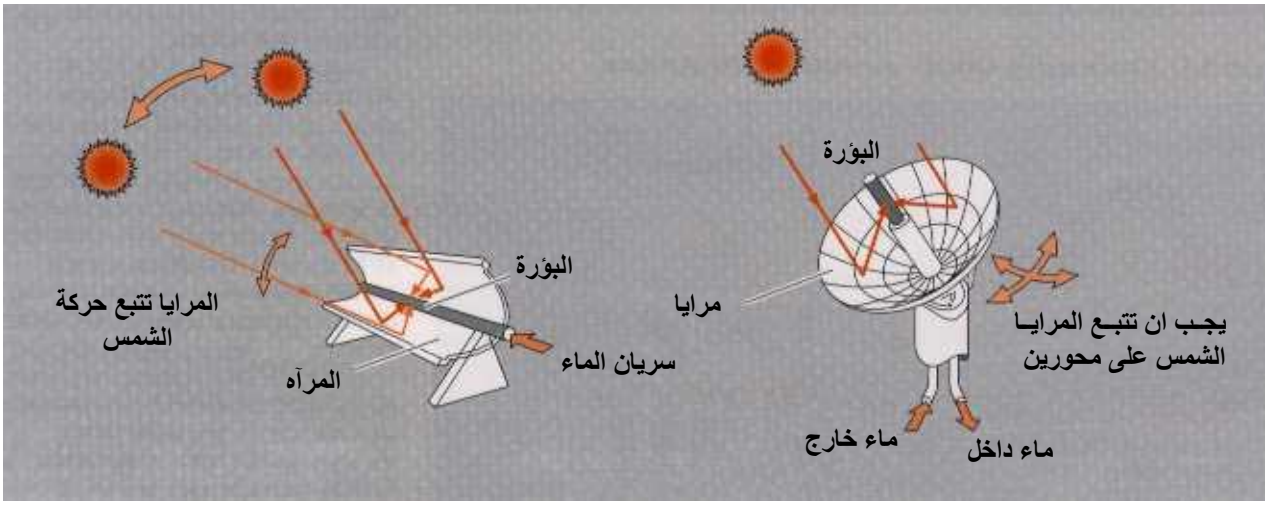
5 - مواصفات اللوح الماص .



شكل (2-10): أنواع مختلفة من المجمعات الشمسية

تجدر الإشارة إلى أن المجمعات الشمسية يجب أن توجه نحو الجنوب دائماً. وللحصول على أعلى حرارة مكتسبة يجب أن تكون الأشعة الشمسية عمودية على سطح المجمع الشمسي قدر الإمكان . ونظراً إلى أنّ الشمس على ارتفاع منخفض في السماء في فصل الشتاء فإن المجمعات الشمسية يجب أن تكون بدرجة ميل كبيرة للحصول على أعلى إشعاع شمسي ساقط عليها . وبصورة عامة يجب أن تكون زاوية ميل المجمعات الشمسية في فصل الشتاء تعادل مقدار زاوية خط العرض مضافاً إليها 10 درجات (خط العرض + 10^0). أما في فصل الصيف فيجب أن تكون زاوية الميل مساوية لمقدار زاوية خط العرض مطروحاً منها 10 درجات (خط العرض -10^0) .

وللحصول على درجات حرارية عالية يجب استخدام المجمعات الشمسية المركزة إذ يتم تجميع الأشعة الشمسية في نقطة معينة بواسطة مرايا أو عدسات الشكل (2-11) . وفي هذه الحالة يجب أن تكون المنظومة متعقبة لحركة الشمس (Tracking The Sun) ، ويتم عادة وضع اللوح الماص في هذه المنظومات داخل منطقة مفرغة من الهواء لتقليل الخسائر بواسطة التوصيل والحمل . والمركزات الشمسية مكلفة وتستخدم في أغراض التدفئة أو تستخدم في معظم الأحيان في توليد البخار لأغراض إنتاج الطاقة الكهربائية إذ يقوم البخار بتدوير عنفة (توربين) ومولد كهربائي .



شكل (2-11): مجمعات شمسيه مركزه تتعقب حركة الشمس

مثال (1)

ما هي مساحة المجمعات الشمسية اللازمة لتزويد منزل بالماء الحار لمدة يوم كامل إذا كانت كمية الحرارة المطلوبة 6000 واط بالساعة بافتراض أن كمية الإشعاع الشمسي الساقط كان 4960 واط في اليوم الواحد/م^2 وأن كفاءة المجمعات الشمسية كانت 50%؟

الحـــــلّ :

كمية الحرارة = كمية الإشعاع X كفاءة المجمعاتX المساحة

$$\frac{\text{6000 واط}}{\text{ساعة}} \text{ X } \frac{\text{24 ساعة}}{\text{يوم}} = \frac{\text{4960 واط}}{\text{م}^2\text{. يوم}} \text{ X 0.5 X المساحة}$$

$$\therefore \text{ المساحة} = \frac{24 \text{ X } 6000}{0.5 \text{ X } 4960} = 58 \text{ م}^2$$

مثال (2)

في عام 1912 تمكن المهندس الأمريكي فرانك شومان من نصب وتشغيل محطة شمسية كبيرة في القاهرة بجمهورية مصر العربية، وكانت وظيفتها تزويد المنطقة بمياه الري من النيل . استخدم المهندس مجمعاً على شكل قطع أسطواني مكافئ (Parabolic Collector) لكي يركز أشعة الشمس ويجمعها على أنبوب أسود من المعدن لتوليد البخار. كانت قدرة النظام 50 كيلوواط ومساحة المجمعات الإجمالية 1207م^2 علماً بأن أقصى شدة إشعاع شمسي ساقطة على المجمعات هي 1200 واط/م^2 . فهل كانت فكرة المهندس صحيحة ومجدية؟

الحـــلّ :

كمية الإشعاع الساقط على المجمعات = 1200 واط/م^2 X 1207م^2 = 1576 كيلوواط

كفاءة النظام = $\frac{\text{درجة الحرارة النهائية (كلفن) ــ درجة الحرارة الابتدائية (كلفن)}}{\text{درجة الحرارة النهائية (كلفن)}}$ ،

فإذا تم افتراض أن المنظومة تستطيع رفع درجة حرارة الماء من 20م إلى 100م فإن الكفاءة ستكون :

$$\text{الكفاءة} = \frac{(273 + 100) - (273 + 20)}{(273 + 100)} \text{ X } 100$$

$$= 100 \text{ X } 0.21$$

$$= 21\%$$

ولهذا فإن أقصى قدرة تستطيع المجمعات الشمسية توفيرها هي :

= كمية الإشعاع الشمسي X كفاءة المجمعات الشمسية

= 1576 X 0.21 = 330 كيلوواط

وعليه فإن افتراضه بعمل شغل مقداره 50 كيلوواط كان ممكناً لأن الحساب النظري يشير إلى إمكانية الحصول على 330 كيلوواط، وهذا أكبر بكثير من المطلوب وهو 50 كيلوواط .

مثال (3)

احسب مساحة المجمعات الشمسية اللازمة لتسخين 80 غالون من الماء يومياً (1 غالون = 4.5 كغ) من درجة 20 مئوية إلى 90 مئوية في شهر يونيه في البحرين، بافتراض أن متوسط الإشعاع الشمسي اليومي في هذا الشهر يصل إلى 500 واط/م^2 ، وأن كفاءة المجمعات تصل إلى 50% ، وأن عدد ساعات سطوع الشمس هي 12 ساعة/يوم ، والحرارة النوعية للماء = 4186 جول/كغ.م .

الحـــلّ :

الطاقة اللازمة لتسخين الماء = كتلة الماء X الحرارة النوعية X الفرق بين درجات الحرارة

$$= \frac{\text{80 غالون}}{\text{يوم}} \times \frac{\text{4.5 كغ}}{\text{غالون}} \times \frac{\text{4186 جول}}{\text{كغ X م}} \times (90 - 20)\ \text{م}$$

= 105.487.200 جول/يوم

≈ 106 ميغا جول/يوم

لذا فإن الطاقة التي تستطيع المجمعات الشمسية توفيرها لتسخين الماء =
كمية الإشعاع X كفاءة المجمع X المساحة

$$\therefore \frac{\text{105487200 جول}}{\text{يوم}} = \frac{\text{500 واط}}{\text{م}^2} \times \frac{\text{12 ساعة}}{\text{يوم}} \times \frac{\text{جول}}{\text{واط . ثانية}} \times \frac{\text{3600 ثانية}}{\text{ساعة}} \times 0.5 \times (\text{م}^2)$$

$$\text{إذن المساحة المطلوبة} = \frac{105487200}{3600 \times 12 \times 500} = 4.8\ \text{م}^2$$

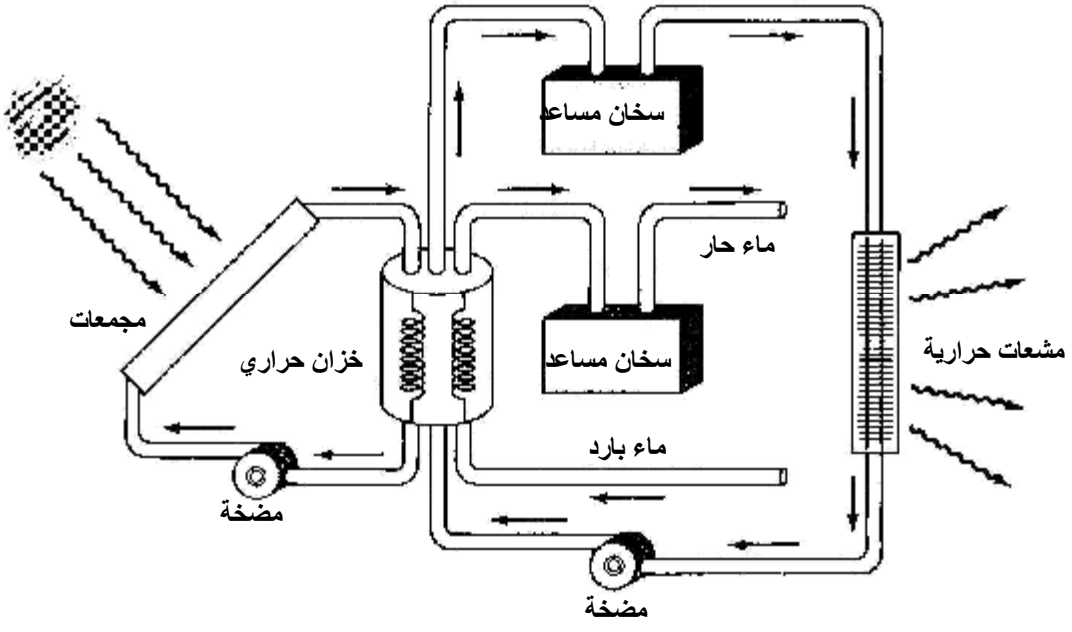
وهي مساحة معتدلة تساوي سطح عرضه 2 م وطوله 2.4م

3-8-2 التدفئة بالطاقة الشمسية

يمكن استخدام الطاقة الشمسية لتوفير ظروف حرارية مناسبة داخل المباني بطريقتين رئيسيتين : أولاهما منظومة التدفئة الفعالة (Active Solar Heating) والتي يتم منها تدوير المائع الساخن (سائل أو غاز) بواسطة مضخة أو مروحة، وثانيتهما منظومة التدفئة السلبية أو التمريرية (Passive Solar Heating) التي لا تستخدم طاقة خارجية ولكنها تسمح للحرارة بالسريان إلى المبنى بطرق طبيعية .

أ - منظومات التدفئة الفعالة

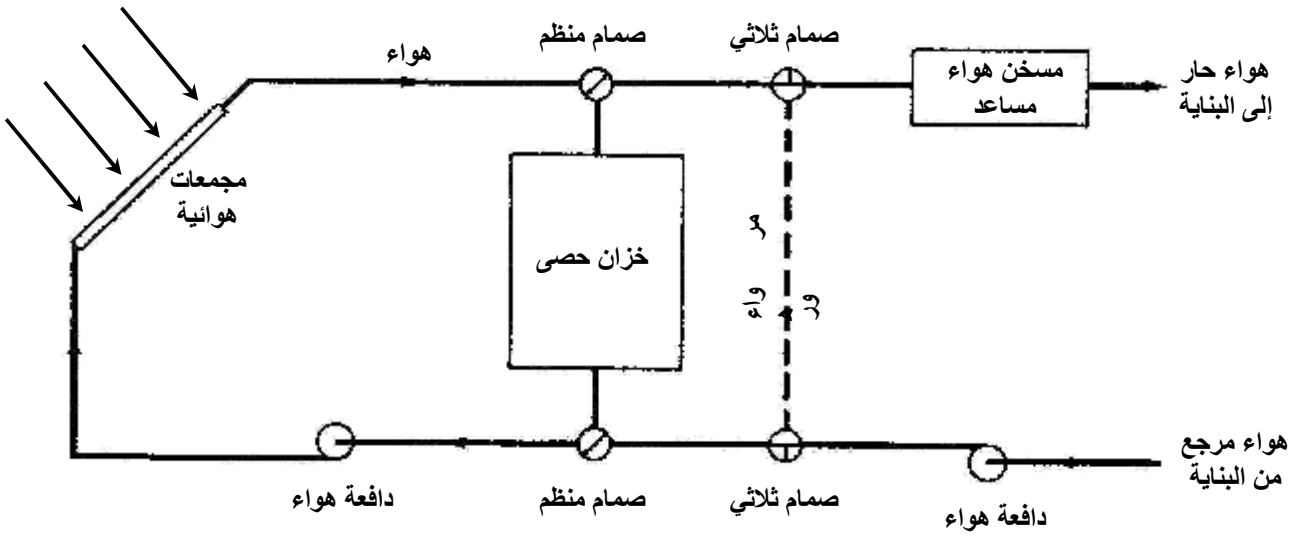
جميع منظومات التدفئة الفعالة لها خصائص مشتركة، فهي تحتوي على أجهزة تجميع ، وخزن ، وتوزيع ، وقسم منها يستخدم الماء كناقل للحرارة والقسم الآخر يستخدم الهواء . ومعظم المنظومات البسيطة تستخدم الماء كناقل للحرارة كما في الشكل (2-12)، وهي تتكون من مجمعات شمسية تنصب عادة على سطح البناية أو في الفضاء الخارجي المجاور لها ، وخزان معزول حرارياً - يوضع عادةً في سرداب البناية أو في مكان خاص منعزل فيها - ، ومبادل حراري ، وسخان (كهربائي ، نفطي ، غازي) مساعد يستخدم في الأيام الغائمة أو عند عدم كفاية الحمل المجهز من المجمعات الشمسية والمشعات الحرارية (Heat Radiations) التي تقوم بتدفئة الحيز (توضع في أماكن مختلفة منه ، على حسب التوزيع الحراري للبناية). وبالإضافة إلى ذلك فإن المنظومة تحتوي على أنابيب توصيل ومضخات وأجهزة سيطرة .



شكل (2-12): منظومه تدفئه فعالة تستخدم الماء كناقل الحرارة

فـي بعـض المجمعـات الشمـسية يكـون الهـواء هـو المـائع المـستخدم ، وتتكـون المنظومة من هذا النوع من مجمعات شمسية ، وخزان يحتوي على الحصى أو الصخور ، وسخان مساعد (شكل 2-13) . في هذه المنظومات يستخدم الهواء الساخن المجهز أو المتوفر في المجمعات الشمسية ، خلال النهار، لتدفئة الحيز ولتسخين الصخور في الخزان . وخلال الليل أو الأيام الغائمة يتم تفريغ الحرارة من الخزان، وعند عدم كفاية الطاقة الموجودة فيه يتم الاستعانة بالسخان المساعد لتغطية النقص في الحرارة المطلوبة (الحمل) .

وتكون منظومات التدفئة التي تستخدم الهواء كمائع أقل سعراً في الغالب ، وليس لها مشاكل تسرب مقارنة بالمنظومات التي تستخدم الماء كناقل للحرارة. نظرا إلى أنّ الهواء أقل كفاءة في نقل الحرارة من الماء فإن المنظومات الهوائية تحتاج إلى حجم خزان أكبر بعدة مرات من المنظومات التي تستخدم الماء ، ولهذا فإن المنظومات التي تستخدم الماء هي الشائعة الاستخدام في منظومات التدفئة الحالية.



شكل (2-13): منظومة تدفئة تستخدم الحصى كخازن للحرارة

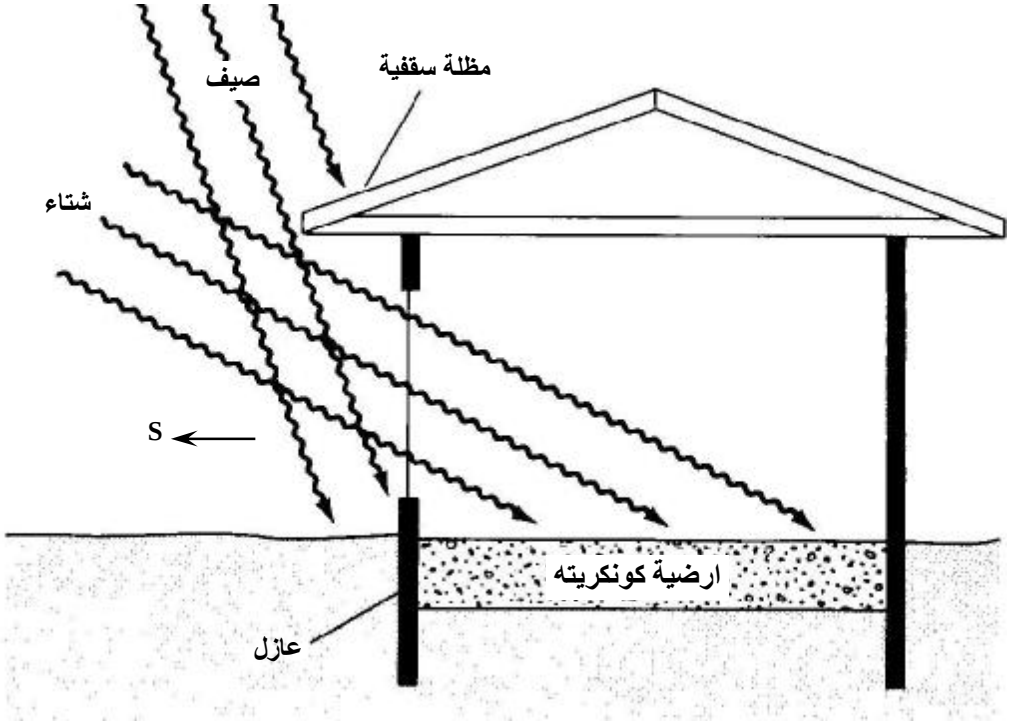
ب - منظومات التدفئة السلبية

يمكن استخدام منظومات غير فعالة أو تمريرية – أي لا تحتاج إلى أجهزة ميكانيكية مساندة وإنما تقوم بتمرير الإشعاع الشمسي لأغراض تدفئة المباني، إذ تكون البناية أو المنزل هي نفسها المجمع الشمسي والخزان . وتسري الطاقة في هذه المنظومات بصورة طبيعية وبدون أجهزة تدوير ميكانيكية مثل المضخات والمراوح . ويتم السماح

للأشعة الشمسية بالدخول بأكبر قدر ممكن من خلال النوافذ خلال النهار، وبذلك يتم خزن الحرارة داخل الحيز المدفأ . ولتقليل زيادة الحرارة خلال أوقات النهار يتم استخدام بعض المواد لخزن الحرارة الفائضة . من هذه المواد استخدام كتل كونكريتية سميكة أو خزانات ماء أو كتل صخرية . والمواصفات الرئيسية المطلوبة للأنظمة السلبية هي توفر عزل حراري جيد ووجود نوافذ في الجانب الجنوبي من المبنى (لكون هذا الاتجاه هوالذي يستلم أكبر معدل من الارتفاع الشمسي خلال اليوم) بالإضافة إلى وجود مواد خزن للطاقة الفائضة. ويمكن تقسيم منظومات التدفئة السلبية إلى ثلاثة أنواع هي:

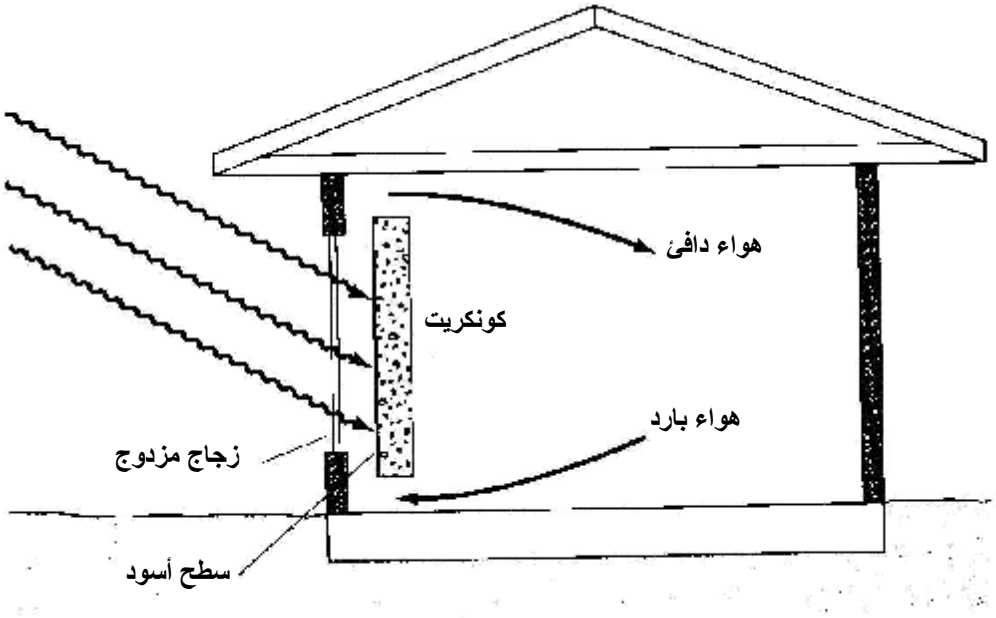
1) منظومات الكسب المباشر.
2) منظومات الكسب غير المباشر .
3) منظومات البيوت الزجاجية الملاصقة للمبنى .

ففي منظومات الكسب المباشر تستخدم النوافذ على الجانب الجنوبي للسماح بدخول الأشعة الشمسية . وتوضع مواد الخزن الحراري ، كالكونكريت والحجر والطابوق ، داخل الحيز لامتصاص الأشعة الشمسية . كما أن جعل الأرضية من الحصى والكونكريت هو أحد الأمثلة لهذه الأنظمة كما هو مبين بالشكل (2-14) إذ تقوم هذه الأرضية الكونكريتية وحيطان الحيز بامتصاص الأشعة الشمسية خلال النهار وإشعاعها مرة أخرى إلى الحيز خلال الليل . وبدون مواد الخزن هذه يمكن أن ترتفع درجة الحرارة داخل الحيز خلال



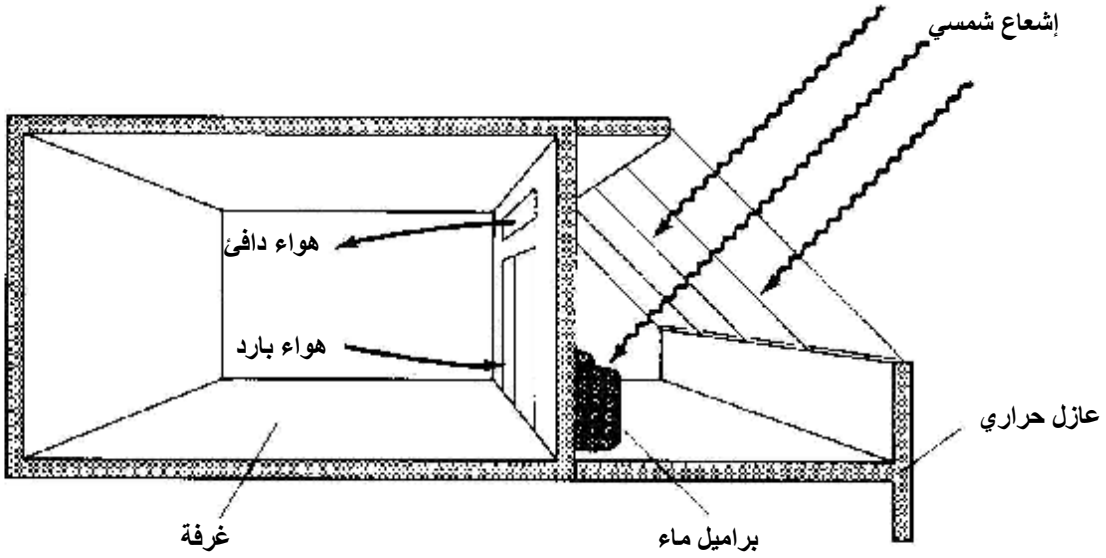
شكل (2-14): منظومة تدفئه سلبية تستخدم النوافذ لإمرار الأشعة الشمسية والكونكريت لخزن الطاقة

في منظومات الكسب غير المباشر يتمّ جمع وخزن الطاقة الشمسية في جزء من المبنى، ويستخدم التبادل الحراري الطبيعي بواسطة التوصيل والحمل في توزيع الحرارة إلى بقية البيت . ومثال جيد على هذه المنظومات هو جدار ترومب (Trombe Wall) كما في الشكل (2-15) . في هذا الجدار يتم وضع كتلة كبيرة من مواد البناء كالكونكريت أو الطابوق ، مثلاً على بعد 10 سم من طبقة زجاجية في الجانب الجنوبي من المبنى . ويقوم الإشعاع الشمسي بالمرور من خلال الزجاج ويتم امتصاصه من قِبل الجدار الذي تصل درجة حرارة سطحه أحياناً إلى درجة عالية خلال النهار . وتنتقل هذه الحرارة إلى الهواء المحصور بين الزجاج والحائط فتؤدي إلى رفع درجة حرارته وبذلك تقل كثافته وينتقل إلى الحيز من الفتحة العلوية . ويتم دخول كمية من الهواء البارد بدله من خلال الفتحة السفلية فيسخن مرة أخرى وينتقل إلى الحيز ، وهكذا تستمر العملية خلال النهار . وفي أثناء الليل يتم غلق الفتحات لمنع تسرب الحرارة إلى الخارج ، وبهذا يتم تفريغ الحرارة المخزونة في الحائط إلى الحيز بواسطة الحمل والإشعاع .



شكل (2-15): نموذج لحائط ترومب

أما منظومات البيوت الزجاجية الملاصقة للمباني فهي موضحة كما في الشكل (2-16) ، ويمكن استخدامها لأغراض الزراعة والتدفئة في آن واحد ، وتقوم بنقل الحرارة المحبوسة في البيت الزجاجي إلى داخل حيز المبنى . وكما في بقية المنظومات الأخرى فإن خزن الحرارة والعزل الجيد لأرضية البيت الزجاجي وجوانبه هما من المتطلبات المهمة في هذه المنظومات . إن الأرضية الكونكريتية السميكة والبراميل المملوءة بالماء هي أجهزة خزن شائعة .



شكل (2-16): بيت زجاجي ملاصق للاستخدام لغرض التدفئة

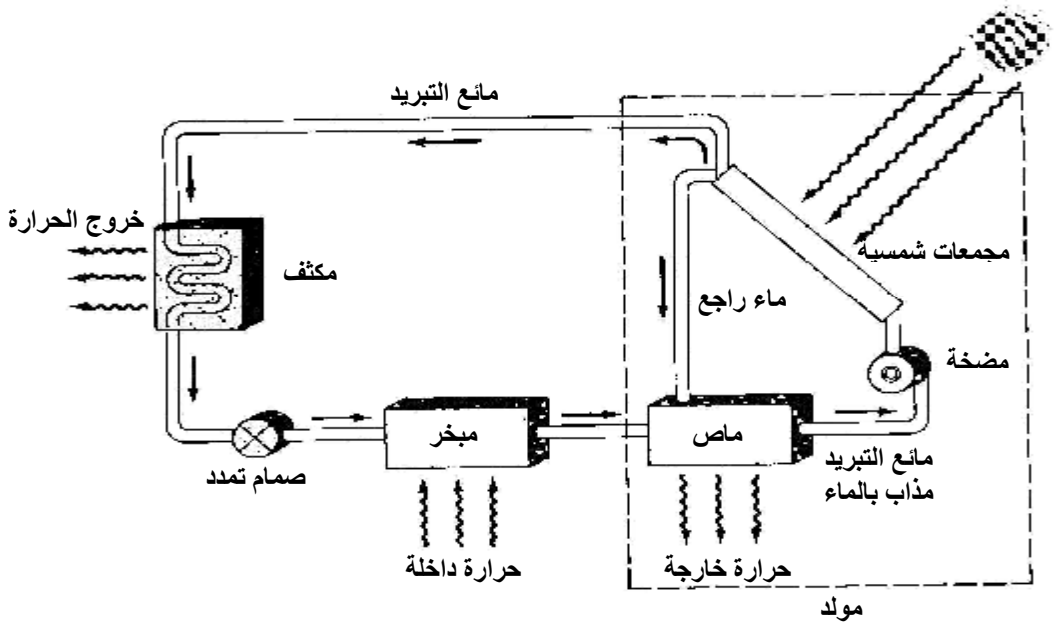
2-8-5 التبريد بالطاقة الشمسية

يمكن استخدام الطاقة الشمسية في تبريد المباني أيضاً بطريقتين رئيسيتين: الأولى منظومات التبريد الفعالة التي تستخدم فيها منظومات التبريد الامتصاصية إذ تستمد حاجتها من الطاقة من مصادر الطاقة الشمسية، ومنظومات التبريد السلبي . وكافة تقنيات منظومات التبريد السلبية والفعالة ميسرة في الوقت الحاضر ، ولكنّ الكلفة الأولية العالية للمنظومات الفعالة تحدّ من استخدامها على نطاق واسع في الوقت الحاضر .

أ - منظومات التبريد الفعالة

إن منظومات التبريد الامتصاصية (Absorption Systems) مشابهة لمنظومات التبريد الانضغاطية (Compression Systems) الاعتيادية إلاّ أنها تختلف عنها بعدم وجود ضاغط (Compressor) . ويتمّ في هذه المنظومات إبدال الضاغط بمولد تتم تغذيته من مصدر شمسي كما هو مبين بالشكل (2-17) . وفي هذه المنظومات يستخدم أحد

المحلولين – عوضاً عن الفريون المستخدم في منظومات التبريد الانضغاطية - وهما خليط من الأمونيا والماء أو خليط من الليثيوم بروماید والماء . ويستخدم عادة محلول الأمونيا والماء في منظومات التثليج ، أما محلول الليثوم بروماید والماء فإنه يستخدم في منظومات التبريد الاعتيادية المستخدمة لأغراض تكييف الهواء . وفي حالة استخدام أحد هذين المحلولين ، ولنقل مثلاً الأمونيا والماء ، وفإن غاز الامونيا يذوب في الماء ويكون هو غاز التبريد . وهذا الخليط السائل (أمونيا وماء) يضخ إلى ضغط أعلى بمضخة صغيرة ، يعادل استهلاكها حوالي 0.1 من استهلاك الضاغط في المنظومات الانضغاطية ، ويدخل هذا السائل إلى المولد الذي يقوم بتسخينه بواسطة الطاقة المجهزة من المجمعات الشمسية ويسبب هذا فصل غاز الأمونيا عن المحلول ، ويذهب الغاز إلى المكثف (Condensor) بينما يذهب الماء المتبقي إلى الجزء الماص (Absorber) التابع للمولد. ويخرج الأمونيا من المكثف على هيئة سائل ليمر خلال صمام التمدد (Expansion Valve) إلى المبخر (Evaporator) . وفي المبخر ، وبعد سحب الحرارة من الحيز المراد تبريده ، تتحول الأمونيا إلى غاز مرة أخرى . ويذهب إلى الجزء الماص للحرارة ليختلط مرة ثانية مع الماء ويتحول إلى محلول ، وتعاد الدورة مرة ثانية وهكذا . وللحصول على كفاءة مقبولة في هذه المنظومات يجب أن تكون درجة حرارة الماء الساخن المجهز من قبل المجمعات الشمسية (أو من أي سخان اعتيادي) أكثر من 85 درجة مئوية . وعمل المنظومات التي تستخدم محلول الليثوم بروماید والماء مشابهة لعمل منظومات محلول الأمونيا والماء، ولكن الفرق الوحيد هو أن الماء سيكون مائع التبريد في المنظومات الأولى .

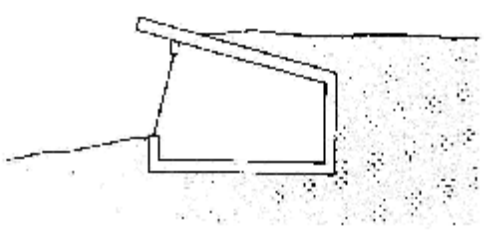


شكل (2-17): منظومة تبريد امتصاصيه يتم تغذيتها من مصدر شمسي

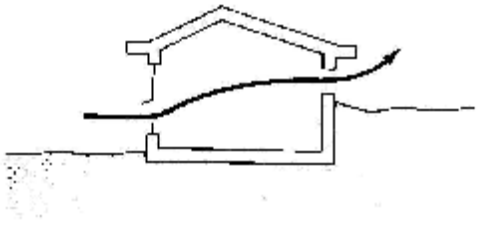
ب - منظومات التبريد السلبية

إن مهمات منظومات التبريد السلبية (Passive Cooling Systems) هو تقليل انتقال الحرارة للأبنية من المحيط الخارجي ، ومبادئ عمل هذه المنظومات تتضمن اختيار الموقع ، واتجاه البناية ، والأشجار المحيطة بها ، والخصائص المعمارية (كنسبة الواجهات إلى حجم البناية ، والتظليل ، ومساحة النوافذ ، وغيرها) ، ومواصفات الهيكل الخارجي (كاستخدام العازل الحراري ، وسمك الجدران ونوع النوافذ) . إن التظليل (Shadowing) ضروري جداً لعملية التبريد ، وإن استخدام الأشجار ومظلات النوافذ يمكن أن يقلل درجة الحرارة في النهار داخل المبنى بضع درجات مئوية . كما أن التهوية الطبيعية مهمة جداً في التبريد السلبي إذا كان الجو جافاً نسبياً. فالتيار الهوائي يمكن أن يقوم بتبخير بعض العرق من الجسم ويشعر الإنسان بالبرودة . والتهوية المناسبة تحتاج إلى فتحات موزعة في المناطق العلوية والسفلية للبناية لتوليد تيار هوائي طبيعي. ويوضح الشكل (2-18) بعض الطرق المستخدمة في منظومات التبريد السلبية . وتعتبر المبردات التبخيرية التي تستهلك قدراً قليلاً من الطاقة الكهربائية ، مقارنة بالمنظومات الانضغاطية ، هي إحدى الوسائل المستخدمة في التبريد في المناطق الحارة والجافة إذ تكون كفاءة هذه المبردات في التبريد عالية جداً في المناطق الجافة .

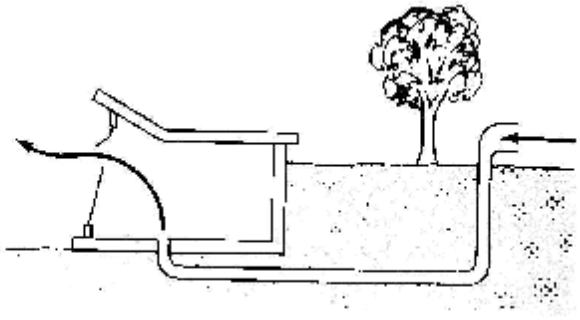
أما في المناطق ذات الرطوبة العالية فإن معظم المنظومات السلبية لا تعمل بكفاءة ، ومنظومات التبريد التبخيري قد لا تعمل بكفاءة – أو لا تعمل إطلاقاً – في المناطق ذات الرطوبة العالية ، كما أن هذا النظام لا يعمل في المناطق ذات الإشعاع الليلي للحرارة من الأبنية إلى السماء لكون السماء غير صافية وملبدة بالغيوم . وتوجد تقنية بديلة لمثل هذه المناطق وهي استخدام مواد تقوم بامتصاص الرطوبة من الهواء . وخلال الليل يمرر الهواء على هذه المواد لامتصاص بعض رطوبته ، وخلال النهار يتم تجفيف هذه المواد من الرطوبة عن طريق أشعة الشمس .



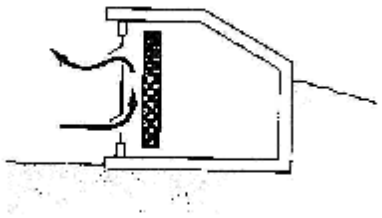
استخدام التربة لأغراض التبريد



مرور هواء بصورة طبيعية



استخدام التربة لتبريد الهواء



استخدام حائط تروب

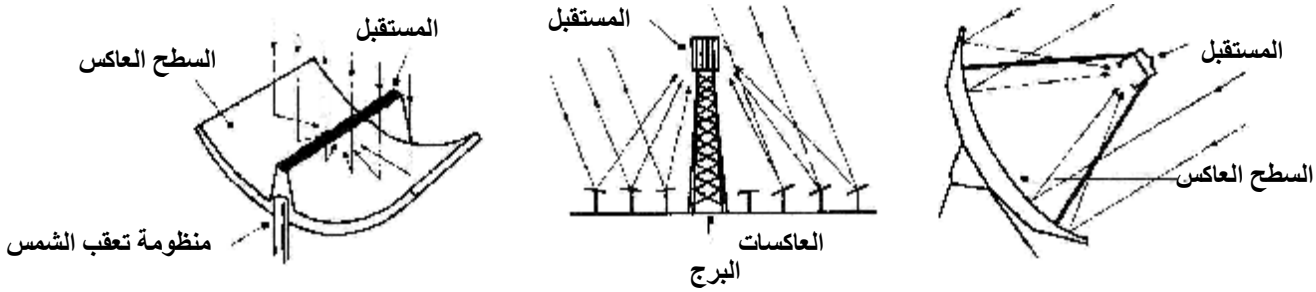
شكل (2-18): بعض الطرق المستخدمة في منظومات التبريد السلبية

9-2 توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية

إن تطبيقات التدفئة ، والتبريد ، وتسخين المياه تدخل ضمن التطبيقات ذات درجات الحرارة المنخفضة . ولكن إذا تم تركيز الإشعاع بواسطة مرايا فسيتم الحصول على درجات حرارة عالية تكفي لإنتاج بخار يمكن بواسطته الحصول على طاقة ميكانيكية تستخدم لأغراض مختلفة كضخ المياه أو تدوير عنفة (توربين) ومولد لإنتاج الطاقة الكهربائية .

إن الطريقة الاعتيادية المستخدمة في تركيز الإشعاع الشمسي تستخدم مرايا ذات قطع مكافئ . وكل الأشعة الشمسية الساقطة والموازية لإحداثيات المرآة تنعكس إلى نقطة واحدة فتسبب ارتفاعاً كبيراً في درجات الحرارة ، ويؤدي ذلك إلى تحويل الماء إلى بخار ذي ضغط ودرجة حرارة عاليين . وهذه المرايا يمكن أن تقوم بعكس الإشعاع على نقطة أو خط كما هو مبين بالشكل (2-19) . ولضمان تركيز الأشعة الشمسية عند نقطة أو خط والحصول على كفاءة عالية يجب أن يتم توجيه محور المرايا باتجاه الشمس في كل الأوقات لكي تسقط الأشعة الشمسية عمودياً على سطح القطع المكافئ من المرايا . وهنالك توافق بين تعقيد تصميم المنظومة ونسبة التركيز . ويمكن لمجمع شمسي ذي قطع مكافئ مصمم بصورة جيدة أن تصل نسبة التركيز فيه إلى أكثر من 1000 وينتج درجة حرارة تصل إلى اكثر من 2500 درجة مئوية . أما لواقط المرايا الشمسية التي تعكس الشعاع على مساحة صغيرة فإن نسبة التركيز فيها تصل إلى أكثر من 50% وتنتج درجة حرارة ما بين

400-200 درجة مئوية . ومن المناسب هنا أن نتذكر بأنه لا يمكن لأي مركز شمسي أن يوفر طاقة أكثر من الطاقة الساقطة عليه ، ولكن تركيز هذه الطاقة على مساحة صغيرة هي التي تنتج هذه الدرجات الحرارية العالية .



شكل (2-19): أنواع مختلفة من المركزات الشمسية

لقد أنشأت بعض المحطات التجريبية لهذه التقنية في الولايات المتحدة ، كانت إحداها بطاقة 10 ميغاوات في كاليفورنيا (الشكل 2-20)، إذ تم استخدام مرايا متحركة تقوم بتركيز الأشعة على مرجل (سخان) منصوب في أعلى برج . ولغرض العمل في درجات حرارية عالية تصل إلى أكثر من 500 درجة مئوية يتم استخدام نوع خاص من الزيت أو الملح الصخري المذاب ، والمادة الأخيرة أفضل من ناحية انتقال الحرارة وذلك لأن لها سعة حرارية ومعامل توصيل عالياً. والملح الحار يستخدم بعد ذلك لتوليد بخار بدرجة حرارة عالية لتدوير عنفة (توربين) معين . ومن الناحية النظرية فإنّ تسخين الملح خلال النهار يمكن استخدامه لتوليد الطاقة خلال الليل ، ولكن عند التطبيق العملي ينصح باستخدام الغاز الطبيعي لتوليد الكهرباء خلال فترة الليل .

شكل (2-20): محطة توليد كهربائية تستخدم المركزات الشمسية

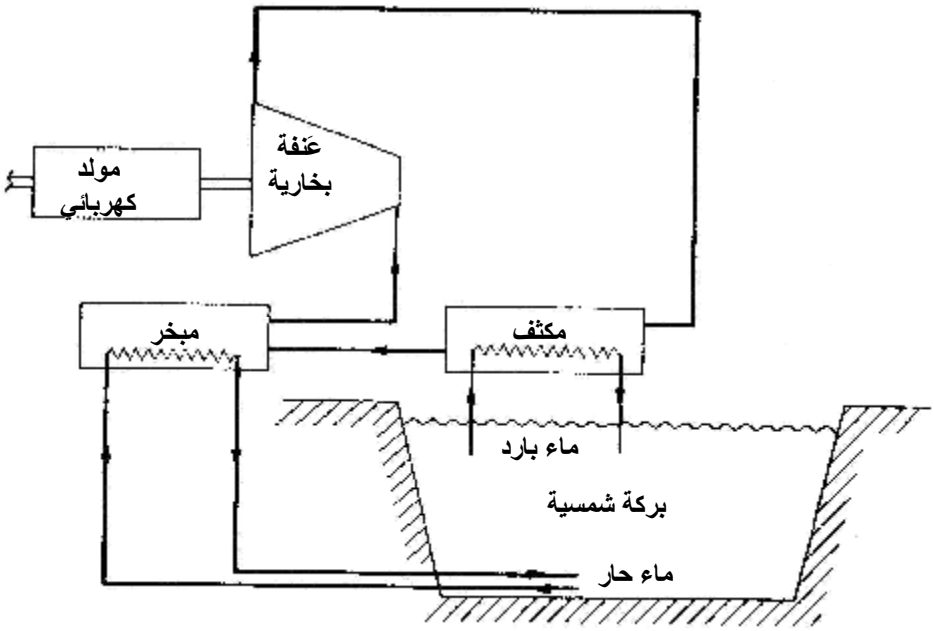
أما المحطة الأخرى فقد تم بناؤها في صحراء كاليفورنيا ما بين 1984 و 1990، إذ شملت تسع منظومات تتراوح سعتها بين 13 و 80 ميغاوات . وتستخدم هذه المنظومات مجمعات ذات قطع اسطواني مكافئ الشكل (2-21) ، وكل منظومة ذات سعة 80 ميغاوات تحتوي على 464 ألف متر مربع من المجمعات . ولقد تم تشييد مثل هذه المجمعات من المحطات في صقلية وإسبانيا وفرنسا .

شكل (2-21): محطة توليد كهربائية تستخدم مجمعات شمسية ذات قطع اسطوانية مكافئه

10-2 استخدام البرك الشمسية لتوليد الطاقة الكهربائية

تتكون البركة الشمسية (Solar Ponds) من بحيرة مالحة ، وتستخدم كنوع من المجمعات الشمسية المسطحة (Flat Plate Collectors) ، كما في الشكل (2-22) . فإذا كان للبحيرة تركيز ملحي مناسب (ماء مالح في القعر وماء حلو في السطح) وكان الماء صافياً بدرجة تكفي للسماح للإشعاع الشمسي بالوصول إلى قعر البركة فإنّه سيتمّ عند ذلك خزن طاقة حرارية مناسبة في المنطقة ذات التركيز الملحي العالي . فالمحلول الملحي الساخن في القعر لا يستطيع أن يرتفع إلى الأعلى لأنه أثقل من الماء الصافي الموجود في السطح ، وبذلك تكون الطبقة السطحية طبقة عازلة للحرارة، وبهذا يمكن أن تصل درجة الحرارة في قعر البركة إلى 90 درجة مئوية . هذه الدرجة كافية لتشغيل عنفة (توربين) ومولد (Generator) يقوم بتوليد الطاقة الكهربائية . إن كفاءة التحويل من الطاقة الشمسية إلى كهرباء في هذه المنظومة قليلة جداً ، وقد تكون حوالي 2 % وذلك لقلة درجة الحرارة . ومن مزايا هذه المنظومات هو أن درجة الحرارة في قاع البحيرة تبقى ثابتة تقريباً خلال الليل والنهار وذلك

لكبر مساحة البحيرة ، ولهذا نستطيع الحصول على طاقة كهربائية مستمرة خلال اليوم . وقد تم تنفيذ بعض المنظومات من هذا النوع في الولايات المتحدة والمملكة العربية السعودية وقطر .

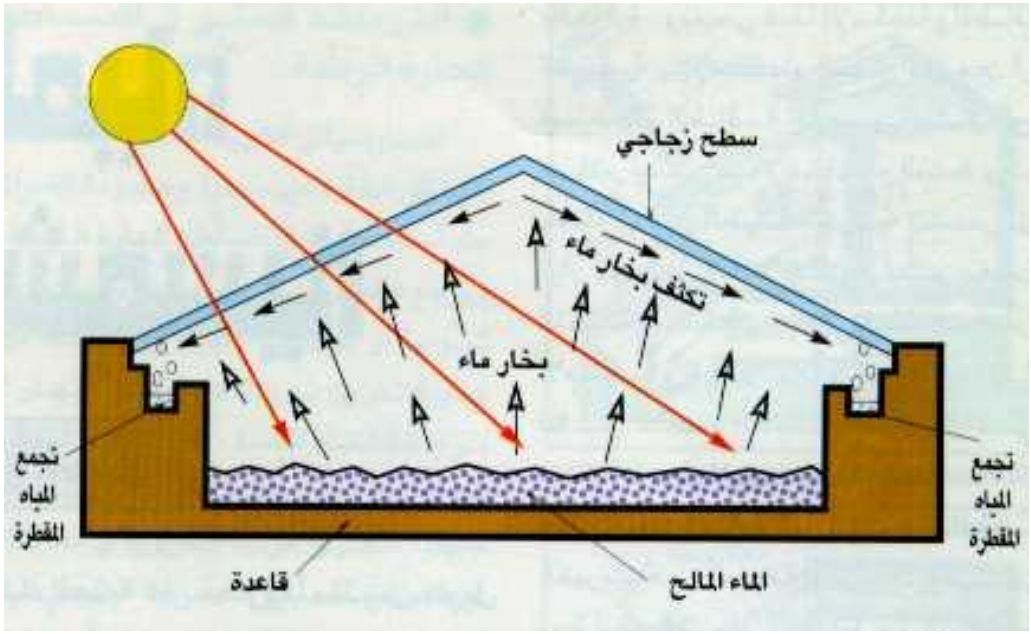


شكل (2-22): بركة شمسية تستخدم لتوليد الطاقة الكهربائية

11-2 استخدام الطاقة الشمسية في تحلية المياه

تعد تحلية المياه إحدى الوسائل الميسرة للنهوض بمستوى المجتمعات والمناطق التي تشكو من ملوحة المياه المفرطة . وتستخدم الطاقة الشمسية لتحلية المياه بطريقتين وفقا لطريقة استخدام الطاقة الشمسية إما بشكل مباشر أو غير مباشر . فطرق التحلية المباشرة تستغل الإشعاع الشمسي لتبخير جزء من المحلول الملحي ثم تكثيفه . ويتم ذلك باستخدام المقطرات البسيطة والتي تتألف عادة من قاعدة حديدية أو بلاستيكية غالبا ما تكون مطلية بصبغة سوداء داكنة لها القابلية على امتصاص أكبر كمية من الإشعاع الشمسي الساقط عليها وغطاء زجاجي مائل باتجاه واحد أو اتجاهين على شكل مثلث كما هو موضح بالشكل (2-23) . ويمكن باختصار شرح طريقة عمل المقطرات الشمسية كما يلي : يمرّ الإشعاع الشمسي خلال السطح الزجاجي إلى الماء المالح الموجود في القاعدة مما يساعد على تبخر جزيئاته وتكثفها على السطح الداخلي للزجاج ، وتتجمع قطرات الماء المتكثفة في القنوات الجانبية للحوض لتصب في وعاء التجميع . ويبلغ متوسط كمية المياه المحلاة 4 لترات في اليوم لكل متر مربع من المقطر

الشمسي. وقد أدخلت تحويرات عديدة على التصميم الأساسي لزيادة كفاءة إنتاجه ولكن إنتاجيته لا تزال تتراوح بين 4-6 لتر يوميا لكل متر مربع . وقد قامت جامعة البحرين باستخدام مثل هذا النظام، وتعكف الآن على تطوير أنظمة أخرى .



شكل (2-23): مخطط مبسط للمقطرات الشمسية الحرارية

أما الطريقة الثانية فتعتمد على إحلال الطاقة الكهربائية المولدة من الطاقة الشمسية محل الطاقة التقليدية لاستخدامها في التقنيات المألوفة للتحلية . ويلاقي هذا النوع إقبالاً كبيراً في الوقت الحاضر نظراً للتقدم العلمي المتواصل في مجال أشباه الموصلات والتي أثبتت فعالية كبيرة في توليد الطاقة الكهربائية التي يمكن استخدامها في منظومات تحلية المياه العاملة بطرق التحليل الكهربائي (الديلزة) والتناضح العكسي والتجميد وغيرها . وقت قامت جامعة البحرين بإنجاز محطة تحلية متنقلة تعمل بمبدأ التناضح العكسي إذ تم استغلال الخلايا الشمسية لتحويل أشعة الشمس إلى كهرباء لتشغيل المضخة التي تدفع الماء المالح إلى أغشية التحلية، وتم إنتاج حوالي 300 غالون يومياً عند استخدام 16 سطح من الخلايا الفولطاضوئية كفاءة كل منها 12% مزودة ببطاريات خزن لاستغلالها ليلاً ، وتقدر تكلفة النظام بحوالي 4000 دينار بحريني .

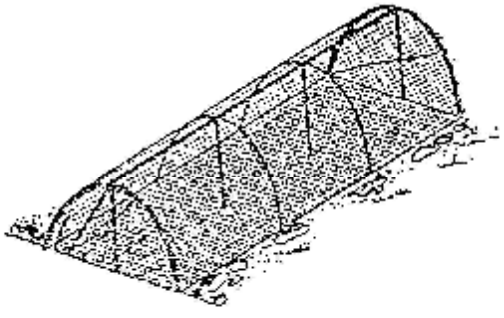
12-2 استخدام الطاقة الشمسية في الزراعة

تعتبر الطاقة أحد المتطلبات الرئيسية للزراعة وتنمية المناطق الريفية. ويستخدم النبات ضوء الشمس وثاني أكسيد الكربون والماء الموجود في البيئة لإنتاج كربوهيـــــدرات

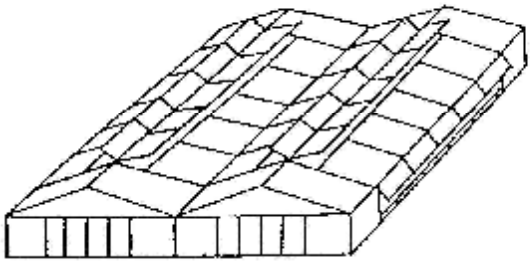
و أوكسجين ، وبذلك تنتج الأوراق الخضراء الغذاء للنبات . أما في الليل فتتم عملية النتح ، وهي عملية معاكسة تماما لما يحدث في النهار إذ يقوم النبات بإطلاق ثاني أكسيد الكربون والماء والطاقة . يمكن أن تقوم مصادر الطاقة المتجددة بحل بعض مشاكل المناطق الريفية حيث يعتبر تحويل المخلفات الزراعية إلى غاز حيوي واحداً من أكثر التدابير غير التقليدية شيوعاً ، كما يلقى استخدام الطاقة الشمسية اهتماماً متزايداً في الوقت الحاضر للأغراض الزراعية وذلك من خلال بيوت الزراعة المحمية ، وضخ المياه ، وتعقيم التربة ، وتجفيف المحاصيل ، وإنتاج الغاز الحيوي .

بيوت الزراعة المحمية

البيت الزراعي المحمي هو حيز محاط بغلاف شفاف (بلاستيك أو زجاج) يعتمد على نظرية حبس أشعة الشمس الساقطة ذات الموجه القصيرة (300 إلى 700 نانومتر) التي تنفذ من خلال الغلاف الشفاف والتي يتم امتصاصها من قبل جزيئات الهواء ، والنباتات ، والمحتويات الموجودة داخل البيت . وبهذا تتحول الأشعة المباشرة إلى طاقة حرارية كامنة فيها تؤدي إلى ارتفاع درجة حرارتها . وتمتاز هذه الحرارة بطول موجتها بحيث لا يمكن فقدانها إلى المحيط الخارجي من خلال الغلاف الشفاف لضعف طاقتها بالإضافة إلى أنّ مواصفات هذا الغلاف هو منع خروج الأشعة الطويلة الموجة ، وبهذا تستمر درجة الحرارة داخل البيت بالارتفاع مادامت كمية الحرارة الناتجة من أشعة الشمس الداخلة إليه أكثر من الفقد الحراري من البيت. ويبين الشكل (2 – 24a, 24b) نموذجيْن لبيت بلاستيكي وبيت زجاجي . وأدى هذا النوع من الزراعة إلى تطور الإنتاج الزراعي والصناعات البلاستيكية من أغطية ، ومنظومات ري بالتنقيط ، ووسائل تغليف وتسويق المحاصيل ، وكذلك إلى تطور الصناعات التكميلية الموافقة ناهيك عن خلق فرص عمل للمواطنين . وأصبحت المردودات الاقتصادية للزراعة المحمية تشكل إحدى الدعامات الأساسية لمكونات الدخل القومي لبعض الدول بالإضافة إلى تأمين الحاجة الغذائية ومضاعفة كمية الإنتاج الزراعي وتحسين نوعيته .



شكل (2-24a): نموذج لبيت بلاستيكي



شكل (2-24b): نموذج لبيت زجاجي

تجفيف المحاصيل الزراعية

يمكن الحفاظ على القيمة الغذائية للفواكه والمحاصيل عند تجفيفها بواسطة الطاقة الشمسية ، هذا بالإضافة إلى نظافة وجودة الفواكه والمحاصيل بعد عملية التجفيف وتقديمها للاستهلاك محافظة على نظارتها الطبيعية في غير مواسمها . وتتكون المجففات الشمسية من ثلاثة أجزاء رئيسية هي وحدة التسخين ، ووحدة التجفيف ، ووحدة تحريك الهواء داخل المجفف . وتختلف هذه الوحدات عن بعضها البعض حسب نوع المجفف وذلك كما يلي :

وحدة التسخين

هو الجزء الذي يستقبل أشعة الشمس ويحتفظ بالطاقة الحرارية اللازمة لتسخين الهواء الذي يمر عليه لينطلق إلى وحدة التجفيف ، لذلك فهو في العادة عبارة عن سطح معدني أو بلاستيكي داكن اللون لامتصاص أكبر قدر ممكن من حرارة الشمس الساقطة عليه مباشرة . ويغطي هذا السطح غلاف شفاف يعمل على رفع درجة الحرارة بالداخل، ثم يمرر عليه الهواء الذي يتجه بعد تسخينه إلى وحدة التجفيف .

وحدة التجفيف

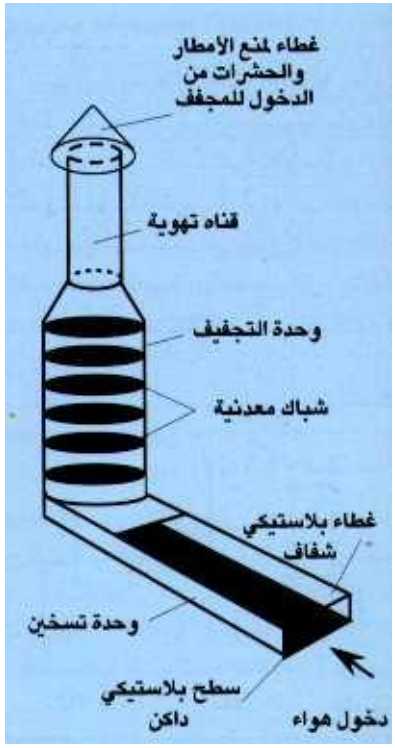
وهي على عدة أشكال حسب نوع المجفف، وقد تشبه في شكلها وتركيبها وحدة التسخين (سطح بلاستيكي أو معدني داكن مغطى بغلاف شفاف) أو قد تكون عبارة عن غرفة بداخلها عدد من الشبابيك المعدنية توضع بها المواد المراد تجفيفها. وللغرفة باب جانبي يفتح عند التعبئة والتفريغ .

وحدة تحريك الهواء

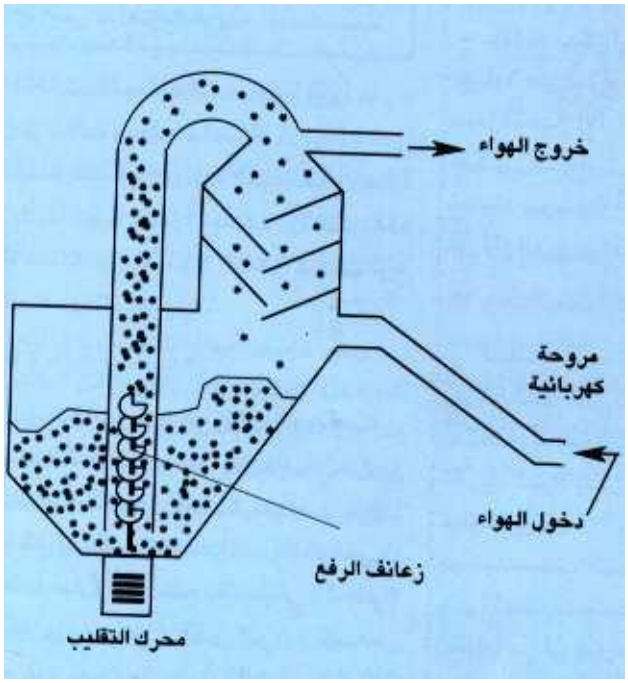
تختلف وحدة تحريك الهواء حسب نوع الطاقة التي تحركها . فعندما يتعذر استخدام الطاقة الكهربائية لتشغيل مراوح تحريك الهواء فإنه يمكن تركيب قناة عمودية تشبه المدخنة في نهاية المجفف تكون مهمتها سحب الهواء المحمل بالرطوبة في المجفف ودفعه إلى الخارج ، وذلك اعتماداً على أن الهواء الحار سيصعد إلى أعلى بسبب قلة كثافته ، مقارنة بالهواء البارد . أما إذا توفر مصدر كهربائي رخيص فإن الوحدة يجب

أن تزود بمروحة تعمل على دفع الهواء. وتدور المروحة إمّا بسرعة ثابتة أو متغيرة عن طريق وحدة تحكم تعمل على تغير سرعتها حسب درجة الحرارة المطلوبة .

وتختلف المجففات الشمسية تبعاً لتنوع المحاصيل الزراعية ، فهنالك مجففات برجية لتجفيف المحاصيل الحقلية (الحبوب والبقول وغيرها) ، وهنالك مجففات مستوية لتجفيف المحاصيل ذات الحجم الكبير (الفواكه والتمور والخضار وغيرها) . ويوضح الشكل (2-25a, 25b) مخططاً لمجففين أحدهما يعمل بالسريان الطبيعي والآخر بالسريان القسري .



شكل (2-25a): مجفف بعمل بالسريان الطبيعي

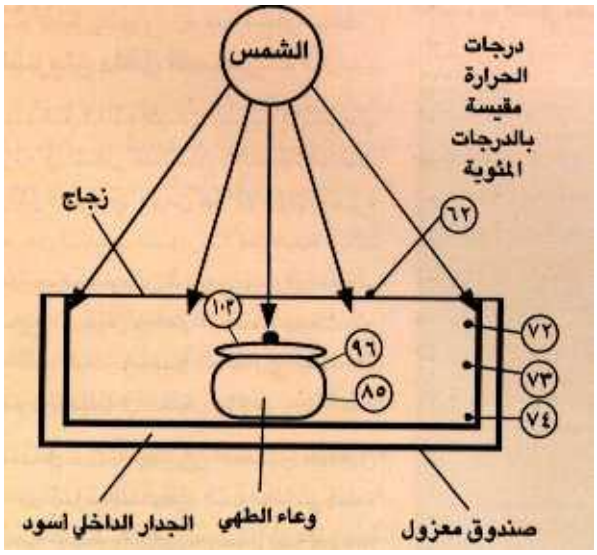


شكل (2-25b): مجفف بعمل بالسريان القسري

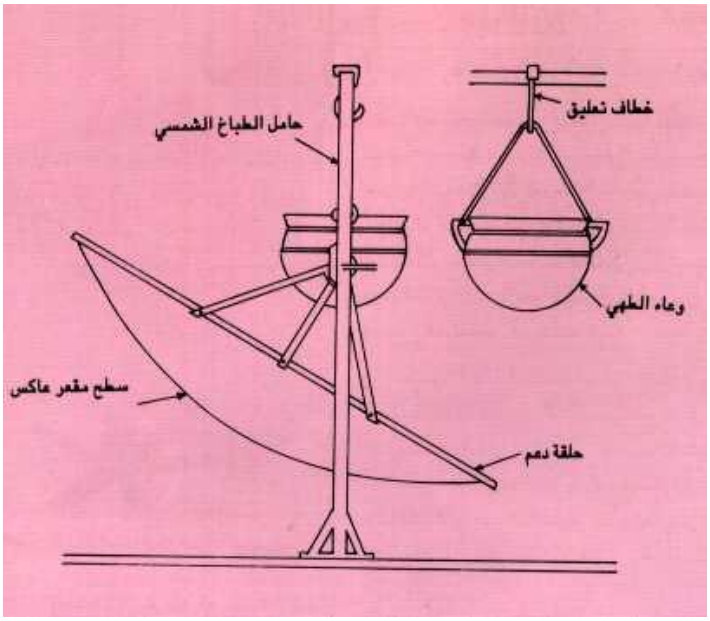
13-2 استخدام الطاقة الشمسية في الطبخ

أدى استخدام الخشب كمصدر للطاقة في المناطق القروية إلى انقراض مساحات كبيرة من الغابات . وقد أصبح هذا الموضوع مشكلة بيئية لا يستهان بها . وإن استخدام الطاقة الشمسية للطهي هو أحد الحلول المهمة لهذه المشكلة خصوصاً أن كلفتها قليلة والحصول عليها يسير جداً . ويعتمد الأساس العلمي للطباخ الشمسي على الاستفادة من مبدأ الاحتباس الحراري الناجم عن سقوط الإشعاع الشمسي وانعكاسه داخل صندوق معزول من جميع جوانبه بعازل حراري جيد عدا الجانب الأعلى المواجه للشمس إذ

يغطى بلوح من الزجاج . كما يتم طلاء أسطحه الداخلية بلون داكن غير لامع لكي يقوم بامتصاص أكبر قدر ممكن من الحرارة (شكل 26a, 26b-2). ويختلف الوقت اللازم لإنضاج الطعام تبعاً لنوعه ، فمثلاً يحتاج الأرز إلى ساعتين ، بينما يحتاج اللحم إلى ثلاث ساعات أو أكثر . ويمكن التحكم ، إلى حد ما ، بدرجات الحرارة في الطباخات الشمسية. فعندما نريد الحصول على درجات حرارة أقل – للمحافظة على سخونة الطعام فقط – فإنه يجب وضع الطباخ بشكل منحرف عن الإشعاع المباشر . وللتقليل من الوقت اللازم للطبخ فقد تم تطوير عدة أنواع من الطباخات منها الطباخ ذو مرآة واحدة ، أو ثلاث مرايا لعكس الأشعة الشمسية على صندوق الطباخ ، والطباخ ذو المجمع البؤري الذي يقوم بتركيز أشعة الشمس باستخدام سطح عاكس لماع على شكل قطع ناقص أو جزء من سطح كروي ، أو عدسة لآمة ذات بعد بؤري مناسب (عدسة فرسنل). وقد يستطيع هذا النوع رفع درجة الحرارة داخل القدر أكثر من 150 درجة مئوية .



شكل (26a-2): طباخ شمسي بسيط



شكل (26b-2): طباخ شمسي ذو مجمع بؤري

مثـــال :

إذا كانت الطاقة اللازمة لطهي بعض الأطعمة هي 150 واط . فما هي مساحة الطباخ الشمسي (بما في ذلك العاكس) اللازمة لاستقبال الإشعاع الشمسي إذا كان الإشعاع في البحرين في منتصف ظهيرة يوم 21 يونيه هو 1100 واط/م^2 وأن 85% من هذه الكمية هي إشعاع مباشر وأن كفاءة الطباخ الشمسي هي 20% ؟

الحــلّ :

مقدار الإشعاع الشمسي المباشر = 0.85 X 1100 = 935 واط/م^2

كمية الطاقة اللازمة للطهي = كمية الإشعاع الشمسي X الكفاءة X المساحة

150 واط = 935 واط X $\frac{0.2}{\text{م}^2}$ X المساحة

∴ المساحة = $\frac{150}{0.2 \text{ X } 935}$ = 0.8 م^2

هذه المساحة مقبولة بالنسبة لطباخ شمسي ، وعليه فإن البحرين مؤهلة لنصب طباخات شمسية على السواحل في المناطق السياحية .

مثــال :

احسب الوقت اللازم لغلي 5 لتر من الماء بدرجة حرارة مقدارها 20 درجة مئوية بالطاقة الشمسية باستخدام الطباخ الشمسي إذا كانت مساحة الطباخ الشمسي هي 1 متر مربع ، وكفاءته تساوي 40% وان الإشعاع الشمسي المباشر الساقط على المنطقة هو 1100 واط/م^2 ؟

الحــل :

كمية الطاقة التي يوفرها الطباخ الشمسي = كمية الإشعاع الشمسي X كفاءة الطباخ X المساحة

= 1100 $\frac{\text{واط}}{\text{م}^2}$ X 1 م^2 X 0.4

= 440 واط (جول/ثانية)

كمية الحرارة اللازمة لتسخين الماء من 20 درجة مئوية إلى 100 درجة مئوية هي :

= كتلة الماء X الحرارة النوعية X الفرق بين درجات الحرارة

= 5 كغ X 4186 $\frac{\text{جول}}{\text{كغ . م}^2}$ X (100 – 20) م

= 3348800 جول

الطاقة اللازمة لتسخين الماء = الطاقة التي يوفرها الطباخ X الزمن

3348800 جول = 440 $\frac{\text{جــول}}{\text{ثانية}}$ X الزمن

الزمن = 7610 ثانية

= 2 . 1 ساعة

أي أن الزمن اللازم لتسخين الماء هو ساعتان و 6 دقائق.

أسئلة تقويمية

1. ما هي أنواع مصادر الطاقة المتجددة . وما هو المصدر الرئيسي لهذه الأنواع ؟
2. كيف يتم توليد الطاقة الشمسية ؟ وكيف تنتقل هذه الطاقة إلى الأرض ؟ وما هي شدة انبعاثها ؟
3. ما هي أنواع وأطوال أمواج الأشعة الشمسية التي تصل إلى الأرض ؟
4. ما المقصود بالإشعاع المباشر والإشعاع المبعثر ؟ وكيف يتم قياسهما ؟
5. عَرف الثابت الشمسي ؟ وما هي قيمته ؟
6. كيف يتم تكون الليل والنهار ، والصيف والشتاء ؟ وفي أي الفصول تكون الأرض قريبة من الشمس ؟ وفي أي الفصول تكون بعيدة عن الشمس ؟ ومتى تتساوى طول ساعات الليل مع طول ساعات النهار ؟
7. عَرف الإعتداليين الربيعي والخريفي . وكذلك الانقلابين الشتوي والصيفي ؟
8. أي نوع من الأشعة يتم امتصاصها من قِبل طبقة الأوزون ؟ وما هي المواد المستخدمة حالياً والتي تؤثر على هذه الطبقة ؟
9. ما هي طرق انتقال الحرارة ؟ وكيف يتم انتقالها حسب كل طريقة ؟
10. ما هي مجالات استخدام الطاقة الشمسية الحرارية ؟
11. ما هي أنواع منظومات تسخين المياه بالطاقة الشمسية ؟
12. ما هي مكونات المجمعات الشمسية ؟ وما هو الفرق بين المجمع الشمسي المائي والمجمع الشمسي الهوائي ؟ وما هي مجالات استخدامهما ؟
13. يعتبر السخان الشمسي من أهم تطبيقات الطاقة الشمسية وأوسعها انتشاراً في معظم أنحاء العالم . ما هي الأسباب التي تؤدي إلى عدم انتشار استخدامه في معظم الدول العربية ؟
14. كيف تتم تدفئة المباني بالطاقة الشمسية ؟ وما هي أنواع المنظومات المستخدمة حالياً ؟
15. ما هي أنواع منظومات التدفئة السلبية بالطاقة الشمسية ؟
16. ما المقصود بظاهرة البيت الزجاجي ؟
17. كيف يتم التبريد بالطاقة الشمسية ؟ وما هي المنظومات المستخدمة في تبريد المباني بالطاقة الشمسية ؟
18. كيف تعمل منظومات التبريد الإمتصاصية ؟ وما الفرق بين المنظومات التي تستخدم محلول الأمونيا والماء أو محلول الليثيوم بروماید والماء ؟
19. ما هي أنواع منظومات التبريد السلبي بالطاقة الشمسية ؟
20. كيف يتم توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية الحرارية ؟
21. ما هي أنواع المركزات الشمسية ؟ وما هي درجات الحرارة التي يمكن الحصول عليها باستخدام هذه الأنواع ؟
22. ما هي البرك الشمسية . وما هي مجالات استخدامها ؟
23. ما هي الطرق التي يمكن فيها استخدام الطاقة الشمسية في تحلية المياه ؟ وما هي المحددات التي تمنع انتشار المقطرات الشمسية البسيطة ؟
24. كيف تتم الاستفادة من الطاقة الشمسية في الزراعة ؟ وما هي المجالات التي يمكن استخدامها فيها ؟
25. كيف يتم تجفيف المحاصيل الزراعية والفواكه باستخدام الطاقة الشمسية ؟
26. ما هي أنواع الطباخات الشمسية ؟ وما هي الدرجات الحرارية التي يمكن الحصول عليها باستخدام هذه الأنواع ؟

الفصل الثالث عشر

اقتصاديات مصادر الطاقة المتجددة

1-13 الطاقة الشمسية الحرارية

- طريقة إعادة المبالغ المصروفة ـ السخان الشمسي
- طريقة إعادة المبالغ المصروفة ـ منظومات التدفئة
- طريقة دورة عمر السخان ـ منظومات التدفئة
- اقتصاديات الطاقة الشمسية الحرارية في توليد الكهرباء

2-13 الخلايا الشمسية الكهروضوئية

3-13 طاقة الرياح

4-13 الكتلة الحيوية

5-13 الطاقة المائية

6-13 طاقة المد والجزر

7-13 طاقة الأمواج وطاقة حرارة المحيطات

8-13 طاقة الحرارة الجوفية

9-13 مقارنة اقتصادية لمختلف مصادر الطاقة في إنتاج الطاقة الكهربائية

1-13 الطاقة الشمسية الحرارية

1-1-13 مقدمـــــة

يعد استغلال الطاقة الشمسية في المجالات الحرارية من اقدم تطبيقات مصادر الطاقة المتجددة وذلك لسهولة وبساطة الاستغلال المباشر لحرارة الشمس في عدد من التطبيقات التي قد تحتاج إلى كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية كتسخين المياه وتدفئة المباني وتدفئة البيوت الزراعية وتجفيف المحاصيل الزراعية.

إن تقنية التسخين بالطاقة الشمسية هي الأكثر استخدماً في مناطق عديدة من العالم وخاصة في منطقة حوض البحر الابيض المتوسط وفي بعض الدول العربية كالاردن ومصر وسوريا وفلسطين ويزداد استخدامها يوماً بعد يوم في المناطق العربية الأخرى.

إذا كان استخدام منظومات التدفئة وتسخين المياه في منطقة ما سيوفر مبالغ للمستهلك فأن النظام سيكون اقتصادي ، وهنالك عدة طرق تستخدم لمعرفة جدوى استخدام هذه المنظومات وهي :

2-1-13 طريقة إعادة المبالغ المصروفة

عند التفكير باستخدام الطاقة الشمسية في تسخين المياه فأن الطريقة العملية الممكن اختيارها لمعرفة الجدوى الاقتصادية هي مقارنة المنظومة مع منظومة تعمل بالوقود التقليدي (سخان كهربائي، سخان غازي، سخان نفطي) . وعلى الرغم من حصولنا على الطاقة الشمسية بدون كلفة إلاّ إن كلفة منظوماتها التي تقوم باستقبال الإشعاع الشمسي وتحويله إلى طاقة مفيدة تكون عالية أحياناً .

وأحد الأمثلة هو استخدام السخان الشمسي ، ولنفرض أن حاجة أسرة مكونة من اربعة اشخاص هي 200 لتر يومياً من الماء (50 لتر يومياً للشخص الواحد) وبدرجة 05 درجة مئوية. وبما أن فترة الحاجة إلى الماء الساخن تتراوح ما بين الفترة سبتمبر ولغاية أبريل (8 اشهر) فأن كمية الحرارة اللازمة تكون :

$$Q = m\, C_\rho\, \Delta T$$

Q = كمية الحرارة المطلوبة بالكيلو جول (KJ)

m = كمية الماء المراد تسخينه بالكيلو جرام (Kg)

C_ρ = الحرارة النوعية $\left(\frac{KJ}{Kg.C_0}\right)$

ΔT = الفرق بين درجات الحرارة للماء المطلوب تسخينه

$$Q = \frac{200\ Kg}{day} \times 4.186\ \frac{KJ}{Kg.C^o} \times (50-20)C^o$$

= 25116 كيلو جول/ يوم

وعليه فأن مجموع كمية الحرارة اللازمة لفترة الشتاء تكون :

$$Q\ (\text{المجموع}) = 25116\left(\frac{KJ}{Day}\right) X 8 X \left(\frac{30day}{Month}\right)$$

$$= 51,627,840\ KJ$$

هنالك ثلاثة حالات يمكن فيها توفير ماء ساخن من مصادر الطاقة التقليدية وهي استخدام السخان الكهربائي والسخان الغازي والسخان النفطي .

أ - استخدام السخان الكهربائي

بما أن كفاءة السخان الكهربائي تعادل تقريباً 100% لان الطاقة الكهربائية في هذه الحالة تتحول جميعها إلى طاقة حرارية .

وعليه تكون الطاقة السنوية اللازمة = $51627840(KJ) X \left(\frac{1}{3600}\right)\left(\frac{hr}{sec}\right)$

$$= 14341\ Kw\text{- }hr$$

واذا افترضنا بان سعر الكيلووات – ساعة هو 8 سنت أمريكي ($0.08) فان الكلفة الكلية لمصاريف الكهرباء لسنة كاملة ستكون :

الكلفة الكلية = 14341×0.08

= $1147 دولار سنوياً

وإذا افترضنا بان سعر سخان شمسي يستطيع توفير كمية الحرارة المطلوبة هو $1500، وبما أن طريقة إعادة المبالغ المصروفة (Pay-back) تنص على أن عدد السنين اللازمة لدفع مصاريف تسخين المياه هي السعر الكلي للمنظومة مقسوماً على كمية

الإدخار . وبما أن السماء لا تكون صافية في معظم الاوقات فان السخان الشمسي يستطيع فقط أن يوفر ما مقداره 80% من الحرارة اللازمة وعليه فان زمن اعادة المبلغ سيكون :

$$\text{الزمن} = \frac{1500}{1147X0.8}$$

$$= 1.7 \text{ سنة} \approx 2 \text{ سنه}$$

وهو الزمن اللازم لتسديد قيمة السخان الشمسي المنصوب بدل سخان كهربائي يعمل بوحدة كهرباء يبلغ سعرها 0.08$ وهذا المبلغ لا يتضمن ارباح الفائدة على المبلغ اذا تم الأقتراض من البنك ولا يتضمن ايضاً مبالغ التشغيل والصيانة والضرائب والاندثار .

ب- استخدام السخان الغازي

عند المقارنة مع السخان الغازي فان كمية الطاقة الكلية السنوية البالغة 51627840 KJ لا تتغير وإنما الذي يتغير هو كلفتها . إذا افترضنا بان سعر الكيلوغرام من الغاز المسال حالياً هو 0.1$ وإن المحتوى الحراري للغاز المسال هو $50X10^6 \frac{J}{Kg}$ وإن كفاءة السخان الغازي تتراوح بين 60%-75% ، وعليه سيكون سعر الطاقة اللازمة للتسخين هو:

$$\text{كمية الغاز المسال اللازمة} = \frac{51627840(KJ)}{50X10^6\left(\frac{J}{Kg}\right)X0.65}$$

$$= 1588.0 \text{ كيلوجرام}$$

$$\text{الكلفة السنوية} = 1588.6 \text{ X } 0.1$$

$$= \$ 158.85$$

$$\text{وعليه فان الزمن اللازم سيكون} = \frac{1500}{158.8X0.8}$$

$$= 11.8 \text{ سنة}$$

$$\approx 12 \text{ سنة}$$

جـ – استخدام السخان النفطي

كمية الطاقة السنوية هي 51627840 KJ ولكن الذي يتغير هو كلفتها ، فإذا افترضنا بان كلفة الكيلوغرام من الكيروسين حالياً هي 0.08$ وإن المحتوى الحراري لنفط التدفئة

المنزلي هو $45X10^6\left(\frac{J}{Kg}\right)$ وان كفاءة السخان النفطي لا تتجاوز 60% فعليه يكون التالي :

$$\text{كمية نفط التدفئة اللازم} = \frac{51627840(KJ)}{45X10^6\left(\frac{J}{Kg}\right)X0.6}$$

$$= 1912.14 \text{ كيلوجرام}$$

$$\text{الكلفة السنوية للنفط} = 1912.14 \text{ x } 0.08$$

$$= 152.97\$ \text{ دولار}$$

$$\text{وعليه فان الزمن اللازم} = \frac{1500}{152.97X0.8}$$

$$= 12.25$$

$$= 13 \text{ سنة}$$

3-1-13 طريقة إعادة المبالغ المصروفة – منظومات التدفئة

تختلف الاحمال الحرارية للأبنية باختلاف موقعها من الوطن العربي وبأختلاف اساليب البناء المتبعة وتحديداً العوازل الحرارية والأساليب السلبية في تقليل حمل التدفئة، ولنفرض بأن أحد أرباب المنازل يدفع سنوياً ما يعادل 800$ لتغطية مصاريف التدفئة، وإن كلفة شراء ونصب منظومة شمسية تقوم بالتدفئة هو ما يعادل 15000$ وإن المنظومة الشمسية تستطيع ان تغطي 80% من الحمل على طول مدار السنة ، وعليه فإن المدة اللازمة لاستعادة المبالغ ستكون :

$$\text{المدة اللازمة لاستعادة المبالغ ستكون} = \frac{15000}{800X0.8}$$

$$= 23.43 \text{ سنة}$$

وقد تبدو هذه المدة طويلة ولهذا السبب فان استخدام الطاقة الشمسية في منظومات التدفئة في الوقت الحاضر في الوطن العربي محدود لان فترة استعادة المبالغ طويلة .

4-1-13 طريقة دورة عمر السخان

في طريقة اعادة المبالغ المصروفة البسيطة يعتبر معدل اعادة الارباح والتضخم معدوماً (يساوي صفر) . ومعظم الاقتصاديين لا يستخدمون هذه الطريقة لأن نتائجها ليست دقيقة بشكل كافي ، وإن طريقة تقدير "كلفة طول فترة العمل" هي وسيلة أكثر دقة لأنها

تأخذ بنظر الأعتبار قيمة الفائدة السنوية والتضخم . فمثلاً إذا كانت كلفة تدفئة بيت كبير هي 1000$ دولار في السنة الأولى . فمستقبلاً نفترض أن أسعار الوقود ستزداد بنسبة 10% سنوياً للسنوات الخمس القادمة ، وعليه فإن السعر:

في السنة الثانية سيكون : 1000 (1+0.1) = 1100$ دولار
وفي السنة الثالثة سيكون : 1000 (1+0.1)(1+0.1) = 1210$ دولار
وفي السنة الرابعة سيكون : 1000 (1+0.1) (1+0.1)(1+0.1) = 1331$ دولار
وفي السنة الخامسة سيكون : 1000 (1+0.1) (1+0.1) (1+0.1)(1+0.1) = 1464$ دولار

وعليه فإن سعر الوقود للسنوات الخمس القادمة سيكون مساوياً لـ :

1000 + 1100 + 1210 + 1331 + 1464 = 6105$ دولار أمريكي

وهذا ما يسمى بالكمية المساوية بالوقت الحاضر أو القيمة الحالية.

ولدفع قوائم التدفئة للسنوات الخمس القادمة يتوجب فرض 10% كمقدار للزيادة السنوية لأسعار الوقود .

مثال:

إذا كانت كلفة تدفئة منزل هي 1000$ لهذه السنة ، فما هي الكلفة الكلية للتدفئة خلال السنوات الخمس القادمة إذا كانت الزيادة السنوية بأسعار الوقود هي 10% ؟

المعادلة الرياضية اللازمة لإنجاز الحسابات التالية هي :

$$\frac{A}{i}\left[(1 + i)^n - 1 \right] = \rho$$

ρ = المبلغ الكلي بقيمته الحالية
A = المصروفات السنوية
i = معدل التضخم
n = عدد السنين

فإذا كانت قيمة الوقود الحالية (A) هي 1000$ ومعدل الزيادة السنوية (التضخم) هي 10%، فإن المبلغ المدفوع (ρ) خلال السنوات الخمس القادمة سيكون :

$$\frac{1000}{0.1}\left[(1 + 0.1)^5 - 1 \right] = \rho$$

= 6015$ دولاراً

والمبلغ أعلاه (6015$ دولاراً) هو المبلغ المطلوب الآن لدفع قوائم الوقود للسنوات الخمس القادمة . وليس من المعقول أن يقوم الشخص بوضع مبلغ على حدة ليتم دفع الكمية المطلوبة سنوياً ، ولكن يجب أن يتم الاستفادة من هذا المبلغ . ولنفرض أن بالإمكان وضعه في حساب توفير بالبنك بفائدة مقدارها 6% للسنوات الخمس القادمة، ولنفرض بان قائمة التدفئة تدفع في نهاية كل سنة ، وبهذا يمكن تعديل المعادلة الرياضية كما يلي :

$$\frac{A}{i - d}\left[\left(\frac{1 + i}{1 + d}\right)^{n} - 1\right] = \rho$$

حيث d هي الفائدة السنوية عن وضع المبالغ بالمصرف ، وعليه سيكون المبلغ الكلي المدفوع كما يلي :

$$\frac{1000}{(0.1 - 0.06)}\left[\left(\frac{1 + 0.1}{1 + 0.06}\right)^{5} - 1\right] = \rho$$

$$\$5087 =$$

5-1-13 اقتصاديات الطاقة الشمسية الحرارية في توليد الكهرباء

يعّد استخدام الطاقة الشمسية الحرارية في توليد الكهرباء من المجالات الحديثة التي لاتزال في مرحلة البحث والتطوير . ونظراً إلى أهمية هذا المجال فقد بدئ في تطويره بصورة جدية في نهاية السبعينات من هذا القرن عن طريق إقامة مجموعة من المحطات الشمسية الحرارية في عدد من الدول الصناعية كالولايات المتحدة وفرنسا واليابان . وقد أسفرت نتائج الدارسات والبحث عن إمكانية خفض تكاليف إنتاج الطاقة الكهربائية من محطات الطاقة الشمسية الحرارية الحديثة بنسبة عالية قد تصل إلى 80% مقارنة بتكلفتها من المحطات السابقة التي أنشئت لأغراض البحث والتطوير . وعند مقارنة كلفة إنتاج الطاقة الكهربائية من مصادرها التقليدية المعروفة مع تكاليف إنتاجها من الطاقة الشمسية الحرارية يتضح عدم جدوى استغلال الطاقة الشمسية في الوقت الحاضر استناداً إلى كلفتها الأولية العالية .

أما إذا أضفنا عناصر أخرى غير الكلفة المباشرة إلى الطاقة المنتجة من مصادر الطاقة التقليدية مثل تكاليف الحد من تأثيرها على البيئة والمجتمع - وهذه التكاليف شبه معدومة- في حالة استخدام منظومات الطاقة الشمسية إذ أن تأثيرها على البيئة محدود جداً أو إمكانية تصدير كميات الوقود التي يمكن تلبيتها باستخدام الطاقة الشمسية فإن الصورة ستختلف نوعا ما .

2-13 الخلايا الشمسية الكهروضوئية

يتم توليد الطاقة الكهربائية من التحويل المباشر للطاقة الشمسية الضوئية باستخدام الخلايا الشمسية التي تتميز بعمر زمني طويل (أكثر من 20 عاماً) وبتكاليف تشغيل وصيانة منخفضة ، وتعمل دون حدوث حركة أو ضوضاء فضلاً عن عدم تلويثها للبيئة على حسب معرفتنا الحالية . ونظراً إلى التكاليف العالية اللازمة لإنشاء المحطات الكهروضوئية فإنه تجري الآن العديد من البحوث والدارسات التي تهدف بصفة رئيسية إلى خفض تلك الكلفة عن طريق تحسين كفاءة تحويل الخلايا والنظم الكهروضوئيه وذلك بمعالجة تركيبها وخفض كلفة تصنيعها واستخدام عناصر جديدة من أشباه الموصلات. وعلى الرغم من إدخال بعض التحسينات والتطوير على الخلايا الكهروضوئية إلاَّ أن كفاءة تحويلها من طاقة ضوئية إلى طاقة كهربائية لا تزال محدودة ولم تتجاوز 20% على النطاق التجاري .

ويمكن الاستفادة بصورة عملية من الخلايا الشمسية في تطبيقات عديدة في المناطق النائية التي تكون فيها كلفة مد شبكات الطاقة الكهربائية مكلفة ، إذ تكون فيها كلفة بناء محطات أو توفير مولدات خاصة لهذه المناطق عالية عند تشغليها وصيانتها .

وتتوقف كلفة إنتاج الكهرباء من الخلايا الشمسية على عدة عوامل أهمها تكاليف إنشاء المحطة ، والعمر الافتراضي لها ، وتكاليف التشغيل والصيانة، وتكاليف تخزين الطاقة الكهربائية المولدة ، وقدرة المحطة ، ونوع الخلايا المستخدمة ، وأسس تصميم المحطة، إضافة إلى معدل الإشعاع الشمسي الساقط ، وظروف البيئة ، والعائد المادي من رأس المال المستثمر .

ويبين الجدول (13-1) التكاليف الكاملة للمنظومات (الإنشاء والتشغيل والصيانة) ومعدل تكاليف إنتاج الطاقة الكهربائية لعام 1994.

جدول (13-1) تكاليف إنتاج الطاقة الكهربائية من بعض الخلايا الشمسية للعام 1994

المصدر	كفاءة التحويل (%)		تكاليف الإنشاء (دولار/ مترمربع)		تكاليف التشغيل والصيانة (دولار/كيلووات – ساعة)	كلفة إنتاج الطاقة الكهربائية (دولار/كيلووات)
	خلايا	نظام	خلايا	ملحقات		
- خلايا سليكونيه أحادية البلورية	15.0	11.5	300.0	50.0	0.15	0.28
- خلايا سليكونية متعددة البلورات (1)	14.0	10.8	260.0	50.0	0.15	0.27
- خلايا سليكونية متعددة البلورات (2)	15.0	11.5	200.0	50.0	0.15	0.21
- خلايا أفلام السليكون الرقيقة	10.0	7.7	150.0	50.0	0.15	0.13
- محطة سعه 1MW (أحادية المحور)	10.0	7.7	160.0	50.0	0.24	0.27
- محطة سعة 10MW (أحادية المحور)	10.0	7.7.4	60.0	50.0	0.24	0.14
- محطة سعة 1MW (ثنائية المحور)	20.0	15.4	250.0	100.0	0.24	0.21
- محطة سعة 10MW (ثنائية المحور)	20.0	15.4	150.0	100.0	0.24	0.16

ويتضح من الجدول أن كُلفة إنتاج الطاقة الكهربائية من هذه المصادر لا تزال عالية مقارنة مع كلفة إنتاج المصادر التقليدية الأخرى والتي يتراوح بين 0.04$ و0.08 دولار. إلاّ أنه مع تطور تقنية الخلايا الشمسية والنظم الكهروضوئية فإن كلفة الطاقة الكهربائية المولدة من الطاقة الشمسية سوف تنخفض إلى الحد الذي قد يسمح باستغلالها اقتصادياً .

