



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
هيئة التعليم التقني
المعهد التقني / الحويجة
وحدة بحوث الطاقات المتجددة

مبادئ الطاقات المتجددة

تأليف

احمد حسن احمد الجبوري
مدرس

د. عمر خليل احمد الجبوري
أستاذ مساعد

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

هيئة التعليم التقني

المعهد التقني / الحويجة

وحدة بحوث الطاقات المتجددة

مبادئ الطاقات المتجددة

تأليف

احمد حسن احمد الجبوري

مدرس

الدكتور عمر خليل احمد الجبوري

استاذ مساعد

المعهد التقني – الحويجة

1410 هـ - 2010 م

بسم الله الرحمن الرحيم

رب قد أتيتني من الملك وعلمتني من
تأويل الأحاديث فاطر السموات
والأرض أنت وليي في الدنيا والآخرة
توفني مسلماً" وألحقني بالصالحين

يوسف- الآية (101)

عبرة

يأبى الله أن يكون هناك كتاب كامل غير كتابه

فالحمد لله من قبل ومن بعد .

المقدمة

أصبحت أزمة الطاقة من أهم المشاكل التي يواجهها العالم حاليا بسبب الزيادة الكبيرة والمستمرة في استهلاك الطاقة الذي يقابله احتياطي محدد من موارد الطاقة التقليدية فضلا عن ارتفاع كبير في أسعار الوقود و المشاكل البيئية التي تسببها مصادر الطاقة التقليدية لذا عمد الباحثون إلى التفكير بتطوير مصادر جديدة و بديلة لها، وتوجهت الأنظار إلى الطاقات المتجددة وعلى رأسها الطاقة الشمسية وبدأت البحوث والدراسات لمواجهة حقيقة نضوب الوقود التقليدي واستبداله بطاقة متجددة غير ناضبة وغير ملوثة للبيئة.

تعرف الطاقات المتجددة أنها تلك الطاقات التي تتولد بصورة طبيعية ومستديمة وتتميز أنها غير ناضبة ومتوفرة في الطبيعة بصورة غير محدودة و أحيانا محدودة ولكنها متجددة باستمرار، فضلا على أنها نظيفة لا ينتج عن استخدامها أي تلوث بيئي؛ وتشمل هذه المصادر، الطاقة الشمسية التي تعد المصدر الرئيس للطاقة على سطح الأرض وكذلك طاقة الرياح وطاقة المد والجزر الناتجة عن قوى التجاذب ما بين الأرض والقمر و الشمس وطاقة الأمواج وطاقة التدرج الحراري في مياه المحيطات وطاقة الحرارة الجوفية وطاقة المساقط المائية؛ ويصنف العلماء الطاقة الناتجة من حرق الفضلات الزراعية والمنزلية ضمن الطاقات المتجددة؛ و سوف نتكلم عن هذه المصادر بالتفصيل في هذا الكتاب.

يتكون الكتاب من عشرة فصول، يتناول الفصل الأول أهم مصادر الطاقة التقليدية والتي تشمل النفط والغاز والفحم والطاقة النووية المستخدمة في العالم حاليا ومعدل الاستهلاك العالمي ومقدار الاحتياطيات المتوفرة منها ومدى استمرارية هذه المصادر والمشاكل البيئية المترتبة عنها، ويتناول أيضا كمية وموقع الطاقات المتجددة في الوقت الحاضر ومميزاتها ومساوئها. كما يتضمن الفصل مقدمة في مبادئ الترموداينمك وانتقال الحرارة وتحويل الطاقة للوصول إلى قاعدة متينة تمكن الطالب من استنباط وفهم عمل منظومات الطاقة المتجددة.

تعرض أساسيات الطاقة الشمسية في الفصل الثاني، فيقدم هذا الفصل تعريفات ومعادلات حساب الزوايا الشمسية و كيفية حساب الإشعاع الشمسي على السطوح المختلفة والتعرف على

مجموعة من النماذج الرياضية المستخدمة لتخمين كمية الإشعاع الشمسي الساقط على الأجسام، ودراسة الخواص الإشعاعية للمواد ومنظومات قياس الإشعاع الشمسي المعتمدة وينتهي هذا الفصل بمجموعة من الأمثلة المحولة لمساعدة الطالب أو الباحث في حساب الإشعاع الشمسي في التطبيقات المختلفة.

تقسم مجمعات الطاقة الشمسية على نوعين أساسيين أولهما: المجمعات المستوية للتجميع عند درجات الحرارة المنخفضة، وثانيهما المجمعات المركزة للتجميع عند درجات الحرارة المتوسطة والعالية، يستعرض الفصل الثالث، أنواع المجمعات الشمسية ونظرية المجمعات المستوية والمركزة وكفاءتها والعوامل المؤثرة في أدائها وكيفية حساب معامل الفقد الحراري الكلي من المجمع إلى المحيط، وطريقة ضبط ميل المجمعات مع الشمس وينتهي الفصل أيضا بمجموعة من المسائل المحولة تساعد الطالب أو الباحث في فهم التحليل الرياضي لهذه المجمعات.

وقدم في الفصل الرابع التطبيقات الحرارية المختلفة للطاقة الشمسية بطريقة مبسطة وتشمل هذه التطبيقات سخانات الماء الشمسية ونظم التدفئة والتبريد المعتمدة على الطاقة الشمسية وتحلية المياه باستخدام الطاقة الشمسية وتجفيف المحاصيل الزراعية باستخدام الطاقة الشمسية، و توليد الطاقة الكهربائية باستخدام البحيرات الشمسية وأنظمة المستقبل المركز واستخدام الأقمار الصناعية لتوليد الطاقة الكهربائية.

يختص الفصل الخامس بتقديم نبذة مختصرة عن طاقة الرياح التي بدأت تلعب دورا كبيرا في توليد الطاقة الكهربائية، إذ يقدم الفصل نبذة مختصرة عن أنواع التوربينات الريحية وتحديد سرعة الرياح المفيدة مع تقديم التحليل الرياضي العام لطاقة الرياح. أما الفصل السادس فيعنى بالطاقة المائية مع عرض موجز لأغلب أنواع التوربينات المائية وخصائص كل منها وطرق تحديد نوع التوربين الملائم للمواقع المختلفة مع التحليل الرياضي لكل نوع من التوربينات المائية.

وتناول الفصل السابع طاقة المحيطات والبحار التي تشمل طاقة تحويل حرارة المحيطات (OTEC) وطاقة المد والجزر وطاقة الأمواج، حيث قدم شرح مبسط لهذه الأنظمة والمناطق الملائمة لها مع وصف مبسط لأنظمة مختلفة لكيفية استخلاص الطاقة من هذه الطاقات فضلا عن مجموعة من الأمثلة المحولة لمساعدة الدارسين في فهم طريقة ومبدأ عملها.

وقد اختصر الفصل الثامن على شرح أهم مصادر الطاقة في باطن الأرض، حيث تم شرح التراكيب العامة للحقل الحراري الأرضي ووصف محطات الطاقة الجيوحرارية والمشاكل التشغيلية والبيئية المصاحبة لها، أما الفصل العاشر فيتطرق إلى مصادر أخرى للطاقات المتجددة مثل طاقة الكتلة الإحيائية وطاقة الفضلات ومحاصيل الطاقة وطاقة الهيدروجين وطرق إنتاج الهيدروجين مع أهميته المستقبلية، كما تم التطرق إلى خلايا الوقود وشرح لكل نوع من هذه الخلايا بسبب الأهمية المستقبلية لهذا النوع، أما الفصل العاشر والأخير فيتطرق إلى اقتصاديات الطاقات المتجددة وطرق تخزينها والتي يتضمن وصف مبسط لكيفية حساب الكلفة الاقتصادية لمختلف أنواع الطاقات المتجددة والتي تعد من أهم العوائق أمام انتشار هذه الطاقات، ويستعرض أيضا الطرائق المختلفة لخزن الطاقات المتجددة وخصائص التخزين وكفاءته.

اعد الكتاب الحالي باستخدام النظام العالمي للوحدات ويمكن استخدام الكتاب منها لمادة الطاقات المتجددة في الكليات التقنية وكليات الهندسة في الجامعات العراقية كافة.

أخيرا يود المؤلفان إن يتوجها بالشكر لكل من ساهم في إعداد مسودة الكتاب وإن يتقدما بهذا الجهد المتواضع إلى الطلبة الأعزاء ليكون احد الأسس في رفع المستوى العلمي لهم لمواكبة التقدم العلمي والصناعي العالمي. وأن يقدم هذا الجهد المتواضع قربي إلى الله عز وجل، ويسألان سبحانه إن ينفع به طلاب ومهندسي تطبيقات الطاقات المتجددة، آمليان إن يحقق الكتاب الغرض الذي اعد من اجله، إلا وهو مرضاة الله.

المؤلفان

كركوك-الحويجة

كانون الاول – 2009

المحتويات

الرقم	الموضوع	الصفحة
	الفصل الأول: مصادر الطاقة	15
1.1	مقدمة عامة	16
2.1	مصادر الطاقة	17
1.2.1	مصادر الطاقة التقليدية	17
2.2.1	الطاقة النووية	21
1.2.2.1	أنواع الوقود النووي	21
2.2.2.1	أنواع المفاعلات النووية	23
3.2.1	مصادر الطاقة المتجددة	26
3.1	استمرارية توفر مصادر الطاقة	26
4.1	خصائص مصادر الطاقة المتجددة	27
5.1	مدخل إلى دايNMك الحرارة	27
6.1	مبادئ انتقال الحرارة	35
1.6.1	موجز معادلات انتقال الحرارة بالتوصيل	37
2.6.1	موجز معادلات انتقال الحرارة بالحمل	42
3.6.1	موجز معادلات انتقال الحرارة بالإشعاع	45
	الفصل الثاني: الطاقة الشمسية	55

56	مقدمة عامة	1.2
56	طبيعة الإشعاع الشمسي	2.2
59	حركة الأرض	3.2
61	الثابت الشمسي	4.2
62	زوايا الأرض- الشمس الأساسية	5.2
65	الوقت الشمسي	6.2
66	الإشعاع الشمسي الساقط على سطح أفقي خارج الغلاف الجوي	7.2
67	الأشعة الشمسية المباشرة والمنتشرة	8.2
71	الخواص الإشعاعية للمواد	9.2
73	قانون فرزنيل	1.9.2
75	النفذية و الانعكاسية الكلية لطبقة واحدة من الزجاج	2.9.2
76	الخواص الضوئية المؤثرة للألواح المنفذة	10.2
77	نفذية الإشعاع المنتشر	11.2
77	الكفاءة البصرية الكلية لمجمع شمسي بسيط	12.2
79	الأسطح الانتقائية	13.2
79	الأسطح المنفذة الانتقائية	1.13.2
82	الأسطح الماصة الانتقائية	2.13.2
82	الأسطح العاكسة	14.2

84	قياس الإشعاع الشمسي	15.2
104	الفصل الثالث: المجمعات الشمسية	
105	مقدمة عامة	1.3
105	المجمع الشمسي المستوي	2.3
108	التحليل الحراري للمجمع الشمسي المستوي	1.2.3
109	مواصلة فقدان الحرارة للمجمع الشمسي البسيط	2.2.3
119	عامل طرح الحرارة للمجمع	3.2.3
121	درجة الحرارة المتوسطة للصفحة الماصة	4.2.3
122	كفاءة المجمع	5.2.3
123	أنواع المجمعات الشمسية البسيطة	6.2.3
127	المجمعات الشمسية المركزة	3.3
128	نسبة التركيز	1.3.3
131	أنواع المجمعات المركزة	2.3.3
133	الأداء الحراري للمجمعات الشمسية المركزة	4.3
135	الأداء الحراري للمجمعات الشمسية الخازنة	5.3
136	زاوية ميلان المجمع الشمسي	6.3
156	الفصل الرابع: استخدامات الطاقة الشمسية	
157	مقدمة عامة	1.4

157	تسخين المياه	2.4
159	تصميم منظومات تسخين المياه	3.4
164	التدفئة بالطاقة الشمسية	4.4
164	منظومات التدفئة الفعالة	1.4.4
167	منظومات التدفئة السلبية	2.4.4
172	التبريد بالطاقة الشمسية	5.4
172	منظومات التبريد الفعالة	1.5.4
173	منظومات التبريد السلبية	2.5.4
174	البحيرات الشمسية	6.4
176	أنظمة توليد الطاقة الكهربائية باستخدام الطاقة الشمسية	7.4
182	التقطير باستخدام الطاقة الشمسية	8.4
185	التحليل الرياضي لادعاء المقطر الشمسي البسيط	9.4
189	المجففات الشمسية	10.4
191	أنظمة الطاقة الشمسية بواسطة الأقمار الصناعية	11.4
205	الفصل الخامس: طاقة الرياح	
206	مقدمة عامة	1.5
209	سبب حركة الرياح	2.5
211	مميزات ومساوئ طاقة الرياح	3.5

211	أنواع التوربينات الريحية	4.5
214	التحليل الرياضي لطاقة الرياح	5.5
220	القوى المؤثرة على ريش التوربين	6.5
222	اختيار الأماكن الملائمة	7.5
224	طرق تحديد خصائص الرياح	8.5
228	استخدامات طاقة الرياح	9.5
234	مزارع الرياح	10.5
245	الفصل السادس: الطاقة المائية	
246	مقدمة عامة	1.6
247	الطاقة الكامنة المخزونة	2.6
248	دورة المياه في الطبيعة	3.6
249	محطات القدرة الكهرومائية	4.6
250	اختيار موقع محطات القدرة الكهرومائية	5.6
250	التحريات المطلوبة	6.6
252	أنواع السدود	7.6
256	النواير المائية	8.6
257	أنواع التوربينات المائية	9.6
258	التوربين الدفعي	1.9.6

263	التوربين التفاعلي	2.9.6
267	كيفية اختيار التوربينات المناسبة	10.6
280	الفصل السابع: طاقة تحويل حرارة المحيطات	
281	مقدمة عامة	1.7
281	طاقة تحويل حرارة المحيطات	2.7
282	الطرق المستخدمة لاستغلال طاقة الفرق في درجات الحرارة	1.2.7
285	اختيار الموقع الملائم	2.2.7
287	طاقة المد والجزر	3.7
288	التفسير العلمي لظاهرة المد والجزر	1.3.7
290	أنظمة استغلال طاقة المد والجزر	2.3.7
295	طاقة الأمواج	4.7
296	التحليل الرياضي لطاقة الأمواج	1.4.7
298	حساب كمية الطاقة الناتجة عن الأمواج	2.4.7
300	منظومات طاقة الأمواج	3.4.7
313	الفصل الثامن: طاقة باطن الأرض	
314	مقدمة عامة	1.8
314	أصل طاقة باطن الأرض	2.8
317	أنظمة الطاقة الجيوحرارية	3.8

318	أنظمة البخار الجاف	1.3.8
320	أنظمة الماء الساخن	2.3.8
323	أنظمة الصخور الجافة الساخنة	3.3.8
325	أنظمة الطاقة الجيوحرارية - الاحفورية المشتركة	4.3.8
326	الاستخدام المباشر للطاقة الجيوحرارية	4.8
328	المشاكل التشغيلية والبيئية	5.8
333	الفصل التاسع: مصادر أخرى للطاقة	
334	طاقة الكتلة الإحيائية	1.9
334	استخدام الخشب كوقود	1.1.9
336	محاصيل الطاقة	2.1.9
337	الغاز الحيوي	3.1.9
339	مكونات وحدة إنتاج الغاز الحيوي	4.1.9
342	شروط عملية التخمير	5.1.9
342	استخدامات الغاز الحيوي	6.1.9
343	معوقات استخدام الغاز الحيوي	7.1.9
344	آفاق استخدام الغاز الحيوي في الوطن العربي	8.1.9
344	الطاقة من النفايات	2.9
346	الديزل الحيوي	3.9
346	إنتاج الديزل الحيوي	1.3.9

349	استخدامات الديزل الحيوي	2.3.9
350	مميزات الديزل الحيوي	3.3.9
351	طاقة الهيدروجين	4.9
352	مميزات طاقة الهيدروجين	1.4.9
353	طرق إنتاج الهيدروجين	2.4.9
355	استعمالات الهيدروجين	3.4.9
357	خزن الهيدروجين	4.4.9
358	خلايا الوقود	5.9
359	أنواع خلايا الوقود	1.5.9
361	وقود خلايا الوقود	2.5.9
363	مميزات خلايا الوقود	3.5.9
354	تطبيقات خلايا الوقود	4.5.9
365	الفصل العاشر: اقتصاديات وخزن الطاقات المتجددة	
366	اقتصاديات الطاقات المتجددة	1.10
366	القيمة الحالية الصافية	1.1.10
367	سلسلة الدفعات	2.1.10
368	اقتصاديات منظومات التسخين الشمسية	3.1.10
369	مقارنة اقتصادية لمختلف مصادر الطاقة	4.1.10
370	خزن الطاقات المتجددة	2.10
371	الخزن الحراري	1.2.10
371	التخزين في السوائل	1.1.2.10
372	التخزين في المواد الصلبة	2.1.2.10

374	التخزين بالحرارة الكامنة	3.1.2.10
376	الخرن الميكانيكي	2.2.10
380	الخرن المغناطيسي	3.2.10
381	الخرن الكهربائي بالبطاريات	4.2.10
381	الخرن الكيميائي	5.2.10
388	الملاحق	

الفصل الأول

1

مصادر الطاقة

الفصل الأول

مصادر الطاقة

1.1 مقدمة عامة:

تطورت الوسائل التي اعتمدها الإنسان في إيجاد مصادر للطاقة بتطور الإنسان نفسه و اختلفت باختلاف مراحل التطور التي عاشها إذ إن هناك تفاعلا متبادلا بين نوع الحضارة ومصادر الطاقة. كان الإنسان قبل الثورة الصناعية يعتمد على قوته العضلية أو على الحيوانات أو بعض المصادر الطبيعية مثل الشمس، والرياح، والمساقط المائية لتلبية حاجاته اليومية، إذ استعمل الإنسان الطاقة الشمسية منذ القدم في تجفيف ملابسه وتجفيف الفاكهة وحفظها واستخدم أيضا طاقة المساقط المائية لطحن الحبوب، واستخدم طاقة الرياح في الزراعة وفي طحن الحبوب وغيرها من الاستخدامات.

شكلت الثورة الصناعية في أوروبا نقطة تحول كبير في أنماط استخدام الإنسان للطاقة، إذ ترافق مع الثورة الصناعية ازدياد الآلات الميكانيكية وانتشارها بشكل واسع وبذلك ازداد الطلب على الوقود اللازم لتشغيل هذه الآلات، ومع بداية هذه الثورة، أصبح الفحم هو المصدر الأول للطاقة، ثم بدأ النفط مع مطلع القرن العشرين يحل رويدا مكان الفحم، وقد ازداد استخدام النفط والغاز حاليا وأصبح النفط أهم مصادر الطاقة في القرن العشرين.

ازداد استهلاك العالم للطاقة خصوصا في النصف الثاني من القرن العشرين، وقد ساعد على تصاعد معدلات استهلاك الطاقة حقيقة إنها كانت سلعة رخيصة جدا بالمقارنة مع السلع الأخرى، حتى بدأت أول أزمة للطاقة في عام 1973 وأخذت أزمة الطاقة هذه بعدا سياسيا واقتصاديا يتناول النظام العالمي بأكمله، إذ لاح للدول الصناعية خطر انحباس النفط، و أصبحت أزمة الطاقة من أهم المشاكل التي يواجهها العالم حاليا بسبب الزيادة الكبيرة و المستمرة في استهلاك الطاقة الذي يقابله احتياطي محدد من موارد الطاقة التقليدية فضلا على ارتفاع كبير في أسعار الوقود و المشاكل البيئية التي تسببها مصادر الطاقة التقليدية لذا عمد الباحثون إلى التفكير بتطوير مصادر جديدة و بديلة لها وتوجهت الأنظار إلى الطاقات المتجددة وعلى رأسها الطاقة الشمسية وبدأت منذ ذلك الوقت البحوث والدراسات لمواجهة حقيقة نضوب الوقود التقليدي واستبداله بطاقة متجددة غير ناضبة وغير ملوثة للبيئة.

2.1 مصادر الطاقة:

يمكن تقسيم مصادر الطاقة على مصدريين رئيسيين هما:

1.2.1 مصادر الطاقة التقليدية (Conventional energy resources):

وتشمل الوقود الاحفوري مثل النفط، والغاز، والفحم بكل أنواعه وتكونت هذه الأنواع عبر ملايين السنين في باطن الأرض وهي ذات أهمية كبيرة؛ لأنها تحتزن طاقة كيميائية من السهل إطلاقها كطاقة حرارية أثناء عملية الاحتراق وتشمل هذه المصادر أيضا الطاقة النووية التي تستخدم في عمليات توليد الكهرباء وفي تسيير السفن والغواصات عن طريق استخدام الحرارة الناتجة عن عمليات الانشطار النووي في المفاعلات النووية وجميع مصادر الطاقة التقليدية تمتاز بأنها ناضبة أي أنها سوف تنتهي عبر زمن معين؛ لكثرة استخدامها وهي متوفرة في الطبيعة بكميات محدودة وغير متجددة فضلا على أنها ملوثة للبيئة.

1. النفط:

النفط سائل يستخرج من باطن الأرض، عرفه الإنسان منذ عصور قديمة واستخدمه البابليون والآشوريون في بناء المنازل و عرفه أيضا الهنود الحمر وسكان بورما. يعد النفط من أهم مصادر الطاقة وأكثرها انتشارا في العالم إذ يجهز ما يقارب 36 % من الطاقة المستهلكة في العالم⁽¹⁾ (الشكل 1.1) ، وتوجد نظريتان توضحان كيف تكون النفط في جوف الأرض، النظرية الأولى هي النظرية العضوية التي تفترض إن النفط قد تكون من مادة عضوية من الهيدروجين و الكربون وقد تكونت من النباتات والحيوانات التي تعيش منذ ملايين السنين سواء أكانت على اليابسة أم البحار فعندما ماتت هذه الكائنات الدقيقة ترسبت في قاع البحر الذي كان يغطي مساحات شاسعة من اليابسة وعلى مدى السنين تحللت تلك الكائنات بفعل الحرارة و الضغط في جوف الأرض ليتكون النفط الخام و بوجود عوامل مساعدة مثل البكتيريا والمواد المشعة.

أما النظرية الأخرى فهي النظرية غير العضوية التي تفترض انه قد تم اتحاد بين عنصري الهيدروجين و الكربون تحت ضغط وحرارة عاليين في أعماق الأرض مما أدى إلى تكون النفط والغاز الطبيعي، إذ يتواجد النفط عادة في فجوات كبيرة داخل الصخور الرسوبية ويتكون النفط أساسا من نسب وزنية مختلفة لعناصر عديدة هي الكربون و الهيدروجين والأوكسجين و النتروجين.

تحتوي منطقة الشرق الأوسط على أكبر مخزون للنفط في العالم، إذ تحتوي على 59.9 % من الاحتياطي العالمي للنفط والبالغ 1258 مليار برميل⁽¹⁾ (الشكل 2.1) ، ومنه يمكن القول إن الدول العربية ومنها دول الخليج العربي ستبقى المصدر الرئيسي لتجهيز الطاقة في العالم. ومن أهم أسباب انتشار النفط هو سهولة نقله وخزنه وتحويله إلى المشتقات المختلفة التي تتفاوت في خصائصها وكذلك انخفاض سعره وتوفره في كثير من البلدان التي لا تستهلك ألا قليلا منه، فضلا على تميزه بقيمة حرارية عالية وكفاءة جيدة في الاحتراق ويدخل النفط كمادة خام في الكثير من الصناعات الكيماوية.

2. الفحم:

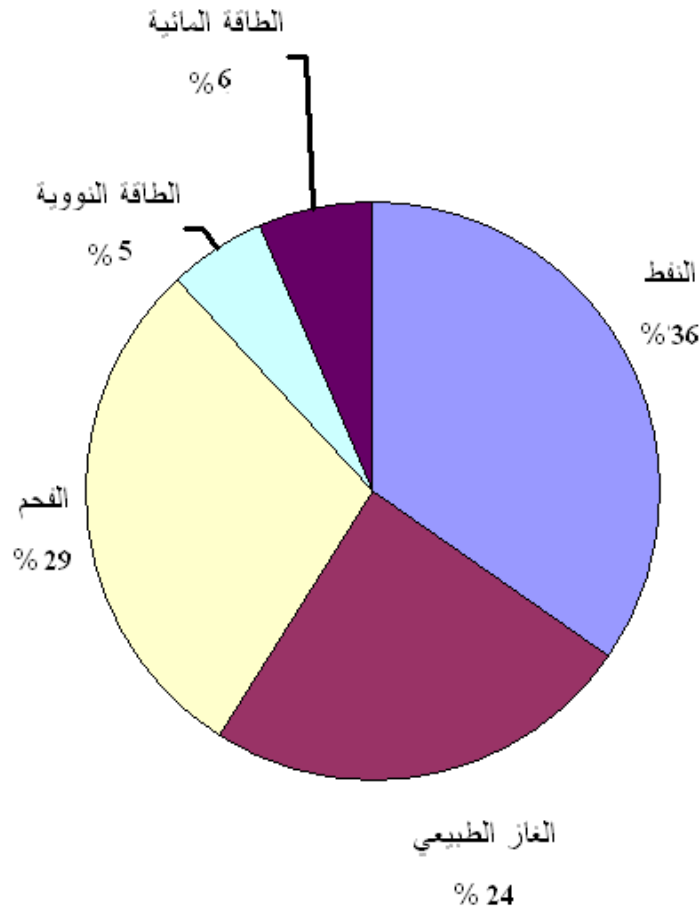
يتكون الفحم من الكربون بشكل أساسي، وظهرت أهميته كمصدر للطاقة في عصر الثورة الصناعية، ويساهم بنسبة 29 % من استهلاك الطاقة في العالم⁽¹⁾ (الشكل 1.1). وهو من أهم مصادر الطاقة التقليدية من حيث حجم احتياطيه والبالغ حوالي 826 مليار طن، وقد تكون داخل الأرض على مدى ملايين السنين، وذلك بسبب تحلل مصادر نباتية تحت عوامل الضغط والحرارة وبمعزل عن الهواء. إن استخدام الفحم الحجري وقودا مباشرا لمحطات التوليد يستلزم أموال باهظة التكلفة لمحطات التوليد كما إن له اثر سيئ على البيئة والإنسان مقارنة بالنفط والغاز الطبيعي، إذ انه المصدر الرئيسي لتلوث الهواء، حيث يؤدي إلى تجمع غاز ثاني أوكسيد الكربون الذي يسبب ارتفاع درجة حرارة الأرض وهي من أهم المشاكل الرئيسة التي تواجه العالم والتي تعرف بظاهرة الاحتباس الحراري، بالإضافة إلى صعوبة استخراجها وكثرة الأيدي العاملة اللازمة لذلك وصعوبة النقل إلى مناطق الاستهلاك المختلفة ناهيك عن المخاطر الناتجة من استخراجها من المناجم. يتركز معظم الاحتياطي في الولايات المتحدة الأمريكية التي تمتلك 28.9% منه وأوروبا ودول الاتحاد السوفيتي السابق التي تمتلك 14 % أيضا والصين حوالي 13.9 % وأستراليا حوالي 9.2 % كما في الشكل (3.1) ، وتحتوي البلدان العربية على كميات قليلة مقارنة بالدول الأخرى، إذ يوجد في مصر والجزائر و المغرب.

3. الغاز الطبيعي:

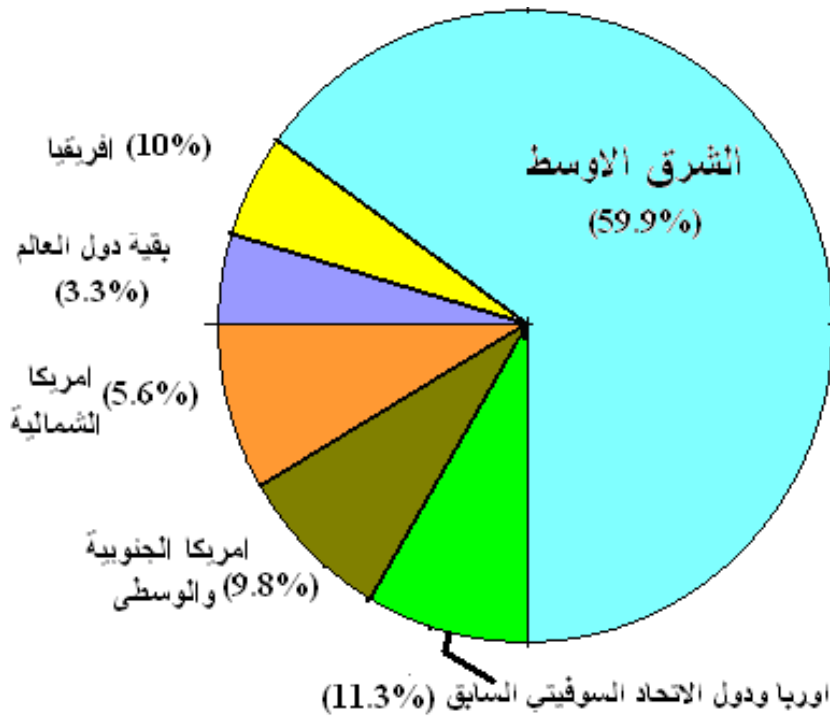
برزت مكانة الغاز الطبيعي كمنافس شديد لبقية مصادر الطاقة في الوقت الحاضر بعد إن عرفه العالم وتعددت سبل استعمالاته، فهو فضلا عن كونه مصدر من مصادر الوقود ذات الطاقة الحرارية العالية فهو أيضا يعد مادة أساسية في الصناعات البتروكيماوية والأسمدة.

يقع الغاز الطبيعي في المرتبة الثالثة من حيث الأهمية في استهلاك العالم من الطاقة بعد النفط والفحم ويساهم بمقدار 24 % من الطاقة المنتجة في العالم، يشكل الميثان الجزء الأساسي في تركيب الغاز الطبيعي يليه الإيثان، ومن أهم مزايا الغاز الطبيعي هي ارتفاع قيمته الحرارية وكفاءة الاحتراق العالية، فضلا عن نظافته عند الاستعمال وقلة تلويثه للبيئة وملائمته للصناعات الكيماوية مثل صناعة الأسمدة. أما أهم الصعوبات التي تواجه الغاز الطبيعي كمصدر للطاقة، هي صعوبة تسويقه لمسافات طويلة وصعوبة تخزينه بالحالة السائلة وعدم تطوير تقنيات خاصة لاستعمال الغاز الطبيعي في وسائط النقل المختلفة.

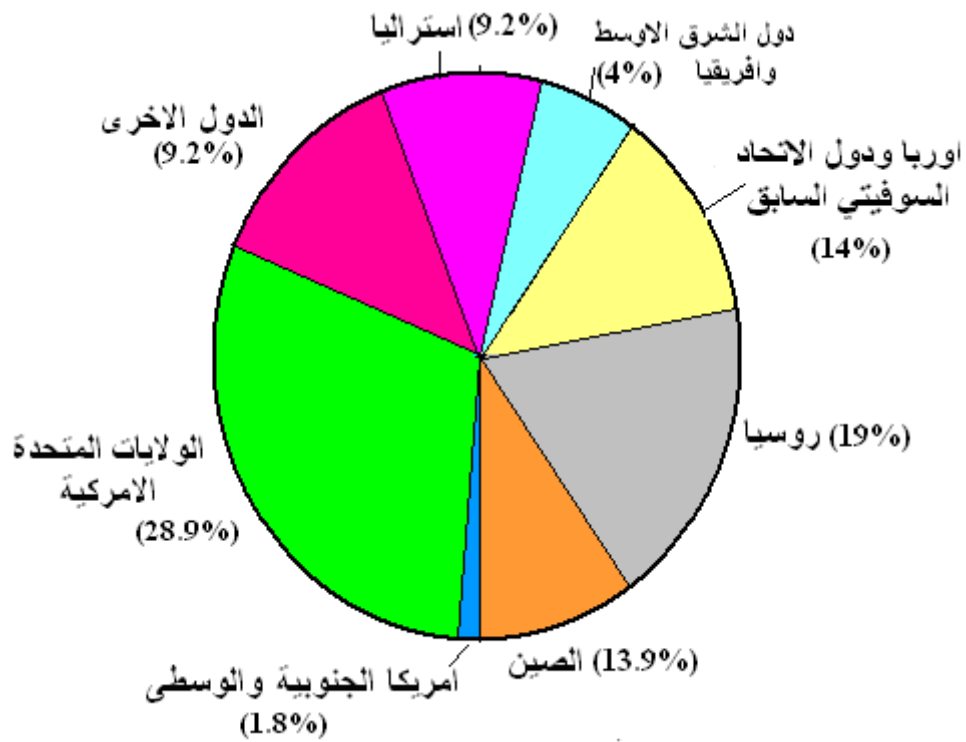
يبلغ احتياطي العالم من الغاز الطبيعي 185.02 تريليون متر مكعب⁽¹⁾، ويتركز 41 % منه في دول الشرق الأوسط وحوالي 34 % في أوروبا ودول الاتحاد السوفيتي السابق ويتوزع الباقي على أنحاء العالم المختلفة كما في الشكل (4.1) ، إما من حيث الاستهلاك فتأتي الولايات المتحدة الأمريكية وروسيا في طليعة الدول المستهلكة للغاز الطبيعي.



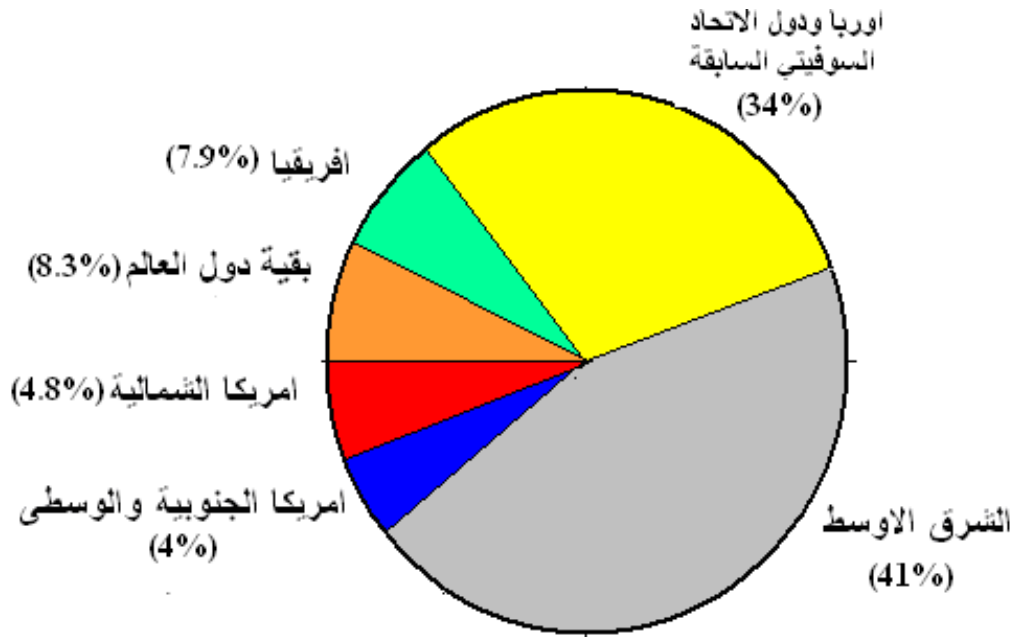
شكل (1.1) نسب استهلاك العالم من أنواع الطاقة المختلفة⁽¹⁾



الشكل (2.1) احتياطي العالم من النفط (1)



الشكل (3.1) نسب احتياطات دول العالم من الفحم (1)



الشكل (4.1) نسب احتياطات دول العالم من الغاز الطبيعي (1)

2.2.1 الطاقة النووية Nuclear energy:

تساهم الطاقة النووية المستخدمة اليوم بنسبة ضئيلة من مقدار الطاقة المستخدمة في العالم تبلغ 6 % من مجمل استهلاك العالم معظمها لتوليد الطاقة الكهربائية، وتستخدم الطاقة النووية في مجالات أخرى غير توليد الكهرباء فقد استخدمت المفاعلات في تسيير السفن والغواصات وتحضير بعض النظائر المشعة واستخدمت هذه النظائر في الطب لعلاج بعض الأمراض. تتركز أهم مشاكل الطاقة النووية في التقنية العالية اللازمة لإدارة المفاعلات النووية والتي لا تمتلكها إلا الدول المتقدمة وفي المواد المشعة الناتجة عن التفاعلات النووية ويبلغ احتياطي العالم من اليورانيوم بحوالي مليون طن تقريباً، والقاسم المشترك بين مصادر الطاقة الأحفورية (النفط والغاز والفحم) والنووية إنها قابلة للاستنزاف ذلك إن الموجود في الطبيعة كميات محدودة ستستهلك عاجلاً أم آجلاً.

يعد الوقود النووي أغنى أنواع الوقود بالطاقة، فالطاقة الحرارية المتولدة من انشطار غرام واحد من الوقود الانشطاري أو القابل للانشطار تبلغ 82 ألف مليون جول، وهذا يكافئ كمية الطاقة المتولدة عن تفجير عشرين طن من مادة (T.N.T) الشديدة الانفجار.

1.2.2.1 أنواع الوقود النووي:

ينقسم الوقود النووي إلى قسمين رئيسيين هما الوقود الانشطاري الذي يستخدم كمصدر

للطاقة في العديد من الاستعمالات العلمية والعسكرية والوقود الاندماجي الذي لا يستخدم حالياً إلا في الأغراض العسكرية.

تعمل محطات الطاقة النووية المستعملة حالياً على ما يعرف بالانشطار النووي وهو نفس فكرة القنبلة الذرية. تقوم فكرة استخلاص الطاقة من الانشطار النووي على إن بعض المواد تنتشر نواتها حين يصدمها نيوترون وينتج عن ذلك طاقة حرارية عالية إضافة إلى نيوترونات أخرى تقوم بدورها بالاصطدام مع ذرات أخرى، وهكذا ينشأ عن هذه العملية تفاعل متسلسل لا ينتهي إلا بتحويل كل المادة القابلة للانشطار إلى مواد جديدة وإطلاق كمية كبيرة من الطاقة.

يطلق مصطلح الوقود الانشطاري على النظائر التي تنتشر نواتها بفعل أي من النيوترونات الحرارية أو النيوترونات البطيئة، ويقصد بالنيوترونات الحرارية: تلك التي تبلغ طاقتها 0.025 إلكترون فولت وسرعتها 2000 m/s، إما النيوترونات البطيئة فهي نيوترونات ذات طاقة أعلى نسبياً (حوالي 1 إلكترون فولت) وتبلغ سرعتها حوالي 10000 m/s تقريباً. إما المواد القابلة للانشطار فهي تلك المواد التي تنتشر نواتها بالنيوترونات السريعة، ولا يحدث ذلك إلا إذا زادت طاقة النيوترون عن 1.8 ميكا إلكترون فولت. وينقسم الوقود الانشطاري إلى وقود طبيعي ووقود مصنع، فالوقود الطبيعي هو عبارة عن اليورانيوم بنظائره الثلاثة: اليورانيوم 238 (U238) و اليورانيوم 235 (U235) و اليورانيوم 234 (U234) ⁽²⁾ ويوجد اليورانيوم في القشرة الأرضية بنسبة تركيز متوسطة وفي معظم الأحيان على صورة ثاني أكسيد اليورانيوم (UO₂) كما يوجد اليورانيوم في ماء البحر أيضاً. تبلغ نسبة النظائر الثلاثة لليورانيوم في الطبيعة حوالي 99.275% لليورانيوم 238، و 0.72% لليورانيوم 235، و حوالي 0.005% لليورانيوم 234، إن المادة المستعملة في غالبية مفاعلات الطاقة النووية هو اليورانيوم الطبيعي المخصب بمدة انشطارية كاليورانيوم 235 أو البلوتينيوم 239 ويتم الحصول على اليورانيوم 235 اللازم لعملية التخصيب عن طريق فصله عن اليورانيوم الطبيعي بواسطة عدد من الطرق الفيزيائية المعقدة والمكلفة ولا يمكن فصل أكثر من 4.5 كيلوغرام من اليورانيوم 235 لكل طن من اليورانيوم الطبيعي، ويسمى اليورانيوم المتبقي من عملية الفصل هذه باليورانيوم المنضب الذي لا يحتوي الطن منه على أكثر من 3 كيلوغرام من اليورانيوم 235. إما في اليورانيوم المستخدم في صناعة الأسلحة الذرية فتصل نسبة اليورانيوم 235 أو البلوتينيوم 239 فيه إلى حوالي 90% وذلك لخفض مقدار الكتلة الحرجة ولزيادة كفاءة استغلال

الطاقة في التفجير. إما الوقود الانشطاري النووي المصنع فيتم الحصول عليه عن طريق سلسلة من التفاعلات النووية التي يتعرض لها اليورانيوم الطبيعي في المفاعلات النووية ليتم تحويل هذا اليورانيوم الى البلوتونيوم 239 والتي تزيد فيه احتمالية انشطاره عن اليورانيوم 235 بحوالي 24%. ويختلف معدل إنتاج البلوتونيوم داخل المفاعل النووي اعتمادا على نوعية المفاعل وطريقة تهدئة النيوترونات وتبعا للشكل الهندسي لللب المفاعل، وغيرها.

كما يوجد هناك نوع آخر من الطاقة النووية ولكنه ما زال في مرحلة الاختبار وهي طاقة الاندماج النووي الناتجة عن اندماج نوى عدة ذرات خفيفة مع بعضها لتشكل ذرة اكبر، و يرافق هذا التفاعل توليد كمية هائلة من الطاقة ومثل هذا التفاعل يجري بصورة دائمة في الشمس ونفس التفاعل يجري في القنبلة الهيدروجينية عند تفجيرها وبما إن الهيدروجين متوفر في الطبيعة بكميات كبيرة جدا وقابلة للتجديد فانه من الممكن ان تشكل هذه الطاقة مصدرا دائما للطاقة في المستقبل.

تتكون أهم أنواع الوقود الاندماجي من نظائر العناصر الخفيفة، مثل نظائر الديتريوم H_1^2 و التريتيوم H_1^3 و الليثيوم Li_3^6 والليثيوم Li_3^7 واغلب هذه النظائر متوفرة في الطبيعة بكميات ضخمة فكل طن من مياه البحر على سطح الأرض يحتوي على 32 غرام من نظير الديتريوم 2 ولذلك تقدر احتياطات هذا النظير في الأرض بحوالي (45-50) تريليون طن (والتريليون يعادل مليون مليون) وهي الكمية التي يكفي استغلال 10% منها لإمداد العالم بالطاقة لملايين السنين، عند النجاح في استغلال الطاقة النووية الاندماجية.

2.2.2.1 أنواع المفاعلات النووية:

تتم عملية الانشطار النووي في منشآت خاصة تسمى بالمفاعلات النووية والمهمة الرئيسية للمفاعل هو التحكم في عملية الانشطار و إطلاق الطاقة الناتجة بصورة تدريجية حتى يمكن استغلال تلك الطاقات للأغراض السلمية وتجنب حدوث الأخطاء ويبلغ عدد المفاعلات حوالي 10600 مفاعل في العالم وتوجد عدة أنواع منها (2):

1. مفاعلات الماء الخفيف:

تعتبر مفاعلات الماء الخفيف (Light water reactor-LWR) التي تبرد وتهدأ بالماء الخفيف الأكثر استعمالا وانتشارا فهي تساهم بحوالي 86% من الطاقة الكهربائية المنتجة من الطاقة النووية في العالم، وذلك باستخدام اليورانيوم الطبيعي المخصب باليورانيوم 235 او

البلوتونيوم 239 بنسبة تركيز تبلغ 3% ، وتم تطوير أنواع عديدة من هذه المفاعلات تتراوح قدرتها ما بين 400 إلى 15000 ميكاواط.

2. مفاعلات الماء الثقيل:

تتميز هذه المفاعلات بإمكانية استخدام اليورانيوم الطبيعي أو ضعيف التخصيب باليورانيوم 235 الذي استهلك في مفاعلات الماء الخفيف، الأمر الذي يوفر نوعاً من التآزر بين هذين النوعين وتقليل نسبة الملوثات النووية الخطرة.

3. المفاعلات المبردة بالغاز:

المفاعلات المبردة بالغاز هي مفاعلات يستخدم فيها اليورانيوم الطبيعي كوقود والكرافيت كمهدئ واستخدام ثاني أكسيد الكربون كمبرد، حيث يغلف الوقود المكون من ثاني أكسيد اليورانيوم بغلاف رقيق من سبيكة المنغنيسيوم. تبلغ كفاءة هذه المفاعلات في تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة كهربائية حوالي 39%.

4. المفاعلات المبردة بالماء الخفيف والمهدأة بالجرافيت:

انتشر تصميم المفاعلات المبردة بالماء الخفيف والمهدأة بالجرافيت تحت الاسم الروسي (RBKM)؛ ذات القدرة 1000 ميكاواط. ويتم احتواء وقود هذه المفاعلات في أنابيب كبيرة نسبياً؛ وتبريد بالماء العادي المعروف بالخفيف الذي يسري في الأنابيب تحت ضغط مرتفع؛ ومحاطة بكتل من الجرافيت التي تعمل كمهدئ.

5. المفاعلات المولدة السريعة:

تقوم جميع المفاعلات السابقة على مبدأ استخدام النيوترونات الحرارية لشطر ذرات اليورانيوم 235 أو البلوتونيوم 239 بعد تهدئة النيوترونات السريعة الناتجة عن الانشطارات النووية باستخدام مواد لتهدئة الخفيفة المتنوعة؛ مثل الماء الخفيف أو الثقيل؛ أو الجرافيت. وهنا ينبغي الإشارة إلى أن قدرة النيوترونات الحرارية أو البطيئة على تحويل المادة القابلة للانشطار مثل اليورانيوم 238 إلى مادة انشطارية وهي البلوتونيوم 239؛ هي قدرة محدودة للغاية. أما المفاعل المولد السريع فهو مفاعل يعمل بالنيوترونات السريعة المتولدة عن الانشطارات النووية دون تهدئة؛ حيث لا يستخدم فيه أي مادة مهدئة للنيوترونات السريعة؛ وبذلك يتم تحاشي تهدئة النيوترونات أو خفض سرعتها. وتتميز النيوترونات السريعة بمقطع عرضي (أي باحتمالية) أكبر على التفاعل مع المادة القابلة للانشطار وهي اليورانيوم 238؛

وتكوين اليورانيوم 239 الذي سرعان ما يتحول إلى البلوتونيوم 239 الانشطاري. وبذلك يمكن توليد كميات أكثر من المادة الانشطارية لزيادة معدل تكونها في هذه المفاعلات مقارنة بالكميات المستهلكة. ويعود السبب في تسمية هذه المفاعلات بالمولدة السريعة (Fast breeder reactor-FBR) إلى أن كمية مادة البلوتونيوم الانشطارية المتولدة فيها تزيد على كمية المادة المستهلكة ، فضلا عن استخدام النيوترونات السريعة، وتجدر الإشارة إلى أن كفاءة تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة كهربائية تبلغ 40%، الأمر الذي يفضلها على بقية الأنواع.

6. مفاعلات الاندماج النووي:

تقوم مفاعلات الاندماج النووي على تسخين خليط من نظائر الهيدروجين أو الليثيوم عند درجة حرارة كبيرة تصل إلى حوالي 60-70 مليون درجة مئوية (أعلى من الدرجة الداخلية للشمس) للوصول بمواد الخليط إلى الحالة الرابعة (البلازما) والتي تعرف بأنها الحالة التي تكون عندها جميع ذرات المادة متأيونة (أي يكون الإلكترون منفصلا عن النواة) وبالتالي الحصول على اندماج نووي متواصل ويجب احتواء البلازما بعيدا عن جدران الوعاء حتى لا تفقد طاقتها نتيجة التصادمات؛ فيتوقف التفاعل الاندماجي خلال أجزاء صغيرة من الثانية ويكون ذلك بعدة طرق مثل؛ طريقة الجاذبية ؛ كما يحدث في النجوم وطريقة القارورة المغناطيسية المعروفة باسم (توكوماك) وطريقة القصور الذاتي وغيرها . ويرى العلماء إن انجح الطرق العملية لاحتواء البلازما حاليا (بعيدا عن جاذبية النجوم) هي القارورة المغناطيسية التي تطبق فيها مجالات مغناطيسية خارجية شديدة لاحتواء البلازما الساخنة وعزلها عن جدران الوعاء الحاوي . ولا زالت هناك محاولات لتطوير مفاعلات لاحتواء البلازما وإنتاج مفاعل اندماج نووي لتوليد الطاقة. إما في مجال التدمير فقد استخدمت الطاقة الاندماجية منذ عام 1953 م في القنابل ثنائية الطول المعروفة (بالقنابل الهيدروجينية) ويستخدم في التفجيرات النووية الاندماجية قنبلة مصنوعة من مادة انشطارية لرفع درجة حرارة المواد الاندماجية التي تحيط بالمادة الانشطارية عادة؛ للدرجة اللازمة لإحداث الاندماج بين مكوناته.

وتوجد هناك أنواع أخرى من المفاعلات تستطيع إن توفر كمية من الإشعاع يستخدم في صنع بعض النظائر المشعة التي تستخدم في علاج بعض الأمراض وبعض التطبيقات العملية وكذلك لإنتاج بعض أنواع الوقود النووي الأخرى.

3.2.1 مصادر الطاقة المتجددة (Renewable energy resources):

وهي المصادر التي تتولد بصورة طبيعية ومستديمة وتتميز بأنها غير ناضبة ومتوفرة في الطبيعة بصورة غير محدودة و أحيانا محدودة ولكنها متجددة باستمرار، فضلا على أنها نظيفة لا ينتج عن استخدامها أي تلوث بيئي وتشمل هذه المصادر، الطاقة الشمسية التي تعد المصدر الرئيس للطاقة على سطح الأرض وكذلك طاقة الرياح وطاقة المد والجزر الناتجة عن قوى التجاذب ما بين الأرض والقمر و الشمس وطاقة الأمواج وطاقة التدرج الحراري في مياه المحيطات وطاقة الحرارة الجوفية وطاقة المساقط المائية ويصنف العلماء الطاقة الناتجة من حرق الفضلات الزراعية والمنزلية ضمن الطاقات المتجددة، و سوف نتكلم عن هذه المصادر بالتفصيل في الفصول اللاحقة.

3.1 استمرارية توفر مصادر الطاقة:

أدى الإسراف في استهلاك الطاقة في القرن الماضي إلى تناقص احتياطات الطاقة التقليدية في العالم، ومن الأرقام المفيدة في هذا المجال هو نسبة الاحتياطي إلى المنتج، فإذا تم تقسيم الاحتياطي المضمون في نهاية كل سنة على الإنتاج في تلك السنة فأن الناتج يمثل طول عمر الاحتياطي. وهذا الرقم سيدل على توفر الطاقة في منطقة معينة. فمثلا في عام 2002 كان هذا الرقم يبلغ 10 أعوام لنفط غرب أوروبا، و 25 عام لنفط أمريكا الشمالية وأكثر من 100 عام لمنطقة الشرق الأوسط، إما للعالم ككل فيبلغ حوالي 40 عام وهذا يعني إن النفط سينفذ بعد 40 سنة، ويختلف الأمر بالنسبة إلى الغاز الطبيعي، إذ إن نسبة الاحتياطي إلى المنتج في الوقت الراهن حوالي 65 عاما⁽³⁾.

أما بالنسبة إلى الفحم فإن الاحتياطي العالمي كبير وموزع على مناطق مختلفة من العالم، ويبلغ مقدار الاحتياطي إلى المنتج حوالي 200 عام وإذا ما زاد استهلاك الفحم نتيجة نضوب النفط والغاز سوف يقل هذا الرقم الى حد كبير، ولكن للفحم مساوئ كثيرة وأهم هذه المساوئ هو انبعاث ثاني أكسيد الكربون و اكاسيد الكبريت وغيرها من الملوثات والتي تسبب ارتفاع درجة حرارة الأرض، اذ يعتقد العلماء ان درجة الحرارة ترتفع بمعدل 0.3°C في كل عقد وذلك نتيجة لزيادة تركيز الغازات الملوثة في الجو، وعلى هذا الأساس يتوجب على البشرية التقليل من الطاقة المستهلكة لغرض إطالة عمر الاحتياطي والبحث عن مصادر جديدة غير ناضبة وغير ملوثة للبيئة وهذه المصادر هي مصادر الطاقة المتجددة.

4.1 خصائص مصادر الطاقة المتجددة:

- إن خصائص مصادر الطاقة المختلفة ومتطلبات استخدامها تفرض على الباحثين تطوير المعدات اللازمة لاستخلاص هذه الطاقات واستغلالها لتلبية حاجات الإنسان المختلفة، وبالنسبة لمصادر الطاقة المتجددة فإن أهم خصائصها هي ⁽⁴⁾:
1. إن أغلب مصادر الطاقات المتجددة مشتقة بصورة مباشرة أو غير مباشرة من الشمس والطاقة الصادرة عنها، لذا فهي مصادر دائمة بالمقارنة مع عمر الشمس المتوقع، إضافة إلى أنها طاقات نظيفة غير ملوثة للبيئة بالمقارنة مع مصادر الطاقة الاحفورية والطاقة النووية.
 2. شدة الطاقة في هذه المصادر واطئة وبالتالي فإن استخدام هذه المصادر تحتاج إلى استعمال العديد من الأجهزة ذات المساحات و الحجوم الكبيرة والذي يسبب ارتفاع الكلفة الأولية اللازمة لإنشاء مثل هذه المشاريع.
 3. مصادر الطاقة المتجددة غير متوفرة بشكل منتظم وتتغير باستمرار خلال الوقت من اليوم وخلال الوقت من السنة، لذا فإن تخزين الطاقة أمر أساسي في منظومات الطاقات المتجددة.
 4. توجد الطاقات المتجددة بأشكال مختلفة مما يستلزم تطوير المعدات التكنولوجية الخاصة بكل طاقة على حدة.

5.1 مدخل الى ديناميك الحرارة (Introduction of thermodynamic):

قبل الدخول في التفاصيل والمبادئ الهندسية لموضوع الطاقات المتجددة، لا بد لنا ان نستذكر بعض التعريفات والخواص المهمة في علم الترموداينمك كالكتلة والكثافة والحجم النوعي والضغط والقوة والشغل والقدرة ودرجة الحرارة وغيرها ⁽⁵⁾.

1. الكتلة (m) Mass

وهي كمية المادة الموجودة في جسم ما وتقاس بالكيلو غرام (kg).

2. الحجم النوعي (v) Specific volume

هو الحجم المشغول لوحدة الكتلة من تلك المادة، ويقاس بالمتري المكعب لكل كيلو غرام (m³/kg).

3. الكثافة (ρ) Density:

هي الكتلة التي تشغل وحدة الحجم الواحدة من المادة، وتقاس بالكيلو غرام لكل متر مكعب (kg/m³)، وتحسب كثافة المادة من المعادلة الآتية:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1) \dots$$

اذ ان :

$$m = \text{الكتلة (kg)}$$

$$V = \text{الحجم (m}^3\text{)}$$

اي ان الكثافة والحجم النوعي هما معكوسا بعضهما. بمعنى ان:

$$\rho = \frac{1}{v} \quad \dots (1.2)$$

3. الضغط (P): Pressure

يعرف الضغط بأنه القوة المسلطة على وحدة المساحة ومنه اذا سلطنا قوة مقدارها F على مساحة A ، واذا كانت هذه القوة مسلطة بالتساوي على المساحة عندئذ يعرف الضغط بالمعادلة الآتية:

$$P = \frac{F}{A} \quad \dots (1.3)$$

ويقاس الضغط بالنيوتن لكل متر مربع N/m^2 او ما يسمى باسكال Pascal (Pa) وتقاس الضغوط الكبيرة بوحدة البار Bar ويساوي:

$$1 \text{ Bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

4. درجة الحرارة (T): Temperature

درجة الحرارة هي خاصية اخرى من خواص النظام المهمة وهي مقياس لمدى سخونة او برودة النظام او الجسم. توجد هناك نوعين من مقاييس درجة الحرارة هما المقياس المئوي (Celsius scale) والمقياس الفهرنهايتي (Fahrenheit scale). تسمى درجة الحرارة التي ينجمد فيها الماء تحت الضغط الجوي القياسي نقطة الانجماد وتعطى هذه النقطة الرقم صفر على المقياس المئوي ام النقطة التي يغلي عندها الماء فهي 100 درجة مئوية وتقسم المسافة بين النقطتين الى 100 قسم، كل واحدة منها يسمى درجة مئوية. وبالمثل في المقياس الفهرنهايتي فان النقطة التي ينجمد عندها الماء عند الضغط الجوي القياسي هي 32 درجة فهرنهايتية، والنقطة التي يغلي عندها الماء هي 212 درجة فهرنهايتية. وتقسم المسافة بين النقطتين الى 180 قسم، كل وحدة منها يسمى درجة فهرنهايتية والعلاقة بين النظامين كالآتي:

$$C^{\circ} = \frac{5}{9}(F^{\circ} - 32) \quad \dots (1.4)$$

كما يوجد مقياس اخر لقياس درجات الحرارة هو المقياس المطلق والذي تكون فيه اقل درجة

حرارة هي الصفر المطلق Absolute zero وهو تلك الدرجة الحرارية التي لا يمكن ان تنخفض درجة الحرارة الى اقل منها ويمكن الربط ما بين النظام المطلق و النظام المئوي عن طريق العلاقة الاتية:

$$T(K^{\circ}) = T(C^{\circ}) + 273.16 \quad \dots (1.5)$$

5. الشغل Work:

اذا اثرت قوة مقدارها (F) على جسم ما وازاحته مسافة مقارها (x) فيقال ان هذه القوة قد انجزت شغل على هذا النظام ويحسب هذا الشغل من المعادلة الاتية:

$$W = F * x \quad \dots (1.6)$$

ويقاس الشغل بوحدات الجول (1 Joule = N.m).

6. القدرة Power:

هي المعدل الزمني للشغل المنجز وتقاس بوحدات الواط او الكيلو واط وتحسب من المعادلة الاتية:

$$Power(W) = \frac{Work}{Time} \quad \dots (1.7)$$

وتقاس القدرة احيانا بوحدات القدرة الحصانية (Horse power H.P) حيث

$$(1 \text{ H.P} = 754.7 \text{ W})$$

اما القدرة الكهربائية فتحسب من المعادلة الاتية:

$$Electrical.power = V.I \quad \dots (1.8)$$

حيث ان :

V : الفولتية المسلطة (V)

I : التيار (A)

7. الطاقة Energy:

الطاقة هي القدرة على انجاز شغل ما، وتقسم الطاقة الى نوعين. الاول بشكل طاقة مخزونة داخل حدود النظام system كالطاقة الكامنة Potential energy والطاقة الحركية Kinetic energy والطاقة الداخلية Internal energy، والثاني بشكل طاقة منتقلة عبر حدود النظام

الى المحيط الخارجي كالحرارة Heat والشغل وتقاس الطاقة بوحدات الجول او احدى مشتقاته.

1.7 الطاقة الكامنة Potential energy:

هي الطاقة التي يمتلكها جسم ما بسبب وضعه نسبة الى مستوى اسناد معين مثل مستوى سطح البحر، فاذا كان اي جسم على ارتفاع مقداره Z فوق مستوى الاسناد عندئذ نتيجة لكتلته يصبح لديه طاقة كامنة مخزونة في هذا الجسم ويمكن حساب هذه الطاقة الكامنة من المعادلة الآتية:

$$P.E = m.g.Z \quad \dots (1.9)$$

حيث ان :

$$m = \text{الكتلة (kg)}$$

$$g = \text{التعجيل الارضي} = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$Z = \text{المسافة من مستوى الاسناد (m)}.$$

2.7 الطاقة الحركية Kinetic energy:

هي الطاقة التي يمتلكها الجسم نتيجة حركته، فاذا كان الجسم يتحرك بسرعة V فان الطاقة الحركية تحسب من المعادلة الآتية:

$$K.E = \frac{1}{2} m.V^2 \quad \dots (1.10)$$

3.7 الطاقة الحرارية Heat energy:

هي احد اشكال الطاقة، ويمكن تحويلها من شكل الى اخر وتنتقل الحرارة بين الاجسام او المنظومات المختلفة نتيجة وجود فرق في درجات الحرارة ومن مصادر الطاقة الحرارية التفاعلات الكيميائية واحتراق الوقود والاحتكاك والتفاعلات النووية وتقاس الحرارة بالجول وفي نظام الوحدات البريطاني تقاس بالوحدة الحرارية البريطانية (B.T.U).

8. الحرارة النوعية Specific heat:

تعرف الحرارة النوعية للمادة بانها كمية الحرارة التي تنتقل من وحدة كتلة واحدة من المادة او اليها في حين تتغير درجة حرارة المادة بمقدار درجة حرارة واحدة وحداتها هي J/kg.K و تتغير الحرارة النوعية بتغير درجة الحرارة ، الا انه في معظم المواد الصلبة والسائلة يكون هذا الاختلاف صغير جدا، بحيث يمكن اعتبارها ثابتة غير ان هذه الحرارة النوعية تتغير بتغيير حالة المادة من طور الى اخر و يمكن حساب كمية الحرارة المكتسبة او المفقودة (Q) من مادة باستخدام الحرارة النوعية كما في المعادلة الآتية:

$$Q = m.c.(T_2 - T_1) \quad \dots (1.11)$$

حيث ان :

m : كتلة المادة (kg)

c : الحرارة النوعية

T_1 : درجة الحرارة الاصلية للمادة.

T_2 : درجة الحرارة النهائية للمادة.

يوجد هناك نوعين من الحرارة النوعية، هما:

1. الحرارة النوعية تحت حجم ثابت c_v :

وتعرف بانها كمية الحرارة المنتقلة من وحدة كتلة واحدة من الغاز او اليها في حين تتغير درجة الحرارة بمقدار درجة حرارة واحدة ويبقى الحجم ثابت.

2. الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت c_p :

وتعرف بانها كمية الحرارة المنتقلة من وحدة كتلة واحدة من الغاز او اليها في حين تتغير درجة الحرارة بمقدار درجة حرارة واحدة ويبقى الضغط ثابت.

وتزداد كمية كلا من الحرارتين النوعيتين بزيادة درجة الحرارة ويبين الجدول (1.1) قيم هذه الحرارتين لعدد من المواد الشائعة.

الغاز	c_p kJ/kg.K	c_v kJ/kg.K
الهواء	1.006	0.717
ثاني اوكسيد الكربون	0.827	0.632
اول اوكسيد الكربون	1.05	0.748
الهيدروجين	14.3	10.4
النيتروجين	1.041	0.743
الاوكسجين	0.913	0.652
الميثان	2.234	1.705
ثاني اوكسيد الكبريت	0.645	0.51

الجدول (1.1) الحرارة النوعية لعدد من الغازات⁽⁵⁾

9. الحرارة المحسوسة **Sensible heat**:

هي كمية الحرارة التي تضاف أو تطرح من أي نظام وتسبب تغيير في درجة حرارة هذا النظام، وسميت محسوسة لوجود تغير محسوس في درجة حرارة المادة ويمكن حساب كمية هذه الحرارة من المعادلة (1.11).

10. الحرارة الكامنة **Latent heat**:

هي كمية الحرارة التي تضاف إلى النظام وتسبب تغيير في حالة وطور المادة ولا تسبب تغيير في درجة حرارة المادة، فلتحويل 1 كيلوغرام ثلج عند درجة حرارة الصفر المئوي إلى الحالة السائلة فإنه يحتاج إلى طاقة كامنة مقدارها 334 kJ وهي تمثل الحرارة الكامنة للانصهار Latent heat of fusion كما في الشكل (5.1). تتم هذه العملية من النقطة a إلى النقطة b ويلاحظ ثبوت درجة الحرارة في هذا الإجراء، عند الاستمرار في إضافة الحرارة إلى الثلج بعد نقطة b يلاحظ ارتفاع درجة حرارة الماء (وهذه هي الحرارة المحسوسة) ويستمر هذا الارتفاع إلى نقطة c المقابلة لـ 100 درجة مئوية حيث يبدأ تحول الماء إلى بخار ويسمى السائل في هذه الحالة بالسائل المشبع (Saturated liquid) وتسمى درجة الحرارة في هذه الحالة بدرجة حرارة التشبع (Saturation temperature) وهي الدرجة التي يبدأ عندها التبخر وتختلف باختلاف المواد والضغط فهي للماء حوالي 100 °C عند الضغط الجوي وللامونيا هي -33 °C ، ولا تحصل زيادة في درجة الحرارة عند الاستمرار في إضافة الحرارة (الإجراء cd) ولكن يبدأ تحول الماء إلى البخار وتسمى الحرارة المضافة في هذه العملية بالحرارة الكامنة للتبخير (Latent heat of vaporization).

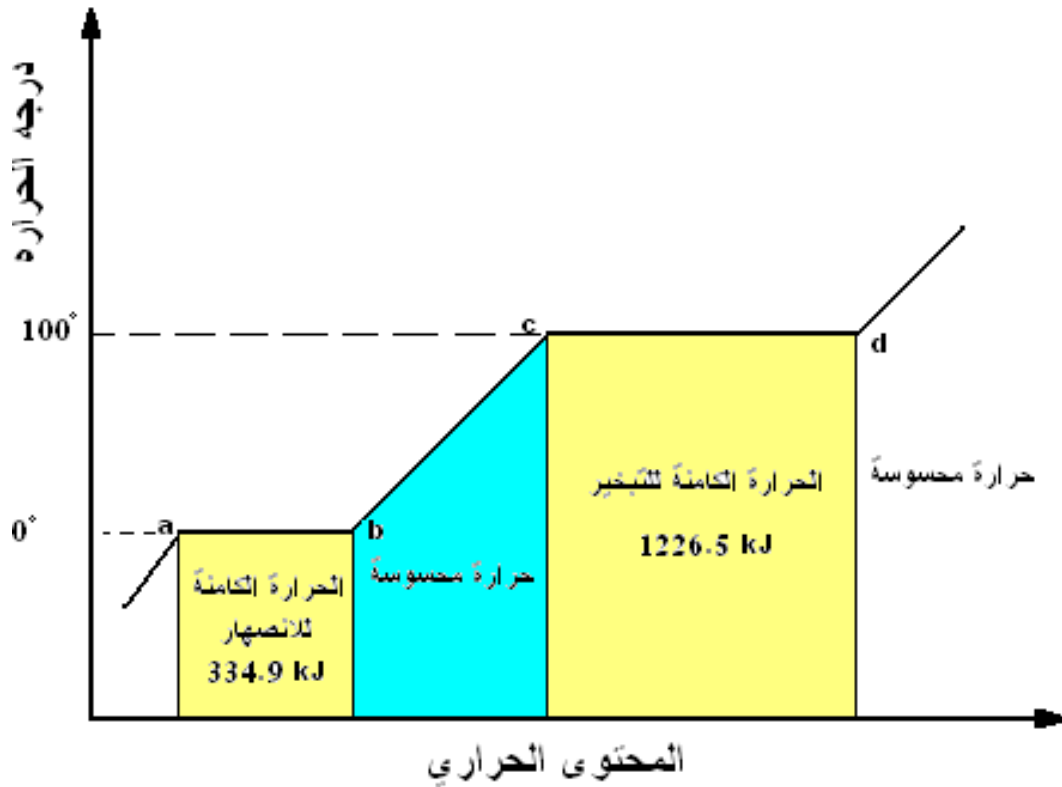
وعند انتهاء عملية التبخير وتحويل كل الماء الموجود في الحيز إلى بخار (النقطة d) والذي يسمى في هذه الحالة بالبخار المشبع (Saturated vapor)، عند الاستمرار في إضافة الحرارة إلى الحيز، تحدث زيادة أخرى في درجة الحرارة نتيجة تحويل البخار إلى بخار محمص (Superheated vapor) بعد النقطة (d) كما في الشكل (5.1)، ولتكثيف البخار المحمص يلزم أولاً إزالة التخميص بتبريد البخار إلى درجة حرارة تشبعه وعند هذه النقطة يمكن تكثيفه بإزالة الحرارة الكامنة للتبخير ليتحول إلى سائل بدرجة حرارة التشبع (سائل مشبع).

11. المحتوى الحراري **Enthalpy (h)**:

هي كمية الطاقة الحرارية التي يحويها كيلوغرام واحد من المادة وتأخذ نسبة إلى نقطة اسناد

معلومة، يأخذ فيها قيمة المحتوى الحراري صفراً وتختلف نقطة الاسناد هذه من مادة الى اخرى، فللماء اقترح في المؤتمر العلمي الخامس لخواص الماء عام 1956، ان تكون الحالة السائلة (الماء) عند النقطة الثلاثية (Triple point)¹ حالة الاسناد لبخار الماء وتقع النقطة الثلاثية للماء تحت ضغط ($P_{\text{triple}} = 0.6112 \text{ kPa}$) ودرجة حرارة ($T_{\text{triple}} = 0.01^\circ \text{C}$). فلو اخذنا كتلة 1 كغم من الماء موضوعة في اسطوانة تحت ضغط ثابت بدرجة حرارة الصفر المئوي وسخن هذا الماء بتزويده بطاقة حرارية لارتفعت درجة حرارته حتى تصل الى درجة حرارة الاشباع وتكون الطاقة الحرارية المعطاة الى الاسطوانة كالآتي:

$$Q_{in} = \Delta h = h_f - 0 = h_f \quad \dots (1.11)$$



الشكل (5.1) الحرارة الكامنة لانصهار وتبخير الماء

وتسمى الطاقة الحرارية المعطاة الى الماء في هذا الطور بالمحتوى الحراري للسائل (h_f) (Liquid enthalpy)، وعند الاستمرار في اضافة الطاقة الى الماء الموجود في داخل الاسطوانة يبدأ تكون البخار مع ثبوت درجة الحرارة الى ان يتحول كل الماء الموجود الى بخار

¹ وهي النقطة التي يصبح فيها كلا من الحالة الصلبة والسائلة والغازية في حالة توازن مع بعضها.

مشبع ولو ان h_g هي الانتالبية النوعية للبخر المشبع فأن الطاقة الحرارية التي تم اضافتها أثناء التبخر هي:

$$Q_{in} = h_{fg} = h_g - h_f$$

او

$$h_g = h_{fg} + h_f \quad \dots (1.12)$$

والاستمرار في اضافة الطاقة الحرارية يؤدي الى ان يصبح البخر محمصا مع ارتفاع درجة الحرارة، ولتسهيل الحسابات فان هذه الخواص وضعت في جداول خاصة بدلالة درجة الحرارة والضغط وسميت في حالة الماء وبخاره بجدول بخار الماء.

اما حساب خواص البخر في منطقة البخر الرطب (المنطقة cd) فيحتاج الى معرفة نسبة الجفاف (Dryness fraction) ويرمز لها عادة (x) وتعرف بانها نسبة كتلة البخر المشبع الموجود في خليط البخر الرطب الى كتلة الخليط الكلية فاذا كان المائع سائلا مشبع فان $x=0$ ولو كان هذا المائع بخارا مشبعا فان نسبة الجفاف تكون $x=1$ وتحسب الخواص النوعية مثل الانتالبية للخليط من المعادلة الاتية:

$$h_x = h_f + x.h_{fg} \quad \dots (1.13)$$

وبنفس الاسلوب يحسب الحجم النوعي:

$$v_x = v_f + x.v_{fg} \quad \dots (1.14)$$

12. الانتروبي (الاختلاج) Entropy (S):

عند دراسة العلاقة بين الطاقة المستهلكة وكمية الشغل المنجز، لابد من ايجاد متغير يحدد كمية الطاقة التي يستفاد منها والتي لا يستفاد منها، اذ ان اكثر من نصف الطاقة الحرارية في المكنائ الحرارية تطرح الى الخارج ولا يمكن الاستفادة منها ويسمى هذا العامل بالانتروبي (الاختلاج) والذي يعرف بنسبة اللامتاحية (unavailability) والانتروبي مثل الانتالبية مأخوذ نسبة الى نقطة اسناد تعد فيه قيمة الانتروبي صفرا، وتوجد قيم الانتروبي للسوائل والابخرة في جداول خاصة، ويمثل تغير الانتروبي (ΔS) نسبة الطاقة الحرارية المنقولة من او الى النظام لكل درجة حرارة مطلقة ويحسب من المعادلة الاتية:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad \dots (1.15)$$

حيث ان :

ΔQ : كمية الحرار المنتقلة (kJ/kg)

T : درجة الحرارة المطلقة (K)

13 . القانون الاول لديناميك الحرارة :First law of thermodynamic

ينص القانون الاول للثرموداينمك على ان الطاقة لا تفنى ولا تستحدث وانما يمكن تحويلها من شكل الى اخر، ولهذا يسمى هذا القانون احيانا بقانون حفظ الطاقة وخلال اي دورة تتم على اي نظام فأن تكامل الدورة يتناسب مع تكامل الشغل لها ورياضيا يمكن التعبير عن القانون الاول للثرموداينمك بالشكل الاتي:

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \quad \dots (1.16)$$

14 . القانون الثاني لديناميك الحرارة :Second law of thermodynamic

على الرغم من ان القانون الاول للثرموداينمك ينص الى ان الطاقة لا تفنى ولا تستحدث فان هذا القانون لا يتعامل بصورة مباشرة مع اتجاه انسياب الشغل والحرارة من والى النظام وتوجد هناك صياغتان تقليديتان للقانون الثاني للثرموداينمك هما: صياغة كلفن – بلانك و التي تنص على انه من المستحيل انشاء محرك يستطيع تحويل كل الحرارة المتوفرة الى شغل وانما تكون هناك جزء من الطاقة مفقودة الى الخارج على شكل خسائر والصيغة الثانية للقانون الثاني لديناميك الحرارة (صيغة كلاسيوس) فتنص على ان من المستحيل نقل الحرارة من مكان ذي درجة حرارة واطنة الى مكان ذي درجة حرارة اعلى من دون انجاز شغل.

6.1 مبادئ انتقال الحرارة:

يعرف علم انتقال الحرارة بانه العلم الذي يبحث في حساب كمية الحرارة المنتقلة نتيجة وجود فرق في درجات الحرارة بين المواد والانظمة المختلفة. وتوجد هناك ثلاثة طرق لانتقال الحرارة هي:

1. التوصيل (Conduction):

في حالة وجود فرق في درجات الحرارة في وسط صلب، فان الحرارة ستنساب من المنطقة ذات درجة الحرارة العالية الى المنطقة ذات درجات الحرارة الواطئة، ويعتمد المعدل الحقيقي لانتقال الحرارة (q_u) في اي وسط على معامل التوصيل k والذي هو عبارة عن خاصية فيزيائية للوسط ويحسب هذا المعدل من المعادلة الاتية:

$$q_u = -k.A.\frac{dT}{dx} \quad \dots (1.17)$$

حيث ان:

$$\frac{dT}{dx} : \text{لانحدار الحراري خلال المسافة } x.$$

A : المساحة التي تنتقل خلالها الحرارة.

تظهر الاشارة السالبة كنتيجة للقانون الثاني لديناميك الحرارة، والذي يحتاج الى وجوب انسياب الحرارة بالاتجاه من درجات الحرارة الاعلى الى درجة الحرارة الاوطأ. تعرف المعادلة اعلاه بمعادلة التوصيل الحراري او قانون فوريرير للتوصيل وقد سمي باسم العالم الفرنسي (J.B.J Fourier) الذي اقترحه عام 1822 وبالرغم من ان معامل التوصيل الحراري بشكل عام يتغير بتغير درجة الحرارة فان التغير في بعض المسائل الهندسية يكون صغير جدا بحيث يمكن اهماله.

2. الحمل (Convection):

تمثل هذه الطريقة انتقال الحرارة في الموائع، حيث تنتقل الطاقة بواسطة الحركة الماكروسكوبية لجزيئات المائع والتي تتحرك نتيجة فرق الكثافة او بواسطة مضخة او مروحة او نتيجة الاثنين معا. وبغض النظر عن اسلوب انتقال الحرارة، فان معدل انتقال الحرارة بالحمل بين سطح ومائع يمكن حسابه من العلاقة الاتية:

$$q_c = h_c.A.(T_s - T_\infty) \quad \dots (1.18)$$

حيث ان:

$$q_c = \text{معدل انتقال الحرارة بالحمل (W)}.$$

$$A = \text{المساحة التي تنتقل خلالها الحرارة (m}^2\text{)}.$$

$$h_c = \text{معامل انتقال الحرارة بالحمل (W/m}^2\text{.K)}.$$

$$(T_s - T_\infty) = \text{الفرق بين درجة حرارة السطح (} T_s \text{) ودرجة حرارة المائع (} T_\infty \text{)}.$$

وتسمى العلاقة (1.18) بقانون نيوتن للتبريد ويعتمد انتقال الحرارة بالحمل على لزوجة المائع اضافة الى اعتماده على الخواص الحرارية للمائع (الموصلية الحرارية للمائع والحرارة النوعية والكثافة).

3. الإشعاع (Radiation):

لا يتطلب انتقال الحرارة بالإشعاع إلى وسط مادي لينتقل خلاله وتعتمد كمية الطاقة التي تترك السطح كحرارة إشعاعية على درجة الحرارة المطلقة وطبيعة السطح ويستطيع أي مشع مثالي أو جسم أسود من أن يبعث طاقة إشعاعية من سطحه بمعدل (q_r) ويعطى بالمعادلة الآتية:

$$q_r = \sigma \cdot A_1 \cdot T_1^4 \quad \dots (1.19)$$

حيث أن:

$$q_r = \text{معدل انتقال الحرارة بالإشعاع (W)}.$$

$$A_1 = \text{المساحة التي تنتقل خلالها الحرارة (m}^2\text{)}.$$

$$\sigma = \text{ثابت ستيفان - بولتزمان} = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \text{ (بالوحدات العالمية)}$$

$$= 0.1718 \cdot 10^{-8} \text{ Btu/h.ft}^2 \cdot \text{R}^4 \text{ (بالوحدات البريطانية)}$$

لا تخضع الأجسام الحقيقية لمواصفات المشع المثالي حيث تبعث طاقة بمعدل اوطى من الأجسام السوداء. ويعطى معدل انتقال الحرارة الإشعاعية الصافي المتبادل بين أي جسمين حقيقيين (رماديين) بالمعادلة الآتية:

$$q_r = \sigma \cdot F_{1-2} \cdot A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad \dots (1.20)$$

حيث أن F_{1-2} عبارة عن معامل لا بعدي يسمى عامل الشكل (Shape factor) وتوجد جداول خاصة لحسابه يمكن الاطلاع عليها في كتب انتقال الحرارة و T_1 و T_2 هي درجة حرارة هذين الجسمين الرماديين (grey bodies).

1.6.1 موجز معادلات انتقال الحرارة بالتوصيل:

سنتناول في هذا البند بعض الحالات المهمة لانتقال الحرارة بالتوصيل التي تواجهنا عند دراسة الطاقات المتجددة.

1. السطح المستوي Plane wall:

يوضح الشكل (6.1) جداراً سمكه Δx ودرجة حرارة سطحه T_1 و T_2 ومساحته A ، تنتقل الحرارة من السطح الساخن بدرجة حرارة T_1 إلى السطح الأقل حرارة بدرجة حرارة T_2 بمعدل Q ، وباستخدام قانون فوريير:

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

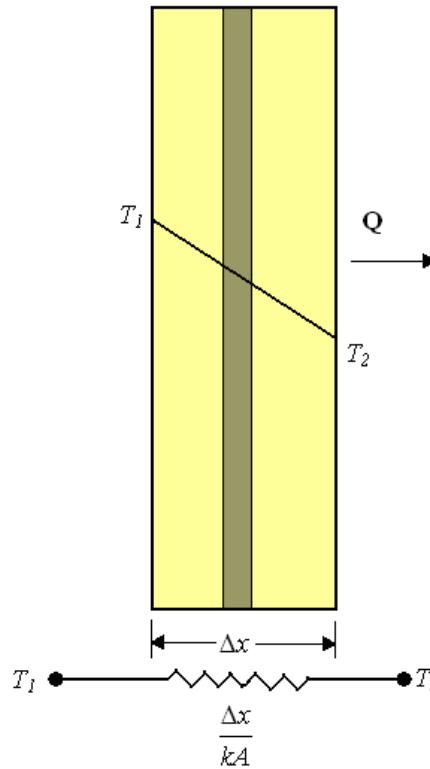
وبإجراء التكامل على العلاقة السابقة بين حدود درجة الحرارة T_1 و T_2 عبر الجدار الذي سمكه Δx نحصل على:

$$Q \int_0^{\Delta x} dx = kA \int_{T_1}^{T_2} dt \Rightarrow Q\Delta x = -kA(T_2 - T_1)$$

وبإجراء ترتيب بسيط نحصل على:

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\Delta x}{kA}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}} \quad \dots (1.21)$$

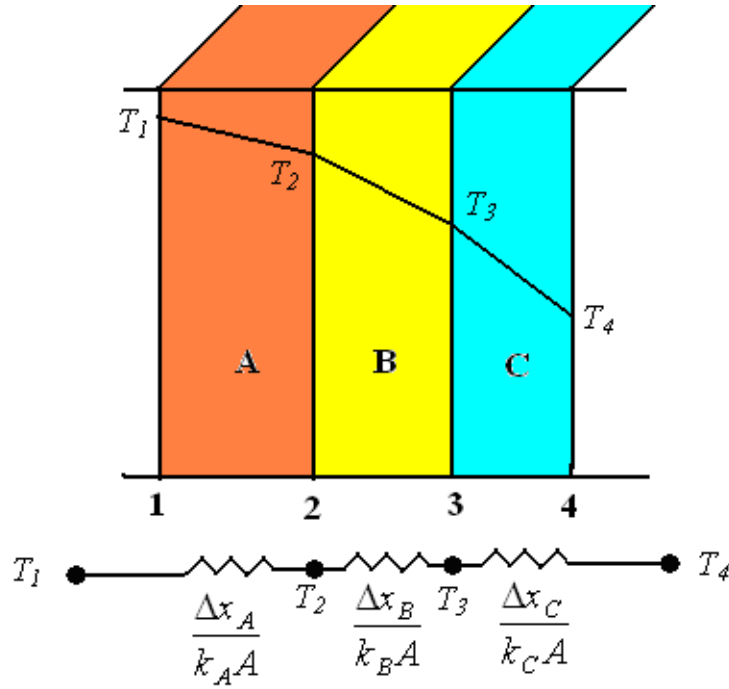
حيث ان R_{th} تمثل المقاومة الحرارية.



الشكل (6.1) انتقال الحرارة خلال السطح المستوي

أما في الجدران التي تتكون من عدد من الطبقات كما موضح في الشكل (7.1) فإنه يلاحظ انحدار الحرارة من T_1 الى T_4 وتحسب كمية الحرارة باستخدام العلاقة الاتية:

$$Q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\Delta x_A}{k_A A} + \frac{\Delta x_B}{k_B A} + \frac{\Delta x_C}{k_C A}} \quad \dots (1.22)$$



الشكل (7.1) انتقال الحرارة خلال جدار مركب من ثلاث طبقات مختلفة

2. الاسطوانة Cylinder:

يوضح الشكل (8.1) اسطوانة نصف قطرها الداخلي r_i ونصف قطرها الخارجي r_o والفرق في درجة الحرارة بين السطحين الداخلي والخارجي مقداره $T_i - T_o$ ، أي أن درجة حرارة السطح الداخلي أعلى من درجة حرارة السطح الخارجي و لأجل توضيح التحليل الرياضي لانتقال الحرارة خلال جدار الاسطوانة تؤخذ شريحة خلال الجدار عند نصف قطر r وبسمك dr ويكتب قانون فوريير لهذا النظام بالترتيب الآتي:

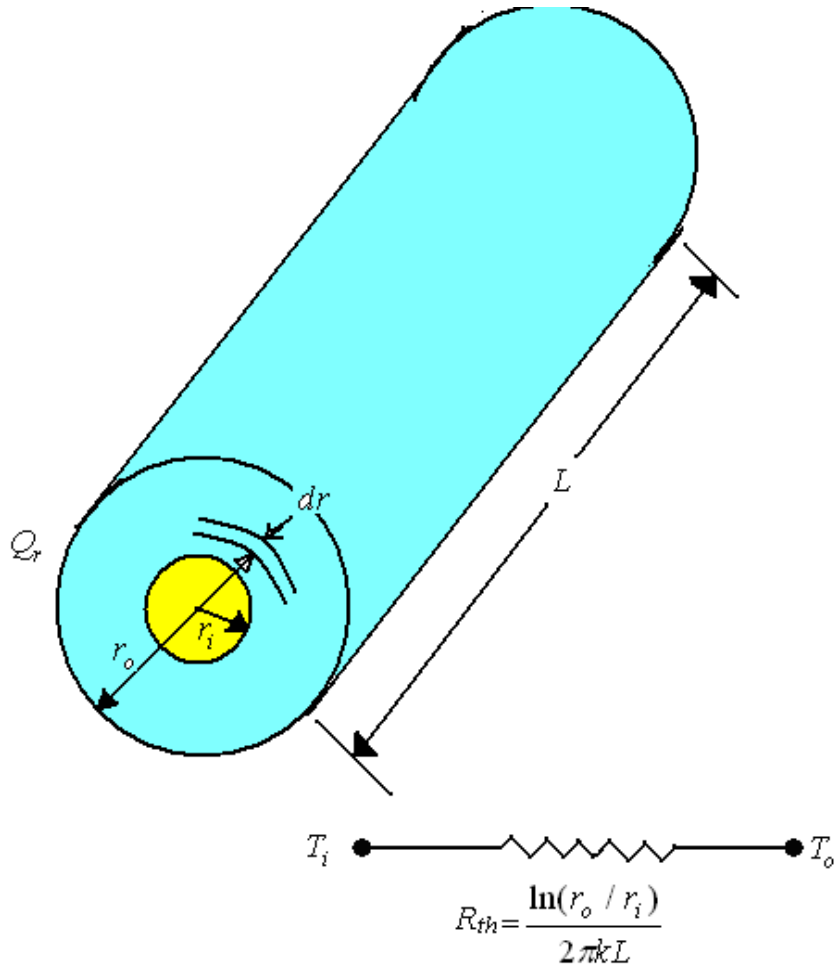
$$Q_r = -kA_r \frac{dT}{dr} \quad \dots\dots(1.23)$$

حيث أن A_r : المساحة السطحية للشريحة وتساوي $2\pi rL$

وبإجراء عملية لتكامل على المعادلة (1.23) وتطبيق الشروط الحدية نحصل على المعادلة:

$$Q_r = \frac{2\pi kL(T_i - T_o)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} = \frac{(T_i - T_o)}{\frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi kL}} = \frac{(T_i - T_o)}{R_{th}} \quad \dots\dots(1.24)$$

حيث أن R_{th} هي المقاومة الحرارية وتساوي $\frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi kL}$.



الشكل (8.1) انتقال الحرارة خلال اسطوانة مجوفة

3. معامل انتقال الحرارة الاجمالي Overall heat transfer coefficient:

عند اعتبار الجدار المستوي يفصل بين مائعين احدهما ساخن (A) عند احد الجوانب والاخر بارد (B) عند الجانب الاخر حيث تنتقل الحرارة من الجانب الساخن الى الجانب البارد (الشكل 8.1) فيمكن تمثيل انتقال الحرارة بدلالة المقاومات الحرارية بالصيغة الاتية:

$$Q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_A A} + \frac{\Delta x}{kA} + \frac{1}{h_B A}} \quad \dots\dots(1.25)$$

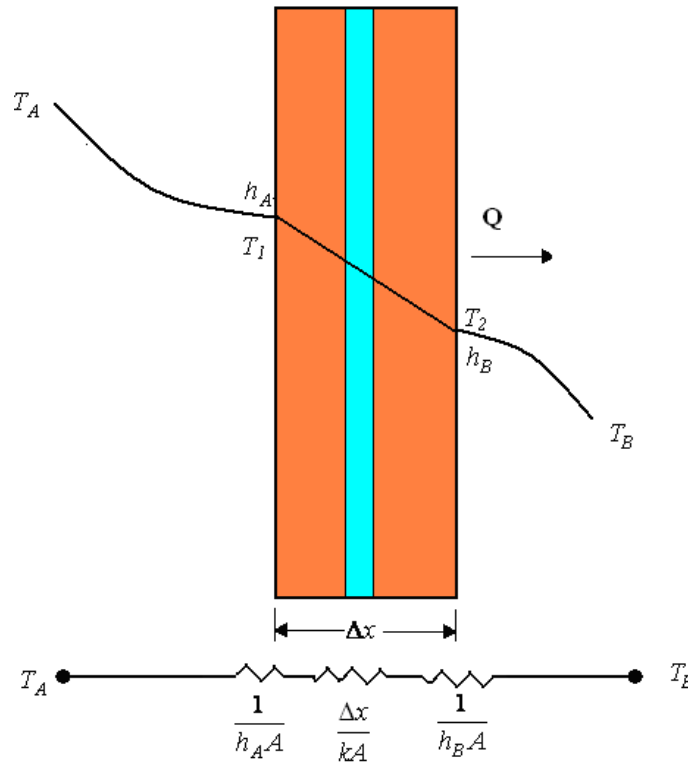
حيث ان مقاومة الحمل الحراري $\frac{1}{h A}$

ويمكن كتابة المعادلة (1.25) بدلالة معامل انتقال الحرارة الاجمالي U :

$$Q = UA\Delta T_{overall} \quad \dots (1.26)$$

اذ ان:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_A} + \frac{\Delta x}{kA} + \frac{1}{h_B}}$$



الشكل (8.1) معامل انتقال الحرارة الاجمالي عبر سطح مستوي

وبالنسبة للاسطوانة المعرضة الى انتقال حرارة عبرها من المائع الساخن الموجود في احد الجوانب الى المائع البارد الموجود في الجانب الاخر (الشكل 9.1) فيمكن حساب كمية الحرارة المنتقلة عبرها بالمعادلة الاتية

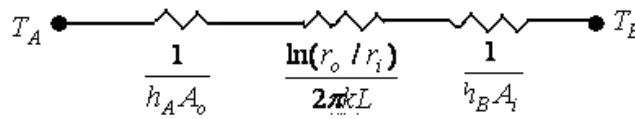
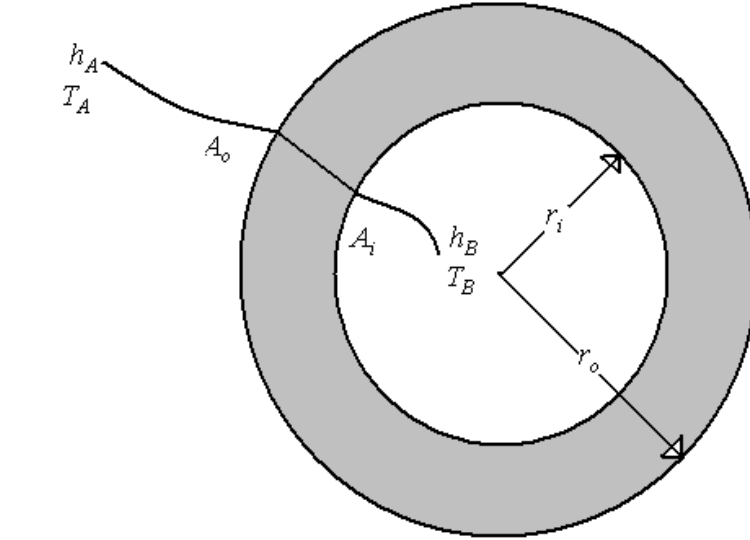
$$Q_r = \frac{(T_A - T_B)}{\frac{1}{h_A A_o} + \frac{\ln(r_o / r_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_B A_i}} \quad \dots (1.27)$$

او تكتب بالصيغة الاتية:

$$Q_r = U_o A_o (T_A - T_B) \quad \dots (1.28)$$

حيث ان U_o معامل انتقال الحرارة الاجمالي المعتمد على المساحة السطحية الخارجية ويساوي:

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_A} + \frac{A_o \ln(r_o / r_i)}{2\pi k L} + \frac{A_o}{h_B A_i}}$$



الشكل (9.1) معامل انتقال الحرارة الاجمالي عبر اسطوانة

ويمكن كتابة المعادلة (1.28) بدلالة معامل انتقال الحرارة الاجمالي المعتمد على المساحة السطحية الداخلية U_i كالآتي:

$$Q_r = U_i A_i (T_A - T_B)$$

حيث ان:

$$U_i = \frac{1}{\frac{A_i}{A_o h_A} + \frac{A_i \ln(r_o / r_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_B}}$$

2.6.1 موجز معادلات انتقال الحرارة بالحمل:

يلعب الحمل دورا اساسيا في انتقال الحرارة في منظومات الطاقة المتجددة والحمل ظاهرة اكثر تعقيدا من التوصيل لاعتمادها على متغيرات كثيرة وتعتمد دائما النتائج المختبرية للحصول على

العلاقات التي تحدد كمية الحرارة المنتقلة بالحمل من هذه الانظمة:

1. الحمل الطبيعي من صفيحة ساخنة:

ان انتقال الحرارة من سطح ساخن الى المحيط البارد له استخدامات واسعة خاصة في مجمعات الطاقة الشمسية ولقد وجد اعتمادا على التجارب العملية ان معامل الحمل من سطح مستوي الى الهواء الطلق يتناسب تقريبا مع الجذر الرابع للفرق بين درجات الحرارة وفق الصيغة الاتية:

$$h_{\infty} = C(T - T_a)^{\frac{1}{4}} \quad \dots(1.29)$$

حيث ان C ثابت يعتمد على وضعية الصفيحة ويأخذ القيم التالية:

1. $C = 2.5$ للصفيحة الافقية.

2. $C = 2.13$ للصفيحة المائلة بزاوية 45.

3. $C = 1.77$ للصفيحة العمودية.

T_a هي درجة حرارة الهواء المحيط.

2. الحمل الطبيعي بين صفيحتين مستويتين:

تغطي المجمعات الشمسية عادة بغطاء واحد او اكثر يوضع فوق الصفيحة المستوية لتقليل الفقد الحراري من الصفيحة الماصة والسماح للاشعة الشمسية بالدخول الى المجمع ووضع الباحث Hollands et al. (1976) العلاقة الاتية لحساب انتقال الحرارة بين صفيحتين مستويتين:

$$Nu = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \beta} \right]^+ \left(1 - \frac{\sin(1.8 * \beta)^{1.6} * 1708}{Ra \cos \beta} \right) \dots(1.30)$$
$$+ \left[\left(\frac{Ra \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+$$

اذ ان:

$$Nu = \text{عدد نسلت} = \frac{hl}{k}$$

$$Ra = \text{عدد رايلى} = \frac{g\beta'\Delta T l^3}{\nu\alpha}$$

$$\beta = \text{زاوية ميلان السطح}$$

$$h = \text{معامل انتقال الحرارة بالحمل}$$

α = الانتشارية الحرارية ،

ν = اللزوجة الكاينماتية ،

β' = معامل التمدد الحجمي،

g = التعجيل الارضي،

ΔT = الفرق في درجة الحرارة بين السطحين،

k = معامل التوصيل الحراري للهواء.

ويجب الانتباه انه اذا كانت القيم داخل الاقواس في المعادلة (1.30) قيم سالبة تؤخذ صفرا اثناء التطبيق بالمعادلة.

3. الحمل القسري داخل الانابيب:

يحسب عدد نسلت عند الجريان القسري الطبقي (عدد رينولد >2300) داخل الانابيب باستخدام المعادلة الاتية:

$$Nu = \frac{hD}{k} = 1.86(Re Pr)^{0.33} \left(\frac{D}{L}\right)^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.33} \quad \dots(1.31)$$

تؤخذ جميع الخواص عند درجة حرارة المائع ماعدا μ_w تؤخذ عند عند درجة حرارة الجدار. وفي حالة الجريان المضطرب (عدد رينولد <2300) فان عدد نسلت يحسب من المعادلة الاتية:

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0.023(Re)^{0.8} (Pr)^{0.4} \quad \dots(1.32)$$

4. الحمل القسري على صفيحة:

للجريان الطبقي فوق صفيحة مستوية ($Re = \frac{hL}{k} < 500000$) يحسب عدد نسلت من المعادلة:

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0.664(Re)^{0.5} (Pr)^{0.33} \quad \dots(1.33)$$

و للجريان المضطرب يحسب عدد نسلت من المعادلة الاتية:

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0.036(Pr)^{1/3} (Re^{0.8} - 23200) \quad \dots(1.34)$$

ويمكن استعمال العلاقة الاتية مباشرة لتعيين معامل انتقال الحرارة نتيجة الريح:

$$h_{wind} = 5.7 + 3.8V \quad \dots(1.35)$$

حيث ان V سرعة الرياح.

3.6.1 موجز معادلات انتقال الحرارة بالإشعاع:

يعتبر التبادل الإشعاعي بين سطحين افقيين من المواضيع التي لها تطبيق واسع في التطبيقات الشمسية ويمكن حساب التبادل الحراري الإشعاعي بين هذين السطحين باستخدام العلاقة الآتية:

$$Q_1 = -Q_2 = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \quad \dots (1.36)$$

حيث ان:

T_1, T_2 هي درجة حرارة السطح الاول والثاني على التوالي.

A_1, A_2 مساحة السطح الاول والثاني على التوالي.

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ابتعاثية السطحين الاول والثاني على التوالي.

F_{12} معامل الشكل بين السطحين.

وبتطبيق المعادلة (1.36) على المجمع الشمسي المستوي الذي يحتوي على صفيحتين

متوازيتين ومتساويتين بالمساحة ويكون معامل الشكل فيها $F_{12} = 1$ سوف نحصل على:

$$\frac{Q}{A} = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad \dots (1.37)$$

امثلة محلولة

مثال (1.1):

سيارة تتحرك بسرعة 50 km/h كانت مقاومة للهواء للسيارة حوالي 900 N احسب مقدار قدرة محرك السيارة باهمال الخسائر؟

الحل:

تحسب القدرة من المعادلة (1.7):

$$Power(W) = \frac{Work}{Time} = Force(N) * Speed(m / s)$$

$$Power = 900 * \frac{50 * 1000}{3600} = 12.5 \text{ kW}$$

مثال (2.1):

سخان كهربائي قدرته 5 kW يشتغل بفولتية 220 V احسب التيار بالامبير الذي نحتاج اليه لتشغيله؟

الحل:

تحسب القدرة الكهربائية من المعادلة (1.8):

$$Electrical.power = V.I$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{5000}{220} = 22.727 \text{ Ampere}$$

مثال (3.1):

ما كمية الحرارة المطلوبة لتسخين 5 kg من الفولاذ من 15 °C الى 100 °C، علما ان الحرارة النوعية للفولاذ هي 480 J/kg.K؟

الحل:

من المعادلة (1.11)

$$Q = m.c.(T_2 - T_1) \\ = 5 * 480 * (100 - 15)$$

$$= 204000 \text{ J}$$

$$= 204 \text{ kJ}$$

مثال (4.1) :

محرك ديزل يستخدم 54.5 kg من وقود الزيت بالساعة والذي قيمته الحرارية 45 MJ/kg، فإذا كانت الكفاءة الحرارية للمحرك 25%، احسب القدرة الناتجة من المحرك.

الحل :

كفاءة اي ماكينة حرارية تحسب من المعادلة الاتية:

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} = 0.25$$

$$\begin{aligned} P_{output} &= 0.25 * \text{القيمة الحرارية للوقود} * \text{التدفق الكتلي للوقود} \\ &= 0.25 * 45 * 10^6 * 54.5/3600 \\ &= 170.3125 \text{ kW} \end{aligned}$$

مثال (5.1) :

محطة لتوليد الطاقة الكهربائية تنتج 1000 MW وكفاءتها الحرارية 25%، احسب كمية الفحم المستهلك بوحدة طن / ساعة اذا كانت القيمة الحرارية للفحم 30 MJ/kg.

الحل :

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} = 0.25$$

$$P_{input} = \frac{1000}{0.25} = 4000 \text{ MW}$$

$$P_{input} = \text{التدفق الكتلي للوقود} * \text{القيمة الحرارية للوقود}$$

$$P_{input} = 4000 * 10^6 = \dot{m} * 30 * 10^6$$

$$\therefore \dot{m} = 133.333 \text{ kg/s}$$

$$\therefore \dot{m} = 133.333 * \frac{3600}{1000} = 480 \text{ ton / h}$$

مثال (6.1) :

احسب الحجم النوعي للبخر الرطب والذي نسبة جفافه 0.9 عند ضغط مقداره 1.24 MPa .

الحل :

من المعادلة (1.14) نجد:

$$v_x = v_f + x.v_{fg}$$

من جداول البخار، عند ضغط 1.24 MPa نجد ان:

$$v_f = 1.14 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} \quad , \quad v_g = 158.28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\begin{aligned} v_x &= 1.14 \cdot 10^{-3} + 0.9 \cdot (158.28 - 1.14) \cdot 10^{-3} \\ &= 0.142 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

مثال (7.1) :

احسب المحتوى الحراري (الانثالبية) للماء عن درجة حرارة 50°C ، قارن النتيجة المستحصلة مع جداول البخار.

الحل :

المحتوى الحراري للماء هو الطاقة الحرارية المطلوبة لرفع درجة حرارة 1 kg من الماء من الصفر الى درجة معينة وهي 50°C في هذا السؤال.

$$\begin{aligned} Q &= m.c.(T_2 - T_1) \\ &= 1 \cdot 4180 \cdot (50-0) \\ &= 209 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

من جداول بخار الماء نجد ان المحتوى الحراري للماء (h_f) عند درجة 50°C هو 209.33 kJ/kg

مثال (8.1) :

احسب الانتروبي (الاختلاج) للماء عن درجة حرارة 50°C ، قارن النتيجة المستحصلة مع جداول البخار.

الحل :

تغير الطاقة الحرارية من الصفر المئوي الى درجة 50°C تساوي 209 kJ/kg ومعدل الدرجة المطلقة ما بين الصفر المئوي والـ 50 °C

$$\frac{(0 + 273) + (50 + 273)}{2} = 298 \text{ K}$$

والتغير في الانتروبي يحسب من المعادلة (1.15):

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} = \frac{209}{298} = 0.701$$

من جداول بخار الماء نجد ان الانتروبي للماء (S_f) عند درجة 50°C هو 0.7038 kJ/kg

مثال (9.1):

بخار ماء نسبة جفافه 0.95 تحت ضغط مقداره 0.7 MN/m² ادخل الى مسخن بانبوب قطره الداخلي 0.25mm وكانت سرعة الجريان داخل الانبوب 12 m/s يدخل الماء الى المسخن تحت درجة حرارة 20 °C ويخرج البخار مع الماء ليكون خليطا يغادر المسخن تحت درجة حرارة 90 °C، احسب

1. كتلة بخار الماء الداخلة الى المسخن بالساعة.

2. المحتوى الحراري للبخار الداخل الى المسخن

الحل:

من جداول البخار عند ضغط 0.7 MPa نجد ان:

الضغط (MPa)	درجة حرارة الاشباع (°C)	المحتوى الحراري النوعي kJ/kg			الحجم النوعي m ³ /kg	
		h_f	h_{fg}	h_g	v_g	v_f
0.7	165	697.1	2064.9	2762	0.273	1.11*10 ⁻³

1. ان الحجم النوعي لبخار الماء نسبة جفافه 0.95 وتحت ضغط مقداره 0.7 MPa يساوي:

$$v_x = v_f + x.v_{fg} = 1.11*10^{-3} + 0.95 * (0.273 - 1.11*10^{-3}) = 0.259 \text{ m}^3/\text{kg}$$

حجم بخار الماء الذي يمر بالانبوب بالثانية يكون،

$$= \left[\frac{\pi}{4} * (25 * 10^{-3})^2 * 12 \right]$$

حجم بخار الماء الذي يمر بالانبوب بالساعة يكون،

$$= \left[\frac{\pi}{4} * (25 * 10^{-3})^2 * 12 * 3600 \right]$$

إذا كتلة الماء الداخلة بالساعة تساوي

$$= \left[\frac{\frac{\pi}{4} * (25 * 10^{-3})^2 * 12 * 3600}{0.259} \right] = 81.9 \text{ kg}$$

2. المحتوى الحراري النوعي لبخار الماء الداخل الى المسخن يساوي

$$= h_f + x * h_{fg} = 691.7 + 0.95 * 2064.9 = 2658.8 \text{ kJ/kg}$$

مثال (10.1):

وعاء حجمه 0.4 m^3 يحتوي 2 kg من البخار الرطب في حالة توازن عند ضغط مقداره 0.6 MPa احسب:

1. حجم وكتلة السائل

2. حجم وكتلة البخار

الحل:

نحسب الحجم النوعي لخليط البخار الرطب كالآتي:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{0.4}{2} = 0.2 \text{ m}^3/\text{kg}$$

وهذا الحجم النوعي يساوي الآتي:

$$v_x = v_f + x.v_{fg} \Rightarrow 0.2 = v_f + x.v_{fg}$$

من جداول البخار عند ضغط مقداره 0.6 MPa نجد:

$$v_f = 1.1006 * 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} , v_g = 0.3157 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\therefore 0.2 = 1.1006 * 10^{-3} + x.(0.317 - 1.1006 * 10^{-3})$$

$$\therefore x = 0.632$$

وبذلك تكون كتلة السائل

$$= (1 - 0.632) * 2 = 0.736 \text{ kg}$$

وكتلة البخار

$$= 0.632 * 2 = 1.264 \text{ kg}$$

وحجم السائل

$$= v_f * m_f = 1.1006 * 10^{-3} * 0.736 = 0.0008 \text{ m}^3$$

وحجم البخار

$$= v_g * m_g = 0.3157 * 1.264 = 0.399 \text{ m}^3$$

مثال (11.1):

احسب معدل الحرارة المنتقلة من جدار فرن لوحدة مساحة واحدة. اذا كان الجدار يتكون من طبقتين، احدهما مصنوعة من الفولاذ بسمك 0.5 cm وطبقة خارجية من طابوق الزركونيوم بسمك 10 cm، فأذا كانت درجة حرارة السطح الداخلي 900 °K ودرجة حرارة السطح الخارجي 450 °K، ماهي درجة الحرارة عند السطح بين الطبقتين؟ (خذ معامل التوصيل الحراري للفولاذ k = 40 W/m.K وطابوق الزركونيوم k = 2.5 W/m.K)

الحل:

يمكن استخدام المعادلة (1.22) لحساب كمية الحرارة المنتقلة:

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_{steel} - T_{brick}}{\frac{\Delta x_{steel}}{k_{steel}} + \frac{\Delta x_{brick}}{k_{brick}}}$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{900 - 450}{\frac{0.005}{40} + \frac{0.1}{2.5}} = 11.214 \text{ W/m}^2$$

ويتم الحصول على درجة حرارة السطح البيني من المعادلة الآتية:

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_{steel} - T_{interface}}{\frac{\Delta x_{steel}}{k_{steel}}} \Rightarrow T_{interface} = T_{steel} - \frac{Q}{A} * \frac{\Delta x_{steel}}{k_{steel}}$$

$$T_{interface} = 900 - 10.965 * 0.000125 = 888.6 \text{ K}$$

مثال (12.1):

يتعرض جدار من الطابوق سمكه 0.1 m (k = 0.7 W/m.K) لرياح باردة بدرجة حرارة مقدارها 270 K اذا علمت ان معامل انتقال الحرارة بالحمل من الخارج مقداره 40 W/m².K

وكان في الجهة الاخرى هواء دافئ عند درجة حرارة مقدارها 330 K وبمعامل انتقال الحرارة بالحمل الحر مقدار 10 W/m².K ، احسب معدل انتقال الحرارة لوحدة المساحة.