3-13 طاقة الرياح

إن التقدير الاقتصادي لطاقة الرياح يتضمن عدة عوامل أهمها ما يلي :

أ - الطاقة الكهربائية السنوية المولدة من طاقة الرياح .

ب - الكلفة الاستثمارية للمحطة .

جـ - معدل الرأسمال السنوي (محسوب بواسطة تحويل الكلفة الاستثمارية مضافاً اليها الفائدة السنوية) .

د - مدة المقاولة التي تتضمن شراء أجهزة توليد الطاقة .

هـ - عدد السنوات التي يتم خلالها إعادة مبلغ رأس المال .

و - كلفة الصيانة والتشغيل .

والطريقة التي يمكن بها حساب الكلفة هي التالية :

الكلفة لوحدة الطاقة الكهربائية المولدة من طاقة الرياح يمكن تقديرها باستخدام المعادلة التالية :

$$CR\backslash E + M = g$$

g = كلفة وحدة الطاقة المولدة من طاقة الرياح

C = الرأسمال المستثمر

R = معامل استرداد الرأسمال

E = الطاقة السنوية المولدة من المنظومة

M = كلفة الصيانة والتشغيل لوحدة الطاقة المولدة

ويمكن حساب R من المعادلة التالية :

$$R = \frac{X}{1-(1+X)^{-n}}$$

حيث X = المعدل السنوي المطلوب للتضخم

n = عدد السنين التي يمكن بها تغطية الكلفة

أما الطاقة بالكيلوواط - ساعة فيمكن حسابها باستخدام المعادلة التالية :

$$(H \times P_r \times F)\ T = E$$

حيث H = عدد الساعات بالسنة (h = 8760 hr/yr)

Pr = معدل القدرة لكل مروحة (كيلوواط)

F = معامل السعة السنوية للعَنفة (التوربين)

T = عدد المراوح

وتحسب كلفة الصيانة M كالتالي :

$$KC \backslash E = M$$

حيث K = معامل تمثيل كلفة التشغيل السنوية لمزرعة الرياح كجزء من الكلفة الكلية وتساوي 0.025 أو 2.5% من الكلفة حسب تقدير جمعية طاقة الرياح الأوروبية .

ويتضح من السابق أن الطاقة السنوية المولدة من عَنفة (توربين) الرياح تعتمد على منحنى الطاقة ، وسرعة الرياح للعَنفة (التوربين) ، ومعدل تذبذب سرعة الرياح بالموقع وقت عمل العَنفة (التوربين) .

أما معامل السعة فهو مصطلح يستخدم بكثرة لتوضيح إنتاجية محطة توليد لفترة معينة من الزمن . فإذا استطاع توربين أن يعمل خلال السنة فإن له معامل سعة يعادل 1.0(100%) . ولكن في الحقيقة لا يمكن أن تكون سرعة الرياح ثابتة وفي سرعتها القصوى دائماً خلال السنة ، ولهذا فإن للعَنفة (التوربين) معامل سعة أقل من 1.0 دائماً، وفي أفضل المواقع يتراوح معامل السعة بين 0.3 و 0.4 .

والسعر الاستثماري لتوربينات الرياح يتراوح من 500$ إلى 900 دولار أو ما يعادله للكيلوواط المنتج ، أو ما يقارب 450 $ إلى 650$ في المتر المربع من مساحة الجزء الدوار .

ولعَنفات (لتوربينات) رياح تصل زمن عملها بين 20 و15 عاماً ، وفي مناطق ذات سرعة رياح عالية فإن الطاقة المولدة منها تكون منافسة للطاقة المولدة من المصادر التقليدية.

4-13 الكتلة الحيوية

في بعض دول أوربا يوجد سوق متنامٍ للهاضمات . ففي الدنمارك توصل البرنامج الحكومي لدراسة اقتصاديات الهاضمات بعد ستة أعوام من التجارب إلى أن محطات إنتاج الغاز الحيوي من المخلفات تكون اقتصادية إذا تم بناؤها وفق التكنولوجيا المتوفرة شريطة استيفاء الشروط الثلاثة التالية :

أ - أن يتم بيع الغاز بأسعار مقاربة لأسعار الغاز الطبيعي .
ب - أن تعمل محطة الغاز الحيوي على إنتاج الحرارة والطاقة .
جـ - أن يتم استخدام المواد العضوية من مخلفات المصانع .

ومن الأمثلة على اقتصاديات الغاز الحيوي قرية بيورا (Pura) في جنوب الهند التي تقوم محطة إنتاج الغاز الحيوي فيها بتزويد غاز الميثان لمولد سعته 5 كيلووات من

الكهرباء يستخدم للإنارة وتشغيل مضخات المياه. وبعد أربع سنوات من العمل كانت كلفة الطاقة الكهربائية 0.25 دولار للكيلووات – ساعة ، وهذا السعر عالٍ نوعا ما عند مقارنته بسعر الكهرباء الواصل من الشبكة الكهربائية. ولكن دراسة أخرى بينت أن استخدام فضلات الحيوانات يمكن أن يزيد من كمية الغاز ويقلل السعر إلى النصف .
وبالنسبة إلى الطاقة المستخلصة من الخشب فإن التقدير الاقتصادي للخشب المزروع في مزارع غير اعتيادية في شمال شرقي البرازيل ، والتي يكون فيها إنتاج الخشب غير مثالي لعدم توفر المياه الكافية ، يتبين منه أن الخشب يمكن أن ينتج طاقة بسعر 1.4$ لكل جيغا جول، وهذا السعر منخفض جداً نتيجة للخبرة المتراكمة في هذا النوع من الزراعة وقلة أجور العمالة ، كما أنه سعرٌ أقل بكثير من الأسعار العالمية التي قد تصل في أمريكا إلى ما بين 3.9 و2.7$ لكل جيغاجول ، ومن المتوقع أن ينخفض السعر إلى ما بين 2.7 و1.9$ لكل جيغاجول في عام 2010 .

و بالنسبة إلى فضلات الغابات ، ففي النمسا تتوفر بقايا الأخشاب والأغصان بأسعار رخيصة تعادل 5.95$ للمتر المكعب من الخشب الجاف أو حوالى 1.05$ لكل جيغا جول ، وذلك نتيجة لتراكم نفايات الغابات .

أما بالنسبة إلى توليد الطاقة الكهربائية فيعتمد سوق استخدام مصادر الكتلة الحيوية على كفاءة التحويل التي يمكن الوصول إليها بوجود التقنيات الحديثة . ففي المملكة المتحدة بلغت كلفة الكيلوواط – ساعة المولدة من غاز نفايات المطامر 0.085$ بينما بلغت كلفة الكيلوواط من الطاقة المولدة من النفايات الصلبة حوالي 0.1$ ، وقد نزلت هذه الكلفة في عام 1994 إلى 0.056$ و 0.0576$. وهذه المبالغ قليلة مقارنة بما كانت عليه كلفة الطاقة الكهربائية المولدة من توربينات تعمل بمحارق الخشب والتي بلغت حوالي 0.13$ لكل كيلوواط – ساعة .

وأما بالنسبة للايثانول المنتج في البرازيل فإن كلفة إنتاجه تختلف باختلاف المنطقة وإدارة المواقع ، وقد وصلت في ولاية سانت باولو إلى 0.185$ لكل لتر أي مايعادل 7.9$ لكل جيغا جول ، ويمكن أن ينزل إلى 0.15$ لكل لتر بعد فترة وجيزة .

5-13 الطاقة المائية

تختلف مصادر الطاقة المائية عن مصادر الطاقة المتجددة الأخرى لأنها متطورة جداً من الناحية التقنية. ولحساب سعر الوحدة الكهربائية المنتجة من هذه المحطات يجب أن نقوم بتقدير ما يلي:

أ - الكلفة الاستثمارية والمدة اللازمة للإنشاء .
ب - الكلفة السنوية للتشغيل والصيانة .
جـ - معامل الحمل خلال عمر المحطة .
د - معدل التخفيض المناسب .

ويمكن تقدير السعر إذا افترضنا أن كلفة تشغيل مثل هذه المحطات قليلة مقارنة بالكلفة الاستثمارية ، وأن معامل الحمل يبقى ثابتاً خلال عمر المحطة . وفي هذه الحالة يمكن تقدير سعر الكيلووات – ساعة كما يلي :

عند معرفة الكلفة الاستثمارية اللازمة للمحطة يمكننا تخمين كلفة الطاقة المولدة بالكيلووات – ساعة . وبما أنه لا توجد مصروفات للوقود ، وأن كلفة الصيانة والتشغيل قليلة جداً مقارنة بالكلفة الأولية ، فإنه يمكن أن نرمز للكلفة الأولية لكل كيلوواط – ساعة بالرمز C$ (دولار لكل كيلوواط - ساعة) . وهناك متغيرات أخرى كعامل الحمل ، والذي يمكن أن نعتبره 0.4 خلال عمر المحطة الكلي . وبما أن هنالك 8760 ساعة في السنة ، فانّ كل كيلووات منصوب يستطيع توليد 3500 كيلووات – ساعة في السنة. يمكننا أن نفترض أن عمر المحطة سيكون 50 عاماً ، لذا فان إنتاج الكيلوواط المنصوب سيكون 175000 كيلوواط – ساعة طيلة عمر المحطة .

وإذا افترضنا ، كمحاولة أولى ، أن كلفة الكيلوواط – ساعة يمكن تقديرها من الكلفة الأولية للكيلووات المنصوب مقسوماً على عدد الكيلووات – ساعة التي ينتجها كل كيلووات منصوب خلال عمر المحطة ، وإذا كان سعر الكلفة الأولية للكيلوواط المنصوب هو1500$ للكيلوواط فإن كلفة الكيلوواط – ساعة سيكون 0.085$. وهذا هو تقدير أولي يمكن أن يكون بعيداً عن الحقيقة في معظم الأحيان ، لأن كلفة الطاقة المولدة من الطاقة المائية أرخص من الرقم المذكور أعلاه . وعلى سبيل المثال فإن المحطة

الكبيرة المنصوبة في سكوتلندا كان سعر الوحدة المنتجة فيها في عام 1994 هو $0.025 لكل كيلوواط – ساعة .

6-13 طاقة المد والجزر

إن حساب اقتصاديات طاقة المد والجزر معقدة ، ومن الصعب الحصول على منح أو قروض لتمويل مثل هذه المحطات وذلك لكون أسعار الطاقة المنتجة من هذا المصدر أعلى من سعر الطاقة المولدة من المصادر التقليدية . ولكن عندما تزداد أسعار مشتقات الطاقة التقليدية فإنه يمكن أن يكون لهذا المصدر جاذبية اقتصادية . أمّا في الظروف الحالية فإن هذا المصدر يبدو بعيداً عن التطبيق التجاري .

7-13 طاقة الأمواج وطاقة حرارة المحيطات

إن طاقة الأمواج وحرارة المحيطات تتمّيز ، كبقية مصادر الطاقة المتجددة الأخرى، بكلفتها الاستثمارية الأولية العالية . وهذه الكلفة الأولية العالية ناتجة من الحاجة إلى بناء هياكل كبيرة لاحتواء كامل الموجة التي ينتج عنها استخلاص أكبر كمية ممكنة من الطاقة في حالة طاقة الأمواج ، ولاحتواء التوربينات والمبادلات الحرارية وغيرها في حالة حرارة المحيطات . وتتراوح الكلفة السنوية للتشغيل والصيانة لهذا النوع من المحطات بين 3% و 8% من الكلفة الأولية . وهذه المصادر ، كغيرها من مصادر الطاقة المتجددة ، لا يكون استخدامها اقتصادياً إلاّ إذا نزلت كلفة الكيلوواط إلى أقل من $1500 دولار .

ومن المشاكل المترتبة على الكلفة الأولية العالية أن استعادة النفقات تستغرق مدة طويلة، وهذا عامل غير مشجع للحكومات والمستثمرين لتوظيف أموالهم في هذا الاتجاه .

ومن الاعتبارات المهّمة كثافة الطاقة من هذه المصادر ، وأسعار مصادر الطاقة التقليدية ، وإمكانية الاستخدام ، ومن الاعتبارات المهمة وهذه بالطبع تختلف من بلد إلى آخر . وبناءً على ذلك فإن تقدير اقتصاديات هذا المصدر يختلف من بلد الى آخر.

8-13 طاقة الحرارة الجوفية

تعتبر طاقة الحرارة الجوفية من أكثر الطاقات الواعدة والتي شهدت نمواً سريعاً في استخدامها . ومن أسباب نمّو هذه التقنية العوامل البيئية ، والكلفة المعقولة في بعض استخداماتها ، بالإضافة إلى كمية الحرارة المستخرجة . فحقول الماء الحار هي أحد الأمثلة الجيدة على هذا النمو ، إذ انخفضت كلفتها الأولية من 3000$ دولار في السنة للسعة بالكيلوواط إلى 2600$ دولار خلال عقد واحد فقط ، وانخفضت كلفة الصيانة من 0.04$ دولار إلى 0.022$ دولار ، بينما انخفض سعر الكيلوواط – ساعة المنتج من 0.085 إلى 0.057$ دولار في هذه الفترة . ومن المحتمل أن ينخفض سعر الكيلوواط – ساعة إلى أقل من 0.048$ دولار خلال السنين القادمة. أما بالنسبة إلى اقتصاديات المصادر الجوفية ذات الحقول التي تحتوي على طاقة قليلة فإنهّا تعتمد على عدة عوامل سياسية واقتصادية مثل توفر مصادر الطاقة التقليدية وأسعارها ورغبة الحكومات في الاستثمار في مصادر الطاقة المتجددة ودرجة أهمية المحافظة على البيئة من منطقة ما .

9-13 مقارنة اقتصادية لمختلف مصادر الطاقة في إنتاج الطاقة الكهربائية

تتوقف تكلفة استغلال مصادر الطاقة المتجددة على عدة عوامل أهمها تكاليف نصب وإنشاء المنظومات ، وعمرها الافتراضي ، وتكاليف التشغيل والصيانة والخزن ، وقدرة المنظومة ، وكفاءة التحويل ، والظروف البيئية ، والعائد المادي من رأس المال . وعلى الرغم من قلة فرص الاستغلال الاقتصادي لمصادر الطاقة المتجددة في الوقت الحاضر فإنه أمكن استخدامها بصورة واسعة في عدة مجالات كطاقة المساقط المائية ، وطاقة الرياح ، والطاقة الشمسية الكهروضوئية ، والطاقة الشمسية الحرارية .

ويبين الجدول (13-2) مقارنة لأسعار النصب والطاقة الكهربائية المنتجة لمختلف منظومات الطاقة التقليدية والطاقة المتجددة وذلك للحصول على صورة كاملة للطاقة الكهربائية المولدة من مصادر الطاقة المتجددة مقارنة بالطاقة الكهربائية المولدة حالياً من مصادر الطاقة التقليدية .

ويتضح من الجدول أدناه أن تكلفة إنتاج الكيلووات – ساعة من الطاقة الكهربائية من المصادر التقليدية لا تزال أقل من كلفته من المصادر المتجددة . والمصدر المتجدد الوحيد المنافس في الوقت الحاضر هو الطاقة المائية .

جدول (13-2) : مقارنة اقتصادية لمختلف مصادر الطاقة في مجال إنتاج الطاقة الكهربائية

المصـــــــــدر	كلفة النصب دولار/كيلووات	كلفة التشغيل والصيانة سنت/كيلووات – ساعة	كلفة الطاقة الكهربائية المولدة سنت/كيلووات – ساعة
طاقة المساقط المائية	2000 – 6000		8 – 2
طاقة الرياح	1000 – 800	0.1 – 0.05	7 – 5
الطاقـــة الكهروضـــوئية (خلايـــا الـــسليكون الأحـــادي والمتعـــدد البلورات)	4500 – 3900		
الطاقـــة الكهروضـــوئية (خلايـــا الأغشية الرقيقة)	2000		
الطاقـــة الكهروضـــوئية (كلفـــة المنظومة)	14000-11000		75 – 50
الطاقـــة الشمـــسية – المركـــزات الشمسية (80 ميغاوات)	3500 – 2800		17 – 12
الكتلة الحيوية (الحرق المباشر)	2500		14
الكتلة الحيوية (التقنيات الحديثة)	2500 – 400		10 – 6
الحرارة الجوفية (محطات تجارية)	1700 – 1600		
الحـرارة الجوفيـة (محطـات ميـاه حارة)	2500 – 2400		8 – 6.2
طاقة المد والجزر	1800		8
حرارة المحيطات	10000	1	25 – 12
الطاقة النووية (1000ميغاواط)	2300 – 2100		4-2
محطات غازية	650 – 450	0.35	4 – 3
محطـات بخاريـة (تعمـل بـالفحم الحجري)	1500 – 1200	2 – 1.5	10 – 5

أسئلة تقويمية

1. يعد استغلال الطاقة الشمسية في مجال تسخين المياه من أكثر التطبيقات انتشاراً في مختلف دول العالم . ما هو سبب عدم انتشار هذه المنظومات في معظم الدول الغربية؟
2. أيهما أقل كلفة توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية من الطرق الحرارية أم إستخدام الخلايا الشمسية الفولطاضوئية؟
3. ما هي أفضل الطرق المستخدمة في توليد الطاقة الكهربائية من مصادر طاقة الكتلة الحيوية من الناحية الإقتصادية ؟
4. كما هو معروف بأن كلفة الطاقة الكهربائية المولدة من الطاقة المائية رخيصة جداً . فما هي حدود استخدام هذه التقنية ؟
5. إن طاقة المد والجزر وطاقة الأمواج من الطاقات المتجددة الواعدة . ما هي حدود استغلالهما لإنتاج الطاقة الكهربائية ؟
6. أي التقنيات في مجال الطاقة المتجددة هي الأفضل استخداماً للوطن العربي ؟ صنف أفضلية كل تقنية لكل دولة عربية حسب مناخها وطبيعتها الجغرافية ؟

الفصل الثالث عشر

اقتصاديات مصادر الطاقة المتجددة

1-13 الطاقة الشمسية الحرارية

- طريقة إعادة المبالغ المصروفة ـ السخان الشمسي
- طريقة إعادة المبالغ المصروفة ـ منظومات التدفئة
- طريقة دورة عمر السخان ـ منظومات التدفئة
- اقتصاديات الطاقة الشمسية الحرارية في توليد الكهرباء

2-13 الخلايا الشمسية الكهروضوئية

3-13 طاقة الرياح

4-13 الكتلة الحيوية

5-13 الطاقة المائية

6-13 طاقة المد والجزر

7-13 طاقة الأمواج وطاقة حرارة المحيطات

8-13 طاقة الحرارة الجوفية

9-13 مقارنة اقتصادية لمختلف مصادر الطاقة في إنتاج الطاقة الكهربائية

1-13 الطاقة الشمسية الحرارية

1-1-13 مقدمـــــة

يعد استغلال الطاقة الشمسية في المجالات الحرارية من اقدم تطبيقات مصادر الطاقة المتجددة وذلك لسهولة وبساطة الاستغلال المباشر لحرارة الشمس في عدد من التطبيقات التي قد تحتاج إلى كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية كتسخين المياه وتدفئة المباني وتدفئة البيوت الزراعية وتجفيف المحاصيل الزراعية.

إن تقنية التسخين بالطاقة الشمسية هي الأكثر استخدماً في مناطق عديدة من العالم وخاصة في منطقة حوض البحر الابيض المتوسط وفي بعض الدول العربية كالاردن ومصر وسوريا وفلسطين ويزداد استخدامها يوماً بعد يوم في المناطق العربية الأخرى.

إذا كان استخدام منظومات التدفئة وتسخين المياه في منطقة ما سيوفر مبالغ للمستهلك فأن النظام سيكون اقتصادي ، وهنالك عدة طرق تستخدم لمعرفة جدوى استخدام هذه المنظومات وهي :

2-1-13 طريقة إعادة المبالغ المصروفة

عند التفكير باستخدام الطاقة الشمسية في تسخين المياه فأن الطريقة العملية الممكن اختيارها لمعرفة الجدوى الاقتصادية هي مقارنة المنظومة مع منظومة تعمل بالوقود التقليدي (سخان كهربائي، سخان غازي، سخان نفطي) . وعلى الرغم من حصولنا على الطاقة الشمسية بدون كلفة إلاّ إن كلفة منظوماتها التي تقوم باستقبال الإشعاع الشمسي وتحويله إلى طاقة مفيدة تكون عالية أحياناً .

وأحد الأمثلة هو استخدام السخان الشمسي ، ولنفرض أن حاجة أسرة مكونة من اربعة اشخاص هي 200 لتر يومياً من الماء (50 لتر يومياً للشخص الواحد) وبدرجة 05 درجة مئوية. وبما أن فترة الحاجة إلى الماء الساخن تتراوح ما بين الفترة سبتمبر ولغاية أبريل (8 اشهر) فأن كمية الحرارة اللازمة تكون :

$$Q = m\, C_\rho\, \Delta T$$

Q = كمية الحرارة المطلوبة بالكيلو جول (KJ)

m = كمية الماء المراد تسخينه بالكيلو جرام (Kg)

C_ρ = الحرارة النوعية $\left(\frac{KJ}{Kg.C_0}\right)$

ΔT = الفرق بين درجات الحرارة للماء المطلوب تسخينه

$$Q = \frac{200\ Kg}{day} \times 4.186\ \frac{KJ}{Kg.C^o} \times (50-20)C^o$$

= 25116 كيلو جول/ يوم

وعليه فأن مجموع كمية الحرارة اللازمة لفترة الشتاء تكون :

$$Q\ (\text{المجموع}) = 25116\left(\frac{KJ}{Day}\right) X 8 X \left(\frac{30day}{Month}\right)$$

$$= 51,627,840\ KJ$$

هنالك ثلاثة حالات يمكن فيها توفير ماء ساخن من مصادر الطاقة التقليدية وهي استخدام السخان الكهربائي والسخان الغازي والسخان النفطي .

أ - استخدام السخان الكهربائي

بما أن كفاءة السخان الكهربائي تعادل تقريباً 100% لان الطاقة الكهربائية في هذه الحالة تتحول جميعها إلى طاقة حرارية .

وعليه تكون الطاقة السنوية اللازمة = $51627840(KJ) X \left(\frac{1}{3600}\right)\left(\frac{hr}{sec}\right)$

$$= 14341\ Kw\text{- }hr$$

واذا افترضنا بان سعر الكيلووات – ساعة هو 8 سنت أمريكي ($0.08) فان الكلفة الكلية لمصاريف الكهرباء لسنة كاملة ستكون :

الكلفة الكلية = 14341×0.08

= $1147 دولار سنوياً

وإذا افترضنا بان سعر سخان شمسي يستطيع توفير كمية الحرارة المطلوبة هو $1500، وبما أن طريقة إعادة المبالغ المصروفة (Pay-back) تنص على أن عدد السنين اللازمة لدفع مصاريف تسخين المياه هي السعر الكلي للمنظومة مقسوماً على كمية

الإدخار . وبما أن السماء لا تكون صافية في معظم الاوقات فان السخان الشمسي يستطيع فقط أن يوفر ما مقداره 80% من الحرارة اللازمة وعليه فان زمن اعادة المبلغ سيكون :

$$\text{الزمن} = \frac{1500}{1147X0.8}$$

$$= 1.7 \text{ سنة} \approx 2 \text{ سنه}$$

وهو الزمن اللازم لتسديد قيمة السخان الشمسي المنصوب بدل سخان كهربائي يعمل بوحدة كهرباء يبلغ سعرها 0.08$ وهذا المبلغ لا يتضمن ارباح الفائدة على المبلغ اذا تم الأقتراض من البنك ولا يتضمن ايضاً مبالغ التشغيل والصيانة والضرائب والاندثار .

ب- استخدام السخان الغازي

عند المقارنة مع السخان الغازي فان كمية الطاقة الكلية السنوية البالغة 51627840 KJ لا تتغير وإنما الذي يتغير هو كلفتها . إذا افترضنا بان سعر الكيلوغرام من الغاز المسال حالياً هو 0.1$ وإن المحتوى الحراري للغاز المسال هو $50X10^6 \frac{J}{Kg}$ وإن كفاءة السخان الغازي تتراوح بين 60%-75% ، وعليه سيكون سعر الطاقة اللازمة للتسخين هو:

$$\text{كمية الغاز المسال اللازمة} = \frac{51627840(KJ)}{50X10^6\left(\frac{J}{Kg}\right)X0.65}$$

$$= 1588.0 \text{ كيلوجرام}$$

$$\text{الكلفة السنوية} = 1588.6 \text{ X } 0.1$$

$$= \$ 158.85$$

$$\text{وعليه فان الزمن اللازم سيكون} = \frac{1500}{158.8X0.8}$$

$$= 11.8 \text{ سنة}$$

$$\approx 12 \text{ سنة}$$

جـ – استخدام السخان النفطي

كمية الطاقة السنوية هي 51627840 KJ ولكن الذي يتغير هو كلفتها ، فإذا افترضنا بان كلفة الكيلوغرام من الكيروسين حالياً هي 0.08$ وإن المحتوى الحراري لنفط التدفئة

المنزلي هو $45X10^6\left(\frac{J}{Kg}\right)$ وان كفاءة السخان النفطي لا تتجاوز 60% فعليه يكون التالي :

$$\text{كمية نفط التدفئة اللازم} = \frac{51627840(KJ)}{45X10^6\left(\frac{J}{Kg}\right)X0.6}$$

$$= 1912.14 \text{ كيلوجرام}$$

$$\text{الكلفة السنوية للنفط} = 1912.14 \text{ x } 0.08$$

$$= 152.97\$ \text{ دولار}$$

$$\text{وعليه فان الزمن اللازم} = \frac{1500}{152.97X0.8}$$

$$= 12.25$$

$$= 13 \text{ سنة}$$

3-1-13 طريقة إعادة المبالغ المصروفة – منظومات التدفئة

تختلف الاحمال الحرارية للأبنية باختلاف موقعها من الوطن العربي وبأختلاف اساليب البناء المتبعة وتحديداً العوازل الحرارية والأساليب السلبية في تقليل حمل التدفئة، ولنفرض بأن أحد أرباب المنازل يدفع سنوياً ما يعادل 800$ لتغطية مصاريف التدفئة، وإن كلفة شراء ونصب منظومة شمسية تقوم بالتدفئة هو ما يعادل 15000$ وإن المنظومة الشمسية تستطيع ان تغطي 80% من الحمل على طول مدار السنة ، وعليه فإن المدة اللازمة لاستعادة المبالغ ستكون :

$$\text{المدة اللازمة لاستعادة المبالغ ستكون} = \frac{15000}{800X0.8}$$

$$= 23.43 \text{ سنة}$$

وقد تبدو هذه المدة طويلة ولهذا السبب فان استخدام الطاقة الشمسية في منظومات التدفئة في الوقت الحاضر في الوطن العربي محدود لان فترة استعادة المبالغ طويلة .

4-1-13 طريقة دورة عمر السخان

في طريقة اعادة المبالغ المصروفة البسيطة يعتبر معدل اعادة الارباح والتضخم معدوماً (يساوي صفر) . ومعظم الاقتصاديين لا يستخدمون هذه الطريقة لأن نتائجها ليست دقيقة بشكل كافي ، وإن طريقة تقدير "كلفة طول فترة العمل" هي وسيلة أكثر دقة لأنها

تأخذ بنظر الأعتبار قيمة الفائدة السنوية والتضخم . فمثلاً إذا كانت كلفة تدفئة بيت كبير هي 1000$ دولار في السنة الأولى . فمستقبلاً نفترض أن أسعار الوقود ستزداد بنسبة 10% سنوياً للسنوات الخمس القادمة ، وعليه فإن السعر:

في السنة الثانية سيكون : 1000 (1+0.1) = 1100$ دولار
وفي السنة الثالثة سيكون : 1000 (1+0.1)(1+0.1) = 1210$ دولار
وفي السنة الرابعة سيكون : 1000 (1+0.1) (1+0.1)(1+0.1) = 1331$ دولار
وفي السنة الخامسة سيكون : 1000 (1+0.1) (1+0.1) (1+0.1)(1+0.1) = 1464$ دولار

وعليه فإن سعر الوقود للسنوات الخمس القادمة سيكون مساوياً لـ :

1000 + 1100 + 1210 + 1331 + 1464 = 6105$ دولار أمريكي

وهذا ما يسمى بالكمية المساوية بالوقت الحاضر أو القيمة الحالية.

ولدفع قوائم التدفئة للسنوات الخمس القادمة يتوجب فرض 10% كمقدار للزيادة السنوية لأسعار الوقود .

مثال:

إذا كانت كلفة تدفئة منزل هي 1000$ لهذه السنة ، فما هي الكلفة الكلية للتدفئة خلال السنوات الخمس القادمة إذا كانت الزيادة السنوية بأسعار الوقود هي 10% ؟

المعادلة الرياضية اللازمة لإنجاز الحسابات التالية هي :

$$\frac{A}{i}\left[(1 + i)^n - 1 \right] = \rho$$

ρ = المبلغ الكلي بقيمته الحالية
A = المصروفات السنوية
i = معدل التضخم
n = عدد السنين

فإذا كانت قيمة الوقود الحالية (A) هي 1000$ ومعدل الزيادة السنوية (التضخم) هي 10%، فإن المبلغ المدفوع (ρ) خلال السنوات الخمس القادمة سيكون :

$$\frac{1000}{0.1}\left[(1 + 0.1)^5 - 1 \right] = \rho$$

= 6015$ دولاراً

والمبلغ أعلاه (6015$ دولاراً) هو المبلغ المطلوب الآن لدفع قوائم الوقود للسنوات الخمس القادمة . وليس من المعقول أن يقوم الشخص بوضع مبلغ على حدة ليتم دفع الكمية المطلوبة سنوياً ، ولكن يجب أن يتم الاستفادة من هذا المبلغ . ولنفرض أن بالإمكان وضعه في حساب توفير بالبنك بفائدة مقدارها 6% للسنوات الخمس القادمة، ولنفرض بان قائمة التدفئة تدفع في نهاية كل سنة ، وبهذا يمكن تعديل المعادلة الرياضية كما يلي :

$$\frac{A}{i - d}\left[\left(\frac{1 + i}{1 + d}\right)^{n} - 1\right] = \rho$$

حيث d هي الفائدة السنوية عن وضع المبالغ بالمصرف ، وعليه سيكون المبلغ الكلي المدفوع كما يلي :

$$\frac{1000}{(0.1 - 0.06)}\left[\left(\frac{1 + 0.1}{1 + 0.06}\right)^{5} - 1\right] = \rho$$

$$\$5087 =$$

5-1-13 اقتصاديات الطاقة الشمسية الحرارية في توليد الكهرباء

يعّد استخدام الطاقة الشمسية الحرارية في توليد الكهرباء من المجالات الحديثة التي لاتزال في مرحلة البحث والتطوير . ونظراً إلى أهمية هذا المجال فقد بدئ في تطويره بصورة جدية في نهاية السبعينات من هذا القرن عن طريق إقامة مجموعة من المحطات الشمسية الحرارية في عدد من الدول الصناعية كالولايات المتحدة وفرنسا واليابان . وقد أسفرت نتائج الدارسات والبحث عن إمكانية خفض تكاليف إنتاج الطاقة الكهربائية من محطات الطاقة الشمسية الحرارية الحديثة بنسبة عالية قد تصل إلى 80% مقارنة بتكلفتها من المحطات السابقة التي أنشئت لأغراض البحث والتطوير . وعند مقارنة كلفة إنتاج الطاقة الكهربائية من مصادرها التقليدية المعروفة مع تكاليف إنتاجها من الطاقة الشمسية الحرارية يتضح عدم جدوى استغلال الطاقة الشمسية في الوقت الحاضر استناداً إلى كلفتها الأولية العالية .

أما إذا أضفنا عناصر أخرى غير الكلفة المباشرة إلى الطاقة المنتجة من مصادر الطاقة التقليدية مثل تكاليف الحد من تأثيرها على البيئة والمجتمع - وهذه التكاليف شبه معدومة- في حالة استخدام منظومات الطاقة الشمسية إذ أن تأثيرها على البيئة محدود جداً أو إمكانية تصدير كميات الوقود التي يمكن تلبيتها باستخدام الطاقة الشمسية فإن الصورة ستختلف نوعا ما .

2-13 الخلايا الشمسية الكهروضوئية

يتم توليد الطاقة الكهربائية من التحويل المباشر للطاقة الشمسية الضوئية باستخدام الخلايا الشمسية التي تتميز بعمر زمني طويل (أكثر من 20 عاماً) وبتكاليف تشغيل وصيانة منخفضة ، وتعمل دون حدوث حركة أو ضوضاء فضلاً عن عدم تلويثها للبيئة على حسب معرفتنا الحالية . ونظراً إلى التكاليف العالية اللازمة لإنشاء المحطات الكهروضوئية فإنه تجري الآن العديد من البحوث والدارسات التي تهدف بصفة رئيسية إلى خفض تلك الكلفة عن طريق تحسين كفاءة تحويل الخلايا والنظم الكهروضوئيه وذلك بمعالجة تركيبها وخفض كلفة تصنيعها واستخدام عناصر جديدة من أشباه الموصلات. وعلى الرغم من إدخال بعض التحسينات والتطوير على الخلايا الكهروضوئية إلاَّ أن كفاءة تحويلها من طاقة ضوئية إلى طاقة كهربائية لا تزال محدودة ولم تتجاوز 20% على النطاق التجاري .

ويمكن الاستفادة بصورة عملية من الخلايا الشمسية في تطبيقات عديدة في المناطق النائية التي تكون فيها كلفة مد شبكات الطاقة الكهربائية مكلفة ، إذ تكون فيها كلفة بناء محطات أو توفير مولدات خاصة لهذه المناطق عالية عند تشغليها وصيانتها .

وتتوقف كلفة إنتاج الكهرباء من الخلايا الشمسية على عدة عوامل أهمها تكاليف إنشاء المحطة ، والعمر الافتراضي لها ، وتكاليف التشغيل والصيانة، وتكاليف تخزين الطاقة الكهربائية المولدة ، وقدرة المحطة ، ونوع الخلايا المستخدمة ، وأسس تصميم المحطة، إضافة إلى معدل الإشعاع الشمسي الساقط ، وظروف البيئة ، والعائد المادي من رأس المال المستثمر .

ويبين الجدول (13-1) التكاليف الكاملة للمنظومات (الإنشاء والتشغيل والصيانة) ومعدل تكاليف إنتاج الطاقة الكهربائية لعام 1994.

جدول (13-1) تكاليف إنتاج الطاقة الكهربائية من بعض الخلايا الشمسية للعام 1994

المصدر	كفاءة التحويل (%)		تكاليف الإنشاء (دولار/ مترمربع)		تكاليف التشغيل والصيانة (دولار/كيلووات – ساعة)	كلفة إنتاج الطاقة الكهربائية (دولار/كيلووات)
	خلايا	نظام	خلايا	ملحقات		
- خلايا سليكونيه أحادية البلورية	15.0	11.5	300.0	50.0	0.15	0.28
- خلايا سليكونية متعددة البلورات (1)	14.0	10.8	260.0	50.0	0.15	0.27
- خلايا سليكونية متعددة البلورات (2)	15.0	11.5	200.0	50.0	0.15	0.21
- خلايا أفلام السليكون الرقيقة	10.0	7.7	150.0	50.0	0.15	0.13
- محطة سعه 1MW (أحادية المحور)	10.0	7.7	160.0	50.0	0.24	0.27
- محطة سعة 10MW (أحادية المحور)	10.0	7.7.4	60.0	50.0	0.24	0.14
- محطة سعة 1MW (ثنائية المحور)	20.0	15.4	250.0	100.0	0.24	0.21
- محطة سعة 10MW (ثنائية المحور)	20.0	15.4	150.0	100.0	0.24	0.16

ويتضح من الجدول أن كُلفة إنتاج الطاقة الكهربائية من هذه المصادر لا تزال عالية مقارنة مع كلفة إنتاج المصادر التقليدية الأخرى والتي يتراوح بين 0.04$ و0.08 دولار. إلاّ أنه مع تطور تقنية الخلايا الشمسية والنظم الكهروضوئية فإن كلفة الطاقة الكهربائية المولدة من الطاقة الشمسية سوف تنخفض إلى الحد الذي قد يسمح باستغلالها اقتصادياً .

3-13 طاقة الرياح

إن التقدير الاقتصادي لطاقة الرياح يتضمن عدة عوامل أهمها ما يلي :

أ - الطاقة الكهربائية السنوية المولدة من طاقة الرياح .

ب - الكلفة الاستثمارية للمحطة .

جـ - معدل الرأسمال السنوي (محسوب بواسطة تحويل الكلفة الاستثمارية مضافاً اليها الفائدة السنوية) .

د - مدة المقاولة التي تتضمن شراء أجهزة توليد الطاقة .

هـ - عدد السنوات التي يتم خلالها إعادة مبلغ رأس المال .

و - كلفة الصيانة والتشغيل .

والطريقة التي يمكن بها حساب الكلفة هي التالية :

الكلفة لوحدة الطاقة الكهربائية المولدة من طاقة الرياح يمكن تقديرها باستخدام المعادلة التالية :

$$CR\backslash E + M = g$$

g = كلفة وحدة الطاقة المولدة من طاقة الرياح

C = الرأسمال المستثمر

R = معامل استرداد الرأسمال

E = الطاقة السنوية المولدة من المنظومة

M = كلفة الصيانة والتشغيل لوحدة الطاقة المولدة

ويمكن حساب R من المعادلة التالية :

$$R = \frac{X}{1-(1+X)^{-n}}$$

حيث X = المعدل السنوي المطلوب للتضخم

n = عدد السنين التي يمكن بها تغطية الكلفة

أما الطاقة بالكيلوواط - ساعة فيمكن حسابها باستخدام المعادلة التالية :

$$(H \times P_r \times F)\ T = E$$

حيث H = عدد الساعات بالسنة (h = 8760 hr/yr)

Pr = معدل القدرة لكل مروحة (كيلوواط)

F = معامل السعة السنوية للعَنفة (التوربين)

T = عدد المراوح

وتحسب كلفة الصيانة M كالتالي :

$$KC \backslash E = M$$

حيث K = معامل تمثيل كلفة التشغيل السنوية لمزرعة الرياح كجزء من الكلفة الكلية وتساوي 0.025 أو 2.5% من الكلفة حسب تقدير جمعية طاقة الرياح الأوروبية .

ويتضح من السابق أن الطاقة السنوية المولدة من عَنفة (توربين) الرياح تعتمد على منحنى الطاقة ، وسرعة الرياح للعَنفة (التوربين) ، ومعدل تذبذب سرعة الرياح بالموقع وقت عمل العَنفة (التوربين) .

أما معامل السعة فهو مصطلح يستخدم بكثرة لتوضيح إنتاجية محطة توليد لفترة معينة من الزمن . فإذا استطاع توربين أن يعمل خلال السنة فإن له معامل سعة يعادل 1.0(100%) . ولكن في الحقيقة لا يمكن أن تكون سرعة الرياح ثابتة وفي سرعتها القصوى دائماً خلال السنة ، ولهذا فإن للعَنفة (التوربين) معامل سعة أقل من 1.0 دائماً، وفي أفضل المواقع يتراوح معامل السعة بين 0.3 و 0.4 .

والسعر الاستثماري لتوربينات الرياح يتراوح من 500$ إلى 900 دولار أو ما يعادله للكيلوواط المنتج ، أو ما يقارب 450 $ إلى 650$ في المتر المربع من مساحة الجزء الدوار .

ولعَنفات (لتوربينات) رياح تصل زمن عملها بين 20 و15 عاماً ، وفي مناطق ذات سرعة رياح عالية فإن الطاقة المولدة منها تكون منافسة للطاقة المولدة من المصادر التقليدية.

4-13 الكتلة الحيوية

في بعض دول أوربا يوجد سوق متنامٍ للهاضمات . ففي الدنمارك توصل البرنامج الحكومي لدراسة اقتصاديات الهاضمات بعد ستة أعوام من التجارب إلى أن محطات إنتاج الغاز الحيوي من المخلفات تكون اقتصادية إذا تم بناؤها وفق التكنولوجيا المتوفرة شريطة استيفاء الشروط الثلاثة التالية :

أ - أن يتم بيع الغاز بأسعار مقاربة لأسعار الغاز الطبيعي .
ب - أن تعمل محطة الغاز الحيوي على إنتاج الحرارة والطاقة .
جـ - أن يتم استخدام المواد العضوية من مخلفات المصانع .

ومن الأمثلة على اقتصاديات الغاز الحيوي قرية بيورا (Pura) في جنوب الهند التي تقوم محطة إنتاج الغاز الحيوي فيها بتزويد غاز الميثان لمولد سعته 5 كيلووات من

الكهرباء يستخدم للإنارة وتشغيل مضخات المياه. وبعد أربع سنوات من العمل كانت كلفة الطاقة الكهربائية 0.25 دولار للكيلووات – ساعة ، وهذا السعر عالٍ نوعا ما عند مقارنته بسعر الكهرباء الواصل من الشبكة الكهربائية. ولكن دراسة أخرى بينت أن استخدام فضلات الحيوانات يمكن أن يزيد من كمية الغاز ويقلل السعر إلى النصف .
وبالنسبة إلى الطاقة المستخلصة من الخشب فإن التقدير الاقتصادي للخشب المزروع في مزارع غير اعتيادية في شمال شرقي البرازيل ، والتي يكون فيها إنتاج الخشب غير مثالي لعدم توفر المياه الكافية ، يتبين منه أن الخشب يمكن أن ينتج طاقة بسعر 1.4$ لكل جيغا جول، وهذا السعر منخفض جداً نتيجة للخبرة المتراكمة في هذا النوع من الزراعة وقلة أجور العمالة ، كما أنه سعرٌ أقل بكثير من الأسعار العالمية التي قد تصل في أمريكا إلى ما بين 3.9 و2.7$ لكل جيغاجول ، ومن المتوقع أن ينخفض السعر إلى ما بين 2.7 و1.9$ لكل جيغاجول في عام 2010 .

و بالنسبة إلى فضلات الغابات ، ففي النمسا تتوفر بقايا الأخشاب والأغصان بأسعار رخيصة تعادل 5.95$ للمتر المكعب من الخشب الجاف أو حوالى 1.05$ لكل جيغا جول ، وذلك نتيجة لتراكم نفايات الغابات .

أما بالنسبة إلى توليد الطاقة الكهربائية فيعتمد سوق استخدام مصادر الكتلة الحيوية على كفاءة التحويل التي يمكن الوصول إليها بوجود التقنيات الحديثة . ففي المملكة المتحدة بلغت كلفة الكيلوواط – ساعة المولدة من غاز نفايات المطامر 0.085$ بينما بلغت كلفة الكيلوواط من الطاقة المولدة من النفايات الصلبة حوالي 0.1$ ، وقد نزلت هذه الكلفة في عام 1994 إلى 0.056$ و 0.0576$. وهذه المبالغ قليلة مقارنة بما كانت عليه كلفة الطاقة الكهربائية المولدة من توربينات تعمل بمحارق الخشب والتي بلغت حوالي 0.13$ لكل كيلوواط – ساعة .

وأما بالنسبة للايثانول المنتج في البرازيل فإن كلفة إنتاجه تختلف باختلاف المنطقة وإدارة المواقع ، وقد وصلت في ولاية سانت باولو إلى 0.185$ لكل لتر أي مايعادل 7.9$ لكل جيغا جول ، ويمكن أن ينزل إلى 0.15$ لكل لتر بعد فترة وجيزة .

5-13 الطاقة المائية

تختلف مصادر الطاقة المائية عن مصادر الطاقة المتجددة الأخرى لأنها متطورة جداً من الناحية التقنية. ولحساب سعر الوحدة الكهربائية المنتجة من هذه المحطات يجب أن نقوم بتقدير ما يلي:

أ - الكلفة الاستثمارية والمدة اللازمة للإنشاء .
ب - الكلفة السنوية للتشغيل والصيانة .
جـ - معامل الحمل خلال عمر المحطة .
د - معدل التخفيض المناسب .

ويمكن تقدير السعر إذا افترضنا أن كلفة تشغيل مثل هذه المحطات قليلة مقارنة بالكلفة الاستثمارية ، وأن معامل الحمل يبقى ثابتاً خلال عمر المحطة . وفي هذه الحالة يمكن تقدير سعر الكيلووات – ساعة كما يلي :

عند معرفة الكلفة الاستثمارية اللازمة للمحطة يمكننا تخمين كلفة الطاقة المولدة بالكيلووات – ساعة . وبما أنه لا توجد مصروفات للوقود ، وأن كلفة الصيانة والتشغيل قليلة جداً مقارنة بالكلفة الأولية ، فإنه يمكن أن نرمز للكلفة الأولية لكل كيلوواط – ساعة بالرمز C$ (دولار لكل كيلوواط - ساعة) . وهناك متغيرات أخرى كعامل الحمل ، والذي يمكن أن نعتبره 0.4 خلال عمر المحطة الكلي . وبما أن هنالك 8760 ساعة في السنة ، فانّ كل كيلووات منصوب يستطيع توليد 3500 كيلووات – ساعة في السنة. يمكننا أن نفترض أن عمر المحطة سيكون 50 عاماً ، لذا فان إنتاج الكيلوواط المنصوب سيكون 175000 كيلوواط – ساعة طيلة عمر المحطة .

وإذا افترضنا ، كمحاولة أولى ، أن كلفة الكيلوواط – ساعة يمكن تقديرها من الكلفة الأولية للكيلووات المنصوب مقسوماً على عدد الكيلووات – ساعة التي ينتجها كل كيلووات منصوب خلال عمر المحطة ، وإذا كان سعر الكلفة الأولية للكيلوواط المنصوب هو1500$ للكيلوواط فإن كلفة الكيلوواط – ساعة سيكون 0.085$. وهذا هو تقدير أولي يمكن أن يكون بعيداً عن الحقيقة في معظم الأحيان ، لأن كلفة الطاقة المولدة من الطاقة المائية أرخص من الرقم المذكور أعلاه . وعلى سبيل المثال فإن المحطة

الكبيرة المنصوبة في سكوتلندا كان سعر الوحدة المنتجة فيها في عام 1994 هو $0.025 لكل كيلوواط – ساعة .

6-13 طاقة المد والجزر

إن حساب اقتصاديات طاقة المد والجزر معقدة ، ومن الصعب الحصول على منح أو قروض لتمويل مثل هذه المحطات وذلك لكون أسعار الطاقة المنتجة من هذا المصدر أعلى من سعر الطاقة المولدة من المصادر التقليدية . ولكن عندما تزداد أسعار مشتقات الطاقة التقليدية فإنه يمكن أن يكون لهذا المصدر جاذبية اقتصادية . أمّا في الظروف الحالية فإن هذا المصدر يبدو بعيداً عن التطبيق التجاري .

7-13 طاقة الأمواج وطاقة حرارة المحيطات

إن طاقة الأمواج وحرارة المحيطات تتمّيز ، كبقية مصادر الطاقة المتجددة الأخرى، بكلفتها الاستثمارية الأولية العالية . وهذه الكلفة الأولية العالية ناتجة من الحاجة إلى بناء هياكل كبيرة لاحتواء كامل الموجة التي ينتج عنها استخلاص أكبر كمية ممكنة من الطاقة في حالة طاقة الأمواج ، ولاحتواء التوربينات والمبادلات الحرارية وغيرها في حالة حرارة المحيطات . وتتراوح الكلفة السنوية للتشغيل والصيانة لهذا النوع من المحطات بين 3% و 8% من الكلفة الأولية . وهذه المصادر ، كغيرها من مصادر الطاقة المتجددة ، لا يكون استخدامها اقتصادياً إلاّ إذا نزلت كلفة الكيلوواط إلى أقل من $1500 دولار .

ومن المشاكل المترتبة على الكلفة الأولية العالية أن استعادة النفقات تستغرق مدة طويلة، وهذا عامل غير مشجع للحكومات والمستثمرين لتوظيف أموالهم في هذا الاتجاه .

ومن الاعتبارات المهّمة كثافة الطاقة من هذه المصادر ، وأسعار مصادر الطاقة التقليدية ، وإمكانية الاستخدام ، ومن الاعتبارات المهمة وهذه بالطبع تختلف من بلد إلى آخر . وبناءً على ذلك فإن تقدير اقتصاديات هذا المصدر يختلف من بلد الى آخر.

8-13 طاقة الحرارة الجوفية

تعتبر طاقة الحرارة الجوفية من أكثر الطاقات الواعدة والتي شهدت نمواً سريعاً في استخدامها . ومن أسباب نمّو هذه التقنية العوامل البيئية ، والكلفة المعقولة في بعض استخداماتها ، بالإضافة إلى كمية الحرارة المستخرجة . فحقول الماء الحار هي أحد الأمثلة الجيدة على هذا النمو ، إذ انخفضت كلفتها الأولية من 3000$ دولار في السنة للسعة بالكيلوواط إلى 2600$ دولار خلال عقد واحد فقط ، وانخفضت كلفة الصيانة من 0.04$ دولار إلى 0.022$ دولار ، بينما انخفض سعر الكيلوواط – ساعة المنتج من 0.085 إلى 0.057$ دولار في هذه الفترة . ومن المحتمل أن ينخفض سعر الكيلوواط – ساعة إلى أقل من 0.048$ دولار خلال السنين القادمة. أما بالنسبة إلى اقتصاديات المصادر الجوفية ذات الحقول التي تحتوي على طاقة قليلة فإنهّا تعتمد على عدة عوامل سياسية واقتصادية مثل توفر مصادر الطاقة التقليدية وأسعارها ورغبة الحكومات في الاستثمار في مصادر الطاقة المتجددة ودرجة أهمية المحافظة على البيئة من منطقة ما .

9-13 مقارنة اقتصادية لمختلف مصادر الطاقة في إنتاج الطاقة الكهربائية

تتوقف تكلفة استغلال مصادر الطاقة المتجددة على عدة عوامل أهمها تكاليف نصب وإنشاء المنظومات ، وعمرها الافتراضي ، وتكاليف التشغيل والصيانة والخزن ، وقدرة المنظومة ، وكفاءة التحويل ، والظروف البيئية ، والعائد المادي من رأس المال . وعلى الرغم من قلة فرص الاستغلال الاقتصادي لمصادر الطاقة المتجددة في الوقت الحاضر فإنه أمكن استخدامها بصورة واسعة في عدة مجالات كطاقة المساقط المائية ، وطاقة الرياح ، والطاقة الشمسية الكهروضوئية ، والطاقة الشمسية الحرارية .

ويبين الجدول (13-2) مقارنة لأسعار النصب والطاقة الكهربائية المنتجة لمختلف منظومات الطاقة التقليدية والطاقة المتجددة وذلك للحصول على صورة كاملة للطاقة الكهربائية المولدة من مصادر الطاقة المتجددة مقارنة بالطاقة الكهربائية المولدة حالياً من مصادر الطاقة التقليدية .

ويتضح من الجدول أدناه أن تكلفة إنتاج الكيلووات – ساعة من الطاقة الكهربائية من المصادر التقليدية لا تزال أقل من كلفته من المصادر المتجددة . والمصدر المتجدد الوحيد المنافس في الوقت الحاضر هو الطاقة المائية .

جدول (13-2) : مقارنة اقتصادية لمختلف مصادر الطاقة في مجال إنتاج الطاقة الكهربائية

المصـــــــــدر	كلفة النصب دولار/كيلووات	كلفة التشغيل والصيانة سنت/كيلووات – ساعة	كلفة الطاقة الكهربائية المولدة سنت/كيلووات – ساعة
طاقة المساقط المائية	2000 – 6000		8 – 2
طاقة الرياح	1000 – 800	0.1 – 0.05	7 – 5
الطاقـــة الكهروضـــوئية (خلايـــا الـــسليكون الأحـــادي والمتعـــدد البلورات)	4500 – 3900		
الطاقـــة الكهروضـــوئية (خلايـــا الأغشية الرقيقة)	2000		
الطاقـــة الكهروضـــوئية (كلفـــة المنظومة)	14000-11000		75 – 50
الطاقـــة الشمـــسية – المركـــزات الشمسية (80 ميغاوات)	3500 – 2800		17 – 12
الكتلة الحيوية (الحرق المباشر)	2500		14
الكتلة الحيوية (التقنيات الحديثة)	2500 – 400		10 – 6
الحرارة الجوفية (محطات تجارية)	1700 – 1600		
الحـرارة الجوفيـة (محطـات ميـاه حارة)	2500 – 2400		8 – 6.2
طاقة المد والجزر	1800		8
حرارة المحيطات	10000	1	25 – 12
الطاقة النووية (1000ميغاواط)	2300 – 2100		4-2
محطات غازية	650 – 450	0.35	4 – 3
محطـات بخاريـة (تعمـل بـالفحم الحجري)	1500 – 1200	2 – 1.5	10 – 5

أسئلة تقويمية

1. يعد استغلال الطاقة الشمسية في مجال تسخين المياه من أكثر التطبيقات انتشاراً في مختلف دول العالم . ما هو سبب عدم انتشار هذه المنظومات في معظم الدول الغربية؟
2. أيهما أقل كلفة توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية من الطرق الحرارية أم إستخدام الخلايا الشمسية الفولطاضوئية؟
3. ما هي أفضل الطرق المستخدمة في توليد الطاقة الكهربائية من مصادر طاقة الكتلة الحيوية من الناحية الإقتصادية ؟
4. كما هو معروف بأن كلفة الطاقة الكهربائية المولدة من الطاقة المائية رخيصة جداً . فما هي حدود استخدام هذه التقنية ؟
5. إن طاقة المد والجزر وطاقة الأمواج من الطاقات المتجددة الواعدة . ما هي حدود استغلالهما لإنتاج الطاقة الكهربائية ؟
6. أي التقنيات في مجال الطاقة المتجددة هي الأفضل استخداماً للوطن العربي ؟ صنف أفضلية كل تقنية لكل دولة عربية حسب مناخها وطبيعتها الجغرافية ؟

الفصل الثاني عشر

خزن الطاقة المتجددة

1-12 مقدمـــــــــــــة

2-12 الخزن الحراري

- الخزن بالحرارة المحسوسة
- وسائط الخزن السائلة
- وسائط الخزن الصلبة
- الخزن بالحرارة المحسوسة في درجات الحرارة العالية
- الخزن بالحرارة الكامنة
- الخزن بحرارة الانصهار والتجمد
- الخزن بحرارة التبخر والتكثيف
- الخزن بالطاقة الكامنة في درجات الحرارة العالية
- الخزن الموسمي

3-12 الخزن الميكانيكي

- الخزن بالهواء المضغوط
- الخزن بالطاقة الكامنة
- الخزن بالعجلة الحدافة

4-12 الخزن الكهربائي

5-12 الخزن الكيميائي

- الخزن الوقودي
- خزن الهيدروجين

6-12 الخزن المغناطيسي

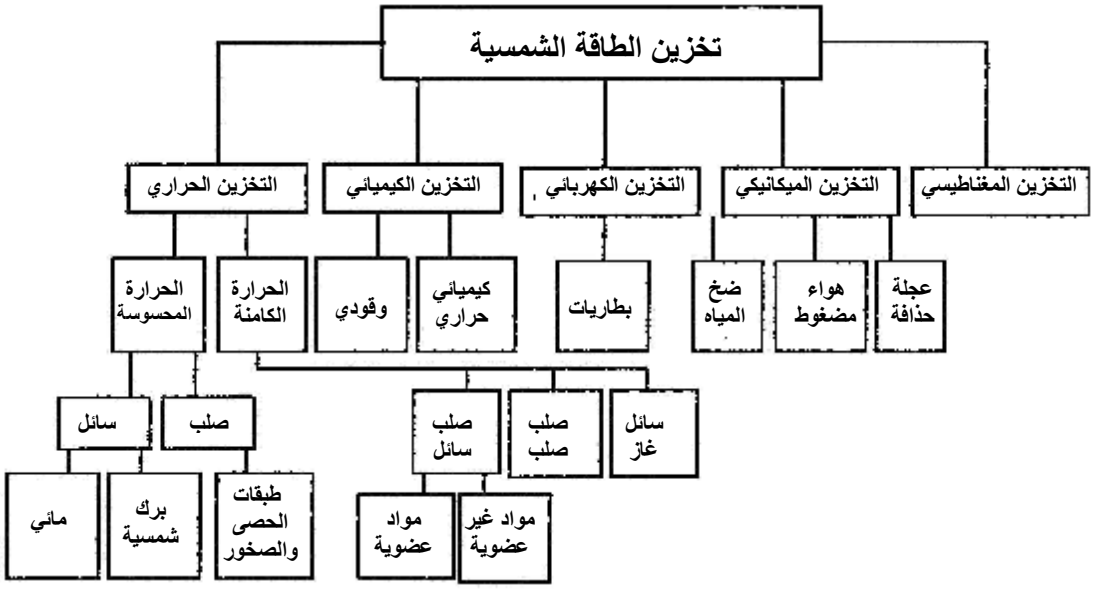
1-12 مقدمـــــة

نظراً لوجود فائض من بعض مصادر الطاقة في فترات زمنية معينه ونقصان في فترات اخرى وان استهلاك الطاقة يتبع عادة تغييراً زمنياً لايكون بالضرورة مماثلاً لتوفر الطاقة فأن الضرورة تستوجب خزن الطاقة الفائضة لأستخدامها في الاوقات التي تدعو الحاجة أليها.

تكتسب تقنية الخزن أهمية كبيرة في تحسين كفاءة وأداء منظومات الطاقة المتجددة، وتعتبر المفتاح الرئيسي لاستغلال هذه المصادر بصورة واسعة وعلى النطاق التجاري حيث ستزيد من مشاركتها في توفير المتطلبات وتقليل نفقات الطاقة المصروفة.

يمكن خزن الطاقة المتجددة لفترات قصيرة أو طويلة حسب المتطلبات ، ويرافق ذلك آليتان رئيسيتان هما الشحن والتفريغ ، وعلى هذا الأساس يعتمد تصميم نظام الخزن على عدة متغيرات وعوامل أهمها ، أوقات توفر ، الطاقة ونوع وسط الخزن المستخدم، ومقدار الخسائر من الطاقة اثناء عملية الخزن ، وكلفة منظومات الخزن والحمل الحراري أو الكهربائي المطلوب .

الأنظمة الرئيسية لخزن الطاقة ، والتي يمكن استخدامها في منظومات الطاقة المتجددة ، هي الخزن الحراري ، والخزن الميكانيكي ، والخزن الكهربائي ، والخزن الكيميائي ، والخزن المغناطيسي . فالطاقة الحرارية يمكن خزنها بواسطة الحرارة المحسوسة والحرارة الكامنة ، والطاقة الكهربائية تخزن عادةً في بطاريات ، والطاقة الميكانيكية تخزن كطاقة حركية أو كطاقة كامنة في خزانات الهواء المضغوط أو خزانات المياه العالية أو في العجلات الحدافة والطاقة الكيميائية تخزن عادة من خلال التفاعلات الكيميائية العكسية أو خزن الوقود الناتج عن التفاعلات الكيموضوئيه ، والخزن المغناطيسي يتم بأستخدام ملفات مغناطيسية فائقة التوصيل مصنوعة من مواد ذات مقاومة صغيرة جداً عند درجات حرارة منخفضة . ويبين الشكل (12-1) مخططاً مبسطاً لأهم الطرق والنماذج لتخزين الطاقة .



شكل (12-1): مخطط لأهم الطرق والنماذج لخزين الطاقة

2-12 الخزن الحراري Thermal Storage

يمكن خزن الطاقة الحرارية كحرارة محسوسة أو خزنها كحرارة كامنة أو بواسطة الدمج بين الطريقتين . ويتم الخزن بالحرارة المحسوسة بزيادة درجة حرارة وسط الخزن عند الشحن وسحب الحرارة منه عند التفريغ . أما الخزن بالطاقة الكامنة فيتم بتغيير طور المادة من حالة إلى أخرى تحت درجة حرارة ثابتة. وإن أهم الصفات المميزة للخزن الحراري هي :

- السعة الحرارية بالنسبة للوزن والحجم .
- مستويات درجة الحرارة التي يعمل بها ، وهي درجات الحرارة التي يتم فيها اضافة وسحب الحرارة في النظام .
- الطرق التي يتم بها إضافة الحرارة وسحبها.
- القدر المطلوب إضافة الحرارة وسحبها.
- مقدار التدرج في درجة الحرارة داخل وحدة الخزن .
- مواصفات حاويات الخزن .
- الطرق المناسبة لتقليل الخسائر الحرارية في منظومة الخزن .
- الكلفة .

يتكـون نظـام الخـزن مـن : وسـيط الخـزن (Medium) ، وحاويـة لوسـيط الخـزن (Container) ، وعـازل حراري (Insulation) لتقليل الخسائر، ومبادل حراري (Heat Exchanger) ، ومائع التبادل الحراري (Fluid) ، ومضخات أو دافعات هواء (Pumps) وأجهزة سيطرة (Controlling) .

1-2-12 الخزن بالحرارة المحسوسة Sensible Heat Storage

تتبدل درجة الحرارة المحسوسة المكتسبة أو المفقودة بواسطة مادة من درجة حرارة مقدارها T_1 إلى درجة حرارة أخرى مقدارها T_2 ، ويمكن التعبير عنها بالمعادلة التالية :

$$V\int_{T_1}^{T_2}\rho\ C_\rho dT = m\int_{T_1}^{T_2}C_\rho dT = Q$$

حيث أن :

m = كتلة المادة المستخدمة (kg)

C_p = الحرارة النوعية للمادة $\left(\frac{KJ}{Kg.C^0}\right)$

r = كثافة المادة $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

T_1 = درجة الحرارة الابتدائية C^o

T_2 = درجة الحرارة النهائية C^o

2-2-12 وسائط الخزن السائلة Liquid Heat Mediums

إن الماء هو المادة الشائعة الاستخدام في خزن الحرارة المحسوسة ، وهنالك سوائل أخرى تستخدم على نطاق ضيق لهذا الغرض ويبين الجدول رقم (12-1) أهم السوائل المستخدمة كوسائط للخزن ومواصفاتها .

جدول رقم (12-1) : الوسائط السائلة المحسوسة

وسط الخزن	درجة الحرارة C^o		كلفة المادة $/Kg	الكثافة عند درجة حرارة الغليان Kg/m^3	الحرارة النوعية $J/Kg.C^o$	الموصلية الحرارية $W/M.C^o$
	الذوبان	التبخر				
الماء	0.0	100.0	0.0	960.0	420.0	0.63
الثرمينول 66 (Therminol/66)	27.0	343.0	2.0	750.0	2740.0	0.106
دويثرم A (Dowtherm A)	12.0	260.0	0.22	867.0	2200.0	0.112
هتيك (Hitec) 4NaNo ,7NaNO, 53KNO	142.0	540.0	0.44	1680.0	1560.0	0.57
ملح ذائب 46NaNO ,54KNO	220.0	540.0	0.25	1733.0	1560.0	0.57
الصوديوم	98.0	760.0	0.57	960.0	1260.0	67.5

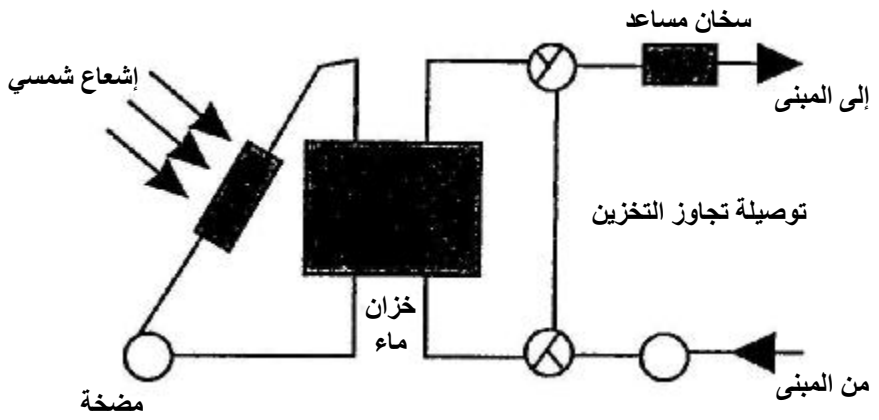
يستخدم الماء عادة في درجات الحرارة المنخفضة (اقل من $100C^0$) وهي الدرجات الملائمة لأغراض التدفئة والتبريد. ويبين الجدول رقم (12-2) أهم إيجابيات وسلبيات استخدامه .

جدول رقم (12-2) : إيجابيات وسلبيات الماء كوسيط خزن

الإيجابيات	السلبيات
1- متوفر ورخيص التكاليف.	1- يسبب صدأ لبعض المعادن عند ملامسته لها.
2- حرارته النوعية عالية مقارنة بالسوائل الأخرى.	2- يتجمد ويتبخر في ظروف خاصة.
3- يمكن استخدامه دون الحاجة الى مبادل حراري.	

يتبين من الجدولين (12-1 , 12-2) أن الماء هو أفضل الوسائط السائلة في درجات الحرارة الواطئة وذلك لكون حرارته النوعية وسعة خزنه أعلى من السوائل الأخرى بالاضافة الى ان سعره يكاد يكون منعدماً .

ويوضح الشكل (12-2) منظومة تكيف هواء تستخدم الماء كوسيط لخزن الحرارة المحسوسة .



شكل (12-2): منظومة تكيف هواء تستخدم الماء كوسيط لخزن الحرارة

12-2-3 وسائط الخزن الصلبة Solid Heat Mediums

تتميز المواد اللاعضوية الصلبة بضغطها الواطئ في درجات الحرارة العالية ، وخمولها الكيميائي ، ورخص سعرها. ولكن لمعظم هذه المواد حرارة نوعيه وموصلية حرارية واطئة، ولذا فأنها تتطلب حجوم خزن كبيرة ، ومنظومات تبادل حراري معقدة . ويبين الجدول (12-3) أن الصخور ، و مادة الرمل Soil أفضل المواد المستخدمة وذلك لسعتهما الحرارية المقبولة ورخص سعرهما .

جدول رقم (12-3) : الوسائط الصلبة لخزن الحرارة المحسوسة

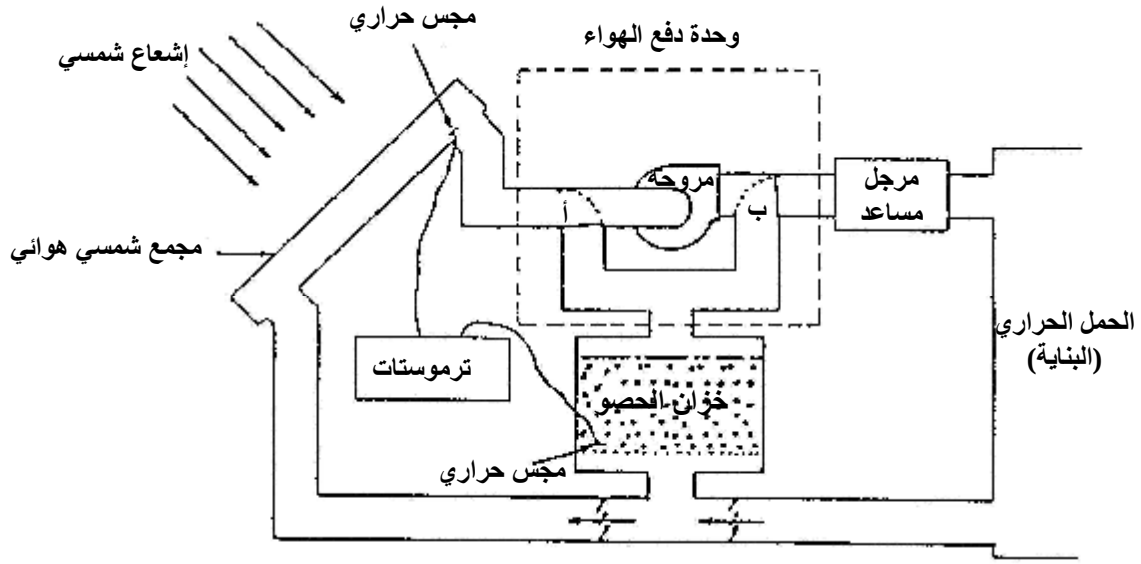
وسيط الخزن	الكثافة Kg/m^3	السعه الحرارية $J/Kg.C^o$	درجة الذوبان C^o	السعر $/Kg
الصخور	2640.0	880.0	1200.0	0.01
الرمل (Sio)	2650.0	910.0	1728.0	0.01
مقاطع حديد الصب Fe	7900.0	837.0	1535.0	0.66
أوكسيد المنغنيز MgO	3580.0	1130.0	2700.0	0.32
أوكسيد الالمنيوم (AI_2O_3)	3970.0	1010.0	2015	0.43

ومن التطبيقات المستخدمة للخزن بالمواد الصلبة في درجات الحرارة الواطئة خزان الحصى (Rockbed Storage) الذي يستخدم الهواء كمائع تدوير ، وحائط ترومب (Tromb wall) . ويتكون خزان الحصى (الصخور) من حاوية وهيكل مسامي لاحتواء الحصى وموزع لدفع الهواء بالاتجاهين أثناء الشحن والتفريغ. وللحصول على كفاءة

خـزن جيـدة يجـب أن يكـون الحصـى متجانـساً بقطـر يتراوح بين 3 و5 سم كمـا يجـب أن تكون صفاته الميكانيكية ومقاومته للتأثيرات الحرارية عالية. ويبين الجدول رقـــم (12-4) إيجابيـات وسـلبيات اسـتخدام هـذا النظـام. ويبـين الـشكل رقـم (12-3) مخططـاً لمنظومة خزن من هذا النوع .

جدول رقم (12-4) : إيجابيات وسلبيات خزان الحصى

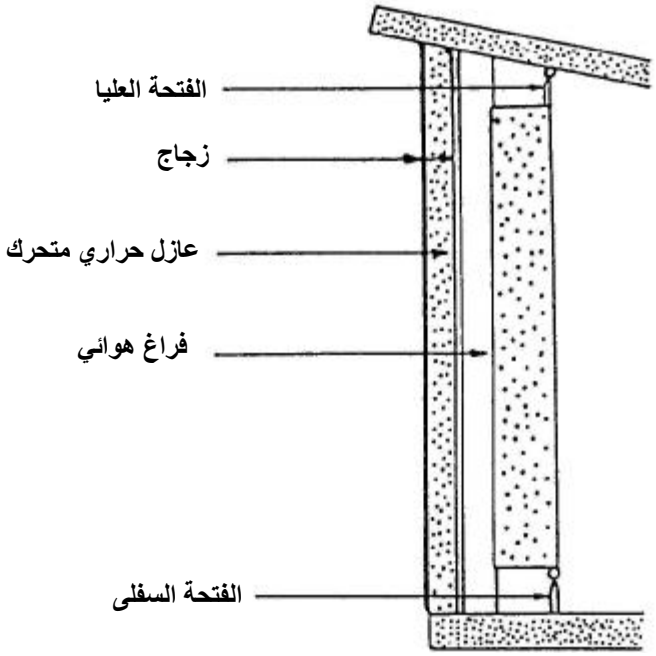
الإيجابيات	السلبيات
1- المادة متوفرة وسعرها زهيد	1- الحرارة النوعية للهواء والصخور قليلة ولهذا فأن حجم الخزان كبير
2- يمكن خزن الحرارة بدرجات حرارة عالية جداً	2- لا يمكن الشحن و التفريغ في آن واحد في مثل هذا النظام
3- حاوية الخزن غير معرضة للصدأ	
4- لا توجد حاجة الى مبادل حراري	



شكل (12-3): منظومة تكيف هواء تستخدم المواد الصلبة كوسيط لخزن الحرارة

والوسيلة الأخرى من وسائل الخزن الصلبة المستخدمة بصورة واسعة هو حائط ترومب الذي يتكون من طبقة واحدة أو طبقتين من الزجاج (أو البلاستك) الشفاف المنصوب على بعد عدة سنتيمترات من حائط سميك معتم من مادة الكونكريت أو الطين أو الحصى أو خليط من قطع الطابوق والرمل ، ويتم تسخين هذا الحائط بواسطة الاشعة الشمسية المارة من خلال الزجاج . ويوضح الشكل رقم (12-4) مكونات هذا النظام أذ يتم خزن الحرارة فيه خلال اوقات النهار ليتم طرحها الى الحيز المراد تدفئته خلال

الليل ، ويحتوي قسم من انواع هذا الحائط على فتحتين من الأسفل والأعلى تسمحان بمرور الهواء البارد من الحيز المراد تدفئته من الفتحة السفلى ليتم تسخينه في الفراغ بين الحائط والزجاج واندفاعه إلى الحيز خلال اوقات النهار أيضا .



شكل (12-4): حائط ترومب الذي يستخدم لخزن الحرارة

4-2-12 الخزن بالحرارة المحسوسة في درجات الحرارة العالية

في أنظمة الخزن بالحرارة المحسوسة في درجات الحرارة العالية من الممكن استخدام ثلاثة أنواع من مواد الخزن هي :

أ - الموائع كالماء والزيت.
ب - الأملاح المذابة ومحاليلها.
جـ - المواد الصلبة.

ومن الواضح أن الماء هو أفضل مواد الخزن في درجات الحرارة الواطئة وذلك لكون حرارته النوعية أعلى بكثير من بقية المواد. ولكن الماء يفقد إيجابياته في درجات الحرارة العالية لكونه يحتاج الى حجوم خزن كبيرة وخزانات تتحمل ضغطاً عالياً عند تحوله إلى بخار ، ولهذا فأن الزيت وبعض المواد الاخرى كالصوديوم والثرمينول هي الاكثر استخداماً في مثل هذه الدرجات. ومن المواد المستخدمة أيضا خليط من الاملاح اللاعضوية المذابة وتعتبر مادة الهيتك مثالاً جيداً لهذه المواد. اما بالنسبة إلى المواد

الصلبة فالمواد الاكثر استخداماً هو الرمل (Soil) والصخور لان سعة خزن هذه المواد مناسبة وسعرها قليل جداً مقارنة بالمواد الصلبة الأخرى .

5-2-12 وسائط الخزن الصلبة والسائلة في درجات الحرارة العالية

يمكن جمع المواد الصلبة والسائلة الخازنة للحرارة المحسوسة بعدة طرق مختلفة ، فالصخور والماء تستخدم لمنظومات خزن خاصة بالتدفئة والتبريد الشمسي. والصخور والزيت تستخدم أحياناً في حاوية واحدة لأجهزة الخزن الخاصة بمنظومات توليد الطاقة الكهربائية التي تعمل بدرجات حرارة عالية .

6-2-12 الخزن بالحرارة الكامنة

إن الحرارة الكامنة هي كسب وفقد الحرارة لمادة بواسطة تغير صفاتها الفيزيائية ، أي طورها ، من حالة إلى أخرى تحت درجة ثابتة . وهنالك ثلاث حالات يمكن استخدامها لخزن وتفريغ الطاقة هي :

أ - التغير من الحالة السائلة الى الحالة الصلبة وبالعكس ، والذي ينتج بدوره حرارة الانصهار والتجمد خلال عمليتي الشحن والتفريغ .

ب - التغير من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية وبالعكس ، والذي ينتج بدوره حرارة التبخر والتكثيف خلال عمليتي الشحن والتفريغ .

جـ- التغير من الحالة الصلبة إلى حالة صلبة أخرى وبالعكس ، والذي ينتج بدوره حرارة خلال عمليتي الشحن والتفريغ .

إن المواد التي يتغير طورها من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة ، وبالعكس ، هي المستخدمة في معظم التطبيقات وذلك لكون التغيير من الحالة السائلة أو الغازية يحتاج إلى حجوم كبيرة ، وبالتالي ستكون كلفة المنظومة عالية . وكذلك فإن التغير من حالة صلبة إلى حالة صلبة أخرى ينتج كمية حرارة قليلة مقارنة ببقية الطرق. ومن الصفات المطلوبة للمواد المستخدمة في هذه الطريقة من الخزن هي :

أ - كمية الحرارة أثناء تبدل الطور يجب أن تكون عالية ، وذلك لخزن أكبر كمية من الحرارة .

ب - درجة حرارة التحول من حالة إلى أخرى يجب أن تكون ملائمة لمعظم التطبيقات الحرارية .

جـ - يجب أن يكون تغير حجم المادة قليلاً عند تحولها من حالة إلى أخرى ، وذلك لتقليل حجم الخزن الحراري .

د - يجب أن تكون المادة غير سامة أو قابلة للاشتعال أو الصدأ .

هـ - يجب أن تكون تكاليف المادة قليلة .

7-1-11 الخزن بحرارة الانصهار والتجمد

إن المواد التي يتغير طورها في درجات حرارة مناسبة مع كمية حرارة انصهار عالية مع بقاء مواصفاتها ثابتة بعد دورات عديدة من الانصهار والتجمد هي المواد المناسبة في هذا النوع من الخزن ، وذلك لكونها ستساهم في تقليل حجمه وكلفته . ومن المواد المستخدمة في هذا المجال قسم من الاملاح وشمع البرافين . ويبين الجدول (12-5) مواصفات بعض المواد التي تتميز بدرجة حرارة انصهار واطئة تكون مناسبة لأغراض التدفئة والتبريد .

ومن الأملاح المستخدمة هيدرات كلوريد الكالسيوم ($CaCL.6H_2O$) والذي من صفاته بأنه يذوب بانتظام ، ولا تبقى فيه كمية من المواد الصلبة عالقة في الأسفل ، كما يمكن كبسه في قناني أو ألواح بلاستيكية أو معدنية . ومن سلبياته أن درجة حرارة انصهاره قليلة نوعاً ما ، ولكنه يمكن أن يستخدم لأغراض التدفئة. ومن المواد التي درست بكثرة لهذا الاستخدام هو ملح جلبرت ($Na_2SO_4.10H_2O$) وذلك لكونه رخيصاً جداً ، وكمية حرارة انصهاره عاليه مقارنة ببعض المواد كما هو مبين بالجدول أعلاه . عملية تحول ملح جلبرت تجري حسب المعادلة التالية :

$$\mathbf{NaSO_4 + 10H_2O + energy \ ® \ Na_2\ SO_4 + 10H_2O}$$

وتتم عملية الخزن بواسطة التفاعل الذي يتم من اليسار إلى اليمين بعد اضافة الحرارة . وتعتمد الطاقة المضافة على مستويات درجة الحرارة المضافة إلى المادة . والحرارة المضافة تتضمن حرارة محسوسة لرفع درجة حرارة الملح إلى درجة الذوبان ثم إلى حرارة كامنة وذلك لتغير طور المادة ومن ثم إلى حرارة محسوسة أخرى لرفع درجة

حرارة المحلول إلى درجة الحرارة النهائية . وعند تفريغ الحرارة من الخزان تجري عملية عكسية ويتم التفاعل من اليمين إلى اليسار والتأثير الحراري السابق يكون معكوساً . ومشكلة هذا الملح الرئيسية هي عدم انتظام ذوبانه وبهذا فأنه سيفقد قسماً كبيراً من حرارة انصهاره بعد عدة دورات من عمله بسبب الأجزاء الصلبة المتبقية التي لا تذوب . وتستخدم أنواع مختلفة من شمع البرافين لأغراض الخزن الحراري حيث أذ تذوب بانتظام ويمكن وضعها في حاويات معدنية أو بلاستيكية. وهذه الشموع تذوب بدرجات حرارة مختلفة مناسبة لأغراض التدفئة والتبريد، ولكن هذه الميزات قليلة الشأن لكون كمية حرارة انصهار هذه الانواع قليلة وموصليتها الحرارية ضعيفة . وأكثر أنواع الشمع استخدماً هو شمع البرافين (Sunco P-116) الذي ادرجت مواصفاته في الجدول أعلاه . كما تستخدم أيضاً أنواع عديدة من البوليمرات العضوية والتي لها كمية حرارة انصهار عالية وتنصهر بدرجات حرارة تتراوح من 130.0إلى 110 درجة مئوية، وهذا يؤهلها للعمل في مكائن التبريد الامتصاصية .

8-2-12 الخزن بحرارة التبخر والتكثيف

إن الخزن بواسطة الطاقة الكامنة بتبخير السوائل ينتج حرارة عالية بالنسبة لوحدة خزن معينة ، ولكن احتياجها إلى خزانات كبيرة بسبب حجم البخار الكبير يجعلها غير عملية من الناحية الاقتصادية .

جدول رقم (12-5) : بعض المواد المستخدمة في الخزن بالحرارة الكامنة بدرجة حرارة انصهار واطئة لأغراض التدفئة والتبريد

وسط الخزن	حرارة الانصهار KJ/Kg	الكثافة Kg/m^3		الحرارة النوعية $J/Kg.C^o$		الموصليه الحرارية $W/m.C^o$		الكلفة $/Kg	درجة حرارة الانصهار C^o
		سائل	صلب	سائل	صلب	سائل	صلب		
$CaCl_2.6H_2O$	190.0	1560.0	1800.0	2130.0	1460.0	0.54	1.09	0.07	27.0
$Na_2SO_4.10H_2O$ (ملح جلبرت)	225.0	1330.0	1460.0	3300.0	1760.0	--	2.25	0.04	32.0
شمع البرافين Sunco P-116	209.0	770.0	820.0	2510.0	2890.0	--	0.14	0.15	47.0
$Na_2So_3.5H_2O$	209.0	--	1650.0	2380.0	1460.0	--	0.57	0.18	48.0

$MgCl_2.6H_2O$	169.0	--	1560.0	2240.0	1590.0	--	--	0.15	120.0

9-2-12 الخزن بحرارة التحول من حالة صلبة إلى حالة صلبة أخرى

بعض المواد تكتسب وتطرح الحرارة خلال تغير حالتها الصلبة من حالة إلى حالة أخرى تحت درجة حرارة ثابتة. ولكّن هذا النوع من طرق الخزن غير مستخدم حالياً وذلك لكون كمية الحرارة المنبعثة نتيجة هذا التحول قليلة .

10-1-11 الخزن بالطاقة الكامنة في درجات الحرارة العالية

تتوفر عدة مواد لها حرارة انصهار مناسبة لأغراض الخزن في درجات الحرارة العالية منها بعض الاملاح اللاعضوية والسبائك المعدنية . ويبين الجدول(12-6) مواصفات بعض هذه المواد . وتلعب الخواص الكيميائية للمواد في درجات الحرارة العالية دورا مهما في بيان فائدة وعمر الاملاح المذابة والسبائك المعدنية . ومن أهم هذه الاعتبارات مكونات الخليط ووجود الشوائب ، واستقرارية الوسيط ، ومشاكل صدأ حاويات الخزن.

جدول رقم (12-6) : الخواص الفيزيائية الحرارية لبعض مواد الخزن الكامنة في درجات الحرارة العالية

اسم المادة	درجة حرارة الانصهارC	حرارة الانصهار (Cal/g)	الحرارة النوعية (سائل)Cal/g.C
- املاح فلوريد البوتاسيوم وفلوريد الصوديوم وفلوريد المغنيسيوم KF-NaF-MgF	685.0	138.0	0.38
- كلوريد الصوديوم وكلوريد الكالسيوم $NaCl-CaCl_2$	500.0	67.0	0.25
- هيدروكسيد الصوديوم NaOH	318.0	76.0	0.25
- كربونات الصوديوم وكلوريد البوتاسيوم Na_2CO_3- KCl	588.0	64.0	0.33
- نترات الصوديوم $NaNO_3$	307.0	41.0	0.44

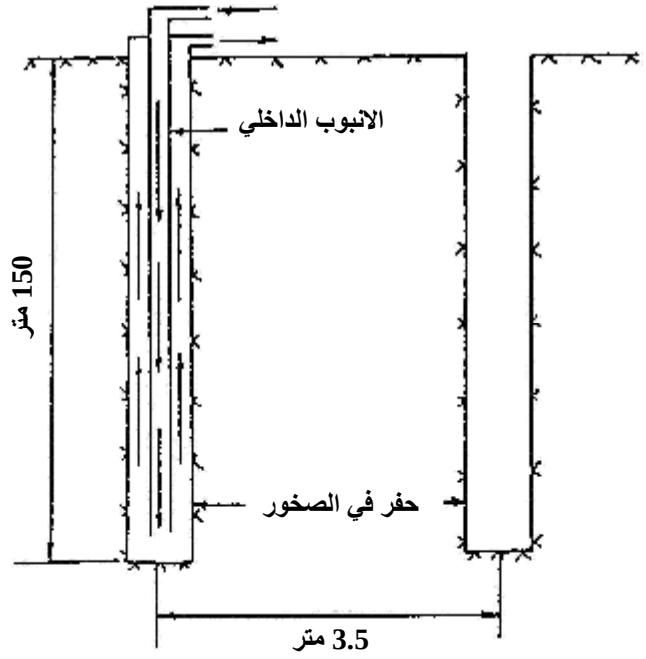
- الرصاص (Pb)	327.0	5.5	0.04
- الالمنيوم (Al)	658.0	94.0	0.25
- المغنيسيوم (Mg)	651.0	48.0	0.28

11-2-12 الخزن الموسمي

الخزن الموسمي للطاقة الحرارية يحتاج الى حجوم كبيرة ، ولهذا فان الخزانات المستخدمة يجب أن تكون تحت سطح الأرض وقريبة من مصدر الطاقة وموقع الاستعمال . وهنالك أنواع من طرق الخزن أهمها :

أ - الخزن بالحفر المثقوبة

الخزن الموسمي للطاقة الحرارية يمكن إنجازه بكلفة مناسبة في حفر مثقوبة في الصخور أو الطين . ففي البداية تخزن الطاقة في الصخور الصلبة أو الطين وتنقل من وإلى الخزان بواسطة تدوير الماء في دائرة مغلقة في حفر صخرية أو طينية بقطر 150 إلى 100 ملمُ تبعد الواحدة عن الأخرى من 4 إلى 3 متر وبعمق يصل إلى 150 ملم . ويبين الشكل (12-5) مخططا لمبدأ عمل نظام الخزن بهذه الطريقة .



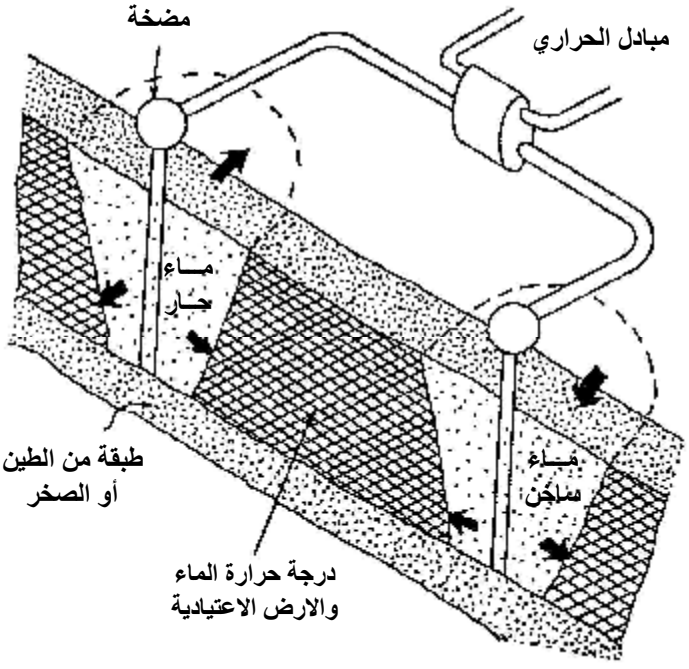
شكل (12-5): مبدأ عمل نظام الخزن بالحفر المثقوبة

ب - الخزانات الفولاذية أو الكونكريتية

وهي خزانات موسمية كبيرة الحجم من الفولاذ أو الكونكريت تستخدم منذ عدة عقود لخزن الطاقة الفائضة عن الحاجة في الأوقات التي لا تكون هنالك حاجة لها ، كما يمكن خزن كمية كبيرة من الحرارة في الخزانات وبالدرجات الحرارية المطلوبة . ويمكن السيطرة على الخسائر الحرارية بإضافة كمية من العازل الحراري .

جـ - الخزن بالطبقات الصخرية المائية

إن الطبقات الصخرية المائية هي تكونات جيولوجية تحتوي على ماء ، وهي موجودة في مناطق مختلفة من العالم على اعماق تتراوح بين عدة امتار وبضعة كيلومترات ، وتحتوي على ماء نقي أو ماء مالح تبعاً لعمق الطبقة ومكانها. وتستخدم هذه الطبقات لخزن الماء الحار أو البارد موسميا . ويبين الشكل (12-6) مخططا لمنظومة خزن للماء الحار المسخن بواسطة الاشعة الشمسية خلال الصيف أو من الحرارة الفائضة من المرافق الصناعية ليتم استخدامها خلال فصل الشتاء وحسب الحاجة .



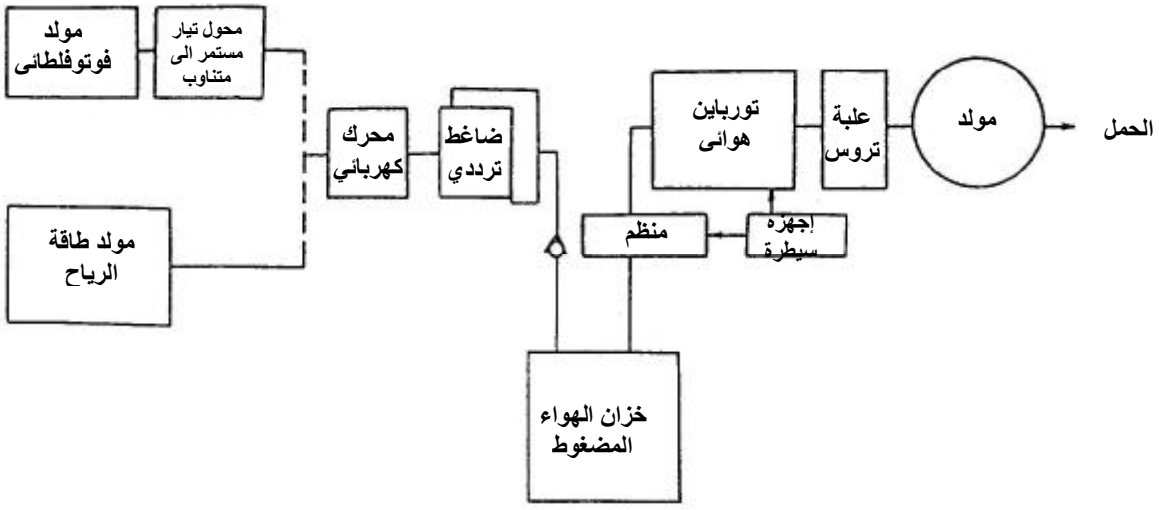
شكل (12-6): مخطط لمنظومة خزن الماء الحار بالطبقات الصخرية المائية

3-12 الخزن الميكانيكي

يمكن خزن الطاقة كطاقة كامنة في الهواء المضغوط أو بواسطة خزن السوائل في المناطق المرتفعة أو بواسطة العجلة الحدافة .

12-3-1 الخزن بالهواء المضغوط

يتم خزن الطاقة في هذا النوع من الأنظمة بواسطة هواء مضغوط في خزانات خاصة تتحمل ضغطاً عالياً أو في كهوف تحت الأرض. ومن السلبيات الرئيسية لهذا النوع من الخزن هي الكلفة العالية، وقلة الكفاءة ، بالإضافة إلى ضوضاء الضاغطة علاوة على المخاطر الناجمة عن ارتفاع الضغط . وفي جميع تطبيقات الطاقة الشمسية المستخدمة في هذا النوع من الخزن تكون الطاقة الداخلة والخارجة هي طاقة كهربائية . ويبين الشكل (12-7) منظومة تجريبية منصوبة في كندا تستخدم الخلايا الفوتوفلطائية وطاقة الرياح لتوليد الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل الضاغطة . وتتراوح كفاءة المنظومة بين 2%0 و5%0 والكلفة التقريبية للطاقة المخزونة هي 240$/KWhr. والسعات المستخدمة حاليا تتراوح بين عدة كيلو وات إذا كان الخزن في خزان حديدي لتجهيز بيت واحد بالطاقة ، و عدة مئات من الميغاوات إذا كان الخزن في الكهوف أو في المناطق الجوفية .

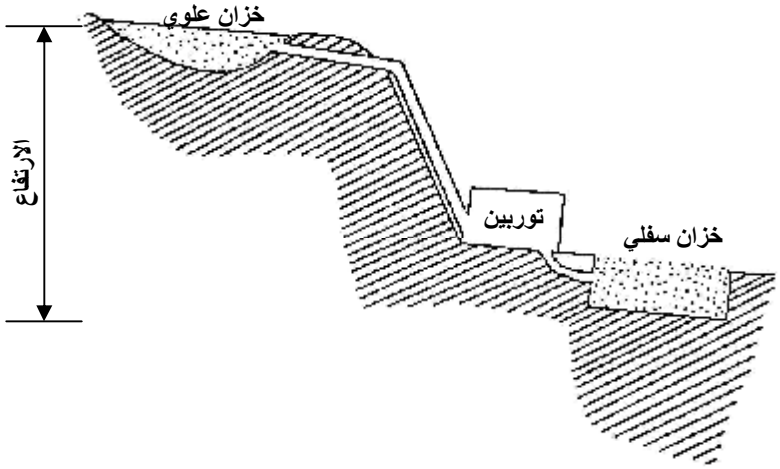


شكل (12-7): مخطط لمنظومة خزن بالهواء المضغوط تستخدم الخلايا الشمسية وطاقة الرياح

12-3-2 الخزن بالطاقة الكامنة

وهي طريقة تقليدية لخزن الطاقة الفائضة من منظومات طاقة الرياح والخلايا الفوتوفلطائية، والتي تتضمن دفع الماء بواسطة المراوح او المضخات التي تعمل بطاقة

الرياح أو بالطاقة الشمسية إلى خزان عالٍ يمكن الاستفادة من الماء للأغراض المختلفة عند عدم وجود سرع عالية للهواء أو عدم وجود الاشعاع الشمسي. وقد استخدمت هذه المنظومات من قبل بعض شركات توليد الطاقة الكهربائية لتزويد المنظومات بالطاقة المخزونة في حالات حمل الذروة ، كما هو موضح في الشكل (12-8) . والكلفة الحالية التقريبية لهذه المنظومات والتي تتضمن محطة التوليد الكهربائية ومحطة التوزيع الثانوية وبقية المنظومة تتراوح بين 95 و 100 $\KWhr دولار (لكل كيلووات – ساعة) بينما تتراوح كلفة منظومة الخزن بين 2 و 10 $\KWhr دولار (لكل كيلو وات – ساعة) . وتتراوح كفاءة المنظومة بين -70 و 75% .



شكل (12-8): مخطط لمنظومة خزن الطاقة الكامنة لتوليد الطاقة الكهربائية

12-3-3 الخزن بالعجلة الحدافة

يمكن خزن الطاقة الكهربائية المولدة من مصادر الطاقة التقليدية بصورة ميكانيكية عن طريق استخدام عجلة حدافة تتكون من قرص دوار ذي اقطاب مغناطيسية مثبتة على محور الدوران لإنتاج الكهرباء عن طريق مولد تقليدي . وتوضع جميع مكونات العجلة الحدافة في وسط مفرغ من الهواء لتقيل الاحتكاك . ويرتبط زمن شحن العجلة بمقدار الجهد الكهربائي المطبق عليها . وتدل الدارسات والبحوث أن مستقبل هذه الطريقة سيكون منافسا بالمقارنة مع البطاريات خاصة أنه لا توجد آثار ضاره بالبيئة . كما أن عمرها الاستهلاكي يتراوح بين 15 و 25 سنة ولها تطبيقات صناعية وسكنية .

12-4 الخزن الكهربائي

الخزن الكهربائي هو أحد المواضيع الرئيسية المرتبطة بتوسيع انتشار منظومات الخلايا الفوتوفلطائيه . والمشاكل المتعلقة بخزن الطاقة الكهربائية هي ارتفاع اسعار البطاريات، واحتياجها إلى صيانة مستديمة، وعمرها المحدود . والتقنية الحالية في هذا المجال تتمثل بشيوع استخدام البطارية التقليدية ، وهي بطارية الرصاص الحامضية (Pb/PbO_2) وبطارية النيكل كادميوم (Ni/cd) ، ومن المحتمل أن يستمرا كخازنين للطاقة الكهربائية لعدة سنوات قادمة .

تتميز بطارية الرصاص الحامضية ، بالإضافة إلى توفرها في الاسواق ، بأنها يمكن الاعتماد عليها ، ولها وقت خزن جيد وكفاءة عالية . ومن سلبياتها أن عمرها محدود ويعتمد على التشغيل اليومي كما أنها تتفرغ تلقائيا مع الزمن .

والتفاعل الأساسي لبطارية الرصاص الحامضية هو:

عند القطب الموجب $PbO_2 + 3H^+ + H_2So_4^- + 2e^- \longrightarrow PbSO_4 + 2H_2O$

عند القطب السالب $Pb + HSO^-_4 \longrightarrow PbSO_4 + H^+ + 2e^-$

وعليه يكون ملخص التفاعل هو :

$$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \longrightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O$$

وعند شحن البطارية يتكون القطب الموجب من PbO_2 والقطب السالب يكون رصاصاً صافياً (Pb) . وخلال التفريغ يتحول كلا القطبين إلى $PbSO_4$.

أما التفاعل الأساسي لبطارية النيكل كادميوم Ni/Cd فهو:

عند القطب الموجب $2NiO(OH) + 2H_2O + 2e^- \longrightarrow 2Ni(OH)_2 + 2OH^-$

عند القطب السالب $Cd + 2OH^- \longrightarrow Cd(OH)_2 + 2e^-$

وعليه يكون ملخص التفاعل هو :

$$2Ni(OH)_2 + Cd(OH)_2 \longrightarrow 2NiO(OH) + Cd + 2H_2O$$

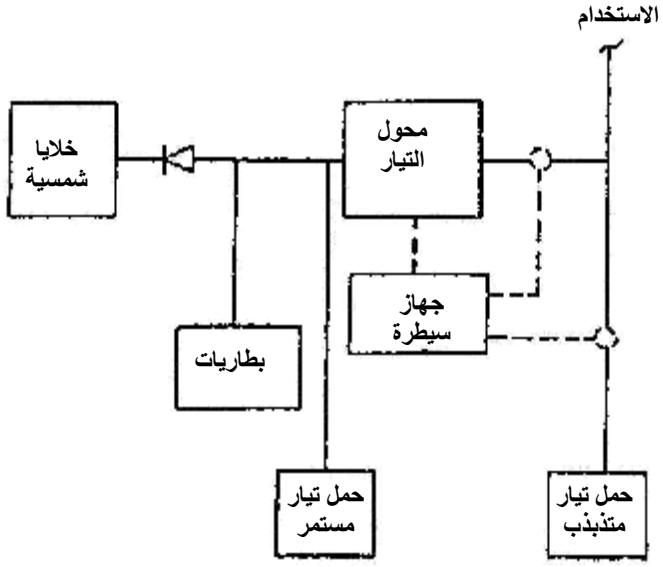
هناك جهود مستمرة لصنع بطاريات متطورة تتميز بتحسين كثافة الخزن وتقليل السعر مع ضمان بقاء الخواص الاخرى بالبطارية ، خاصة عدد ساعات التشغيل . والتقنية الحديثة تتجه حاليا نحو منظومات بدرجات حرارة عالية أو منظومات تحتوي على مفاعلات سائلة أو غازية. ومن أكثر البطاريات المتطورة ذات الدرجات الحرارة

العالية والمستخدمة حالياً هي بطاريات الكبريت والصوديوم Na/S . والتفاعل الأساسي لها هو :

$$2Na + 5S \longrightarrow Na_2S_5\ (300C)$$

فالألكتروليت الخاص بالبطارية هو صلب (BAl_2O_3) وهو موصل جيد لايونات الصوديوم . وهذه البطاريات يمكن تشغيلها فقط عند درجة 300 مئوية ، لان عند هذه الدرجة تتوفر للالكتروليت الموصلية الجيدة إذ عندها تكون المفاعلات بحالتها السائلة. ومن إيجابيات هذا النوع من البطاريات أن كثافة طاقتها عالية جداً. وهذه البطاريات مصنعة حالياً على نطاق ضيق وشيوعها في الاسواق يتطلب عدة سنوات .

كما أن هناك أنواعاً أخرى من البطاريات منها بطارية الزنك كلورين Zn/Cl_2 التي من مواصفاتها أن تفاعل Zn/Cl_2 يجهز كثافة طاقة عالية جداً ، ولكن مشكلتها هي أن الكلورين (Cl_2) يكون بحالة غازية ومن الصعب خزنه ولكنه يتحول إلى مادة $Cl_2.6H_2O$ وهي صلبة وبدرجة أقل من 10 مئوية ، لذلك فان البطارية يجب أن تزود بثلاجة لضمان بقاء الكلورين بدرجة أقل من 10 مئوية . وهنالك بطارية أخرى يمكن أن تعمل بدرجات حرارة عادية ، وهي بطارية الريدوكس (redox). ومن إيجابياتها الرئيسية رخص كلفتها إذ يمكن استخدامها في منظومات توليد الطاقة الكهربائية بواسطة الخلايا الفوتوفلطائية . ويبين الشكل (12-9) مخططا لمنظومة خزن مع مصدر كهربائي مولد من خلايا فوتوفلطائية .



شكل (12-9): مخطط لمنظومة خزن مع مصدر كهربائي مولد من خلايا فوتوفلطائيه

5-12 الخزن الكيميائي

يمكن خزن الطاقة كيميائياً إما بواسطة خزن الوقود الناتج عن التفاعلات الكيموضوئيه، أو التخزين الناتج عن التفاعلات الكيميائية العكسية .

1-5-12 الخزن الوقودي

ويتم ذلك بخزن الطاقة على شكل وقود يمكن انتاجه بواسطة التفاعلات الكيموضوئية، وفي هذه الحالة يمكن استخدام بطاريات خزن خاصة يحدث منها تفاعلات كيميائية عن طريق تأثير الضوء عند الشحن ثم تفريغها .

وأحد هذه التطبيقات هو تحلل مركب النيتروسكلورايد إلى مركباته بوجود الأشعة الشمسية كما يلي :

$$2NOCL \longrightarrow 2NO + CL_2$$

عند استهلاك الطاقة فإن اتجاه التفاعل ينعكس إذ يتفاعل الكلور مع أكسيد النيتروجين ليكونا المركب NOCL بالإضافة إلى حرارة يمكن استغلالها للأغراض المختلفة .
ومن طرق خزن الطاقة الحرارية الأخرى هو تحلل مركب الأمونيوم بايوسلفيت

$$NH_4HSO_4 \longrightarrow NH_3 + H_2O + SO_3$$

فالماء وثالث أكسيد الكبريت يتكثفان إلى سائل في درجة حرارة مقاربة لدرجة حرارة المحيط، والامونيا يمكن جمعها عكسيا مع ملح مناسب في درجة مقاربة لحرارة المحيط، ولكن الحرارة الناتجة عند التكثيف يصبح استغلالها صعبا وذلك لان قسماً كبيراً من هذه الطاقة يجب أن يصرف لفصل الغازات الثلاثة ولهذا فإن الكفاءة الحرارية لتحلل مركب الامونيوم بايوسلفيت تكون أقل بكثير من 100% . ومن الطرق الأخرى للخزن هو تحلل مادة هيدروكسيد المغنيسيوم الصلبة $Mg(OH)_2$ بدرجة حرارة مقدارها 540 كلفن تحت الضغط الجوي الإعتيادي لإنتاج صلب أكسيد المغنيسيوم وبخار الماء ، وإن كمية الحرارة الناتجة من التفاعل تساوي 19 كيلو كالوري لكل جول . والمشكلة الرئيسية في هذه الطريقة ، كما هو موضح في المخطط أدناه هي أن حوالي نصف

الحرارة المخزونة يتم فقدها عندما يتكثف بخار الماء الناتج عند درجة حرارة 540 كلفن.

$$Mg(OH)_2\ (540K^o) \xrightarrow[-4.57]{18.72} MgO + H_2O\ (540K^o)$$

$$Mg\ (OH)_2\ (300k^o) \longrightarrow MgO + H_2O\ (g)\ (300K^o)$$

$$\uparrow -8.99$$

$$MgO + H_2O + H_2O\ (L)\ (300K)$$

هنالك أنظمة كثيرة أخرى يمكن استخدامها لخزن الطاقة الحرارية. ولكن المشكلة الرئيسية التي تحد من استخدامها هي أن كفاءتها قليلة وكثافة خزنها واطئة إذا لم تكن نتائج تفاعلها بطور غازي .

2-2-12 خزن الهيدروجين

إن مميزات الهيدروجين كوسيط كيمياوي لخزن الطاقة كثيرة ، أهمها كونه يتولد بكفاءة وله مواصفات جيدة للخزن الحراري لفترة طويلة وبكثافة خزن عالية وبدرجات حرارة مقاربة لدرجة الحرارة الخارجية ، ويمكن خزنه ونقله كغاز أو كسائل إلى مناطق بعيدة، كما يمكن استخدامه لتوليد الطاقة الكهربائية في خلايا الوقود أو من حرقه الذي ينتج درجة حرارة لهب أعلى من 2000 كلفن .

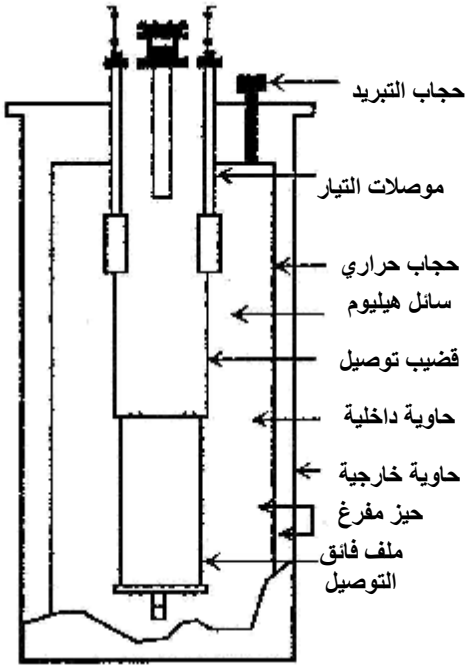
ويمكن إنتاج الهيدروجين من الماء والشمس من خلال عدة عمليات متعاقبة يتم فيها تحلل الماء بدرجة حرارة عالية تصل إلى 1100 كلفن أو من تحلل حامض الكبريتيك .

ويخزّن الهيدروجين عادة إما بشكل سائل أو غاز مضغوط في أوعية فولاذية ذات غلاف خارجي مزدوج مفصولة بطبقة من الهواء بدرجة 250 درجة مئوية عند ضغط 10 ضغط جوي (atm) . وسعر الخزان المتكون من مادة الفولاذ المرن أو سبيكة الألمنيوم تتراوح بين 2.3 $\KWhr$ دولار (لكل كيلو وات ـ ساعة) لسعة مقدارها 10Mwh ميجاوات ـ ساعة إلى 0.3 $/KWhr لسعة مقدارها 1000Mwhr ميغاوات ـ ساعة . وخزن الهيدروجين كغاز يتطلب وعاءً يتحمل ضغطاً عالياً وضاغط ، وتكون ضاغطات الهيدروجين عادة من النوع الترددي وبدون تزييت لمرحلة واحدة أو عدة مراحل ، وهذه تعتمد على نسبة الانضغاط . وتتراوح كفاءة دورة الانضغاط بين 93% و 98% معتمدة على كمية الغاز المار والضغط الداخل والضغط النهائي للخزان .

وتدرس حاليا طرق اخرى لخزن الهيدروجين منها استخدام الكهوف الصخرية تحت الأرض .

6-12 الخزن المغناطيسي

تم مؤخراً خزن الطاقة الكهربائية المتولدة من مصادر الطاقة المتجددة مباشرة عن طريق تحويلها إلى طاقة مغناطيسية بأستخدام ملفات مغناطيسية فائقة التوصيل مصنوعة من مواد ذات مقاومة صغيرة جداً عند درجات حرارة منخفضة جداً . وتعد هذه الطريقة ذات كفاءة عالية أذ إنه لا يلزم فيها تحويل الطاقة إلى أشكال أخرى مثل التحويل الميكانيكي وغيره ، ثم تحويلها مره أخرى إلى طاقة كهربائية وبالتالي فقدان جزء منها اثناء التحويل . وفي هذه الطريقة يمرر تيار كهربائي مرتفع على ملف فائق التوصيل يعمل على حفظ الطاقة بشكل مغناطيسي ثم يحولها عند اللزوم إلى طاقة كهربائية . وقد لجأت بعض المصانع الالكترونية إلى هذه التقنية لتأمين الكهرباء عند حدوث انقطاع مفاجئ للتيار الكهربائي نظراً لصغر حجمها وطول عمر استهلاكها. ويوضح الشكل (12-10) مخططاً مبسطاً لوحدة تخزين نموذجية تستخدم ملفاً مغناطيسياً فائق التوصيل.



شكل (12-10): مخطط لوحدة تخزين تستخدم ملفاً مغناطيسياً فائق التوصيل

أسئلة تقويمية

1. ما هي أنواع الخزن الحراري ؟ وما هي الوسائط المستخدمة فيه ؟
2. ما هي أهم المواد المتغيرة الطور المستخدمة في منظومات الخزن الحراري ؟
3. كيف يتم استخدام الخزن بالطاقة الكامنة في توليد الطاقة الكهربائية ؟
4. كيف يتم خزن الهيدروجين ؟

الفصل الحادي عشر

طاقة حرارة مياه البحار والمحيطات
وطاقة وقود الهيدروجين وخلايا الوقود
والطاقة المسترجعة

11-1 طاقة حرارة مياه البحار والمحيطات

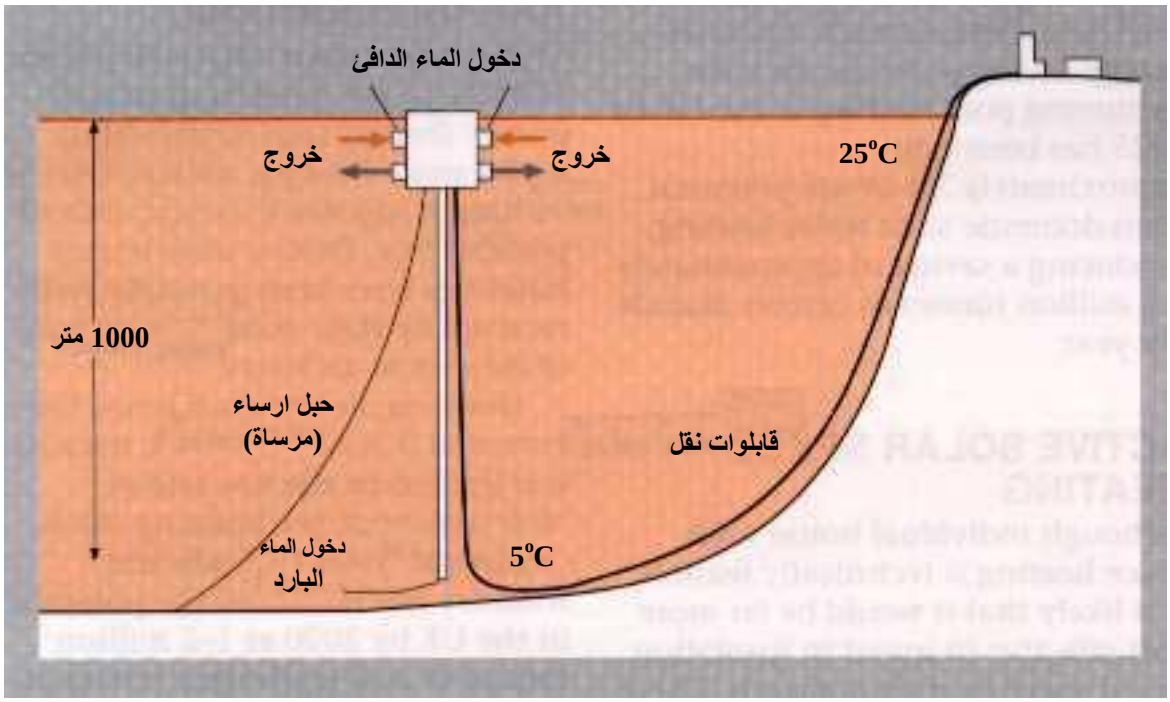
11-2 طاقة وقود الهيدروجين

11-3 خلايا الوقود

11-4 الطاقة المسترجعة

1-11 طاقة حرارة مياه البحار والمحيطات

تختلف درجة حرارة مياه المحيطات باختلاف الطبقة والمنطقة الجوفية التي توجد فيها هذه المياه . فالمياه السطحية للبحار والمحيطات تختزن قدراً هائلاً من الطاقة الشمسية التي تسقط عليها طوال النهار خصوصاً تلك التي على خط الاستواء والتي تصل درجة الحرارة فيها في بعض المناطق إلى نحو 30 درجة مئوية . أما طبقة المياه الباردة السفلية فإنها تتكون نتيجة لذوبان الثلوج القادمة من المناطق القطبية ، ونظراً إلى برودة المياه فإن كثافتها تكون عالية، ولهذا فهي تهبط إلى الأعماق وتكوِّن طبقة باردة قد تصل درجة حرارتها إلى حوالي 5 درجات مئوية على أعماق تتراوح من 800 إلى 1000 متر (الشكل 1-11) .



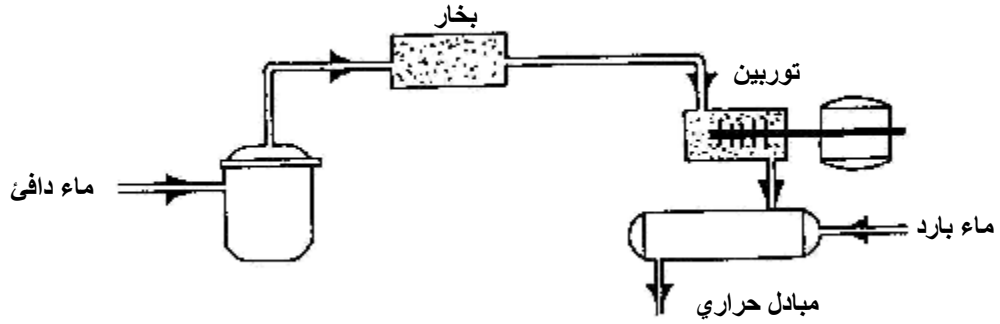
شكل (1-11): منظومة تستخدم لاستغلال طاقة حرارة المحيطات

لقد فكر بعض العلماء في استخدام الفرق بين درجة حرارة سطح البحار ودرجة حرارته السفلية في توليد الطاقة الحركية وعلى الرغم من صغر هذا الفارق فإنه يكفي نظرياً للاستفادة منه في توليد الطاقة ، وإن كانت كفاءة المحرك الحراري الناتج ستكون قليلة إلى حد ما ، إذ قد لا تزيد عن 2% . ويشترط لنجاح توليد الطاقة بهذا الأسلوب ألا يقل الفرق في درجة الحرارة بين طبقتي المياه الدافئة والباردة عن 15 درجة مئوية .

إن أول تجربة ناجحة في استغلال هذا المورد من الطاقة تمّت في عام 1929 ، وقد قام بها مهندس فرنسي يدعى جورج كلود الذي أقام محركاً صغيراً قدرته 22 كيلووات على شاطئ البحر واستخدم فيه الماء البارد من أعماق البحر عبر أنبوب طويل. ولئن لم تكن هذه المحاولة ناجحة من الناحية الاقتصادية فانها برهنت على إمكان تنفيذ هذه الأفكار. كما أجريت تجربة أولية أخرى نفذت في الثلاثينات في البحر الكاريبي حيث تم سحب مياه من أعماق البحر. وقد أنتجت هذه المنظومة طاقة لا تزيد كثيراً على الطاقة التي صرفت في سحب المياه . وكشفت هذه التجربة أنّ تشغيل محطة بحرارة المحيطات تنتج 100 ميجاوات فإن ذلك يتطلب ضخ حوالي 500 متر مكعب من الماء بالثانية لكل من الماء البارد والماء الدافئ خلال تبادلها الحراري .

وهنالك طريقتان لاستغلال حرارة مياه البحار في إنتاج الطاقة الكهربائية . الأولى هي استخدام الدائرة المفتوحة ، وفيها يستعمل ماء البحر وحده . والثانية هي استخدام الدائرة المغلقة وذلك باستعمال سائل آخر سريع التطاير .

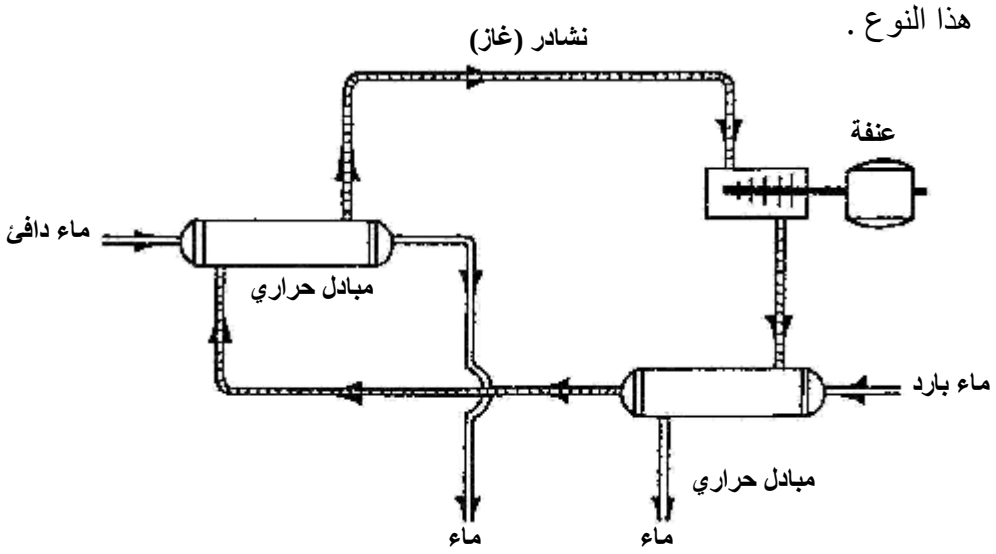
وطريقة الدائرة المفتوحة بسيطة نسبياً أذ يدفع ماء سطح البحر الدافئ ، الذي تكون حرارته حوالي 30 درجة مئوية ، إلى مبخر خاص تحت ضغط مخلخل(Vacuum) يصل إلى نحو ثلاثة أجزاء من مائة $\left(\frac{3}{100}\right)$ من الضغط الجوي الاعتيادي ، فيتحول هذا الماء إلى بخار يمرر على توربين ومنه ينتقل إلى مبادل حراري آخر ليقابل تياراً من الماء البارد الوارد من قاع البحر فيتكثف البخار إلى ماء مرة أخرى . وهذا الفارق في الضغط بين أول الدائرة ونهايتها هو الذي يدفع التوربين إلى الدوران مولداً الكهرباء. ويبين الشكل (11-2) مخططاً لهذه الطريقة .



شكل (11-2): طريقة الدائرة المفتوحة لانتاج الطاقة من حرارة مياه المحيطات

وتحتاج هذه الطريقة إلى استخدام توربين ضخم ، ويجب كذلك تخليص مياه البحر من الهواء الذائب فيه حتى لا يؤدي هذا الهواء إلى تقليل ضغط البخار وتوقف العنفة عن الحركة .

وتختلف طريقة الدائرة المغلقة عن الطريقة الأولى حيث يستخدم فيها سائل آخر سهل التطاير مثل النشادر في دائرة مقفلة خاصة به ، ويُدفع النشادر إلى مبادل حراري ليقابل تياراً من سطح البحر الدافئ فيتحول النشادر إلى غاز أو بخار يمر من خلال التوربين ويدفعه إلى الدوران . يخرج النشادر من العنفة على مبادل حراري ليقابل تياراً من ماء البحر البارد القادم من الأعماق فيتكثف النشادر إلى سائل مرة أخرى . ويمكن استخدام غازات أخرى بدل النشادر كالفريون مثلا . ويبين الشكل (11-3) مخططاً لمنظومة من هذا النوع .



شكل (11-3): طريقة الدائرة المقفلة لانتاج الطاقة من حرارة مياه المحيطات

لا يمكن حالياً الحكم على مدى جدوى استخدام هذه الطاقة ، ولا بد من إجراء مزيد من البحوث والدراسات لزيادة كفاءة المبادلات الحرارية وزيادة كفاءة التوربينات المولدة للكهرباء مع ضرورة صنع تجهيزات من مواد خاصة تستطيع مقاومة التآكل الناتج من مياه المحيط المحملة بالأملاح .

2-11 طاقة وقود الهيدروجين

يعتبر الهيدروجين أحد البدائل الجديدة للطاقة ، ويمكن أن يكون وقود المستقبل وذلك لأن احتراقه لا يسبب في الغالب أية ملوثات بيئية ولكون المحتوى الحراري لاحتراقه يقارب ثلاثة أمثال المحتوى الحراري لنفس الكتلة من الوقود النفطي . ففي المركبات

الفضائية يتم حرقه لدفع المحركات النفاثة . ويمكن كذلك حرقه مع الأوكسجين في غرفة احتراق فتنتج عنه حرارة عالية يمكن أن تحول الماء إلى بخار لإدارة توربينات توليد الطاقة الكهربائية إضافة إلى إمكانية استخدامه في مكائن الاحتراق الداخلي للسيارات وكالغاز الطبيعي يمكن حرقه واستخدام الحرارة الناتجة منه في التسخين .

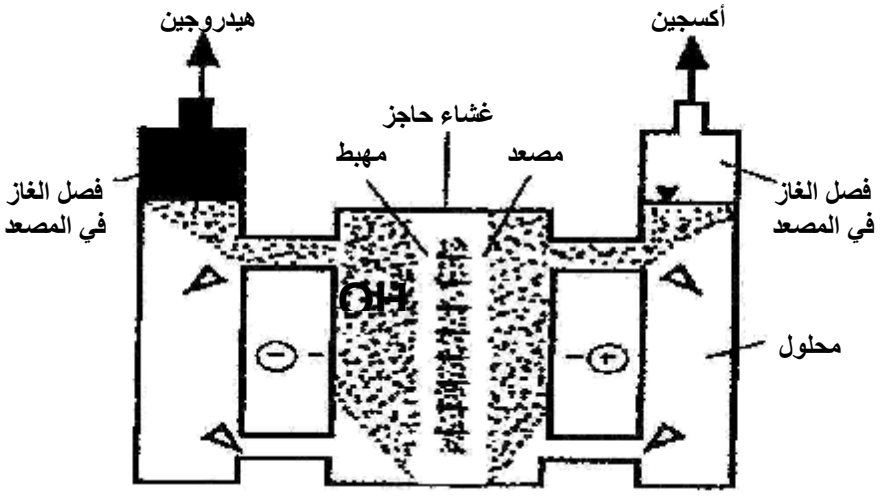
ينتج الهيدروجين حالياً من النفط ، والغاز الطبيعي ، والفحم . وتقدر نسبة الإنتاج بحوالي 50% من النفط ، 30% من الغاز الطبيعي ، و 15% من الفحم ، و 5% من المصادر الأخرى . ويمكن إنتاج الهيدروجين من التحليل الكهربائي للماء أذ يتم تحليل الماء كهربائياً إلى عنصري الأوكسجين والهيدروجين ، ومن هذه الطريقة ينتج غاز بدرجة نقاوة عالية جداً .

تعتبر المياه المتوفرة في البحار والمحيطات المصدر الرئيسي لإنتاج غاز الهيدروجين. ويمكن استخدام الطاقة الشمسية في إنتاج الهيدروجين وذلك بتحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية بواسطة الخلايا الشمسية ومن ثم استخدام الكهرباء الناتج لتحليل الماء . ويوضح الشكل (11-4) كيفية عمل المحلل الكهروليتي لتحليل الماء وتتضمن العملية التفاعلات التالية :

التفاعل في المهبط : $2H_2O + 2e^- \rightarrow H2 + 20H^-$

التفاعل في المصعد : $20H^- \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^-$

التفاعـــل النهائـي : $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$

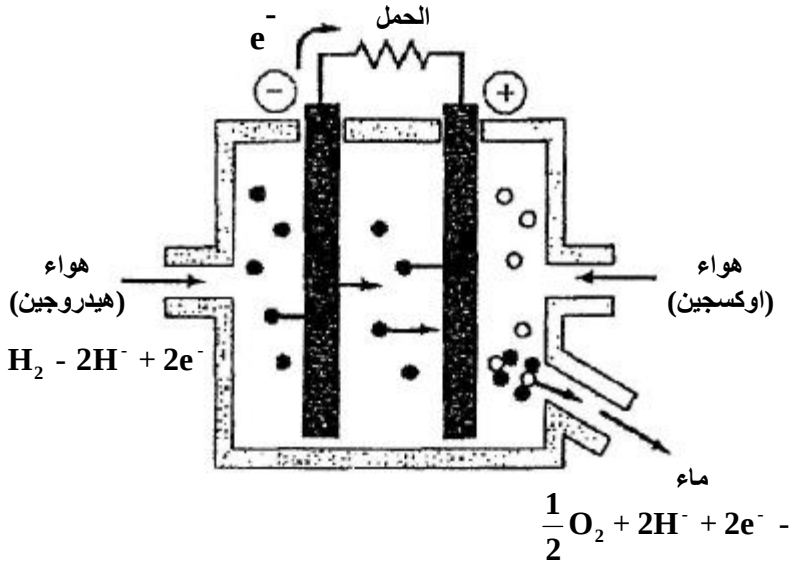


شكل (11-4): مخططاً يوضح عملية التحليل الكهروليتي

عند مرور تيار كهربائي مستمر في الخلية فإن الهيدروجين (شحناته موجبة) يتجمع عند القطب السالب (المهبط) للخلية في حين يتجمع الأوكسجين (شحنات سالبة) عند القطب الموجب (المصعد) وذلك على شكل فقاعات غازية ، ويفصل الغشاء الحاجز بين غاز الهيدروجين والأوكسجين ، ويتم فصل كل غاز عن المحلول الناتج في الغرفة الخاصة بفصل الغازات ، ثم يعود سائل المحلول ثانية إلى الخلية لإعادة الدورة مرة أخرى وهكذا ، وبعد الحصول على الهيدروجين يتم تخزينه إما على شكل سائل مضغوط أو على شكل غاز في خزانات أو اسطوانات تحت ضغوط مختلفة حسب نوع الاستخدام والتطبيق .

3-11 خلايا الوقود

تتكون خلية الوقود من قطبين من الكربون تفصل بينهما مادة موصلة للكهرباء تعرف بالالكتروليت، وهي تتكون عادة من مادة حامض الكبريتيك أو هيدروكسيد البوتاسيوم . وتعمل خلية الوقود عن طريق أكسدة غاز الهيدروجين بأوكسيد الهواء . فعند أمرار تيار من الأوكسجين أو الهواء على القطب الموجب فإن ذلك يتسبب في انطلاق الإلكترونات من قطب إلى آخر ويسبب مرور التيار الكهربائي . ويبين الشكل (11-5) مبدأ عمل الخلية .



شكل (11-5): مخططاً يوضح مبدأ عمل خلية الوقود

عند القطب الموجب فتحول ذرة الهيدروجين تتحول إلى أيونات الهيدروجين والكترونات وتدخل خلال حامض الكبريتيك أو هيدروكسيد البوتاسيوم .

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$$

وعند القطب السالب تتحد أيونات الهيدروجين مع ذرات الأوكسجين والألكترونات لتكوين ماء وتسير الألكترونات خلال الدائرة الخارجية التي تربط القطبين .

$$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$$

تتميز خلايا الوقود ببساطتها وكفاءتها العالية التي تتراوح بين 50% و 65% ، كما إنها لا يصدر عنها أي ضوضاء وهي غير ملوثة للبيئة، فإنتاجها بخار ماء فقط . وبذلك يمكن نصبها داخل المدن قريباً من الأحمال الكهربائية . ومنظوماتها بسيطة ومن السهل نصبها، ويمكن أيضاً استخدام أنواع مختلفة من الوقود كالغاز الطبيعي والهيدروجين والميثانول والغاز الحيوي .

ويمكن استخدام خلايا الوقود في حافلات النقل فبالرغم من أن ثقل وزنها لا يؤهلها للاستخدام في السيارات الصغيرة فأنها مناسبة جداً للحافلات الكبيرة والشاحنات . ومن المشاكل التي تواجه توسيع استخدام خلايا الوقود ارتفاع سعرها الأولي. وتجري أبحاث كثيرة في دول مختلفة من العالم لتقليل سعرها . وقد تم نصب محطتين تجريبيتين في هذا المجال أحداهما بسعة 4.5MW في مدينة طوكيو وأخرى بسعة 4.8MW في مدنية نيويورك .

4-11 الطاقة المسترجعة

أخذت منظومات الطاقة المسترجعة بالتطور والانتشار على نطاق تجاري محدود. وقد تزامن استغلال هذه الطاقة كأحد الحلول المقترحة للتغلب على تلوث البيئة من خلال استغلال المخلفات الحارة والساخنة التي تتسرب إلى الجو والأرض والمياه .

وتعتبر الطاقة المسترجعة من المعامل والمصانع والحرارة الناتجة من أجهزة التكيف وتوليد البخار والغازات أمثلة لأنواع مصادر هذه الطاقة . تستخدم حالياً هذه الطاقة في عمليات التدفئة وتسخين المياه للمجمعات السكنية القريبة من مصادرها. ويعتبر استغلال مصادر الطاقة المسترجعة ذا مردودات اقتصادية وبيئية مشجعة .

أسئلة تقويمية

1. كيف يتم استخلاص الطاقة من فرق درجات الحرارة بين السطح وأعماق البحار والمحيطات ؟
2. ما هي التقنيات التي يتم فيها توليد الطاقة الكهربائية من طاقة حرارة مياه المحيطات والبحار ؟
3. ما هي الطرق المستخدمة حالياً في إنتاج الهيدروجين ؟
4. تعتبر خلايا الوقود من التقنيات الواعدة والتي سيكون لها دور كبير في تأمين جزء من احتياجات الطاقة في المستقبل . ما هي مكونات هذه الخلايا ؟ وكيف يتم الحصول على الطاقة الكهربائية منها ؟
5. ما هي مشاكل تقنية خلايا الوقود ؟
6. ما هي فوائد استغلال تقنية خلايا الوقود على البيئة خصوصاً وإن وقودها الهواء الدافئ والهيدروجين بينما ناتجها الكهرباء ومخلفاتها الماء ؟ وهل ترى في إنتاج بخار الماء من هذه العلمية تأثيراً على المناخ لو استخدمت هذه التقنية بشكل واسع ؟

الفصل العاشر

طاقة الحرارة الجوفية

1-10 مقدمـــــة

2-10 أنواع مصادر الطاقة الجوفية

3-10 مصادر الحرارة والموائع المتعلقة بالنشاطات البركانية

4-10 الخصائص الكيميائية للمياه الجوفية

5-10 تغيير الضغط مع العمق

6-10 مصادر الحرارة في السهول الرسوبية

7-10 الصخور الحارة الجافة

8-10 حقول البخار ذات الضغط العالي

- محطات البخار الجاف
- المحطات البخارية الوميضية الأحادية
- محطات الدورات المزدوجة
- المحطات الوميضية الثنائية

9-10 المصادر المستخدمة في الاستخدام المباشر لطاقة الحرارة الجوفية

10-10 تقنيات الصخور الحارة الجافة

11-10 الاعتبارات البيئية لطاقة الحرارة الجوفية

2-10 طاقة الحرارة الجوفية

تعتبر الأرض خزاناً ضخماً للحرارة التي يعتقد بأن لها مصدرين: الأول هو أن الأرض كانت كتلة غازية حارة جداً ثم بدأت تبرد مع مرور الزمن ، إذ بردت قشرتها وتصلبت نتيجة تماسها المباشر مع الفضاء الخارجي ، أما الجزء الداخلي فما زالت درجة حرارته عالية جداً . والمصدر الثاني هو أن حرارة الأرض هي الحرارة الناتجة من تحلل المواد المشعة الموجودة بمقادير صغيرة من الصخور نتيجة لتحلل عناصر الراديوم واليورانيوم والتوريوم والبوتاسيوم وغير ذلك من المواد المشعة الموجودة بنسب متفاوتة في هذه الصخور . ويظهر النشاط الإشعاعي بشكل بارز في صخور الغرانيت (صخور نارية) .

إن كمية الحرارة المتسربة سنوياً من باطن الأرض تعادل تقريباً 10^{12} جول ، وهي قليلة مقارنة بحرارة الشمس التي تصل إلى الأرض سنوياً والبالغة $5.4 \text{ X } 10^{24}$ جول . وبعض مناطق الأرض فيها كمية حرارة مركزة وقريبة من سطح الأرض ، وتقوم المياه الجوفية بنقل هذه الحرارة إلى سطح الأرض على شكل ينابيع ساخنة يتصاعد منها الماء الساخن أو البخار ، ويمكن بذلك الاستفادة من هذه الحرارة للتسخين أو توليد الطاقة الكهربائية .

وإلى حدّ عام 1990 كانت كمية الطاقة الكهربائية المولدة من طاقة الحرارة الجوفية في مختلف دول العالم حوالي 6 جيغاواط ، وهي تمثل نسبة قليلة من الطاقة الكهربائية الكلية المولدة ، إلا إنها مصدر مهم للطاقة في بعض المناطق . وهناك حوالي 4 جيغاواط أخرى تم استثمارها أيضاً في استخدامات مباشرة دون توليد طاقة كهربائية ، ومجالات استخدام الطاقة المتأتية من هذا المصدر هي لغرض التدفئة والزراعة ومختلف العمليات الصناعية (الجدول 10-1) .

وعلى الرغم من أن بعض المختصين يعتقدون أن الطاقة الحرارية الجوفية غير متجددة - وهذا هو الغالب - بسبب فتور بعض الينابيع الحارة وتوقف نفثها البخار ، فإنها تشترك مع مصادر الطاقة المتجددة بكونها طاقة نظيفة وطبيعية وتختلف عن مصادر الطاقة التقليدية المخزونة في باطن الأرض كالنفط أو الوقود النووي . إن استغلال الطاقة الجوفية يعود إلى العصر الروماني الذي كانت المياه الحارة فيه تستخدم للأغراض الطبية والاستخدامات المنزلية والاستحمام . وسكان نيوزلندا الأصليون ، وقبل وصول الأوربيين إليها ، كانوا يعتمدون على البخار الصادر من الأرض للطبخ والتدفئة ويستخدمون الماء الحار للاستحمام والغسل والمعالجة .

جدول (10-1) : مصادر الطاقة الجوفية في مختلف أنحاء العالم المستثمرة حتى عام 1990

البلد	الطاقة الكهربائية المولدة (MW_e)	الاستخدام المباشر (MW_e)
أمريكا		
الولايات المتحدة	2800	160
المكسيك	680	8
السلفادور	95	-
نيكاراغوا	35	-
غـــرب الباســـفيك (المحيط الهادئ)		
اليابان	228	970
الصين	11	610
تايوان	3	10
الفلبين	894	-
أندونسيا	140	-
نيوزلندا	280	200
أوربـــــا، آســـــيا، إفريقيا		
الاتحـــاد الـــسوفيتي السابق	11	340
ايسلينداا	39	480
فرنسا	4	270
إيطاليا	545	210
المجّر	-	375
تركيا	21	70
زكيا	3	-
كينيا	45	-
الأخرى	-	240
المجموع	**5834**	**4123**

وفي القرن التاسع عشر أمكن ، بفضل التقدم التقني ، استغلال هذه المصادر بصورة علمية. وفي منطقة توسكني (Tuscany) استخدمت الطاقة الجوفية بدلاً من الخشب في عمليات تحضير مركبات البورون والأمونيوم . لقد بدأ توليد الطاقة الكهربائية من هذا المصدر عام 1904 من قِبل الأمير كونتي (Conti) ، وشهد عام 1913 تشييد أول محطة توليد بطاقة 250 كيلو واط في منطقة لارديرلو (Larderllo) التي تعتبر كبداية لفعاليات جديدة . وتبلغ سعة محطة لارديرلو الآن 400 ميغاواط ، ومن الممكن أن تصل إلى 850 ميغاواط .

ويعتبر حقل ويراكي (Wairakei) في نيوزلندا الحقل الثاني الذي استثمر في عام 1950، وتبعه حقل في شمال كاليفورنيا بدأ توليد الطاقة فيه عام 1960 بسعة مقدارها 2800 ميغاواط ، وهو الآن من أكثر الحقول تطوراً في العالم .

ومن الدول التي استثمرت هذه الطاقة هي إيطاليا ، وإيسلندا ، واليابان ، والفلبين ، والمكسيك. ومن الدول المرشحة لاستغلال هذه الطاقة هي السلفادور ، ونيكاراغوا ، وكوستاريكا ، والاكوادور ، وتشيلي .

أما الدول التي استخدمت الطاقة الحرارية مباشرة لأغراض التدفئة والزراعة فهي اليابان ، والصين ، وجورجيا ، وداغستان . وتعتبر المجّر وإيسلندا هما الدولتان الرئيسيتان اللتان استغلتا الطاقة الجوفية في مجال الاستخدام المباشر ، بالإضافة إلى أنه تم تطوير تقنيات متقدمة في فرنسا وبعض الدول الأوربية الأخرى .

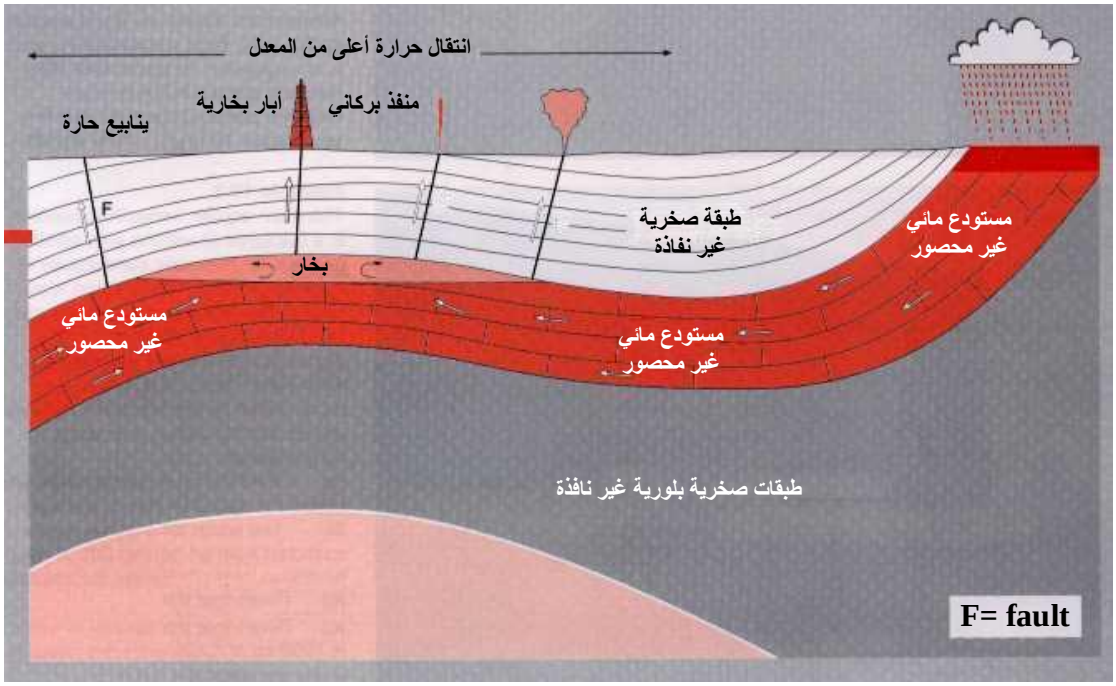
2-10 أنواع مصادر الطاقة الجوفية

هناك ثلاث خصائص هامة لمصادر الطاقة الجوفية بشتى أنواعها ، كما هو مبين بالشكل (1-10) وهي :

1 - طبقة مائية صخرية (Aquifer) تحتوي على ماء يُمكن الوصول إليه بعد الحفر.

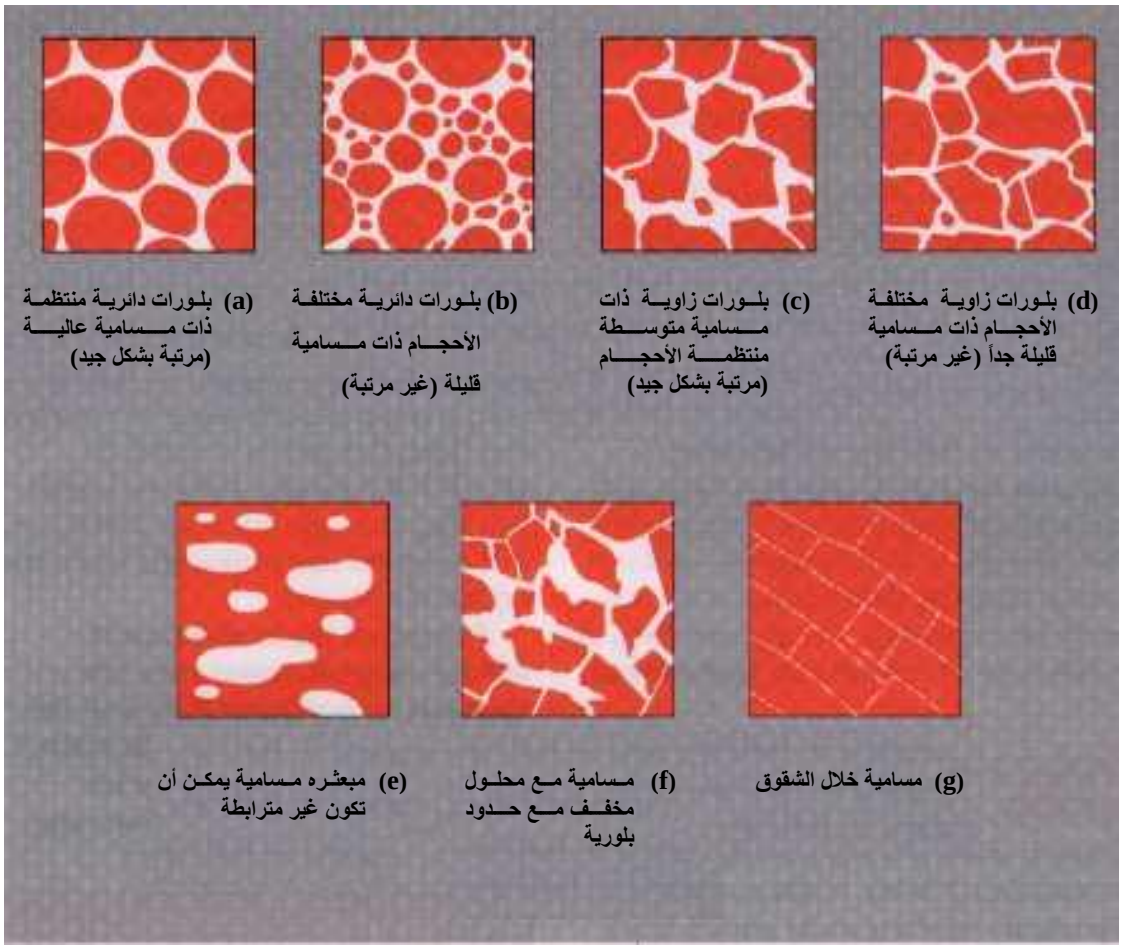
2 - طبقة صخرية فوقية (Cap rock) تحجز الماء .

3 - مصدر حراري .



شكل (1-10): خصائص مصادر الطاقة الجوفية

والطبقة الصخرية المائية (Aquifer) الطبيعية هي صخور مسامية تستطيع أن تخزن الماء ، ويمر الماء من خلالها . والصخور في الشكل (2a, 2c-10) هي صخور ذات مسامية عالية وبذلك تكون عالية النفاذية ، لكن الصخور في الشكل (2b, 2d-10) لها مسامية قليلة ونفاذية قليلة . والصخور في الشكل (2e-10) لها نفاذية قليلة بالرغم من أن لها مسامية عالية لأنها غير مترابطة لكن الصخور في الشكل (2f -10) لها مسامية ونفاذية عاليتان . والنفاذية الناتجة عن التكسر كما هو موضح بالشكل (2g -10) هي مهمة في حقول الحرارة الجوفية .



شكل (2a,b,c,d, e, f, g-10): أنواع مختلفة من الصخور

وتعتبر الموصلية الهيدروليكية (K_w) في الصخور مقياساً جيداً للنفاذية . وينص قانون دارسي (Darcy's Law) على أن سرعة المائع (V) المار خلال مادة مسامية يتناسب مع فرق الضغط المسبب للسريان :

$$\frac{H}{L} K_W = V$$

حيث أن H هو الارتفاع المؤثر للماء المسبب للجريان ويقاس بالمتر، والنسبة (H\L) هي فرق الضغط أو الفرق الهيدروليكي ، وهو التغير في الارتفاع المؤثر(H) لمسافة (L) على طول اتجاه الجريان .

وحجم المـــاء (Q) المار في وحدة الزمن خلال مساحة معينة (A) بالمتر المربع هو حاصل ضرب السرعة في المساحة . أو يمكن كتابة قانون دارسي كالآتي :

$$\frac{H}{L} K_W A = Q$$

حيث K_W هو الحجم المار خلال متر مربع واحد في وقت معين وتحت فرق ضغط هيدروليكي واحد .

ويبين الجدول (10-2) بعض المعلومات عن المسامية والموصلية الهيدروليكية لبعض الصخور ، مع ملاحظة أن أعلى قيم تكون في الصخور غير الصلبة وغير المصقولة مثل الرماد البركاني المنتشر اعتيادياً في المناطق البركانية ، وهذه القيم عالية أيضاً في بعض الأحجار الكلسية والأحجار الرملية التي تمتلك نفاذية عالية .

جدول (10-2) النفاذية والموصلية لبعض الصخور

المادة	النفاذية (%)	الموصلية الهيدروليكية (متر/يوم)
طين	60-45	$<10^{-2}$
غرين	50-40	10^{-2}-1
رمل ورماد بركاني	40-30	1-500
حصى	25-35	10000-500
صخور رسوبية متكونه من:		
أ- حجر طيني	5-15	10^{-8}-10^{-6}
ب- حجر رملي	5-30	10^{-4}-10
جـ- حجر جيري	0.1-30	10^{-5}-10
صخور بلورية متكونة من:		
أ- حِمَم بركانية متحجرة	0.001-1	0.003-0.03
ب- غرانيت	0.0001-1	0.003-0.03
جـ- صخر صفائحي	0.001-1	10^{-8}-10^{-5}

في الطبقات الصخرية المائية المحصورة ، (الشكل10-1) يكون ضغط السائل تحت نقطة الاستخراج عالياً ، وذلك لوجود طبقة من الصخور تمنع السوائل من الخروج إلى أعلى ، مثل الصخور الطينية والفخار والصخور غير المتكسرة .

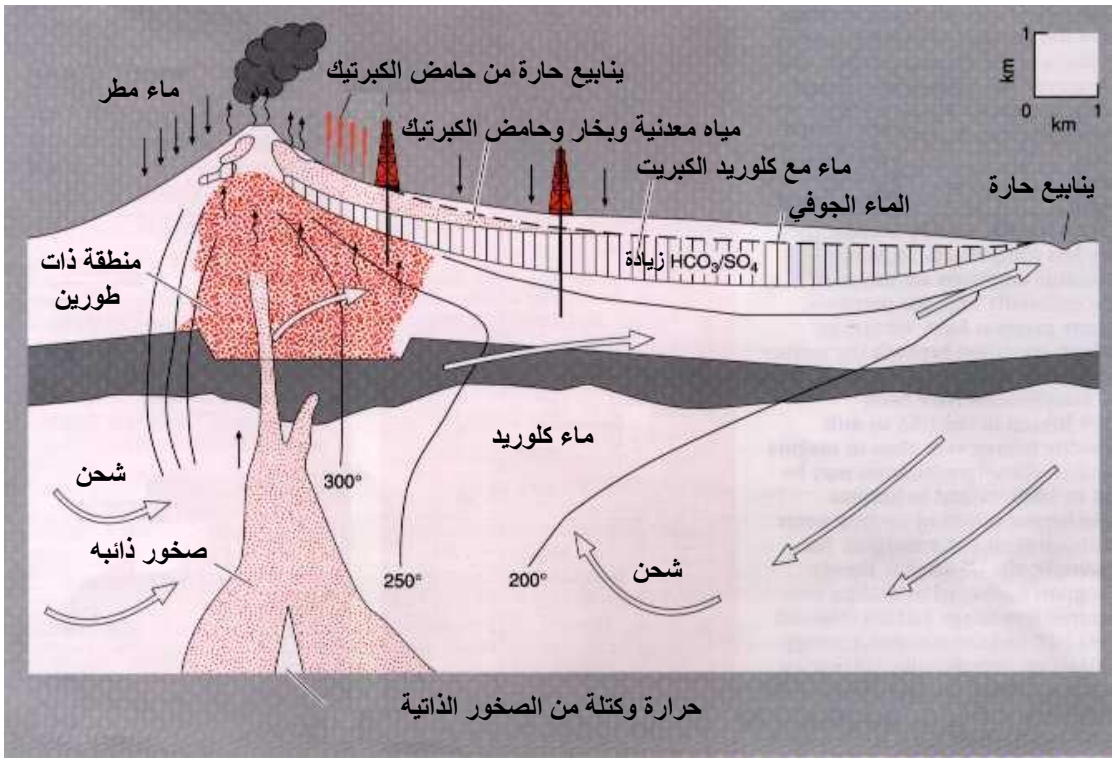
ومن المتطلبات الرئيسية للمصدر الجوفي القابل للاستغلال هو وجود المصدر الحراري . ففي المناطق ذات المحتوى الحراري العالي تكون الحرارة البركانية غزيرة ، أما في المناطق القليلة المحتوى الحراري فإن المصدر الحراري يكون أقل وضوحاً . وفي هذه المناطق هنالك مصدران رئيسيان للحرارة : المصدر الحراري الأول هو الواقع في الأحواض الرسوبية التي تنقل فيها المنطقة الصخرية الماء إلى أعماق تجعلها حارة وجاهزة للاستغلال . والثاني هو الواقع في مناطق الصخور الحارة الجافة التي يكون فيها التوليد الطبيعي للحرارة عالياً ، ولكنها تحتاج إلى عمل منطقة صخرية مائية بواسطة تكسير الصخور ليكون المصدر قابلاً للاستغلال .

3-10 مصادر الحرارة والموائع المتعلقة بالنشاطات البركانية

تتولد الحرارة اعتيادياً من تصلب الصخور المذابة التي لا تكون ، في كل الأحوال، موجودة تحت الحقل الحراري الجوفي كما في الشكل (3-10) . ومن المدهش أحياناً أن الصخور الذائبة تحت البراكين لا تنفجر ، لكنها تصل إلى مستوى تتوازن فيه قدرة الطفو وذلك لكون كثافتها تتساوى مع كثافة الصخور المحيطة بها . وهنالك عاملان يتعاونان على إيقاف الصخور الذائبة الصاعدة من الأسفل : أولهما أن الضغط يقل مع صعود الصخور الذائبة إلى الأعلى ، وهذا يساعد على فصل سائل الصخور الذائبة عن الغازات المذابة الضائعة ، وبذلك تزداد كثافة الصخور الذائبة المتبقية. والعامل الثاني هو أن الصخور في المناطق الضحلة تكون أقل انضغاطاً ، علماً بأن الانفجار البركاني يتكون نتيجة ازدياد ضغط الغاز . وإن معظم الصخور الذائبة تتجمد على عمق يتراوح من 1 إلى 5 كيلومتر.

وتوجد مواقع عديدة للطاقة الجوفية ذات إمكانيات جيدة تحت مواقع البراكين الخامدة وهي مناسبة للاستثمار ، وذلك لأن الصخور عازل جيد للحرارة ، ولهذا فإن الزمن الذي تستغرقه الصخور الذائبة بالرجوع إلى درجة حرارة المحيط يستغرق عشرات الملايين من السنين . وهذه المناطق تستمر في كونها مصدراً للمائع الحار . وطبيعة هذا

المصدر تعتمد على الظروف المحلية من ضغط ودرجة حرارة داخل المنطقة . وهذه تحدد طريقة الاستخلاص وصلاحية الموقع .

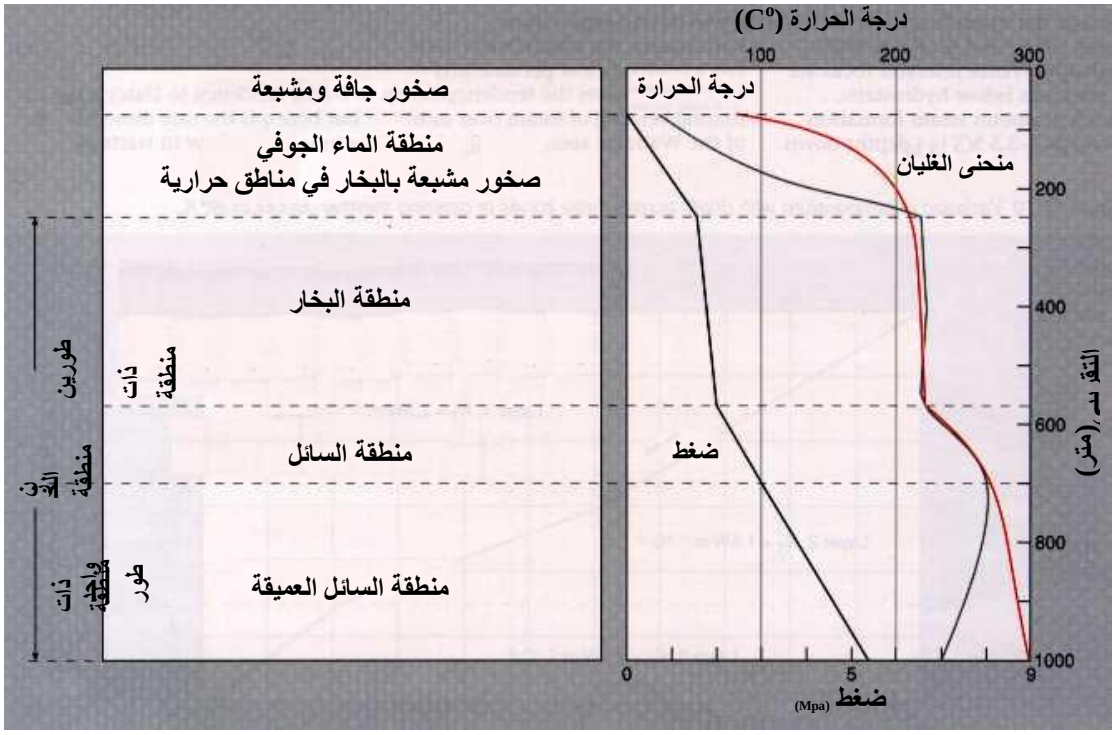


شكل (10-3): نموذج افتراضي لمنظومة حرارة جوفية بركانية

إن المدى الجيد لاستغلال موقع معين هو أن تكون درجة الحرارة (T) فيه تتراوح بين 100 و 300 درجة مئوية أقل من النقطة الحرجة التي لا يمكن فيها تمييز الماء السائل أو بخار الماء ، إذ يصل مدى الضغط فيها إلى حدّ 20 ميغا باسكال .

والمنحني الاعتيادي لدرجة الحرارة T والضغط P (P-T Curve) في موقع عمودي من حقل حراري جوفي يتوضح في (الشكل 10-4) . ففي الأعماق الضحلة التي يبلغ عمقها حوالي 250 متراً تكون درجة الحرارة منخفضة بحيث لا يمكنها الوصول بالماء إلى درجة الغليان ، ولكن في الأعماق التي تتراوح بين 250 و 575 متراً فإن درجة الحرارة تكون عالية بما فيه الكفاية لتبخر الماء ، ولهذا فإن منحنى درجة الحرارة يقع إلى اليمين من منحنى نقطة الغليان (الشكل 10-4) . وخلال هذه المنطقة يكون ازدياد الضغط قليلاً وذلك راجع لامتلاء فتحة الحقل ببخار الماء المتحول بدلاً من الماء، وإن وزن الغاز هو الذي يسبب زيادة الضغط القليلة هذه . ولأن بخار الماء يتحول بسرعة فإن المنطقة ستكون ثابتة الحرارة (Isothermal Zone) . وفي عمق يتراوح بين 575 متراً و 700 متر يزداد معدل درجة الحرارة مع العمق ، وذلك لمسايرة تبخير الماء عند

الازدياد المستمر للضغط . إن الضغط يزداد بسرعة في أعماق أقل من 700 متراً عندما يبتعد سير الضغط والحرارة (P-T) للمائع الجوفي عن منطقة غليان الماء في المنحنى . إن الفصل بين مناطق السائل والبخار نادراً ما يكون واضحاً كما هو مبين بالشـــكل (4-10) ، وذلك لأن في الأعماق التي تتراوح بين 250 و700 متر يكون المائع قريباً من طور تغيير درجة الحرارة (بين السائل والبخار) ، وفي هذه الحالة لا تقوم كمية الطاقة المضافة أو المستخرجة بتغيير درجة الحرارة ، لذا فإن هذه المنطقة في الحقيقة هي منطقة يتواجد فيها الطوران الغازي والسائل يكون فيها بخار الماء مركزاً فوق السائل .



شكل (10-4): منحنى الضغط ودرجة الحرارة لأحد المواقع الجوفية

وعلى أثر ذلك تقسم منظومات المحتوى الحراري العالي إلى المنظومات ذات المحتوى البخاري والمنظومات ذات المحتوى السائل معتمدة على الطور (سائل أو بخار) في الخزان . وعند النظر للخزان في الشكل(10-4) يمكن اعتباره ذا هيمنة بخارية . ومن الطبيعي لمنظومة كهذه أن تحتوي على بخار ذي محتوى حراري عالٍ على شكل بخار عالي الحرارة لأن درجة الحرارة ارتفعت إلى أعلى من نقطة الغليان في المنحنى . وهذا النوع من المصادر هو الأفضل إنتاجاً وذلك لأن البخار فيه يكون جافاً (خالياً من السوائل) ، ويحتوي على كمية حرارة عالية . ويكون خزان الصخور هذا تحت ضغط يتراوح من 3 إلى 3.5 ميغا باسكال عند عمق 2000 متر ، ويجب أن يتم عزل هذه المستودعات من تسرب الماء الجوفي الأرضي .

وعلى العكس ، فإن المناطق التي يهيمن فيها السائل تكون تحت ضغط عالٍ يزيد على 10 ميغا باسكال وبعمق أقل من كيلو متر واحد. إن توليد الطاقة الكهربائية من المناطق التي يهيمن فيها السائل تستفيد من الضغط العالي في العمق إذ يتحول فيها الماء إلى بخار عندما يعبر نقطة التبخير على المنحنى إلى ضغط أقل . لذا يمكن القول إن منحنى P-T في المناطق التي يهيمن فيها السائل يكون أقل من منحنى التبخير للماء على كل الأعماق ، ولكن عندما تفتح فتحة في المنطقة فإن الضغط سيقل والماء المرتفع سيعبر نقطة الغليان عند صعوده إلى السطح ، وبذلك يتكون بخار لكنه سيكون بخاراً رطباً وذا محتوى حراري قليل مما يسبب مشاكل عند توليد الطاقة الكهربائية .

إن تفسير كيفية انتقال الحرارة من الصخور المتصلبة لتعزيز دوران المياه الحارة ، كما هو مبين بالشكل (10-3) ، معقد ويحتاج إلى بحوث كثيرة . لكن من الواضح أن التفاعل بين الصخور والماء الجوفي نادراً ما يحدث ، وأن الحرارة تنتقل بواسطة التوصيل من الصخور عبر منطقة متاخمة (Boundary Layer) ، وتكون في بعض الأحيان ضيقة جداً لكن لها انتقال حراري عالٍ ، وبذلك تكون المنطقة الأعلى ذات مياه حارة مناسبة للتدفئة . وفي بعض الأحيان يخرج الماء مباشرة من منطقة الصخور حاملاً معه أنواعاً مختلفة من المواد الكيميائية المتطايرة التي تختلط أحياناً مع المياه الجوفية المتوفرة وتسبب مشاكل تلوث للذين يستغلون هذا المصدر . والمعلومات الجيوكيمائية تشير إلى أن معظم الماء الجوفي هو ماء مطر مخلوط بقليل من ماء الصخور البركانية .

4-10 الخصائص الكيميائية للمياه الجوفية

يوضح (الشكل 10-3) كيفية اختلاف كيمياء محاليل المناطق الجوفية بالنسبة لبعدها عن الصخور البركانية الحارة . فالغازات المتسربة من مناطق الصخور البركانية تحتوي على كلوريد الهيدروجين (HCL) و ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) وثاني أكسيد الكربون (CO_2) . ويحتوي ماء المطر على ثاني أكسيد الكربون المذاب . ويتفاعل كلوريد الهيدروجين من الصخور البركانية مع الصخور المجاورة مكوناً ماءً جوفياً يحتوي على كلوريد الصوديوم (Nacl) وقليل من كلوريد البوتاسيوم (Kcl) . وبعض هذه المياه يتسرب إلى سطح الأرض كينابيع كبريتية .

ويصل ثاني أكسيد الكبريت إلى سطح الأرض مكوناً ينابيع الكبريت الحامضية . ويكون البخار الناتج من الماء الحراري الجوفي قرب السطح غنياً بالكبريت أكثر من البخار الموجود في مناطق أعمق والذي يختلط مع محلول غني بالكلور . وهنالك زيادة مستمرة بمحتوى الكربونات الثنائية على مسافة من مركز الصخور البركانية وذلك لاختلاطها بماء المطر المشبع بثاني أكسيد الكربون .

5-10 تغيير الضغط مع العمق

يزداد الضغط بحوالي 1 ضغط جوي لكل زيادة 10 أمتار من العمق ، لذا فإن منطقة الطبقة الصخرية المائية ذات عمق 1000 متر تنتج ضغطاً مقداره 100 ضغط جوي (100 Bars) أو 10 ميغا باسكال (ميغا باسكال واحد يعادل 10 ضغط جوي) .

6-10 مصادر الحرارة في السهول الرسوبية

من النقاط المهمة التي يجب معرفتها لفهم مصادر طاقة الحرارة الجوفية هي معادلة التوصيل :

$$K_T \frac{\Delta T}{Z} = q$$

q = كمية الحرارة المتنقلة (وات بالمتر المربع)

ΔT = فرق درجات الحرارة (بالدرجات المئوية) على ارتفاع Z (بالمتر)

$\Delta T \backslash Z$ = التغيير الحراري

K_T = التوصيلية الحرارية (وات/متر- درجة مئوية)

مثال حول تغير درجة الحرارة مع الأعماق

إذا افترضنا وجود حرارة تنتقل إلى الأعلى من عدة كيلومترات تحت السطح وبمعرفة التوصيلية الحرارية للتربة نستطيع أن نربط كمية الحرارة المنتقلة مع درجة الحرارة على أي عمق . فمثلاً إذا كانت درجة الحرارة على عمق 2000 متر هي 58 درجة مئوية وكانت درجة حرارة السطح 10 درجة مئوية فإن التغيير الحراري سيكون :

$$\frac{DT}{Z} = \frac{58-20}{2000} = 0.024 \text{ درجة مئوية لكل متر}$$

وبافتراض أن التوصيلية الحرارية هي 2.5 واط/متر.درجة مئوية ، لذا فإن كمية الحرارة المنتقلة هي :

$$q = 2.5X0.024$$
$$= 0.06 \text{ واط لكل متر مربع}$$

أما إذا افترضنا أن هذه الكمية من الحرارة تنتقل خلال عدة طبقات مختلفة التوصيلية الحرارية فإن المعادلة السابقة تخبرنا بأن هنالك تغييراً حرارياً لكل طبقة مع درجة حرارة متغيرة أكثر خلال الطبقة القليلة التوصيلية الحرارية .

فإذا كانت التوصيلية الحرارية للطبقة الأولى هي 2.5 وات/متر.درجة مئوية ، والتوصيلية للطبقة الثانية 1.5 وات/متر.درجة مئوية ، والطبقة الثالثة 3.0 واط/متر.درجة مئوية ، عندها يمكن أن نتحقق بأن الشكل (10-5) يزودنا بقراءات صحيحة . فعند حساب التغير الحراري لكل طبقة من المعادلة ومقارنتها بقراءة من المنحنى في الشكل المشار إليه نحصل على النتائج التالية :

بالنسبة للطبقة الأولى :

$$\text{التغير الحراري حسب المعادلة} = \frac{0.06}{2.5} = 0.024 \text{ درجة مئوية/متر}$$

$$\text{القراءة من المنحنى} = \frac{34.5 - 10}{1000} = 0.0245 \text{ درجة مئوية/متر}$$

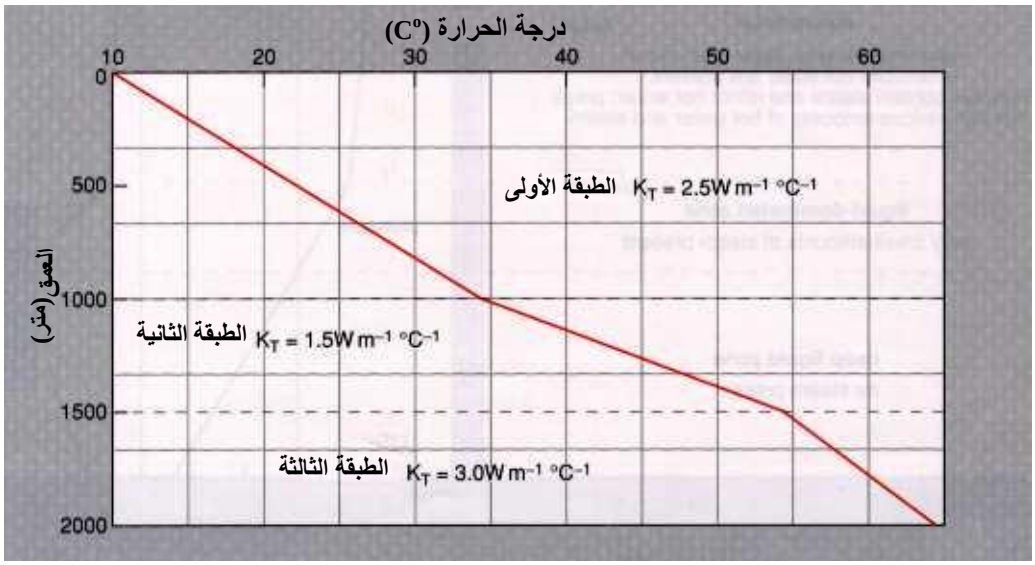
بالنسبة للطبقة الثانية :

$$\text{التغير الحراري حسب المعادلة} = \frac{0.06}{1.5} = 0.04 \text{ درجة مئوية/متر}$$
$$\text{القراءة من المنحنى} = \frac{54.5 - 34.5}{500} = 0.04 \text{ درجة مئوية/متر}$$

بالنسبة للطبقة الثالثة :

$$\text{التغير الحراري حسب المعادلة} = \frac{0.06}{3.0} = 0.02 \text{ درجة مئوية/متر}$$
$$\text{القراءة من المنحنى} = \frac{64.5 - 54.5}{1000} = 0.02 \text{ درجة مئوية/متر}$$

من دقة المعلومات وتوافق الدرجة المحسوبة والمقاسة يتبين أن التغيير الحراري يتناسب مع كمية الحرارة المنتقلة وهي 0.06 واط لكل متر لكل طبقة . وعند مقارنة هذه الحالة مع الحالة الأولى عند استخدام موصلية حرارية واحدة لكل العمق نستنتج أن وجود طبقة قليلة العمق وذات موصلية حرارية قليلة تحّسن من درجة الحرارة على عمق 2 كيلو متر .



شكل (10-5): تغير درجة الحرارة مع العمق لثلاث مناطق مختلفة الموصلية الحرارية

إن قيم الموصلية الحرارية (K_T) لأنواع مختلفة من الصخور (كالصخور الكلسية والرملية والبلورية) متقاربة وتتراوح قيمتها من 2.5 إلى 3.5 وات/م درجة مئوية . أما الصخور الطينية فتتراوح قيمتها من 1-2 وات/م.درجة مئوية . وعند النظر مرة ثانية إلى الجدول (10-2) نرى أن هذه الصخور هي من الصخور العالية النفاذية وتسهم بخاصتين مهّمتيْن للمصادر الجوفية : الأولى أنهّا تعمل كصخور واقية عالية النفاذية، والثانية أنهّا تقوم بتحسين التغير الحراري فوق المنطقة المائية الصخرية .

وهذه الخواص ساعدت في تبني برامج اكتشاف لتحديد مكان المياه الطبيعية الحارة في مناطق الصخور الرسوبية التي تحتوي على الصخور الطينية والصخور الكلسية العالية النفاذية .

إن استكشافات المصادر الهيدروكربونية في الستينات والسبعينات من القرن العشرين كانت ناجحة في تحديد مواقع مياه حارة بدرجات حرارية تتراوح بين 70 و55 درجة

مئوية على أعماق تتراوح ما بين 2 و1 كيلو متر تحت مدينة باريس ، ولكنها لم تجد أي نفط أو غاز . وبما أن هذه الدرجات غير مناسبة لتوليد الطاقة الكهربائية وقربها من الحمل الحراري ، فإن منطقة باريس تكون منطقة مناسبة لاستغلال هذه الطاقة لأغراض التدفئة . وهنالك مناطق أخرى مماثلة في إنكلترا أيضاً .

7-10 الصخور الحارة الجافة

تنسب مصادر الصخور الحارة الجافة إلى الحرارة المخزونة في طبقة من الصخور القليلة النفاذية وإلى العمليات التي يمكن بها استخلاص هذه الحرارة . والطريقة التي يتم بها استخلاص الحرارة من هذه المناطق هي بحفر مجارعميقة داخل الطبقات الصخرية يتم ضخ المياه فيها ليتكون بخار يتم منه توليد الطاقة الكهربائية . وبالرغم من أن التكنولوجيا غير موجودة حالياً لاستخلاص هذه الحرارة إلاّ أنه من الناحية النظرية يمكن لتقنية استخلاص الطاقة من الصخور الجافة أن تطبق على مناطق واسعة من سطح الكرة الأرضية . وكلفة الحفر عالية ، ولهذا فإن 6 كيلو مترات فقط تحت سطح الأرض يمكن استخدامها لاستخلاص طاقة بالرغم من أن الحفر قد وصل أحياناً إلى عمق 15 كيلو متر . وبعد دراسة المحددات التقنية الحالية وكلفة الحفر بعمق فإنه من الأفضل الاهتمام بمناطق صخرية ذات انتقال حراري عالٍ . والهدف المثالي هو أجسام الغرانيت ، وذلك لأنها تحتل حجوماً كبيرة من قشرة الكرة الأرضية وأنها تصلبت من الحمم البركانية ذات التركيز العالي بالمواد المشعة كاليورانيوم والتوريوم والبوتاسيوم .

ومن محاسن استغلال طبقات الصخور الجافة انتقال الحرارة العالي منها إذ يصل فرق درجات الحرارة إلى 30 درجة مئوية لكل كيلو متر فيها ، لذا فإنه على عمـــــق 5 كيلو مترات تكون درجة الحرارة أكثر من 170 درجة مئوية ، وهي مناسبة جداً لتوليد الطاقة الكهربائية . وتجري حالياً بحوث في منطقتين ملائمتين في كل من فرنسا وألمانيا لتطوير استغلال طاقة الحرارة الجوفية .

8-10 حقول البخار ذات الضغط العالي

تبدأ الخطوة الأولى لاستغلال الطاقة الجوفية بدراسات جيولوجية في المناطق البركانية بهدف تحديد الصخور التي تغيرت كيميائيا بواسطة المحاليل الجيوحرارية والمساحات ذات المظاهر الدالة كالينابيع ومستنقعات الطين . والتقنيات الجيو فيزيائية ، وبالأخص

تحديد المقاومة وبعض الطرق الكهربائية الأخرى المصممة للاستشعار عن مناطق ذات موائع موصلة للكهربائية ، هي من الطرق الفعالة لتحديد المصادر الجوفية الحرارية .

وعندما يتم تحديد موقع الصخور المائية يتم حفر البئر . وعندما يكون ضغط المائع داخل الموقع حوالي 10 ميغا باسكال يجب أن يتم رمي طين ذي كثافة عالية للتصدي لهذا الضغط ومنع الانفجار ، ويتم حينها إخراج الغازات التي من الصعب السيطرة عليها. إن مساحة فتحة البئر تقل كلما ازداد العمق . فعند السطح تكون اعتيادياً بحوالي 50 سنتمتراً ، وتكون حوالي 15 سنتمتراً عند عمق الإنتاج . وتغلف البئر بأنابيب فولاذ وكونكريت وأحياناً يتم وضع غطاء فولاذي مثقوب عند عمق الإنتاج . ويتم أيضاً وضع صمام على أنبوب البئر يكون إمّا مربوطاً بلحام بالأنبوب الفولاذي أو مربوطاً بقاعدة الكونكريت على سطح الأرض . وهذه تساعد ربط البئر بمحطة توليد الطاقة عبر شبكة من الأنابيب المعزولة .

إن تقنيات محطة التوليد تعتمد بصورة رئيسية على طبيعة المنتج ولكن ليس فقط درجة الحرارة والضغط وإنمّا أيضاً درجة ملوحته واحتوائه على غازات أخرى ، إن كل هذه تؤثر على كفاءة المحطة وتصميمها . وتوجد الآن أكثر من 250 محطة منصوبة في مختلف أنحاء العالم ، وهي تتضمن أربعة أنواع رئيسية هي :

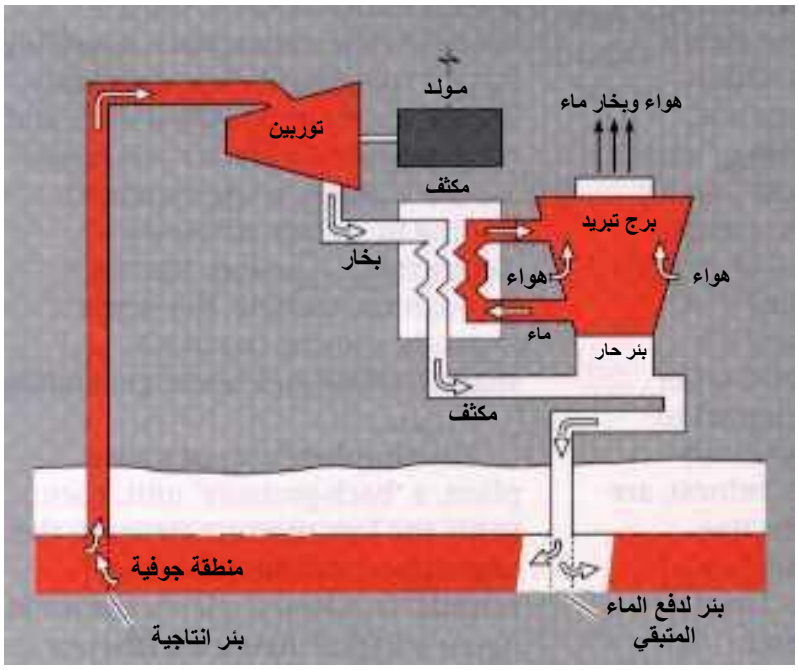
1-8-10 محطات البخار الجاف

يكون البخار المنتج في هذه المحطات غير مختلط بالسوائل ، وإنما هو بخار عالي الحرارة بدرجة حرارة تتراوح بين 185 و180 درجة مئوية وضغط يتراوح بين 0.9 و0.8 ميغا باسكال ويصل إلى السطح من عمق يبلغ عدة كيلومترات . وعندما يتم تنفيسه إلى الجو يحدث صوتاً كصوت الماكنة النفاثة في الجو. ودرجات حرارة هذا البخار تتروح بين 350 و 300 درجة مئوية ، وضغط عالٍ يمكن استغلاله أيضاً ، وهذا يعطينا كفاءة أكثر في إنتاج الطاقة الكهربائية. وعند إمرار البخار في التوربين فإنه سيتمدد ليقوم بتدوير شفرات التوربين وتوليد الطاقة الكهربائية .

وأبسط نوع من هذه المحطات هو وحدة الضغط الخلفي (الشكل10-6) وفيها يتم إطلاق البخار ذي الضغط الواطئ إلى الخارج . ولكن المحطات التي تقوم بتكثيف البخار هي

الأكثر كفاءة إذ تقوم بتكثيف البخار وبالتالي زيادة فرق الضغط بين طرفي التوربين، وذلك لأن الماء يشغل حجماً أقل من حجم البخار بما يعادل 1000 مرة .

إن الكفاءة الاعتيادية لهذه المحطات لا تزيد عن 30% رغم أنها تستخدم بخاراً بدرجات حرارة عالية . وكانت المحطات التي أنشئت في الستينات تحتاج إلى 15 كيلو غرام من البخار لإنتاج واحد كيلو وات – ساعة من الكهرباء في الظروف الاعتيادية . ومع استخدام بخار بدرجات حرارة أعلى ومكائن ذات تصميم أفضل تم تقليل الكمية إلى 6.5 كيلو غرام من البخار لإنتاج واحد كيلو وات – ساعة من الكهرباء . لذا فإن محطة بقدرة 55 ميغاواط تحتاج إلى 100 كيلو غرام بالثانية من البخار . وإن وجود الغازات غير القابلة للتكثيف مع البخار يقلل من كفاءة المحطة ويؤثر على جدواها الاقتصادية وعلى تلوث البيئة أيضاً . ولهذا إما أن يتم تخليصها من السائل المتبقي الخارج من التوربين أو حقنها مرة أخرى إلى الأرض لتقليل التلوث . ومحطات البخار الجاف من أكثر المحطات كفاءة واستخداماً واقتصاداً . وتتوفر الولايات المتحدة وإيطاليا على كميات كبيرة من مصادر البخار الجاف ، بالإضافة إلى وجود بعض الحقول في كل من أندونيسيا واليابان والمكسيك .