الحل:

ان المقاومات الثلاث هي:

$$R_1 = \frac{1}{\bar{h}_{c,hot} A} = \frac{1}{10 * 1} = 0.1 \text{ K/W}$$

$$R_2 = \frac{L}{kA} = \frac{0.1}{0.7 * 1} = 0.143 \text{ K/W}$$

$$R_3 = \frac{1}{\bar{h}_{c,cold} A} = \frac{1}{40 * 1} = 0.025 \text{ K/W}$$

ومعدل انتقال الحرارة لوحدة المساحة، تكون:

$$\frac{Q}{A} = \frac{\Delta T}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{330 - 270}{0.1 + 0.143 + 0.025} = 223.9 \text{ W/m}^2$$

مثال (13.1):

احسب معامل انتقال الحرارة بالحمل بين صفيحتين مائلتين بزاوية 45° تفصل بينهما فجوة من الهواء وبسمك مقداره 25mm ، اذا كانت درجة حرارة الصفيحة السفلى مقدارها 70°C ودرجة حرارة الصفيحة العليا 50°C.

الحل:

من جداول الهواء نأخذ خواص الهواء عند معدل درجة الحرارة بين الصفيحتين وهي 60°C وكانت الخواص كالآتي:

$$k = 0.029 \text{ W/m.K}, \nu = 1.88 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}, \alpha = 2.69 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$\beta' = \frac{1}{T} = \frac{1}{333}$$

نحسب عدد راييلي من المعادلة الآتية:

$$Ra = \frac{g\beta'\Delta T l^3}{\nu\alpha}$$

$$Ra = \frac{9.81 * 20 * (0.025)^3}{333 * 1.88 * 10^{-5} * 2.69 * 10^{-5}} = 1.84 * 10^4$$

من المعادلة (1.30) نحصل على:

$$Nu = 2.4$$

$$h = Nu \frac{k}{l} = 2.4 * \frac{0.029}{0.025} = 2.78 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

مثال (14.1):

ماء يمر خلال انبوب ويتم تسخينه من درجة حرارة 15°C الى 65°C ، قطر هذا الانبوب 3 cm وطوله 5 m ومحاط ملف كهربائي للتسخين يوفر فيض حراري منتظم على السطح الخارجي للانبوب ومقدار التدفق الحجمي للماء هو 10 liter/min. احسب مقدار الطاقة الكهربائية المجهزة للملف الكهربائي ودرجة حرارة السطح الداخلي للانبوب عند نهاية الانبوب.

الحل:

نحصل من جداول خواص الماء عند معدل درجة حرارة الماء بين 15°C و 65°C وهي 40°C .

$$\rho = 992.1 \text{ kg/m}^3, C_p = 4179 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}, k = 0.631 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$$

$$Pr = 4.32, \nu = 0.658 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

كمية التدفق الكتلي تحسب كالآتي:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = 992.1 * 0.01 / 60 = 0.1654 \text{ kg/s}$$

$$Q = \dot{m} C_p (T_e - T_i) = 0.165 * 4179 * (65 - 15) = 34.6 \text{ kW}$$

نحسب سرعة جريان الماء داخل الانبوب

$$V_m = \frac{V}{A_c} = \frac{0.01 / 60}{\frac{\pi}{4} * 0.03^2} = 0.236 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{V_m D}{\nu} = \frac{0.236 * 0.03}{0.658 * 10^{-6}} = 10760$$

ولأن رقم رينولدز اكبر من 2300 فالجريان المضطرب. وتستخدم المعادلة (1.32)

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0.023(Re)^{0.8} (Pr)^{0.4} = 0.023 * (10760)^{0.8} (4.34)^{0.4}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = 69.5 \Rightarrow h = \frac{69.5 * 0.631}{0.03} = 1462$$

$$h = \frac{k}{D} Nu = \frac{0.631}{0.03} 69.5 = 1462 \text{ W/m}^2.\text{C}$$

يحسب الفيض الحراري المسلط على السطح الخارجي للانبوب من المعادلة:

$$\dot{q}_s = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi DL} = \frac{34.6}{0.471} = 73.46 \text{ kW/m}^2$$

وتحسب درجة حرارة السطح عند مخرج الانبوب من المعادلة الآتية:

$$T_s = T_m + \frac{\dot{q}_s}{h} = 65 + \frac{73460}{1462} = 115 \text{ } ^\circ\text{C}$$



الفصل الثاني

2

الطاقة الشمسية

الفصل الثاني الطاقة الشمسية Solar energy

1.2 مقدمة عامة :

الشمس هي مصدر الطاقة على سطح الارض ولولاها لما وجدت الحياة بشكلها الحالي على سطح كوكبنا، وقد ادرك الانسان منذ القدم اهمية الشمس في حياته ولربما كانت قصة ارخميدس المشهورة المتعلقة باستخدام مرايا لتركيز الاشعة لاحتراق سفن الاسطول الروماني عام 212 ق.م من اولى الاشارات التي تدل على استعمال الانسان للطاقة الشمسية. تعد 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 بالمصادر الأخرى. لقد أصبحت للطاقة الشمسية مكانتها اللائقة بين المصادر الأخرى للطاقة في الوقت الحاضر، واعتمدت ميزانيات كبيرة في اغلب الدول لاستغلالها، كما تعددت الطرق المقترحة للاستفادة منها مثل استخدام المرايا العاكسة لتجميع ضوء الشمس و ابتكار طرق أخرى لامتصاص هذه الطاقة وتحويلها إلى طاقة كهربائية بوساطة الخلايا الشمسية وغيرها من الاستخدامات.

2.2 طبيعة الإشعاع الشمسي:

الشمس عبارة عن كرة غازية يبلغ قطرها 1.4 مليون كيلو متر ويبلغ وزنها 1.986×10^{30} kg وهو ما يعادل 99.87% من مجمل كتلة النظام الشمسي بأجمعه، اما المسافة بين الارض والشمس فتقدر بحوالي 150×10^6 km⁽⁷⁾.

تتكون الشمس بصورة رئيسة من غاز الهيدروجين (بنسبة 75%) وغاز الهيليوم (بنسبة 24%)، فضلا على كميات ضئيلة من بعض العناصر الأخرى كالحديد والسيليكون والنيون والكربون. وتتولد الطاقة الشمسية نتيجة التحول المستمر لكل أربع ذرات من الهيدروجين إلى ذرة واحدة من الهيليوم في تفاعل اندماجي نووي ، ولما كانت كتلة الهيليوم الناتجة من التفاعل

أقل من مجموع كتل ذرات الهيدروجين الداخلة فيه فان فرق الكتلة هذا يتحول إلى ضوء وحرارة تنتقل على هيئة أشعة، يبلغ معدل انبعاثها 3.8×10^{23} kW وتشع هذه الكمية في جميع الاتجاهات. تتراوح درجة حرارة باطن الشمس ما بين ($8-40^\circ\text{K}$) وتشكل كتلة باطن الشمس حوالي 40% من كتلة الشمس الكلية وكثافة باطن الشمس عالية تصل الى 100 ضعف بقدر كثافة الماء ويحيط بقلب الشمس منطقة تعرف بمنطقة الحمل (Convection zone) وتصل درجة حرارتها الى 130000°K وكثافتها حوالي 70 kg/m^3 ، اما الغلاف الغازي للشمس فيتكون من ثلاث طبقات رئيسة هي:

1. طبقة الفوتوسفيراو الكرة الضوئية (Photosphere):

وهي الطبقة السطحية الاولى للشمس وهي عبارة عن غاز متوهج يبدو كقرص لونه اصفر وكثيف، وهو السبب في حجب رؤية ما في باطن الشمس. وسمك هذه الطبقة 300 km ودرجة حرارتها 5000°K وكثافتها واطنة جدا وتساوي $\rho = 10^{-5} \text{ kg/m}^3$.

2. طبقة الكروموسفير او الكرة اللونية (Chromosphere):

وهي الكرة التي تحيط بقرص الشمس وتبدو على شكل حلقة حمراء حول القمر عند حدوث الكسوف، وسمكها يتراوح بين (2000-3000 km) وتقوم هذه الطبقة بامتصاص الوان معينة من الطيف الشمسي.

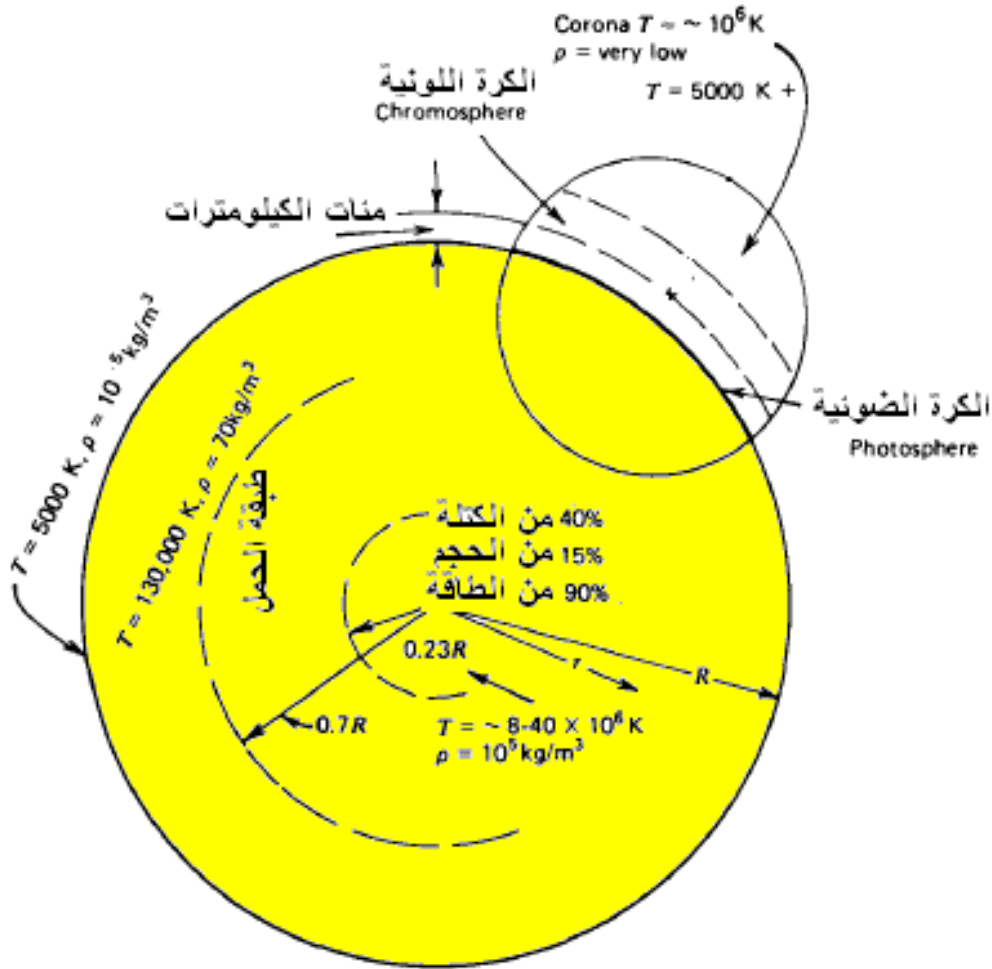
3. الاكليل (Corona):

وهو الغلاف الشفاف العلوي للشمس ، وهذه الطبقة تمتد الى ارتفاعات تصل بضعة ملايين من الكيلومترات ودرجة حرارتها اعلى من الطبقات الاخرى ودرجة حرارتها مرتفعة جدا تصل الى مليون درجة مطلقة وكثافتها منخفضة جدا.

لقد وجد بطرائق فيزيائية مختلفة ان درجة حرارة سطح الشمس المسمى بالفوتوسفير حوالي 6000°K (شكل 1.2). وتعتبر طبقة الفوتوسفير مصدر الاشعاع الرئيسي من الشمس ، تستقبل الارض 1.8×10^{14} kW من طاقة الشمس وهي تعادل 20 الف مرة قدر الاستهلاك العالمي من الطاقة.

يتعرض الاشعاع الشمسي أثناء مساره خلال الغلاف الجوي لسطح الأرض إلى حالات من الانتشار والانعكاس والامتصاص من قبل مكونات الغلاف الغازي المحيط بالكرة الأرضية إذ تعمل هذه المكونات ، ومنها الغازات المختلفة وذرات الغبار و جزيئات الماء العالقة بالهواء ،

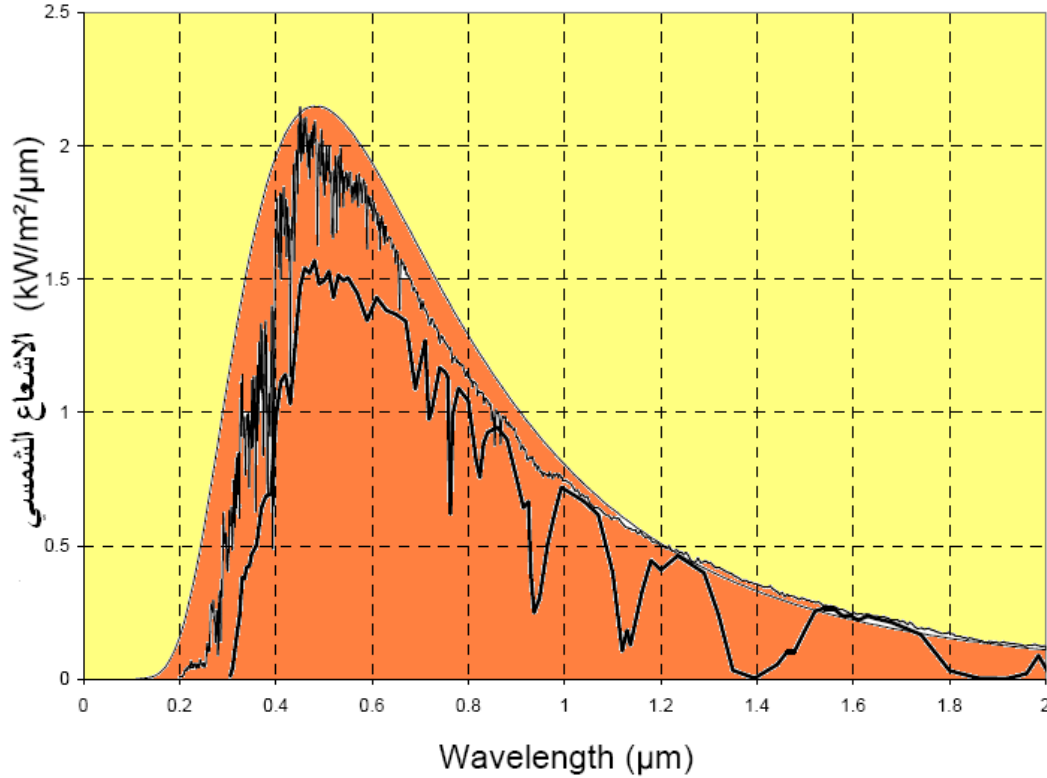
على امتصاص وانكسار جزء من الأشعة الشمسية الواصلة إلى سطح الأرض. ان كمية الطاقة الشمسية التي تتلقاها الارض كبيرة جدا بالمقارنة مع احتياجات العالم من الطاقة، غير ان معظم هذه الطاقة تسقط على البحار والمحيطات التي تشكل نسبة 70% من الكرة الارضية وهي مناطق غير ملائمة لاستغلال الطاقة الشمسية نتيجة لبعدها عن اليابسة وكلفتها الاقتصادية العالية، فضلا عن أن هناك مساحات واسعة من الصحارى التي تتلقى كميات كبيرة من الاشعاع ولكنها غير مأهولة بالسكان وبعيدة عن مراكز الاستهلاك مما يجعل التفكير بأستغلالها غير مجد في الوقت الحاضر.



شكل (1.2) نموذج بسيط للشمس⁽⁶⁾.

إذا اخذنا الجسم الاسود كنموذج للشمس عند درجة حرارة الاتزان فان الفيض الاشعاعي المنبعث من سطح الشمس يمكن تمثيله بتوزيع بلانك على الرغم من الاختلاف البسيط لكون

الشمس ليست في حالة توازن اشعاعي ولا حتى في حالة استقرار واحسن تقريب لطيف الشمس هو منحني الجسم الاسود الذي يقابل درجة حرارة 5800 K كما يلاحظ من الشكل (2.2).



الشكل (2.2) توزيع الطيف المنبعث من الشمس (8)

ان 12% من طاقة الاشعاع الشمسي تنقل باطوال موجية اقصر من $0.4\mu m$ وهذا معظمه يكون على شكل اشعة فوق بنفسجية. ويحتوي الجزء المرئي من الطيف الشمسي على 37% من طاقة الاشعة الشمسية بينما تلك الاطوال الموجية الاطول من $0.7\mu m$ (في الاساس اشعة تحت الحمراء) تحتوي على 51% من الطاقة لذا نجد ان ثلثي الطاقة التي تصلنا من الشمس تكون غير مرئية بالنسبة للعين البشرية والجزء الاعظم منها يكون في منطقة الاشعة تحت الحمراء.

3.2 حركة الارض Motion of earth:

إن حركة الأرض حول الشمس تتأثر مبدئياً بقوة التجاذب بين الأرض والشمس وعلى الرغم من أن القمر والكواكب يؤثران على مدار الأرض لحد ما ، إلا أنه ينتج عنهما اضطراب صغير فقط وسوف نهمل الأخير ونفرض إن الأرض هي فقط جسم سماوي يدور حول الشمس، فضلاً عن ذلك سنفرض أن الأرض والشمس هي كرات صغيرة أو على الأقل تتصرف كذلك بسبب المسافة الكبيرة التي تفصل بينهما وفي الحقيقة أن البعد بين الأرض والشمس هو أكثر من

200 مرة بقدر نصف قطر الشمس وأكثر من 20,000 مرة بقدر نصف قطر الأرض؛ ولأن الشمس أثقل كثيراً من الكواكب الأخرى سنفرض أن الشمس تبقى تقريباً ثابتة عند دوران الأرض حولها . باستخدام قوانين نيوتن في الحركة الكلاسيكية مع قانون نيوتن في الجاذبية ، نستطيع أن نثبت ما يأتي (6):

(1) ان الأرض تدور في مستوى ثابت حول الشمس.

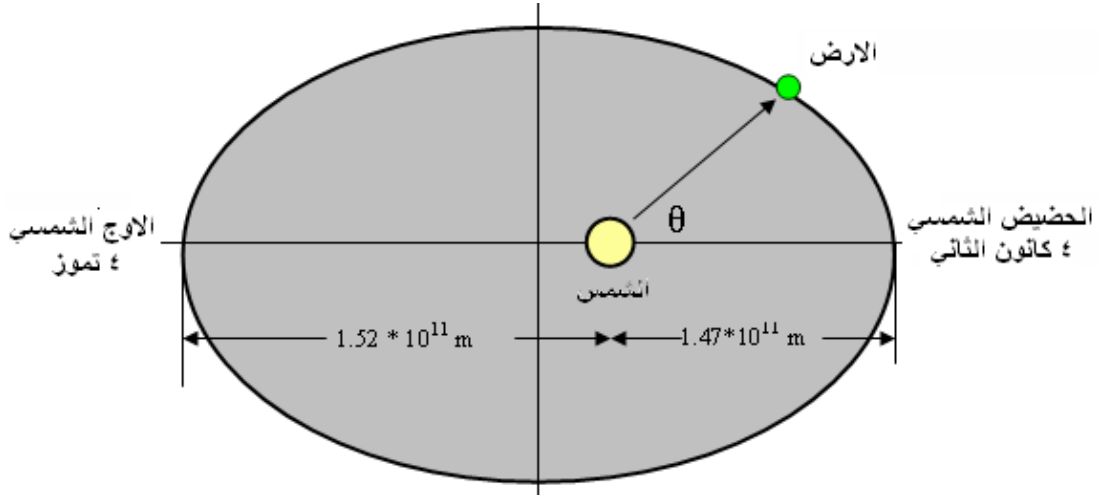
(2) ان مدار الأرض حول الشمس هو مدار بيضوي.

تكون الشمس موجودة في نقطة فيه تعرف بالبؤرة (قانون كبلر الأول) ويدعى المستوى الثابت الذي يحتوي مدار الأرض بمستوى دائرة البروج (ecliptic plane)؛ لأنه فقط عندما يمر القمر خلال هذا المستوى يمكن أن يحدث الخسوف . إن مدار الأرض على الرغم من أنه بيضوي هو قريب جداً من الدائري وتكون الشمس منحازة عن المركز على طول نصف المحور الكبير عند بؤرة الشكل البيضوي. يمكن التعبير عن مدار الأرض بصورة أفضل باستخدام الإحداثيات القطبية مثل:

$$r = \frac{a * (1 - \varepsilon^2)}{1 + \varepsilon * \cos \theta} \quad (2.1)$$

حيث أن نصف المحور الكبير (معدل المسافة المدارية) هو $ma = 1.497 * 10^{11}$ () والاختلاف المركزي (eccentricity) هو $\varepsilon = 0.0167$ الذي يمثل مقدار الانحراف عن الشكل الدائري ويساوي صفراً بالنسبة للدائرة ويقترب من الواحد عندما يصبح الشكل البيضوي مسطحاً، ان المدار البيضوي للأرض موضح في الشكل (3.2) ولكن بشكل مبالغ فيه لحد ما. من المعادلة (2.1) نجد ان اصغر قيمة لـ r تدعى الحضيض الشمسي (Perihelion) تحدث عندما $\theta = 0$ وكذلك ان اكبر قيمة لـ r تدعى الاوج الشمسي (Aphelion) تحدث عندما تكون $\theta = 180$ وتصل الأرض الحضيض الشمسي والاوج الشمسي في الرابع من كانون الثاني والرابع من تموز على التوالي. لهذا تكون الأرض اقرب الى الشمس في النصف الشمالي في فصل الشتاء عنه في فصل الصيف. وعلى الرغم من ان الأرض تكون اقرب الى الشمس في الشتاء فأن الاجواء تكون باردة وذلك؛ لأن القطب الشمالي ينحرف بعيداً عن الشمس، وتسقط الأشعة الشمسية بصورة منحرفة وغير مباشرة باعثة اقل كثافة من الطاقة. (تعرف كثافة الطاقة بأنها مقدار الكيلو واط-ساعة من الطاقة الساقطة على المتر المربع من سطح الأرض في زمن

معين). اما في شهر حزيران (يونيو) فيكون القطب الشمالي للأرض مواجهاً للشمس، وبهذا تنطلق الأشعة الشمسية إلى الجزء الشمالي من الكرة الأرضية بصورة عمودية. وهنالك عامل آخر يجب ملاحظته وهو أنه كلما قل ارتفاع الشمس في السماء - بالنسبة إلى الراصد على الأرض - فإن الإشعاع يمر بطريق أطول خلال الغلاف الجوي المحيط بالأرض، وبذلك يزداد احتمال تبعثر الإشعاع ورجوعه الى الفضاء مرة أخرى.



شكل (3.2) مدار الأرض موضح فيه الاختلاف المركزي

4.2 الثابت الشمسي Solar Constant:

يعرف الثابت الشمسي بأنه شدة الإشعاع الشمسي الساقطة على مستوى عمودي على اتجاه الأشعة موجود خارج الغلاف الجوي للأرض ويتغير هذا الثابت بتغير الوقت من السنة بسبب تغير المسافة بين الأرض والشمس وتسمى قيمته عندما تكون المسافة عند معدلها بالثابت الشمسي. القيمة المستعملة في معظم المصادر للثابت الشمسي هي 1367 W/m^2 ويحسب الثابت الشمسي خلال أي وقت من السنة من المعادلة الآتية⁽⁶⁾:

$$I_{sc} = 1367 * (1 + 0.033 * \cos \frac{360 * ND}{365}) \quad (2.2)$$

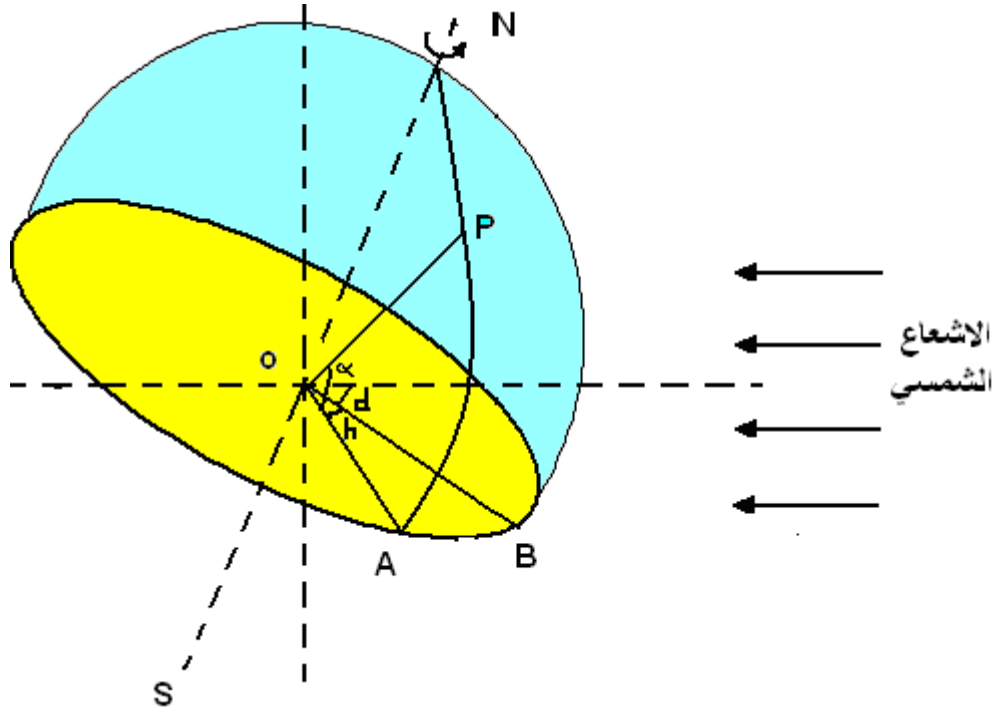
اذ ان:

ND رقم اليوم من السنة.

I_{sc} شدة الاشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي

5.2 زوايا الأرض- الشمس الأساسية Sun-earth angles:

موقع أي نقطة على سطح الأرض وعلاقتها بأشعة الشمس توصف في أي لحظة بواسطة زاوية خط عرض الموقع (α) وزاوية الوقت الشمسي (الزاوية الساعية (h)) وزاوية ميل الشمس (زاوية الانحراف (d)) الموضحة في الشكل (4.2) ⁽⁹⁾:



شكل (4.2) زوايا الارض- الشمس الرئيسية

1- زاوية خط العرض (α) Latitude angle:

هي الزاوية التي يصنعها الخط OP مع مسقطه OA في مستوى الاستواء (المستوى الذي يحوي دائرة خط الاستواء) ويمكن الحصول عليها من الاطلس، أذ تمثل هذه الزاوية خط العرض المار بالمنطقة المراد حساب شدة الاشعاع الشمسي فيها والجدول (1.2) يبين خطوط العرض والطول لبعض المدن العراقية.

2- زاوية الوقت الشمسي (h) Solar time angle:

وتسمى ايضا بالزاوية الساعية (Hour angle) وهي الزاوية المحصورة بين المسقط OA، والمسقط OB (مسقط الخط الواصل بين مركز الأرض ومركز الشمس). وتكون قيمة الزاوية الساعية صفراً عند الظهر الشمسي (Solar noon) وعليه فان OB يمثل المسقط عند الظهر للخط الواصل بين المركزين (أي خط الإشعاع الشمسي) والزاوية الساعية هي مقياس

للفت خلال اليوم بالنسبة إلى الظهر الشمسي فساعة من الوقت تعادل 15° من الزاوية الساعية، أي عندما تكون الزاوية الساعية 45° فهذا يعني أن الوقت هو 3 P.M (الساعة الثالثة بعد الظهر)، وتستخرج زاوية الوقت الشمسي من العلاقة الآتية:

$$h = 15 * [Solar.time - 12] \quad (2.3)$$

وتأخذ الزاوية الإشارة السالبة قبل الظهر.

خط العرض	خط الطول	المدينة
33°21'	44°35'	بغداد
36°19'	43°09'	الموصل
35°20'	44°28'	كركوك
33°02'	40°17'	الربطبة
35°33'	45°26'	السليمانية
32°36'	44°02'	كربلاء
31°02'	46°16'	الناصرية
30°	47°46'	البصرة

الجدول (1.2) خطوط العرض والطول لبعض المدن العراقية⁽⁹⁾.

3-زاوية الانحراف أو زاوية ميل الشمس (Declination angle (d):

هي الزاوية بين خط المركزين ومسقطه OB وعليه تمثل الزاوية بين أشعة الشمس والمستوى المار من الاستواء. وهي مقياس لتغير موقع الشمس بالنسبة للفصول، إذ تتغير من 23.45+ إلى 23.45- خلال السنة ويمكن أن تعد زاوية الانحراف هي الزاوية الحاصلة بين نقطة مباشرة فوق شخص ما عند خط الاستواء وموقع الشمس عند الظهر في ذلك اليوم، ويمكن حساب قيمة الزاوية بدقة من المعادلة التالية:

$$d = 23.45 * \sin \left[\frac{360}{370} (ND - 80) \right] \quad (2.4)$$

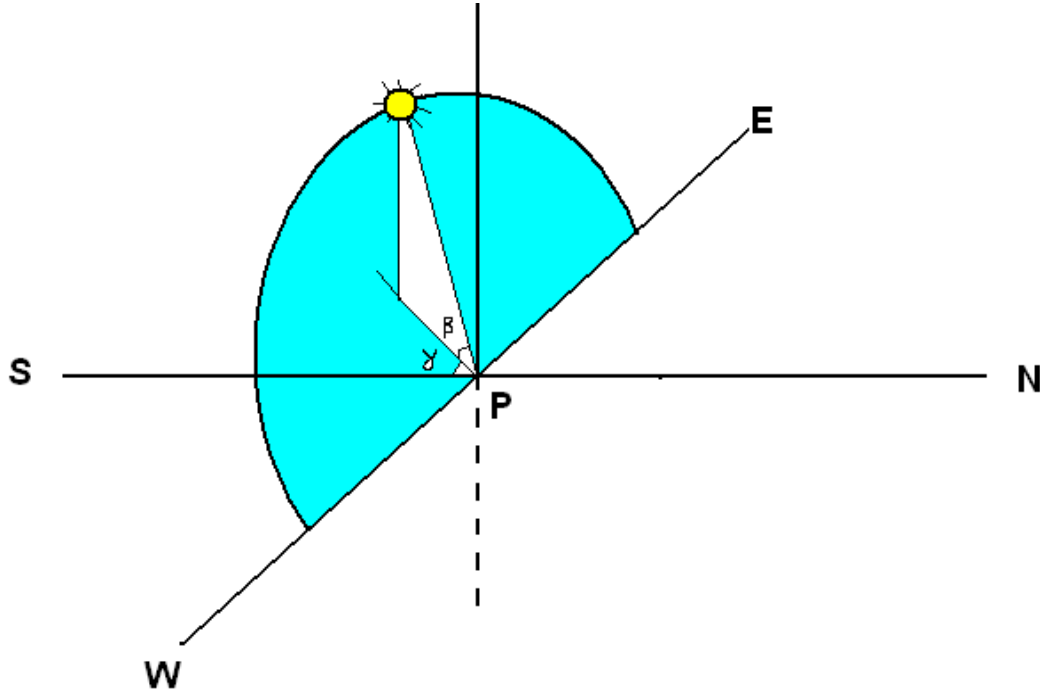
حيث ND يمثل رقم ابتداءً من واحد كانون الثاني إلى 365 في 31 كانون الأول.

وهناك زوايا أخرى مهمة تشتق من الزوايا الرئيسية هي:

1- زاوية ارتفاع الشمس β (Altitude angle)

2- زاوية السم γ (Azimuth angle)

وهذه الزوايا موضحة في الشكل (5.2) لنقطة P على سطح الأرض.



شكل (5.2) زاويتا ارتفاع الشمس والسمت للنقطة P على الأرض

1- زاوية الارتفاع الشمسي (β)

تعرف إنها الزاوية في المستوى العمودي بين أشعة الشمس ومسقط تلك الأشعة على سطح الأرض، وتحصل زاوية الارتفاع الشمسي القصوى عند فترة الظهر في جميع فصول السنة ففي فصل الشتاء عند الظهر وعند خط عرض 35° شمالا على سبيل المثال تكون زاوية الارتفاع الشمس 26.5° بينما في فصل الصيف تكون 78° وبسبب هذا الاختلاف الكبير في زوايا الارتفاع خلال السنة وفي حالة استعمال مجمع شمسي يجب إن يميل عن المستوى الأفقي خلال الموسم لكي يجمع أكبر كمية من الطاقة الشمسية.

إن الشمس تشرق في الشتاء عند الجنوب من الشرق وتغرب عند الجنوب من الغرب، بينما تشرق الشمس من الشرق وتغرب من الغرب بالضبط مرتين فقط في السنة إذ يتساوى الليل والنهار (12 ساعة لكل منهما) إحداهما في الربيع (21 اذار) والأخرى في الخريف (21

ايلول) وتسمى بالاعتدالين الربيعي والخريفي. أما في الصيف فان الشمس تشرق في الشمال من الشرق وتغرب في الشمال من الغرب ويمكن حساب زاوية ارتفاع الشمس β من المعادلة:

$$\beta = \sin^{-1}(\cos(d) * \cos(\alpha) * \cos(h) + \sin(d) * \sin(\alpha)) \quad (2.5)$$

من المعادلة اعلاه نجد ان زاوية ارتفاع الشمس تعتمد على ثلاث زوايا أساسية هي زاوية الانحراف (d) و الزاوية الساعية (h) و زاوية خط العرض (α).

2- زاوية السميت (γ) azimuth angle :

زاوية السميت تقاس في المستوى الأفقي بين الجنوب ومسقط الخط الواصل بين مركز الشمس ونقطة معينة على الأرض (نقطة P) على المستوى الأفقي كما مبين في الشكل (5.2) ويمكن حسابها من المعادلة :

$$\tan \gamma = \frac{\sin(h)}{\sin(\alpha) * \cos(h) - \cos(\alpha) * \tan d} \quad (2.6)$$

عندما يكون الوقت ظهراً بالتوقيت الشمسي تكون $h=0$ فان زاوية الارتفاع تكون عند قيمتها القصوى ويمكن الحصول على تعبير بسيط لزاوية الارتفاع وهو :-

$$\beta_{noon} = 90 - |\alpha - d| \quad (2.7)$$

كما يمكن حساب ساعة الشروق و الغروب من المعادلة (2.5) بتعويض قيمة $\beta=0$ (أي أن زاوية الارتفاع هي صفر عند الشروق والغروب) ومنها نحصل على:

$$h_o = \cos^{-1}[-\tan(d) * \tan(\alpha)] \quad (2.8)$$

حيث h_o بالدرجات ويجب أن تقسم على 15 للحصول على قيمتها بالساعات كما أن ساعة الشروق هي نفس مقدار ساعة الغروب، ولكنها بالسالب، وأما طول اليوم فيحسب من المعادلة :

$$2h_o = 2 * \cos^{-1}[-\tan(d) * \tan(\alpha)] \quad (2.9)$$

يحسب معدل الاشعاع بدلالة الوقت الشمسي لذا يجب إيجاد علاقة بين الزمن المحلي في موقع معين والوقت الشمسي .

6.2 الوقت الشمسي Solar time:

يعد خط كرينتش هو خط الطول الذي قيمته صفر، اذ يعد منتصف الليل عنده يساوي صفراً ومنتصف النهار(أي عند الظهر) يساوي الساعة 12 أما الوقت المدني المحلي LCT

والذي يعتمد على خط الطول يكون متقدماً نحو الشرق ومتأخراً نحو الغرب من خط الإسناد (خط كرينتش) والفرق هو أربع دقائق لكل خط طول واحد. يعد طول اليوم بالتوقيت المدني المحلي 24 ساعة بالضبط أما اليوم الشمسي فهو ليس 24 ساعة بالتمام؛ لأن محور دوران الأرض حول الشمس ليس دائرياً مضبوطاً والفرق بين الوقت الشمسي المحلي والوقت المدني المحلي يعطي معادلة الوقت (E) :-

الوقت الشمسي المحلي مطروحاً منه الوقت المدني المحلي $E =$
و ربما اختلف الوقت الرسمي الفعلي عن الوقت المدني المحلي اذ يعتمد الأول على خط الطول لذلك البلد وهذا الوقت يسمى بالوقت المركزي القياسي أي أن :-

الوقت المدني المحلي = الوقت المركزي القياسي $\pm 4 \times$ (خط الطول للموقع الفعلي - خط الطول الذي أعتمد التوقيت المحلي على أساسه).

فمثلاً خط الطول الفعلي لمدينة بغداد هو 44.14° بينما خط الطول الذي أعتمد عليه التوقيت المحلي هو 45° بالنسبة للعراق. يمكن كتابة معادلة الوقت الشمسي بالصيغة التالية :-

$$Solar\ time = Standard\ time + E \pm 4(La-Lc) \quad (2.10)$$

اذ ان:

$E =$ معادلة الوقت

$La =$ دائرة خط الطول الفعلي للموقع المراد حساب الوقت عنده .

$Lc =$ دائرة خط الطول للبلد الذي أعتمد التوقيت المحلي على أساسه والتي هي 45° درجة شرقاً بالنسبة للعراق. وتؤخذ العلاقة الموجبة عندما يكون الموقع شرقاً والسالبة إذا كان الموقع غرباً، فالعراق على سبيل المثال يقع في الشرق بالنسبة لخطوط الطول وعليه تؤخذ العلاقة الموجبة. اما معادلة الوقت E فتحسب بالطريقة المقترحة الاتية:

$$E = 9.87 * \sin(2 * B) - 7.53 * \cos(B) - 1.5 * \sin(B) \quad (2.11)$$

$$B = \frac{360 * (ND - 81)}{364} \quad \text{اذ ان:}$$

7.2 الاشعاع الشمسي الساقط على سطح افقى خارج الغلاف الجوي:

تتغير المسافة بين الارض والشمس خلال السنة مما يؤدي الى تغير كمية الاشعاع الشمسي الواصل الى الارض تبعا لذلك ويمكن حساب كمية الاشعاع الشمسي الساقط على سطح افقى خارج الغلاف الجوي الارضي من المعادلة الاتية⁽⁷⁾:

$$I_o = 1367 * (1 + 0.033 * \cos \frac{360 * ND}{365}) * \sin(\beta)$$

او

$$I_o = 1367 * (1 + 0.033 * \cos \frac{360 * ND}{365}) * (\cos(d) * \cos(\alpha) * \cos(h) + \sin(d) * \sin(\alpha)) \quad \dots (2.12)$$

ويستلزم احيانا حساب كمية الاشعاع الشمسي الساعي او اليومي الساقط على سطح افقي خارج الغلاف الجوي، ويمكن حساب ذلك باجراء التكامل على المعادلة (2.12) على مدى الفترة المطلوبة، وبذلك يحسب الاشعاع الساعي من المعادلة:

$$H_o = \int_{t1}^{t2} I_o dt \quad \dots (2.13)$$

حيث ان $t1$ و $t2$ هما الوقت حسب التوقيت الشمسي عند بداية ونهاية الساعة المطلوب حساب كمية الاشعاع الشمسي الساقط عليها وبأجراء التكامل نحصل على المعادلة الاتية:

$$H_o = \frac{12 * 3600}{\pi} * 1367 * (1 + 0.033 * \cos \frac{360 * ND}{365}) * \left(\cos(d) \cos(\alpha) (\sin w_2 - \sin w_1) + \frac{\pi(w_2 - w_1)}{180} \sin(d) \sin(\alpha) \right) \quad \dots (2.14)$$

حيث ان w_1 و w_2 هما الزاوية الساعية عند بداية ونهاية الساعة المطلوبة بالدرجات.

ويمكن بنفس الطريقة حساب كمية الاشعاع اليومي D_o لنحصل على المعادلة الاتية:

$$D_o = \frac{24 * 3600}{\pi} * 1367 * (1 + 0.033 * \cos \frac{360 * ND}{365}) * \left(\cos(d) \cos(\alpha) \sin(h_o) + \frac{\pi.h_o}{180} \sin(d) \sin(\alpha) \right) \quad \dots (2.15)$$

حيث ان h_o هي الزاوية الساعية عند غروب الشمس بالدرجات.

8.2 الاشعة الشمسية المباشرة والمنتشرة :Beam and diffused radiation

يتبعثر جزء كبير من الاشعاع الشمسي عند دخوله الغلاف الغازي للارض نتيجة لعمليات الانكسار والانعكاس والامتصاص من قبل بعض مكونات الغلاف الغازي⁽¹⁰⁾. وتبلغ نسبة ما يتشتت وينعكس ويمتص خلال مروره بالجو 35% منها 6% يعكسه الغلاف الجوي و

2% يعكسه سطح الارض و 27% تعكسه وتبعثره الغيوم الى الفضاء. هذه النسبة تمثل المفقود من هذا الاشعاع والتي لا تساهم في تسخين سطح الارض و لا الغلاف الغازي. اما الاشعاع الشمسي الذي يساهم في تسخين الهواء فهو 65% منه 51% يمتصه سطح الارض اما الباقي فيمتصه الغلاف الجوي ويقدر 14% ويساهم مباشرة في تسخين الهواء، ويعتمد الفرق بين الاشعة الشمسية خارج الغلاف الجوي للارض الى تلك التي تصل سطح الارض على مسار الاشعة خلال الغلاف الجوي، ومقدار الضباب وبخار الماء في الجو. توجد العديد من النماذج لحساب كمية الاشعاع الشمسي الساقط على الارض ومن اهم هذه النماذج هي:

1. نموذج اشري:

تحسب كمية الاشعاع المباشر الساقط على سطح عمودي على مساره I_{DN} حسب هذا النموذج من القانون الاتي⁽¹¹⁾:

$$I_{DN} = A_1 * \exp\left(-\frac{P_L}{P_o} * \frac{B}{\sin(\beta)}\right) \quad (2.16)$$

اذ ان :

A_1 هي معامل شدة الاسعاع الشمسي وتحسب من العلاقة الاتية:

$$A_1 = 1158 * [1 + 0.066 * \cos(360 * ND/370)] \quad (2.17)$$

B هو معامل الاضمحلال الجوي (Atmospheric extinction coefficient) وبحسب من العلاقة الاتية⁽¹²⁾:

$$B = 0.175 * [1 - 0.2 * \cos(0.93 * ND)] - 0.0045 * [1 - \cos(1.86 * ND)] \quad (2.18)$$

اما $\frac{P_L}{P_o}$ فهو النسبة بين الضغط الجوي عند الموقع المطلوب حساب شدة الاشعاع

الشمسي فيه الى الضغط الجوي عند مستوى سطح البحر ويحسب من العلاقة الاتية⁽¹³⁾:

$$\frac{P_L}{P_o} = \exp(-0.0001184 * H_{alt}) \quad (2.19)$$

اذ ان H_{alt} هو مقدار الارتفاع عن مستوى سطح البحر بالامتار.

ان مقدار الاشعة المباشرة الساقطة على سطح مائل بزاوية مقدارها δ عن الافق

يحسب من المعادلة الاتية:

$$I_D = I_{DN} * \cos(\theta) \quad (2.20)$$

اذ ان:

θ هي زاوية السقوط وتحسب من العلاقة الاتية:

$$\cos \theta = [\sin(\beta) * \cos(\delta) \pm \cos(\beta) \cos(\phi) \sin(\delta)] \quad (2.21)$$

اذ ان :

ϕ هي الزاوية المحصورة بين مسقط الاشعة على السطح الافقي وبين الخط العمودي على السطح، وتدعى زاوية السميت السطحي. وتأخذ الاشارة موجبة اذا كان السطح المائل مواجه للشمس وسالبة اذا كان السطح المائل بعيدا عن الشمس.

اما مقدار الاشعة المنتشرة الساقطة على سطح مائل بزاوية مقدارها δ عن الافق فيحسب من المعادلة الاتية:

$$I_{diffuse} = I_{DN} * \left[C * \frac{(1 + \cos \delta)}{2} + s * (C + \sin \beta) * \frac{(1 - \cos \delta)}{2} \right] \quad (2.22)$$

اذ ان :

s مقدار الانعكاسية الارضية والتي تعرف بـ (Albedo) وتتراوح قيمتها بين 0.2 للحالة العادية و 0.7 عند تواجد الثلوج ويبين الجدول (2.2) الانعكاسية الارضية لبعض البيئات الشائعة⁽¹⁴⁾.

C هو معامل الاشعة المنتشرة ويعرف أنه المعدل الشهري للنسبة بين شدة الاشعة الشمسية المنتشرة الى شدة الاشعة الشمسية العمودية المباشرة ولسماء صافية ويحسب من المعادلة الاتية:

$$C = 0.0965 * [1 - 0.42 * \cos((360/370) * ND)] - 0.0075 * [1 - \cos(1.95 * ND)] \quad (2.23)$$

اما شدة الاشعة الشمسية الكلية الساقطة على سطح مائل بزاوية مقدارها δ عن الافق فتساوي مجموع الاشعة المباشرة والمنتشرة وتحسب من المعادلة الاتية:

$$I_T = I_{DN} * \left[\cos(\theta) + C * \frac{(1 + \cos \delta)}{2} + s * (C + \sin \beta) * \frac{(1 - \cos \delta)}{2} \right] \quad (2.24)$$

الانعكاسية الارضية	الوسط
17%-27%	الخرسانة
5%-15%	المزروعات الخضراء
5%-10%	الغابات
5%-10%	طريق اسفلت اسود
34%-40%	رمل ابيض
75%-90%	ثلج حديث
45%-70%	ثلج قديم
5%-15%	تربة داكنة
25%-30%	تربة كالصحراء
8% ويعتمد على اتجاه الشمس	الماء

الجدول (2.2) الانعكاسية الارضية لبعض البيئات الشائعة.

2. نموذج هوتيل:

يستخدم هذا النموذج لحساب الاشعاع المباشر فقط وقد اقترح هوتيل المعادلة الاتية لحساب كمية الاشعاع المباشر على سطح افقي⁽¹⁵⁾:

$$\frac{I_b}{I_o} = a_o + a_1 \exp\left(-\frac{k}{\sin \beta}\right) \quad \dots (2.25)$$

حيث ان I_o هي كمية الاشعاع الشمسي الساقط على سطح افقي خارج الغلاف الجوي الارضي و a_o و a_1 و k ثوابت تعتمد على الظروف والعوامل الاتية:

أ- ارتفاع الموقع A بالكيلومتر فوق مستوى سطح البحر.

ب- صفاء الجو او مدى الرؤية التي تعتمد على نسب بخار الماء وثاني اوكسيد الكربون والغبار الموجود في الجو.

ج- نوع مناخ الموقع.

وقد وجد هوتيل ان هذه القيم تأخذ القيم a_o^* و a_1^* و k^* اذ لم نأخذ مناخ الموقع في الاعتبار وهذه القيم تعطى بالمعادلات الاتية:

1. لمدى رؤية 25 كيلومتر:

$$\begin{aligned} a_o^* &= 0.4237 - 0.00821(6 - A)^2 \\ a_1^* &= 0.5055 + 0.00595(6.5 - A)^2 \quad \dots (2.26) \\ k^* &= 0.2711 + 0.01858(2.5 - A)^2 \end{aligned}$$

2. لمدى رؤية 5 كيلومتر:

$$\begin{aligned} a_o^* &= 0.2538 - 0.0063(6 - A)^2 \\ a_1^* &= 0.7678 + 0.001(6.5 - A)^2 \quad \dots (2.27) \\ k^* &= 0.249 + 0.081(2.5 - A)^2 \end{aligned}$$

حيث ان A هو ارتفاع الموقع فوق سطح البحر بالكيلومتر ولا يتعدى 2.5 كيلومتر وصنف هوتيل المناخ الى اربعة اصناف، والعلاقة بين الثوابت a_o^* ، a_1^* ، k^* لتلك الانواع المختلفة من المناخ موجودة في الجدول (3.2).

$\frac{k}{k^*}$	$\frac{a_1}{a_1^*}$	a_o / a_o^*		نوع المناخ
		مدى الرؤية 5 كيلومتر	مدى الرؤية 25 كيلومتر	
1.02	0.98	0.92	0.95	مداري
1.02	0.99	0.95	0.96	صيف منتصف العرض
1.01	0.99	0.99	0.98	صيف شبه قطبي
1	1.01	1.03	1.04	شتاء منتصف العرض

الجدول (3.2) تأثير العوامل المناخية على قيم ثوابت نموذج هوتيل⁽¹⁶⁾

9.2 الخواص الاشعاعية للمواد:

يعتمد عمل المجمعات الشمسية بشكل كبير على الصفات البصرية لمكوناتها مثل الغطاء الزجاجي وصفحة الامتصاص ويتم اختيار هذه المواد تبعاً لخواصها الاشعاعية ومدى استقرار هذه الخواص مع تغير الظروف الجوية بالاضافة الى الكلفة الاقتصادية للمواد المستخدمة في صناعة هذه المجمعات الشمسية.

عند سقوط اشعاع على سطح بمعدل G يتم امتصاص جزء من الاشعاع الكلي من قبل السطح، وينعكس قسم اخر من السطح، وينفذ الباقي من خلال الجسم كما في الشكل (6.2). واذا قمنا بعمل توازن حراري على السطح نحصل على⁽¹⁷⁾:

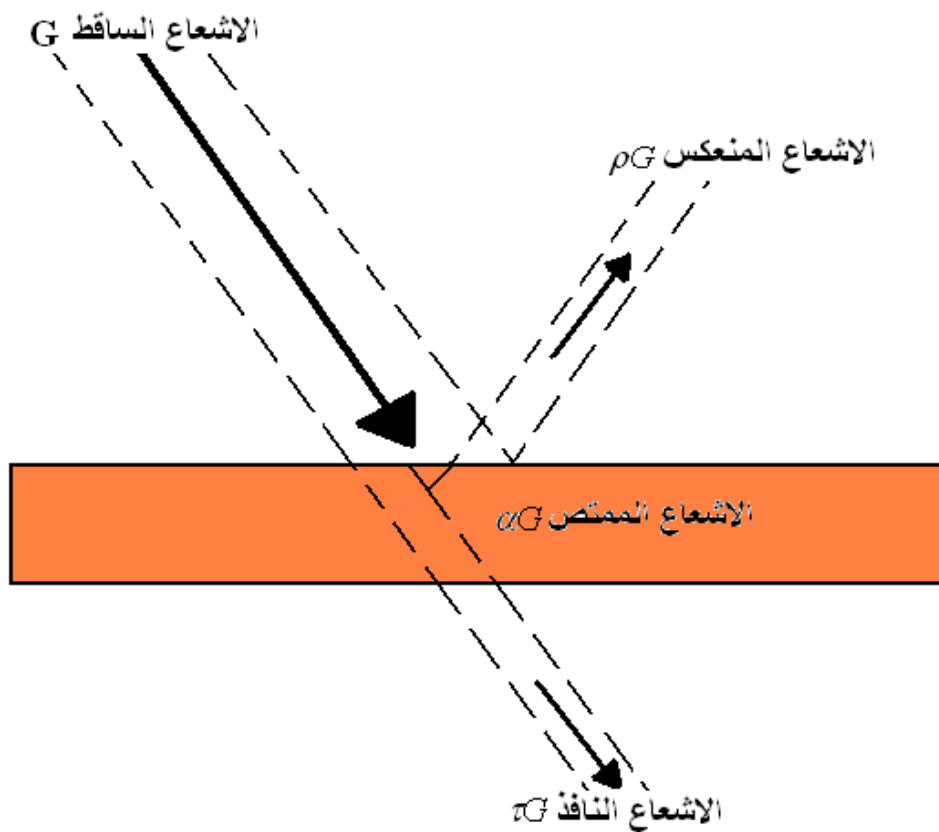
$$\alpha G + \rho G + \tau G = G \quad \dots (2.28)$$

ويتضح من هذه المعادلة ان مجموع الامتصاصية والانعكاسية والنفاذية يجب ان يساوي واحد كالاتي:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad \dots (2.29)$$

وعندما يكون السطح معتما فإنه لا ينقل ايا من الاشعة الساقطة. اي ان $\tau = 0$ وللجسم المعتم تصبح المعادلة (2.22) كالاتي:

$$\alpha + \rho = 1 \quad \dots (2.30)$$



شكل (6.2) خواص الاشعاع

1.9.2 قانون فرزنيل Fresnel law:

ينص قانون فرزنيل على انه اذا سقطت اشعة على سطح ما بزاوية سقوط قدرها θ_1 كما في الشكل (7.2) فإن انعكاسية السطح (r) تقدر بمعدل مركبتين احدهما المركبة العمودية ويرمز لها بـ r_1 والاخرى للمركبة الافقية ويرمز لها بـ r_2 وفق المعادلتين الاتيتين⁽¹⁸⁾:

$$r_1 = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad \dots\dots(2.31)$$

$$r_2 = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad \dots\dots(2.32)$$

$$r = \frac{1}{2}(r_1 + r_2) \quad \dots\dots(2.33)$$

حيث ان:

θ_2 زاوية الانكسار على السطح وتقدر زاوية الانكسار من قانون سنيل Snell's law كما يلي:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad \dots\dots(2.34)$$

n_1 و n_2 هما معامل الانكسار في الوسطين الاول والثاني على التوالي ويمكن تعريف معامل الانكسار على انه النسبة بين سرعة الضوء في الفراغ الى سرعة الضوء في الوسط المطلوب حساب معامل الانكسار له ورياضيا تكتب بالشكل الاتي:

$$n = \frac{c}{v} \quad \dots\dots(2.35)$$

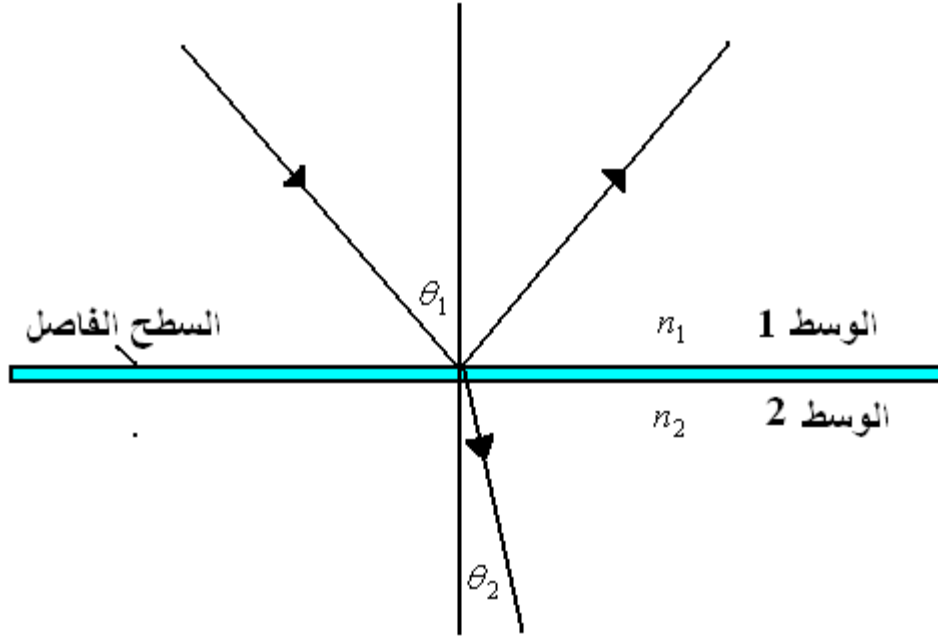
ولما كانت سرعة الضوء في الفراغ هي دائما اعلى من سرعة الضوء في الوسط فسيكون معامل الانكسار دائما اعلى من 1 والجدول (4.2) يبين معامل الانكسار لبعض الاوساط. عند سقوط الاشعة بصورة عمودية فان كلا من θ_1 ، θ_2 تساوي صفر ويمكن حساب الانعكاسية الكلية من المعادلة الاتية:

$$r(\theta = 0) = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 \quad \dots\dots(2.36)$$

تتعرض الاشعة المارة خلال اي وسط الى امتصاص من قبله ولحساب مقدار النفاذية التي تؤخذ بعين الاعتبار امتصاصية الوسط يستخدم قانون بوجور Bouguer's law الذي ينص على:

$$\tau_a = e^{-K_1 * L / \cos \theta_2} \quad \dots (2.37)$$

حيث ان K_I : ثابت يعرف بمعامل الاضمحلال ويوضح الجدول (5.2) قيم معامل الاضمحلال
لعدد من الاوساط المنفذة.
 L : سمك الوسط.



الشكل (7.2) انعكاسية السطح الفاصل بين وسطين

الوسط	معامل الانكسار
زجاج متعدد الكاربون	1.59
زجاج عادي	1.526
زجاج جيرى	1.5
زجاج مائي ابيض	1.5
تيفلون	1.34
ماء	1.33
ثلج	1.31
هواء	1

الجدول (4.2) معامل الانكسار لبعض الاوساط الشائعة⁽¹⁶⁾.

الوسط	معامل الاضمحلال (cm^{-1})
زجاج عادي	0.3
زجاج ماص للحرارة	2.7-1.3
زجاج مائي ابيض	0.04
تيفلون	0.59
بوليثيلين	1.65
ميلار (Mylar-اسم تجاري)	2.05
فلوريد متعدد الفينيل	1.4

الجدول (5.2) معامل الاضمحلال لبعض الاوساط المنفذة الشائعة.

2.9.2 النفاذية و الانعكاسية الكلية لطبقة واحدة من الزجاج:

عند سقوط اشعة على طبقة من الزجاج كما في الشكل (8.2) فان الزجاج سوف يتعرض الى سلسلة غير منتهية من الانعكاسات الداخلية، يتعرض الاشعاع الشمسي الى عملية استقطاب اثناء دخوله ويتحلل الى مركبتين هما المركبة العمودية والافقية ولو اخذنا المركبة العمودية فقط فان جزءا من هذه المركبة سوف ينعكس على السطح الخارج (الجزء r) والباقي (الجزء $1-r$) سوف ينفذ الى داخل الزجاج وعند وصول هذا الجزء الى السطح الداخلي للزجاج فان جزء من هذه المركبة سوف تنفذ الى الجانب الاخر من الزجاج (الجزء $(1-r)^2$) والجزء الاخر (الجزء $(1-r)r$) سوف ينعكس الى داخل الزجاج مرة اخرة وتستمر سلسلة الانعكاسات الداخلية مما يقلل كمية الاشعاع النافذ وللحصول على النفاذية الكلية للمركبة العمودية للضوء تجمع المركبات النافذة بالصيغة الاتية:

$$\tau_1 = (1 - r_1)^2 \sum_{n=0}^{\infty} r_1^{2n} = \frac{(1 - r_1)^2}{1 - r_1^2} = \frac{1 - r_1}{1 + r_1} \quad \dots (2.38)$$

وبنفس الطريقة نحصل على النفاذية الكلية للمركبة الافقية:

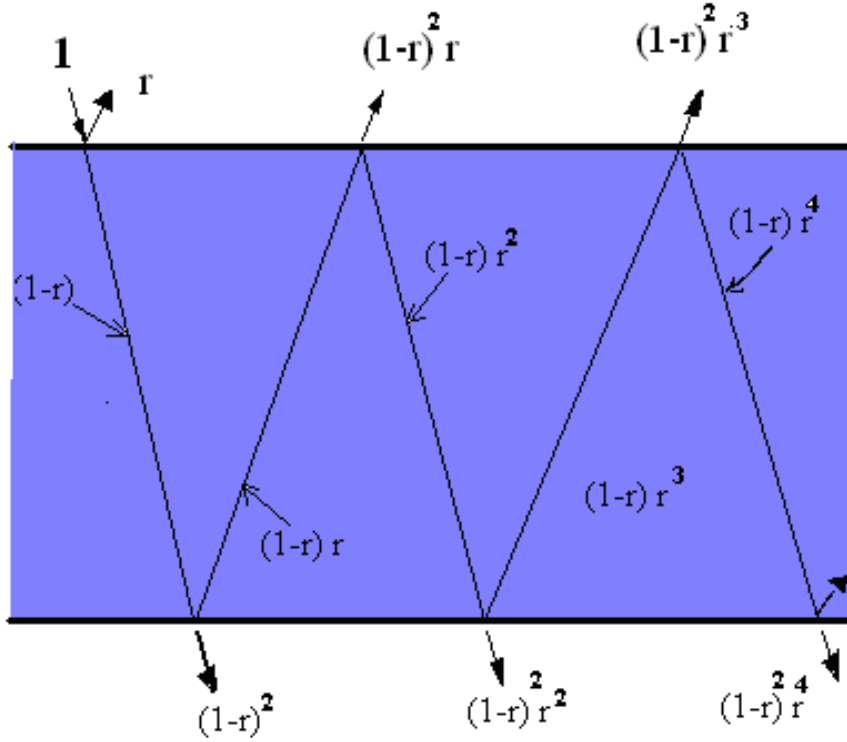
$$\tau_2 = \frac{1 - r_2}{1 + r_2}$$

وللحصول على النفاذية الكلية نأخذ معدل المركبتين كالآتي:

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left(\frac{1-r_1}{1+r_1} + \frac{1-r_2}{1+r_2} \right) \quad \dots (2.39)$$

ولعدد من طبقات الزجاج يمكن حساب النفاذية الكلية لها بتصحيح المعادلة اعلاه لنحصل على :

$$\tau_{rN} = \frac{1}{2} \left(\frac{1-r_1}{1+(2N-1)r_1} + \frac{1-r_2}{1+(2N-1)r_2} \right) \quad \dots (2.40)$$



الشكل (8.2) الانعكاسات المتعددة خلال الاوساط المنفذة مثل الزجاج.

10.2 الخواص الضوئية المؤثرة للالواح المنفذة:

ان المعادلات المذكورة في الفقرة السابقة لم تأخذ بنظر الاعتبار امتصاصية الوسط للاشعاع اثناء مروره وللوصول الى معادلات شاملة لحساب النفاذية و الامتصاصية والانعكاسية لاي وسط منفذ نستخدم المعادلة الاتية لحساب النفاذية:

$$\tau \cong \tau_a * \tau_r \quad \dots (2.41)$$

اي ان النفاذية الكلية هي حاصل ضرب النفاذية الانعكاسية والنفاذية الامتصاصية، اما الامتصاصية الكلية فتحسب من

$$\alpha \cong 1 - \tau_a \quad \dots (2.42)$$

وتحسب الانعكاسية الكلية من المعادلة (2.29):

$$\rho = 1 - \alpha - \tau$$

والتي يمكن تقريبها الى الشكل الاتي:

$$\rho \cong \tau_a - \tau \quad \dots (2.43)$$

11.2 نفاذية الاشعاع المنتشر Transmittance for diffused radiation

ينقسم الاشعاع الشمسي الى نوعين هما الاشعاع المباشر والمنتشر وتطبق المعادلات المذكورة في الفقرات السابقة لحساب النفاذية على الاشعاع المباشر فقط، يتميز الاشعاع المنتشر بسقوطه على المنظومات الشمسية بزوايا سقوط تتراوح بين 0 و 90° ولحساب الخواص الاشعاعية للاشعاع المنتشر يلزم ان يؤخذ بنظر الاعتبار كل زوايا السقوط من 0 الى 90° وهذه عملية معقدة ولذلك اقترح الباحثون⁽¹⁹⁾ تسهيل عملية حساب هذه الخواص بأخذ زاوية سقوط مؤثرة يتم عندها حساب الخواص الاشعاعية للاشعاع المنتشر بنفس الطريقة التي يتم حساب الخواص الاشعاعية في حالة سقوط اشعاع مباشر بزاوية سقوط تعادل زاوية السقوط المؤثرة وقام الباحثون بدراسة استقبال سطح يميل بزاوية β عن الافق لاشعاع منتشر من السماء واخر منتشر من سطح الارض كما في الشكل (9.2) ويمكن استخدام المعادلة الاتية للاشعاع المنعكس من الارض⁽¹⁹⁾:

$$\theta_e = 90 - 0.5788\beta + 0.00263\beta^2 \quad \dots (2.44)$$

وبالنسبة لانعكاس الاشعاع المنتشر من السماء يمكن استخدام المعادلة الاتية:

$$\theta_e = 59.7 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2 \quad \dots (2.45)$$

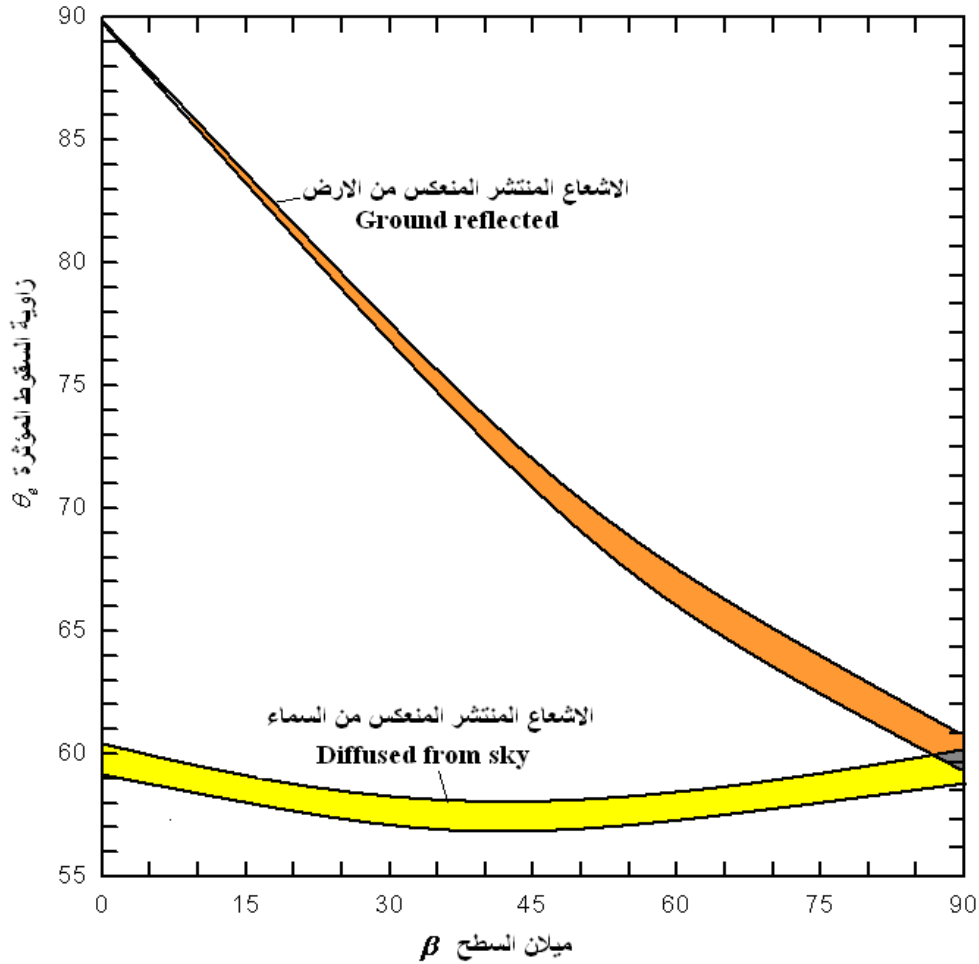
12.2 الكفاءة البصرية الكلية لمجمع شمسي بسيط

تتكون المجمعات الشمسية عادة من سطح ماص مغطى بلوح زجاجي والكفاءة البصرية للمجمع الشمسي هي تقريبا حاصل ضرب امتصاصية اللوح الماص (α_p) ونفاذية الغطاء الزجاجي (τ_g). ان حاصل ضرب الامتصاصية - النفاذية يجب ان يصحح على اساس ان قسم من الاشعة المنعكسة من صفيحة الامتصاص في الشكل (10.2) سوف تنعكس باتجاه الزجاج ومن ثم تنعكس من سطح الزجاج الى الصفيحة الماصة مرة اخرى وقسم من الاشعة سوف يمتص

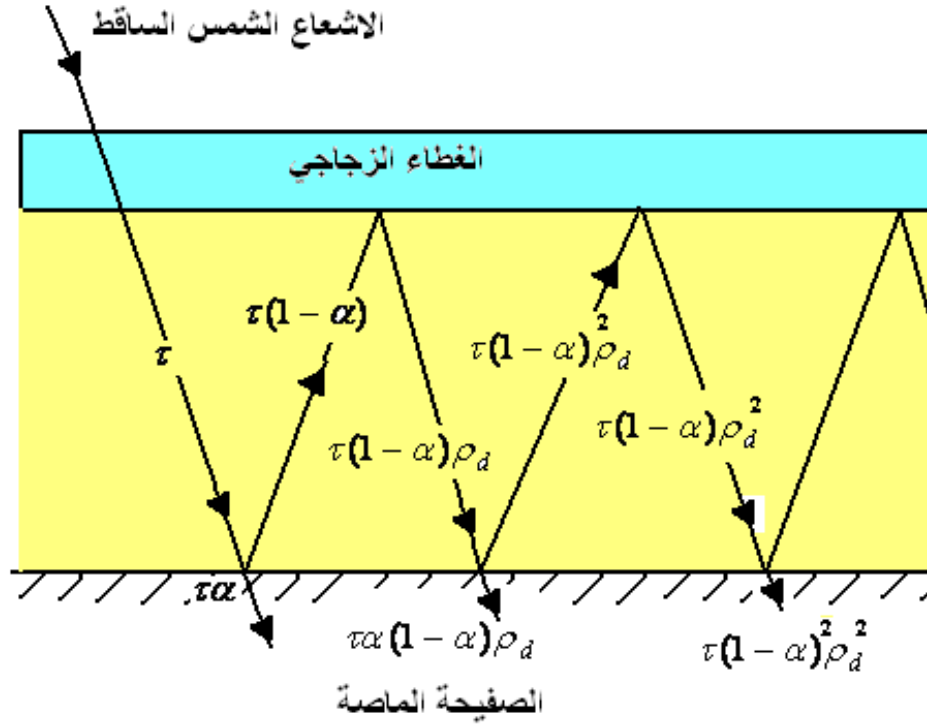
من قبل الغطاء الزجاجي وهكذا تستمر سلسلة من الانعكاسات الداخلية بين الصفيحة الماصة والغطاء الزجاجي وللحصول على حاصل ضرب الامتصاصية – النفاذية الفعال نستخدم المعادلة الآتية:

$$(\tau_g \alpha_p)_e = \frac{\tau \alpha}{1 - (1 - \alpha) \rho_d} \quad \dots(2.46)$$

حيث ان ρ_d انعكاسية الغطاء الزجاجي للإشعاع المنعكس من الصفيحة الماصة ويحسب من المعادلة (2.43).



الشكل (9.2) زاوية السقوط المؤثرة للإشعاع المنتشر



الشكل (10.2) الانعكاسات المتعددة بين الصفحة الماصة والغطاء الزجاجي.

13.2 الاسطح الانتقائية:

الاسطح الانتقائية هي اسطح تتغير خواصها الاشعاعية بتغير طول موجة الاشعاع الساقط عليه او الصادر منه، في تطبيقات الطاقة الشمسية ينقسم الاشعاع الى قسمين: القسم الاول هو الاشعاع الشمسي وهو قصير الموجة ويتراوح طول الموجة فيه من $0.2\mu.m$ الى $2\mu.m$ والقسم الثاني هو الاشعاع الحراري طويل الموجة المنبعث من الصفحة الماصة نتيجة ارتفاع درجة حرارتها ويتراوح طول موجتها بين $2\mu.m$ و $20\mu.m$ ويعتمد اداء المنظومات الشمسية بصورة عامة على نوعية المواد المستخدمة في صناعة هذه المنظومات ومدى ملائمتها للتطبيقات المختلفة بالإضافة الى الكلفة التصنيعية لهذه المواد وتقسّم الاسطح الانتقائية الى نوعين هما:

1.13.2 الاسطح المنفذة الانتقائية:

هناك العديد من الاغطية الشفافة المستعملة في مختلف التطبيقات الشمسية، غير ان الزجاج اكثرها شيوعا ويسمح الزجاج لحوالي 80-90% من الاشعاع الشمسي بالنفاذ من خلاله، بينما

يقوم بامتصاص الجزء الآخر وعكسه. ويفضل عند اختيار الغطاء المنفذ في التطبيقات الشمسية ان تكون له الخواص الآتية:

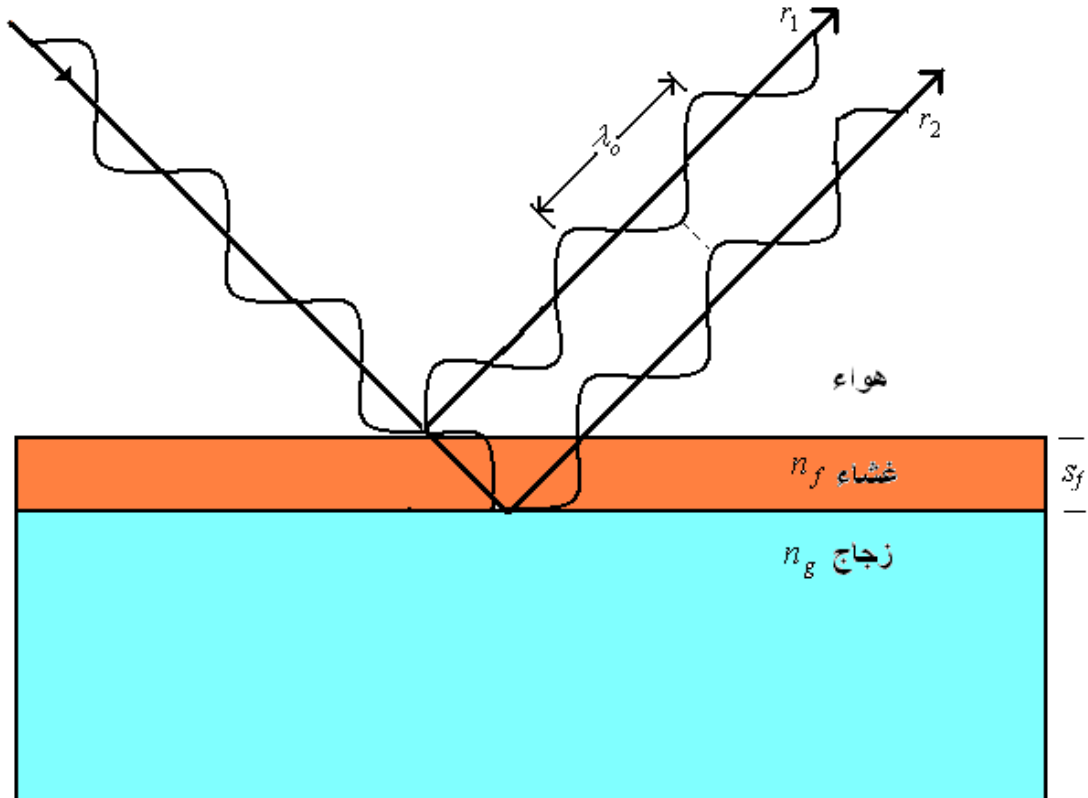
1. قيمة منخفضة لامتصاصية الاشعاع الشمسي.
2. قيمة منخفضة لانعكاسية الاشعاع الشمسي.
3. قيمة مرتفعة لانعكاسية الاشعاع الحراري الطويل الموجة المنبعث من الصفيحة الماصة نتيجة لارتفاع درجة حرارتها.

تختلف خصائص الزجاج المستخدم في المجمعات الشمسية عن زجاج النوافذ، ففي زجاج المجمعات الشمسية يتم التخلص من معظم الشوائب لزيادة شفافية الزجاج وبالتالي زيادة كمية الاشعاع الشمسي النافذ الى الصفيحة الماصة وتقليل كمية الجزء الممتص او المنعكس، وازضافة الى ما تقدم فانه يتم التخلص من الشوائب الحديدية في الزجاج وذلك من اجل زيادة مقاومة الزجاج للاجهادات الحرارية، وفي العادة تكون اغطية المجمعات الشمسية اكثر متانة من الزجاج العادي وذلك لمقاومة الصدمات والظواهر المناخية ويوضح الجدول (6.2) الخواص الاشعاعية لثلاثة انواع من الزجاج، ويلاحظ ان نسبة احتواء الحديد في الزجاج تؤثر مباشرة على قيمة امتصاصية الزجاج للاشعاع، وعليه يفضل اختيار الزجاج الذي له اقل نسبة احتواء للحديد وهو الزجاج المائي الابيض، ويمكن معرفة احتواء الزجاج على الحديد بالنظر الى لون مقطع الزجاج، حيث ترتفع درجة الاخضرار مع ارتفاع نسبة احتواء الحديد في الزجاج ولا ينصح باستخدام الزجاج العادي في التطبيقات الشمسية.

نوع الزجاج			الخاصية
عادي	جيرى	مائي ابيض	
12%	5%	1%	نسبة احتواء الحديد
79%-84%	88%-89%	91.2%-91.6%	الانفاذية (سقوط عمودي)
8%-8.2%	8%-8.1%	8%	الانعكاسية
8%-13%	3%-4%	اقل من 1%	الامتصاصية
3-6	3-4.5	3-5.5	سمك اللوح (mm)

جدول (6.2) خواص الزجاج الاشعاعية⁽²⁰⁾

وللحصول على قيم منخفضة لانعكاسية سطح الزجاج للأشعاع الشمسي يعالج السطح الخارجي للزجاج بطليه بغشاء رقيق غير عاكس للأشعاع، فلو فرضنا ان ضوءا طولاه الموجي λ_0 يسقط عموديا على الزجاج المطلي كما في الشكل (11.2). فمن الممكن جعل الموجات المنعكسة عن السطحين العلوي (هواء-غشاء) والسفلي (غشاء-زجاج) تتداخل تداخلا اتلافيا بحيث لا يكون هناك انعكاس نهائي ولعمل ذلك يجب تحقيق شرطين هما:



الشكل (11.2) التداخل الاتلافي بين موجتين منعكستين عن السطحين السفلي والعلوي لغشاء غير عاكس.

1. يجب ان تنعكس الموجتان بنفس السعات ويتحقق ذلك بجعل:

$$n_f = \sqrt{n_g} \quad \dots\dots(2.47)$$

حيث ان:

n_f معامل انكسار الغشاء و n_g معامل انكسار الزجاج.

2. يجب ان تنعكس الموجتان من كلا السطحين عائدة الى الهواء بفرق في الطور قدره

180° ويتحقق هذه الشرط بالضبط اذا كان سمك الغشاء هو بالضبط

$$s_f = \frac{m\lambda_o}{4n_f} \quad \dots\dots(2.48)$$

حيث ان : $m=1,3,5,\dots$

وتعتبر مركبات الفلوريد من افضل المواد المستخدمة لصناعة الغشاء حيث يتم غمس الزجاج في حوض مشبع من حامض السليسيك الفلوري.

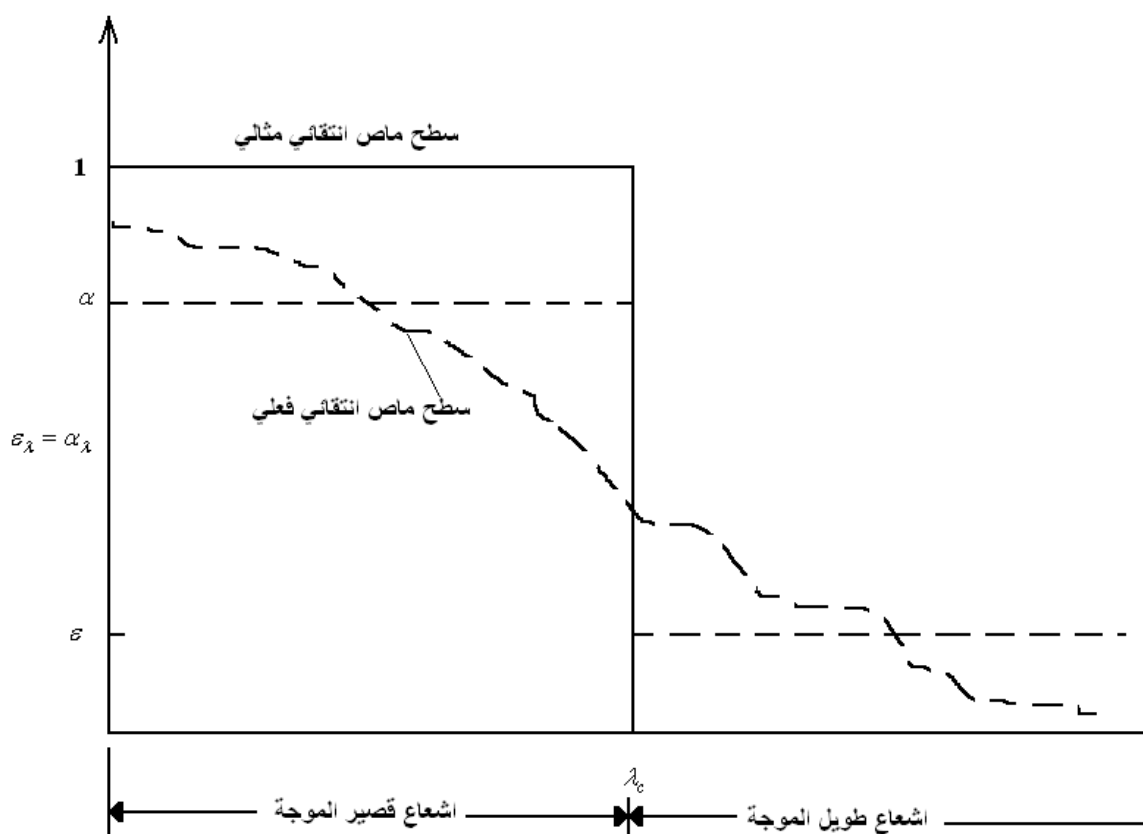
2.13.2 الاسطح الماصة الانتقائية:

الصفحة الماصة هي العمود الفقري للمجمعات الشمسية ذلك انها تقوم بامتصاص ونقل الطاقة الى احد الموائع الذي يسخن بدوره وترتفع درجة حرارته. تتطلب صناعة الصفائح الماصة الملائمة لتطبيقات الطاقة الشمسية تحسين خصائص اسطحها الاشعاعية فيما يتعلق بامتصاص الاشعاع الشمسي وابتعائه، فالاجسام الرمادية عادة تمتص موجات الاشعاع الشمسي وتبعث الاشعاع الحراري ومن المعلوم انه كلما زادت امتصاصية السطح زادت ابتعاثية السطح للاشعاع الحراري. ولجل تحسين خصائص الصفائح الماصة فان الامر يتطلب تعديل خصائص اسطحها بحيث تزداد قدرتها على امتصاص اشعة الشمس ذات الموجات القصيرة وتقليل كفاءة ابتعاث الاشعة ذات الموجات الطويلة (اشعاعات الاجسام الحارة والشكل (12.2) ابتعاثية وامتصاصية لوح ماص مثالي، ان طول موجة القطع، Cutoff wavelength (λ_c)، يجب ان تكون بين المنطقتين الشمسية والحرارية من الطيف الكهرومغناطيسي اي في المدى $2\mu m \leq \lambda_c \leq 6\mu m$.

ومن اجل تحقيق هدف زيادة امتصاصية الصفحة الماصة للاشعاع الشمسي وتقليل ابتعاثيته للاشعاع الحراري يتم طلاء اسطح الصفائح الماصة بطلاءات خاصة من اكاسيد معدنية وتعرف هذه الاسطح التي تمتلك هذه الخصائص بالاسطح الانتقائية (Selective surfaces) ومن اهم هذه المواد الشائعة الاستعمال في هذا المجال الكروم الاسود والنيكل الاسود واوكسيد الحديد واوكسيد النحاس والجدول (7.2) يبين خواص بعض الاسطح الماصة الانتقائية.

14.2 الاسطح العاكسة:

تستخدم الاسطح العاكسة في المجمعات المركزة للحصول على درجات حرارة عالية بالمقارنة مع المجمعات المستوية وتعمل هذه الاسطح العاكسة على عكس الاشعة المباشرة الساقطة عليها وتركيزها في نقطة بؤرية او على طول خط بؤري.



الشكل (12.2) تغير امتصاصية وابتعاثية سطح ماص انتقائي واخر فعلي مع طول الموجة.

اسم السطح	التركيب الكيميائي للطلاء	α	ε
نيكل اسود فوق فولاذ مطلي بالنيكل	$Ni-Zn-S$	0.95	0.07
اوكسيد الكوبلت فوق فولاذ مطلي بالنيكل	$Co O$	0.92	0.08
كروم اسود فوق فولاذ مطلي بالنيكل	$Cr-Cr_2O_3$	0.95	0.09
اوكسيد النحاس فوق المنيوم	CuO	0.93	0.11
كروم اسود فوق نحاس	$Cr-Cr_2O_3$	0.95	0.15
كروم اسود فوق فولاذ مكلف	$Cr-Cr_2O_3$	0.95	0.16
اوكسيد النحاس فوق نيكل	CuO	0.81	0.17

الجدول (7.2) الخواص الاشعاعية لبعض الاسطح الماصة الانتقائية.

تصنع الاسطح العاكسة من مواد تتمتع بخصائص عكس معظم الاشعاع الشمسي الساقط وتقليل كمية الاشعاع الممتص، هذا بالاضافة الى ضرورة ان تتوفر الخصائص الهندسية الملائمة في

السطح العاكس التي تمكنه من تركيز الأشعة المنعكسة على نقطة بؤرية أو على طول خط بؤري، ومن أهم السطوح العاكسة الشائعة الاستعمال هو الألمنيوم المصقول المطلي بطبقة رقيقة سمك $1\mu.m$ من الألمنيوم الانودي حيث يتميز بانخفاض كلفته مع أدائه الجيد ويعرف هذا النوع من الألمنيوم تجارياً باسم الزاك (Alzak) والجدول (8.2) يوضح انعكاسية بعض المواد.

المادة	الانعكاسية
الفضة	0.94
الألمنيوم	0.91
الزجاج المائي الأبيض المفضض الظهر	0.88
رقائق الألمنيوم	0.87
الزاك	0.85
الألمنيوم الانودي	0.82

الجدول (8.2) انعكاسية بعض المواد المستخدمة لصناعة السطوح العاكسة.

15.2 قياس الإشعاع الشمسي:

إن معظم أجهزة قياس الطاقة الشمسية تقع ضمن أحد صنفين، الأجهزة الكهروضوئية (Photoelectric) وأجهزة التحسس الحراري للإشعاع (Bolometric). المجموعة الأولى تشمل أجهزة تحتوي على عناصر مستقبلية أو مجسات تتغير خواصها الكهربائية في حالة وجود إشعاع شمسي مثل خلايا السليكون والسيليونيوم اذ تتولد فيها فولتية عندما يسقط الإشعاع الشمسي عليها. وعلى الرغم من أن الأجهزة الكهروضوئية الصلبة متينة وصغيرة ورخيصة الصنع وتتغير قليلاً بظروف المحيط لكنها مع ذلك لها عيوب عديدة منها:

1. أنها لا تنتج دائماً إشارة خطية في مستوى الشمس والعديد منها يميل إلى الإشباع أو التساوي Level off عند مستويات الشدة العالية .

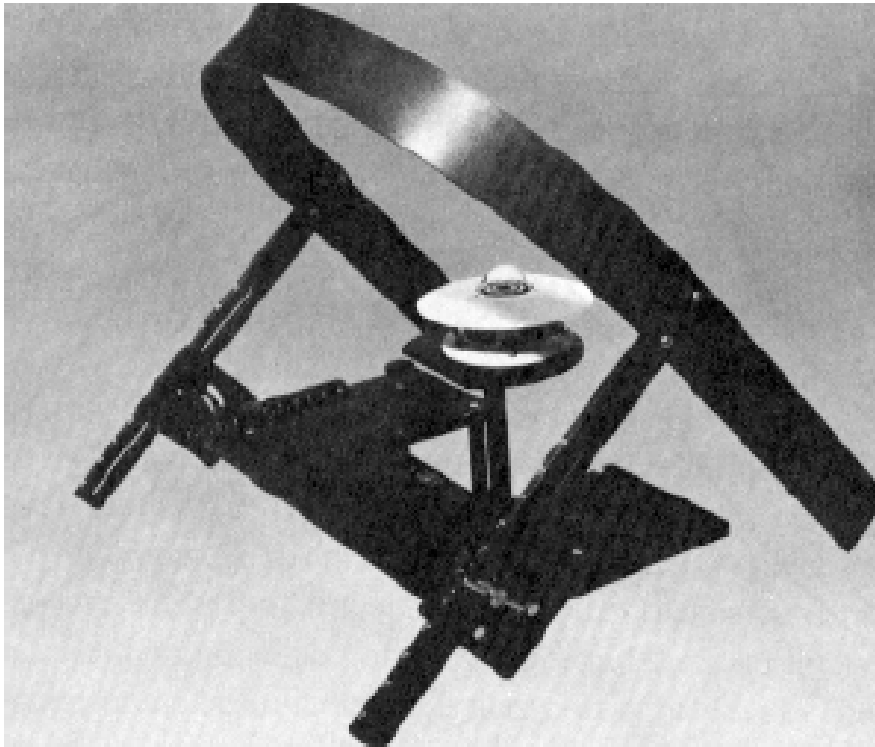
2. وهي الأكثر أهمية ليس للأجهزة الكهروضوئية استجابة طفيفة ثابتة على مدى الطيف الشمسي هذا يعني أن كميات متساوية من الطاقة الشمسية الواصلة في مناطق مختلفة من الطيف تنتج إشارات مختلفة خاصة إذا كان الجهاز حساساً فقط للطيف المرئي.

أما الصنف الثاني يشمل أجهزة التحسس الحراري للإشعاع وهذه الأجهزة عموماً تمتص الإشعاع الساقط على ماص أسود وتستخدم الحرارة المتولدة لإنتاج تغير في حالة

المستقبل (receiver). يقاس هذا التغير ويعزى الى مستوى الشمس وأحد أجهزة التحسس الحراري للإشعاع النموذجية هو البايرانوميتر (Pyranometer). يتكون المستقبل من سطحين مستويين متقاربين أحدهما أسود والآخر أبيض (أو مطلي بالفضة) مثبت لكل منهما مجس حراري (عادة مزدوج حراري)، المجس يولد إشارة كهربائية تتناسب طردياً مع الفرق بدرجات الحرارة بين السطحين الأسود والأبيض. عندما تسقط الطاقة الشمسية على الجهاز يمتص السطح الأسود الإشعاع فيصبح أكثر سخونة من السطح الأبيض الذي يعكس الإشعاع فيبقى عند درجة حرارة المحيط. وكلما كان مستوى الشمس أكبر كان الفرق بدرجات الحرارة أكبر وإشارة الفولتية أكبر. لحماية الجهاز من العوامل الجوية يغطى المستقبل عادة بقبة زجاجية شفافة للإشعة الشمسية. ويستخدم هذا الجهاز لقياس الاشعة من القبة السماوية (180) درجة اذ يوضع على سطح مستوى ومرتفع عن سطح الارض. ويقاس الاشعاع المباشر (العمودي) بجهاز يسمى باير هليومتر (Pyrhliometer) وهو جهاز يشبه المنظار الفلكي (التلسكوب) يوضع على جهاز يتتبع الشمس في حركتها اثناء النهار (الشكل 2.13). اما الاشعاع المبعثر فيقاس بنفس جهاز قياس الاشعاع الكلي بعد حجز الاشعاع المباشر عن عنصر القياس بواسطة تركيب قوس لتوليد الظل على جهاز البايرنوميتر كما في الشكل (2.14).



الشكل (13.2) جهاز قياس شدة الاشعاع المباشر.



الشكل (14.2) جهاز قياس شدة الاشعاع المنتشر.

امثلة محلولة

مثال (1.2):

احسب الوقت الشمسي لمدينة بغداد الواقعة عند خط طول 44.14° شرقاً عند الساعة 9:00 صباحاً ليوم 21 آذار، ثم احسب ساعة الشروق والغروب وطول اليوم ، علماً إن خط العرض لمدينة بغداد هو 33.20° شمالاً؟

الحل:

1. من المعادلة (2.11) نحسب معادلة الوقت (E) :

$$E = 9.87 * \sin(2 * B) - 7.53 * \cos(B) - 1.5 * \sin(B)$$

$$B = \frac{360 * (ND - 81)}{364}$$

$$ND = 31 + 28 + 21 = 80$$

$$B = \frac{360 * (80 - 81)}{364} = -0.989$$

لذا فإن معادلة الوقت E تصبح:

$$E = 9.87 * \sin(2 * (-0.989)) - 7.53 * \cos(-0.989) - 1.5 * \sin(-0.989) = -7.8435$$

او ان :

$$E \approx -7^{\min} : 51^{\sec}$$

يحسب الوقت الشمسي من المعادلة (2.10):

$$\begin{aligned} \text{Solar time} &= \text{Standard time} + E \pm 4(La - Lc) \\ &= 09:00 - 00:07:51 + 4 * (44:14 - 45) \\ &= 08:52:9 - 00:03:04 \\ &= 08:49:5 \end{aligned}$$

2. تحسب ساعة الغروب من المعادلة (2.7):

$$h_o = \cos^{-1}[-\tan(d) * \tan(\alpha)]$$

ونحتاج أولاً كلا من زاوية خط العرض (α) و زاوية الانحراف (d) وزاوية خط العرض لمدينة بغداد فهي (33.33)، اما زاوية الانحراف فتحسب من المعادلة (2.4):

$$d = 23.45 * \sin\left[\frac{360}{370}(ND - 80)\right] = 0$$

$$h_o = \cos^{-1}[\tan(0) * \tan(33.33)] = 90^\circ$$

وللحصول على ساعة الغروب نقسم على 15 لنحصل على:

$$h_o = \frac{90}{15} = 6 \text{ P.M.}$$

أي ان غروب الشمس يحدث عند الساعة السادسة مساءً. أما ساعة الشروق فتحسب من معرفة إن الفترة من وقت الظهر وحتى الغروب تعادل الفترة من ساعة الشروق وحتى ساعة الظهر، أي إن ساعة الشروق:

$$h_o = 12 - 6 = 6 \text{ A.M.}$$

أي إن ساعة الشروق هي الساعة السادسة صباحاً والغروب هو الساعة السادسة مساءً وطول اليوم هو 12 ساعة أي إنه اليوم الذي يتساوى فيه الليل والنهار تقريباً.

مثال (2.2):

1. احسب زاوية الارتفاع (β) وزاوية السميت (γ) عند الساعة الثالثة بعد الظهر بالوقت الشمسي في مدينة كركوك في 21 من شهر حزيران، علماً ان خط العرض لمدينة كركوك 35.33° شمالاً.

2. جد زاوية الارتفاع القصوى.

3. ساعة الشروق والغروب وطول النهار.

4. زاوية السميت (γ) عند الشروق والغروب.

الحل:

1. من المعلومات المعطاة في السؤال:

$$\alpha = 35.33^\circ \text{ N}$$

(عند الثالثة بعد الظهر بالتوقيت الشمسي) $h = 45^\circ$

من المعادلة (2.4) يمكن حساب قيمة زاوية الانحراف (d):

$$d = 23.45 * \sin \left[\frac{360}{370} (ND - 80) \right]$$

$$ND = 31 + 28 + 31 + 30 + 31 + 21 = 172$$

$$d = 23.45 * \sin \left[\frac{360}{370} (172 - 80) \right] = 23.45^\circ$$

وتحسب زاوية الارتفاع من المعادلة (2.5) :

$$\beta = \sin^{-1} (\cos(23.45) * \cos(35.33) * \cos(45) + \sin(23.45) * \sin(35.33)) = 49.376$$

زاوية السميت تحسب من المعادلة (2.9):

$$\tan \gamma = \frac{\sin(45)}{\sin(35.33) * \cos(45) - \cos(35.33) * \tan(23.45)}$$

$$\gamma = 85.55 = 85^\circ 33'$$

2. تحسب زاوية ارتفاع الشمس القصوى من المعادلة (2.6):

$$\beta_{noon} = 90 - |\alpha - d| = 90 - |35.33 - 23.45| = 78.18^\circ$$

3. لحساب طول اليوم نحتاج أولاً حساب ساعات الشروق والغروب وتحسب ساعة الغروب من

المعادلة (2.7) :

$$h_o = \cos^{-1} [-\tan(23.45) * \tan(35.33)] = 107.9$$

إذا وقت الغروب هو $7 : 11 : 36$ ^{hour min sec} $\frac{107.9}{15}$ أي ان وقت الغروب هو عند الساعة السابعة

و 11 دقيقة و 36 ثانية تقريباً مساءً، اما طول اليوم فيحسب كما يلي :-

$$2 * h_o = 2 * (7 : 11 : 36) = 14 : 23 : 12$$

4. زاوية السميت عند الغروب نحصل عليها من المعادلة الآتية:

$$\tan \gamma_o = \frac{\sin(h_o)}{\sin(\alpha) * \cos(h_o) - \cos(\alpha) * \tan(d)}$$

$$\tan \gamma_o = \frac{\sin(107.9)}{\sin(35.33) * \cos(107.9) - \cos(35.33) * \tan(23.45)} = -1.79132$$

$$\gamma_o = -60.81$$

أي ان زاوية السميت عند الغروب هي 29.19 درجة شمال الغرب وزاوية السميت عند الشروق هي 29.19 درجة شمال الشرق.

مثال (3.2):

1. جدار منزل يواجه الجنوب فيه شباك ارتفاعه متران، المنزل يقع في بغداد (44E°, 33.33 N°)، جد اقل امتداد للطول s لمظلة الشباك اللازمة لحجب الشمس وقت الظهر الشمسي بعد 21 نيسان.

2. في أي يوم بعد الانقلاب الصيفي تبدأ اشعة الشمس وقت الظهر الشمسي بدخول الشباك.

الحل:

1. يوضح الشكل ادناه المسألة، اذ ان المطلوب هو ايجاد زاوية ارتفاع الشمس β ومن ثم ايجاد الزاوية المكمل لها ϕ ، تحسب زاوية ارتفاع الشمس من المعادلة (2.5) :

$$\beta = \sin^{-1}(\cos(d) * \cos(\alpha) * \cos(h) + \sin(d) * \sin(\alpha))$$

من معطيات السؤال نجد ان زاوية خط العرض α تساوي 33.33 وزاوية الوقت الشمسي h تساوي صفر ، وزاوية انحراف الشمس (d) تحسب من المعادلة الآتية:

$$d = 23.45 * \sin\left[\frac{360}{370}(ND - 80)\right]$$

$$ND = 31 + 28 + 31 + 21 = 111$$

$$d = 11.7824^\circ$$

وبذلك تكون زاوية ارتفاع الشمس تساوي:

$$\beta = \sin^{-1}(\cos(11.782) * \cos(33.33) * \cos(0) + \sin(11.782) * \sin(33.33)) = 68.448$$

$$\phi = 90 - 68.448 = 21.55^\circ$$

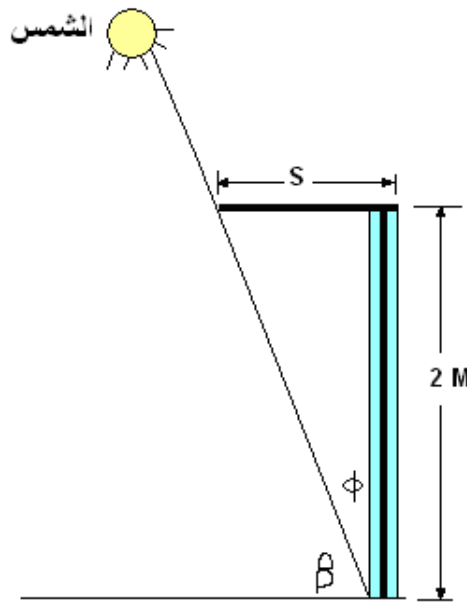
ولحساب امتداد المضلة s :

$$\tan\phi = \frac{s}{2m} \Rightarrow s = 0.789m \text{ (طول مظلة الشباك اللازمة لحجب الشمس وقت الظهر في بغداد)}$$

2. لكي تدخل اشعة الشمس الى الشباك بعد الانقلاب الصيفي، يتغير فقط رقم اليوم في السنة ND في حين تبقي قيم جميع الزاوية ثابتة، اذن:

$$d = 11.7824^\circ = 23.45 * \sin\left[\frac{360}{370} * (ND - 80)\right]$$

ومن هذه المعادلة نجد ان رقم اليوم الذي يحققها هو 234 والمقابل ليوم 22 اب (اليوم الذي تدخل فيه الاشعة الى الشباك).



مثال (3.2)

مثال (4.2):

احسب ادنى و اعلى زاوية ارتفاع للشمس لمدينة الموصل والتي تقع على خط عرض $36^\circ 19'$.

الحل:

بملاحظة المعادلة (2.6) نجد ان اعلى قيمة لزاوية الارتفاع تحدث عندما يكون الحد $|\alpha - d|$ اقل ما يمكن ويحدث هذا عندما تكون زاوية الانحراف (d) اعلى ما يمكن ، أي تكون قيمتها 23.45 والتي تحدث في 21 حزيران:

$$\beta_{noon, \max} = 90 - |36.316 - 23.45| = 77^\circ 8'$$

وادنى قيمة لزاوية الارتفاع تحدث عندما تكون زاوية الانحراف اقل ما يمكن أي تكون قيمتها $d = -23.45$ والتي تحدث في 21 كانون الاول:

$$\beta_{noon,min} = 90 - |36.316 - (-23.45)| = 30^{\circ}14'$$

مثال 5.2 :

أحسب شدة الأشعة الشمسية المباشرة والمنتشرة على سطح يميل بزاوية 30° مع الأفق ويواجه الجنوب الشرقي في الساعة الثالثة بعد الظهر بالتوقيت الشمسي في 21 تموز عند خط العرض 30° درجة شمالا و واقعة عند مستوى سطح البحر.

الحل :

زاوية الارتفاع تحسب من المعادلة (2.5) :

$$\beta = \sin^{-1}(\cos(d) * \cos(\alpha) * \cos(h) + \sin(d) * \sin(\alpha))$$

من معطيات السؤال نجد ان:

زاوية خط العرض α تساوي 33.33°

وزاوية الوقت الشمسي h تساوي 45°

وزاوية ميلان السطح δ تساوي 30°

وزاوية انحراف الشمس (d) تحسب من المعادلة الآتية:

$$d = 23.45 * \sin\left[\frac{360}{370}(ND - 80)\right]$$

$$ND = 31 + 28 + 31 + 30 + 31 + 30 + 21 = 202$$

$$d = 23.45 * \sin\left[\frac{360}{370}(202 - 80)\right] = 20.5686^{\circ}$$

لذا فإن زاوية ارتفاع الشمس :

$$\therefore \beta = \sin^{-1}(\cos(20.5686) * \cos(30) * \cos(45) + \sin(20.5686) * \sin(30)) = 48.495^{\circ}$$

من المعادلة (2.16) نحصل على I_{DN} :

$$I_{DN} = A_1 * \exp\left(-\frac{P_L}{P_o} * \frac{B}{\sin(\beta)}\right)$$

حيث ان A_1 تحسب من المعادلة (2.17):

$$A_1 = 1158 * \left[1 + 0.066 * \cos\left(\frac{360}{370} * 202\right)\right] = 1084.7 \text{ W/m}^2$$

B هو معامل الاضمحلال الجوي يحسب من المعادلة (2.18):

$$B = 0.175 * [1 - 0.2 * \cos(0.93 * 202)] - 0.0045 * [1 - \cos(1.86 * 202)] = 0.209$$

اما $\frac{P_L}{P_o}$ فيحسب من المعادلة (2.19):

$$\frac{P_L}{P_o} = \exp(-0.0001184 * 0) = 1$$

$$\therefore I_{DN} = 1084.73 * \exp(-1 * \frac{0.209}{\sin(48.495)}) = 820.14 \text{ W/m}^2$$

ان مقدار الاشعة المباشرة الساقطة على السطح يحسب من المعادلة (2.20):

$$I_D = I_{DN} * \cos(\theta)$$

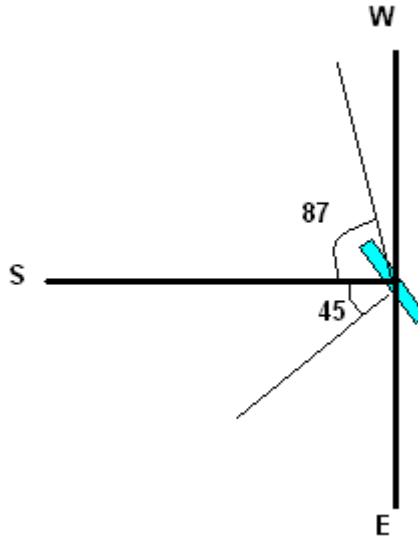
θ هي زاوية السقوط وتحسب من المعادلة (2.21):

$$\cos \theta = [\sin(48.495) * \cos(\delta) \pm \cos(\beta) \cos(\phi) \sin(\delta)]$$

اما زاوية السميت فتحسب من المعادلة (2.9):

$$\tan \gamma = \frac{\sin(45)}{\sin(30) * \cos(45) - \cos(30) * \tan(20.5686)} \Rightarrow \gamma = 87.679^\circ$$

فأذن زاوية السميت السطحي تحسب من الشكل المجاور:



المثال (5.2)

$$\phi = 87.679 + 45 = 132.679^\circ$$

θ هي زاوية السقوط وتحسب من المعادلة (2.21):

$$\cos \theta = [\sin(48.495) * \cos(30) + \cos(48.495) \cos(132.679) \sin(30)]$$

$$\therefore \theta = 66.77^\circ$$

إذا شدة الأشعة الشمسية المباشرة الساقطة عموديا على السطح من المعادلة (2.20):

$$I_D = 820.14 * \cos(66.77) = 323.48 \text{ W/m}^2$$

أما مقدار الأشعة المنتشرة الساقطة على سطح مائل بزاوية مقدارها δ عن الأفق فيحسب من المعادلة (2.22):

$$I_{diffuse} = I_{DN} * \left[C * \frac{(1 + \cos \delta)}{2} + s * (C + \sin \beta) * \frac{(1 - \cos \delta)}{2} \right]$$

C هو معامل الأشعة المنتشرة ويحسب من المعادلة (2.23):

$$C = 0.0965 * [1 - 0.42 * \cos((360/370) * 202)] - 0.0075 * [1 - \cos(1.95 * 202)] = 0.134$$

$$I_{diffuse} = 820.14 * \left[0.134 * \frac{(1 + \cos 45)}{2} + 0.2 * (0.134 + \sin 48.495) * \frac{(1 - \cos 45)}{2} \right]$$

$$I_{diffuse} = 114.96 \text{ W/m}^2$$

أن شدة الأشعة الشمسية الكلية الساقطة على سطح مائل تساوي مجموع الأشعة المباشرة والمنتشرة:

$$I_{total} = 323.48 + 114.96 = 438.444 \text{ W/m}^2$$

مثال 6.2 :

أحسب شدة الأشعة الشمسية الكلية على مجمع شمسي في مدينة البصرة، يميل بزاوية 20° مع الأفق ويواجه الجنوب في الساعة العاشرة صباحا بالتوقيت المحلي في 27 آب لعام 2004 عند خط العرض 30° درجة شمالا.

الحل :

السنة 2004 سنة كبيسة لذا يأخذ بنظر الاعتبار أن شهر شباط مكون من 29 يوم :

$$ND = 31 + 29 + 31 + 30 + 31 + 30 + 31 + 27 = 240$$

وزاوية انحراف الشمس (d) تحسب من المعادلة الآتية:

$$d = 23.45 * \sin\left[\frac{360}{370}(240 - 80)\right] = 9.659^\circ$$

معادلة الوقت بأستخدام المعادلة (2.11) :

$$E = 9.87 * \sin(2 * B) - 7.53 * \cos(B) - 1.5 * \sin(B)$$

حيث ان:

$$B = \frac{360 * (240 - 81)}{364} = 157.252$$

أذن:

$$E = 9.87 * \sin(2 * 157.252) - 7.53 * \cos(157.252) - 1.5 * \sin(157.252) = -0.675 \approx -41 \text{ sec}$$

لذا قالوقت الشمسي من المعادلة (2.10) :

$$\begin{aligned} \text{Solar time} &= \text{Standard time} + E \pm 4(La - Lc) \\ &= 10:00:00 - 00:00:41 + 4/60 * (47.78 - 45) \\ &= 09:59:19 + 00:11:08 \\ &= 10:10:27 \\ &= 10.175^\circ \end{aligned}$$

اذن الزاوية الساعية (h) تحسب من المعادلة الآتية:

$$h = 15 * [12 - \text{Solar.time}] = 15 * [12 - 10.175] = 27.375^\circ$$

وتأخذ زوايا الوقت الشمسي بالسالب قبل الظهر، لذا فأن:

$$h = -27.375^\circ$$

زاوية الارتفاع تحسب من المعادلة (2.5) :

$$\beta = \sin^{-1}(\cos(9.659) * \cos(30) * \cos(-27.375) + \sin(9.659) * \sin(30)) = 57.355^\circ$$

اما زاوية السميت فتحسب من المعادلة (2.9):

$$\tan \gamma = \frac{\sin(-27.375)}{\sin(30) * \cos(-27.375) - \cos(30) * \tan(9.659)} \Rightarrow \gamma = -57.176^\circ$$

فأذن زاوية السميت السطحي ϕ تحسب من:

$$\phi = -57.176$$

من المعادلة (2.16) نحصل على I_{DN} :

$$I_{DN} = A_1 * \exp\left(-\frac{P_L}{P_o} * \frac{B}{\sin(\beta)}\right)$$

حيث ان A_1 تحسب من المعادلة (2.17):

$$A_1 = 1158 * \left[1 + 0.066 * \cos\left(\frac{360}{370} * 240\right)\right] = 1112.55 \text{ W/m}^2$$

B هو معامل الاضمحلال الجوي يحسب من المعادلة (2.18):

$$B = 0.175 * [1 - 0.2 * \cos(0.93 * 240)] - 0.0045 * [1 - \cos(1.86 * 240)] = 0.195$$

اما $\frac{P_L}{P_o}$ فيحسب من المعادلة (2.19):

$$\frac{P_L}{P_o} = \exp(-0.0001184 * 0) = 1$$

$$\therefore I_{DN} = 1112.553 * \exp\left(-1 * \frac{0.1958}{\sin(57.176)}\right) = 881.312 \text{ W/m}^2$$

ان مقدار الاشعة المباشرة الساقطة على السطح يحسب من المعادلة (2.20):

$$I_D = I_{DN} * \cos(\theta)$$

θ هي زاوية السقوط وتحسب من المعادلة (2.21):

$$\cos \theta = [\sin(57.355) * \cos(20) + \cos(57.355) \cos(57.176) \sin(20)] = 0.891$$

اذا شدة الاشعة الشمسية المباشرة الساقطة عموديا على السطح هي:

$$I_D = 881.312 * 0.891 = 785.256 \text{ W/m}^2$$

اما مقدار الاشعة المنتشرة الساقطة على سطح المجمع المائل بزاوية مقدارها δ عن الافق

فيحسب من المعادلة (2.22):

$$I_{diffuse} = I_{DN} * \left[C * \frac{(1 + \cos \delta)}{2} + s * (C + \sin \beta) * \frac{(1 - \cos \delta)}{2} \right]$$

C هو معامل الاشعة المنتشرة ويحسب من المعادلة (2.23):

$$C = 0.0965 * [1 - 0.42 * \cos((360/370) * 240)] - 0.0075 * [1 - \cos(1.95 * 240)] = 0.11$$

$$I_{diffuse} = 881.312 * \left[0.11 * \frac{(1 + \cos 20)}{2} + 0.2 * (0.11 + \sin 57.176) * \frac{(1 - \cos 20)}{2} \right]$$

$$I_{diffuse} = 98.47 \text{ W/m}^2$$

اذن شدة الاشعة الشمسية الساقطة على المجمع تساوي مجموع الاشعة المباشرة والمنتشرة:

$$I_{total} = 785.256 + 98.47 = 883.726 \text{ W/m}^2$$

مثال 7.2:

قارن بين النتائج المستحصلة من نموذج اشري و نموذج هوتيل لتقدير كمية الاشعاع المباشر الساقط على سطح افقي في مدينة البصرة ويواجه الجنوب في الساعة العاشرة صباحا بالتوقيت المحلي في 27 تموز لعام 2004 عند خط العرض 30° درجة شمالا.

الحل:

من المثال (7.2) نجد ان كمية الاشعاع المباشر الساقط على سطح عمودي على مساره I_{DN} تساوي:

$$I_{DN} = 1112.553 * \exp(-1 * \frac{0.1958}{\sin(57.176)}) = 881.312 \text{ W/m}^2$$

وتحسب كمية الاشعاع المباشر الساقط على سطح افقي من المعادلة الاتية:

$$I_D = I_{DN} * \cos(\theta)$$

θ هي زاوية السقوط وتحسب بالاستناد الى نتائج المثال السابق كالاتي:

$$\cos \theta = [\sin(57.355) * \cos(0) + \cos(57.355) \cos(57.176) \sin(0)] = 0.842$$

$$I_D = 881.312 * 0.842 = 742.1 \text{ W/m}^2$$

وباستخدام نموذج هوتيل نحسب اولا الثوابت a_o^* و a_1^* و k^* لمدينة البصرة حيث مدى الرؤيا

$5 \text{ km} =$ الارتفاع عن مستوى سطح البحر $A=0$ وذلك باستخدام المعادلات (2.23)

$$a_o^* = 0.2538 - 0.0063(6 - A)^2 = 0.2538 - 0.0063(6 - 0)^2 = 0.027$$

$$a_1^* = 0.7678 + 0.001(6.5 - A)^2 = 0.7678 + 0.001(6.5 - 0)^2 = 0.81$$

$$k^* = 0.249 + 0.081(2.5 - A)^2 = 0.249 + 0.081(2.5 - 0)^2 = 0.755$$

وعلى فرض ان مناخ البصرة هو صيف منتصف العرض، فمن الجدول (2.2) نجد ان:

$$a_o = 0.95 * 0.252 = 0.02565$$

$$a_1 = 0.99 * 0.81 = 0.8091$$

$$k = 1.02 * 0.755 = 0.7701$$

وباستخدام المعادلة (21.2) :

$$\frac{I_b}{I_o} = a_o + a_1 \exp\left(-\frac{k}{\sin \beta}\right)$$

$$\frac{I_b}{I_o} = 0.02565 + 0.8091 \exp\left(-\frac{0.7701}{\sin 56.929}\right) = 0.02565 + 0.8091 * 0.399 = 0.349$$

نحسب كمية الاشعاع الشمسي الساقط على سطح افقي خارج الغلاف الجوي الارضي (I_o)

من المعادلة (2.12):

$$I_o = 1367 * (1 + 0.033 * \cos \frac{360 * ND}{365}) * \sin(\beta) \quad \dots (2.12)$$

$$I_o = 1367 * (1 + 0.033 * \cos \frac{360 * 240}{365}) \sin(57.176) = 1128 \text{ W/m}^2$$

$$\frac{I_b}{I_o} = 0.349 \rightarrow I_b = 0.349 * 1128 = 393.65 \text{ W/m}^2$$

ومن نجد ان تقديرات نموذج هونيل تحدد الاشعاعية المباشرة بحوالي 393.65 W/m^2

ونموذج اشري بحوالي 742.1 W/m^2 .

مثال 8.2:

احسب انعكاسية زجاج عادي يتعرض الى سقوط اشعاع شمسي بصورة عمودية مرة وبزاوية

سقوط قدرها 60° مرة اخرى.

الحل:

من الجدول (4.2) نجد ان معامل الانكسار للزجاج العادي هو 1.526 و للهواء هو 1، للسقوط العمودي نستخدم المعادلة (2.36)

$$r(\theta = 0) = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 = \left(\frac{1.526 - 1}{1.526 + 1} \right)^2 = 0.0434$$

وللسقوط بزاوية قدرها 60° نحسب زاوية الانكسار من المعادلة (2.30)

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{\sin 60}{1.526} \right) = 34.58$$

ونحسب الانعكاسية من المعادلة (2.33):

$$r = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \right)$$

$$r(60) = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(34.58 - 60)}{\sin^2(34.58 + 60)} + \frac{\tan^2(34.58 - 60)}{\tan^2(34.58 + 60)} \right)$$

$$r(60) = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(-25.24)}{\sin^2(94.58)} + \frac{\tan^2(-25.24)}{\tan^2(94.58)} \right) = \frac{1}{2} (0.185 + 0.001) = 0.093$$

مثال 9.2:

احسب نفاذية طبقتين من الزجاج غير الماص على فرض ان زاوية سقوط الاشعة عمودية مرة وبزاوية سقوط قدرها 60 مرة اخرى.

الحل:

عند وجود اكثر من طبقة زجاج نستخدم المعادلة (2.40)، ولان زاوية سقوط الاشعة عمودية فان كلا من المركبة العمودية والافقية لها نفس الانعكاسية وتصبح المعادلة (2.40) بالشكل الاتي:

$$\tau_{rN} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - r_1}{1 + (2N - 1)r_1} + \frac{1 - r_2}{1 + (2N - 1)r_2} \right)$$

$$\tau_{rN} = \left(\frac{1 - r}{1 + (2N - 1)r} \right) = \frac{1 - r}{1 + (2N - 1)r}$$

من المثال السابق نجد ان انعكاسية اشعاع ساقط بصورة عمودية هي $r = 0.0434$ وتصبح الانفاذية بالشكل الاتي:

$$\tau(0) = \frac{1 - 0.0434}{1 + (2 * 2 - 1) * 0.0434} = 0.846$$

عند زاوية السقوط (60°) فان قيم انعكاسية المركبة العمودية $r_1 = 0.185$ وانعكاسية المركبة الافقية هي $r_2 = 0.001$ وتكون الانفاذية في هذه الحالة:

$$\tau_{rN}(60) = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - 0.185}{1 + (2 * 2 - 1) * 0.185} + \frac{1 - 0.001}{1 + (2 * 2 - 1) * 0.001} \right) = 0.76$$

مثال 10.2:

احسب نفاذية وانعكاسية وامتصاصية طبقة من الزجاج العادي ذات سمك قدره 2.3 mm عند سقوط اشعة الشمس عليه بزاوية سقوط قدرها 60° علما ان معامل الاضمحلال لهذا الزجاج هو 32 m^{-1}

الحل:

زاوية الانكسار $\theta_2 = 34.58$ (من نتائج المثال السابق) وعند الاخذ بنظر الاعتبار امتصاصية الغطاء الزجاجي تحسب الانفاذية الامتصاصية من معادلة Bouguer's law الذي ينص على:

$$\tau_a = e^{-\frac{K_1 * L}{\cos \theta_2}} = e^{-\frac{32 * 0.0023}{\cos(34.58)}} = 0.915$$

نحسب الانفاذية الكلية من المعادلة (2.41)

$$\tau \cong \tau_a * \tau_r$$

وتحسب τ_r كالآتي:

$$\tau_r(60) = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - 0.185}{1 + 0.185} + \frac{1 - 0.001}{1 + 0.001} \right) = 0.843$$

$$\therefore \tau \cong 0.915 * 0.843 = 0.771$$

تحسب الامتصاصية الكلية من (2.42)

$$\alpha \cong 1 - \tau_a = 1 - 0.915 = 0.085$$

وتحسب الانعكاسية الكلية من المعادلة (2.29):

$$\rho = 1 - 0.085 - 0.771 = 0.144$$

مثال 11.2:

احسب حاصل ضرب الامتصاصية – النفاذية الفعال لمجمع شمسي يستخدم صفيحة ماصة ذو امتصاصية $\alpha = 0.9$ اذا كانت زاوية السقوط 50° و $KL = 0.037$ و معامل الانكسار للزجاج العادي هو 1.526

الحل:

لحساب حاصل ضرب الامتصاصية – النفاذية الفعال نستخدم المعادلة (2.46):

$$(\tau_g \alpha_p)_e = \frac{\tau \alpha}{1 - (1 - \alpha) \rho_d}$$

ولزاوية سقوط قدرها 50° نحسب زاوية الانكسار من المعادلة (2.34)

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{\sin 50}{1.526} \right) = 30.132$$

تحتسب الانفاذية الامتصاصية من معادلة Bouguer's law الذي ينص على:

$$\tau_a = e^{-K_1 * L / \cos \theta_2} = e^{-\frac{0.037}{\cos(30.132)}} = 0.958$$

$$r_1 = \frac{\sin^2(30.132 - 50)}{\sin^2(30.132 + 50)} = \frac{\sin^2(-19.868)}{\sin^2(80.132)} = 0.119$$

$$r_2 = \frac{\tan^2(30.132 - 50)}{\tan^2(30.132 + 50)} = \frac{\tan^2(-19.868)}{\tan^2(80.132)} = 0.004$$

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - r_1}{1 + r_1} + \frac{1 - r_2}{1 + r_2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - 0.119}{1 + 0.119} + \frac{1 - 0.004}{1 + 0.004} \right) = \frac{1}{2} (0.787 + 0.992)$$

$$\tau_r = 0.6025$$

$$\tau \cong 0.958 * 0.6025 = 0.577$$

وتحسب الانعكاسية الكلية من المعادلة (2.38):

$$\rho_d \cong \tau_a - \tau = 0.958 - 0.577 = 0.3808$$

حاصل ضرب الامتصاصية – النفاذية الفعال:

$$(\tau_g \alpha_p)_e = \frac{\tau \alpha}{1 - (1 - \alpha) \rho_d} = \frac{0.795 * 0.9}{1 - (1 - 0.9) * 0.162} = 0.727$$

مثال 12.2:

احسب كمية الاشعاع اليومي الساقط على سطح افقي خارج الغلاف الجوي عند خط عرض 43°N في 15 نيسان.

الحل:

$$ND = 31 + 28 + 31 + 15 = 105$$

نحسب زاوية الانحراف من المعادلة (2.7):

$$d = 23.45 * \sin \left[\frac{360}{370} (ND - 80) \right] = 23.45 * \sin \left[\frac{360}{370} (105 - 80) \right] = 9.66$$

نحسب زاوية الغروب من المعادلة (2.8):

$$h_o = \cos^{-1} [-\tan(d) * \tan(\alpha)] = \cos^{-1} [-\tan(9.66) * \tan(43)] = 99.13$$

يحسب الاشعاع اليومي D_o من المعادلة (2.15):

$$D_o = \frac{24 * 3600}{\pi} * 1367 * (1 + 0.033 * \cos \frac{360 * 105}{365}) * \left(\cos(9.66) \cos(43) (\sin 99.13) + \frac{\pi * 99.13 w_s}{180} \sin(9.66) \sin(43) \right)$$

$$D_o = 33.8 \text{ MJ/m}^2$$

مثال 13.2:

احسب كمية الاشعاع الساعي الساقط على سطح افقي خارج الغلاف الجوي عند خط عرض 43°N في 15 نيسان بين الساعة 10 و 11 صباحا.

الحل:

من المثال (12.2) نجد ان:

$$d = 9.66$$

الزاوية الساعية عند العاشرة صباحا ($w_1 = -30^\circ$) وعند الساعة الحادية عشرة صباحا ($w_2 = -15^\circ$)، ولحساب كمية الاشعاع الشمسي بين هاتين الساعتين نستخدم المعادلة (2.14):

$$H_o = \frac{12 * 3600}{\pi} * 1367 * (1 + 0.033 * \cos \frac{360 * ND}{365}) * \left(\cos(d) \cos(\alpha) (\sin w_2 - \sin w_1) + \frac{\pi(w_2 - w_1)}{180} \sin(d) \sin(\alpha) \right)$$

$$H_o = \frac{12 * 3600}{\pi} * 1367 * (1 + 0.033 * \cos \frac{360 * 105}{365}) * \left(\cos(9.66) \cos(43) (\sin(-15) - \sin(-30)) + \frac{\pi(-15 - (-30))}{180} \sin(9.66) \sin(43) \right)$$

$$\therefore H_o = 3.79 \text{ MJ/m}^2$$

مثال 14.2:

جد معامل الانكسار لغشاء يجعل الزجاج ($n_g=1.5$) غير عاكس. ماهو اقل سمك لهذا الغشاء يجب ترسيبه لجعل الزجاج غير عاكس عند السقوط العمودي للضوء الاخضر $\lambda_o = 0.5 \mu.m$.

الحل:

حسب المعادلة (2.47) يجب ان يكون معامل انكسار الغشاء:

$$n_f = \sqrt{n_g} = \sqrt{1.5} = 1.22$$

ونحصل على اقل سمك لهذا الغشاء بجعل $m=1$ في المعادلة (2.48) وهذ يعطي:

$$s_f = \frac{m \lambda_o}{4 n_f} = \frac{1 * 0.5}{4 * 1.22} = 0.102 \mu m$$

الفصل الثالث

3

المجمعات الشمسية

الفصل الثالث

المجمعات الشمسية

Solar collectors

1.3 مقدمة عامة:

يتطلب الاستخدام الفعال للطاقة الشمسية ضرورة تحويلها من موجات كهرومغناطيسية إلى طاقة حرارية لاستخدامها في تلبية حاجات البشر ومن أجل تحقيق هذا الغرض يتطلب الأمر استعمال بعض الوسائل التي تقوم بتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية وتسمى هذه الأجهزة بالمجمعات الشمسية (Solar collectors). يمكن تصنيف المجمعات الشمسية إلى نوعين رئيسيين، النوع الأول هو المجمعات الشمسية المستوية (Flat solar collector) التي يتم بواسطتها الاستفادة من الإشعاع المباشر والمنتشر الساقط على المجمع ، ويمكن الاستفادة من هذه المجمعات في المنظومات التي لا تحتاج إلى درجات حرارة عالية كالتدفئة وتسخين المياه للأغراض المنزلية، تمتاز هذه المجمعات ببساطة تركيبها وسهولة تصنيعها وصيانتها فضلا عن الكلفة الواطئة بالمقارنة مع الأنواع الأخرى⁽⁴⁾.

أما النوع الثاني من المجمعات الشمسية هي المجمعات الشمسية المركزة (Concentrating collector) والتي تستخدم لتجهيز حرارة عالية إذ تتركز كثافة الفيض الشمسي بواسطة عاكس (Reflector) على مساحة صغيرة لتنتج كثافة فيض عالية وتحتاج هذه المجمعات إلى منظومات تعقب حركة الشمس، وتستخدم عادة في محطات توليد الطاقة الكهربائية والأفران الشمسية وغيرها من التطبيقات التي تحتاج إلى حرارة عالية.

وظهر في الفترة الأخيرة نوع جديد من المجمعات الشمسية يعتمد على دمج الصفيحة الماصة مع خزان الحفظ في جزء واحد ويسمى هذه المجمع بالمجمع الشمسي الخازن (Storage solar collector) لتقليل الكلفة الاقتصادية وتسهيل عملية التصنيع.

2.3 المجمع الشمسي المستوي (Flat solar collector):

تعد المجمعات الشمسية المستوية أكثر الأنواع شيوعا وذلك لسهولة تصنيعها وانخفاض سعرها بالمقارنة مع المجمعات الأخرى (الشكل (1.3)) ، ويشيع استعمال هذا النوع من المجمعات في التطبيقات التي تحتاج إلى درجات حرارة واطئة نسبيا، أي لا تتعدى

(90-100 °C) واستعمالات الطاقة على مثل هذه الدرجات المنخفضة كثيرة فتسخين المياه للاستخدام المنزلي لا يتعدى أكثر من (50-60 °C)، أما تدفئة البيوت فإنه يعني الاحتفاظ بدرجة حرارة الأجواء الداخلية على (20-25°C) ليس أكثر، ويتكون المجمع الشمسي المستوي من ثلاثة أجزاء رئيسية كما في الشكل (2.3)⁽²⁰⁾:

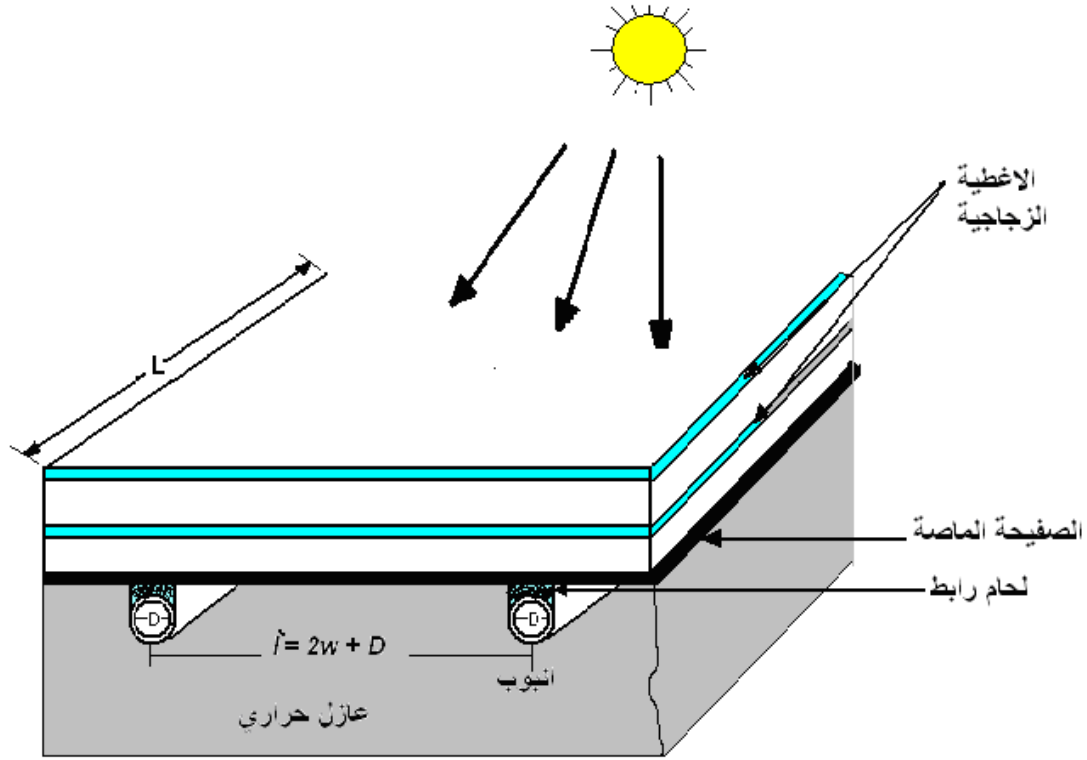
1- اللوح الماص Absorber plate:

هو الجزء الفعال من المجمع الشمسي ويتكون من لوح معدني ملحوم إلى شبكة من الأنابيب التي يمر بها المائع والذي يكون عادة من الماء أو الهواء، ويصنع اللوح الماص وهذه الأنابيب عادة من معادن ذات موصلية حرارية عالية وكلفة اللوح الماص لها دور مهم في اختيار نوع اللوح، فيأتي النحاس في المرتبة الأولى من حيث قابلية توصيله الحراري ولكنه غالي الثمن، لذلك يصنع اللوح عادة من الألمنيوم أو الفولاذ المقاوم للصدأ أو البراص.



الشكل (1.3) المجمع الشمسي المستوي

يطلق اللوح الماص عادة بطلاء أسود معتم لامتناس اكبر كمية من الإشعاع الشمسي ويفضل إن يكون الطلاء انتقائيا؛ لزيادة كفاءة اللوح الماص إذ يمتص اغلب الأشعة الساقطة ويبعث نسبة قليلة من الإشعاعات الحرارية وفي اغلب الأحيان يكون الطلاء الانتقائي من أكاسيد معدن اللوح الماص.



شكل (2.3) مخطط لمجمع شمسي مستوي

2-الغطاء الزجاجي (Glass cover):

يغطي اللوح الماص بغطاء شفاف يفضل أن يكون مصنوعا من الزجاج إذ تترك مسافة من 2 إلى 5 سنتيمترات بينه وبين اللوح الماص ويكون الزجاج المستخدم من النوع النقي الخالي من الألوان وعلى الرغم من أن اللوح الزجاجي يشكل عائقا أمام وصول كل الأشعة الشمسية إلى اللوح الماص كون الزجاج يسمح للأشعة ذات الموجات القصيرة بالنفاذ من خلاله بينما يعترض الموجات الطويلة ولا يسمح لها بالنفاذ وتعرف هذه الخاصية باسم خاصية البيت الزجاجي (Green house effect) إضافة إلى ذلك فإنه يقلل من الخسائر الحرارية الحاصلة عن طريق الحمل والإشعاع ويحفظ اللوح الماص من الأمطار والأتربة وغيرها.

وتختلف خصائص زجاج المجمعات الشمسية عن زجاج النوافذ، ففي أغشية المجمعات الشمسية يتم التخلص من معظم الشوائب لزيادة شفافية الزجاج وبالتالي زيادة كمية الأشعة النافذة إلى داخل المجمع، أما مساوي الزجاج فهو سهولة الكسر، ويمكن استخدام أكثر من طبقة من الزجاج لتقليل الخسائر الحرارية.

3- الهيكل الخارجي للمجمع والمواد العازلة:

تركب أجزاء المجمع الشمسي داخل صندوق يصنع من الخشب أو الحديد المقاوم للصدأ حتى لا يتأثر بالظروف الجوية ويغلف المجمع الشمسي بطبقة من العازل لتقليل الخسائر الحرارية من جميع جوانبه عدا الجهة المعرضة للشمس ومن العوازل المستخدمة هي الألياف المعدنية والزجاجية و الصوف الصخري والعوازل الرغوية وغيرها.

1.2.3 التحليل الحراري للمجمع الشمسي المستوي:

إن المجمع الشمسي عبارة عن مبادل حراري قادر على استخدام الأشعة الشمسية لزيادة الطاقة الداخلية ودرجة الحرارة لمائع التشغيل. ويتكون في أبسط صورته من أنبوب معرض لأشعة الشمس. ويتم امتصاص جزء من الأشعة الشمسية من قبل الأنبوب، فترتفع درجة حرارة جداره، وإذا كان هنالك مائع عند درجة حرارة المحيط يمر من خلال الأنبوب، فستنتقل الحرارة من الأنبوب إلى المائع لتزداد درجة حرارة المائع إلى أن تكون الحرارة المفقودة من الأنبوب إلى المحيط مساوية للحرارة الممتصة من أشعة الشمس. ولتطوير الأداء الحراري لمثل هذا النظام البسيط، يمكن إضافة زعانف إلى الأنبوب لتزداد المساحة المعرضة لأشعة الشمس ويمكن تقليل الفقد بالحرارة بوضع طبقة أو طبقتين من الزجاج بين الطاقة الشمسية القادمة والسطح الذي يقوم بامتصاصها. وإذا ما مر مائع مثل الماء خلال الأنبوب، فأن الطاقة النافعة المستلمة من قبل المائع تكون⁽²¹⁾:

$$q_u = \dot{m} c_p (T_{f,out} - T_{f,in}) \quad (3.1)$$

إذ إن:

$\dot{m}$ = معدل جريان الكتلة خلال المجمع.

c_p = الحرارة النوعية عند ثبوت الضغط لمائع التشغيل.

$(T_{f,out} - T_{f,in})$ = الارتفاع بدرجة حرارة مائع التشغيل المار عبر المجمع.

يمكن إيجاد الأداء الحراري للمجمع الشمسي بتوازن الطاقة الذي يحدد ذلك الجزء من الأشعة القادمة والتي تعطي كطاقة نافعة لمائع التشغيل. ولمجمع شمسي ذي صفيحة مستوية يكون هذا التوازن:

$$I_c A_c \tau_s \alpha_s = q_u + q_{loss} + \frac{de_c}{dt} \quad (3.2)$$

حيث:

I_c : الإشعاع الشمسي على سطح المجمع.

τ_s : النفاذية الفعالة لغطاء أو أغطية المجمع.

α_s : الامتصاصية الشمسية لسطح المجمع الماص.

q_u : معدل انسياب الحرارة من صفيحة المجمع إلى المائع.

q_{loss} : معدل انسياب الحرارة (أو فقدانها) من الصفيحة إلى المحيط.

$\frac{de_c}{dt}$: معدل تخزين الطاقة الداخلية في المجمع.

إن الكفاءة الآنية للمجمع هي ببساطة نسبة الحرارة النافعة إلى الطاقة الشمسية القادمة الكلية:

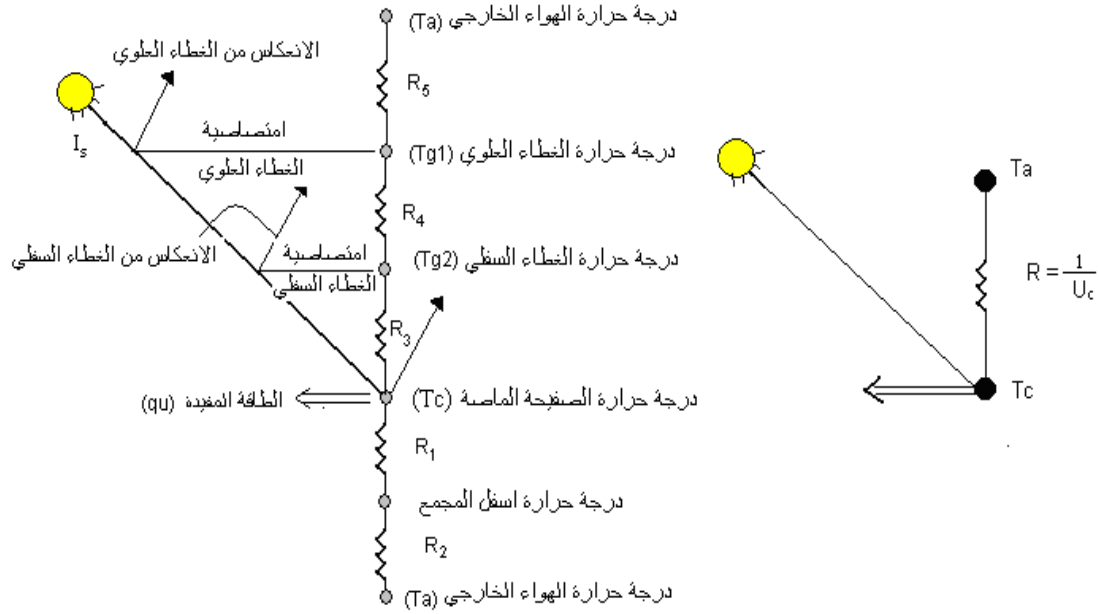
$$\eta = \frac{q_u}{I_c * A_c} \quad (3.3)$$

2.2.3 مواصلة فقدان الحرارة للمجمع الشمسي المستوي:

لكي نفهم العوامل التي تحدد الفعالية الحرارية للمجمع الشمسي، من المهم أن نطور مفهوماً عن المواصلة الإجمالية لفقدان الحرارة بالمجمع U_c ، وإذا كانت صفيحة المجمع عند متوسط الحرارة T_c فإن الحد الثاني في الطرف الأيمن للمعادلة (3.2) يمكن أن يكتب لدرجة حرارة معينة للمحيط T_a بالشكل البسيط⁽¹⁷⁾:

$$q_{loss} = U_c * A_c * (T_c - T_a) . \quad (3.4)$$

إن بساطة هذه العلاقة ربما تعطي فهماً خاطئاً؛ لأنه لا يمكن تحديد مواصلة فقدان الحرارة للمجمع بدون تفصيل تحليل كل الفقد بالحرارة، يوضح الشكل (2.3) مخططاً توضيحياً لمجمع شمسي ذي لوحين من الزجاج، ويوضح الشكل (3.3) الدائرة الحرارية بجميع أجزائها التي يجب تحليلها قبل جمعها بعنصر مواصلة واحد.



الشكل (3.3) الدوائر الحرارية لمجمع شمسي ذي صفيحة مستوية (17)

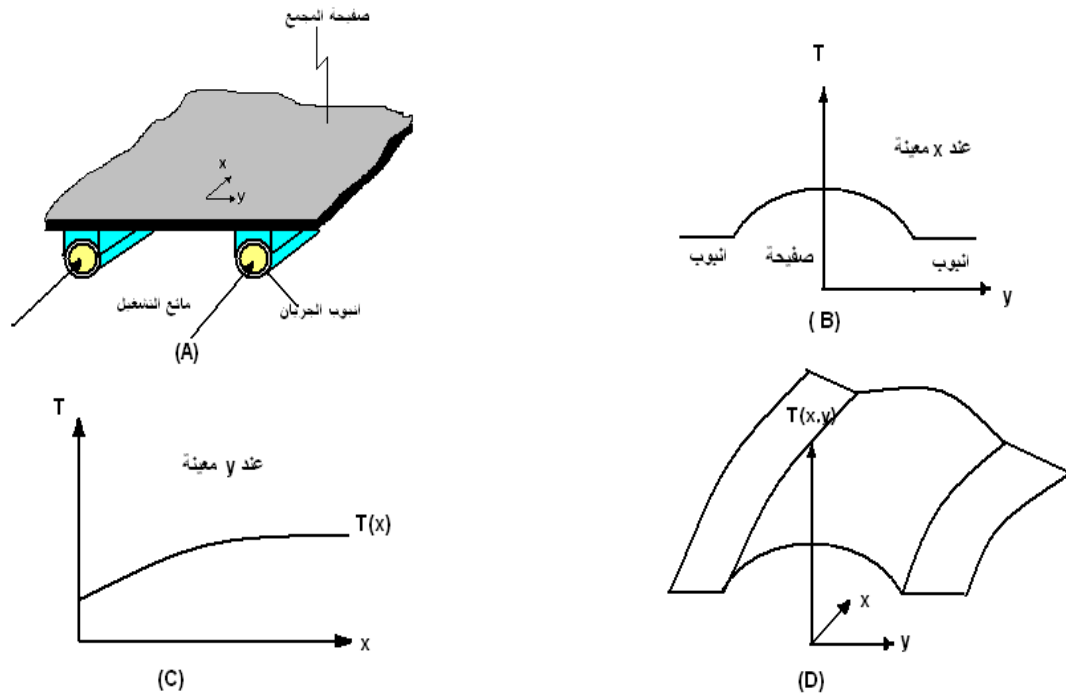
يوضح الشكل رقم (4.3) نوعيا توزيع درجة الحرارة في صفيحة المجمع المستوية. ويسقط الإشعاع على أعلى الصفيحة التي تربط أي أنبوبين متجاورين للجريان ويتم امتصاصها من قبل الصفيحة وتوصل بعد ذلك إلى أنابيب الجريان، إذ تنتقل بعد ذلك بالحمل إلى المائع الجاري خلال المجاري ويلاحظ أن درجة الحرارة عند أي مقطع عرضي عمودي على اتجاه الجريان تكون أعلى ما يمكن في منتصف المسافة بين مجريين متجاورين وتقل على طول الصفيحة باتجاه الأنبوب، كما موضح في الشكل (3.4(B)). بما أن الحرارة تنتقل إلى مائع التشغيل فإن درجة حرارة المائع ستزداد باتجاه الجريان إن الزيادة بدرجة الحرارة في منتصف المسافة بين الأنبوبين موضحة كميا في الشكل (3.4(C)) وتوزيع درجة الحرارة في الاتجاهين x, y موضح في المخطط الثلاثي الأبعاد في الشكل (3.4(D)). ولكي نضع نموذجا مناسباً للتحليل الحراري لجميع الصفيحة المستوية يجب عمل افتراضات التبسيط الآتية:-

1. يكون المجمع في حالة الاستقرار حرارياً.
2. يكون الهبوط بدرجة الحرارة بين أعلى وأسفل صفيحة الامتصاص مهماً.
3. يكون انسياب الحرارة باتجاه واحد خلال الغطائين بالإضافة للعازل الخلفي.

4. تشغل الأنابيب الرئيسية التي تربط الأنابيب مساحة صغيرة فقط من المجمع وتعطي تدفقا منتظما في الأنابيب.

5. يمكن معاملة السماء كجسم أسود بخصوص الأشعة تحت الحمراء عند درجة حرارة السماء المكافئة.

6. الإشعاع على صفيحة المجمع منتظم.



شكل (4.3) توزيع درجات الحرارة في صفيحة الامتصاص للمجمع الشمسي المستوي

للتحليل الكمي خذ موضعاً عند x و y على مجمع الصفيحة المستوية النموذجي، وكما موضح في الشكل (4.3 (A)). لتكن درجة حرارة الصفيحة عند هذه النقطة $T_c(x,y)$ وافرض إن الطاقة الشمسية تمتص بمعدل $I_s \alpha_s$. فإذا كان السطح السفلي للمجمع معزولاً بشكل جيد، فإن معظم الفقدان بالحرارة سيحدث من السطح العلوي. ويمكن حساب المواصلات للسطح العلوي للمجمع بإيجاد المقاومات الحرارية R_3 و R_4 و R_5 في الشكل (3.3). وتنتقل الحرارة بين الغطاء واللوح الزجاجي الثاني وبين اللوحين الزجاجيين بالحمل والإشعاع على التوازي ما عدا عند امتصاص الطاقة الشمسية باللوح الزجاجي الثاني فإن علاقتي معدل انتقال الحرارة بين T_c

و T_{g2} و بين T_{g1} سيكونان متماثلتين وعليه فإن معدل انتقال الحرارة بوحدة المساحة السطحية للمجمع بين اللوح الماص والغطاء الزجاجي الثاني سيكون:

$$q_{top,loss} = A_c \bar{h}_{c2} (T_c - T_{g2}) + \frac{\sigma(T_c^4 - T_{g2}^4) A_c}{(1/\varepsilon_{p,i}) + (1/\varepsilon_{g2,i}) - 1} \quad (3.5)$$

حيث ان :

$\bar{h}_{c2}$ = معامل انتقال الحرارة بين الصفيحة واللوح الزجاجي الثاني.

$\varepsilon_{p,i}$ = ابتعاثية الصفيحة .

$\varepsilon_{g2,i}$ = ابتعاثية الغطاء الزجاجي الثاني.

وإذا كان الحد الخاص بالإشعاع خطياً فإن المعادلة ستصبح:

$$q_{top,loss} = (\bar{h}_{c2} + h_{r2}) A_c (T_c - T_{g2}) = \frac{T_c - T_{g2}}{R_3} \quad (3.6)$$

إذ أن:

$$h_{r2} = \frac{\sigma(T_c + T_{g2})(T_c^2 + T_{g2}^2)}{(1/\varepsilon_{p,i}) + (1/\varepsilon_{g2,i}) - 1} \quad (3.7)$$

إن انبعاثيتي الغطاءين ستكون واحدة بالطبع إذا كانا مصنوعين من نفس المادة، مع ذلك يمكن الحصول على بعض الفوائد الاقتصادية باستخدام غطاء بلاستيكي بين الغطاء الخارجي الزجاجي والصفيحة وفي مثل هذا التركيب المتراس قد لا تكون الخواص الإشعاعية للغطائين متماثلة.

إن المعادلة الخاصة بالمقاومة الحرارية بين السطح العلوي لغطاء المجمع الخارجي والهواء المحيط لها شكل مماثل للعلاقتين السابقتين، إلا أن معامل انتقال الحرارة عند السطح الخارجي يجب أن يحسب بطريقة مختلفة وإذا كان الهواء ساكناً يجب استخدام علاقات الحمل الطبيعي لكن عند هبوب الرياح على المجمع، تطبق علاقات الحمل القسري ويحدث تبادل الإشعاع بين الغطاء العلوي والسماء عند T_{sky} في حين يحدث انتقال الحرارة بالحمل بين T_{g1} والهواء المحيط عند T_{air} ولغرض التجانس، سنشير إلى الموصليتين بدرجة حرارة الهواء وينتج عن ذلك :

$$q''_{top,loss} = (\bar{h}_{c,\infty} + h_{r,\infty}) A_c (T_{g1} - T_{air}) = \frac{T_{g1} - T_{air}}{R_5} \quad \dots (3.8)$$

إذ ان :

$$h_{r,\infty} = \varepsilon_{g1,i} \sigma (T_{g1} + T_{sky}) (T_{g1}^2 + T_{sky}^2) \frac{T_{g1} - T_{sky}}{T_{g1} - T_{air}} \quad \dots (3.9)$$

ولمجمع الصفیحة المستویة الثنائي الغطاء الزجاجي يمكن التعبير عن مواصلة فقدان الحرارة الكلية بالشكل:

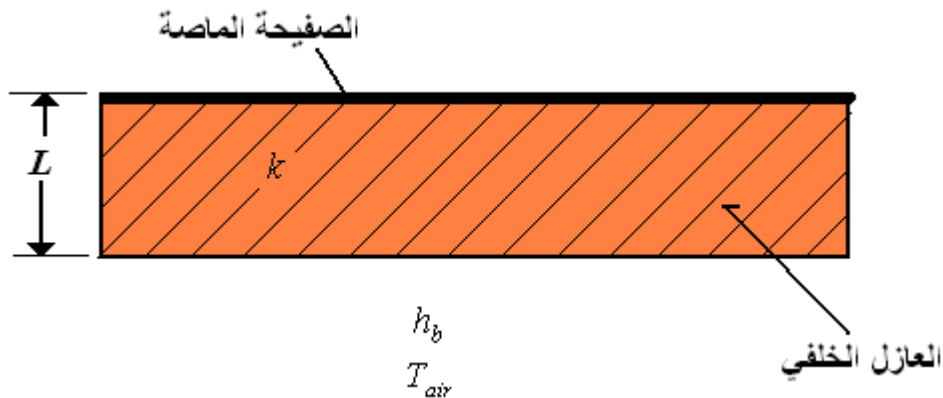
$$U_{c,total} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3 + R_4 + R_5} \quad \dots (3.10)$$

إذ أن R_1 هي المقاومة الحرارية للسطح السفلي. حيث تستخدم طبقة من المواد العازلة ذات معامل توصيل حراري صغير خلف الصفیحة الماصة كما هو مبين في الشكل (5.3) ويمكن كتابة المقاومة الحرارية للعازل بالشكل الآتي:

$$R_1 = \frac{L}{k} \quad \dots (3.11)$$

حيث ان L و k هما سمك العازل و الموصلية الحرارية للعازل الخلفي على التوالي. وعند اخذ تأثير الحمل الحراري الى الهواء الخلفي بنظر الاعتبار فيمكن كتابة معامل انتقال الحرارة الخلفي الكلي كما يأتي:

$$\frac{1}{U} = \frac{L}{k} + \frac{1}{h_b} \quad \dots (3.12)$$



الشكل (5.3) انتقال الحرارة خلال العازل الخلفي

ويحتاج حساب موصلية المجمع المعرفة بالمعادلة (3.10) السابقة حلاً بطريقة التكرار؛ لأن وحدتي الموصلة للإشعاع هما دالتان لدرجتي حرارة الغطاء والصفحة غير المعلومتين سابقاً وقد تم اقتراح الطريقة التجريبية لحساب U_c للمجمعات التي تكون أغطيتها من نفس المادة، والتي تكون عادة دقيقة بشكل كاف وأكثر ملائمة للاستخدام وعلى هذا الأساس فإن فقدان الحرارة من أعلى المجمع يكتب بالشكل التالي⁽²²⁾:

$$q_{toploss} = \frac{(T_c - T_a) A_c}{N} \div \left[\frac{(C / T_p)(T_c - T_a) / (N + f)^{0.33} + \frac{1}{h_{c,\infty}}}{\sigma(T_c^4 - T_a^4) A_c} + \frac{1}{\varepsilon_{p,i} + 0.05N(1 + \varepsilon_{p,i})} + \frac{2N + f - 1}{\varepsilon_{g,i}} - N \right] \quad (3.13)$$

حيث أن:

$$f = (1 - 0.04h_{c,\infty} + 0.0005h_{c,\infty}^2)(1 + 0.091N)$$

$$C = 365.9(1 - 0.00883\beta + 0.00013\beta^2)$$

$$h_{c,\infty} = 5.7 + 3.8V_\infty \quad (V_\infty \text{ in m/s})$$

$$\varepsilon_{g,i} = \text{ابتعائية طبقات الغطاء الزجاجي}$$

$$N = \text{عدد طبقات الغطاء}$$

إن قيم $q_{toploss}$ المحسوبة في المعادلة أعلاه تتفق كثيراً مع القيم التي تم الحصول عليها من المعادلة (3.10).

لغرض حساب كفاءة المجمع الشمسي، يجب حساب معدل انتقال الحرارة إلى مائع التشغيل. وإذا أهملنا تأثيرات الانتقال فإن معدل انتقال الحرارة إلى المائع من خلال المجمع يعتمد فقط على درجة حرارة سطح المجمع الذي تنتقل الحرارة منه بالحمل إلى المائع، ودرجة حرارة المائع، ومعامل انتقال الحرارة بين أنبوب المجمع والمائع. لحساب معدل انتقال الحرارة خذ أولاً الشرط عند المقطع العرضي للمجمع الموضح في الشكل (2.3). ويتم توصيل طاقة الإشعاع الشمسي الساقطة على السطح العلوي لصفحة المجمع في الاتجاه المستعرض نحو قنوات الجريان وتكون درجة الحرارة أقصى ما يمكن عند أية نقطة وسطية بين القنوات

المتجاورة وتعمل صفيحة المجمع كز عنفة متصلة بجدران قناة الجريان ويمكن التعبير عن الأداء الحراري للز عنفة الصفيحية بدلالة كفاءتها η_f ، التي تعرف على أنها نسبة معدل انسياب الحرارة خلال ز عنفة حقيقية الى معدل انسياب الحرارة خلال ز عنفة ذات موصلية حرارية لا متناهية.

إذا كانت U_c هي وحدة الموصلة الإجمالية من سطح صفيحة المجمع إلى الهواء المحيط، فإن معدل فقدان الحرارة من جزء معين من صفيحة المجمع عند x و y في الشكل (3.4) يكون:

$$q(x, y) = U_c [T_c(x, y) - T_a] dxdy \quad (3.14)$$

حيث ان : T_c = درجة حرارة صفيحة المجمع الموضعية.

T_a = درجة حرارة الهواء المحيط.

U_c = وحدة الموصلة الإجمالية بين الصفيحة والهواء المحيط.

وإذا تم إهمال التوصيل باتجاه الإحداثي x ، فإن التوازن الحراري عند مسافة x_0 من المقطع العرضي لصفيحة المجمع المستوية لوحدة الطول في الاتجاه x كما في الشكل (6.3c) يمكن أن تكتب بالشكل:

$$\alpha_s I_s dy - U_c (T_c - T_a) dy + \left[\left(-kt \frac{dT_c}{dy} \right) \Big|_{y, x_0} - \left(-kt \frac{dT_c}{dy} \right) \Big|_{y+dy, x_0} \right] = 0$$

وإذا كان سمك الصفيحة t منتظماً وكانت الموصلية الحرارية للصفيحة لا تعتمد على درجة الحرارة يمكن صياغة المعادلة أعلاه بشكل معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية:

$$\frac{d^2 T_c}{dy^2} = \frac{U_c}{kt} \left[T_c - \left(T_a + \frac{\alpha_s I_s}{U_c} \right) \right] \quad \dots (3.15)$$

إن الشروط الحدية للنظام (الشكل 6.3b) الذي تم وصفه أعلاه هي:-

1. عند المركز بين أي مجريين يكون انسياب الحرارة صفراً أو عند $y=0$: $dT_c/dy = 0$
2. عند المجرى تكون درجة حرارة الصفيحة هي $T_b(x_0)$ ، أو عند $y = w = [(l' - D)/2]$ حيث أن $T_b(x_0)$ هي درجة الحرارة عند قاعدة الز عنفة.

إذا وضعنا $m^2 = U_c / kt$ و $\phi = T_c - (T_a + \alpha_s I_s / U_c)$ فإن المعادلة ستصبح:

$$\frac{d^2\phi}{dy^2} = m\phi \quad \dots (3.16)$$

وتتعرض للشروط الحدية

$$\text{عند: } y=0 \text{ فإن } \frac{d\phi}{dy} = 0$$

وكذلك عند

$$y = \frac{l' - D}{2}$$

فان

$$\phi = Tb(x_o) - \left(Ta + \frac{a_s I_s}{U_c} \right)$$

والحل العام للمعادلة (3.16) أعلاه هو:

$$\phi = C_1 \sinh my + C_2 \cosh my$$

يمكن إيجاد الثابتين C_1 و C_2 بتعويض الشروط الحدية وحل المعادلتين الناتجتين لإيجاد C_1 و C_2 وينتج:

$$\frac{T_c - (T_a + a_s I_s / U_c)}{T_b(x_o) - (T_a + a_s I_s / U_c)} = \frac{\cosh my}{\cosh mw} \quad \dots (3.17)$$

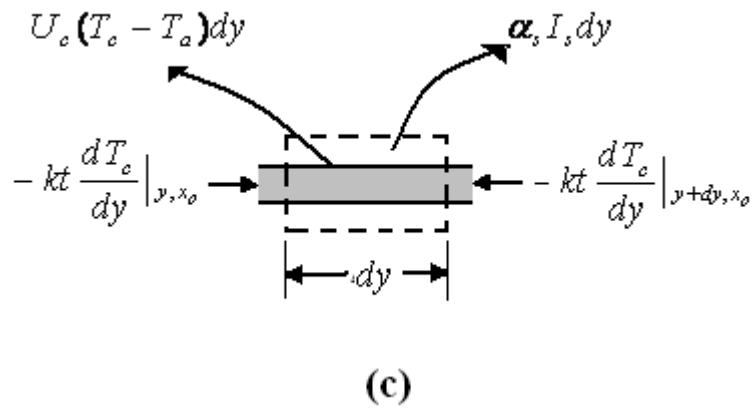
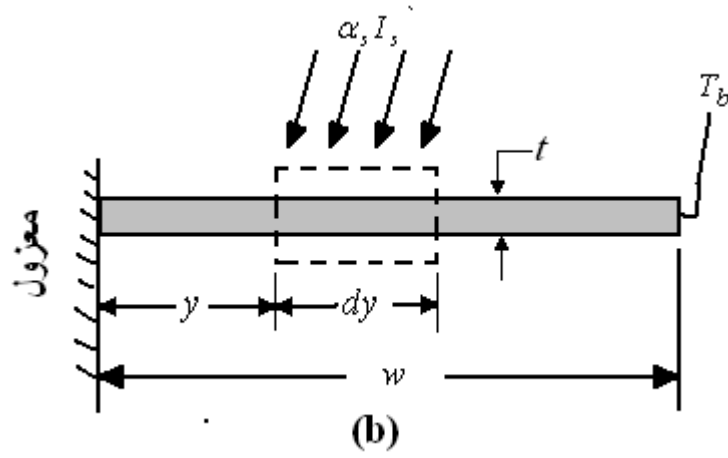
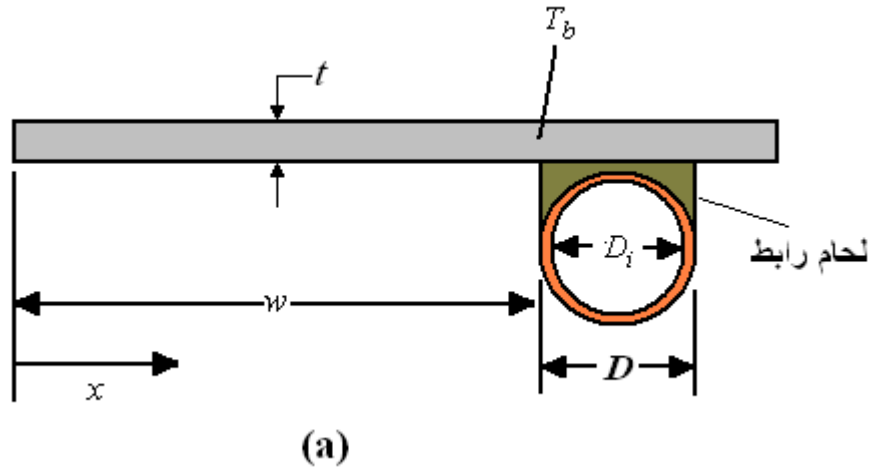
ومن المعادلة السابقة يمكن إيجاد معدل انتقال الحرارة إلى القناة من جزء الصفيحة الواقع بين قناتين بحساب تدرج درجة الحرارة عند قاعدة الزعنفة بوحدة العرض، أو:

$$q_{fin} = -kt \frac{dT_c}{dy} \Big|_{y=w} = \frac{1}{m} [\alpha_s I_s - U_c (T_b(x_o) - T_a) \tanh mw]$$

و طالما ان القناة متصلة بالزعانف من طرفيها ، فإن المعدل الكلي لانتقال الحرارة يكون

$$q_{total}(x_o) = 2w [\alpha_s I_s - U_c (T_b(x_o) - T_a)] \frac{\tanh(mw)}{mw} \quad \dots (3.18)$$

وإذا كانت الزعنفة كلياً عند درجة الحرارة $T_b(x)$ ، أي الموضع الذي يقابل فيزيائياً لصفيحة ذات موصلية حرارية كبيرة بشكل لا متناهي، فإن معدل انتقال الحرارة سيكون أقصى ما يمكن $q_{totalmax}$ وكما ذكرنا سابقاً، فإن نسبة المعدل لانتقال الحرارة بزعنفة حقيقية إلى المعدل الذي نحصل عليه هو كفاءة الزعنفة η_f . باستخدام هذا التعريف، يمكن كتابة المعادلة السابقة بالشكل:



الشكل (6.3) موازنة الطاقة لعنصر الزعنفة المستخدم في التحليل الرياضي للمجمع الشمسي

$$q_{total}(x_o) = 2w\eta_f [\alpha_s I_s - U_c (T_b(x_o) - T_a)]$$

حيث أن:

$$\eta_f \equiv \frac{\tanh mw}{mw}$$

بالإضافة إلى الحرارة المنتقلة من خلال الزعنفه، فإن الطاقة الساقطة على جزء الصفيحة الواقع فوق ممر الجريان تعطي أيضا طاقة نافعة. وإن معدل الطاقة النافعة من هذه المنطقة يكون جاهزاً بتسخين مائع التشغيل وهو:

$$q_{duct}(x) = D[\alpha_s I_s - U_c (T_b(x_o) - T_a)]$$

وعليه فإن الطاقة النافعة لوحدة الطول باتجاه الجريان تصبح:

$$q_u(x) = (D + 2w\eta_f)[\alpha_s I_s - U_c (T_b(x_o) - T_a)] \quad \dots (3.19)$$

ان الطاقة $q_u(x)$ يجب أن تنتقل كحرارة إلى مائع التشغيل. فإذا كانت المقاومة الحرارية لمعدن جدار المجرى ذات قيمة صغيرة بحيث يمكن إهمالها ونأخذ بنظر الاعتبار المقاومة الحرارية نتيحة اللحام ومقاومة التماس بين المجرى والصفيحة فإن معدل انتقال الحرارة إلى المائع يكون:

$$q_u(x) = \frac{(T_b(x_o) - T_f(x_o))}{\frac{1}{(\pi D_i) \bar{h}_{c,i}} + \frac{1}{C_p}} \quad \dots (3.20)$$

$$C_p = \frac{k_b \cdot b}{\gamma_b} \quad \text{حيث ان :}$$

k_b : معامل التوصيل الحراري لمادة اللحام الرابط.

b : عرض اللحام.

γ_b : سمك اللحام.

لكي نحصل على علاقة تخص الطاقة النافعة التي يستلمها المجمع بدلالة عوامل فيزيائية معلومة، يجب حذف درجة حرارة المائع ودرجة حرارة المجمع من المعادلتين الأخيرتين (3.19) و (3.20) ونحل لإيجاد $T_b(x_o)$ في المعادلة (3.20) أعلاه وبتعويض هذه العلاقة في المعادلة (3.19) ينتج :

$$q_u(x) = (D + 2w)F'[\alpha_s I_s - U_c(T_f(x_o) - T_a)] \quad \dots(3.21)$$

اذ أن F' يسمى عامل كفاءة المجمع (Collector efficiency factor) ويعطى بـ:

$$F' = \frac{1/U_c}{(D + 2w) \left[\frac{1}{U_c(D + 2w\eta_f)} + \frac{1}{C_p} + \frac{1}{h_{c,i}(\pi D_i)} \right]} \quad \dots(3.22)$$

إن المقام في المعادلة (3.22) من الناحية الفيزيائية، هو المقاومة الحرارية بين المائع والمحيط ، في حين يمثل البسط المقاومة الحرارية بين المجمع والهواء المحيط. ويعتمد عامل كفاءة صفيحة المجمع F' على U_c ، $h_{c,i}$ و η_f . ويعتمد فقط وبشكل جزئي على درجة الحرارة ويمكن أن نعامله للأغراض العلمية كعامل تصميم. والقيم النموذجية للعوامل التي تحدد قيم F' معطاة في الجدول (1.3). يزداد عامل كفاءة المجمع بزيادة سمك الصفيحة وموصلية الصفيحة الحرارية لكنه يقل بزيادة المسافة بين قنوات الجريان. وكذلك فإن زيادة معامل انتقال الحرارة بين جدران قناة الجريان ومائع التشغيل تعمل على زيادة F' ، غير أن الزيادة في الموصلة الإجمالية U_c تسبب نقصان F' .

3.2.3 عامل طرح الحرارة للمجمع Collector Heat Removal Factor:

تعطي المعادلة (3.19) معدل انتقال الحرارة إلى المائع عند نقطة معينة x على طول الصفيحة للمجمع المحدد ودرجات حرارة المائع. مع ذلك. ففي المجمع الحقيقي تزداد درجة الحرارة باتجاه الجريان وكلما انتقلت الحرارة إليه⁽¹⁷⁾.

4 W/m ² .K	غطاءان من الزجاج	U_c
8 W/m ² .K	غطاء زجاجي واحد	
0.4 W/m.K	صفيحة نحاسية بسمك 1mm	k_t
0.005 W/m.K	صفيحة فولاذية بسمك 1 mm	
300 W/m ² .K	ماء في جريان طباقى للحمل القسري	$h_{c,i}$
1500 W/m ² .K	ماء في جريان مضطرب للحمل القسري	
100 W/m ² .K	هواء في حمل قسري مضطرب	

الجدول (1.3) القيم النموذجية للعوامل التي تحدد عامل كفاءة المجمع F' للمجمع ذي الصفيحة المستوية في المعادلتين (3.19) و (3.20).

ويمكن كتابة توازن الطاقة لمقطع من المجرى dx بالشكل:

$$-\dot{m}c_p(T_f|_{x+dx}-T_f|_x)=q_u(x)dx \quad \dots(3.23)$$

وبتعويض المعادلة (3.21) بالنسبة لـ $q_u(x)$ ووضع:

$$\left[T_f(x) + \frac{dT_f(x)}{dx}dx \right] = T_f|_{x+dx}$$

في المعادلة (3.23) تنتج المعادلة التفاضلية

$$-\dot{m}c_p \frac{dT_f(x)}{dx}dx = (D+2w)F'[\alpha_s I_s - U_c(T_f(x) - T_a)]$$

بفصل المتغيرات ينتج، وبعد إجراء بعض الترتيبات :

$$\frac{dT_f(x)}{T_f(x) - T_a - (\alpha_s I_s / U_c)} = \frac{(D+2w)F'U_c}{\dot{m}c_p} dx$$

يمكن أن نكامل المعادلة أعلاه ونحل لإيجاد درجة حرارة الخروج للمائع، $T_{f,out}$ ، لمجرى بطول L ومائع بدرجة حرارة دخول، $T_{f,in}$ ، إذا افترضنا أن F' و U_c ثابتان، أو

$$\frac{T_{f,out} - T_a - (\alpha_s I_s / U_c)}{T_{f,in} - T_a - (\alpha_s I_s / U_c)} = \exp\left(-\frac{(D+2w)F'U_c L}{\dot{m}c_p}\right) \quad \dots(3.24)$$

لكي نقارن الأداء لمجمع حقيقي مع الأداء الديناميكي الحراري الأمثل، يكون من المناسب ان نعرف عامل طرح الحرارة F_R على أنه نسبة المعدل الحقيقي لانتقال الحرارة إلى المائع، إلى معدل انتقال الحرارة عند أقصى فرق بدرجة الحرارة بين صفيحة الامتصاص والمحيط. والحد الخاص بديناميك الحرارة يقابل حالة مائع التشغيل الذي يبقى عند درجة حرارة الدخول خلال المجمع. ويمكن الوصول إلى ذلك عندما تكون سرعة المائع عالية جداً ويمكن التعبير عن F_R من تعريفه على أنه:

$$F_R = \frac{G_c c_p (T_{f,out} - T_{f,in})}{\alpha_s I_s - U_c (T_{f,in} - T_a)} \quad \dots (3.25)$$

إذ أن G_c هو معدل الجريان لوحدة المساحة السطحية للمجمع، $\dot{m} / A_c$ ، وبإعادة تجميع الطرف الأيمن للمعادلة (3.25) وجمعه مع المعادلة (3.24)، يمكن إن نحقق ببساطة أن:

$$F_R = \frac{G_c c_p}{U_c} \left[1 - \exp\left(-\frac{U_c F'}{G_c c_p}\right) \right] \quad \dots (3.26)$$

يبين فحص المعادلة أعلاه أن F_R يتزايد بزيادة معدل الجريان ويقترب من الحد العلوي F' ، عامل كفاءة المجمع. بما أن البسط للطرف الأيمن للمعادلة (3.23) هو q_u فإن معدل انتقال الحرارة المفيد يمكن التعبير عنه الآن بدلالة درجة حرارة دخول المائع:

$$q_u = A_c F_R [I_c \tau_s \alpha_s - U_c (T_{f.in} - T_a)] \quad \dots (3.27)$$

وهذا الشكل مناسب للتصميم، لأن درجة حرارة دخول المائع إلى المجمع تكون عادة معلومة أو يمكن تحديدها.

4.2.3 درجة الحرارة المتوسطة للصفحة الماصة:

على الرغم من أن كمية الحرارة الممتصة من قبل المجمع الشمسي المستوي تحسب من المعادلة (3.27) إلا أن معامل وحدة المواصلة الإجمالية بين الصفحة والهواء المحيط (U_c) يحسب باستخدام درجة حرارة الصفحة الماصة والتي تعتمد على درجة الحرارة المتوسطة للمائع، وتحسب درجة الحرارة المتوسطة للمائع من إجراء التكامل للمعادلة (3.24) كالآتي:

$$T_{fm} = \frac{1}{L} \int T_f(x) dx \quad \dots (3.28)$$

وبإجراء التكامل للمعادلة أعلاه نحصل على:

$$T_{fm} = T_{fi} + \frac{q_u / A_c}{F_R U_c} \left(1 - \frac{F_R}{F'}\right) \quad \dots (3.29)$$

أن كمية الحرارة الممتصة من قبل المجمع الشمسي يمكن أن تحسب من إجراء موازنة للطاقة على هذا المجمع كالآتي:

الطاقة الممتصة = الإشعاع الشمسي - الخسائر الحرارية

$$q_u = A_c [\alpha_s I_s - U_c (T_{pm} - T_a)] \quad \dots (3.30)$$

وبإجراء مساواة للمعادلتين (3.27) و (3.30) نحصل على:

$$T_{pm} = T_{fi} + \frac{q_u / A_c}{F_R U_c} (1 - F_R) \quad \dots (3.31)$$

5.2.3 كفاءة المجمع الآتية Collector efficiency:

تعرف كفاءة المجمع إنها النسبة بين الحرارة النافعة التي تصل إلى المائع لكل وحدة مساحة من المجمع إلى الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على المجمع كما في المعادلة:

$$\eta_c = \frac{q_u}{A_c I_c} \quad \dots(3.32)$$

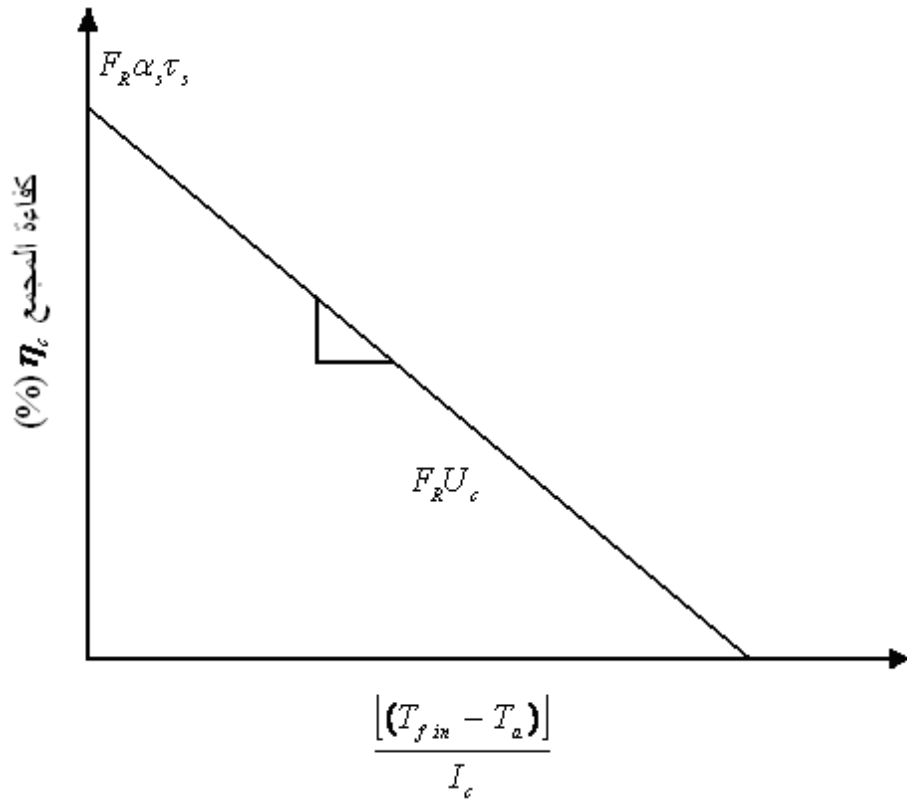
وباستخدام المعادلة (3.27) نحصل على:

$$\eta_c = \frac{F_R [\alpha_s \tau_s I_c - U_c (T_{f.in} - T_a)]}{I_c}$$

والتي يمكن كتابتها بالصورة الآتية:

$$\eta_c = F_R \alpha_s \tau_s - \frac{[F_R U_c (T_{f.in} - T_a)]}{I_c} \quad \dots(3.33)$$

وتسمى المعادلة (3.33) بمعادلة (Hottel-Whillier-Bliss) وهي من أهم معادلات المجمعات المستوية وهذه المعادلة خطية كما يلاحظ من الشكل (7.3) .



الشكل (7.3) كفاءة المجمعات الشمسية المستوية المثالية

وتكون أعلى قيمة للكفاءة هي $F_R \alpha_s \tau_s$ وتحدث عندما تكون قيمة $\frac{[(T_{f.in} - T_a)]}{I_c}$ مساوية

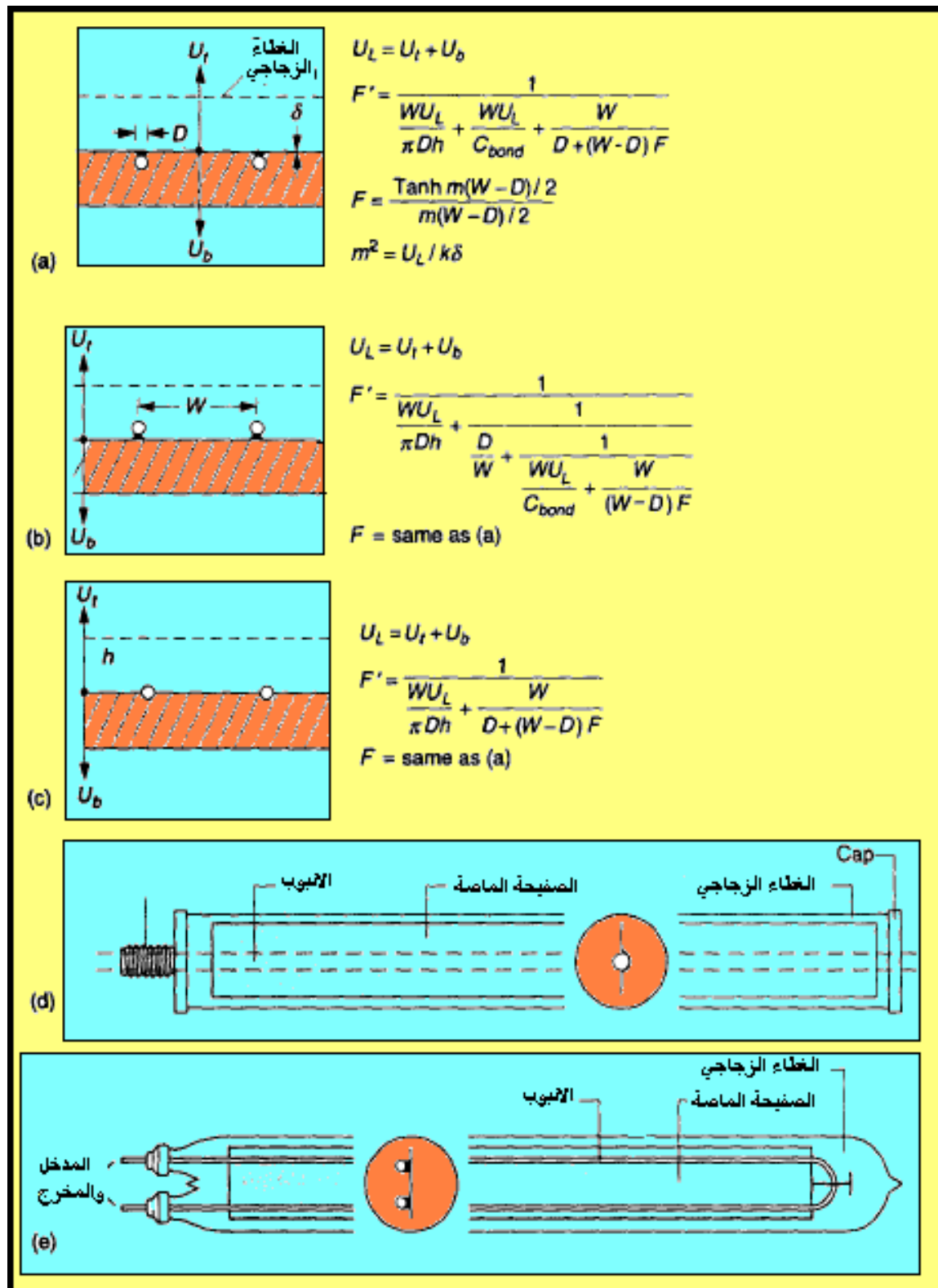
للصفر ، وتتناقص الكفاءة بمعدل $F_R U_c$. وعلى ذلك تعتبر المعاملات $F_R U_c$ و $F_R \alpha_s \tau_s$ هي المعاملات المحددة لاداء المجمعات الشمسية المستوية.

6.2.3 انواع المجمعات الشمسية المستوية:

تقسم المجمعات الشمسية المستوية حسب نوع المائع المستخدم الى نوعين، فهناك مجمعات تستخدم الماء كوسيط تشغيل واخرى تستخدم الهواء والماء هو الأفضل من الناحية الاقتصادية لسهولة كشف تسربه والطاقة الميكانيكية القليلة اللازمة لتدوير الماء داخل المنظومة ولكن هناك بعض العيوب مثل امكانية تجمد الماء في الجو البارد والتسرب والصدأ، وفي بعض التطبيقات مثل التدفئة تستلزم احيانا استخدام الهواء كوسيط على الرغم من الطاقة الميكانيكية العالية اللازمة لتدوير الضواغط ولا تظهر مشاكل الصدأ والتجمد عند استخدام الهواء كوسيط تشغيل.

1. المجمعات الشمسية السائلية:

تتميز هذه المجمعات باحتوائها على انابيب لنقل مائع التشغيل و توجد هناك العديد من تصاميم المجمعات الخاصة بتسخين الماء و السوائل الاخرى كما في الشكل (8.3) ويجب التذكير انه من الضروري لحم الانابيب الناقلة لمائع التشغيل باللوح الماص بصورة جيدة والتحليل الرياضي المستخدم في الفقرات السابقة يخص نوعية المجمعات التي تكون فيها الأنابيب أسفل الصفيحة الماصة كما في الشكل (8.3-a) ولكل نوع تحليل رياضي خاص ويمكن استخدام نفس المعادلات المستخدمة في التحليل السابق مع استبدال المعادلة التي يتم فيها حساب عامل كفاءة المجمع F' وكفاءة الزعفة بالمعادلات الملحقه بكل تصميم واستخدام نفس المتغيرات المذكورة في كل شكل لذا يجب التنويه الى ذلك. فالشكل (8.3-b) يخص المجمع الشمسي الذي انابيبه تكون فوق الصفيحة الماصة والشكل (8.3-c) يخص المجمع الذي انابيبه مدمجة مع الصفيحة، اما الاشكال (8.3-d) و (8.3-e) فهي لمجمعات خاصة وهي عبارة عن انبوب او اكثر مزود بزعفة من طرفيه تعمل عمل الصفيحة الماصة ويحاط كلا من الانبوب والزعفة بغطاء زجاجي مجوف.



الشكل (8.3) التصاميم المختلفة للمجمعات المستوية التي تستخدم الماء كمائع تشغيل

2. المجمعات الشمسية الهوائية:

تتميز هذه المجمعات بعدم احتوائها على انابيب ولكون الهواء ذو قابلية تبادل حراري قليلة فانه يجب ان تكون مساحة تماسه مع الصفيحة الماصة اكبر للحصول على كمية حرارة مناسبة وتستخدم تصميمات خاصة للمجمعات الهوائية فتستخدم الزعانف او تستخدم سرع جريان عالي للوصول الى اداء حراري قريب من المجمعات الشمسية السائلية وتوجد هناك العديد من التصاميم كما هو واضح من الشكل (9.3).

للحصول على تحليل رياضي لاداء المجمعات الشمسية الهوائية سوف نأخذ المجمع الشمسي الهوائي في الشكل (9.3-a) وهو عبارة عن صفيحة ماصة مغطاة بغطاء زجاجي من الجهة الامامية ومعزولة بعازل حراري من الجهة الخلفية ويجري الهواء في الحيز المحصور بين الصفيحة الماصة والغطاء الزجاجي والشكل (10.3) يوضح التحليل الشبكي الحراري للفقء الحراري خلال المجمع. تقوم الصفيحة الماصة بامتصاص الطاقة الشمسية الساقطة عليها لترتفع درجة حرارتها الى T_p ، وتفقد هذه الصفيحة الحرارة على شكل خسائر حرارية من الجانب الخلفي للمجمع بمواصلة حرارية مقدارها U_b والى الجانب الامامي بمواصلة حرارية مقدارها U_t وتنتقل الطاقة المتبقية الى الهواء الجاري الذي درجة حرارته T_f بمعامل انتقال حراري قدره h_2 .

وباجراء موازنة للطاقة على الغطاء الزجاجي والصفيحة الماصة والهواء الجاري تنتج المعادلات الاتية:

$$U_t(T_a - T_c) + h_r(T_p - T_c) + h_1(T_f - T_c) = 0 \quad \dots (3.34)$$

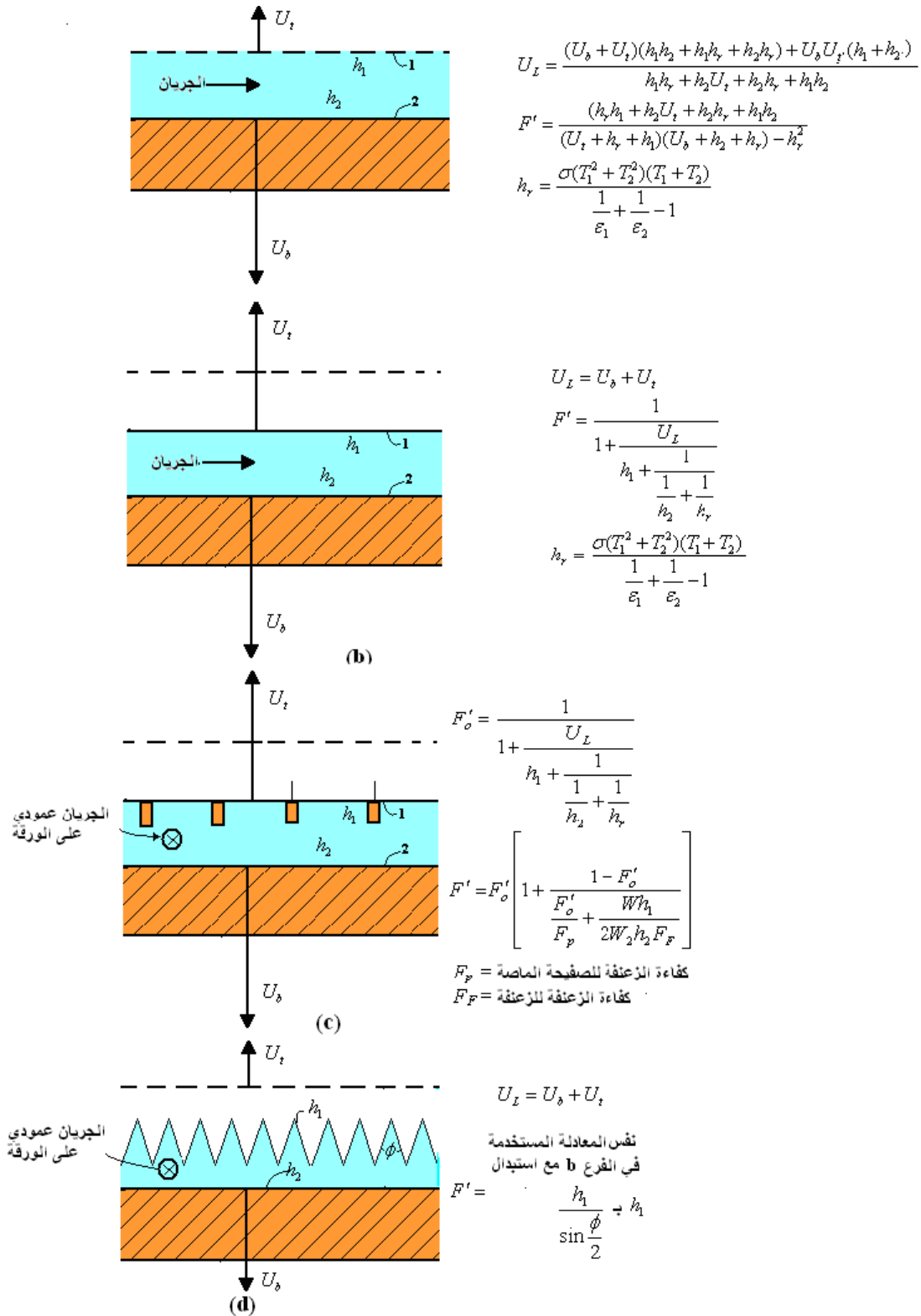
$$I_c + U_b(T_a - T_p) + h_r(T_c - T_p) + h_2(T_f - T_p) = 0 \quad \dots (3.35)$$

$$h_1(T_c - T_f) + h_2(T_p - T_f) = q_u \quad \dots (3.36)$$

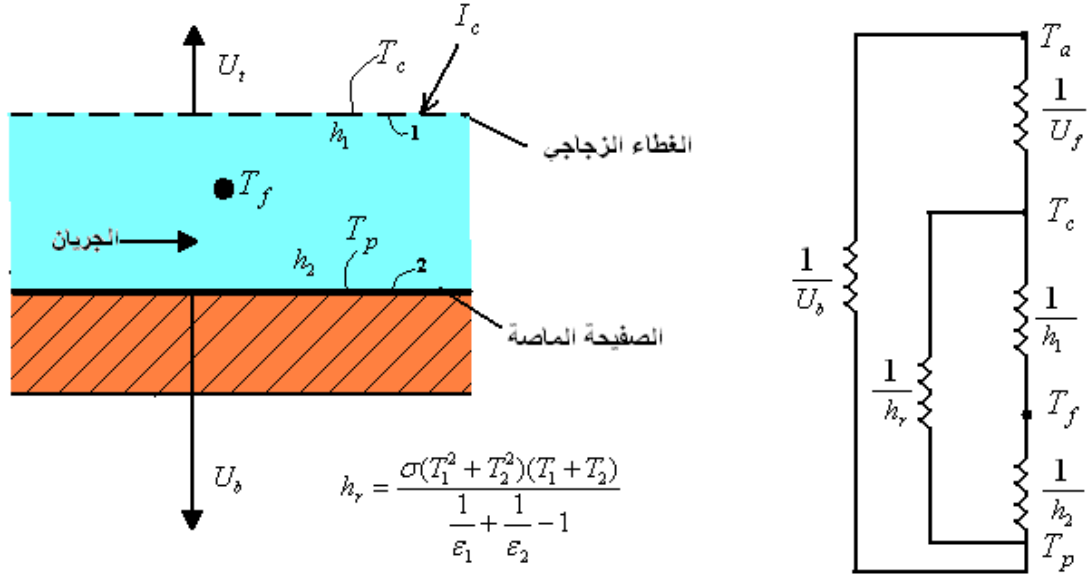
نحل هذه المعادلات الثلاث لنحصل على المعادلتين الاتيتين:

$$T_p - T_f = \frac{I_c(U_t + h_r + h_1) - (T_f - T_a)(U_t h_r + U_t U_b + U_b h_r + U_b h_1)}{(U_t + h_r + h_1)(U_b + h_2 + h_r) - h_r^2} \quad (3.37)$$

$$T_c - T_f = \frac{I_c h_r - (T_f - T_a)(U_t h_2 + U_t U_b + U_t h_r + U_b h_{1r})}{(U_t + h_r + h_1)(U_b + h_2 + h_r) - h_r^2} \quad \dots (3.38)$$



الشكل (9.3) التصاميم المختلفة للمجمعات المستوية التي تستخدم الهواء كمائع تشغيل



الشكل (10.3) التحليل الشبكي الحراري للفقد الحراري خلال المجمع الهوائي نوع a.

و بتعويض المعادلتين (3.37) و (3.38) في المعادلة (3.36) نحصل على المعادلة الآتية:

$$q_u = F'[I_c - U_L(T_f - T_a)] \quad \dots(3.39)$$

حيث ان:

$$F' = \frac{h_r h_1 + h_2 U_t + h_2 h_r + h_1 h_2}{(U_t + h_r + h_1)(U_b + h_2 + h_r) - h_r^2}$$

و

$$U_L = \frac{(U_b + U_t)(h_1 h_2 + h_1 h_r + h_2 h_r) + U_b U_t (h_1 + h_2)}{h_1 h_r + h_2 U_t + h_2 h_r + h_1 h_2}$$

3.3 المجمعات الشمسية المركزة Solar Concentrating Collectors

تستعمل المجمعات الشمسية المركزة في التطبيقات التي تتطلب درجات حرارة أعلى من درجة الغليان ألا انه يمكن استعمالها في التطبيقات ذات درجات الحرارة الواطئة أيضا ولأجل الحصول على درجات الحرارة العالية يجب تركيز الأشعة الشمسية على مساحة صغيرة. وبالتالي فإنها ترفع درجة حرارة مائع التشغيل إلى درجات حرارة عالية حيث أثبتت التجارب انه بالإمكان رفع درجة السوائل بواسطتها إلى 500°C أو أكثر وعلى مثل هذه الدرجات فإنه بالإمكان إنتاج البخار على ضغوط مرتفعة نسبيا واستخدامه في العمليات الصناعية المختلفة، او في تشغيل التوربينات البخارية لتوليد الطاقة الكهربائية.

أن الأجزاء الرئيسية في المجمعات الشمسية المركزة هي:

1. السطح العاكس (Reflector) للإشعاع الشمسي، وهو الذي يقوم بعكس أشعة الشمس المباشرة الساقطة عليه وتركيزها في نقطة بؤرية أو على طول خط بؤري. وتركز الأشعة باستخدام المرايا أو العدسات وللعديد من العيوب، حيث يكون تصنيعها مكلفا وخاصة العدسات الكبيرة الحجم وهي ثقيلة وصعبة النصب وتمتص بعض الطاقة خلال مرور الأشعة خلالها، أما المرايا فهي أقل كلفة وأخف وزنا وتمتص من الطاقة أقل من العدسات لأنها تركز الأشعة بالانعكاس.

2. السطح الماص (Absorber) للإشعاع المنعكس، وهو الذي يقوم بامتصاص الإشعاع الشمسي المنعكس من العاكس وامتصاص التأثير الحراري ومن ثم نقله إلى السائل المراد تسخينه.

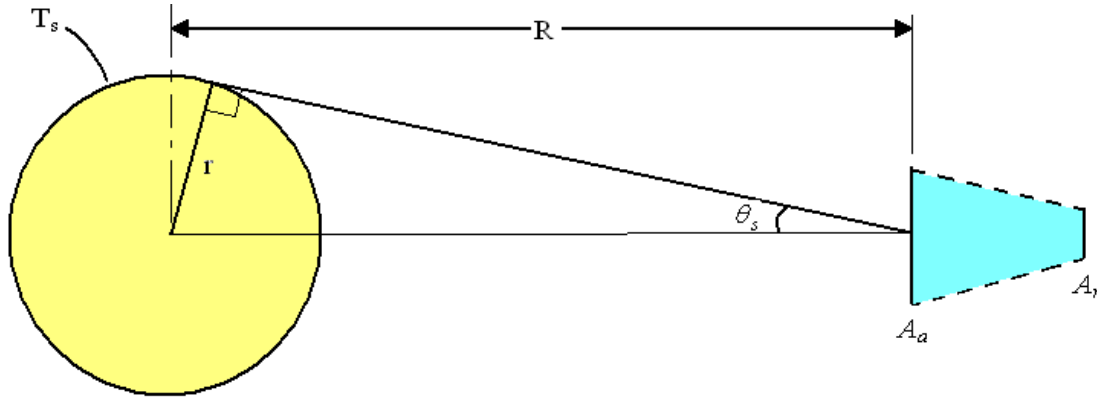
3. جهاز التعقب الذي يتعقب حركة الشمس لزيادة كمية الإشعاع المباشر الساقط على السطح العاكس.

وتتطلب صناعة المجمعات المركزة استعمال المواد الملائمة لعكس الأشعة الشمسية وامتصاصها على السطح الماص. وتتخذ المجمعات الشمسية المركزة أشكالا مختلفة تشترك جميعها في الخصائص الرئيسية ولكنها تختلف من ناحية الشكل الهندسي وينجم عن هذا الاختلاف أن درجة الحرارة القصوى التي يمكن الحصول عليها تختلف من مجمع إلى آخر.

1.3.3 نسبة التركيز (Concentration ratio):

من المؤشرات المهمة في المجمعات الشمسية المركزة ما يعرف بنسبة التركيز Cr وهي النسبة بين مساحة مقطع السطح العاكس الذي تسقط عليه أشعة الشمس إلى مساحة مقطع الأنبوب أو الجسم الذي يسقط عليه الإشعاع المنعكس، وكلما ارتفعت هذه النسبة أصبح بالإمكان رفع درجة حرارة المائع إلى درجات أعلى. وحيث أن للسطوح العاكسة من عدسات ومرايا بعض العيوب تتسبب في فقدان بعض الطاقة وتكون كفاءتها الضوئية أقل من 100%، فيقل بذلك كفاءة التركيز فيجب إضافة تعريف ثاني وهو نسبة التركيز المفيد Cu وهو حاصل ضرب نسبة التركيز والكفاءة الضوئية الكلية حيث أن الكفاءة الضوئية الكلية η_o هي حاصل ضرب الانتقالية والانعكاسية والامتصاصية على جميع السطوح بين فتحة الدخول والسطح الماص.

يمكن حساب القيمة العظمى لنسبة التركيز من تطبيق القانون الثاني للثرموداينمك على مجمع مركز كروي ذو فتحة دخول مساحتها A_a وسطح ماص مساحته A_r ، والموضوع على بعد R من المصدر (الشمس) والتي نصف قطرها r وكما موضح في الشكل (11.3).



الشكل (11.3) شكل تخطيطي يوضح المجمع الكروي على بعد R من الشمس التي درجة حرارتها T_s

نفرض ان الشمس تشع الطاقة في جميع الاتجاهات بمعدل Q_s :

$$Q_s = A_s \sigma T_s^4$$

حيث A_s هي مساحة سطح المصدر (الشمس) و T_s هي درجة حرارته. ولا تصل كل الطاقة الصادرة من الشمس الى المجمع وانما يصل منها جزء بسيط يعطى بالنسبة بين مساحة فتحة الدخول A_a ومساحة الكرة ذات نصف قطر R :

$$Q_{s \rightarrow a} = \frac{A_a}{A_R} A_s \sigma T_s^4$$

او

$$Q_{s \rightarrow a} = \left(\frac{r^2}{R^2}\right) A_a \sigma T_s^4$$

وعلى فرض ان الفقد الحراري مهمل فان كل الطاقة التي تدخل من فتحة الدخول تصل الى السطح الماص.

$$Q_{s \rightarrow r} = \left(\frac{r^2}{R^2}\right) A_a \sigma T_s^4$$

ويشع السطح الماص الى المصدر طاقة كما لو كان جسم اسود ليصل منها الى المصدر الكمية:

$$Q_{r \rightarrow s} = A_r \sigma T_r^4 E_{r-s}$$

وعندما تكون درجة حرارة السطح الماص مساوية لاقصى قيمة لها وهي درجة حرارة المصدر وبتطبيق القانون الثاني للثرموداينمك يكون

$$Q_{s \rightarrow r} = Q_{r \rightarrow s}$$

اي انه يكون:

$$\frac{A_a}{A_r} = \frac{R^2}{r^2} E_{r-s}$$

وحيث ان القيمة العظمى للنسبة E_{r-s} تساوي واحد، يكون:

$$\left(\frac{A_a}{A_r} \right)_{\max} = \frac{R^2}{r^2}$$

ومن الشكل (11.3) يكون:

$$\frac{R^2}{r^2} = \frac{1}{\sin^2 \theta_s}$$

وبذلك يمكن كتابة القيمة العظمى لنسبة التركيز للمجمعات الكروية لتكون كالآتي:

$$C_{\max} = \frac{1}{\sin^2 \theta_s} \quad \dots (3.40)$$

وبنفس الطريقة يمكن الحصول على العلاقة الآتية للمجمعات الاسطوانية الخطية وذلك بفرض ان المصدر اسطوانيا:

$$C_{\max} = \frac{1}{\sin \theta_s} \quad \dots (3.41)$$

ويمكن حساب الزاوية θ_s بملاحظة الشكل (11.3) ومن العلاقة الآتية نحصل على:

$$\theta_s = \frac{2r}{R}$$

وحيث ان قطر الأرض $r = 6.96 * 10^8 .m$ والمسافة بين الأرض والشمس $R = 1.5 * 10^{11} .m$ ، تكون قيمة الزاوية θ_s :

$$\theta_s = \frac{2 * 6.96 * 10^8}{1.5 * 10^{11}} = 9.31 * 10^{-3} \text{ rad} = 0.53^\circ$$

وتكون اقصى درجة تركيز للمجمعات الكروية تبعا للمعادلة (3.40):

$$C_{\max} = \frac{1}{\sin^2 0.53} = 11687$$

وتكون اقصى درجة تركيز للمجمعات الاسطوانية تبعا للمعادلة (3.41):

$$C_{\max} = \frac{1}{\sin 0.53} = 108$$

2.3.3 أنواع المجمعات المركزة:

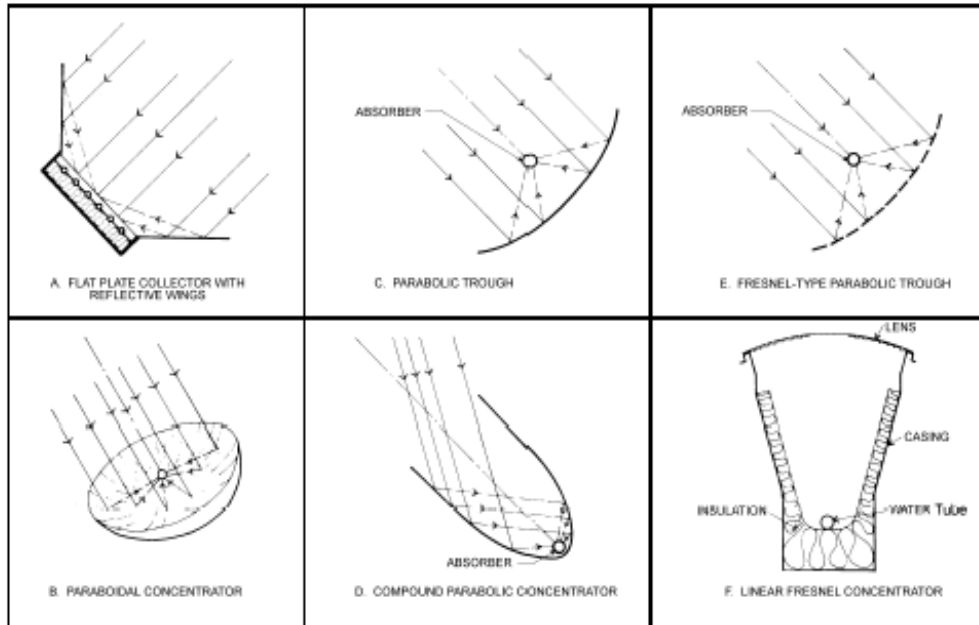
هناك العديد من أشكال المجمعات المركزة (الشكل (12.3)) و أكثرها شيوعا هي:

1. المجمع الأسطواني المركز:

يتكون المجمع الأسطواني المركز من سطح عاكس متحرك وأنبوب ثابت يمر على طول الخط البؤري كما في الشكل (13.3). يكون السطح العاكس مقعرا ويتخذ شكل جزء من اسطوانة ويقوم السطح العاكس بتركيز الأشعة الساقطة على الأنبوب الذي يمر به السائل، ويتحرك هذا السطح بحيث يتعقب حركة الشمس اليومية. تتراوح نسبة التركيز في هذه المجمعات ما بين 20-60 و لذلك يصلح للتطبيقات التي تتطلب درجة حرارة بين 150-300°C. وعلى الرغم من انخفاض نسبة التركيز في هذا النوع فإن لها فوائد عديدة مثل إمكانية وضع أنبوب على طول خطوط البؤرة إضافة إلى إنها اقل حساسية في الاقتفاء من الأنظمة الأخرى.

2. مجمع الطبق المركز:

يكون السطح العاكس لمجمع الطبق المركز مقعرا وهو أشبه ما يكون بالمرآة المقعرة ويتخذ قطاعه العرضي شكل الدائرة كما في الشكل (6.3-B-) ، يقوم السطح العاكس بتركيز أشعة الشمس على نقطة بؤرية يثبت فيها جسم كروي يقوم بامتصاص الشعاع المنعكس ويمر خلاله أنبوب يحمل سائلا، ونظرا لصغر مساحة مقطع الجسم الكروي بالمقارنة مع مساحة مقطع السطح العاكس الذي تسقط عليه أشعة الشمس فإن نسبة التركيز في هذا النوع من المجمعات تكون عالية جدا ويصبح بالإمكان رفع درجة حرارة السائل إلى درجات حرارية



الشكل (12.3) المجمعات الشمسية المركزة



الشكل (13.3) المجمع الأسطواني المركز

عالية تصل إلى 1000°C . ونظرا لارتفاع درجة الحرارة في هذا النوع من المجمعات فإنه يصلح لتوليد البخار للعمليات الصناعية ولتوليد الطاقة الكهربائية. ويحتوي مجمع الطبقة المركز على جهاز لتعقب حركة الشمس أثناء النهار.

3. المجمع الشمس المركز المركب:

يتكون السطح العاكس للمجمع الشمسي المركز المركب من قطاعين متماثلين يتخذ كل منهما شكل القطع المكافئ، ويعكس هذان السطحان الأشعة الساقطة عليهما على طول خط بؤري يمر فيه أنبوب يحمل السائل المراد تسخينه. في بعض تصاميم المجمعات المركزة المركبة يستبدل بالأنبوب المعدني الحامل للسائل أنبوب زجاجي مفرغ من الهواء يمر فيه أنبوب معدني يحمل السائل المراد تسخينه، والهدف من استعمال الأنابيب الزجاجية المفرغة هو تقليل انتقال الحرارة بالحمل والتوصيل إلى أقل درجة ممكنة ذلك لأن انتقال الحرارة بالحمل والتوصيل يحتاج إلى وسط مادي وتسمى المجمعات الشمسية في هذه الحالة بالمجمعات الشمسية المفرغة (Evacuated solar collector).

4. عدسات فرزنييل :

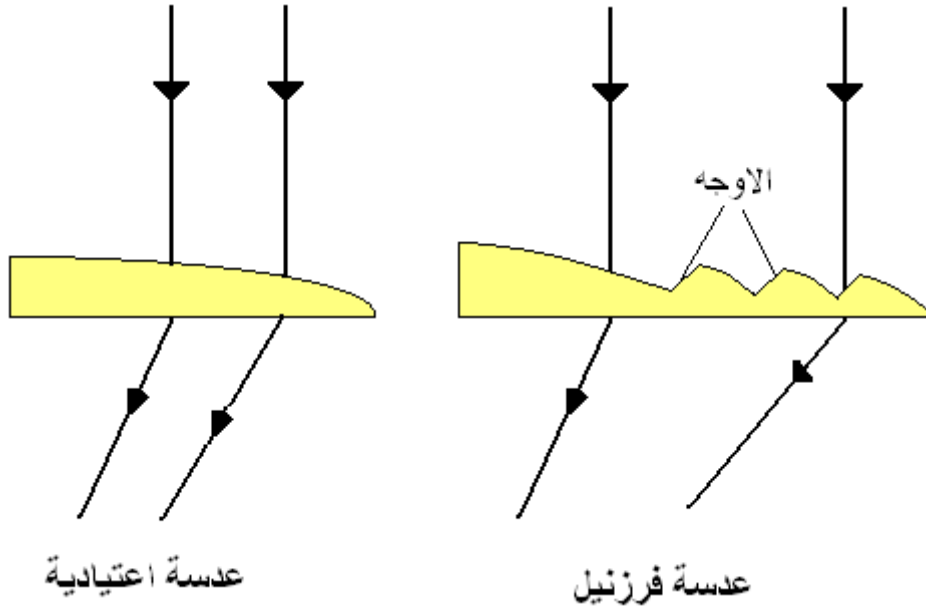
تستخدم عدسات فرزنييل وهي نوع من العدسات المستوية لتجميع الأشعة الشمسية وتوجيهها باتجاه السطح الماص، وهي أرخص كلفة وأخف وزنا وسمكا من العدسات التقليدية المحدبة بنفس المساحة.

تصنع عدسة فرزنييل بنمذجة عدد من الأخاديد أو القطوع على سطح ورقة بلاستيكية شفافة كما في الشكل (14.3) وتسمى هذه القطوع بالأوجه وتميل هذه الأوجه بزوايا معينة لتعكس الأشعة باتجاه البؤرة والتي يوضع بها الجزء الماص، وهي أقل كفاءة من العدسة التقليدية لأن جزءا من هذه الأوجه غير فعال في تركيز الضوء وخاصة عندما يسقط الإشعاع بصورة مائلة على سطح العدسة وتصنع عدسات فرزنييل عادة من اللدائن الشفافة قليلة الكلفة.

4.3 الأداء الحراري للمجمعات الشمسية المركزة:

لا تقتصر الجوانب الإيجابية لهذه المجمعات على تركيز الأشعة على مساحة صغيرة، بل إن صغر مساحة المستقبل (Receiver) للإشعاع تعني صغر المساحة الفاقدة للحرارة، وبالتالي فإن هذه المجمعات المركزة تحقق هدفي تركيز الإشعاع الشمسي بحيث يمكن رفع درجة حرارة السائل المراد تسخينه إلى درجات حرارة عالية وتقليل مساحة السطح الفاقد

للحرارة، ولكن من الجانب الآخر تعني درجة الحرارة المرتفعة للسطح المستقبل للإشعاع الشمسي ازدياد الفرق في درجات الحرارة بين السطح والأجواء المحيطة وهو الأمر الذي يزيد من الخسائر الحرارية، ولهذا يجب إيجاد علاقات حرارية مشابهة في مضمونها للعلاقات المستخدمة في المجمعات المستوية.



الشكل (14.3) العدسات الاعتيادية وعدسات فرزنييل

يتضمن معامل الخسائر الحرارية الكلي في أي مجمع شمسي مركز ثلاثة أجزاء رئيسية:

$$U_L = h_w + h_r + U_{cond} \quad \dots(3.42)$$

حيث أن :

h_w = معامل انتقال الحرارة بالحمل الناتج عن حركة الرياح

h_r = معامل انتقال الحرارة الإشعاعي

U_{cond} = معامل انتقال الحرارة بالتوصيل خلال جدران المجمع

حيث أن معامل الخسائر الإشعاعي (h_r) يمكن أن يحسب من المعادلة الآتية:

$$h_r = 4\sigma\epsilon\bar{T}^3 \quad (3.43)$$

حيث أن:

ϵ = ابتعاثية الصفيحة الماصة.

$\bar{T}$ = معدل درجة حرارة الإشعاع.

ويختلف الأداء الحراري للمجمعات الشمسية المركزة باختلاف التصميم الهندسية لها.

5.3 الأداء الحراري للمجمعات الشمسية الخازنة:

توجد تصاميم مختلفة لهذا النوع من المجمعات الشمسية وبرزها المبين في الشكل (15.3-a) حيث يتكون من انبوب واحد كبير و أحيانا من عدة انابيب متوسطة الحجم بحيث تكون اقطارها اكبر نسبيا من اقطار الانابيب المستخدمة في المجمع المستوي (الشكل (15.3-b) لتشكل خازنا حراريا كبيرا وتتصل هذه الانابيب ببعضها ببعض وتغطي الجهة الامامية بغطاء زجاجي وتعزل الجهة الخلفية بعازل حراري لتقليل الفقد الحراري من خلالها. ولغرض تحليل اداء المجمعات الشمسية الخازنة رياضيا تجرى عملية موازنة للطاقة على المنظومة كلها بالشكل الاتي:

(الطاقة الخارجة) = Energy out = الطاقة الداخلة (Energy in)

الزيادة في درجة حرارة المجمع الخازن = الخسائر الحرارية – الاشعاع الشمسي

$$I_c A_c \tau_s \alpha_s - q_{loss} = \frac{de_c}{dt} \quad \dots (3.44)$$

حيث:

I_c : الإشعاع الشمسي على سطح المجمع.

τ_s : النفاذية الفعالة لغطاء المجمع.

α_s : الامتصاصية الشمسية لسطح المجمع الماص.

q_{loss} : معدل انسياب الحرارة (أو فقدانها) من المجمع إلى المحيط.

$\frac{de_c}{dt}$: معدل تخزين الطاقة الداخلية في المجمع.

$$(mC)_e \frac{dT_c}{dt} = A_c (I_c \tau_s \alpha_s - U_L (T_c - T_a)) \quad \dots (3.45)$$

حيث ان:

$$(mC)_e = \sum_{i=1}^n (m_n C_n)$$

وتشمل كل مكونات المجمع (الخزان – الغطاء الزجاجي وغيرها).

لتبسيط الحل نجري عملية تكامل بسيطة على المعادلة (3.45) لنحصل على المعادلة الآتية:

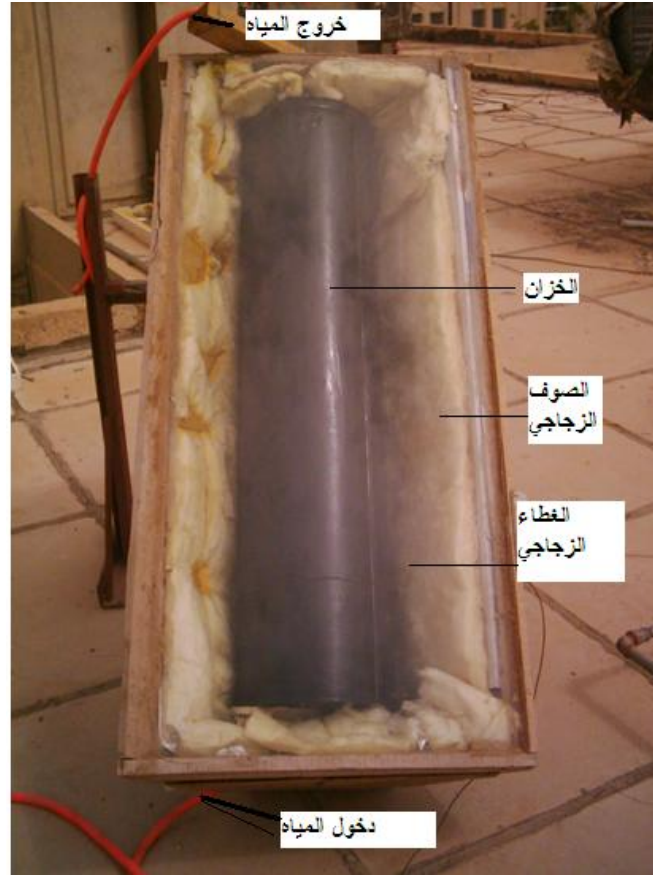
$$\frac{I_c \tau_s \alpha_s - U_c (T_c - T_a)}{I_c \tau_s \alpha_s - U_c (T_{c,initial} - T_a)} = e^{-\left(\frac{A_c U_c t}{(mC)_e}\right)} \quad \dots (3.46)$$

ويمكن حساب درجة حرارة المجمع الشمسي الاجمالية من المعادلة الآتية:

$$T_c^+ = T_a + \frac{I_c \tau_s \alpha_s}{U_c} - \left[\frac{I_c \tau_s \alpha_s}{U_c} - (T_c - T_a) \right] e^{-\left(\frac{A_c U_c t}{(mC)_e}\right)} \quad \dots (3.47)$$

6.3 زاوية ميلان المجمع الشمسي:

إن زاوية ميلان المجمع الشمسي تؤثر بلا شك على كمية الطاقة التي تسقط على سطحه، وتعتمد درجة الميل على حجم المجمع وكلفته والموقع الجغرافي والفصل الذي يستعمل فيه، وعلى هذا الأساس وجد إن افضل زاوية ميل للمجمع الشمسي في حالة استخدام المنظومة على مدار السنة للنصف الشمالي من الكرة الأرضية هي زاوية خط العرض لتلك المنطقة، أما إذا كانت المنظومة تستخدم لفصل واحد فيفضل ان تكون درجة ميلان المجمع الشمسي مساوية لزاوية خط العرض زائد 10 في فصل الشتاء ومساوية لزاوية خط العرض ناقصا 15 في فصل الصيف⁽¹⁴⁾.