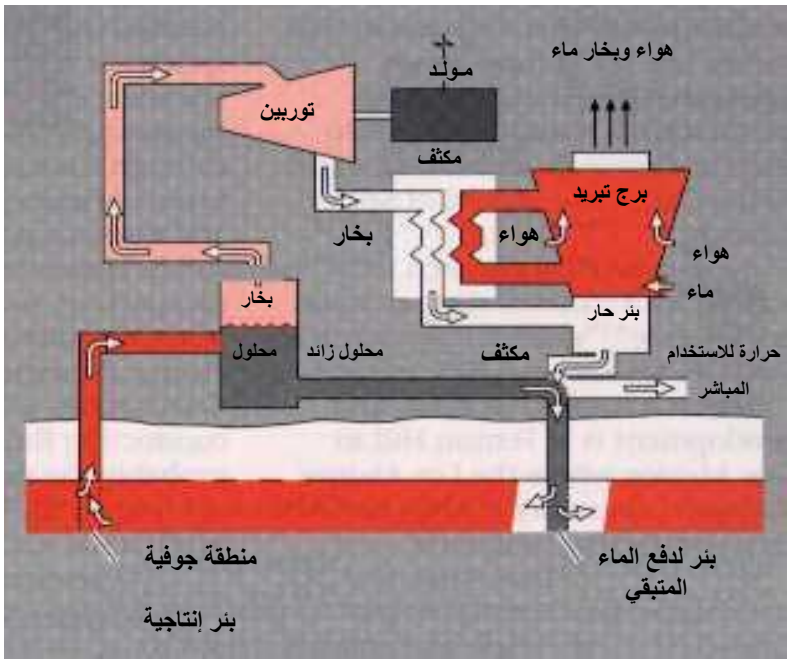


شكل (10-6): مخطط لمحطة بخار جاف من نوع وحدة الضغط الخلفي

2-8-10 المحطات البخارية الوميضية الأحادية

في هذه المحطات يكون البخار الواصل إلى السطح مصحوباً ببعض السوائل الناتجة إمّا من تكثيف بعض البخار أثناء صعوده إلى السطح أو من تواجد ماء حار ذي ضغط عالٍ في الخزان (الشكل 10-7) . وفي هذه الحالة يتم نصب جهاز لفصل الماء عن البخار لحماية التوربين ومن الأفضل تجنب حالة تكثيف البخار أثناء صعوده لأن ذلك سيسبب تراكم المعادن المصاحبة للبخار على جانبي الأنبوب والتي يمكن أن تؤدّي إلى انسداده .

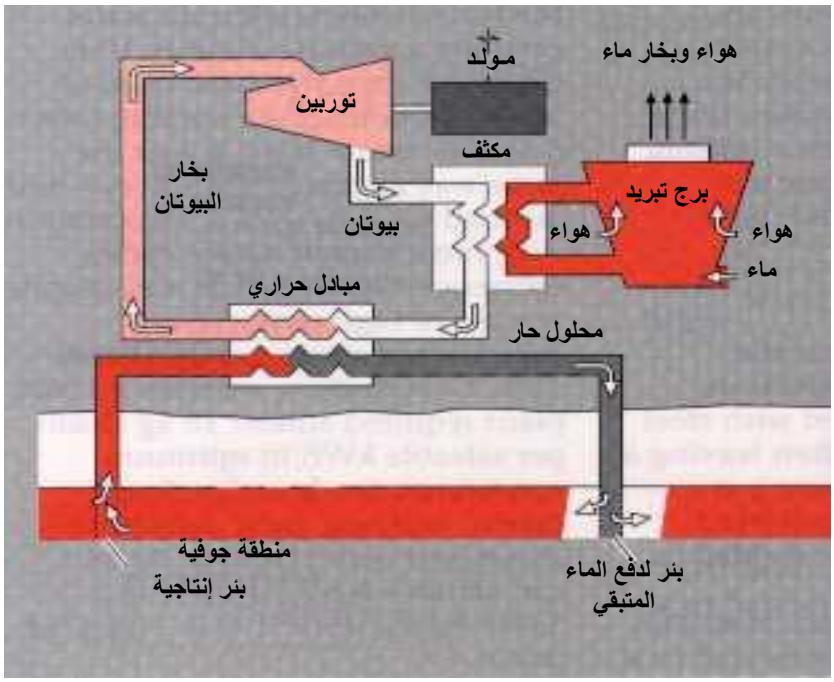
إن التعامل مع ماء تحت ضغط عالٍ يتطلب أجهزة أكثر تعقيداً وذلك لتقليل الضغط وفصل البخار . وفي هذه المحطات يستخدم التوربين التقليدي بضغط أقل يتراوح بين 0.6و0.5 ميغا باسكال ودرجات حرارة تتراوح بين 165 و155 درجة مئوية ، إذ تحتاج المحطة إلى كمية أكثر من البخار تصل إلى 8 كيلوغرام لكل كيلوواط – ساعة . أما السائل المتبقي والذي يصل إلى حوالي 8% ، فيمكن أن يحقن مرة ثانية أو يستخدم في أغراض التدفئة وتسخين المياه .



شكل (10-7): مخطط لمحطة بخار جاف من النوع الوميضي الأحادي

3-8-10 محطات الدورات المزدوجة

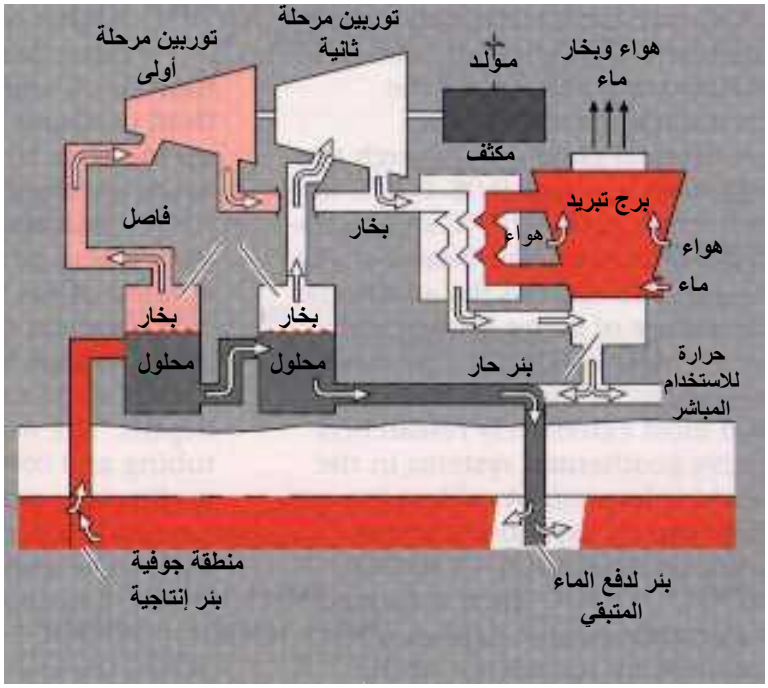
تستخدم هذه المحطات مائعاً ثانويّاً ، كما في الشكل (10-8) ، ذا درجة غليان أقل من درجة غليان الماء مثل البنتين والبيوتين اللذين يتبخران ويدوّران التوربين . ويدفع محلول الماء الجوفي عند ضغط مساو لضغط الخزان إلى مبادل حراري ، والحرارة المنتقلة عبر المبادل الحراري إلى المائع تكون كافية لتبخيره ورفع درجة حرارة البخار إلى درجة عالية . وعلى الرغم من الكفاءة العالية لهذا النظام ، مقارنة بالمحطات البخارية الوميضية الأحادية ، إلاّ أن كلفته الأولية عالية جداً . وبالإضافة إلى ذلك فإن إبقاء الماء الجوفي تحت ضغط ورفع ضغط المائع الثانوي يتطلب حوالي 30% من الطاقة المنتجة وذلك للحاجة إلى مضخات كبيرة . وهناك كميات كبيرة من الماء الجوفي تستخدم لهذا الغرض . ففي محطة الطاقة الجوفية الحرارية في منطقة ماموث في ولاية كاليفورنيا يتم استهلاك 700 كيلو غرام بالثانية من المياه لإنتاج 30 ميغاوات . وتعمل حوالي 60 محطة من هذا النوع في مناطق مختلفة من العالم .



شكل (10-8): مخطط لمحطة بخار جاف نوع محطات الدوران المزدوجة

4-8-10 المحطات الوميضية الثنائية

جرت في الآونة الأخيرة محاولات لتحسين كفاءة المحطات البخارية الوميضية الأحادية وذلك لتجنب استخدام محطات الدورات المزدوجة العالية الكلفة . والمحطات الثنائية كما في الشكل (10-9) تكون مناسبة جداً عند عدم احتواء الماء الجوفي على شوائب وغازات متكثفة وترسبات . وفي هذه المحطات يذهب السائل المتبقي بعد المرحلة الأولى إلى خزان ضغط واطئ . ونتيجة لفرق الضغط يتكون بخار يخلط مع الناتج الخارج من التوربين الأول لتشغيل توربين آخر (أو تشغيل المرحلة الثانية من التوربين الأول) . وهذا التحوير يرفع إنتاج المحطة بنسبة 20% إلى 25% بزيادة إضافية في الكلفة قدرها 5% . وفي هذه المحطات هنالك حاجة أيضاً إلى كميات كبيرة من المياه الجوفية . فمثلاً تستخدم محطة شرقي ميسا (East Mesa) في جنوب كاليفورنيا ، التي افتتحت في عام 1988 مياهاً بكمية مقدارها 1000 كيلو غرام بالثانية من ست عشرة بئراً لإنتاج 37 ميغاوات ، وهي عشرة أضعاف الكمية المستخدمة في محطات البخار الجاف.



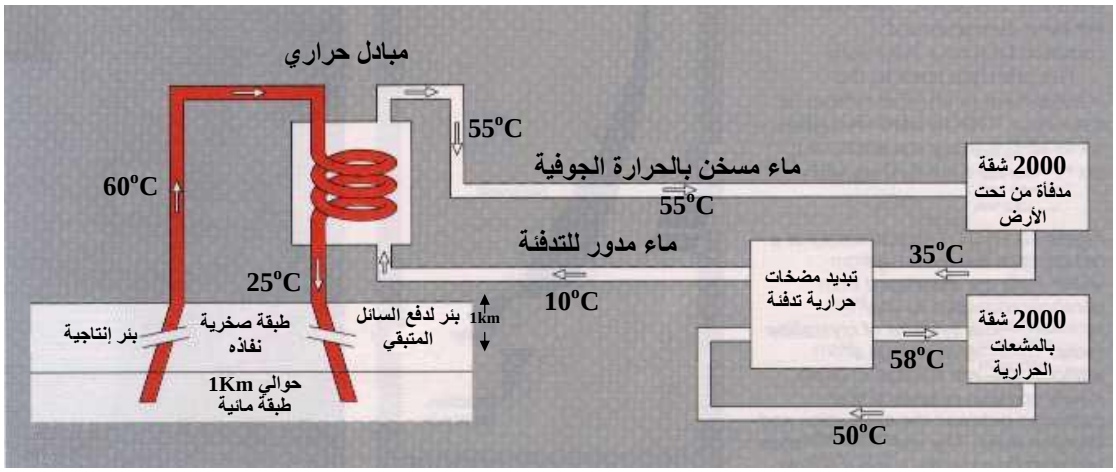
شكل (10-9): مخطط لمحطة بخار جاف من النوع الوميضي الثنائي

9-10 المصادر المستخدمة في الاستخدام المباشر لطاقة الحرارة الجوفية

الدول المدرجة في الجدول (10-1) والتي تستغل مصادر الطاقة الجوفية لأغراض غير توليد الطاقة الكهربائية اختارت في تطوير هذه الاستخدامات مناطق مجاورة للحقول البخارية . ومن أمثلة ذلك اليابان ، ونيوزلندا ، وإيسلندا وإيطاليا . أما بالنسبة إلى المصادر ذات درجات حرارية قليلة والتي تقع في الأحواض الرسوبية فإن عدداً منها قد استغل في وسط أوربا . فعمليات الحفر في هذه المناطق أقل خطراً وذلك لكون الماء الموجود يكون تحت ضغط قليل مقارنة بحقول البخار ، وهنالك حاجة في هذه الحالة إلى مضخات لرفع الماء إلى سطح الأرض . إن الماء الحار المستخدم سيكون بالتأكيد مالحاً جداً وذا شوائب كثيرة تساعد على التآكل ولا يمكن ضخه مباشرة إلى منظومات التدفئة ولهذا السبب تستخدم مبادلات حرارية عالية المقاومة للتآكل في هذا المجال . ويتم استغلال الماء الحار الناتج عبر المبادل الحراري في تدفئة البيوت الزجاجية والتدفئة المركزية .

لقد طور الفرنسيون هذه المصادر القليلة المحتوى الحراري ، وخلال الثلاثين عاماً الماضية تم نصب 55 مجموعة تدفئة في باريس وعدة منظومات أخرى في جنوب غربي فرنسا . في مرحلة التصميم يتم ضخ المياه الحارة من بئر إنتاجية ويتم طرح المياه الخارجة من المبادل الحراري إلى بئر أخرى الشكل (10-10) وذلك لإنتاج 3 إلى 5 ميجاوات من الطاقة الحرارية وبمعـــدل20 إلى 25 لتراً بالثانية لماء بدرجة حرارة $60C^0$ درجة مئوية . في هذا التصميم يجب الاهتمام بالظروف الراهنة بالماء الجوفي بحيث يجب أن تكون المسافة بين البئرين مناسبة لعدم حدوث تأثير من الماء الراجع على درجة حرارة الماء المجهز لمنظومة التدفئة . وقد تم الاعتماد على مبدأ المضخة الحرارية لتحسين كفاءة المنظومة كما في الشكل (10-10) . وتعمل المضخات الحرارية بنفس مبدأ مكيفات الهواء ولكنها هنا تنتج ماء بدرجة حرارية عالية . بالطبع ، فإن المضخة الحرارية ستستهلك طاقة كهربائية ولكنها في نفس الوقت تقوم بتجهيز ماء حار كافي لتدفئة منظومة إضافية أخرى .

سيتيح استعمال المضخة الحرارية مستقبلاً إلى الاتجاه حول إمكانية استخدام آبارٍ ذات مياه جوفية بدرجة حرارة معتدلة لأغراض التدفئة . فمثلاً أمكن تدفئة 4000 سكن منفرد باستخدام المضخة الحرارية وبمياه جوفية ذات عمق 100 متر ، وارتفع هذا العدد إلى 9000 في عام 1992 .



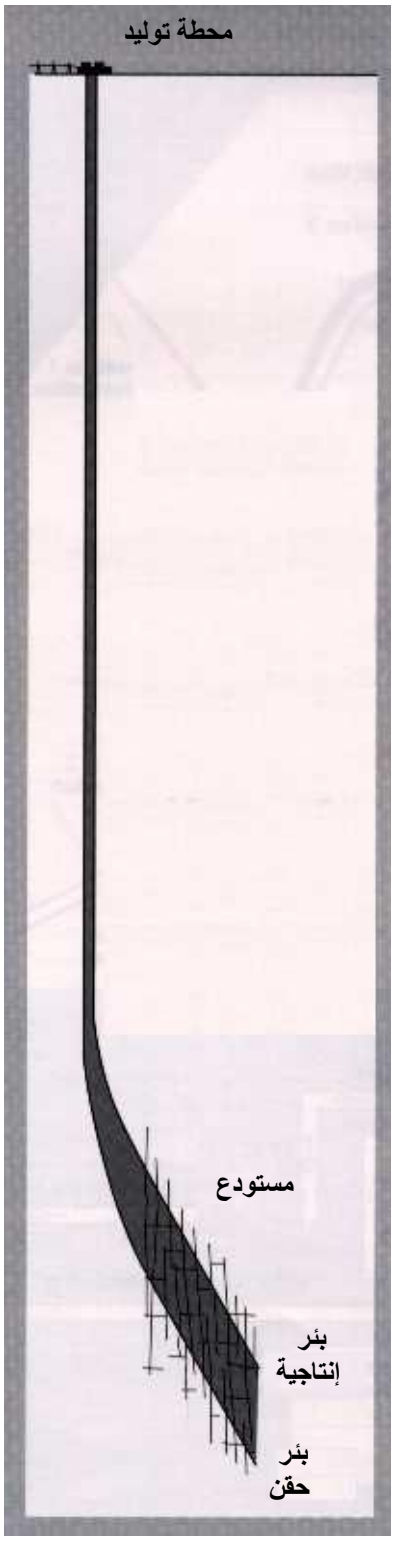
شكل (10-10): منظومة تدفئة جوفية تعمل بمبدأ المضخة الحرارية

10-10 تقنيات الصخور الحارة الجافة

إن المبدأ الذي تقوم عليه عمليات استغلال هذه الطاقة هو حفر بئر رأسية تصل إلى الصخور الصلدة الساخنة في باطن الأرض ، والتي قد يصل عمقها من 6 إلى3 كيلو متر تحت سطح الأرض ، ثم دفع سائل يستطيع نقل الحرارة (مثل الماء) خلال هذه البئر ليدور بين شقوق هذه الصخور وينقل منها بعض حرارتها ويحملها معه إلى سطح الأرض من بئر أخرى (الشكل 10-11) .

وقد كان العلماء الأمريكيّون في مختبرات لوس ألموس أول من قاموا بإجراء تجربة عملية في هذا المجال في بداية السبعينات . فتم حفر بئر رأسية بجوار أحد البراكين القديمة حتى وصل عمقها إلى 3000 متر تحت سطح الأرض ، ودُفع فيه تيار من الماء ليخرج من بئر أخرى على مسافة قريبة من البئر الأولى بدرجة حرارة $180C^0$ درجة مئوية بعد أن تحول إلى بخار . واستخدم البخار الخارج في تدوير توربين لتوليد الكهرباء . وبعد نجاح هذا المشروع بدأ العلماء في التخطيط لمشروع آخر مماثل في عام 1979 . وقد بدأت تجارب مماثلة في كثير من البلدان مثل ألمانيا الغربية وفرنسا واليابان وأوكرانيا .

وهنالك الكثير من الصعوبات التي تعترض تنفيذ مثل هذه المحطات منها تسرب المياه التي يتم دفعها إلى البئر إلى بعض الطبقات المسامية من قشرة الأرض ، وبذلك لا يمكن إعادتها إلى سطح الأرض ، وصعوبة نفاذية الصخور في بعض المناطق وهذا يشكل حملاً كبيراً على مضخات ضخ الماء . وسيحتم ذلك استكشاف المناطق التي تصلح لاستخدام طاقة الأرض الحرارية مع دراسة نوعية الصخور الموجودة بباطن أرضها .



شكل (10-11): منظومة توليد تستخدم طبقة الصخور الجافة

لقد انحصر البحث عن هذه المصادر الأرضية فيما مضى في الأماكن المحيطة بالينابيع الحارة الطبيعية واستخدمت في ذلك بعض الطرق المستعملة في البحث عن البترول ، مثل قياس الجاذبية الأرضية وتعيين التوصيل الكهربائي للكتل الصخرية واستخدام أجهزة القياس المتقدمة . ويهتم العلماء أيضاً بخفض تكلفة عمليات الحفر العميق وذلك

لأن أغلب الصخور الصلدة الساخنة التي تصلح مصدراً للحرارة العالية توجد على عمق كبير . وترتفع تكلفة الحفر إلى حدود كبيرة عندما يزيد عمق الحفرة عن 6000 متر ، كما أن أجهزة القياس المختلفة تفقد كثيراً من حساسيتها وقد تفقد صلاحيتها تماماً عند درجات الحرارة المرتفعة التي تصل إلى 2000 درجة مئوية . ولهذا فإن البحوث الحديثة في هذا المجال تتجه أساساً إلى تحسين طرق الحفر وطرق القياس معاً .

11-10 الاعتبارات البيئية لطاقة الحرارة الجوفية

إن معظم المشاكل البيئية المتعلقة بهذا النوع من الطاقة هي تلك المتعلقة بتحضير الموقع مثل مشاكل الضجيج خلال الحفر ، ورمي المخلفات السائلة للحفر والتي تحتاج منطقة ترسيب واسعة . والضجيج عامل مهم في المواقع ذات المحتوى الحراري العالي وذلك عند خروج البخار خلال عمليات الحفر والتجربة ، ولكن عندما يصل الموقع إلى مرحلة التشغيل الاعتيادي فإن مستوى الضجيج لا يتعدى مستوى محطات توليد الطاقة الأخرى .

والحوادث خلال عمليات التجربة قليلة ماعدا حادثة 1991 في محطة زميل (Zamil) للحرارة الجوفية التي نتجت من جراء الحفر في موقع مهمل منذ عام 1981 في منطقة بركانية . وقد أدى هذا الحادث إلى تطاير مئات الأطنان من الصخور والطين والبخار إلى الجو .

ومن التأثيرات الطويلة الأمد هو ترسب السوائل الناتجة عن الحفر والغازات الملوثة غير المتكثفة مثل ثاني أكسيد الكربون (CO_2) مع كميات قليلة من كبريتيد الهيدروجين (H_2S) ، وثاني أكسيد الكبريت (SO_2) ، والهيدروجين (H_2) ، والميثان (CH_4)، والنيتروجين (N_2) . كما يوجد في الماء المتكثف السليكات ، والمعادن الثقيلة، وكلوريدات الصوديوم ، والبوتاسيوم وفي بعض الأحيان الكربونات ، وهذه تعتمد على علاقة التفاعل بين الماء والصخور في الخزانات العميقة .

ويمكن القول إن تطوير مصادر الطاقة الجوفية الحرارية له تأثيرات إيجابية على المحيط مقارنة بمنظومات مصادر الطاقة التقليدية وذلك لقلة انبعاث المواد الملوثة . فلتوليد نفس الكمية من الطاقة الكهربائية تبعث الطاقة الجوفية من غاز ثاني أكسيد الكربون 2% فقط من الكمية التي يبعثها أنظف وقود للطاقة التقليدية . أما بالنسبة إلى

غاز الأمطار الحامضية (ثاني أكسيد الكبريت) فإن الانبعاث لا يتجاوز 1% . وفي مجال التنمية الاجتماعية فإن المحطات الجوفية الحرارية تستغل مساحة قليلة من الأراضي، ويمكن استخدام بضعة دونمات لتشغيل محطة بطاقة 100 ميغاوات . كما أن حفر آبار الطاقة الجوفية الحرارية أكثر أماناً وخالٍ من الحرائق مقارنة بحفر آبار النفط أو الغاز .

إن استخلاص الطاقة من باطن الأرض له كثير من المميزات الواضحة ، إذ لا يحتاج إلى عمليات ثانوية مثل عمليات التعدين والاستخراج من باطن الأرض ، كما أن الطاقة لا تحتاج إلى إعداد معين قبل تسويقها ولا تحتاج إلى ابتكار وسائل لنقلها أو تخزينها، وهي أمور نصادفها دائماً عند استخدامنا لمصادر الطاقة التقليدية المستعملة اليوم .

وعلى الرغم من أن الطاقة الحرارية لباطن الأرض لم تستغل إلى حد الآن بشكل جدي وعلى نطاق واسع ، فإن هنالك آمالاً عريضة في أن يتم استغلالها بشكل عملي في السنوات القليلة القادمة ، خاصة وأنها تتوفر في كل مكان ، كما أنها طاقة نظيفة لا ينتج عنها تلوث للبيئة .

أسئلة تقويمية

1. كيف تكونت الحرارة داخل الأرض ؟
2. ما هي أنواع الطاقة الحرارية الجوفية ؟
3. كيف يتم استخلاص الحرارة من الصخور الجافة ؟
4. ما هي التقنيات المستخدمة في توليد الطاقة الحرارية من الطاقة الجوفية ؟
5. ما هي الآثار البيئية الناجمة عن استخدام مصادر الطاقة الجوفية ؟
6. بعض علماء الجيولوجيا لا يعتبرون الطاقة الحرارية طاقة غير متجددة لأن الحرارة تتسرب إلى الجو لدرجة وصول حرارة الجوف إلى البرودة . ما هو تعليقك على هذا الرأي ؟

الفصل التاسع

طاقة الأمواج

1-9 مقدمـــــة

2-9 المبادئ الأساسية لطاقة الأمواج

3-9 خصائص الموجة وقدرتها

4-9 حالة البحر الاعتيادية

5-9 تقديرات قدرة الموجة في أي موقع

6-9 اتجاه الرياح

7-9 ماذا يحدث تحت سطح البحر

8-9 التوجه نحو المناطق الضحلة

9-9 الانكسار

10-9 تقنيات طاقة الأمواج

11-9 الأجهزة الثابتة

12-9 الأجهزة الطافية

13-9 التأثيرات البيئية

1-9 مقدمـــــة

لقد راودت فكرة إمكانية استخلاص الطاقة من أمواج المحيط بعض المفكرين منذ عدة قرون . وعلى الرغم من تجدد مثل هذه الأفكار منذ أكثر من مائة عام فإن التفكير الجدي باستغلال هذه الطاقة لم يدخل حيّز التطبيق إلاّ بعد السبعينات من هذا القرن .

والمناطق المناسبة لاستغلال هذه الطاقة هي المناطق التي تكون فيها الأمواج عالية ومصادر الطاقة التقليدية فيها مكلفة كالجزر النائية . فنصب مثل هذه المحطات في هذه المناطق يمكن أن يكون اقتصادياً في الوقت الحاضر .

ويتوجب علينا إجراء بعض التطويرات التقنية حتى يستطيع هذا المصدر أن يكون ملائماً من الناحية الفنية والاقتصادية . وتوجد الآن بعض النماذج المنصوبة قرب الساحل وتعمل بصورة تجريبية ، ولكن تحسين تصاميم هذه النماذج وتطوير الهياكل الطافية داخل المحيطات هما المفتاح الأولي اللازم لاستخلاص كميات كبيرة من الطاقة من هذه المحيطات .

2-9 المبادئ الأساسية لطاقة الأمواج

تتولد أمواج المحيط نتيجة مرور الرياح على مساحات واسعة من المياه . والميكانيكية الدقيقة للتفاعل بين الرياح وسطح البحر معقدة وغير مفهومة حالياً ، إلاّ أن هناك ثلاث عمليات رئيسية يمكن أن تكون ذات علاقة بالموضوع .

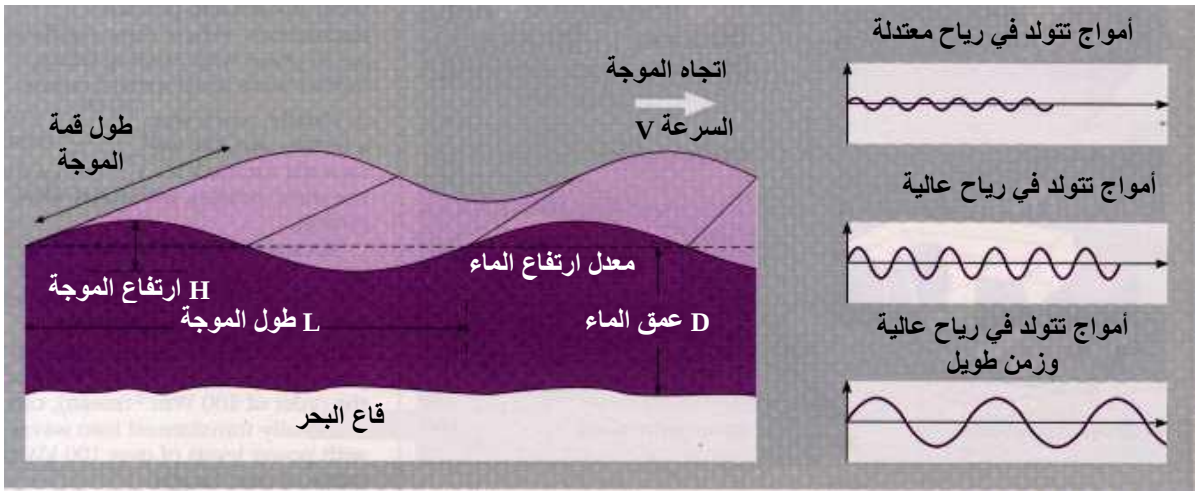
أ - الهواء المارّ على البحر والذي يولد ضغطاً تماسيّاً على سطح الماء هو السبب لتكوين الأمواج ونموها .

ب - جريان الهواء المضطرب القريب من سطح البحر يولد بصورة سريعة إجهاداً وضغطاً متغيريْن . وعندما تكون هذه الترددات موافقة للأمواج الموجودة فإن هذه الأمواج تأخذ في الازدياد .

جـ - عندما تصل الأمواج إلى حجم معين فإن الرياح تستطيع أن تسلط قوة أكبر على وجه الرياح العالية للموجة مسببة تكبير الموجة .

وبما أن الرياح تتكون بالأصل من الطاقة الشمسية فإننا نستطيع أن نقول إن طاقة الأمواج مشتقة من الطاقة الشمسية . فسقوط حزمة شمسية بقدرة معّدلها 100 واط على كل متر مربع يمكن أن يتحول إلى أمواج ذات قدرة تعادل 100 كيلو واط لكل متر من طول أعلى الموجة .

وتشخص الأمواج بطول موجتها وبارتفاع الموجة H و بزمن الموجه T . أما حجم الموجة التي تتولد بواسطة الرياح فإنّه يعتمد على ثلاثة عوامل : سرعة الرياح ، وزمنها ، والمسافة التي تقطعها عند تحويل طاقة الرياح إلى المحيط لتكوين الأمواج (الشكل 9-1). والأمواج التي تحدث في ، أو قرب ، المساحات التي تتولد فيها تدعى الأمواج العاصفة . وهذه الأمواج تحّول الموقع الذي تتواجد فيه إلى مكان معقد ومضطرب ، ومع هذا فإن الأمواج يمكن أن تنتقل من هذه المنطقة بدون خسائر في الطاقة لإنتاج أمواج ضخمة في مناطق بعيدة عن موقع تكونها الأصلي .



شكل (9-1): خصائص الموجة

تحتوي الأمواج الكبيرة على طاقة أكبر لكل متر من طول القمة مقارنة بالموجات الصغيرة . واعتيادياً يتم حساب قدرة الأمواج بدلاً من محتوى طاقتها . وتحسب قدرة الأمواج بوحدة الكيلووات / متر في محيط ساكن الأمواج على أنها مربع ارتفاع الموجة H (بالمتر) مضروباً بزمنها T (بالثانية) . ويمكن حسابها من المعادلة التالية :

$$P \text{ (واط/متر)} = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\,\pi}$$

حيث يمثل ρ كثافة ماء البحر (كلغم/م^3) ، g تسارع الجاذبية الأرضية (م / ت^2) .

3-9 خصائص الموجه وقدرتها

يمكن وصف شكل الموجة الاعتيادي بأنه منحنى جيبي ، والفرق بين القمة والقاعدة يعرف بارتفاع الموجة H ، والمسافة المتعاقبة بين قمة أو قاع موجتين يدعى طول الموجة L . افرض أن قمم وقيعان الموجه تتحّرك عبر سطح البحر بسرعة V (م/ثانية) وأن الزمن اللازم (بالثانية) بين تعاقب قمة أو قاع موجة لقطع مسافة معينة هو T . وعليه فإن ذبذبة الموجة (Φ) التي تبين الفرق بين تذبذب قمة وقمة أخرى أو قاع وقاع آخر بالثانية هو مقلوب الزمن أي (Φ= 1\T) .

عندما تنتقل الموجة بسرعة معينة عبر نقطة معينة فإنها تقطع مسافة تعادل طولها (L) في زمن يساوي زمن الموجة (T) . ولهذا فإن السرعة تساوي طول الموجة مقسوماً على زمنها أو (V=L\T) .

وإذا كان عمق الماء (H) أكبر من نصف طول الموجة $\left(\frac{L}{2}\right)$ فإن السرعة تتناسب مع الزمن ($V = gT\backslash 2\pi$) ، وهذا يوصلنا إلى استنتاج مفيد هو أن السرعة بالمتر في الثانية تساوي 1.5 مرة من زمن الموجة بالثانية ($V = 1.5\ T$) . ويمكن أيضاً حساب طول الموجة L بدلالة الزمن T باستخدام العلاقتين السابقتين أو من خلال :

$$L = \frac{gT^3}{2\pi}$$

والاستنتاج المثير الذي يمكن ملاحظته هنا هو أنه في المناطق العميقة من المحيط تنتقل الموجات الطويلة بسرعة أكبر من الموجات القصيرة . وفي المناطق الضحلة تعتمد خصائص الموجة على عمق الماء (D) ، أما في المناطق المتوسطة العمق (أي بين $D = \frac{1}{2}L$ و $D = \frac{1}{4}L$) فإن خصائص الموجة تتأثر بواسطة عمق الماء D و زمن الموجة T.

وعند وصول الأمواج إلى الشاطئ يبدأ قاع البحر بالتأثير على سرعتها . وإذا كان عمق الماء (D) أقل من ربع طول الموجة فإن السرعة تكون :

$$V = \sqrt{gD}$$

أي أن السرعة تحت هذه الظروف تعادل ثلاثة أضعاف جذر عمق الماء $V = \sqrt{gD}$ ولا تعتمد على زمن الموجة .

وقدرة الموجة (واط بالمتر) هي :

$$P = \frac{\rho g\, {}^2H^2T}{32\pi}$$

حيث تساوي الكثافة ρ حوالي 1025 كيلوجرام/متر مكعب .

وبعد التعويض عن القيم المذكورة في المعادلة السابقة نحصل على معادلة مفيدة جداً هي :

$$P = H^2T$$

أي أن القدرة مقاسه بالكيلووات على المتر من عرض مقدمة الموجة تساوي تقريباً مربع ارتفاع الموجة مضروباً في زمنها .

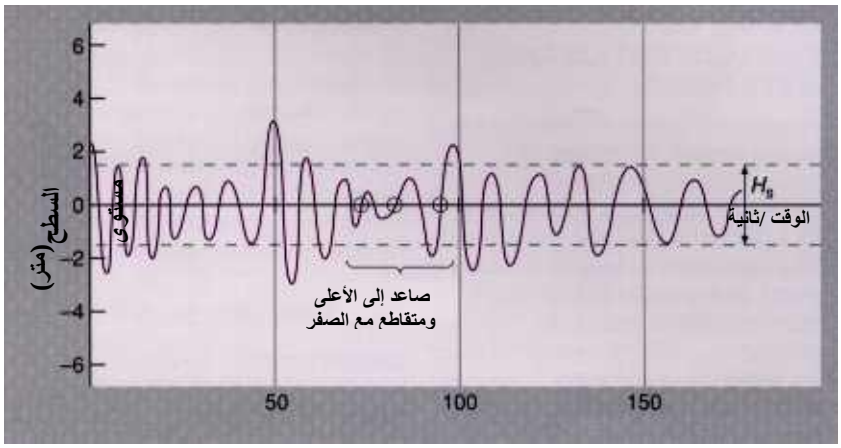
4-9 حالة البحر الاعتيادية

تتكون حالة البحر الاعتيادية من عدة موجات كل منها مشابه للموجة المثالية (أحادية الطول الموجي) وكل منها لها خصائصها من نواحي الزمن وارتفاع الموجة واتجاهها . فالموجات التي نراها عندما ننظر إلى سطح البحر هي خليط من هذه الموجات ، والقدرة الكلية في كل متر من مقدمة الموجة في البحر المضطرب هي بالطبع مجموع القدرة لكل الموجات . ومن الواضح أنــه لا يمكن قياس الارتفاعات والزمن لهذه المحصلة ، ولهذا فإن عملية إيجاد المعدل المتوسط هي المستخدمة لتقدير القدرة الكلية .

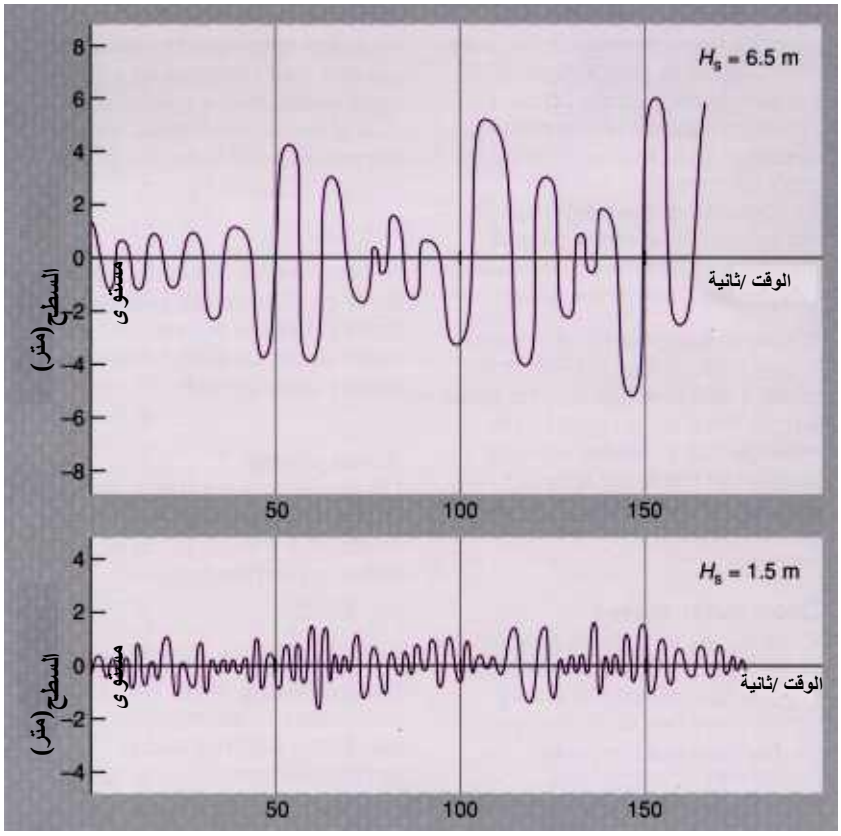
وباستخدام عوّامة طافية تركب الموجة فإنه من الممكن تسجيل التغييرات في مستوى السطح في زمن مختار معين . ويمكن حساب ارتفاع الموجة المؤثر (Significant Wave Height) H_s كما هو موضح بالشكل (2-9) وهو يعادل تقريباً معدل أعلى ثلاث من الموجات ، وهذا مطابق لتقدير ارتفاع الموجه بواسطة العين المجردة (Zero-up-Crossing Period) Te والذي تعرف بأنه معدل الزمن بين الحركات العليا للسطح خلال متوسط الارتفاع لبحر مضطرب اعتيادي ، وعندها فإن القدرة الكلية يمكن تخمينها من المعادلة التالية :

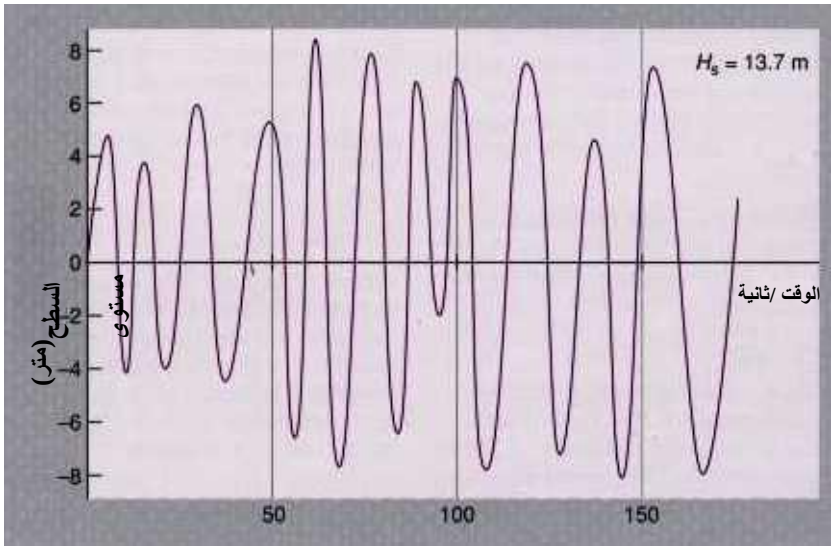
$$P \text{ (كيلوواط/متر)} = \alpha_S H_S^2 Te$$

α_S= ثابت له علاقة مع قيم ρ π ويساوي $0.49 KWS^{-1}m^{-3}$



شكل (9-2a): تسجيل ارتفاع الأمواج

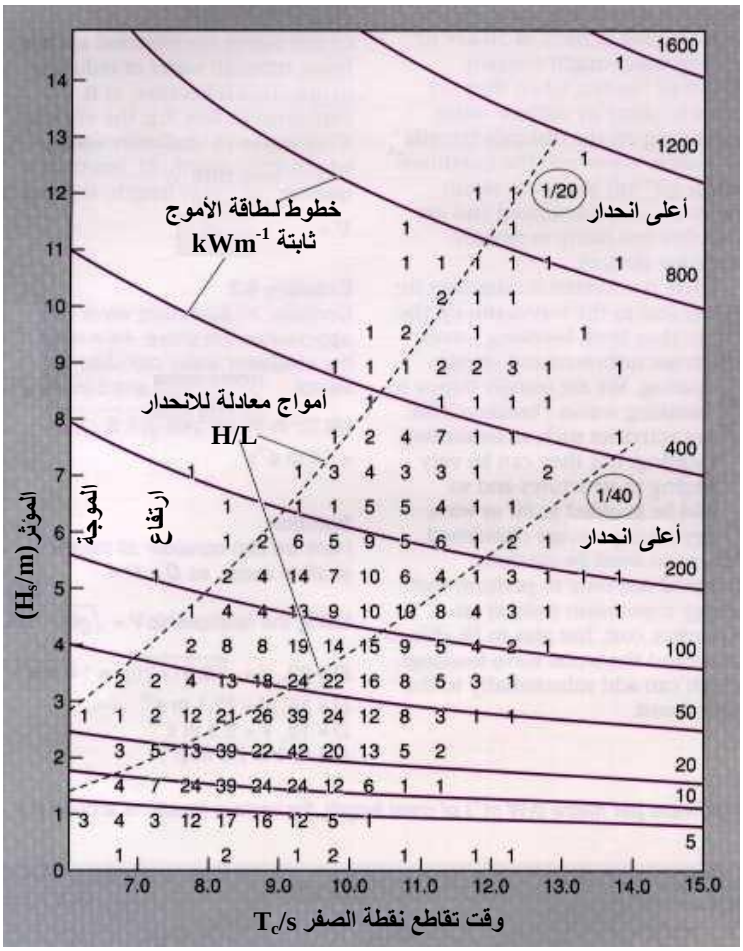




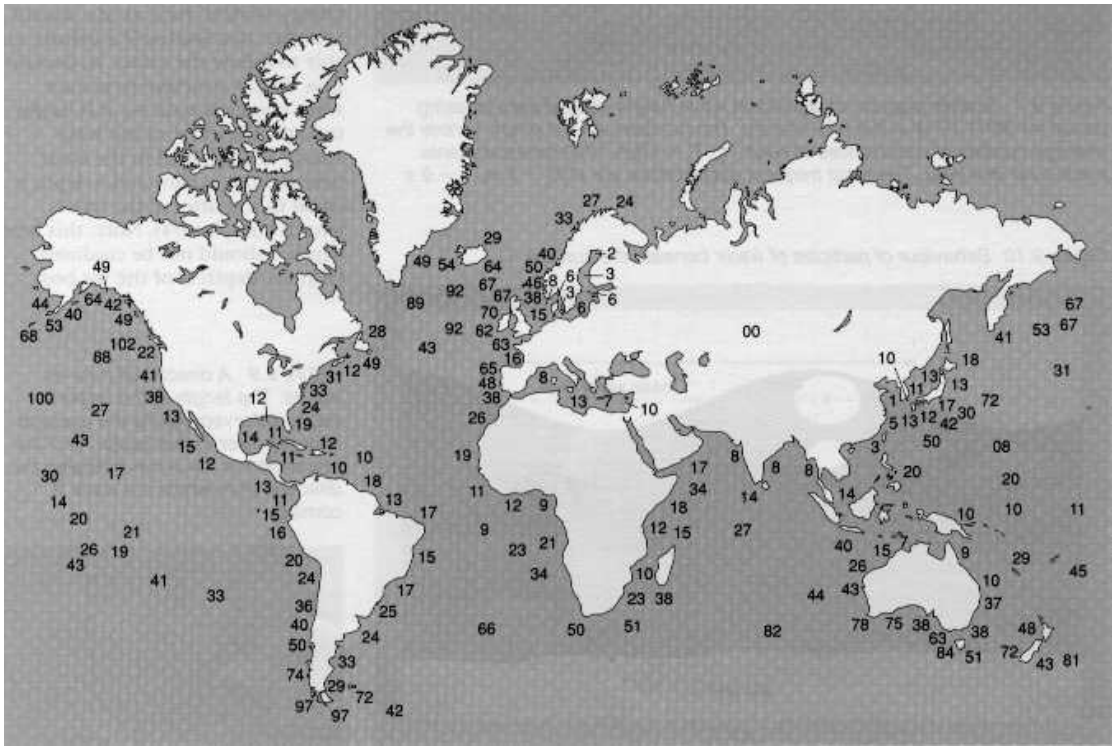
شكل (9-2b): تسجيل ثلاثة موجات في أيام مختلفة

9-5 تقديرات قدرة الموجة في أي موقع

إن تسجيل مستوى البحر في أيام وأوقات مختلفة يعطينا قيماً مختلفة من H_s و Te . لنفترض بأن زمن كل تسجيل هو 0.001 من العام ، وإذا أخذنا موقعاً معّيناً وسجلنا حالة البحر فيه لمدة عام كامل وأخذنا قراءات لكل من H_s و Te نستطيع أن نكون صورة إحصائية لتوزيع الموجة في هذا الموقع . وهذه الصورة أو الرسم التخطيطي المبعثر يبين الحدوث النسبي بأجزاء من الألف لقراءة H_s و Te . والشكل (9-3) هو رسم تخطيطي لموقع في شمال المحيط الأطلسي ، ويتبين فيه بوضوح أن الأمواج في هذا الموقع لها معدل كثافة طاقة (واط/م) عالٍ. ففي منطقة ذات عمق 100 متر يكون معدل كثافة الطاقة 70 كيلوواط/متر أو (613000 , KWh m^{-1} Yr^{-1}) . وفي موقع آخر أقرب إلى الشاطئ كان العمق فيه 40 متراً فإن معدل كثافة الطاقة هو 50 كيلوواط/متر أو (438000 KWh m^{-1} Yr^{-1}) . هذه الأرقام تعتبر مرتفعة وتبين أن شمال المحيط الأطلسي هو مصدر جيد لطاقة الأمواج . والشكل (9-4) يوضح كثافة طاقة الأمواج في مناطق مختلفة من العالم . إن مناطق العالم التي تقع تحت تيارات ريحية منتظمة هي نفس المناطق التي تحتوي على مصادر أمواج عالية .



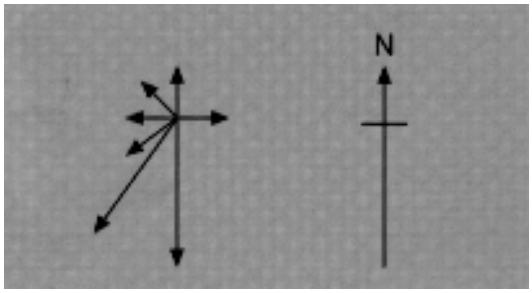
شكل (9-3): تسجيل ارتفاع الأمواج في شمال المحيط الأطلسي



شكل (9-4): المعدل السنوي لطاقة الأمواج KWm^{-1}

6-9 اتجاه الرياح

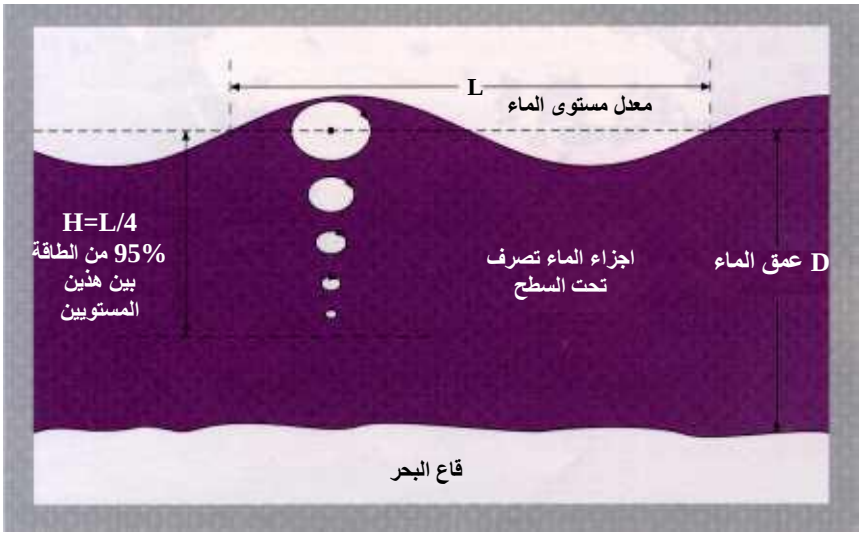
وُجد الاهتمام ، ولا يزال ، بطاقة الأمواج التي تحدث في الماء العميق ، أي عندما يزيد العمق على 50 متراً . إن اتجاه الأمواج المنتقلة في المياه العميقة يتبع اتجاه الرياح التي تولدها . ويمكن أن تنتقل الأمواج لمسافات بعيدة في الماء المفتوح دون خسائر في الطاقة . وفي موقع معين يمكن أن نتوقع ملاحظة أمواج تصل من مصادر مختلفة وباتجاهات مختلفة . فمثلاً يمكن أن نرى أمواجاً تقترب من موقع في أوربا مكونة من الرياح التي تعبر المحيط الأطلسي ، وفي نفس الوقت يمكن أن نرى أمواجاً تولدت من عواصف حدثت في شمال الموقع . ولهذا فإنه من السهل أن ندرك سلوك الأمواج معقد . إن تمثيل معدل القدرة بدلالة الاتجاه في موقع معين يمكن أن يوضح بسهم موّجة (الشكل 9-5) وطول السهم يوضح الإسهام النسبي لمعدل كثافة الطاقة السنوي في الموقع .



شكل (9-5): الإسهام النسبي لمعدل كثافة الطاقة السنوي

7-9 ماذا يحدث تحت سطح البحر؟

يمكن ملاحظة وجود أمواج من النظر فوق سطح البحر . ويجب أيضاً التعرف على طبقة الأمواج تحت سطح البحر لنستطيع تصميم منظومة كفأة لاستخلاص الطاقة منها كما في الشكل (9-6) .



شكل (9-6): تصرف دقائق الماء تحت الماء

تتكون الأمواج من جزئيات من الماء تسير في مدارات معينة قرب السطح . وحجم هذه المدارات مساوٍ لارتفاع الموجة . وتصغر هذه المدارات كلما انخفضنا تحت السطح . وحجم المدار يقل بدالة أسية (Exponentially) مع العمق .

من أجل استخلاص أعلى طاقة من الأمواج يجب نصب جهاز يستلم كل أجزاء مدارات الموجة ، ولكن هذا غير عملي وغير اقتصادي ، لأن المدارات الواطئة تحتوي على طاقة قليلة . ولمعرفة العمق المناسب لهيكل منظومة استخلاص الطاقة من المفيد معرفة أن 95% من طاقة الموجة تحويها الطبقة الواقعة بين السطح وعمق H المساوي لربع طول الموجة (H=L\4) .

8-9 التوجه نحو المناطق الضحلة

في مناطق عديدة من العالم يكون الخط الساحلي متكوناً من منحدر صخري عميق جداً ، وهذه هي المساحات المناسبة لتشييد محطات طاقة الأمواج ، وذلك لأن الأمواج التي تحدث فيها لها محتوى طاقة كبير ، علماً بأن معظم سواحل العالم يكون فيها عمق البحر قرب السواحل ضحلاً .

وعند اقتراب أمواج المياه العميقة من اليابسة تتحرك في الماء الضحل ومن ثم تصل إلى الشاطئ وتقوم بفقد طاقتها خلال مسيرها في المياه الضحلة . وهذا الفقد ناتج أساساً من الاحتكاك بين جزيئات الماء العميق وقاع البحر ، يكون مؤثراً جداً عندما يكون العمق أقل من ربع طول الموجة . إن الخسارة في القدرة يمكن أن تكون عدة وحدات من الوات لكل متر من قمة الموجة لكل متر تسير فيه في الشاطئ .

يمكن لأمواج ذات كثافة طاقة مقدارها $50KWm^{-1}$ في الماء العميق أن تنزل إلى $20KWm^{-1}$ أو أقل عندما تقترب من الشاطئ في المياه الضحلة . وتعتمد هذه القيمة على طول مسافة الانتقال في المياه الضحلة وخشونة قاع البحر .

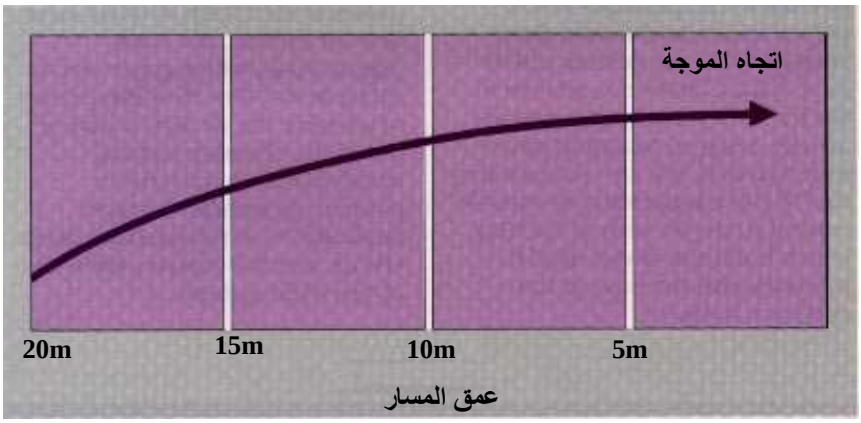
وتوجد خسائر أخرى للطاقة عند اقتراب الأمواج من الشاطئ ، وهي أن الأمواج تنكسر وتتحول إلى أمواج مضطربة وتسبب خسائر كبيرة في الطاقة . وهذه الأمواج المتكسرة تكون عادة مدمرة لهيكل منظومات طاقة الأمواج ، لهذا يجب الابتعاد عنها قدر المستطاع عند نصب المنظومات أو تصميم الهياكل بصورة كفأة بحيث يتم استخلاص طاقة الأمواج بأسعار مناسبة مع مقاومة أسوأ الأحوال الجوية .

9-9 الانكسار

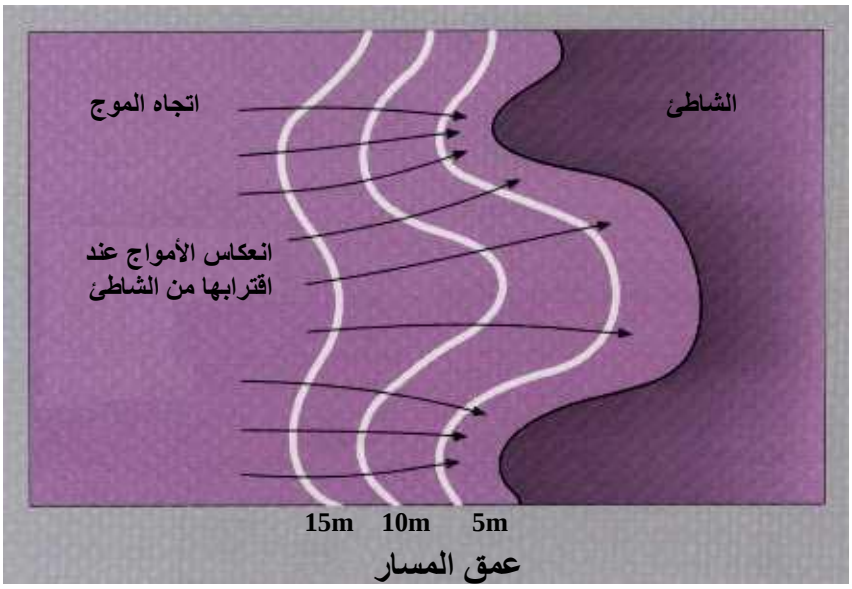
إن أمواج المحيطات تنكسر عندما تنتقل خلال الماء القليل العمق ، وذلك لأن سرعة الموجة في المياه الضحلة ذات العمق D تكون أقل من ربع طول الموجة ، وهي تحسب من المعادلة :

$$V = \sqrt{gD}$$

بسبب تأثير الانكسار الناتج من تقليل العمق ، وكذلك تقليل السرعة ، فإن الانكسار يتغير بالتدريج في اتجاه تقدم الموجة بحيث تصل الموجة إلى الشاطئ بزاوية 90^0 درجة (الشكل9-7) . فإذا نظرنا إلى الشاطئ المبين في الشكل (9-8) فإنه يمكن أن نلاحظ كيف يقوم تغير العمق (المبين بالخطوط البيضاء) بكسر الأمواج . وبهذا تغادر الموجة من المنطقة إلى الأخرى بأقل كثافة طاقة .



شكل (9-7): انكسار الأمواج



شكل (9-8): تركيز تأثيرات الانكسار قرب الساحل

10-9 تقنيات طاقة الأمواج

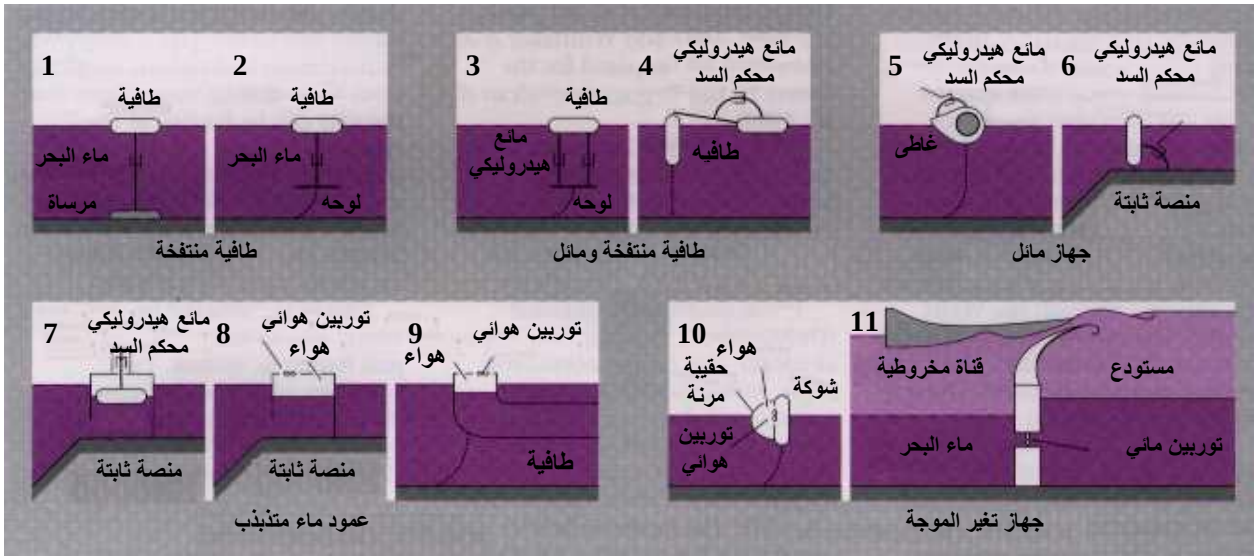
لأجل الحصول على طاقة من أمواج البحر فإنه من الضروري استقبال الموجة بهيكل يمكنه مقاومة القوة المسلطة عليه من الأمواج . وإذا كان الهيكل مثبتاً في قاع البحر أو في الساحل فإنه من الممكن أن يكون قسم منه متحركاً بالنسبة للهيكل الثابت ، وبالتالي يقوم بتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية .

كما يمكن استخدام الهياكل العائمة شريطة أن يكون هنالك إطار ثابت ليتسّنى للجزء الفعال من المنظومة الحركة نسبة إلى الهيكل الرئيسي . ويمكن الوصول إلى هذا الهدف بالاستفادة من القصور الذاتي أو بتكبير الهيكل بحيث يستطيع أن يتسع لعدة قمم من الموجات ويبقى ثابتاً بصورة معقولة في كافة حالات البحر .

وحجم الهيكل الخاص لمحول طاقة الأمواج هو عامل حرج ، ومن السهل تقدير حجمه المناسب وذلك بالأخذ بنظر الاعتبار حجم الماء الداخل إليه . وفي معظم الأحوال يجب أن يكون حجم المحول مساوياً لحجم الماء وذلك لاستخلاص كل الطاقة التي تحتويها الأمواج. وبعض الأفكار والمقترحات الممكن استخدامها في هذا المجال موضحة ومبينة في الشكل (9-9) . إن الحجم الدقيق وشكل كل منظومة محكومان بطريقة التشغيل ، ولكن كتقدير أولي فإن الحجم المطلوب يجب أن يكون بمقدار عدة عشرات من الأمتار المكعبة بالنسبة إلى متر من عرض المنظومة .

وهنالك أشكال مختلفة من محولات طاقة الأمواج وعدة طرق لتصنيفها كما في الشكل (9-9) ، إذ يمكن تصنيف محولات طاقة الأمواج بالنسبة للشكل ، والتوجيه كالمنتهي (Terminator) أو المخفف (Attenuates) أو ممتص النقطة(Point Absorber).

إن أجهزة المنتهي تكون محاورها الأساسية موازية للموجات الساقطة على مقدمتها ، أما أجهزة المخفف فإن محاورها الأساسية تكون عمودية على مقدمة الموجة . وأما بالنسبة إلى ممتصات النقطة فهي أجهزة لها أبعاد صغيرة بالنسبة إلى طول الموجة الساقطة ، وهي مصممة لامتصاص الطاقة من الموجات المحيطة بواسطة استخدام استراتيجيات سيطرة مثل المزلاج الذي يحمل الجهاز حتى يتفاعل مع الموجة في اللحظة المناسبة .

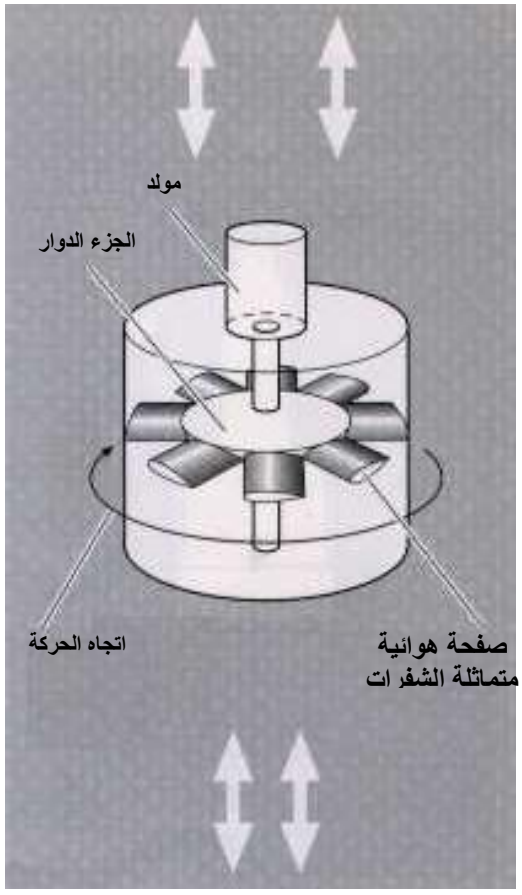


شكل (9-9): مخططات لأنواع مختلفة من محولات طاقة الأمواج

9-11 الأجهزة الثابتة

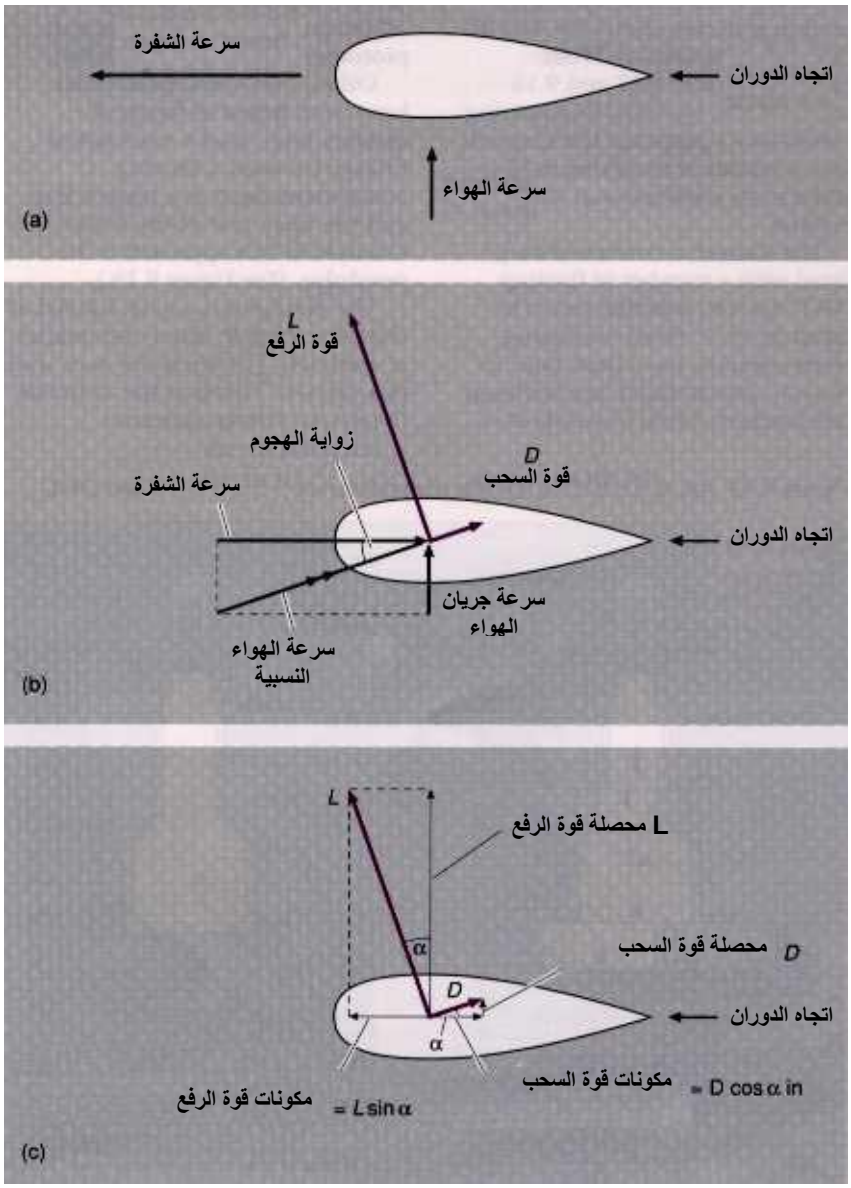
إن الأجهزة الثابتة المربوطة في قاع المحيط أو على الشواطئ هي الوحيدة التي تمت تجربتها من بين أجهزة طاقة الأمواج . ومعظم الأجهزة التي فحصت كانت من نوع عمود الماء المتردد (Oscillating Water Column) . ففي هذه الأجهزة توجد غرفة هوائية تخترق سطح الماء ، والهواء المحصور يدفع خارج وداخل الغرفة بواسطة قمة الموجة وقعرها في طريقه من و إلى الغرفة ويمّر الهواء خلال توربين هوائي ومولد لإنتاج الطاقة الكهربائية . يستخدم الآن توربين هوائي محوري جديد اسمه توربين ويلز (Wells Turbine) نسبة إلى مخترعه (الشكل 9-10) وهو يستمر بالدوران في اتجاه واحد في حالة كون الهواء داخلاً أو خارجاً من الغرفة ، وله خصائص ديناميكية هوائية ملائمة لتطبيقات الأمواج في منظومات عديدة من أجهزة عمود الماء المتردد .

وتوربين ويلز يستخدم الهواء بكلا الاتجاهين . وللوصول إلى هذا ينبغي أن يكون شكل الصفيحة الهوائية متماثلا حول سطح الدوران وغير مثني ودرجة ميله صفراً أي أن خط الوتر يجب أن يكون بخط مستقيم مع سطح الدوران . وعندما تدور الشفرات إلى الأمام فستكون زاوية الهجوم ، وهي الزاوية المحصورة بين الهواء والماء ، وسرعة الجزء الدوار صغيرة ، وهذه تنتج قوة رفع (FL) كبيرة . والمكونات الأمامية لقوة الرفع تزود العزم الذي تقوم بتدوير الشفرات باتجاه الأمام .



شكل (9-10): توربين ويلز

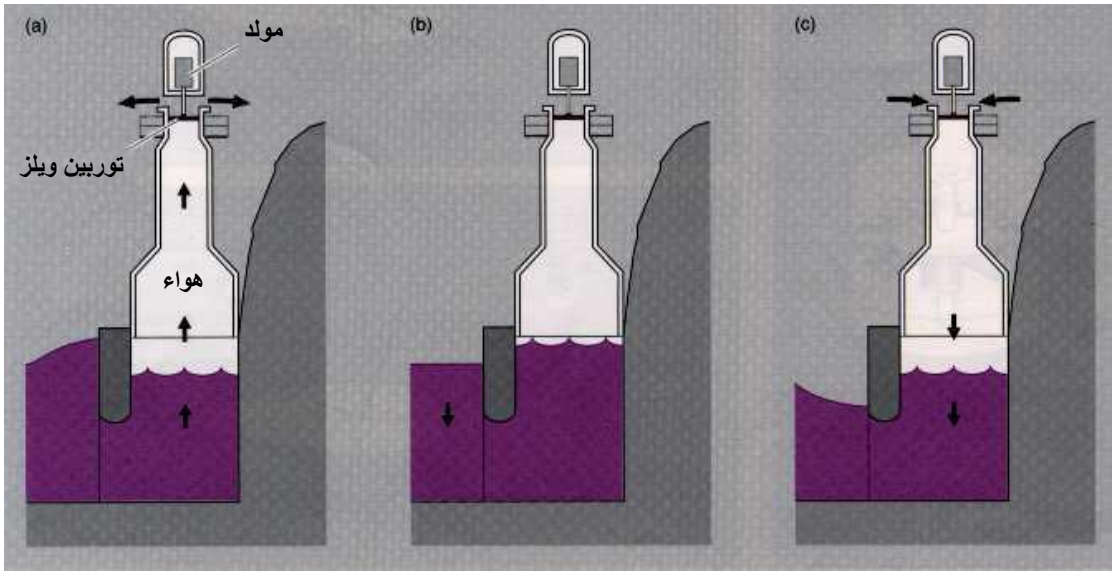
إن توربين وليز يعمل بنفس الطريقة التي يعمل بها توربين الرياح ذو المحور الأفقي مع وجود شفرات متماثلة غير ملتوية وزاوية ميل تساوي صفراً . وعند النظر إلى الشفرة الموضحة في الشكل (9-11a) ، فإذا كانت الشفرة ثابتة بالنسبة إلينا (حتى ولو كانت متحركة) وذلك باعتبار أن موجة سرعة الشفرة تعكس اتجاه حركة الشفرة ، فإننا نحصل على الشكل (9-11b) . ونظراً إلى أن وتر الشفرة بنفس خط مستوى الدوران فإن زاوية الهجوم مساوية للزاوية النسبية للريح (Φ) . وإذا جمعنا الموجهات نحصل على الشكل (9-11c) . ومن هذا الشكل نصل إلى نتيجة أن هنالك محصلة لقوة أمامية على الشفرة تعمل في سطح الدوران إذا كانت الكمية $FLSi\alpha\text{-}FD\cos\alpha$ أكبر من صفر . ومكونات التفاعل ذات الكمية قليلة ولكن سطح الارتكاز في الجزء الدوار يجب أن يتحمل هذه القوى . فإذا كان العزم الأمامي أكبر من صفر فإن الشفرات تدور بسرعة أمامية وتستطيع استخلاص طاقة مفيدة .



شكل (9-11): توربين ويلز (a) جريان الهواء وسرعة الشفرة، (b) سرعة الهواء النسبية وقوى الرفع والسحب، (c) القوى في مستوى الدوران

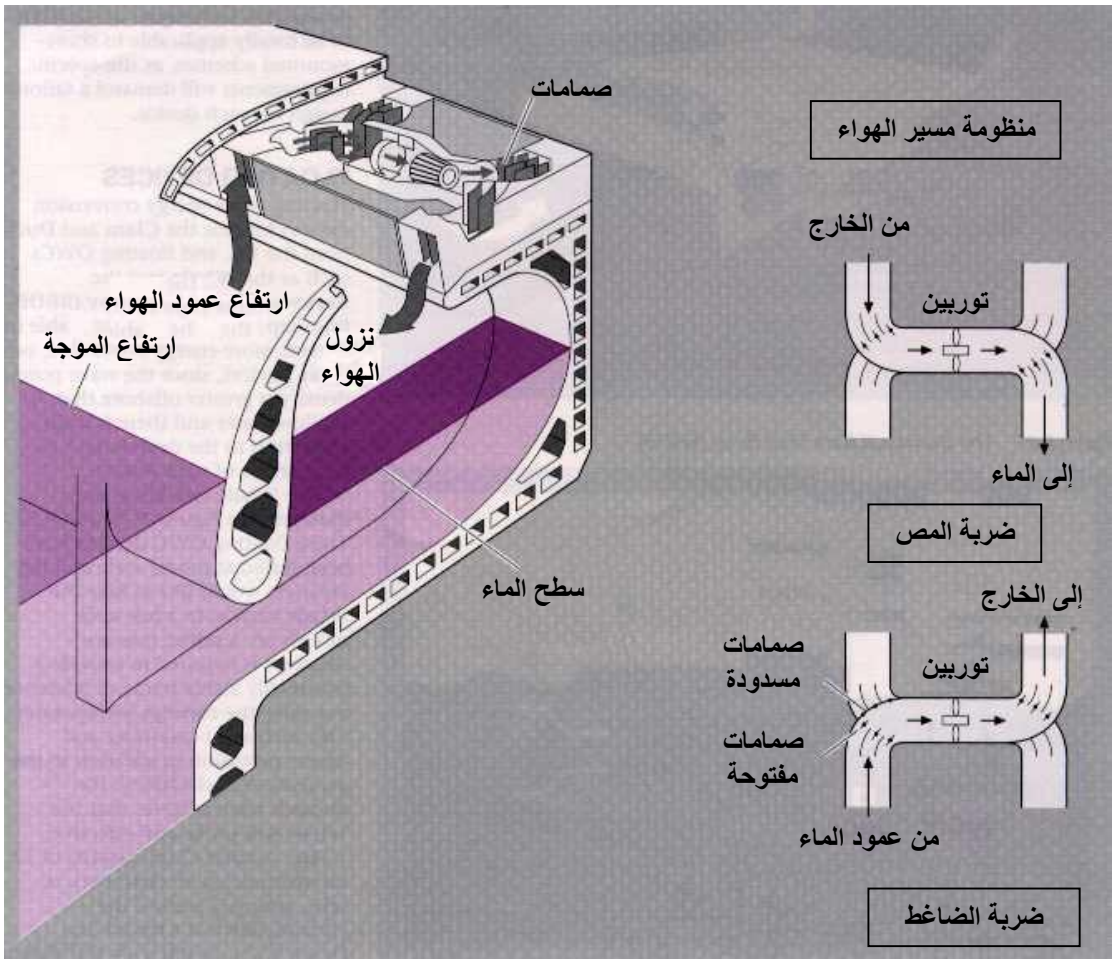
إن شكل الشفرة مهم جداً هنا ، لأنه يحدد قيم معاملات الرفع والسحب وقيمة العزم الأمامية . وتوجد علاقة مباشرة بين سريان الهواء وهبوط الضغط في عمود دوران ويلز الذي يدور بسرعة ثابتة ، وهذه تجعل توربين ويلز مناسباً تماماً لطاقة الأمواج . ومن الخصائص المفيدة الأخرى لتوربين ويلز أنه يدور بسرعة عالية (300 إلى 1500 دورة في الدقيقة rpm) ، ويمكن في هذه الحالة ربط المولد مباشرة على عمود التوربين بدون الحاجة إلى استخدام صندوق تبديل السرعة .

الأشكال (9-12a, 12b, 12c) توضح العمل الأساسي لتوربين ويلز منصوبة قرب الساحل . وعمل التوربينات الطافية يشبه عمل هذه التوربينات . فالهواء يملأ الجزء العلوي من العمود والماء في الجزء السفلي متصل مع البحر بواسطة فتحة تقع تحت معدل مستوى الماء ، وعندما تقترب الموجة من الهيكل يرتفع مستوى الماء السفلي ويدفع الهواء إلى أعلى ليقوم بتدوير التوربين . وعندما تصل قاعدة الموجة يقل مستوى الماء الداخلي ساحباً الهواء مرة أخرى إلى الجزء العلوي ويمّر الهواء في هذه الحالة من التوربين بعكس الاتجاه . وبما أن توربين ويلز يعمل بالاتجاهين فالهواء في هذه الحالة يقوم بتدوير التوربين بنفس الاتجاه لتدوير المولد وتوليد الطاقة الكهربائية.



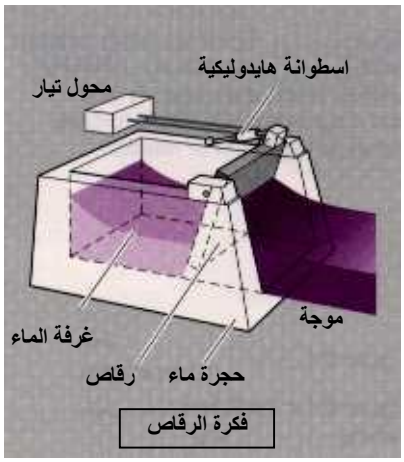
شكل (9-12a, 12b, 12c): التشغيل الأساسي لعَنفة (توربين) ويلز المنصوب على الساحل

ولا يستخدم توربين ويلز دائماً في هذه المنظومات ، إذ هنالك توربينات أخرى مقترحة للعمل ، والشكل (9-13) يوضح بعض الأنواع الأخرى التي تستخدم منظومة ذات توربين هوائي عادي .



شكل (9-13): منظومة ذات عَنفة (توربين) هوائية عادية

لقد نُصبت في منطقة ساكاتا (Sakata) الواقعة على الساحل الغربي لليابان عدة توربينات من نوع عمود الماء المتردد ، كما تم نصب نماذج من توربينات من نوع آخر. والتوربينات الأخرى المنصوبة تستخدم موصلا ميكانيكياً بين الأجزاء المتحركة والأجزاء الثابتة . ونموذج من هذه التوربينات يسّمى الرقاص (Pendulor) وهو مبين في الشكل (9-14) .



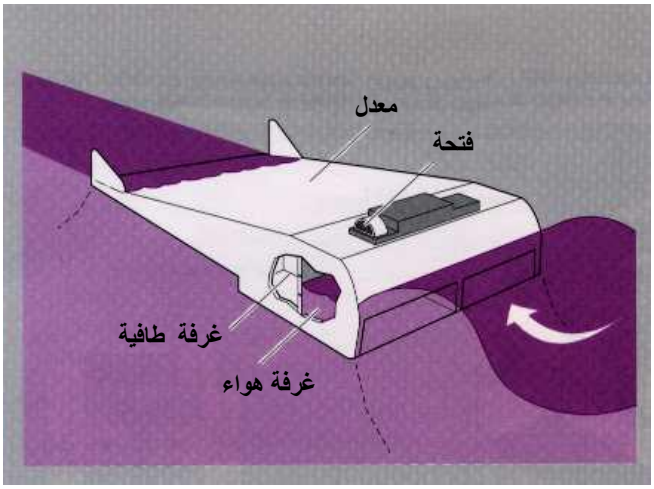
شكل (9-14): جهاز الرقاص الياباني

والرقاص هو مّمر معلق في الأعلى ، موضوع على ربع طول الموجة من خلف حائط الصندوق ، مّعرض لحركة قوية ناتجة من دفع الموجة . وتستخلص الطاقة من حركة الممر بواسطة دفع وسحب المنظومة الهيدروليكية . هناك منظومتان بطاقة توليد مقدارها 5 كيلووات تعملان في منطقة هوكايديو (Hokkaido) في اليابان منذ عام 1980.

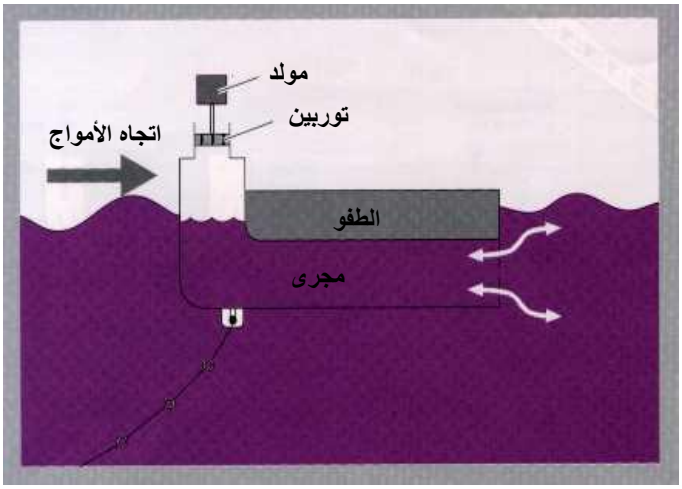
كما نصب توربين من نوع عمود الماء المتردد في إحدى جزر النرويج ، وربط التوربين بمولد ذي سعة مقدارها 600 كيلووات ، والطاقة المولدة ربطت بالشبكة عبر محول ذبذبة . وقد كان أداء التوربين والمولد أكثر من المتوقع ، وتم توليد طاقة كهربائية بكلفة رخيصة .

12-9 الأجهزة الطافية

تم تصميم أجهزة تحويل الطاقة الطافية التي تتضمن توربينات في كل من إنكلترا واليابان . وهناك نوعان من هذه التوربينات اليابانية : الأول على شكل حوت ، والأخر على شكل مكعب طافٍ وهما مبّينان في الشكليْن (9-15 ,9-16) . وهذه النماذج صُممت وشُغلت على النطاق التجريبي فقط .



شكل (9-15): منظومة على شكل حوت



شكل (9-16): منظومة على شكل مكعب

وهنالك نشاطات أخرى لتصميم وتجربة منظومات توليد طاقة من هذا المصدر تجري في كل من اليابان والنرويج وإنكلترا والصين والهند والدانمارك والسويد وإسبانيا وايرلندا والولايات المتحدة . ويبين الجدول (9-1) أعداداً من الأنظمة التجريبية ذات سعة تتراوح من 50 واط إلى 600 كيلو واط . وقد حقق قسم من هذه التجارب نجاحاً في

حين أن القسم الآخر اعترضته مشاكل . ويبين الجدول (9-2) المنظومات المقترحة للمستقبل .

13-9 التأثيرات البيئية

إن طاقة الأمواج تعتبر من أكثر مصادر الطاقة الخالية من التأثيرات البيئية ، وذلك للأسباب التالية :

أ - لا تستخدم أية مواد كيمياوية ملوثة ، وقد تستخدم ، في أسوأ الأحوال ، بعض الزيوت لأغراض التشحيم والتي تكون مسدودة الأحكام .

ب - ليس لها أي ضجيج ، ودرجة الضوضاء فيها أقل من ضوضاء تلاطم الأمواج .

جـ - لا تشكل أية مخاطر للسفن .

د - لا تؤثر على بيئة السواحل لأنها تستخلص جزءاً قليلاً من طاقة العواصف والأمواج .

جدول (9-1) عرض لبعض الأنظمة التجريبية في قسم من دول العالم

السنة	النوع	الموقع	السعه (كيلو وات)	الملاحظات
1965	عمود الماء المتردد (OWC)	اليابان	0.05	نصب منها عدة مئات في سواحل اليابان
1978-1986	كايمي (Kaimei)	اليابان	100-375	توقف الاهتمام بالفحوصات
1983	عمود الماء المتردد (OWC)	اليابان	40	الطاقة المتولدة قليلة ، وفكك بعد عام من النصب
1983	الرقاص (Pendulor)	اليابان	5	لا تزال تعمل
1984	كايو المنتهي الطافي (Kaiyo floating terminator)	اليابان	غير معروف	برنامج البحوث أكمل
1985	عمود الماء المتردد (OWC)	النرويج	600	أداء جيد، تحطم بإحدى العواصف عام 1988
1985	تابجان (Tapchon)	النرويج	350	لا تزال تعمل
1985	عمود الماء المتردد (OWC)	اليابان	40	انتهى الفحص عام 1988
1988	عمود الماء المتردد (OWC)	اليابان	30	عشرة توربينات منصوبة على شكل صف
1989	جناح معلق (hinged flap)	اليابان	1	تحت العمق
1989	تتهيرد الطافي (Tethered float)	الدنمارك	45	بعض المشاكل
1989	عمود الماء الطافي (OWC)	اليابان	60	يعمل الآن
1991	عمود الماء الطافي (OWC)	إنكلترا	75	لا يزال يعمل
1991	عمود الماء الطافي (OWC)	الهند	150	أكمل عام 1992
1992	FWPV	السويد	110	تشغيل ناجح
1992	OLAS-1000	إسبانيا	-	
1995	OSPREY	إنكلترا	2000	أكمل التصميم

جدول (9-2) : المنظومات المقترحة

النوع	الموقع	**السعة (كيلوات)**	الملاحظات
عمود الماء المتردد (OWC)	البرتغال	350-500	تحت التخطيط
عمود الماء المتردد (OWC)	اليابان	100-400	تم طلب التحويل
على شكل مجرى هوائي (BBDB)	اليابان أوهواي	330	موديل حجم 10/1 من الأصلي ثم فحصه
الرقاص	اليابان	125	
كالم Clam	اسكتلندا	2000	تم عمل موديل15/1 من الأصلي
تايجان Tapchan	اندونيسيا	1000-1500	تحت الإنشاء
طاحونة البحر Seamill	أمريكا	200	تحت التخطيط
عمود الماء المتردد (OWC)	اسكتلندا	3000	تم طلب التحويل
ضخة الخرطوم FWPV	السويد	1000	تحت المناقشة
Hose Pump	اليونان	600, 1000, 6000	تحت التخطيط

أسئلة تقويمية

1. متى تم التفكير باستغلال طاقة الأمواج لتوليد الطاقة الكهربائية ؟ وما هي الإمكانات المتاحة لاستغلال هذه الطاقة ؟
2. كيف تتكون الأمواج ؟ وكيف يمكن استخلاص الطاقة منها ؟
3. ما هي أنواع العنفات المستخدمة لتوليد الطاقة الكهربائية من طاقة الأمواج ؟
4. ما هي النشاطات الحالية الخاصة باستخلاص هذا المصدر ؟
5. ما هي التأثيرات البيئية الإيجابية والسلبية الناتجة عن استغلال هذا المصدر ؟
6. ما هي العوامل المساعدة على استغلال طاقة الأمواج ؟ صنفها حسب أهميتها ؟
7. هل استغلال طاقة الأمواج ذو جدوى اقتصادية ؟

الفصل الثامن

طاقة المدّ والجزر

1-8 مقدمـــــة

2-8 التفسيرات الفيزيائية لظاهرة المدّ والجزر

3-8 الرنين الموقعي

4-8 توليد الطاقة

5-8 العوامل الفنية

6-8 العوامل البيئية

7-8 محطات المدّ والجزر الطافية

8-8 الإمكانيات العالمية

1-8 مقدمـــــة

إن لاستخدام طاقة المدّ والجزر تاريخاً طويلاً . فقد استخدمت هذه الظاهرة في كل من إنكلترا وفرنسا في القرون الوسطى وذلك بنصب طواحين لطحن الذرة على بعض الأنهر ، ومنذ عهد ليس بالبعيد عادت فكرة استخدام طاقة المد والجزر على نطاق أوسع لتوليد الطاقة الكهربائية وذلك بنصب عنفات (توربينات) على حواجز كالسدود الصغيرة التي تبنى في مصبّ مياه مناسب .

لقد تواصل الاهتمام بهذا المصدر ، فأنشأت فرنسا في منطقة قريبة من سانت مالو (StMalo) ما بين عامي 1961 و 1967 محطة وصل إنتاجها إلى 240 MW في عام 1966، وتتضمن هذه المحطة طريقاً للعبور . وتم بعدها اقتراح إنشاء محطة بسعـــــة 15 GW تحصر مساحة كبيرة من البحر من منطقة سانت مالو في الجنوب إلى منطقة كاب ديكارتريل (Cap de Carterel) في الشمال ، وهو ما يسمى بمشروع "إسل ديجوسي" لكن تنفيذه لم يتم . وتم أيضاً اقتراح محطة في خليج فوندي (Bay of Fundy) في كندا ومحطة في الاتحاد السوفيتي السابق ، إلاّ أن المشروع الذي أنشئ كان نصب محطة منفصلة بقدرة 18 MW في منطقة نوفا سكوتيا (Nova Scotia) أكملت في عام 1984 ، كما أكملت محطة بقدرة 400 كيلوواط في خليج كيسلايا (Bay of Kislaya) على بعد 180 كيلو متر من مورمانسك (Murmansk) . وأكملت عام 1968 محطة بقدرة 500 كيلووات في منطقة جدول جانجكسا (Jangxia Creek) في شرق بحر الصين . ويبين الشكل (1-8) المواقع المختلفة من مناطق العالم التي يمكن أن تقام عليها محطات من هذا النوع .

شكل (1-8): المواقع المحتمله لطاقة المد والجزر

2-8 التفسيرات الفيزيائية لظاهرة المد والجزر

تغّير ارتفاع الماء أثناء المد والجزر يحدث بصورة أساسية نتيجة للتجاذب بين الأرض والقمر . فخلال اليوم الواحد تنتج قوة جذب على أية نقطة من الكرة الأرضية . ونلاحظ أن مستوى ماء البحر يرتفع وينخفض مرتين في اليوم ، وهذا الارتفاع أقل من المتوقع بسبب تأثير قوة جذب الشمس للأرض وبسبب طبوغرافية كتلة الأرض اليابسة والمحيطات .