(a) انبوب واحد



(b) عدد من الانابيب

الشكل (15.3) المجمع الشمسي الخازن

امثلة محلولة

مثال 1.3:

مجمع شمسي ذو غطاء زجاجي مفرد، احسب معامل الخسائر من الوجه الأمامي (U_t) لمجمع شمسي ذي غطاء زجاجي مفرد وبالمواصفات التالية:

المسافة بين الصفيحة الماصة والغطاء الزجاجي (25 mm)

ابتعاثية الصفيحة الماصة ε_p (0.95)

ابتعاثية الغطاء الزجاجي ε_g (0.88)

درجة حرارة السماء والهواء المحيط T_a (10 °C)

معدل درجة حرارة الصفيحة الماصة T_c (100 °C)

ميلان المجمع الشمسي β (45°)

معدل انتقال الحرارة من الغطاء الزجاجي بسبب الرياح h_w (10 W/m².°C)

ثم قارن الناتج مع نتائج المعادلة (3.13)

الحل:

للمجمع الشمسي بالمواصفات اعلاه فان المعادلة (3.10) تصبح بالشكل الاتي:

$$U_{c,total} = \frac{1}{R_3 + R_4} = (R_3 + R_4)^{-1} = \left(\frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_w + h_{r,c-a}} \right)^{-1}$$

يحتاج حل هذه المسألة الى عملية تكرار لان درجة حرارة الغطاء الزجاجي غير معلومة وتحسب درجة حرارة الغطاء الزجاجي من المعادلة الاتية:

$$T_c = T_p - \frac{U_c (T_p - T_a)}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}}$$

نفرض ان درجة حرارة الغطاء الزجاجي هي 35°C.

يحسب معامل انتقال الحرارة الاشعاعي بين الصفيحة الماصة و الغطاء الزجاجي من المعادلة

(3.7) :

$$h_{c,p-c} = \frac{\sigma(T_p + T_c)(T_p^2 + T_c^2)}{(1/\varepsilon_p) + (1/\varepsilon_c) - 1} = \frac{5.67 * 10^{-8} (373 + 308)(373^2 + 308^2)}{(1/0.95) + (1/0.88) - 1} = 7.6 \text{ W/m}^2.\text{C}$$

ويحسب معامل انتقال الحرارة الاشعاعي بين الغطاء الزجاجي والسماء من المعادلة (9.3):

$$h_{r,c-a} = \varepsilon_c \sigma (T_c + T_a)(T_c^2 + T_a^2) = 0.88 * 5.67 * 10^{-8} (308 + 283)(308^2 + 283^2)$$

$$h_{r,c-a} = 5.16 \text{ W/m}^2.\text{C}$$

يحسب معامل انتقال الحرارة بالحمل الحر بين الصفيحة الماصة والغطاء الزجاجي من المعادلة (1.30) في الفصل الاول:

$$Nu = 1 + 1.44 * \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \beta} \right]^+ \left(1 - \frac{\sin(1.8 * \beta)^{1.6} * 1708}{Ra \cos \beta} \right) + \left[\left(\frac{Ra \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+$$

حيث تؤخذ خواص الهواء من الجداول عند معدل درجة حرارة بين الصفيحة الماصة والغطاء الزجاجي وتساوي 67.5°C وكانت الخواص كالآتي:

$$\nu = 1.96 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}, k = 0.0293 \text{ W/m.C}, \alpha = 2.69 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$\beta' = \frac{1}{T} = \frac{1}{340.5}$$

$$5.33 * 10^4 = \frac{9.81 * (100 - 35) * (0.025)^3 * 0.7}{340.5 * (1.96 * 10^{-5})^2} = \frac{g \beta' \Delta T l^3 P_r}{\nu^2} = Ra = \text{عدد راييلي}$$

من المعادلة (1.30) نحصل على:

$$Nu = 3.19$$

$$h_{c,p-c} = Nu \frac{k}{l} = 3.19 \frac{0.0293}{0.025} = 3.73 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

ويكون معامل الخسائر من الوجه الأمامي (U_l) من التكرار الاول:

$$U_{c,total} = \left(\frac{1}{3.73 + 7.6} + \frac{1}{5.16 + 10} \right)^{-1} = 6.49 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

وتحسب درجة حرارة الغطاء من المعادلة:

$$T_c = 100 - \frac{6.49(90)}{3.73 + 7.6} = 48.5^\circ\text{C}$$

وتعاد نفس الخطوات السابقة مع اخذ التغير الحصل في درجة حرارة الغطاء الزجاجي من 35°C الى 48.5°C لنحصل على معاملات انتقال الحرارة الاتية:

$$h_{r,p-c} = 8.03 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$h_{r,c-a} = 5.53 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$h_{c,p-c} = 3.52 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

ويكون معامل الخسائر من الوجه الأمامي (U_t) من التكرار الثاني:

$$U_{c,total} = 6.62 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

وتحسب درجة حرارة الغطاء الجديدة من التكرار الثاني:

$$T_c = 48.4^\circ\text{C}$$

التغير في درجة حرارة الغطاء صغير فنتوقف عملية التكرار ويكون معامل الخسائر من الوجه

$$\text{الأمامي } (U_t) \text{ من التكرار الثاني } U_{c,total} = 6.62 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

لمقارنة النتائج مع المعادلة (3.13) نكتب المعادلة بالشكل الآتي:

$$q_{toploss} = U_t * A_c * (T_c - T_a)$$

حيث ان :

$$U_t = \left[\frac{N}{\left(\frac{C}{T_p} \right) [(T_c - T_a)/(N + f)]^{0.33}} + \frac{1}{h_{c,\infty}} \right]^{-1} + \frac{\sigma(T_c^2 + T_a^2)(T_c + T_a)}{\frac{1}{\varepsilon_{p,i} + 0.05N(1 + \varepsilon_{p,i})} + \frac{2N + f - 1}{\varepsilon_{g,i}} - N}$$

$$f = (1 - 0.04h_{c,\infty} + 0.0005h_{c,\infty}^2)(1 + 0.091N)$$

$$f = (1 - 0.04 * 10 + 0.0005 * 10^2)(1 + 0.091 * 1) = 0.709$$

$$C = 365.9(1 - 0.00883\beta + 0.00013\beta^2)$$

$$C = 365.9(1 - 0.00883 * 45 + 0.00013 * 45^2) = 316.832$$

فأذن معامل الخسائر من الوجه الأمامي يكون:

$$U_t = \left[\frac{1}{\left(\left(\frac{316.832}{373} \right) \left[\frac{(100-10)}{1+0.709} \right]^{0.33} \right) + \frac{1}{10}} \right]^{-1} + \frac{5.67 \cdot 10^{-8} (373^2 + 283^2) (373 + 283)}{\frac{1}{0.95 + 0.05(1 + 0.95)} + \frac{2 + 0.709 - 1}{0.88} - 1}$$

$$U_t = 2.3908 + 4.2989 = 6.6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

الفرق في الناتج قليل جدا لذا يمكن استخدام المعادلة (3.13) لسهولة استخدامها.

مثال 2.3:

احسب معدل الكفاءة الساعية واليومية لمجمع شمسي يعمل بالماء وله مواصلة إجمالية قدرها $8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ على السطح العلوي. وكان مصنوعا من أنابيب نحاسية ، قطرها الداخلي 1 cm وسمكها 0.05 cm وتتصل بصفيحة سمكها 0.05 cm وكانت المسافة بين مراكزها 15 cm . ان معامل انتقال الحرارة داخل الأنابيب يساوي $1500 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ وابتعاثية الغطاء تساوي 0.9 والامتصاصية الشمسية للغطاء النحاسي تساوي 0.9 . وكان المجمع بعرض 1 m وبطول 2 m ، وكانت درجة حرارة الدخول 330 K ومعدل جريان الماء يساوي 0.02 kg/s . ومقدار الطاقة الشمسية I_c ودرجة حرارة المحيط مدونان أدناه في الجدول أدناه.

الوقت (h)	$I_c (\text{W/m}^2)$	$T_{amb} (\text{K})$
7-8	94	270
8-9	208	280
9-10	387	283
10-11	583	286
11-12	804	290
12-13	828	290
13-14	720	288
14-15	579	288
15-16	387	284
16-17	267	280

ثم احسب درجة الحرارة المتوسطة للمائع والصفحة الماصة بين الساعة 11 و 12.

الحل:

سنفرض إن المجمع يعمل في حالة شبه الاستقرار خلال كل ساعة كما موضح في الجدول أعلاه. باستخدام التحليل الموضح للتركيب المحدد أولاً، يتم الحصول على كفاءة الزعفة من المعادلة الآتية:

$$\eta_f = \frac{\tanh(mw)}{mw}$$

$$m = \left(\frac{U_c}{kt} \right)^{1/2} = \left(\frac{8}{390 * 5 * 10^{-4}} \right)^{1/2} = 6.4$$

ونحصل على

$$\eta_f = \frac{\tanh[6.4(0.15 - 0.01) / 2]}{6.4(0.15 - 0.01) / 2} = 0.938$$

ان عامل كفاءة المجمع F' هو من المعادلة (3.22):

$$F' = \frac{1/U_c}{(D + 2w) \left[\frac{1}{U_c(D - 2w\eta_f)} + \frac{1}{\bar{h}_{c,i}(\pi D_i)} \right]}$$

$$= \frac{1/8.0}{(0.15) \left[\frac{1}{8.0(0.01 - 0.14 * 0.938)} + \frac{1}{1500 * \pi * 0.01} \right]} = 0.920$$

بعد ذلك نحصل على عامل طرح الحرارة من المعادلة (3.26)

$$F_R = \frac{G_c c_p}{U_c} \left[1 - \exp\left(-\frac{U_c F'}{G_c c_p}\right) \right]$$

$$F_R = \frac{0.01 * 4184}{8} \left[1 - e^{-(8.0 * 0.920 / 0.01 * 4184)} \right] = 0.844$$

اما معدل الحرارة النافعة المعطى، يكون من المعادلة (3.27)

$$q_u = A_c F_R [\alpha_s I_c - U_c (T_{f.in} - T_a)]$$

في العلاقة أعلاه I_c هي الأشعة الساقطة على غطاء المجمع الزجاجي. اذا كانت الانتقالية للزجاج تساوي 0.9 ، فإن الأشعة الساقطة على صفيحة المجمع تكون

$$I_s = \tau * I_c = 0.9 * I_c$$

$$q_u = 2 * (0.844) [I_c * 0.81 - 8.0(T_{f,in} - T_a)]$$

و كفاءة المجمع $\eta_c = \frac{q_u}{AI_c}$ والمعدلات الساعية مدونة في الجدول أدناه، حيث نلاحظ انه في

الصباح الباكر وفي أواخر النهار تكون الشمس واطئة جدا على الأفق لتعطي طاقة نافعة. ويتم الحصول على المعدل اليومي بجمع الطاقة النافعة للساعات التي يستلم خلالها المجمع الحرارة وتقسيمها على الطاقة الشمسية الكلية الساقطة على المجمع بين شروق الشمس وغروبها، وكما موضح في الجدول أعلاه. وينتج عن ذلك:

$$\eta_{b,day} = \frac{\sum q_u}{\sum A_c I_c} = \frac{2099}{4837} = 0.43\%$$

الوقت (h)	$I_c(W/m^2)$	$q_u(W)$	η_c
7-8	94	0	0
8-9	208	0	0
9-10	387	0	0
10-11	583	221	0.190
11-12	804	584	0.363
12-13	828	619	0.374
13-14	720	438	0.304
14-15	579	237	0.205
15-16	387	0	0
16-17	267	0	0
	$\sum I_{tot} = 4837 \text{ W/m}^2$	$\sum q_u = 2099 \text{ W}$	

تحتسب درجة الحرارة المتوسطة للمائع بين الساعة 11 و 12 من المعادلة (3.29):

$$T_{fm} = T_{fi} + \frac{q_u / A_c}{F_R U_c} \left(1 - \frac{F_R}{F'}\right) = 330 + \frac{584 / 2}{0.844 * 8} \left(1 - \frac{0.844}{0.92}\right) = 333.57^\circ \text{K}$$

$$T_{fm} = 60.57^\circ \text{C}$$

اما درجة الحرارة المتوسطة للصفحة الماصة بين الساعة 11 و 12 فتحتسب من المعادلة (3.31):

$$T_{pm} = T_{fi} + \frac{q_u / A_c}{F_R U_c} (1 - F_R) = 330 + \frac{584 / 2}{0.844 * 8} (1 - 0.844) = 336.74^\circ \text{K}$$

مثال 3.3:

احسب كفاءة مجمع شمسي هوائي نوع (b) في الشكل (9.3) يميل بزاوية قدرها 45° معرض الى اشعاع شمسي قيمته 900 W/m^2 والمسافة بين الصفحة الماصة والغطاء الزجاجي تبلغ 20 mm وعرض مجرى الهواء 10 mm . عرض المجمع الكلي 1 m وارتفاعه 4 m وحاصل ضرب الامتصاصية - النفاذية الفعال للمجمع الهوائي 0.82 والصفحة الماصة مطلية بطلاء انتقائي يوفر ابتعائية منخفضة قدرها 0.1 . درجة حرارة الهواء الداخل الى المجمع 60°C ودرجة حرارة الهواء المحيط 10°C ومعدل التدفق الكتلي للهواء الجاري الى المجمع هو 0.056 kg/s ومعامل انتقال الحرارة نتيجة الرياح هو $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$. ومعامل انتقال الحرارة من الجهة العليا U_t $3.3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$ ومن الجهة الخلفية U_b يساوي $1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$.

الحل:

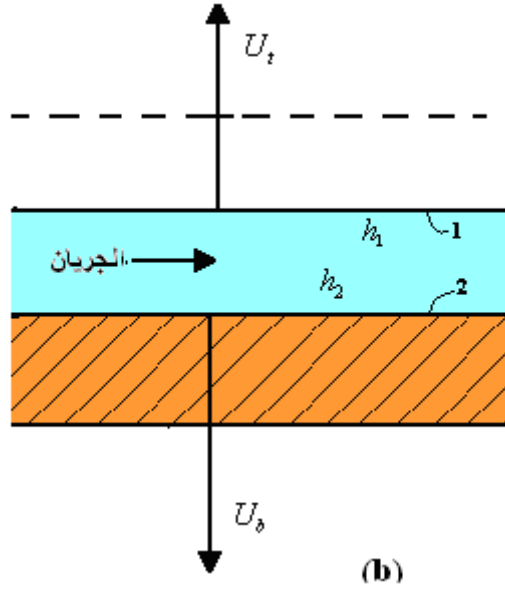
من ملاحظة السؤال نجد ان درجة حرارة السطح السفلي والعلوي لمجرى الهواء غير معلومة، لذا نفرض ان درجة حرارة المائع الجاري هي 70°C وتساوي معدل الدرجة الحرارية الاشعاعية بين السطحين والتي سنفرضها متساوية ويحسب معامل انتقال الحرارة الاشعاعي باستخدام معدل الدرجة الحرارية الاشعاعية من المعادلة الاتية:

$$h_r = \frac{4\sigma \bar{T}^3}{(1/\varepsilon_1) + (1/\varepsilon_2) - 1} = \frac{4 * 5.67 * 10^{-8} * 343^3}{2/0.95 - 1} = 8.3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$$

نأخذ خواص الهواء عند معدل الدرجة الاشعاعية (343 K) ونحسب رقم رينولد للهواء الجاري داخل المجرى من القانون الاتي:

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} = \frac{\dot{m} * D_h}{A_f \mu} = \frac{0.056 * 2 * 0.01}{0.01 * 1 * 2.04 * 10^{-5}} = 5490$$

حيث ان D_h هو القطر الهيدروليكي للمجرى الهوائي ويساوي ضعف ارتفاع المجرى.



المثال (3.3)

ومن معادلات انتقال الحرارة على مجرى معرض الى تسخين من الاعلى ومعزول من الاسفل وللجريان المضطرب كما في هذه الحالة تستخدم المعادلة الاتية:

$$Nu = 0.0158 * Re^{0.8}$$

$$\therefore Nu = 0.0158 * 5480^{0.8} = 15.5$$

$$Nu = \frac{h * D_h}{k} \rightarrow h = 15.5 * \frac{0.029}{2 * 0.01} = 22 \text{ W/m}^2.C$$

$$h_1 = h_2 = 22 \text{ W/m}^2.C$$

$$U_L = U_t + U_b = 3.3 + 1 = 4.3 \text{ W/m}^2.C$$

$$F' = \frac{1}{1 + \frac{U_L}{h_1 + \frac{1}{\frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_r}}}}} = \frac{1}{1 + \frac{4.3}{22 + \frac{1}{\frac{1}{22} + \frac{1}{8.3}}}}} = 0.87$$

من المعادلة (3.26):

$$F_R = \frac{G_c c_p}{U_c} \left[1 - \exp\left(-\frac{U_c F'}{G_c c_p}\right) \right]$$

$$G_c = \frac{\dot{m}}{A_c} = \frac{0.056}{4} = 0.014$$

$$\therefore \frac{U_c F'}{G_c c_p} = \frac{4.3 * 0.87}{0.014 * 1009} = 0.265$$

$$\therefore F_R = \frac{0.014 * 1009}{4.3} [1 - \exp(-0.265)] = 0.764$$

من المعادلة (3.27):

$$q_u = A_c F_R [I_c \tau_s \alpha_s - U_c (T_{f.in} - T_a)]$$

$$q_u = 4 * 0.764 * [900 * 0.82 - 4.3 * (60 - 10)] \approx 1610 W$$

تحتسب درجة خروج الهواء من المجمع من المعادلة الآتية:

$$T_o = T_i + \frac{q_u}{\dot{m} * c_p} = 60 + \frac{1610}{0.056 * 1009} = 89 \text{ } ^\circ\text{C}$$

تحتسب درجة حرارة الصفيحة الماصة من المعادلة (3.31):

$$T_{pm} = T_{fi} + \frac{q_u / A_c}{F_R U_c} (1 - F_R) = 60 + \frac{1610 / 4}{0.764 * 4.3} (1 - 0.764) = 88.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

اما درجة الحرارة المتوسطة للصفيحة الماصة فتحسب من المعادلة (3.31):

$$T_{pm} = T_{fi} + \frac{q_u / A_c}{F_R U_c} (1 - F_R) = 60 + \frac{1610 / 4}{0.77 * 4.3} (1 - 0.88) = 74 \text{ } ^\circ\text{C}$$

تم فرض كلا من درجة حرارة المائع والصفيحة الماصة في البداية مساوية الى $70 \text{ } ^\circ\text{C}$ لذا

نحتاج الى خطوة تكرار اضافية مع اخذ درجة حرارة الصفيحة الماصة مساوية الى $88.9 \text{ } ^\circ\text{C}$

وتعاد نفس الخطوات السابقة لنحصل على النتائج الآتية:

$$\bar{T} = T_{fm} = 347 K$$

$$h_r = 8.7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$$

$$Re = 5400$$

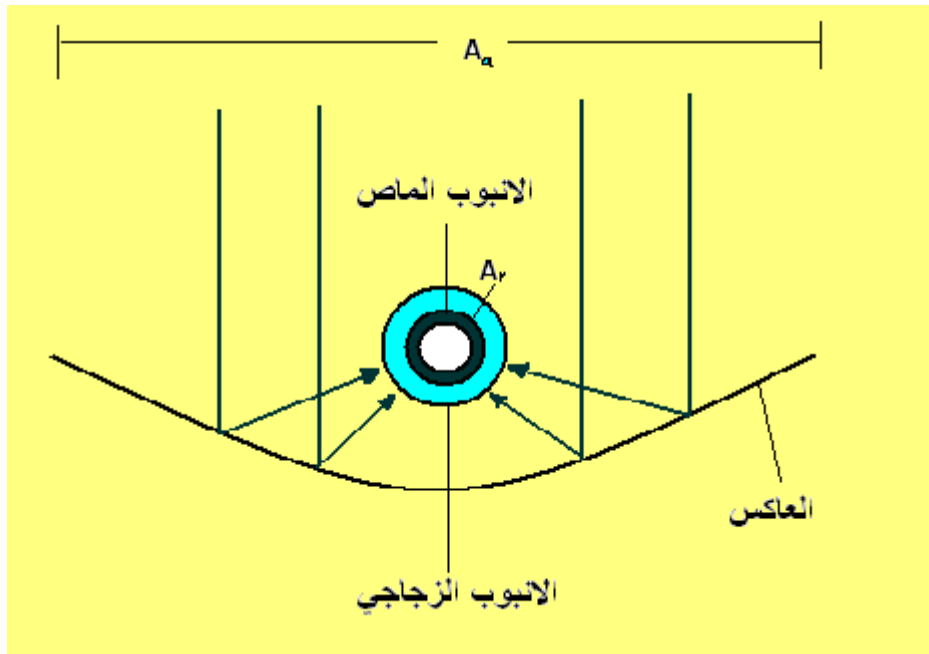
$$h_1 = h_2 = 23 \text{ W/m}^2.\text{C}$$

نلاحظ ان التغير طفيف في معامل انتقال الحرارة بالحمل لذا تبقى النتائج الاخرى قريبة لنتائج التكرار الاول وتكون كفاءة المجمع مساوية الى:

$$\eta = \frac{q_u}{A_c * I} = \frac{1610}{4 * 900} = 45\%$$

مثال 4.3 :

احسب معامل الخسائر الحرارية الإجمالي U_L لمجمع شمسي أسطواني مركز (الشكل 16.3)، وكان قطر الأنبوب المستقبل (Receiver) 0.06m ودرجة حرارته 200°C مغلف بأنبوب زجاجي لتقليل الخسائر الحرارية ذي قطر 0.09m، وكان الحيز بين الأنبوب المستلم و الغلاف الزجاجي الخارجي مفرغا من الهواء بصورة كلية. افرض إن ابتعاثية المستلم هي 0.91 و ابتعاثية الغطاء الزجاجي هي 0.88 وسرعة الرياح 5 m/sec ودرجة حرارة كلا من الهواء المحيط والسماء 10°C .



الشكل (16.3) المجمع الأسطواني المركز في المثال (3.3)

الحل :

يتطلب الحساب الدقيق لمعامل الخسائر الإجمالي تحديد المكونات الأساسية لخسائر هذه المنظومة، يفقد الأنبوب الزجاجي الخارجي الحرارة إلى الخارج عن طريق الحمل والإشعاع ونظرا لمجهولية درجة حرارة الأنبوب الزجاجي، سنفرض أن درجة حرارة الزجاج هي 50 درجة مئوية، ولحساب معامل انتقال الحرارة من الأنبوب الخارجي نتيجة الرياح تستخدم علاقة Mcdonald لتحديد عدد نسلت Nu لاسطوانة معرضة الى تيار هوائي:

$$Nu = 0.24 * (Re)^{0.6} \quad (3.48)$$

إذ إن :

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \text{عدد رينولدز}$$

$$D = \text{قطر الأنبوب الزجاجي}$$

$$V = \text{سرعة الرياح}$$

من جداول الهواء نجد خواص الهواء عند درجة حرارة مقدارها 30°C (المعدل بين درجة حرارة المحيط (10°C) ودرجة حرارة الغلاف الزجاجي المفروضة (50°C)).

$$\therefore Re = \frac{1.16 * 5 * 0.09}{1.86 * 10^{-5}} = 28100$$

يحسب عدد نسلت من المعادلة (3.48) مع إضافة زيادة مقدارها 25% بسبب الظروف الخارجية:

$$Nu = 0.24 * 1.25 * (28100)^{0.6} = 140$$

$$Nu = \frac{hD}{k} \Rightarrow h = \frac{Nu * k}{D} = \frac{140 * 0.0265}{0.09} = 41 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

أما معامل انتقال الحرارة الإشعاعي الإجمالي من الأنبوب الزجاجي h_r إلى المحيط الخارجي فيحسب من المعادلة (3.43):

$$h_{r,r-c} = 4\sigma\epsilon\bar{T}^3 = 4 * 5.67 * 10^{-8} * 0.88 * (30 + 273)^3 = 5.55 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

تنتقل الحرارة بين الأنبوب المستلم (Receiver tube) والأنبوب الزجاجي عن طريق الإشعاع فقط لأن الحيز المحصور مفرغ من الهواء ويحسب معامل انتقال الحرارة الشعاعي من المعادلة الآتية:

$$h_r = \frac{\sigma(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + 1} + 1 + \frac{(1 - \varepsilon_2)A_1}{\varepsilon_2 A_2}} \dots (3.49)$$

$$\therefore h_{r,r-c} = \frac{5.67 \cdot 10^{-8} (473^2 + 323^2)(473 + 323)}{\frac{1 - 0.91}{0.91} + 1 + \frac{(1 - 0.88) \cdot 0.06^2}{0.88 \cdot 0.09^2}} = 12.45 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

ولعدم وجود انتقال حرارة بالحمل بين الأنبوب المستلم والأنبوب الزجاجي، فإن معامل انتقال الحرارة الإجمالي يحسب من المعادلة الآتية:

$$U_L = \left[\frac{A_r}{(h_w + h_{r,c-a})A_c} + \frac{1}{h_{r,c-a}} \right]^{-1} = \left[\frac{0.06^2}{(41 + 5.5) \cdot 0.09^2} + \frac{1}{12.45} \right]^{-1}$$

$$\therefore U_L = 10.6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

هذه القيمة لمعامل الخسائر مستندة إلى فرضية إن درجة حرارة الغطاء الزجاجي هي 50°C وهي تحتاج إلى تصحيح، إن كمية الحرارة المنتقلة من الأنبوب الماص إلى الغطاء الزجاجي هي نفسها كمية الحرارة المنتقلة من الغطاء الزجاجي إلى المحيط الخارجي، لذا فإن:

$$A_c (h_{r,c-a} + h_w)(T_c - T_a) = A_r h_{r,r-c} (T_r - T_c)$$

وبحل هذه المعادلة، نحصل على:

$$T_c = \frac{A_r h_{r,r-c} T_r + A_c (h_{r,c-a} + h_w) T_a}{A_r h_{r,r-c} + A_c (h_{r,c-a} + h_w)}$$

$$T_c = \frac{12.45 \cdot 200 + \frac{0.09}{0.06} (5.5 + 41) 10}{12.45 + \frac{0.09}{0.06} (5.5 + 41)} = 39^\circ\text{C}$$

إن احتساب درجة حرارة الغطاء الزجاجي 39°C لا يغير كثيرا في قيمة معامل الخسائر الإجمالي U_L لذا فإن قيمة معامل الخسائر الإجمالي الناتجة من المحاولة الأولى وبالـمـغـة $(10.6 \text{ W/m}^2\text{C})$ مقبولة.

تنتقل الحرارة من الأنبوب المستلم (Receiving tube) إلى المائع الذي يجري بداخله ويمكن كتابة معامل انتقال الحرارة الإجمالي (معتمدا على القطر الخارجي للأنبوب المستلم) بين المائع والمحيط الخارجي بالشكل الآتي:

$$U_o = \left[\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{f,i} * D_i} + \frac{D_o * \ln(D_o / D_i)}{2k} \right]^{-1} \quad \dots (3.50)$$

حيث ان :

D_o, D_i القطر الداخلي والخارجي للأنبوب المستلم على التوالي.

h_i معامل انتقال الحرارة بالحمل بين السطح الداخلي للأنبوب والمائع الذي بداخله.

k الموصلية الحرارية لمادة الأنبوب.

ان الطاقة الحرارية المكتسبة لوحدة الطول بالنسبة إلى الأنبوب المستلم هي الفرق بين الطاقة الحرارية الممتصة والفقدان الحراري بواسطة الإشعاع والحمل، لذا يكمن الحصول على الطاقة الحرارية المكتسبة لوحدة الطول (q'_u) من المعادلة الآتية:

$$q'_u = \frac{A_a S}{L} - \frac{A_r U_L}{L} * (T_r - T_a) \quad \dots (3.51)$$

حيث ان:

A_a مساحة مقطع السطح العاكس الذي تسقط عليه أشعة الشمس (الشكل (16.3)).

A_r مساحة الأنبوب الذي يسقط عليه الإشعاع المنعكس وبالنسبة إلى الأنبوب الأسطوانى تساوي πD_o .

ويمكن الحصول على الطاقة الحرارية المكتسبة لوحدة الطول (q'_u) بدلالة درجة حرارة المائع (T_f) من العلاقة الآتية:

$$q'_u = \frac{A_r / L * (T_r - T_f)}{\frac{D_o}{h_{f,i} D_i} + \left(\frac{D_o}{2k} \ln \frac{D_o}{D_i} \right)} \quad \dots (3.52)$$

وبحذف T_r من المعادلتين (3.51) و (3.52) نحصل على المعادلة الآتية:

$$q'_u = F' \frac{A_a}{L} \left[S - \frac{A_r}{A_a} U_L (T_f - T_a) \right] \quad \dots (3.53)$$

حيث ان F' عامل كفاءة المجمع ويحسب كآلاتي:

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{f,i} D_i} + \frac{D_o}{2k} \ln \frac{D_o}{D_i}} \quad \dots (3.54)$$

أو ان :

$$F' = \frac{U_o}{U_L} \quad \dots (3.55)$$

وبنفس الطريقة المستخدمة لاشتقاق المعادلة (3.27) يمكن الحصول على المعادلة التالية:

$$Q_u = A_a F_R \left[S - \frac{A_r U_L}{A_a} (T_i - T_a) \right] \quad \dots (3.56)$$

حيث ان:

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p}{A_r U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_r U_L F'}{\dot{m} c_p}\right) \right] \quad \dots (3.57)$$

مثال (5.3):

مجمع شمسي أسطواني مركز بعرض 2.5 m وبطول 10 m، تبلغ كمية الطاقة الشمسية الممتصة لوحدة المساحة (S) فيه حوالي 430 W/m^2 ، الأنبوب المستقبل (Receiver) ذي قطر 0.06 m و مصبوغ بلون اسود ومغلف بأنبوب زجاجي لتقليل الخسائر الحرارية ذي قطر 0.09 m، وكان الحيز بين الأنبوب المستلم و الغلاف الزجاجي الخارجي مفرغ من الهواء بصورة كلية. المجمع الشمسي مصمم لتسخين مائع معين إلى درجة حرارة مقدارها 200°C وبمعدل جريان 0.139 kg/s ، كانت السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط لهذا المائع مقدارها $1.26 \text{ kJ/kg}^\circ \text{C}$ ، ومقدار معامل انتقال الحرارة داخل الأنبوب $300 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ \text{C}$ ، أما معامل الخسائر الإجمالي من المجمع فيبلغ حوالي $10.6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ \text{C}$ ، أما الأنبوب الماص للحرارة فمصنوع من الفولاذ المقاوم للصدأ ($k=16 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ \text{C}$) ويبلغ سمك جدار الأنبوب حوالي 5 mm. فإذا كانت درجة حرارة الهواء المحيط 25°C ، احسب الكسب الحراري الكلي ودرجة حرارة المائع عند الخروج.

الحل:

يحسب الكسب الحراري الكلي من المعادلة (3.56)، ومساحة الأنبوب الماص فتحسب كالاتي:

$$A_r = \pi D L = \pi * 0.06 * 10 = 1.88 \text{ m}^2$$

أما مساحة مقطع السطح العاكس فتحسب مع الأخذ بنظر الاعتبار مقدار التضييل بسبب الأنبوب الماص :

$$A_a = (2.5 - 0.09) * 10 = 24.1 \text{ m}^2$$

ولحساب معامل طرح الحرارة للمجمع F_R يجب حساب معامل كفاءة المجمع F' :

$$F' = \frac{1/10.6}{\frac{1}{10.6} + \frac{0.06}{300 * 0.05} + \frac{0.06}{2 * 16} \ln \frac{0.06}{0.05}} = 0.96$$

ويحسب معامل طرح الحرارة للمجمع F_R من المعادلة (3.57):

$$F_R = \frac{0.139 * 1260}{1.88 * 10.6} \left[1 - \exp\left(-\frac{1.88 * 10.6 * 0.96}{0.139 * 1260}\right) \right] = 0.91$$

اذن الكسب الحراري الكلي فيحسب من المعادلة (3.56):

$$Q_u = 24.1 * 0.91 \left[430 - \frac{1.88 * 10.6}{24.1} (200 - 25) \right] = 6256.8 \text{ W}$$

وتحسب درجة حرارة المائع الخارج من المعادلة الآتية:

$$t_o = t_i + \frac{Q_u}{\dot{m} * C_p} = 200 + \frac{6260}{0.139 * 1260} = 235.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

مثال (6.3):

اوجد معادلة منحنى الكفاءة للمجمع الشمسي المستوي المذكور في المثال (2.3) ثم اوجد أعلى درجة حرارة يصل إليها السطح الماص في حالة عدم مرور المائع عند منتصف النهار.

الحل:

تكون معاملات منحنى الكفاءة بالشكل الآتي:

$$F_R \alpha_s \tau_s = 0.844 * 0.9 * 0.9 = 0.6836$$

$$F_R U_c = 0.844 * 8 = 6.752$$

وتكون معادلة منحنى الكفاءة بالشكل الآتي:

$$\eta_c = 0.6836 - \frac{[6.752 * (T_{f.in} - T_a)]}{I_c}$$

و في حالة عدم مرور المائع في المجمع تكون كفاءة المجمع مساوية للصفر ودرجة حرارة السطح الماص مساوية الى درجة حرارة المائع الداخل وبالتعويض في معادلة الكفاءة أعلاه

$$0 = 0.6836 - \frac{[6.752 * (T_m - 290)]}{804}$$

$$T_m = 371.4 \text{ } ^\circ K$$

مثال (7.3):

مجمع شمسي خازن مكون من عدد من الانابيب ذات قطر 150 mm مطلية بلون اسود قاتم وموضوعة في صندوق معزول جيدا من الجهة الخلفية والجوانب ومغطي بطبقة من الزجاج من الجهة الامامية كما في الشكل ادناه. تم ملئ الانابيب بماء درجة حرارته $18 \text{ } ^\circ C$ عند الساعة السادسة صباحا، فاذا كان الصندوق مع الانابيب مائلة بزاوية ميلان β قدرها 40 احسب درجة حرارة الماء في الانابيب خلال اليوم على فرض عدم وجود تحميل وكانت الظروف الجوية كما مبينة في الجدول ادناه.

Time (hour)	$I_T \text{ (MJ/m}^2\text{)}$	$T_a \text{ (}^\circ\text{C)}$	Time (hour)	$I_T \text{ (MJ/m}^2\text{)}$	$T_a \text{ (}^\circ\text{C)}$
7 a.m	0.05	7	7 p.m	0	15
8	0.32	9	8	0	14
9	1.09	14	9	0	12
10	1.23	16	10	0	10
11	2.36	16	11	0	9
12	3.95	17	12	0	9
1 p.m	3.9	20	1 a.m	0	9
2	3.52	20	2	0	8
3	2.55	21	3	0	6
4	1.38	22	4	0	7
5	0.46	21	5	0	7
6	0.04	16	6	0	7

المواصفات الاخرى للمجمع:

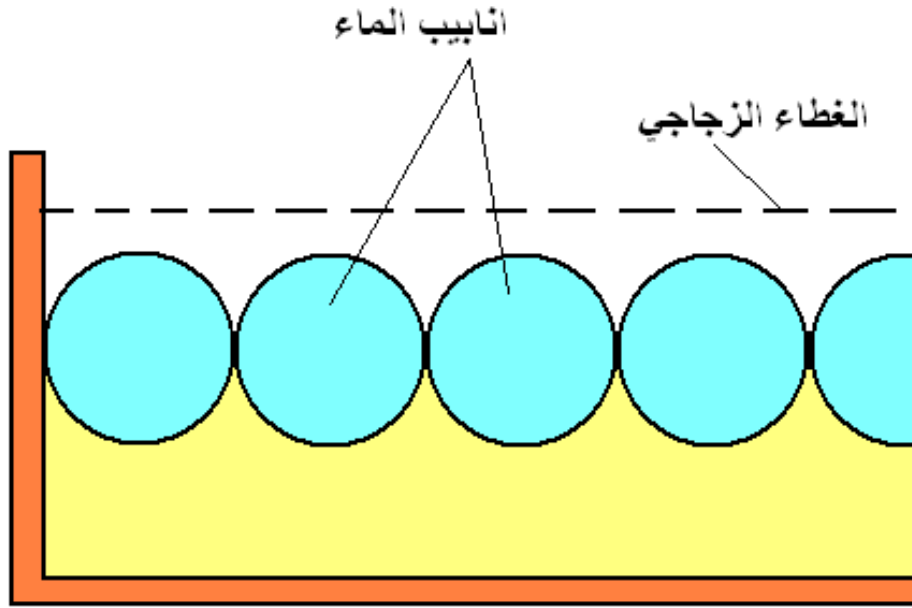
ابتعاثية المادة المصنوع منها الانابيب (0.95)

الامتصاصية (0.95)

نفاذية الغطاء الزجاجي (0.89)

معامل الخسائر من الوجه الأمامي $(U_c) = 7 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

افرض ان السعة الحرارية النوعية للزجاج والهيكل الخارجي للمجمع مهملة ومعامل الخسائر ثابت خلال اليوم



مثال (7.3)

الحل:

يمكن حساب درجة حرارة الماء من المعادلة (3.47) والتي تحسب درجة حرارة المجمع الشمسي الاجمالية التي يمكن اعتبارها درجة حرارة الماء على اعتبار ان اغلب كتلة المجمع مكونة من الماء:

$$T_w^+ = T_a + \frac{I_c \tau_s \alpha_s}{U_c} - \left[\frac{I_c \tau_s \alpha_s}{U_c} - (T_w - T_a) \right] e^{-\left(\frac{A_c U_c t}{(mC)_e} \right)}$$

$$\frac{I_c \tau_s \alpha_s}{U_c} = \frac{I_c * 10^6 * 0.95 * 0.89}{7 * 3600} = 33.55 I_c$$

$$\left(\frac{A_c U_c t}{(mC)_e}\right) = \frac{0.15 * 1 * 7 * 3600}{\frac{\pi}{4} * 0.15^2 * 1 * 1000 * 4190} = 0.051$$

$$e^{-0.051} = 0.95$$

وتصبح المعادلة بالشكل الاتي:

$$T_w^+ = T_a + 33.55 * I_c - [33.55 * I_c - (T_w - T_a)] * 0.95$$

وتصبح المعادلة بالنسبة للساعة الاولى:

$$T_w^+ = 7 + 33.55 * 0.05 - [33.55 * 0.05 - (18 - 7)] * 0.95 = 17.53 ^\circ\text{C}$$

وبالنسبة للساعة الثانية تصبح:

$$T_w^+ = 9 + 33.55 * 0.32 - [33.55 * 0.32 - (17.53 - 9)] * 0.95 = 17.64 ^\circ\text{C}$$

وهكذا لبقية النتائج المبينة في الجدول ادناه

Time (hour)	I _T (MJ/m ²)	T _a (C)	T _w ⁺ (C)	Time (hour)	I _T (MJ/m ²)	T _a (C)	T _w ⁺ (C)
7 a.m	0.05	7	17.5	7 p.m	0	15	43
8	0.32	9	17.6	8	0	14	42
9	1.09	14	19.3	9	0	12	40
10	1.23	16	21.1	10	0	10	38.5
11	2.36	16	24.8	11	0	9	37
12	3.95	17	30.7	12	0	9	35.4
1 p.m	3.9	20	36.9	1 a.m	0	9	34.3
2	3.52	20	41.9	2	0	8	33
3	2.55	21	45.2	3	0	6	31.6
4	1.38	22	46.4	4	0	7	30.3
5	0.46	21	45.9	5	0	7	29.1
6	0.04	16	44.4	6	0	7	28

الفصل الرابع

4

استخدامات الطاقة الشمسية

الفصل الرابع

استخدامات الطاقة الشمسية

Solar energy utilizations

1.4 مقدمة عامة:

تعد أزمة الطاقة من أهم المشاكل التي يواجهها العالم حالياً، بسبب الزيادة الكبيرة والمستمرة في استهلاك الطاقة التي يواجهها احتياطي محدد من موارد الطاقة التقليدية. لذا عمد الباحثون إلى استغلال الطاقات المتجددة لمواجهة هذه النقص الكبير في الطاقة. وكانت الطاقة الشمسية إحدى الطاقات المرشحة لاحتلال مكان الصدارة محل الطاقات التقليدية. تعددت استخدامات الطاقة الشمسية وأصبح استغلالها وتحويلها إلى طاقة حرارية أو كهربائية أو كيميائية أمراً مألوفاً في الوقت الحاضر إذ يمكن الاستفادة منها في التدفئة والتبريد وتسخين الماء وتحلية المياه وتوليد الطاقة الكهربائية والطبخ وتجفيف المحاصيل الزراعية وغيرها من الاستخدامات المهمة. وسنتطرق في هذا الفصل إلى التطبيقات الحرارية المختلفة للطاقة الشمسية.

2.4 تسخين المياه:

تتشترك المجمعات الشمسية في إنها تقوم بتسخين السوائل المارة فيها، ومن ضمنها الماء أكثر السوائل استعمالاً في تطبيقات الطاقة الشمسية. وعند الحديث عن تسخين المياه بأستخدام الطاقة الشمسية يكون المقصود رفع درجة حرارتها إلى 60°C وهي كافية للاستخدام المنزلي. تحتوي منظومات التسخين الشمسية على ثلاثة أجزاء رئيسية المجمع الشمسي وخزان الحفظ وشبكة توزيع المياه وقد تحتوي المنظومة أيضاً على بعض الملحقات الإضافية كأجهزة السيطرة ومضخات لدفع المياه قسرياً ومبادلات حرارية ومسخنات كهربائية مساعدة لاستخدامها في حالة الحمل الكبير أو في حالة عدم توفر طاقة شمسية كافية، وتقسم منظومات التسخين الشمسية إلى نوعين وحسب طبيعة دوران المائع:

1. السخانات ذات التدوير الطبيعي Thermosyphon system:

يعتمد عمل هذا النوع من السخانات على مبدأ الفرق في كثافة المائع الناقل للحرارة بتأثير التسخين الشمسي، وبسبب هذا الفرق في الكثافة يتم تدوير السائل ذاتيا خلال المنظومة. يتغير معدل التدوير الذاتي داخل المنظومة خلال اليوم والسنة اعتمادا على كمية الطاقة الممتصة، ودرجة حرارة المائع، وشكل المنظومة، ويمتاز هذا النوع من السخانات بالبساطة وقلة التكاليف وعدم حاجتها إلى منظومة سيطرة متخصصة. يستخدم عادة نوعان من السخانات ذات التدوير الطبيعي، النوع الأول يدمج فيه خزان الماء والمجمع الشمسي في جزء واحد، أما النوع الثاني فيكون الخزان منفصلا عن المجمع الشمسي بحيث يكون مستوى فتحة خروج الماء من الخزان أعلى من مستوى الأنبوب الرئيسي، ويبين الشكل (1.4) أحد أنواع السخانات ذات التدوير الطبيعي⁽²³⁾.

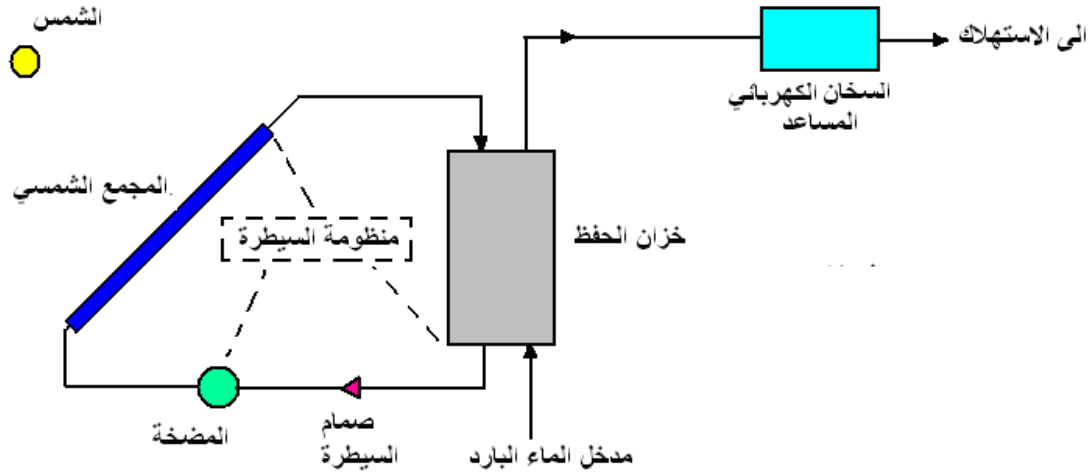


الشكل (1.4) سخان شمسي ذو تدوير طبيعي

2. السخانات ذات التدوير القسري Forced circulation system:

في هذا النوع من السخانات لا يشترط وضع الخزان أعلى من مستوى المجمع أذ تستخدم مضخة لتدوير المائع خلال المنظومة ، ويستخدم عادة في المنظومات الكبيرة ، ويكون أكثر تعقيدا من السخانات ذات التدوير الطبيعي اذ يتطلب وضع منظومة سيطرة متمثلة بالمتحسسات الحرارية التي تعطي إشارة كهربائية لتشغيل مضخة تدوير مائع نقل الحرارة عند بلوغ درجة حرارة المائع الدرجة المطلوبة وكما مبين في الشكل (2.4).

يعد تسخين المياه بالطاقة الشمسية من أكثر تطبيقات الطاقة الشمسية شيوعاً وأكثرها ملائمة من الناحية الفنية والاقتصادية في الوقت الحاضر وينتشر استعمال السخانات الشمسية في العديد من دول العالم بما فيها الدول العربية كالأردن وسوريا وفلسطين ومصر ودول الشمال الأفريقي.



الشكل (2.4) السخان الشمسي ذو التدوير القسري

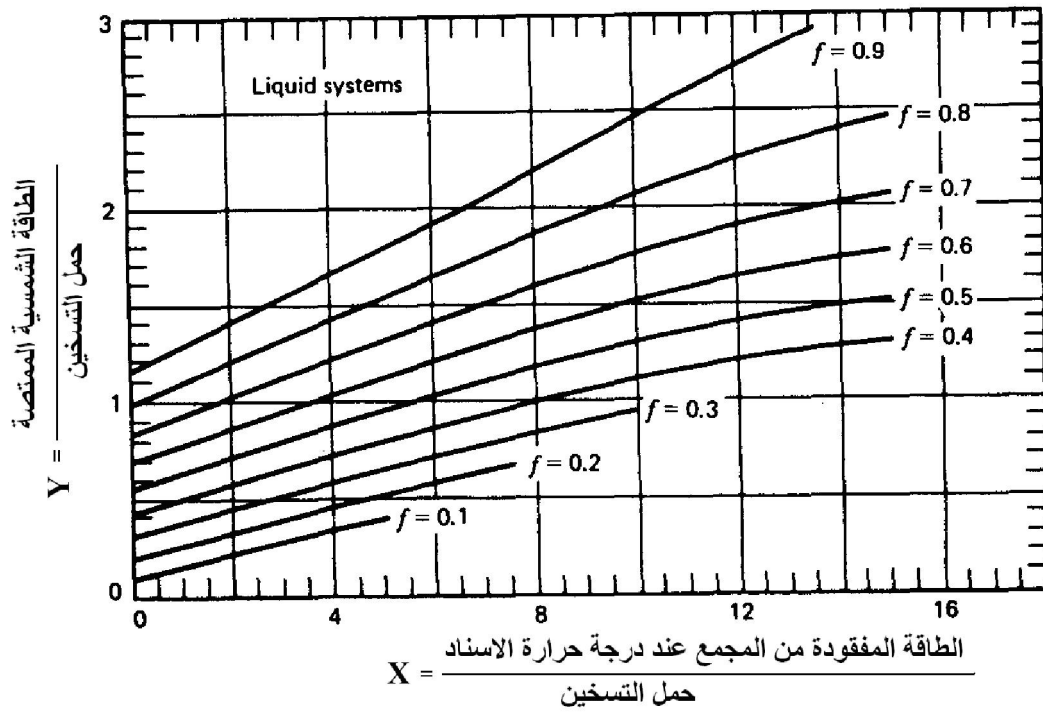
3.4 تصميم منظومات تسخين المياه:

تهدف عملية تصميم منظومات تسخين المياه الى زيادة فعالية هذه المنظومات وتقليل تكاليفه وتقسم السخانات الشمسية الى ثلاث اقسام رئيسية:

1. المجمع الشمسي.
2. اجهزة تدوير المائع (مضخة، صمامات، انابيب).
3. خزان الحفظ.

عند تصميم اي سخان شمسي فانه من المتطلب معرفة مساحة المجمعات الشمسية اللازمة لتسخين كمية معينة من الماء وكذلك حساب حجم خزان الحفظ اللازم لهذه المنظومة. تصمم مساحة المجمعات الشمسية على اساس معلومات مناخية شهرية وسنوية وكفاءة المجمعات الشمسية وكمية الاستهلاك الشهري من الماء الساخن وتستخدم طريقة مبسطة وشائعة وهي طريقة خارطة f – (f -chart method)⁽⁶⁾ لتصميم منظومات تسخين المياه بأستخدام الطاقة الشمسية باستعمال مجمعات شمسية مستوية وتدوير قسري كما في الشكل (3.4) و خارطة f – تمثل العلاقة بين ثلاث كميات لابعدية هي:

1. الطاقة المفقودة من المجمع عند درجة حرارة الاسناد مقسومة على حمل التسخين ويرمز لها بـ X .
2. الطاقة الشمسية الممتصة مقسومة على حمل التسخين ويرمز لها بـ Y .
3. نسبة الطاقة التي تؤمن بواسطة الطاقة الشمسية الى الطاقة الكلية المستهلكة ويرمز لها بـ f .



الشكل (3.4) خارطة f لمنظومات تسخين المياه بالطاقة الشمسية.

ويعتمد المقدار X على مدى كفاءة المجمع الشمسي، اما المقدار Y فيعتمد على مقدار الطاقة الشمسية الساقطة والموقع الجغرافي لمكان المنظومة واستتبط هذا الشكل من عدد كبير من النتائج العملية والمحاكاة العملية لمنظومات مختلفة. ويمثل المتغير نسبة الطاقة التي تؤمن بواسطة الطاقة الشمسية الى الطاقة الكلية المستهلكة، اي:

$$f = \frac{Q_u}{L} \quad \dots (4.1)$$

حيث ان L هي كمية الطاقة اللازمة لتسخين كمية الماء المستهلكة وتحسب بواسطة المعادلة الآتية:

$$L = \dot{m} * c_p * (T_H - T_C) * N \quad \dots (4.2)$$

حيث ان :

L = الطاقة اللازمة لتسخين كمية معينة من الماء بالشهر (Joule/month، جول / شهر)

$\dot{m}$ = كمية الماء الساخن المستهلك يوميا (Liter/day، لتر /يوم).

c_p = الحرارة النوعية للماء = 4180 J/kg.°C

T_H = درجة حرارة الماء الساخن (°C).

T_C = درجة حرارة الماء البارد (°C).

N = عدد ايام الشهر.

ويمكن التعبير عن الشكل (3.4) والذي يمثل نتائج التجارب المختبرية والمحاكاة النظرية لعدد كبير من المنظومات الشمسية بالمعادلات الآتية:

$$f = 1.029Y - 0.065X - 0.245Y^2 + 0.0018X^2 + 0.0215Y^3 \quad \dots (4.3)$$

ولغرض الوصول الى ترتيب محدد لتحديد الأداء الحراري لمنظومات التسخين الشمسية تعتمد الخطوات الآتية:

1. يحسب المتغير X والذي يمثل الطاقة المفقودة من المجمع عند درجة حرارة الإسناد مقسومة على حمل التسخين من المعادلة الآتية:

$$X = F_R U_L * \left(\frac{F'_R}{F_R} \right) * (T_{ref} - \bar{T}_a) * \Delta t * \frac{A_c}{L} \quad \dots (4.4)$$

وهذه المعادلة معتمدة للتطبيق لقيم X تتراوح بين $0 \leq X \leq 18$ وهي معتمدة على مجموعة من المتغيرات يمكن ان تحسب كآتي:

$F_R U_L$ هو ميل منحنى كفاءة المجمع الشمسي المستخدم في المنظومة (مراجعة الفصل الثالث – صفحة 122-) وهي خاصية تعتمد على تصميم المجمع.

$\frac{F'_R}{F_R}$ هو التصحيح نتيجة المبادلات الحرارية الموجودة في المنظومة ويعطى بالمعادلة الآتية:

$$\frac{F'_R}{F_R} = \left[1 + \left(\frac{A_c * F_R * U_L}{(\dot{m} * c_p)_c} \right) \left(\frac{(\dot{m} * c_p)_c}{\varepsilon(\dot{m} * c_p)_{\min}} - 1 \right) \right]^{-1} \quad \dots (4.5)$$

حيث ان :

ε فعالية المبادل الحراري

$(\dot{m} * c_p)_{\min}$ السعة الحرارية الدنيا لمائعي التشغيل.

A_c هي مساحة المجمع الشمسي (m^2).

T_{ref} هي درجة الحرارة الاسنادية وتؤخذ $100^\circ C$ وهي مشتقة عمليا.

$\bar{T}_a$ هو متوسط درجة حرارة الهواء الخارجي خلال الشهر لمنطقة وجود المنظومة الشمسية .

Δt العدد الكلي للثواني خلال الشهر.

2. يحسب المتغير Y والذي يمثل الطاقة الشمسية الممتصة مقسومة على حمل التسخين من المعادلة الآتية:

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n * \left(\frac{F'_R}{F_R} \right) * \left(\frac{(\tau\alpha)_{av}}{(\tau\alpha)_n} \right) * \bar{H}_T * N * \frac{A}{L} \quad \dots (4.6)$$

و هذه المعادلة صحيحة للتطبيق لقيم Y تتراوح بين $0 \leq Y \leq 3$ وهي معتمدة على مجموعة من المتغيرات، هي:

$(\tau\alpha)_n$ هي حاصل ضرب نفاذية الأغذية الزجاجية للمجمع وامتصاصية اللوح الماص للمجمع للأشعة الشمسية الساقطة بصورة عمودية على سطح المجمع.

النسبة $\frac{\tau\alpha}{(\tau\alpha)_n}$ هي التصحيح في قيمة $(\tau\alpha)$ الناتج عن تغير زاوية السقوط للأشعة على

$$\frac{(\tau\alpha)_{av}}{(\tau\alpha)_n} = 0.94 - 0.96$$

المجمع وتؤخذ ما بين

N هي عدد الأيام بالشهر.

$\bar{H}_T$ المتوسط الشهري للإشعاع الساقط على سطح مائل مثل المجمع الشمسي (J/m^2) ويحسب

المتوسط الشهري للإشعاع الساقط على سطح مائل باستخدام المعادلة الآتية:

$$\bar{H}_T = \bar{R} * \bar{H} \quad \dots (4.7)$$

حيث ان $\bar{H}$ هو المتوسط الشهري للإشعاع اليومي الساقط على سطح أفقي.
 $\bar{R}$ هي النسبة بين المتوسط الشهري للإشعاع اليومي الساقط على سطح مائل إلى ذلك الساقط على سطح أفقي ويحسب من المعادلة الآتية:

$$\bar{R} = (1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}})\bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d * (1 + \cos \beta)}{2\bar{H}} + \frac{s * (1 - \cos \beta)}{2} \quad \dots (4.8)$$

حيث ان:

$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$: نسبة الإشعاع المنتشر إلى الإشعاع الكلي وتحسب هذه النسبة عند إي موضع ما من المعادلات الآتية:

$$1. \quad 0.3 \leq \bar{K}_T \leq 0.8 \text{ و } h_o \leq 81.4^\circ$$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.391 - 3.56\bar{K}_T + 4.189\bar{K}_T^2 - 2.137\bar{K}_T^3 \quad \dots (4.9-a)$$

$$2. \quad 0.3 \leq \bar{K}_T \leq 0.8 \text{ و } h_o > 81.4^\circ$$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.311 - 3.022\bar{K}_T + 3.427\bar{K}_T^2 - 1.821\bar{K}_T^3 \quad \dots (4.9-b)$$

حيث ان $\bar{K}_T$ هي قيمة المتوسط الشهري للنسبة بين الإشعاع الشمسي الحقيقي إلى الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي للأرض.

$\bar{R}_b$ هي المتوسط الشهري لنسبة الإشعاع اليومي المباشر الساقط على سطح مائل إلى نظيره الساقط على سطح أفقي وتحسب من المعادلة الآتية:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\alpha - \beta) \cos(d) \sin(h'_o) + \frac{\pi}{180} h'_o \sin(\alpha - \beta) \sin(d)}{\cos \alpha \cos(d) \sin(h_o) + \frac{\pi}{180} h_o \sin(\alpha) \sin(d)} \quad \dots (4.10)$$

حيث إن h_o هي الزاوية الساعية عند غروب الشمس لمستوى أفقي وتعطى بالمعادلة (2.8) الآتية:

$$h_o = \cos^{-1}[-\tan(d) * \tan(\alpha)]$$

و h'_o هي الزاوية الساعية عند غروب الشمس لسطح مائل وتعطى بالمعادلة الآتية:

$$h'_o = \text{MIN}(h_o, \cos^{-1}[-\tan(\alpha - \beta) * \tan(d)]) \quad \dots (4.11)$$

حيث تؤخذ اقل القيمتين داخل القوس الموجود في المعادلة (4.11).

s : هي انعكاسية الأرض وتؤخذ من الجدول (2.2) في الفصل الثاني.

β : زاوية ميلان السطح.

ان المعادلات السابقة تستخدم لكل منظومات التدفئة الشمسية والتي تشمل منظومات تدفئة الهواء والتسخين الشمسي وفي الحقيقة فان حمل تسخين المياه يشكل نسبة 20% فقط من الحمل الكلي وهي كمية صغيرة نسبيا ، اما في حالة تصميم منظومات تسخين المياه فقط فان الامر يتطلب تعديلا لمعادلة المتغير X ليشمل تأثير كلا من T_m (درجة الحرارة المتوسطة لماء الاسالة) و T_w (درجة حرارة الماء الساخن المطلوبة وتؤخذ عادة 60°C) لتصبح بالشكل الآتي:

$$\frac{X_C}{X} = \frac{1.16 + 1.18T_w + 3.86T_m - 2.32\bar{T}_a}{100 - \bar{T}_a} \quad \dots (4.12)$$

وتتراوح قيمة f بين الصفر (عندما يغطي الحمل الحراري بالطاقة التقليدية كالكهرباء) والواحد (عندما يغطي الحمل الحراري بالطاقة الشمسية بالكامل). وتستخدم العلاقات الرياضية السابقة لمجمعات شمسية باتجاه الجنوب وبزوايا ميلان تتراوح بين 30° و 90° وحجم خزان الحفظ يتراوح بين 37.5 و 300 لتر لكل متر مربع من مساحة المجمعات الشمسية.

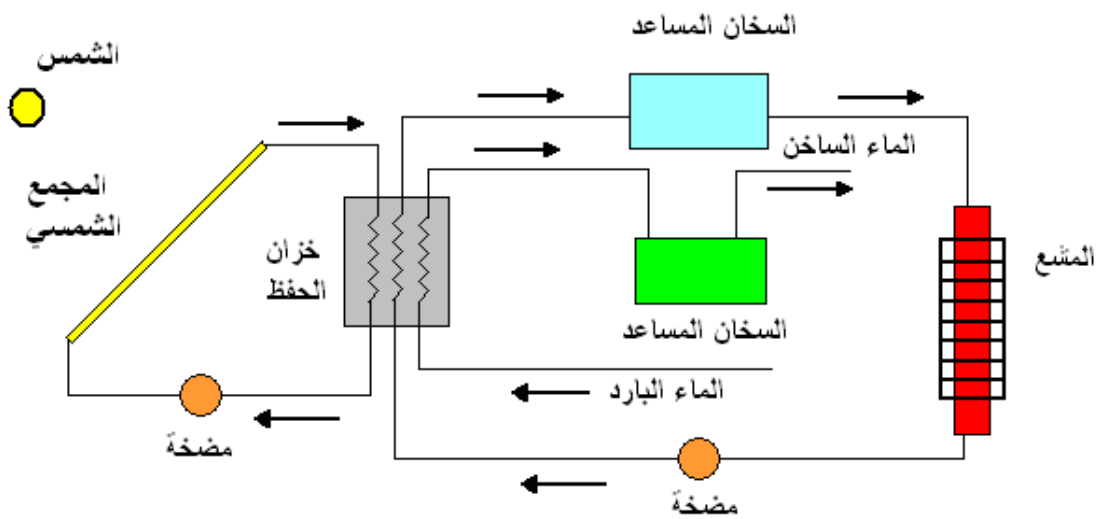
4.4 التدفئة بالطاقة الشمسية:

إن تدفئة المنازل بالطاقة الشمسية تشابه في فكرتها الأساسية تسخين المياه. و يمكن استخدام الطاقة الشمسية لتوفير ظروف حرارية مناسبة داخل المباني بطريقتين رئيسيتين⁽²⁴⁾:

1.4.4 منظومات التدفئة الفعالة (Active Solar Heating):

ويتم فيها تدوير المائع الساخن (ماء أو هواء) بواسطة مضخة أو دافعة هواء، فالحرارة تدخل إلى المنزل عن طريق تسخين الهواء أو الماء ، ففي نظام التدفئة بالهواء يتم تسخين الهواء بالمجمعات الشمسية ومن ثم دفعه إلى داخل البناية بواسطة دافعات هواء ولا يختلف تصميم المجمع الشمسي الخاص لتدفئة الهواء عن المجمع الشمسي المستخدم لتسخين المياه إلا في تصميم مجرى المائع حيث يصمم المجمع على شكل مستطيل ويكون خالي من شبكة الأنابيب المستعملة في مجمعات تسخين المياه.

معظم المنظومات البسيطة تستخدم الماء كناقل للحرارة كما في الشكل (4.4) ، وهي تتكون من مجمعات شمسية تنصب عادة على سطح البناية أو في الفضاء الخارجي المجاور لها ، وخزان معزول حراريا (يوضع عادة في مكان منعزل من البناية)، ومبادل حراري ، و سخان مساعد (كهربائي ،نفطي ، غازي) يستخدم في الأيام الغائمة أو عند عدم كفاية الحمل المجهز من المجمعات الشمسية و المشعات الحرارية (Heat Radiations) التي تقوم بتدفئة الحيز (توضع في أماكن مختلفة منه، على حسب التوزيع الحراري للبناية). و بالإضافة إلى ذلك فإن المنظومة تحتوي على أنابيب توصيل و مضخات و أجهزة سيطرة. وفي قسم آخر من المجمعات الشمسية يكون الهواء هو المائع المستخدم، و تتكون المنظومة في هذا النوع من مجمعات شمسية وخزان يحتوي على الحصى أو الصخور وسخان مساعد (شكل 5.4)، حيث يستخدم في هذه المنظومات الهواء الساخن المجهز أو المتوفر في المجمعات الشمسية خلال النهار لتدفئة الحيز و لتسخين الصخور في الخزان و خلال الليل أو الأيام الغائمة يتم تفريغ الحرارة من الخزان، و عند عدم كفاية الطاقة الموجودة فيه يتم الاستعانة بالسخان المساعد لتغطية النقص في الحرارة المطلوبة (الحمل). وتكون منظومات التدفئة التي تستخدم الهواء كمائع تشغيل أقل سعرا في الغالب وليس لها مشاكل تسرب مقارنة بالمنظومات التي تستخدم الماء كناقل للحرارة نظرا إلى أن الهواء أقل كفاءة في نقل الحرارة من الماء فإن المنظومات الهوائية تحتاج إلى حجم خزان أكبر بمرات عديدة من المنظومات التي تستخدم الماء ولهذا فإن المنظومات التي تستخدم الماء هي الشائعة الاستخدام في منظومات التدفئة الحالية.



الشكل (4.4) منظومة تدفئة فعالة تستخدم الماء كناقل للحرارة

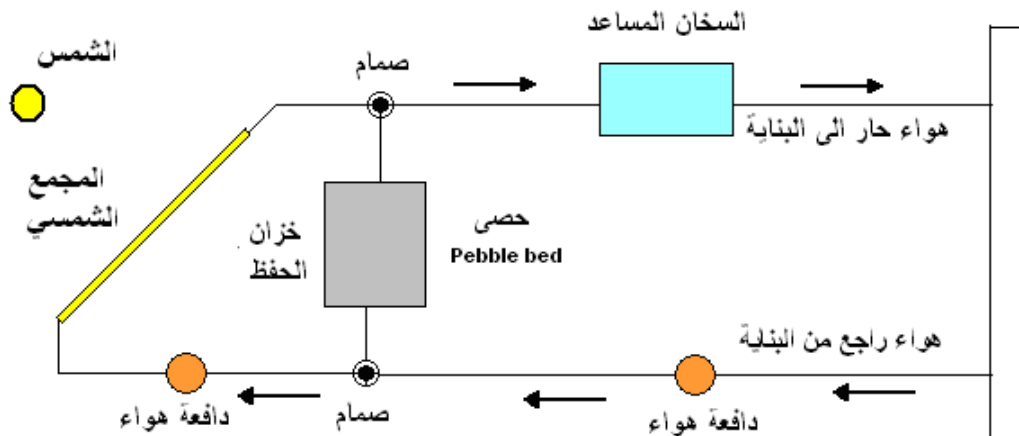
إن درجة حرارة المياه المطلوبة هي نفسها المطلوبة في أنظمة تسخين المياه، أي ما يقارب 60°C ، إما في أنظمة تسخين الهواء فيتم رفع درجة حرارة الهواء إلى 35°C ، والسبب في اختلاف درجة الحرارة في النظامين هو إن الهواء المسخن يدفع مباشرة إلى الحيز المطلوب تدفئته دون الحاجة إلى الدخول في عمليات تبادل حراري مع موائع أخرى، بينما في أنظمة التدفئة بالماء الساخن يتم استعمال المبادلات الحرارية لنقل التأثير الحراري من الماء الساخن إلى الهواء، وعلى ذلك يتطلب الأمر أن تكون درجة حرارة الماء الداخل إلى المبادل الحراري أعلى من درجة حرارة الهواء الخارج من المبادل الحراري بحدود $20-25^{\circ}\text{C}$. لتقويم أداء منظومات التدفئة الفعالة التي تستعمل الماء كوسيط تشغيل، تستخدم طريقة خارطة – f المشروحة في الفقرات السابقة مع الأخذ بنظر الاعتبار استخدام حمل التدفئة وتسخين المياه بدلا من حمل التسخين فقط وتقدر قيمة L تبعا للعلاقة الآتية:

$$L = L_H + L_w \quad \dots (4.13)$$

حيث L_H هي حمل التدفئة للشهر تحت الدراسة و L_w هي حمل التسخين للمياه خلال الشهر تحت الدراسة ويعطى حمل التسخين للمياه باستخدام المعادلة (4.2) ويمكن التعرف على طرائق حساب حمل التدفئة بمراجعة كتب تكييف الهواء.

أما نظم التدفئة التي تستخدم الهواء كما في الشكل (5.4) فتستخدم نفس التعريفات المعطاة بالمعادلات (4.5) و (4.6) السابقة على التوالي مع حساب قيمة المتغير f بالشكل الآتي:

$$f = 1.04Y - 0.065X - 0.159Y^2 + 0.00187X^2 + 0.0095Y^3 \quad \dots (4.14)$$



شكل (5.4) منظومة تدفئة تستخدم الحصى كخازن للحرارة

وهذه المعادلة تم حسابها تحت الظروف القياسية الآتية:

1. معدل سريان الهواء في المجمعات الشمسية = 10 liter/sec لكل متر مربع واحد من مساحة المجمع.

2. سعة خزان الحفظ الحاوي للحصى = 0.25 m³ لكل متر مربع من مساحة المجمع.
وعند تغير معدل سريان الهواء في المجمع عن القيمة القياسية، تعدل قيمة X الى القيمة التالية X_C بالشكل الآتي:

$$\frac{X_C}{X} = \left(\frac{\dot{m}_a}{10} \right)^{0.28} \quad \dots (4.15)$$

ويشترط ان يكون:

$$5 \leq \dot{m}_a \leq 20$$

حيث $\dot{m}_a$ بوحدات (liter/s) لكل متر مربع واحد من مساحة المجمع.
اما في حالة اختلاف حجم خزان الحفظ عن الحجم القياسي فيجب ان تعدل قيمة X الى القيمة التالية X_C بالشكل الآتي:

$$\frac{X_C}{X} = \left(\frac{0.25}{V} \right)^{0.3} \quad \dots (4.16)$$

ويشترط ان يكون:

$$0.125 \leq V \leq 1$$

حيث V بوحدات م³ لكل متر مربع واحد من مساحة المجمع.

2.4.4 منظومات التدفئة السلبية (Passive solar heating):

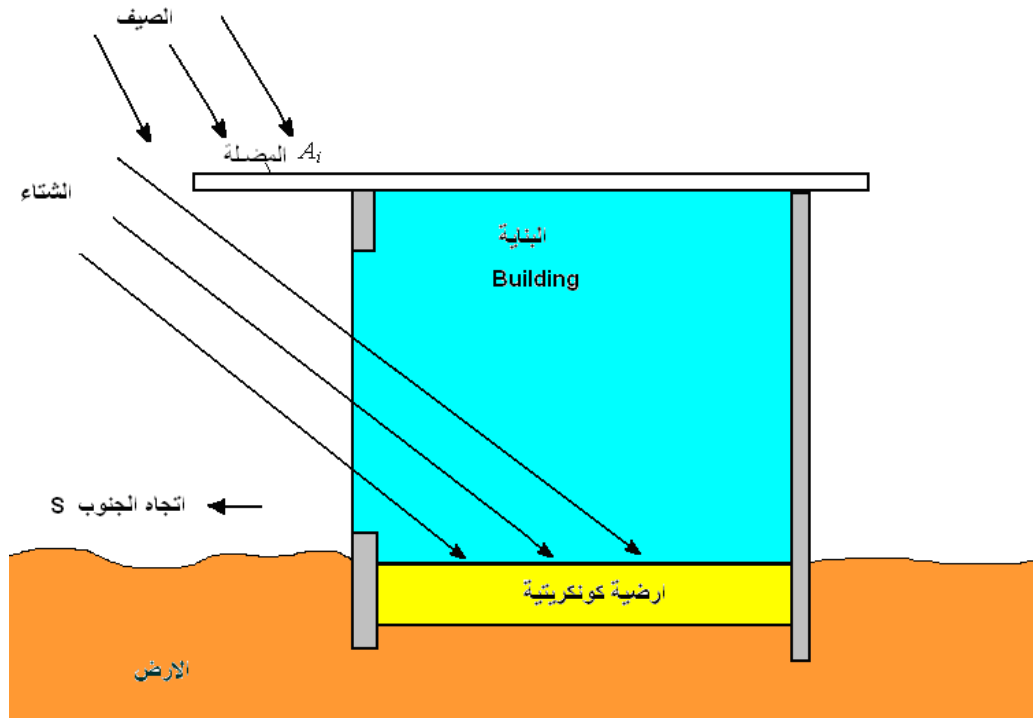
يمكن استخدام منظومات غير فعالة أو سلبية – أي لا تحتاج إلى أجهزة ميكانيكية مساندة وإنما تقوم بتمرير الإشعاع الشمسي مباشرة لأغراض تدفئة المباني، إذ تكون البناية أو المنزل هي نفسها المجمع الشمسي و الخزان. و تسري الطاقة في هذه المنظومات بصورة طبيعية و بدون أجهزة تدوير ميكانيكية مثل المضخات و دافعات الهواء. ويتم السماح للأشعة الشمسية بالدخول بأكبر قدر ممكن من خلال النوافذ خلال النهار، و بذلك يتم خزن الحرارة داخل الحيز المدفأ . و لتقليل 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 . و المواصفات

الرئيسية المطلوبة للأنظمة السلبية هي توفر عزل حراري جيد ووجود نوافذ في الجانب الجنوبي من المبنى (لكون هذا الاتجاه هو الذي يستلم أكبر معدل من الإشعاع الشمسي خلال اليوم) بالإضافة إلى وجود مواد خزن للطاقة الفائضة. ويمكن تقسيم منظومات التدفئة هذه إلى ثلاثة أنواع:

1. منظومات الكسب المباشر:

في منظومات الكسب المباشر تستخدم النوافذ على الجانب الجنوبي للسماح بدخول الأشعة الشمسية. وتوضع مواد الخزن الحراري، كالكونكريت والحجر و الطابوق، داخل الحيز لامتصاص الأشعة الشمسية، كما أن جعل الأرضية من الحصى والكونكريت هو أحد الأمثلة لهذه الأنظمة كما هو مبين بالشكل (5.4) إذ تقوم هذه الأرضية الكونكريتية وجدران الحيز بامتصاص الأشعة الشمسية خلال النهار وإشعاعها مرة أخرى إلى الحيز خلال الليل. تحسب كمية الطاقة الحرارية الداخلة إلى الحيز من خلال هذا الشباك الذي مساحته A_w خلال أي وقت من المعادلة الآتية:

$$Q_r = A_w [\alpha (I_b R_b \tau_b f_i + I_d \tau_d F_{r-s}) - U_l (T_r - T_a)] \quad \dots (4.17)$$



شكل (5.4) منظومة تدفئة سلبية تستخدم النوافذ لامتصاص الأشعة الشمسية والأرضية الكونكريتية لخزن الحرارة.

حيث α الامتصاصية الفعالة للغرفة او الحيز الموجود فيه الشباك ويحسب من المعادلة الاتية:

$$\alpha = \frac{\alpha_i}{\alpha_i + (1 - \alpha_i) \tau_d \frac{A_w}{A_i}} \quad \dots (4.18)$$

τ_b نفاذية زجاج النوافذ للاشعاع المباشر.

U_l معامل الخسائر لفقدان الحرارة من الشباك الى المحيط الخارجي.

I_b الاشعاع المباشر.

I_d الاشعاع المنتشر.

A_i المساحة الداخلية للغرفة.

α_i امتصاصية المساحة الداخلية في الغرفة للاشعاع المنتشر.

τ_d نفاذية زجاج النوافذ للاشعاع المنتشر.

f_i = معامل يبين تأثير وجود مضلة على الشباك ويساوي 1 عند عدم وجود مضلة على الشباك.

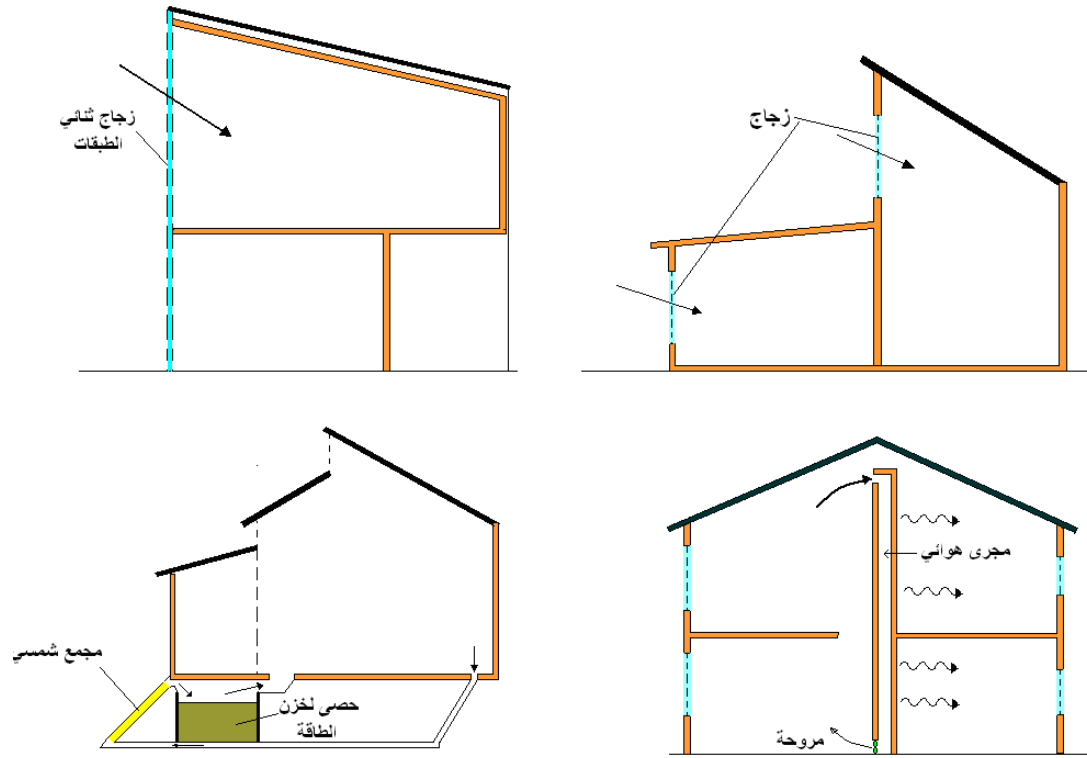
F_{r-s} = معامل الشكل بين الشباك والسماء = 0.5 للشبابيك العمودية.

يطبق مفهوم منظومات الكسب المباشر بصورة رئيسية في التصاميم الحديثة للمنازل والبنيات عن طريق الاستفادة من الطاقة الشمسية لتدفئة البنيات بصورة طبيعية ويبين الشكل (6.4) بعض هذه التصاميم.

2. منظومات الكسب غير المباشر:

في منظومات الكسب غير المباشر يتم جمع و خزن الطاقة الشمسية في جزء من المبنى، و يستخدم التبادل الحراري الطبيعي بوساطة التوصيل و الحمل في توزيع الحرارة إلى بقية البيت. ومثال جيد على هذه المنظومات هو جدار ترومب (Trombe Wall) كما في الشكل (7.4)⁽²⁵⁾. في هذا الجدار يتم وضع كتلة كبيرة من مواد البناء كالكونكريت أو الطابوق، مثلاً على بعد 10 cm من طبقة زجاجية في الجانب الجنوبي من المبنى. و يقوم الإشعاع الشمسي بالمرور من خلال الزجاج ويتم امتصاصه من قبل الجدار المصبوغ باللون الأسود الذي تصل درجة حرارته سطحه أحياناً إلى درجة عالية خلال النهار. و تنتقل هذه الحرارة إلى الهواء المحصور بين الزجاج و الحائط فتؤدي إلى رفع درجة حرارته و بذلك تقل كثافته و ينتقل

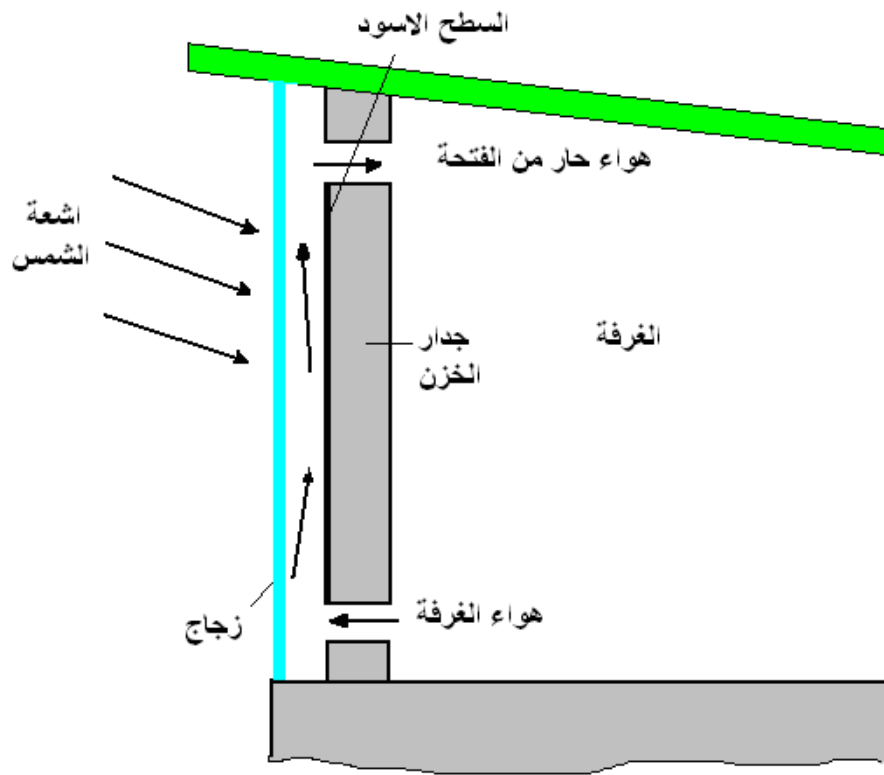
إلى الحيز من الفتحة العلوية. و يتم دخول كمية من الهواء البارد بدله من خلال الفتحة السفلية فيسخن مرة أخرى و ينتقل إلى الحيز، و هكذا تستمر العملية خلال النهار. وفي أثناء الليل يتم غلق الفتحات لمنع تسرب الحرارة إلى الخارج، و بهذا يتم تفريغ الحرارة المخزونة في الحائط إلى الحيز بواسطة الحمل و الإشعاع.



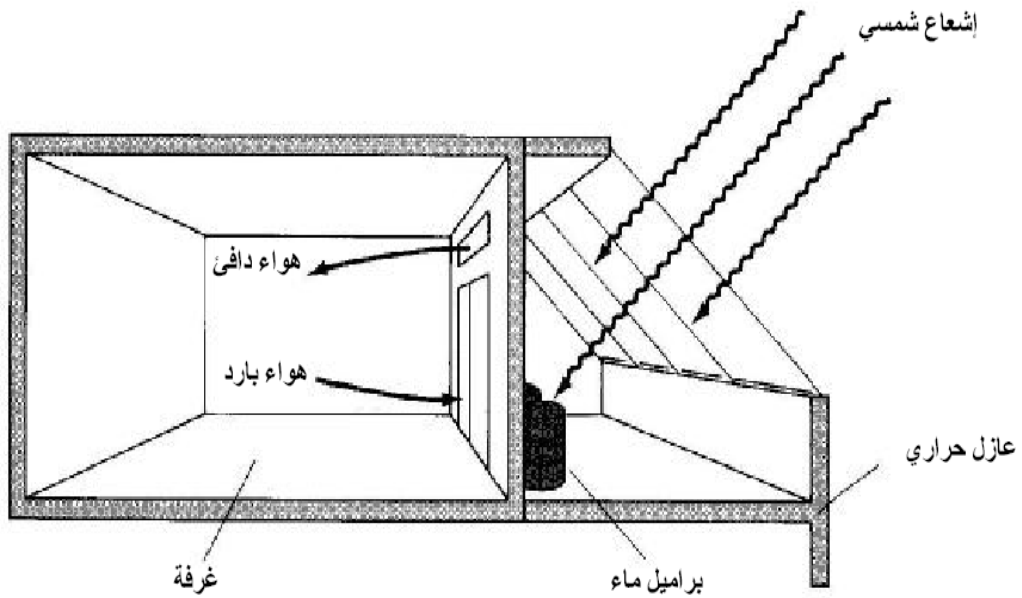
الشكل (6.4) بعض تصاميم البيوت الشمسية.

3. منظومات البيوت الزجاجية الملاصقة للمبنى.

أما منظومات البيوت الزجاجية الملاصقة للمباني فيمكن استخدامها لأغراض الزراعة و التدفئة في آن واحد، و تقوم بنقل الحرارة المحبوسة في البيت الزجاجي إلى داخل حيز المبنى. وكما في بقية المنظومات الأخرى فإن خزن الحرارة و العزل الجيد لأرضية البيت الزجاجي وجوانبه هما من المتطلبات المهمة في هذه المنظومات. إن الأرضية الكونكريتية السميكة و البراميل المملوءة بالماء هي أجهزة خزن شائعة كما مبين في الشكل (8.4).



الشكل (7.4) جدار ترومب



الشكل (8.4) بيت زجاجي ملاصق لأغراض التدفئة يحتوي على براميل ماء لأغراض الخزن.

5.4 التبريد بالطاقة الشمسية:

اتسع نطاق استخدام الطاقة الشمسية خلال العقود الأخيرة في مجال التبريد والتجميد، وتعتبر عملية التبريد من العمليات المهمة في الوقت الحاضر، فقد شاع استعمال التبريد و التجميد في معظم أنحاء العالم و ذلك أما لأغراض تكييف هواء المحلات و الدور أو لتجميد الأطعمة وحفظ الخضار و الفواكه و اللحوم و حفظ الأدوية و بعض المواد و المركبات الكيميائية ولما كانت الدول التي تتمتع بجو صحو مستمر خلال فصل الصيف علاوة على ارتفاع عالي في درجات الحرارة، تتطلب استخدام التبريد لتكييف الدور و الأبنية العامة و المستشفيات و غيرها، لذا شاع استخدام الطاقة الشمسية خلال فصل الصيف الذي تكون فيه هذه الطاقة أعلى ما يمكن لأغراض التبريد، يمكن استخدام الطاقة الشمسية في تبريد المباني أيضا بطريقتين رئيسيتين هما:

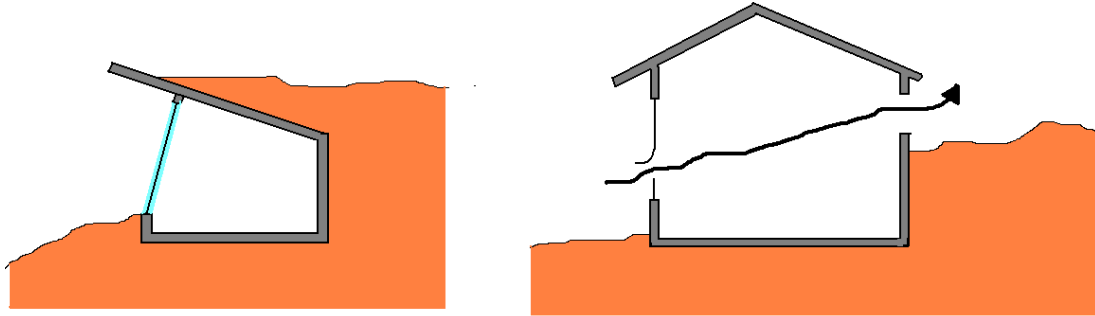
1.5.4 منظومات التبريد الفعالة:

يتم استخدام الطاقة الشمسية في منظومات التبريد الفعالة باستخدام أسلوب التثليج الامتصاصي (Absorption Refrigeration)، وهي أول منظومة تكييف هواء استخدمت الطاقة الشمسية في تشغيلها، إن منظومات التبريد الامتصاصية (Absorption Systems) مشابهة لمنظومات التبريد الانضغاطية الاعتيادية إلا أنها تختلف عنها بعدم وجود ضاغط (Compressor). ويتم في هذه المنظومات إبدال الضاغط بمولد تتم تغذيته من مصدر شمسي كما هو مبين بالشكل (9.4). وفي هذه المنظومات يستخدم أحد المحلولين عوضا عن الفريون المستخدم في منظومات التبريد الانضغاطية – وهما خليط من الأمونيا والماء أو خليط من الليثيوم برومايد والماء. التي تستخدم فيها منظومات التبريد الامتصاصية إذ تستمد حاجتها من الطاقة من مصادر الطاقة الشمسية، ومنظومات التبريد السلبي وتقنيات منظومات التبريد السلبية والفعالة كافة ميسرة في الوقت الحاضر، ولكن الكلفة الأولية العالية للمنظومات الفعالة تحد من استخدامها على نطاق واسع في الوقت الحاضر.

كما يمكن استخدام أسلوب التثليج الانضغاطي (Compression Refrigeration) في تكييف الهواء باعتبارها طريقة موثوق بها وذات كفاءة عالية. ولكنها تحتاج إلى طاقة داخلية على شكل شغل. وبما إن تحويل الطاقة الشمسية إلى شغل يعطي كفاءة غير مقبولة، لذلك فأن استخدام الطاقة الشمسية في هذه المنظومة يجعلها اقل اقتصادية. وتجهز المنظومة بالطاقة الكهربائية اللازمة من محطة الطاقة الشمسية المركزية أو من خلايا كهروضوئية.

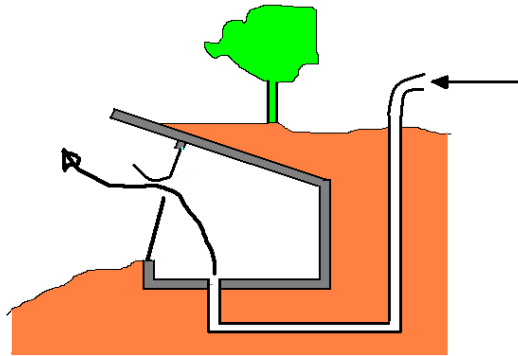
أما في المناطق ذات الرطوبة العالية فإن معظم المنظومات السلبية لا تعمل بكفاءة، ومنظومات التبريد التبخيرية قد لا تعمل بكفاءة وقد لا تعمل إطلاقاً في المناطق ذات الرطوبة العالية، كما أن هذا النظام لا يعمل في المناطق ذات الإشعاع الليلي للحرارة من الأبنية

إلى السماء لكون السماء غير صافية و ملبدة 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 للتبريد

مرور الهواء بصورة طبيعية



استخدام التربة لأغراض تبريد الهواء

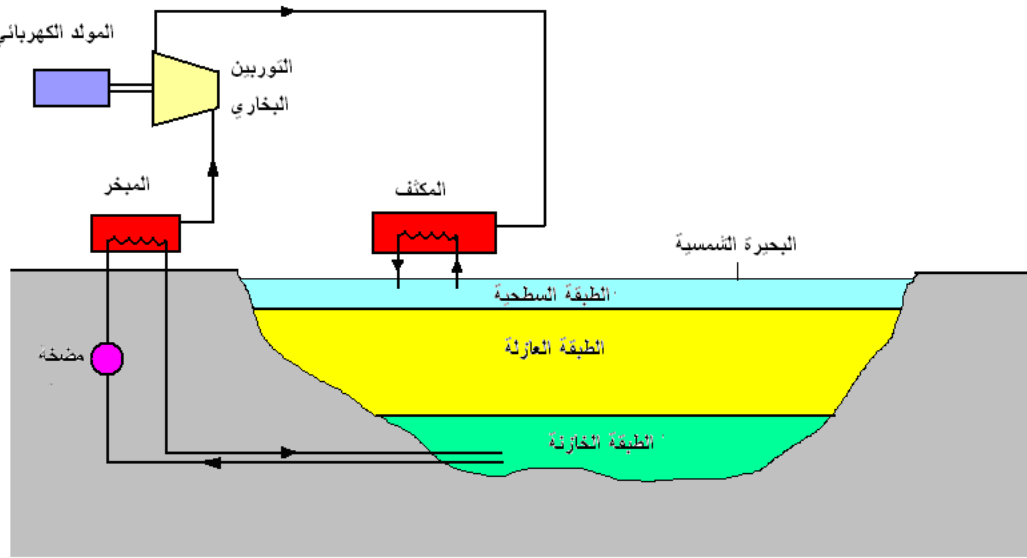
الشكل (10.4) بعض طرق التبريد السلبي

6.4 البحيرات الشمسية Solar pond:

البحيرات الشمسية عبارة عن بحيرات مالحة يزداد تركيز الملح مع عمق البحيرة، ويستخدم الملح لأحداث استقرارية للمائع مع تدرجات الكثافة المركزة. واستخدمت هذه البحيرات لجمع وتخزين الطاقة الشمسية، إذ يتركز الماء المالح في قعر البحيرة والماء الصافي على سطح البحيرة وإذا كان الماء صافيا بدرجة تكفي لنفاذ أشعة الشمس إلى قعر البحيرة فإنه سيتم خزن الطاقة الحرارية في المنطقة السفلى ذات التركيز الملحي العالي⁽²⁶⁾.

تتكون البحيرة الشمسية من ثلاث طبقات كما في الشكل (11.4) هي:

1. الطبقة الأولى والواقعة في أعلى البحيرة تسمى الطبقة السطحية (Surface layer) او الطبقة الحملية العليا (Upper convective zone) وتكون قليلة العمق (بحدود 0.1 m) وهي ذات تركيز ملحي قليل جدا (اقل من 1000 ppm).
 2. الطبقة العازلة (Insulation layer) او منطقة التدرج الحراري وهي واقعة تحت الطبقة السطحية وتندرج فيها الملوحة إلى أن تصل إلى 20000 ppm ويتراوح عمقها بين 0.5 إلى 0.7 m وتعمل هذه الطبقة على منع تسرب الحرارة إلى الأعلى.
 3. أما الطبقة الأخيرة والواقعة في اسفل البحيرة فتدعى بالطبقة الخازنة (Storage layer) وتكون فيها الملوحة متجانسة وعالية تصل إلى أكثر من 20000 ppm.
- تتفد الأشعة الشمسية خلال طبقات البحيرة إذ يتم امتصاص اكبر كمية ممكنة من الإشعاع الشمسي الواصل إلى منطقة الخزن ويمكن أن تصل درجة حرارة المحلول الملحي بعد فترة من الزمن الى ما يقارب 95°C . تفقد الحرارة من المنطقة الخازنة إلى الأعلى عن طريق التوصيل فقط. ولأن الموصلية الحرارية للماء قليلة فأن كمية التسرب الحراري إلى الأعلى تكون قليلة. تم اكتشاف البحيرات الشمسية ذات التدرج الحراري كظاهرة طبيعية في بداية القرن العشرين في بعض البحيرات الطبيعية الموجودة في المناطق المالحة في هنغاريا ومنها بحيرة (Medve)، حيث ارتفعت درجة حرارتها في نهاية فصل الصيف الى أكثر من 70°C عند عمق 1.32 m ، بينما كانت درجة حرارة سطح البحيرة مقاربة الى درجة حرارة الهواء المحيط وكان قاع البحيرة يحتوي على ملح كلوريد الصوديوم بتركيز 26%. وتوجد مجموعة من البحيرات الشمسية الطبيعية منتشرة في العالم ويمكن ان تنشأ البحيرات الشمسية بصورة صناعية للحصول على تدرج حراري مناسب لتوليد الطاقة الحرارية.
- تتميز البحيرات الشمسية بفوائد كثيرة متمثلة بدرجات حرارة التشغيل العالية نسبيا و إمكانية الخزن لفترات طويلة والكلفة القليلة بالمقارنة مع المنظومات الشمسية الأخرى، إضافة إلى ذلك فأن درجة الحرارة في قاع البحيرة تبقى ثابتة خلال الليل والنهار وذلك لكبر مساحة البحيرة ولهذا نستطيع الحصول على طاقة حرارية مستمرة. يبين الشكل (11.4) منظومة لتوليد الطاقة الكهربائية بواسطة البحيرات الشمسية، حيث يتم تشغيل التوربين عن طريق تبخير مائع له درجة غليان منخفضة مثل الفريون او البروبان. كما يمكن استخدام الماء الساخن الموجود اسفل البحيرة مباشرة عن طريق مبادل حراري لتدفئة البيوت الزجاجية لزراعة المحاصيل



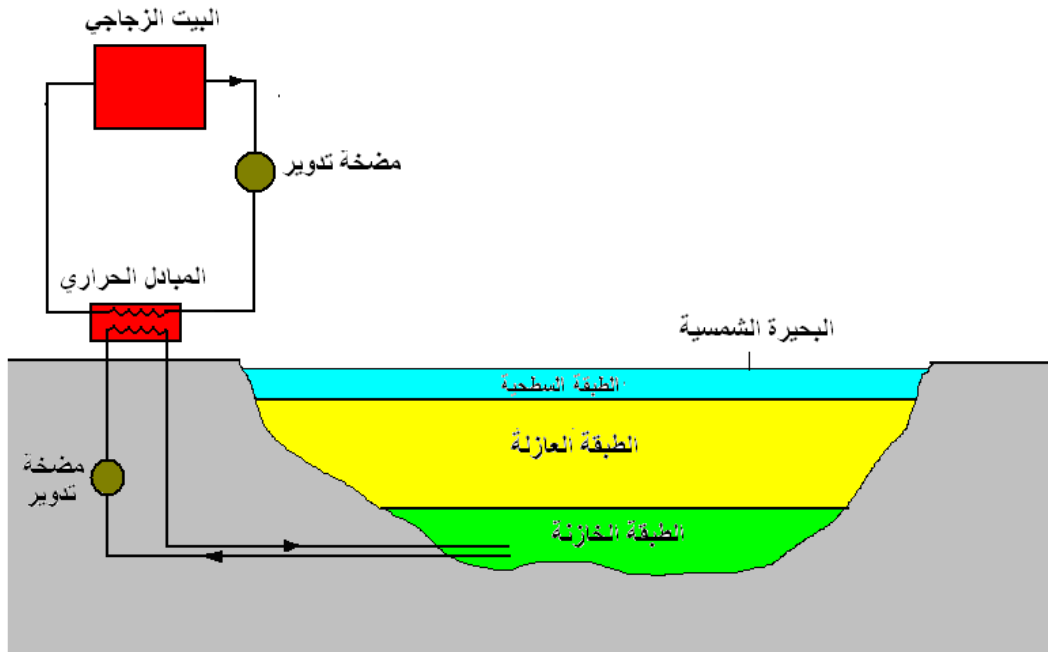
شكل (11.4) بحيرة شمسية تستخدم لتوليد الطاقة الكهربائية

الزراعية الصيفية شتاءا ويبين الشكل (12.4) رسما تخطيطيا لبحيرة شمسية تعمل لهذا الغرض، حيث يتم سحب المحلول الملحي الساخن من الطبقة الخازنة السفلى الى مبادل حراري موضوع اما داخل البحيرة في حالة كون البحيرة صغيرة الحجم، او خارج البحيرة في حالة كونها كبيرة. ويحدث تبادل حراري بين المحلول الملحي الساخن والمائع المستخدم للتدفئة (الماء او الهواء) ويتم ارجاع المحلول الملحي البارد الخارج من المبادل الى البحيرة بطريقة تمنع حدوث اضطراب داخل البحيرة وتؤثر على الانحدار الحراري والملحي خلال البحيرة وقد تم بناء بعض من هذه المنظومات في الولايات المتحدة الأمريكية والسعودية وقطر.

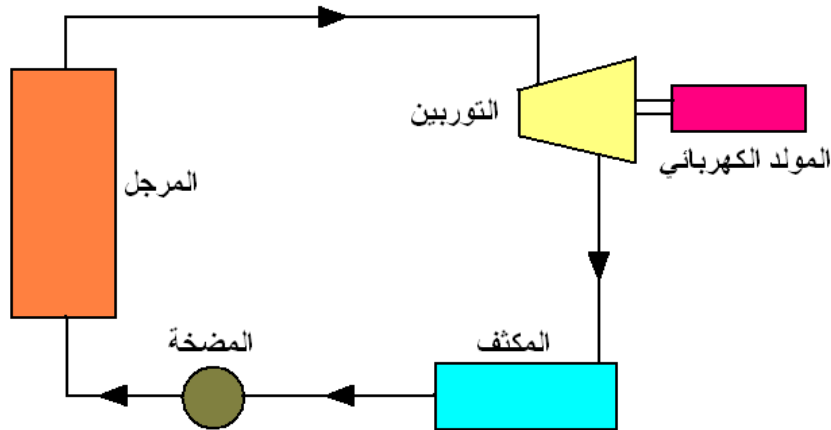
7.4 أنظمة توليد الطاقة الكهربائية باستخدام الطاقة الشمسية:

يعد استخدام الطاقة الشمسية لتوليد الكهرباء من أهم منجزات الإنسان في الوقت الحاضر، ويتم توليد معظم الطاقة الكهربائية في العالم في محطات القدرة الحرارية والتي تعمل وفق دورة رانكن (Rankin cycle) كما مبين في الشكل (13.4).

ويتم توليد الكهرباء في محطات توليد الطاقة الحرارية التي تعتمد على الطاقة الشمسية بنفس الأسلوب المتبع في محطات الطاقة التقليدية إلا ان الإشعاع الشمسي هو المصدر الحراري الذي يقوم بتجهيز المحطة بالطاقة بدلا عن الوقود، وبدلا عن استعمال المرجل لإنتاج البخار ذي الضغط العالي والحرارة العالية تقوم المجمعات الشمسية بهذا الدور وتوجد عدة أنظمة لاستغلال الطاقة الشمسية في توليد الكهرباء، منها:



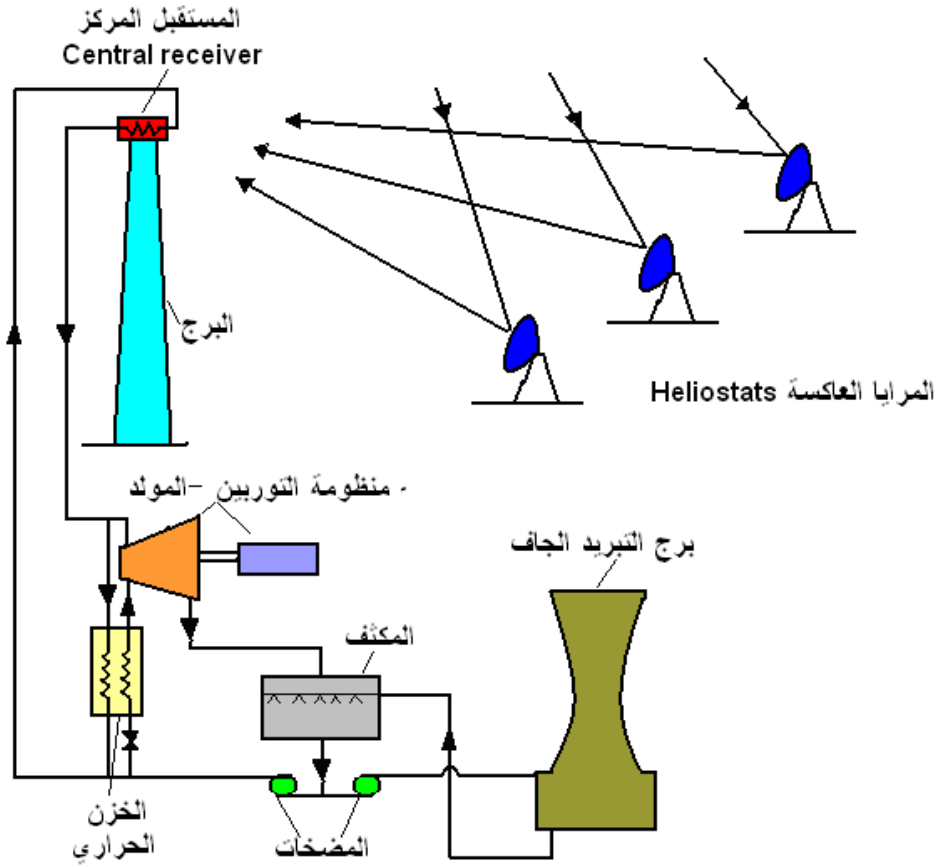
شكل (12.4) بحيرة شمسية تستخدم لتدفئة البيوت الزجاجية.



الشكل (13.4) دورة رانكن

1. أنظمة المستقبل المركز (Central receiver system):

تستخدم مرايا تسمى (Heliostats) مثبتة على قواعد متحركة منتشرة على مساحات واسعة لمتابعة حركة الشمس وتركيز الأشعة الشمسية على خزان حراري موجود فوق برج كما في الشكل (14.4) ويقوم حاسب إلكتروني بالسيطرة على حركة المرايا أثناء ساعات النهار حسب حركة الشمس مما يؤدي إلى تأمين استلام الأشعة المنعكسة والمركزة على الخزان الحراري طيلة ساعات النهار.



شكل (14.4) مخطط لمحطة حرارية شمسية تستخدم لتوليد الطاقة الكهربائية.

يمر السائل المراد تسخينه في الخزان الحراري الموضوع في اعلى البرج، حيث ترتفع درجة حرارته ويمكن استخدامه بطريقة مباشرة او غير مباشرة لتشغيل دورة رانكن فعند استعماله بصورة مباشرة فانه يجري تبخيره ورفع ضغطه ودرجة حرارته ثم يوجه باتجاه التوربين ليتم تدويره وتوليد الطاقة الكهربائية اما في حالة الاستعمال غير مباشر فانه تستعمل سوائل ذات ضغوط عالية يمكنها تحمل درجات الحرارة العالية دون ان تتبخر ويجمع السائل الساخن في خزان حراري يحتوي على مبادل حراري يحوي سائل اخر يتبخر بسهولة لكي يتم رفع درجة حرارته وضغطه ومن ثم يتم استخدامه لتدوير التوربين ومن السوائل التي يمكنها العمل في درجات حرارية تصل الى اكثر من 500°C دون ان تتبخر هي انواع خاصة من الزيت او الملح الصخري المذاب، والمادة الأخيرة هي الأفضل من ناحية انتقال الحرارة؛ لان لها سعة حرارية ومعامل توصيل حراري عالي والملح الحار يستخدم لتوليد بخار بدرجات حرارية عالية لتدوير توربين معين، وتم إنشاء محطات تجريبية من هذا النوع في الولايات

المتحدة الأمريكية، كانت إحداها في كاليفورنيا بطاقة 10 MW كما مبين في الشكل (15.4)، ويلاحظ استخدام مرايا متحركة تقوم بتركيز الأشعة على خزان حراري موضوع فوق برج.



الشكل (15.4) صورة فوتوغرافية لمحطة توليد كهربائية تستخدم نظام المستقبل المركز.

2. المجمعات المركزة المستقلة (Dispersed Concentrators collectors):

يتكون هذا النظام من مجموعة من المجمعات الشمسية المركزة ذات نسبة التركيز العالية والتي تكفي لرفع درجة حرارة مائع التشغيل الى الدرجة المطلوبة والتي تكون عادة اكثر من 500°C وترتبط المجمعات بشبكة من الانابيب توصل الى خزان حراري يستخدم لخرن السائل الساخن. ويحتوي الخزان على مبادل حراري يمر فيه سائل اخر يتبخر عند درجة حرارة اوطأ ليستخدم في تشغيل التوربين وتوليد الطاقة الكهربائية والشكل (16.4) مخطط لهذا النوع من المحطات.

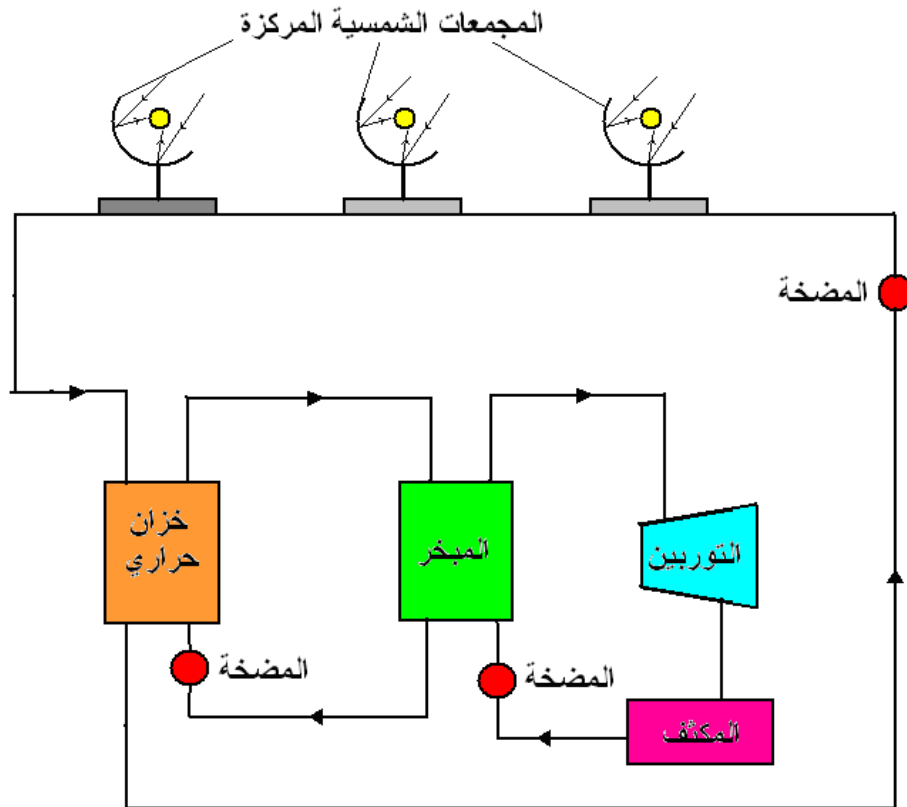
3. الخلايا الشمسية Solar cell:

يتم في الخلايا الشمسية تحويل الاشعاع الشمسي الى طاقة كهربائية بصورة مباشرة من دون المرور بعمليات تحويل طاقة كما في الطرائق السابقة التي يصاحبها عادة فقدان حراري لا يستهان به والتيار الكهربائي الناتج عن عملية التحويل هو تيار مباشر كالتيار الذي تولده البطاريات الجافة وليس تيار متناوب ولكن يمكن تحويله الى تيار متناوب باستخدام محولات خاصة. تمتاز الخلايا الشمسية في ان انتاجها من الطاقة الكهربائية يتناسب طرديا مع الاشعاع الشمسي الساقط عليها ومع تغير شدة الاشعاع تتغير الطاقة المنتجة. تصنع الخلايا الشمسية من

مواد مختلفة كالسيليكون وزرنيخ الجرمانيوم وكبريتيد الكادميوم وتوجد عدة طرائق لصناعة الخلايا الشمسية وتؤثر طرائق التصنيع والمواد المستخدمة في كفاءة الخلايا الشمسية فالخلايا التي تصنع من السيليكون فلها كفاءة تتراوح ما بين 12-18% ، اما الخلايا التي صنع من زرنيخ الجرمانيوم فتصل كفاءتها الى 16-20% واما خلايا كبريتيد الكادميوم فتبلغ كفاءتها 5-8% ولا تزيد كفاءة الخلايا الشمسية الحالية عن 25% وتعرف كفاءة الخلية الشمسية على انها:

$$\eta_{cell} = \frac{I_{max} * V_{max}}{A_{cell} * I_o} \dots(4.19)$$

حيث ان I_{max} اقصى قيمة للتيار المنتج و V_{max} اقصى قيمة للفتولتية المتولدة و A_{cell} مساحة الخلية الشمسية و I_o شدة الاشعاع الشمسي الساقط ، وما زال استعمال الخلايا محدود في تشغيل اجهزة الاتصالات البعيدة وفي تزويد الطاقة الكهربائية لبعض القرى المعزولة وفي بعض الاجهزة الكهربائية ذات الاستهلاك الكهربائي الواطئ و الشكل (17.4) يمثل خلايا شمسية مستخدمة لتزويد بيت عائلة بالكهرباء والشكل (18.4) بناية كبيرة مجهزة بالطاقة الشمسية⁽²⁷⁾.



الشكل (16.4) مخطط لمحطة طاقة شمسية تستخدم المجمعات الشمسية المركزة المستقلة.



الشكل (17.4) خلايا شمسية مثبتة على سقف احد المنازل.



الشكل (18.4) خلايا شمسية مستخدمة لتجهيز الكهرباء لبناية كبيرة ويلاحظ التصميم المعماري المميز والمتناسق مع استخدام الطاقة الشمسية.

4. المداخل الشمسية:

تتكون هذه الانظمة من مساحة دائرية من الزجاج الموضوع على مسافة معينة من سطح الارض ويوجد في مركز هذه الدائرة مدخنة عالية مشابهة للمداخل المستخدمة في محطات القدرة الحرارية كما مبين في الشكل (19.4)، تقوم اشعة الشمس بتسخين الهواء المحصور بين الارضية والتي تكون مطلية باللون الاسود لتعمل عمل الصفيحة الماصة في المجمعات الشمسية فتقل كثافة هذا الهواء ليتجه باتجاه المدخنة التي يتحرك فيها الهواء بسرعة عالية ليدور توربينات خاصة مشابهة للتوربينات الريحية الموضوعه داخل هذه المدخنة ويمكن حساب ضغط الهواء اللازم للتغلب على خسائر الاحتكاك داخل المدخنة والكافي لتدوير التوربينات من المعادلة الاتية:

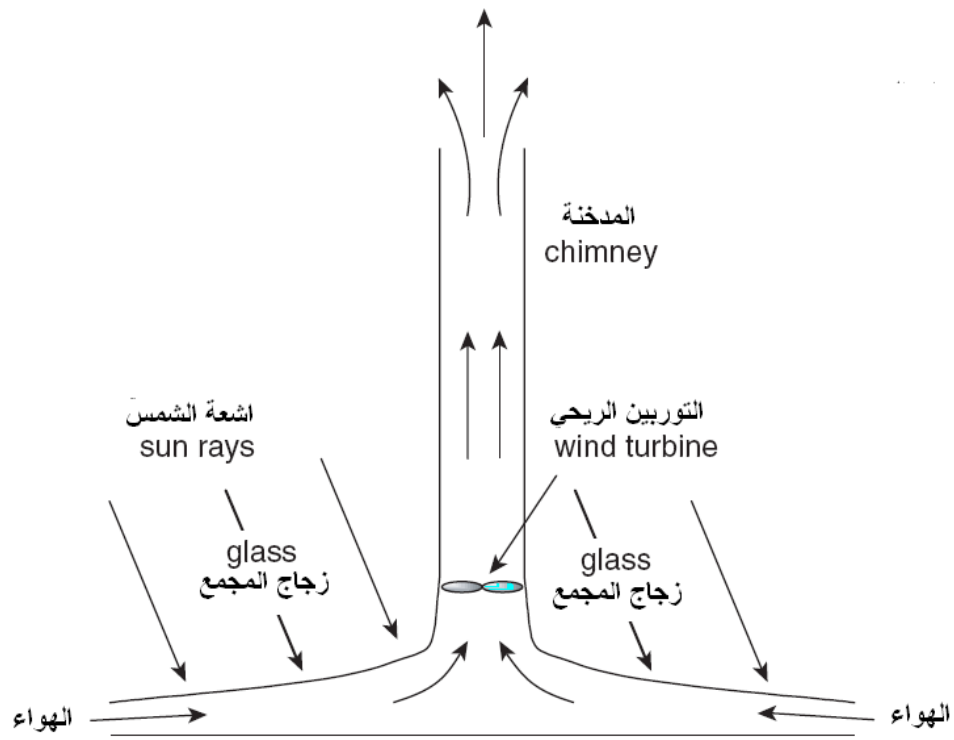
$$\Delta P_d = \frac{gH}{R} \left(\frac{P_o}{T_o} - \frac{P_i}{T_i} \right) \quad \dots (4.20)$$

حيث H ارتفاع المدخنة و P_o و T_o هما ضغط ودرجة حرارة الهواء المحيط بالمدخنة و P_i و T_i هما ضغط ودرجة حرارة الهواء داخل المدخنة و g التسجيل الارضي و R ثابت الغاز الطبيعي.

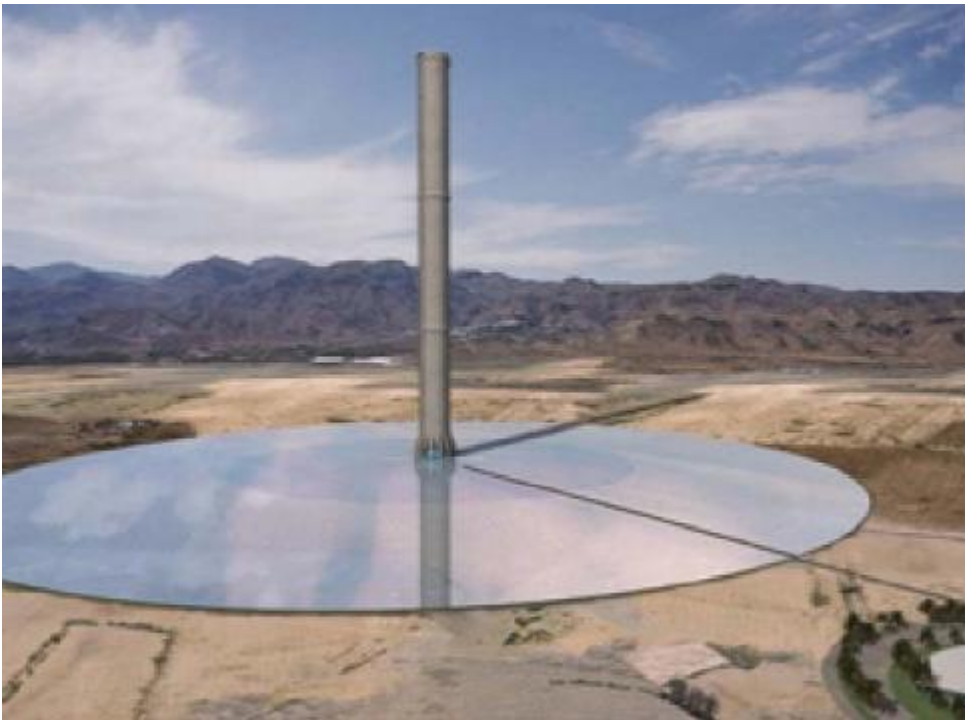
8.4 التقطير باستخدام الطاقة الشمسية Solar distillation:

تشكل المحيطات والبحار بمساحاتها الهائلة و أعماقها الكبيرة اكبر مستودع للمياه في الطبيعة، أذ ان 97% من كميات المياه على الكرة الأرضية توجد فيها. إلا إن مياهها هذه تحتوي على حوالي 3.5% من وزنها أملاح مختلفة أهمها: كلوريد الصوديوم، وثاني كربونات الكالسيوم و المغنيسيوم، بالإضافة إلى عدد كبير من العناصر والمركبات الأخرى الموجودة بكميات ضئيلة. بسبب وجود هذه الأملاح فأن مياه المحيطات غير قابلة للاستعمال في كثير من المجالات كالشرب و الزراعة و الصناعة.

تزايد استهلاك العالم للمياه في السنوات الأخيرة نتيجة التقدم العلمي والحضاري وارتفاع مستوى المعيشة ، ونتيجة للكلفة العالية لمحطات التحلية اتجهت أنظار العلماء إلى استخدام الطاقة الشمسية لحل أزمة المياه خاصة في البلدان الواقعة على شواطئ البحار وتعتبر دول الشرق الأوسط من المناطق المؤهلة لاستخدام الطاقة الشمسية في تحلية المياه ذلك لأن معظم هذه الدول لها شواطئ بحرية ويتوفر فيها الكثير من الإشعاع الشمسي وتوجد هنالك طريقتان لتقطير المياه باستخدام الطاقة الشمسية هما:



(a) رسم تخطيطي يوضح طريقة عمل المداخن الشمسية



(b) صورة فوتوغرافية لمدخنة شمسية

الشكل (19.4) المدخنة الشمسية

1. الطريقة غير المباشرة:

تعتمد هذه الطريقة على إحلال الطاقة الكهربائية المولدة عن طريق الشمس محل الطاقة التقليدية المستخدمة في محطات التحلية المألوفة، وتوجد أساليب عديدة للحصول على الماء العذب من المياه المالحة أهمها:

أ- الانتشار المتعاكس

ب- التجمد و الهيدرات الغازية

ت- التحليل الكهربائي

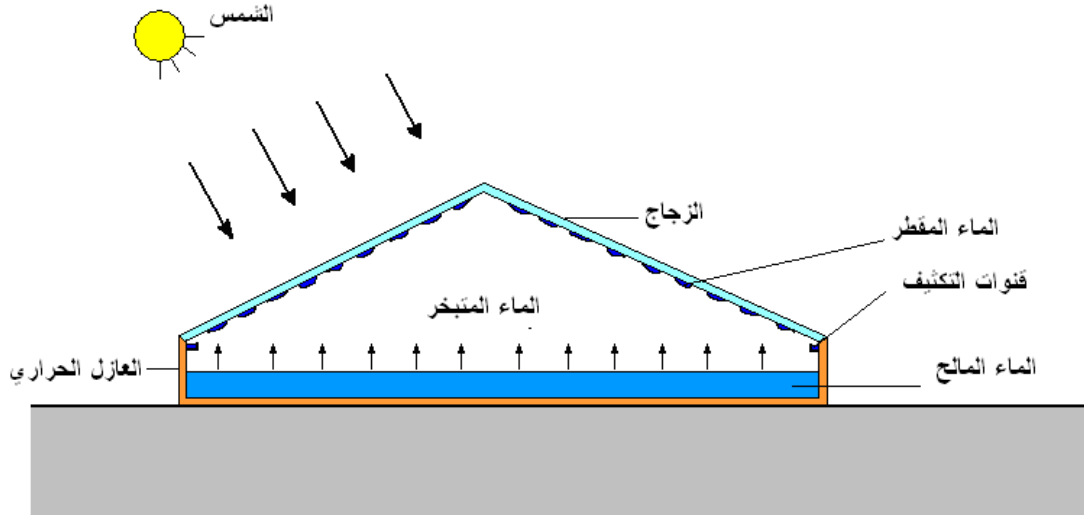
ث- التقطير بالغليان

وجميع هذه الطرائق تحتاج إلى طاقة، إما على شكل حرارة كما هو الحال في طريقة التقطير بالغليان أو طاقة للتبريد كما هو الحال في طريقة التجمد أو على شكل طاقة كهربائية أو ميكانيكية كما هو الحال في الطرائق الأخرى، ويلقي هذا النوع إقبالا كبيرا في الوقت الحاضر نظرا للتقدم العلمي الحاصل في مجال أشباه الموصلات والتي أثبتت فعالية في توليد الطاقة الكهربائية التي يمكن استخدامها في منظومات تحلية المياه التقليدية.

2. الطريقة المباشرة (طريقة المقطر الشمسي Solar still):

يتكون المقطر الشمسي من حوض معزول حراريا ومغلق الأطراف ويطلّي قعره بلون اسود وله غطاء زجاجي شفاف، ويكون الغطاء الزجاجي مائلا وذلك للسماح للبخار المتكثف عليه أن ينحدر إلى قنوات جانبية تتجمع فيه المياه النقية كما في الشكل (20.4). ان ما يحدث في هذه المحطة هو تبخر بطيء للماء وليس غليانا إذ إن درجة الحرارة لا تصل الى 100°C بل تبقى بحدود $50-60^{\circ}\text{C}$. كما يجري العمل فيها تحت الضغط الجوي الاعتيادي ولا تحتاج هذه المحطات الى أية أجهزة ميكانيكية أو كهربائية أو أجهزة سيطرة مما يجعل تكاليف إنشائها وتشغيلها قليلة جدا و قابلية تعطيلها شبه معدومة. من الشكل (20.4) يتبين ان قسم من الأشعة الشمسية التي تسقط على غطاء المحطة ينعكس إلى الخارج ، قسم ثاني يمتصه الغطاء إما القسم الأعظم الباقي فيخترق الغطاء ليصل إلى سطح الماء المالح حيث تتكرر العملية نفسها مرة ثانية أي انعكاس جزء من الأشعة على سطح الماء، و امتصاص جزء آخر منه من قبل الماء ونفوذ القسم الثالث عبر الماء إلى السطح الداخلي الأسود للمقطر الذي يمتصه بالكامل تقريبا باستثناء جزء صغير جدا ينعكس عن سطحه. يتبخر قسم من جزيئات الماء المالح نتيجة لارتفاع درجة

حرارته وينتقل الى الجو الداخلي للمقطر ومن ثم إلى السطح الداخلي للغطاء ولكون هذا الغطاء بارد نسبيا فإن جزيئات الماء تتكثف على سطحه، وتتجمع قطرات الماء المتكثفة في القنوات الجانبية للحوض لتصب في وعاء التجميع.



الشكل (20.4) المقطر الشمسي البسيط

وقد أجريت مجموعة من الدراسات النظرية والتجارب العملية على نماذج مختلفة من المقطرات الشمسية تناولت تأثير عوامل مختلفة مثل ميل الغلاف، بعد الغطاء الزجاجي عن سطح الماء المالح، سمك طبقة الماء في الحوض، الفرق بين درجة حرارة الغلاف الزجاجي على كمية الماء الناتجة في المقطر. حيث بينت هذه الدراسات ان الناتج اليومي يزداد بزيادة شدة الإشعاع الشمسي، وكذلك يزداد الإنتاج اليومي للمحطة بزيادة الفرق في درجات الحرارة بين الماء المالح والغطاء الزجاجي ويؤدي رفع درجة حرارة الماء الداخل إلى المقطر إلى زيادة كبيرة في ناتج المقطر ويقل الناتج اليومي للمقطر بزيادة سمك الماء المالح في المقطر و بزيادة تركيز الملح في الماء. ومن المشاكل التي تواجه هذا النوع من الاجهزة مشكلة ترسب الاملاح في قاع الحوض والتي تتطلب التنظيف الدوري للحوض بالإضافة إلى الغبار المترسب على سطح الزجاج والذي يقلل كمية الإشعاع الشمسي الداخل إلى المقطر، وتظهر هذه المشكلة بصورة جلية في الأجواء الصحراوية ومنها المناطق العربية.

9.4 التحليل الرياضي لاداء المقطر الشمسي البسيط:

يوضح الشكل (21.4) رسم تخطيطي للمقطر الشمسي حيث ينتج المقطر كمية من الماء تعادل D لوحة مساحة الغطاء. درجة حرارة الماء الموجود في المقطر قدرها T_w بينما متوسط درجة

$$C_s \frac{dT_w}{dt} = (\alpha_g + \alpha_w \tau_g) I_o - q_{ga} - q_b - q_f \quad \dots (4.21)$$

حيث C_s هي السعة الحرارية للمقطر، وتشمل السعة الحرارية للغطاء والماء وهيكل المقطر مجتمعة، كما يعطي الاتزان الحراري لغطاء المقطر العلاقة الآتية:

$$q_{ga} = q_r + q_c + q_e + \alpha_g I_o \quad \dots (4.22)$$

تنتقل الحرارة بالحمل بين سطح الماء الساخن الموجود داخل المقطر والسطح الداخلي البارد للغطاء الزجاجي، حيث تنشأ حركة دوران للهواء تؤدي إلى نقل الحرارة بالحمل الحر وتقدر الحرارة المنقولة بالحمل (واط لكل متر مربع (W/m^2)) من سطح الزجاج باستخدام المعادلة الآتية:

$$q_c = 0.8831 \left[(T_w - T_g) + \frac{P_w - P_{wg}}{0.265 - P_w} (T_w + 273) \right]^{1/3} (T_w - T_g) \quad \dots (4.23)$$

حيث T_g و T_w هي درجة الحرارة المتوسطة لكل من سطح الماء والسطح الزجاجي على التوالي بالمقياس المئوي، و P_w و P_{wg} هي ضغط بخار الماء (Absolute MPa) عند درجتي الحرارة T_g و T_w على التوالي.

يحمل الهواء الساخن بخار الماء من سطح الماء الدافئ في قاعدة المقطر إلى السطح السفلي للغطاء الزجاجي البارد نسبياً مما يسبب تكثف بخار الماء على سطح الزجاج الداخلي ويقدر معدل انتقال الحرارة بالتكثيف (q_e) (واط لكل متر مربع) من المعادلة الآتية:

$$q_c = 0.0061 \left[(T_w - T_g) + \frac{P_w - P_{wg}}{0.265 - P_w} (T_w + 273) \right]^{1/3} (P_w - P_{wg}) L_w \quad \dots (4.24)$$

حيث أن L_w هي الحرارة الكامنة للتبخير عند درجة حرارة الماء في المقطر (T_w) وتنتقل الحرارة أيضاً بالإشعاع بين سطح الماء والغطاء الزجاجي ويقدر معدل انتقالها بهذه الطريقة كما يلي:

$$q_r = F \sigma [(T_w + 273)^4 - (T_g + 273)^4] \quad \dots (4.25)$$

حيث ان σ ثابت ستيفان بولتزمان وبفرض صغر المسافة الفاصلة بين سطح الماء والغطاء الزجاجي بالمقارنة مع طول وعرض المقطر فيمكن اعتبار الاسطح لانتهائية ويحسب معامل الشكل من المعادلة الاتية:

$$F = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1} \quad \dots (4.26)$$

حيث ان ε_g و ε_w هما على التوالي اشعاعية سطح الماء والسطح الداخلي للغطاء الزجاجي على التوالي. يفقد الغطاء الزجاجي الحرارة الى المحيط الخارجي بالحمل الحراري والاشعاع معا ويحسب هذا الفقد الحراري من المعادلة الاتية:

$$q_{ga} = h_{ga} (T_g - T_a) + \varepsilon_g \sigma [(T_g + 273)^4 - (T_{sky} + 273)^4] \quad \dots (4.27)$$

حيث ان h_{ga} هو معامل انتقال الحرارة بين السطح الخارجي للغطاء الزجاجي والهواء المحيط ويعتمد اعتمادا كبيرا على سرعة الرياح ويمكن استخدام المعادلة الاتية لحساب هذا المعامل:

$$h_{ga} = 5.61 + 1.09v \quad \text{عندما } v < 18$$

او

$$h_{ga} = 2.64 * v^{0.78} \quad \text{عندما } 18 \leq v \leq 110$$

حيث v سرعة الرياح وتعطى بوحدات (km/hour) و T_{sky} درجة الحرارة الاشعاعية المؤثرة للسماء وتحسب من المعادلة الاتية:

$$T_{sky} = 0.0552 * (T_g + 273)^{1.5} + 273$$

او من العلاقة التجريبية الاتية:

$$T_{sky} = T_a - 10$$

يعزل جسم المقطر الشمسي بصورة جيدة من الاسفل ومن الجوانب لتقليل الفقد الحراري الى المحيط الخارجي ويقدر معدل الحرارة المفقودة من جسم المقطر لكل متر مربع من مساحة الغطاء من العلاقة الاتية:

$$q_b = h_b (T_w - T_a) \quad \dots (4.28)$$

حيث ان h_b هو المعامل الكلي لانتقال الحرارة بين الماء داخل المقطروالعازل الحراري. وإذا كان نظام التغذية مستمرا للماء الداخل الى المقطر فان كمية الحرار المستنزفة نتيجة هذه التغذية تحسب من المعادلة الاتية:

$$q_f = G_f c_p (T_w - T_{f,i}) \quad \dots (4.29)$$

حيث G_f معدل التغذية لكل متر مربع من سطح الزجاج و c_p السعة الحرارية لماء التغذية و $T_{f,i}$ درجة حرارة ماء التغذية عند الدخول الى المقطر وتؤخذ عادة مساوية لدرجة حرارة الهواء الجوي.

ولتقويم اداء التصاميم المختلفة للمقطرات الشمسية البسيطة، تستخدم كفاءة المقطر كمقياس لتقويم اداء المقطر وتعرف كفاءة المقطر بانها نسبة الحرارة المستخدمة في التبخير q_e الى شدة الاشعاع الشمسي الساقط، اي ان:

$$\eta = \frac{q_e}{I_o} \quad \dots (4.30)$$

10.4 المجففات الشمسية Solar dryer :

التجفيف هو عملية تخلص المواد المختلفة من كل السوائل الموجودة فيها او جزء منها للحصول على مواد جافة تحتوي على نسبة قليلة من الرطوبة او لا تحتوي عليها أبداً، ويعتبر التجفيف بشكل عام من أقدم استخدامات الطاقة الشمسية حيث استخدم الإنسان الشمس منذ اقدم العصور لتجفيف ملابسه، و تتكون المجففات الشمسية من ثلاثة أجزاء رئيسية هي (الشكل 22.4):

1. وحدة التسخين:

وهي الوحدة المسؤولة عن تسخين الهواء وتتكون من مجمعات شمسية مخصصة لتسخين الهواء وتختلف في أشكالها من تصميم إلى آخر وقد تكون عبارة عن أنبوب أسطواني الشكل ذي قطر كبير يقوم بدور المجمع الشمسي ويصنع هذا الأنبوب من مواد بلاستيكية رخيصة الثمن ذات لون اسود لزيادة امتصاص الإشعاع الشمسي، يسخن الهواء المدفوع بواسطة المروحة أثناء مروره بالأنبوب وترتفع درجة حرارته بضع درجات بعدها يدخل هذا الهواء الى صندوق التجفيف.



الشكل (22.4) مجفف شمسي لتجفيف المحاصيل الزراعية في مركز بحوث الطاقة العراقي.

2. صندوق التجفيف:

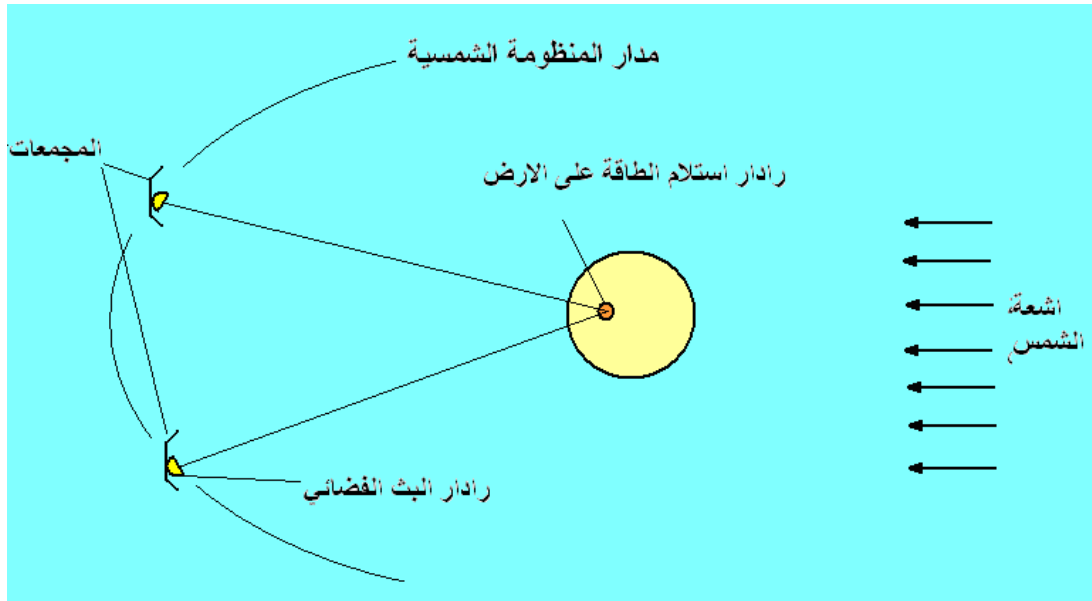
وهو عبارة عن صندوق توضع فيه المواد الزراعية او المواد المراد تجفيفها وتوجد على أشكال عدة تختلف حسب نوع المجفف ويلاحظ في الشكل (22.4) ان الجهة المواجهة للشمس صنعت من الزجاج لغرض زيادة الكسب الحراري الشمسي و تعجيل عملية التجفيف بفعل ظاهرة البيوت الزجاجية.

3. دافعات الهواء:

ويتم بواسطتها تحريك الهواء داخل المجفف ويتم تدويرها بواسطة محرك كهربائي وفي بعض الأحيان يستغني عن وحدة دافعات الهواء بتركيب قناة عمودية تشبه المدخنة في نهاية المجفف تكون مهمتها سحب الهواء المحمل بالرطوبة في المجفف ودفعه إلى الخارج، وذلك اعتماد على إن الهواء الحار يكون قليل الكثافة ويصعد إلى الأعلى و يلاحظ إن المجمعات الشمسية رخيصة الثمن نسبيا وفعالة، مما يساعد على انتشارها في المناطق الزراعية في مختلف أنحاء العالم، و نظرا لسهولة التكنولوجيا فأنها غالبا ما تصنع من المواد المحلية المتوفرة، كما يجب الانتباه إلى إن بعض المحاصيل الزراعية خاصة تتعرض إلى التلف عند زيادة نسبة الجفاف عن حدود معينة.

11.4 أنظمة الطاقة الشمسية بواسطة الأقمار الصناعية:

بدأ التفكير في هذه التقنية لأول مرة عام 1960 بالاعتماد على تقنية برامج الفضاء و أخذت هذه التقنيات المزيد من الاهتمام في السنوات الأخيرة، يتلخص مبدأ هذه الأنظمة (الشكل 23.4) على نصب أقمار صناعية في مدار يبلغ ارتفاعه 36000 km عن سطح الأرض بحيث تدور هذه الأقمار من الشرق نحو الغرب بسرعة تعادل السرعة الدورانية للأرض، تقوم هذه الأقمار باستلام الطاقة الشمسية في موقعها خارج الغلاف الجوي للأرض وتحويله إلى إشعاع مايكروويف وبثه إلى منطقة محددة في الأرض حيث توجد منصات خاصة لتحويل إشعاع المايكروويف هذا إلى تيار متناوب يربط إلى شبكة توزيع الكهرباء، من مميزات هذه الأنظمة تجهيزها الطاقة بصورة دائمة والمشكلة الرئيسية التي تواجه هذه الأنظمة هي الكلفة العالية جدا(28).



الشكل (23.4) نظام طاقة شمسية بواسطة الأقمار الصناعية.

امثلة محلولة

مثال (1.4):

احسب حمل التسخين الشهري اللازم لتسخين مياه لعائلة تتكون من 6 افراد على فرض ان معدل استهلاك الفرد الواحد 50 لتر ودرجة حرارة الماء المسحوب من الاسالة = 10 °C ودرجة حرارة الماء الساخن المطلوبة = 60 °C.

الحل:

يحسب حمل التسخين الشهري من المعادلة (4.2):

$$L = \dot{m} * c_p * (T_H - T_C) * N$$

$$\dot{m} = 6 * 50/1000 = 0.3 \text{ m}^3/\text{day}$$

$$L = 0.3 * 4180 * (60 - 10) * 30 = 1.881 \text{ MJ/month}$$

مثال (2.4):

احسب المتوسط الشهري للاشعاع الساقط على سطح مائل لمجمع شمسي باتجاه الجنوب عند خط عرض 43 °N وبزاوية ميلان للمجمع قدرها 60 علما ان المتوسط الشهري للاشعاع اليومي الساقط على سطح افقي ($\bar{H}$) والاشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي الارضي ($\bar{H}_o$) والانعكاسية الارضية مبينة في الجدول ادناه.

الشهر	الانعكاسية الأرضية s	$\bar{H}$	$\bar{H}_o$
كانون الثاني	0.7	5.85	13.37
شباط	0.7	9.13	18.81
اذار	0.4	12.89	26.03
نيسان	0.2	15.88	33.78
ايار	0.2	19.79	39.42
حزيران	0.2	22.11	41.78
تموز	0.2	21.96	40.55
اب	0.2	19.39	35.92
ايلول	0.2	14.75	28.8

20.9	10.34	0.2	تشرين الاول
14.63	5.72	0.2	تشرين الثاني
11.91	4.42	0.4	كانون الاول

الحل:

لحل مثل هذه المسألة نبدأ بشهر كانون الثاني ونتبع الخطوات الاتية:

1. نحسب زاوية الانحراف (d) من المعادلة (2.8):

$$d = 23.45 * \sin\left[\frac{360}{370}(ND - 80)\right]$$

حيث ان رقم اليوم يؤخذ منتصف الشهر وهو 15،

$$d = 23.45 * \sin\left[\frac{360}{370}(15 - 80)\right] = -20.938$$

2. نحسب زاوية غروب الشمس لسطح افقي من المعادلة (2.8):

$$h_o = \cos^{-1}[-\tan(d) * \tan(\alpha)] = \cos^{-1}[-\tan(-20.9) * \tan(43)] = 69.1$$

و تحسب الزاوية الساعية عند غروب الشمس لسطح مائل وتعطى بالمعادلة (4.11):

$$h'_o = \text{MIN}(h_o, \cos^{-1}[-\tan(\alpha - \beta) * \tan(d)])$$

حيث تؤخذ اقل القيمتين داخل القوس:

$$h_o = 69.1$$

$$\cos^{-1}[-\tan(\alpha - \beta) * \tan(d)] = \cos^{-1}[-\tan(43 - 60) * \tan(-20.938)] = 96.7$$

القيمة الاولى اقل اذن تؤخذ h'_o مساوية الى 69.1.

3. نحسب المتوسط الشهري لنسبة الاشعاع اليومي المباشر الساقط على سطح مائل الى نظيره

الساقط على سطح افقي ($\bar{R}_b$) من المعادلة (4.10):

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(43 - 60) \cos(-20.9) \sin(69.1) + \frac{\pi}{180} 69.1 \sin(43 - 60) \sin(-20.93)}{\cos(43) \cos(-20.9) \sin(69.1) + \frac{\pi}{180} * 69.1 * \sin(43) \sin(-20.9)}$$

$$\bar{R}_b = 2.79$$

4. نحسب قيمة المتوسط الشهري للنسبة بين الاشعاع الشمسي الحقيقي الى الاشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي للارض $\bar{K}_T$ كالآتي:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} = \frac{5.85}{13.37} = 0.44$$

ثم نحسب نسبة الاشعاع المنتشر الى الاشعاع الكلي $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$ من المعادلة (4.9-a) لكون $h_o \leq 81.4^\circ$:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.391 - 3.56 * 0.44 + 4.189 * 0.44^2 - 2.137 * 0.44^3 = 0.45$$

5. نحسب النسبة بين المتوسط الشهري للاشعاع اليومي الساقط على سطح مائل الى ذلك الساقط على سطح افقي ($\bar{R}$) من المعادلة (4.8):

$$\bar{R} = (1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d * (1 + \cos \beta)}{2\bar{H}} + \frac{s * (1 + \cos \beta)}{2}$$

$$\bar{R} = (1 - 0.45) * 2.79 + \frac{0.45 * (1 + \cos 60)}{2} + \frac{0.7 * (1 - \cos 60)}{2} = 2.048$$

6. نحسب المتوسط الشهري للاشعاع الساقط على سطح مائل باستخدام المعادلة (4.7):

$$\bar{H}_T = \bar{R} * \bar{H} = 2.048 * 5.58 = 11.42 \text{ MJ/m}^2$$

ونفس الخطوات تتبع في بقية اشهر السنة لنحصل على الجدول الآتي:

الشهر	الانعكاسية الأرضية s	$\bar{H}$	$\bar{H}_o$	$\bar{K}_T$	$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$	$\bar{R}_b$	$\bar{H}_T$
كانون الثاني	0.7	5.58	13.37	0.44	0.46	2.79	11.42
شباط	0.7	9.13	18.81	0.49	0.41	2.04	15.5
اذار	0.4	12.89	26.03	0.5	0.43	1.42	15.8
نيسان	0.2	15.88	33.78	0.47	0.46	0.96	14.5
ايار	0.2	19.79	39.42	0.5	0.43	0.71	15.4
حزيران	0.2	22.11	41.78	0.53	0.4	0.62	15.9

تموز	0.2	21.96	40.55	0.54	0.39	0.66	16.3
اب	0.2	19.39	35.92	0.54	0.39	0.84	16.6
ايلول	0.2	14.75	28.8	0.51	0.42	1.21	15.8
تشرين الاول	0.2	10.34	20.9	0.5	0.4	1.81	14.9
تشرين الثاني	0.2	5.72	14.63	0.39	0.51	2.56	9.6
كانون الاول	0.4	4.42	11.91	0.37	0.54	3.06	8.5

مثال (3.4):

نظام تدفئة عند خط عرض 43°N يستخدم مجمعات شمسية موجهة باتجاه الجنوب ومائلة بزاوية قدرها 60° عن الافق و ذو اداء مبين في منحني الكفاءة ادناه. كان معامل التصحيح نتيجة وجود المبادلات الحرارية يساوي $(F'_R / F_R = 0.97)$ والتصحيح في قيمة $(\tau\alpha)$ الناتج عن تغير زاوية السقوط للاشعة على المجمع يساوي $(\bar{\tau\alpha} / (\tau\alpha)_n = 0.96)$ والمعدلات الشهرية للاشعاع الشمسي الساقط على المجمع ودرجات حرارة الهواء الخارجي ومعدل الحمل الكلي الذي نحتاجه لتسخين المياه وتدفئة المنازل مبينة في الجدول ادناه. حدد نسبة الطاقة التي تؤمن بواسطة الطاقة الشمسية الى الطاقة الكلية المستهلكة (f) اذا كانت مساحة المجمعات الشمسية مقدارها 50 m^2 .

الشهر	$\bar{H}_T$	$\bar{T}_a$	$L \text{ (GJ)}$
كانون الثاني	11.9	-7	36
شباط	15.5	-6	30.4
اذار	15.8	0	26.5
نيسان	14.5	7	15.7
ايار	15.4	13	9.2
حزيران	15.9	19	4.1
تموز	16.3	21	2.9
اب	16.6	20	3.4

6.3	15	15.8	ايلول
13.2	10	14.9	تشرين الاول
22.8	1	9.6	تشرين الثاني
32.5	-5	8.5	كانون الاول

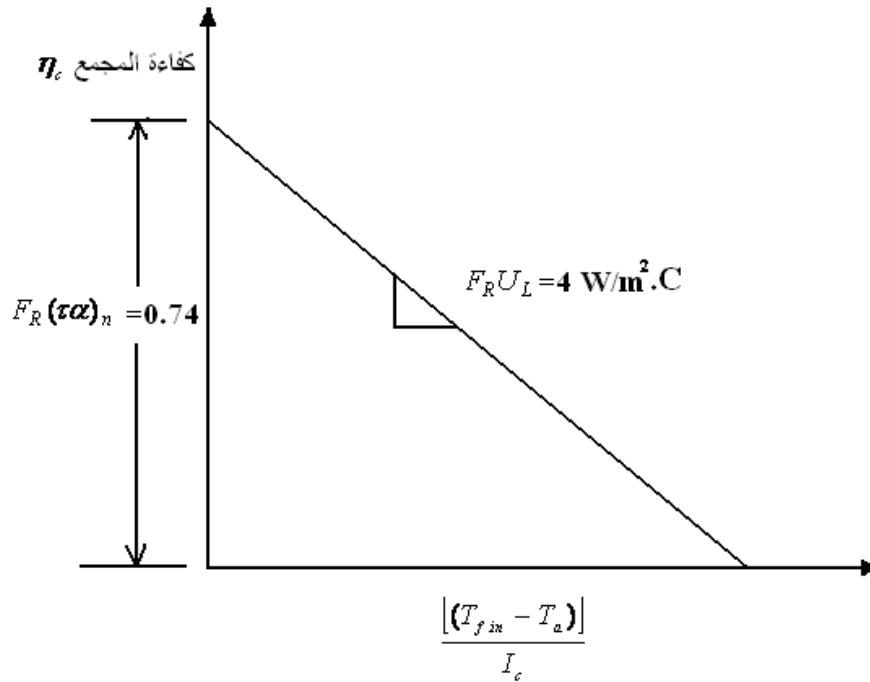
الحل:

نأخذ شهر كانون الثاني نموذجاً للحل، من المعادلة (4.4) نحصل على:

$$X = F_R U_L * \left(\frac{F'_R}{F_R} \right) * (T_{ref} - \bar{T}_a) * \Delta t * \frac{A_c}{L}$$

$$X = 4 * (0.97) * (100 - (-7)) * 31 * 24 * 3600 * \frac{50}{36 * 10^9} = 1.54$$

من المعادلة (4.6) نحصل على:



$$Y = F_R (\tau\alpha)_n * \left(\frac{F'_R}{F_R} \right) * \left(\frac{(\tau\alpha)_{av}}{(\tau\alpha)_n} \right) * \bar{H}_T * N * \frac{A}{L}$$

$$Y = 0.74 * (0.97) * (0.96) * 11.9 * 10^6 * 31 * \frac{50}{36 * 10^9} = 0.35$$

ومن المعادلة (4.3) نحصل على

$$f = 1.029Y - 0.065X - 0.245Y^2 + 0.0018X^2 + 0.0215Y^3$$

$$f = 1.029 * 0.35 - 0.065 * 1.54 - 0.245 * 0.35^2 + 0.0018 * 1.54^2 + 0.0215 * 0.35^3$$

$$f = 0.24$$

وكمية الطاقة المجهزة من قبل الطاقة الشمسية تساوي:

$$f * L = 0.24 * 36 = 8.6 \text{ GJ}$$

وللأشهر الأخرى نستخدم نفس الطريقة للحصول على الجدول الآتي:

الشهر	$\bar{H}_T$	$\bar{T}_a$	L (GJ)	X	Y	f	fL (GJ)
كانون الثاني	11.9	-7	36	1.54	0.35	0.24	8.6
شباط	15.5	-6	30.4	1.64	0.49	0.35	10.5
اذار	15.8	0	26.5	1.95	0.63	0.44	11.7
نيسان	14.5	7	15.7	2.98	0.96	0.6	9.4
ايار	15.4	13	9.2	4.91	1.73	0.88	8.1
حزيران	15.9	19	4.1	9.93	4.01	1	4.1
تموز	16.3	21	2.9	14.15	6.01	1	2.9
اب	16.6	20	3.4	12.23	5.22	1	3.4
ايلول	15.8	15	6.3	6.78	2.59	1	6.3
تشرين الاول	14.9	10	13.2	3.54	1.21	0.71	9.4
تشرين الثاني	9.6	1	22.8	2.18	0.44	0.27	6.2
كانون الاول	8.5	-5	32.5	1.68	0.28	0.16	5.3
الكلية			203.2				85.9

مثال (4.4):

نظام تدفئة هوائية عند خط عرض 43°N (يستخدم مجمعين شمسيين موجهان باتجاه الجنوب ومائلان بزاوية قدرها 60° عن الافق) و ذو اداء مبين في منحنى الكفاءة ادناه. فإذا كان معامل

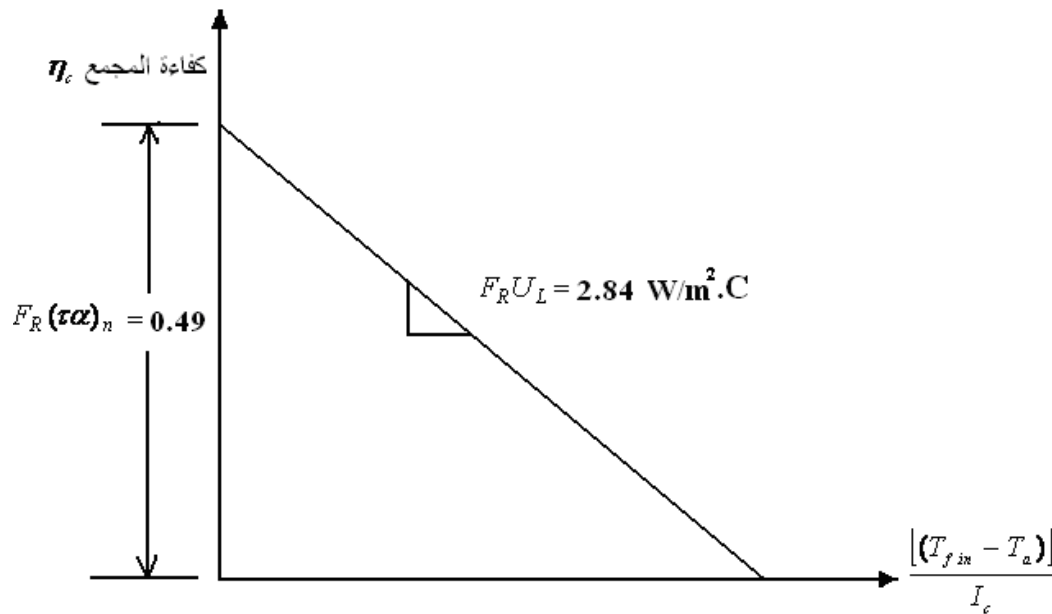
التصحيح في قيمة $(\tau\alpha)$ الناتج عن تغير زاوية السقوط للأشعة على المجمع يساوي $(\overline{\tau\alpha})/(\tau\alpha)_n = 0.93$ ومعدل الحمل الكلي الذي نحتاجه لتسخين المياه وتدفئة المنازل قدرها 36 GJ ومعدل الاشعاع الشمسي اليومي خلال شهر كانون الثاني مقداره 11.9 MJ/m^2 ومعدل درجة حرارة الهواء لخارجي خلال هذا الشهر تساوي -7°C . احسب نسبة الطاقة التي تؤمن بواسطة الطاقة الشمسية الى الطاقة الكلية المستهلكة (f) اذا كانت مساحة المجمعات الشمسية مقدارها 50 m^2 .

الحل:

نعتبر عدم وجود معامل التصحيح نتيجة المبادلات الحرارية لانخفاض مقدار خسائر الاحتكاك لذا:

$$\frac{F'_R}{F_R} = 1$$

من المعادلة (4.4) نحصل على:



$$X = F_R U_L * \left(\frac{F'_R}{F_R}\right) * (T_{ref} - \bar{T}_a) * \Delta t * \frac{A_c}{L}$$

$$X = 2.84 * (1) * (100 - (-7)) * 31 * 24 * 3600 * \frac{50}{36 * 10^9} = 1.13$$

من المعادلة (4.6) نحصل على:

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n * \left(\frac{F'_R}{F_R}\right) * \left(\frac{(\tau\alpha)_{av}}{(\tau\alpha)_n}\right) * \bar{H}_T * N * \frac{A}{L}$$

$$Y = 0.49 * 1 * (0.93) * 11.9 * 10^6 * 31 * \frac{50}{36 * 10^9} = 0.23$$

ومن المعادلة (4.14) نحصل على

$$f = 1.04 * 0.23 - 0.065 * 1.13 - 0.159 * 0.23^2 + 0.00187 * 1.13^2 + 0.0095 * 0.23^3$$

$$f = 0.16$$

وكمية الطاقة المجهزة من قبل الطاقة الشمسية تساوي:

$$f * L = 0.16 * 36 = 5.8.GJ$$

مثال (5.4):

احسب التغير في اداء نظام التدفئة الشمسية المبين في المثال (4.4) عند تغير معدل تدفق الهواء من القيمة القياسية 10 لتر بالثانية لكل متر مربع الى 15 لتر بالثانية مع العلم ان مواصفات المجمعات الشمسية المستخدمة في نظام التدفئة ايضا تغيرت نتيجة تغير تدفق الهواء لتصبح بالشكل الاتي:

$$W/m^2.C F_R U_L = 3.01 \text{ و } F_R (\tau\alpha)_n = 0.52$$

الحل:

تغيرت مواصفات المجمعات الشمسية نتيجة تغير تدفق الهواء ولذلك نحتاج الى حساب المتغيرات X و Y :

$$X = F_R U_L * \left(\frac{F'_R}{F_R}\right) * (T_{ref} - \bar{T}_a) * \Delta t * \frac{A_c}{L}$$

$$X = 3.01 * (1) * (100 - (-7)) * 31 * 24 * 3600 * \frac{50}{36 * 10^9} = 1.198$$

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n * \left(\frac{F'_R}{F_R}\right) * \left(\frac{(\tau\alpha)_{av}}{(\tau\alpha)_n}\right) * \bar{H}_T * N * \frac{A}{L}$$

$$Y = 0.52 * 1 * (0.93) * 11.9 * 10^6 * 31 * \frac{50}{36 * 10^9} = 0.24$$

عند تغير معدل سريان الهواء في المجمع عن القيمة القياسية، تعدل قيمة X الى القيمة X_C حسب المعادلة (4.15):

$$\frac{X_C}{X} = \left(\frac{\dot{m}_a}{10} \right)^{0.28}$$

$$\frac{X_C}{1.198} = \left(\frac{15}{10} \right)^{0.28} \Rightarrow X_C = 1.342$$

ومن المعادلة (4.14) نحصل على

$$f = 1.04Y - 0.065X - 0.159Y^2 + 0.00187X^2 + 0.0095Y^3$$

$$f = 1.04 * 0.24 - 0.065 * 1.34 - 0.159 * 0.24^2 + 0.00187$$

$$* 1.34^2 + 0.0095 * 0.24^3 = 0.156$$

وكمية الطاقة المجهزة من قبل الطاقة الشمسية تساوي

$$f * L = 0.156 * 36 = 5.646 \text{ GJ}$$

مثال (6.4):

احسب التغير في اداء نظام التدفئة الشمسية المبين في المثال (4.4) عند تغير حجم خزان الحفظ حوالي 60% من القيمة القياسية.

الحل:

في حالة اختلاف حجم خزان الحفظ عن الحجم القياسي تعدل قيمة X الى القيمة X_C بواسطة المعادلة (4.16):

$$\frac{X_C}{X} = \left(\frac{0.25}{V} \right)^{0.3}$$

$$\frac{X_C}{X} = \left(\frac{0.25}{0.6 * 0.25} \right)^{0.3} \Rightarrow X_C = 1.165$$

وقيمة Y تبقى 0.23 وتكون f حسب المعادلة (4.14) مساوية الى 0.15.

مثال (7.4):

منظومة تسخين للمياه باستخدام الطاقة الشمسية موجود في منطقة عند خط عرض 43°N يستخدم مجمع شمسي ثنائي الغطاء الزجاجي وبالمواصفات الآتية: $F_R(\tau\alpha)_n = 0.64$ و $W/m^2 \cdot C F_R U_L = 3.64$ موجهة باتجاه الجنوب ومائلة بزاوية قدرها 45° عن الأفق. وكان المطلوب من هذا النظام تسخين كمية من المياه مقدارها 400 لتر خلال اليوم من درجة حرارة 11°C إلى 60°C وتحتوي المنظومة على خزان للحفظ عبارة عن اسطوانة قطرها 0.5 m وطولها 1.16 m ومعدل معامل فقدان الحرارة من هذا الخزان يبلغ $0.62 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$ حدد نسبة الطاقة التي تؤمن بواسطة الطاقة الشمسية إلى الطاقة الكلية المستهلكة (f) إذا كانت مساحة المجمعات الشمسية مقدارها 10 m^2 ومعامل التصحيح في قيمة $(\tau\alpha)$ الناتج عن تغير زاوية السقوط للأشعة على المجمع يساوي $(\overline{\tau\alpha})/(\tau\alpha)_n = 0.94$ والمعدل الشهري للإشعاع الشمسي الساقط على المجمع خلال شهر كانون الثاني يبلغ 11.1 MJ/m^2 ومعدل درجة حرارة الهواء المحيط 20°C .

الحل:

يحسب حمل التسخين الشهري (كمية الطاقة اللازمة لتسخين كمية من المياه مقدارها 400 لتر خلال اليوم من درجة حرارة 11°C إلى 60°C في الشهر) من المعادلة (4.2):

$$L = \dot{m} * c_p * (T_H - T_C) * N$$

$$L = 0.4 * 4180 * (60 - 11) * 31 = 2.55 \text{ GJ/month}$$

وتحسب الخسائر الحرارية خزان الحفظ من القانون الآتي:

$$Q_{loss} = U * A * (60 - T_a)$$

$$A = \pi * D * l + \frac{\pi * D^2}{2} = 3.14 * 0.5 * 1.16 + \frac{3.14 * 0.5^2}{2} = 2.21 \text{ m}^2$$

$$\therefore Q_{loss} = 0.62 * 2.21 * (60 - 20) = 55 \text{ W}$$

وتساوي هذه الخسائر خلال الشهر الآتي:

$$Q_{loss \text{ during month}} = 55 * 31 * 24 * 3600 \approx 0.15 \text{ GJ}$$

ويكون الحمل الكلي على المنظومة ما يأتي:

$$L = 2.55 + 0.15 = 2.7 \text{ GJ}$$

ومن ثم نحسب قيم المتغيرات X_C و Y كالآتي:

$$X_C = X * \frac{X_C}{X} = F_R U_L * \left(\frac{F'_R}{F_R} \right) * (T_{ref} - \bar{T}_a) * \Delta t * \frac{A_c}{L} *$$

$$\frac{1.16 + 1.18T_w + 3.86T_m - 2.32\bar{T}_a}{100 - \bar{T}_a}$$

$$X_C = X * \frac{X_C}{X} = 3.64 * (1) * (100 - (-7)) * 31 * 24 * 3600 * \frac{10}{2.7 * 10^9} *$$

$$\frac{1.16 + 1.18 * 60 + 3.86 * 11 - 2.32 * (-7)}{100 - (-7)}$$

$$X_C = 5.1$$

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n * \left(\frac{F'_R}{F_R} \right) * \left(\frac{(\tau\alpha)_{av}}{(\tau\alpha)_n} \right) * \bar{H}_T * N * \frac{A}{L}$$

$$Y = 0.64 * (1) * (0.94) * 11.1 * 10^6 * 31 * \frac{10}{2.7 * 10^9} = 0.76$$

ومن المعادلة (4.3) تكون قيمة f تساوي (0.37).

مثال (8.4):

احسب نسبة الاشعاع الشمسي الداخل إلى غرفة إبعادها 5*4*2.5 m عن طريق شباك خارجي والتي يمكن امتصاصها من قبل الجدران الداخلية للغرفة، اذا علمت ان الشباك ثنائي الغطاء الزجاجي وابعاده 1.5*3 m وامتصاصية الاسطح الداخلية للغرفة 0.45 ومواصفات الزجاج المستخدم كالآتي: $\tau_c = 0.87$ ، $KL = 0.0125$

الحل:

تحتسب الامتصاصية الفعالة للغرفة (α) من المعادلة (4.19):

$$\alpha = \frac{\alpha_i}{\alpha_i + (1 - \alpha_i) \tau_d \frac{A_w}{A_i}}$$

$$A_w = \text{مساحة الشباك} = 3 * 1.5 = 4.5 \text{ m}^2$$

A_i المساحة الداخلية للغرفة بدون الشباك وتساوي

$$A_i = 2(5 * 4 + 5 * 2.5 + 4 * 2.5) - 4.5 = 80.5 .m^2$$

$$\therefore \alpha = \frac{0.45}{0.45 + (1 - 0.45) * 0.74 * \frac{4.5}{80.5}} = 0.95$$

وتكون نسبة الاشعاع الشمسي الممتصة من قبل جدران الغرفة كالآتي:

$$\tau_c \alpha = 0.87 * 0.95 = 0.83$$

مثال (9.4):

محطة حرارية تستخدم نظام المستقبل المركز لتوليد الطاقة الكهربائية، يدخل البخار الساخن إلى التوربين بضغط و درجة حرارة 35 bar و 320 °C على التوالي، ويسمح للبخار بالتمدد داخل التوربين إلى ضغط المكثف البالغ 0.07 bar فإذا كانت القدرة الكلية للمحطة هي 2 MW و شدة الاشعاع الشمسي الساقط على المرايا هي 900 W/m² وكفاءة المولد الكهربائي 88% وكفاءة التوربين البولتروبية 82% وكفاءة التحويل بالمجمعات الشمسية 35%، احسب:

1. التدفق الكتلي للبخار

2. عدد المرايا العاكسة (Heliostats) اللازمة اذا كانت مساحة المرآة الواحدة 40 m².

الحل:

$$\eta_{generator} = 0.88 = \frac{2.M.W}{P_{input}} \Rightarrow P_{input} = 2.272 \text{ MW}$$

من جداول البخار نجد خواص البخار عند ظروف دخول البخار إلى التوربين (35bar و 320°C):

$$h_1 = 3029 \text{ kJ/kg} , s_1 = 6.3535 \text{ kJ/kg}$$

يتمدد البخار إلى ضغط المكثف بثبوت الانتروبي لذلك:

$$s_{at p=35 \text{ bar}} = (s_f + x * s_{fg})_{at P=0.07 \text{ bar}} = 0.5592 + x * 7.7167$$

$$\therefore x = 0.7744$$

$$h_2 = (h_f + x h_{fg})_{at P=0.07 \text{ bar}} = 163.4 + 0.7744 * 2409.1 = 2029 \text{ kJ/kg}$$

$$(\Delta h)_{isentropic} = h_1 - h_2 = 3029 - 2029 = 1000 \text{ kJ/kg}$$

$$(\Delta h)_{actual} = 0.82 * 1000 = 820 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Power from the turbine} = \dot{m} * (\Delta h)_{actual}$$

$$\therefore \dot{m} = \frac{P}{(\Delta h)_{actual}} = \frac{2.272 * 10^6}{820 * 10^3} = 2.771 \text{ kg/s} \quad (\text{التدفق الكتلي للبخر})$$

تساوي كفاءة المرايا نسبة الحرارة المنتقلة إلى الماء إلى الحرارة المستلمة من الأشعة الشمسية.
تحتسب كمية الحرارة المنتقلة إلى الماء من المعادلة الآتية:

$$Q_{input} = \dot{m} * (h_1 - h_{f(at \text{ condenser pressure})}) = 2.771 * (3029 - 163.4) = 941 \text{ kW}$$

$$7941 = 0.35 * A_{total} * 0.9$$

$$A_{total} = 25209.52 \text{ m}^2$$

$$\text{No. of mirror} = A_{total} / 40 = 631 \text{ مرآة}$$

الفصل الخامس

5

طاقة الرياح

الفصل الخامس

طاقة الرياح

(Wind energy)

1.5 مقدمة عامة:

تعد طاقة الرياح من أولى أنواع الطاقات المتجددة التي استخدمها الإنسان، إذ تشير الشواهد التاريخية إلى إن البابليون كانوا من الأوائل الذين انتبهوا إلى طاقة الرياح وسخروها لبعض استخداماتهم، حيث صنعوا أشعة بسيطة لتسيير بعض القوارب الصغيرة وهناك شواهد من مسلة حمورابي تشير إلى استخدام طواحين الرياح لأغراض السقي في القرن السابع عشر قبل الميلاد. كما وجد علماء الآثار أثناء حفرياتهم في إيران والصين دلائل على وجود مضخات مياه تعمل بطاقة الرياح لأغراض السقي أيضاً. وانتشرت طواحين الرياح في أوروبا في القرون الوسطى ووصل عددها في عام 1750 إلى أكثر من 800 طاحونة في هولندا وأكثر من 1000 في بريطانيا والشكل (1.5) يبين إحدى الطواحين الهوائية في بريطانيا. استمر استخدام طاقة الرياح بشكل متزايد حتى منتصف القرن التاسع عشر، حيث قل استخدامها بسبب اكتشاف الماكينة البخارية من قبل جيمس واط وقل استخدامها بشكل أكثر بعد اكتشاف النفط في بداية القرن الماضي.

أدى ارتفاع أسعار النفط وظهور مشاكل التلوث الناتجة عن استخدام مصادر الطاقة التقليدية إلى زيادة الاهتمام بطاقة الرياح، ووصلت تكنولوجيا تصنيع التوربينات الريحية في ثمانينات القرن الماضي إلى درجة عالية من الجودة والكفاءة العالية وبكف واطئة نسبياً، وتنتج الدول الصناعية حالياً أنواع عديدة من التوربينات الريحية وبتصاميم مختلفة تتجاوز الطاقة الصادرة من كل منها 4 MW والشكل (2.5) صورة لتوربين ريحي ينتج 1.5 MW، وتقدر القدرة المنتجة باستخدام طاقة الرياح لعام 2004 ما يقارب 39434 MW ولقارة أوروبا النصيب الأكبر من هذه القدرة المنتجة كما مبين في الشكل (3.5) وتحتل ألمانيا مركز الصدارة في مجال استخدام طاقة الرياح لتوليد الكهرباء كما مبين في الجدول (1.5).

إن طاقة الرياح ودورها في توليد الكهرباء عالمياً يتزايد سنوياً بمعدل 13% إلا أنه نظراً لأن حجم هذا التوليد حالياً متواضع ولا يتجاوز حوالي 65 تيراوات ساعة عام 2005، فإن مساهمة طاقة الرياح في توليد الكهرباء ستظل محدودة في المستقبل ويتوقع أن تصل هذه

المساهمة إلى 930 تيراوات ساعة عام 2030 أي بمقدار 3% من إنتاج الكهرباء عندئذٍ. وتبلغ الاستثمارات السنوية حالياً في توسيع طاقة الرياح 7 بليون دولار سنوياً، ومعظم هذه الاستثمارات ستنتم في ألمانيا حيث تبلغ قدرة المحطات الحالية حوالي 17 ألف ميجاوات وهي تشكل 4% من قدرة التوليد الكهربائي في ألمانيا. والاتجاه حالياً هو لوضع محطات التوليد من الرياح في المياه خارج الشاطئ off-Shore وذلك لسرعة الرياح العالية هناك ولتجنب التلوث الصوتي ومناظر المزارع. إلا أن الكلف المتأتبة على ذلك مرتفعة وتؤثر سلباً على اقتصاديات طاقة الرياح كما هو موضح في القسم التالي⁽²⁹⁾.

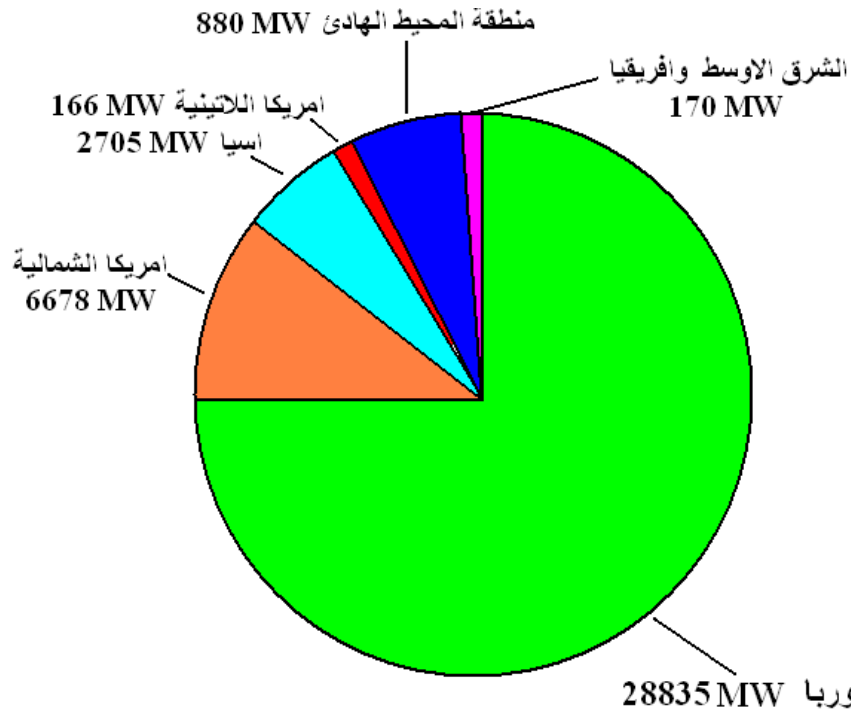
إن تقدير الطاقة المستخلصة من الرياح يحتاج إلى تحليل دقيق و معرفة بعدد من المجالات منها الأنواء الجوية، وميكانيك الموائع ، ومنظومات القدرة الكهربائية، وطرق السيطرة عليها.



الشكل (1.5) الطاحونة الهوائية



الشكل (2.5) توربين ريحي ينتج 1.5 MW عام 1996



الشكل (3.5) توزيع القدرة المنتجة من قبل طاقة الرياح في مختلف مناطق العالم.

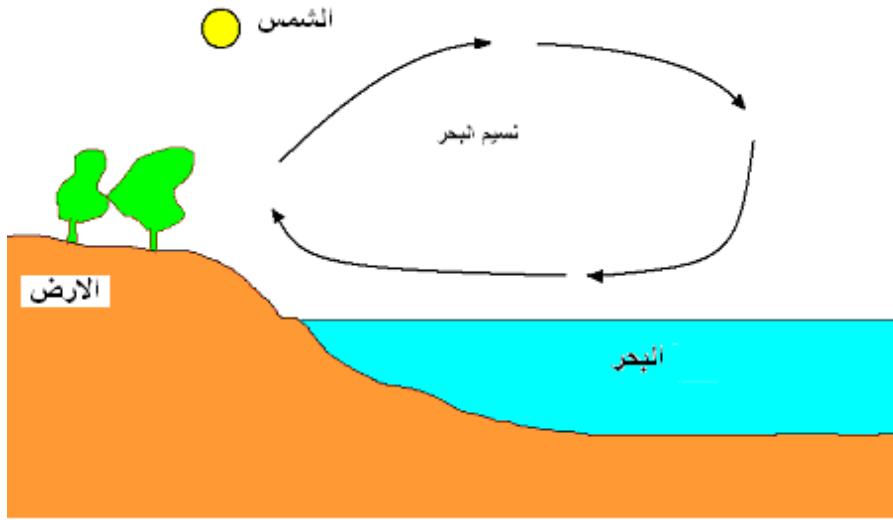
البلد	القدرة المنتجة (MW)
المانيا	14609
الولايات المتحدة الامريكية	6352
اسبانيا	6202
الدنمارك	3115
الهند	2120

الجدول (1.5) الدول الرائدة في مجال استخدام طاقة الرياح

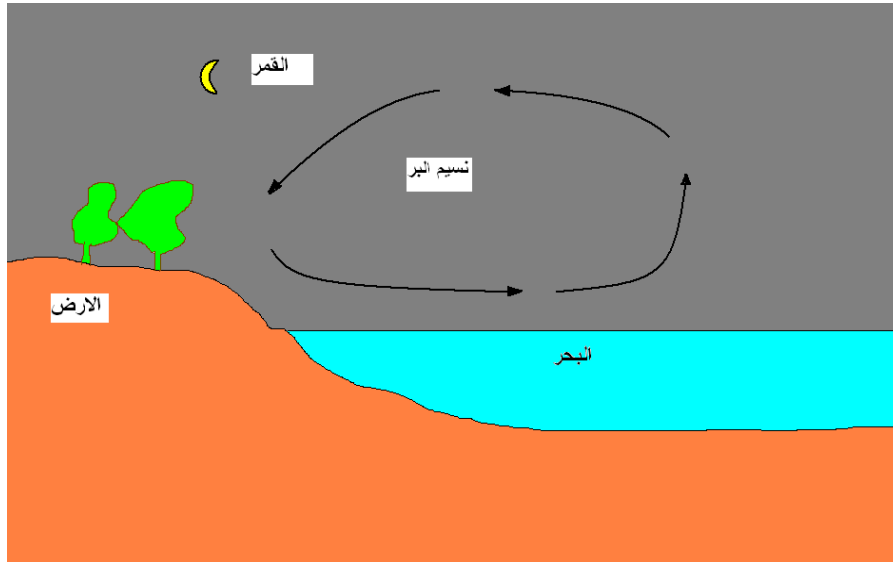
2.5 سبب حركة الرياح:

تتكون الرياح في الكرة الأرضية نتيجة الاختلافات في درجات الحرارة بين المناطق المختلفة من الأرض، فعند سقوط الإشعاع الشمسي على منطقة ما، يسخن الهواء فيها مما يؤدي إلى انخفاض كثافته وتقليل الضغط الجوي. أما المناطق التي ينخفض فيه مقدار الإشعاع الشمسي فأن كثافة الهواء تزداد و بذلك يزداد الضغط الجوي فيها وينتقل الهواء من مناطق الضغط المرتفع إلى مناطق الضغط المنخفض وهذا التدفق في الهواء من مناطق الضغط المرتفع إلى مناطق الضغط المنخفض يسمى الرياح. ولما كانت منطقة خط الاستواء تستلم اكبر كمية من الإشعاع الشمسي، ولو افترضنا إن الأرض لا تدور فسوف يتكون لدينا نظام بسيط من تيارات الحمل (Convection currents) يتجه فيه الهواء الحار في منطقة خط الاستواء إلى طبقات الجو العليا لانخفاض كثافته ويتجه إلى القطبين الشمالي والجنوبي مزيحا بذلك الهواء البارد الموجود في منطقة القطبين إلى خط الاستواء. و بما إن الأرض لها حركة دورانية لذا تنشأ قوى تسمى بقوى كوريولس تؤثر على حركة الرياح، لذلك لا تأخذ الرياح أثناء هبوبها اتجاهها مباشرا و إنما تنحرف إلى يمين اتجاهها المباشر في نصف الكرة الشمالي وإلى يساره في نصف الكرة الجنوبي بسبب دورانها حول نفسها. وهناك نوع آخر من الرياح تسمى بالرياح المحلية والتي تهب على مناطق معينة من الأرض مثل نسيم البر والبحر (Land and water wind) والذي يتولد في المناطق الساحلية نتيجة لاختلاف السعة الحرارية للبحر والساحل كما في الشكل (4.5). فالأرض تكتسب الحرارة بسرعة خلال النهار وتفقد حرارتها بسرعة خلال الليل بينما يكتسب البحر الحرارة ببطء ويفقدها ببطء، ولذلك يسخن الهواء الملامس للأرض أثناء النهار وتقل كثافته ويتجه إلى الأعلى ليحل محله تيار هواء بارد قادم من البحر وهذا هو نسيم

البحر⁽³⁰⁾. أما خلال الليل فينعكس تيار الهواء ليتحرك من الأرض هواء بارد باتجاه البحر ويحل محله تيار دافئ قادم من البحر وهذا هو نسيم البر. وبنفس الأسلوب يوجد هناك في المناطق الجبلية ما يعرف بنسيم الجبل والوادي (Hill and mountain wind). ففي الليل تنزل الرياح عن السطوح الجبلية الباردة نحو الوديان الدافئة بسبب الضغط الواطئ الناشئ من تباين درجات الحرارة ما بين الوادي والجبل، بينما في النهار حيث ترتفع حرارة أعالي الجبال فنتجه الرياح من الوادي نحو الجبل.



(أ) نسيم البحر



(ب) نسيم البر

الشكل (4.5) نسيم البر والبحر

3.5 مميزات و مساوئ طاقة الرياح:

تعتبر طاقة الرياح من الطاقات الرائدة التي يشجع على استخدامها في التطبيقات المختلفة، حيث إن استخدامها لا يخلف أي تلوث للبيئة أو أية أضرار أخرى. كما إنها متوفرة بشكل هائل ويمكن الحصول عليها في أماكن كثيرة. ولها في نفس الوقت مساوئ منها انخفاض معدل الطاقة فيها، وهذا يعني ضرورة توفير مساحات كبيرة نسبياً من الأراضي المفتوحة التي تنصب عليها معدات استغلال طاقة الرياح وعلى ارتفاعات عالية نسبياً أو تكبير حجم المراوح المستخدمة في التوربينات الريحية (Wind mills) لغرض الحصول على معدل عال للطاقة، وبالتالي فإن الكلفة الابتدائية تكون عالية نسبياً في بعض المناطق، إضافة إلى ذلك أنه لا يمكن الحصول على الطاقة بشكل مستمر وبمعدلات ثابتة وذلك نتيجة لتذبذب واختلاف سلوكية حركة الرياح بسبب كونها ظاهرة طبيعية لا يمكن التحكم بها والسيطرة عليها. كما تتعرض ريش التوربينات الريحية إلى الظواهر الطبيعية المختلفة من رطوبة وحرارة وغيرها مما يؤدي إلى تأكلها بسبب الصدأ وغير ذلك من العوامل الميكانيكية الأخرى والتي تسبب تكاليف إضافية لأغراض الحماية والصيانة. تصنف التوربينات الريحية إلى صنفين رئيسيين هما:

4.5 أنواع التوربينات الريحية:

تصنف التوربينات الريحية إلى صنفين رئيسيين هما:

1. توربينات المحور الشاقولي (Vertical axis turbine):

ويكون فيها محور الدوران بشكل عمودي وحركة السطوح المؤثرة باتجاه حركة الرياح وغالباً ما يزيد عدد الريش فيها عن ثلاثة وتستخدم عادة في التطبيقات الميكانيكية مثل ضخ المياه ومن أهم مميزاتهما:

- أ- بسطة التركيب من حيث الهيكل والريش وسهولة الصيانة والتصليح ورخيصة الثمن مقارنة بذات المحور الأفقي.
- ب- يمكن أن تدور بأي اتجاه للرياح أي إنها مرنة الحركة عند تغير اتجاه الرياح ولذلك فهي لا تحتاج إلى نظام لتغيير اتجاه الحركة باتجاه الرياح مما يعني كلفة أقل.
- ت- تحتاج إلى برج بسيط التركيب ورخيص الثمن.
- ث- ذات معامل قدرة أو كفاءة واطئة مقارنة بالتوربينات الأفقية المحور.
- ج- إن كبر مساحة الريش في هذه الأنواع قد يسبب بعض المشاكل عند هبوب رياح قوية.

ح- تحتاج الى منظومة ميكانيكية للشغيل الاولي في حالة كون التوربين متوقف عن الحركة.

توجد تصاميم مختلفة لتوربينات المحور الشاقولي واهم هذه التصاميم هي:

1. توربين داريوس (Darrieus turbine):

وسمي نسبة الى المهندس الفرنسي جورج داريوس الذي صممه لأول مرة عام 1930 ، وشكله الخارجي مشابه الى الخلاط المستخدم في المطابخ وتوجد منه أشكال أخرى على شكل حرف (V) و (H) ويحتوي هذا التوربين على ريشتين او اكثر ويمتاز باداء عالي في مدى السرعة المحصور بين 4.5 - 7 m/s و يستخدم هذا التصميم عادة في مجال توليد الطاقة الكهربائية والشكل (4.5) صورة فوتوغرافية لتوربين داريوس⁽³¹⁾.

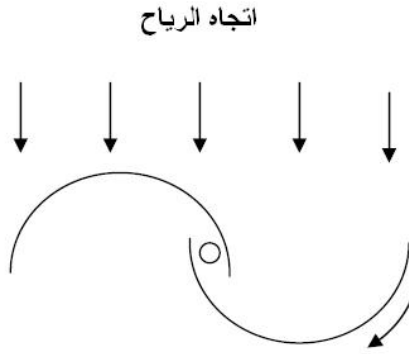


الشكل (4.5) أشكال مختلفة لتوربين داريوس

2. توربين سفانيوس (Savonius turbine):

يتكون هذا التوربين من اسطوانتين متعاكستين على شكل حرف (S) كما مبين في الشكل (5.5). تؤدي الرياح المسلطة على هذا التوربين الى توليد قوة دفع عالية على الجهة المقابلة للرياح، في حين تكون الجهة الاخرى المعاكسة لاتجاه الرياح تحت تأثير قوة اقل من الجهة الاخرى، مما يسبب توليد عزم دوراني يسبب تدوير التوربين، ومعامل القدرة لهذا التوربين

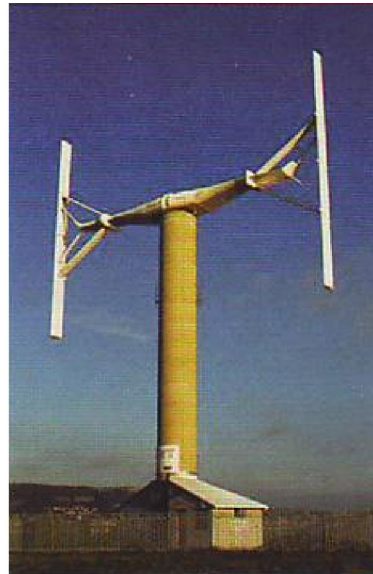
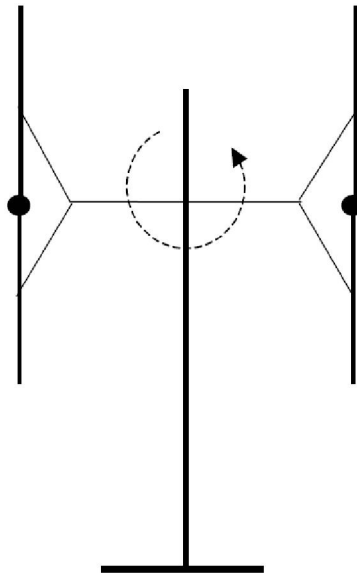
منخفض بالمقارنة مع بقية التصميمات، كما توجد تصاميم كثيرة مستوحاة من هذا المبدأ الأساسي الموضح في أعلاه..



(5.5) توربين سفانيوس

3. توربين مسكروف (Musgrove turbine):

طور هذا التصميم لأول مرة من قبل فريق بحثي يقوده البرفسور (Musgrove) في بريطانيا وشكله الخارجي مشابه للحرف (H) كما موضح في الشكل (6.5) وتسبب الرياح الهابة توليد عزم دوراني يستخدم لتوليد الطاقة الميكانيكية.



الشكل (6.5) توربين مسكروف

2. توربينات المحور الأفقي (Horizontal axis turbine):

ويكون فيها محور الدوران بشكل أفقي ويكون الدوران في مستوى عمودي على اتجاه الرياح ويمكن وضعها إما في مواجهة أو في عكس اتجاه الرياح ومن أهم مميزات توربينات المحور الأفقي هي::

- أ- معامل القدرة أو الكفاءة عال نسبياً.
- ب- مساحة الريش تكون صغيرة.
- ت- ذات تركيب معقد ولذلك تكون صعبة الصيانة وغالية الثمن في صناعتها.
- ث- لا يمكن تغيير الدوران إذا تغير اتجاه الرياح إلا باستخدام نظام سيطرة معين للتحكم بالريش.

توجد تصاميم مختلفة لتوربينات المحور الأفقي فهناك التوربين الاحادي الريش، والذي يكون اقل كلفة بسبب الاقتصاد في المواد المصنعة للريشة الناتجة عن الغاء ريشة كاملة وتظهر مشاكل الموازنة بصورة جلية نتيجة لوجود ريشة واحدة والتي يتم معالجتها عن طريق إضافة ثقل إلى الطرف الاخر كما موضح في الشكل (7.5). وأكثر التوربينات الأفقية المحاور استخداماً في مجال توليد الطاقة لكهربائية هي التوربينات الثلاثية الريش ويعود السبب إلى إن توزيع وتوازن الأحمال على محور الدوران يكون أفضل من استخدام ريشة واحدة أو ريشتين. ويعد حساب الأحمال على محور الدوران أمراً بالغ الأهمية، حيث يبلغ وزن الريشة الواحدة المصنعة من مادة الفيبير كلاس قرابة 2 طن وتوجد توربينات متعدد الريش إلا أنها غالباً ما تستخدم في ضخ المياه والشكل (8.5) صورة فوتوغرافية لعدد من التوربينات الريحية الثلاثية الريش المنشأة في البحر لإغراض توليد الطاقة الكهربائية.

5.5 التحليل الرياضي لطاقة الرياح:

إن معدل القدرة لأي مائع متحرك يساوي حاصل ضرب معدل التدفق الكتلي $\dot{m}$ في الطاقة الحركية للرياح ولذلك فأن:

$$P_{total} = \dot{m} * K.E = \dot{m} * \frac{V_i^2}{2} \quad (5.1)$$

إذ إن:

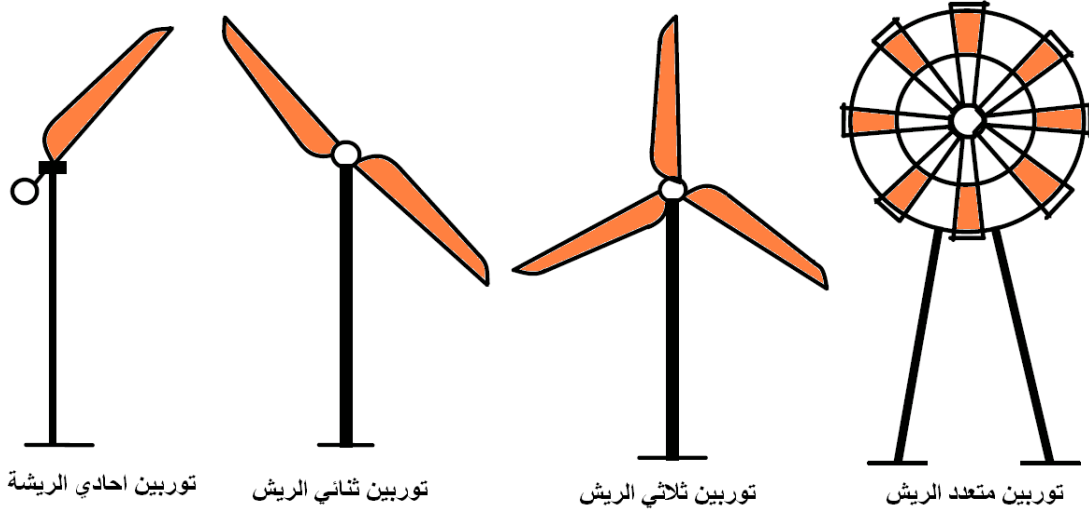
P_{total} = القدرة الكلية (W)

$\dot{m}$ = التدفق الكتلي (kg/s)

V_i = سرعة الرياح الداخلة إلى التوربين الريحي (m/s)

ويحسب معدل التدفق الكتلي من معادلة الاستمرارية:

$$\dot{m} = \rho * A * V_i \quad (5.2)$$



الشكل (7.5) التوربينات الافقية المحاور



الشكل (8.5) صورة فتوغرافية لعدد من التوربينات الريحية الثلاثية الريش المنشأة في البحر

إذن :

كثافة الهواء الداخل إلى التوربين $\rho = (\text{kg/m}^3)$

مساحة الجزء المعرض للرياح أو مساحة مروحة التوربين $A = (\text{m}^2)$

بتعويض المعادلة (5.2) في المعادلة (5.1) نحصل على:

$$P_{total} = \frac{1}{2} * \rho * A * V_i^3 \quad (5.3)$$

تشير المعادلة (5.3) إلى أن القدرة الناتجة من الرياح تتناسب مع مكعب سرعة الرياح وكذلك مع المساحة التي تغطيها ريش التوربين الريحي عند تحريكها، فإذا زادت سرعة الرياح من 1m/s إلى 2 m/s فإن القدرة الناتجة المستخرجة ستزداد 2^3 أي ثمانية إضعاف، ولو زادت السرعة إلى 3 m/s فإن القدرة المستخلصة ستزداد بـ 27 مرة.

من المستحيل تحويل كل طاقة الرياح إلى طاقة ميكانيكية، ولحساب اعظم طاقة ممكن استغلالها من طاقة الرياح، سوف نأخذ توربين أفقي المحور، نفرض إن سمك محور الدوران هو (a-b) كما في الشكل (9.5)، حيث ان سرعة وضغط الهواء الداخل إلى التوربين هي V_i و P_i على التوالي و سرعة وضغط الهواء الخارج من التوربين هي V_e و P_e على التوالي ومن توزيع السرعة نلاحظ إن سرعة الهواء الخارج من التوربين اقل من سرعة الهواء الداخل بسبب استنزاف الطاقة الحاصل في التوربين والذي تحول الى طاقة ميكانيكية وبتطبيق معادلة برنولي بين النقطتين i و a نحصل على:

$$\frac{P_i}{\rho} + \frac{V_i^2}{2} = \frac{P_a}{\rho} + \frac{V_a^2}{2} \quad (5.4)$$

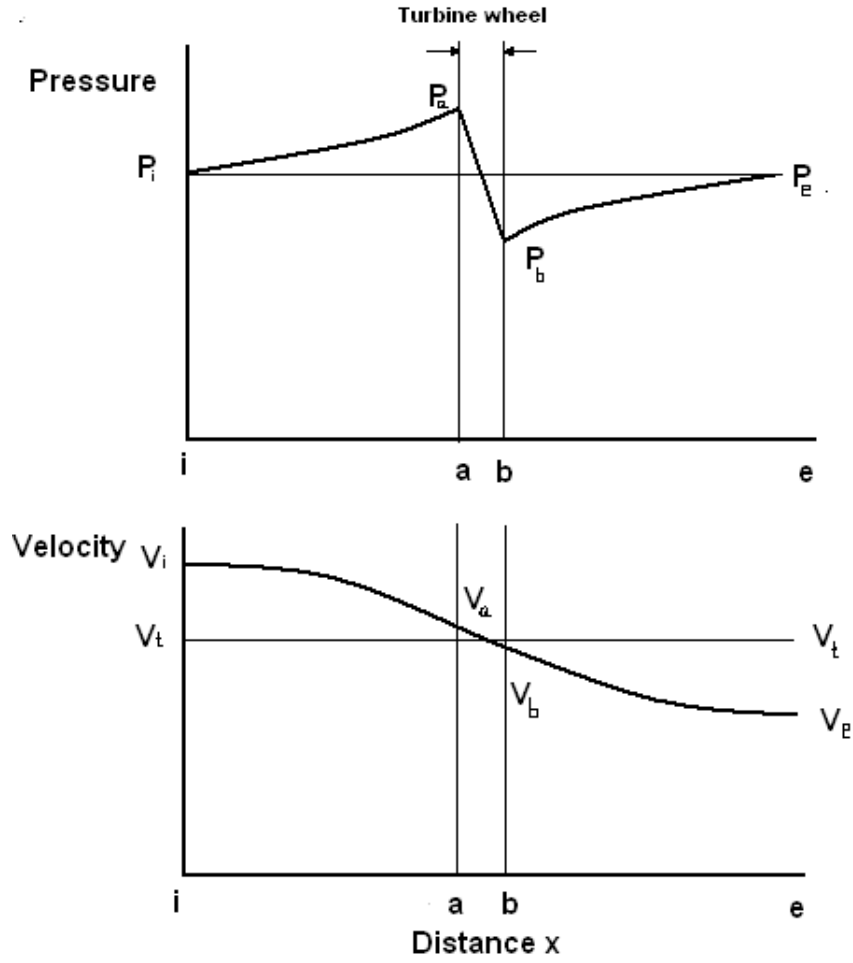
وبنفس الأسلوب بين النقطتين (b-e) نحصل على:

$$\frac{P_e}{\rho} + \frac{V_e^2}{2} = \frac{P_b}{\rho} + \frac{V_b^2}{2} \quad (5.5)$$

وبطرح المعادلة (5.5) من المعادلة (5.4) نحصل على:

$$P_a - P_b = P_i + \rho * \frac{V_i^2 - V_a^2}{2} - P_e - \rho * \frac{V_e^2 - V_b^2}{2} \quad (5.6)$$

من الرسم نلاحظ ان:



الشكل (9.5) توزيع السرعة والضغط على توربين ريحي أفقي المحور

$$P_e = P_i$$

$$V_t \approx V_a \approx V_b \quad (\text{لأن التغير في السرعة قليل})$$

بتعويض القيم أعلاه في المعادلة (5.6) نجد:

$$P_a - P_b = \rho * \left(\frac{V_i^2 - V_e^2}{2} \right) \quad (5.7)$$

و تحسب القوة المحورية F_x المؤثرة باتجاه موازي لاتجاه الرياح على محور التوربين من المعادلة الآتية:

$$F_x = (P_a - P_b) * A = \rho * A * \left(\frac{V_i^2 - V_e^2}{2} \right) \quad (5.8)$$

وتساوي القوة أيضا مقدار التغير في الزخم $\Delta(\dot{m}V)$ حيث إن $\dot{m}$ مقدار التدفق الكتلي ويعطى بالمعادلة الآتية:

$$\dot{m} = \rho * A * V_t \quad (5.9)$$

لذلك فإن القوة المحورية تكون:

$$F_x = \rho * A * V_t * (V_i - V_e) \quad (5.10)$$

وبمساواة المعادلتين (5.8) و (5.10) نحصل على :

$$V_t = \frac{1}{2} * (V_i + V_e) \quad (5.11)$$

ان الفرق بين الطاقة الحركية الداخلة والخارجة هو مقدار الشغل المنجز ، لذلك:

$$W = K.E_i - K.E_e = \frac{V_i^2 - V_e^2}{2} \quad (5.12)$$

و تعرف القدرة على إنها الشغل المنجز لوحدة الزمن ويعطى بالمعادلة الآتية:

$$P = \dot{m} * \frac{V_i^2 - V_e^2}{2} = \frac{1}{2} * \rho * A * V_t * (V_i^2 - V_e^2) \quad (5.13)$$

وبالتعويض عن قيمة V_t من المعادلة (5.11) تصبح المعادلة (5.13) بالشكل الآتي:

$$P = \frac{1}{4} * \rho * A * (V_i + V_e) * (V_i^2 - V_e^2) \quad (5.14)$$

باشتقاق المعادلة (5.14) نسبة لـ V_e ومساواتها بالصفر نجد ان:

$$3V_e^2 + 2V_iV_e - V_i^2 = 0$$

وبتبسيط المعادلة أعلاه، نجد إن سرعة الرياح الخارجة من التوربين المثالية تساوي:

$$V_e(opt) = \frac{1}{3} V_i \quad (5.15)$$

أي إن أعلى قدرة تنتج عندما تكون سرعة الرياح الخارجة من التوربين ثلث سرعة الرياح الداخلة إلى التوربين. وبالتعويض المعادلة (5.15) في المعادلة (5.14) نحصل على اعظم قدرة يمكن الحصول عليها من طاقة الرياح والتي تساوي:

$$P_{\max} = \frac{8}{27} * \rho * A * V_i^3 \quad (5.16)$$

وتكون الكفاءة العظمى لمنظومات الرياح والتي تسمى معامل القدرة (Power coefficient) والتي تساوي نسبة القدرة العظمى المشتقة من طاقة الرياح (معادلة 5.16) إلى طاقة الرياح الكلية (معادلة 5.3) :

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\max}}{P_{\text{total}}} = \frac{8}{27} * 2 = \frac{16}{27} = 0.5926 \quad (5.17)$$

ويمكن القول إن التوربينات الريحية مهما كانت كفاءتها فأنها لا تستطيع إن تحول أكثر من 60% من طاقة الرياح الكلية بأحسن الأحوال ويمثل الشكل (10.5) معامل القدرة لمختلف أنواع التوربينات الريحية ولسرع معينة. وتحسب القدرة الحقيقية للتوربينات الريحية بالشكل الآتي:

$$P_{\text{total}} = \frac{1}{2} * \eta * \rho * A * V_i^3 \quad (5.18)$$

حيث ان η = كفاءة التوربين وتتراوح نسبتها ما بين (30-40%) .
ان العامل المهم في تحسين كفاءة منظومات الرياح هو نسبة سرعة الإطراف والتي تربط ما بين سرعة الرياح وسرعة طرف ريش التوربين الريحي:

$$\lambda = \frac{\text{Tip.speed.of.blade}}{\text{Wind.speed}} =$$

لان توربينات المحور الأفقي غالبا ما تكون من شفرتين او ثلاث وبما ان كثافة الطاقة لا تتعدى 650 W/m^2 ولذلك لتوليد قدرة 600 W/m^2 يستوجب توفير عنفات القطر الكلي لها 43 m وإذا ما دار التوربين الريحي بسرعة 750 دورة بالدقيقة سوف تحصل على سرعة هائلة جدا في الإطراف، فإذا ما دار التوربين بسرعة بطيئة جدا فان معظم الرياح ستمر بشكل مستقيم عبر الثغرة ما بين الشفرات ، وبالتالي لن تعطي أي قدرة ولكن اذا ما دار بسرعة عالية فان الريش ستتشوه وتمثل حاجزا قويا للرياح وستشكل شفرات الدوار اضطرابا عند دورانها في الهواء ومن اجل الحصول على نسبة سرعة الأطراف المثالية الى سرعة الرياح المثالية (λ) فان الصيغة التالية قد تم البرهان على صحتها تجريبيا:

$$\lambda(\text{max.power}) = \frac{4\pi}{n} \quad (5.19)$$

حيث n عدد الشفرات.

$$v = wr$$

$$w = \frac{2\pi n}{60}$$

$$\therefore v = \frac{2\pi nr}{60} \quad (5.20)$$

6.5 القوى المؤثرة على ريش التوربين:

يوجد هناك نوعان من القوى المؤثرة على التوربين الريحي الأفقي المحور، النوع الأول هي القوى المحيطية المؤثرة باتجاه دوران ريش التوربين والنوع الثاني هي القوى المحورية المؤثرة باتجاه الرياح والتي تسبب دفع محوري مما يستلزم بناء برج قوي لمقاومة هذا الدفع المحوري.

إن القوى المحيطية أو العزم المدور يحسب من العلاقة الآتية:

$$T = \frac{P}{w} = \frac{P}{\pi * D * N} \quad (5.21)$$

حيث أن:

T = العزم

w = السرعة الزاوية للتوربين

D = قطر مروحة التوربين

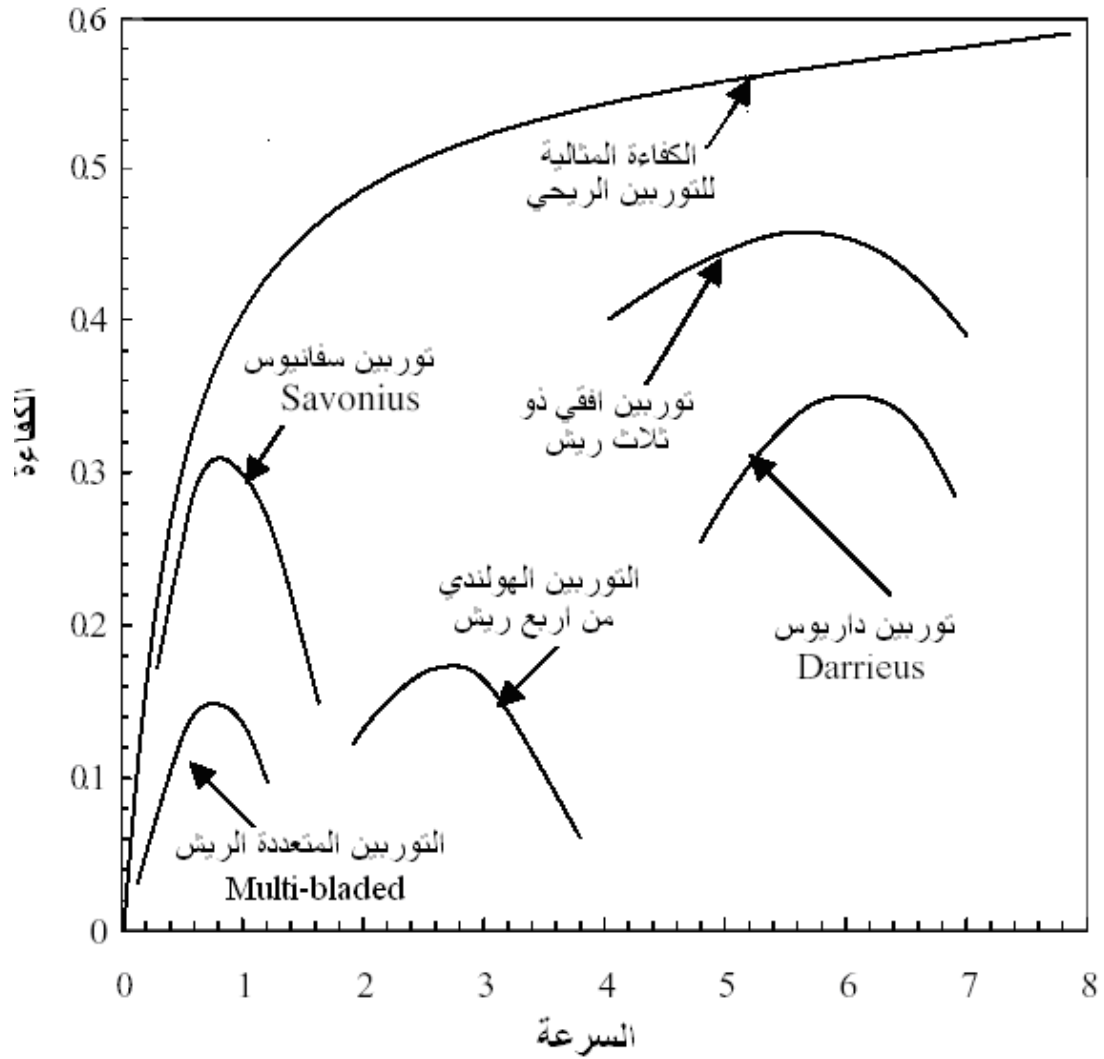
N = السرعة الدورانية للتوربين

بتعويض المعادلة (5.18) في المعادلة (5.21) نجد أن :

$$T = \frac{\eta * \rho * D * V_i^3}{8 * N}$$

ويمكن الحصول على اعظم عزم مسلط على ريشة التوربين الريحي الأفقي بتعويض الكفاءة العظمى في المعادلة أعلاه:

$$T_{\max} = \frac{2}{27} \frac{\rho * D * V_i^3}{N} \quad (5.22)$$



الشكل (10.5) معامل القدرة لأنواع مختلفة من التوربينات الريحية

أما القوى المحورية فتحسب من المعادلة (5.10):

$$F_x = \frac{1}{2} * \rho * A * (V_i^2 - V_e^2) = \frac{\pi}{8} * \rho * D^2 * (V_i^2 - V_e^2)$$

وللحصول على أعلى كفاءة يجب أن تكون سرعة الرياح الخارجة من التوربين ثلث سرعة الرياح الداخلة الى التوربين:

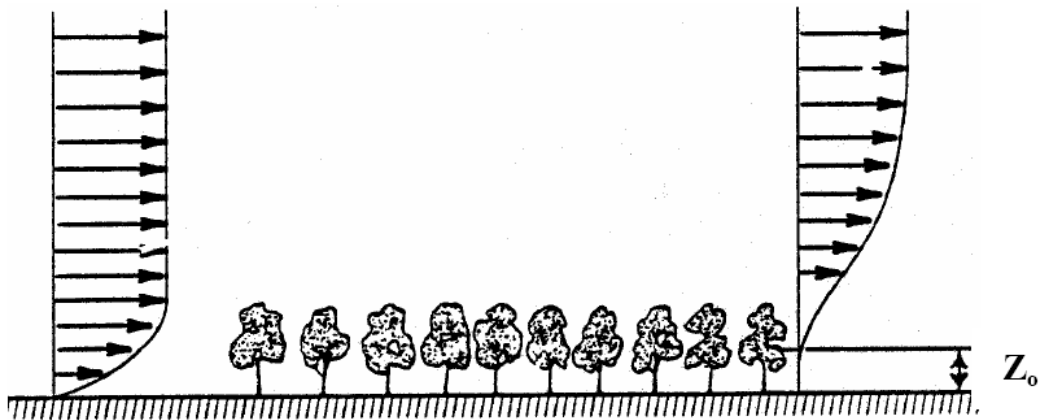
$$F_{x,max} = \frac{4}{9} * \rho * A * (V_i^2) = \frac{\pi}{9} * \rho * D^2 * (V_i^2) \quad (5.23)$$

و يلاحظ إن القوى المحورية تتناسب طرديا مع مربع القطر وبالتالي فإن التوربينات ذات الأقطار الكبيرة تحتاج إلى تصاميم دقيقة لمواجهة هذه القوى الكبيرة.

7.5 اختيار الأماكن الملائمة:

إن استغلال أي طاقة من الطاقات المتجددة يجب إن يسبقها دراسة لخصائص هذه الطاقة لغرض استخدامها بالشكل الذي يضمن الجدوى الاقتصادية منها، وطاقة الرياح واحدة من هذه الطاقات. لذا فإن التفكير باستغلالها كطاقة بديلة يجب إن يسبقه أعداد الدراسات اللازمة لخصائص الرياح في المنطقة المراد استغلال طاقة الرياح فيها، وتوجد مجموعة عوامل تحدد المنطقة الملائمة منها⁽³²⁾:

1. يجب إن تكون الرياح بسرعه ملائمة ومستمرة ومناسبة لنوع التوربين المستخدم.
2. يجب إن يكون الموقع قريبا من خطوط نقل الطاقة الكهربائية وقريب من مناطق الاستهلاك.
3. يجب إن تكون الأرض المقام عليها التوربين الريحي رخيصة السعر نسبيا لتقليل الكلفة الاقتصادية.
4. يوجد الموقع في ارض مفتوحة ولا يحيط به أي عائق طبيعي أو صناعي، حيث إن وجود العوائق (Obstacles) من العوامل المؤثرة تأثيرا حادا على سرعة الرياح، لذا يجب إن يكون التوربين الريحي بعيدا بقدر الامكان عن العوائق لتلافي تأثيرها، وافضل المواقع لنصب التوربينات الريحية هو أما على شواطئ البحار أو بداخل البحار تفاديا لفقد الرياح جزء من طاقتها بالاحتكاك الناتج عن خشونة السطح (Roughness)، ويعبر عن كل سطح بطول معامل الخشونة بالمتر (Roughness length) (Z_o) ويعرف الطول بالمتر الذي تكون سرعة الرياح عنده مساوية للصفر كما في الشكل (11.5) والجدول (2.5) يبين معامل الخشونة لعدد من اسطح الارض المختلفة.



الشكل (11.5) تأثير خشونة السطح على سرعة الرياح

نوعية السطح	معامل الخشونة (z_o)
مدينة او غابة كثيفة	1
ضواحي المدينة	0.5
تجمعات شجرية وحواجز	0.3
الكثير من الأشجار والشجيرات	0.2
ارض زراعية يتخللها مصدات رياح	0.1
ارض زراعية ذات مظهر مفتوح	0.05
ارض زراعية حقليّة مفتوحة جدا	0.03
مناطق مكشوفة (مهبط مطار)	0.01
مسطحات مائية (بحار-رمال)	0.0002

الجدول (2.5) معامل الخشونة لعدد من اسطح الارض المختلفة

وكذلك يمكن تركيب التوربينات الريحية على مرتفعات عالية كالجبال و التلّول، ويبين الشكل (12.5) شكل سريان الرياح فوق تل والمعادلة الآتية تمكن من حساب الارتفاع (l) الذي يحدث عنده اقصى تزايد في السرعة:

$$l \cong 0.3z_o \left(\frac{l}{z_o}\right)^{0.67}$$

حيث $2L$ قطر المرتفع و l هو الارتفاع الذي يحصل عنده اعلى تزايد في السرعة. تختلف سرع الرياح عند سطح الارض عنه عند الارتفاعات العالية، فكلما كانت الارتفاع اكثر كلما زادت سرعة الرياح، وهذا يفهم من المعادلة الآتية:

$$\frac{V}{V_r} = \left[\frac{H}{H_r} \right]^\alpha \quad (5.24)$$

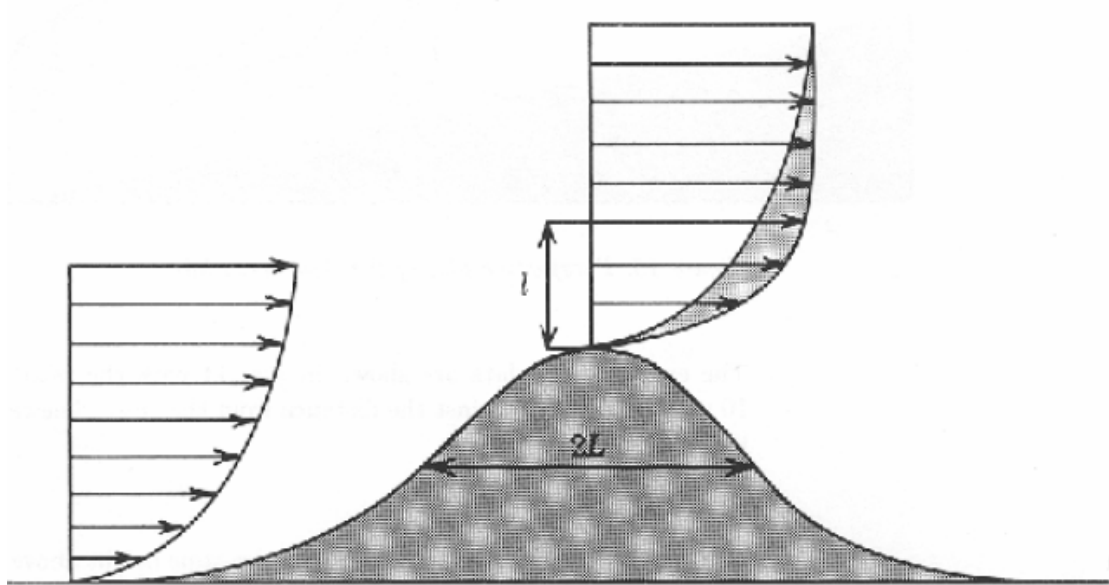
إذ ان:

V = سرعة الرياح عند ارتفاع معين

V_r =(9.1m) سرعة الرياح عند ارتفاع قياسي هو

H = الارتفاع المطلوب حساب سرعة الرياح عنده

H_r =(9.1 m) الارتفاع القياسي الذي تكون عنده سرعة الرياح مقاسة في محطات الأنواء



الشكل (12.5) شكل سريان الرياح فوق تل حيث $2L$ قطر المرتفع و l هو الارتفاع الذي يحصل عنده اعلى تزايد في السرعة.

أما α فيسمى معامل القص الأسى للرياح ، وكلما زادت قيمته كلما كانت سرعة الرياح الساقطة على ريش التوربين اقل ويحسب من المعادلة الآتية:

$$\alpha = \alpha_o \left(1 - \frac{\log V_r}{\log V_o} \right) \quad (5.25)$$

إذ ان :

$$\alpha_o = \left(\frac{Z_o}{H_r} \right)^{0.2}$$

حيث ان Z_o طول الخشونة للمنطقة المجاورة للتوربين و V_o سرعة ثابتة مقدارها 67.1 m/sec.

8.5 طرق تحديد خصائص الرياح:

ان تحليل مناخ الرياح وتحديد الموقع الامثل لانشاء التوربينات الريحية يحتاج الى بيانات دقيقة ولمدد طويلة قد تصل الى 10 سنوات، بالإضافة الى معرفة تفصيلية بطبيعة سطح الارض المقترحة لاقامة مثل هذه المنشآت والتي ذكرناها سابقا مثل التضاريس و خشونة الارض ووجود العوائق ومن المعروف ان سرع الرياح تزداد مع الارتفاع عن سطح الارض في طبقات الجو الدنيا مع عدم تغيرها في طبقات الجو العليا وهذا التغير في طبقات الجو الدنيا ناتج عن خشونة سطح الارض والعوائق.