إن التحليل التفصيلي للتجاذب بين الأرض والقمر والشمس معقد جداً ، وسنسعى إلى تبسيط شرحه هنا بدءً بالتجاذب بين الأرض والقمر . فقوة جذب القمر تسحب البحر على جانب الأرض القريب منها باتجاه القمر ، بينما تكون البحار البعيدة عن الجذب القمري ذات تأثير أقل وتبتعد عن القمر .

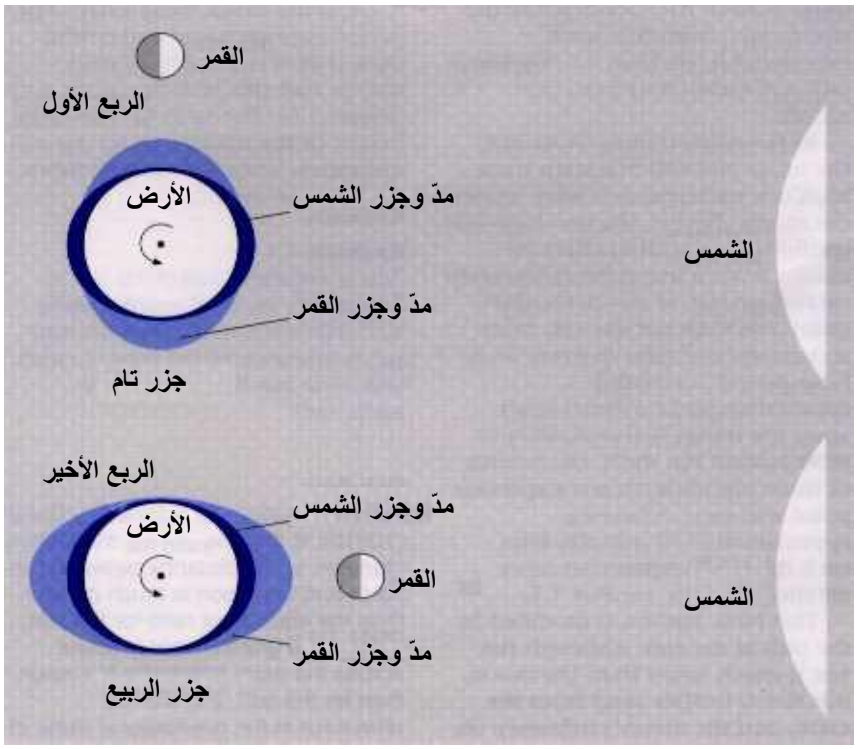
وبسبب دوران الأرض حول محورها فإن الجذب القمري يقوم بتكرار تسلسل المدّ والجزر وبمعدل مرتين في اليوم (أو بصورة أدق مرتين في كل 24.0 ساعة) . وبما أن القمر يدور في مدار حول الأرض فإن توقيت المدّ العالي في أية نقطة يتغير بحوالي 50 دقيقة كل يوم، كما أن بزوغ القمر يتأخر يومياً خمسين دقيقة في المتوسط .

وهذا التسلسل الأساسي يتم خفضه من قبل الشمس . فبالرغم من أن الشمس أكبر كثيراً من القمر إلا أنها أبعد كثيراً عن الأرض ، وتأثير القمر على البحر يتجاوز ضعف تأثير الشمس ، والتأثير النهائي يعتمد على دورانها النسبي .

وعندما يكون القمر والشمس على خط واحد مستقيم مع الأرض فإن تأثير الجذب يكون في أشده والنتيجة هي حدوث زيادة في المد عن المعتاد (مدّ عال أو تامّ Spring Tide) . وعندما يشكل الشمس والقمر زاوية عمودية مع الأرض (90^o) فإن النتيجة حدوث خفض في الجزر عن المعتاد (جزر تام Neap Tide) . والمدة بين الجزر التام والمد التام تكون حوالي 14 يوماً ، وهي تقريباً نصف 29.5 يوم التي هي دورة القمر للراصد على الأرض ، كما في الشكل (8-2) . والنسبة بين ارتفاع أعلى مدّ وأوطئ جزر يمكن أن تكون أكثر من اثنين إلى واحد .

إن قوة جذب الشمس أعلى كثيراً من قوة جذب القمر بحوالي 177 مرة ، ولكن تأثيرها على المد والجزر أقل بكثير ، ذلك لأن المسافة بين الأرض والقمر هي أعلى بكثير من تلك التي

بين الأرض والشمس ، وهذا يجعل فرق الجذب عبر الأرض أكثر للقمر منه للشمّس . ومحصلة الفرق بين مجالات الجذب للقمر والشمس في كلا جانبي الأرض يكون هو العامل المؤثر .



شكل (8-2): تأثير الشمس والقمر على المدّ والجزر

إن التحليل الموضح أعلاه تحليلٌ مبسط ، لأنه توجد في الحقيقة عوامل أخرى تعقد تعاقب ظاهرة المد والجزر ولكن تأثيرها قليل . فمثلاً بالرغم من أن الظاهرة غير فصلية إلا أن الظروف الجوية يمكن أن تلعب دوراً مؤثراً . فالرياح العالية والعواصف إذا حدثت في وقت المدّ العالي نتج مّد عارم يتطلب تصميم حواجز المياه بحيث تستطيع مقاومة هذا المد .

وهنالك عوامل أخرى متعلقة بتوليد الطاقة على الرغم من أن تأثيرها قليل . فمثلاً التعاقب النصف الشهري العالي والجزر الواطئ يتأثران ويقلان بسبب كون مدار القمر ليس دائرياً بل على شكل بيضوي . وتحدث أيضاً تغيرات مدارية طويلة المدى ، منها مثلاً شبه الدورة السنوية التي يسببها ميلان مدار القمر بالنسبة للأرض (حول الشمس) والتي تسبب اختلافاً بنسبة حوالي 10% بارتفاع المد .

ولإكمال الصورة المعقدة لطبيعة المد وأسبابه نشير إلى أن المّد يقل في بعض المناطق بسبب قوى كوريلوس (Coriolis Force) ، وهذه تحدث بسبب دوران الأرض وخروج تيارات المّد من طريقها الاعتيادي .

وبعيداً عن الاضطرابات البسيطة كالتي ذكرناها فإن التأثير العام للتجاذب الأساسي بين الشمس والقمر والأرض يجعل التغيير الاعتيادي للمّد يصل إلى 0.5 متر . ولكن مستوى ارتفاع المد في المناطق التي تقع على السواحل في بعض الأحيان يكون متغيراً بشكل واضح ، ويتضاعف بسبب التغيرات الطبوغرافية المحلية كالمناطق الساحلية الضحلة أو عند مصبات الأنهار .

وعند اقتراب المّد من السواحل يقلّ عمق الماء ويزداد جريان المّد حتى يصل إلى حوالي 3 متر . أما إذا دخل المّد في مضيق أو مصّب نهر مناسب فإنه يكون على شكل قمع وعندها يزداد الارتفاع أكثر وقد يصل إلى 10 أمتار أو إلى 15 متراً في بعض المواقع . وتلعب ظاهرة الرنين (Resonance Effect) دوراً كبيراً في ذلك . فالرنين(Resonance) يشبه الذبذبات التي يمكن أن تحدث في الصناديق الصوتية الخاصة بالآلات الموسيقية وذلك بتكبير ذبذبات معينة في الصوت الأصلي . ويعتمد وجود أيّ رنين على شكل التجويف المكوّن له وسعة ذلك التجويف .

ويمكن توضيح بعض المعلومات عن الرنين كالآتي :

تأثير الرنين يحدث موقعيا (في مصبات الأنهار مثلاً أو في وسط المحيطات) ، وله تأثير كبير على زيادة مستوى المّد . إن مصّب نهر أو قاعدة محيط كاملة يمكن أن تتصرف كفجوة رنين صندوق أو منطقة محصورة يحدث فيها رنين عندما تتطابق أبعاد الصندوق أو المنطقة المحصورة مع موجة التغيرات المؤثرة أو الإشارة المترددة . فإذا كانت الأبعاد مناسبة فإن الموجات تنحصر في حيطان الفجوة وتنعكس منها ، وبذلك يتم تكبير الإشارة الأصلية . وهذه الموجات المستقرة يمكن أن يكون لها موجات مضاعفة للموجة الأصلية، وبنفس الطريقة يمكن أن يحدث الرنين مع موجات تبلغ نصف أو ربع الموجة الأصلية .

إن طبيعة الزيادة والنقصان في المّد والجزر يمكن تمثيلها بإشارة مترددة أو متذبذبة تساعد على تكوين رنين مكبر في حوض المحيط أو في الخلجان ذات الأبعاد المناسبة . فالمسافة بين أمريكا الشمالية وأوروبا تقدر بحوالي 4000 كيلو متر ، وقد وجد بأنها مناسبة لتكوين

رنين في دورة المد والجزر التي تحدث كل 12 ساعة ، وبموجة يساوي طولها ضعف عرض المحيط الأطلسي .

ومن الناحية العلمية فإن مستويات المد والجزر التي تحدث في كل ساحل تعتمد على المؤثرات الموقعية . وأن الفجوة المترددة أو المتذبذبة ، وهي حوض المحيط ، تم افتراضها بأن لها جوانب عمودية تستطيع أن تعكس الموجات بشكل تام . وفي حالة شمال المحيط الأطلسي فإن مستوى المّد والجزر في حوض المحيط يبلغ حوالي 0.5 متر ويصل إلى 3 متر عند كل ساحل .

ويحدث أيضاً رنين مخفف من هذا النوع بذبذبات مختلفة في المحيط الهادي الذي يبلغ عرضه أربعة أضعاف المحيط الأطلسي ، وموجات المد المترددة في هذه الحالة يكون طولها الموجي نصف عرض المحيط . وبما أن عرض المحيط غير متماثل فإن تأثير الرنين حول المحيط الهادي أكثر تعقيداً ولكنه أقل إثارة . وفي بعض مناطق المحيط الهادي يحدث مّد وجزر منخفضان ، وفي بعض المناطق يحدث مد وجزر واحد في اليوم وذلك لأن الرنين يحدث كل 24 ساعة .

3-8 الرنين الموقعي (Local Resonauce)

بالإضافة إلى الرنين الذي يحدث على طول حوض المحيط فإن حدوث رنين موقعي في بعض المناطق الساحلية الضحلة ممكن . فمثلاً يمكن أن يكون لحوض صغير في خليج مستوى مد وجزر يصل إلى حوالي 10 أمتار . ولمناطق مثل البحر الايرلندي (Irish Sea) ، وقناة برستل (Bristol Channel) وخليج سيفيرن (Sevrn Estuary) في المملكة المتحدة التي يمتد طولها إلى 600 كيلو متر رنين طبيعي يحدث كل 6 ساعات تقريباً، ورنين على ربع طول الموجة (ضعف ذبذبة موجة المد) . وهنالك أيضاً رنين على نصف طول الموجه في المساحة الواقعة بين منطقة لاندزاند (Lands End) ودوفر (Dover) على طول القناة الإنجليزية (عرضها 500 كيلو متر وبعمق تقريبي 70 متراً) .

إن الرنين يكون أكثر تأثيراً في الخلجان لأنها فجوات مغلقة ، والرنين في معظم الأحيان معقد وذلك لتغير العرض والعمق ولطبيعة قعر الخليج التي تضيف خسائر احتكاك متغيرة. وحتى عند عدم فهم حدوث الرنين بصورة عميقة فإنه يمكن بوضوح أن نرى أنه عند وجود موقع على شكل قمع فإن مستوى المد يزداد عندما يجري المد ضد التيار وعندما يقل

عرض الخليج وعمقه . وهناك أيضاً تأثيرات احتكاك تكون على شكل خسائر في الطاقة عندما يجري المد على مواد مختلفة من قاع الخليج . ففي بعض الأحيان ، وفي خلجان طويلة ، تحدث تأثيرات للمد والجزر ضد التيار . فبدلاً من حدوث ارتفاع قليل نسبياً كما هو متوقع في الجزء الكبير من خليج سفيرن (Sevrn Estuary) فإن جريان المد ضد التيار يمكن تركيزه ليرتفع بصورة مفاجئة بحيث يمكن أن يرتفع إلى موجة عمودية تسمى ثقب سفيرن (Sevrn Bore) . ونفس التأثير يحدث على طول خلجان أخرى بما في ذلك خليجا همبر (Humber) ، وهوكلي (Hoogly) القريبان من كلكتا في الهند .

إن المحرك الرئيسي لتوليد المد والجزر هو التجاذب بين الأرض والقمر ، ولكن طاقة جريان المد تأتي من دوران الأرض الذي يعمل تأثيره على تكوين المد في عرض البحار.

4-8 توليد الطاقة

إن المبادئ الأساسية الفيزيائية والهندسية المتعلقة بتوليد الطاقة الكهربائية من طاقة المد والجزر لا تتضمن تعقيدات ، وهي واضحة نسبياً .

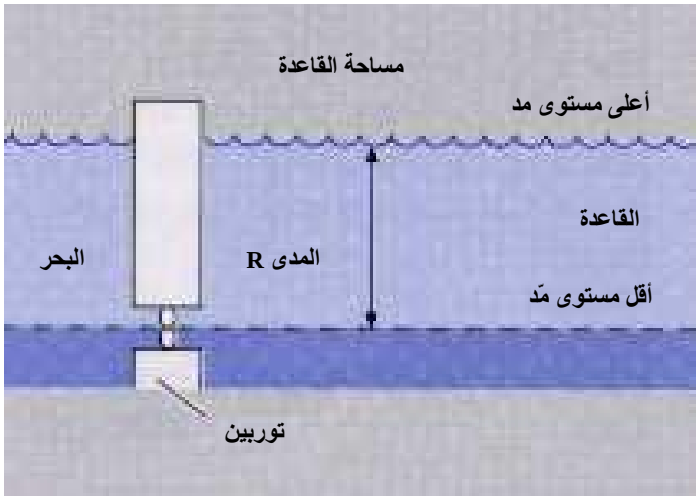
إن الحواجز التي تشيّد على الخلجان المناسبة مصممة لاستخلاص الطاقة من ارتفاع الأمواج وانخفاضها وذلك باستخدام عَنفات (توربينات) منصوبة في الممرات المائية عند الحواجز . والطاقة الكامنة الناتجة عن الاختلاف في مستوى الماء تتحول إلى طاقة حركية على شكل ماء يمر بسرعة عالية خلال العَنفة. وهذه الطاقة الحركية تتحول بدورها إلى طاقة حركية دوارّة ناتجة عن حركة شفرات العَنفة. وهذه العَنفة الدائرة تقوم بتسيير مولد (Dynamo) لإنتاج الطاقة الكهربائية . ومعدل القدرة الناتجة من حواجز المد والجزر يتناسب بصورة تقريبية مع مربع مستويات المّد والجزر . وإن الاشتقاق الرياضي لهذه العلاقة بسيط ، وهو كالآتي :

نفترض أن مدى ارتفاع وانخفاض الموجة هو (R) ، وأن مساحة الحوض خلف الحاجز ثابتة ومقدارها (A) ، وهذه تبقى مغطاة بالماء عند الجزر (الشكل 8-3) . فكمية الماء المحصورة تكون كتلتها تساوي (ρAR) عند مركز الثقل الذي يكون على عمق R\2 أثناء المّد (ρ هي كثافة الماء) . وكمية الطاقة الكامنة القصوى (E) المتوفرة عند المّد إذا قل الماء إلى ارتفاع R\2 يمكن حسابها من حاصل ضرب الكتلة (ρAR) والارتفاع (R\2) وتسارع الجاذبية الأرضية (g) أي أن (Rgm = E) :

$E = \rho ARg(R\backslash 2)$ (جول)

أي أن معدل الطاقة خلال زمن مد واحد مقداره T هو $\rho AR^2g\backslash 2T$.

ومن الواضح أن أيّ فرق قليل في ارتفاع المد يسبب فرقاً كبيراً في إنتاجية الحاجز وجدواه الاقتصادية . وإن معدل مدى ارتفاع 5 متر يعتبر أقل قيمة مناسبة لتوليد طاقة كهربائية بصورة اقتصادية . والمعادلة السابقة تبين أيضاً أن الطاقة الناتجة تتناسب أيضاً مع مساحة الماء المحصورة خلف الحاجز ، لذا فإن جغرافية الموقع مهمة أيضاً . وكل هذا يعني أن نصب الحاجز عامل مهم في الإنتاجية .



شكل (8-3): توليد الطاقة الكهربائية من المد والجزر

وإلى الآن فإن المحطة الوحيدة المنصوبة والتي تبلغ سعتها 240 ميغاواط هي التي تقع على خليج رانس (Rance Estuary) في الساحل الغربي من فرنسا ، وهي لا تزال تعمل بنجاح منذ 25 عاماً وذلك بالإضافة إلى العَنفة (التوربين) التي بسعة 18 ميغاواط والتي تم نصبها في منتصف عام 1980 في نوفا سكوتيا في كندا (Annapolis Royal In Nova Scotia, Canada) ومشاريع صغيرة أخرى في مناطق مختلفة من العالم ، من ضمنها مشروع في خليج صغير قرب منطقة مورمنسك (Murmansk) في روسيا وعدة مشاريع أخرى في الصين .

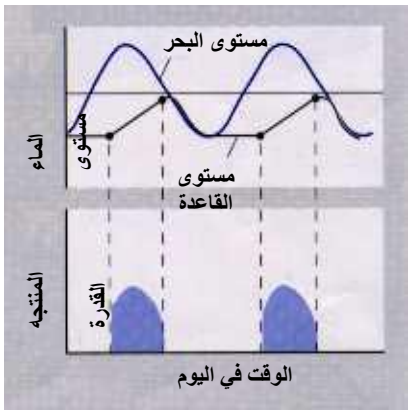
5-8 العوامل الفنية

إن الطاقة التي تدخل إلى الحاجز وكذلك ارتفاع المد والجزر وانخفاضه تتبع موجة جيبية (الشكل 8-4) . ومثلما ذكر سابقاً فإن المّد والجزر يتعاقبان كل 12.4 ساعة ، والقيمة بين أعلى ارتفاع وأدناه تختلف باختلاف الموقع نتيجة لتعقيدات الرنين ، ونتيجة لتعقيدات هيئة الخليج المعين ، وللتأثير الناتج عن اتخاذه شكل قمع مع التغيرات المترتبة نتيجة لاختلاف العمق والعرض والاحتكاك فوق المواد المختلفة في قاع الخليج التي تولد تغيّرات موقعية ، لذلك نرى أنه من الصعب تكوين نموذج رياضي حقيقي للرنين .

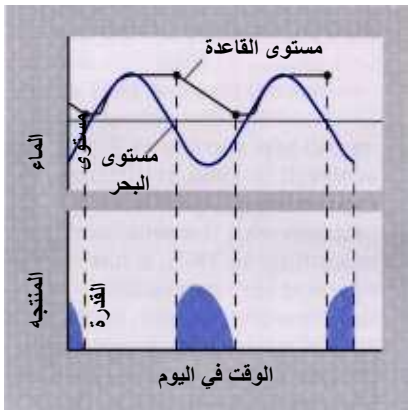
وهنالك حاجة ملحّة لتحليل هذه التأثيرات عندما يتم اتخاذ قرار بنصب محطة في منطقة معينة، وذلك لاختيار موقع الحاجز واتجاهه ، لأن لذلك تأثيراً رئيسيّاً على الطاقة المنتجة. ومن المؤكد أن هنالك إمكانية لتحديد موقع حاجز يناسب الخليج ويكون قريباً من الرنين وذلك لزيادة الطاقة المنتجة ، ولهذا فإنه يجب أن يتم الابتعاد عن الأمور التي تعّكر حدوث الرنين الموجود فيها .

وبالإضافة إلى النقاط الأساسية الخاصة بالموقع والاتجاه فإن هنالك مجموعة من العوامل التي تؤثر على إنتاج الطاقة من الحاجز لها علاقة بنموذج التشغيل .

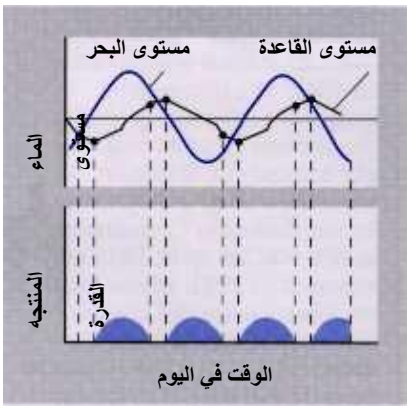
وتولد الطاقة إما بإمرار موجة المد خلال توربين منصوب على الحاجز (ويسمى توليد الفيضان) ، (الشكل 8-4) ، أو بواسطة السماح للمد بالمرور من الحاجز خلال البوابات بدون توليد ، وحجز المياه خلف الحاجز بواسطة غلق البوابات . وستتولد الطاقة الكهربائية نتيجة لفرق الارتفاع بعد السماح للماء بالخروج عبر البوابات خلال فترة الجزر ويسمى "توليد الجزر" (الشكل 8-5) . وتوليد الجزر هو الشائع الاستخدام ، ولكن التوليد في كلا الحالتين مستخدم أيضاً (الشكل 8-6) . إن التقنيات الأساسية لتوليد الطاقة متطورة حالياً بشكل جيد ، ولها خصائص مشتركة مع المحطات المائية . ويمثل الشكل (8-7) صورة فنية تصويرية لمخطط التوليد .



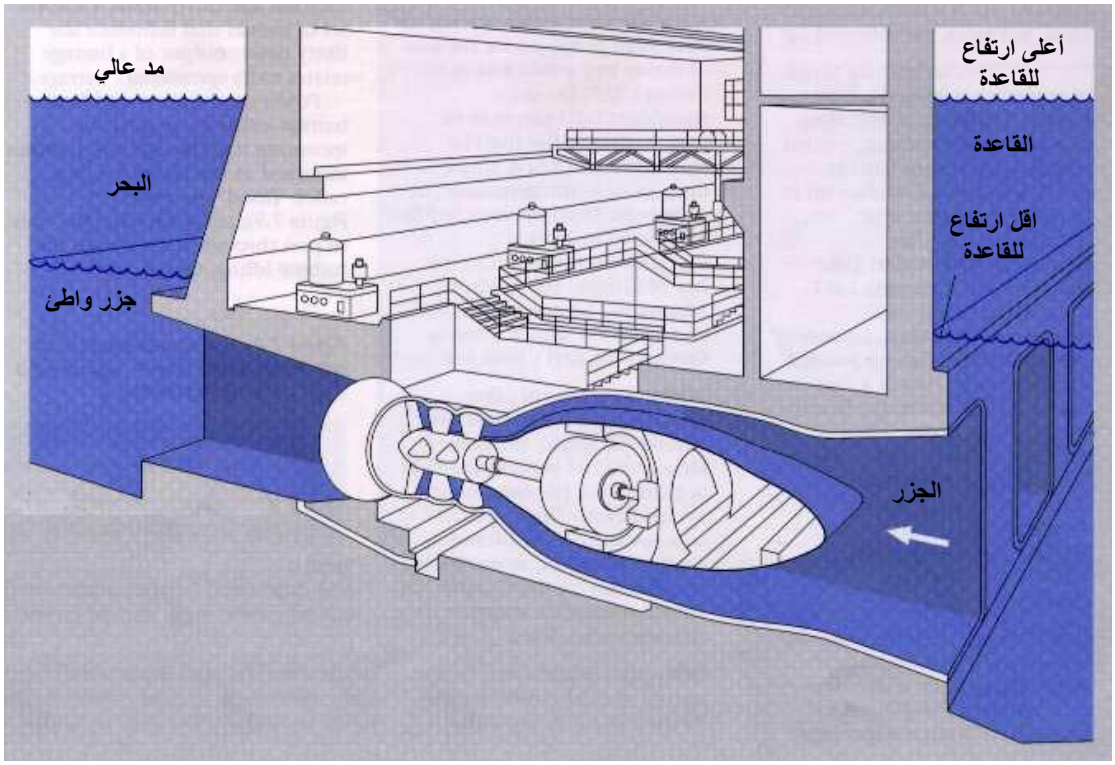
شكل (8-4): توليد الفيضان



شكل (8-5): توليد الجزر

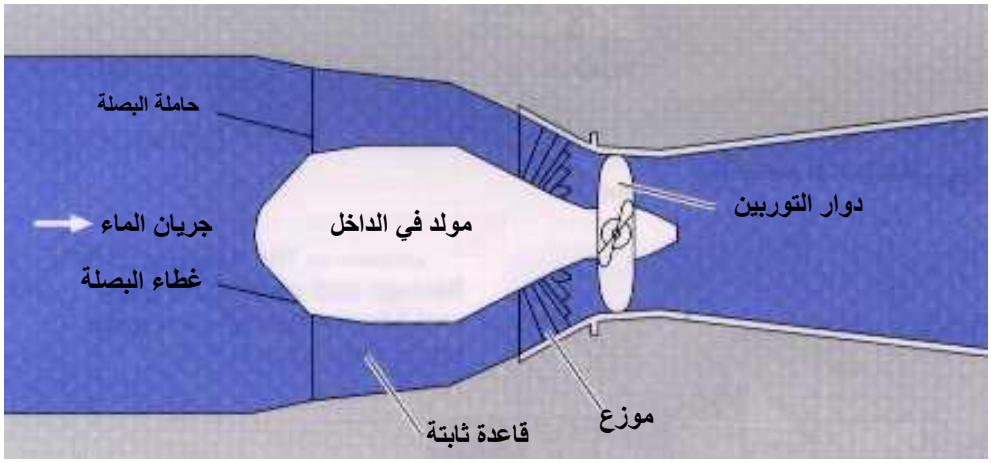


شكل (8-6): التوليد في كلا الحالتين



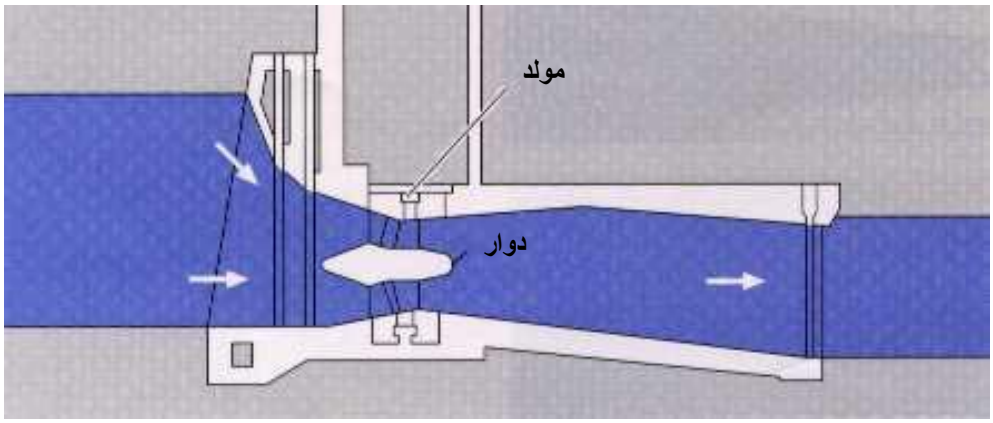
شكل (8-7): صورة فنية لمخطط التوليد

هناك عدد من الأشكال و الهيئات التي يمكن استخدامها في هذا النوع من المحطات . ففي محطة لارانس (LaRance) استخدمت منظومة بصلية الشكل يكون فيها التوربين والمولد محفوظين في مجري التيار في منطقة مسيجة على شكل بصلة (الشكل8-8). وفي هذه الحالة سيكون الجريان حول البصلة الكبيرة مع وجود وسيلة للوصول إلى المولد (في حالة الصيانة) تتضمن قطع سريان مجرى الماء .



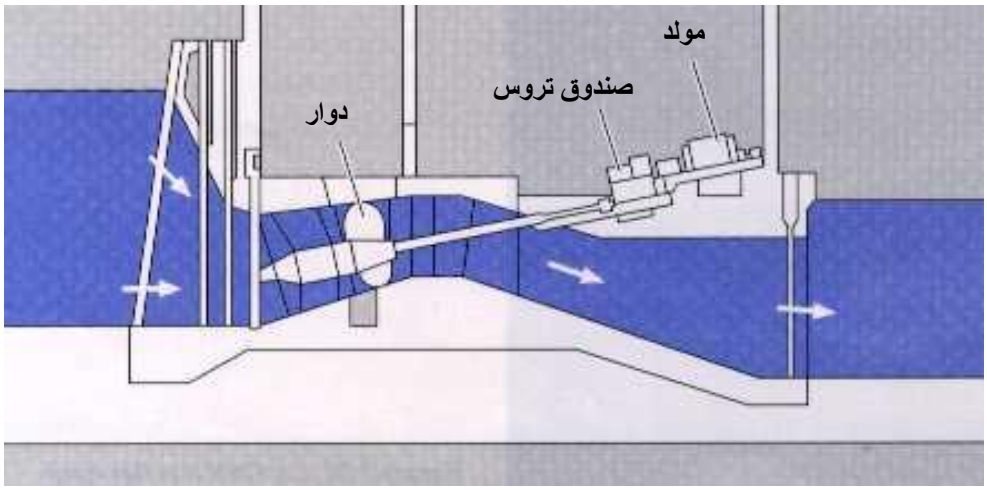
شكل (8-8): عَنفة (توربين) على شكل بصلة

هذه المشاكل تم تقليلها في توربين ستر افلو (Straflo) المستخدم في محطة (Annapolis Royal) وذلك بنصب المولد بصورة دائرية حول الحافة ، والجزء المعرض للتيار يكون الجزء الدوار من العَنفة (التوربين) شفرات العَنفة (التوربين) كما في الشكل (8-9) .



شكل (8-9): عَنفة (توربين) توليد داخل إطار

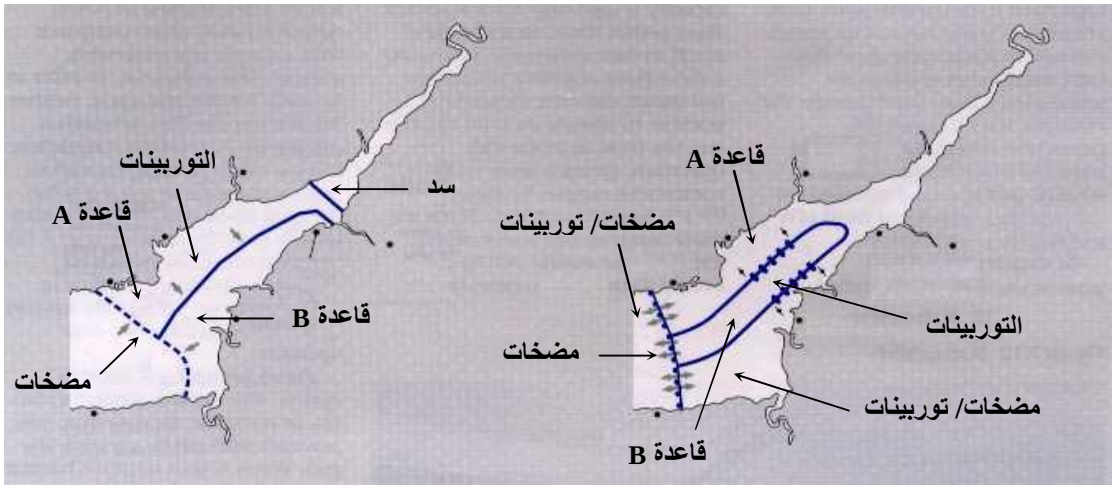
وتوجد أيضاً نوع آخر من العَنفات، وهي العَنفات الأنبوبية (Tubular) وفيها يكون الجزء الدوار (شفرات التوربين) موضوعاً بزاوية يتم فيها نقل قدرة الدوران إلى مولد خارجي (الشكل 8-10) . وسرعة دوران العَنفة تكون قليلة اعتيادياً (50-100 دورة بالدقيقة) ، وبهذا فإن مشاكل الاحتكاك تقل مقارنة بما يحدث في المحطات المائية ذات الارتفاع العالي . ونظراً إلى أن كمية كبيرة من الماء تمّر في وقت قصير فإن نصب أعداد كبيرة من العَنفات مطلوب في الحواجز الضخمة . فمثلاً المقترح في محطة حاجز سيفيرين (Severn) أن يكون هناك 216 توربيناً كل منها ذو سعة مقدارها 40 Mw وتولد طاقة كلية مقدارها 8640 Mw أي لها القدرة على توليد ما مقداره 17 تيراواط – ساعة بالسنة ($17Twhyr^{-1}$ = 10^{12}] .T1]



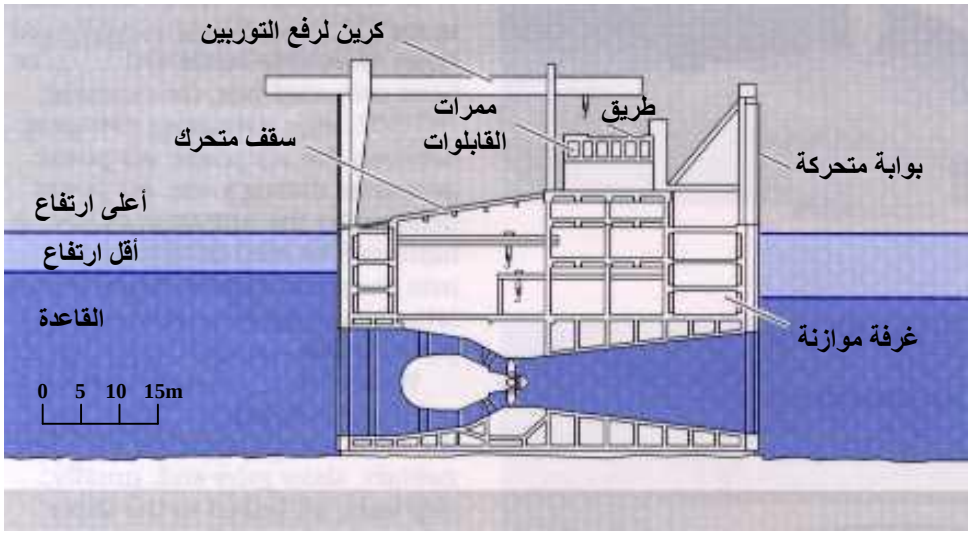
شكل (8-10): عَنفة (توربين) أنبوبي

وفي محطات التوليد بواسطة المّد أو الجزر تستخدم هذه السعة الكبيرة لمدة ثلاث إلى ست ساعات لكل دورة مد وجزر ، ومن الممكن التوليد خلال عمليتي المد والجزر في عملية باتجاهين بحيث يمكن أن تنتج طاقة ثابتة تقريباً باستخدام عَنفة (توربين) عكسية غاطسة . وهذا النوع من العَنفات (التوربينات) معقد ومكلف . وعلى الرغم من أن الإنتاج يكون موزعاً على الزمن ، إلاّ أن قدرته التوليدية تكون أقل من التوليد البسيط في حالة الجزر . وسبب هذا النقصان هو أنه يجب دائماً الاستعداد للدورة الثانية . وفي هذه الحالة لا يكون كلا الطورين الجزر أو المد كاملين إذ أنه من المفروض فتح البوابات وتقليل مستوى الماء استعداداً لدورة المد التالية والعكس في حالة التوليد عند الجزر (الشكل 8-6). وعلاوة على ذلك فإن تأثير تصميم الشفرات لا يمكن أن يكون الأفضل عند الاستخدام في اتجاهين .

وهنالك طريقة أخرى يمكن استخدامها ، وتسمى ضخ المد أو الفيضان (Flood Pumping). وفي هذه الحالة تعمل مولدات التوربين كمحركات ضخ تتغذى من الشبكة الكهربائية وتقوم بضخ الماء خلف الحاجز إلى الحوض لتجهيز ماء إضافي يستخدم في حالة التوليد بالجزر . وبالإضافة إلى ذلك فإن هنالك عدة أنواع من منظومات الأحواض المزدوجة المقترحة (الشكـــل 8-11) . ويستخدم أحياناً الضخ بين الأحواض . والطاقة الفائضة المتولدة في حالة الحمل الواطئ من قبل توربين ومولد الحوض الأول يمكن استغلالها لضخ ماء إلى الخزان الثاني وذلك لتوليد الطاقة عند الحاجة إليها . ومهما كان شكل المنظومة المستخدمة فإن المعدات الأساسية التي يجب أن تتكون منظومة الطاقة منها هي : التوربينات ، والبوابات، وأحياناً مكان للسماح للبواخر بالعبور إذ تكون مربوطة بجسور مع الشاطئ . ويوضع التوربين عادة في هيكل إسمنتي قوي (كونكريتي) كبير تحت الماء ، وهذه يمكن أن يتم بناؤها على الشاطئ ومن ثم وضعها في مكانها المناسب تحت الماء (الشكل 8-12) .

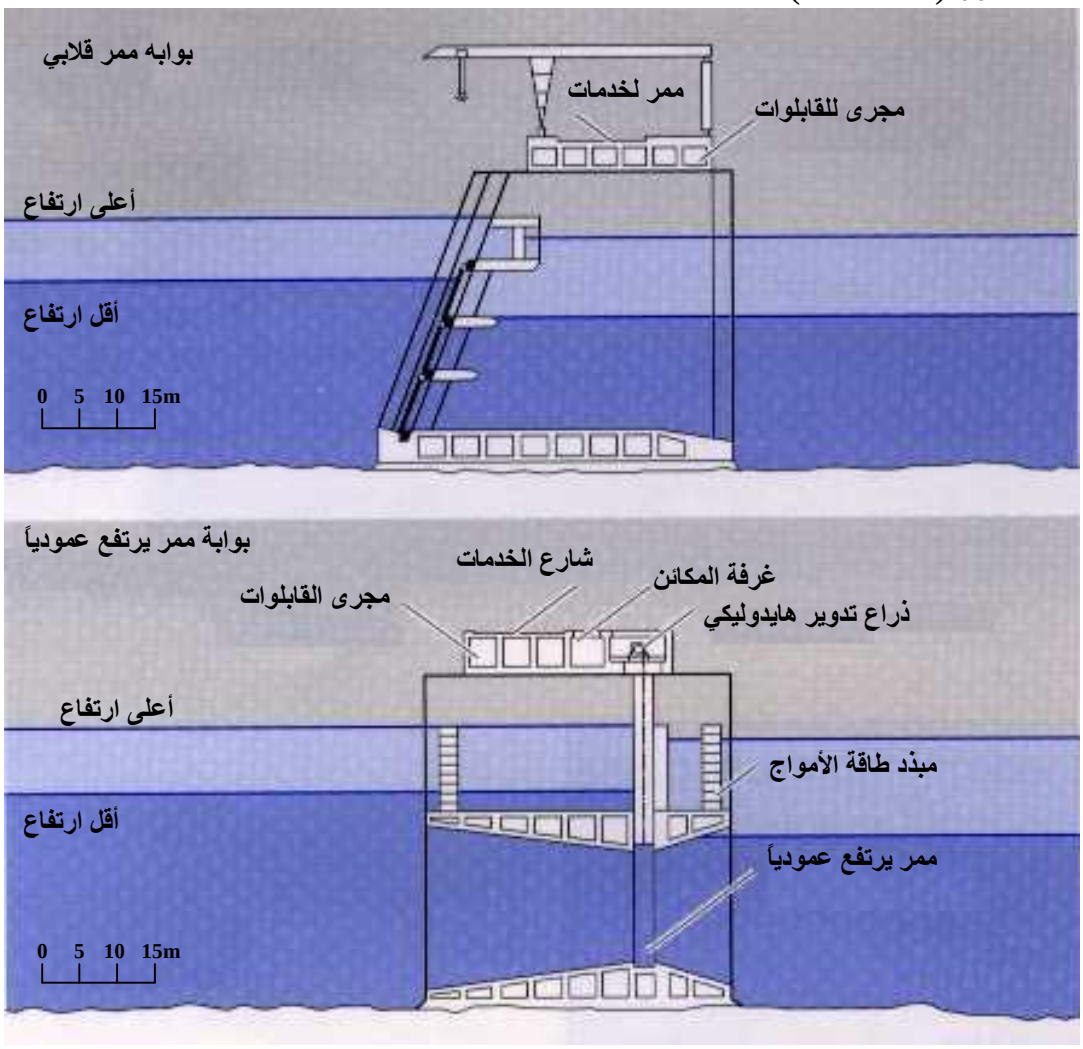


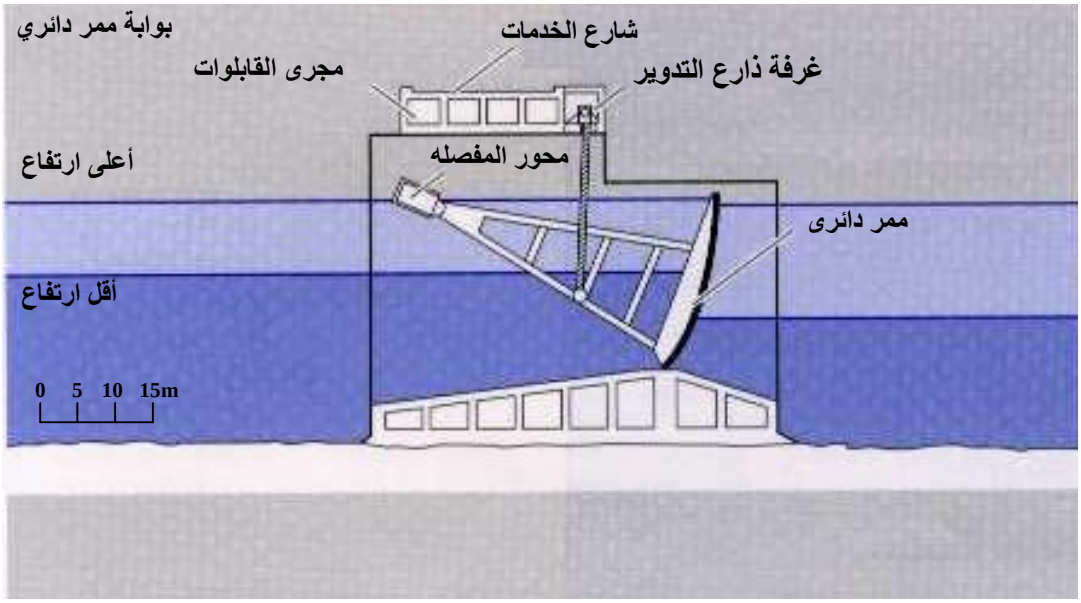
شكل (8-11): أنواع من المنظومات التي يستخدم فيها الضخ بين الأحواض



شكل (8-12): عَنفة (توربين) في حجرة كونكريتية تحت الماء

إن بوابات المرور هي من الأساسيات التي يجب أن تكون موجودة في الحاجز للسماح للمد بالمرور استعداداً للتوليد في حالة الجزر ، وهي أيضاً تكون منصوبة تحت الماء . أما بقية الحاجز فيمكن إنشاؤهُ من مواد مختلفة ، فالسد في محطة لارانس (La Rance) مثلاً متكون من صخور، وهنالك طرق أخرى كاستعمال سدّ ترابي كبير مغطى بطبقة من الكونكريت أو الصخور (الشكل 8-13) .





شكل (8-13): أنواع مختلفة من السدود المستخدمة في محطات التوليد

6-8 العوامل البيئية

إن إنشاء حاجز كبير في خليج لابد أن يكون له تأثير على البيئة المجاورة له . وهذه التأثيرات بعضها إيجابي وبعضها الآخر سلبي . ومن الآثار الواضحة هو التأثير الكبير على الحياة البرية في المنطقة ، وعلى الأسماك ، والطيور التي يكون بعضها من النوع المهاجر، بالإضافة إلى تأثير إنشاء الحواجز والسدود على مستوى الغرين والمواد المترسبة العالقة في الماء . فعند حجز الماء خلف السدود تترسب المواد العالقة فيه ، ويصبح الماء بذلك أكثر صفاءً. وعند تعرضه لأشعة الشمس فإن الإشعاع الشمسي يصل إلى عمق أكبر ، وبذلك يزيد من الإنتاجية البيولوجية للماء ، ومن غذاء الأسماك والطيور في المنطقة .

كما أن إنشاء سدود أو حواجز في المضايق أو الخلجان يسبب عادة منع السفن من المرور. وعلى الرغم من وجود مداخل خاصة للسفن في بعض السدود إلاّ أن المستوى العالي للمياه خلف السد سيساعد على تحسين الملاحة في الموانئ ، والتأثير الحقيقي يعتمد على دورة المد والجزر والموقع الحقيقي للسد والميناء . فالسدود يمكن أن تلعب دوراً في الحماية من الفيضانات أو العواصف وذلك لكونها تحد من توليد الأمواج .

إن السدود ، بالطبع ، لها بعض التأثيرات على الاقتصاد المحلي خلال فترتي الإنشاء والتوليد، وعلى الأنشطة الأخرى المتعلقة بالسياحة أو برياضة الماء التي يمكن مزاولتها في هذه المواقع. وعند التحدث عن السدود أو عن الحواجز الصغيرة فإن مسألة البيئة يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار ، ويجب أن تبذل جهود كبيرة للحّد من المشاكل القابلة الحدوث .

7-8 محطات المد والجزر الطافية

بدلاً من إنشاء حاجز مكلف وعَنفات (توربينات) في أحد الخلجان فإنه من الممكن استخلاص الطاقة الحركية من تيارات المد والجزر وذلك بنصب توربينات غاطسة في مناطق مناسبة.

والفكرة غير متطورة إلى حّد الآن ، ومع ذلك فإن القدرة التي يمكن استخلاصها ، مثلاً ، من القناة الشمالية للبحر الايرلندي تعادل 66.3 ميغا واط . ويمكن الاستفادة من تيّار من هذا النوع باستخدام صف من الدوارات ذات القطر الكبير مسندة على عوامات مربوطة في قاع البحر أو مثبتة في القاع . ومن مزايا هذه الفكرة اختلافها عن الحواجز أو السدود ، وذلك لإمكانية بنائها على مركبات تنصب بالتدريج .

وهنالك مشاكل منها تعلق الأسماك والحشائش البحرية، ولكن هذه المشاكل تعتبر ثانوية مقارنة بعدم إنشاء سد أو حاجز .

لقد نوقش إنشاء عدة محطات من هذا النوع في مناطق مختلفة من العالم من ضمنها موقع قرب ألديرني (Alderney) في الساحل الفرنسي ، ومضائق مسّينا (Messina) في إيطاليا ، وفي غرب أستراليا .

وللمقارنة بين التقنيات المختلفة فإن الدوارات الغاطسة تعمل بسرع أقل من سرع عمل التوربين الريحي . وبما أن كثافة المائع المستخدم (الماء) أكبر من كثافة الهواء فإن القدرة المستخلصة من تيار المد والجزر أكبر بكثير من القدرة المستخلصة من طاحونة الهواء .

8-8 الإمكانيات العالمية

إن إمكانيات استغلال هذا المصدر تعتمد على المواقع المؤهلة . ويبين الجدول (8-1) مختلف هذه المواقع في مناطق العالم . ويتبين من الجدول أن هناك مواقع في دول كثيرة من العالم، كروسيا وكندا وأمريكيا والأرجنتين وكوريا وأستراليا وفرنسا والصين والهند ، ذات جهد افتراضي يصل إلى 300 تيراواط – ساعة بالسنة ($Twhyr^{-1}$) . والشكل (8-14) يوضح مواقع بعض منها .

شكل (8-14): بعض المواقع المؤهلة لاستغلال طاقة المد والجزر

جدول 8-1 : إمكانيات الطاقة المنتجة من بعض مناطق العالم

الموقع	المساحة كيلو متر مربع	أعلى عمق متر	الطول متر	المدى المتوسط متر	التوربينات (العدد x القطر بالمتر)	الطاقة السنوية تيرا وات -ساعة	كلفة الطاقة بنس امريكي/كيلووات - ساعة
الأرجنتين وتشيلي							
خليج سان حوزي **Gulf San Jose**	788	25	7000	5.78	270 x 7.5	10.9	2.1
رايو كالو عوز **Rio Gallegos**	140	12	3400	7.46	85 x 6	3.27	1.6
سان جوليان **San Julian**	77	13	810	5.66	40 x 6	1.04	1.8
ريو سانتا كروز **Rio Santa Cruz**	215	32	2070	7.48	60 x 9	5.05	2.3
ريو كويغ **Rio Coig**	46	12	1800	7.86	30 x 6	0.61	1.9
باهيه سان سيباسنيان **Bahia San Sebastian**	580	30	19300	6.5	145 x 9	10	3.8
الاتحاد السوفيتي السابق							
زاليف توغورسكي **Zaliv Tugurski**	1400	30	26000	4.74	200 x 9	12	4
استراليا							
خليج سكيور **Secure Bay**	140	50	1300	7	37 x 9	2.9	3.6
والكوت انليت **Walcott Inlet**	260	75	2500	7	70 x 9	5.4	5.1
كندا							
خليج فوندي **Bay of Fundy**	282	42	8000	11.7	106 x 7.5	11.7	2.2
جنوب شرق الصين							
دامو شان **Damao Shan**	200	24	3550	4.8	100 x6	2.05	3.7
دونك اندو **Dong'an Dao**	210	21	3900	5.1	100 x 6	2.26	3.2
سانتو آو **Santo Ao**	680	35	3000	4.8	150 x9	3.7	2.8
الهند							
خليج كامي **Gulf of Cambay**	1055	22	25000	6.1	570 x6	16.4	2.5
خليج كاجاج **Gulf of Kachahh**	50	18	2000	4.8	24 x 6	0.48	5
كوريا الجنوبية							
خليج كارولين **Garolim Bay**	100	28	1850	4.8	24 x8	0.893	4.5
خليج اسام **Gulf of Asam**	130	24	2350	6.06	72 x6	2.05	3.1

إن الطاقة الرئيسية التي يمكن توليدها تعتمد على مواقع قليلة ذات سدود أو حواجز ضخمة، ولكن هنالك مواقع أخرى مؤهلة لوحدات صغيرة ومتوسطة . والمواقع الرئيسية الحالية التي يمكن من خلالها توليد طاقة كبيرة تقع في كندا وإنكلترا وروسيا . وهنالك مواقع متوسطة السعة تقع في كل من كوريا والهند وأستراليا والبرازيل .

إن تطور إنتاج الطاقة من هذا المصدر قد يعّد ضعيفاً قياساً إلى مصادر الطاقة المتجددة الأخرى . بالرغم من ذلك فإن هناك كمية كبيرة من الطاقة الكلية غير مستغلة حالياً من المد والجزر ، إذ تصل إلى 3000 جيغاواط ، وأن هناك ما مقداره حوالي 1000 جيغاواط من هذه الطاقة المبددة في مناطق ضحلة يمكن استغلالها .

ومن الناحية العملية ، فإن طاقة المد والجزر الكلية المنصوبة التي تعادل 120 جيغاواط تنتج على الأقل (190 $Twhyr^{-1}$) تيراواط – ساعة بالسنة . ورغم إن هذه الكمية تشكل حوالي 10% فقط من إمكانيات الطاقة المائية العالمية فإنهّا تعّد ، مع ذلك كمية لا يستهان بها .

أسئلة تقويمية

1. كيف تحدث ظاهرة المد والجزر ؟
2. كيف يتم استخلاص الطاقة من المد والجزر ؟
3. ما هي أنواع العَنفات المستخدمة في توليد الطاقة الكهربائية من طاقة المد والجزر ؟
4. ما هي الإمكانات المتوفرة حالياً من استغلال طاقة المد والجزر ؟
5. ما هي التأثيرات البيئية الناتجة عن استغلال ظاهرة المد والجزر ؟
6. ما هو الإرتفاع المناسب لمنسوب المياه لتكون جدوى استغلال هذا النوع من الطاقة مقبولاً ؟
7. هل وجود خليج ضيق ذو عمق معين أفضل من خليج واسع ومفتوح مياهه ضحلة ؟ وضح ذلك ؟
8. هل توجد مناطق معينة من الوطن العربي صالحة لاستغلالها في إنتاج طاقة المد والجزر؟

الفصل السابع

الطاقة المائية

1-7 مقدمـــــة

2-7 مصادر الطاقة المائية
- الطاقة الكامنة
- القدرة والارتفاع وكمية الجريان

3-7 الموارد العالمية

4-7 القيمة الحالية للسعة والإنتاج العالمي

5-7 نبذة تاريخية مختصرة عن الطاقة المائية
- المحركات الرئيسية
- أنواع الدواليب المائية
- تقنيات القرن التاسع عشر

6-7 أنواع محطات الطاقة المائية
- الارتفاع الواطئ والمتوسط والعالي
- تأثير الارتفاع والضغط
- تخمين القدرة

7-7 بعض أنواع العَنفات (التوربينات) المستخدمة
- عَنفة (توربين) فرانسيس
- الدافع أو العَنفة (التوربين) ذو الجريان المحوري
- العَنفات (التوربينات) ذات القوة الدافعة

8-7 السرع النوعية ومديات التطبيق

9-7 محطات الطاقة المائية القليلة السعة

10-7 تطور الطاقة المائية في العالم

11-7 الاعتبارات البيئية واستخدام مصادر الطاقة المائية
- التأثيرات الهيدرولوجية
- تأثيرات السدود
- التأثيرات الاجتماعية

12-7 الآفاق المستقبلية

13-7 المحطات التقليدية الكبيرة

14-7 المحطات الكهرومائية الصغيرة

1-7 مقدمـــــة

إن طاقة المصادر المائية ذات تقنية معروفة ومستخدمة منذ عقود طويلة . وكلفة إنتاج الطاقة الكهربائية من هذا المصدر منافسة جداً للكلفة من المصادر التقليدية . وتستخدم مصادر الطاقة المائية حالياً في أكثر من ثلاثين بلداً في العالم ، ويبلغ إنتاجها من الطاقة خمس الإنتاج العالمي الكلي من الطاقة الكهربائية . لقد تطورت تقنية هذا المصدر من دولاب خشبي يقوم بتحويل قسم قليل من طاقة المياه إلى طاقة ميكانيكية إلى توربين ومولد يدور بسرعة 1500 دورة في الدقيقة وينتج طاقة كهربائية بكفاءة تصل إلى حوالي 90% .

2-7 مصادر الطاقة المائية

إن الأشعة الشمسية الساقطة على المحيطات والبحار والتي تكّون ثلاثة أرباع الإشعاع الشمسي الكلي الواصل إلى سطح الأرض تقوم بتبخير الماء . وقسم من هذه الكمية الكبيرة من الطاقة المخزونة يسقط على الأرض مرة أخرى على شكل أمطار أو ثلوج فتسبب جريان الماء في الأنهار والجداول التي تصب بعد ذلك في البحار والمحيطات .

1-2-7 الطاقة الكامنة المخزونة

عند تواجد ماء (أو أي مادة أخرى) على ارتفاع معّين فإن ذلك يّمثل طاقة مخزونة . والطاقة اللازمة لرفع كيلوغرام واحد من المادة إلى ارتفاع مقداره متر واحد تساوي 10 جول . ويمكن تمثيل ذلك بالمعادلة التالية :

الطاقة الكامنة (PE) = mgh
m = الكتلة (كيلوغرام)
g = التسارع (التعجيل) الأرضي ويعادل $10ms^{-2} \approx 9.8ms^{-2}$
h = الارتفاع عن سطح الأرض (م)

ومن هذه المعادلة نستطيع أن نقدر الطاقة المطلقة العليا التي يمكن لهذا المصدر توفيرها إذا استغل بصورة كاملة . إن كمية ماء المطر التي تسقط تقدر بحوالي 10^{17} كيلو غرام سنوياً ، ومعدل ارتفاع مناطق الأرض هو 800 متر فوق مستوى سطح البحر . لذا فإن الطاقة السنوية الكلية التي نستطيع أن نولدها نظرياً من هذا المصدر هي 8×10^{20} J أو

أكثر بقليل من TWh 200000 في السنة. وهذه الكمية تعادل ضعف الاستهلاك العالمي الحالي للطاقة .

2-2-7 القدرة والارتفاع وكمية الجريان

إن حساب القدرة في أي وقت له نفس أهمية تقدير الإنتاج الكلي السنوي . فالقدرة المتوفرة عند سقوط المياه هي معدل إنتاج الطاقة ووحداتها جول في الثانية ، وهذه تعتمد بصورة واضحة على كمية المياه المستخدمة لكل كيلوغرام من الثانية. وبصورة عامة يجب أن نأخذ في الاعتبار كمية الجريان (Q) مقاسه بالمتر المكعب في الثانية . وبما أن كل متر مكعب من الماء له كتلة(m) تساوي 1000 كيلوغرام فإن مقدار القدرة (p) بوحدة الوات ستكون :

$$P = mg\,h$$

$$\text{وات (W)} = Q\ 1000 \times 10 \times h$$

$$\text{وات } Qh\ 10000$$

$$\text{كيلو وات (KW)} = Qh\ 10$$

وعند الأخذ في الاعتبار خسائر الطاقة التي تحدث في أية منظومة حقيقية فإن الماء يفقد جزءاً من طاقته نتيجة للاحتكاك والاضطراب عند مروره في قنوات أو خلال أنابيب ، ولهذا فإن الارتفاع (h) المؤثر يقل عن الارتفاع الحقيقي . وهذه الخسائر تختلف من منظومة إلى أخرى . ففي بعض الحالات لا يتجاوز الارتفاع المؤثر 75% من الارتفاع الحقيقي وقد يصل أحياناً إلى 95% . وهنالك أيضاً خسائر بالمحطة والأجهزة . وعلى الرغم من أن توربين التوليد في هذه المحطات ذو كفاءة (η) عالية فإن كفاءته أقل من 100% ، لذا يمكن تحوير المعادلة إلى الشكل التالي :

$$P = 10\ HQ\eta \quad \text{كيلو وات (KW)}$$

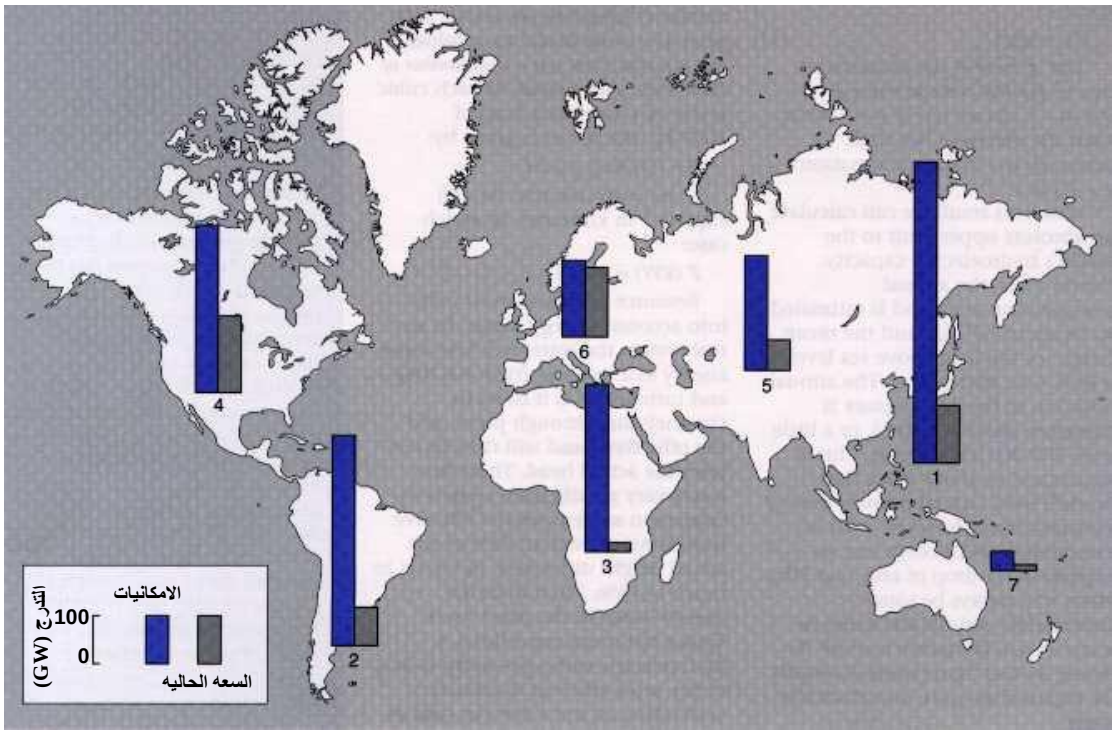
3-7 الموارد العالمية

يمكن تقدير المورد العالمي من طاقة المصادر المائية بحوالي ربع الطاقة التي خمناها سابقاً أي 50 000 TWh (T1=10^{12}10) في العام . وهذه الطاقة تعادل أربعة أضعاف الطاقة المولدة حالياً في محطات توليد الطاقة الكهربائية المنتشرة في كافة أرجاء العالم . وبالتأكيد فإن الرقم الحقيقي الذي يمكن الحصول عليه هو أقل بكثير من الرقم المذكور.

وعند الاستفسار عن كمية الطاقة التي يمكن استخدامها من منطقة معينة فإن الإجابة عن ذلك تعتمد على الظروف الموقعية وطبوغرافية الأرض وكميات المطر التي تسقط على المنطقة . إن التقدير الحالي لهذه الطاقة المتجددة يشير إلى أنه يمكن توليد 2 إلى 3 TW أي بإنتاج طاقة سنوية مقدارها 000 20 000 10 إلى TW .

4-7 القيمة الحالية للسعة والإنتاج العالمي

إن المجموع العالمي للسعة المنصوبة (المشيدة) حالياً في مختلف أنحاء العالم تبلغ 630 GW (1 جيغاوات = 10^9 وات) كما هو موضح بالشكل (7-1) ، والإنتاج السنوي يعادل 220 TWh . هذه القيمة تمثل 10% من أعلى تقدير مطروح حالياً . والسؤال الآن هو : أي قيمة من 90% المتبقية يمكن استغلالها في المستقبل؟ . الجواب يعتمد على اقتصاديات الطاقة المنتجة من هذا المصدر إضافة إلى بعض الاعتبارات البيئية والاجتماعية .



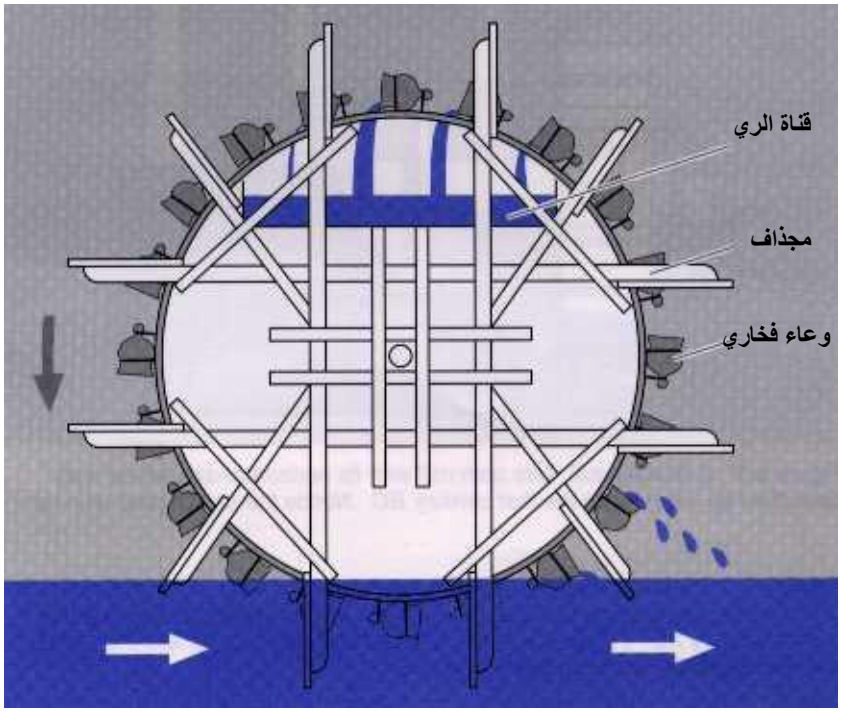
شكل (7-1) : السعه الحالية لمصادر الطاقة المائية في العالم

1- آسيا بدون دول الاتحاد السوفييتي السابقة 2- إمريكا الجنوبيه 3- إفريقيا 4- إمريكا الشمالية
5- الاتحاد السوفييتي السابق 6- أوربا بدون الاتحاد السوفييتي 7- أستراليا ونيوزلندا

5-7 نبذة تاريخية مختصرة عن الطاقة المائية

1-5-7 المحركات الرئيسية

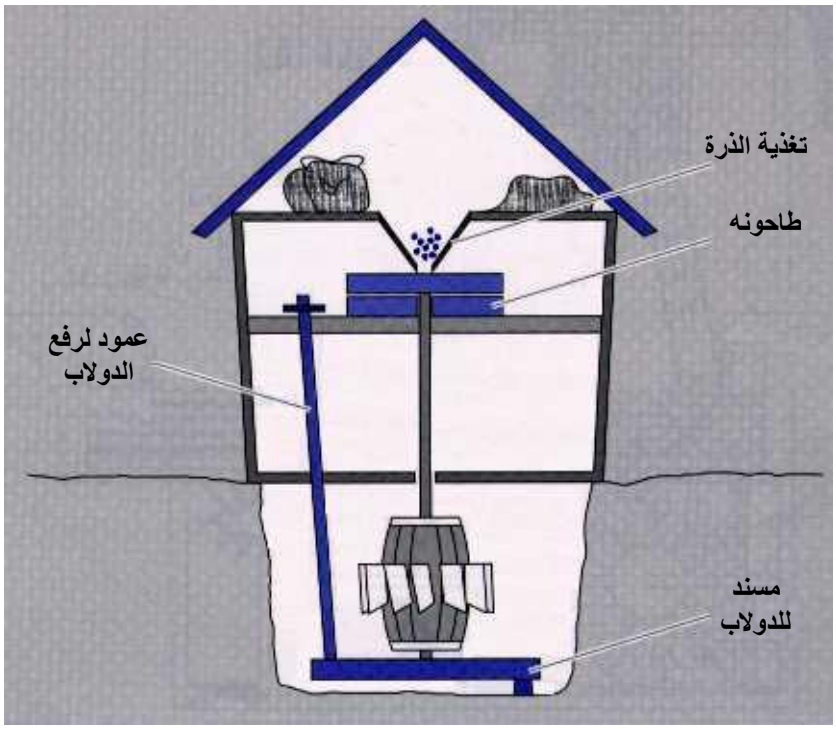
كان استخدام سرعة جريان المياه من أقدم مصادر الطاقة المستخلصة وذلك لتقليل الأحمال على الإنسان والحيوان. ولا أحد يعرف متى تم اختراع الدولاب المائي (Water Mill) . ولكن منظومات الري كانت موجودة قبل أكثر من 5000 عام . وإن أقدم جهاز كان اسمه نوركا (Norica) وكان يقوم برفع الماء من نهر إلى خزان أو منظومة قنوات . هذا الجهاز استخدم قبل ميلاد المسيح عليه السلام في مناطق من الشرق الأوسط والشرق الأقصى الشكل (2-7) .



شكل (2-7): دولاب نوركا المائي

إن أقدم طاحونة مائية هي طاحونة الذرة العمودية وتدعى نورس (Norse) أو الطاحونة الإغريقية (الشكل 3-7) ، وقد ظهرت في مناطق الشرق الأوسط في القرن الثاني بعد الميلاد ، ثم ظهرت بعد عدة قرون في الدول الاسكندنافية. وفي القرون اللاحقة أنشئت مطاحن مائية متطوّرة في الإمبراطورية الرومانية وما جاورها من دول الشرق الأوسط وأوربا .

كان رفع المياه وطحن الحبوب عملاً يوميّاً في معظم مناطق العالم القديم ، وفي القرون اللاحقة تطورت التكنولوجيا وبدأ استخدامها في التعدين وعمل الورق وعمليات متعددة متعلقة بالصوف والقطن .



شكل (7-3): طاحونه نورس

وفي الفترة ما بين 1650 و 1800 ميلادية أجريت عدة بحوث علمية لتحسين أداء دواليب المياه . وقد ظهرت عدة تصاميم لدواليب ذات قدرة تتراوح بين حصان واحد و 60 حصاناً للدواليب الكبيرة . وقد تم الاستنتاج بأنه للحصول على أعلى كفاءة يجب على الماء لمس الشفرات (Blades) ومغادرتها بنعومة وأن يعطي كل طاقته الحركية لها .

7-5-2 أنواع الدواليب المائية

منذ نهاية القرن الثامن عشر استخدمت ثلاثة أنواع من الدواليب (الشكل 7-4) . وهذه الدواليب هي :

أ - الدولاب المسير بالدفع السفلي

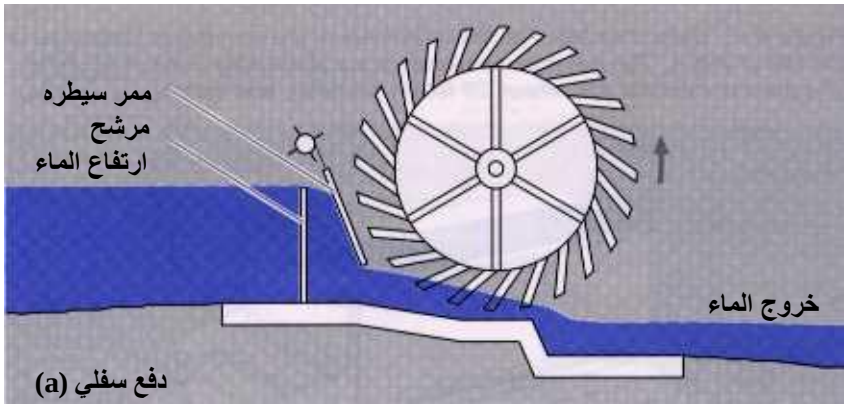
يتحرك الدولاب بواسطة ضغط الماء على الجزء السفلي من الشفرات المغمورة فيه . وفي هذا مزايا جيدة إذ يمكن استخدامه في جدول أو ساقية، ولكن مساوئه تظهر أثناء الفيضانات إذ ينغمر كل الدولاب وتتوقف حركته .

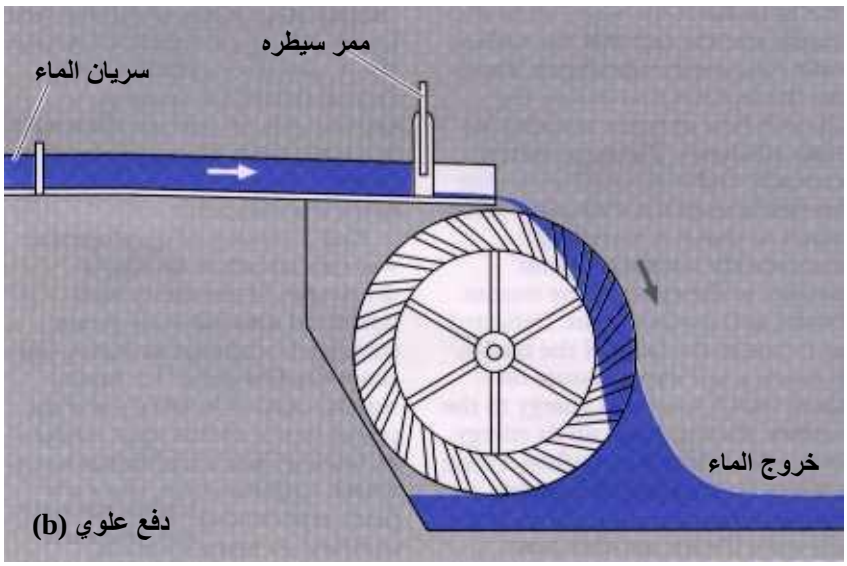
ب - الدولاب المسير بالدفع العلوي

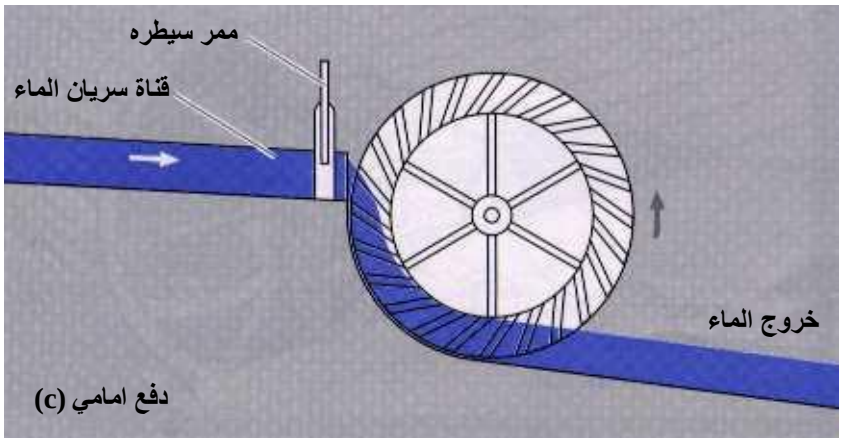
يتحرك الدولاب بواسطة الماء الساقط على الشفرات من الأعلى . والشفرات لها جوانب مغلقة تجعلها تبدو كدلو . ولا يعاني الدولاب المسير بالدفع العلوي من مشاكل الفيضان ، لكن له حدود وهو أن فرق الارتفاع بين دخول الماء وخروجه يجب أن يكون على الأقل مساوياً لقطر الدولاب. وهذا النوع من الدواليب غير ملائم للعمل في الجداول والأنهار ذات التدرج الطبيعي ، كما أنه يجب أن يتم صنعه بمتانة لمقاومة وزن الماء الساقط من الأعلى .

جـ - الدولاب المسير بالدفع الأمامي

التطوير الأخير للدولاب هو حل وسط بين الدولابين السابقين . فالماء يمر خلال حيطان متوازية ويضغط على الدولاب بمستوى مساو لمحوره . ولهذا الدولاب حسنات إذ يقوم يتفادى مشكلة الفيضان دون الحاجة إلى مستوى ماء مرتفع ومتانة غير اعتيادية خلافاً لما هو مطلوب في الدولاب المسير بالدفع العلوي .





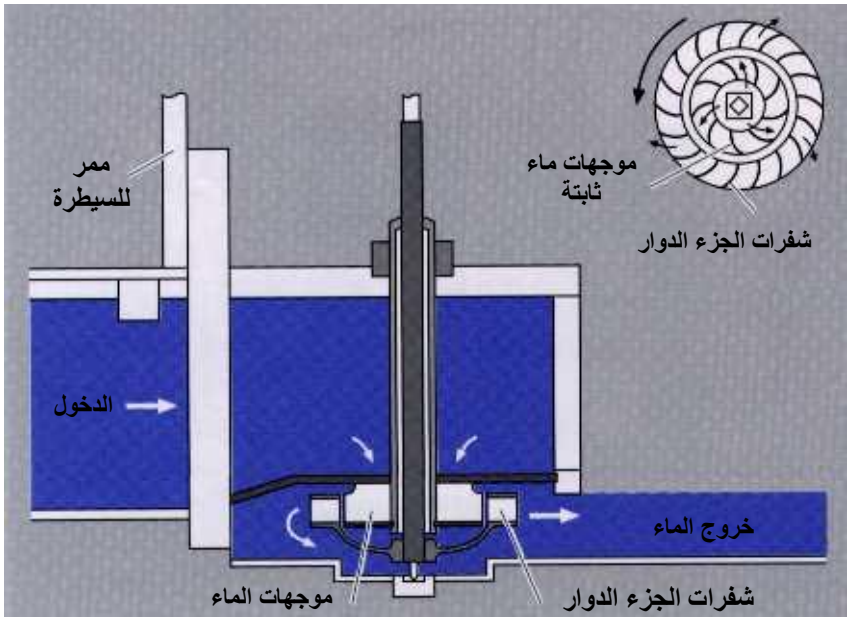


شكل (7-4): أنواع من الدواليب المائية

3-5-7 تقنيات القرن التاسع عشر

في عام 1832 اخترع مهندس فرنسي شاب اسمه (بونواه فورني رون) دولاباً مائياً ذا كفاءة عالية فكان هو وجهازه أول عَنفة (توربين) مائية. ولعَنفة (توربين) فورني رون (الشكل7-5) خصائص عّدة فهو ماكنة ذات محور عمودي ، والابتكار الجديد فيه هو استخدام الريش التي توجه الماء وتدفعه إلى الشفرات ، ويكون التوربين تحت الماء بصورة كاملة . في هذا التصميم يمكن الحصول على تيار مائي ناعم وبكفاءة عالية ، إذ يدخل الماء من الوسط وينحرف عبر الوجه المنحني من الريش الموجهة الثابتة بحيث يسير أفقياً إلى الخارج بصورة موازية تقريباً لمنحني الشفرات المتحركة عندما يصل إليها . وينعطف الماء عندما يعبر وجه الشفرات ، وبهذا فهو يسلط ضغطاً جانبيّاً عليها، وبدورها تنقل الطاقة إلى الجزء المتحرك . وتتم السيطرة على القدرة بواسطة رفع وخفض الحلقة بين الريش الموجهة والشفرات المتحركة . وهذه من الخصائص الجديدة في هذا التصميم .

وقد بينت الفحوصات بأن العَنفة (التوربين) استطاعت تحويل حوالي 80% من طاقة الماء إلى طاقة ميكانيكية . وأول زوج من هذا النوع تمّت تجربته عام 1837 ، ولم تتوقف التحسينات المُدْخَلة عليه . لقد تمّت تجربة عدة أنواع من العَنفات (التوربينات) ، وبعد عدة سنوات استطاع المهندس الأمريكي جيمس فرانسس (James Francis) إنجاز تجارب عديدة على عَنفات (توربينات) ذات سريان دائري داخلي (Inward-Flow) .



شكل (7-5): عَنفة (توربين) فورني رون

وبعد نصف قرن من التطور - وقبل أن يكتشف فرداي أن الكهرباء يمكن تحويلها إلى محطات كهربائية رئيسية - ادعى غودالمنغ (Godalming) في عام 1881 إمكانية تجهيز مناطق مختلفة بالكهرباء من دولاب مائي ، ولكن بعد مدة تم تعويض الدولاب بماكنة بخارية وذلك لعدم إمكانية الاعتماد على مستوى الماء في النهر . ومن هذه البداية البسيطة تطورت صناعة الكهرباء خلال العشرين سنة الأخيرة من القرن التاسع عشر بسرعة لم يوازها تطور أية تقنية أخرى . وفي عام 1891 نقلت الطاقة الكهربائية إلى مسافة 100 ميل لإنارة البيوت والمصانع وتشغيل الطباخات والمسخنات والمكاوي الكهربائية والمحركات .

6-7 أنواع محطات الطاقة المائية

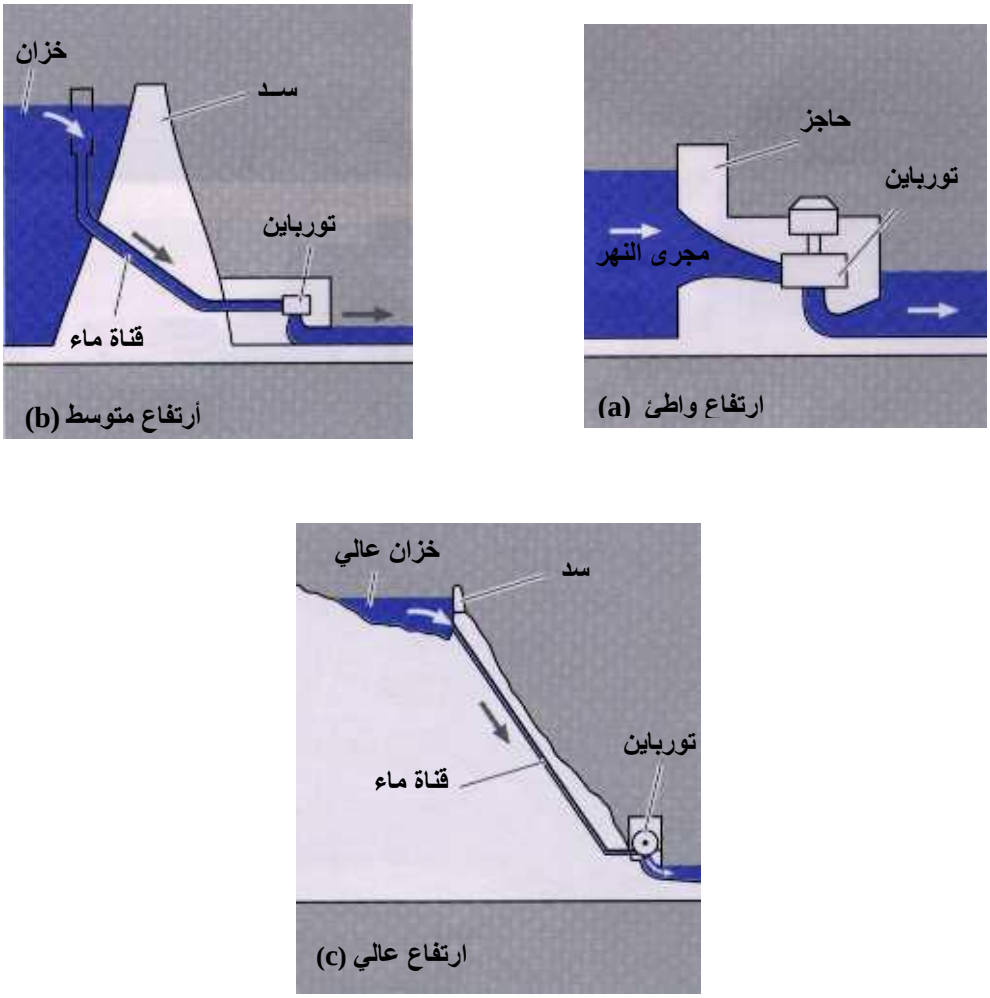
تتراوح سعة محطات الطاقة الكهربائية المولدة من الطاقة المائية من عدة مئات من الكيلووات إلى أكثر من 10000 ميغاوات . ويمكن تصنيف المحطات طبقاً لعّدة معايير وهي:

- معيار ارتفاع الماء المؤثر
- معيار السعة – الطاقة الكهربائية المنتجة
- معيار أنواع التوربين المستخدمة
- معيار موقع السد والخزان ونوعهما

هذه التصنيفات ليست منفصلة عن بعضها بعضاً ، والارتفاع والطاقة الكهربائية المنتجة هما اللذان يحددان نوع المحطة وخطوات نصبها .

1-8-7 الارتفاع الواطئ والمتوسط والعالي

يمكن لنوعيْن من المحطات لهما نفس الإنتاجية أن يكونا مختلفتين تماماً ، فالأول ذو كمية ماء قليلة وسرعة عالية مزودة من جبل عالٍ ، والثاني ذو كمية كبيرة جداً من الماء وسرعة قليلة مزودة من نهر جار . ويمكن تصنيف المواقع ومنشآت النصب إلى ارتفاع واطئ ، ومتوسط ، وعالٍ . على فرض أن الارتفاع العالي يكون بحدود 100 متر ، والارتفاع الواطئ يصل إلى حوالي أقل من 10 أمتار ، ويبين الشكل (7-6) المعالم الرئيسية للأنواع الثلاثة .



شكل (7-6): أنواع من محطات الطاقة المائية

فالسد أو الخزان الواطئ الموضح بالشكل (7-6a) يقوم بتوفير ارتفاع الماء المطلوب واحتواء مكونات المحطة مع وجود فتحات لمرور السفن أو الأسماك المهاجرة .

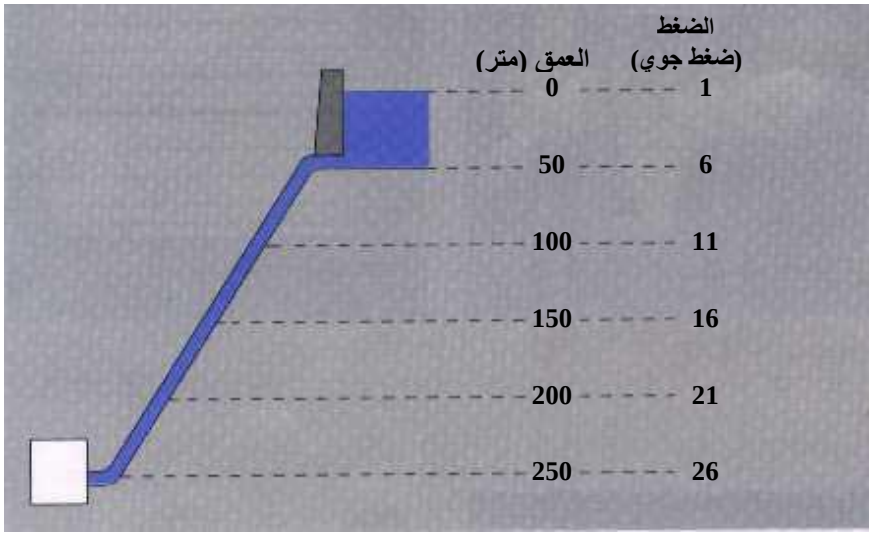
هذا النوع من محطات توليد الطاقة لا يحتوي على طاقة خزن ، ويعتمد على تيار النهر، ويمكن أن يتعرض لمشاكل استمرارية توفير الطاقة عند اختلاف مواسم السنة أو تغيير الظروف الجوية . فالمحطة المبنية في الشكل تستخدم عَنفة(توربيناً) عمودية المحور مع مولد ، وتستخدم حالياً أنواع أخرى من التوربينات في المواقع المنخفضة الارتفاع . إن الكمية الكبيرة المارة خلال الموقع المنخفض تعني أن كل المعدات والأعمال المدنية المتعلقة بها ستكون كبيرة جداً وبالتالي ستكون الكلفة عالية .

أما المحطتان الموضحتان في الشكلين (7-6b, 7-6c) فهما محطتان ضخمتان جداً ومنصوبتان في منطقة ضيقة من مجرى نهر في واد ، وخزان الماء الكبير يكون خلف السد وهو مصمم لتزويد خزن كافي لتزويد المحطة بالمياه في الظروف الجافة . لقد أنشأت الولايات المتحدة الأمريكية أكبر المحطات من هذا النوع في العالم . والأعمال الإنشائية في هذه المحطات كبيرة بشكل واضح ، ولكن المنظومات المستخدمة لا يشترط فيها أن تكون ضخمة جداً إذ يمكن لخزان صغير أن يقوم بتشغيل محطة توليد منصوبة بعد السد بصورة مستمرة . إن كمية الماء الجارية في محطة ذات ارتفاع ماء عالٍ تكون أقل بكثير من كميته في محطة قليلة الارتفاع تولد نفس الطاقة الكهربائية ، ولهذا فإن العَنفة (التوربين) والمولد وهيكلهما تكون أقل حجماً . ولكن المسار الطويل للماء يزيد من الكلفة ، كما أن الهيكل يجب أن يقاوم الضغط العالي المسلط من الماء والذي يعادل 100 ضغط جوي عند ارتفاع 1000 متر .

7-6-2 تأثير الارتفاع والضغط

الضغط (Pressure) في سائل (أو غاز) هو القوة (Force) التي تضغط على كل متر مربع من المساحة لأي جسم مغمور فيه . إن الضغط الجوي المسلط علينا هو نتيجة لوزن الهواء فوقنا . ويعادل الضغط الجوي عند مستوى سطح البحر ـ القوة المسلطة على متر مربع عند هذا السطح – قيمة 1 ضغط جوي (10^5 باسكال أو 14 رطلاً لكل بوصة مربعة) ، ويقل الضغط الجوي مع الارتفاع بنسبة 5% لكل 300 متر (أو 1 سم

زئبق لكل 120 متراً) . وكلما انحدرنا إلى مستوى أقل من الخزان (عمق أكثر) أو أي جسم من الماء ، فإن الضغط يزداد وذلك لزيادة وزن الماء ، لأن الماء أكثر كثافة بعدة مئات من المرات من الهواء ، ولهذا فإن الفرق يكون واضحاً . فعلى عمق 10 متر يكون الضغط ضعف قيمته على السطح ، أي 2 ضغط جوي . وهذه الزيادة تكون واحد ضغط جوي لكل عشرة أمتار (الشكل 7-7) .