ان تحديد المكان الامثل لاقامة منشآت طاقة الرياح يستلزم تحري الدقة في قياسات سرع الرياح وأيضا أماكن وضع ابراج القياس وارتفاعاتها بحيث تكون بعيدة عن العوائق وعلى ارتفاع كبير من سطح الارض ويفضل ان يكون في نفس ارتفاع التوربين الريحي المزمع تركيبه في هذا الموقع وغالبا ما يستخدم الانيموميتر (Cup Anemometer) المبين في الشكل (13.5) لقياس سرعة الرياح، اذ تسجل عدد اللفات اليكترونيا وتترجم الى سرعة الريح بوحدات متر لكل ثانية، وتوجد انواع اخرى من الانيموميتر مثل انيوميتر الضغط والانيموميتر المروحي (Propellers Anemometer) والانوموميتر الصوتي (Sonic Anemometer) وغيرها. اما اتجاه الرياح فتستخدم ريشة الرياح (Wind vane) لتحديد الاتجاه، ويتم القياس خلال دائرة كاملة (360 درجة) والغرض من قياس الاتجاه هو معرفة الاتجاه السائد للرياح كذلك توزيع السرعات المقاسة على الاتجاهات المختلفة، ويؤخذ هذا في الاعتبار عند تحليل البيانات وتخطيط مزارع الرياح (Wind farm). ان انسب الطرق لقياس سرعة الرياح في موقع ما هو وضع الانيموميتر أعلى برج القياس حتى لا يتأثر بالبرج، ويفضل ان يكون ارتفاع البرج نفس ارتفاع التوربين المزمع تركيبه والشكل (14.5) شكل عام لبرج قياس يتم فيه قياس سرع الرياح عند ارتفاعات مختلفة.



(b) ريشة الرياح

(a) الانيموميتر

الشكل (13.5) اجهزة قياس سرعة واتجاه الرياح

توجد عدة طرائق لتحديد خصائص الرياح المناسبة منها:

أ. طريقة معدل سرعة الرياح:

وهي من أبسط الطرق ويحسب معدل السرعة فيه باستخدام المعادلة الآتية:

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (5.26)$$

حيث أن :

$$\sum_{i=1}^n V_i = \text{مجموع كل سرع الرياح المقاسة}$$

$$n = \text{عدد القراءات المقاسة}$$

ب. طريقة معدل سرعة الطاقة:

تتناسب القدرة المنتجة طرديا مع مكعب سرعة الرياح، لذا تم الاعتماد في تحديد سرع الرياح الملائمة على معدل سرعة الطاقة كما يأتي:

$$\bar{V}_E = \left(\frac{\sum_{i=1}^n V_i^3}{n} \right)^{1/3} \quad (5.27)$$

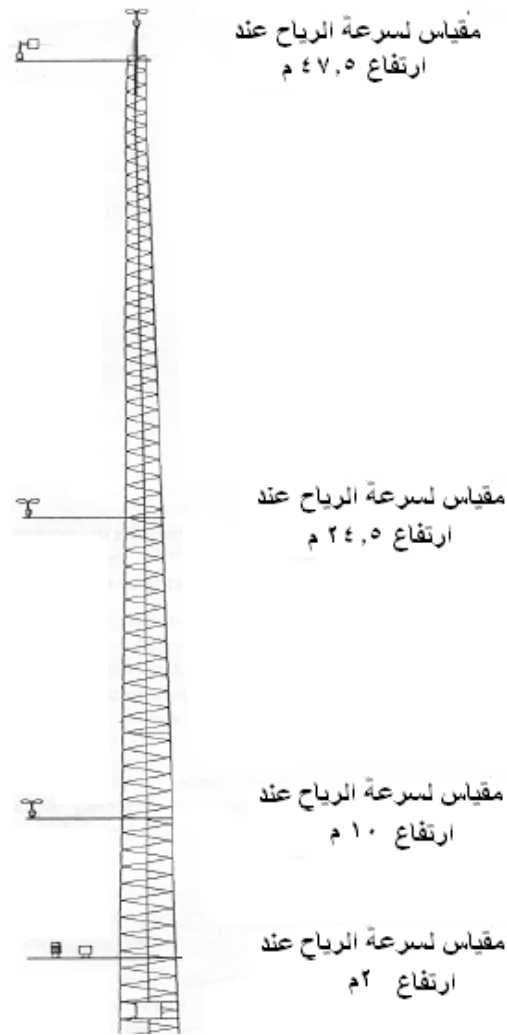
ولفهم الفرق بين الطريقتين السابقتين في تحديد الكمية الحقيقية لطاقة الرياح المنتجة نأخذ مجموعة من القراءات المقاسة خلال ساعة بمعدل قراءة واحدة لكل 10 دقائق كما مبين في الجدول (3.5) حيث تم اعتماد كثافة الهواء مساوية الى 1.24 kg/m^3 عند حساب القدرة المنتجة لكل متر مربع وفق المعادلة الآتية:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3$$

فعند الاعتماد على طريقة معدل سرعة الرياح تكون قيمة القدرة المنتجة تساوي:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} * 1.24 * 6.45^3 = 166.37 \text{ W/m}^2$$

وعند الاعتماد على طريقة معدل سرعة الطاقة، بحيث يتم حساب الطاقة المنتجة لكل قراءة ومن ثم يؤخذ معدل القراءات الناتجة، تكون قيمة الطاقة المنتجة 207 W/m^2 أي أن معدل الانحراف بين الطريقتين حوالي 20% ولهذا يتم الاعتماد عادة على طريقة معدل سرعة الطاقة.



الشكل (14.5) شكل عام لبرج قياس سرعة الرياح

القراءة	السرعة V (m/s)	V^3	القدرة (W/m^2)
1	4.3	79.51	49.29
2	4.7	103.82	64.37
3	8.3	571.79	354.51
4	6.2	238.33	147.76
5	5.9	205.38	127.33
6	9.3	804.36	498.7
	$m/s \bar{V} = 6.45$		$\bar{P} = 207$

الجدول (3.5)

ت. نموذج توزيع ويبل (Weibull distribution model):

تم تطوير نماذج رياضية خاصة لتحديد احتمالية توفر الرياح بسرور أعلى من سرعة محددة يتم اختيارها للمناطق المراد دراستها، ومن أهم هذه النماذج هو نموذج توزيع ويبل، حيث يعطي هذا النموذج احتمالية وجود الرياح بسرعة أعلى من سرعة محددة عندما يكون معدل السرور (Mean wind velocity) معلوما كما في المعادلة الآتية:

$$P(V_i > V) = e^{-(V/C_r)^{K_r}} \quad (5.28)$$

حيث ان :

$$P(V_i > V) = \text{الاحتمالية}$$

$$K_r = 1.09 + 0.2 * V$$

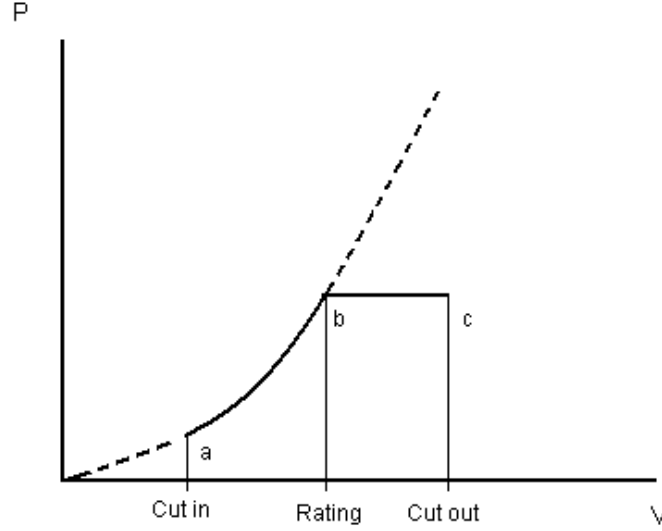
$$C_r = \frac{\bar{V}}{\Gamma(1 + \frac{1}{K_r})}$$

Γ = Gamma function

و بسبب اعتماد طاقة الرياح على مكعب سرعة الرياح فإن التغير الذي يطرأ على سرور الرياح يسبب تغيرا كبيرا في مقدار الطاقة المنتجة، ويلجأ المشغلون إلى إيقاف التوربينات الريحية عندما تكون سرعة الرياح أقل من حد معين يسمى سرعة الإيقاف الدنيا (Cut-in velocity) بسبب الخسائر الميكانيكية العالية، وكذلك يتم توقف التوربين عندما تكون سرور الرياح عالية لحماية التوربين من التوقف وتسمى هذه السرعة بسرعة الإيقاف العليا (Cut-out Velocity) وعادة يتم المحافظة على سرعة التوربين ضمن مدى معين يسمى (Flat rating) كما مبين في الشكل (15.5). تكون سرعة التوربين متغيرة في المنطقة المحصورة بين نقطة a و b وثابتة في المنطقة المحصورة بين نقطة b و c.

9.5 استخدامات طاقة الرياح:

تعددت استخدامات طاقة الرياح، ففي القرون الماضية استخدمت طاقة الرياح بصورة رئيسة لطحن الحبوب وسقي المزروعات، اما في الوقت الحاضر فالاستخدامات الرئيسية لطاقة الرياح هو في مجال توليد الطاقة الكهربائية ولاغراض الشقي.

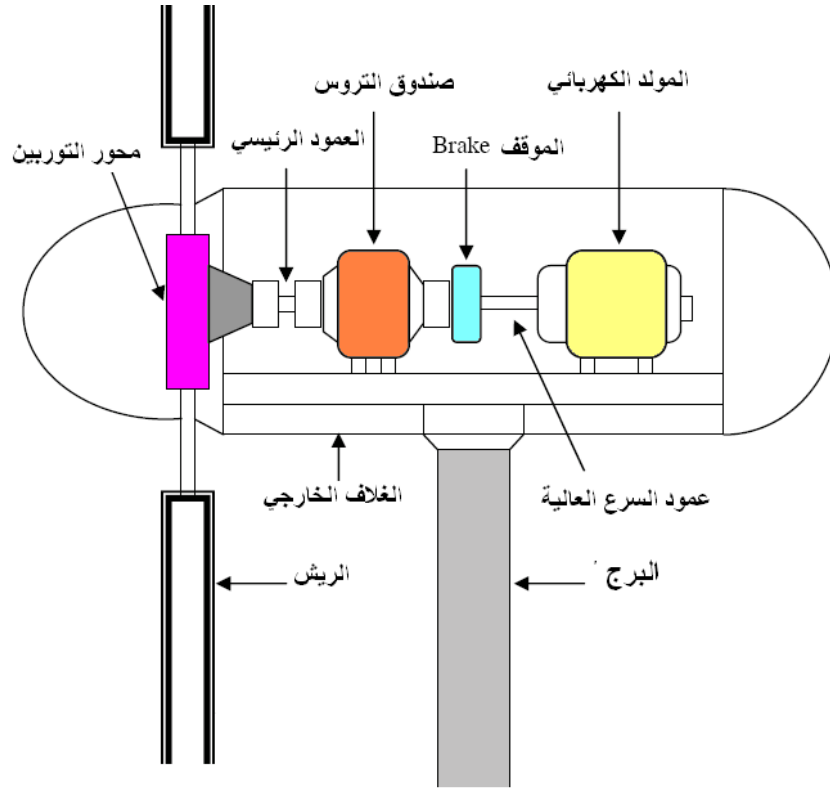


الشكل (15.5) حدود عمل التوربين الريحي

1. توليد الطاقة الكهربائية:

حققت عدد من الدول تقدم مذهل في مجال استخدام طاقة الرياح لتوليد الكهرباء. تحول التوربينات الطاقة الحركية Kinetic energy في الرياح إلى كهرباء ومعظم التوربينات الريحية المستخدمة في توليد الكهرباء هي من التوربينات الأفقية المحاور الثلاثية الريش (الشكل 5.8) وفي بدء التشغيل يعتمد المولد الحثي على سحب تيار كهربائي من الشبكة الوطنية وهو ما يعني ان التوربين يعمل في البداية كمحرك حتى تصل سرعة دوران الريش الى سرعة معينة تختلف باختلاف تصميم التوربين (27 دورة / دقيقة على سبيل المثال). تتكون محطة توليد الطاقة الكهربائية بصورة رئيسية من الأجزاء المبينة في الشكل (16.5) وهي⁽³³⁾:

1. البرج (Tower).
2. الجزء الدوار (الريش ومحور العجلة الدوارة).
3. عمود السرعة العالية والواطئة.
4. صندوق التروس (Gear box).
5. المولد الكهربائي (Generator).
6. المتحسسات وموجهات التوربين (Sensors and yaw drive).
7. منظمات القدرة ووحدات السيطرة (Power regulation and controlling units).
8. أنظمة السلامة (Safety systems).

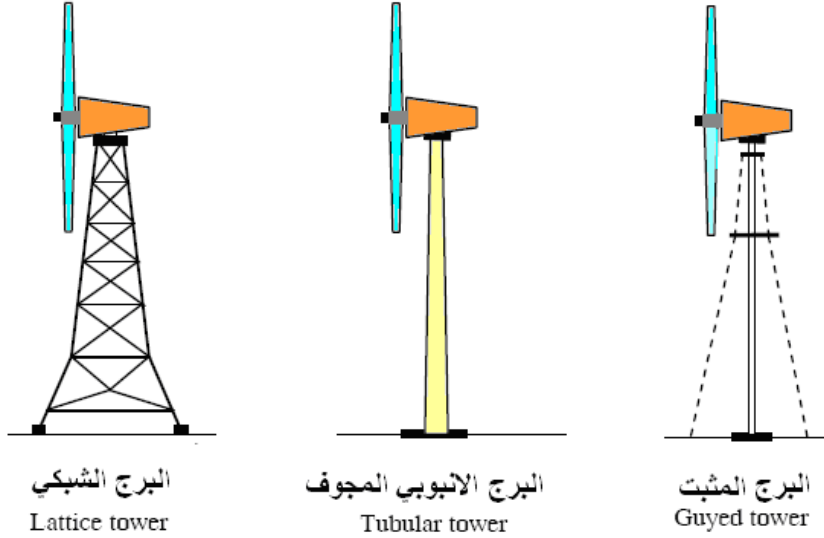


الشكل (16.5) الأجزاء الرئيسية للتوربين الريحي المستخدم لتوليد الطاقة الكهربائية.

يقوم البرج بحمل كل أجزاء التوربين الريحي والذي يزيد وزنه أحيانا عن 30 طن وتوجد هناك ثلاث أنواع من الأبراج المستخدمة لهذا الغرض وموضحة بالشكل (17.5) وهي البرج الشبكي (Lattice tower) والبرج المجوف الأنبوبي (Tubular tower) والبرج المثبت (Guyed tower) والتوربين الشبكي مشابه في شكله لأعمدة نقل الطاقة الكهربائية وهو اقل كلفة بمقدار النصف بالمقارنة مع النوعين الآخرين، وبالرغم من ذلك فهو اضعف من الناحية الانشائية ويشكل صعوبة عند صيانة التوربينات الريحية وقل جمالية، اما البرج الأنبوبي فهو أكثر استخداما ومقاوم جدا للظروف الخارجية ويتم انشاءه من عدد الانابيب الحديدية او الكونكريتية بطول 10-20 م التي يتم ربطها بعضها ببعض والنوع الثالث هو البرج المثبت فيتكون من برج يتم تثبيته بواسطة اسلاك حديدية من اربعة جهات واستخدامه محدود في بعض التوربينات الصغيرة الحجم وبصورة عامة كلما ازداد حجم التوربين الريحي ازداد حجم البرج المنشأ لحمل هذا التوربين وازدادت كلفة الانشاء تبعا لذلك، وتشكل كلفة البرج حوالي 20% من الكلفة الكلية للتوربين الريحي ولذلك ظهر اتجاه جديد في الآونة الأخيرة لتركيب أكثر من توربين ريحي على نفس البرج أو ما يعرف باسم شجرة المراوح المبينة في الشكل (18.5). الجزء الثاني من

التوربين الريحي هو الجزء الدوار (الريش) وهو المسئول عن تحويل طاقة الرياح الى طاقة ميكانيكية وتصنع هذه الريش من مواد مختلفة مثل الخشب والألمنيوم والحديد وفي الفترة الأخيرة استخدمت مادة الألياف الزجاجية لصناعة هذه الريش وتربط هذه الريش الى منظمات لتغيير زوايا هذه الريش للحصول على افضل أداء. يربط الجزء الدوار عن طريق العمود الرئيسي والذي يسمى أحيانا بعمود السرعة الواطئة إلى صندوق التروس والذي يقوم بتحويل السرعة الدورانية للجزء الدوار والتي تتراوح ما بين 30-50 دورة /دقيقة الى السرعة المثلى لعمل المولد الكهربائي والتي تتراوح ما بين 1000-1500 دورة / دقيقة عن طريق عمود السرعة العالية. يربط صندوق التروس الى موقف ميكانيكي (Brake) لاييقاف التوربين الريحي عن الحركة عن وجود رياح قوية جدا تزيد سرعتها عن 25 م/ثانية أو وجود صيانة ويربط هذا الموقف بدوره الى مولد كهربائي والذي يعتبر من اهم اجزاء التوربين الريحي فهو المسئول عن توليد الطاقة الكهربائية، وفي محطات طاقة الرياح الصغيرة الحجم يستخدم مولد تيار مستمر (DC)، او مولد تيار متناوب احادي الطور، اما في المحطات الكبيرة الحجم فيوجد نوعان من المولدات الكهربائية هما المولد التوافقي أو التزامني (Synchronous Generator) حيث ينقسم المولد الى جزأين احدهما ثابت (Stator) يتكون من عدد من الأقطاب المغناطيسية، والآخر دوار (Rotor) ويطلق على المولد لفظ تزامني أو توافقي لان الجزء الدوار فيه يدور بسرعة ثابتة تتزامن مع سرعة دوران المجال المغناطيسي علما ان سرعة الدوران تتحدد بعدد الأقطاب في المولد. أما النوع الآخر من المولدات فهو المولد ألحثي (Induction Generator) وهو من أكثر المولدات استخداما في منظومات طاقة الرياح ويكاد يكون استخدامه في الحياة العملية قاصرا عليها ولعله من المهم إن نذكر إن هذا المولد قد صمم في الأصل كمحرك ولذلك فإنه يستخدم ملفات ينشأ عنها مجال مغناطيسي عند تزويدها بالكهرباء في بداية عمل المولد وذلك بدلا من الأقطاب المغناطيسية المستخدمة في المولد التزامني، كما يتميز هذا المولد برخص ثمنه مقارنة بالمولد التزامني وعادة ما تستخدم التوربينات مولدات تعتمد على أربعة أو ستة ملفات نظرا لان السرعة العالية في الدوران تقلل حجم وتكلفة المولد، حيث إن عدد الأقطاب يتناسب تناسبا عكسيا مع سرعة الدوران التي يبدأ عندها توليد الطاقة الكهربائية. يدور الملف بداخل المولد في مجال مغناطيسي بسرعة أعلى من سرعة التوليد والتي غالبا ما تكون 1500 دورة / دقيقة ومن الجدير بالذكر انه عند تساوي

سرعة التوليد وسرعة الملف (1500 دورة /دقيقة) لا نحصل على كهرباء ويبدأ توليد الكهرباء فوق 1500 دورة بالدقيقة ولضمان الاستفادة القصوى من طاقة الرياح تستخدم منظومة لتوجيه التوربين في اتجاه الرياح.



الشكل (17.5) أنواع مختلفة من أبراج التوربينات الريحية

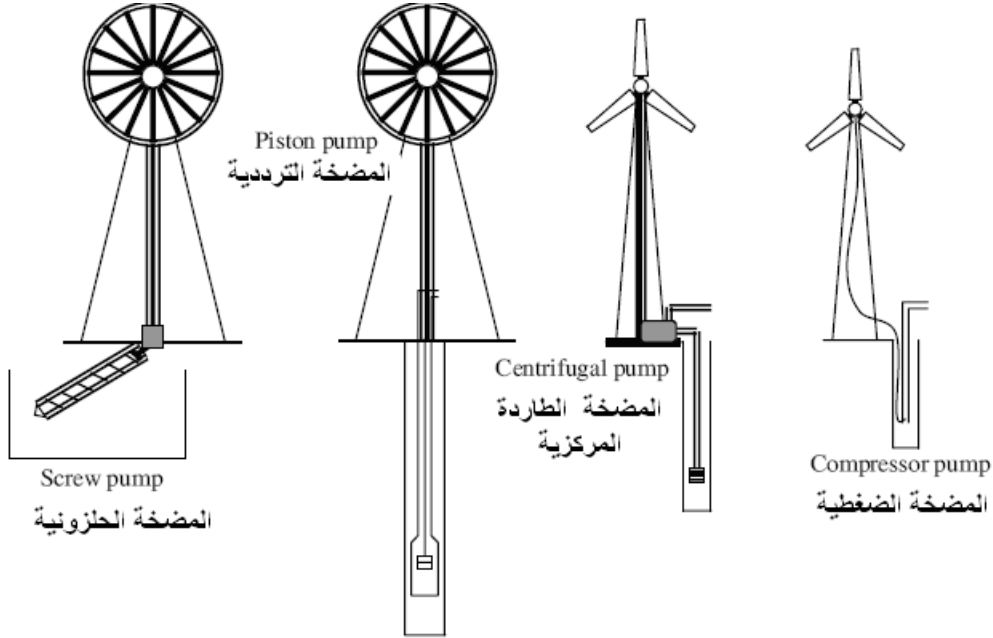


الشكل (18.5) شجرة المراوح

2. سقي المزروعات:

إن أقدم استخدامات طاقة الرياح هو استخدامها للسقي، إذ انه بمجرد تحويل الحركة الدورانية الى حركة خطية باستخدام نظام الكامات أو المحاور الدوارة يمكن تشغيل المضخة

الترددية او المضخات الأخرى بصورة عملية والشكل (19.5) يمثل انواع المضخات المستخدمة للري باستخدام طاقة الرياح.



الشكل (19.5) يمثل انواع المضخات المستخدمة للري باستخدام طاقة الرياح

وسوف نركز في شرحنا لهذه الفقرة على المضخة الترددية، تصنف المضخات الترددية ضمن مضخات الإزاحة الموجبة وقد شاع استخدامها في مجال طاقة الرياح والشكل (20.5) يوضح الية عمل المضخة ويمكن فهم طريقة رفع الماء والتدفق والقدرة من التحليل الرياضي التالي، تسبب حركة المحور الدوار (shaft) المنقولة عبر ذراع التدوير إزاحة للمكبس قدرها $(2r)$ وتسبب حركة خطية بازاحة قدرها (S) :

$$S = 2r \quad \dots (5.29)$$

الحجم الذي يزيحه المكبس خلال حركته داخل الاسطوانة لمسافة قدرها (S) أي ان:

$$V_s = \frac{\pi}{4} d^2 S \quad \dots (5.30)$$

حيث ان d تمثل قطر الاسطوانة التي يتحرك داخلها المكبس، ويمكن حساب كمية الماء المتدفق من المضخة لعدد من الدورات قدره (N) دورة من المعادلة الآتية:

$$Q = \frac{\pi}{4} d^2 (2r) N$$

وغالبا ما تكون المضخات ذات كفاءة اقل من 100%، لذا يجب إدخال عامل الكفاءة ليصبح كمية الماء من مضخة ترددية تعمل بطاقة الرياح من المعادلة الآتية:

$$Q = \frac{\pi}{2} d^2 (r) N \eta \quad \text{..... (5.31)}$$

حيث ان η كفاءة المضخة

ويجب الانتباه إلى التمييز بين السرعة الدورانية للتوربين الريحي (N) والسرعة الدورانية للمحور الدوار اذ غالبا ما تكون السرعة الدورانية للمحور الدوار في مثل هذه التطبيقات قليلة وكذلك (r) لا يمثل نصف قطر ريش التوربين الريحي، إما الضغط المسلط على سطح مكبس المضخة فيحسب من المعادلة الآتية:

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{..... (5.32)}$$

وبالتالي تحسب القوة المسلطة على سطح المكبس من المعادلة الآتية:

$$F = \eta h * \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{..... (5.33)}$$

حيث d قطر المكبس او الاسطوانة الداخلي، ولما كانت الحركة الخطية للمكبس على طول الشوط (S) ناتجة عن دوران الذراع (r) فمن الضروري ان نجد العزم المدور (T) حيث:

$$T = F * r \quad \text{..... (5.34)}$$

اما القدرة اللازمة لتدوير مضخة ما فتحسب من المعادلة الآتية:

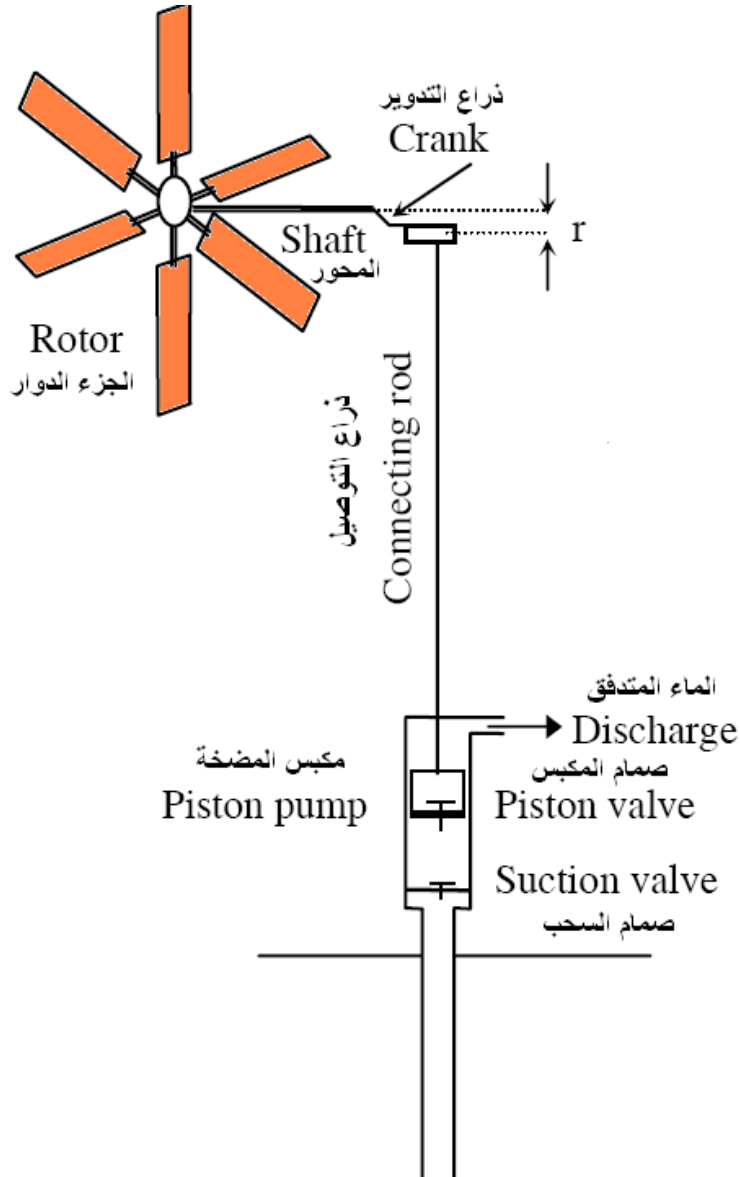
$$P = \frac{\rho_w g Q h}{\eta} \quad \text{..... (5.35)}$$

حيث ان ρ_w كثافة الماء و g التعجيل الارضي و h ارتفاع المضخة عن مستوى سطح الماء. وبالرغم من الية العمل الغير معقدة للمضخات الترددية الا ان هنالك مشكلة العزم الابتدائي لبدء التشغيل الذي لا يتناسب مع سرعة الرياح احيانا.

10.5 مزارع الرياح Wind Farms:

هي مجموعة من توربينات الرياح الموجودة في مكان واحد يتم توصيلها سويا لتوليد الطاقة الكهربائية التي تنقل عبر خطوط النقل والتوزيع للمستهلكين. ونظرا للتأثير المهم لسرعة الرياح على الطاقة المولدة فان بعضا من مزارع الرياح تقام داخل المياه فيما يطلق عليه المزارع

البحرية (Off-shore wind farms) وتوجد منها بعض المشاريع الريادية في العالم مثل تلك المقامة بالدانمارك (الشكل 8.5)، اما تلك المقامة على اليابسة المجاورة لشواطئ البحار فتسمى بالمزارع الشاطئية (On-shore wind farms) مثل تلك الموجودة في منطقة الزعفرانة بالبحر الأحمر في مصر (الشكل 21.5). وعلى الرغم من ارتفاع كلفة المزارع البحرية وصعوبة تركيبها وصيانتها بالمقارنة مع المزارع الشاطئية، إلا إن هذه المشروعات ضرورية من اجل زيادة المنافسة واكتساب الخبرة والعمل في بيئة المزارع البحرية.



الشكل (20.5) سحب المياه من الآبار باستخدام مضخة ترددية تعمل بطاقة الرياح



الشكل (21.5) جانب من مزرعة الزعفرانة في مصر

امثلة محلولة

مثال 1.5:

توربين ريحي قطر مروحته 4.56 m تهب عليه رياح بسرعة 7.62 m/sec وبدرجة حرارة هواء مقدارها 15.5 °C وكان هذا التوربين مصمم لسحب المياه من بئر عمقه 9.144m، احسب كمية المياه المسحوبة ليوم واحد اذا كانت كفاءة التوربين تبلغ 25%.

الحل:

نحسب كثافة الهواء أولا من المعادلة الآتية:

$$\rho = \frac{P}{R * T} = \frac{1.01325 * 10^5}{287 * (15.5 + 273)} = 1.2237 \text{ kg/m}^3$$

تحسب كمية القدرة التي يولدها التوربين من المعادلة (5.18):

$$P_{total} = \frac{1}{2} * \eta * \rho * A * V_i^3 = 0.5 * 0.25 * 1.2237 * \frac{\pi * 4.56^2}{4} * 7.62^3 = 1105.272$$

W

وتساوي هذه القدرة القدرة اللازمة لسحب المياه، لذلك:

$$P_{total} = 1105.272 = Q * \gamma * H \Rightarrow Q = \frac{1105.272}{9810 * 9.144} = 0.01232 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$Q_{\text{all the day}} = 0.01232 * 24 * 3600 = 1064.579 \text{ m}^3 \text{ (كمية المياه المسحوبة خلال اليوم)}$$

مثال 2.5:

تهب رياح على منطقة معينة بسرعة 10m/sec و تحت الظروف الجوية القياسية (ضغط 1 ضغط جوي ودرجة حرارة 25 °C)، احسب:

1. كثافة القدرة الكلية لهذه الرياح.
2. كثافة القدرة العظمى
3. كثافة الطاقة الفعلية اذا كانت كفاءة التوربين 40%
4. القدرة الكلية المنتجة اذا كان قطر التوربين 120m
5. العزم والدفع المحوري المسلط على التوربين اذا كانت سرعة التوربين 40 r/min ويعمل بأعظم كفاءة.

الحل:

نحسب كثافة الهواء أولاً من المعادلة الآتية:

$$\rho = \frac{P}{R * T} = \frac{1.01325 * 10^5}{287 * (15.5 + 273)} = 1.2237 \text{ kg/m}^3$$

1. كثافة القدرة الكلية لهذه الرياح:

من المعادلة الآتية:

$$\frac{P_{total}}{A} = \frac{1}{2} * \rho * V_i^3 = \frac{1}{2} * 1.2237 * 10^3 = 611.85 \text{ W/m}^2$$

2. كثافة القدرة العظمى

تحسب من المعادلة:

$$\frac{P_{max}}{A} = \frac{8}{27} * \rho * V_i^3 = \frac{8}{27} * 1.2237 * 10^3 = 363 \text{ W/m}^2$$

3. كثافة الطاقة الفعلية اذا كانت كفاءة التوربين 40%:

من المعادلة (5.18) :

$$\frac{P_{total}}{A} = \frac{1}{2} * \eta * \rho * V_i^3 = 0.5 * 0.4 * 1.2237 * 10^3 = 245 \text{ W/m}^2$$

4. القدرة الكلية المنتجة اذا كانت قطر التوربين 120m:

$$P = 0.245 * \frac{\pi * 120^2}{4} = 2770 \text{ kW}$$

5. من المعادلة (5.21) نحصل على:

$$T_{\max} = \frac{2}{27} \frac{\rho * D * V_i^3}{N} = \frac{2}{27} * \frac{1.223 * 120 * 10^3}{40 / 60} = 16306.6 \text{ N.m}$$

من المعادلة (5.23) نجد ان:

$$F_{x,\max} = \frac{\pi}{9} * \rho * D^2 * (V_i^2) = \frac{\pi}{9} * 1.223 * 120^2 * 10^2 = 614435.2 \text{ N}$$

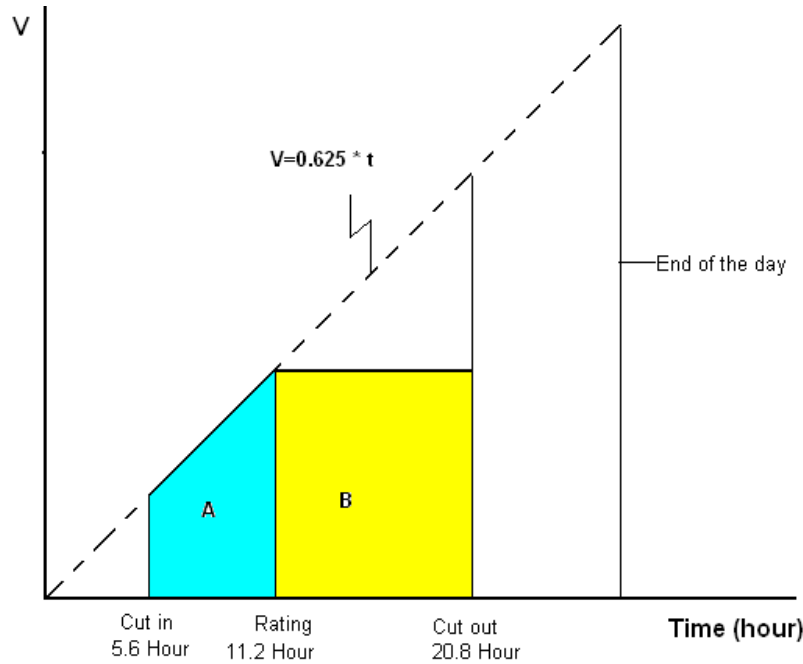
مثال 3.5:

تتغير الرياح خلال اليوم في منطقة ما على شكل خط مستقيم (من الصفر الى 15m/sec) كما في الشكل المجاور، يوجد توربين في هذه المنطقة يبلغ قطر مروحته 61m وكفاءته 0.25 ويعمل هذا التوربين ضمن الحدود التالية:

Cut in = 3.5 m/sec

Rating = 7 m/sec

Cut out = 13 m/sec



احسب:

1. القدرة المولدة بـ الكيلوواط-ساعة.

2. معدل سرعة الرياح

الحل:

1. لحل هذه المسألة نجد أولاً معادلة الخط المستقيم الذي مثل تغير السرعة خلال اليوم:

$$\frac{V}{t} = \frac{15}{24} \Rightarrow V = 0.625 * t$$

نجد من هذه المعادلة أوقات حدوث Cut in و Rating و Cut out كما يلي:

$$V = 0.625 * t \Rightarrow t = \frac{3.5}{0.625} = 5.6 \text{ hour (Time of Cut in)}$$

$$V = 0.625 * t \Rightarrow t = \frac{7}{0.625} = 11.2 \text{ hour (Time of Rating)}$$

$$V = 0.625 * t \Rightarrow t = \frac{13}{0.625} = 20.8 \text{ hour (time of Cut out)}$$

وتحسب القدرة المنتجة خلال اليوم بتكامل المعادلة الآتية:

$$P = \frac{1}{2} * \eta * \rho * A \left[\int_{5.6}^{11.2} V^3 dt + V^3 * (20.8 - 11.2) \right]$$

$$P = \frac{1}{2} * 0.25 * 1.2 * \frac{\pi * 61^2}{4} * \left[\int_{5.6}^{11.2} (0.625 * t)^3 dt + V^3 * (20.8 - 11.2) \right]$$

$$P = 438.37 * \left[\left(0.244 * \frac{t^4}{4} \right)_{5.6}^{11.2} + 3292.8 \right] = 1837.934 \text{ kW.hour}$$

2. يحسب معدل سرعة الطاقة من المعادلة (5.27)

$$\bar{V}_E = \left(\frac{\sum_{i=1}^n V_i^3}{n} \right)^{1/3}$$

نحسب السرعة لكل ساعة كما في الجدول الآتي:

Hour	Velocity	V ³
6	3.75	52.734

8	5	125
10	6.25	244.14
12	7.5	421.875
14	8.75	669.92
16	10	1000
18	11.25	1423.828
20	12.5	1953.125

ولذلك تكون معدل سرعة الطاقة يساوي:

$$\bar{V}_E = \left(\frac{\sum_{i=1}^n V_i^3}{n} \right)^{1/3} = 9.03 \text{ m/sec}$$

مثال 4.5:

احسب كمية الطاقة المنتجة خلال سنة من توربين ريحي ذو قطر 50m وكفاءة 30% في موقعين:

1. الموقع A وتبلغ سرعة الرياح فيه 6 m/sec على مدار السنة.
2. الموقع B وتبلغ سرعة الرياح فيه 3 m/sec في الشهور الستة الاولى 9 m/sec في الشهور الباقية.

الحل:

بفرض إن كثافة الهواء 1.2 kg/m³ و من المعادلة الاتية:

$$P_{total} = \frac{1}{2} * \eta * \rho * A * \int_0^t V_i^3 dt = \frac{1}{2} * \eta * \rho * A * [V_i^3 * t]$$

حيث ان t عدد الساعات في الفترة الزمنية المحددة.

1. للموقع A:

$$P_{total} = \frac{1}{2} * 0.3 * 1.2 * \frac{\pi * 50^2}{4} * [24 * 365 * 6^3] = 668744.545 \text{ kW-hour}$$

2. للموقع B:

$$P_{total} = \frac{1}{2} * 0.3 * 1.2 * \frac{\pi * 50^2}{4} * [181 * 24 * 3^3 + 184 * 24 * 9^3] = 1179234.816 \text{ kW-}$$

hour

يبين هذا المثال الحاجة لقياس سرعة الرياح خلال فترات قصيرة.

مثال 5.5:

احسب سرعة الرياح على ارتفاع 100 m، إذا كانت سرعة الرياح المسجلة بواسطة محطة الأنواء الجوية تبلغ 6 m/s عند ارتفاع 10 m.

الحل:

تحتسب سرعة الرياح على ارتفاع 100m من المعادلة (5.24):

$$\frac{V}{V_r} = \left[\frac{H}{H_r} \right]^\alpha$$

و يحسب معامل القص الآسي من المعادلة الآتية:

$$\alpha = \alpha_o \left(1 - \frac{\log V_r}{\log V_o} \right)$$

حيث أن :

$$\alpha_o = \left(\frac{Z_o}{H_r} \right)^{0.2} = \left(\frac{0.4}{9.1} \right)^{0.2} = 0.535$$

فأذن:

$$\alpha = 0.535 * \left(1 - \frac{\log 6}{\log 67.1} \right) = 0.307$$

$$\frac{V}{6} = \left[\frac{100}{9.1} \right]^{0.307} \Rightarrow V = 12.523 \text{ m/sec}$$

مثال 6.5:

توربين ريحي يستخدم لرفع الماء بواسطة مضخة ترددية، فإذا كانت سرعة المكبس 6 m/s والتدفق الحجمي للماء 75 Liter/min وتستخدم لرفع الماء لارتفاع 20 m جد مساحة المقطع العرضي للمكبس والقدرة اللازمة لإدارة المضخة إذا علمت ان كفاء المضخة 75% .

الحل:

في البداية نحول التدفق الحجمي الى الوحدات العالمية كالآتي:

$$Q = \frac{75}{1000 * 60} = 0.00125 \text{ m}^3/\text{s}$$

من المعادلة (5.35) نجد:

$$P = \frac{\rho_w g Q h}{\eta} = \frac{1000 * 9.81 * 0.00125 * 20}{0.75} = 327 \text{ W}$$

$$Q = A * V \Rightarrow A = \frac{Q}{V} = \frac{0.00125}{6} = 2.08 \text{ cm}^2$$

مثال 7.5:

جد العزم اللازم لادارة مضخة ترددية تعمل على طاقة الرياح اذا علمت ان قطر الاسطوانة الداخلي 20 cm وطول الشوط 10 cm وتستخدم لرفع الماء من بئر عمقه 10 m.

الحل:

من المعادلة (5.33) نحسب القوة المسلطة:

$$F = \eta h * \frac{\pi d^2}{4} = 9810 * 10 * \frac{\pi (0.2)^2}{4} = 3081.9 \text{ N}$$

من المعادلة (5.34) نحسب العزم كالآتي:

$$T = F * r$$

ولما كان طول الشوط يساوي (2r) كما في الشكل (5.20) نجد ان:

$$r = \frac{S}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ cm}$$

$$\therefore T = 3081.9 * 0.05 = 154 \text{ N.m}$$

مثال 8.5:

توربين ريحي قطر مروحته 8 m يدور بسرعة 100 RPM، اذا علمت ان درجة حرارة الهواء 15.5 °C، ما اقصى قدرة يمكن الحصول عليها من التوربين اذا كانت كفاءة التوربين 35% وعدد ريش التوربين هو 3.

الحل:

تحسب السرعة الخطية لطرف الريش من المعادلة (5.20):

$$v = \frac{2\pi nr}{60} = \frac{2 * \pi * 100 * 4}{60} = 41.88 \text{ m/s}$$

ومن المعادلة (5.19) نحصل على نسبة سرعة الأطراف المثالية الى سرعة الرياح المثالية (λ) :

$$\lambda(\text{max. power}) = \frac{4\pi}{n} = \frac{4\pi}{3} = 4.188$$

وتساوي هذه النسبة:

$$\lambda = \frac{v}{\text{wind.speed}} \Rightarrow \text{wind.speed} = \frac{41.88}{4.188}$$

$$\therefore \text{wind.speed} = 10 \text{ m/s}$$

ونحسب كثافة عند درجة حرارة 15 C من القانون العام للغاز أي انه:

$$\rho = \frac{P}{RT} = 1.2237 \text{ kg/m}^3$$

ومن ثم نحسب أعظم قدرة يمكن الحصول عليها من المعادلة الآتية:

$$P = 0.35 * \frac{1}{2} * 1.2237 * \frac{\pi d^2}{4} * 10^3 = 10.763 \text{ kW}$$

مثال 9.5:

توربين ريحي قطر مروحته 10 m يستخدم لرفع الماء من بئر عمقه 9 m باستخدام مضخة ترددية قطر اسطوانتها 0.4 m وطول الشوط 0.15 m وكفاءة المضخة 0.85، جد الزمن اللازم لملاؤ خزان سعته 1000 m³ على اعتبار ان الرياح تهب بصورة منتظمة طوال فترة التشغيل وعدد ريش التوربين 2 ودرجة حرارة الهواء 15.5 °C.

الحل:

من المعادلة (5.19) نحصل على نسبة سرعة الأطراف المثالية الى سرعة الرياح المثالية (λ) :

$$\lambda(\text{max. power}) = \frac{4\pi}{n} = \frac{4\pi}{2} = 6.283$$

وتساوي هذه النسبة:

$$\lambda = 6.283 = \frac{v}{wind.speed(V)} \Rightarrow wind.speed(V) = \frac{2\pi Nr}{46.283} = 0.0872N$$

او

$$V = 0.0872 * N \quad \dots (*)$$

وتتناسب الطاقة الناتجة من الرياح طرديا مع مكعب السرعة حسب المعادلة الاتية:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} * \rho * A * V_i^3$$

وبتعويض معادلة (*) في المعادلة الاخيرة:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} * \rho * A * (0.0872)^3 * N^3$$

وفي نفس الوقت فان اعظم قدرة تحسب ايضا من المعادلة الاتية:

$$P_{\max} = \gamma * Q * h$$

حيث التدفق الحجمي (Q) يحسب من المعادلة (5.31):

$$Q = \frac{\pi}{2} d^2(r) N \eta$$

الفصل السادس

6

الطاقة المائية

الفصل السادس الطاقة المائية Hydraulic energy

1.6 مقدمة عامة:

الماء أساس الحياة على الارض ولولاه لانعدمت هذه الحياة وجل من قال (وجعلنا من الماء كل شيء حي) ويلعب دورا بارزا في كافة الأنشطة الاقتصادية ويشكل حجر الزاوية لخطط التنمية الزراعية والاقتصادية والاجتماعية لاي بلد ويلعب توفر المياه العذبة دورا مهما في انتاج الطاقة في محطات القدرة الحرارية والمائية.

يعود استخدام الإنسان للطاقة المائية إلى القرن الأول الميلادي، حيث استعملت مياه الأنهار في تشغيل بعض النواعير المستخدمة لطحن الحبوب، ومع القرن الرابع الميلادي انتشرت النواعير في العراق وسوريا ومصر ومن ثم انتقلت إلى أوروبا حيث انتشرت هناك خاصة بعد الثورة الصناعية وتوسعت استعمالاتها لتشمل ضخ المياه وتشغيل آلات قطع الأخشاب و آلات النسيج. يرتبط مفهوم مصادر الطاقة المائية في الوقت الحاضر بمحطات توليد الطاقة الكهربائية وتعود فكرة إنشاء محطات الطاقة على مساقط الأنهار إلى عام 1870م حيث طرحت فكرة إنشاء محطة لتوليد الطاقة الكهربائية عند شلالات نيكارا في الولايات المتحدة الأمريكية وكانت طاقتها تبلغ 3.75 MW، وتستخدم الطاقة المائية حاليا في معظم دول العالم الحاوية على الأنهار والشلالات، ويبلغ إنتاجها من الطاقة حوالي 7% من الإنتاج العالمي للطاقة (الشكل 1.1 في الفصل الاول).

تشكل الطاقة المائية مصدرا محدودا للطاقة في البلاد العربية لمحدودية المياه والأنهار في المنطقة ويقدر إنتاج الطاقة المائية العربية بحوالي 28 ألف جيجاواط ساعة (GWh) ولا يشكل إلا 12% من إنتاج الكهرباء في العالم العربي، وهي نسبة آخذة في التراجع نتيجة تزايد الإنتاج من مصادر الطاقة التقليدية، وينحصر إنتاج الطاقة الكهرومائية في بعض الدول العربية ذات الأنهار كما هو مبين في الجدول رقم (1.6). أن الإنتاج الكهربائي للطاقة المائية في العالم يبلغ حوالي 3000 تيراواط - ساعة عام 2003، وهو أكثر قليلا من إنتاج الطاقة النووية، وتبلغ إمكانيات إنتاج الطاقة المائية عالميا نظريا ما يقارب 14000 تيراواط. ساعة من الكهرباء سنويا وهو ما يقارب إنتاج الطاقة الكهربائية في العالم حاليا. إلا أنه لأسباب اقتصادية وبيئية فإن معظم

هذه الطاقة لن تستغل. مع ذلك فإن الطاقة المائية ستستمر في التطور فهي من أهم مصادر الطاقة المتجددة إذ إنها نظيفة ورخيصة نسبياً وتتطلب كُلفاً بسيطة للتشغيل وكفاءة إنتاجها تقارب حوالي 90 % وبالتالي وفي السنوات القليلة القادمة فإن مساهمة الطاقة المائية في مصادر الطاقة العالمية قد ينمو بصورة أسرع من نمو إنتاج الطاقة العالمية⁽³⁴⁾.

الدولة	إنتاج الطاقة الكهرومائية (جيجاواط. ساعة)	النسبة إلى إنتاج الكهرباء
سورية	4247	% 13.5
لبنان	1122	% 11.0
مصر	13019	% 13.7
السودان	1107	% 29.5
المغرب	1600	% 9.7
العراق	5723	% 19.0
تونس	154	% 1.3
الجزائر	251	% 0.8
الأردن	53	% 0.6
مجموع الدول العربية	27276	% 12

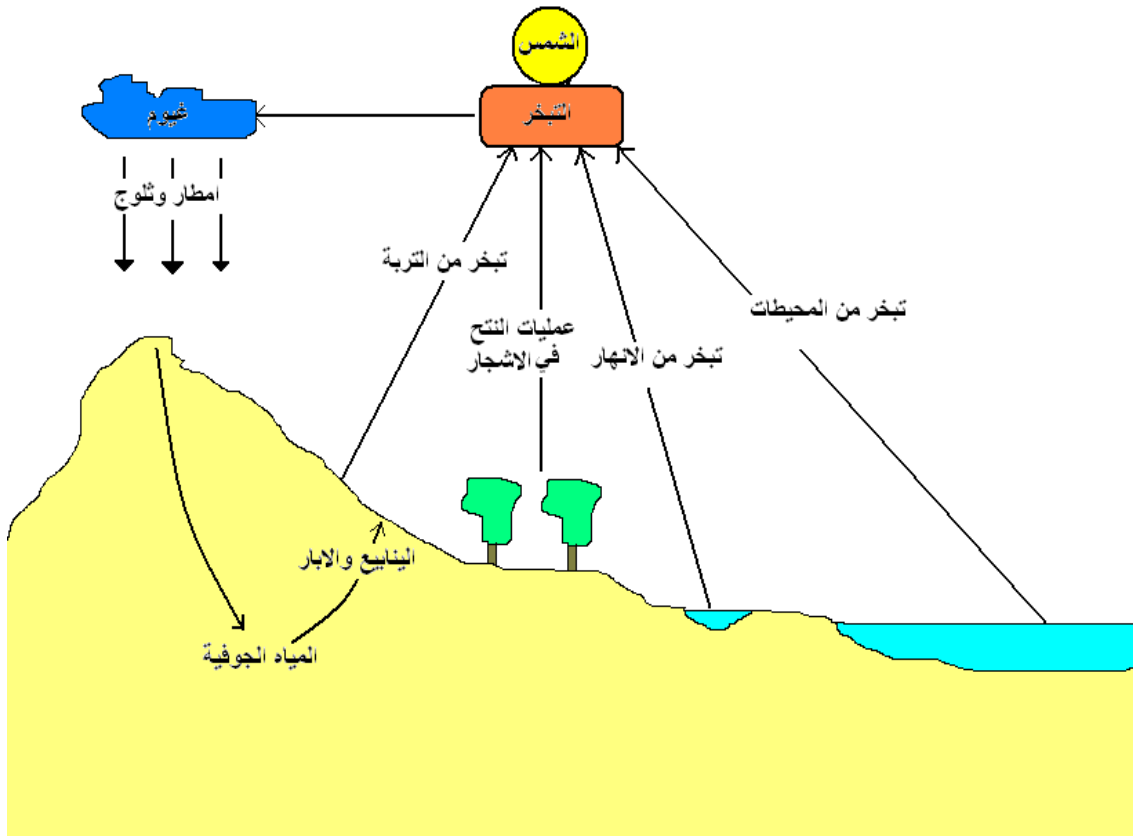
جدول رقم (1.6) إنتاج الطاقة الكهرومائية العربية لعام (2004)

2.6 الطاقة الكامنة المخزونة:

تعتمد كمية الطاقة الكامنة المخزونة في محطات التوليد الكهرومائية على حجم كمية الماء المخزونة وعلى ارتفاع سقوط الماء، فكلما ارتفع أي من العاملين المذكورين زادت كمية الطاقة الكامنة في المحطة، وتعمل محطات الطاقة المائية بكفاءة عالية تصل إلى 90% بالمقارنة مع كفاءة محطات القدرة الحرارية التي تستعمل الوقود الاحفوري والتي تعمل بكفاءة لا تزيد عن 40% في الغالب. تبلغ كمية الطاقة الكامنة في العالم $10^6 \text{ MW} \times 3$ في حين تبلغ نسبة كمية الطاقة المستغلة 5% من الطاقة الاحتمالية الكلية، ويعزى أحد أسباب هذه النسبة المنخفضة إلى الكلفة العالية لإنشاء محطات الطاقة وبخاصة إن المواقع الملائمة غالباً ما تكون بعيدة عن مراكز الاستهلاك وبالنسبة للعراق فأن محطات توليد الطاقة المائية موجودة في سد الموصل وسد دوكان وسد حديثة وسد دربندخان.

3.6 دورة المياه في الطبيعة Hydrologic cycle:

يمكن تعريف دورة المياه في الطبيعة او ما يسمى بالدورة الهيدرولوجية بانها سلسلة الحوادث التي تحدث للماء في الطبيعة ، فالماء يغطي الجزء الاكبر من سطح الكرة الارضية ويتأثر بالعوامل المناخية ويتبخر جزء من ماء المحيطات والانهار وبقية المسطحات المائية متصاعدا الى الجو على هيئة بخار بالإضافة إلى تصاعد بخار الماء من سطح التربة واسطح النباتات نتيجة لعمليات التبخر والنتح الى الجو، ثم تتكثف هذه الابخرة وتتساقط مرة اخرى على سطح الارض وفوق المحيطات على شكل امطار او ثلوج او ندى اوضباب علما ان قسما منه لا يصل لى سطح الارض بل يبقى فوق النباتات والابنية ليتبخر مرة ثانية ويعود الى الجو ويدعى بالخسائر البينية (Interception loss) وينساب قسم من المياه التي تصل الى الارض عبر جداول وانهار لتصب مرة ثانية في الميطات ويترشح قسم اخر الى باطن الارض ليشكل المياه الجوفية والتي قدر تخرج بصورة طبيعية كما في الينابيع والعيون او يقوم الانسان باستخراجها عن طريق حفر الابار والشكل (6.1) يبين دورة المياه في الطبيعة.



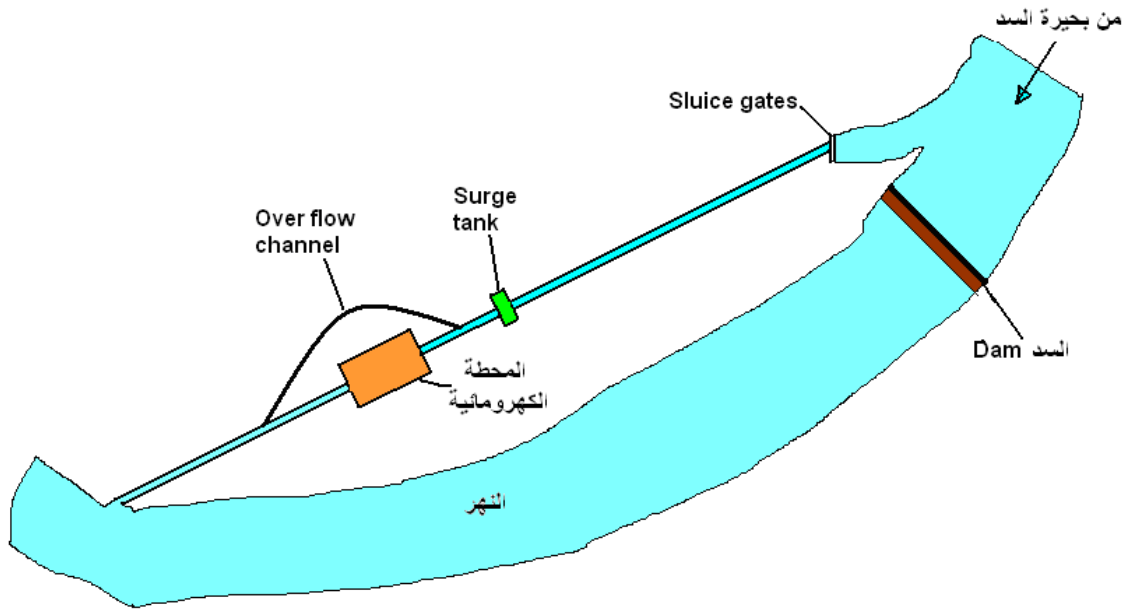
الشكل (1.6) دورة المياه في الطبيعة

4.6 محطات القدرة الكهرومائية:

تتكون أي محطة كهرومائية من أربعة أجزاء رئيسية الشكل (2.6) هي:

1. بحيرة الخزن (Storage reservoir).
2. السد وملحقاته (Dam and its parts).
3. التوربين والمولد الكهربائي (Water turbine and electric generator).
4. الأنابيب والممرات الناقلة للمياه (Water ways).

وتتراوح سعة محطات القدرة الكهرومائية من عدة مئات من الكيلووات إلى أكثر من 1000 MW ويمكن تصنيف المحطات إلى عدة أنواع هي:



الشكل (2.6) أجزاء المحطة الكهرومائية

1. محطات السدود:

وهو النوع السائد من المحطات الكهرومائية إذ يتم تخزين الماء خلف سد ومن ثم التحكم فيه تبعاً للاحتياجات ويمكن الإشارة هنا إلى إن حجز المياه غالباً ما يحقق أهدافاً أخرى كتوفير المياه للأغراض الزراعية والصناعية أو منع حدوث الفيضانات أو للأغراض السياحية وتختلف هذه البحيرات في مقدار الارتفاع المؤثر للمياه الموجودة أمام السد.

2. محطات سريان الماء الصغيرة:

تقام مثل هذه المحطات على مجاري الأنهار الصغيرة ولا تزيد ارتفاعات المياه الساقطة

في هذه المحطات عن 20 m. ومن الطبيعي أن يكون مقدار الطاقة المنتجة محدودا، ولقد تزايد استخدام هذا النوع من المحطات في الدول النامية؛ وذلك لأسباب عديدة منها: قلة تكاليف إنتاج الكهرباء، وإمكانية استخدام المواد المحلية والتصاميم المناسبة لبيئة المناطق التي يتم تنفيذ المحطات فيها، بالإضافة إلى تعاضد الآثار البيئية المصاحبة لبناء السدود الكبيرة.

3. محطات تخزين المياه:

يستفاد من الطاقة الفائضة من محطات توليد الكهرباء التقليدية خلال فترة الأحمال المنخفضة كساعات الليل حيث يمكن ضخ المياه من بحيرة سفلية إلى بحيرة علوية ثم يعاد إسقاط المياه عبر توربينات توليد الطاقة الكهربائية لتغطية حمل الذروة ويؤدي هذا النظام التكافلي إلى خفض الكلفة الإجمالية لإنتاج الكهرباء.

5.6 اختيار موقع المحطات الكهرومائية:

ان اختيار اي موقع لإنشاء محطة كهرومائية يتطلب توفر الدراسات والبيانات والمعلومات الدقيقة المبنية على اسس علمية صحيحة، وتعتمد عملية اختيار موقع المحطة على عدة عوامل منها:

1. نوع السد المراد انشاؤه (ترابي ، كونكريتي ، مستقيم ، قوس..الخ).
2. جيولوجية الأسس والموقع بصورة عامة.
3. توفر المواد الأولية لإنشاء الأسس وإمكانية النقل للمواد وغيرها الى الموقع.
4. الكلفة العامة والقيمة الاقتصادية للأراضي التي سوف تغمر بالمياه بعد انشاء السد.
5. الحالة الهيدرولوجية للنهر.
6. ديموغرافية المنطقة والحالة الاجتماعية وتوفير الايدي العاملة والمعدات اللازمة.
7. عامل الامان ضد الكوارث الطبيعية كالهزات الارضية والفيضانات والتفريغ المفاجئ، حيث انه عند تنفيذ واقتراح مثل هذه المنشآت يجب ان يؤخذ الخطر الفادح الناتج عن انطلاق المياه المخزونة مع مياه الموجة الفيضانية على المناطق القريبة والبعيدة.

6.6 التحريات المطلوبة:

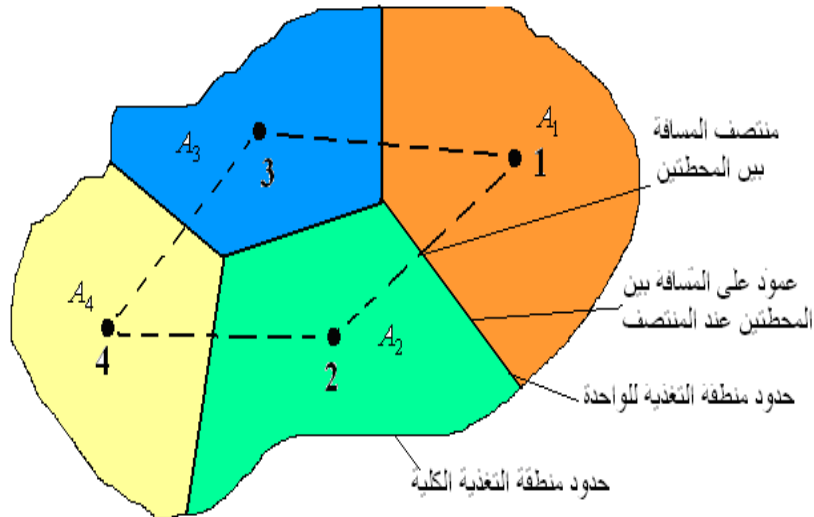
1. الدراسات الهيدرولوجية:

وتتضمن هذه الدراسات تسجيل وجمع البيانات عن التساقط (Intensity) المطري والتلجي والتبخر والاستهلاك النباتي ولتحقيق هذه الغاية ينبغي إنشاء العديد من محطات القياس

التي تنتشر في عموم منطقة التغذية ، حيث تبين البيانات المسجلة في كل محطة معدل التساقط في المساحة التي تمثلها تلك المحطة في منطقة التغذية، وتوجد عدة طرق لقياس معدل التساقط ومن اهم هذه الطرق، طريقة ثيسن (Thiessen) وتتلخص هذه بتسقيط مواقع المحطات على خارطة منطقة التغذية (Drainage area) ومد خطوط مستقيمة بين النقاط التي تمثل مواقع المحطات ثم تنصف هذه الخطوط ويرسم خط عمودي على كل خط بين محطتين من منتصفه وتمد الخطوط العمودية حتى تتقاطع فيما بينها مكونة بذلك حدود كل محطة على الخارطة وتحسب كثافة التساقط لعموم منطقة التغذية بالشكل الاتي:

$$P = \frac{A_1 P_1 + A_2 P_2 + \dots + A_n P_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad \dots (6.1)$$

حيث P_1 كثافة التساقط في المحطة (1) التي مساحتها A_1 و n عدد المحطات كما في الشكل (3.6).



الشكل (3.6) تقسيم منطقة التغذية الى وحدات حسب المحطات في المنطقة لحساب معدل التساقط.

تتجمع المياه الجارية نتيجة تساقط الامطار في مجرى معين وهذه المياه الجارية هي جزء من المياه المتساقطة التي تزيد عن كمية امتصاص التربة والتي تنساب على سطح الارض متبعا عدة مسارات حسب طوبوغرافية المنطقة الى ان يصل الى مجرى احد الانهار فيصب فيه ويصبح جزءا منه، ويبدأ الجريان السطحي في المجرى الرئيسي، يضاف الى الجريان السطحي الجريان الجوفي (Ground water flow) والناتج عن تقاطع سطح الماء الارضي مع سطح الماء في

المجرى ويتميز هذا الجزء من المياه المتسربة بسرعه البطيئة جدا، كما تتضمن الدراسات الهيدرولوجية دراسة التغيرات المناخية مثل المعدل الشهري لدرجات الحرارة وسرعة الرياح والرطوبة النسبية.

2.التحريات الجيولوجية والطوبوغرافية(Geological and Topographical survey): وتتضمن هذه التحريات النقاط الآتية:

1. عمل خرائط المسح الطوبوغرافي لموقع السد متضمنة كل المساحة المخصصة لجميع منشآت السد، كالسد الرئيسي، منشأ الجريان العلوي (Spill way) ومنشآت التصريف ومنشآت التحويل وبقية المنشآت الأخرى.
2. خرائط المنطقة التي تغطيها مياه بحيرة السد (Reservoir submergence).
3. مسوحات للنهر أو الوادي (Rive surveys) بطول حوالي 10 كيلومتر امام وبعد موقع السد.
4. تحري الاسس للسدود وتحديد مدى مقاومة ارض البحيرة لنفوذ المياه (Water tightness)، وتحديد الترسبات المعدنية الثمينة والأراضي المحتمل تعرضها للانزلاق والثقوب العميقة في طبقات التربة (Sink holes).
5. تحديد الطبقات الصخرية والرملية وغيرها التي تؤثر على قوة الاسس ونفاذية المياه.
6. الهزات الأرضية ومدى مقاومة المنطقة لها (Seismic condition).
7. تحديد مقالع الحجر والمواد الأولية الأخرى والمتطلبات في عمليات بناء السد وأجراء فحوصات قياسية لتحديد صلاحية المواد وتحديد نوع السد الممكن إنشاؤه.

7.6 أنواع السدود:

السد عبارة عن حاجز شبه مصمت ينشأ بعرض المجرى المائي بغرض تجميع المياه إمامه في خزان ومن ثم التحكم فيها. تعتبر السدود من أقدم المنشآت الهيدروليكية التي عرفها الإنسان حيث أنشأ أول سد في العالم في مصر القديمة حوالي 4000 سنة قبل الميلاد ويبلغ عدد السدود المقامة حالياً حوالي 11 ألف سد في مختلف بلدان العالم. وتقام السدود لإغراض عديدة منها تخزين المياه وتوليد الطاقة الكهربائية ورفع مستوى المياه الجوفية أو لغرض تحويل المياه إلى مجرى معين أو لتقليل سرعة المياه أحياناً في المناطق الشديدة الانحدار، ويمكن تصنيف السدود حسب

المواد المستعملة في إنشاءها وحسب طريقة مقاومتها لضغط المياه المخزونة او الغرض من انشاءها وبصورة عامة يمكن تقسيم السدود الى الانواع الاتية:

1. السدود الترابية (Earthen dams):

تعتبر السدود الترابية من أقدم السدود التي أقامها الإنسان، وسميت السدود الترابية لكونها تنشأ من المواد الترابية، كالطين والرمل والحصى والحجر. وتكون عادة على شكل شبه منحرف عريض القاعدة السفلية وتعتمد على وزنها في مقاومة ضغط المياه المحبوزة وهي تفضل على غيرها للأسباب التالية:

1. لا تحتاج مثل هذه السدود الى اسس قوية جدا كالتربة الحجرية بل يمكن انشاؤها على الترب الجيدة الاعتيادية.
2. المعدات والاليات اللازمة لتنفيذ هذه السدود هي بسيطة جدا.
3. عدم الحاجة الى المواد المكلفة كالسمنت والحديد وغيرها او انها تستعمل كميات صغيرة نسبيا مقارنة بغيرها من السدود.
4. الكلفة الاولى لانشاء مثل هذه السدود هي اقل كثيرا منها في بقية انواع السدود بالرغم من ضخامتها وكبر مقطعها.
5. تزداد السدود الترابية متانة مع الزمن.
6. في المناطق المعرضة للزلازل الارضية تفضل السدود الترابية على غيرها بسبب مقاومتها لمثل هذه الظروف.

ويجب عند تصميم السدود الترابية ان يكون ارتفاع السد كافيا بحيث لا يتعرض السد إلى طغيان المياه فوقه في اي وقت وباية حال ولذلك يجب دراسة ارتفاع موجات المياه في الخزان والرياح والى منسوب متوقع للمياه اثناء الفيضان. ان السدود الترابية انشأت منذ فترات بعيدة تزيد على 2000 عام وان التقدم الحاصل في معدات ازاحة التربة يشجعان على اقتراح انشاء السدود الترابية الى ارتفاعات عالية جدا مثل سد (Oroville) في الولايات المتحدة الامريكية والذي يصل الى ارتفاع 224 متر وسد (Mica) في كندا بارتفاع 242 متر وهو اكبر سد في العالم.

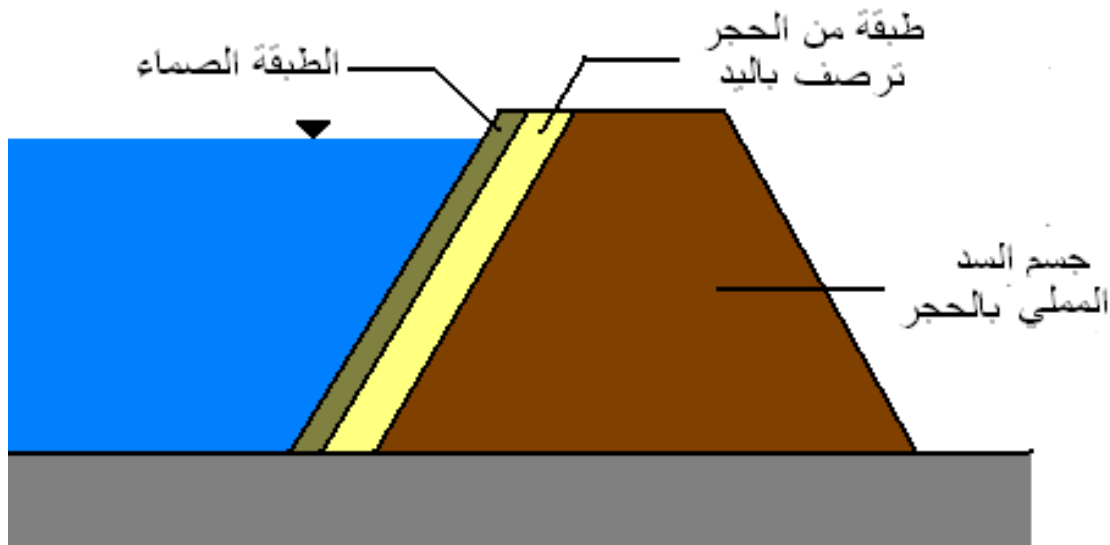
2. السدود الحجرية (Rock-fill dams):

وهي سدود أشبه بالسدود الترابية الا ان مادة الاملاء الرئيسية فيها هي الحجر. حيث يتم الاملاء بالقاء الحجر اكواما او رصفه باليد او فرشاه على شكل طبقات يتم حذلها بالحدل الاهتزازي

(Vibratory compaction) ويتم انشاء هذه السدود على تربة حجرية الا ان الاسس فيها لا تحتاج الى تلك القوة الضاغطة المطلوبة في غيرها من السدود التي تعتمد على وزنها في مقاومة ضغط الماء مثل السدود الكونكريتية. ان السدود الحجرية لها من الاستقرار الجيدة بحيث انها تقاوم الهزات الارضية دون تخلل السد ولهذا فإنها تستعمل كثيرا في السدود ذات الارتفاعات العالية. الصفة الأساسية للسدود الحجرية لكي تحجز المياه لا بد لها من وجود طبقة صماء تمتد على طول السد واستنادا الى نوعية الطبقة الصماء في السد الحجري، هناك نوعان من السدود الحجرية:

1. السدود الحجرية ذات الغشاء غير النافذ:

حيث تكون الطبقة الصماء في هذا النوع من الكونكريت غير النافذ او الكونكريت الاسفلتي واحيانا من الحديد. توضع هذه الطبقة على جانب مقدم السد فوق طبقة من قطع الحجر المرصوفة باليد والطبقة الاخيرة تغطي الحجر المفروش عشوائيا في جسم السد كما في الشكل (4.6).

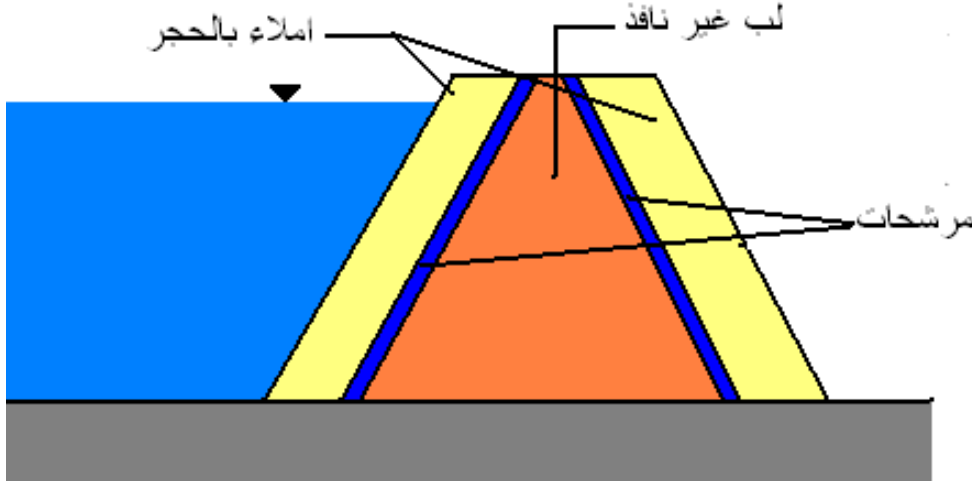


الشكل (4.6) السدود الحجرية ذات الغشاء غير النافذ

2. السدود الحجرية ذات اللب الترابي:

حيث تكون الطبقة الصماء عبارة عن لب معمول من التربة الصماء في وسط السد، ومثل هذه السدود تسمى ايضا السدود الترابية – الحجرية (الشكل 5.6). ان اللب الترابي يمكن ان يكون في الوسط وبصورة عمودية كما في السدود الترابية او مائلا وغير متماثل الجهتين، في مثل هذه

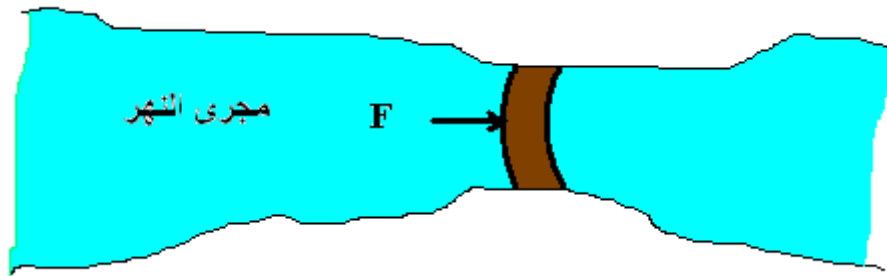
السدود بفصل اللب عن الاملاء بالحجر بمرشحات يتم اختيار مادتها جيدا وعلى جانبي اللب والسدود الحجرية ذات الغشاء غير النافذ اكثر كلفة من السدود الحجرية ذات اللب الترابي.



الشكل (5.6) السدود الحجرية ذات اللب الترابي

2. السدود الكونكريتية (القوسية Arch dam و الوزنية Gravity dams):

وتقسم السدود الكونكريتية الى نوعين: الأول هو السدود القوسية وهي عبارة عن سدود لها شكل منحنى في المسقط الأمامي كما مبين في الشكل (6.6) وتنشأ هذه السدود في الأودية الضيقة، اما النوع الثاني من السدود الكونكريتية فهي السدود الوزنية أو الثقيلة عبارة عن حائط سميك من الخرسانة أو الأحجار، وتعتمد هذه النوعية من السدود في ثباته على وزنه وعلى تماسكه مع طبقة الأساس ويكون شكله المقابل للماء على شكل خط مستقيم ويسمح في حالات الضرورة بوجود انحناء بسيط من الجهة الأمامية ويجب اختيار موقع السد أثقل في مكان يتميز قطاعه الجيولوجي بوجود طبقات تأسيس صخرية قوية. ويجب حقن الطبقة الأساس بالاسمنت من خلال أبار حقن وذلك لملأ الشقوق الموجودة فيها وبالتالي تقليل التسرب الذي يحدث خلالها.



الشكل (6.6) السدود الكونكريتية

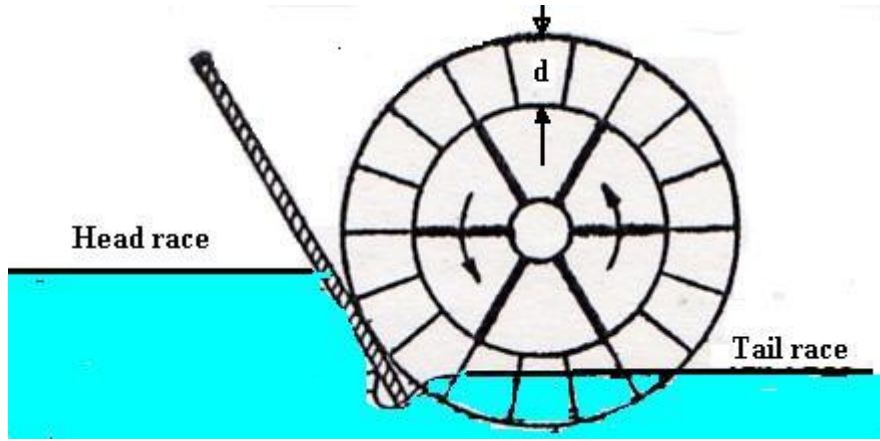
8.6 النواعير المائية (Water wheel):

استخدمت النواعير منذ فترات طويلة لتلبية حاجات الإنسان اليومية ويوجد هناك نوعان

رئيسان هما:

1. الناعور المسير بالدفع السفلي (Undershot water wheel):

يتحرك الناعور بواسطة ضغط الماء على الجزء السفلي من الشفرات المغمورة فيه وفي هذا مزايا جيدة، اذ يمكن استخدامه في الجداول و السواقي (الشكل 7.6)، وتظهر مساوئه أثناء الفيضانات اذ ينغمر كل الدولاب ويتوقف عن الحركة. ويعطى مقدار القدرة المستخلصة من هذا الناعور بالمعادلة الآتية⁽³⁵⁾:



الشكل (7.6) الناعور المسير بالدفع السفلي

$$P = \eta * \gamma * Q * H \quad (6.2)$$

إذ ان:

الكفاءة وتتراوح قيمتها بين (50-60 %) η

ارتفاع المياه (m) H

الكثافة الوزنية للماء $\gamma = 9810 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

التدفق الحجمي للمياه (m³/sec) Q

$$Q = k * b * d * \frac{w * d}{2}$$

سمك الدلو (m) d

$b=(m)$ عرض الدلو

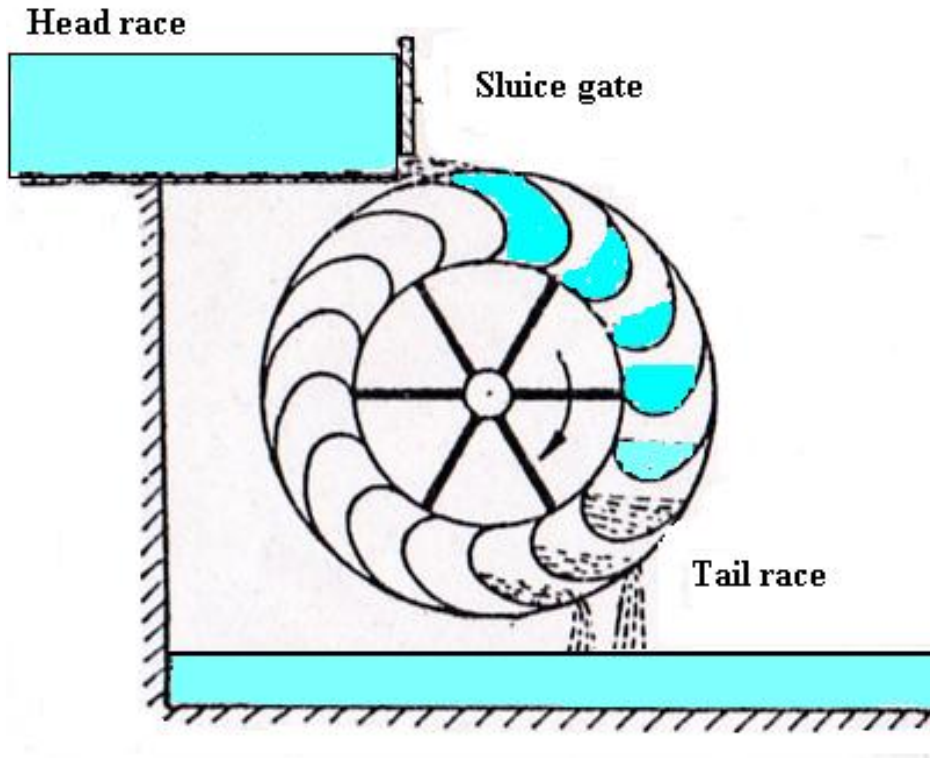
k مقدار امتلاء كل دلو بالماء

D قطر الناعور

w = السرعة الدورانية للناعور (rad/sec)

2. الناعور المسير بالدفع العلوي (Overshot water wheel):

يتحرك الماء بواسطة الماء الساقط على الشفرات (الدلو) من الأعلى (الشكل 8.6) والتي لها جوانب مغلقة تجعله يبدو كدلو. ولا يعاني الناعور المسير بالدفع العلوي من مشاكل الفيضان، لكن له حدود وهو ان فرق الارتفاع بين دخول الماء وخروجه يجب ان يكون على الأقل مساويا لقطر الناعور، وهذا النوع من النواعير غير ملائم للعمل في الجداول ولانهار ذات التدرج الطبيعي، كما انه يجب ان يتم صنعه بمتانة لمقاومة وزن الماء الساقط من الأعلى.



الشكل (8.6) الناعور المسير بالدفع العلوي

9.6 أنواع التوربينات المائية:

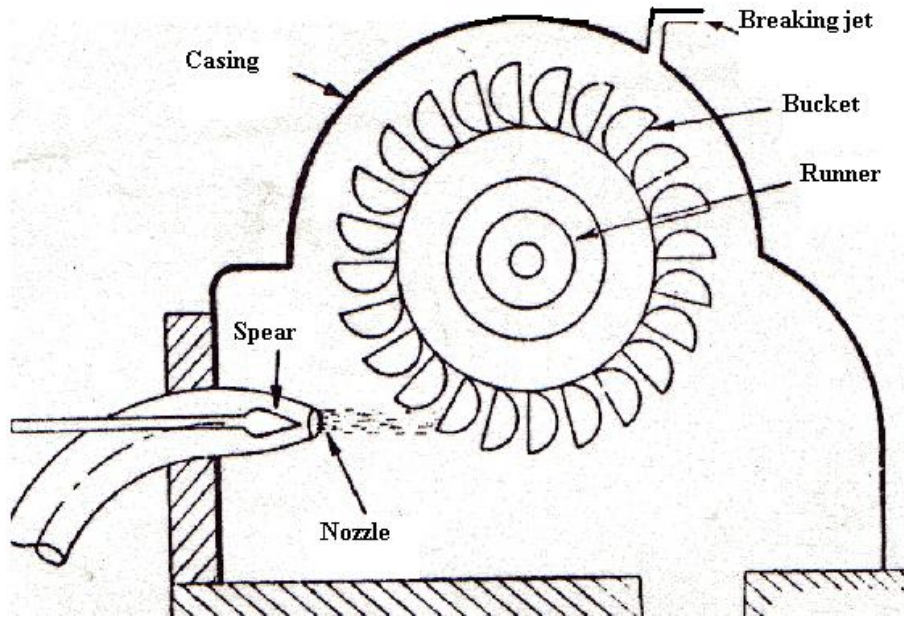
تتميز التوربينات المائية بأنها كفوءة وطويلة العمر وتوجد هناك تصاميم مختلفة للتوربينات، ولكن يمكن ان تصنف هذه التوربينات عامة إلى نوعين رئيسيين:

1.9.6 التوربين الدفعي (Impulse turbine):

وفيه يصطدم المائع بريش التوربين (blade) ليسبب حركته إذ أن التغير في زخم المائع يولد قوة على الريش ولا يحدث تغير في ضغط المائع أثناء مروره بالتوربين، وتعتمد فكرة التوربينات الدفعية على تحويل طاقة الارتفاع الكامنة إلى طاقة حركية، حيث ينقل الماء القادم من خزان السد خلال أنابيب ناقلة ويتم توجيهه إلى المنافث (Nozzle) لتحويل طاقة الارتفاع إلى طاقة حركية ومن ثم يتم توجيه الماء الخارج من المنافث بسرعة عالية إلى ريش التوربين الدفعي ليتم تدوير التوربين ومن ثم يخرج الماء من التوربين بطاقة حركية منخفضة، وتوجد عدة أنواع من التوربينات الدفعية أهمها توربين بلتون (Pelton turbine) حيث يستخدم في السدود ذات الارتفاعات العالية لمنسوب المياه والتي تزيد عن 250 m ويتكون هذا التوربين من أربعة أجزاء رئيسية (الشكل 9.6):

- المنفث (Nozzle)
- الجزء الدوار والريش المثبتة على المحيط (Runner and Bucket)
- الغطاء الخارجي (Casing)
- منفث الإيقاف (Breaking Jet Casing).

يمر تيار الماء ذي السرعة العالية القادم من المنفث على ريش التوربين بشكل متوالية من دفعات قصيرة ويلاحظ من هذه الريش والتي تشبه الدلو إنها مشطورة إلى نصفين متناظرين بواسطة حافة حادة تشطر الماء إلى نصفين متساويين (الشكل 10.6) حيث يجري الماء على السطح الداخلي الأملس للريشة ليرجع بزاوية مقدارها ϕ (الشكل 11.6) والفائدة من شطر تيار المياه إلى نصفين هي التخلص من قوى الدفع الجانبي على محور التوربين. يكون هذا التوربين غير مغمور بالمياه ويدور بصورة رئيسية في الهواء تحت الضغط الجوي الاعتيادي، ويحاط الجزء الدوار بغطاء من الخارج للمحافظة عليه من الأضرار الجانبية ولمنع تطاير المياه بعيدا عن الريش، و لغرض إيقاف التوربين يتم غلق المنافث وتوجيه تيار من الماء على الجهة الخلفية للريش بواسطة منفث الإيقاف لغرض تقليل السرعة الدورانية للتوربين ومن ثم إيقافه بصورة نهائية.



الشكل (9.6) اجزاء توربين بلتون



الشكل (10.6) الجزء الدوار في توربين بلتون

لاشتقاق كمية الشغل المنجز نرسم مثلث السرعة عند الدخول والخروج كما في الشكل (11.6) ،
حيث إن:

V = السرعة المطلقة للماء الداخل إلى الريش

V_1 = السرعة المطلقة للماء الخارج من الريش

V_r = السرعة النسبية للماء الداخل إلى الريش

V_{r1} = السرعة النسبية للماء الخارج من الريش

V_f = سرعة الجريان عند الدخول

V_{fl} = سرعة الجريان عند الخروج

D = قطر التوربين

d = قطر المنفت

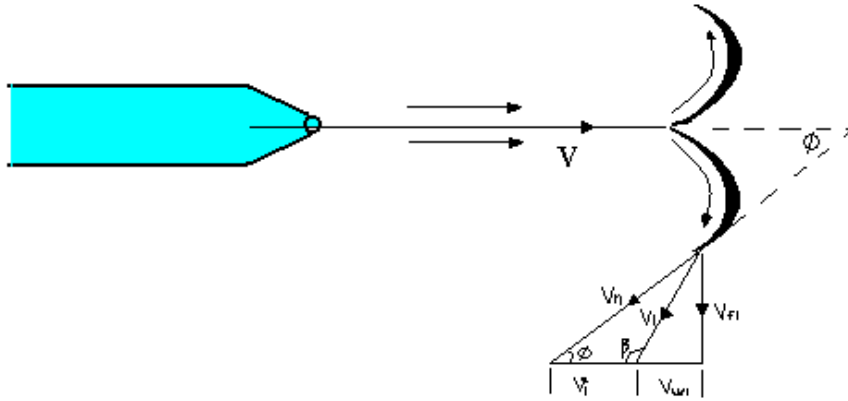
N = (r.p.m) سرعة دوران التوربين

ϕ = زاوية الريشة

H = ارتفاع الماء الذي يعمل عنده التوربين

v = السرعة المماسية للريشة عند الدخول

v_I = السرعة المماسية للريشة عند الخروج



شكل (11.6) مثلثات السرعة عند الدخول و الخروج لتوربين بلتون

إن مركبة السرعة المطلقة في اتجاه حركة الريشة هو الجزء الفعال من السرعة المنتج للحركة في الريش و باستخدام قوانين نيوتن للحركة:

القوة = الكتلة * التغير في السرعة

ان تغير السرعة الذي ينتج القوى على الريشة في مستوى الدوران هو التغير في سرعة التدوير (V_w) وسرعة التدوير هذه عند الدخول تساوي:

$$V_w = V$$

كما ان السرعة المماسية تساوي:

$$V_r = V - v$$

و لان الجريان في توربين Pelton مماسي فيكون:

$$v = v_1, \quad V_r = V_{r1} = V - v_1$$

و من مثلث السرعة عند الخروج نجدان سرعة التدوير عند الخروج (V_{w1}) هي:

$$V_{w1} = V_{r1} * \cos(\phi) - v = (V - v) * \cos(\phi) - v$$

وتكون القوى لكل كيلو غرام من الماء المتدفق تساوي:

$$F = \frac{1}{g} * (V_w - V_{w1})$$

و لما كانت V_{w1} باتجاه معاكس لسرعة التدوير عند الدخول V_w لذا تصبح القوة:

$$F = \frac{1}{g} * (V_w + V_{w1})$$

ويكون الشغل المنجز لكل كيلو غرام من الماء:

$$W = \text{Force} * \text{distance}$$

$$W = \frac{1}{g} * (V_w v + V_{w1} v)$$

$$W = \frac{V_w v}{g} + \frac{(V_{r1} \cos \phi - v) * v}{g}$$

لكن :

$$V_{r1} = V_r = V - v$$

$$\therefore W = \frac{V_w v}{g} + \frac{((V - v) * \cos \phi - v) * v}{g}$$

$$= \frac{v}{g} [V_w + (V - v) * \cos \phi - v]$$

لكن عند الدخول $V_w = V$ فأذن:

$$W = \frac{v}{g} [V(1 + \cos \phi) - v(1 + \cos \phi)]$$

$$\therefore W = \frac{v * (V - v)(1 + \cos \phi)}{g} \quad (6.3)$$

و تعرف الكفاءة الهيدروليكية (Hydraulic efficiency) على إنها:

$$\eta_h = \frac{\text{Work done per kg water}}{\text{Energy supplied per kg water}}$$

$$\eta_h = \frac{v(V-v)(1+\cos\phi)/g}{V^2/2g} = \frac{2v(V-v)(1+\cos\phi)}{V^2} \quad (6.4)$$

وللحصول على أعلى كفاءة يجب اشتقاق المعادلة (6.3) بالنسبة لسرعة الريشة v ومساواتها للصفر:

$$\frac{d}{dv} \left(\frac{2v(V-v)(1+\cos\phi)}{V^2} \right) = 0 \Rightarrow v = \frac{V}{2} \quad (6.5)$$

وهذا يعني انه للحصول على أعلى كفاءة يجب ان تكون سرعة الريش هي نصف سرعة الماء الداخل الى الريشة ولهذا فأن اعظم شغل لكل كيلو غرام من الماء يمكن الحصول عليه بتعويض المعادلة (6.4) في المعادلة (6.2) لينتج ان :

$$W_{\max} = \frac{V^2(1+\cos\phi)}{4 * g} \quad (6.6)$$

وتساوي اعظم كفاءة هيدروليكية:

$$\eta_{h,\max} = \frac{\frac{V^2(1+\cos\phi)}{4 * g}}{V^2/2g} = \frac{1+\cos\phi}{2} \quad (6.7)$$

ويحسب مقدار القدرة المتولدة من توربين Pelton من المعادلة الآتية:

$$P = 9.81 * Q * H \text{ (kW)} \quad (6.8)$$

حيث ان :

$H =$ ارتفاع المياه (m)

$Q =$ التدفق الحجمي للمياه (m³/sec)

وتكون الكفاءة الكلية لمنظومة التوربين $\eta_{overall}$:

$$\eta_o = \frac{P}{9.81 * Q * H} \quad (6.9)$$

2.9.6 التوربين التفاعلي او المرتد (Reaction turbine):

يحدث في هذه التوربينات تغير في الضغط السكوني للمائع أثناء مروره خلال الريش وتتولد كذلك قوى تسبب تغير زخم المائع وتوجد هناك تصاميم منها:

أ.توربين فرانسيس (Francis turbine):

يعد توربين فرانسيس (الشكل 12.6) من النوع التفاعلي (Reaction) اذ يدخل المائع من خلال تجويف حلزوني (Volute) إلى الدولاب الدوار وذلك بعد أن يمر خلال ريش موجهة (guide vane) مثبتة على مفاصل وتساعد هذه الريش على تمرير المائع نحو الدولاب الدوار بالاتجاهات المطلوبة كما انه يمكن تغيير اتجاهات الريش للحصول على احسن أداء مطلوب وحسب الحاجة ويخرج المائع من أنبوبة سحب مركزية (Draft tube) باتجاه محور الدوران. ولكي نفهم كيف تتولد القوى والعزوم التي تدير التوربين من جراء المائع سوف نرسم مثلثات السرعة عند الدخول والخروج من الريشة كما في الشكل (13.6)، إذ إن:

السرعة المطلقة للماء الداخل إلى التوربين V

السرعة المطلقة للماء الخارج إلى الريش V_1

السرعة النسبية للماء عند الدخول V_r

السرعة النسبية للماء عند الخروج V_{r1}

سرعة الجريان عند الدخول V_f

سرعة الجريان عند الخروج V_{f1}

القطر الخارجي للتوربين D

القطر الداخلي للتوربين D_1

سرعة دوران التوربين $N = (r.p.m)$

زاوية الريشة ϕ

ارتفاع الماء الذي يعمل عنده التوربين H

السرعة المحيطية للتوربين عند الدخول $v = \frac{\pi DN}{60}$

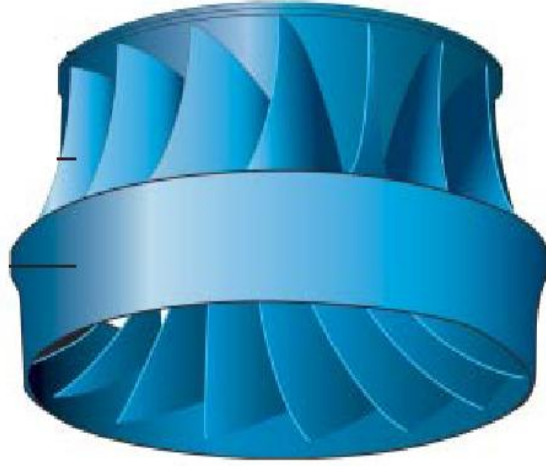
السرعة المحيطية للتوربين عند الخروج v_1

زاوية الريشة عند الدخول θ

زاوية الريشة عند الخروج ϕ =

زاوية توجيه الريشة (الزاوية التي يدخل بها الماء إلى التوربين) α =

الزاوية التي يدخل بها الماء إلى التوربين β =

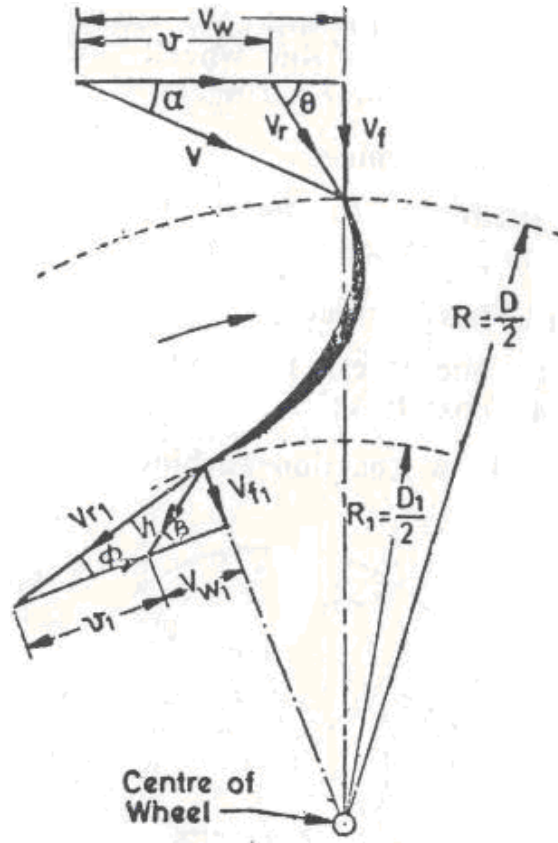


(a)



(b)

الشكل (12.6) توربين فرانسيس ويلاحظ كبر حجم التوربين بالمقارنة مع الأشخاص الواقفين بجواره



شكل (13.6) مثلثات السرعة عند الدخول و الخروج لتوربين فرانسسن

يمكن حساب الشغل المنجز لكل كيلو غرام من الماء من المعادلة الآتية:

$$W = \frac{V_w * v}{g} - \frac{V_{w1} * v_1}{g} \quad (6.10)$$

اما الكفاءة الهيدروليكية فهي نسبة الشغل المنجز لكل كيلو غرام من الماء إلى الطاقة

الكلية المسلطة من قبل الماء لذلك فأن:

$$\eta_h = \frac{\frac{V_w * v}{g} - \frac{V_{w1} * v_1}{g}}{H} \quad (6.11)$$

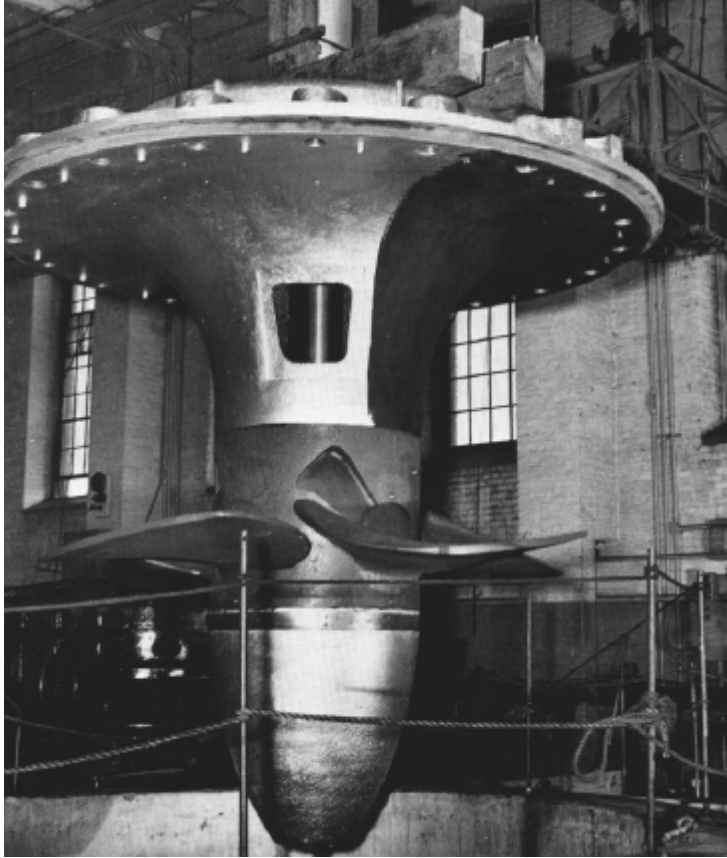
و إذا كان الجريان قطري فأن سرعة التدوير عند الخروج تساوي $V_{w1}=0$ وتصبح الكفاءة

الهيدروليكية بالشكل الآتي:

$$\eta_h = \frac{\frac{V_w * v}{g}}{H} = \frac{V_w * v}{g * H} \quad (6.12)$$

ب. توربين كابلان (Kaplan turbine):

يعد توربين كابلان من التوربينات التفاعلية أيضا (الشكل 14.6) ولكنه يختلف عن توربين فرانسس الذي يجري فيه المائع بالاتجاه القطري (Radial) حيث يجري المائع في هذا التوربين باتجاه المحور ويدور الرفاس (Propeller) كما تدور المروحة إذا سلط عليها تيار من الهواء. ويستعمل هذا النوع عند توفر كميات هائلة من المياه وبارتفاعات منخفضة.



الشكل (14.6) توربين كابلان

يدخل المائع إلى التوربين عبر الزعانف الموجهة (Guide blade) التي تعطي تدويما بدائيا للمائع ويحسب معدل الجريان خلال التوربين بضرب سرعة الجريان عند المدخل (V_f) في المساحة العمودية على المحور التي يمر من خلالها المائع وهي عبارة عن الدائرة الكبيرة مطروحا منها الدائرة الصغيرة (الشكل 15.6) كما في المعادلة الآتية:

$$Q = V_f * \frac{\pi}{4} * (D^2 - D_b^2) \quad (6.13)$$

حيث إن :

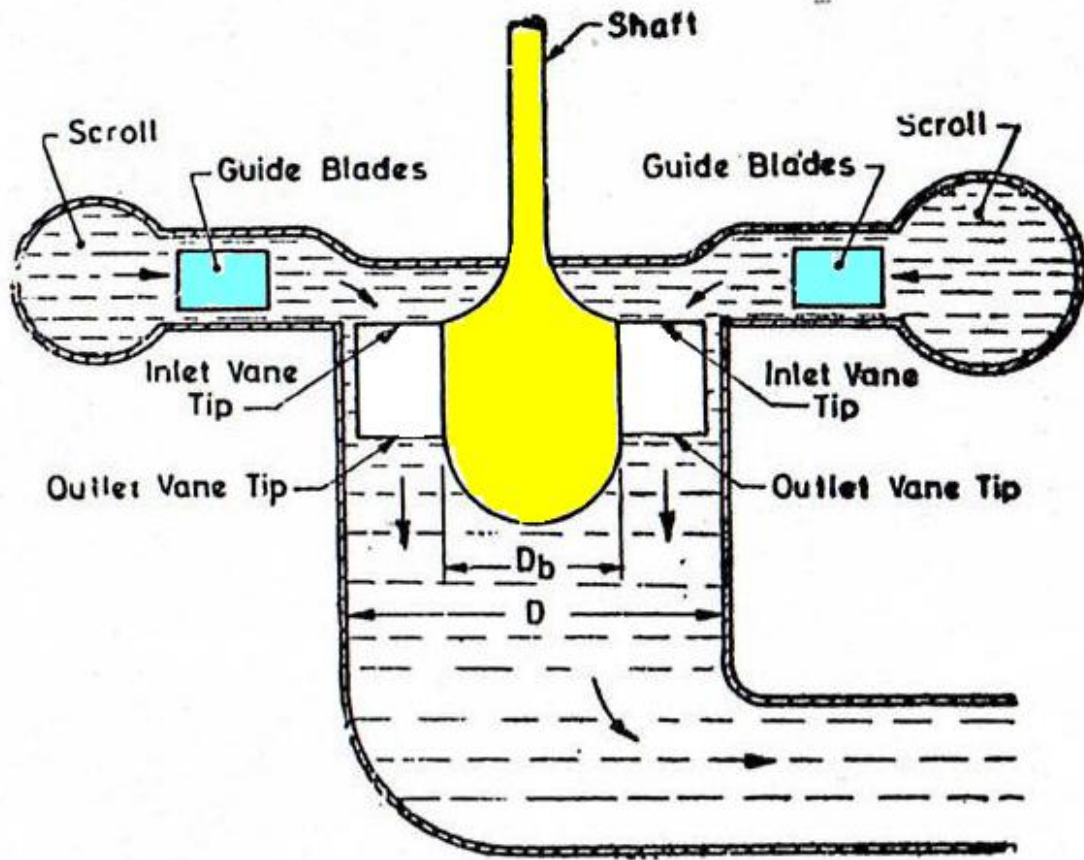
D = قطر التوربين

D_b = قطر السرة

ويبين الجدول (2.6) مواصفات توربين كابلان لمختلف الارتفاعات.

Head (m)	5	20	40	50	60	70
D_b/D	0.3	0.4	0.5	0.55	0.6	0.7
No. of Blades	3	4	5	6	8	10

الجدول (2.6) مواصفات توربين كابلان حسب الارتفاع



الشكل (15.6) مخطط بسيط لمنظومة توربين كابلان

10.6 كيفية اختيار التوربينات المناسبة:

تستخدم توربينات بلتون للارتفاعات العالية من مناسب المياه بينما يصلح توربين فرانسيس للارتفاعات المتوسطة من مناسب المياه و توربين كابلان للارتفاعات المنخفضة

وبين الجدول (3.6) نوعية التوربينات المستخدمة لكل مدى من ارتفاع الماء المؤثر، وليس ارتفاع المياه هو العامل المؤثر الوحيد في تحديد نوعية التوربين الملائمة، ويلجأ المصممون إلى مصطلح السرعة النوعية (V_s) و التي تربط مجموعة عوامل مثل القدرة المنتجة (P) والارتفاع المؤثر (H) ومعدل الدوران (N) كالآتي:

$$V_s = \frac{N * \sqrt{P}}{(H)^{5/4}} \quad (6.14)$$

ويمكن استخدام هذه المعادلة لحساب السرعة النوعية واختيار التوربين المناسب من الجدول (4.6).

التسلسل	ارتفاع الماء بالأمتار	التوربين الملائم
1	0 to 25	كابلان او فرانسيس والمفضل كابلان
2	25 to 50	كابلان او فرانسيس والمفضل فرانسيس
3	50 to 150	فرانسيس
4	150 to 250	فرانسيس او بلتون والمفضل فرانسيس
5	250 to 300	فرانسيس او بلتون والمفضل بلتون
6	above 300	بلتون

الجدول (3.6) التوربينات الملائمة حسب الارتفاع

التسلسل	السرعة النوعية	التوربين الملائم
1	10 to 35	بلتون مع منفث واحد
2	35 to 60	بلتون مع منفثين او اكثر
3	60 to 300	فرانسيس
4	300 to 1000	كابلان

الجدول (4.6) التوربينات الملائمة حسب السرعة النوعية

أمثلة محلولة

مثال 1.6:

نهر جار يخطط لإنشاء سد عليه وقد سجلت كمية المياه الجارية خلال سنة وفق الجدول الآتي:

الشهر	الكمية (مليون م ³)	الشهر	الكمية (مليون م ³)
كانون الثاني	1000	تموز	2500
شباط	800	أب	3000
آذار	600	أيلول	2400
نيسان	500	تشرين الأول	2000
أيار	200	تشرين الثاني	1500
حزيران	1500	كانون الأول	1500

احسب كمية القدرة المتوقعة توليدها على فرض إنشاء سد يحجز المياه بارتفاع 80 م وكانت الكفاءة الكلية للمعدات الميكانيكية والكهربائية المستخدمة في التوليد 80%.

الحل:

نحسب في البداية معدل المياه الجارية لكل شهر كالآتي

$$\bar{Q} = \frac{1000 + 800 + 600 + 500 + 200 + 1500 + 2500 + 3000 + 2400 + 2000 + 1500 + 1500}{12} \approx 1460$$

وحدات هذه الكمية هي مليون م³ لكل شهر وبالتالي تكون كمية المياه المتدفقة بالمتري المكعب لكل ثانية تساوي:

$$= \frac{1460}{24 * 3600 * 30} = 564 \text{ m}^3/\text{sec}$$

وتحسب لقدرة المنتجة من القانون الآتي:

$$P = \gamma * Q * H * \eta = 9810 * 564 * 80 * 0.8 = 354 \text{ MW}$$

مثال 2.6:

تجري مياه في نهر ما بمعدل $20 \text{ m}^3/\text{s}$ خلال موسم الفيضان المتكون من أربعة أشهر وبمعدل $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ لبقية أشهر السنة واقتراح إنشاء سد على هذا النهر لغرض توليد الطاقة الكهربائية، احسب:

1. أدنى حجم للبحيرة المتكونة إمام السد.
2. إذا كانت خسائر الاحتكاك في توصيلات المياه التي تنقل المياه إلى منظومة التوليد حوالي 3% من الارتفاع الحقيقي وكفاءة التوليد الكلية (الكهربائية والميكانيكية) 90% احسب معدل القدرة المتولدة إذا كان ارتفاع السد 80 م. (يبدأ موسم الفيضان وذوبان الثلوج من 1 حزيران إلى 30 أيلول).

الحل:

عدد الأيام التي يكون فيها الجريان أعلى ما يمكن ($20 \text{ m}^3/\text{s}$) تساوي
يوم $30 + 31 + 31 + 30 = 122$

وعدد الأيام التي يكون فيها الجريان أقل ما يمكن ($2.5 \text{ m}^3/\text{s}$) تساوي
يوم $365 - 122 = 243$

وبذلك تكون كمية المياه الكلية الجارية خلال السنة تساوي
 $= 20 * 3600 * 24 * 122 + 2.5 * 3600 * 24 * 243 = 263304000 \text{ m}^3$
ويكن معدل الجريان الحجمي يساوي

$$= \frac{263304000}{24 * 3600 * 365} = 8.35 \text{ m}^3/\text{s}$$

وبذلك يكون الفرق بين أعلى تدفق ومعدل يساوي
 $= 20 - 8.35 = 11.65 \text{ m}^3/\text{s}$

ويكون أدنى حجم للبحيرة مساوي إلى
 $= 11.65 * 3600 * 24 * 122 = 122800320 \text{ m}^3$

ويبلغ كمية الطاقة المتولدة:

$$\begin{aligned} P &= \gamma * Q * H * \eta \\ &= 9810 * 8.35 * 80 * 0.97 * 0.9 \\ &= 5.72 \text{ MW} \end{aligned}$$

مثال 3.6:

ناعور مائي مسير بالدفع الأمامي ذو قطر (D) مقداره 8 m وعرض الدلو (b) فيه 2 m يعمل تحت ارتفاع مياه (H) مقداره 5 m وعمق الدلو فيه (d) يبلغ 40 cm ويتحرك كل دلو بسرعة مقدارها 1.5m/s وكان مقدار امتلاء كل دلو بالماء حوالي 5/8 من حجمه، احسب القدرة الكلية، اذا كانت كفاءة الناعور 60%.

الحل:

يحسب مقدار التدفق الحجمي من المعادلة الآتية:

$$Q = k * b * d * \frac{w * d}{2} = k * b * d * v = \frac{5}{8} * 2 * 0.4 * 1.5 = 0.75 \text{ m}^3/\text{sec}$$

ويعطى مقدار القدرة الكلية المنتجة من المعادلة (6.1):

$$P = \eta * \gamma * Q * H = 0.6 * 9.81 * 0.75 * 5 = 22.07 \text{ kW}$$

مثال 4.6:

توربين من نوع Pelton يعمل تحت ارتفاع ماء مؤثر يبلغ مقداره 500m وينتج قدرة مقدارها 13000 kW ويدور بسرعة دورانية مقدارها 430 r.p.m فأذا كانت كفاءة التوربين الكلية 85 % احسب:

1. مقدار التدفق الحجمي

2. قطر محور التوربين

3. قطر المنفتح المستخدم

افرض ان معامل السرعة $C_v = 0.98$ وان العلاقة بين سرعة المائع وسرعة الريشة (نسبة السرعة) هي $v = 0.46 * V$.

الحل:

من المعادلة (6.8) تكون الكفاءة الكلية للتوربين:

$$\eta_o = \frac{13000}{9.81 * Q * 500} = 0.85$$

$$\therefore Q = 3.118 \text{ m}^3/\text{sec}$$

من علاقات ميكانيك الموائع:

$$V = C_v * \sqrt{2 * 9.81 * H} = 0.98 * \sqrt{2 * 9.81 * 500} = 97.06 \text{ m/sec}$$

$$\therefore v = 0.46 * V = 0.46 * 97.06 = 44.647 \text{ m/sec}$$

ولكن:

$$v = \text{tangential velocity} = \frac{\pi * D * N}{60} = 44.647 \text{ m/s}$$

$$\therefore D = 1.984 \text{ m} = \text{قطر محور التوربين}$$

يساوي معدل التدفق الحجمي خلال التوربين خلال المنفذ :

$$Q = \frac{\pi * d^2}{4} * V \Rightarrow 3.12 = 97.06 * \frac{\pi * d^2}{4} \Rightarrow d = 0.202 \text{ m}$$

مثال 5.6:

توربين بليتون يعمل تحت ارتفاع ماء مقداره 400 m مصمم لتوليد قدرة مقدارها 3750 kW ، احسب مقدار التدفق الحجمي وقطر المنفذ المستخدم اذا كانت كفاءة المولد الكهربائي المربوط إلى التوربين 95 % والكفاءة الكلية للتوربين 80 % ومعامل السرعة (C_v) يساوي 0.97 ونسبة السرعة تساوي 0.46.

الحل:

لما كانت كفاءة المولد الكهربائي تساوي 0.95 لذا فإن :

$$\eta_{gen} = \frac{P_{output}}{P_{input}} \Rightarrow P_{input} = \frac{3750}{0.95} = 3947.368 \text{ kW}$$

$$\eta_{overall} = \frac{P}{9.81 * Q * H} \Rightarrow Q = \frac{3947.368}{9.81 * 0.8 * 400} = 1.257 \text{ m}^3/\text{sec}$$

سرعة الماء الخارج من المنفذ :

$$V = C_v * \sqrt{2 * 9.81 * H} = 0.97 * \sqrt{2 * 9.81 * 400} = 85.93 \text{ m/sec}$$

ويكون معدل التدفق الحجمي (Q):

$$Q = \frac{\pi * d^2}{4} * V \Rightarrow 1.257 = \frac{\pi * d^2}{4} * 85.93 \Rightarrow d = 0.1364 \text{ m}$$

مثال 6.6:

توربين فرانسس قطري مصمم لتوليد قدرة مقدارها 2580 kW ويعمل تحت ارتفاع ماء مؤثر مقداره 30 m وتبلغ الكفاءة الكلية لمنظومة التوربين $\eta_o = 82\%$ والسرعة المحيطية تساوي $0.95 \cdot \sqrt{2gH}$ وسرعة الجريان $0.3 \cdot \sqrt{2gH}$. فإذا كان التوربين يدور بسرعة دورانية مقدارها 300 r.p.m و نسبة الخسائر الهيدروليكية 12% احسب:

1. التدفق الحجمي خلال التوربين

2. زاوية توجيه الريشة عند الدخول (α)

3. زاوية الريشة عند الدخول (θ)

4. قطر التوربين عند الدخول D

الحل:

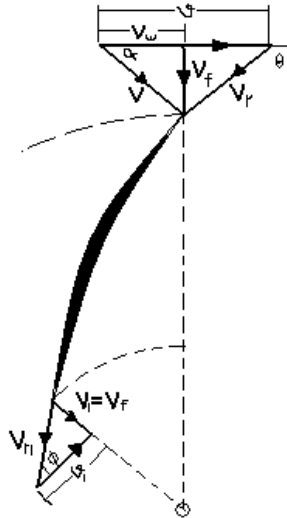
من المعادلة (6.8) نجد ان :

$$\eta_o = \frac{P}{9.81 \cdot Q \cdot H} \Rightarrow Q = \frac{2580}{9.81 \cdot 0.82 \cdot 30} = 10.691 \text{ m}^3/\text{s}$$

نسبة الخسائر الهيدروليكية 12% لذلك فإن الكفاءة الهيدروليكية تكون:

$$\eta_h = 100 - 12 = 88\% = 0.88$$

و لما كان الجريان قطري فإن الكفاءة الهيدروليكية تحسب من المعادلة (6.11):



مثال (6.4)

$$\eta_h = \frac{V_w * v}{g * H} = 0.88$$

حيث ان v هي السرعة المحيطية للتوربين عند الدخول وتساوي:

$$v = 0.95 * \sqrt{2gH} = 0.95 * \sqrt{2 * 9.81 * 30} = 23.048 \text{ m/sec}$$

اذن:

$$0.88 = \frac{V_w * 23.048}{9.81 * 30} \Rightarrow V_w = 11.2367 \text{ m/sec}$$

و لما كانت سرعة التدوير اقل من السرعة المحيطية فأن مثلث السرعة عند الدخول يكون كما في الشكل (6.8) و من مثلث السرعة هذا نحصل على:

$$\tan \alpha = \frac{V_f}{V_w} = \frac{0.3 * \sqrt{2gH}}{11.2367} \Rightarrow \alpha = 32.932$$

لحساب زاوية الريشة عند الدخول، من مثلث السرعة عند الدخول نجد ايضا:

$$\tan(180 - \theta) = \frac{V_f}{v - V_w} = 0.619 \Rightarrow \theta = 148.246^\circ$$

أما قطر التوربين عند الدخول فيحسب كآلاتي:

$$v = \frac{\pi DN}{60} \Rightarrow D = \frac{60 * 23.04}{\pi * 300} = 1.47 \text{ m}$$

مثال 7.6:

توربين كابلان يعمل تحت ارتفاع ماء مقداره 20 m وينتج قدرة مقدارها 37500 kW بكفاءة كلية مقدارها $\eta_o = 86\%$ وبالمواصفات الآتية:

$$\frac{v}{\sqrt{2gH}} = 2.0$$

$$\frac{V_f}{\sqrt{2gH}} = 0.6$$

$$D_b = 0.35D$$

احسب قطر وسرعة التوربين.

الحل:

الكفاءة الكلية للتوربين تساوي:

$$\eta_o = \frac{P}{9.81 * Q * H} \Rightarrow Q = \frac{37500}{9.81 * 0.86 * 20} = 222.2459 \text{ m}^3/\text{sec}$$

وتحسب سرعة الجريان من المعادلة الآتية:

$$\frac{V_f}{\sqrt{2gH}} = 0.6 \Rightarrow V_f = 0.6 * \sqrt{2 * 9.81 * 20} = 11.885 \text{ m/sec}$$

ومن المعادلة (6.12) نجد ان التدفق الحجمي يساوي :

$$222.245 = 11.885 * \frac{\pi}{4} * (D^2 - 0.35^2 * D^2)$$

$$\therefore D = 5.2089 \text{ m}$$

اما السرعة الدورانية فتحسب من المعادلة :

$$v = \frac{\pi D N}{60} \Rightarrow N = \frac{60 * v}{\pi * D}$$

حيث ان v السرعة المحيطية و تساوي:

$$\frac{v}{\sqrt{2gH}} = 2.0 \Rightarrow v = 2 * \sqrt{2 * 9.81 * 20} = 39.618 \text{ m/sec}$$

$$\therefore N = 145.26 \text{ r.p.m}$$

مثال 8.6:

احسب السرعة النوعية وحدد التوربين الملائم للعمل في محطة تنتج 7000 kW وتحت ارتفاع ماء مؤثر يبلغ 20 m ويدور بسرعة دورانية مقدارها 100 r.p.m.

الحل:

من المعادلة (6.13) نحسب السرعة النوعية:

$$V_s = \frac{N * \sqrt{P}}{(H)^{5/4}} = \frac{100 * \sqrt{7000}}{(20)^{5/4}} = 197.8 \text{ r.p.m}$$

من الجدول (6.3) نجد ان التوربين الملائم للعمل في هذه المحطة هو توربين فرانسيس ومن

الجدول (6.2) نجد ان توربين فرانسيس يصلح للعمل تحت هذا الارتفاع.

مثال 9.6:

محطة قدرة كهرومائية يتوفر فيها الماء بتدفق حجمي مقداره $400 \text{ m}^3/\text{sec}$ وارتفاع الماء الموجود يبلغ حوالي 45 m ، فإذا كان التوربين يدور بسرعة مقدارها 250 r.p.m وبكفاءة كلية تبلغ 82% . احسب اقل عدد للتوربينات المستخدمة إذا كان:

1. التوربين المستخدم توربين فرانسيس بسرعة نوعية لا تزيد عن 200.
2. التوربين المستخدم توربين كابلان بسرعة نوعية لا تزيد عن 600.

الحل:

تحسب كمية القدرة المتوفرة من المياه من المعادلة الآتية:

$$P = 9810 * Q * H * \eta = 9.81 * 400 * 45 * 0.9 = 158.922 \text{ MW}$$

أ. إذا كان توربين فرانسيس:

القدرة المجهزة من توربين واحد تحسب كالتالي:

$$V_s = \frac{N * \sqrt{P}}{(H)^{5/4}} \Rightarrow 200 = \frac{250 * \sqrt{P}}{(45)^{5/4}} \Rightarrow P = 8693.8 \text{ kW}$$

$$\text{توربين} = \frac{158922}{8693.8} = 18.28 \approx 19$$

ب. إذا كان توربين كابلان:

القدرة المجهزة من توربين واحد تحسب من:

$$V_s = \frac{N * \sqrt{P}}{(H)^{5/4}} \Rightarrow 600 = \frac{250 * \sqrt{P}}{(45)^{5/4}} \Rightarrow P = 78244.49 \text{ kW}$$

$$\text{توربين} = \frac{158922}{78244.49} = 2.03 \approx 2$$

ولذلك فإن توربين كابلان هو الأمثل اقتصادياً؛ لأن عدد التوربينات المستخدمة هو اقل بكثير من حالة استخدام توربين فرانسيس.

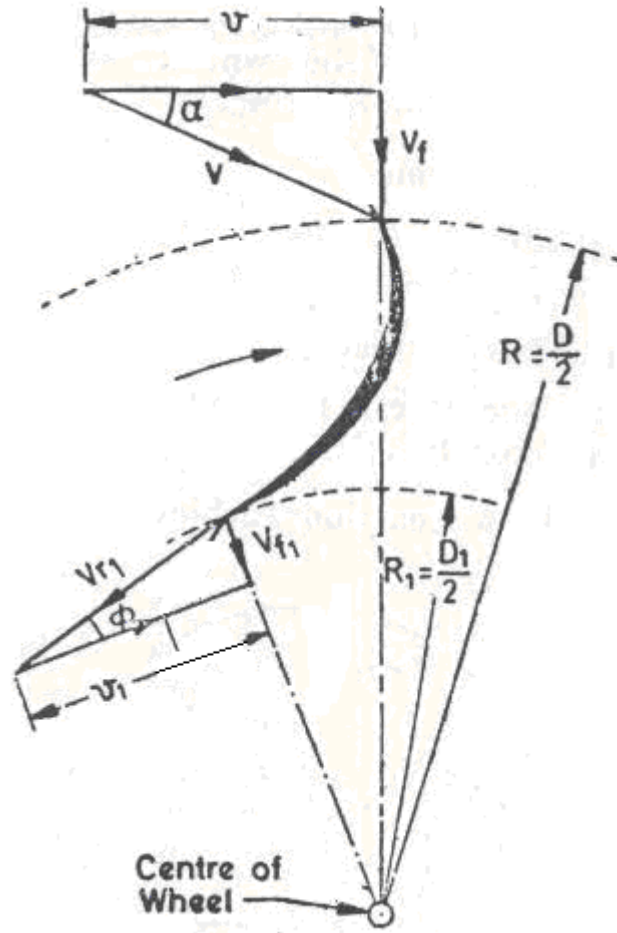
مثال 10.6:

توربين من النوع التفاعلي، القطر الداخلي والخارجي للتوربين 0.5 m و 1 m على التوالي، وفيه الجريان قطري خلال الدخول والخروج بحيث تكون زاوية الريشة $\alpha = 10^\circ$ وكانت سرعة الماء عند الدخول تساوي 3 m/s وتساوي سرعة الماء عند الخروج، جد

1. السرعة الدورانية للتوربين.

2. زاوية الخروج للريشة.

الحل:



مثال (10.6)

بالاستناد الى معطيات المثال نجد ان :

$$V_f = V_{f1} = 3 \text{ m/s}$$

ومن مثلث السرعة تحسب السرعة الخطية للتوربين بالشكل الاتي:

$$v = \frac{V_f}{\tan(\alpha)} \Rightarrow v = \frac{3}{\tan(10)} = 17 \text{ m/s}$$

وتساوي هذه السرعة

$$v = \frac{\pi D N}{60} \Rightarrow N = \frac{60 \cdot 17}{\pi} = 324.7 \text{ r.p.m}$$

لحساب زاوية خروج الريشة (الزاوية ϕ في الشكل) نحتاج الى حساب السرعة المماسية عند الخروج من المعادلة الاتية:

$$v_1 = \frac{\pi D_1 N}{60} = \frac{\pi * 0.5 * 324.7}{60} = 8.5 \text{ m/s}$$

وبالتالي تكون ϕ :

$$\tan \phi = \frac{V_{f1}}{v_1} = \frac{3}{8.5} = 0.3529$$

$$\therefore \phi = 19.33$$

مثال 11.6:

جد القطر الخارجي والداخلي وزاوية الريشة عند الدخول وعند الخروج لتوربين من النوع الرد-فعلي، علما ان مواصفات التوربين بالشكل الاتي:

القدرة 20000 HP، السرعة الدورانية 300 r.p.m

ارتفاع المياه $H = 120 \text{ m}$ ، نسبة الأقطار $D_1/D = 0.6$

الطول المحيطي للريشة عند الدخول $b = 0.1 * D$ ، نسبة التدفق $\frac{v_f}{\sqrt{2gH}} = 0.15$

الكفاءة الهيدروليكية $\eta_h = 0.88$ ، الكفاءة الكلية $\eta_o = 0.85$

الحل:

بفرض ان الجريان قطري وسرعة الجريان ثابتة والمساحة المشغولة بسبب سمك الريشة الى المساحة الكلية 5% نحصل على مخطط السرعة في الشكل (11.6)، تحسب كمية التدفق من المعادلة الاتية:

$$\eta_o = \frac{P}{\rho Q H} \Rightarrow 0.85 = \frac{20000 * 750}{1000 * Q * 120} \Rightarrow Q = 14.706 \text{ m}^3/\text{s}$$

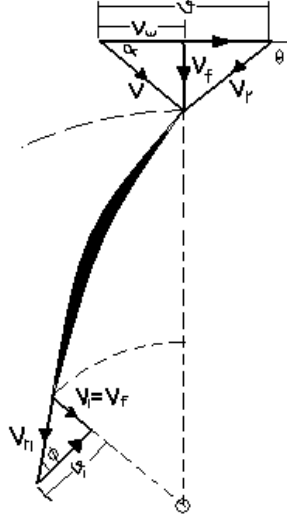
ويساوي معدل التدفق هذا حاصل ضرب السرعة في مساحة المقطع العرضي أي:

$$Q = V * A_{actual}$$

$$\text{Or } Q = \pi * D * b * v_f * 0.95$$

$$Q = \pi * D * 0.1D * v_f * 0.95 \Rightarrow 14.706 = \pi * D^2 * 0.1 * v_f * 0.95$$

$$\therefore D = 2.6 \text{ m}$$



الشكل (11.6)

من معادلة الكفاءة الهيدروليكية

$$\eta_h = \frac{v_w v}{gH} \Rightarrow 0.88 = \frac{v_w * 40.84}{9.81 * 120} \Rightarrow v_w = 25.14 \text{ m/s}$$

من الشكل (11.6) نجد:

$$\tan(\alpha) = \frac{v_f}{v_w} = \frac{7.28}{25.14} \Rightarrow \alpha = 16^\circ 9'$$

وبذلك تكون زاوية الريشة عند الدخول تساوي:

$$\tan(180 - \theta) = \frac{V_f}{v - V_w} = \frac{7.28}{40.84 - 25.14} = 0.4637$$

$$\therefore \theta = 155^\circ 8'$$

نحسب السرعة الخطية للريشة عند الخروج:

$$v_1 = \frac{\pi D_1 N}{60} = \frac{\pi * 1.56 * 300}{60} = 24.5 \text{ m/s}$$

وتحسب زاوية الريشة عند الخروج من مثلث السرعة عند الخروج:

$$\tan(\phi) = \frac{V_{f1}}{v_1} = \frac{7.28}{24.5}$$

$$\therefore \phi = 16^\circ 33'$$

الفصل السابع

7

طاقة المحيطات والبحار

الفصل السابع طاقة المحيطات والبحار Energy from the oceans and seas

1.7 مقدمة عامة:

تغطي المياه حوالي 70% من سطح الأرض مما يجعلها أكبر خزان للطاقة على الأرض، فأشعة الشمس تسقط على سطح الكرة الأرضية سواء اليابسة منها أو البحار وتقوم المياه بامتصاص قسم من هذه الطاقة وتحويلها إلى طاقة حرارية، كما إن قسما آخر منها يعمل على تبخير المياه التي تتحول إلى غيوم و أمطار، وينعكس الباقي من على سطح المياه وينتشر في الجو.

توجد هناك أشكال عديدة من الطاقة يستطيع الإنسان الحصول عليها من البحر، فهناك الفرق في درجة حرارة المياه في السطح والأعماق، وهناك حركة المد والجزر التي يمكن الاستفادة منها في توليد الطاقة، وكذلك هناك أمواج البحر والتي تستخدم حاليا لتوليد الطاقة في الكثير من دول العالم. وسنتطرق إلى هذه الطاقات بالتفصيل في الفقرات القادمة.

2.7 طاقة تحويل حرارة المحيطات (OTEC) Ocean Thermal Energy Conversion:

تسقط أشعة الشمس على سطح الكرة الأرضية وتقوم المياه بامتصاص قسم من هذه الطاقة بشكل طاقة حرارية ويخضع امتصاص المياه للطاقة الشمسية لقانون لمبرت لامتصاص (Lambert law of absorption) :

$$I(y) = I_0 e^{-\mu \cdot y} \quad (7.1)$$

حيث ان :

I_0 كمية الإشعاع على السطح ($y=0$).

I كمية الإشعاع عند المسافة y من السطح.

μ معامل الامتصاص ويؤخذ 0.05 m^{-1} للماء الصافي و 0.5 m^{-1} للماء المالح.

يؤدي امتصاص المياه للطاقة الشمسية إلى رفع درجة حرارة المياه عند السطح، أما المياه الموجودة على أعماق مئات الأمتار فأن تأثرها بالشمس يكون قليلا جدا وتبقى عند درجات

حرارة منخفضة. ولهذا فكر العلماء في استخدام الفرق بين درجة حرارة المياه السطحية الدافئة التي قد تصل إلى 30°C في بعض المناطق وبين درجة حرارة المياه العميقة الباردة والتي تصل إلى 4°C على عمق 1 km وعلى الرغم من صغر هذا الفارق بين درجات الحرارة إلا أنه يكفي نظرياً للاستفادة منه في توليد الطاقة.

يعد المهندس الفرنسي جورج كلود أول من أنشأ محطة لتوليد الطاقة الكهربائية من الفرق في درجات الحرارة بين السطح والقاع في خليج ماتنزاس في كوبا، وقام كلود بتركيب المحطة على اليابسة وكانت تتغذى بالمياه المطلوبة عبر أنابيب تمتد من البحر إلى المحطة، وكانت قدرة المحطة 2.2 MW وتعمل على فرق درجة حرارة يبلغ 14°C بين مياه القاع ومياه السطح. إذ كانت درجة حرارة السطح 27°C ودرجة حرارة القاع 11°C . قام كلود بنقل المياه عبر أنبوب قطره 2 m وطوله 2 km ويزن 400 طن وكانت عملية نصب هذا الأنبوب الأصعب من الناحية التقنية في ذلك العصر إذ فقد أنبوبان قبل أن يتم نصب الأنبوب في المحاولة الثالثة. واشتغلت المحطة المذكورة خلال الأعوام 1929-1930 ثم توقفت بسبب مشاكل التآكل والصدأ الناتجة عن ملوحة مياه البحر.

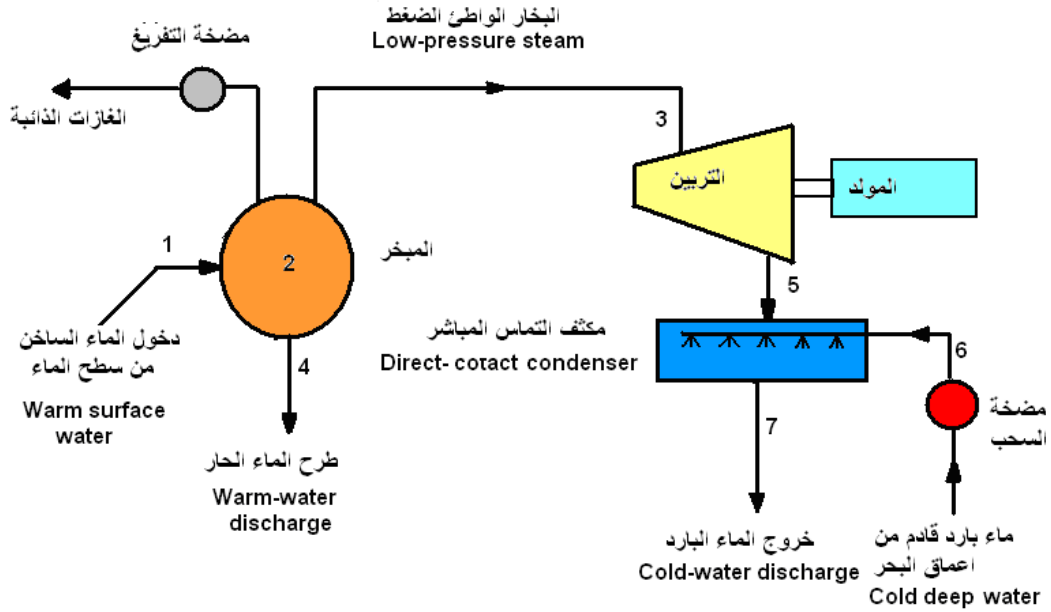
1.2.7 الطرق المستخدمة لاستغلال طاقة الفرق في درجات الحرارة:

هناك طريقتان لإنتاج الطاقة الكهربائية تتضمن إحداها استعمال الدورة المفتوحة أو دورة كلود (Claude cycle) والثانية هي الدورة المغلقة أو دورة أندرسون (Anderson cycle)⁽³⁶⁾.

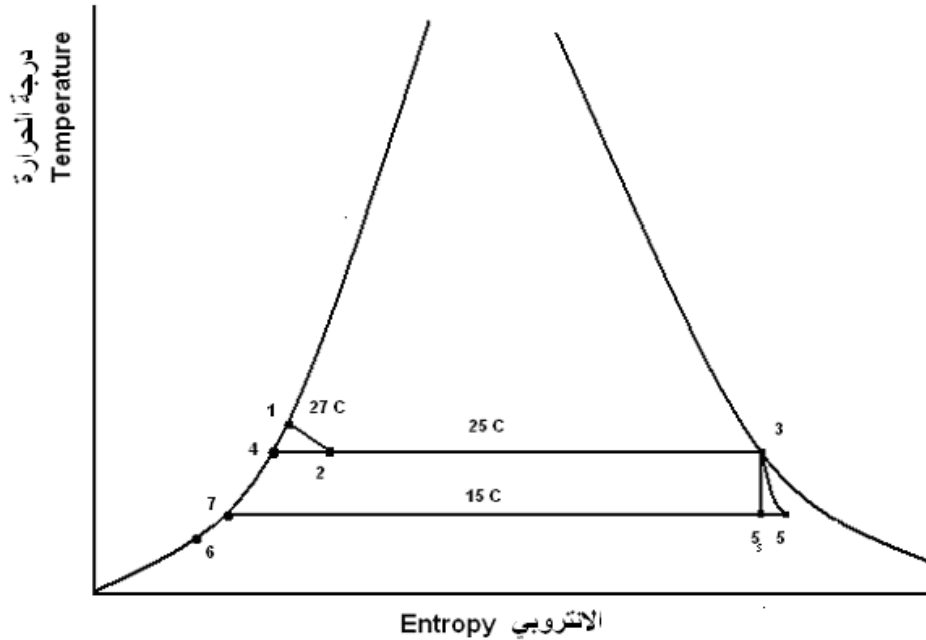
1. الدورة المفتوحة أو دورة كلاود (Claude cycle):

يستعمل ماء البحر وحده في هذه الدورة، ويبين الشكل (1.7) مخططاً بسيطاً لأجزاء الدورة إضافة إلى مخطط درجة الحرارة-الانتروبي (T-s diagram)، يتم دفع ماء سطح البحر الدافئ الذي تكون درجة حرارته على سبيل المثال 27°C إلى داخل المبخر الذي يكون تحت ضغط مخلخل أقل من ضغط التشبع المقابل لدرجة حرارة الماء الدافئ والذي يمثل النقطة (1) على مخطط الانتروبي-درجة الحرارة وتكون قيمة ضغط التشبع المقابل لدرجة الحرارة 27°C هو 0.0356 bar ويكون ضغط المبخر تحت ضغط أقل من هذه القيمة وليكن على سبيل المثال 0.0317 bar المقابل لدرجة التشبع 25°C . يتحول الماء عند دخوله المبخر إلى بخار رطب (Wet steam) وبنسبة جفاف منخفضة (النقطة (2)) يتم فصل البخار ليمر على التوربين

البخاري (النقطة 3)) ليتم تدويره وتوليد الطاقة الكهربائية عن طريق المولد الكهربائي. يتم المحافظة على ضغط التخلل عن طريق مضخة التفريغ (Vacuum pump) تعمل في الوقت نفسه على التخلص من الغازات الآكلة الضارة ويتم التخلص من الماء المالح المتبقي في المبخر عن طريق طرحه إلى البحر (النقطة 4).



ا-مخطط بسيط لدورة كلود (الدورة المفتوحة)



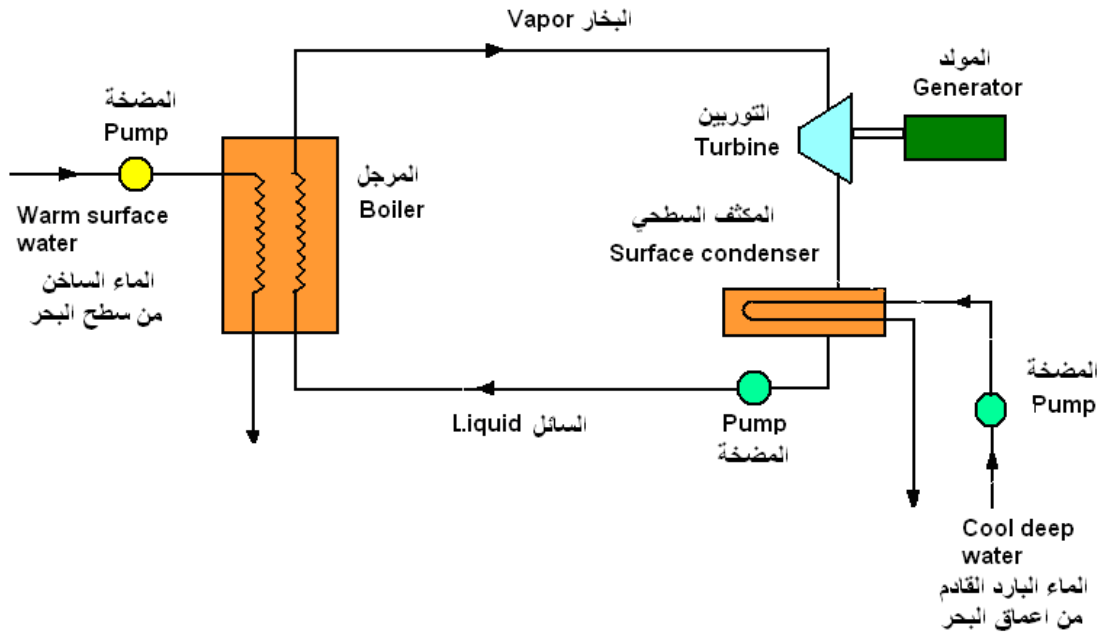
ب- مخطط الانتروبي -درجة الحرارة
الشكل (1.7) الدورة المفتوحة (دورة كلود)

يكون البخار في النقطة (3) قبل دخوله التوربين تحت ضغط واطئ وحجم نوعي كبير (0.0317 bar و $43.3 \text{ m}^3/\text{kg}$) عند المقارنة مع ظروف دخول البخار إلى التوربينات في المحطات البخارية التقليدية ولهذا يكون حجم التوربينات في هذه المحطات كبير نسبياً بسبب كبر الحجم النوعي. يتمدد البخار في التوربين ايزونتروريا إلى النقطة (5) حيث المكثف والذي يكون تحت ضغط منخفض 0.017 bar ودرجة حرارة مقدارها 15°C ليقابل تياراً من الماء البارد القادم من قاع المحيط (النقطة 6) فيتكاثف البخار إلى ماء (النقطة 7) يمكن استخدامه للشرب أو الزراعة ولهذا فإن هذا النظام يسمح بإنتاج المياه النقية في المكثف. ولا يتوفر هذا الأمر في الدورات المغلقة التي تستعمل الغازات العضوية. والواقع أن العالم يواجه نقصاً في مصادر المياه الصالحة للاستعمال بسبب الزيادة في السكان والتوسع في الصناعة والزراعة ويستهلك العالم بالتأكيد الكثير من مصادر الطاقة الحالية لتحلية مياه البحر و إنتاج المياه العذبة ولذلك فإن هذه الأنظمة ملائمة للمناطق التي تعاني من نقص في مصادر المياه العذبة.

2. الدورة المغلقة أو دورة اندرسون (Anderson cycle) :

في أواسط الستينيات من القرن الماضي، اقترح المهندس الأمريكي هيلبرت اندرسون استغلال طاقة الفرق في درجة الحرارة بين السطح والقاع بواسطة استعمال محطات تعمل على غازات عضوية مثل الامونيا و الفريون و البروبان بدل البخار، ومن خصائص هذه الغازات إنها تتبخر في درجات حرارة منخفضة بحيث يمكن استعمالها في تشغيل توربينات تربط بمولدات كهربائية، يبين الشكل (2.7) تخطيط بسيط لهذه الدورة حيث يتم دفع الامونيا أو أي غاز آخر إلى المبادل الحراري ليقابل تيار من ماء سطح البحر الدافئ فيتحول السائل إلى غاز أو بخار يمر من خلال التوربين لتوليد الطاقة الكهربائية. يخرج الغاز من التوربين ويدفع إلى مبادل حراري ليقابل تياراً من قاع البحر البارد فيتحول مرة أخرى إلى سائل ويعود إلى دورته الجديدة. إن إحدى المشكلات الرئيسية في أنظمة الدورات المغلقة تكمن في المبادلات الحرارية (المبخر والمكثف) وذلك لأن أحجامها المطلوبة كبيرة جداً، أما المشكلة الأخرى التي تواجه هذا النوع من المنظومات هي تلك الناتجة عن وجود هذه المبادلات في البحر، وفضلاً عن تأثير أملاح البحر على المعادن المصنوعة منها هذه المبادلات فإن هناك تأثير الكائنات البحرية التي تنمو على أي سطح موجود في مياه البحر، إذ من المتوقع أن تنمو الكثير من الكائنات البحرية على سطح المبادلات الحرارية وتكون طبقات تعزل سطح المبادل والذي بدوره سيؤثر سلباً

على كفاءة المحطة. إن أحد الحلول المطروحة أن تنشأ المحطة على منصة تتحرك في عرض البحر لتقليل إمكانية نمو الكائنات البحرية وتراكمها على المبادلات الحرارية ولمنع ارتفاع درجة حرارة المياه المحيطة بالمبادلات وهو أمر يؤدي إلى انخفاض كفاءة عمل المحطة.



شكل (2.7) مخطط لمنظومة مغلقة تستخدم لاستغلال طاقة حرارة المحيطات.

2.2.7 اختيار الموقع الملائم:

يتطلب استغلال أي مصدر من مصادر الطاقة المتجددة توفر الظروف الملائمة التي تجعل أمر استغلال هذا المصدر ممكناً من الناحية التكنولوجية وفي نفس الوقت غير مكلف اقتصادياً. ولهذا فأن الشرط الأساسي لإمكانية استغلال طريقة الفرق الحراري هو توفر فارق في درجات الحرارة بين مياه السطح ومياه الأعماق بحيث لا يقل عن 15°C وسبب هذا التحديد يمكن فهمه عن طريق استخدام مبدأ كارنوت الذي يحدد أعلى كفاءة لأي ماكينة حرارية بالشكل الآتي:

$$\eta = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}}$$

فإذا افترضنا إن محطة حرارية تعمل على الدورة المفتوحة في بحر تبلغ درجة حرارة السطح فيه 27°C وأنها تتحول في المبخر إلى مزيج من الماء والبخار تحت درجة حرارة 25°C وإن

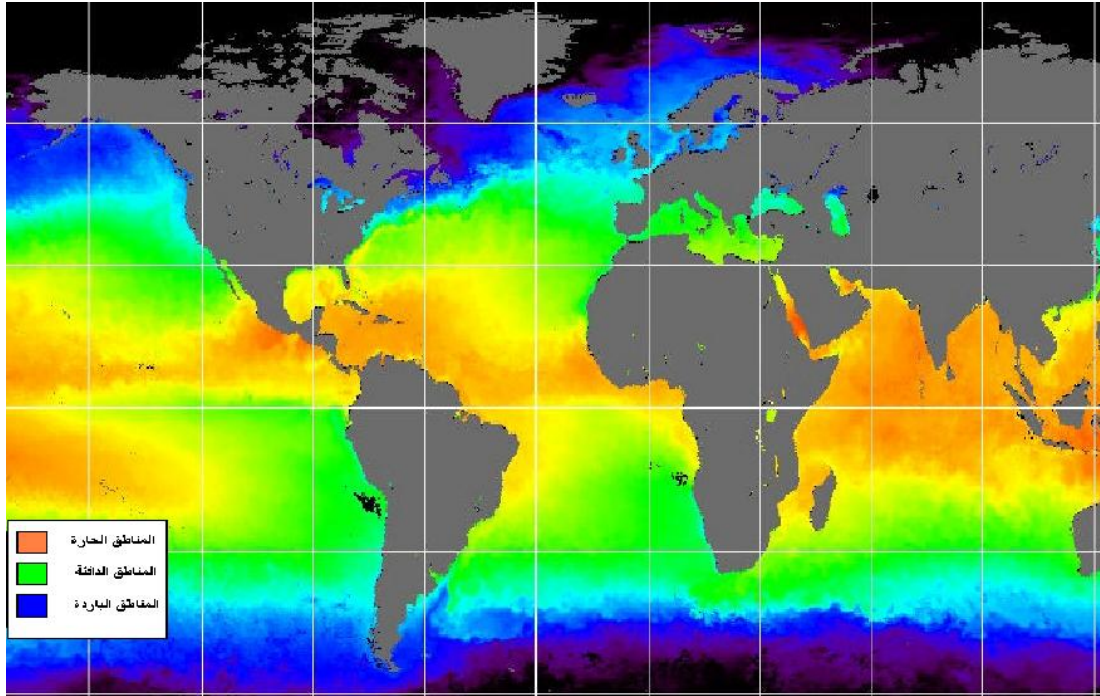
بخار الماء بعد مروره في التوربين يتحول الى سائل في المكثف على درجة حرارة مقدارها 10°C فأن الكفاءة النظرية للنظام في هذه الحالة هي :

$$\eta = \frac{(25 - 10)}{25 + 273} = 5\%$$

وهي في الواقع العملي لا تتعدى 3% وهي كفاءة منخفضة جدا إذا ما قورنت مع كفاءة محطات القدرة البخارية التي تعمل بالوقود الاحفوري والتي تتراوح بين 30 إلى 40 %. ولكن الواضح في هذه المقارنة إن الوقود المستهلك في هذا النوع يكون مجاني وعليه فأن الكفاءة المنخفضة لهذه المحطات لا تشكل عائقا أمام استغلال هذا النوع من المحطات شرط توفر فرق ملائم في درجات الحرارة. ويمكن القول أن اكثر المناطق ملائمة لإنشاء هذا النوع من المحطات هي المناطق المحصورة بين المدارين (السرطان والجدي) كما هو واضح في الشكل (3.7). إذ تكون هذه المناطق معرضة إلى فيض شمسي عالي وبعيدة عن المناطق القطبية مما يساعد على توفر فرق حراري ملائم لعمل هذا النوع من المحطات. فإذا توفر الفرق الحراري الملائم في منطقة ما تأتي بعد ذلك مسألة اختيار موقع المحطة نفسها، فالمحطة أما إن تنشأ على اليابسة أو على منصة في عرض البحر. ففي الحالة الأولى يكون المطلوب ضخ المياه الدافئة والباردة من البحر إلى المحطة عبر أنابيب تمتد لمسافات طويلة وحيث ان هذه المحطات تتطلب كميات كبيرة من المياه لذا فأن أحجام أنابيب ضخ المياه والمضخات سوف تكون كبيرة أيضا وتكون الطاقة المصروفة على عملية الضخ هذه مساوية تقريبا لكمية الطاقة المنتجة بواسطة المحطة وهذا غير مقبول عمليا و اقتصاديا. ورغم ذلك فأن هناك جانب آخر يتحكم في تحديد اختيار موقع المحطة التي تعمل بالنظام المفتوح على اليابسة فالبخار الخارج من التوربين يكثف إلى ماء وهذا الماء صالح للاستخدامات البشرية و إذا أخذنا بنظر الاعتبار كمية المياه الكبيرة المستعملة في المحطة نجد أننا أمام محطة لتحلية مياه البحر بغض النظر عن كمية الطاقة المتولدة خاصة وأن مناطق كثيرة في العالم وخاصة المنطقة العربية تعاني من نقص متزايد في مصادر المياه.

أما في الحالة الثانية حيث يتم إنشاء المحطة في عرض البحر فأن الوضع يختلف فلا حاجة لمد أنابيب لمسافات طويلة ولكن من الضروري إنشاء منصة قوية وكبيرة قادرة على تحمل الوزن الكبير للمحطة وقد ساعد تطور تكنولوجيا التنقيب عن النفط في بناء منصات في البحار الشديدة العواصف والأمواج مثل بحر الشمال، إضافة إلى ذلك فأن إنشاء المحطات في

عرض البحر يتطلب دراسات معمقة لأحوال تلك المنطقة لمعرفة إمكانية تعرض تلك المناطق إلى الزلازل والأعاصير. وأذ تم اختيار موقع المحطة في عرض البحر فستظهر مشكلة نقل الطاقة المنتجة إلى مناطق الاستهلاك على اليابسة وهناك خياران أمام العلماء، الخيار الأول هو إنتاج الطاقة الكهربائية في عرض البحر ونقلها بواسطة أسلاك كهربائية تمتد عبر مياه البحر إلى اليابسة و إذا كانت المسافة طويلة بين المحطة واليابسة فسوف يؤدي ذلك إلى زيادة الكلفة الاقتصادية للمحطة أولاً وإلى فقدان قسم من الطاقة الكهربائية بسبب طول الأسلاك ثانياً. أما الخيار الثاني فهو استعمال الطاقة المتولدة من المحطة في التحليل الكهربائي لمياه البحر و إنتاج الهيدروجين الذي يعتبر أحد البدائل الجديدة للطاقة، أما نقل الهيدروجين إلى اليابسة فهذا لا يشكل مشكلة إذ إن تكنولوجيا نقل الغاز الطبيعي في الأنابيب متقدمة بما فيه الكفاية لضمان سلامة نقل الهيدروجين، كما انه من الممكن نقل الهيدروجين بواسطة السفن بذات الشكل الذي يتم فيه نقل الغاز الطبيعي.



شكل (3.7) التوزيع الحراري لدرجات حرارة مياه البحار والمحيطات

3.7 طاقة المد والجزر Tidal energy:

ترتفع المياه في المحيطات والبحار ثم تنخفض مرتين في اليوم بصورة متعاقبة ويحدث ارتفاع الماء على شكل موجات تتجه نحو الساحل عند المد، وتنقهر عند الجزر. ويحدث ذلك

بسبب قوة جذب القمر التي تؤثر في المياه فتضطرب وتتحرك من أطراف الكرة الأرضية، فترتفع على الجهة المقابلة للقمر، كما تتحرك في الوقت ذاته نحو الجهة المعاكسة وترتفع عليه أيضا بسبب القوة الناشئة عن دوران الأرض حول نفسها. وقد استخدم الإنسان مصدر الطاقة هذا قبل مئات السنين فقد اعتاد سكان المناطق الساحلية في أوروبا - وخاصة المناطق التي يتوفر فيها منسوب عالي أثناء المد- من استعمال طاقة المد في تشغيل طواحين القمح لإنتاج الدقيق.

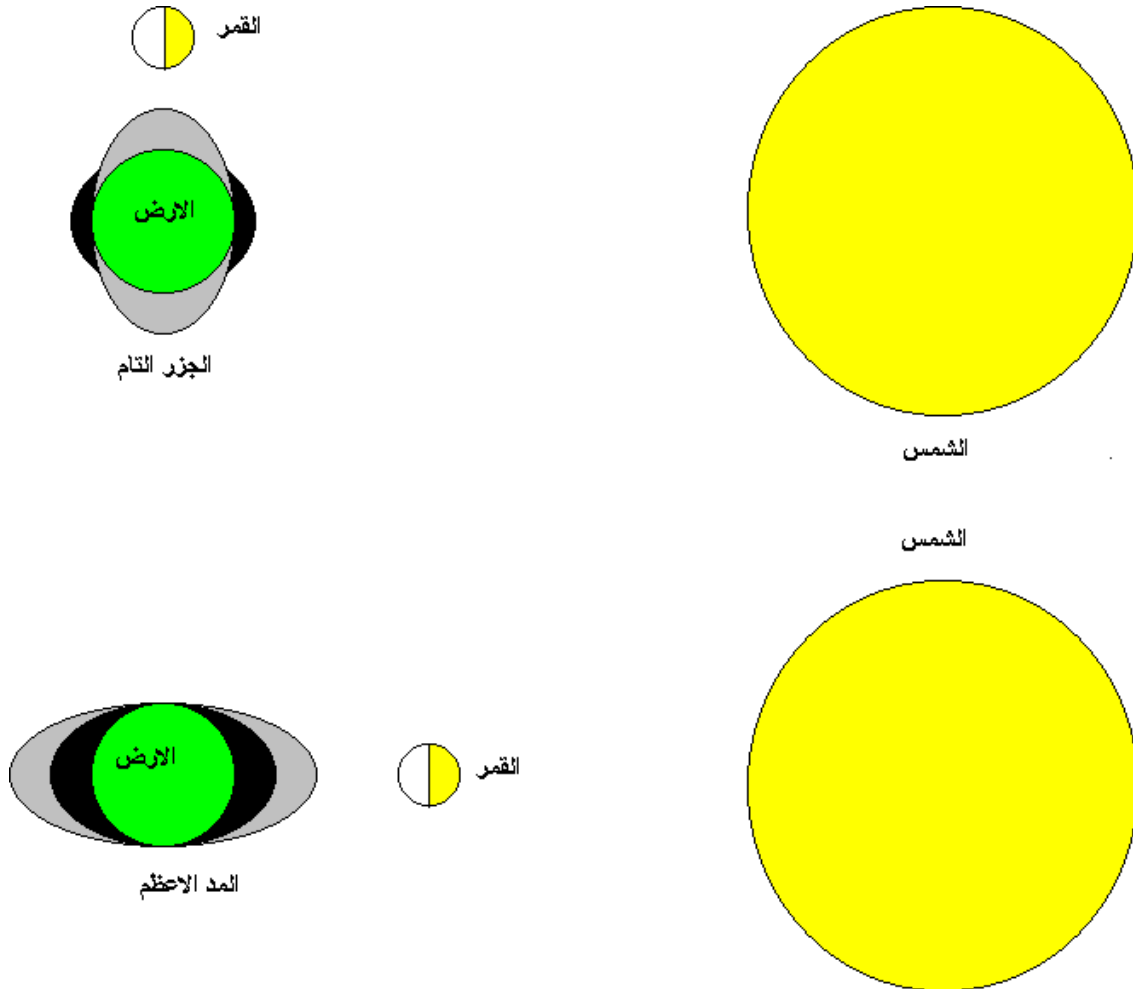
وبعد دخول الإنسان عصر الكهرباء اخذ الباحثون يفكرون في الاستفادة من المد والجزر لإنتاج الكهرباء ، وتعود الأفكار الأولى لهذا المشروع إلى عام 1919 حيث اقترح المهندس الأمريكي ديكستر كوبر بناء محطة كهربائية تعمل على حركة المياه أثناء المد والجزر في خليج باسامكودي في الولايات المتحدة الأمريكية ، ففي هذه المنطقة توجد مجموعة من الجزر الصغيرة على باب الخليج يساعد وجودها على تحريك المياه بقوة كبيرة أثناء المد، وكانت فكرته تتضمن بناء سد ضخم لحجز المياه في الخليج أثناء المد، غير إن رفض الكونغرس الأمريكي تخصيص الاعتمادات المالية المطلوبة أدى إلى وقف العمل في هذا المشروع. لقد تواصل الاهتمام في هذا المشروع ، فأقامت فرنسا على نهر الرانس سدا يحتوي على 24 توربيناً في محطته وبدا بإنتاج الطاقة الكهربائية كما مبين في الشكل (4.7). أما المشروع الآخر الذي تم إنشائه فيقع في الاتحاد السوفيتي السابق في منطقة مرمسك في كسلايا غوبا وتبلغ طاقته الإنتاجية 2000 kW فقط وتم الانتهاء منه عام 1969، ويعمل على فارق منسوب بين المد والجزر مقداره 11 قدماً فقط، وأكملت عام 1968 محطة بقدرة 500 kW في منطقة جدول جانجسكا في شرق بحر الصين.

1.3.7 التفسير العلمي لظاهرة المد والجزر:

تسبب قوة جذب القمر إلى نشوء منطقتان تندفع فيهما المياه وتميل إلى الارتفاع، إحداها في موقع عكس الأخرى ولكن على امتداد واحد هو اتجاه القمر كما مبين في الشكل (5.7) وتنشأ بين هاتين المنطقتين ، منطقتان تنحسر فيهما المياه وتنخفض. وفي أثناء اليوم الواحد تنتقل جهات المحيطات والبحار الواسعة مع الأرض فتكون مرة أمام القمر فتعلو فيها المياه وتتكون فيه أمواج المد، ثم تنحرف عن ذلك فتتنحسر فيها المياه قليلاً فتتكون أمواج الجزر. وباستمرار دوران الأرض تنتقل جهات المحيطات والبحار الواسعة إلى الجهة المعاكسة للقمر فترتفع فيه المياه ثانية، وتعود فتتنخفض بانتقالها بعيداً عن تلك الجهة. وتتعاقب موجات



شكل (4.7) صور جوية للمحطة الفرنسية المقامة على نهر الرانس في فرنسا



شكل (5.7) تأثير الشمس و القمر على المد والجزر

المد والجزر مرتي في كل 24 ساعة و52 دقيقة وهذه المدة تمثل اليوم القمري. أما تأثير الشمس على مياه المحيطات والبحار فلا يتجاوز (5/11) من تأثير القمر عليها، وإذا ما اتفق وتسلمت قوة جاذبية كل من الشمس و القمر في اتجاه واحد ازداد المد وبلغ أقصى ارتفاع له ويسمى بالمد الأعظم (Spring tide) ويحدث هذا عندما يكون القمر في حالة المحاق والبدر، أما إذا أصبحت الأرض بين الشمس والقمر كما هو الحال في التربيعة الأول والثاني فلا ترتفع مياه المد كثيرا ويعرف آنذاك بالجزر التام (Neap tide) والمدة بين المد التام والجزر التام تكون حوالي 14 يوما وهي تقريبا نصف 29.5 يوم التي هي دورة القمر للراصد على الأرض. إن التحليل الموضح أعلاه تحليل مبسط ، لأنه في الحقيقة توجد عوامل أخرى تعقد تعاقب ظاهرة المد والجزر مثل الظروف الجوية وميلان مدار القمر بالنسبة إلى الأرض وكون مدار القمر ليس دائريا تماما بل على شكل بيضوي.

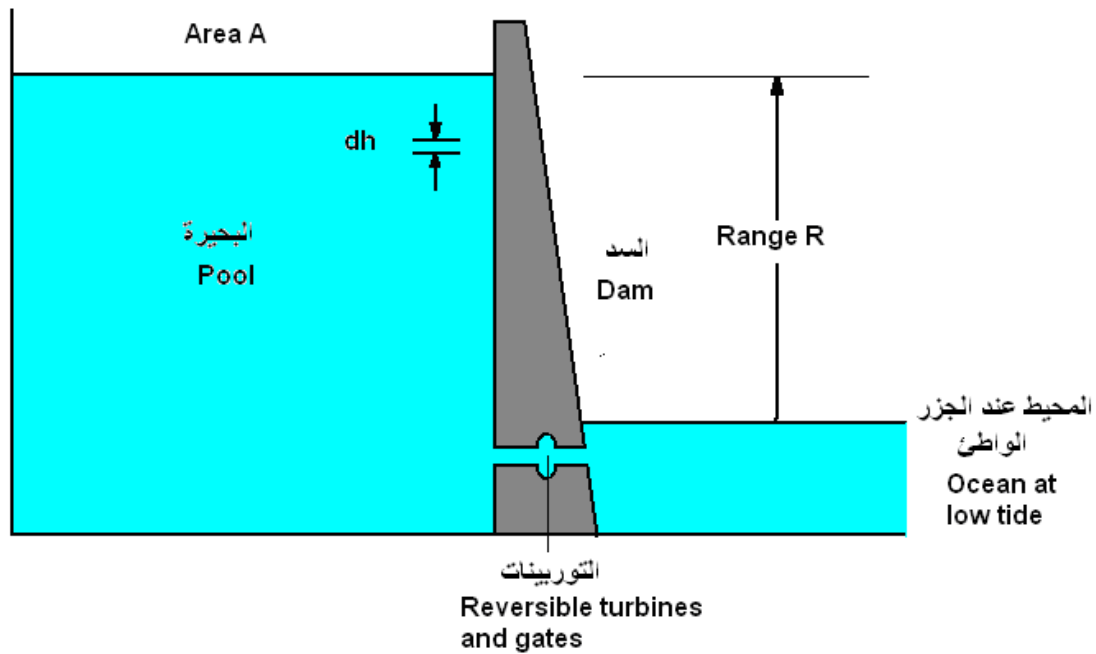
عند اقتراب المد من السواحل يقل عمق المياه ويزداد جريان المد حتى يصل إلى حوالي 3 m، أما إذا دخل المد في مضيق أو مصب نهر مناسب فإنه يكون على شكل قمع وعندها يزداد الارتفاع وتلعب ظاهرة الرنين (Resonance Effect) دورا كبيرا في ذلك. ويمكن الحصول على طاقة أكثر إذا كان الخليج أو المرفأ على شكل قمع مسدود.

2.3.7 أنظمة استغلال طاقة المد والجزر:

توجد هناك العديد من الأنظمة التي تعمل على حركة المد والجزر والتي تلائم المواقع المختلفة و أنماط الاستهلاك المختلفة، وسنشير هنا إلى أربعة من هذه الأنواع:

1-الأنظمة الأحادية الخزان البسيطة (Simple Single-Pool Tidal system):

يتكون هذا النظام من حوض واحد يتم إنشائه بواسطة بناء حاجز أو سد في مضيق الخليج، ويتم تركيب محطة لتوليد الطاقة الكهربائية في هذا الحاجز إضافة إلى مجموعة من النوافذ التي تغلق وتفتح حسب الحاجة كما مبين في الشكل (6.7)، ويتم ملئ هذا الخزان بواسطة ارتفاع مستوى الماء أثناء المد، وحين يصل مستوى الماء إلى المستوى المطلوب تغلق المنافذ للمحافظة على ارتفاع مستوى المياه في الخزان، بعد ذلك يأخذ مستوى ماء البحر بالانخفاض ويتم توجيه مياه الخزان إلى التوربينات التي تأخذ بالعمل وتوليد الطاقة الكهربائية. لحساب كمية الطاقة المتولدة نأخذ شريحة من المائع كما في الشكل (6.7):



شكل (6.7) مخطط لنظام أحادي الخزان بسيط.

Differential work = Potential energy

$$dw = g * dm * h$$

لكن :

$$dm = - \rho * A * dh$$

لذلك :

$$dw = -g * \rho * A * h * dh \quad (7.2)$$

يعد إن :

الشغل المنجز من قبل التوربين $W = (J)$

$g = 9.81 \text{ m}^2/\text{s}$ = التعجيل الأرضي

$m = (\text{kg})$ الكتلة

$h = (\text{m})$ الارتفاع

$\rho = (\text{kg}/\text{m}^3)$ كثافة الماء

$A = (\text{m}^2)$ مساحة البحيرة

$R = (\text{m})$ ارتفاع الماء في البحيرة

لذلك فإن الشغل الكلي يمكن حسابه عن طريق إجراء التكامل على المعادلة (7.2):

$$W = \int_R^0 dW = -g * \rho * A \int_R^0 h.dh$$

$$W = \frac{1}{2} * g * \rho * A * R^2 \quad (7.3)$$

$$Power = Work / time$$

حيث ان زمن المد هو 6 ساعات و 12.5 دقيقة أي ما يعادل 22350 sec

$$P_{av} = \frac{1}{44700} * g * \rho * A * R^2 \quad (W) \quad (7.4)$$

و إذا علمنا إن كثافة ماء البحر تبلغ 1025 kg/m^3 ، نجد ان مقدار الطاقة المنتجة لكل متر من مساحة الخزان تحسب من المعادلة الآتية:

$$\frac{P_{av}}{A} = 0.225 * R^2 \text{ W/m}^2 \quad (7.5)$$

2. الأنظمة الأحادية الخزان ثنائية المفعول (Compound Single-Pool Tidal system):

يعد هذا النوع من الأنظمة صورة مطورة عن النظام السابق، وتقوم الفكرة هنا على الاستفادة من حركة الماء بالاتجاهين، أي توليد الطاقة الكهربائية أثناء تعبئة الخزان و أثناء تفريغه. ويقتضي هذا ان تتوفر إمكانية تعديل اتجاه الريش بما يتلاءم مع اتجاه حركة المياه. لنبدأ بافتراض إن المحطة في حالة التوقف عن العمل (الشكل (7.7)) و أن فارق مستوى المياه بين البحر والحوض لا يسمح بتشغيل التوربين (النقطة 1)، مع بداية المد يبدأ مستوى مياه البحر بالارتفاع فوق مستوى مياه الحوض وحين يصل الفرق بين مستوى المياه بين البحر والحوض ملائم لأغراض التوليد الكهربائي تفتح البوابات ويتم تدوير التوربينات وتوليد الطاقة الكهربائية (النقطة 2). يصل مستوى المد إلى أعلى نقطة ثم يبدأ بالانخفاض وعندما يصل الفرق بين مياه البحر والحوض إلى فرق قليل غير ملائم لاستغلال الطاقة الكهربائية، تغلق البوابات المؤدية إلى التوربينات و تفتح بوابات ثانوية (النقطة 3)، يستمر تدفق مياه البحر إلى الحوض إلى أن يتساوى المستوى في كلا من البحر والحوض عندها تغلق البوابات الثانوية (النقطة 4)، يبدأ مستوى ماء البحر بالانخفاض عن مستوى المياه في الحوض وعندما يصل الفرق في مستوى المياه إلى المستوى المقبول يتم السماح لمياه الحوض بالتدفق إلى البحر عبر التوربينات ويتم تدوير التوربينات وتوليد الطاقة الكهربائية (النقطة 5). يستمر توليد الطاقة الكهربائية إلى أن

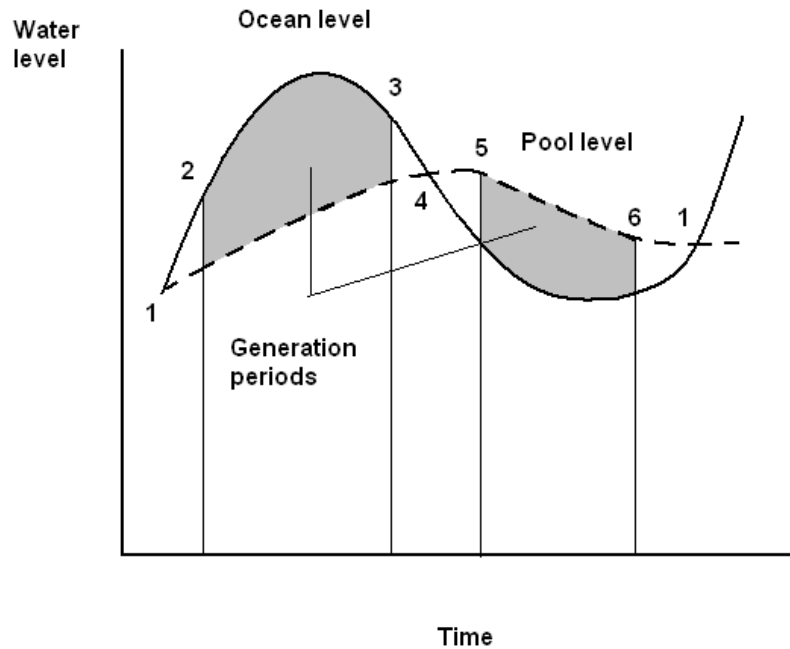
ينخفض مستوى المياه في الحوض إلى مستوى غير مقبول لتوليد الكهرباء النقطة (6) عندها تغلق البوابات مرة أخرى إلى أن يصل المد إلى ارتفاع ملائم لتوليد الطاقة الكهربائية. ويحسب كمية الطاقة المتولدة لهذا النوع من الأنظمة من القانون الآتي:

$$W = g * \rho * A * R^2 * \left[0.988 * a * \left(-\cos\left(\frac{\pi * \theta_2}{6.2083}\right) + \cos\left(\frac{\pi * \theta_1}{6.2083}\right) - \frac{a^2}{2} * (\theta_2^2 - \theta_1^2) \right) \right] \quad (7.6)$$

حيث ان :

$a = h^{-1}$ ثابت يعتمد على مواصفات المنظومة

$\theta_1, \theta_2 = (h)$ زمن فترة التوليد الأولى والثانية



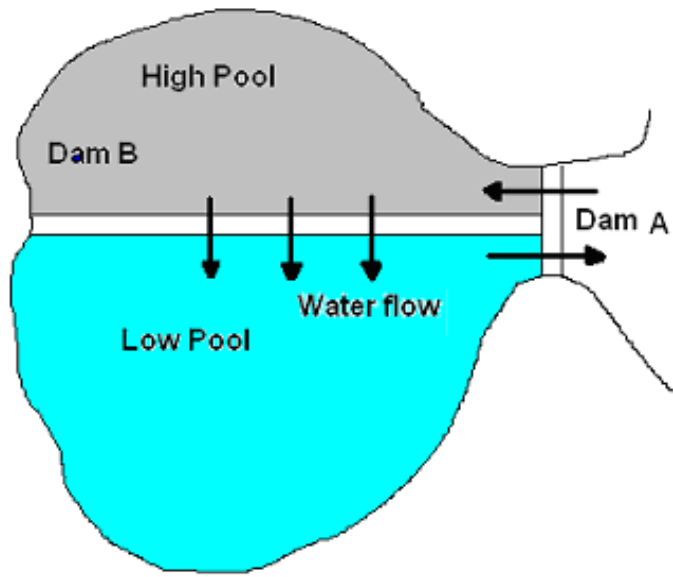
شكل (7.7) فترات توليد الطاقة الكهربائية في المحطات الأحادية الخزان ثنائية المفعول

3. الأنظمة الثنائية الخزان (Two-pool tidal systems) :

يمتاز هذا النوع من المحطات بأن توليد الكهرباء عملية مستمرة طوال الوقت، لكن كمية الكهرباء المنتجة ليست ثابتة طوال الوقت وإنما تختلف مع حركة المد والجزر. وهذا النوع من المحطات ملائم لبعض المناطق التي يتوفر فيها منطقتان متجاورتان تشكل كل منها حوضاً قائماً بذاته. وتتم الاستفادة من هذا النوع من المصادر بواسطة إنشاء سد أو حاجز مشترك يحجز الحوضين عن مياه البحر، وتنشأ في الحاجز منافذ لكل من الحوضين على حدة. أما محطة التوليد

الكهربائي فتنشأ بين الحوضين، يعرف أحد الحوضين بالحوض العالي (High pool) والآخر بالحوض المنخفض (Low pool) حيث يتم الاحتفاظ بمستوى الماء في الحوض العالي على مستوى أعلى من مستوى المياه بالحوض المنخفض بشكل دائم مما يعني إمكانية توليد الطاقة الكهربائية بشكل مستمر كما مبين في الشكل (8.7).

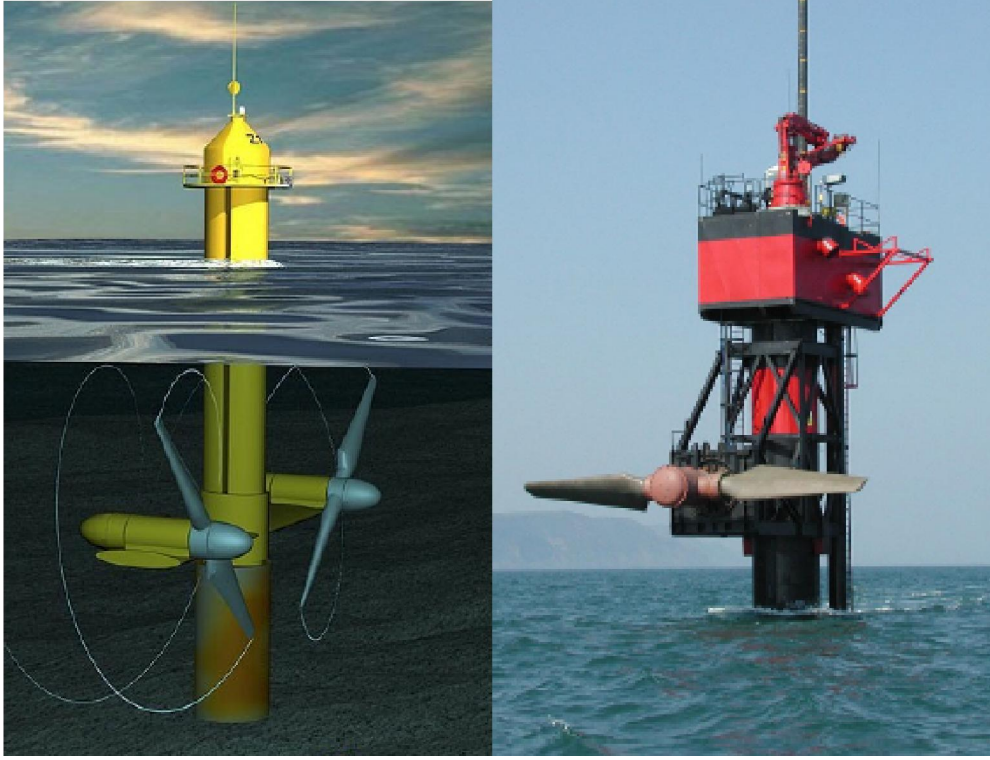
يتلقى الخزان العالي مياهه من البحر أثناء المد ويقذف بها إلى الخزان المنخفض بشكل دائم، ويتم تفريغ المياه في الخزان المنخفض إلى البحر، وهكذا تتحرك المياه من البحر إلى الخزان العالي ثم إلى الخزان المنخفض فالبحر بصورة دائمة.



شكل (8.7) رسم تخطيطي للنظام الثنائي الخزان

4. محطات المد و الجزر الطافية:

تتميز الأنظمة الثلاثة السابقة بكلفتها الأولية العالية إذ أنها تحتاج إلى خزان كبير لحفظ الماء عند المد، لذا تتجه الأنظار إلى استخلاص الطاقة الحركية لتيارات المد و الجزر وذلك بنصب صف من التوربينات الغاطسة المثبتة في القاع كما مبين في الشكل (9.7) وتشبه هذه التوربينات في شكلها التوربينات الريحية غير إن سرعتها تكون اقل، وبما إن كثافة المائع المستخدم (الماء) اكبر من كثافة الهواء فأن القدرة المستخلصة من تيار المد و الجزر اكبر بكثير من القدرة الناتجة من التوربين الريحي.



شكل (9.7) محطة قدرة طافية تتضمن توربين تحت سطح الماء

4.7 طاقة الأمواج Wave energy:

تعد طاقة الأمواج من الطاقات المشتقة من طاقة الرياح وبما إن الرياح مشتقة بالأصل من طاقة الشمس فأننا نستطيع القول إن طاقة الأمواج مشتقة مرتين من طاقة الشمس، وفكرة استخدام طاقة الأمواج فكرة قديمة غير إن التفكير الجدي باستغلال هذه الطاقة لم يدخل حيز التطبيق إلا بعد السبعينيات من القرن الماضي و منظومات طاقة الأمواج مكلفة وتكون ملائمة للمناطق التي لا تتوفر فيها مصادر الطاقة التقليدية مثل الجزر والشواطئ البحرية ومن أهم المشاكل التي تواجه استغلال طاقة الأمواج هي صعوبة حمايتها في بيئة بحرية صعبة تزداد حدتها بسبب وجود العواصف الشديدة، إضافة إلى مشكلة نقل الطاقة المنتجة إلى اليابسة حيث مصادر الاستهلاك ومشاكل التآكل الناتجة عن ملوحة ماء البحر.

تؤثر الرياح في مياه المحيطات والبحار فتجعل سطحها يرتفع وينخفض في تتابع وتلاحق في حركة موجية تنتشر على سطح الماء موجة اثر موجة باتساق وانتظام طالما انتظم هبوب الرياح واعتدلت سعتها، وتختلف الأمواج فيما بينها طولاً وارتفاعاً وسرعة، وقد لا تصل بعض الأمواج إلى الشاطئ، بينما يطوي الموج الآخر نصف امتداد المحيط قبل وصوله إلى

شاطئ بعيد. ويزداد حجم الأمواج في المحيطات عنه في البحار، فيبلغ طول الموج في البحر المتوسط نحو 50 m و يبلغ ارتفاعه 3 m بينما يكون طول الموج في المحيطات بين 160-220 m وقد يصل ارتفاعه حوالي 11 m.

والأمواج في الحقيقة حركة ظاهرية لا يسير فيها الماء مع الموجة في عرض البحر، إنما يتحرك في مسار دائري أو بيضوي متعامد مع خط سير الموجة ثم يعود الماء إلى مكانه الأصلي تقريبا. وتوجد عوامل عديدة تؤثر في حركة الأمواج هي:

1. سرعة الرياح: حيث تزداد سعة الموجة وامتدادها إذا استمرت الرياح تهب في اتجاه الموجة. و إذا ما هبت معارضة لاتجاه الموجة ضعفت الموجة وقد تتلاشى، ولذلك فالرياح سبب نشوء الموج و تلاشيها.

2. طبيعة الشاطئ: تعمل الجزر المنتشرة داخل الخليج وقرب مداخله على امتصاص طاقة الأمواج، فتقل الأمواج في ذلك الخليج، وكذلك تلعب الشعاب المرجانية القريبة من سطح الماء على تكسير الأمواج وعدم وصولها إلى الشواطئ، ويعمل الجليد المفكك على هدوء البحر رغم الرياح القوية، لان الأمواج تنكسر على حافته، وأفضل المناطق لإنشاء محطات طاقة الأمواج هي السواحل التي لها منحدر صخري عميق جدا.

1.4.7 التحليل الرياضي لطاقة الأمواج:

يمكن وصف شكل الموجة الاعتيادي بأنه منحني جيبي ولو أخذنا موجة جيبية كما في

الشكل (10.7) فيمكن وصفها بالمصطلحات الآتية:

الطول الموجي (المسافة بين قمتي أو قعري موجتين متعاقبتين) $\lambda(m)$

السعة $a(m)$

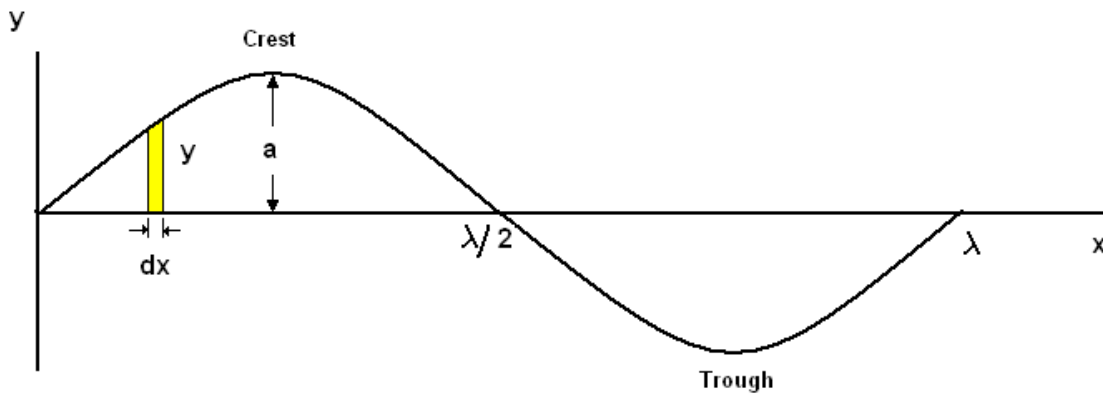
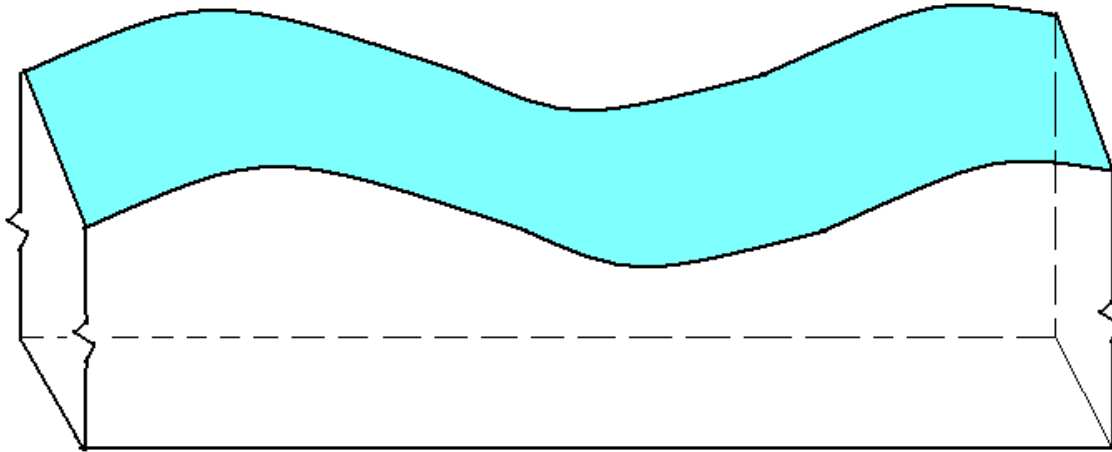
ارتفاع الموجة (المسافة بين قمة وقعر الموجة) $2a$

زمن الموجة (الزمن اللازم لقطع المسافة بين قمتين متعاقبتين) $\tau(\text{sec})$

سرعة تقدم الموجة في البحر $c = \frac{\lambda}{\tau} (m/\text{sec})$

تردد الموجة $f = \frac{1}{\tau}$

ويمكن تبسيط العلاقة بين الطول الموجي و زمن الموجة باستخدام العلاقة الآتية:



الشكل (10.7) مخطط للموجة البحرية

$$\lambda = 1.56 * \tau^2 \quad (7.8)$$

وشكل الموجة يمكن تبسيطه بالشكل الاتي:

$$y = a * \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{\lambda}\theta\right) \quad (7.9)$$

حيث ان :

ارتفاع الماء فوق المستوى الطبيعي y (m) =

الزمن θ =

$$m = \frac{2\pi}{\lambda}$$

بالإضافة إلى حركة الموجة بالاتجاه x فإن جزيئات المائع تتحرك في مدارات شبه دائرية أو بيضوية متعامدة مع خط سير الموجة كما في الشكل (11.7) و حجم هذه المدارات مساو لارتفاع

الموجة وتصغر هذه المدارات كلما اتجهنا إلى الأسفل بدالة اسية مع العمق ومحاور هذه المدارات البيضاوية تعطى بالمعادلات الآتية:

$$\alpha = a \frac{\cosh(m\eta)}{\sinh(mh)} \quad (7.10)$$

$$\beta = a \frac{\sinh(m\eta)}{\sinh(mh)} \quad (7.11)$$

2.4.7 حساب كمية الطاقة الناتجة عن الأمواج:

تتكون الطاقة الناتجة عن الأمواج من قسمين رئيسيين هما:

1. الطاقة الكامنة Potential energy

وهي الطاقة الناتجة عن ارتفاع و انخفاض ماء البحر عن المستوى الطبيعي له أثناء حركة الموجات، ولو أخذنا شريحة للمائع كما في الشكل (10.7) فسيكون مقدار الطاقة الكامنة في هذه الشريحة يساوي:

$$\begin{aligned} dP.e &= \frac{1}{2} * m * g * y = (\rho * y * dx * L) * \frac{g * y}{2} \\ &= \frac{\rho L}{2} * y^2 * g * dx \end{aligned}$$

حيث ان :

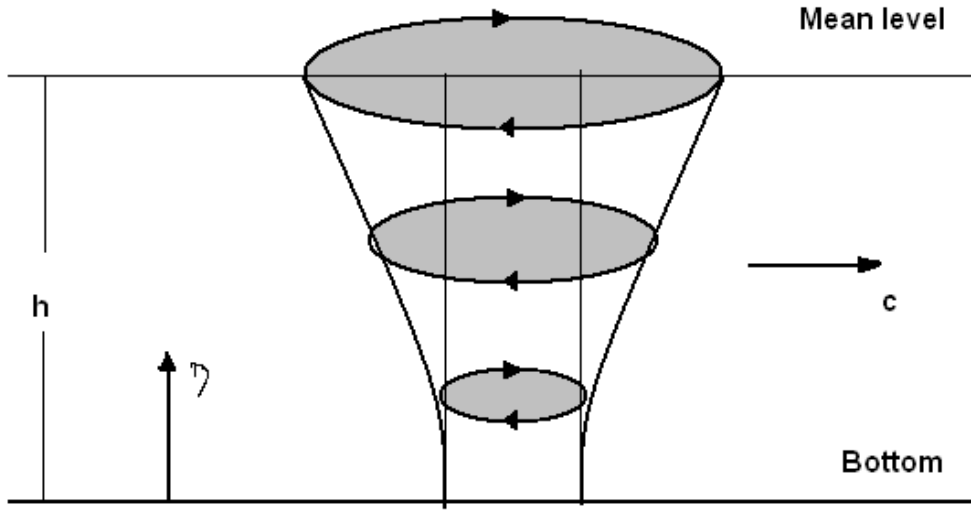
m = كتلة الشريحة المأخوذة

g = 9.81 m²/sec = التعجيل الأرضي

ρ = الكثافة

و بتعويض المعادلة (8.6) في المعادلة أعلاه و مكاملتها نحصل على:

$$\begin{aligned} PE &= \frac{\rho L a^2}{2} * g * \int_0^\lambda \sin^2(mx - n\theta) dx \\ &= \frac{\rho L a^2}{2m} * g * \left(\frac{1}{2} mx - \frac{1}{4} \sin^2 2mx \right)_0^\lambda \\ &= \frac{\rho L a^2}{2m} * g * \left(\frac{m\lambda}{2} \right) = \frac{1}{4} \rho a^2 \lambda L g \quad (7.12) \end{aligned}$$



الشكل (11.7) المدارات البيضوية لحركة جزيئات ماء البحر

وتعرف كمية الطاقة لوحدة المساحة بكثافة الطاقة حيث ان المساحة تساوي $A = \lambda L$ وتعطى بالمعادلة الآتية:

$$\frac{PE}{A} = \frac{1}{4} \rho a^2 g \quad (7.13)$$

2. الطاقة الحركية Kinetic energy:

تمتلك موجات البحر طاقة حركية عالية تحسب من المعادلة الآتية:

$$KE = \frac{1}{4} \rho a^2 \lambda L g \quad (7.14)$$

وتكون كثافة الطاقة الحركية كآلاتي:

$$\frac{KE}{A} = \frac{1}{4} \rho a^2 g \quad (7.15)$$

وتكون الطاقة الكلية للموجات مجموع الطاقتين الكامنة والحركية :

$$E = \frac{1}{2} \rho a^2 g \lambda L \Rightarrow \frac{E}{A} = \frac{1}{2} \rho a^2 g \quad (7.16)$$

أما القدرة فهي الطاقة لوحدة الزمن وتحسب كثافة القدرة من المعادلة الآتية:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho a^2 f g \quad (7.17)$$

3.4.7 منظومات طاقة الأمواج:

توجد تصاميم مختلفة لاستغلال طاقة الأمواج وسنقتصر على شرح اثنين من هذه التصاميم:

1. ماكينة طاقة الأمواج العائمة (Float wave-power machine):

اقترح هذه النظام من قبل الباحث مارتن (Martin) ، يتكون النظام (الشكل 12.7) من طوافة تتحرك بحرية إلى الأعلى والأسفل مع حركة مياه البحر ومقيدة بأربعة أعمدة ترتكز إليها الماكينة والمكانة مستقرة على أربعة خزانات هواء ثابتة لا تتأثر بالحركة الأفقية والعمودية للأمواج البحر. تؤدي حركة الطوافة إلى الأعلى والأسفل إلى كبس الهواء وضغطه في خزانات الهواء الأربعة والتي لها وضيفتان هما: تعويم المحطة وخزن الهواء وهذا الهواء المخزون يستخدم لتشغيل توربين هوائي مربوط إلى مولد كهربائي لتوليد الطاقة الكهربائية وينقل التيار الكهربائي بخطوط نقل خاصة إلى اليابسة حيث مصادر الاستهلاك. ويمكن تقريب عمل هذه الماكينة لعمل ضاغط هوائي مثالي يعمل بالدورة المبينة بالشكل (12.7) وعليه يمكن حساب الشغل المنجز من قبل التوربين من المعادلة الآتية:

$$\frac{W_{turbine}}{m} = c_p T_o \left[1 - \left(\frac{r_c}{r_e} \right)^{(k-1)/k} \cdot r_c^{(1-k)/k} \right] \quad (7.18)$$

حيث إن :

$m (kg)$ = كتلة الهواء

$c_p (J/kg.K)$ = الحرارة النوعية للهواء

$r_c = P_1/P_o$ = نسبة الضغط في الضاغط

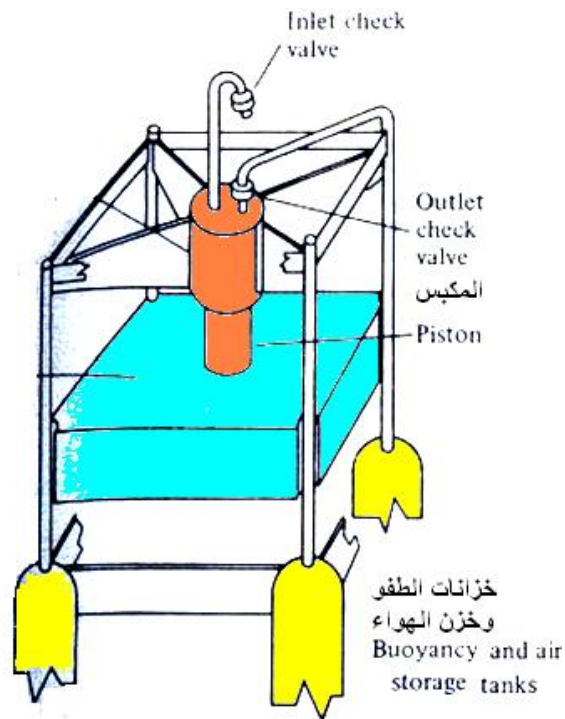
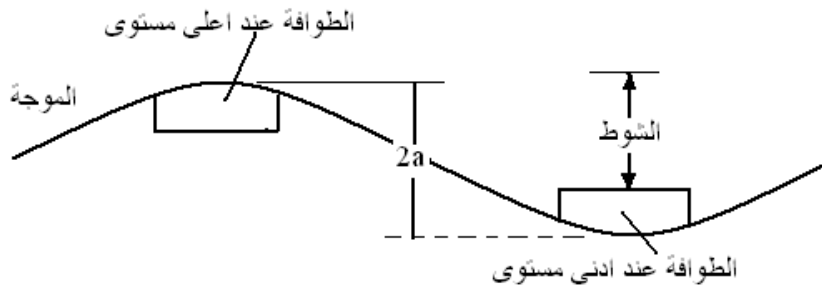
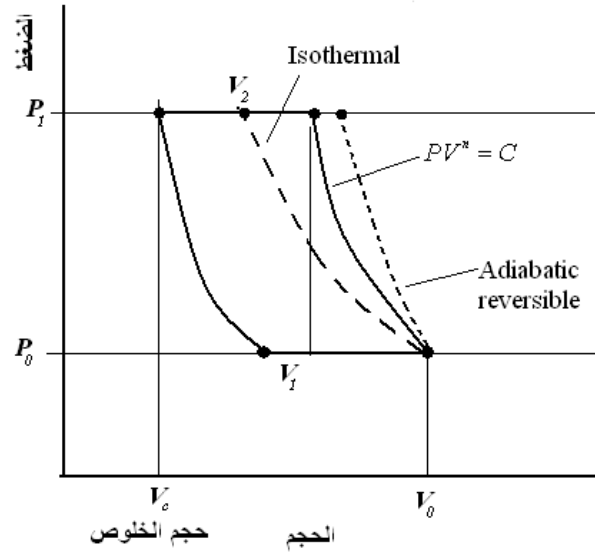
$r_e = P_2/P_3 = P_1/P_3$ = نسبة الضغط في الضاغط

P_3 = الضغط الخارج من التوربين

k = نسبة الحرارة النوعية للهواء

وعادة تأخذ النسبة $\frac{r_c}{r_e}$ مساوية إلى 1.1 ولغرض الاستفادة من اكبر كمية ممكنة من طاقة

الأمواج يصار إلى نصب مجموعة من الماكينات بطول 1 ميل لتوليد طاقة قد تصل مقدارها أحيانا إلى 100 MW وفي الحقيقة إن هذه الماكينات لا تخلو من المشاكل فهناك مشكلة تآكل



الشكل (12.7) ماكينة طاقة الأمواج العائمة

المعادن المصنوع منها التوربين ومشكلة نمو الطحالب ومشكلة نقل القدرة الكهربائية الى الشاطئ وغيرها.

2. ماكينة الدولفين لطاقة الأمواج (The dolphin-type wave-power machine):

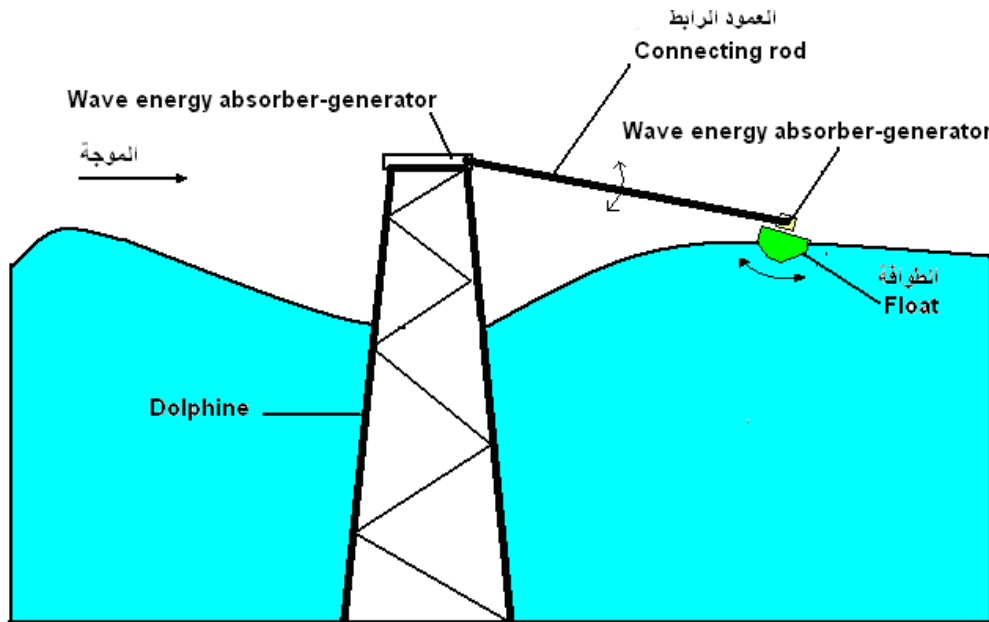
طورت هذه المنظومة في مختبرات الأبحاث اليابانية و تتكون المنظومة من أربعة أجزاء رئيسية (الشكل 13.7):

1. الدولفين Dolphin

2. العوامة Float

3. العمود الرابط Connecting rod

4. المولدات الكهربائية Electrical generator



الشكل (13.7) مخطط محطة الدولفين لطاقة الأمواج

تتحرك العوامة في هذه المنظومة حركتان، إحداها نقطة اتصال العوامة مع العمود الرابط والأخرى حول نقطة اتصال العمود الرابط مع الهيكل الثابت (Dolphin) ويتم تحويل هذه الحركات عبر ميكانيكية خاصة إلى أجهزة دوران تعمل على تدوير المولدات الكهربائية وتوليد الكهرباء. تم نصب أول محطة من هذا النوع في اليابان و أنتجت قدرة مقدارها 90 W ، 20 W منها استنزفت لتشغيل الأجزاء المختلفة من المحطة فيكون مقدار القدرة الصافية 70 W ، و أظهرت النتائج المختبرية إن القدرة المنتجة يمكن إن تحسب من المعادلة الآتية:

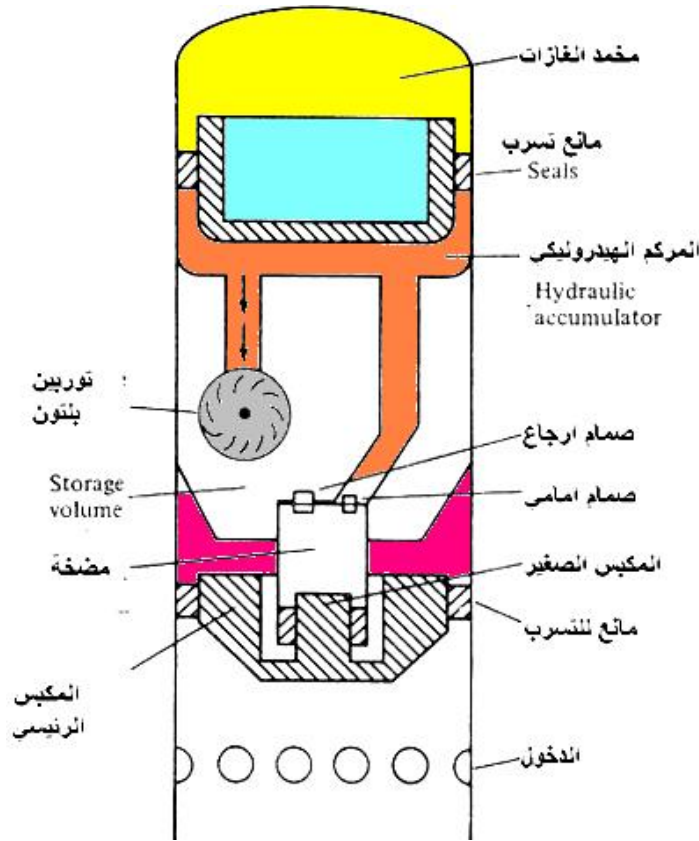
$$\frac{P}{L} = 1.74 * a^2 * \tau \quad (7.19)$$

إذ إن P/L هي القدرة المنتجة لكل وحدة طول من طول الموجة، فإذا كان لدينا موجة ارتفاعها متران وزمن موجتها 6 sec فيكون مقدار القدرة المنتجة من هذه المحطة 10 kW/m وهي كمية كبيرة.

3. ماكينات تجميع الموجات ذات الضغط العالي High pressure accumulator wave machine:

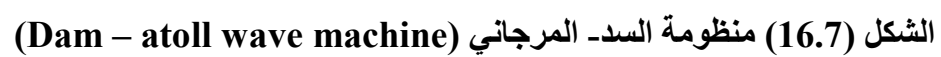
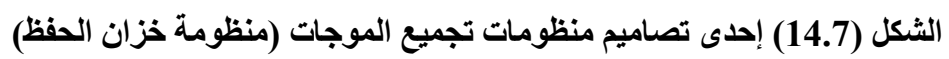
يستخدم في هذا النوع من المنظومات، الماء بدلا من الهواء المضغوط المستخدم في المنظومات السابقة، حيث تستغل طاقة الأمواج لضغط الماء في أوعية ضغط ذو سعة كبيرة أو ضخ ماء البحر بواسطة مضخات تعمل إلى ارتفاعات عالية لتخزن على شكل طاقة كامنة يمكن استغلالها عن طريق إمرارها خلال توربين مائي وعادة ما يكون من نوع بلتون مربوط إلى مولد كهربائي لتوليد الطاقة الكهربائية.

الشكل (14.7) إحدى تصاميم منظومات تجميع الموجات، حيث إن حركة الأمواج نحو الأعلى والأسفل يتم استغلالها عن طريق مكبس مركب يدخل إليه الماء الصاعد والنازل من الموجات عن طريق الفتحات الموجودة في الأسفل، تسبب هذه الموجات في حركة المكبس الرئيسي (Main piston) صعودا مع صعود الموجة نحو الأعلى ونزولا مع حركة الموجة نحو الأسفل ويتم تكبير الضغط الذي يسلطه الماء على المكبس الكبير عن طريق مكبس صغير ليصل الضغط إلى مستويات عالية تصل أحيانا إلى 5 bar، ويستغل هذا الضغط العالي لضغط ماء موجود أصلا في داخل المنظومة ومخزون في المرمك الهيدروليكي (Hydraulic accumulator) وعند نزول مستوى الماء على سطح البحر نتيجة انخفاض الموجة وانخفاض الضغط المسلط على المكبس الرئيسي، يعمل الهواء المضغوط الموجود في مخمد الغازات على دفع الماء الموجود في المرمك الهيدروليكي باتجاه توربين بلتون وبالتالي توليد الطاقة الكهربائية عن طريق المولد الكهربائي المرتبط إليه ويسحب الماء الخارج من التوربين عن طريق مضخة خاصة ليعاد إلى إمام الكبس الرئيسي ومن ثم تتكرر هذه الدورة مرة أخرى. إن استخدام الماء كمائع تشغيل في هذه الدورة له بعض المساوئ منها، التآكل والأنجماد تحت درجات الحرارة المنخفضة، ولذلك يصار أحيانا إلى استخدام الكحول كمائع تشغيل على الرغم من أن له محاذير منها تسريع معدل التآكل الكيميائي بين الحلقات والاسطوانة والمكبس.



الشكل (14.7) إحدى تصاميم منظومات تجميع الموجات (منظومة المركم الهيدروليكي)

وهناك طريقة أخرى للاستفادة من طاقة الأمواج في هذه المنظومات حيث يستعاض عن المركم الهيدروليكي المستخدم لخرن الماء المضغوط برفع هذا الماء إلى مستويات عالية فوق مستوى الأمواج ولذلك يجب إن تقام هذه المنظومات بالقرب من الساحل لخرن المياه في بحيرة اصطناعية تقام على مرتفع على الساحل أو إن ينشأ برج حديدي في البحر مثبت في أعلاه خزان كبير لخرن الماء المسحوب من مستوى ماء البحر والشكل (15.7) إحدى هذه المنظومات وكما أوضحنا سابقاً انه بالإضافة إلى حركة الموجة بالاتجاه x فإن جزيئات المائع تتحرك في مدارات شبه دائرية أو بيضوية متعامدة مع خط سير الموجة واستطاع الباحثين من تطوير منظومة تستغل هذه الحركة الدورانية عن طريق تصميم خاص لتوربين يمكن نصبه في داخل البحر وكما هو مبين في الشكل (16.7) وتسمى هذه المنظومة بمنظومة السد- المرجاني (Dam – atoll wave machine).



امثلة محلولة

مثال 1.7:

محطة طاقة بحرية تعمل بنظام الدورة المفتوحة تنتج طاقة إجمالية مقداره 100 kW وتعمل بظروف الشكل (7.1) وكانت كفاءة التوربين البولتروبية 0.8 وكفاءة المولد الإجمالية 0.9. أحسب كميات المياه الدافئة المسحوبة من السطح والباردة المسحوبة من الأعماق بوحدات كيلو غرام/ثانية و متر مكعب/ثانية وكفاءة المحطة.

الحل:

باستخدام جداول البخار يمكن الحصول على مواصفات البخار والماء عند درجات حرارة 13، 15، 25، 27 درجة مئوية كالتالي:

1- المبخر

$$h_1 = h_f \text{ at } 27^\circ\text{C} = 113.2 \text{ kJ/kg} \quad v_1 = 0.0010036 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_2 = h_1 = 113.2 = (h_f + x_2 h_{fg}) \text{ at } 25^\circ\text{C}$$

$$= 104.8 + x_2 * 2442$$

$$\therefore x_2 = 0.00344 \text{ or } 0.344 \%$$

Warm water mass-flow rate per unit turbine mass-flow rate

$$\dot{m}_w = \frac{m_1}{m_3} = \frac{m_2}{m_3} = \frac{1}{x_2} = \frac{1}{0.00344} = 290.7$$

1- التوربين

$$h_3 = h_g \text{ at } 25^\circ\text{C} = 2550 \text{ kJ/kg}, s_3 = 8.5570 \text{ kJ}/(\text{kg.K})$$

يتمدد البخار بصورة اديباتية انعكاسية حتى النقطة (5_s) لذلك:

$$s_{5,s} = s_3 = 8.5570 = (s_f + x_{5,s} s_{fg}) \text{ at } 15^\circ\text{C}$$

$$= 0.2244 + x_{5,s} * 8.5562$$

$$x_{5,s} = 0.9739 \text{ or } 97.39 \%$$

$$h_{5,s} = (h_f + x_{5,s} h_{fg}) \text{ at } 15^\circ\text{C} = 62.97 + 0.9739 * 2465 = 2463.6 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Adiabatic reversible turbine work} = h_3 - h_{5,s} = 2550 - 2463.6$$

$$= 86.4 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned} \text{Actual turbine work } w_T &= 86.4 * \text{polytropic efficiency} \\ &= 86.4 * 0.8 \\ &= 69.1 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$h_5 = h_3 - \text{actual work} = 2550 - 69.1 = 2480.9 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{at which } x_5 = 0.9809 \text{ or } 98.09 \% \text{ and } v_5 = 76.48 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{Turbogenerator output} = 69.1 * 0.88 = 60.8 \text{ kJ/kg}$$

-2 المكثف:

$$h_6 = h_f \text{ at } 13^\circ \text{C} = 54.60 \text{ kJ/kg}$$

$$v_5 = 0.0010007 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_7 = h_f \text{ at } 15^\circ \text{C} = 62.97 \text{ kJ/kg}$$

Cold water mass-flow rate per unit turbine mass-flow rate:

$$\dot{m}_c = \frac{h_5 - h_7}{h_7 - h_6} = \frac{2480.9 - 62.97}{62.97 - 54.60} = 288.9$$

-3 الدورة

$$\begin{aligned} \text{Turbine mass-flow rate } \dot{M}_T &= \text{turbine work} / w_T = 100/69.1 \\ &= 1.447 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Turbine volume flow rate at throttle} &= \dot{M}_T v_3 = 1.447 * 43.40 \\ &= 62.8 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Turbine volume flow rate at exhaust} &= \dot{M}_T v_5 = 1.447 * 76.48 \\ &= 110.7 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Warm-water mass-flow rate } \dot{M}_w &= \dot{M}_T \dot{m}_w = 1.447 * 290.7 \\ &= 420.6 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

$$\text{Warm-water volume-flow rate } \dot{V}_w = \dot{M}_w v_1 = 420.6 * 0.0010036$$

$$= 0.422 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Cold-water mass-flow rate } \dot{M}_c = \dot{M}_T \dot{m}_c = 1.447 * 288.9$$

$$= 418.0 \text{ kg/s}$$

$$\text{Cold-water volume-flow rate } \dot{V}_c = \dot{M}_c v_6 = 418.0 * 0.0010007$$

$$= 0.418 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Gross cycle efficiency} = \frac{w_t}{q_A} = \frac{h_3 - h_5}{h_3 - h_7} = \frac{69.1}{2487} = 0.0278 = 2.78 \%$$

$$\text{Gross plant efficiency} = 0.0278 * 0.9 = 0.0250$$

$$= 2.5 \%$$

ويجب ملاحظة إن هذه الكفاءة لا تشمل القدرة المستهلكة في المضخات و الأجهزة المساعدة الأخرى، كما نلاحظ الكمية العالية للماء الساخن المستخدمة في هذه المحطة.

مثال 2.7:

محطة قدرة من ذوات الدورة المغلقة تولد طاقة مقدارها 100 MW مصممة للعمل في موقع معين وسط البحر، تبلغ درجة حرارة السطح فيه 300K ودرجة حرارة الماء على عمق معين 278K تحتوي على مبادل حراري يستخدم غاز الفريون R-22 كمائع تشغيل بين درجتي حرارة 284K و 294K. أحسب التدفق الكتلي للفريون وللماء المستخدم والمساحة السطحية للمكثف وكفاءة المحطة بفرض ان الموصلية الإجمالية للمكثف $200 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ وفعاليتيه 100% وكفاءة المضخة والتوربين 80% و 90% على التوالي، المخطط البسيط للمحطة مبين في الشكل أدناه.

الحل:

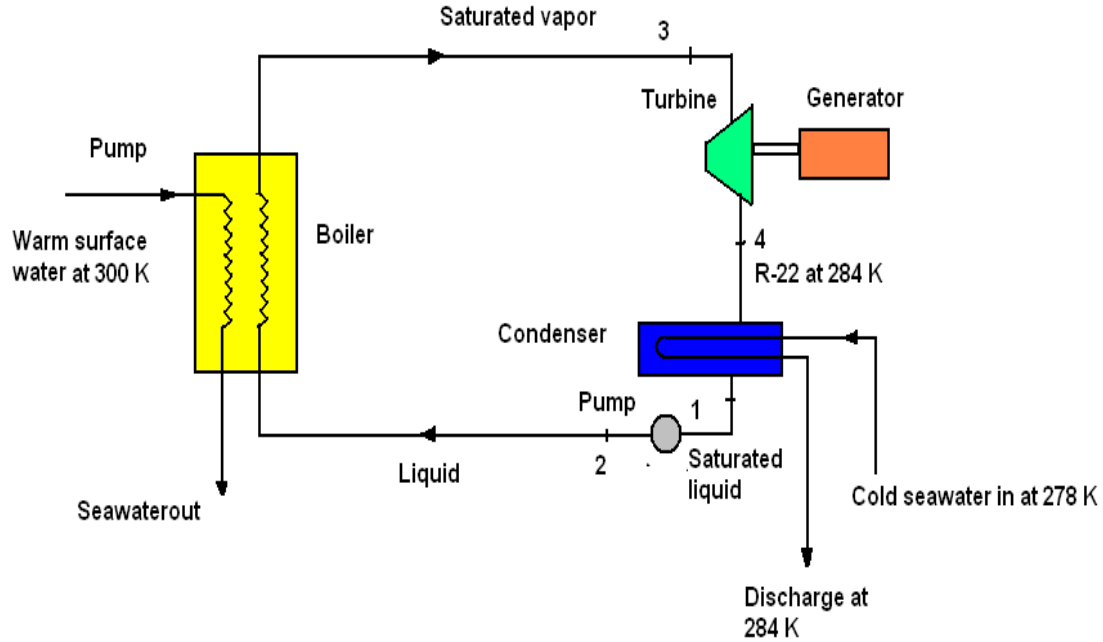
من جداول الفريون نجد مواصفات الفريون عن درجات الحرارة 284 K و 294 K كما يلي:

$T \text{ (K)}$	P_{sat} (kPa)	s_f (kJ/kg.K)	s_g (kJ/kg.K)	s_{fg} (kJ/kg.K)	h_f (kJ/kg.K)	h_g (kJ/kg.K)	h_{fg} (kJ/kg.K)
294	938		0.9			256.8	
284	681	0.217		0.695	56.45		197

يتمدد الفريون ايزنتروپيا خلال التوربين لذلك:

$$s_3 = 0.9 = 0.217 + x * 0.695$$

$$x = 0.9827$$



المثال (7.2)

وتصبح انثالبية الفريون بعد خروجه من التوربين

$$h_4 = h_{f,4} + x_4 * h_{fg,4} = 56.45 + 0.9827 * 197$$

$$= 250.048 \text{ kJ/kg}$$

$$\therefore \text{Turbine.output} = \eta * (h_3 - h_4) = 0.9 * (256.8 - 250.048) = 6.076 \text{ kJ/kg}$$

أما القدرة المصروفة على المضخة بين النقطتين 1 و 2 :

$$W_p = \frac{v * \Delta p}{\eta_p}$$

حيث ان v هو الحجم النوعي للفريون عند النقطة 4 وتساوي $0.000799 \text{ m}^3/\text{kg}$ لذلك فإن:

$$W_p = \frac{0.000799 * (938 - 681)}{0.8} = 0.2566 \text{ kJ/kg}$$

و القدرة الصافية المنتجة من المحطة هي الفرق بين القدرة المنتجة من قبل التوربين والقدرة المستهلكة من قبل المضخة، لذلك:

$$W_{net} = W_T - W_p = 5.82569 \text{ kJ/kg}$$

ولقدرة منتجة مقدارها 100 MW يكون معدل التدفق الكتلي لمائع التشغيل يساوي:

$$\dot{m} = (100 \text{ MW})(10^5 \text{ kJ/sec})(3600 \text{ sec/hr}) / (5.82569 \text{ kJ/kg}) = 6.179 * 10^9 \text{ kg/hr}$$

كمية الحرارة الداخلة الى المرجل هي الفرق في الانثالبية بين النقطتين 2 و 3 لذا:

$$Q_{in} = h_3 - h_1 = 256.8 - (56.45 + 0.2566) = 200 \text{ kJ/kg}$$

وتكون الكفاءة

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = \frac{5.82569}{200} = 0.029 = 2.9\%$$

لحساب المساحة السطحية للمكثف المستخدم يجب حساب كمية الحرارة المطروحة من المكثف والتي تساوي:

$$q_c = \dot{m} * (h_4 - h_1) = 6.179 * 10^9 (250.048 - 56.45) = 1.1962 * 10^{10} \text{ kJ/hr}$$

وتساوي هذه الكمية في نفس الوقت:

$$q_c = U * A * \Delta T_{mean} \Rightarrow A = \frac{1.1962 * 10^{10}}{3600 * 3 * 1} = 1,107,592.6 \text{ m}^2$$

مثال 7.3:

تبلغ مساحة خليج Fundi الواقع بين الولايات المتحدة الأمريكية وكندا حوالي 13000 km² وارتفاع المد 8 m، فأذا تم إنشاء محطة تعمل بطاقة المد والجزر عند مدخله فأحسب الطاقة المستخرجة من هذا الخزان اذا كانت كفاءة التوربينات العاملة تبلغ 27.5%.