شكل (7-7): ازدياد الضغط مع العمق

3-6-7 تخمين القدرة (Estimating The Hydropower)

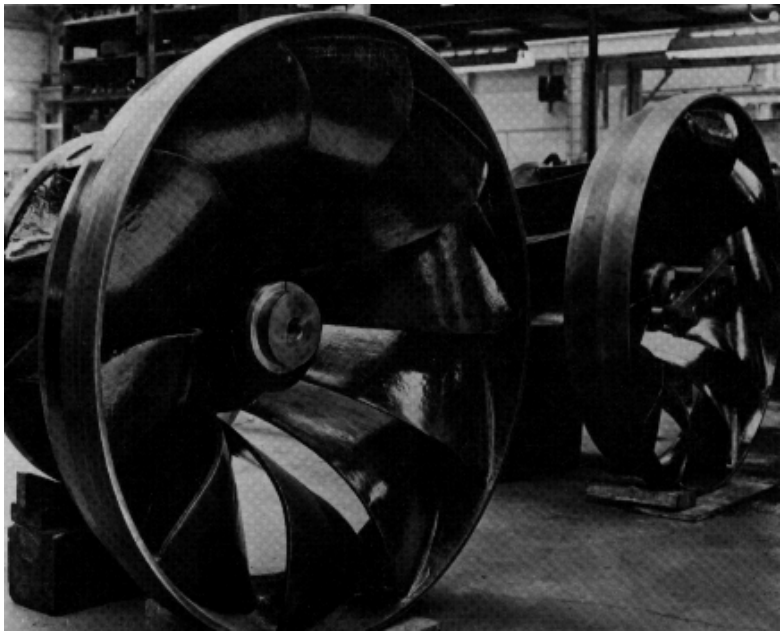
إن الحصول على معلومات دقيقة عن كمية المياه وتغيراتها هي من المتطلبات الأساسية لتقدير قدرة مكمن الطاقة المائية لموقع . والتقنية المفضلة للقياس هي تكوين علاقات تجريبية بين كمية السريان (Flow Rate) وعمق الماء (Depth of Water level) أو سرعة الماء في نقطة مختارة . وعند عدم توفر مثل هذه القياسات يجب اتباع طرق أخرى مثل إيجاد كمية المطر السنوية الساقطة على مساحة التجميع ، وهذه يمكن أن توفر معلومات عن كمية الجريان في المنظومة مع ملاحظة كمية التبخير وكمية سقي المزروعات والكمية المتسربة إلى الأرض . وفي معظم المناطق هنالك تغيير موسمي في كمية المياه ، وهذه يمكن تقديرها . ومن المشاكل الرئيسية هي وجود تغيرات موسمية لفترات طويلة أو لفترات قصيرة . فالتغيرات من سنة إلى أخرى قد تكون كبيرة . فمثلاً قد يكون معدل سقوط المطر في مساحة تجميع معينة 900 ملم ، ولكنه قد يتغير من 600 ملم إلى 1200 ملم . ففي الدول التي تعتمد بصورة رئيسية على

استمرارية سقوط كمية من المطر فإن نقص هذه الكمية لسنوات متعاقبة يعني حدوث مشاكل في توليد كميات مناسبة من الطاقة الكهربائية .

7-7 بعض أنواع العنَفات (التوربينات) المستخدمة

1-7-7 عَنفة (توربين) فرانسس (Francis Turbine)

إن العَنفات المستخدمة حالياً تكون على أشكال مختلفة كما في (الشكل7-7) وتختلف هذه العَنفات من حيث الحجم . فقد يتراوح قطر الجزء المتحرك منها من ثلث متر إلى 20 ضعفاً . والعَنفة المستخدمة غالباً في الأيام الحالية ، وبصورة واسعة ، هي عَنفة فرانسس كما هو موضح في (الشكل 7-8) . ويتم حالياً نصب مثل هذه العَنفة في محطات يصل فيها ارتفاع منسوب المـــاء ما بين 2 متر و 200 متر . وهذه العَنفات هي ذات دوران دائري . وبالرغم من أن الماء يسري إلى الداخل باتجاه المركز - مقارنة بالسريان إلى الخارج الذي يتم في عَنفة فورني رون – فإن مبدأ العمل يبقى مشابهاً لعَنفة القرن التاسع عشر .



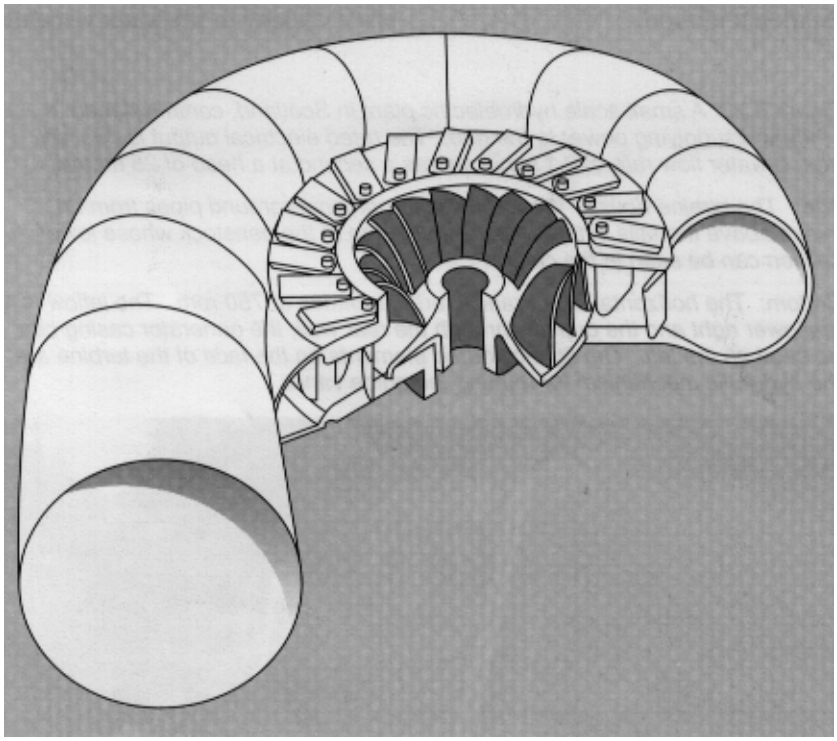
شكل (7-8): عَنفة (توربين) فرانسس

أ – عمل العَنفة (التوربين)

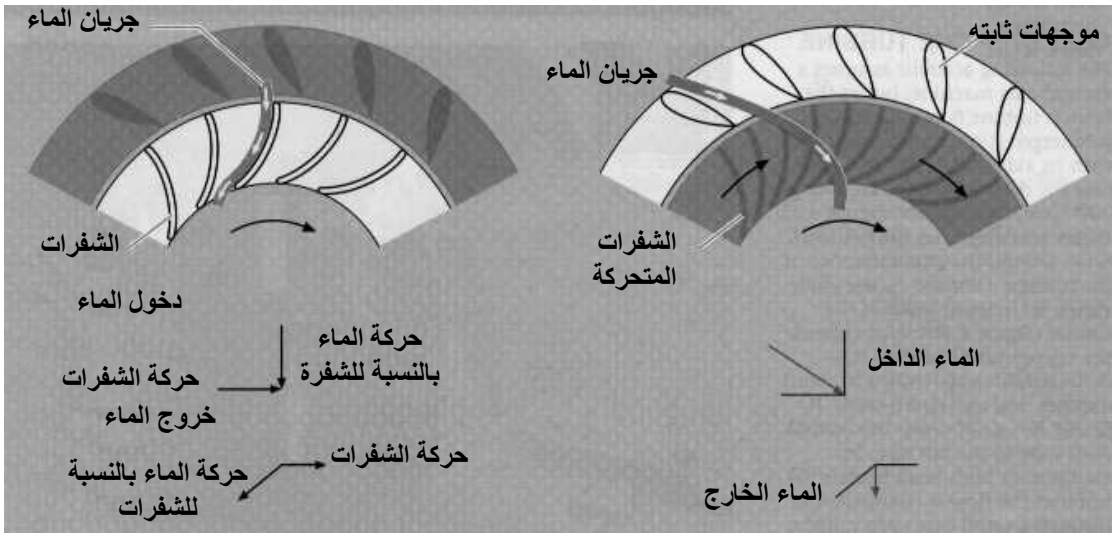
يسير الماء في الممر المحيط بالتوربين متوجهاً إلى الريش الدّوارة (Blades) كما في (الشكل 7-9) التي تقوم بتوجيه شفرات الجزء الدوار ، ومن ثم إلى المجرى

في الذيل . ففي العَنفات (التوربينات) المتوسطة من هذا النوع يتم توجيه التيار إلى غطاء ذي شكل لولبي يشبه هيكل قوقعة الحلزون مع ريش موجهة موضوعة في سطحه الداخلي . إن شكل الريش الموجهة وشكل شفرات الجزء الدوار مُهّمان في إنتاج سريان منتظم لغرض الحصول على كفاءة عالية ، وللتأكد من أن الماء عند خروجه قد فقد كل حركته الدورانية كما موضح في الشكل (7-10) الذي يبين سير الماء عند مواجهته ومغادرته لشفرات الجزء الدوار . ويجب أن نتذكر أن الشفرات تدور أيضاً ، وعليه فإن المسار الحقيقي للماء هو نتيجة جمع سرعة الشفرات إلى سرعة المياه كما في الشكل (7-10a) . أما الأسهم في الشكل (7-10b) فإنها توضح كيفية تغير اتجاه الجريان .

يسلط الماء قوة على الشفرات ، وهذه القوة تنقل الطاقة إلى الجزء الدوار لاستمرار دورانها . ومن أهمّ خصائص هذا النوع أن الماء الذي يصل إلى الجزء الدوار يكون تحت ضغط ، ويقل هذا الضغط عند مروره خلال العَنفة (التوربين) لتوليد طاقة الدوران .



شكل (7-9): هيكل عَنفة (توربين) فرانسس



شكل (7-10): سريان الماء في عَنفة (توربين) فرانسس

ب – كفاءة العَنفة (التوربين)

إن القدرة المتولدة من العَنفة تكون أقل من القدرة المسلطة عليه وذلك لعدة أسباب : أولها أن هنالك خسائر احتكاك ، وثانيها أن الطاقة المائية الموجهة تدور في أنابيب وقنوات ، وفي هذا أيضاً خسائر احتكاك .

إن العَنفات الحديثة ، وفي الظروف المناسبة ، تكون مكائن ذات كفاءة عالية. ويمكن الحصول منها على كفاءة تصل إلى 95% بعد أن يتم تثبيت سرعة الماء القادم الصحيح واتجاهه بالنسبة إلى الشفرات . والقدرة الناتجة يمكن أن تقل عندما تقل كمية الماء . ولتثبيت ذبذبات دوران المولد فإن معدل سرعة هذا المولد يجب أن تكون ثابتة لأية قدرة منتجة . ولكن عند عدم تغيير سرعة الجزء الدوار - عندما تقل سرعة المياه – فإن ذلك يعني أن الزاوية التي يتم فيها تسليط الماء على الشفرات المتحركة ستكون متغيرة وعندها ستقل كفاءتها . إن هذه الخصائص يجب تقبلها في مثل هذا النوع من العَنفة.

جـ - محددات عَنفة (توربين) فرانسس

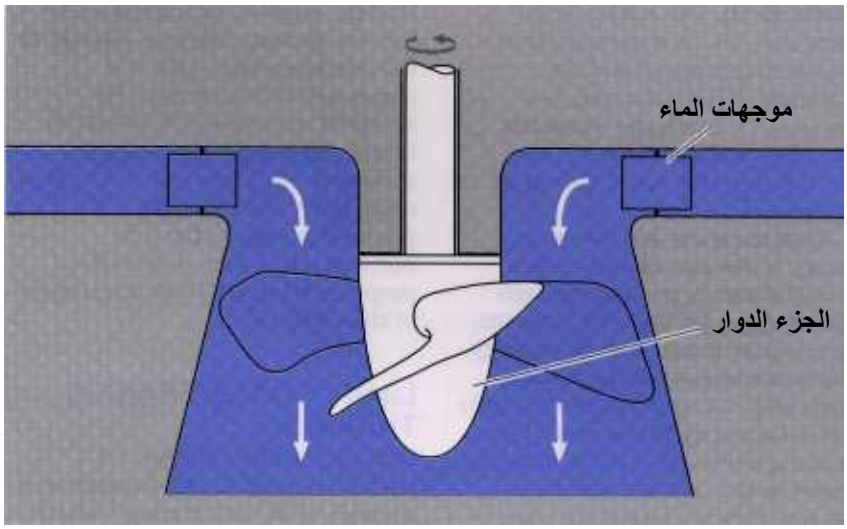
إن اختيار أفضل عَنفة لعمل معين يعتمد على عدة عوامل من أهمها أن يكون ارتفاع الماء مقبولاً . فإذا كان الارتفاع قليل فإن الحاجة إلى كميات كبيرة من المياه تكون مطلوبة للحصول على طاقة ثابتة . وعندما يكون الارتفاع أقل تقل

سرعة المياه ، وهذا يعني ضرورة اختيار مساحة كبيرة . والعَنفات الملائمة للعمل في مثل هذه الظروف هي من نوع العَنفة ذي الجريان المحوري (Propellers) . والحقيقة أن الارتفاع العالي للماء يسبب مشاكل أيضاً. فالارتفاع العالي يعني سرعة مياه عالية ، وعندها تكون عَنفة فرانسس في أعلى كفاءته بسبب دوران الشفرات بسرعة مقاربة لسرعة الماء التي هي سرعة عالية جداً وهذا يكون أحياناً غير مرغوب فيه . ويستخدم لهذا النوع من المحطات عَنفات تدعى العَنفات الدافعة (Impulsive Turbines).

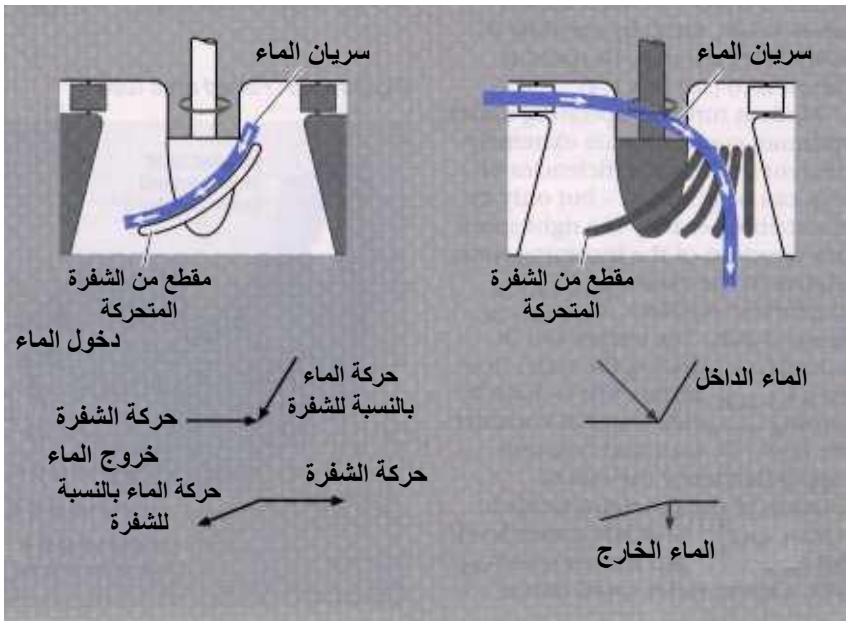
2-7-7 الدافع (Propellers) أوالعَنفة (التوربين) ذات الجريان المحوري

في العَنفة ذي الجريان المحوري والموضح في الشكل (7-11) تكون المساحة التي يدخل منها الماء أكبر ما يمكن ، وهي كل المساحة التي تغطي الشفرات . لذلك فإن العَنفة ذي الجريان المحوري ملائمة لكميات كبيرة من الماء ولارتفاع قليل جداً لا يتجاوز عدة أمتار . ولهذا النوع من العَنفة مزايا إيجابية عند مقارنته بالعَنفات ذات الجريان الدائري لأنه أبسط من الناحية التقنية في حالة تغير زاوية الشفرات وذلك عندما يتغير الطلب على القدرة وهذا تحسين للكفاءة عندما يتغير الحمل . وتدعى العَنفات ذات الجريان المحوري التي تمتلك هذه الخصائص عَنفات كابلن (Kaplan Turbines) .

ويمكن مقارنة الشكل (7-12) مع الشكل (7-10) لغرض توضيح جريان الماء بالنسبة للشفرات والجريان الحقيقي المطلوب لتحقيق ذلك . ففي حالة الجريان المحوري يكون اتجاه الجريان العام غير دائري ولكنه محوري ، وهو يعمل زاوية مناسبة مع المحور وليس على طوله. وكما في السابق فإن الماء الداخل يكون كالدوامة المستديرة ، ولكن الخاصية المهمة هنا هي أن سرعة الشفرات أكبر من سرعة الماء (بقدر ضعفها) ، وهذه تسمح بحركة دوران سريعة حتى لو كان الماء ذا سرعات قليلة . ونظراً إلى أن الأجزاء الخارجية من الشفرات تدور أسرع من الأجزاء المركزية وأن الماء المتحرك على شكل دوامة يكون أسرع قرب المركز ، فإن زاوية الشفرة تحتاج إلى زيادة من المسافة مع المحور ، ولهذا يكون للدافع (Propeller) الشكل الملتوي المألوف .



شكل (7-11): العَنفة (توربين) ذات الجريان المحوري



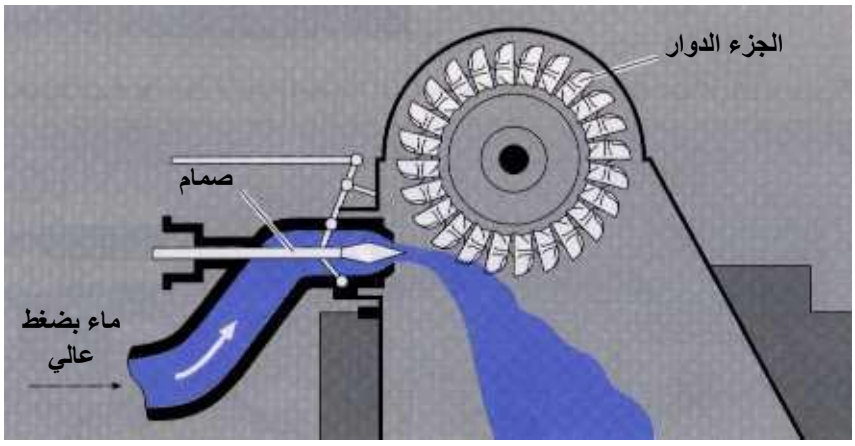
شكل (7-12): سريان الماء في العَنفة (التوربين)

3-7-7 العَنفات (التوربينات) ذات القوة الدافعة (Impulse Turbines)

أ - دولاب بلتن (Pelton Wheels)

إن دولاب بلتن هو المفضل للاستخدام في الارتفاعات العالية لمنسوب المياه والتي تزيد عن 250 متراً. هذا الدولاب اخترعه عام 1880 لستر بلتن ، وقد استخدم في نهاية القرن التاسع عشر في كاليفورنيا . وهو يختلف تماماً عن

الأنواع الأخرى التي نوقشت سابقاً . ويتكون هذا الدولاب بصورة أساسية من دولاب ومجموعة من الملاعق أو الأكواب المثبتة حول المحيط ، كما هو موضح بالشكل (7-13) ويسير بواسطة تيار الماء ذي السرعة العالية الذي يضرب الأكواب على التوالي . يمر الماء حول المنحنى ، وفي أفضل الحالات سيعطي معظم طاقته الحركية . وبما أن الطاقة تتوفر في متوالية من دفعات قصيرة في هذه العَنفة لذا أطلق عليها العَنفة ذي القوة الدافعة وخلافاً للعَنفة التي وصفناها سابقاً فإن أحد الفروق المهمة بين هاتين النوعين هي أن العَنفة السابقة تدور وهي مغمورة في الماء وبفرق ضغط خلال الجزء الدوار بينما تدور هذه العَنفات (ذي القوة الدافعة) بصورة رئيسية في الهواء تحت الضغط الجوي الاعتيادي .



شكل (7-13): هيكل دولاب بلتن

إن القدرة المتوفرة لتوربين بلتن يمكن معرفتها ، كما هو معتاد ، بواسطة الارتفاع وكمية الماء الجاري . فإذا كانت مساحة التدفق A بالمتر المربع فإن حجم التدفق المناسب (Q) للارتفاع (H) يمكن حسابه من المعادلة التالية :

$$\sqrt{H20}\ A = Q$$

وبما أن القوة الداخلة بالكيلووات تعادل QH10 (كما تم شرحها سابقاً) ، لذا فإنه بالتعويض في قيمة Q من المعادلة السابقة فإن القدرة P ستساوي :

$$\therefore P = \sqrt{H20}\ A\ H\ 10$$

$$\approx \sqrt{^3H}\ A\ 45 \quad \text{(كيلووات)}$$

فإذا كانت الأكواب المجاورة لا تتداخل مع تيار الجريان فإن قطر الدولاب يجب أن يكون عشرة أمثال قطر التدفق . ولكن دولاب بلتن لا يحتاج فقط إلى تدفق واحد إذ يمكن استخدام تدفقيْن أو أربعة تدفقات لتوليد قوة كبيرة من دون زيادة حجم العَنفة وسعرها . فلو افترضنا أن عدد التدفقات هو j فإن القوة الداخلة تصبح:

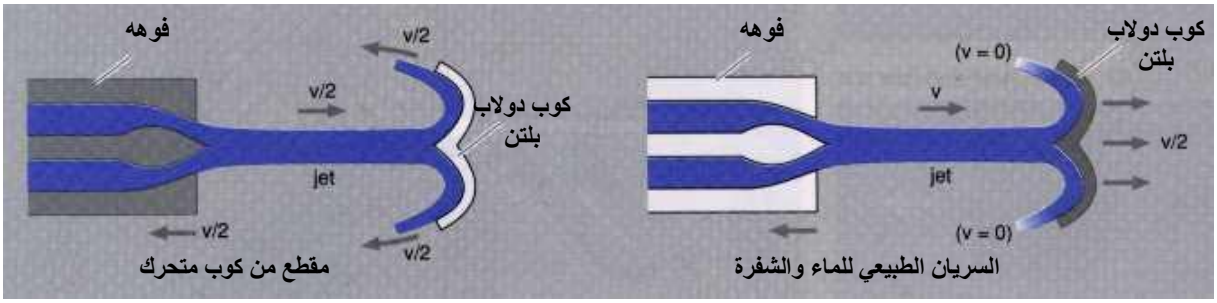
$$P \text{ (كيلووات)} = 45jA\sqrt{H^3}$$

$$= 45\ jA\ \sqrt{H^3}$$

وأعلى كفاءة لدولاب بلتن تكون عندما تكون سرعة الأكواب مساوية لنصف سرعة تدفق الماء كما هو مبين أدناه .

وعندما يقترب الماء من الأكواب بسرعة مقدارها V كما هو مبين بالشكل (7-14) ويبتعد الكوب بسرعة تعادل نصف هذه السرعة (V\2) فإن الماء يدخل الكوب ويغادره بسرعة V\2 بعكس الاتجاه .

وعند تحرك الكوب إلى الأمام بسرعة (V\2) تكون سرعة الماء الحقيقية صفراً ، أي أن الماء يعطي كل طاقته الحركية إلى الدولاب وتكون الكفاءة في هذه الحالة 100% . ومن الناحية العملية فإن هذه الحالة صحيحة تقريباً ، وأفضل سرعة كوب تكون أقل قليلاً من V\2 .



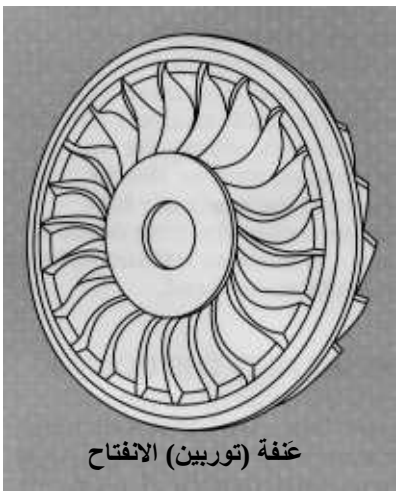
شكل (7-14): سريان الماء في دولاب بلتن

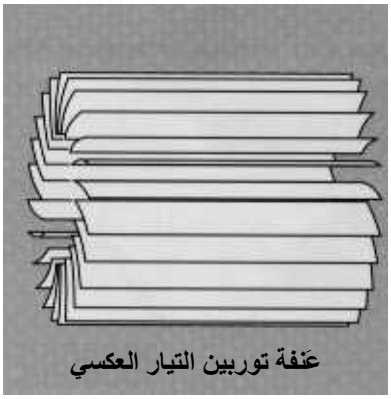
ب - عَنفات (توربينات) الانفتاح والتيار العكسي (Turgo and Cross-flow Turbine)

أحد العَنفات المختلفة عن دولاب بلتن هو عَنفة الانفتاح (Turgo Turbine) ، وقد تم تطويره عام 1920 . بأن تم تبديل الأكواب المزدوجة بكوب فردي قليل العمق

مع دخول الماء من اتجاه وخروجه من الاتجاه الآخر . ويدخل الماء كنافورة على الأكواب بالتعاقب . ويعتبر هذا التوربين توربيناً دافعاً، وهو يشبه عَنفة بلتن إذ أن أعلى كفاءة يصل إليها هي عندما تكون سرعته نصف سرعة الماء ، إلاَّ أن قابليته باستخدام كميات من الماء تكون أكبر من دولاب بلتن لنفس القطر ، وهذا يعطيه بعض المزايا لإمكانية توليد الطاقة في الارتفاعات المتوسطة .

إن عَنفة التيار العكسي – كما في الشكل (7-15) - هو نوع آخر من العَنفات الدافعة . ففيه يدخل الماء في صفيحة مستوية بدلاً من النافورة المدورة ويذهب إلى الشفرات ماراً خلال العَنفة ملاقياً الشفرات مرة أخرى عند المغادرة . ويستعمل هذا النوع من العَنفات، بدلاً من عَنفة فرانسس ، في المحطات الصغيرة التي تكون سعتها أقل من 100 كيلو واط وهنالك تفكير في تطوير أنواع بسيطة من هذه العَنفة لا تحتاج إلى معدات هندسية متقدمة لنصبها في المناطق النائية وفي الدول النامية .


عَنفة (توربين) الانفتاح


عَنفة توربين التيار العكسي

شكل (7-15): عَنفات (توربينات) الانفتاح والتيار العكسي

8-7 السرع النوعية ومديات التطبيق

تبعاً لما تمَّ توضيحه سابقاً فإن دواليب بلتن(Pelton Wheels) أكثر مناسبة للارتفاعات العالية من منسوب المياه . أما العَنفات الدافعة (Propellers) فإنها مناسبة للارتفاعات المنخفضة ، بينما عَنفات فرانسس تصلح للارتفاعات المتوسطة من منسوب المياه . ولكن الارتفاع المؤثر ليس هو العامل الوحيد في تحديد أفضلية العَنفة لمحطة معينة . فالقدرة المفيدة هي أيضاً ذات صلة بالموضوع .

والعامل الاعتيادي المستخدم في اختيار التوربينات هو السرعة النوعية (V_s) التي لها علاقة بالقدرة المنتجة (P_r) ، والارتفاع المؤثر (H) بالمتر ، ومعدل الدوران (n) (دورة بالدقيقة) وذلك كالآتي :

$$n \sqrt{\frac{P}{H^2 \sqrt{H}}} = V_X$$

هذه المعادلة يمكن استخدامها لاختيار أفضل نوع عَنفة (توربين) لاستخدام معين . ومن الموقع سيتم تقدير كيفية إيجاد الارتفاع المؤثر (H) والقدرة المفيدة (P) ، والقيم الممكنة لمعدل الدوران (n) محددة بمتطلبات وجوب دوران المولد المربوط إلى الشبكة بسرعة مناسبة لتوفير الذبذبة المتوافقة مع الذبذبة الرئيسية للمنظومة . وهذه المعلومات يمكن استخدامها لاحقاً لإيجاد القيم المفضلة (مديات من القيم) في N_s للموقع المقترح .

والمعلومات المبينة في الجدول (7-1) تستخدم لاختيار التوربين المناسب الموافق للسرعة النوعية N_s .

جدول (7-1) : السرعة النوعية لعَنفات (لتوربينات) مختلفة

نوع العَنفة (التوربين)	**مديات السرع النوعية**
عَنفة فرانسس (Francis)	70-500
العَنفة الدافعة (Propeller)	600-900
عَنفة كابلن (Kaplan)	350-1000
دولاب بلتن نافورة واحدة (Pelton)	10-35
دولاب بلتن بنافورتين (Pelton)	10-45
عَنفة الانفتاح (Turgo)	20-80
عَنفة التيار المعاكس (Cross-flow)	20-90

إن السرعة النوعية مشتقة من عدد من المتغيرات كالقدرة (P) والارتفاع المؤثر (H) وعدد الدورات ، ويمكن أيضاً أن تعتمد على معاملات معينة تفهم من العلاقة التالية:

$$N_S = 500 \left(\frac{r}{R}\right)\left(\frac{V_B}{V_w}\right) ،$$

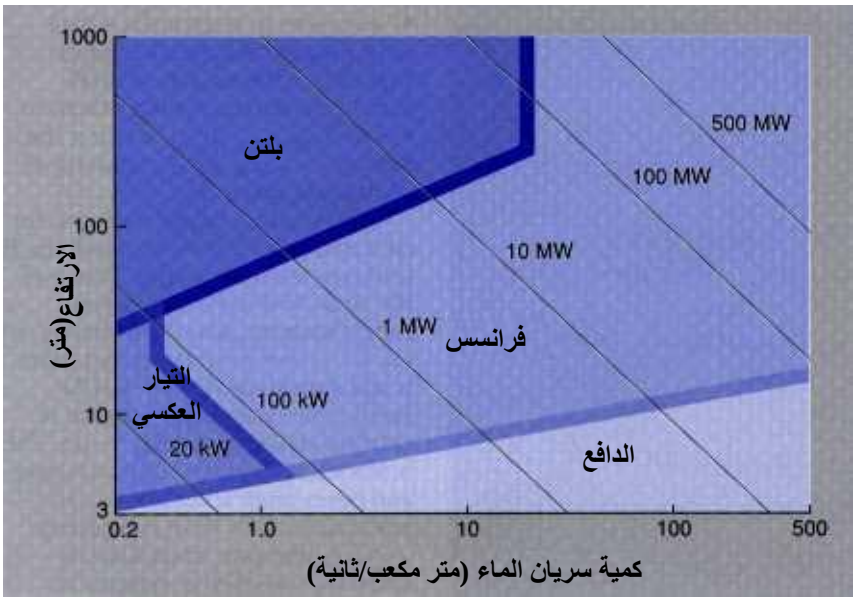
بمعنى آخر إن السرعة النسبية تعتمد على متغيرين :

الأول : هو النسبة بين قطر التيار المتدفق (d أو r) إلى قطر التوربين R أو D أي

$$\left(\frac{d}{D}\right) \text{ أو } \left(\frac{r}{R}\right)$$

الثاني : هو سرعة الشفرات V_B إلى سرعة الماء V_w أي $\left(\frac{V_B}{V_w}\right)$

وكما رأينا فإن هاتين النسبتين تعكسان أهم الفروق بين الأنواع المختلفة للتوربينات . ولكل نوع ، دون الالتفات إلى حجمه ، مديات من السرعة النسبية V_x كما في الشكل (16-7) والجدول (1-7).



شكل (16-7) : مديات السرعة لأنواع من التوربينات

9-7 محطات الطاقة المائية القليلة السعة

من الانعكاسات المثيرة في هذه الأيام هو أن المحطات ذات قدرة 50 ميغاواط والتي تنتج قدرة كافية لتغذية مدينة متوسطة الحجم تسمى بالمحطات الصغيرة . وهذه الحالة يمكن أن تؤخذ كمثال على اختلاف مدلولات المصطلحات في النقاش حول المحطات الصغيرة والأصغر والصغيرة جداً والتي تتراوح من عشرات الميغاواط إلى مئات الواط . وسنعتبر أن المحطات الصغيرة هي ذات السعة الأقل من 5 ميغاواط .

10-7 تطور الطاقة المائية في العالم

إن المحطات الصغيرة حالياً غير شائعة في دول أوروبا وأمريكا الشمالية . ولكن مع بداية اكتشاف الكهرباء نصبت مولدات بقدرة تتراوح بين عدة كيلووات إلى ميغاواط على الجداول والأنهار باستخدام السدود أحياناً ومواقع طواحين الهواء . وكثير من هذه المجمعات واصل إنتاج الطاقة طيلة نصف قرن أو أكثر ، إلى أن تمّ إنشاء الشبكة

الوطنية للكهرباء منذ بداية 1920 . وبسبب توفر وسائل الراحة ، والاعتماد الكبير على المحطات المركزية تمّ منذ أكثر من سبعين عاماً العزوف عن نصب المحطات الصغيرة المختلفة الفولتية والذبذبة بصورة تدريجية ، فالتطور التكنولوجي تركز على منظومات ذات سعة تعادل عدة ميغاواط . ويرجع الاهتمام الحالي بهذه المحطات الصغيرة إلى عدة أسباب هي :

أ - الاهتمام الاستراتيجي بتوفير الطاقة .

ب - القابلية المحدودة لبناء محطات كبيرة السعة في بعض الدول .

جـ - تقدم العلوم الإلكترونية الذي قلل من كلفة السيطرة على المحطات ومكن المحطات الصغيرة من توفير الفولتية والذبذبة المناسبتيْن للشبكة الرئيسية .

وفي الدول الصناعية فإن المواقع التي يتم التفكير في اختيارها تقع ضمن صنفين رئيسيين هما السدود وخزانات المياه . وبعض المواقع تعمل حالياً لإنتاج الطاقة ، ولكن يوجد فيها بعض الإمكانيات لنصب منظومات صغيرة إضافية مستخدمة الهياكل الإنشائية المتوفرة . وبالطبع فإن مثل هذه التحويرات مفيدة من الناحية الاقتصادية ومقبولة من الناحية البيئية مقارنة بإنشاء المحطات الجديدة الكاملة . فالصين هي أكثر الدول استخداماً للمحطات الصغيرة التي تقدر سعتها بحوالي مائة كيلوواط . وقد نصبت أكثر من مائة ألف منظومة من هذا النوع خلال السنوات الخمس والعشرين الماضية .

أما المحطات الكبيرة ذات السعة التي تزيد عن عدة مئات من الميغاواط فإنها ليست بالضرورة مناسبة للمناطق النامية في العالم . فالمحطات الصغيرة تمثل تكنولوجيا أفضل لحل مشاكل نقصان الطاقة في هذه المناطق . ومن مزايا هذه المحطات أنها لا تعتمد على نصب شبكات واسعة من خطوط نقل الطاقة ، وأنها مخصصة لخدمة منطقة صغيرة معينة ، وبهذا تحتاج إلى خدمات وعدد من الفنيين المختصين أقلّ .

ولقد أنشئت برامج لتطوير معدات محطات الطاقة المائية الصغيرة ونصبها وتصنيعها في أكثر من عشرين بلداً في العالم معظمهما في آسيا وأمريكا الجنوبيّة لتزويد المناطق النائية والمنعزلة بالطاقة الكهربائية .

11-7 الاعتبارات البيئية واستخدام مصادر الطاقة المائية

من أهم مزايا استخدام مصادر الطاقة المائية أنها لا تبعث غاز ثاني أكسيد الكربون إلى الجو ، وأن لها تأثيراً بسيطاً جداً على المحيط وهو زيادة التبخر المائي ، وبعض التأثيرات على درجة حرارة المنطقة . (لاحظ أن زيادة وجود الأعشاب المائية يزيد من انبعاث غاز الميثان ، لكنه لم يثبت إلى حد الآن أن نصب المحطات المائية يسبب انبعاث هذا الغاز) !! . كما أن هذا الاستخدام لا يسبّب أي تلوث بالضوضاء ، ولا يُعَدُّ سبباً لحدوث الانفجارات أو الحرائق أو انبعاث المواد السامة .

إن التأثيرات البيئية والاجتماعية المتعلقة بالمحطات المائية يمكن تلخيصها كالآتي :

- التأثيرات الهيدرولوجية : سريان الماء ، المياه الجوفية ، تجهيز المياه والري وغيرها.
- التأثيرات البيئيـــــــة : الأرض ، النباتات والحيوانات .
- التأثيرات الاجتماعية .

أولا : التأثيرات الهيدرولوجية

إن التأثيرات الهيدرولوجية ستكون مؤثرة بالطبع على البيئة وعلى المجتمع المحلي وخاصة في حالة نصب المحطات الكبيرة . فالمحطات تبدّل أوضاع مصادر المياه ، وتحويل جدول مائي جبلي إلى ماء يمر في أنبوب هو تحويل له تأثيرات ، ولو بسيطة ، على المنطقة .

كما أن خزن الماء في خزان ماء كبير يقلل كمية المياه الجارية بسبب التبخر العالي من الخزان . ومن أمثلة هذه التأثيرات أن أحد الخزانات قد أثر على توزيع المياه الجوفية في المناطق المجاورة . كما أن نضوب نهر كالورادو خلال مساره أدى إلى نقص الكميات المناسبة من المياه عند وصوله إلى بداية خليج كاليفورنيا مّما أحدث مشاكل بين بعض الولايات الأمريكية لعدة عقود.

ثانيا : تأثيرات السدود

إن أيّ مبانٍ كبيرة في أية منطقة لابد أن يكون لها تأثير على البيئة ، وذلك لأن عملية البناء تؤدي إلى حدوث معكرات واسعة . ومع أن عملية بناء السدّ تستغرق بضع سنوات فقط إلاّ أن تأثيراتها على البيئة تمتد إلى أكثر من ذلك . وحتى عندما تنتهي هذه التأثيرات فإن التغيير من بيئة مناسبة للزهور والمزروعات والحيوانات الأليفة إلى بيئة مناسبة للأسماك والقوارب سيكون مختلفاً.

كما أن هنالك تأثيرات أخرى كالتي أحدثها سد أسوان في مصر ، إذ أن الأراضي بعد إقامة السد لم تعد تحصل على التربة الجيدة والمواد الغنية الناتجة عن فيضان النهر . إن منظومة الري التي كانت مستخدمة منذ فترات طويلة والمعتمدة على هذه الظاهرة الطبيعية قد تم تعويضها بمنظومة تعتمد على الري الميكانيكي . كما أن استخدام الأسمدة أدى إلى تدهور تدريجي للتربة وإلى تلوث مياه النهر . وفي الوقت نفسه يتجمع الغرين خلف السد فيقل حجم التخزين المائي ويؤثر ذلك بالتالي على إمكانية التوليد .

والسدود نفسها هي موضوع يثير الاهتمام من ناحيتي التأثيرات المشاهدة وإمكانية حدوث كارثة بسبب خللٍ ما . فعندما نرجع إلى المعلومات عن حوادث السدود خلال العقود الماضية نجد أن تسلسل الحوادث المأساوية التي أدت إلى فقدان أرواح تحدث مرة في كل فترة تمتدّ من 6 إلى 10 سنوات . وإن المعدل الحالي هو كارثة واحدة لكل 000 120 سد بالسنة !! .

والسدود المنصوبة في مناطق يمكن أن تتعرض لهزات أرضية هي من المشاكل الواضحة ، ويجري نقاش منذ عدة سنوات حول ما إذا كانت هذه المحطات تزيد من حدوث الهزات الأرضية أم لا . لقد بنيت القياسات أنه عند ازدياد منسوب المياه في زمبابوي فإنهّا ترتفع خلف سد كاريبا (Kariba Dam) – المنجز عام 1960- مؤدية إلى حدوث تغيرات في مستوى الأرض حتى مسافة 36 كيلومتر من السد. وفي السنة التي وصلت فيها مياه السد إلى الارتفاع الاقصى حدثت سلسلة من الهزات الأرضية كان قسم منها كان بقوة 5 أو أكثر على مقاس ريختر.

وهذه الحالة ليست دائماً الحالة الطبيعية ويمكن ملاحظة الجدول (7-2) الذي يوضح حوادث مماثلة في بعض السدود .

جدول (2-5) السدود والحوادث الزلزالية

اســـــم الســـــد	البلـــد	ارتفاع السد (متر)	سعة الخزان بليون متر مكعب	الحوادث الزلزالية منذ التشيد
كلن كانيون (Glen Canyon)	أمريكا	220	33	لا يوجد
هوفر (Hoover)	أمريكا	220	38	وسط
كاريبا (Kariba)	زامبيا وزمبابوي	130	160	قوي
اوروفيل (Oroville)	أمريكا	240	4	خفيف
واراكامبا (Warragamba)	أستراليا	140	2	وسط

ثالثا : التأثيرات الاجتماعية

يعتبر الناس الذين يعيشون في وادٍ أصبح فيما بعد خزاناً لأحد السدود انهم خسروا بيت العائلة وكافة القرية . فالسد العالي في مصر تسبب في نقل 80,000 شخص إلى أماكن أخرى ، وسد كاريبا تسبب في نقل 60,000 شخص. كذلك فإن منظومة كوركيس للطاقة المائية المقترح إنشاؤها على نهر يانغزي (Yangzi River) ستساهم في غمر 100 مدينة وترحيل أكثر من مليون شخص . وعلى العكس يجب أن نتذكر بانه يمكن للناس الذين يعيشون على ضفاف نهر تفيض ضفتاه كل عام أن يوفر لهم سد المحطة الكهرومائية الاطمئنان بسبب وضع حد للتخريب الذي ينتجه الفيضان. ومن ناحية أخرى فإن التغيير معناه الحرمان من التنّزه على شواطئ النهر لبعض الناس وسرور للآخرين للتنعم بنشاطات مختلفة أخرى .

ويجب أن لا ننسى أنه لا يوجد فقط اختيار بين محطة كهرومائية أو لا شئ ، وإنما يوجد اختيار بين هذا النوع من المحطات ومحطة كهربائية أخرى من نوع آخر . وهنالك نقاش دائم وآراء مختلفة حول الخسائر والأرباح عند مقارنة الاختيارات .

12-7 الآفاق المستقبلية

إن الإنتاج العالمي الحالي من الطاقة يصل إلى 12000 TWh في العام، ويتولد من محطات ذات سعة مقدارها 2700 GW ، وتبلغ نسبة مساهمة الطاقة المائية فيها 22000

TWh ناتجة من سعة مقدارها GW 630 وهو ما يمثل أكثر من 18% من الإنتاج العالمي الكلي المولد من سعة تمثل 23% من سعة المحطات المنصوبة في العالم .

لقد ازداد استهلاك الطاقة الكهربائية في مجموع دول العالم بنسبة 40% خلال الثمانينات، وذلك بزيادة سنوية مقدارها 304% . ومن الملاحظات اللافتة للنظر أن الاستهلاك السنوي للدول النامية قد ارتفع إلى حوالي ضعف هذه النسبة .

13-7 المحطات التقليدية الكبيرة

توجد حالياً معظم إمكانيات تطوير محطات الطاقة المائية في المناطق الأقل تقدماً . وأن عدداً من المشاريع ذات السعة الكبيرة والتي أنجزت منذ وقت قليل أو هي تحت الإنشاء تقع في دول أمريكا الجنوبية وآسيا وإفريقيا.

هذه المحطات الكبيرة ، ستوفر بدون شك قدرة كهربائية كبيرة لمساحات من مختلف مناطق العالم . ففي معظم الدول النامية التي تعاني من مشاكل اقتصادية سيشكل إنشاء مثل هذه المحطات سيشكل عبئاً كبيراً عليها قد يصل إلى ربع أو أكثر من الاستثمارات الكلية في بعض البلدان . وفي بعض الدول يكون معامل الحمل دائماً قليلاً لأن منظومة التوزيع تفشل في مسايرة سعة المحطات، ولهذا فإن أحد البحوث التي أجريت حديثاً تدعو إلى التركيز على كفاءة الأنظمة القديمة وتحسينها بدلاً من التركيز بصورة منفردة على توسيع سعة المحطات. ولكن هذه الملاحظات لا تعني إيقاف تطور المحطات الكهرومائية أو التركيز فقط على تطوير منظومات نقل وتوزيع الطاقة الكهربائية .

إن المحطات الكهرومائية لا تزيد المشاكل البيئية التي يعاني منها عالم اليوم ، ولا تستهلك من مصادر طاقته التقليدية الناضبة، ولهذا فإن الاستغلال الأمثل لهذه المصادر سيكون أثره على الحياة واضحاً جداً . والمحطات الكهرومائية الكبيرة تحتل مساحة واسعة قد تساهم في التأثير على بعض المجتمعات المأهولة بالسكان ، وتسبب تغيراً غير مقبول في حياة الاجتماعية للبعض منهم ولكن أنصار إنشاء مثل هذه المحطات يعتقدون انها تساعد على تحسين البيئة التي تسيء إليها محطات توليد الطاقة الكهربائية الاعتيادية أو النووية .

أما بالنسبة إلى الدول الصناعية فإن امكانيه إنشاء محطات كبيرة فيها مستقبلاً محدوده جداً . فبعض هذه الدول لها مجال قليل من حيث المساحة أو لا يوجد لديها مجال كلياً لبناء مثل هذه المحطات ، وبعض الدول الأخرى كالولايات المتحدة وسويسرا والنرويج طاقتها المشيدة تكاد تقترب تماماً من الإمكانيات المتاحة . فالولايات المتحدة الأمريكية تبلغ السعة الحالية لمحطاتها أكثر من 72 جيغاوات ومن المحتمل أن تزداد لحوالي 20% خلال العقد القادم ، ولكن معظم هذه الزيادة سيحصل من تطوير المحطات الموجودة حالياً وتحسينها.

أما السعة الكلية الحالية للدول الأوروبية فهي تعادل 60 جيغاوات والزيادة المتوقعة لهذه الدول سوف لن تكون أكثر من 10% ومعظمها ينتج من تحسين المحطات الحالية .

14-7 المحطات الكهرومائية الصغيرة

إلى حّد الآن لم يتم تقدير السعة الكهربائية التي يمكن أن تنتجها المحطات الصغيرة في العالم بالرغم من أن هنالك دراسات في دول مختلفة حول هذا الموضوع ، ولكن يجوز القول أن المحطات الصغيرة يمكن أن تنتج طاقة تتراوح بين 10% و 25% من سعة المحطات الكبيرة . والإنتاجية الحالية تقدر بحوالي 25 جيغاوات (GW) . أما أغلب المحطات الموجودة فهي في الصين إذ يبلغ إنتاجها 10 جيغاوات .

ويوجد لأكثر من 70 بلداً من مختلف أنحاء العالم خطط لإنشاء محطات صغيرة . ففي فنصف إنتاج الصين ، ناتجاً من محطات صغيرة. أما بالنسبة لبقية أنحاء العالم فالنسبة هي 1% فقط .

هنالك سببان يحولان دون توسع استخدام المحطات الصغيرة ، الأول هو رغبة معظم الدول ومعظم شركات الكهرباء في بناء محطات كبيرة والثاني هو مسألة التمويل المادي .

إن مشكلة المحطات الكهرومائية تكمن في الكلفة الأولية اللازمة لنصبها أذ أن كلفتها أكبر بكثير من كلفة تشييد محطات الوقود التقليدي. إلاّ أنّه بامكانها أن تغطي نفقاتها (PayBack) بعد فترة، وتبقى بعد ذلك تعمل لفترة طويلة مجاناً .

ولضمان تقدم ملموس في نصب المحطات الصغيرة فإنه يتوجب القيام ببعض التغييرات منها :

أ - تقليل الكلفة بواسطة تطوير تكنولوجية هذه المحطات والتخفيض من كلفة منظوماتها.

ب - تغيير عناصر التمويل المادي أو تغيير بعض السياسات الحكومية للتمويل لتصبح بنسبة فائدة قليلة .

جـ - قيام الحكومات بتمويل إنشاء منظومات المحطات الصغيرة .

أسئلة تقويمية

1. كيف يتم استخلاص الطاقة من المصادر المائية ؟
2. ما هي النسبة المئوية لمساهمة الطاقة المائية في الاستهلاك العالمي للطاقة الكهربائية ؟
3. ما هي أنواع العَنفات المستخدمة حالياً في المحطات الكهرومائية ؟
4. ما الفرق بين محطات توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة المائية الكبيرة السعة والقليلة السعة ؟
5. ما هي الإمكانيات المستقبلية المتوفرة لاستغلال مصادر الطاقة المائية ؟
6. ما هي التأثيرات البيئية الناجمة عن استخدام السدود في المحطات المائية ؟

الفصل السادس

الطاقة من النفايات

1-6 النفايات الصلبة

- استخراج الوقود من النفايات
- تطوير غاز المطامر الصحية
- المخمر اللاهوائي للنفايات الصلبة
- النفايات الصناعية والتجارية

2-6 محاصيل الطاقة

- محاصيل الخشب
- إنتاج الكحول الإثيلي من قصب السكر
- الذرة الشائعة والذرة الصينية البيضاء
- زيت الخضراوات

3-6 الفوائد البيئية الناتجة عن استخدام مصادر الكتلة الحيوية

4-6 طاقة البناء الضوئي

1-6 النفايات الصلبة

في معظم مدن العالم تدفن أغلب النفايات المنزلية حالياً في مناطق خاصة . وإن قسماً قليلاً منها يتمّ حرقه في محارق مناسبة . إن وجود البلاستيك الملوث والمعادن والمواد السامة الأخرى في النفايات المدفونة يحدث مشكلة بيئية ، ولكن مواقع الردم والمحارق في معظم المدن تخضع لرقابة مشددة من قبل الجهات الصحية ، وهي مصممة بكيفيّة تجعل درجة انبعاث الروائح منها في المستوى المقبول . ففي الوقت الحالي ، ونظراً لازدياد كلفة الردم وقلة مساحاته ، يتوجب تقليل النفايات من خلال تدويرها أو معالجتها أو حرقها للحصول على طاقة .

لقد وضعت خطط على مستوى واسع لفصل القمامة وتدويرها أو تحويلها إلى سماد في معظم المدن الأوربية ، أما في المستقبل فإن نصف القمامة سيُحرق أو يُحّول إلى وقود سائل أو وقود غازي . إن استخلاص الطاقة من القمامة الصلبة هو خيار مشجع للمدن الكبيرة ، وذلك لقلة المساحات المخصصة للردم والكلفة العالية لنقل القمامة .

لقد جربت تكنولوجيا حرق النفايات الصلبة وفحصت في كل من أوروبا واليابان ، وكما جهزت شبكات واسعة لجمع القمامة ونقلها في معظم المدن الكبيرة لضمان تغذية مستمرة لمحارق الفضلات إذ يوجد حوالي 350 محرقة تعمل باستمرار في الوقت الحاضر في مختلف أنحاء العالم . أما في سويسرا واليابان فإن 8% من النفايات الصلبة تعامل بهذه الطريقة . وهنالك عدد من الدول الصناعية تعتبر حرق الفضلات إحدى الخطوات المهمة في إعادة الحرارة . كما أن الحرارة الناتجة عن الحرق تستخدم في التدفئة وتوليد الطاقة الكهربائية . أمَّا الرماد فيمكن أن يُستخدم في التشييد والبناء . وتتم مراقبة انبعاث الغبار ، والحوامض ، والمعادن ، والمواد العضوية من المحارق القديمة والحديثة مراقبة جيّدة في معظم مدن العالم الكبيرة .

إن حرق النفايات الصلبة في عدة مناطق بريطانية يستغل لغرض إنتاج طاقة حرارية لأبنية متعددة الطوابق وبعض الأبنية العامة بما في ذلك المخازن التي يمتلكها أناس عاديون .

1-1-6 استخراج الوقود من النفايات (Refuse-Derived Fuel,RDF)

توجد في الوقت الحاضر عدة معامل تدوير للمخلفات الصلبة وذلك بطريقة الفصل الميكانيكي للمواد غير القابلة للحرق مثل المعادن والزجاج ، ثم توجيه المواد العضوية المتبقية إلى منظومات إنتاج الوقود . إن عملية استخراج الوقود من النفايات هي أكثر سهولة من عمليات الفصل الميكانيكي المعقدة ، وفيها أيضاً يتم استخدام الرماد (Ash) كمادة تحرق مع الفحم لأغراض توليد الطاقة . ولقد أدّت القوانين والأنظمة الصارمة التي وضعتها بعض الدول الأوروبية بخصوص حرق النفايات إلى التقليل من استخدام هذه الطريقة .

2-1-6 تطوير غاز المطامر الصحية

يستخدم الغاز المتولد من المطامر الصحية للحرق في الأفران والمراجل لإنتاج بخار لغرض توليد الطاقة الكهربائية أو إنتاج ماء ساخن لأغراض التدفئة . ويوجد في مختلف أنحاء العالم حوالي 240 موقعاً وصلت سعتها إلى 440 في عام 1992 . وأحد المشاريع الكبيرة في العالم يولّد 46 MW . وإن كل طن من النفايات ينتج نظرياً في العام ما بين 300 و1500 متر مكعب من الغاز ذي محتوى طاقوي يعادل 5 GJ أو 6 GJ وذلك في موقع عمره عشر سنوات أو أكثر . وبسبب صعوبات استخلاص الغاز وإدارة الظروف تحت الأرض فإن كفاءة الإنتاج تتراوح بين 25% و 50% .

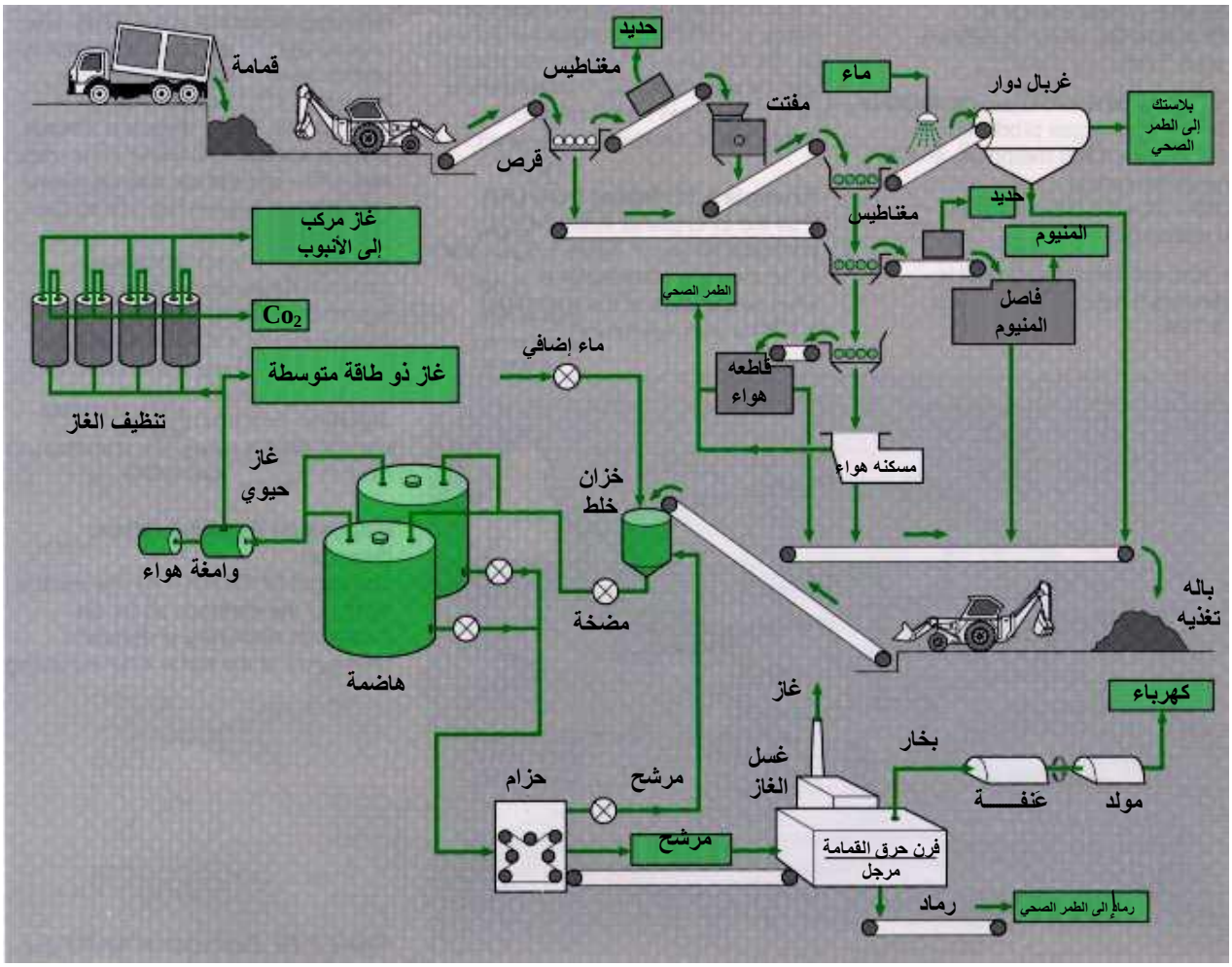
إن كلفة توليد الطاقة من غاز الطمر الصحي مشجعة جداً ، إذ أن إنتاج الطاقة من هذه المنظومات يتراوح بين 4 و6 سنت أمريكي للكيلووات – ساعة . وفي حالة إنتاج 150 متراً مكعباً من الغاز لكل طن من النفايات الصلبة فإنه يمكن توليد طاقة كهربائية مقدارها 5 TWh في السنة .

3-1-6 المخمر اللاهوائي للنفايات الصلبة

يمكننا استخدام طرق أخرى لإنتاج الغاز من المطامر الصحية إحداها إخضاع النفايات لعملية مسيطر عليها جيداً في مهاضم مصنعة . وفي هذه الظروف فإن الهضم يتمّ في أسابيع بدلاً من سنين . وتتم تغذية الهاضم بواسطة تخفيف النفايات الصلبة بسوائل المجاري . ومن حسنات هذه الهواضم مقارنة باستخدام مطامر النفايات ، هو إمكانية

نـصبها قـرب المنـاطق الـسكنية وبهـذا لا تحتـاج القمامـة إلـى أن تنقـل لمـسافات بعيـدة بالإضافة إلى أنها تكتفي بمساحة قليلة من الأرض .

لقد تم تطوير مثل هذه المنظومات في الولايات المتحدة . ويبين الشكل (6-1) المنظومة التـي تقـوم بتجميـع المـواد المفيـدة مـن النفايـات الـصلبة وإنتـاج غـاز الميثـان بواسـطة الهواضم وتوليد الطاقة الكهربائية بواسطة حرارة احتراق النفايات الصلبة .



شكل (6-1) : منظومة تقوم بتجميع المواد المفيدة من النفايات الصلبة وإنتاج غاز الميثان وتوليد الطاقة الكهربائية

4-1-6 النفايات الصناعية والتجارية

يتم جمع كميات ضخمة من النفايات الصناعية والتجارية في كل مدينة . وإن حوالي ثلثي هذه النفايات قابل للاحتراق ، كما أن قسماً كبيراً منها غير ملائم للجمع مع النفايات المنزلية لاختلاف نوعية المواد . فنفايات عمليات تصنيع الأغذية ، مثلاً ، يجب أن تعالج قبل طرحها كنفايات لتقليل تأثير المواد البيولوجية والكيميائية ، ويتم بعد ذلك

وضعها في هاضم لإنتاج طاقة حرارية . ومخلفات المستشفيات يحب حرقها لتجنب التلوث . كما أن كميات كبيرة من الإطارات المستعملة التي ترمى في النفايات يمكن حرقها وتحويلها إلى حرارة أيضاً .

2-6 محاصيل الطاقة

وهي محاصيل تزرع خصيصاً لإنتاج الطاقة ، وقد توجّه الاهتمام إليها في السنين الأخيرة . إن تقليل انبعاث ثاني أكسيد الكربون في الجو هو أحد الدواعي الرئيسية إلى استخدام مصادر الكتلة الحيوية ومصادر الطاقة المتجددة الأخرى بدلاً من الوقود التقليدي ، إلاّ أن لهذا الاستخدام في بعض الدول دواعي أخرى منها زيادة الإنتاج الزراعي وتقليل الاعتماد على النفط المستورد . والمحاصيل المفضل زراعتها تعتمد على توفر الظروف المحلية المؤهلة ومن ضمنها الخشب للحرق ، ونباتات لإنتاج الإيثانول ، ومحاصيل ذات النواة الغنيّة بالزيت . ويبين الجدول (6-1) كمية الإنتاج السنوي لبعض المحاصيل المستخدمة لهذا الغرض .

جدول (6-1) الإنتاج السنوي لمحاصيل مختلفة

المحصول	معدل الإنتاج طن/هكتار في العام	أفضل إنتاج طن/هكتار في العام
قصب السكر	35	90
الذرة	10	40
الحبوب	5	20
الرز	4	16
جذور قصب السكر	8	18
كاسافا (منيهوت)	8	35
خشب في المناطق الاعتيادية	10	20
خشب في المناطق الاستوائية	20	35

1-2-6 محاصيل الخشب

يبقى الخشب المصدر الرئيسي للطاقة في معظم بلدان آسيا وإفريقيا وبعض بلدان أمريكيا الجنوبية . إن الخشب أو (الفحم النباتي) هو الوقود الرئيسي المستخدم في بيوت معظم هذه البلدان ، ويستخدم بكميات كبيرة في الاستهلاك الصناعي . ففي البرازيل مثلاً تستخدم مصانع الفولاذ أكثر من مليوني طن من الفحم النباتي سنوياً . وإن مصادر الخشب مهمة جداً . فعند وجود صناعة قطع الخشب في الغابات تتوفر كميات كبيرة من

النفايات ، لكن استمرار هذه الصناعة قد يؤدّي إلى انقراض الغابات مستقبلاً ، والحل الأمثل لهذه المشكلة هو زراعة أشجار سريعة النمو . والطريقة القديمة المستخدمة منذ مئات السنين والتي يتم فيها قطع جذوع الأشجار وتركها تنمو مرة أخرى ، هي أيضاً إحدى الطرق التي تقوم بتجربتها كثير من الدول النامية .

ومن الأشجار السريعة النمو أشجار الحور والصفصاف . فعند زراعتها بكثافة 5000 إلى 20000 شجرة بالهكتار لمسافة مقدارها5X1 م و 1X2 م يمكن الحصول على إنتاج مقداره 10 أطنان للهكتار في السنة ولمدة تقارب الثلاثين عاماً .

لقد صرفت الحكومة السويدية حوالي 179 مليون دولار أمريكي خلال السنوات الخمس الماضية لتطوير صناعة الغابات وذلك لاستغلالها لإنتاج الطاقة من الكتلة الحيوية . وقد أوضحت دراسة حديثة أن المساهمة السنوية للوقود الحيوي ستزداد من 250 PJ حالياً إلى 700 PJ عام 2000 مع مساهمة من الوقود الذي ينتج من الغابات مقدارها 50% .

2-2-6 إنتاج الكحول الإيثلي (الإيثانول) من قصب السكر

إن إنتاج الإيثانول من قصب السكر أو الذرة هو الطريقة المستخدمة حالياً في مناطق عديدة من العالم . ففي البرازيل تم إنتاج أكثر من 100 بليون لتر منذ بداية البرنامج عام 1975 بالاعتماد على معامل السكر ، وقد تم بذلك توفير كميات ضخمة من الوقود المستورد . وهناك أكثر من أربعة ملايين سيارة تعمل في البرازيل بالايثانول الصافي، وتسعة ملايين سيارة أخرى تعمل بغازولين يحتوي على نسبة 20% من الايثانــول .

أما دولة زمبابوي الإفريقية فلها برنامج ناجح في هذا المجال وذلك بإنتاج 40 مليون لتر في السنة بالاعتماد على مؤسسة تقوم بتصنيع السكر ، والايثانول ، وثاني أكسيد الكربون ، وعلف للمواشي ، وتوليد الطاقة بالإضافة إلى تدوير المخلفات المتبقية لاستخدامها كسماد لحقول قصب السكر . كما توجد معامل صغيرة لتصنيع الايثانول في كينيا وملاوي .

إن انخفاض صناعة السكر في بلدان البحر الكاريبي ومناطق أخرى جاء نتيجة لاستخدام أنواع جديدة من قصب السكر ذات المحتوى العالي من الكتلة الحيوية والتي تعتبر من أفضل النباتات المنتجة مقارنة بقصب السكر العادي الذي ينتج من 30 إلى 40

طناً جافاً بالهكتار . فالقصب الجديد (قصب الطاقة) يمكن أن ينتج من 60 إلى 70 طناً جافاً بالهكتار . ومعظم هذه الكميات ناتجة عن زيادة محتوى الألياف بالرغم من أن كمية السكر المنتج يمكن أن تكون أقل ، ولكن الخسائر الناتجة عن هذا النقص تعوض بواسطة الطاقة الإضافية التي تكون على شكل مخلفات مفيدة . ومن الممكن اقتصاديا حرق البعض من القصب مباشرة دون استخراج السكر منه .

3-2-6 الذرة الاعتيادية والذرة الصينية البيضاء

تطور إنتاج الإيثانول المنتج من الذرة لخلطه مع الغازولين في الولايات المتحدة بشكل واسع . ففي عام 1990 تم إنتاج 3,4 بليون لتر بواسطة معامل تقطير في 22 ولاية. وهذه الكمية مافتئت تتزايد .

وتزرع الآن في البرازيل والولايات المتحدة أنواع مختلفة من الأعشاب الحلوة مثل الحبوب وأعشاب مشابهة لقصب السكر لتحويلها إلى كحول يستخدم كوقود .

4-2-6 زيت الخضراوات

يمكن استخراج النواة في عدة نباتات لسحقها وإنتاج كميات كبيرة من الزيت ، وهو من مركبات الهيدروكربون . وزيت الخضراوات له محتوى طاقوي يقدر بحوالي (37-9 GJ/ton) وهو مقارب للديزل (42 GJ/ton) ، وأعلى في هذه الحالة من الإيثانول (30 GJ/ton) . وهناك عدة زيوت يمكن حرقها مباشرة في مكائن الديزل إما نقية أو بعد خلطها مع وقود الديزل ، لكن الخليط الذي يحتوي على نسبة عالية من الزيت يمكن أن يسد منافذ ضخ الوقود ويتجمع على أجزاء أخرى من الماكنة . ويمكن تفادي هذه الظاهرة بخلط الزيت مع الايثانول أو الميثانول وخلط 30% من زيت الخضراوات مع الديزل وهو الأسلوب المستخدم حالياً . ويستخدم حالياً زيت جوز الهند في الشاحنات والحافلات في الفلبين . أما زيت النخيل فإنه يستخدم حالياً في البرازيل ، وأما زيت عباد الشمس فإنه الأكثر استخداماً في إفريقيا الجنوبية .

3-6 الفوائد البيئية الناتجة عن استخدام مصادر الكتلة الحيوية

لقد حظي التأثير البيئي الناتج عن استخدام طاقة الكتلة الحيوية باهتمام كبير على الرغم من أنّ حرق النفايات له تأثيرات بيئية أيضاً ، لكنّ الوقود المنتج من الكتلة الحيوية يبعث كمية من ثاني أكسيد الكربون تقل بنسبة 65% عن كمية الوقود التقليدي . كما أن النتائج المرجوة من توسيع إنتاج محاصيل الطاقة ستكون نتائج مبشرة .

وإن إحدى وسائل تقليل ارتفاع درجة حرارة الجو هي تثبيت كمية ثاني أكسيد الكربون بواسطة زراعة أشجار على مساحات واسعة . إن امتصاص أشجار الغابات لثاني أكسيد الكربون هو وسيلة مناسبة لتقليل الضرر البيئي ، ولكن إحلال وقود الكتلة الحيوية بدل الوقود التقليدي هو حل أفضل . وتعتمد كلفة تقليل ثاني أكسيد الكربون وإمكانيته بهذه الطريقة على كفاءة طاقة التحويل في تنمية وحرق مصادر الكتلة الحيوية ونوع الوقود الذي يتم إبداله . وإن الفحم هو أحد الموادّ المرشحه لهذا الغرض .

إن الوقود الحيوي هو أكثر نظافة بخصوص انبعاث غازات البيت الزجاجي كثاني أكسيد الكربون ، وانبعاث الغازات الحامضية كأكسيد الكبريت وأكسيد النيتروجين .

وتجنباً لحدوث الانفجارات الناتجة عن انبعاث غاز الميثان وانتشاره من المطامر الصحية فإن استخراج هذا الغاز وحرقه يوفّران منافع بيئية إضافية نتيجة لتحويل غاز الميثان إلى غاز أقل ضرراً منه وهو غاز ثاني أكسيد الكربون . وتجدر الإشارة إلى أن غاز الميثان له القدرة على حبس الحرارة أكثر من ثاني أكسيد الكربون بحوالي 25 مرة.

4-6 طاقة البناء الضوئي

تعتمد جميع الكائنات الحية على الغذاء الذي يتم صنعه في أوراق النباتات بواسطة عملية البناء الضوئي . ويستفيد النبات بحوالي 5% من الطاقة التي تصل إلى الأرض من الشمس في عملية البناء الضوئي . وهذا الجزء من الطاقة ، رغم أنه صغير نسبياً ، يعمل على إنتاج ما بين 150 و 200 بليون طن سنوياً من المادة العضوية الجافة .

لقد تمكن العلماء في نهاية القرن التاسع عشر من الوصول إلى معادلة البناء الضوئي وإثبات أن النبات الأخضر يحول الطاقة الشمسية إلى طاقة كيميائية تختزن في مركبات عضوية يصنعها النبات ، وأن السكر أهم هذه المركبات . والمعادلة هي التالي :

$$6CO_2 + 12H_2O \xrightarrow[\text{كلورفيل}]{\text{ضـــــوء}} C_6H_{12}O_6 + CO_2 + 6H_2O$$

وهذه المعادلــة في الواقع لاتصف التفاعلات الحقيقية للبناء الضوئي . فالمــواد السكرية (الغلوكوز) ($C_6H_{12}O_6$) لا تتألف من مزج ثاني أكسيد الكربون (CO_2) مع الماء بهذه البساطة ، لأن المزج يكّون حامض الكبريتيك (H_2CO_3) . لذا فإن المعادلة تبين المواد المستهلكة في العملية والمواد الناتجة منها دون التعرض للخطوات والمراحل المتتابعة والدقيقة فيها .

وتقدر كمية الكربون الداخلة في هذه العملية سنوياً بحوالي 200 بليون طن . ويأتي هذا الكربون من غاز ثاني أكسيد الكربون الذي لا تزيد نسبته في الجو عن 0.3% من مكونات الهواء الجوي .

ويمكن القول أنهّ لولا وجود عملية البناء الضوئي لما وجدت حياة على سطح الأرض. ويرجع ذلك إلى أن جميع الكائنات الحية تعتمد في الحصول على طاقتها اللازمة على النباتات الخضراء ذاتية التغذية ، إذ أن هذه الكائنات مُنتجة للطاقة الكيميائية .

أسئلة تقويمية

1. كيف يتم إنتاج الوقود من النفايات ؟
2. ما هي محاصيل الطاقة ؟ وكيف يتم استخلاص الوقود منها ؟
3. كيف يقوم النبات باستغلال الطاقة الشمسية للحصول على غذاء ؟
4. ما هي الجدوى الإقتصادية من إنتاج الوقود من النفايات ؟
5. هل تصلح تقنية استغلال النفايات في الوطن العربي ؟ وما مشاكل تطبيقاتها ؟
6. أي من النفايات يصلح لإنتاج الطاقة ؟ صنفها على حسب أهميتها ؟

الفصل الخامس

طاقة الكتلة الإحيائّية

1-5 مقدمـــــة

2-5 طاقة الكتلة الإحيائّية "الماضي والمستقبل"

3-5 استخدام الخشب كوقود

4-5 الكتلة الإحيائّية كوقود

5-5 استخلاص الطاقة

6-5 الحرق المباشر

7-5 عملية إنتاج الوقود الغازي

8-5 الانحلال الحراري

9-5 الوقود الصناعي

10-5 الهاضم الهوائي
- الغاز الحيوي
- غاز الطمر الصحي

11-5 التخمير

12-5 المخّلفات الزراعية
- مخّلفات الخشب
- نفايات المحاصيل
- النفايات الحيوانية

1-5 مقدمـــــــة

يطلـق مـصطلح الكتلـة الإحيائيـة (البيومـاس) علـى النفايـات العـضوية ، وهـي مخلفـات الإنسان ، والحيوان ، والنبات . وقد تكون صلبة كالقمامة ومخلفات الحيوانـات ومخلفـات الأشجار ، كما قد تكون سائلة كمياه المجاري ومخلفات بعض الصناعات .

ويعتبـر اسـتغلال الكتلـة الإحيائيـة ضـرورة حتميـة وذلـك لكونهـا ملوثـة للبيئـة ويجـب التخلص منها حفاظاً على الصحة العامة ، ويمكن تحويلها إلى طاقة أو تدوير بعض منها لاستخدامها مرة أخرى . وبالإضـافة إلـى مـا ورد أعـلاه يمكـن الاستفادة مـن المخلفـات العضوية قبل معالجتها النهائية . وإن من أهم الصناعات أو المواد التحويليـة التـي تنـتج عنـد معالجـة مـا تبقـى مـن الكتـل الحيويـة هـو السماد العضـوي (Fertilizer) الـذي يعتبـر عنصراً هاماً للتربة والنبات إذ يحتوي على الفسفور ، والنيتروجين ، والبوتاسيوم، وهـي عناصر غذائية ضرورية للنبات .

لقد استعملت هذه المخلفات في إنتاج الغاز الحيوي الذي يحتـوي علـى الميثـان والبروبـان اللذيْن يمكن استخدامهما فـي أغراض الإنـارة والطبخ والتدفئـة . وقد تم أيضاً الاستفادة من بعض المخلفات الزراعية التـي تحتـوي علـى نسبة عاليـة مـن الزيـوت إذ تمّ تحويلهـا إلى زيت يشبه زيت الديزل ويمكن استخدامه مباشرة في مكائن الاحتراق الداخلي بكفاءة عالية دون الحاجة إلى إحداث أي تغيير أو تعديل في هذه المحركات .

كمـا يمكـن أيضاً الاسـتفادة مـن بعـض المنتجـات النباتيـة بتحويلهـا إلـى كحـول إذ تتخمـر بعض المواد النشوية أو السكرية الموجودة بهذه النباتات أو المخلفات ، وبطريقـة خاصـة يتم تحولها إلى كحول اثيلي أو يمكن معالجة هذه المخلفات بطريقـة أخرى بحيث تعطـي خليطاً مـن غـازي الهيـدروجين وأول أكسيد الكربـون ، ويمكـن تحويـل هـذا الخليـط إلـى كحول آخر يسمّى الكحول المثيلي .

ولقد نشأت فكرة استخدام الكحول كوقود فـي محركـات السيارات فـي السبعينات فـي كل من البرازيل والولايات المتحدة الأمريكية ، وتم استعمال خليط من الغـازولين والكحـول الاثيلي النقـي كوقـود لإدارة محركـات السيارات ، وبلغـت نسبة الكحـول فـي هذا الخليـط نحـو 22% . وقـد أطلـق علـى هـذا الخلـيط اسـم "الغـازوهول" (Gasohol) ، وهـي كلمـة

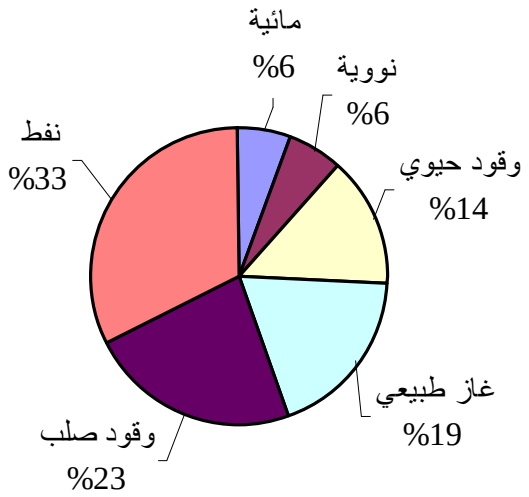
مشتقة من "غازولين" و "كحول" (Gasohol) . وعلى الرغم من ارتفاع سعر الكحول كثيراً مقارنة بسعر الغازولين بما قد يتجاوز الثلاثة أضعاف ، فإن له بعض الميزات الأخرى التي تؤهله للاستخدام في مكائن الاحتراق الداخلي . وإحدى هذه الميزات هي أن الرقم الاوكتيني للكحول أعلى من الرقم الاوكتيني للغازولين ، وهذه الخاصية تعوض النقص في قيمته الحرارية التي لا تزيد على تلثي القيمة الحرارية للغازولين .

2-5 طاقة الكتلة الإحْيائية "الماضي والمستقبل"

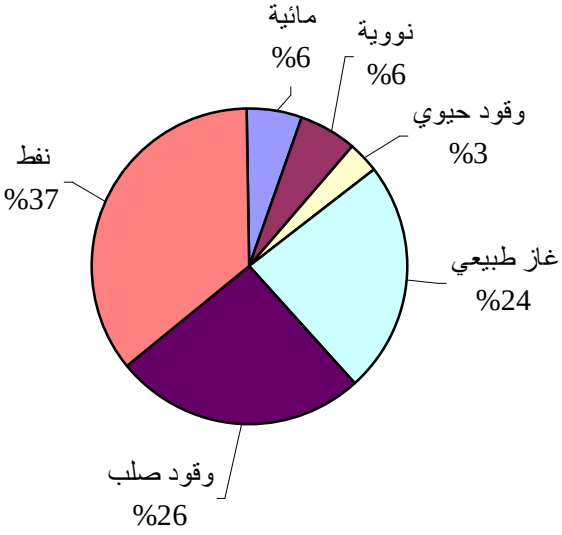
إلى حَدّ القرن السابع عشر كان الوقود الحيوي (Biofuels) – إضافة إلى الشمس - هو المصدر الرئيسي للطاقة الحرارية والإنارة . والوقود الحيوي هو أية مادة صلبة أو سائلة أو غازية متكونة من موادّ عضوية تكون إمّا مباشرة من نبات أو بصورة غير مباشرة من المخلفات الصناعية أو الزراعية أو المنزليّة .

ومن أهم تقنيات الوقود الحيوي إنتاج فحم الحطب (Charcoal) . وقد استمر استخدام هذا المصدر حتى تم تعويضه بالفحم الحجري في بداية النهضة الصناعية . وعلى الرغم من تعويض الخشب بأنواع أخرى من الوقود في الوقت الحاضر فإن الخشب يبقى الوقود الرئيسي لثلاثة أرباع سكان العالم ، وهم سكان القرى والأرياف في الدول النامية. وهناك دول مثل الحبشة والنيبال تستهلكا معظم طاقتها من الكتلة الحيوية . كما أن نسبة استهلاك مصادر الكتلة الحيوية الحالي في كل من كينيا والهند والبرازيل هي 75% و 50% و 25% على الترتيب . ويقدر استهلاك الكتلة الحيوية لكل شخص في الدول النامية بما بين نصف طن و طنين في العام من الخشب . ولمجموع الأربعة مليارات شخص في الدول النامية فإن الاستهلاك سيكون 3 جيغا طن من الكتلة الحيوية في السنة. ومع افتراض أن محتوى الطاقة هو 15 جيغا جول في الطن الواحد (1 جيغا جول = 10^9 جول) من الخشب فهذا يعني استنزاف طاقة سنوية تتراوح من 45 إلى 50 أكسا جول (EJ1 = 10^{12} جول) . وحتى في الدول المتقدمة فإن الاستهلاك محدود وكميته حوالي 1\3 طن في السنة لكل شخص وهذه تكون نسبة استهلاك مقدارها 3% من الطاقة الكلية المستهلكة . وفي دول مثل النمسا والسويد وسويسرا وأمريكا ستكون نسبة استخدام الخشب كوقود في ازدياد . وإن مجموع طاقة الكتلة الحيوية المستهلكة في الدول المتقدمة تعادل 8 أكساجول . وبناء على ذلك فإن الاستهلاك العالمي يربو على 55 أكساجول أو ما يعادل 14% من الاستهلاك العالمي الكلي للطاقة . ويبين الشكل (5-1)

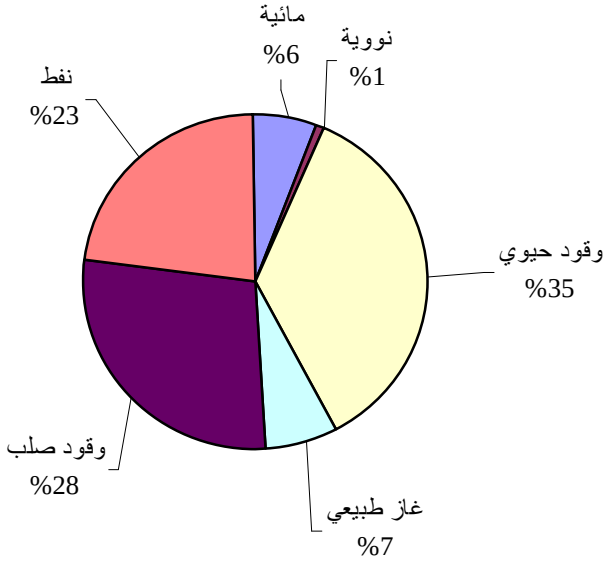
توزيع نسب استهلاك الطاقة الحيوية إلى مجموع استهلاك الطاقة العالمي وفي الدول المتقدمة والدول النامية .



شكل(5-1a): الاستهلاك العالمي: 400 EJ – الطاقة الكلية: 400 EJ/Y – طاقة الفرد: 80GJ/Y



شكل(5-1b): الدول الصناعية: الطاقة الكلية: 250 EJ/Y – طاقة الفرد: 210 GJ/Y



شكل(5-1c): الدول النامية: الطاقة الكلية: 140 EJ/Y – طاقة الفرد: 36GJ/Y

شكل (5-1): توزيع نسب استهلاك الطاقة الحيوية إلى مجموع استهلاك الطاقة العالمي والدول المتقدمة والدول النامية

3-5 استخدام الخشب كوقود

إن استخدام الخشب لإنتاج الطاقة ليس أمراً جديداً . فقد استخدم منذ آلاف السنين في التدفئة وطهو الطعام والإنارة، ولكن قلّ استخدامه بعد شيوع استخدام الفحم في القرن التاسع عشر، وقل استخدام الفحم بعد استخدام النفط في بداية القرن العشرين .

ويتكون الخشب من نوعين من المركبات هما السليلوز واللجنين . والسليلوز عبارة عن مادة كربوهيدراتية تتكون من جزيْئات كبيرة تتكرر فيها وحدات السكر ، وقد تصل هذه الوحدات في جزئي السليلوز إلى 3000 وحدة أو أكثر . أما اللجنين فيكون نحو 25% من وزن الخشب ، وهو يكون نسيجاً ضاماً يتخلل ألياف السليلوز ويربطها معاً .

لقد استخدم الخشب في كثير من الأغراض الأخرى . فقد استخدم في إنتاج الفحم النباتي المستعمل في اختزال الخامات عند تحضير بعض الفلزات ، كما استخدم الرماد الناتج من حرقه في تحضير بعض المحاليل القلوية وفي تحضير كربونات البوتاسيوم أيضاً .

لقد عرف الناس فائدة تقطير الخشب بعزله عن الهواء في نهاية القرن السابع عشر وحصلوا من هذه العملية ، إلى جانب الفحم النباتي ، على بعض الأبخرة التي تم تكثيفها بعد ذلك إلى سائل عرف باسم السائل الحمضي وإلى سائل آخر كثيف أطلق عليه اسم قطران الخشب .

وقام الكيميائي الألماني غلوبر (Glauber) عام 1658 بفصل حامض الخليك من هذا السائل الحمضي ، كما قام الكيميائي البريطاني بويل (Boyle) عام 1661 بفصل سائل طيار من السائل الحمضي أطلق عليه اسم روح الخشب (Spirit of Wood) وهو الذي أطلق عليه اسم الكحول المثيلي .

وتمكّن الكيميائيون في النصف الثاني من القرن التاسع عشر من فصل الأسيتون من السائل الحمضي ، كما قاموا بفصل كثير من المركبات العضوية الأخرى من سائل القطران مثل بعض الأحماض الدهنية وغير المشبعة ، وبعض المركبات الأروماتية (العطريّة) مثل الزايلين والكيومين والفينولات وهي جميعها مواد قابلة للاشتعال وتعطي قدراً من الحرارة عند احتراقها ، كما أن لكثير منها فوائد أخرى متعددة .

كان الاستعمال الرئيسي الشائع للخشب ، بالإضافة إلى كونه مصدراً للطاقة الحرارية، يهدف إلى الحصول على بعض هذه المركبات الناتجة من تقطيره بمعزل عن الهواء لاستخدامها في تحضير بعض العقاقير والأصباغ وغيرها من المواد النافعة . وإن استخدام الخشب كمصدر للطاقة لا يعني قطع الأشجار وتدمير الغابات ، إذ يمكن الاستفادة من الثروة الخشبية للغابات واستغلالها بطريقة منظمة وذلك بزراعة أنواع من الأشجار تتميز بسرعة نموها في مزارع خاصة وصفوف متقاربة للاستفادة من مساحة الأرض على أكمل وجه ، ثم تقطع هذه الأشجار بعد عدة سنوات عند اكتمال نموها وتترك جذورها وبراعمها سليمة لتنتج أشجاراً جديدة توفر مزيداً من الخشب لاستخدامه في دورة أخرى ، وهكذا .

وتوجد طرق عديدة لإنتاج الطاقة من الخشب منها الطريقة الحرارية ، وهي تتمثل في إحراق الخشب بطريقة مباشرة واستخدام الحرارة الناتجة أو تتضمن تسخين الخشب وتقطيره بمعزل عن الهواء واستخدام ما ينتج من غازات وأبخرة كمصدر للحرارة . والقيمة الحرارية للخشب عالية فهي تبلغ نحو 19800 كيلوجول لكل كيلوغرام من الخشب الجاف الخالي من الرطوبة ، وهي تقل إلى حّد ما عن القيمة الحرارية للفحم التي تبلغ 28000 كيلوجول لكل كيلوغرام من الفحم . ونظراً إلى احتواء الخشب عادة على قدر متغير من الرطوبة فإن القيمة الحرارية لأنواع الخشب العادية تقل عن ذلك بنسب مختلفة تتوقف على كمية الرطوبة الموجودة فيها . وهنالك طريقة كيميائية أخرى لاستخدام الخشب في إنتاج الطاقة، تتمثل في تعريض رقائق الخشب أو نشارته إلى بعض المواد الكيميائية تحت ضغط مرتفع وفي درجة حرارة عالية، وتعطي هذه الطريقة زيوتاً تقبل الاشتعال ويمكن استعمالها وقوداً سائلاً . وقد أقيم مصنع تجريبي لهذا الغرض في الولايات المتحدة استخدمت فيه هذه الطريقة لتحويل الخشب إلى زيت قابل للاشتعال ، وتبين من هذه التجارب أن كل 405 كيلوغرامات من رقائق الخشب تعطي برميلاً واحداً من الزيت ، وهي نسبة لا بأس بها .

ويمكن أيضاً تحويل الخشب إلى غاز وذلك لأنه يحتوي على قدر صغير من الرماد لا يزيد على 2% من وزنه ، كما أنه يحتوي على قدر ضئيل من الكبريت لا يزيد على 0.1% وبذلك لن تحتوي الغازات الناتجة منه إلاّ على قدر ضئيل جداً من مركبات الكبريت الضارة . كذلك فإن الخشب غير متغير التركيب أي إنه يتكون دائماً من نسب

ثابتة من كل من الكربون والهيدروجين والأوكسجين وبذلك يكون تركيب الغازات الناتجة منه ثابتة أيضاً إلى حد كبير .

4-5 الكتلة الأحيائية كوقود

توجد بعض المواد القابلة للاحتراق كالخشب والورق والقش والفحم والنفط والغاز الطبيعي ، ومواد أخرى غير قابلة للاشتعال كالرمل والملح والماء . فلماذا ؟ ما الذي يجعل مادة كالنفط مثلاً تحترق ومادة أخرى لا تحترق ؟ قبل البحث عن جواب يجب معرفة بعض الحقائق عن الاحتراق وهي :

- تحتاج عملية الاحتراق إلى هواء أو أوكسجين على وجه التحديد
- الوقود بعد الاحتراق يختفي أو يتغير بشكل كبير
- تنتج حرارة من الاحتراق

وعلى هذا الأساس فإن الوقود هو مادة تتفاعل مع الأوكسجين وتتغير كيميائياً وتحرر طاقة. ولدينا معلومات كافية عن مركبات منتجات الوقود الرئيسية ، ولهذا يمكن أن نسخر المكونات الناتجة من الاحتراق . فمثلاً غاز الميثان هو وقود حيوي ، وهو كذلك المركب الرئيسي للغاز الطبيعي ، ويتكون من الكربون والهيدروجين (CH_4) . وكل جزيئة تحتوي على ذرة كربون واحدة وأربع ذرات هيدروجين . وعند احتراقه مع غاز الأوكسجين (الذي يتكون من ذرتين من الأوكسجين (O_2)) فإنه يحرر طاقة وفق المعادلة التالية :

$$\mathbf{CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O + energy}$$

إن ترتيب ذرات الكربون C والهيدروجين H والأوكسجين O ، هو نوع من عملية التدرج في الطاقة . إن طاقة ثاني أكسيد الكربون والماء هي أقل بكثير من طاقة الوقود الأصلي (الميثان) والأوكسجين ، والفرق بين كمّيتيْ هاتين الطاقتين يتحرر على شكل حرارة . وتتماسك الجزيئات بشكل رئيسي نتيجة للقوى الكهربائية ، وعليه يمكن القول إن الاحتراق هو عملية تتحول فيها الطاقة الكهربائية المخزونة إلى حرارة .

وبالرغم من أن الاحتراق الذي ذكرناه سابقاً يمّثل حرق غاز الميثان إلاّ أنه يعبر عن كل الملامح الناتجة عن حرق أي غاز . فأيّ مركب يحتوي على الكربون والهيدروجين يتفاعل مع الأوكسجين الموجود في الهواء لينتج ثاني أكسيد الكربون والماء (يكون الماء

الناتج على شكل بخار ماء) فإذا علمنا الكتل النسبية للمكونات يمكن أن نحسب كمية ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء الناتجة من حرق كمية معينة من الوقود .

مثـــال:

إذا كان معدل ما يستخدم في مكان ما 60 جيغا جول في السنة لأغراض التدفئة وتسخين الماء ، وإذا كان الغاز المستعمل لهذا الغرض هو غاز الميثان وكفاءة منظومة الاحتراق تعادل 60% . فما هي كمية غاز ثاني أكسيد الكربون المنبعثة من الموقع في السنة ؟

الحـــلّ:

غاز الميثان (CH_4) يتكون من الكربون والهيدروجين وكتلة ذرة كل منهما هي 12 و 1 على التوالي ، وكتلة ذرة غاز الأوكسجين هي 16 .

$$\mathbf{CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O}$$

$$\mathbf{(12 + 4x1) + 2\ x(2\ x\ 16) \longrightarrow 12 + (2\ x\ 16) + 2x(2x1 + 16)}$$

وعليه يمكن أن نرى أنه بحرق 16 طناً من الميثان ينتج 44 طناً من غاز ثاني أكسيد الكربون. والمحتوى الحراري للغاز الطبيعي هو 55 جيغاجول بالطن ، وعليه فإن حرق 16 طناً من الغاز الطبيعي يحرر 880 جيغا جول من الحرارة ، وينتج 44 طناً من غاز ثاني أكسيد الكربون . لذلك فإننا نحصل على طن واحد من غاز ثاني أكسيد الكربون لكل 20 جيغا جول من الحرارة . وعندما تكون كفاءة المنظومة 60% فإن المنظومة تحتاج إلى وقود ينتج 100 جيغا جول لينتج 60 جيغا جول من الحرارة المفيدة ، لهذا فإن المكان يقوم بابتعاث 5 أطنان من ثاني أكسيد الكربون سنوياً .

إن النفط والفحم هما المصدران الآخران من مصادر الوقود ، ولكنهما أعقد من غاز الميثان وطريقة احتراقهما مشابهة لطريقة احتراقه . فالحرارة المتحّررة من طن واحد من الوقود أقلّ ، ولكن نسبة ذرات الكربون إلى الهيدروجين تكون أكثر ، ولهذا فإنهما يبعثان كمية أكبر من ثاني أكسيد الكربون بالنسبة لوحدة الحرارة المتحررة كما هو موضح بالجـــدول (5-1) . وهذان النوعان من الوقود تكونا نتيجة للتغييرات الجيولوجية عبر مئات الملايين من السنين على النباتات والحيوانات ، وهما متكونان من هيدروكربونات وبشكل رئيسي من كربون وهيدروجين .

الجدول (5-1) نسب الكربون والهيدروجين والأوكسجين في الوقود

الوقود	نسب الذرات			النسبة المئوية بالوزن			كمية ثاني أوكسيد الكربون المنبعثة بالنسبة لكل جيغاجول
	O	H	C	O	H	C	
الفحم	0.1	1	1	9%	6%	85%	120 كغ
النفط	0	2	1	0	15%	85%	75 كغ
الميثان	0	4	1	0	25%	75%	50 كغ
الخشب	0.7	1.5	1	45%	6%	49%	77 كغ

معظم الوقود الأحيائي ينتج من مصادر الكتلة الأحيائية التي تحتوي على أوكسجين . وإن جزيْئات المواد البيولوجية أكبر وأكثر تعقيداً من غاز الميثان ، ولكن يمكن تمثيل احتراقها بطريقة بسيطة . لنأخذ مثلاً الهايدوكربونات ، فنسبة مكوناتها هي جزيئان من الهيدروجين وجزيْئ من الأوكسجين لكل جزيْئة كربون ، لذلك فإن عملية الحرق ستكون كالتالي :

$$[CH_2O] + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O + energy$$

يبين الجدول (5-2) كمية الطاقة التي تحتوي عليها مصادر مختلفة للطاقة

الجدول (5-2) معدل محتوى الطاقة لأنواع مختلفة من الوقود البيولوجي

الوقـــــود	محتـــــوى الطاقـــــــة	
	جيغا جول لكل طن	جيغا جول لكل مترمكعب
الخشب (20% رطوبة)	15	10
الورق (صحف محلية)	17	9
المخلفات الحيوانية (روث)	16	4
القش	14	1.4
قصب السكر	14	10
مخلفات المجاري	9	1.5
النفط	42	34
الفحم	28	50
الغاز الطبيعي	55	0.04

5-5 استخلاص الطاقة (Extracting The Energy)

حتى يكون الوقود الأحيائي منافساً للوقود التقليدي ، فإنه يجب أن يكون مقارباً لسعره ، بالإضافة إلى ضرورة وفرته وسهولة نقله . وإن المصادر التقليدية كالنفط والغاز لها

قيمة عالية وذلك لإمكانية خزنها بتكلفة قليلة ، وهي متوفرة عند الحاجة إليها . وهذه المصادر، بالإضافة إلى الطاقة الكهربائية ، تعتبر من أنواع الطاقة التي تتميز بسهولة نقلها من مكان إلى آخر .

وتتوفر مصادر الكتلة الحيوية بأشكال مختلفة مثل الخشب ، والمخلفات الحيوانية ، ونشارة الخشب ، والقش ، والورق القديم ، والمخلفات المنزلية ، ومخّلفات المجاري . ومعظم هذه المصادر تتحّلل بسرعة ، وقسم منها له قابلية خزن جيدة . ولكون معظم هذه المصادر ذات كثافة وقليلة الطاقة فإن نقلها من مكان إلى آخر بعيد نسبياً يكون مكلفاً .

إن طرق استخلاص الطاقة حسب تعقيد عملية الاستخلاص هي كالتالي :

أ - الحرق المباشر كوقود الأفران أو إنتاج الفحم من الأشجار والأخشاب .

ب - الحرق بعد إجراء عمليات فيزيائية بسيطة تتضمن الفصل أو التكسير أو الضغط أو التجفيف .

جـ - العمليات الحرارية الكيميائية لتحسين كفاءة الوقود الأحيائي . وهذه العمليات تتضمن الانحلال الحراري والتسييل أو تحويلها إلى غاز .

د - العمليات البيولوجية ، وهي عمليات طبيعية مثل التخمير الهوائي والتخمر بمعزل عن الهواء وذلك بتأمين ظروف مناسبة تتيح إنتاج وقود غازي أو وقود سائل .

الناتج الأول من بعض هذه الطرق هو الحرارة . وتستخدم هذه الحرارة عادة في العمليات الكيميائية أو التدفئة أو لتوليد بخار لغرض تدوير التوربينات الكهربائية . أما الناتج الآخر من بعض الطرق المشار إليها أعلاه فهو وقود صلب أو سائل أو غازي مثل الفحم النباتي وغيره .

6-5 الحرق المباشر (Direct Combustion)

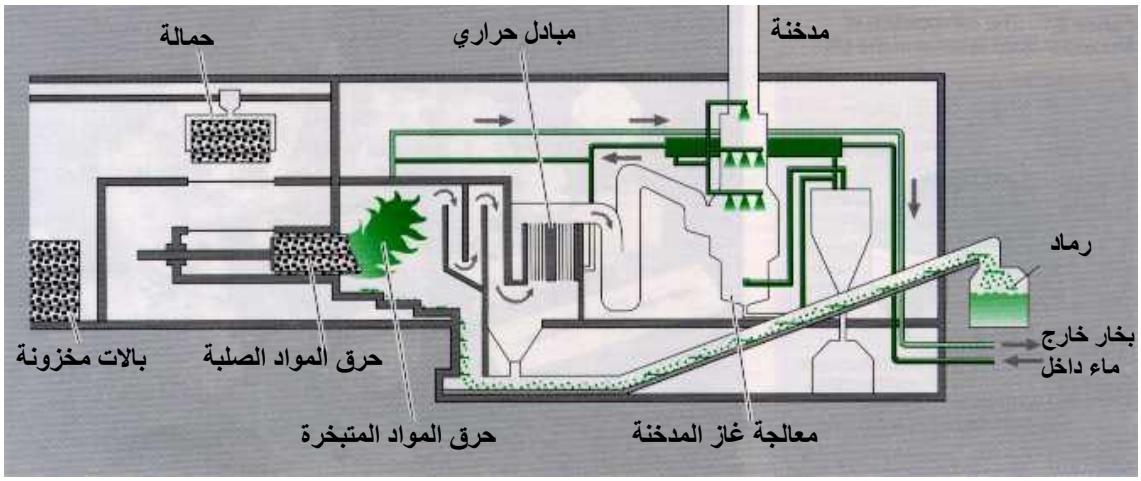
إن تبخير كمية من الماء موضوعة في قدر هي عملية بسيطة ، لكنها ، لسوء الحظ عملية غير كفأة إطلاقاً . ويبيّن الجدول (5-2) أنّ محتوى الطاقة في كل متر مكعب من الخشب المجفف بواسطة الهواء يساوي 10 جيغا جول (GJ) أو ما يعادل عشرة ملايين كيلو جول . ورفع درجة حرارة لتر من الماء بمقدار درجة مئوية واحدة يتطلب طاقة مقدارها 4.2KJ . إن تبخير لتر واحد من الماء يتطلب من الطاقة ما يعادل 400KJ أي

مـا يعـادل 40 سـنتمتراً مكعبـاً مـن الخـشب أو قطعـة صـغيرة منـه . ولكننـا فـي التطبيـق العملي نحتاج إلى كمية خشب أكثر بخمسين مرة من الكمية المذكورة أعلاه لتبخير هذه الكمية من الماء ، وذلك لأن كفاءة التحويل لا تزيد على 2% بسبب الضياع في الطاقة . ولتصميم فرن خاص كُفء يستهلك القليل من الوقود فإن ذلك يتطلب فهماً لعمليات احتراق الوقود الصلب .

إن عمليـة الاحتـراق تتكـون مـن مـرحلتين ، وذلـك لأن أي وقـود صـلب يحتـوي علـى مركبين قابلين للاحتراق . وعند ارتفاع درجة الحرارة تتطاير المادة وتتحرر على شكل خليط من بخار القطران والزيت . واحتراق هذا الخليط يكوّن لهباً يمكن رؤيته حول الخشب أو الفحم . أما الجزء الصلب المتبقي فإنه يتكون من خشب محروق يتركب من كربون ويحترق لينتج ثاني أكسيد الكربون وبعض البقايا كالقش (الرماد) .

ومن خصائص الوقود الأحيائي أن ثلاثة أرباع طاقته أو أكثر تكون على شكل مادة متطايرة (يختلف الفحم عن هذا ، إذ أن طاقة المادة المتطايرة فيه أقل من نصف الكمية). ولهذا فإنه من المهم عند تصميم أي فرن التأكد من أن هذه الغازات المتطايرة تحترق ، ولا تخرج من المدخنة دون احتراق . وللحصول على احتراق كامل يجب أن يصل الهواء إلى الخشب ، ويتم ذلك بتقسيمه إلى أجزاء صغيرة ، ويجب أيضاً السيطرة على الهواء عند استخدام كمية قليلة من الأوكسجين ، إذ أن الاحتراق عندما يكون كاملاً يولّد أول أكسيد الكربون ، الذي هو غاز سام . أما عند استخدام كمية كبيرة من الهواء فستكون هنالك خسائر وضياع في الطاقة لأن قسماً من الحرارة سيتبدد مع الغازات الخارجة .

والأنظمة الحديثة لمحارق الوقود الأحيائي تختلف باختلاف الوقود الأحيائي نفسه . وتتراوح المحارق من أفران صغيرة مصممة لترشيد الاستهلاك في دول العالم الثالث ، إلى مراجل بخارية كبيرة ذات سعة حرارية تقدر بالميغاواتات . ويوضح الشكل (5-2) منظومة احتراق كبيرة السعة .



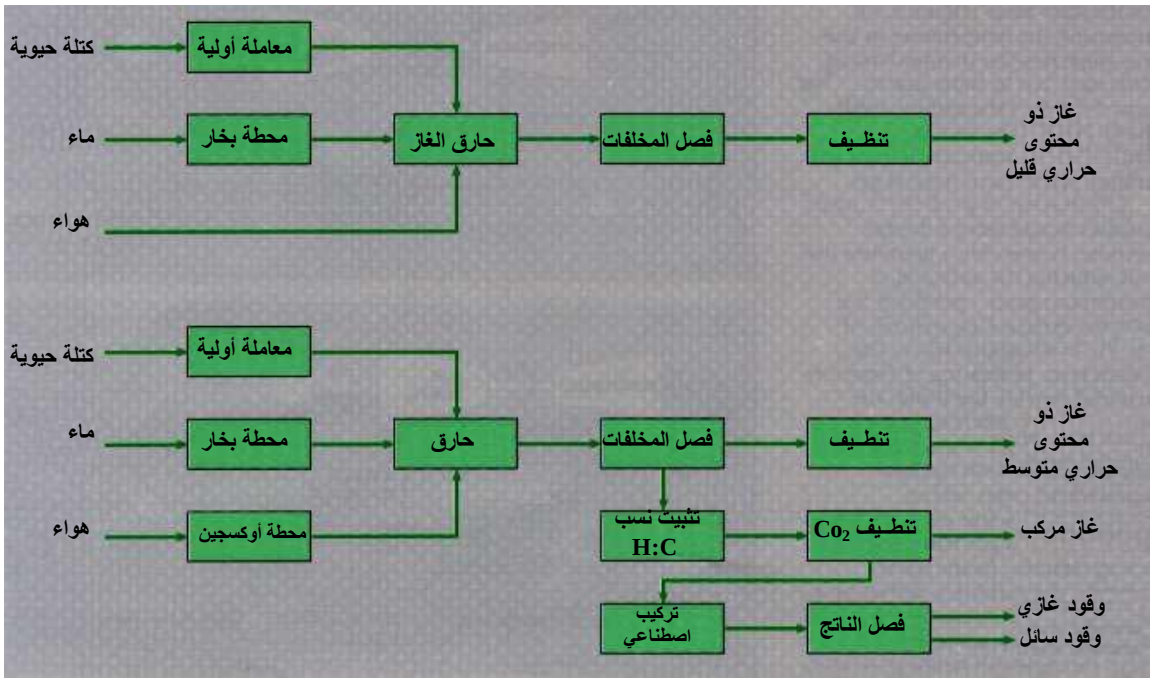
شكل (5-2): منظومة احتراق كبيرة الحجم

إن الحرق المباشر هو إحدى الطرق المستخدمة لاستخلاص الطاقة من النفايات المنزلية التي ليست هي الوقود المثالي ، إذ تتكون من مواد مختلفة ورطوبة عالية تصل إلى 20% أو أكثر أحياناً ، وكثافة طاقتها قليلة لدرجة أن المتر المكعب منها يحتوي على طاقة تعادل 30% من طاقة الفحم الحجري لنفس الحجم . ونقل هذا النوع من الوقود مكلف أيضاً ، وحرقه يتطلب منظومة خاصّة به .

إن تطوير أنظمة الحرق المباشر يحظى بعناية في مختلف دول العالم ، وخاصة الدول الأوربية . وأفضل طريقة مستخدمة الآن تدعى تجميع وقود القمامة المفيدة (Densified Refuse-derived, fuel) ، وتتضمن فصل الجزء القابل للاحتراق من القمامة وبعدها يتم سحقها وكبسها وتجفيفها لإنتاج وقود صلب يحتوي على كثافة طاقة تعادل حوالي 60% من طاقة الوقود .

7-5 عملية إنتاج الوقود الغازي (Gasification)

يتضمن إنتاج الوقود الغازي عدة عمليات يتم فيها تعرض الوقود الصلب إلى بخار حار وهواء أو أوكسجين لإنتاج وقود غازي . ويوضح الشكل (5-3) مثل هذه العملية . وتوجد عدة أنواع من هذه المنظومات وبدرجة حرارة تشغيل تتراوح من عدة مئات من الدرجات المئوية إلى ألف درجة مئوية ، وضغوط تتراوح من ضغط جوي واحد إلى غاية 30 ضغط جوي . والغاز الناتج هو خليط مكوناته الرئيسية أول أكسيد الكربون ، والهيدروجين، والميثان بالإضافة إلى وجود ثاني أكسيد الكربون والنيتروجين وبنسب تعتمد على ظروف العملية وفيما إذا استخدم فيها الهواء أو الأكسجين .



شكل (5-3): عمليات إنتاج الوقود الغازي

وعملية إنتاج الوقود الغازي ليست جديدة . فعملية تحويل الفحم الحجري إلى وقود غازي كانت مستخدمة بصورة واسعة لعدة عقود قبل إبدالها بالغاز الطبيعي . وهنالك أسباب عديدة لعودة الاهتمام بهذا الموضوع الآن ، منها أن الوقود المنتج أكثر نظافة من حرق القمامة أو مواد الكتلة الحيوية الأخرى . كذلك يمكن خلال هذه العملية فصل المواد الكيميائية الملوثة للبيئة والمواد الأخرى التي تسبب الدخان عند احتراق الوقود ، بالإضافة إلى أن الغاز هو وقود متعدد الاستخدام ، وأحد الاستخدامات هو الحرق المباشر . ويمكن كذلك استخدام الغاز في محركات الاحتراق الداخلي أو توربينات الغاز . وأخيراً فإن عملية إنتاج الوقود تحت ظروف مناسبة يمكن أن تنتج الغاز المركب الخليط من أول أكسيد الكربون والهيدروجين والذي يمكن استخدامه كبديل لإنتاج أي من الهيدروكربونات .

8-5 الانحلال الحراري (Pyrolysis)

إن عملية الانحلال الحراري هي أسهل وأقدم طريقة تستخدم وقوداً معّيناً لإنتاج وقود يفوقه جودة . والطريقة التقليدية تتضمن تسخين المادة الأصلية دون وجود الهواء وتحت درجة حرارة تتراوح من $300\ ^0C$ إلى $500\ ^0C$ حتى يتم طرد المادة المتطايرة .

وستكون بقية المادة فحماً نباتيّاً وهو وقود له ضعف كثافة طاقة (وات/م^2) من المادة الأصلية ، ويحترق في درجات حرارة عالية .

وكان إنتاج الفحم النباتي ، خلال عدّة قرون ، يتمّ في كافة أنحاء العالم من الانحلال الحراري للخشب . واعتماداً على نسبة الرطوبة وكفاءة عملية الانحلال فإنه يتم استخدام من 4 إلى 10 أطنان من الخشب للحصول على طن من الفحم النباتي .

وعند استخدام التقنيات المتقدمة يتم جمع المواد المتطايرة ، وفي حالة اختيار درجة حرارة مناسبة تتم السيطرة على المكونات . وإن الوقود السائل يشبه النفط ، لكنه ملوث بحوامض ينبغي التخلص منها قبل الاستعمال .

إن الانحلال الحراري لمواد نباتية ، كالخشب في درجات تتراوح بين 800 و 900 درجة مئوية يترك نسبة قليلة تقدر بحوالي 10% من المادة كفحم صلب وحوالي 60% كغاز غني بالهيدروجين وأول أكسيد الكربون . وهذه تعطي قوة لعملية الانحلال وتجعلها منافسة لطرق إنتاج الغاز ، لكن يجب أن يتم تطوير هذه العلمية لإنتاج وقود على النطاق التجاري .

وتعتبر عملية الانحلال الحراري التقليدية مرغوبة تكنولوجياً . ودرجات الحرارة القليلة نسبياً تعني أن هناك قليلاً من الملوثات التي تنبعث عند الاحتراق الكامل ، وهذا يعطي هذه العملية مزايا إيجابية بيئية عند تعاملها مع فضلات معينة . وتجري الآن محاولات عديدة للتعامل مع الفضلات البلاستيكية وإطارات السيارات القديمة ، لكنها لا تزال قيد التطوير .

9-5 الوقود الصناعي (Artificial Fuel)

عند استخدام الأوكسجين ، بدل الهواء ، في تحويل الوقود إلى غاز فإن الناتج سيكون الهيدروجين (H_2) و أول أكسيد الكربون (CO) وثاني أكسيد الكربون (CO_2) . والإمكانية المثيرة هنا هي عند فصل ثاني أكسيد الكربون عن الخليط ليكون المتبقي غازاً يدعى "الغاز الصناعي" . وعند تفاعل مكونات هذا الغاز يمكن إنتاج غاز الميثان النقي (CH_4) كالتالي :

$$CO + H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2$$

ومن الممكن أيضاً إنتاج الميثانول (CH_3OH) ، وهو هيدروكربون سائل ذو كفاءة طاقة مقدارها23 جيغا جول للطن الواحد . وإنتاج الميثانول بهذه الطريقة يتطلب سلسلة من عمليات كيميائية معقدة بدرجات حرارة وضغط عاليين ومعدات عالية الكلفة . وقد يخطر تساؤل هو : لماذا يتم الاهتمام بهذا المنتج بهذه الطريقة ؟ والجواب هو أن الميثانول وقود سائل ممتاز كبديل للغازولين . ففي الوقت الحاضر يعتبر إنتاج الميثانول باستخدام الغاز الصناعي من الكتلة الحيوية غير مقبول من الناحية التجارية لكن التكنولوجيا اللازمة له موجودة ، وقد طورت لاستخدام الفحم الحجري في بعض الدول الصناعية الغنية بالفحم في الأوقات التي يكون فيها تزويد النفط مهدداً بالخطر .

10-5 الهاضم اللاهوائي (Anirobic Digester)

وهذه العملية تتم أيضاً بدون وجود الهواء . وفيها يتم التحليل هنا بواسطة البكتريا بدلاً من درجات الحرارة العالية التي تستخدم في طريقة الانحلال الحراري . وهذه العملية تحدث في أية مادة بيولوجية وتحت ظروف حارة ورطبة وبدون وجود الهواء ، وتتم بشكل طبيعي عند تحلل الفضلات النباتية في قعر الحوض فتنتج غاز الميثان (Methane Gas) الذي يصعد إلى السطح ويجمع من هنالك . والتخمر اللاهوائي (Anirrobic Fermentation) يحدث أيضاً باستخدام المخلفات الحيوانية والبشرية وباستخدام طريقتين: إحداهما طريقة الغاز الحيوي (Biogas) الذي يتولد من تركيز الفضلات البشرية والحيوانية ، والأخرى طريقة غاز الردم أو الطمر الصحي (Landfill gas) الذي يتولد في مواقع طمر النفايات . وفي كلتا الحالتين يكون الغاز المتكون عبارة عن خليط من غاز الميثان وأول أكسيد الكربون .

إن التفاصيل الكيميائية لإنتاج الغاز الأحيائي وغاز الطمر الصحي معقدة ، لكن يبدو أن خلط مستعمرات من البكتريا يفكك المادة العضوية إلى سكر ومن ثم إلى حوامض تتحلل وتتحول إلى غاز .

1-10-5 الغاز الأحيائي (Bio Gas)

تدفع الفضلات والقش ، وهي المواد المستخدمة في هذه العملية ، إلى الهاضم (Digester) الذي يحتوي على 95% من حجمه ماء . ويتراوح حجم الهواضم من متر

مكعب واحد (كالهاضم المنزلي) إلى عشرة أضعاف هذا الحجم (كالهاضم الريفي) كما في الشكل (5-4) ، وقد يصل حجم الهاضم إلى 2000 متر مكعب كما في حالة المنظومات التجارية . وتكون تغذية المواد إلى الهاضم إما مستمرة أو على شكل دفعات. وتستغرق عملية التخمير من عشرة أيام إلى عدة أسابيع . وتولّد عملية الهضم حرارة ، ولكن عند نصب هذه المنظومات في المناطق الباردة فمن المطلوب إضافة حرارة لأن الحرارة المثالية المطلوبة لتوليد الغاز الحيوي هي أكثر من $35C^0$.

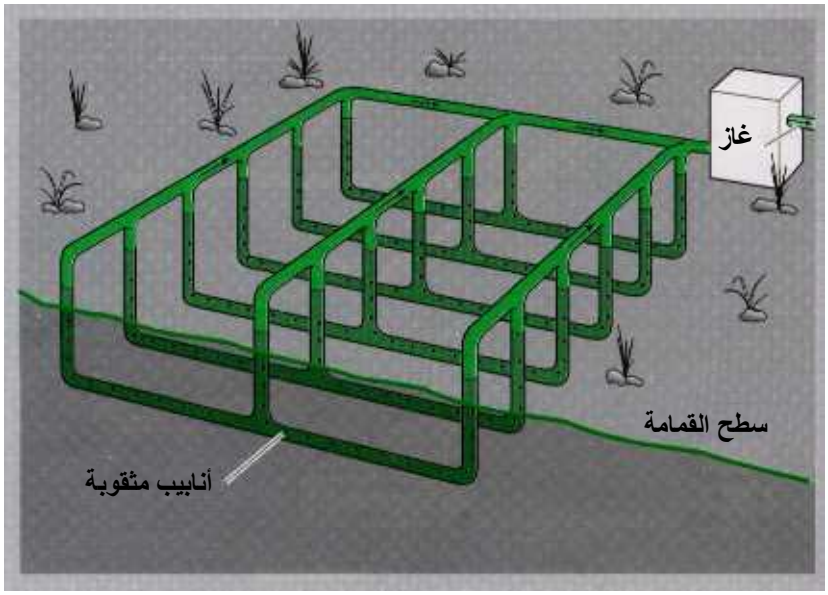
والهاضم الذي يعمل بصورة جيدة ينتج من 200 إلى 400 متر مكعب من الغاز الذي يحتوي على نسبة من 50% إلى 75% من الميثان لكل طن جاف من المادة المستخدمة أو ما يعادل 11 جيغا جول (GJ) من الطاقة المفيدة . وتعتبر عملية إنتاج الغاز بهذه الطريقة مفيدة حتى في الحالات التي تكون فيها كفاءة التحويل قليلة وذلك نظراً إلى أن الإنتاج هو غاز نظيف والناتج العرضي الذي تكّون من العملية سيكون سماداً مفيداً .

شكل (5-4): هاضم ريفي

2-10-5 غاز الطمر الصحي (Bypass Product)

إن جزءاً كبيراً من مواد القمامة هي مواد بيولوجية يتم رميها غالباً في مناطق طمر منعزلة . وهذه القمامة (Vertices) تكون مناسبة للتخمر اللاهوائي ، وينبعث منها غاز الميثان . وعملية التخمير في هذه المواقع تكون أبطأ ، وربما تستغرق أعواماً بدلاً من أسابيع ، وذلك لعدم توفر ظروف مناسبة كالحرارة والرطوبة . والناتج النهائي هو غاز خليط من غازي الميثان وثاني أكسيد الكربون . ويتراوح إنتاج هذه الهاضمات نظرياً

من حوالي 150 إلى 300 متر مكعب من الغاز مقابل طن من الفضلات ، وتكون نسبة غاز الميثان فيها متراوحةً من 50% إلى 60% ، وبهذا يتم الحصول على طاقة تعادل من 5 إلى 6 جيغا جول لكل طن من القمامة . وعند التطبيقات العملية يكون الإنتاج أقل بكثير من هذه الكمية . وإذا ما توفرت بعض الظروف الطبيعية كتغطية المساحة بعد ملئها بالطين أو مواد مشابهة فإنه يمكن جمع الغاز المتكون بواسطة أنابيب مثقوبة ومدفونة مع الفضلات على عمق حوالي 20 متر ومربوطة من نهايتها بأنبوب يصل إلى خزان كما في الشكل (5-5) . وفي الغالب يتم نصب شبكة الأنابيب في الموقع قبل طمرها بالنفايات .



شكل (5-5): استخلاص الغاز من الطمر الصحي

11-5 التخمير (Fermentation)

عرفنا كيف يتم إنتاج الكحول (الميثانول) من الكتلة الحيوية عبر سلسلة معقدة من العمليات الكيميائية وذلك عند حديثنا عن استخدام الغاز الصناعي . وتوجد عدة طرق يمكن استخدامها لإنتاج الكحول من الكتلة الحيوية كما يعرفها تجار الخمور ومنتجوها .

إن التخمير عملية بيولوجية لاهوائية يتم فيها تحويل السكر إلى كحول بفعل كائنات حية صغيرة كالموجودة في الخميرة . والكحول الناتج هو ايثانول (C_2 H5 OH) بدلاً من الميثانول ، ولكن يمكن استخدامه في مكائن الاحتراق الداخلي إما مباشرة في مكائن مناسبة محسنة على شكل خليط من الغازوهول الذي يتكون من غازولين يحتوي على 20% من الإيثانول .

و قيمة أي مادة صالحة من مواد الكتلة الحيوية تعتمد على كمية ما تحتوي عليه من السكر. وأفضل مصدر للإيثانيول هو قصب السكر أو الدبس . والمواد الأخرى التي تحتوي على النشويات ، مثل البطاطا والذرة والحبوب الأخرى ، ينبغي تحويل النشا فيها إلى سكر. وحتى الخشب يمكن أن يكون مادة صالحة لكن الكاربوهيدرات والسليلوز التي يحتوي عليها مقاومة للتحول إلى سكر بواسطة الحوامض والأنزيمات .

والسائل الناتج من التخمير يحتوي على 10% من الايثانول الذي يجب أن يقطر قبل استخدامه كوقود . والمحتوى الطاقوي في المنتج النهائي حوالي 30 GJ\ton أو 24 $GJ\m^3$. والعملية الكاملة تحتاج إلى كمية كبيرة من الحرارة التي تجهز عادة من مخلفات النباتات . والجدول (5-3) يبين كميات الإيثانول التي يمكن إنتاجها من طن من المواد الأولية أو لكل هكتار من الأرض لمنتجات مختلفة . والطاقة اللازمة لعملية التخمير يمكن تعويض خسارتها بسبب سهولة خزن الوقود السائل ونقله ورخص عملية التخمير بهذه التقنية .

جدول (5-3) : كميات الإيثانول الممكن إنتاجها من بعض المواد الزراعية

المادة الأولية	لتر لكلّ طن	لتر لكلّ هكتار
قصب السكر	70	400-12000
الذرة	360	250-2000
جذور المنيهوت	180	500-4000
بطاطا حلوة	120	1000-4500
خشب	160	160-4000

5-12 المخلفات الزراعية

توفر مخلفات المحاصيل والحيوانات ، في عدّة دول كميات كبيرة من الطاقة ، ويأتي ترتيبها مباشرة بعد الخشب الذي يعتبر المصدر الرئيسي من مصادر الكتلة الحيوية المستخدمة لإنتاج الطاقة . وقد بلغ مقدار استغلال فضلات القش والمحاصيل في الهند عام 1985 : 110 ميغا طن ، بينما كانت كمية الخشب المستغلة 133 ميغا طن . أما في الصين فإن وزن المخلفات النباتية كان أكبر بمرتين ونصف من كمية الخشب المستخدم.

5-11-1 مخلفات الخشب

توفر عمليات تقليم الأشجار وقطع الأغصان اليابسة كميات كبيرة من مخلفات الغابات، وبَدَل أنْ تهمل هذه المخلفات حتى في الدول التي تستورد الطاقة فإنّه يمكن جمعها وتجفيفها واستخدامها وقوداً في المناطق القروية .

ويمكن لمناطق الدول النامية ، التي تستخدم الفحم النباتي كوقود ، أن تنتج هذا الفحم على عين المكان دون حاجة إلى دفع مصاريف نقل . ولقد تم تطوير معدات ميكانيكية في أوروبا وأمريكيا خلال السنوات الماضية لإنتاج قطع صغيرة من الخشب يمكن حملها وتجفيفها بسهولة .

إن استخدام مخلفات الغابات لإنتاج بخار للتدفئة أو توليد الطاقة ما فتئ يتنامى في بعض دول العالم . وتنتج بعض شركات توليد الطاقة الأمريكية عدة جيغاواط من الطاقة الكهربائية من محطات تستخدم مصادر الكتلة الحيوية ، ومعظم هذه المحطات أنشئت خلال السنوات العشر الأخيرة . فالنمسا تنتج 1250 ميغاواط من مخلفات الغابات لغرض التدفئة المنزلية ومنظومات التدفئة ، ومعظم منظومات التدفئة سعتها 2-1 ميغاواط ، مع قسم قليل من وحدات أكبر (15 MW) . أما بريطانيا فإنها تنتج حوالي 2.3 ميغا طن من مخلفات الغابات تمثل حوالي 40 بيتا جول من الطاقة ، وهذه تلبّي حاجة السوق التجاري المقدرة بحوالي 0.2 ميغا طن سنوياً . وتشير التقديرات أنه يمكن استخدام 25% من المجموع لتغذية عدة محطات ذات سعة كلية مقدارها 50 ميغاواط . إن بقايا قطع الأخشاب من غبار القطع والقطع الزائدة الناتجة عن تلك العلميات تصلح لأن تكون وقوداً جيداً . أما شركات صناعة الأثاث البريطانية فقد قدّرت أنه بإمكانها استخدام 35000 طن من المخلفات في العام الواحد ، وهو ما يعادل ثلث إنتاجها . أما في السويد فإن طاقة الكتلة الحيوية تمثل 15% من طاقتها الرئيسية .

5-11-2 نفايات المحاصيل

في كل عام يتم إنتاج 14 مليون طن من القش في بريطانيا معظمه فائض عن الحاجة، ويتم حرقه في الحقول . وقد انخفض حالياً استخدام هذه المادة (القش) لأغراض التدفئة وذلك لرخص أسعار النفط ، ومع ذلك فإن 000 200 طن من القش يستخدم سنوياً لأغراض التدفئة ومن المحتمل أن يرتفع الاستهلاك إلى 000 800 طن في نهاية القرن

العشرين . أما في الدنمارك فقد تم نصب 54 منظومة تدفئة في مناطق قروية في السنوات العشر الماضية ومعظمها بسعة تتراوح بين 3 و5 ميغاواط . وتقدر بعض بقايا المحاصيل الأخرى بحوالي 1.6 مليون طن وترمى في بريطانيا كل عام ، وهي محاصيل جديدة تتراوح نسبة الرطوبة فيها من 60% إلى 80% . وهذه المحاصيل هي من البطاطا وقصب السكر وجذور الشوندر ، إضافة إلى 5 ملايين طن من بقايا المشاتل والحدائق . وهذه النفايات الرطبة يمكن أن تكون ملائمة لعمليات التخمير أكثر من حرقها كوقود .

5-11-3 النفايات الحيوانية

إن المشاكل البيئية التي تسببها مخلفات الحيوانات من حيث الرائحة وتلوث المياه قد شجّعت بعض الفلاحين على بناء هواضم (Digesters) في مزارعهم . ويمكن استخدام الغاز المنتج من هذه الهواضم في أغراض التدفئة أو الطبخ أو توليد الطاقة أحياناً . أما بقايا الأبقار والدجاج والخنازير فهي من النفايات المعروفة حالياً . ففي أوربا ، وخاصة في الدنمارك وهولندا والمملكة المتحدة ، ينتج سنوياً 7 ملايين طن من بقايا هذه الحيوانات وبمحتوى طاقة قدرها 110 بيتاجول (10^{15} جول) . وبالرغم من أن قسماً قليلاً من هذه المصادر مفيد اقتصادياً من ناحية محتوى الطاقة إلاّ أنه يمكن توليد الغاز الحيوي كناتج مفيد من الهاضمات اللاهوائية .

لقد تم بناء منظومات صغيرة ، تقدر بعشرات الملايين ، تستخدم الفضلات البشرية والحيوانية لإنتاج الطاقة وبصورة واسعة في كل من الهند والصين حيث استخدمت أنواع مختلفة من المنظومات ذات كلفة رخيصة .

وفي بعض دول العالم الثالث تكون كلفة إنشاء هاضم أكثر من الإمكانية المادية للمزارعين الصغار ، ولهذا يجب أن يتم تأسيس جمعيات تقوم بإنشاء مثل هذه المنظومات أو أن تساعد الدولة على إنشائها .

أسئلة تقويمية

1. ما المقصود بطاقة الكتلة الحيوية ؟
2. كيف يتم استخلاص الطاقة الكهربائية أو الطاقة الحرارية من طاقة الكتلة الحيوية ؟
3. كيف يتم إنتاج الوقود الغازي من الوقود الصلب كالفحم الحجري مثلاً ؟
4. ما هي عملية الانحلال الحراري ؟
5. ما هو الغاز الحيوي ؟ وكيف يتم إنتاجه من مصادر الكتلة الحيوية ؟
6. كيف يتم إنتاج الميثانول والإيثانول ؟ وما هي مجالات استخداماتهما ؟
7. ما هي الفوائد والتأثيرات البيئية الناتجة عن استخدام مصادر الكتلة الحيوية ؟

الفصل الرابع

طاقة الرياح

1-4 مقدمـــــة عن طاقة الرياح

2-4 نسيم البّر والبحر

3-4 طواحين الهواء
- عَنفات (توربينات) الرياح الأفقية المحور
- عَنفات (توربينات) الرياح العمودية المحور

4-4 كيف تعمل عَنفات (التوربينات) الريحية

5-4 تأثير عدد الشفرات

6-4 التوربينات الريحية الأفقية المحور
- القوى المؤثرة وسرعة شفرات العَنفات (التوربينات) الريحية الأفقية
- السيطرة على السكون

7-4 عَنفات (توربينات) الريح العمودية المحور

8-4 القدرة والطاقة المستخلصة من عَنفات (توربينات) الرياح
- كمية الطاقة التي تنتجها العَنفة (التوربين)

9-4 خصائص تخمين سرعة الرياح في موقع
- استخدام قياسات سرع الرياح من مناطق مجاورة
- استخدام الأطلس وخرائط سرع الرياح
- استخدام موديلات مبرمجة بالحاسوب لسريان الرياح

10-4 التطوير التجاري لمنظومات طاقة الرياح
- عَنفات (التوربينات) الريحية ذات السعات الصغيرة

11-4 الإمكانيات المتاحة لطاقة الرياح

12-4 التأثيرات البيئية لاستخدام طاقة الرياح
- الفوائد البيئية
- المساوئ البيئية المكتسبة
- ضجيج العَنفة (التوربين) الريحي
- التداخل الكهرومغناطيسي
- التأثيرات البصرية

1-4 مقدمـــــة عن طاقــة الريــاح

توفر طاقة الرياح إمكانية واسعة لتوليد قدرات كبيرة من الطاقة الكهربائية من دون مشاكل التلوث التي تحدثها مصادر الطاقة التقليدية الحالية . فحجم تطوير هذا المصدر المتجدد يعتمد على الاختيار الأفضل للتوربين (العَنفة) الهوائي وموقعه .

لقد استخدمت طاقة الرياح منذ الآلاف السنين في طحن الحبوب والري وبعض التطبيقات الميكانيكية الأخرى . كما أن هنالك مؤشرات تفيد بأن طواحين الهواء قد استخدمت من قبل البابليين في العراق ، وفي الصين القديمة في الفترة التي تتـــــراوح ما بين 1700 إلى 2000 قبل الميلاد . وتشير بعض المراجع الأجنبية إلى أن أمير المؤمنين عمر بن الخطاب هو من اوائل من استخدموا الطواحين الشراعية الميكانيكية . وانتشرت طواحين الهواء في أوروبا منذ القرن الثاني عشر فوصل عددها في عام 1750 إلى أكثر من 8000 طاحونة في هولندا وأكثر من 10 آلاف طاحونة في إنجلترا. ولكن استخدام هذا المصدر من الطاقة تناقص بشكل كبير بعد اكتشاف جميس وات الماكنة البخارية في نهاية القرن الثامن عشر ، وقل استخدامه أكثر بعد اكتشاف النفط في بداية القرن الحالي .

بعد ارتفاع أسعار النفط وظهور مشاكل بيئية ناتجة عن استخدام مصادر الطاقة التقليدية زاد الاهتمام بطاقة الرياح ، ووصلت تكنولوجيا تصنيع طواحين الهواء في عقد الثمانينات من هذا القرن إلى درجة عالية من النضج بحيث يمكن حالياً تصنيع منظومات توليد الطاقة الكهربائية بكفاءة ممتازة وأسعار مناسبة . وما فتئت الجهود تبذل لتقليل سعر هذه المنظومات وزيادة الثقة فيها من الناحية التقنية . وتنتج الدول الصناعية حالياً أنواعاً عديدة من الطواحين بتصاميم مختلفة ومن قبل عشرات الشركات تتجاوز الطاقة الصادرة من كل منها 1 ميغاواط .

ولفهم ميكانيكية استخلاص الطاقة من الرياح يجب معرفة عدد من المجالات منها الأنواء الجوية ، وديناميكية الموائع ، ومبادئ توليد الطاقة الكهربائية ، ومنظومات السيطرة ، بالإضافة إلى تصاميم ونصب الهياكل الحديدية لحمل هذه الطواحين .

إن حركة الرياح تتولد نتيجة لامتصاص أشعة الشمس من قبل عناصر الجو وسطح الأرض بنسب متفاوته . فعند سقوط الإشعاع الشمسي على منطقة ما يتأثر الغلاف الجوي ويسخن الهواء مما يؤدي إلى ازدياد كبير في حجمه ، ويسفر ذلك عن انخفاض في كثافتة وعندها يقل وزن عمود الهواء على وحدة المساحة التي تسقط عليها أشعة الشمس مما يؤدي إلى تقليل الضغط الجوي . أما المناطق التي ينخفض فيها مقدار الإشعاع الشمسي فإن وزن عمود الهواء يزيد ، وتبعاً لذلك يزيد مقدار الضغط الجوي على تلك المناطق ، فيقوم الهواء بالانتقال من منطقة الضغط المرتفع – حيث يقل الإشعاع الشمسي – إلى منطقة الضغط المنخفض – حيث الإشعاع الشمسي الأكثر – وذلك لمعادلة الضغط في المنطقتين . وهذا التدفق في الهواء من منطقة ذات ضغط مرتفع إلى ضغط منخفض هو الرياح .

وتتناسب الطاقة التي يمكن الحصول عليها من الرياح تناسباً طردياً مع مكعب سرعة الهواء ، ويمكن حسابها من المعادلة التالية :

$$½\ \rho A \eta U^3 = P_w$$

حيث P_w هي كمية الطاقة الكهربائية المستخرجة من الرياح (واط) ، و P هي كثافة الهواء (كغ/م^3) ، و U هي سرعة الرياح (م/ت) ، و A هي مساحة الجزء المعارض للرياح (م^2) ، و η هي كفاءة العَنفة (التوربين) .

ويتم عادة التعبير عن الطاقة المتوفرة من الرياح باستخدام العلاقة :

$$½\ \rho U^3 = P/A$$

حيث تسمى (P\A) كثافة الطاقة Power Density ويعبر عنه بوحدة (واط/م^2) .

2-4 نسيم البر والبحر

يتولد نسيم البر والبحر في المناطق الساحلية نتيجة لاختلاف السعة الحرارية للبحر والساحل كما في الشكل (4-1) . فالأرض لها سعة حرارية أقل من البحر ، ولهذا فهي تسخن بسرعة خلال النهار وتفقد حرارتها بسرعة أكبر في البحر. وخلال النهار يكون

البحر أبرد من الأرض ، ولهذا يتولد تيار هوائي بارد على الساحل ليحل محل التيار الدافئ الخارج من الأرض والمرتفع إلى الأعلى ، وهذا هو نسيم البحر . أما خلال الليل فينعكس تيار الهواء ليتحرك من الأرض هواء بارد يلطف حرارة البحر وهذا هو نسيم البر ، لذلك نرى أن البحارة يبحرون فجراً حيث يدفع الهواء القادم من الساحل أشرعتهم باتجاه البحر .

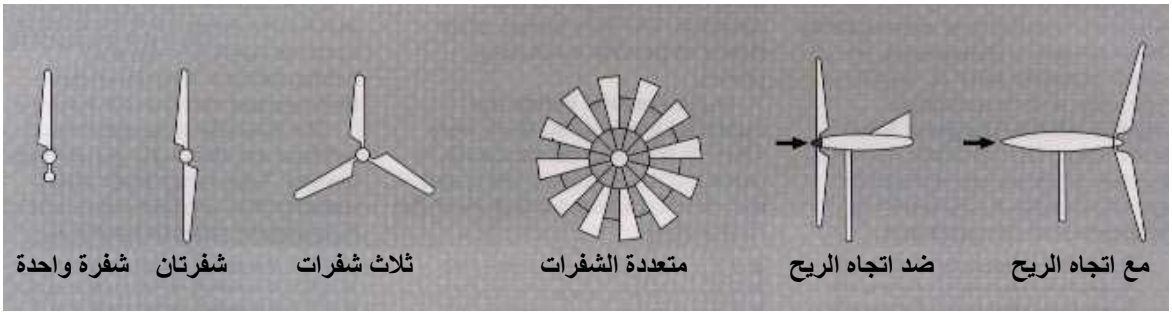
شكل (4-1a) : نسيم البحر، الرياح تتجه إلى الشاطئ خلال النهار

شكل (4-1b) : نسيم البر، الرياح تتجه إلى البحر خلال الليل

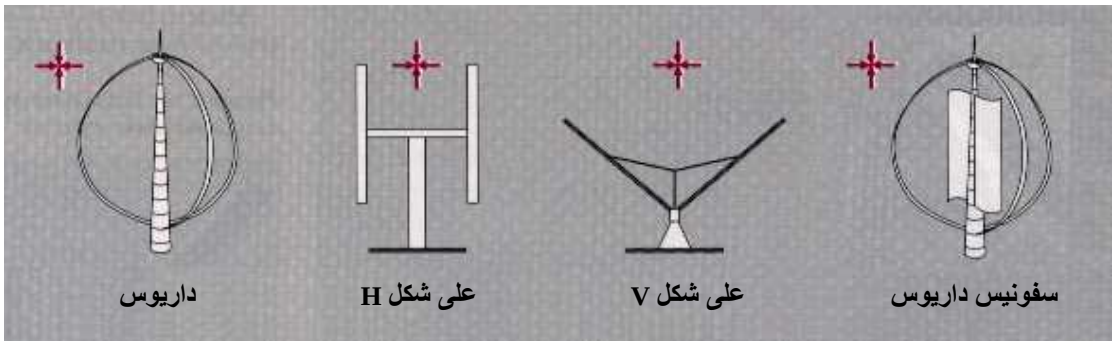
3-4 طواحين الهواء (Wind Mills)

تعتبر طاقة الرياح من أقدم مصادر الطاقة التي استغلت منذ بداية الحضارات . وكان يعتقد أن الرياح لم تستخدم في العصور القديمة إلاّ لتسيير القوارب الشراعية ، لكن الشواهد تؤكد أن استغلال هذا المصدر لتدوير طواحين الهواء يرجع إلى أكثر من 4000 عام . وكان مجال استخدامها في طحن الحبوب وبعض المواد الأخرى وقطع الأخشاب وضخّ المياه وغيرها .

وقد اقترحت أنواع عديدة من المكائن لاستغلال هذه الطاقة . ويبين الشكل (4-2) بعض هذه الأنواع .



شكل (4-2a): أنواع من طواحين الهواء الأفقية المحور

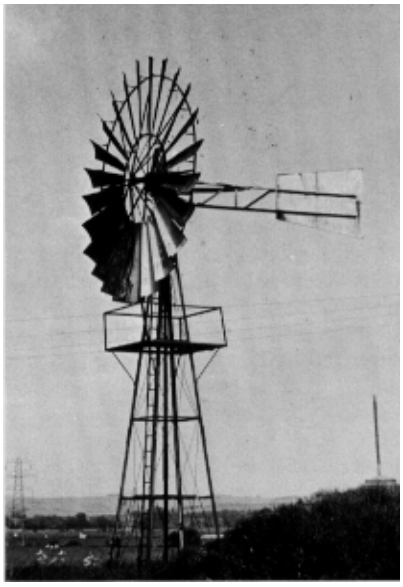


شكل (4-2b): أنواع من الطواحين الهواء عمودية المحور

إن طواحين الهواء الحديثة التي عرفت لاحقاً باسم توربينات الرياح (Wind Turbine) تتكون من نوعين يتمّيزان عن الطواحين القديمة (ماعدا بعض الحالات المبتكرة القليلة) وهما التوربينات الأفقية المحور(Horizontal Axis Wind Turbine) والتوربينات العمودية المحور(Vertical Axis Wind Turbine) ويستخدمان لتوليد الطاقة الكهربائية بقدرات تتراوح بين عشرات من الواط إلى عدة ميغاواط .

1-3-4 عَنفات (توربينات) الرياح الأفقية المحور Horizontal Axis Wind Turbine

تتكون عَنفات الرياح الأفقية المحور عادة من شفرتين (Blades) أو ثلاث أو أكثر . وعَنفات الرياح ذات العدد الكبير من الشفرات تظهرا فعلياً كأنها قرص صلب مغطى بشفرات صلبة ويمكن وصفه بجهاز ذي صلابة عالية . ويتضمن هذا النوع الطاحونة المبينة بالشكل (4-3) المستخدمة في المزارع لضخ المياه . أما بالنسبة إلى الطواحين ذات العدد القليل من الشفرات فيكون فيها فراغ ، وقسم قليل منها صلب ، ويمكن تعريفها بالأجهزة ذات الصلابة القليلة .



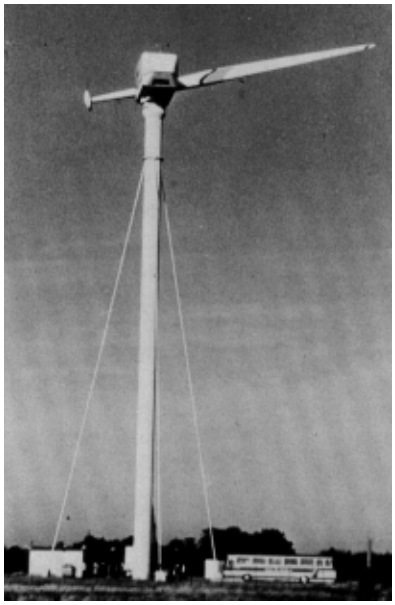
شكل (4-3): طاحونة هواء أفقية متعددة الشفرات تستخدم عادة لضخ المياه

والعَنفات ذات الصلابة القليلة المطورة من الطواحين التقليدية لها مظهر نظيف وانسيابي ، وقد تم التوصل إلى هذا التصميم نتيجة لفهم المصممين لديناميكا الموائع التي تم اقتباسها بصورة عامة من تصاميم أجنحة الطائرات أو الأجهزة الدوارة الأخرى . فالجزء الدوار منها يحتوي على شفرتين أو ثلاث شفرات ، وهي تشبه الجناح كما في الأشكال (4a, b -4) . وهي مصنوعة بصورة خاصة لتوليد الطاقة الكهربائية .

شكل (4a-4): طاحونه هواء افقيه ذات ثلاث شفرات

شكل (4b-4): طاحونه هواء افقيه ذات شفرتين

هذه العَنفات مصنعة تجارياً لسعة تصل إلى 1 ميغاواط ، وتنتج حالياً في كل من الدانمارك ، والولايات المتحدة الأمريكية ، والمملكة المتحدة ، وهولندا ، وألمانيا، وإيطاليا ، وإسبانيا ، وبلجيكا ، واليابان ، وأستراليا ، والصين . وتقدر المراجع أن عدد طواحين الرياح المشيدة على الأرض يبلغ أكثر من 20 ألف مروحة متوسطة السعة، ويكون العدد أكثر من ذلك عند احتساب المراوح قليلة السعة في مختلف أنحاء العالم . وتنتج المراوح الأحادية الشفرة بصورة واسعة في ألمانيا ، وإيطاليا . وعلى الرغم من أن شكل هذه المراوح يبدو مختلفاً فإنها أرخص وأقل حملاً على الجزء الدوار (الشكل 4-5) .



شكل (4-5): طاحونة هواء أفقية أحادية الشفرة

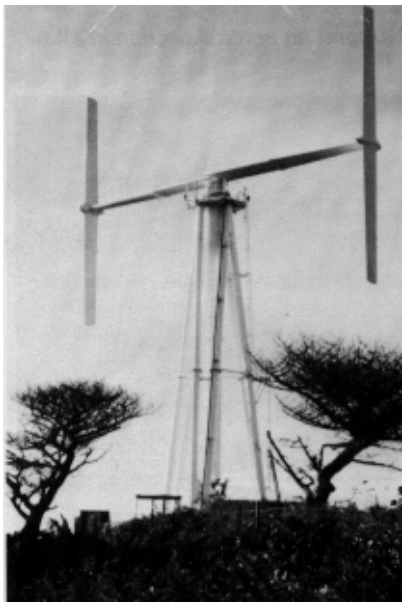
4-3-2 عَنَفات (توربينات) الريح العمودية المحور Vertical Axis Wind Turbines

العَنفات الريحية العمودية المحور لها محور دوران عمودي يختلف عن العَنفات الأفقية المحور لكونها تستغل الرياح في كافة الاتجاهات بدون الحاجة إلى إعادة تنظيم الجزء الدوار عندما يتغير اتجاه الرياح .

هذه العَنفات العمودية المحور الجديدة ابتكرت من قِبل مهندس فرنسي يدعى جورج دارويس (George Darrieus) ، وقد حملت اسمه إحدى العَنفات العمودية . هذا الجهاز يشبه خفاقة البيض ، وله شفرات منحنية متصلة من أحد جوانبها بالجزء العلوي من شافت (Shaft) أو عمود الدوران ، بينما يتصل الجانب الآخر بالجزء السفلي من عمود الدوران (الشكل 4-6) .

شكل (4-6): طاحونة هواء عمودية نوع دارويس

إن عَنفات داروِيس هي الأكثر تقنية من بين العَنفات الريحية العمودية المحور . فلقد نصبت عدة مئات من هذا النوع في مزرعة ريحية (Wind Park) في كاليفورينا ، وأنتجت أيضاً أعداد قليلة منها في كندا، وتجري حاليا بحوث لتطوير التصميم في عدة دول منها ألمانيا وفرنسا وإسبانيا . وشفرات عَنفات داروِيس العمودية المحور تكون على شكل منحنى يشبه حبل القفز . وهذا الشكل كُفْءٌ ملائم لتحمل القوة الطاردة عن المركز العالية المسلطة على الشفرات . ومع هذا فإن هيئة الشفرة المنحنية تسّبب مشاكل في التصنيع والنقل والنصب . ولتخطي هذه المصاعب تم اقتراح أنواع عديدة من الحلول منها شفرات على شكل حرف (H) أو حرف (V) . فالمروحة من نوع (H) الموضحة في الشكل (4-7) تتكون من برج يحتوي على شافت عمودي يتصّل برأسه العلوي ذراعان أفقيّان مربوٌط في نهاية كل منهما شفرة عمودية . أما المروحة الأخرى من نوع (V) الموضحة في (الشكل 4-8) فإنها تتكون من شفرتين على شكل صفيحة هوائية مربوطتين من إحدى نهايتهما بالشافت العمودي ومائلتين بشكل يشبه حرف V ، ومن معالمها الواضحة هي قصر الشافت العمودي ، ويكون المولد فيها منصوباً على الأرض . وهذا النوع لا يزال قيد التجربة ، وهو إلى حد الآن ليس منافساً اقتصادياً للمراوح العمودية التي على شكل حرف H .



شكل (4-7): طاحونة هواء عمودية على شكل حرف H

شكل (4-8): طاحونة هواء عمودية على شكل حرف V

4-4 كيف تعمل العَنفات (التوربينات) الريحية

تقوم العَنفات الريحية الأفقية والعمودية باستغلال قوى ديناميكا الهواء المتولدة بواسطة الصفائح الهوائية (Aero Foils) لاستخلاص الطاقة من الرياح . وكل من هذين النوعين يستخلص الطاقة بطريقة مختلفة .

ففي العَنفات الأفقية الثابتة ، ومع اعتبار محور الدوران في اتجاه واحد مع اتجاه الرياح لسرعة ريح معينة وسرعة دوران معينة ، تبقى زاوية الهجوم (Angle of Attack) لأي موضع على الشفرات ثابتة خلال فترة الدوران (تُعرف زاوية الهجوم بأنها الزاوية التي يصنعها جسم مع اتجاه سريان الهواء مقاسة على خط ثابت في الجسم) . أما في العَنفات العمودية وفي نفس الظروف فإن زاوية الهجوم في أي موقع على الشفرات تتغير بشكل ثابت خلال فترة الدوران . وخلال التشغيل الاعتيادي للمحور الأفقي للجزء الدوار فإن اتجاه الرياح على الصفيحة الهوائية يبقى ثابتاً . وفي حالة العَنفات العمودية فإن زاوية الهجوم تتغير من موجب إلى سالب ، وإلى موجب خلال كل دورة . وهذا يعني أن جانب الشفط ينعكس خلال كل دورة لضمان استخلاص الطاقة في حالتي كون زاوية الهجوم موجبة أو سالبة .

5-4 تأثير عدد الشفرات

يمكن حساب سرعة دوران العَنفات الريحية إما بالدورة في الدقيقة (Rotation Per Minute) أو بزاوية نصف قطرية في الدقيقة ($rad\ s^{-1}$) . وسرعة الدوران في الدقيقة (RPM) يرمز لها بالرمز N والسرعة الزاوية يرمز لها بالرمز ($rad\ s^{-1}$) .

وللعلم فإن : 1 دورة في الدقيقة (rpm) $= \frac{2\Pi}{60}$ ($rad\ s^{-1}$) $= 0.10472$ $rad\ s^{-1}$

(حيث $\Pi = 3.14$ أو $\frac{22}{7}$)

ومن المقاييس الأخرى لسرعة التوربين هو سرعة التماس U ، وهي سرعة التماس للجزء الدوار على سطح الشفرات مقاسة بالمتر في الثانية ، وهي حاصل ضرب السرعة الزاوية Ω للجزء الدوار ونصف قطر منطقة التماس R (متر) . ويمكن تعريفها بما يلي : $U = \frac{2\Pi R}{60}$

وعند تقسيم سرعة التماس U على سرعة الرياح في حالة السكون V_O في المسار العلوي للجزء الدوار نحصل على نسبة مهمة (غير قياسية) ليس لها وحدات تدعى نسبة سرعة التماس ويرمز لها بـ λ . وهذه النسبة تعتبر مقياساً مهماً لمقارنة عَنفات رياح ذات خصائص مختلفة . ويمكن لعَنفة رياح ذات تصميم معين أن تعمل على مديات واسعة من نسب سرعة التماس ولكنها تعمل بأعلى كفاءة عند نسبة سرعة تماس معينة . ونسبة سرعة التماس القصوى لعَنفة (لتوربين) رياح معين تعتمد على عرض الشفرات (Blade Width) وعددها (Number Of Blades) . فالعَنفات الريحية ذات العدد الكبير من الشفرات لها مساحة كبيرة من الجزء الصلب ، وتسمى عَنفات الرياح ذات الصلابة العالية . أما عَنفات الرياح ذات الشفرات الضيقة فإنها تسمى العَنفات ذات الصلابة القليلة . ولاستخلاص أكثر ما يمكن من الطاقة بأكبر كفاءة ممكنة فإن الشفرات يجب أن تتماس مع أكبر كمية من الرياح المارة خلال مساحة الجزء الدوار . فالعَنفة ذات الشفرات العريضة والعديدة تتماس مع الريح تحت نسبة سرعة تماس قليلة جداً ، ولكن العَنفة ذات الشفرات الرفيعة والقليلة يجب أن تدور بسرعة كبيرة لتستطيع التماس مع الهواء المار . فإذا كانت نسبة سرعة التماس قليلة فإنه سيمر جزء من الهواء بدون تماس مع الشفرات ، وأما إذا كانت نسبة سرعة التماس عالية جداً فإن العَنفة ستظهر مقاومة كبيرة للرياح وبذلك تذهب الرياح حول الجزء الدوار . فالعَنفة ذات الشفرتين والتي لها نفس عرض شفرات عَنفة ذات ثلاث شفرات تكون فيها نسبة سرعة تماس قصوى أكبر بنسبة الثلث من العَنفة ذات الثلاث شفرات . والعَنفات ذات الشفرة الواحدة والتي لها عرض شفرات مساوي لشفرات عَنفة ذات شفرتين لها ضعف نسبة سرعة التماس مقارنة بالعَنفة ذات الشفرتين . إن نسبة سرعة التماس القصوى للعَنفات الحديثة تتراوح بين 6 و 20 .

ونظرياً إنه عندما يكون عدد الشفرات كبيراً فإنه يجب أن تكون الكفاءة أعلى ، ولكن وجود شفرات كثيرة يمكن أن يؤدي إلى التداخل بينها ، وبهذا تكون العَنفة ذات الشفرات الكثيرة العدد أقل كفاءة . ولهذا فإن العَنفات ذات الصلابة العالية تكون أقل كفاءة بصورة عامة من العَنفات ذات الصلابة القليلة . وفي العَنفات ذات الصلابة القليلة وجد أن العَنفات ذات الثلاث شفرات أعلى كفاءة من العَنفات ذات الشفرتين ، وأن الأخيرة أعلى كفاءة من العَنفات ذات الشفرة الواحدة .

إن القوة الميكانيكية المستخلصة من عَنفات الرياح تعادل حاصل ضرب السرعة الزاوية والعزم المسلط من قِبل الريح . والعزم هو القوة المسلطة حول مركز الدوران نتيجة

لوجود قوة ضاربة من قِبل الريح على شفرات الجزء الدوار، ويقاس بالنيوتن – متر . ولقوة معينة ثابتة فإن لأقل سرعة زاوية عزماً أعلى ولأعلى سرعة زاوية عـزماً أقل .

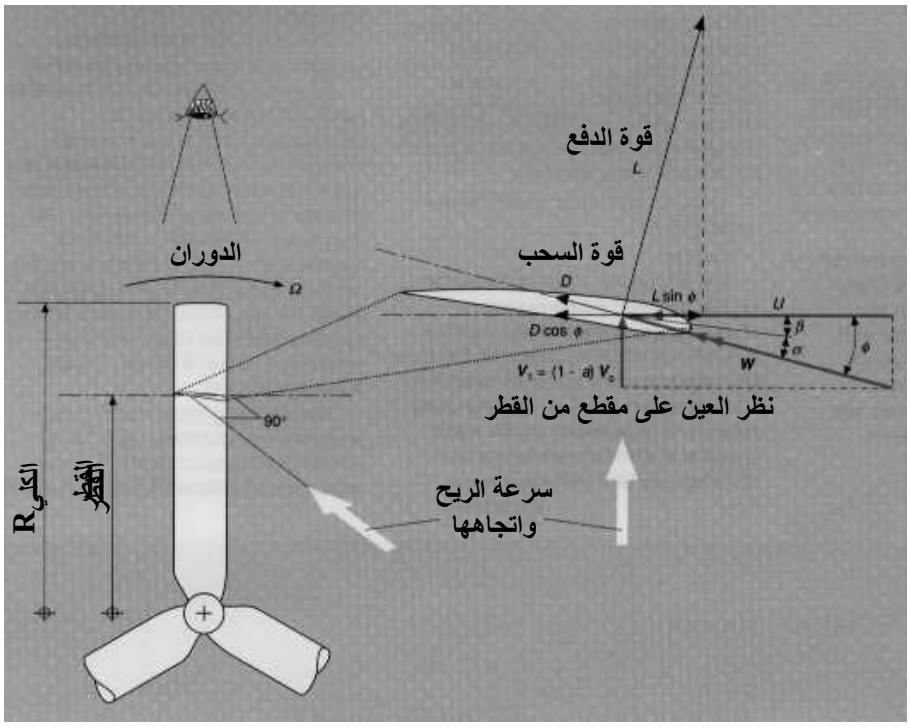
6-4 كيفية عمل العَنفات (التوربينات) الريحية الأفقية المحور (Horizontal Axis Wind Generators)

تكون محاور التدوير في هذا النوع من العَنفات على خط اتجاه الريح ، وتسمّى بأجهزة الجريان المحوري . ويبقى محور الدوران بنفس خط اتجاه الريح بواسطة آلية الانعراج (Yawing Mechanism) وهي التي تعيد دائماً الجزء الدوار إلى موقعه باتجاه الريح .

ويعتمد أداء الجزء الدوار ذي المحور الأفقي على عدد وشكل الشفرات ، ومقطع الصفيحة الهوائية ، بالإضافة إلى طول وتر الشفرة ، وزاوية الريح النسبية ، وزاوية القذف للشفرة (تساوي الفرق بين زاوية الريح النسبية وزاوية الهجوم) في مواضع مختلفة على طولها ، ومقدار الانحراف بين محور التوربين ونقطة التماس مع الشفرة .

1-6-4 القوى المؤثرة وسرعة شفرات العَنفات (التوربينات) الريحية الأفقية

يوضح الشكل (4-9) مقطعاً من الشفرة الدوارة لعَنفة أفقية والمخطط الموجه للقوى، والسرع في موقع معين على طول الشفرة وفي وقت معين .



شكل (4-9): مخطط بيان المتجهات لمقطع من شفرة الدوار المتحركة لعَنفة أفقية

وبما أن الشفرات تتحرك فالاتجاه الذي ترى فيه الشفرة سرعة الريح النسبية (W) هو محصله سرعة التماس (U) للشفرة في نفس الموقع وسرعة الريح V عند الجزء الدوار. وسرعة التماس (متر/ثانية) في أي موقع على الشفرة هي حاصل ضرب السرعة الزاوية Ω ($Rad\ s^{-1}$) للجزء الدوار ونصف القطر المحلي r (متر) في أي موقع أو $U = \Omega r$. سرعة الريح على الجزء الدوار V هي سرعة الريح الساكنة في أعلى الجزء الدوار V_O مضروبة بمعامل يأخذ بالحسبان تخفيض سرعة الرياح نتيجة لاستخلاص الطاقة ، وهذا المعامل يسمى معامل التداخل المحوري (Axial Interface Factor) ويرمز له بـ (α) .

وقد أوضح البرت بتز (Albert Betz) في عام 1928 أن أعلى قيمة للقوة التي يمكن استخلاصها نظرياً لا يمكن أن تتعدى 59.3% ، وتقل عند ذلك سرعة الريح الساكنة بنسبة $\frac{1}{3}$. وبمعنى آخر عندما يكون مقدار معامل التداخل المحوري α يساوي $\frac{1}{3}$ القيمة 59.3% فإنه يدعى أحياناً حدود بتز .

إن زاوية الريح النسبية Φ هي الزاوية التي تعملها الريح النسبية مع الشفرة (على نقطة معينة من نصف القطر المحلي للشفرة) مقاسة من مستوى سطح الدوران . أما زاوية الهجوم (∞) في أية نقطة على الشفرة فإنها يمكن أن تقاس بالنسبة لزاوية الريح النسبية .

كما أن زاوية قذف الشفرة ß (Blade Pitch Angle) تساوي الفرق بين زاوية الريح النسبية وزاوية الهجوم .

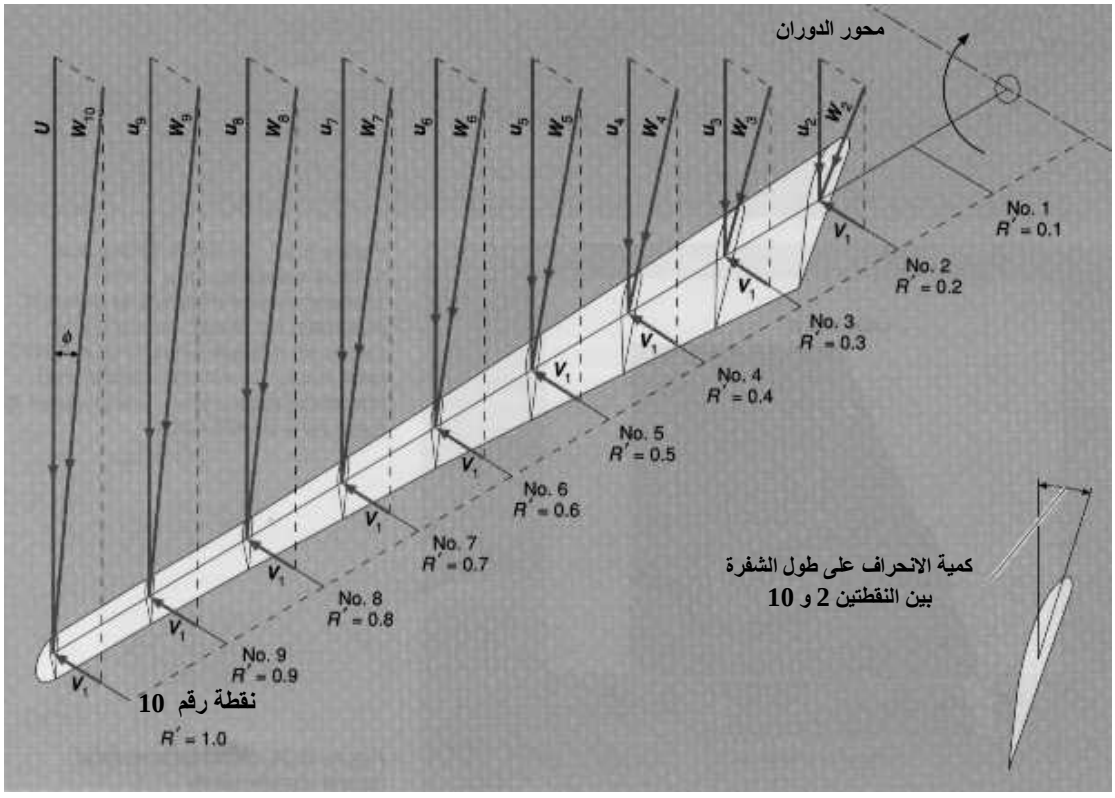
وبما أن الجزء الدوار محدد بالدوران في مستوى معين بزاوية موافقة مع الرياح الساكنة فإن القوة المحركة على أية نقطة في الشفرة هي القوة المركبة لقوة الرفع للصفيحة الهوائية ، والتي تؤثر في مستوى الدوران ، وتساوي حاصل ضرب قوة الرفع (L) وجيب (Sin) سرعة الرياح النسبية Φ وتساوي ($L \sin \Phi$) . أما القوة المركبة للسحب في أية نقطة من الجزء الدوار فهي حاصل ضرب قوة السحب (D) وجيب تمام زاوية (cos) الريح النسبية Φ وتساوي ($D \cos \Phi$) .

لأحظ أن العزم المقصود هو العزم حول محور الدوران ووحداته نيوتن – متر (NM) على نقطة من الشفرة تساوي حاصل ضرب القوة المحركة في سطح الدوران (وهي

الفرق بين مركبة قوة الرفع على مستوى الدوران وقوة السحب في مستوى الجزء الدوار) ونصف القطر الموضعي .

أما العزم الكلي Q المسلط على الجزء الدوار فإنه يمكن حسابه من جمع العزوم المسلطة على كل النقاط على طول الشفرة مضروباً في عدد الشفرات . والقوة الناتجة من الجزء الدوار تساوي حاصل ضرب العزم الكلي Q والسرعة الزاوية للجزء الدوار Ω .

إن قيمة واتجاه سرعة الريح النسبية Φ تتغير على طول الشفرة بالنسبة إلى نصف القطر الموضعي r وذلك لأن سرعة التماس الموضوعية U لأي جزء من الشفرة تساوي حاصل ضرب السرعة الزاوية للجزء الدوار(Ω) ونصف القطر الموضعـــــيr للشفرة . وعندما تقل سرعة التماس باتجاه رأس الجزء الدوار فإن السرعة النسبية Φ تزداد تدريجياً . وغالبا ما تكون الشفرة مصممة بحيث تكون زاوية الهجوم ثابتة على طولها ، ويجب أن يكون لها التواء بكمية تتغير تدريجياً من القمة إلى القاعدة . ويوضّح الشكل (4-10) الالتواء التدريجي لشفرات الجزء الدوار من توربينات الريح الأفقية . وإن معظم مصنعي الشفرات ينتجون شفرات ملتوية على الرغم من إمكانية إنتاج شفرات غير الملتوية. فالشفرات غير الملتوية أرخص لكنها أقل كفاءة .



شكل (4-10): منظر ثلاثي الأبعاد لشفره الجزء الدوار لعنفة أفقية يوضح فيه تغير زاوية سرعة الريح النسبية مع طول الشفرة

2-6-4 السيطرة على السكون (Stall Control)

لنفرض أن العَنفة تدور بسرعة ثابتة مهما كانت سرعة الريح ، وأن زاوية قذف الشفرة (β) ثابتة أيضاً . فعند ازدياد سرعة الريح تقلّ نسبة السرعة في القمة وفي نفس الوقت تزداد زاوية الريح النسبية مسببة ازدياد زاوية الهجوم . ومن الممكن استخدام هذه الخصائص للسيطرة على العَنفة في حالة الرياح العالية . وتم تصميم شفرات الجزء الدوار بطريقة ما بحيث تقل كفاءتها عند السرع العالية ، وذلك باقتراب زاوية الهجوم من زاوية السكون ، وعندها تقل قوة الرفع ويكون العزم على منطقة الشفرات معدوماً . وهذه الطريقة مستخدمة بنجاح في عدد كبير من العَنفات الريحية الأفقية والعمودية .

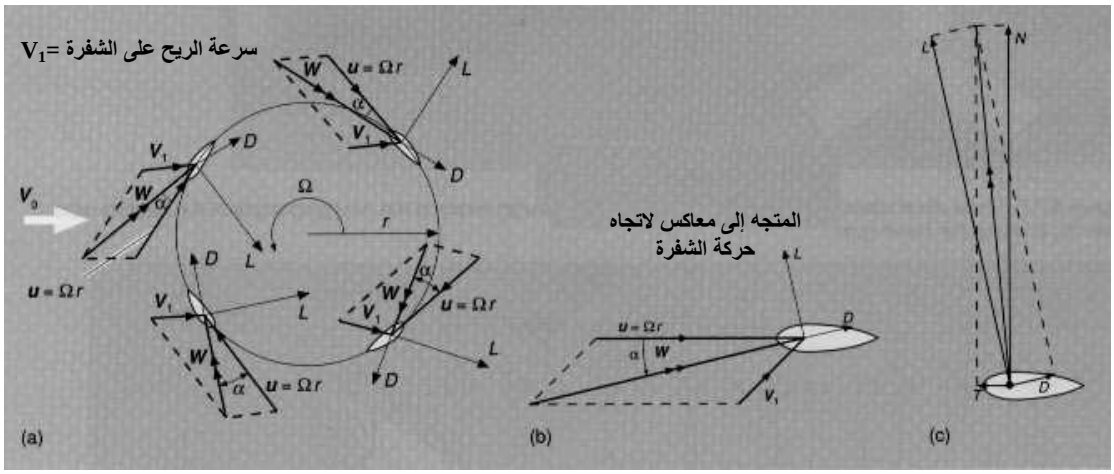
7-4 كيفية عمل عَنفات (توربينات) الريح العمودية المحور

العَنفات العمودية المحور الحديثة تختلف عن العَنفات الأفقية لأنها أجهزة ذات سريان متقاطع (Cross-Flow Devices) ، وهذا يعني أن الاتجاه الذي يمّر منه تيار الهواء الساكن يأتي من الزوايا المناسبة لمحور الدوران أو أن الهواء يمر عبر المحور . وعندما تدور شفرات الجزء الدوار فإنها تندفع على السطح بثلاثة أبعاد مقارنة باندفاعها على سطح دائري أحادي كما في شفرات التوربينات الأفقية .

فعندما تدور الشفرات بسرعة أكبر بعدة مرات من سرعة الرياح الساكنة فإن زاوية الهجوم في منطقة سرعة الرياح النسبية ستتغير ولكنها تبقى قليلة لتمكين الشفرات من امتصاص قوى الدنياميكا الهوائية التي تولد قوة تماس محركة وعزماً على الجزء الدوار .

والعَنفات الريحية العمودية تعمل عند سريان الرياح بأي اتجاه . وإذا افترضنا أنّ الرياح تهب من اتجاه معين وقيمة زاوية التوطين (Setting Angle) للشفرة مثبتة بحيث يكون الوتر في خط مستقيم مع مماس المسار الدائري للدوران وبصورة أوضح ، فإن زاوية الشفرة بالنسبة لاتجاه الرياح الساكنة تتغير من صفر إلى 360 درجة لكل دورة كاملة . ويتبين من ذلك أن زاوية الهجوم من الريح إلى الشفرة تتغير بنفس القيمة ، ولهذا فإنّ من غير الممكن أن تتحرك العَنفة الريحيه العموديه . ولكن مع ذلك يجب أن نأخذ بالحسبان بأنه عند تحرك الشفرة فإن زاوية الريح النسبية التي تراها الشفرة هي محصلة

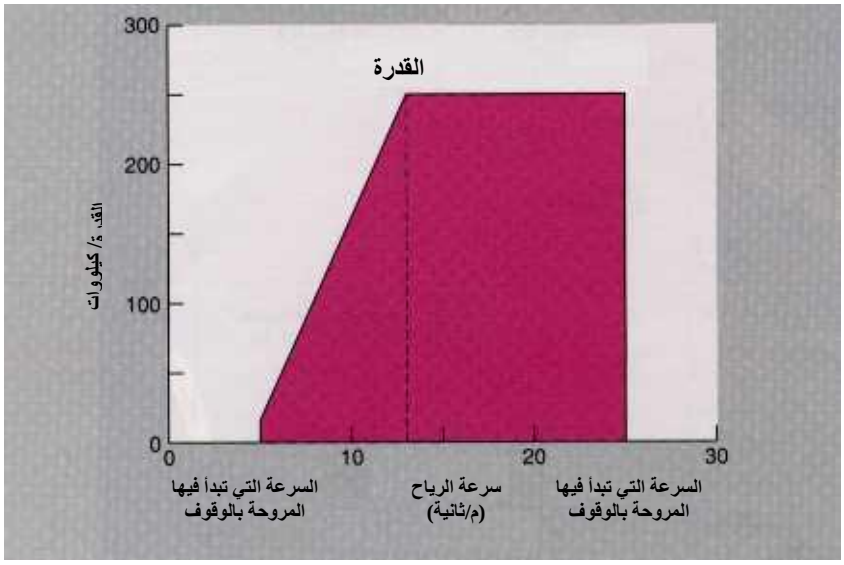
سرعة الرياح V للجزء الدوار وسرعة الشفرة U . فإن الشفرة تتحرك بسرعة كافية مقارنة بسرعة الريح ، وإن زاوية الهجوم التي تعملها الشفرة مع سرعة الريح النسبية W تتغير بمقدار قليل جداً كما هو موضح بالشكـــل (4-11) .



شكل (4-11): قوى الرفع والسحب على شفرات الجزء الدوار

8-4 القدرة والطاقة المستخلصة من عَنفات (توربينات) الرياح

كمية القدرة التي تنتجها عَنفة الرياح تتغير مع سرعة الريح ، وكلّ عَنفة لها خصائص معينة ومنحنى للسرعة والقدرة (Wind Speed-Power Curve). ومثال على ذلك العَنفة الموضحة في الشكل (4-12) . هذا المنحنى يبين الطاقة التي تنتجها العَنفة في موقع معين وتحت سرعة رياح معينة .



شكل (4-12): منحنى السرعة والقدرة لعَنفة عادية

1-8-4 كمية الطاقة التي تنتجها العَنفة (التوربين)

إذا تمت معرفة المعدل السنوي لسرعة الرياح في موقع ما فإن المعادلة التالية يمكن استخدامها (EWEA1991, Andersom,1992) لتقدير الطاقة التي تستطيع أن تولدها العَنفة بالكليوواط – ساعة في السنة لعدد من عَنفات الرياح .

الطاقة السنوية المولدة = $K\overline{V}^3AT$

الثابت K = 2.5 وهو معامل يعتمد على: خصائص أداء العَنفة، ومعدل صلاحية عمل العَنفة البالغة (90%) ، والضياع (5%) من التأثير على العَنفة الحاصل من وجود العَنفة في صف من العَنفات، والعلاقة بين معدل سرعة الريح وتوزيع تغيرات سرعة الريح .

$\overline{V}$ = المعدل السنوي لسرعة الريح (متر/ثانية) في الموقع

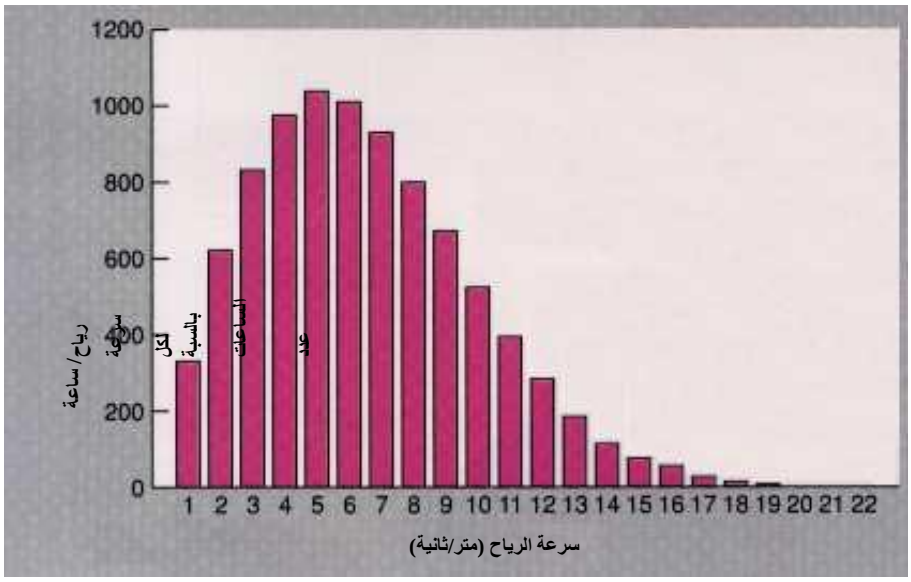
A = المساحة التي تشغلها العَنفة بالمتر المربع

T = عدد العَنفات

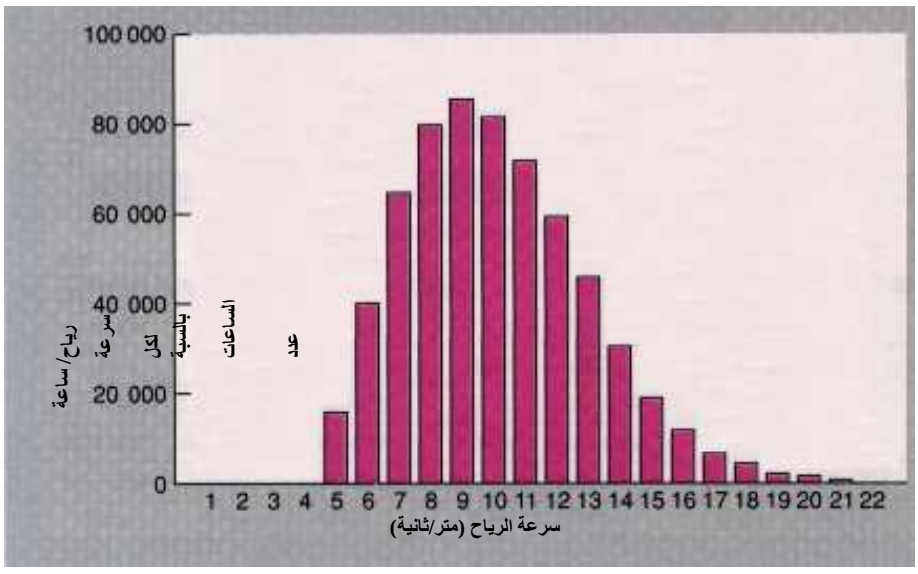
يجب استخدام هذه المعادلة بحذر وذلك لأنها تعتمد على خصائص عَنفات الرياح الموجودة حالياً ، وافتراض علاقة تقريبية بين المعدل السنوي لسرعة الريح وتوزيع تغيرات سرعة الريح والتي يمكن أن تكون غير دقيقة في المواقع المختلفة .

إن الطاقة التي تولّدها العَنغة تعتمد على كل من منحنى القدرة والسرعة (Speed-Power Curve) وتوزيع تغيرات سرعة الرياح (Wind Speed Frequency Distribution) في الموقع . والمنحنى الأخير يوضح عدد الساعات التي تهب فيها الرياح في سرع مختلفة في زمن محدد . ويبين الشكل (4-13) توزيع تغيرات سرع الرياح لكل سرعة رياح واقعة ضمن السرع التي تعمل بها العَنفة (بين السرعة التي تبدأ بها العَنفة بالاشتغال والسرعة التي تتوقف عندها العَنفة عن العمل) . والطاقة المولدة لهذه السرعة يمكن حسابها من حاصل ضرب عدد ساعات الحدوث مع القدرة التي تولدها العَنفة في هذه السرعة (مستقاة من منحنى القدرة وسرعة الرياح للعَنفة). وهذه المعلومات يمكن استخدامها لتكوين منحنى لتغيرات سرع الرياح . وكما هو مبين

بالشكل (4-14) فإن كمية الطاقة المولدة يمكن حسابها من جمع الطاقة المولدة في كل سرع الرياح في مدى السرع التي تعمل بها العَنفة .



شكل (4-13): منحنى توزيع سرعة الرياح



شكل (4-14): منحنى القدرة

وأفضل طريقة لإيجاد توزيع سرع الرياح في موقع معين هو قياس سرع الرياح بأجهزة تسجيل عدد الساعات التي تحدث بها هذه السرع في كل مدى لسرع الرياح (بمعنى آخر، من صفر – 1 متر بالثانية ، من 1 – 2 متر بالثانية ، من 2 – 3 متر بالثانية ..الخ). وكلما زاد عدد القياسات المسجلة كان التقدير أكثر دقة . ولأن القدرة تتناسب مع مكعب السرعة فإن أي خطأ قليل في تقدير السرعة يولد خطأ كبير في حساب الطاقة المولدة .

وهناك عامل آخر يؤثر على الطاقة المولدة وهو خسائر (الضياع في) نقل الطاقة، وصلاحية العَنفة للعمل . فصلاحية عمل العَنفة تعتبر مؤثراً في نسبة الاعتماد على تشييدها ومتانتها وإمكانيتها على التوليد بدون مشاكل . فمعظم العَنفات الحالية لها صلاحية عمل أكثر من 90% ، ولِقسْم منها أكثر من 95% من العمر الافتراضي لها .

9-4 خصائص تخمين سرعة الرياح في موقع (Characteristic Of Accessory The Wind Speed At Site)

من المكلف جداً القيام بقياسات مفصلة في موقع ، ولكن هنالك عدد من التقنيات التي يمكن استخدامها للحصول على تقدير مقارب لخصائص سرع الرياح في المنطقة . وهذه التقنيات لا يمكن بأي حال من الأحوال أن تكون مثل دقة القياسات الطويلة الأمد لكنها يمكن أن تكون دليلاً على إمكانية القيام بتسجيل قياسات طويلة الأمد لبيان إمكانية الحصول على طاقة من الرياح في موقع ما . وتقنيات التقدير تتضمن حالياً ما يلي :

4-9-1 استخدام قياسات سرع الرياح من مناطق مجاورة

يمكن استخدام القراءات المتوفرة في موقع واحد أو عدة مواقع مجاورة وتقدير المعلومات حول الموقع المطلوب بواسطة التحليل مأخوذاً بنظر الاعتبار الفروق بين الموقع المقترح والمواقع المجاورة .

4-9-2 استخدام الأطلس وخرائط سرع الرياح

الخرائط المتوفرة في معظم البلدان العربية أو أطلس الرياح الذي أنجزته المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم (الألكسو) يمكن أن تكون مؤشراً أوّليّاً على إمكانية توفر الرياح في المناطق المختلفة .

4-9-3 استخدام نماذج رياضية لسريان الرياح

تم تطوير عدة نماذج رياضية يمكن بواسطتها تقدير طبوغرافية المنطقة على سرع الرياح . ومن متطلبات تقدير جهد طاقة الرياح في موقع ما الحصول على بيانات حركات الرياح واتجاهاتها وتكرارها من محطة قريبة نسبياً من هذا الموقع .

10-4 التطوير التجاري لمنظومات طاقة الرياح

إن التطور الحالي في صناعة العَنفات الريحية يعود إلى تطور هذه الصناعة في كل من الدنمارك وولاية كاليفورنيا الأمريكية . لقد استمرت بحوث تصنيع المراوح الريحية لغرض توليد الطاقة الكهربائية منذ القرن التاسع عشر وحتى بداية السبعينات من القرن العشرين . وبعد أزمة النفط عام 1973 عندما قرّر الملك فيصل (رحمه الله) ملك المملكة العربية السعودية وقف تصدير النفط إلى أمريكا ، بدأ استخدام المولدات الريحية الصغيرة في الحقول يتطور من قِبل بعض الشركات الزراعية في الدنمارك وولاية كاليفورنيا الأمريكية ، وهذه الشركات يعود إليها الفضل في دفع تطوير هذه الصناعة من وحدات صغيرة إلى وحدات كبيرة تربط بالشبكة الكهربائية . وبدأ التطور السريع في منتصف الثمانينات عندما تم تشييد أعداد كبيرة من المولدات وذلك نتيجة لتخفيض الضرائب على هذه الصناعة لتشجيع انتشارها .

وتشير الإحصاءات أنه ولغاية نهاية عام 1991 تم نصب حوالي 15500 عَنفة رياح ولدت من الكهرباء ما قدره 16200 ميغاواط. وقد كان إنتاج هذه العَنفات من الوحدات الكهربائية 2700 مليون كيلوواط – ساعة في عام 1991 . وفي الدنمارك وصل عدد عَنفات الرياح العاملة في نهاية عام 1990 إلى 2880 عَنفة رياح بسعة توليد مقدارها 343 ميغاواط . وهذه المراوح تنتج من الوحدات الكهربائية حوالي 604 مليون كيلوواط – ساعة وهو ما يعادل 2% من الطاقة المستهلكة في الدنمارك .

وفي العقد الأخير تطور استخدام عَنفات الرياح في بعض الدول الأوربية . ففي عام 1993 كانت الطاقة المولدة من عَنفات الرياح في المملكة المتحدة 202000 ميغاواط – ساعة . وفي عام 1993 ارتفع هذا الرقم إلى 317000 ميغاواط – ساعة .

1-10-4 العَنفات (التوربينات) الريحية ذات السعات الصغيرة (Small Size Wind Turbines)

منذ زمن طويل يتم تصنيع التوربينات الريحية لتوليد الطاقة الكهربائية لتزويد بعض الحقول والمنازل المنعزلة والمجتمعات النائية وشحن بطاريات القوارب والكرفانات . وفي الوقت الحالي تستغل طاقة الرياح لتزويد طاقة غرف (كابينات) التلفون في المناطق النائية . إن كلفة عَنفات الريح الصغيرة - بالنسبة للكليوواط المولدة – تكون أعلى من كلفة العَنفات ذات السعة المتوسطة ، وفي كلتا الحالتين لا يمكنها منافسة الطاقة

الكهربائية المولدة من الطرق التقليدية ، ومع ذلك يتم استخدام هذه المنظومات في المناطق النائية حالياً . وقد استطاعت إحدى الشركات البريطانية بيع أكثر من 20000 عَنفة رياح صغير يقوم بتوليد حوالي 50 واط ، إذ تستخدم لشحن البطاريات . وهناك نشاط واسع لتصنيع بعض المنظومات الصغيرة والمتوسطة السعة التي تتضمن ماكنة ديزل كمصدر مساعد مع خزن لفترات قصيرة بالبطاريات يتم استخدامها عندما تكون الرياح ساكنة لفترة طويلة نسبياً . وهذه المنظومات تكون مكلفة في المناطق التي توجد فيها الشبكة الكهربائية ، ولكنها ذات مردود اقتصادي في الأماكن البعيدة كالجزر المنعزلة وغيرها .

11-4 الإمكانيات المتاحة لطاقة الرياح

بعد مسح المساحة الكلية على سطح الكرة الأرضية للمناطق المناسبة لنصب توربينات الرياح فيها، قام فان ويجك وآخرون في عام 1991 بتقدير الإمكانيات النظرية المتاحة في العالم في هذه المناطق ، فكانت 20000 تيراواط – ساعة السنة ($Twh\ yer^{-1}$) ، وهذه تعادل ضعف الاستهلاك العالمي للطاقة الكهربائية في عام 1987 والذي كان 900 تيراواط – ساعة . وبعد الأخذ في الاعتبار المحددات المختلفة التي تواجه نصب مثل هذه المنظومات ، توصل هذا الفريق من علماء الطاقة إلى أنه يمكن نصب عَنفات رياح بسعة 450000 ميغاواط (1 ميغاواط = 10^6 واط) لغاية عام 2020، وهذه الكمية ستقوم بتوليد ما يقارب من 900 تيراواط – ساعة في السنة وهو ما يعادل 10% من الاستهلاك العالمي للطاقة الحالي أو 3.5% من الاستهلاك المتوقع في عام 2020 ، طبقاً لتقدير مجلس الطاقة العالمي . وهذه الكمية المولدة ستمنع انبعاث 800 ميلون طن من ثاني أكسيد الكربون لو أنّ توليد الطاقة الكهربائية تمَّ من المحطات التي تستخدم الفحم الحجري .

لقد بينت جمعية طاقة الرياح الأوربية أنهّ بالإمكان توليد 10% من الطاقة الكهربائية المستهلكة في دول أوربا في عام 2030 مستخدمة عَنفات رياح بسعة 100 ميغاواط موزعة في أوروبا على مساحة مقدارها 5400 كم^2 . وأن 99% من هذه المساحة يمكن استخدامه لأغراض الزراعة ، بينما المتبقي (1%) هو المساحة اللازمة لتشييد قواعد عَنفات الرياح والطرق المساندة وغيرها .

ونظراً إلى التطورات الحالية فإنه من المتوقع أن يزداد استخدام طاقة الرياح في مختلف أنحاء العالم . ففي عام 1994 كانت المنظومات المنصوبة ذات سعة تزيد على 3.5 جيغاواط (1 جيغاواط = 10^9 واط) معظمها كان في أمريكا والدنمارك ثم بقية الدول كالمملكة المتحدة وألمانيا وإسبانيا والهند . وكان البرنامج البريطاني مشابهاً لبرنامج كاليفورنيا إذ تم نصب أكثر من 20 مزرعة رياح في عام 1994 معظمها استخدم عَنفات ذات سعة 300-400 كيلوواط تم تصنيع أغلبها في الدنمارك واليابان .

12-4 التأثيرات البيئية لاستخدام طاقة الرياح

إن تطور استخدام طاقة الرياح له فوائد ومساوئ بيئية . ولتوسيع إنتاج الطاقة من هذا المصدر يجب أن تكون المحاسن في حدها الأعلى بينما تكون المساوئ في حدها الأدنى.

1-12-4 الفوائد البيئية

إن توليد الطاقة الكهربائية من طاقة الرياح لا يتضمن انبعاث ثاني أكسيد الكربون أو سقوط الأمطار الحامضية أو ملوّثات أخرى . فاستخدام طاقة الرياح يقلل الاعتماد على الوقود التقليدي والوقود النووي . وبالإضافة إلى ذلك فإن العَنفات الرياح لا تحتاج إلى مصادر مياه كبعض المصادر التقليدية والمتجددة .

2-12-4 المساوئ البيئية المكتسبة

المشاكل البيئية الناتجة عن استخدام منظومات طاقة الرياح هي الضجيج، والتداخل الكهرومغناطيسي ، والتأثيرات البصرية كانعكاسات أشعة الشمس من شفرات العَنفات الريحية أثناء دورانها .

أ - ضجيج التوربين الريحي

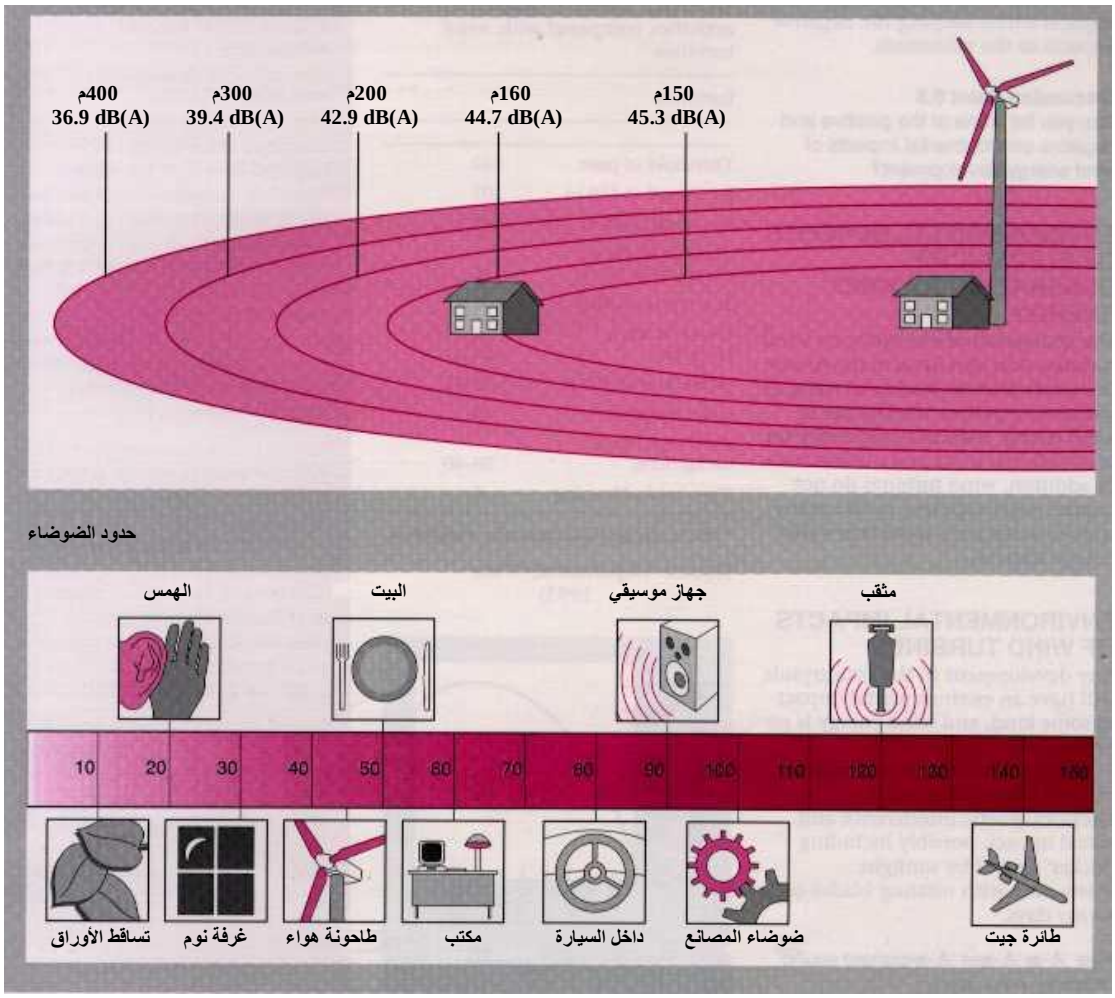
لا تعتبر العَنفات الريحية عند مقارنتها مع مكائن أخرى ذات ضجيج عالٍ مثلما هو مبين بالجدول (3-1) . ولكن هنالك بعض المواقع التي يتم فيها ملاحظة بعض الضجيج غير المريح . ويوجد نوعان للضجيج : أولهما يصدر من المعدات الكهربائية الميكانيكية المستخدمة في تقنية طاقة الرياح كصندوق التروس والمولد ، وهذا يسمى "بالضجيج

الميكانيكي" . أما ثانيهما فهو ناتج من تداخل تيار الهواء مع الشفرات ويسمّى "بالضجيج الايروديناميكي" .

والضجيج الميكانيكي (Mechanical Noise) هو المشكلة الرئيسيّة، ولكن من السهل تخفيضه باستخدام مجمع تروس أكثر هدوءاً أو وضع الأدوات الميكانيكية في هياكل معزولة لتخفيف الصوت . أما الضجيج الايروديناميكي (Aerodynamic Noise) فيعتمد على شكل الشفرة ، والتداخل بين الهواء والشفرة والبرج ، وحافة الشفرة ورأسها، وعلى كون الشفرة تعمل أو ساكنة ، ونوعية الرياح . ويزداد الضجيج الايروديناميكي عادة مع سرعة الدوران ، ولهذا فإن قسماً من العَنفات يكون مصمماً للدوران بسرعة قليلة عندما تكون سرعة الرياح قليلة . ومعظم عَنفات الرياح التجارية تخضع لقياسات ضجيج وفقاً للوائح التي وضعتها وكالة الطاقة العالمية أو القوانين الدنماركية . وتزودنا قياسات الضجيج بالمعلومات التي يمكن على أساسها نصب توربين الرياح في الموقع المناسب أو للسيطرة على تأثير الضجيج . وفي الدنمارك فإن القوانين تنص على أنه لا يمكن نصب عَنفات الرياح في المناطق السكنية إذا كان الضجيج الصادر منها يتجاوز 40 دسيبل (dB) . وفي المملكة المتحدة فإن حدود الضجيج في المناطق القريبة من الطرق يجب أن لا تزيد على 68 دسيبل . ويبين الشكل (4-15) مسار الضجيج الصادر من أحد عَنفات الرياح .

جدول (3-1) : الضجيج لفعاليات مختلفة مقارنة بعَنفات (توربينات) الرياح

المصـــــــــــدر	مستوى الضوضاء (dB)
طائرة جيت على علوّ 250 م	105
مثقاب كهربائي	95
شاحنة تسير بسرعة 48 كم/ سا	65
دائرة عمل مزدحمة	60
سيارة تسير بسرعة 64 كم / سا	55
عَنفة ريحية على بعد 350 م	35-45
غرفة نوم هادئة	20



شكل (4-15): مسار الصحيح الصادر من أحد عَنفات (توربينات) الرياح

ب - التداخل الكهرمغناطيسي

عند نصب عَنفات الرياح بالقرب من مناطق تستخدم الراديو والتلفزيون والمرسلات والمستقبلات فإنه من المحتمل جداً أن تنعكس بعض الموجات بطريقة تجعل الموجات المعكوسة تتداخل مع الموجات الأصلية قبل وصولها إلى الجهاز ، وهذا قد يسبب تشوّها في الموجه التي تصل إلى المستخدم . وينشأ التداخل الكهرمغناطيسي من نوع مادة الشفرات وشكلها . فإذا كانت الشفرات مصنوعة من معدن فإن التداخل محتمل الحدوث إذا كانت العَنفة قريبة من مناطق وجود هذه الأجهزة. أما الشفرات الخشبية فإنه عادة تمتص الموجات بدلاً من عكسها، والأبراج المربعة تعكس أكثر من الأبراج المدورة وذلك لزيادة مساحة

سطحها . وأكثر المنظومات تأثراً بهذا النوع من الضجيج التلفزيونات ومنظومات اتصالات المايكرويف ، لذا وضعت بعض الوكالات معلومات كافية لتجنب مثل هذه التداخلات في المناطق التي توجد فيها هذه المنظومات .

جـ - التأثيرات البصرية

تتحّدد هذه التأثيرات بعدة عوامل مثل حجم العَنفة وتصميمها ، وعدد الشفرات ، ولونها ، وعدد وترتيب العَنفات في الحقل . ويتحدد قبول بعض المواطنين بوجود العَنفات الريحية بعدة عوامل أهمها عامل الثقافة وفهم مختلف التقنيات ، ورأيه في أفضل مصدر من مصادر الطاقة . وللصحف والمجلات التي تنشر أحياناً الأخبار عن مصادر الطاقة المختلفة تأثير كبير في موقف بعض المواطنين . وفي دراسة أجريت في المملكة المتحدة عام 1989 تبين أن 35% من المواطنين الذين تكونت منهم العيّنة اعَتبَروا بأن منظومات طاقة الرياح تساهم في تشويه المنظر .

أسئلة تقويمية

1. كيف تتكون الرياح . وما هي العلاقة بين الطاقة التي يمكن الحصول عليها وسرعة الرياح ؟
2. كيف يحدث نسيم البر والبحر ؟
3. متى استخدم الإنسان طاقة الرياح ؟ وفي أي مجال تم استخدامها ؟
4. كيف تعمل العَنفات الريحية ؟
5. ما هي الأنواع الشائعة من طواحين الهواء ؟
6. ما الفرق بين عَنفات الرياح الأفقية المحور و عَنفات الهواء العمودية المحور ؟
7. ما هو تأثير عدد العَنفات على كفاءة العَنفات الريحية ؟ وما هي القوى المؤثرة على هذه العَنفات ؟
8. كيف يتم تقدير سرعة الرياح في موقع معين ؟
9. ما هي الإمكانات المتاحة لطاقة الرياح ؟ ومتى يمكن أن تصل منظومات طاقة الرياح إلى التطبيق الاقتصادي ؟
10. ما هي التأثيرات البيئية الناتجة عن استخدام طاقة الرياح ؟
11. هل لشكل الأرض حول موقع منظومة العَنفات الهوائية تأثير على الطاقة المتصلة من الرياح ؟
12. أيهما أفضل نصب منظومة رياح على ساحل البحر أم وسط منطقة زراعية بها أشجار ؟

الفصل الثالث

الخلايا الشمسية الفولطاضوئيّة

1-3 مقدمة عن الخلايا الشمسية

2-3 المبادئ الأساسية لعمل الخلايا الشمسية

3-3 الخصائص الكهربائية للخلايا والألواح الشمسية السلكونية

4-3 بعض أنواع الخلايا الشمسية الفولطاضوئيّة
- الخلايا السلكونية احادية البلورية
- الخلايا السلكونية الشريطة
- الخلايا السلكونية متعددة البلورية
- خلايا الغاليوم ارسنايد

5-3 الخلايا ذات الأغشية الرقيقة
- الخلايا السلكونية العشوائية
- خلايا الكوبر انديوم ديسلنايد
- خلايا الكادميوم تليرايد

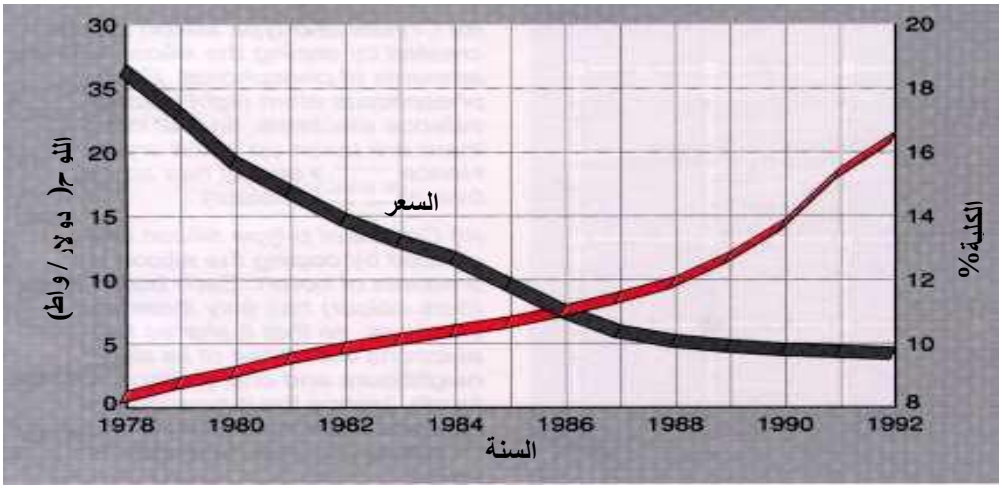
6-3 منظومات الخلايا الفولطاضوئيّة المركزة

7-3 تطبيقات الخلايا الفولطاضوئيّة
- تطبيقات الخلايا الشمسية في المناطق النائية
- تطبيقات الخلايا الفولطاضوئيّة في بعض البلدان النامية
- استخدام المنظومات الفولطاضوئيّة للربط مع الشبكة الكهربائية

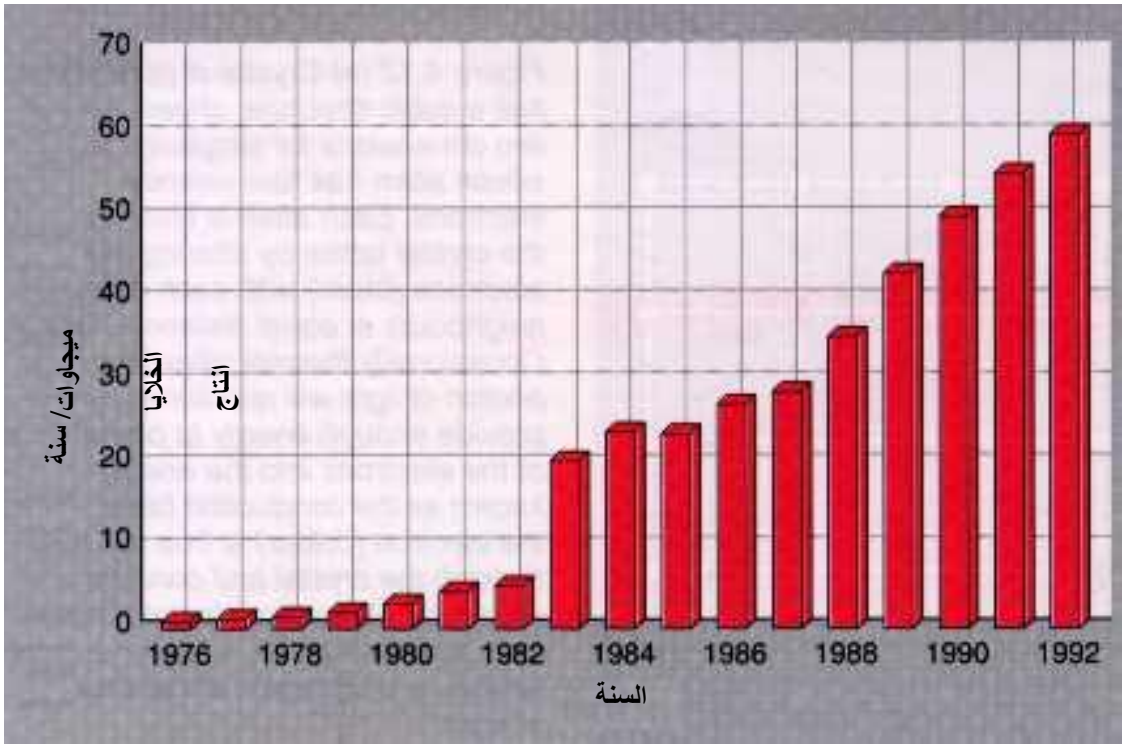
8-3 استخدام الخلايا الشمسية في الفضاء

1-3 مقدمة عن الخلايا الشمسية

إن تحويل أشعة الشمس المباشرة إلى طاقة كهربائية هو أحد المنجزات العلمية الكبرى في القرن العشرين والألفية الثانية ، وهو أفضل التقنيات المستخدمة حالياً في مجال الطاقة المتجددة . لقد بدأت هذه التقنية منذ عقود عديدة لكنها دخلت مرحلة الاستغلال الفعلي عند استخدامها في برامج الفضاء في نهاية الخمسينات من هذا القرن . ولكن العائق في استخدامها على نطاق واسع ومن قِبل عموم الناس هو كلفتها العالية . ولقد انخفض سعر الخلايا الشمسية (Photovoltaic Cells) مئات المرات في الوقت الحاضر عما كان عليه في بداية الستينات ، ولكنها لا تزال مكلفة نسبياً إلى حد الآن . والحقيقة هي عدم وجود أية صعوبات تقنية تمنع توسيع انتشار هذه المنظومات . فمدى انتشار استخدامها يعتمد على كلفة الإنتاج وزيادة الكفاءة . وخلال الأعوام المنصرمة حدث تقدم واسع في إنتاج الخلايا بكلفة معقولة ، وازدادت كفاءتها إلى أن وصلت حوالي 30% في الظروف المخبرية . ويبين الشكل (3-1) تناقص سعر إنتاج الخلايا وزيادة كفاءتها منذ نهاية السبعينات وحتى بداية التسعينات . وعلى الرغم من الكلفة العالية للطاقة الكهربائية المنتجة من الطاقة الشمسية عند مقارنتها بأسعار إنتاج الطاقة الكهربائية بالطرق التقليدية فإن سوق الخلايا الشمسية ما فتئ ينمو . وقد نصبت عشرات الآلاف من المنظومات في تطبيقات مختلفة كالإنارة والاتصالات ، وضخ المياه ، وشحن البطاريات ، وتشغيل ثلاجات الأدوية وغيرها من الاستخدامات . ويبين الشكل (3-2) زيادة كمية الإنتاج السنوي للأسطح الشمسية الفولطاضوئية منذ عام 1976 ولغاية 1992 . ومعظم تقنيات الخلايا الشمسية يتم تطبيقها في المناطق النائية حيث تبقى الخلايا الشمسية هي الأفضل استخداماً وذلك لسهولة نصبها وعدم حاجتها إلى صيانة مستمرة وعدم مساهمتها في تلوث البيئة .



شكل (3-1): تناقص سعر إنتاج الخلايا الشمسية وزيادة كفاءتها للفترة من 1978 ولغاية 1992



شكل (3-2): الإنتاج السنوي للأسطح الشمسية الفولطاضوئيّة للفترة من عام 1976 ولغاية عام 1992

المادة الأولية التي تصنع منها الخلايا هي السليكون ، وهو متوفر دائماً في الطبيعة . وسينمو سوق الخلايا الشمسية بصورة كبيرة عندما تصل كلفة إنتاج الطاقة الكهربائية منها إلى كلفة مثيلتها الناتجة من المصادر الأخرى . وقد تم إلى حد الآن انخفاض سعر اللوح الشمسي الفولطاضوئي بالنسبة للواط من 4.5 دولار إلى 2.5 دولار (لاحظ أنه في الدول العربية تكون كلفة الواط بعد تركيب كافة الأنظمة المصاحبة من 8 إلى 10 دولار) . وإذا استمر هذا النقصان فستصبح منظومات الطاقة الشمسية منافسة لسعر مولدات الديزل، وعندما يصل سعر اللوح إلى 1.5 دولار للواط أو سعر منظومة الخلايا الشمسية بسعر 2.5 إلى 3.0 دولار لكل واط فإنه بذلك يمكن إنتاج طاقة كهربائية بكلفة 12 سنت أمريكي لكل كيلوواط ساعة ، علماً بأن الهدف الحالي المحدد هو إنتاج كهرباء بكلفة 6 إلى 9 سنت لكل كيلوواط – ساعة ويتطلب ذلك فترة زمنية طويلة .

2-3 المبادئ الأساسية لعمل الخلايا الشمسية

تتكون الخلية الشمسية من خط اتصال يفصل بين طبقتين خفيفتين من مادة شبه موصلة إحداهما موجبة وتدعى (P) ، بينما الأخرى سالبة وتدعى نوع (N) . وللسهولة سنعتبر بأن المادة شبه الموصلة المستخدمة هي السليكون (بالرغم من أننا سنرى لاحقاً بعض الخلايا

المصنوعة من مادة غير السليكون) . إن النوع (N) مصنوع من مادة السليكون البلوري المطلي بطبقة خفيفة من شوائب الفسفور(Phosphore) بطريقة تجعل طبقة الشوائب تسيطر على الفائض من الإلكترونات الحرة . وبما أن الإلكترونات (Electrons) ذات شحنة سالبة فإن السليكون المطلي بهذه الطريقة يدعى نوع (N) السالب (Negative Charge) . أما النوع (P) فهو مصنوع أيضاً من مادة السليكون البلوري ولكنه مطلي بطبقة خفيفة من الشوائب تدعى البورون (Boron) تجعل المادة ذات عجز بالنسبة للإلكترونات الحرة . وهذه الإلكترونات المفقودة تدعى ثقوباً (Holes) ، وهذا يعني أن الشحنة الموجبة في هذه الطبقة أكثر من الشحنة السالبة ، فلذلك يعتبر السليكون المطلي بهذه الطريقة هو نوع (P) الموجب (Positive Charge) .

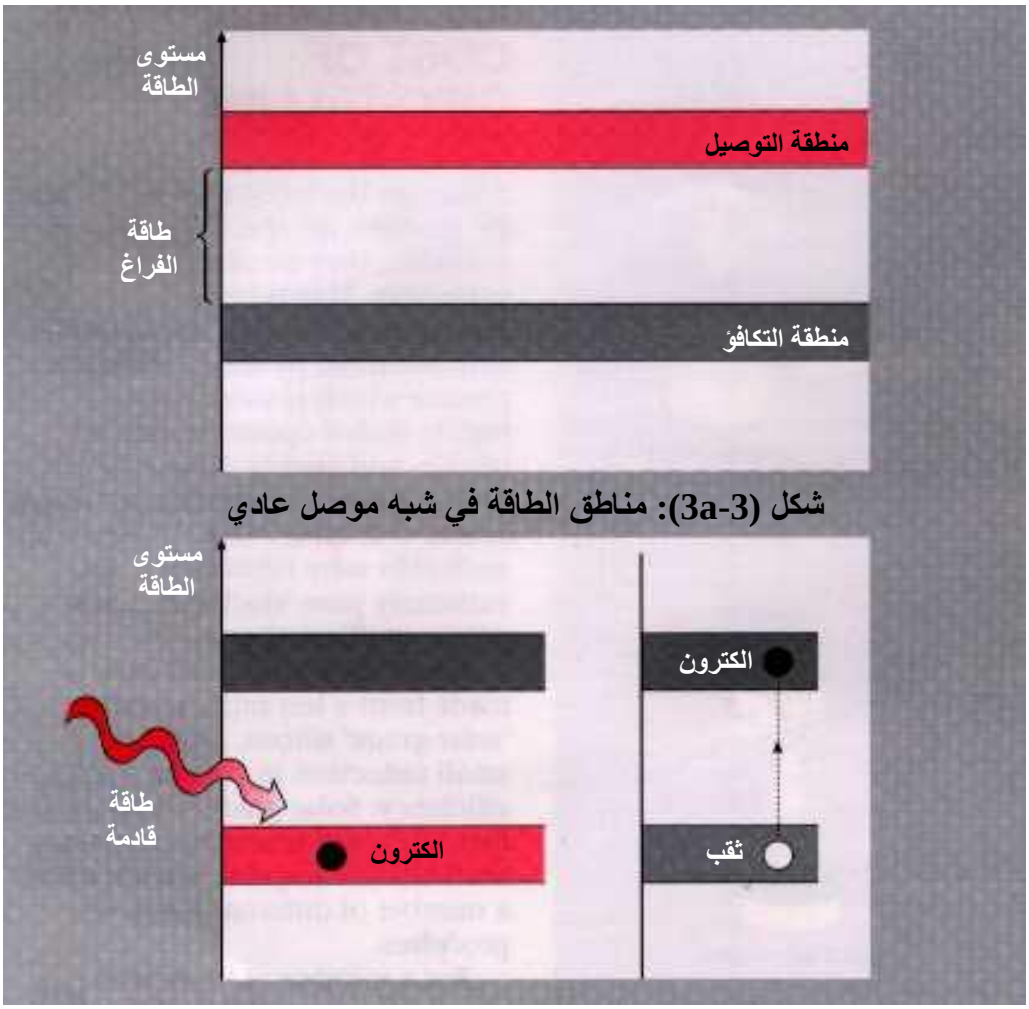
وعند ربط هاتين الطبقتين المختلفتين من المادة شبه الموصلة ببعضهما البعض سيظهر خط تماس بينهما يدعى خط الارتباط (P-N Junction) . ويتكون بذلك مجال كهربائي في منطقة خط التماس يقوم بتحريك الجسيمات السالبة الشحنة إلى اتجاه معين والجسيمات الموجبة الشحنة إلى اتجاه معاكس. ويكون المجال الكهربائي المتكون مشابهاً للمجال الذي يمكن توليده عند حك مشط بلاستيكي بمادة من القماش . فعند سقوط فوتونات (Photons) الإشعاع الشمسي على منطقة التماس (P-N Junction) ستنقل تلك الفوتونات طاقتها إلى بعض الإلكترونات في المادة مسببة رفعها إلى مستوى طاقة أعلى . ففي الظروف الاعتيادية تقوم الإلكترونات بالمساعدة على تماسك المواد مع بعضها بعضاً مكونة ربطاً متكافئاً مع الذرات القريبة ولكنها لا تستطيع الحركة . وفي هذه الحالة المتحفزة ، بعد سقوط الإشعاع الشمسي، فإن الإلكترونات تكون حرة لتوليد تيار كهربائي يمر خلال المادة . وعندما تتحرك الإلكترونات تترك وراءها ثقوباً (Holes) في المادة تتحرك أيضاً . فعند تكوّن منطقة الارتباط (P-N Junction) فإن بعض الإلكترونات المجاورة لها تنجذب من جهة (N) لتتحد مع الثقوب في جهة (P) . وبنفس الطريقة فإن الثقوب المجاورة (الموجبة) لمنطقة الارتباط تنجذب لتتحد مع الإلكترونات (السالبة) في جهة (N) القريبة .

والتأثير النهائي الناتج من هذا الوضع حول منطقة الارتباط هو وجود شحنة موجبة أكثر من السابق على جهة (N) ووجود شحنة سالبة أكثر من السابق على جهة (P) . وهذا يعني وجود مجال كهربائي معاكس حول منطقة الارتباط يكون موجباً حول جهة (N) وسالباً

حول جهة (P) . والمنطقة التي تقع حول منطقة الارتباط ستكون مفرغة من الشحنات (الإلكترونات والثقوب) وتسمى بذلك منطقة التفريغ أو الاستنزاف (Depletion Region) .

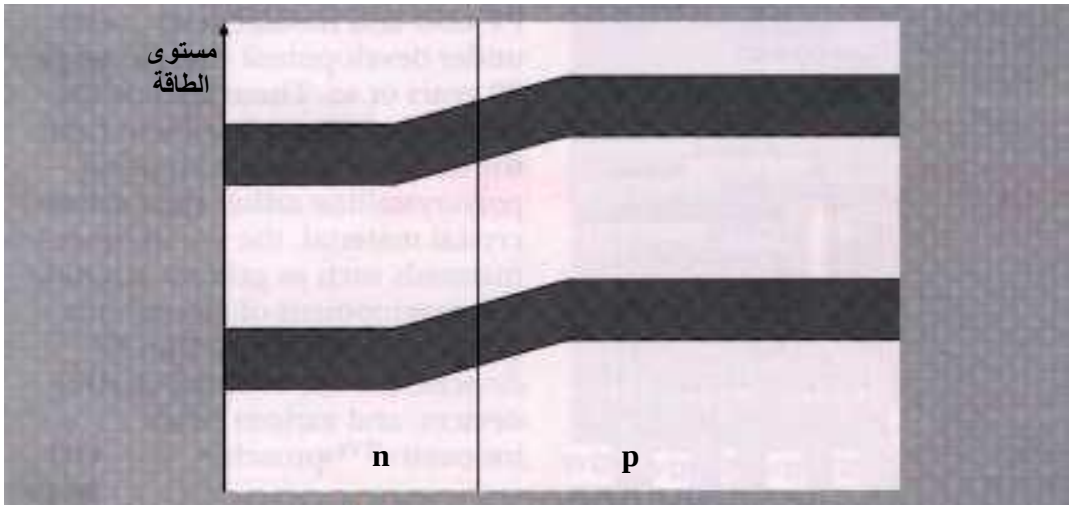
وعند تهيج الإلكترونات في منطقة الاتصال بواسطة فوتونات الإشعاع الشمسي ستقفز إلى منطقة التوصيل (Conduction Band) تاركة ورائها ثقوباً في منطقة التكافؤ (Valance Band) وبذلك ستتولد حوامل من الشحنة المزدوجة (زوج من الكترون وثقب) ، وتحت تأثير المجال الكهربائي المعاكس ستتجه الإلكترونات إلى جهة (N) وتتجه الثقوب إلى جهة (P) .

يمكن تصوير العملية كمستويات طاقة في المادة كما في الشكل (3-3) . تدخل الإلكترونات المتهيجة بواسطة الفوتونات منطقة الارتباط ، ويمكن تصورها متدحرجة إلى الأسفل تحت تأثير المجال الكهربائي في منطقة الاتصال . وكذلك يمكن تصوير الثقوب وكأنها تطفو إلى الأعلى تحت تأثير المجال في منطقة الارتباط إلى جهة (P) .

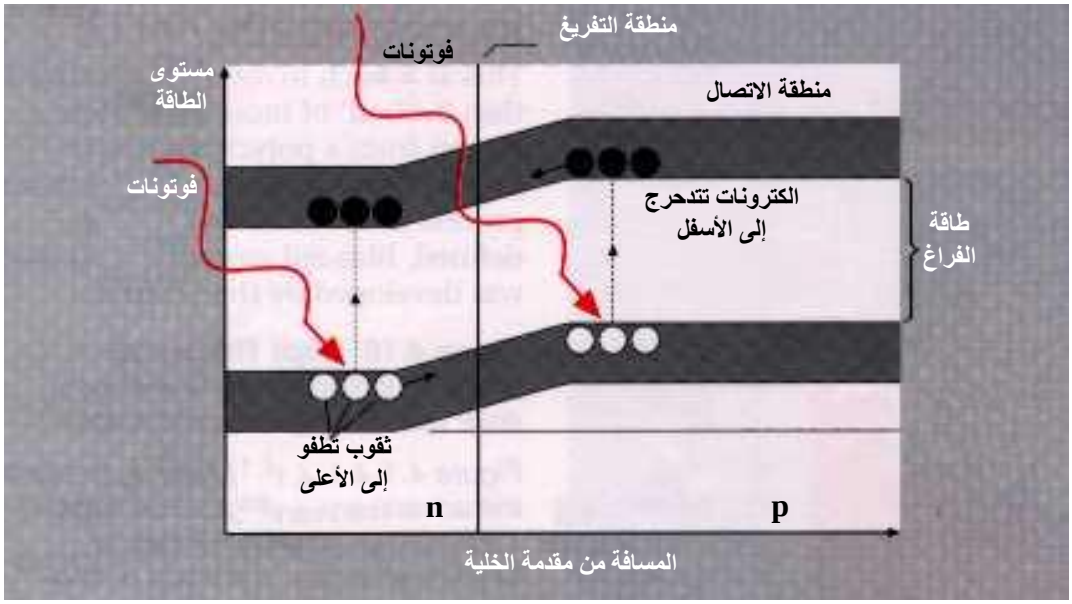


شكل (3a-3): مناطق الطاقة في شبه موصل عادي

شكل (3b-3): عند امتصاص طاقة الإشعاع يتنقل الالكترون الى منطقة التوصيل تاركاً ثقباً في منطقة التكافؤ



شكل (3c-3): عند اتحاد أشباه موصلات من نوع p و n فان مناطق الطاقة المختلفة لهما تتحد وبذلك يتكون توزيع طاقة جديد



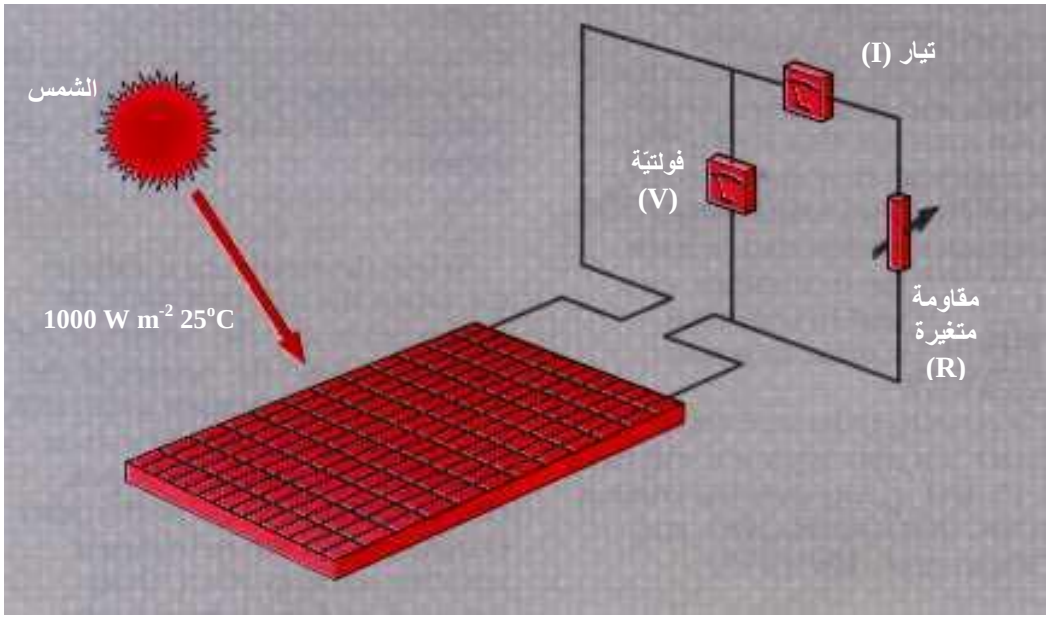
شكل (3d-3): في منطقة الاتصال تقوم فوتونات الضوء بتهّيج الالكترونات وانتقالها من منطقة التكافؤ إلى منطقة التوصيل فتتدحرج الالكترونات الى منطقة (n) وتطفو الثقوب إلى منطقة (p)

إن سريان الإلكترونات إلى جهة (N) هو ما يسمى بالتيار الكهربائي . فإذا كانت هنالك دائرة خارجية لمرور التيار فيها فإن الإلكترونات المتحركة تترك شبه الموصل إلى أحد الأسلاك الخارجية في أعلى الخلية وفي نفس الوقت تتجه الثقوب إلى اتجاه معاكس خلال المادة إلى أن تصل إلى السلك الخارجي الآخر في قاع الخلية ، وعندها ستمتلئ بواسطة الإلكترونات الداخلة في نصف الدائرة الخارجية الآخر .

إن توليد القوة الكهربائية يتطلب وجود فولتية وتيار ، ولهذا فإنه لإنتاج قوة كهربائية على الخلية يتطلب توليد فولتيّة ، بالإضافة إلى التيار المجهز بواسطة حركة الإلكترونات . أما الفولتية فتجهز بواسطة تأثير المجال الكهربائي الداخلي حول منطقة الاتصال (P-N Junction) . والخلية الشمسية الاعتيادية الواحدة تنتج نصف فولط (0.5V) وتياراً مقداره 2.5 أمبير ، وهذا يعادل طاقة عظمى تصل إلى 1.25 واط . ويمكن لبعض الخلايا إنتاج تيار أكبر وفولتيّة أعلى اعتماداً على نوعية التصميم .

3-3 الخصائص الكهربائية للخلايا والألواح الشمسية السليكونية

أبسط تعريف لخلية شمسية ذات مساحة مقدارها 100.0 سنتمتر مربع هو أنها بطارية شمسية تقوم بإنتاج فولتيّة مقدارها نصف فولط (0.5V) وتيار يتناسب مع شدة الإشعاع الشمسي يصل إلى مقدار يتراوح بين 2.5-3.0 أمبيرفي حالة الإشعاع الشمسي الأقصى . وقبل استخدام الخلية الشمسية (Photovltaic) يجب التأكد من سلوكها عند ربطها إلى حمل معين. والشكل (3-4) يبين خلية شمسية مساحتها 100 سنتمتر مربع مربوطة إلى مقاومة متغيرة (R) بالإضافة إلى ربط جهازي الأميتر لقياس التيار والفولتميتر لقياس فرق الجهد أو الفولتيّة . (عادة يتم قياس أداء الخلية تحت ظروف قياسية ، وهي إشعاع شمسي مقداره 1000.0 واط في المتر المربع ودرجة حرارة 25 درجة مئوية) . وعندما تكون المقاومة غير محدودة (ما لا نهاية) يكون التيار (I) في الدائرة صفراً ويكون فرق الجهد (V) أعلى ما يمكن ، (Open Circuit voltage – V_{oc}) وهذا ما يسمى بفولتيّة الدائرة المفتوحة . وفي الحالة المعاكسة تماماً ، أي عندما تكون المقاومة صفراً وتكون الخلية كدائرة مغلقة ، فإن التيار سيكون بحالته العظمى وهذا ما يسمى بتيار الدائرة المغلقة (Short Circuit Current Isc) . وإذا قمنا بتغير المقاومة بين الصفر والمالا نهاية فإن التيار والفولتية سيتغيران كما في الشكل (3-5) والذي يسمى منحنى خصائص الفولتية والتيار (I-V Curve) . ويمكن بعد النظر إلى المنحنى الاستنتاج بأن الخلية تنتج طاقتها القصوى (Maximum Power) عندما يتم تغيير المقاومة الخارجية حتى تكون قيمتها مساوية لنقطة الطاقة العظمى (Maximum Power Point) على المنحنى . وعندما يكون الإشعاع الشمسي أقل من 1000 واط بالمتر المربع فإن شكل المنحنى يكون مشابهاً للمنحنى الأول ولكن المساحة تحت المنحنى ستكون أقل ونقطة الطاقة العظمى ستتحرك إلى اليسار . إن تيار الدائرة المفتوحة I_{oc} يتناسب طردياً مع زيادة درجة حرارة الخلية T ($I_{0c} \propto T$) T .



شكل (3-4): خلية شمسية مربوطة إلى مقاومة متغيرة ومقياس للفولتيّة ومقياس للتيار

شكل (3-5): منحنى خصائص الفولتيّة والتيار لخلية سلكونية تحت الظروف الاعتيادية

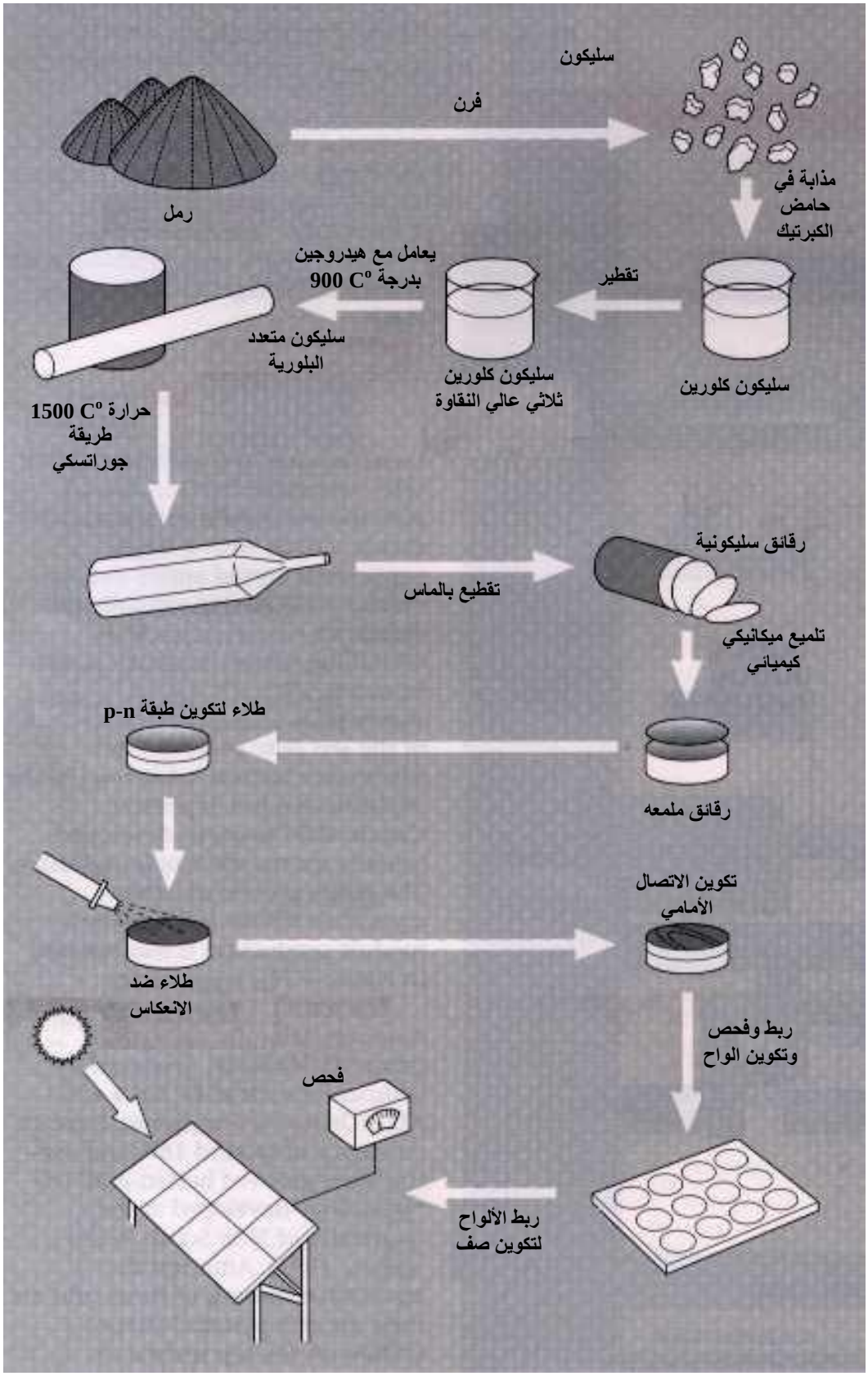
ويمكن أن نستنتج من النظر إلى الشكل (3-5) بأن خلية ذات مساحة 100 سنتمتر مربع يمكن أن تنتج جهداً كهربياً (فولتيّة) مقدارها نصف فولط وبتيار مقداره أقل من 3.0 أمبير. وبما أن معظم تطبيقات الخلايا الشمسية تقوم بشحن بطارية ذات 12 فولط فإن لوحاً شمسياً مكوناً من 26 خلية شمسية مربوطة على التوالي تؤمن الحصول على حوالي 13 فولط وهو كافٍ لشحن بطارية ذات 12 فولط حتى ولو كان الجو غير مشمس .

4-3 بعض أنواع الخلايا الفولطاضوئية

1-4-3 الخلايا السلكونية أحادية البلورية

معظم الخلايا الفولطاضوئية المصنعة لغاية فترة قريبة كانت من سليكون نقي ذي هيكل مستمر أحادي البلورية (Single Crystal) وبدون شوائب (Impurities). والسليكون أحادي البلورية يصنع عادة من حبوب صغيرة من البلور مسحوبة ببطء من كتلة مذابة من سليكون متعدد البلورية بطريقة متقدمة وغالية الثمن تدعى بعملية زوجرالسكي (Czochralski Process) طورت خصيصاً للصناعة الإلكترونية . والخطوات الكاملة لإنتاج الخلية السلكونية الأحادية البلورية واللوح الشمسي مبينة في الشكل (3-6) . ومعظم الخلايا السلكونية الأحادية البلورية المتوفرة في الأسواق ذات كفاءة تقارب16%. وبالرغم من ميزة الكفاءة العالية التي تختص بها الخلية الشمسية الأحادية البلورية فإن سعرها مرتفع جداً لكونها مصنوعة من سليكون متعدد البلورية وعالي النقاوة لكون طريقة التصنيع غالية وتحتاج إلى عمال مهرة . ويتم حالياً تصنيع بعض الخلايا من سليكون أقل نقاوة ، وهذه الخلايا تكون أرخص سعراً وتنتج بكلفة أرخص باستخدام عمليات مختلفة قليلة الكلفة ولكنها ذات كفاءة أقل وعمر زمني أقل .

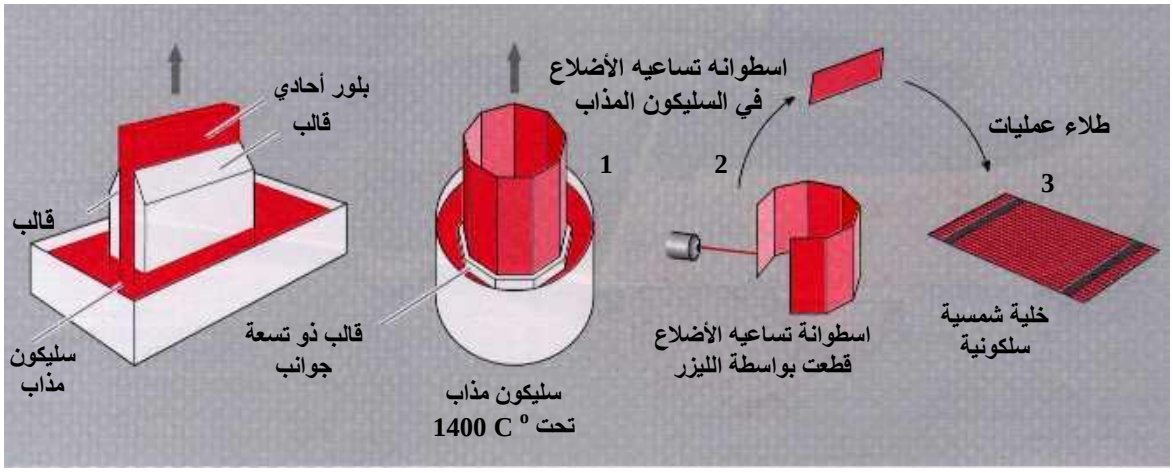
لقد تم خلال العشرين سنة الماضية تطوير طرق مختلفة لتقليل كلفة تصنيع الخلية الشمسية والألواح . من هذه الطرق تنمية السليكون على هيئة رقيقة أو شريط (Thin Film) أو استخدام سليكون متعدد البلورية بدلاً من أحادي البلورية (Polycrystalline Silicon) أو استخدام مواد أخرى مثل الغاليوم ارسنايد (Gallium arsenide) أو تصنيع خلايا غير بلورية كالخلايا السليكونية العشوائية (Amorphous Silicon) .



شكل (3-6): خطوات إنتاج خلية سلكونية أحادية البلورية ولوح شمسي

2-4-3 الخلايا السلكونية الشريطية

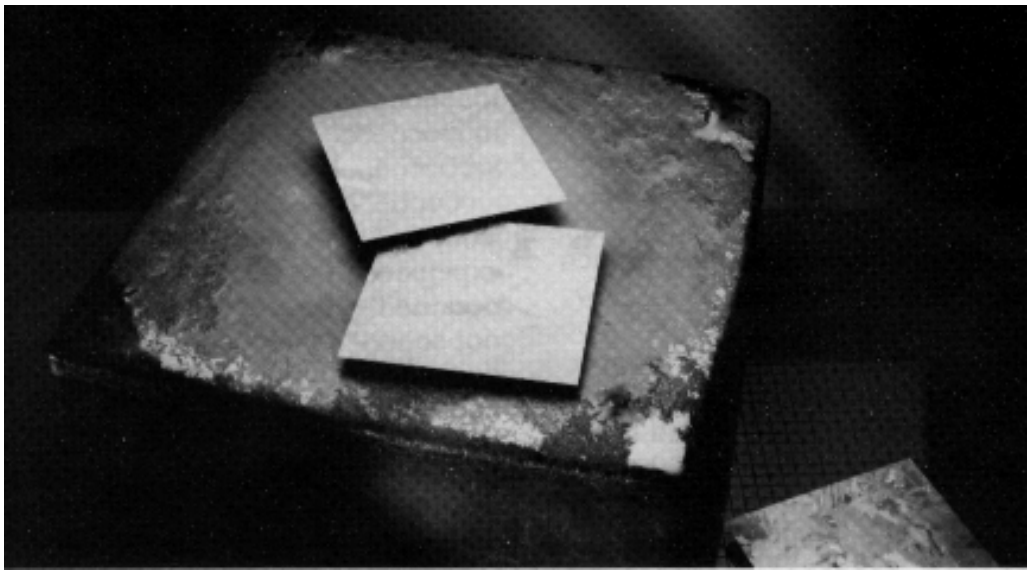
يتم في هذه الطريقة إنتاج شريط من السليكون الأحادي البلورية من سليكون متعدد البلورية أو من سليكون بلوري أحادي مذاب . والعملية الرئيسية المستخدمة تعتمد على تحديد الحافة وعملية إنماء تغذية الرقيقة (Edge-defined, film-fed growth process)، وقد تم استخدامها من قِبل شركة سولار موبيل الأمريكية (Solar Mobile) . ويبين الشكل (3-7) خطوات عملية إنتاج هذه الخلايا .



شكل (3-7): خطوات إنتاج خلية سلكونيه شريطية

3-4-3 الخلايا السلكونية المتعددة البلورية

يتكون السليكون المتعدد البلورية (Polycrystalline Silicon Cells) من حبيبات صغيرة من البلور الأحادي . ويمكن إنتاج طبقة رقيقة من السليكون المتعدد البلورية بعدة طرق أحدها يتضمن تكوين سبيكة من السليكون المتعدد البلورية المذاب ، ومن ثم يتم تقطيع السبيكة بمنشار رقيق إلى رقائق مربعة خفيفة كما هو مبين بالشكل (3-8) ، ويتم بعد ذلك تصنيعها بنفس طريقة تصنيع السليكون الأحادي البلورية .



شكل (3-8): سبيكة سليكونية كبيرة ورقائق مربعة خفيفة

بالرغم من كون الخلايا الكهروضوئية (Polycrystalline Photovollaic Cells) المتعددة البلورية أرخص وأسهل تصنيعاً من الخلايا الأحادية البلورية (Single Crystal Cells) إلاّ أنها أقل كفاءة وذلك لكون حاملات الشحنة (كالالكترونات والثقوب) المولدة من قِبل فوتونات الإشعاع الشمسي يمكن أن تتجمع على الحدود بين الحبيبات داخل السليكون المتعدد البلورية . وقد وجد بأنه عند عملية تصنيع المادة بطريقة تكون فيها الحبيبات كبيرة الحجم ويتم توجيهها من الأعلى إلى الأسفل ، وذلك للسماح للإشعاع الشمسي بالتغلغل بعمق خلال الحبيبات ، فإن كفاءة هذه الخلايا تتحسن . والألواح السليكونية المتعددة البلورية والمتوفرة في الأسواق الحالية تصل إلى كفاءة مقدارها 10% أو أكثر بقليل . ولامتصاص معظم الإشعاع الشمسي الساقط يجب أن يكون سمك الخلية السليكونية المتعددة البلورية عدة مئات من المايكرونات (واحد على المليون) ، ولكن إحدى الشركات الأمريكية (Astro power Inc) أثبتت بأنه يمكن استخدام تقنيات مختلفة لالتقاط الإشعاع الشمسي ، وبهذا يمكن أن يكون سمك الخلية ما يقارب 20 مايكرونا، وقد تصل كفاءة هذه الصفائح الرقيقة إلى حوالي 15%. وبالرغم من كون هذه الصفائح رقيقة جداً إلاّ أنها أكثر سمكاً من الصفائح المستخدمة في بعض الخلايا الأخرى كالخلية السليكونية العشوائية (Amorphous Silicon Cells) ولهذا تدعى أحياناً بالصفائح السميكة للخلايا المتعددة البلورية (Thick Polycrystalline Cells) . وفي عام 1994 تم نصب محطة في منطقة ديفز (Davis) بولاية كاليفورنيا ذات قدرة مقدارها 18 كيلوواط وتتكون من 312 لوحاً شمسياً تم تصنيعها من هذا النوع من الرقائق الخفيفة.

4-4-3 خلايا الغاليوم أرسنايد (Gallium Arsenide Cell)

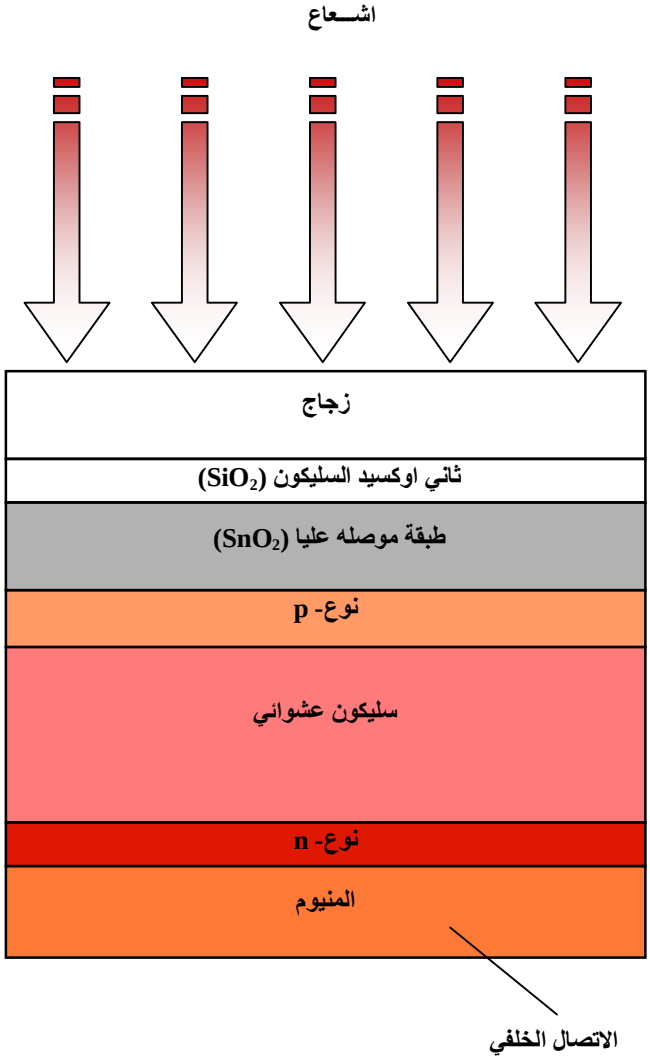
السليكون ليس المادة الوحيدة الملائمة للاستخدام في تصنيع الخلايا الكهروضوئية، فهناك مواد أخرى يمكن استخدامها كالغاليوم أرسنايد (Gallium Arsenide Cell) التي تمتلك هيكلا بلورياً مشابهاً للسليكون ، وهي تتكون من ذرات متعاقبة من الغاليوم والأرسنايد . ولكونها ذات معامل امتصاص عالٍ للضوء فإنها ملائمة جداً للاستخدام في تطبيقات الخلايا الشمسية ، وهي تتمتع بكفاءة جيدة ، ويمكن أن تعمل تحت ظروف درجة حرارة عالية نوعا ما بدون تناقص في أدائها كالخلايا السليكونية وبعض أشباه الموصلات التي تعاني من هذه المشكلة . وبهذه المواصفات يمكن استخدام خلايا الغاليوم أرسنايد في منظومات الخلايا الشمسية المركزة . ومن الأمور الأخرى التي يجب معرفتها هي أن كلفة تصنيع هذه الخلايا أعلى من كلفة تصنيع الخلايا السليكونية وذلك لكون عمليات إنتاجها غير متطورة حالياً . وتستخدم هذه الخلايا عند الحاجة إلى خلايا ذات كفاءة عالية كما هو الحال في تطبيقات الفضاء . وقد استخدمت أيضاً في تشغيل سيارة أنتجتها شركة جنرال موتورز أطلق عليها إسم صن ريسير (Sun Racer) وفازت عام 1987 بسباق عالمي للسيارات المسيرة بالطاقة الشمسية عندما قطعت مسافة 3000 كيلو متر بسرعة 66 كيلو متر في الساعة .

5-3 الخلايا ذات الأغشية الرقيقة (Thin Film Photovollaic Cells)

1-5-3 الخلية السليكونية العشوائية (Amorphous Silicon Cells)

يمكن تصنيع الخلايا الشمسية بطريقة أرخص من طرق تصنيع الخلايا البلورية الأحادية والمتعددة . وهذه الخلايا تدعى خلايا السليكون العشوائي (A-Si) وتكون ذرات السليكون فيها أقل ترتيباً من النوع البلوري . ففي السليكون العشوائي لا ترتبط كل ذرة ارتباطاً كاملاً مع الذرات المجاورة وإنما تترك ما يسمى بالرباط المتدلي (Dangling Bands) وتستطيع امتصاص إلكترونات إضافية عند إجراء عملية الطلاء . وعملية التصنيع تتم بواسطة خليط من غاز يحتوي على السليكون والهيدروجين (SiH_4) وكمية قليلة من الشوائب مثل البورون التي تتحلل كهربائياً بطريقة يمكن أن تكون طبقة رقيقة من السليكون العشوائي على قاعدة من مادة مناسبة كالفولاذ المرن (Elastic Stainless Steel) . إن الهيدروجين في هذا الغاز يقوم بتوفير إلكترونات

إضافية تتحد مع روابط السليكون المتدلية (Dangling Silicon Bands) لتكوين طبقة من السليكون والهيدروجين. والشوائب الموجودة في الغاز لها تأثيرها الاعتيادي بتوزيع حاملات الشحنة لتحسين القابلية التوصيلية للمادة . وتختلف خلايا السليكون العشوائي عن الخلايا المصنعة بطرق أخرى بالنسبة لمنطقة الارتباط (P-N Junction) إن تتكون في هذا النوع من الخلايا منطقة تسمى (P-I-N) وهي طبقة رقيقة جداً من نوع (P) من السليكون العشوائي تأتي بعدها طبقة داخلية (I) أكثر سمكاً من مادة السليكون العشوائي الخالي من الشوائب ، ثم طبقة رقيقة جداً نوع (N) من السليكون العشوائي . ويوضح الشكل (3-9) هيكلية هذه الخلية . والتأثير الكهروضوئي على الخلية السليكونية العشوائية مشابه لما في الخلايا السليكونية البلورية باستثناء أن سمك حيز الارتباط (Band Gap) أكبر لكنه غير محدد بصورة واضحة .



شكل (3-9): هيكلية خلية سليكونية عشوائية

وللخلية السليكونية العشوائية إيجابيات وسلبيات . ومن إيجابياتها أنها اقل سمكاً وأرخص سعراً من الخلايا السليكونية البلورية ، وهي أيضاً أكثر امتصاصاً للإشعاع الشمسي، كما أن عمليات تصنيعها تجري تحت ظروف درجة حرارة قليلة جداً مقارنة بالخلايا السليكونية البلورية ، ولهذا فهي تحتاج إلى طاقة أقل . وهي ملائمة جداً للإنتاج المستمر ويمكن طلاؤها على مواد مختلفة صلدة ومرنة كالحديد والزجاج والبلاستيك . ومن سلبيات الخلايا السليكونية العشوائية قلة كفاءتها مقارنة بالخلايا السليكونية البلورية الأحادية والمتعددة . إن أعلى كفاءة تم الحصول عليها في المختبر من هذا النوع من الخلايا الكهروضوئية لا تتجاوز 12% ، وإن كفاءتها تتناقص مع مدة تعرضها للشمس من 8% إلى ما يقارب 4% بعد عدة أشهر من الاستخدام أي أن عمرها الزمني قليل . كما أن مخلفاتها التي تحول إلى الأرسانيد (الزرنيج) ضارة بالبيئة .

وتجري محاولات كثيرة جادة لتحسين كفاءتها وحل مشكلة نقصان كفاءتها مع الاستخدام . إن إحدى الطرق المستخدمة لتحسين كفاءة التحويل هي وضع طبقتين من الأغشية الرقيقة واحدة فوق الأخرى بحيث إن كلا من هاتين الطبقتين تمتص جزءاً من الطول الموجي للإشعاع الساقط . وحيز الارتباط (Band Gap) يمكن توسيعه بواسطة استخدام طبقة من الكربون تجعل المادة أكثر امتصاصاً للضوء على النهاية الزرقاء للحزمة الضوئية . وبالطلاء بمادة الجرمنيوم (Germanium) فإن حيز الربط يقل مما يجعل المادة أكثر استجابةً للضوء على النهاية الحمراء من الحزمة . لذا فإن حيز الارتباط يكون عريضاً (Wide Band Gap) في منطقة الجزء العلوي للسيلكون العشوائي فيمتص فوتونات الضوء ذات الطاقة العالية في النهاية الزرقاء من الحزمة الضوئية التي يتبعها غشاء رقيق آخر من السليكون العشوائي ، وكل من هذين الغشائين مصمم لامتصاص جزء من الذبذبات الضوئية القصيرة القريبة من النهاية الحمراء للحزمة الضوئية (الشكل 3-10) . وبالإضافة إلى زيادة كفاءة الخلية من هذه الطريقة فإن وضع طبقات متعددة له فائدة أخرى وهي تقليل النقصان في الكفاءات التي تحدث في الخلية السليكونية العشوائية ذات طبقة الارتباط الواحدة .

شكل (3-10): استخدام طبقتين من الأغشية الرقيقة لتحسين كفاءة الخلية الشمسية العشوائية مع الاستخدام

بالرغم من الكفاءة الحالية المتدنية للخلايا السليكونيّة العشوائية فإنها تستخدم بصفة واسعة تجارياً وذلك لرخص أسعارها. وقد بلغت نسبة استخدامها في عام 1990 حوالي 30% من مجموع الخلايا المستخدمة في التطبيقات المختلفة .

والخلية السليكونية العشوائية ليست الوحيدة المناسبة بل هنالك بعض الخلايا المصنعة من تقنيات الأغشية الرقيقة (Thin Films) المتكونة من عدة شبه موصلات (Semiconductor) من بينها كوبر انديم ديسلنايد (CuIn Se_2 or CIS) وكادميوم تيلرايد (CdTe) وقد وصلت الخلايا المصنعة من هذه التقنيات إلى مرحلة الإنتاج التجاري في الوقت الحاضر .

2-5-3 خلايا الكوبراندیوم دیسلنايد (Copper Indium diselenide)

وهي مواد شبه موصلة مركبة من النحاس والانديوم والسلينايد (CIS) . وقد استخدمت في تصنيع خلايا وصلت كفاءتها مختبرياً إلى 12% . وقد قامت شركة سيمنس (Simens) الألمانية بتصنيع ألواح من نوع (CIS) ذات مساحة 30 سنتمتر مربع وبكفاءة تعادل 10% . وفي عام 1994 أعلنت بأنها يمكن أن تقوم بتصنيع هذه الخلايا على النطاق التجاري بالتعاون مع إحدى شركات الزجاج الأمريكية . وهذا النوع من الخلايا لا يعاني من مشكلة نقصان الكفاءة عند الاستخدام والذي ظهر في الخلايا السليكونية العشوائية ولكن مشكلته تنحصر في سمك الغشاء الرقيق لهذه الخلايا ، فهو أكبر من الخلايا السليكونية العشوائية . وبما أن مادة الانديوم مادة غالية الثمن ، وبالرغم من أن الكمية المستخدمة قليلة فإن ذلك يؤثر على سعرها . ومن مساوئ طريقة تصنيع هذه الخلايا هو استخدام غازي الهيدروجين والسيلنايد وهو سام جداً ويسبب مشاكل صحية كبيرة في حالة حدوث خلل عند التصنيع .

3-5-3 خلايا الكادميوم تليرايد (CdTe)

وهي مواد أخرى شبه موصلة مناسبة لاستخدام الخلايا الفولطاضوئية تتألف من الكادميوم والتيلرايد . ومن محاسن خلايا الكادميوم تيلرايد هو إمكانية صنعها باستخدام عملية بسيطة ورخيصة من الطلاء الكهربائي . وقد وصلت كفاءة الخلايا من هذا النوع إلى 10% وبدون تناقص في الكفاءة عند الاستخدام . ومن مساوئ هذه الخلايا هو أن الكادميوم مادة سامة جداً ولهذا يجب أخذ الاحتياطات اللازمة أثناء عملية التصنيع .

6-3 منظومات الخلايا الفولطاضوئية المركزة

من الطرق الأخرى المستخدمة للحصول على طاقة أكثر من الخلايا الشمسية الفوتوضوئية هو تركيز الإشعاع الشمسي باستخدام مرايا أو عدسات أذ يمكن استخدام عدد أقل من الخلايا الشمسية للحصول على نفس كمية الطاقة عند استخدام المركزات، وهذا يعتمد على نسبة التركيز التي تتراوح من عدة مرات إلى مئات أو آلاف المرات . والأنظمة ذات التركيز العالي تستخدم متحسسات معقدة وغالية ومحركات وأجهزة سيطرة لتعقب حركة الشمس على محورين (الارتفاع وزاوية السمت) ، بحيث تتمكن

الخلية من استقبال أعلى إشعاع شمسي ممكن . إن المنظومات ذات نسبة التركيز القليلة تتعقب الشمس على محور واحد وتكون بذلك أقل تعقيداً .

7-3 تطبيقات الخلايا الفولطاضوئية

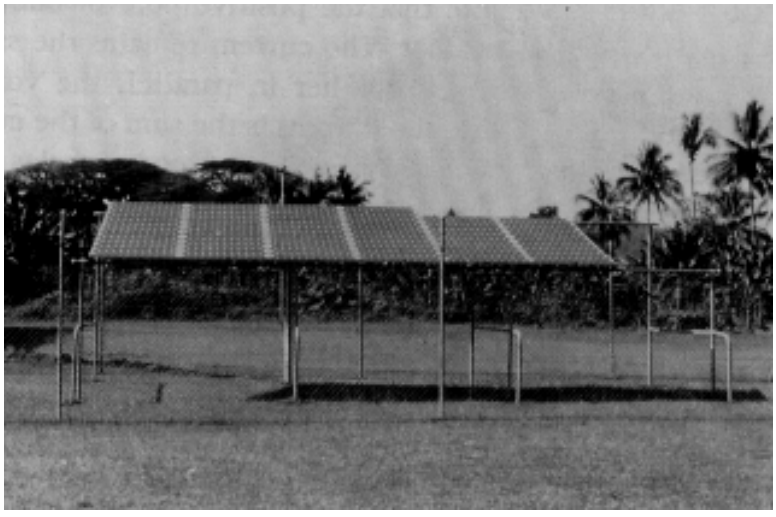
1-7-3 تطبيقات الخلايا الشمسية في المناطق النائية

يزداد استخدام الخلايا الشمسية الكهروضوئية أو الفوتوفولطائية حالياً في الكثير من التطبيقات في مناطق بعيدة عن مناطق وجود الشبكة الكهربائية . وتوجد أمثلة على هذه التطبيقات موضّحة في الشكل(3-11) . وتتراوح هذه التطبيقات بين محطة تقوية راديوية على أحد الجبال أو تزويد الوحدات التلفونية الخارجية أو شاحنات بطاريات لبعض القوارب والكرفانات أو كهربة السياجات الخارجية أو إنارة الشوارع وغيرها. ولمعرفة كمية الألواح الشمسية أو سعة البطاريات اللازمة لتزويد منطقة ما بالطاقة الكهربائية يجب أن يتم تزويد مصمم منظومات الخلايا الشمسية بالمعلومات التالية :

1- الاستهلاك اليومي والأسبوعي والسنوي للطاقة الكهربائية .

2- كمية الإشعاع الشمسي اليومي والأسبوعي والشهري والسنوي الواصل إلى المنطقة التي توجد فيها المنظومة .

3 - عدد الأيام الغائمة المتكررة التي يجب أن تقوم البطارية بها بتزويد الحمل .



شكل (3-11): إحدى تطبيقات الخلايا الشمسية في المناطق النائية

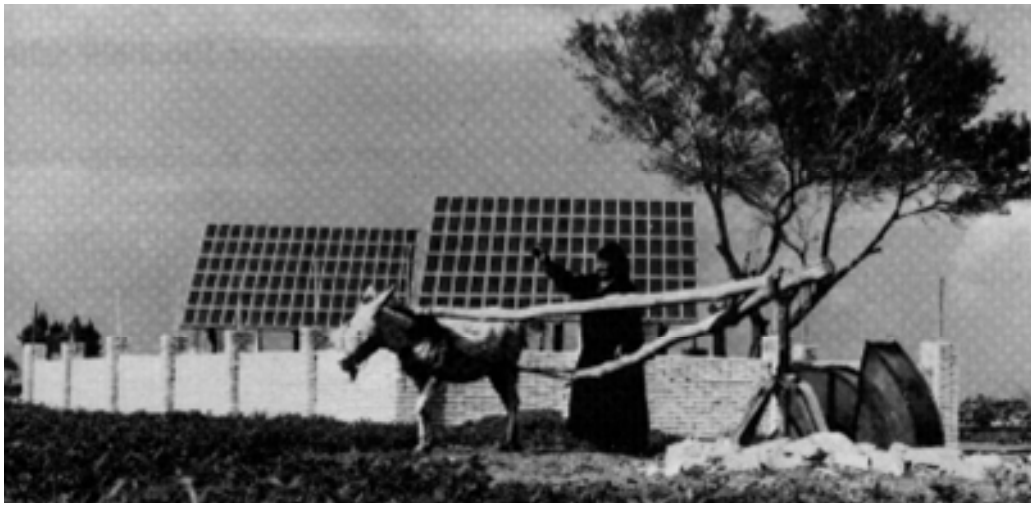
فمعرفة مكونات منظومة الخلايا الشمسية اللازمة لتزويد حمل ما معقدة ، ولهذا فإن معظم الشركات المنتجة للخلايا الشمسية أنتجت برامج حاسوبيّة لمساعدة المهندسين المصممين لحساب مساحات وسعات مكونات المنظومة وأسعارها بدقة كافية لتغطية متطلبات الأحمال في المناطق المختلفة .

2-7-3 تطبيقات الخلايا الفولطاضوئية في بعض البلدان النامية

في معظم البلدان المتقدمة تكون الشبكة الكهربائية موزعة بصورة كاملة والطاقة الكهربائية المولدة من الطاقة التقليدية ذات كلفة قليلة مقارنة بكلفة إنتاج الطاقة من منظومات الطاقة المتجددة ، ولهذا فإنه من الصعب على الطاقة المتجددة خصوصاً الخلايا الفولطاضوئية التنافس مع المصادر التقليدية .

وفي الدول النامية وبالأخص في المناطق القروية والنائية نجد أن الطاقة الكهربائية غير متوفرة، ولهذا فإن توليد الطاقة الكهربائية من الخلايا الشمسية يكون منافساً قوياً لتوليد الطاقة من الوسائل الأخرى كاستخدام الديزل، خاصة في البلدان التي تنعم بإشعاع شمسي عالٍ. وإن استخدام الخلايا الشمسية يتوسّع باستمرار وبصورة سريعة في مختلف التطبيقات خاصة في مجالات ضخ المياه ، ومنظومات الري ، ومنظومات مياه الشرب، وتشغيل ثلاجات الأدوية ، وفي الأعمال المنزلية والعامة كالإنارة وتشغيل الراديو والتلفزيون والفيديو وغيرها من وسائل الراحة ، وإنارة الشوارع ومنظومات الاتصالات . ويبين الشكلان (12a, b-3) بعض التقنيات المستخدمة في عدد من البلدان النامية .

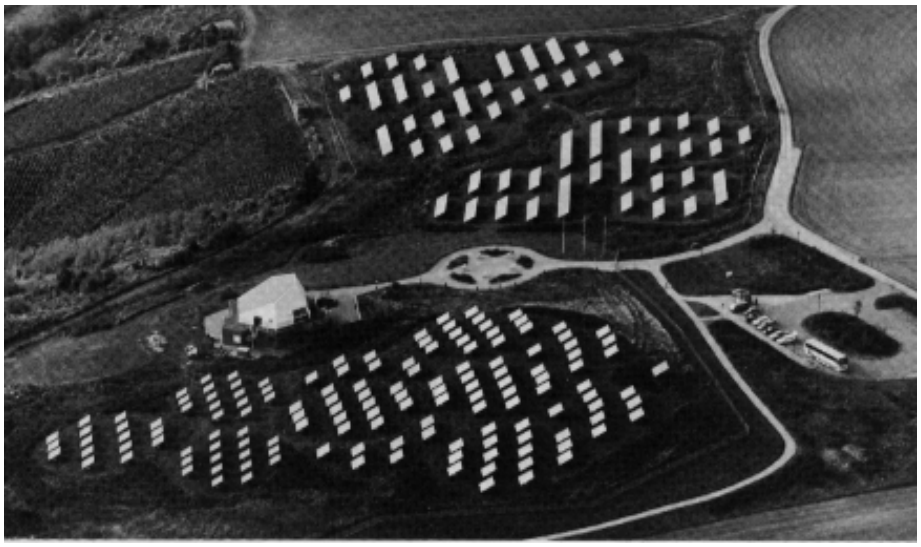
شكل (12a-3): بعض تطبيقات الخلايا الشمسية في الدول النامية



شكل (3-12b): بعض تطبيقات الخلايا الشمسية في الدول النامية

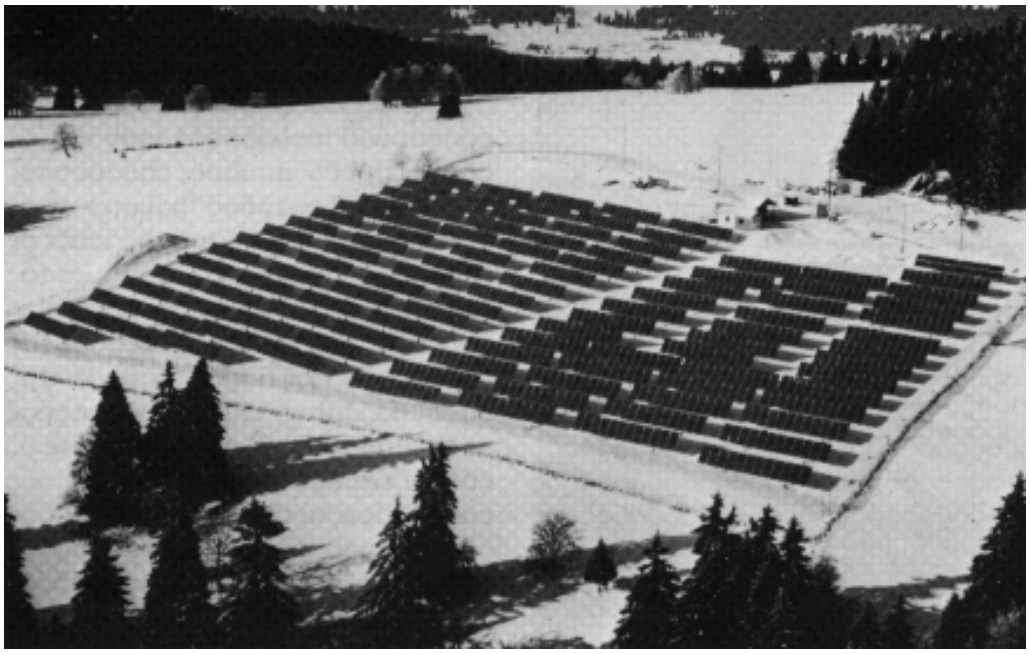
3-7-3 استخدام المنظومات الفولطاضوئية للربط مع الشبكات الكهربائية

تم تشييد عدد من المنظومات الكبيرة السعة في عدد من دول العالم . نجد في أوربا إحدى أكبر المحطات التي نصبت ، وكان ذلك في عام 1988 من قِبل أكبر شركة توزيع كهربائية ألمانية (RWF) بالقرب من مدينة كويلنز على إحدى التلال القريبة من نهر موسيلي . وبلغت سعة المحطة 340 كيلو واط وبطاقة سنوية مقدارها 250000 كيلو واط – ساعة . وخضعت المحطة لمراقبة مستمرة وتم تقييم أدائها ، وعلى ضوء ذلك تم تصميم الجزء الثاني من المشروع البالغ 300 كيلو واط على ضفاف بحيرة تيورات وبدأ في العمل عام 1991 (الشكلان 3-13a, b) . كما شاركت شركة (RWF) أيضاً في تشييد محطة بقدرة 1 ميغاوات بالقرب من طليطلة في إسبانيا . وفي سويسرا تم إنشاء محطة بقدرة 500 كيلوواط ربطت بالشبكة ، كما في (الشكل 3-14) . وبلغت تكاليف المحطة 3.8 مليون جنيه إسترليني وشيدت على مساحة 20 ألف متر مربع، وتتكون من 110 مجموعات من الألواح الشمسية الأحادية البلورية من إنتاج شركة سيمنس ، سعة كل منها 5 كيلو واط وبمساحة 4574 متراً مربعاً من الخلايا لكل مجموعة. وتبلغ الطاقة السنوية للمحطة 700 ميغاوات – ساعة .



شكل (13a-3): محطة سعة 340 كيلوواط منصوبة على نهر موسيلي في ألمانيا

شكل (13b-3): محطة سعة 300 كيلوواط في ألمانيا



شكل (3-14): محطة سعة 500 كيلوواط في سويسرا

ومن البلدان الأخرى التي اهتمت باستغلال الخلايا الكهروفولطائية في إنتاج الكهرباء إيطاليا ، فقد تم نصب محطة بقدرة 300 كيلوواط بالقرب من مدينة فوجيا في جنوب إيطاليا . وقد تم توسيع المحطة إلى 600 كيلوواط عام 1991 (الشكل 3-15) . كما تم بناء محطة أخرى أكبر بسعة 3.3 ميغاواط بالقرب من مدينة نابولي الإيطالية أيضاً .

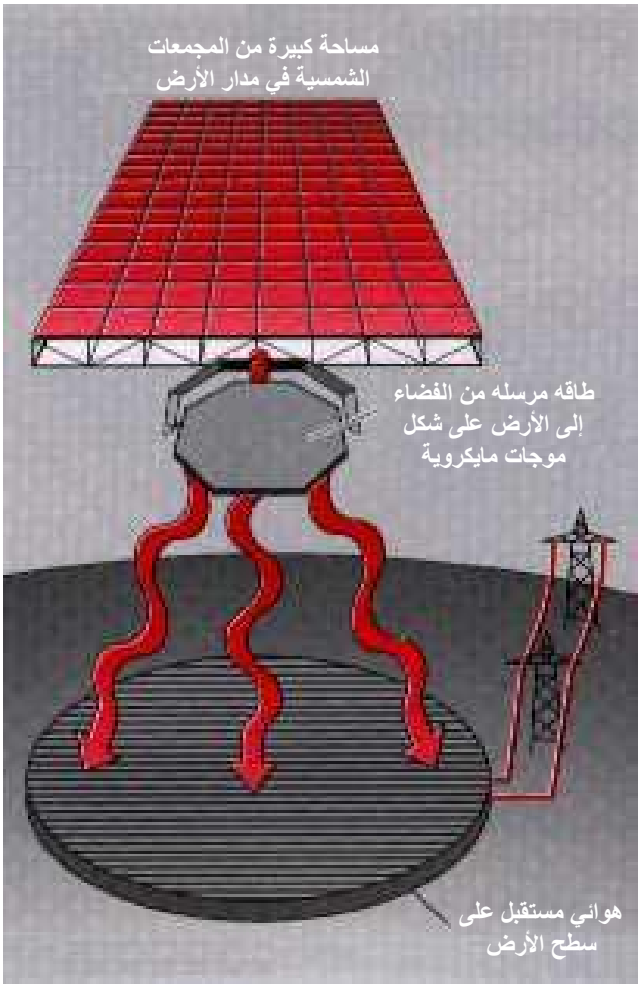
شكل (3-15): محطة بسعة 600 كيلوواط في بريطانيا

وفي الولايات المتحدة تم نصب عدد كبير من المحطات ذات السعة العالية منها منظومتان رائدتان نصبتا في كاليفورنيا من قِبل شركة آركو (Arco) في بداية الثمانينات سعة الأولى 1 ميغاواط والثانية 6.5 ميغاواط ، وقد استخدمت كلا المحطتين منظومة تعقيب على محورين لتركيز الطاقة على الخلايا يعادل ضعف شدة الإشعاع، ونتيجة لدرجة الحرارة العالية على الخلايا فقد تناقصت كفاءة قسم منها . وقد تم تفكيك المحطتين وبيعت أجزاؤها للاستخدام في منظومات صغيرة لمناطق نائية . وهنالك بعض المحطات الكبيرة الأخرى التي تم نصبها في مناطق متعددة منها محطة بسعة 1 ميغاواط تستخدم منظومة تعقيب أحادية المحور نصبت في ولاية كاليفورنيا ، ومحطة أخرى نصبت في تكساس بسعة 300 كيلوواط . ونصبت أيضاً محطات عديدة في أنحاء مختلفة من الولايات المتحدة بسعات تتراوح بين 200 إلى 400 كيلوواط كل منها يستخدم تقنية مختلفة من تقنيات الخلايا الفولطاضوئية . وقد تم تقديم مقترح لبناء محطة بسعة 100 ميغاواط تنصب في صحراء نيفادا وتستخدم المحطة خلايا شمسية من نوع السليكون العشوائي . وقد تم تقدير كلفة المحطة بـ 150 مليون دولار ، ويمكنها أن تنتج طاقة كهربائية بكلفة 5.5 سنت لكل كيلوواط – ساعة .

8-3 استخدام الخلايا الشمسية في الفضاء

تم اقتراح نصب محطة فضائية لتوليد الطاقة الكهربائية بسعة عدة جيغاواط (1 جيغاواط = 1000 ميغاواط = 10^9 واط) تنصب على مدار حول الأرض وبمساحة تعادل 30 كيلو متر مربع . ويتم تحويل التيار المستمر الذي تنتجه الخلايا إلى إشعاع مايكرو ويف بذبذبة مقدارها 2.45 جيغا هيتز وتوجه بكثافة قدرة مقدارها 250 وات/م^2 من1 كيلو متر قطر هوائي في الفضاء إلى 100 كيلو متر مربع هوائي على سطح الأرض . ويتم بعدها تحويل الطاقة المستلمة إلى تيار متناوب ، وتربط مع الشبكة (الشكل 3-16) . ومن مزايا نصب هذه المنظومة أن الإشعاع الشمسي في الفضاء الخارجي يصل إلى 1367 واط لكل متر مربع بدلا من 1000 واط لكل متر مربع على سطح الأرض . وهذه الطاقة متوفرة دائماً ، ويمكن كذلك اختيار هياكل واسعة وذات متانة قليلة لانعدام الرياح ومشاكل الجو الأخرى . ولكن المشكلة الرئيسية التي تواجه نصب هذه المحطة هي الكلفة . لقد أجريت دراسة في الولايات المتحدة تبين منها أن كلفة نصب محطة تنتج 5 ميغاواط تقدر بحوالي 15 بليون دولار ، وهذا المبلغ مرتفع

ولا يمكن أن تنفقه أغنى دول العالم إلاّ إذا آثرت التخلي عن جزء من ميزانيات الإنفاق العسكري على الأسلحة .



شكل (3-16): فكرة محطة شمسية فضائية

أسئلة تقويمية

1. ما هي مبادئ عمل الخلية الشمسية الفلطاضوئية ؟
2. ما هي المراحل التي تمر بها الطاقة الشمسية حتى تصبح طاقة كهربائية ؟
3. ما هي أنواع الخلايا الشمسية الفلطاضوئية ؟
4. ما الفرق بين الخلية الشمسية الأحادية البلورية والمتعددة البلورية ؟
5. ما الفرق بين الخلية السلكونية البلورية والخلية السلكونية العشوائية ؟
6. ما هي المواد الأخرى بالإضافة إلى السليكون التي يمكن منها إنتاج خلية شمسية ؟
7. لغرض تصميم منظومة توليد كهربائية تعمل بالخلايا الشمسية ، ما هي المتطلبات التي يجب أن تتوفر لدى المصمم لاختبار مكونات ومواصفات المنظومة ؟
8. ما هي التطبيقات الأكثر استخداماً في الوقت الحالي في مجال توليد الطاقة الكهربائية من الخلايا الشمسية الفلطاضوئية ؟
9. ما هي الأسباب التي تحول دون نصب محطات توليد كهربائية كبيرة السعة وربطها مع الشبكة الكهربائية ؟
10. هل يمكن نصب محطة توليد كهربائية في الفضاء الخارجي واستلام الطاقة على سطح الأرض ؟ وما هي المعوقات التي تحول دون ذلك ؟
11. ما هي التأثيرات البيئية الناتجة عن استخدام الخلايا الشمسية ؟