الحل:

باستخدام العلاقة (7.4) نجد:

$$P_{av} = 0.275 * \frac{1}{44700} * 9.81 * 1025 * 13000 * 10^6 * 8^2 = 51468.48 \text{ MW}$$

وتعادل هذه الكمية المنتجة ضعف الاستهلاك السنوي لكندا لعام 1980 !

مثال 7.4:

احسب الكمية الطاقة المتولدة من محطة أحادية الخزان ثنائية المفعول تعمل على طاقة المد والجزر، فإذا كانت مساحة خزان حفظ المياه أثناء المد حوالي 10000 km² وكثافة ماء البحر

1025 kg/m^3 وارتفاع المد 12 m وقيمة الثابت a هي 0.0625 h^{-1} وفترة التوليد الأولى (ساعة) $\theta_1 = 1$ وفترة التوليد الثانية (ساعة) $\theta_2 = 4$. احسب كمية الطاقة المتولدة.

الحل:

بتطبيق المعادلة (7.6) نجد ان:

$$W = g * \rho * A * R^2 * \left[0.988 * a * \left(-\cos\left(\frac{\pi * \theta_2}{6.2083}\right) + \cos\left(\frac{\pi * \theta_1}{6.2083}\right) - \frac{a^2}{2} * (\theta_2^2 - \theta_1^2) \right) \right]$$

$$W = 9.81 * 1025 * 10^0 * 12^2 * \left[0.988 * 0.0625 * \left(-\cos\left(\frac{\pi * 4}{6.2083}\right) + \cos\left(\frac{\pi * 1}{6.2083}\right) - \frac{0.0625^2}{2} * (4^2 - 1^2) \right) \right]$$

$$W = 7.493 * 10^{14} \text{ J}$$

ولما كانت فترة المد تبلغ 6.2083 ساعة لذا فإن القدرة المنتجة تكون:

$$P = W / \text{time}$$

$$P_{av} = \frac{7.493 * 10^{14}}{6.2083 * 3600} = 3.35 * 10^{10} = 33500 \text{ MW}$$

مثال 7.5:

إذا كان متوسط ارتفاع الموجة 2 m ، وزمن الموجة 6 sec ، وتحدث في منطقة ارتفاع المياه فيها 100 m أحسب:

1. الطول الموجي (Wave length)
2. سرعة الموجة (Wave velocity)
3. طول المدارات الأفقية والعمودية لحركة المياه (Vertical and horizontal semi axis)
4. كثافة الطاقة وكثافة القدرة للموجة

الحل:

يحسب الطول الموجي من المعادلة (7.8):

$$\lambda = 1.56 * \tau^2 = 1.56 * 6^2 = 56.16 \text{ m}$$

أما سرعة الموجة فتحسب من المعادلة الآتية:

$$c = \frac{\lambda}{\tau} = \frac{56.16}{6} = 9.36 \text{ m}$$

ارتفاع الموجة يبلغ 2 m لذلك:

$$2a = 2 \Rightarrow a = 1 \text{ m}$$

$$m = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{56.16} = 0.1119 \text{ m}^{-1}$$

عند السطح يكون ($\eta = h = 100 \text{ m}$)

تحسب المدارات الأفقية والعمودية للمحاور من المعادلتين (7.10, 7.11):

$$\alpha = a \frac{\cosh(m\eta)}{\sinh(mh)} = 1 * \frac{\cosh(11.19)}{\sinh(11.19)} = 1 \text{ m}$$

$$\beta = a \frac{\sinh(m\eta)}{\sinh(mh)} = 1 * \frac{\sinh(11.19)}{\sinh(11.19)} = 1 \text{ m}$$

نلاحظ إن المحاور متساوية مما يعني إن الحركة دائرية بسبب عمق المياه.

يحسب التردد من المعادلة الآتية:

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{6} \text{ s}^{-1}$$

تحسب كثافة الطاقة وكثافة القدرة من المعادلتين (7.16) و (7.17):

$$\frac{E}{A} = \frac{1}{2} \rho a^2 g = 0.5 * 1025 * 1^2 * 9.81 = 5027.6 \text{ J/m}^2$$

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho a^2 f g = 0.5 * 1025 * 1^2 * \frac{1}{6} * 9.81 = 837.9 \text{ W/m}^2$$

الفصل الثامن

8

طاقة باطن الأرض

الفصل الثامن طاقة باطن الأرض (Geothermal energy)

1.8 مقدمة عامة:

عرف الإنسان طاقة باطن الأرض أو الطاقة الجيوحرارية منذ آلاف السنين و استخدمها لتلبية بعض أغراضه بشكل يتلاءم ومستوى المعرفة التي يمتلكها الإنسان في ذلك الوقت، وقد عرف الإنسان فوائد الاستشفاء في ينابيع المياه الحارة منذ فترات بعيدة ومازالت هذه الينابيع موجودة وقيد الاستعمال لأغراض السياحة والاستشفاء في أنحاء مختلفة من العالم، فلو نظرنا إلى العالم العربي لوجدنا توفر هذه الينابيع في فلسطين والعراق ومصر والجزائر. أما خارج العالم العربي فهناك أوربا حيث توجد الينابيع الحارة في هنغاريا والجييك وإيطاليا، وفي شمال أوربا توجد في أيسلندا بشكل مكثف، حيث اعتمد سكانها الأصليون على البخار الصادر من الأرض للطبخ والتدفئة ويستخدمون الماء الحار للاستحمام والغسل والمعالجة.

أدى التطور العلمي والتكنولوجي الهائل الذي شهده العالم بالإضافة إلى ازدياد حاجات الإنسان للطاقة إلى بناء أول محطة لتوليد الطاقة الكهربائية تستخدم البخار المندفَع من باطن الأرض لتدوير التوربينات في إيطاليا عام 1904. أما الآن فهناك 12 دولة تستخدم طاقة باطن الأرض لتوليد الكهرباء ويبين الجدول (1.8) كميات الطاقة الكهربائية المتولدة في مختلف دول العالم. أما الدول التي استخدمت الطاقة الحرارية مباشرة لأغراض التدفئة والزراعة فهي اليابان ، والصين ، و جورجيا ، وداغستان. وتعتبر هنغاريا وأيسلندا هما الدولتان الرئيسيتان اللتان استغلتا طاقة باطن الأرض في مجال الاستخدام المباشر ، بالإضافة إلى أنه تم تطوير تقنيات متقدمة في فرنسا وبعض الدول الأوروبية الأخرى⁽³⁷⁾.

وعلى الرغم من إن بعض المختصين يعتقدون أن الطاقة الحرارية الباطنية غير متجددة بسبب فتور بعض الينابيع وتوقف نفثها للبخار، فأنها تشترك مع مصادر الطاقة التقليدية بكونها نظيفة وطبيعية وتختلف عن المصادر التقليدية مثل النفط والغاز.

2.8 أصل طاقة باطن الأرض:

تتركب الأرض من أربعة أقسام رئيسية كما مبين في الشكل (1.8) وهي:

الدولة	الانتاج عام MW بـ 1995	الانتاج عام 2000 بـ MW	الدولة	الانتاج عام MW بـ 1995	الانتاج عام 2000 بـ MW
الولايات المتحدة	2817	2228	كينيا	45	45
الفلبين	1227	1909	كواتيمالا	33	33
ايطاليا	632	785	الصين	29	29
المكسيك	753	755	روسيا	11	23
اندونيسيا	310	590	تركيا	20	120
اليابان	414	547	البرتغال	5	16
نيوزلندا	186	437	إثيوبيا	0	8
أيسلندا	50	170	فرنسا	4	4
السلفادور	105	161	تايلندا	0.3	0.3
كوستاريكا	55	142	استراليا	0.2	0.2
نيكاراغوا	70	70	الارجنتين	0.7	0
الإنتاج الكلي بـ MW				6833	7974

جدول (1.8) مصادر الطاقة الباطنية الأرضية في مختلف أنحاء العالم المستثمرة حتى عام 2000.

1. القشرة اليابسة (Lithosphere):

تنقسم هذه الطبقة إلى جزأين هما القشرة (Crust) والوشاح الخارجي (Upper mantle)، يتراوح سمك اليابسة من 0-100 km، وتشكل ما يقارب 1.5% من حجم الأرض وترتفع درجة الحرارة فيها إلى حوالي 1000 °C، والجدير بالذكر أن مصادر الطاقة الأرضية الحرارية التي نتكلم عنها تقع في طبقة القشرة وتزداد درجة حرارة القشرة بمعدل 30°C لكل كيلومتر عمقا، أي إذا كانت درجة الحرارة على السطح 20 °C فإنه على عمق 1 km ستكون الحرارة 50 °C ولهذا فإن الحرارة تنتقل من الطبقات الداخلية إلى الطبقات الخارجية نتيجة هذا الانحدار الحراري.

2. الوشاح الداخلي (Inner mantle):

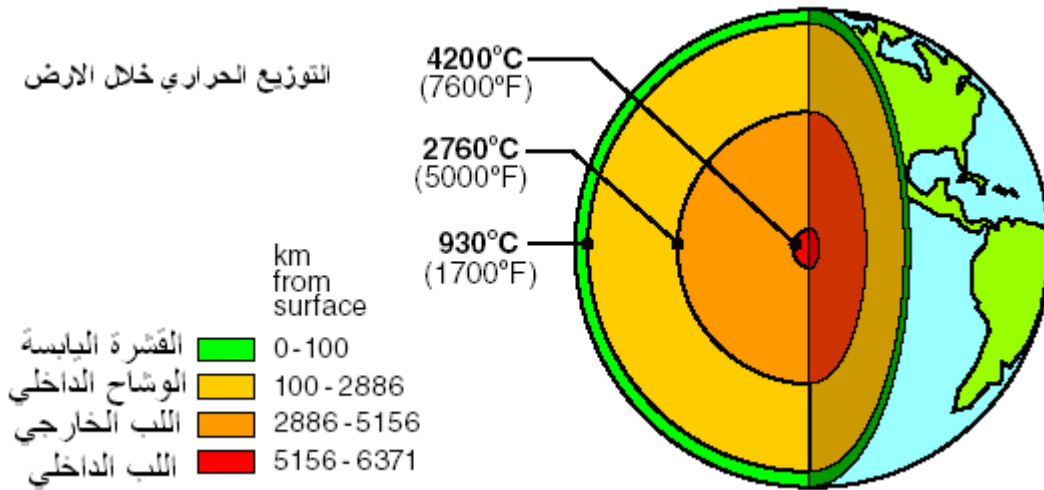
ويقع تحت القشرة اليابسة ويمتد إلى عمق 2886 km تقريبا ويشكل 82.3% من مجمل حجم الأرض، وتصل درجة الحرارة فيه إلى 2760 °C.

3. اللب الخارجي (Outer core):

ويقع تحت الوشاح ويمتد إلى عمق 5156 km .

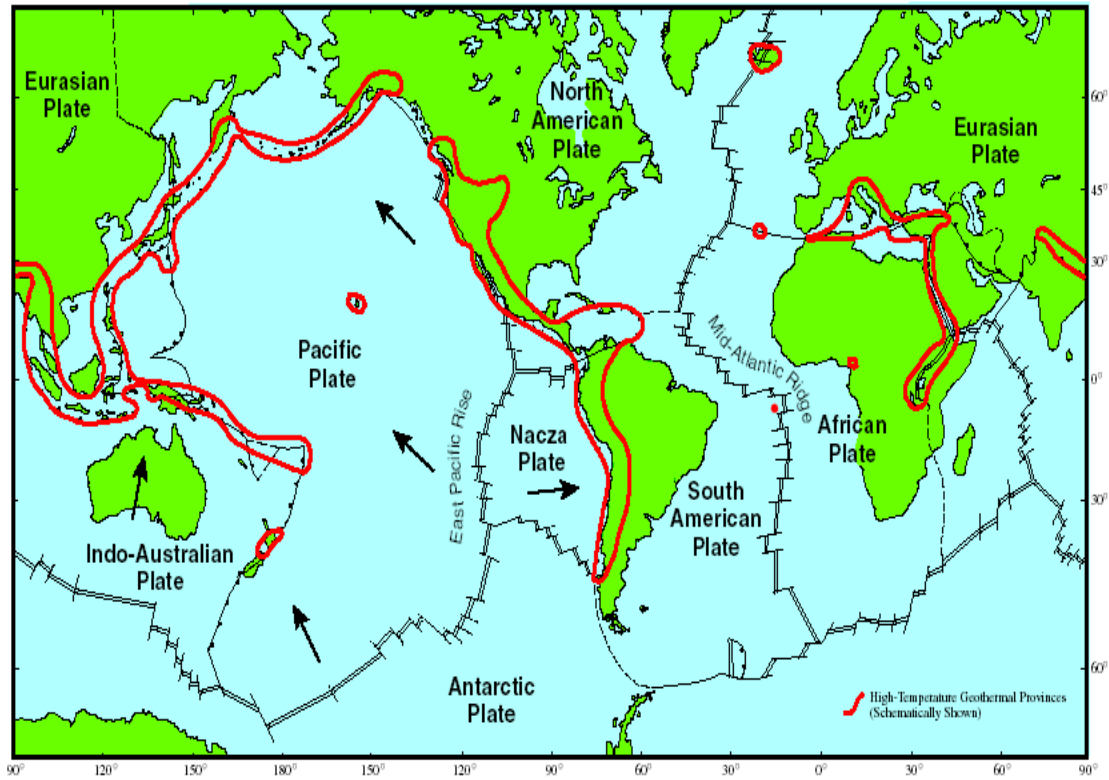
4. اللب الداخلي (Inner ore):

ويشغل القسم المتبقي من الأرض وتصل درجة الحرارة فيه إلى 4200°C . ويبلغ حجم اللب الداخلي مع الخارجي ما يقارب 16.2% من مجمل حجم الأرض. ويعزى سبب وجود الحرارة في داخل الأرض إلى عوامل الجاذبية وحركة الأرض وإلى قوى الاحتكاك بين الطبقات الأرضية التي تتحرك بعضها فوق بعض، وبشكل أكبر إلى الإشعاعات الصادرة من المواد المشعة، ولهذا السبب يسمى بعض العلماء طاقة باطن الأرض بالطاقة النووية الاحفورية (Fossil Nuclear Energy).



شكل (8.1) التوزيع الحراري خلال طبقات الأرض

تتكون القشرة الأرضية من مجموعة من الصفائح التي تتحرك بعضها فوق بعض كما مبين في الشكل (2.8) ، ويؤدي احتكاك هذه الصفائح إلى توليد كميات حرارة كبيرة ترفع من درجة حرارة الصخور وخزانات المياه، كما أنها تساعد على عمل شقوق تتيح للأبخرة والمياه الساخنة من الوصول إلى سطح الأرض والواقع أننا لو نظرنا إلى المناطق التي تتوفر فيها حقول البخار والمياه الساخنة لوجدناها قريبة من أماكن هذه الصدعات. تسبب الزلازل والحركات الرضوية إلى اقتراب المادة السائلة المسمى بالماكما (Magma) من السطح كما في الشكل (3.8)، وتبرد هذه المادة السائلة (A) متحولة إلى ما يعرف بالصخور



شكل (2.8) الصفائح الأرضية

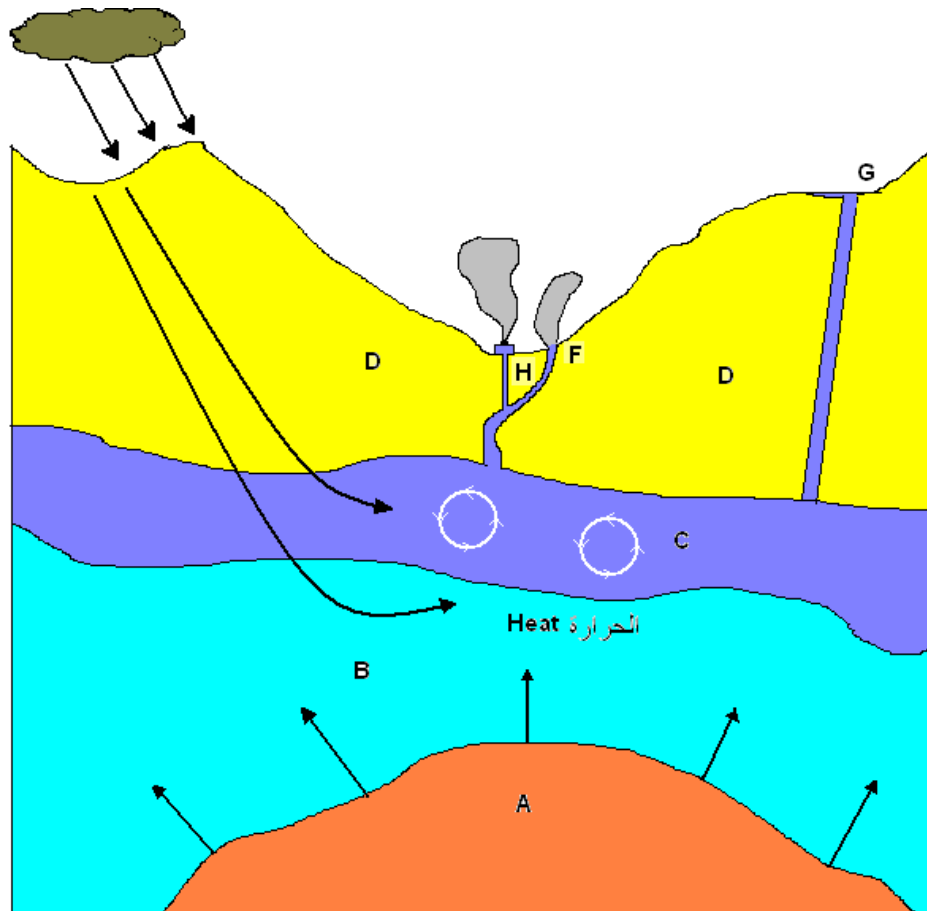
النارية (Igneous rock) (B)، إذ تنتقل الحرارة عبر طبقة الصخور البركانية إلى الأعلى حيث الطبقة المسامية (C) والتي تسمح للماء بالنفاذ خلالها للوصول إلى طبقة الصخور البركانية الحارة، وعند ملامسة الماء للصخور الحارة فإنه يسخن وتقل كثافته ويرتفع مرة أخرى حيث يحل محله الماء البارد ذو الكثافة العالية حيث يسخن بدوره وهكذا تستمر العملية بحيث يسخن كل الماء الجوفي الموجود في باطن الأرض، وتتواجد فوق الطبقة المسامية طبقة من الصخور غير المسامية (D)، تشكل عازلاً حرارياً يقلل من تسرب الحرارة من خزان المياه في باطن الأرض، وعند وجود الشقوق (F) فإن الماء الحار سوف يتسرب إلى السطح مشكلاً ما يسمى بالعيون الحارة (Hot spring) أو السخانات (Geysers) (G). وتمثل النقطة (H) موقع المحطة الجيوحرارية.

3.8 أنظمة الطاقة الجيوحرارية:

توجد هناك العديد من المنظومات لاستغلال طاقة باطن الأرض وتختلف اعتماداً على نوعية الطاقة المتوفرة في باطن الأرض ومن هذه المنظومات:

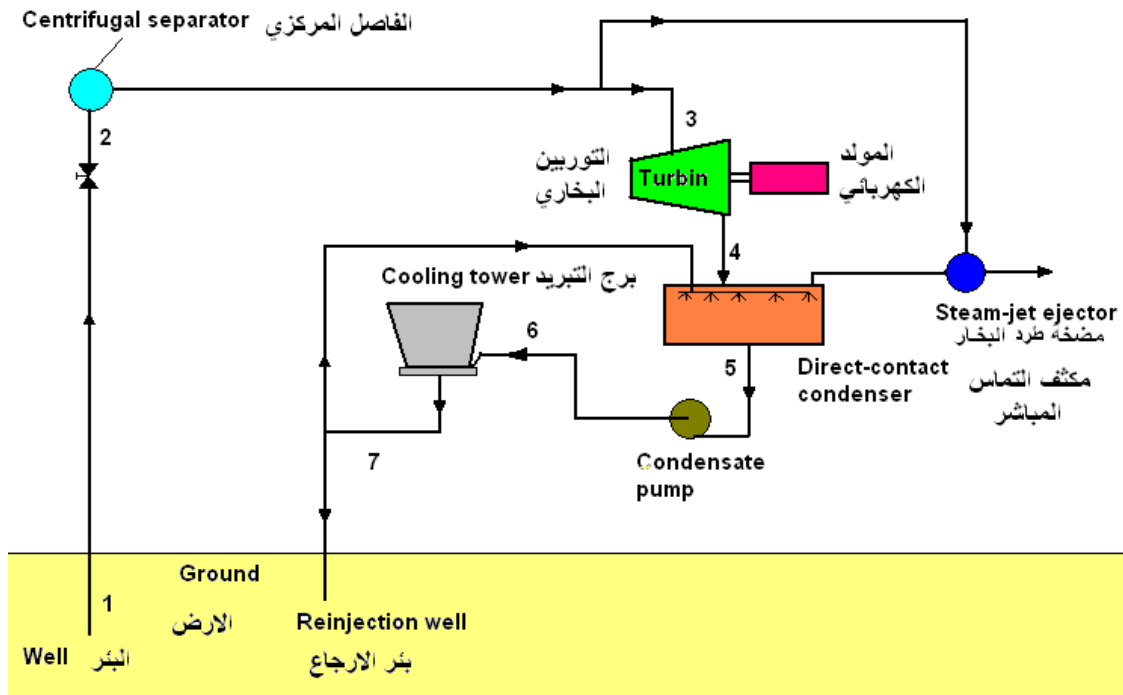
1.3.8 أنظمة البخار الجاف (Dry steam system):

تنشأ هذه الأنظمة في الأماكن التي يتوفر البخار غير المختلط بالسوائل، حيث تكون الطبيعة الغالبة لهذه الأنظمة وجود خزانات من أبخرة الماء على درجات حرارة عالية تصل إلى 205°C و ضغط مقداره 8 bar. ويتم الاستفادة مباشرة من البخار المتدفق لتشغيل التوربينات ومنه توليد الكهرباء. وتعتبر هذه الأنظمة الأكثر ملائمة لأغراض توليد الطاقة الكهربائية إذ إن المطلوب لا يتعدى القيام بعمليات الحفر لإتاحة المجال أمام البخار ليندفع إلى السطح ومن ثم نقل هذا البخار إلى التوربينات لتشغيلها وتوليد الكهرباء وتكون الأقل كلفة من بقية الأنظمة، إضافة إلى أن محطات البخار الجاف هي الأقل تأثراً بالمشاكل المصاحبة لمحطات القدرة الجيوحرارية من بقية الأنظمة مثل وجود الغازات الآكلة والرمل والملوثات البيئية.



شكل (3.8) رسم تخطيطي لحقل حراري جوفي

يبين الشكل (4.8) إحدى المنظومات المستخدمة لهذا الغرض حيث يخرج البخار المشبع الجاف من البئر (النقطة 1) بدرجة حرارة تصل إلى 205°C ، يتعرض البخار المشبع الى عملية خنق خلال الصمام فيتحول إلى بخار محمص (النقطة 2)، يمر البخار المحمص الى الفاصل المركزي (Centrifugal separator) لإزالة المواد العالقة مثل الرمل وفي نفس الوقت يتعرض إلى عملية خنق لزيادة درجة تحميصه، يدخل البخار إلى التوربين عند النقطة (3) ليتمدد داخله عاملاً على تدوير التوربين المربوط إلى مولد كهربائي لتوليد الطاقة الكهربائية، يخرج البخار الرطب من التوربين عند النقطة (4) ليدخل إلى المكثف والذي يكون من نوع مكثف التماس المباشر (Direct contact condenser) لكونه أكثر كفاءة وأقل كلفة ليختلط مع الماء البارد القادم من أبراج التبريد (النقطة 7) لينتج ماء مشبع (النقطة 5) والذي يسخن إلى أبراج التبريد (Cooling tower) و القسم الأعظم من الماء الخارج من أبراج التبريد يسخن إلى المكثف والقسم الآخر يعاد مرة أخرى إلى الأرض.



الشكل (4.8) مخطط بسيط لمحطة جيولوجية تعمل بنظام البخار الجاف

ان الكفاءة الاعتيادية لهذه الدورات لا تزيد عن 30% رغم إنها تستخدم بخارا بدرجات حرارة عالية ووجود الغازات الغير قابلة للتكثيف مع البخار تقلل من كفاءة المحطة ويؤثر على جدواها الاقتصادية وعلى تلوث البيئة لذا يتم التخلص منها و من الغازات الآكلة من المكثف عن

طريق مضخة طرد البخار (Steam jet ejector). ومحطات البخار الجاف من أكثر المحطات استخداما وكفاءة ومن المحطات العاملة بهذا النظام في العالم هي، محطة توليد الكهرباء في Larderello في إيطاليا ومحطة Matsukawa في اليابان وقسم من المحطات العاملة في الولايات المتحدة الأمريكية وإيسلندا، بالإضافة الى وجود بعض الحقول في كلا من إندونيسيا والمكسيك.

2.3.8 أنظمة الماء الساخن (Hot water system):

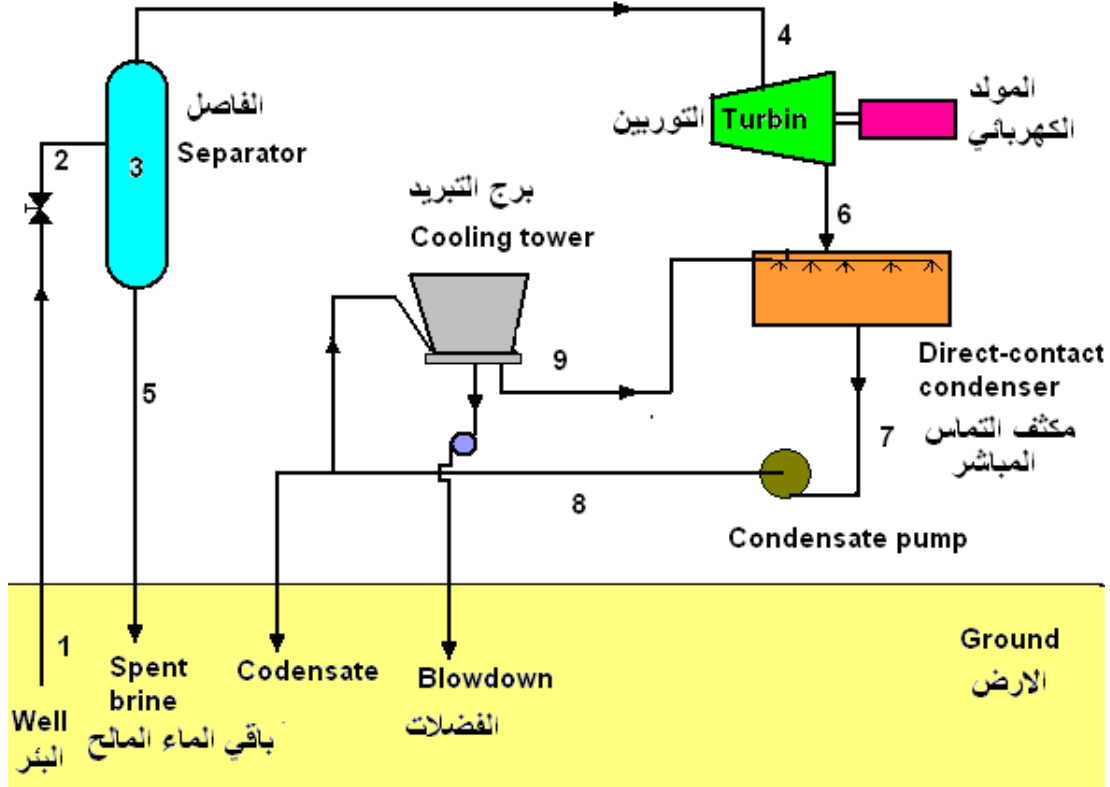
تنشأ هذه الأنظمة في المناطق التي يتوفر فيها ماء ساخن بدرجات حرارة عالية تتراوح بين (150-350 °C) و تحت ضغوط عالية أيضا. عند السماح لهذا الماء الحار بالتدفق إلى السطح عند حفر بئر مثلا ويتعرض إلى الضغط الجوي الذي هو أقل من الضغط المؤثر عليه في باطن الأرض، فإن الماء سيتبخر بحكم انخفاض الضغط ويتحول قسم منه إلى بخار يمكن دفعه في أنابيب وتوصيله إلى التوربينات لتشغيلها وتوليد الطاقة الكهربائية، أما الماء الباقي فيمكن استخدامه لأغراض أخرى كالتدفئة والتبريد والتجفيف وغيرها. وقد يتواجد الماء في مناطق أخرى ولكن بدرجات حرارة أقل من درجة الغليان وتحت ضغوط منخفضة نسبيا بحيث إنها تبقى في حالة السيولة حتى حين وصولها إلى السطح.

تتميز منظومات الماء الساخن باحتواء الماء المستخرج من باطن الأرض على كميات كبيرة من المواد العالقة و الرمل التي تتراوح نسبتها ما بين (3000-25000 ppm) ونسبة الملوحة فيها تتراوح ما بين (4-10%) وتكون عادة مشبعة بغاز الميثان، توجد مجموعة من الأنظمة لاستغلال الماء الساخن المتوفر في مناطق مختلفة من العالم منها:

أ. نظام البخار الوميضي (The flashed-steam system):

يستخدم هذا النظام في المواقع التي تحتوي على ماء ساخن بدرجات حرارة عالية كما في الشكل (5.8)، حيث يصل الماء من البئر (النقطة 1) إلى السطح (النقطة 2) بعد إن يتم خنقه (بثبوت الانثالبية) خلال الصمام حيث يتحول الماء الساخن إلى بخار رطب كما يلاحظ من مخطط (T-s) في المثال (2.8). يخنق البخار مرة أخرى ويتم فصل الماء عن البخار في الفاصل (Separator) (النقطة 3) لحماية التوربين من قطرات الماء التي تسبب تآكل و تعرية الريش، ينقل البخار المشبع إلى التوربين بواسطة أنابيب (النقطة 4) ويعاد الماء المالح (Spent brine) مرة أخرى إلى الأرض (النقطة 5)، يتمدد البخار خلال التوربين ليتم تدوير التوربين

وتوليد الطاقة الكهربائية ويخرج البخار الرطب من التوربين (النقطة 6) ليدخل إلى مكثف التماس المباشر حيث يختلط بالماء القادم من أبراج التبريد (النقطة 9) لينتج ماء مشبع (النقطة 7) والذي يضخ قسم منه إلى أبراج التبريد (Cooling tower)، والقسم الآخر يعاد مرة أخرى إلى الأرض. تستخدم هذه المنظومات في الوقت الحاضر في اليابان وإيطاليا ونيوزلندا.

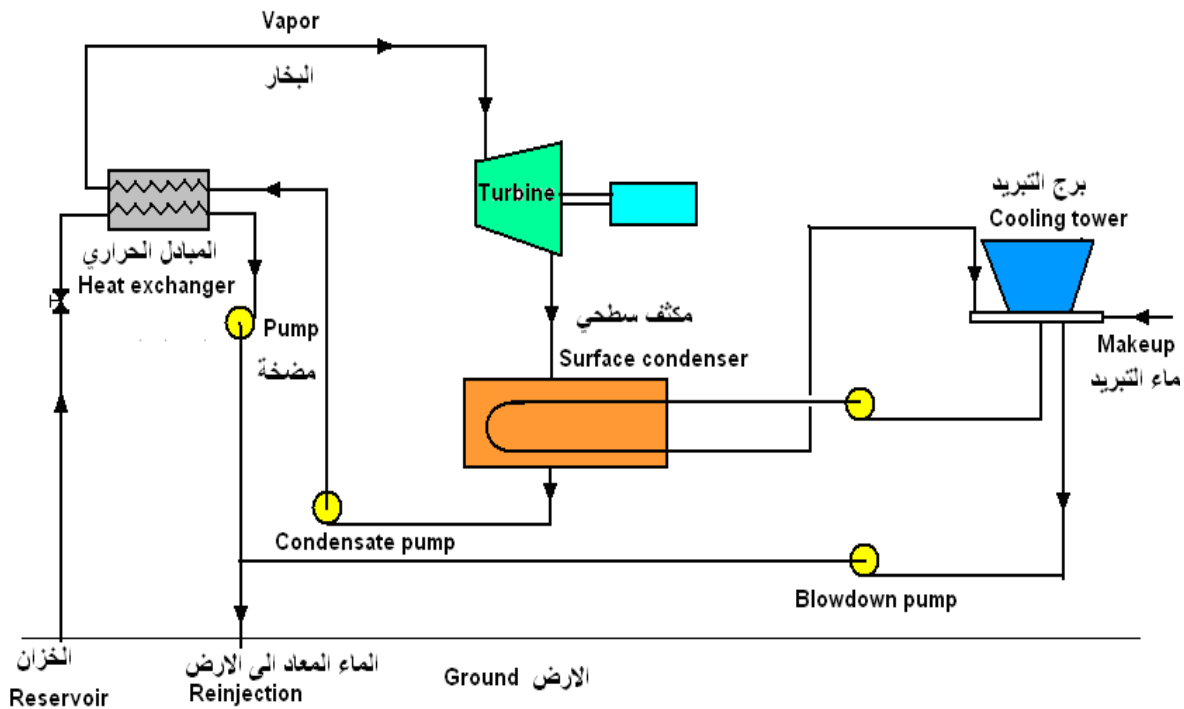


شكل (5.8) نظام البخار الوميضي

ب. المحطات الوميضية الثنائية Double flashed-steam system:

ان كمية الماء المالح الذي يعاد حقنه مرة أخرى إلى الأرض في النقطة (5) في النظام الوميضي (شكل 5.8) كبيرة وتمتلك طاقة حرارية عالية حيث إن نسبة انثالية الماء المالح إلى البخار المستخدم لتدوير الريش تبلغ 1.31، لذا اقترحت أفكار عديدة لتقليل الخسائر الحرارية في هذه المنظومة، ومن هذه الأفكار هي المحطات الوميضية الثنائية كما في الشكل (6.8)، حيث ان الماء الخارج من الفاصل (النقطة 5) يمرر على فاصل ثاني ذو ضغط اقل حيث تجري عملية خنق أخرى لتحويل قسم من هذا الماء المالح الساخن إلى بخار يخلط مع البخار الخارج من التوربين الأول لتشغيل توربين آخر (او تشغيل المرحلة الثانية من التوربين الأول)، ويحقن

النظام بالمقارنة مع بقية الأنظمة، إلا إن كلفتها الأولية عالية جداً، ويتميز هذا النظام بخلوه من مشاكل التآكل والترسبات في التوربين والمكثف وغيرها من أجزاء المحطة الأخرى، وتوجد مثل المحطات روسيا والولايات المتحدة الأمريكية.



الشكل (7.8) المحطات الجيوحرارية المزدوجة

3.3.8 أنظمة الصخور الجافة الساخنة (Hot dry rock system):

تتميز هذه الأنظمة بكونها لا تحتوي على مياه أو سوائل تسهل من عملية نقل الحرارة من باطن الأرض إلى سطحها. إن هذا المصدر هو الأكثر شيوعا ويشكل حوالي 99% من مجموع مصادر الطاقة الجيوحرارية على سطح الأرض، إذ إن درجة الحرارة تزداد مع العمق وقد تصل إلى عدة مئات من الدرجات المئوية على أعماق لا تزيد على كيلومترات قليلة، وحيث إن تكنولوجيا الحفر قد شهدت الكثير من التطوير بفعل حفر آبار النفط مما يشكل أرضية واسعة لاستغلال هذا المصدر المهم. إن أحد العوائق الرئيسية في وجه استغلال هذا المصدر هو كيفية نقل الحرارة من باطن الأرض إلى سطحها والفكرة الرئيسية هي ضخ كميات من المياه إلى باطن الأرض بحيث تصل إلى هذه الصخور الساخنة فتسخن و تتبخر ثم تعود إلى السطح بخارا يستعمل في توليد الطاقة الكهربائية. ومن المعروف إن الصخور موصلات رديئة للحرارة لذا فإن انتقال الحرارة من الطبقات الصخرية الحرة إلى الطبقات الأبرد بطيء نسبيا، ومن أجل

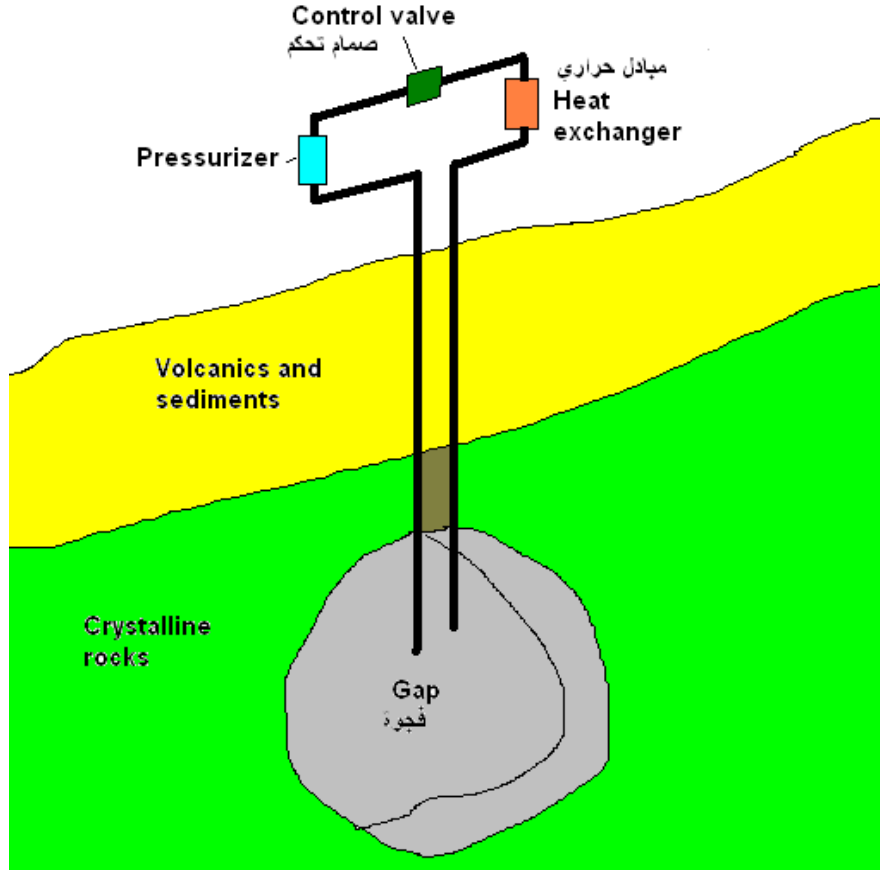
الحصول على أكبر قدر ممكن من الحرارة يستلزم الأمر استخراج الحرارة من مساحة كبيرة من الصخور للتعويض عن الموصلية الحرارية الرديئة لها ويستلزم بدوره ضخ كميات كبيرة من الماء لتغطية السطح الواسع من الصخور، وبعد استخراج المياه إلى السطح واستعمالها في الأغراض المطلوبة يعاد ضخها مرة أخرى إلى الأرض. وتوجد عدة أفكار لاستخلاص الحرارة، فإذا كانت طبقة الصخور الحارة مسامية فإن الأمر يستلزم حفر عدد من الآبار لاخترق الطبقة العليا الصلبة غير النفاذة ويستخدم قسم من هذه الآبار لضخ المياه الباردة إلى باطن الأرض والأخرى لاستلام المياه الحرة من باطن الأرض ونقلها إلى المحطة لغرض توليد الطاقة الكهربائية، ومن أهم المشاكل التي تواجهنا عندما تكون الصخور الحارة مسامية هي مشكلة تسرب المياه إلى باطن الأرض وعدم إمكانية سحبها إلى سطح الأرض، أما حين تكون طبقة الصخور الحارة من النوع اللا- مسامي فلا بد من زيادة مساحة سطح انتقال الحرارة لن صلابة الصخور وعدم مساميتها تمنع الماء من التسرب عبر مساحات كبيرة وتوجد هناك طريقتان لإنتاج مساحات كبيرة وأحداث فجوة في باطن الأرض، هما:

أ. حقن الماء المضغوط:

ويستعمل في هذه الطريقة ماء تحت ضغوط عالية جدا يحقن في باطن الأرض لأحداث شقوق فيها، وتستعمل هذه الطريقة في استخراج النفط حيث تضخ المياه لزيادة مسامية الطبقات التي تحتوي على النفط الخام مما يؤدي إلى زيادة في كميات النفط المستخرجة.

ب. الانفجار النووي:

و تتضمن الطريقة إجراء تفجيرات نووية تحت سطح الأرض داخل منطقة الصخور اللامسامية لتفتيتها و أحداث الشقوق والتصدعات التي تسمح للماء بالتسرب إلى مساحات كبيرة، ومن المعلوم ان اللجوء إلى مثل هذا الأسلوب محفوف بالمخاطر الناتجة عن التلوث النووي المحتمل، فالإشعاعات النووية قد تنفذ إلى سطح الأرض وتعرض حياة الكائنات الحية بما فيها الإنسان إلى الخطر، كذلك فان المياه المحقونة إلى باطن الأرض لاستخراج الحرارة ستحمل إشعاعات نووية وتنقلها إلى السطح مرة أخرى، ورغم إن المياه المستعملة سيعاد ضخها مرة أخرى إلى باطن الأرض إلا إن هذا لا يمنع من إمكان حدوث تسربات للإشعاعات النووية، والجدير بالذكر إن التفجير النووي سيشكل في الوقت نفسه مصدرا حراريا يضاف إلى المصدر الحراري الصخري. و يبين الشكل (8.8) مخطط للفجوة المتكونة في باطن الأرض.



شكل (8.8) الفجوة المتكونة نتيجة الانفجار النووي

4.3.8 أنظمة الطاقة الجيوحرارية-الاحفورية المشتركة:

توجد هناك منظومتين للاستفادة من القدرات المشتركة للطاقة الجيوحرارية و الطاقة التقليدية هما:

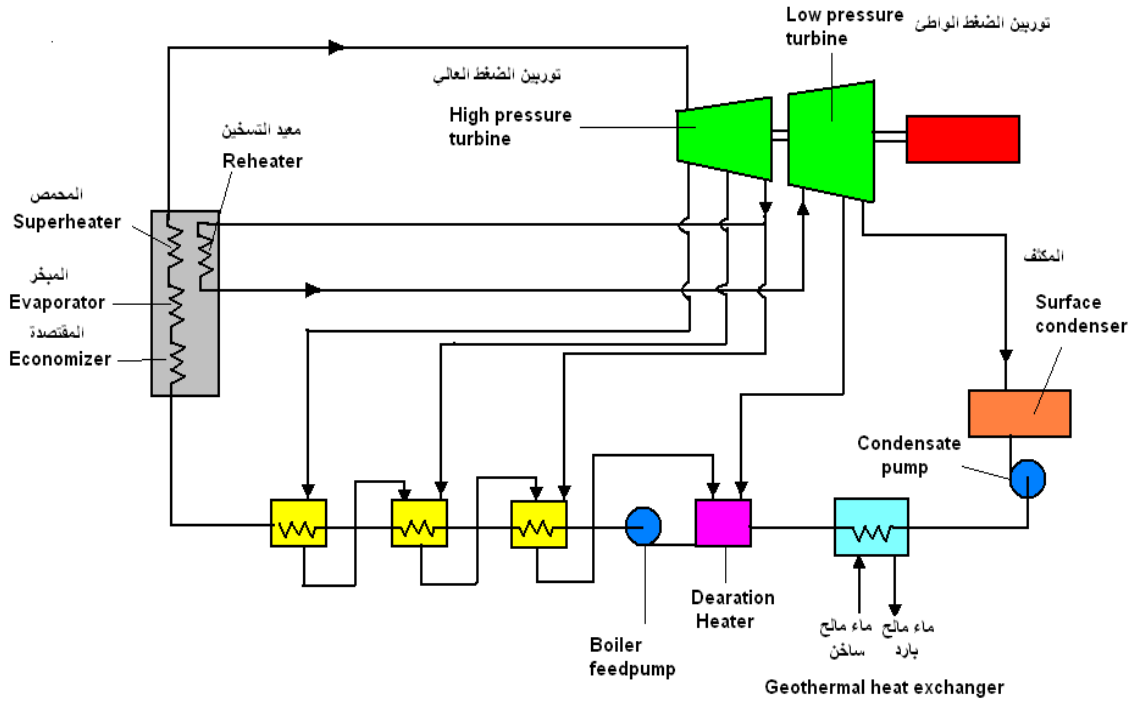
أ. منظومة التسخين الابتدائي بالطاقة الجيوحرارية المشتركة:

ويتم في هذه الأنظمة استخدام طاقة باطن الأرض لتسخين ماء التغذية قبل دخوله إلى المسخنات الابتدائية كما في الشكل (9.8) حيث يستخدم الماء الساخن المسحوب من باطن الأرض لرفع درجة حرارة الماء البارد الخارج من المكثفات بدلا من استنزاف كميات البخار الرطب من التوربينات لتسخين مياه التغذية كما هو الحال في المحطات التقليدية العاملة و هذا الأجراء يزيد من كفاء المحطة الإجمالية.

ب. منظومة التسخين المحمص بالطاقة الاحفورية المشتركة:

يتم في هذه الأنظمة تحميص البخار الناتج من الفاصل في منظومات السائل الساخن لزيادة درجة حرارته بواسطة مصدر تقليدي، يبين الشكل (10.8) مخطط لإحدى المنظومات

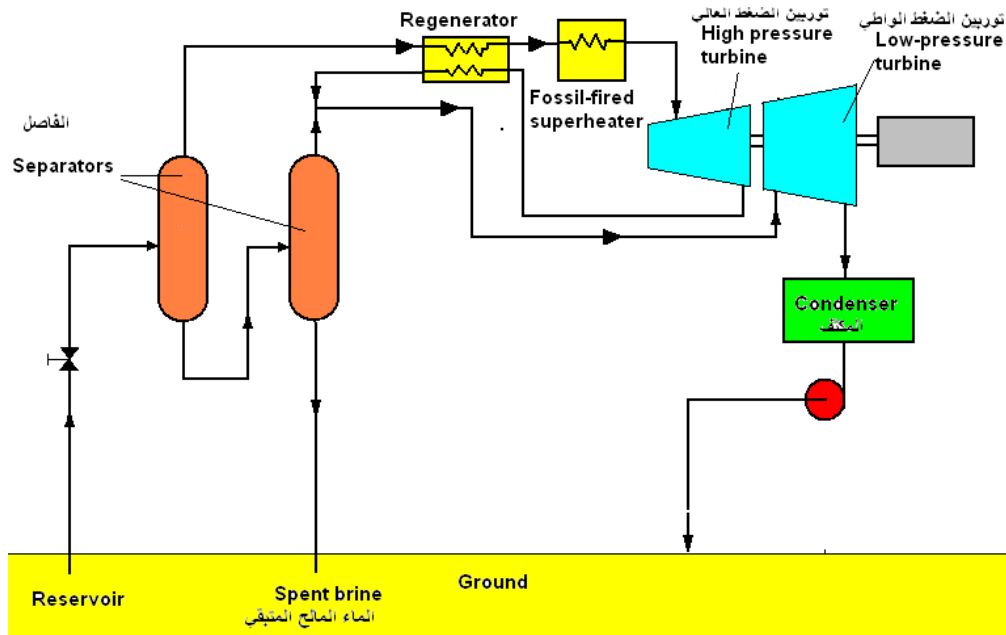
الثنائية الومضوية، حيث إن البخار الخارج من الفاصل الأول يدخل إلى مسخن مجدّد (Regenerator) لرفع درجة حرارته بواسطة البخار الخارج من توربين الضغط العالي، ويسخن هذا البخار مرة أخرى في المحمص الذي يستخدم الوقود التقليدي ومن ثم يسمح له بالتمدد داخل توربين الضغط العالي، إما البخار الخارج من الفاصل الثاني فيختلط بالبخار الخارج من المسخن المجدّد ومن ثم يدخل إلى توربين الضغط الواطئ، ويحقن الماء المالح الخارج من الفاصل الثاني إلى باطن الأرض مرة أخرى.



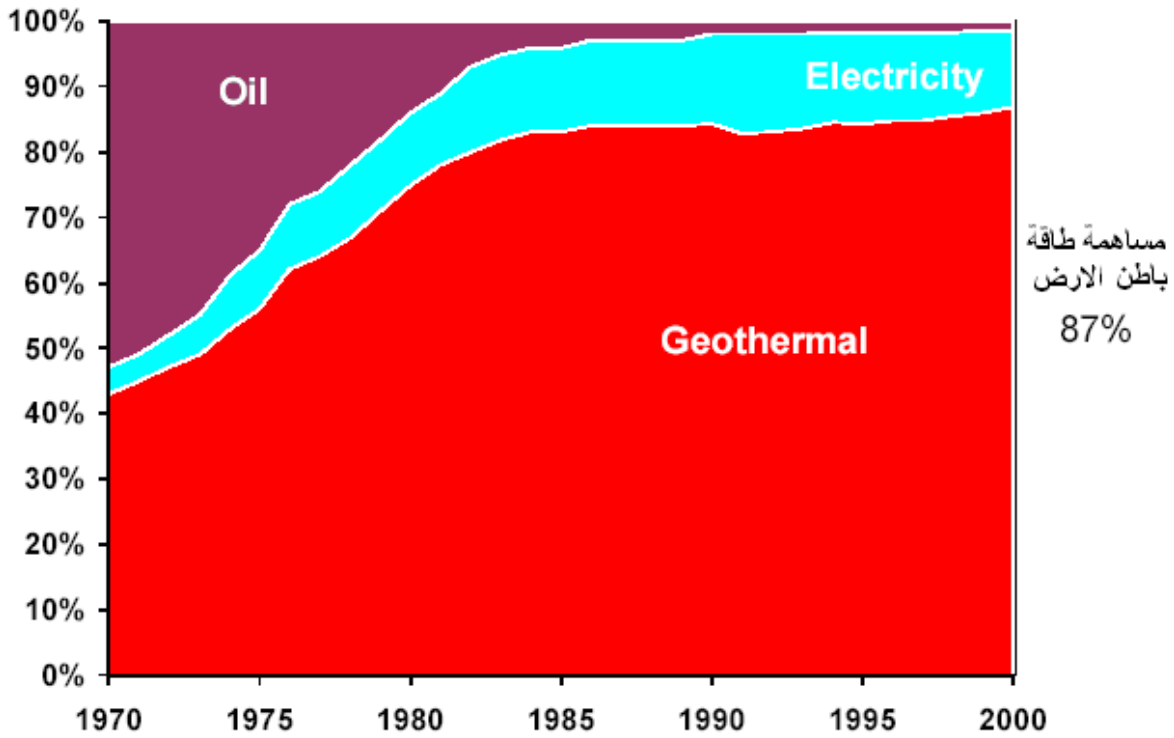
شكل (9.8) مخطط لمحطة تقليدية يتم فيها استخدام الطاقة الجيوحرارية للتسخين الابتدائي

4.8 الاستخدام المباشر للطاقة الجيوحرارية:

لا يقتصر استخدام الطاقة الجيوحرارية على توليد الكهرباء فقط فهناك العديد من الدول التي سخرت هذه الطاقة في مجالات أخرى مثل التدفئة والزراعة والطبخ والاستخدامات الطبية ففي الولايات المتحدة نجد إن استخدام الطاقة الجيوحرارية للتدفئة في مقدمة الاستخدامات المباشرة أما في أيسلندا مايقارب 87% من سكانها يعتمدون على الطاقة الجيوحرارية في تدفئة منازلهم كما يلاحظ من الشكل (11.8)، وفي نيوزلندا تدخل مصادر البخار الساخن في صناعة الورق وتجفيف الأخشاب و التدفئة وفي هنغاريا فإنها تستعمل في تدفئة المنازل والمصانع وفي صناعة السيراميك والورق وغيرها.



شكل (10.8) مخطط لمحطة وميضية جيولوجارية يتم فيها استخدام الطاقة التقليدية لتحميم البخار.



شكل (11.8) نسب مساهمة الطاقات المختلفة في تدفئة البيوت في آيسلندا

5.8 المشاكل التشغيلية والبيئية:

تتصدر المشاكل التشغيلية في الغازات التي تخرج مع البخار أو الماء الساخن والذي تكون محملة بالغازات المضرة لمكونات المحطة مثل التوربين والمكثف إضافة إلى حبيبات الرمل والحصى الصغيرة التي تلعب دورا كبيرا في حدوث التعرية في ريش التوربين البخاري ولذلك تحتاج هذه المحطات إلى منظومة معالجة مياه فعالة جدا للوصول بالماء الداخل الى المحطة إلى المعايير المعتمدة بالمحطات التقليدية، إما التلوث فينحصر بجانبين، الجانب الأول هو التلوث الحراري الناتج عن طرح كميات كبيرة من الحرارة إلى المحيط الخارجي والجانب الثاني فيتعلق بالغازات الغير قابلة للتكثف والتي تتراوح نسبتها (0.2-4%) وتعتمد نسبة هذه الغازات على خصائص المنطقة المحفور فيها البئر وعلى عمر البئر أيضا وتتكون هذه الغازات بصورة رئيسية من ثاني اوكسيد الكربون (بنسبة 80%) بالإضافة إلى كميات محدودة من الميثان والهيدروجين والامونيا وكبريتيد الهيدروجين (H_2S) والمعروف إن لغاز كبريتيد الهيدروجين رائحة كريهة وإذا تجمع بكميات كبيرة فقد يشكل خطرا على حياة الكائنات الحية. والشكل (12.8) صورة فوتوغرافية لإحدى المحطات العاملة في الولايات المتحدة الأمريكية موضحا عليها وحدة إزالة كبريتيد الهيدروجين.



الشكل (12.8) صورة فوتوغرافية لإحدى المحطات العاملة في الولايات المتحدة الأمريكية

امثلة محلولة

مثال(1.8):

محطة جيوحرارية تعمل بنظام البخار الجاف ذات قدرة 100 MW كما في الشكل (4.8) تستخدم بخار مشبع بضغط مقداره 28 bar، تجري عملية خنق لتحميص البخار ليدخل البخار إلى التوربين بضغط مقداره 5.6 bar ويخرج بضغط مقداره 0.14 bar ، تبلغ كفاءة التوربين البوليتروبية 0.82 وكفاءة المولد الكهربائي 0.9 ودرجة حرارة الماء الخارج من أبراج التبريد 21°C ، احسب التدفق الكتلي للبخار المتدفق خلال التوربين والتدفق الكتلي لماء التبريد وكفاءة المحطة.

الحل:

نرسم مخطط (T-s) للدورة كما في الشكل أدناه و باستخدام جداول البخار نجد خواص البخار عند النقطة (1) حيث يخرج البخار من البئر وهو بخار مشبع:

$$h_1 = h_g \text{ (at } P = 28 \text{ bar)} = 2804.0 \text{ kJ/kg.K}$$

و لان الأجراء هو أجراء خنق فأن الانتالبية سوف تكون متساوية، لذلك:

$$h_1 = h_3 \text{ (at } P = 5.6 \text{ bar)} = 2804 \text{ kJ/kg.K}$$

تتوفر لدينا خاصيتان عند النقطة (3) هما الانتالبية والضغط لذلك من جداول البخار (جدول 3) نحصل على الخواص الباقية:

$$T_3 = 180^{\circ}\text{C} ,$$

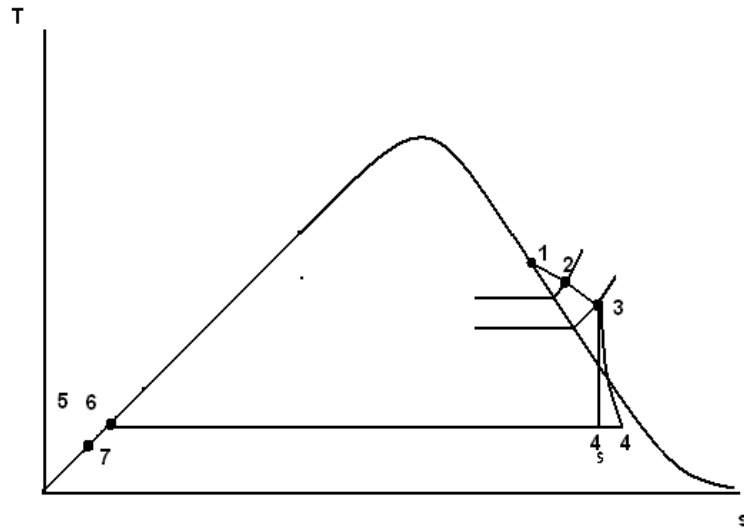
$$s_3 = 6.9067 \text{ kJ/kg} ,$$

$$v_3 = 0.368 \text{ m}^3/\text{kg}$$

للحصول على مواصفات البخار الخارج من التوربين نفرض إن البخار يتمدد ايزنتروبيا خلال التوربين، لذا:

$$s_3 = s_{4,s} = [s_f + x * s_{fg}]_{at.p=0.14.MPa}$$

$$6.9067 = [0.7366 + x * 7.2959] \Rightarrow x = 0.8457)$$



المثال (1.8)

وتمثل هذه نسبة الجفاف عند النقطة 4,s ،

$$h_{4,s} = (h_f + x * h_{fg})_{P=0.014} = 219.99 + 0.8456 * 2376.9 = 2230 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Isentropic work of turbine} = h_3 - h_4 = 2804 - 2230 = 574 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Actual turbine work} = \eta * \text{Isentropic work of turbine}$$

$$= 0.84 * 574 = 470.68 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Actual turbine work} = h_3 - h_4$$

$$\therefore h_4 = h_3 - \text{Actual turbine work} = 2804 - 470.68 = 2333.32 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{5,6} = h_{f(\text{at } 0.14 \text{ bar})} = 219.99 \text{ kJ/kg}$$

$$h_7 = h_{f(\text{at } 21^\circ \text{C})} = 88.14 \text{ kJ/kg}$$

يمكن حساب القدرة من المعادلة الآتية:

$$\text{Power} = \dot{m}_s * W_t * \eta_{gen}$$

$$\text{Turbine steam flow } (\dot{m}_s) = \frac{100 * 10^6}{0.9 * 470.68} = 236.06 \text{ kg/sec}$$

$$\text{Turbine volume flow rate} = \dot{m}_s * v_3$$

$$= 236.06 * 0.3689 = 86.59 \text{ m}^3/\text{sec}$$

لحساب كمية الماء اللازمة للتبريد المكثف، نجري عملية موازنة حرارية على المكثف :

$$\dot{m}_7 * (h_5 - h_7) = \dot{m}_4 * (h_4 - h_5) \Rightarrow \dot{m}_7 = \frac{h_4 - h_5}{h_5 - h_7} * \dot{m}_4$$

$$\therefore \dot{m}_7 = \frac{2333.32 - 219.99}{219.99 - 88.14} * 236.06 = 2783.638 \text{ kg/sec}$$

إن كمية الحرارة الداخلة إلى المحطة هي الفرق في الانثالبية بين النقطتين 6 و 1 :

$$\text{Heat added} = h_1 - h_6 = 2804 - 219.99 = 2584.01 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta = \frac{0.9 * 470.68}{2784.01} = 16.39\%$$

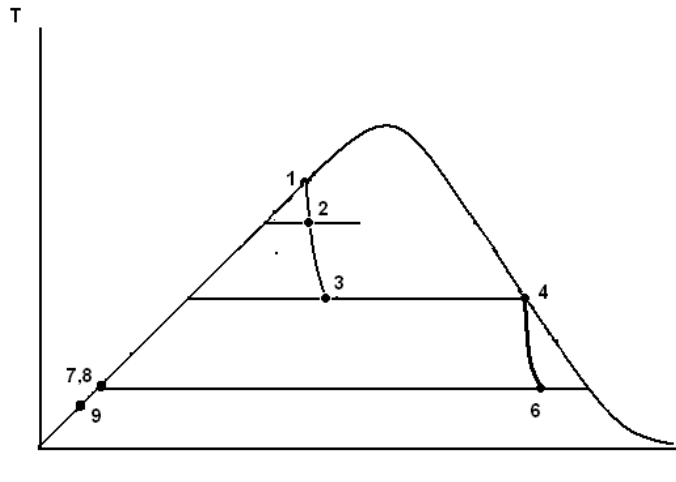
مثال (2.8):

محطة جيوحرارية تعمل بنظام البخار الوميضي كما في الشكل (9.5) تستخدم ماء ساخن مسحوب من باطن الأرض درجة حرارته 238°C وضغطه 11 bar، إما ضغط الفاصل فيقدر بـ 7bar، احسب:

1. معدل التدفق الكتلي للماء المسحوب من البئر وكمية الماء المالح الراجعة إليه لكل وحدة كتلة من البخار الداخل الى التوربين.
2. نسبة انثالبية الماء المالح الى البخار.

الحل:

نرسم في البداية مخطط (T-s) للمحطة كما في الشكل ادناه.حيث ان:



مثال 2.8

$$h_1 \approx h_f \text{ (at } T=238 \text{ }^\circ\text{C)} = 1027.82 \text{ kJ/kg}$$

و لان الأجراء بين 1-3 إجراء خنق فيكون:

$$h_3 = h_1 = (h_f + x_3 * h_{fg})_{at.7.bar} = 697.22 + x_3 * 2066.3 = 1027.82$$

$$\therefore x_3 = 0.16$$

1. معدل التدفق الكتلي للماء المسحوب من البئر لكل وحدة كتلة من البخار الداخل الى التوربين.

$$= \frac{1}{x_3} = 6.21.$$

كمية الماء المالح الراجعة إلى البئر لكل وحدة كتلة من البخار الداخل الى التوربين.

$$= 6.21 - 1 = 5.21$$

2. نسبة انثالبية الماء المالح إلى البخار.

$$= 5.21 * \frac{h_5}{h_4} = 5.21 * \frac{298.54}{1187.2} = 1.31$$

و لنظام البخار الوميضي مساوي كثيرة منها: معدل الاستهلاك الكبير للبخار كما يلاحظ من المثال أعلاه، والذي يؤدي إلى ترسبات كثيرة على أنابيب ومعدات المحطة، إضافة إلى معدل التآكل المرتفع لأنابيب ومكتفات المحطة.

الفصل التاسع

9

مصادر اخرى للطاقة

الفصل التاسع

مصادر اخرى للطاقة

1.9 طاقة الكتلة الإحيائية Biomass energy:

تعتبر طاقة الكتلة الإحيائية من مصادر الطاقة التي كانت شائعة في القرون الماضية خاصة قبل ظهور النفط وتعتمد على استعمال مواد الكتلة الإحيائية biomass التي تنتج وتجمع محليا (مثل مخلفات المحاصيل، والخشب، وروث الحيوانات... الخ) وعلى الرغم من أن معظم دول العالم قد انتقلت بسرعة من استعمال هذا المصدر إلى استعمالات الطاقة الأحفورية منذ بدء استعمال الفحم في القرن التاسع عشر وانتشار استعمال النفط في القرن العشرين، إلا أن الطاقة المتجددة التقليدية القائمة على الكتلة الإحيائية لا تزال مصدرا وحيدا للطاقة لأكثر من 2 مليار نسمة يعيش معظمهم في جنوب آسيا وفي أواسط إفريقيا وبالتالي فإنها تشكل 10% من المصادر الأولية للطاقة العالمية.

تعد النباتات من أهم وسائل استغلال الطاقة الشمسية، إذ تقوم النباتات بتحويل حوالي 10^{21} J والتي تشكل 5% من الطاقة الشمسية الساقطة إلى الأرض بواسطة عملية البناء الضوئي التي تؤدي إلى إنتاج الطعام لكل الكائنات الحية على سطح الأرض بشكل مباشر وغير مباشر، فهناك أحياء تتغذى على النباتات فقط، وهناك إحياء تتغذى على الحيوانات، كما إن هناك أحياء تتغذى على النباتات والحيوانات معا مثل الإنسان، غير إن الحيوانات التي يتغذى عليها الإنسان والحيوانات المفترسة تتغذى على النباتات بدورها مما يعني إن النباتات هي المصدر الرئيسي لغذاء الأحياء على الأرض، ولا ينتهي دور النباتات عند هذا الحد، إذ يتحول جزء من النباتات المستهلكة إلى بروتينيات و دهون داخل أجسام الحيوانات وتتحول إلى فضلات بعد عملية الهضم تحوي مواد عضوية يمكن حرقها أو تحويلها إلى وقود غازي أو سائل.

1.1.9 استخدام الخشب كوقود:

يستعمل الخشب كوقود عند حرقه مباشرة أو بعد تحويله إلى فحم الخشب أو الغاز، وتشير آخر الإحصائيات إلى إن نصف سكان العالم لا يزالون يستخدمون طاقة الكتلة الإحيائية

وخاصة حطب الوقود والفحم، كما بينت الإحصائيات الدور والتأثير الهامين لاستعمال الخشب ومخلفاته في ميزان الطاقة إذ إن أكثر من مليون ونصف طن من الحطب التي يتم جمعها سنويا تستعمل كوقود عن طريق حرقها مباشرة في مواقع خاصة لطبخ الطعام و إنتاج الخبز وينتشر استعمال هذه المواقع التقليدية في البلدان النامية خاصة كما يستخدم بكميات كبيرة في الاستهلاك الصناعي. ففي البرازيل مثلا تستخدم مصانع الفولاذ أكثر من مليوني طن من الفحم النباتي سنويا.

وتولد أكثر أنواع المواقع أو الأفران التقليدية أثناء احتراق الحطب فيها غازات مؤذية وملوثة داخل المساكن، تسبب مشاكل صحية جدية كما أكدت دراسات منظمة الصحة العالمية ان الساكنين في مثل هذه البيوت يستنشقون هواء ملوث بطريقة تفوق أكثر من عشرين مرة بقدرة الحدود المسموح بها التي تعتبرها منظمة الصحة العالمية مؤذية ولا تتجه النيران كلية إلى أناء الطبخ، بل يضيع أغلبها باتجاهات تحددها الرياح وبذلك يكون مردود هذه المواقع ضعيفا يتراوح ما بين 5-15% من جملة الطاقة المستخرجة من الحطب⁽³⁹⁾.

إن الاستخدام المفرط لهذه الغابات قد يؤدي إلى انقراضها مستقبلا، والحل الأمثل هو زراعة أشجار سريعة النمو مثل الحور والصفصاف فعند زراعتها بكثافة 5000 إلى 20000 شجرة بالهكتار يمكن الحصول على إنتاج مقداره 10 أطنان بالهكتار في السنة ولمدة تقارب الثلاثين عاما. يتميز الخشب عند احتراقه بما يلي:

1. سهولة الاتقاد.
 2. عدم الاحتراق بسهولة عندما يكون على شكل قطع كبيرة بسبب تكوين طبقات من الرماد شبه المنصهر فوق سطح القطعة الأمر الذي يمنع نفاذ الهواء.
 3. انعدام الدخان تقريبا في حالة الاشتعال التام.
- كما يمكن إنتاج فحم الخشب (Wood charcoal) والمستخدم كوقود لأغراض متعددة بواسطة عملية التقطير الاتلافي حيث توجد ثلاثة طرق هي:
- أ. الطريقة القديمة وتتم بحرق أكداش كبيرة من الخشب ضمن كمية محدودة من الهواء وتكون الحصيلة فحم الخشب حوالي 20% وتفقد الغازات الناتجة والمواد العرضية إلى الجو.
 - ب. التقطير الاتلافي عند درجات الحرارة الواطنة في أوعية خاصة عند 350°C كحد أقصى،
- حصيلة الفحم المتكون تتراوح بين 35-38% بالإضافة إلى 12-17% مواد متطايرة و 2-

5% رماد ويتميز فحم الخشب بقابلية عالية على امتصاص الأبخرة ويستعمل كوقود وكمادة مختزلة لخام الحديد.

ت. التقطير الاتلافي عند درجات الحرارة العالية من $1000-1200^{\circ}\text{C}$ لانتاج غاز المدن town gas حيث تكون حصة الفحم حوالي 20% والغاز $850\text{ m}^3/\text{ton}$ وذو قيمة حرارية عالية.

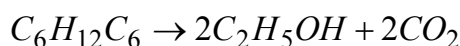
كما توفر عمليات تقليم الأشجار وقطع الأغصان اليابسة كميات كبيرة من مخلفات الغابات وبدل ان تهمل هذه المخلفات حتى في الدول التي تستورد الطاقة فإنه يمكن جمعها وتجفيفها واستخدامها في المناطق القروية. فالنمسا تنتج 1250 MW من مخلفات الغابات لغرض التدفئة المنزلية ومنظومات التدفئة وتنتج بريطانيا حوالي 2.3 MW من مخلفات الغابات ويمكن لمناطق الدول النامية، التي تستخدم الفحم النباتي كوقود إن تنتج الفحم النباتي في نفس مناطق المخلفات دون الحاجة إلى دفع مصاريف النقل. ولقد تم تطوير معدات ميكانيكية في أوروبا وأمريكا لانتاج قطع صغيرة من الخشب يمكن تجفيفها وحملها بسهولة⁽³⁹⁾.

2.1.9 محاصيل الطاقة:

وهي تلك النباتات التي يمكن تحويل منتجاتها إلى وقود يستخدم كمصدر للطاقة، ومن هذه النباتات المهمة في هذا المجال، قصب السكر والذرة والبطاطا والنباتات التي تنتج منها الزيوت مثل القطن والسمسم ولا يعني هذا إن النباتات الأخرى لا تصلح كمحاصيل للطاقة، غير إن إمكانية الاستفادة منها أقل من التي ذكرنا. تتطلب زراعة أي محصول مهما كان نوعه توفير البيئة الملائمة من ارض خصبة ومياه ودرجات حرارية مناسبة وتتوفر هذه الخصائص الطبيعية الملائمة لانتاج محاصيل الطاقة في المناطق المدارية، شمال وجنوب خط الاستواء.

تعتبر البرازيل من الدول الرائدة في مجال إنتاج الكحول الايثيلي (الايثانول) من قصب السكر أو الذرة، ففي البرازيل تم إنتاج أكثر من 100 بليون لتر بالاعتماد على قصب السكر وهناك أكثر من أربعة ملايين سيارة تعمل في البرازيل بالايثانول الصافي، وتسعة ملايين سيارة تعمل بخليط من الغازولين والايثانول.

يتم إنتاج الكحول من السكر الموجود في النباتات بواسطة عملية التخمير (Fermentation) وهي عبارة عن عملية بيولوجية لاهوائية يتم فيها تحويل السكر إلى كحول بفعل كائنات حية صغيرة كالموجودة في الخميرة وفق المعادلة الآتية:



والكحول الناتج في المعادلة أعلاه هو الايثانول والذي يمكن استخدامه في مكائن الاحتراق الداخلي ، أما مباشرة او على شكل خليط يسمى الكازوهول وهي كلمة مشتقة من كلمتي الغاز (Gas) والكحول (Alcohol) والذي يحتوي على 20% من الايثانول وعلى الرغم من ارتفاع سعر الكحول المنتج حيث يبلغ سعره ثلاثة اضعاف سعر الغازولين إلا إن له بعض المميزات الجيدة التي تؤهله للاستخدام في محركات الاحتراق الداخلي واحد هذه المميزات هي ارتفاع الرقم الاوكتاني فيه وبذلك يمكن رفع نسبة انضغاط المحرك فتزداد قدرته ولا يحتاج إلى إضافة رابع اثيل الرصاص والذي يؤثر على البيئة.

3.1.9 الغاز الحيوي (Bio gas):

الغاز الحيوي هو خليط من عدة غازات أهمها غاز الميثان (CH_4) والذي تصل نسبته إلى 70%، وينتج بفعل التحلل غير الهوائي للمواد العضوية الموجودة في المخلفات الحيوية للحيوانات والنباتات والمنتجات الثانوية من أصل حيواني أو نباتي وبقايا المواد العضوية في الأطعمة أو مياه الصرف الصحي أو مياه المعالجة الصناعية وتمثل المواد الكربوهيدراتية مع قليل من الدهون والبروتينات المصدر الرئيسي للحصول على الغاز الحيوي، ويعد الموز أكثر المواد إنتاجا للغاز الحيوي وأسرعها.

تحتوي الأعشاب و مخلفات النباتات والفضلات العضوية بكافة أنواعها (المنزلية والحيوانية) على طاقة كامنة كبيرة، حيث تحتوي الكثير من الفضلات وخاصة الحيوانية على عنصري الهيدروجين والكربون اللذين يعتبران العنصرين الرئيسيين في كافة أنواع الوقود المتعارف عليه، أما النتروجين فهو ما تحتاجه النباتات وتستخدم الفضلات الحيوانية كسماد عضوي في مناطق كثيرة رغم انتشار السماد الكيميائي بكثرة ورغم كون السماد الطبيعي ذو رائحة غير مقبولة.

تتفسخ الفضلات كلها بفعل العوامل الجوية (حرارة + رطوبة) و بتأثير البكتريا المختلفة معطية نواتج مختلفة تعتمد على ظروف عملية التفسخ، فإذا تركت تحت الشروط الجوية الاعتيادية تشكل عدد من الغازات التي تضيع هباء إضافة إلى بعض الأملاح والحوامض التي يؤدي بعضها دورا هاما كسماد عضوي. وتجري افضل التفسخات بمعزل عن الهواء اذ يتكون لدينا مزيج من الغازات أهمها غاز الميثان بنسبة تتراوح بين 60-65% وغاز ثاني اوكسيد

الكاربون بنسبة تتراوح بين 28-32% وعدد من الغازات الأخرى مثل كبريتيد الهيدروجين الذي يسبب الرائحة الكريهة للفضلات.

يمكن الحصول على الغاز الحيوي من كل الفضلات العضوية بخلطها مع الماء بنسبة 50% وتسخينها لدرجة حرارة معينة. إذ توضع هذه الفضلات في وعاء يدعى الهاضم ولا يسمح للأوكسجين بالتسرب إلى حيث توجد الفضلات، فتقوم بكتيريا لاهوائية خاصة تعرف ببكتيريا الميثان بتحليل الفضلات وتسمى هذه العملية بعملية التخمير ويكون الناتج غاز الميثان و أكاسيد الكربون وتختلف نسبة الميثان اعتمادا على نوع الفضلات المستخدمة.

تحدث عملية التحلل غير الهوائي في الطبيعة بصورة متعددة وبشكل بطيء وتدرجي في أعماق البحيرات والتجمعات المائية وأعماق التربة وأماكن جمع النفايات بواسطة عدد من الكائنات الحية الدقيقة وذلك على مرحلتين⁽⁴⁰⁾:

1. المرحلة الأولى:

تتطلب هذه المرحلة مجموعة من البكتيريا اللاهوائية – يطلق عليها المكونة للأحماض – التي تنتج الأحماض العضوية كناتج جانبي من عملية التحلل الأولي للمادة العضوية.

2. المرحلة الثانية:

تتطلب هذه المرحلة مجموعة أخرى من البكتيريا – تعرف بالبكتيريا المكونة للميثان – تقوم بتكسير الأحماض العضوية وإنتاج غاز الميثان كمنتج جانبي لتلك العملية. ينتج عن عملية التخمير إلى جانب غاز الميثان (60 – 80 %) غازات أخرى مثل ثاني أكسيد الكربون بنسبة (20 – 35 %) ونسب قليلة من غازات الأمونيا والهيدروجين والأوكسجين والنتروجين وكبريتيد الهيدروجين الذي يسبب بعض الإضرار في المحركات والأنابيب المستخدمة في منشأة الغاز الحيوي على الرغم من وجوده بتركيز لا يزيد عن 100 ملليجرام في المتر المكعب الواحد من الغاز.

إن درجة الحرارة المثلى لتحلل الفضلات تتراوح بين 35-37°C و لا يجوز إن تنخفض درجة الحرارة عن 30 °C ولا تزيد عن 40°C بأي حال من الأحوال لان زيادة او نقصان درجة الحرارة عن الحد المطلوب يؤدي إلى قتل البكتيريا المولدة لغاز الميثان وبالتالي إيقاف العملية كلها. ويمكن تنظيم الحرارة بشكل جيد باستخدام المجمعات الشمسية البسيطة، حيث

تسخن الخليط عبر مبادل حراري شتاء، أما صيفا فأن درجة حرارة الجو كافية لاستمرار العملية.

تمتاز منشآت الغاز الحيوي المقامة في المناطق الزراعية بأنها تنتج الغاز الحيوي بأقل التكاليف، لأنها تستخدم روث وفضلات الحيوانات إضافة إلى بقايا الحصاد والمخلفات النباتية. يؤدي تجانس المواد العضوية المستخدمة في إنتاج الغاز الحيوي إلى استقرار عملية التخمير وإنتاجية أفضل للغاز الحيوي. انتشرت منشآت معالجة المخلفات العضوية للحصول على الغاز الحيوي في الكثير من بلدان العالم، ففي عام 2004م كان في الصين وحدها 20 مليون منشأة صغيرة لتوليد الغاز الحيوي، وفي الهند حوالي 200 ألف منشأة، وفي البرازيل نحو عشرة آلاف منشأة، وفي ألمانيا 2400 منشأة. يعد الغاز الحيوي منافسا للغاز الطبيعي من حيث الخصائص الطبيعية وطاقة الاحتراق ويوضح الجدول (1.9) مقارنة بين الغاز الحيوي والغاز الطبيعي الحر أو المصاحب للنفط والذي عادة يكون مصاحب لعمليات إنتاج النفط.

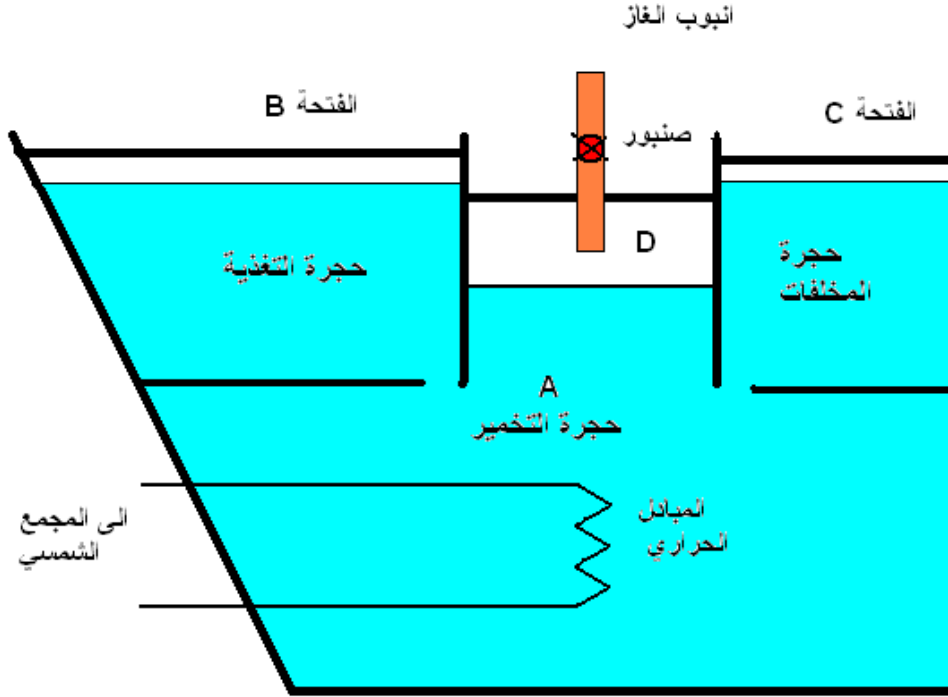
الغاز الحيوي	الغاز الطبيعي	الخاصية
80 – 60	90 -85	- غاز الميثان (% حجم)
35-20	1 – 0.5	- ثاني اوكسيد الكربون (% حجم)
500	1	- غاز النتروجين (جزء من المليون)
100	0	- غاز الامونيا (جزء من المليون)
6-1	10	- الطاقة المنتجة (كيلو واط- ساعة/م ²)
1.16	0	-الكثافة (كيلو غرام /م ³)

الجدول (1.9) مقارنة بين الغاز الحيوي والغاز الطبيعي

4.1.9 مكونات وحدة إنتاج الغاز الحيوي:

تتكون هذه الوحدة من أجزاء كثيرة ويفضل إن يكون موقعها قريبا من أماكن استهلاك الغاز الحيوي ويبين الشكل (1.9) جهاز بسيط لاستحصال الغاز الحيوي وهو الشكل الأكثر انتشارا في الصين، الجهاز عبارة عن حفرة جدرانها أسمنتية تسمى حجرة التخمير تمارس فيه الكائنات الدقيقة اللاهوائية عملها في تحليل المادة العضوية ولا يسمح بدخول الأوكسجين بأي حال من الأحوال، قسم داخلها بجدران بشكل يسمح باستعمالها كجهاز لتوليد الغاز الحيوي بشكل مستمر. يتجمع الغاز في هذه الحفرة ولا يتسرب منها إلا عن طريق الأنبوب المخصص، تبني حجرة

التخمير على شكل حفرة تحت سطح الأرض بشكل عمودي أو أفقي ومن ثم تبطن من الداخل بالخرسانة أو نوع من اللدائن لبلاستيكية المقاومة للتفاعل مع المواد الناتجة، ولضمان استمرارية تدفق الغاز، فإنه يجب إنشاء عدة حفر للتخمير في نفس المكان⁽⁴¹⁾.



الشكل (9.1) جهاز بسيط لأستحصال الغاز الحيوي

يلقى بالفضلات من الفتحة (B) المرتبطة بحجرة التغذية (Inlet chamber) والتي يكون مستوى قاعها أعلى من مستوى قاع حجرة التخمير وتتصل حجرة التغذية مباشرة بحجرة التخمير عن طريق فتحة أو أنبوب لتسهيل عملية التغذية. ويسخن الخليط عن طريق المبادل الحراري حيث تحدث عملية التخمير في المنطقة (A) وينطلق الغاز ليجتمع في المنطقة (D) وليؤخذ هناك عند الحاجة بواسطة صنبور، إما الفضلات فتؤخذ من الفتحة (C) المرتبطة بغرفة المخلفات (Outlet chamber) والتي تقع على الجانب الآخر من غرفة التخمير ومقابلة لغرفة التغذية وتحتاج عملية التخمير إلى فترة تتراوح بين (15-25) يوم وبعده تسحب كمية الفضلات المتفسخة وتضاف كمية أخرى من الفضلات. تحتوي المخلفات التي تبقى بعد إنتاج الغاز على النتروجين، وهو الذي تحتاجه النباتات، ولذلك فإن عملية الهضم اللاهوائي تنتج أسمدة للنباتات في المزارع وبهذا الشكل يمكن الاستفادة من مخلفات الحيوانات باعتبارها مصدر طاقة وأسمدة

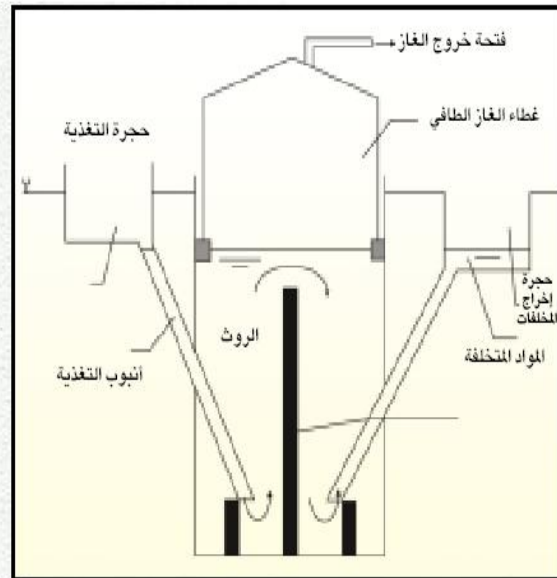
في نفس الوقت. تعتبر الأبقار من افضل الحيوانات في مجال إنتاج الغاز من المخلفات اذ ان مخلفات البقرة الواحدة في اليوم الواحد تنتج ما يساوي 1200 لتر من الغاز كما هو واضح في الجدول (2.9). اما بالنسبة للخنازير فهي تنتج 140 لتر بينما تنتج مخلفات الدجاجة الواحدة 9 لتر. إن من بين الصعوبات الفنية التي يفرضها غاز الميثان هي مسألة الخزن، إذ إن خزن الميثان يحتاج إلى تخفيض حجمه بصورة ملموسة عن طريق ضغطه إلى ما يعادل 200 bar مما يعني الحاجة إلى ضاغطات تحتاج إلى طاقة لذلك فان من الضروري استهلاك أكبر كمية من غاز الميثان الناتج حال خروجه من الهاضم مع الاحتفاظ بخزان مناسب لتلبية أية زيادة طارئة على الطاقة. وتوجد عدة تصاميم مستوحاة من التصميم الاساسي المشروح منها المخمر الهندي والصيني المبينة في الشكل (2.9).

الحيوان	حجم الغاز الناتج	نسبة الميثان في الغاز	القيمة الحرارية في لتر من الغاز / كيلو جول
بقرة	1200	59%	22
خنزير	140	68%	25
دجاجة	9	68%	25

جدول (2.9) انتاج الغاز من مخلفات الحيوانات (الإنتاج بالليتر من مخلفات الحيوان ليوم).



المخمر الصيني



المخمر الهندي

الشكل (2.9) تصاميم مختلفة من أنظمة إنتاج الغاز الحيوي (2).

5.1.9 شروط عملية التخمير:

يلزم لحدوث عملية التخمير وتكون الغاز الحيوي عدم وجود الهواء، كما يلزم إجراؤها تحت درجة حرارة ملائمة، ويتم ذلك في مفاعل الغاز الحيوي أو حوض التخمير، وتصنف درجة الحرارة في حجرة التخمير إلى مستويات ثلاثة، هي كالتالي:

1. **التخمير البارد:** وتكون درجة الحرارة فيه ما بين ($15 - 20^{\circ}\text{C}$) ، وتبقى المواد العضوية في حوض التخمير مدة طويلة نسبيا، وتنتج كميات قليلة من الغاز.
2. **التخمير الساخن:** وتكون درجة الحرارة فيه ما بين ($25 - 40^{\circ}\text{C}$) وتكون مدة تخمير المواد العضوية متوسطة، وتنتج كميات متوسطة من الغاز.
3. **التخمير الحار:** وتكون درجة الحرارة فيه ما بين ($40 - 65^{\circ}\text{C}$) ، وتقل مدة بقاء المواد العضوية في حوض التخمير، وتنتج كميات كبيرة من الغاز.

6.1.9 استخدامات الغاز الحيوي:

يستخدم الغاز الحيوي وما يتخلف منه في كثير من الاحتياجات اليومية خصوصا في المناطق النائية التي لم يصلها التيار الكهربائي، منها الآتي⁽⁴²⁾:

1. توليد الكهرباء:

يتم استخدام الغاز الحيوي لتشغيل الآلات الاحتراق الداخلي التي تقوم بإدارة المولدات الكهربائية، التي تنتج الطاقة الكهربائية اللازمة للمناطق النائية والمزارع البعيدة، ويمكن ربطها بالشبكة الوطنية التي تغذي المناطق الحضرية.

2. إنتاج السماد الزراعي:

يتخلف عن عملية إنتاج الغاز الحيوي بواسطة التخمير اللاهوائي : سماد يتمتع بمواصفات عالية وقيمة غذائية متميزة، حيث تتميز بدرجة تجانس عالية تسهل عملية استهلاكها من قبل النباتات، كما يتميز بخلو من الروائح (يتخلص من 80% منها)، إضافة إلى تميزه بعدم إقبال الحشرات عليه، وخلوه من الكربون والهيدروجين و الاوكسجين نتيجة لاستهلاكها من قبل الكائنات الدقيقة أثناء عملية التخمير واحتواءها على العناصر المهمة للنبات مثل البوتاسيوم والفسفور والنيتروجين، وخلوه من الديدان والبذور الضارة. يعمل هذا السماد دورا حيويا في نمو النباتات نتيجة لتحسن خواص التربة عند استخدامه، ومن الجدير بالذكر ان كمية السماد

المستخلصة من محطات توليد الغاز الحيوي تشكل 90% من المادة المستخدمة في حجرة التخمر.

3. وقود للسيارات:

نجح استخدام الغاز الحيوي - إلى حد ما - في تشغيل بعض وسائل النقل العام كما في المدن النمساوية مثلاً. وقد ساهم استخدامه في تشغيل وسائل النقل العامة بقسط كبير في حماية البيئة من التلوث، حيث يمنع تسرب غاز ثاني أكسيد الكربون إلى الجو مما يقلل من فرص الاحتباس الحراري، ولكن من معوقات استخدامه عدم توفر محطات لتعبئته.

4. تخليص البيئة من النفايات:

تعاني الكرة الأرضية من ملايين الأطنان من النفايات التي يخلقها الإنسان نتيجة لنشاطاته اليومية المختلفة التي تسبب المشاكل له ولبينته، ولذا تعد محطات إنتاج الغاز الحيوي من أهم الوسائل لتخليص البيئة من التلوث. كما يساهم التخلص الآمن من المخلفات عن طريق استخدامها لإنتاج الغاز الحيوي في حماية المياه الجوفية من التلوث، لأن هذه المخلفات إذا دفنت في مدافن أو تركت على سطح الأرض، فإنها تحلل وتنطلق منها الغازات السامة إلى الجو وتختلط الملوثات بالتربة، ومن ثم تتسرب مع مياه الأمطار إلى باطن الأرض وإلى الأنهار فتلوث المياه الجوفية ومياه الأنهار.

5. تقوية الاقتصاد الوطني:

يؤدي إنتاج الغاز الحيوي على تقوية الاقتصاد الوطني عن طريق التقليل من الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية المكلفة في كثير من الأحيان، إضافة إلى تأمينه فرص عمل في الأرياف مما يقلل من تكدس السكان في المدن، كما يمكن استخدام الغاز الحيوي لإغراض أخرى مثل تدفئة البيوت الزجاجية والتجفيف الزراعي أو الصناعي وغيرها.

7.1.9 معوقات استخدام الغاز الحيوي:

هناك الكثير من المشكلات التي لازالت قائمة تعيق استخدام الغاز الحيوي بشكل واسع، منها:

1. عدم إمكانية توزيع ونقل الغاز الحيوي عن طريق شبكة الغاز الطبيعي، حيث تحتاج إلى إيجاد تقنيات مناسبة وبأسعار مقبولة.

2. يتطلب استخدام الغاز الحيوي كوقود في وسائل النقل العام ان يكون منتشرًا ومتاحًا في كل مكان.

3. بالرغم من احتواء الغاز الحيوي على نسبة ضئيلة من كبريتيد الهيدروجين إلا انه يجب التخلص منه بسبب التأثير المدمر لهذا الغاز في الأجزاء الميكانيكية للمحركات والأدوات المستعملة.

4. يحتاج الغاز الحيوي إلى دراسات لتطوير وسائل إنتاجه للوصول إلى جودة الغاز الطبيعي، لكي يمكن ضخه في شبكة الغاز الطبيعي، كما يجب العمل على تسريع عمليات التحلل الحيوي للمواد العضوية والتحكم بها، وتزويد وحدة الإنتاج بتجهيزات للتحكم بعملية إضافة المواد العضوية، وتجهيزات خاصة لسحب المواد المتخلفة من عملية التحلل.

8.1.9 آفاق استخدام الغاز الحيوي في الوطن العربي:

يفتقر الريف العربي إلى تطبيق تقنية إنتاج الغاز الحيوي وللوصول إلى إستراتيجية تضمن توفير تقنية إنتاج الغاز الحيوي يجب الحصول على بعض المعلومات المهمة منها: أماكن تواجد هذه المخلفات العضوية وكميتها وصلاحياتها للمعالجة والجدوى الاقتصادية لها وتوفير الدعم المادي لإنشاء محطات توليد الغاز، وقبل كل شيء نشر الوعي الثقافي بأهمية المحافظة على البيئة من النفايات الملوثة التي يسبب تراكمها إضرارًا بيئية وصحية جسيمة. ومع ذلك فهناك محاولات لبعض البلدان العربية، حيث بدأت تنتشر محطات توليد الغاز في بعض القرى السورية بالتعاون مع برنامج الأمم المتحدة الإنمائي، كما تم إنشاء مشروع لتوليد الغاز الحيوي في الأردن وأمكن إنتاج طاقة كهربائية والحد من انبعاث 11 مليون متر مكعب من غاز ثاني أكسيد الكربون ويتوقع بعد توسيع هذا المشروع ان يحد من انبعاث 7.5 مليون متر مكعب من غاز الميثان.

2.9 الطاقة من النفايات:

ظهرت مشكلة النفايات مع توسع المدن وظهور الصناعات، فعندما كانت المدن صغيرة كان بالإمكان التخلص من كميات القمامة القليلة وذلك بذفها في العراء أو استعمالها كأسمدة للأرض، لكن الآن تتجمع كميات كبيرة من القمامة في مدن الدول الصناعية وبخاصة تلك التي تتمتع بمعدلات استهلاك عالية يرافقه تبذير في طريقة استعمال المواد المختلفة مسببة مشكلة

بيئية و صحية خطيرة، ففي بلد مثل بريطانيا يبلغ وزن نفاياتها 20 مليون طن في السنة، اما في الولايات المتحدة الأمريكية فان الرقم يرتفع الى 200 مليون طن.

وفي الواقع هناك بعض المدن التي بدأت باستغلال القمامة لتوفير جزء من متطلباتها من الطاقة، ففي مدينة فرانكفورت الألمانية يجرى إنتاج 7% من استهلاك المدينة من الكهرباء بواسطة حرق أكوام القمامة ونقل الطاقة الناتجة إلى محطات توليد الكهرباء، وتحصل مدينة امستردام على 6% من احتياجاتها من الطاقة الكهربائية من حرق القمامة، أما في مدينة فينا عاصمة النمسا فان القمامة تستعمل في إنتاج البخار للأغراض الصناعية.

وهناك طرق عديدة للحصول على الطاقة من القمامة والنفايات منها:

1. طريقة الحرق المباشر: تعتمد هذه الطريقة على بناء محارق خاصة لحرق النفايات واستخدام الحرارة الناتجة في تسخين المياه أو إنتاج البخار الذي يمكن استعماله بعد ذلك في تشغيل التوربينات وتوليد الطاقة الكهربائية.

2. طريقة الهدرجة: الهدرجة هي عملية اختزال كيميائي القصد منه استخراج الأوكسجين من المخلفات العضوية وبخاصة السليلوز الذي يشكل أحد العناصر الرئيسية في هذه المخلفات. يتكون السليلوز من الأوكسجين والكربون والهيدروجين وحين يتم التخلص من الأوكسجين يتبقى عنصري الكربون والهيدروجين وهما أساسيان في الوقود.

تتم عملية الهدرجة بوضع النفايات والمخلفات العضوية واحد العوامل المساعدة مثل كربونات الصوديوم في مفاعل خاص، ويجري بعد ذلك إدخال بخار الماء و أول أكسيد الكربون الى المفاعل تحت ضغط يتراوح بين 100-250 bar ودرجة حرارة تتراوح بين 240-380 °C . تستمر العملية حوالي الساعة وينتج عنها تحويل المخلفات الى زيوت نفطية. وينتج عن عملية الهدرجة أنتاج برميلين من زيوت المحروقات لكل طن من المخلفات.

3. التحلل الحراري Pyrolysis:

يتم في هذه الطريقة فصل المواد العضوية عن المواد غير العضوية أولا ومن ثم تجفف النفايات للتخلص من الماء الموجود فيها ومن ثم تقطع إلى قطع صغيرة وبعد ذلك تدخل النفايات العضوية الى وعاء مقفل ولا يسمح للهواء بالدخول إليه. تسخن النفايات إلى درجة حرارة تعادل 500 °C حيث تحلل المواد العضوية، وينتج عن هذه العملية برميل زيت لكل طن من النفايات،

إضافة إلى كمية من الفحم وبعض الغازات الأخرى ذات القيمة الحرارية الواطئة ويستعمل الفحم والغازات كوقود لتوليد الحرارة المطلوبة للتفاعل.

لا يجري في هذه العملية التخلص من الأوكسجين الموجود في النفايات ولذا فإن الزيت الناتج يحتوي على نسبة عالية من الأوكسجين تصل إلى حوالي الثلث ولهذا يكون الزيت الناتج ذو قيمة حرارية منخفضة. ومن مزايا عملية التحلل الحراري هذه إنها لا تؤدي إلى أي آثار بيئية ولذلك فأنها أكثر قبولا من طريقة الحرق المباشر.

3.9 الديزل الحيوي (Biodiesel):

يعد الديزل الحيوي من البدائل المقترحة بدلا عن الوقود التقليدي لأنه وقود نظيف ينتج من مصادر متجددة وتعود بدايات إنتاج الديزل الحيوي إلى عام 1895 عندما طور رودولف ديزل – مي وقود الديزل باسمه تقديرا لجهوده في إنتاج محرك وقود الديزل – محركا يعمل بزيوت الفول السوداني تم عرضه عام 1900 م في باريس إلا إن الموت داهم ديزل عام 1913 قبل أن يرى النور اختراعه.

بلغ إنتاج الديزل الحيوي في السنوات الأخيرة حوالي 30 بليون لتر / سنة، تم استهلاكها في وسائل النقل المختلفة ويتوقع زيادة الطلب على الديزل الحيوي في الأسواق الجديدة كالصين والهند والبرازيل، إذ سيتراوح استهلاك تلك الأسواق ما يزيد على 12% إلى 20% سنويا عن الإنتاج العالمي لعام 2007 م حتى عام 2020 م ويؤثر ذلك بالطبع على أسعار المواد الغذائية ويفسر هذا الارتفاع الحاد في أسعار المواد الغذائية في الوقت الحاضر.

1.3.9 إنتاج الديزل الحيوي Biodiesel production:

يتم إنتاج الديزل الحيوي – يعرف كيميائيا بأحادي الكيل أسترات الحامض الدهني - عبر سلسلة من التفاعلات الكيميائية المحفزة تحول زيوت الطعام (Vegetable oils) الطازجة أو المستخدمة في الطهي المنزلي، على حد سواء- مثل زيت الصويا- أو الشحوم الحيوانية (Animal fats)، أو عظام وأمعاء الحيوانات كالبحر والدجاج وقودا يمكن خلطه مع الديزل النفطي بنسب مختلفة لموائمته مع المحركات الموجودة في السوق، أو استخدامه مباشرة لتشغيل محركات السيارات و المولدات الكهربائية و الدراجات البخارية وأي آلة تعمل بالاحتراق الداخلي.

يتم إنتاج الديزل الحيوي بواسطة التفاعل الكيميائي المحفز بين الكحول من جهة والزيوت النباتية أو الشحوم الحيوانية من جهة أخرى في وجود عامل محفز. حيث يتم مزج الزيت النباتي أو الشحم الحيواني مع الكحول في وجود هيدروكسيد الصوديوم كمحفز. تتميز التفاعلات المحفزة لإنتاج الديزل الحيوي بما يلي:

1. انخفاض درجة الحرارة والضغط اللازمين لإجراء التفاعل.
2. ارتفاع نسبة معدل التحويل - حوالي 98% - مقابل تفاعلات جانبية قليلة جدا في وقت قصير.
3. تحول الزيت مباشرة إلى الديزل الحيوي دون المرور بمركبات وسيطة.
4. عدم تكون شوائب أثناء التفاعل.

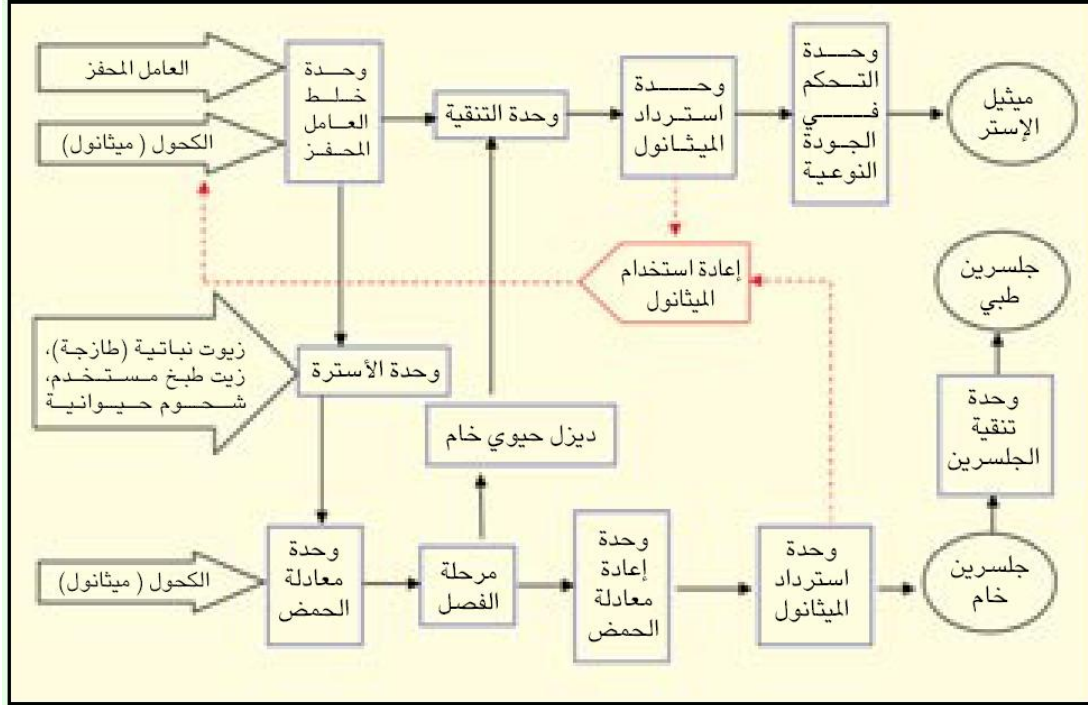
يعرف الديزل الحيوي المنتج من زيت الصويا بديزل الصويا (Soy diesel) أو صويات المثل (Methyl Soyate) وأحيانا يطلق عليها صويا مثل الاستر (Soy Methyyl Esters) كما يمكن إنتاج الديزل الحيوي من زيت الذرة، وزيت السمك، وزيت جوز الهند وغيرها من الزيوت النباتية أو الشحوم العائمة على سطح الفضلات أو النفايات الناتجة من محطات معالجة المياه. تتضمن خطوات إنتاج الديزل الحيوي كما في الشكل (3.9) الآتي:

1. خلط الكحول مع العامل المحفز: وفيها يتم إذابة العامل المحفز (هيدروكسيد الصوديوم NaOH أو الصودا الكاوية أو هيدروكسيد البوتاسيوم في الكحول (غالبا الميثانول CH_3OH وأحيانا الإيثانول CH_3CH_2OH).

2. التفاعل الكيميائي : ويتم بإضافة الزيت النباتي أو الحيواني إلى محلول الكحول والعامل المحفز في وعاء مغلق، عند الضغط الجوي ودرجة حرارة غليان الكحول المستخدم – تتراوح ما بين 64.6 م بالنسبة للميثانول و 78.3 للإيثانول لتقادي تطايره ، ثم يترك المزيج لمدة تتراوح ما بين ساعة إلى 8 ساعات، مع التأكد على زيادة كمية الكحول المستخدم في التفاعل لضمان التحول التام للزيوت المستخدمة إلى استر (Esters) وضرورة المراقبة المستمرة لكمية الماء والحمض الدهني المتكون في وعاء التفاعل لتقادي أي مشاكل قد تحدث أثناء تكون الصابون الذي يعيق عمليات فصل الكلسرين – المنتج الثانوي- من عملية إنتاج الديزل الحيوي.

3. الفصل: ويتم بترك وعاء التفاعل دون تحريك لفترة من الزمن حتى تنفصل طبقتي الكلسرين و الديزل الحيوي عن بعضهما بفعل الجاذبية الأرضية، حيث تعلو طبقة من الكلسرين طبقة الديزل الحيوي، لأنها اقل كثافة كما يمكن تسريع عملية الفصل باستخدام جهاز الطرد المركزي.

يدخل كلا من الكلسرين و الديزل الحيوي (مثل الاستر) المفصولين عن بعضهما البعض الى وحدات تنقية لإنتاج الكلسرين الطبي و الديزل الحيوي النقي على التوالي.



الشكل (3.9) عملية إنتاج الديزل الحيوي

4. إزالة الكحول الفائض من الكلسرين: ويتم بالتبخير أوميضي (Flash evaporation)، أو بالتقطير (Distillation) لإعادة استخدامه مرة أخرى. كما إن بعض أنظمة الإنتاج تتم فيها معادلة المخلوط قبل فصل المنتجين عن بعضهما البعض شريطة التأكد من خلوه من الماء المتراكم أثناء التفاعل قبل إعادة استخدامه.

5. معادلة الكلسرين: تتم بإزالة المحفز غير المستخدم وبعض الصابون والملح. علما إن إزالة الكحول والماء تنتج كلسرين خام تتراوح نقاوته ما بين 80 – 88 % ، وفي بعض عمليات الإنتاج المطورة يتم تقطير الكلسرين لتصل نقاوته إلى 99% أو تزيد لتباع في سوق الأدوية ومستحضرات التجميل.

6. غسل الديزل الحيوي: ويتم بواسطة ماء دافئ لإزالة ما قد علق به من العامل المحفز أو الصابون الناتج الثانوي، ثم يجفف وأخيرا يرسل للتخزين ولا تعد هذه الخطوة أحيانا مهمة، حيث يتم الحصول على سائل رائق يميل إلى الصفرة له لزوجة قريبة من لزوجة الديزل النفطي، كما قد يقطر الديزل الناتج لإزالة العوالق اللونية للحصول على ديزل حيوي عديم اللون يمكن تسويقه

تجاريا بمزجه مع الديزل النفطي بنسبة تزيد عن 20% للاستخدام في محركات الديزل التقليدية، او استخدامه كوقود بنسبة 100% في محركات الديزل المطورة.

2.3.9 استخدامات الديزل الحيوي:

يمتاز الديزل الحيوي بأن له صفات احتراق جيدة، كما مبين في الجدول (3.9) ويمكن استخدام الديزل الحيوي كمذيب، كما يدخل في تصنيع الكيمائيات الثانوية الوسيطة لإنتاج المنظفات، إضافة إلى استخدامه كوقود لمحركات الاحتراق الذاتي، حيث يمكن استخدام الديزل الحيوي بصورة منفردة للوصول إلى وقود نظيف صديق للبيئة، حيث يؤدي إلى خفض المنبعثات الغازية من عادم المحرك مثل الهيدروكربونات غير مكتملة الاحتراق، وأول اوكسيد الكربون. إضافة إلى ذلك فان الديزل الحيوي غير سام وقابل للتحلل الحيوي، مما يعني أهمية مما يعني أهمية استخدامه في وسائط النقل البحري لندرة تلويثه للبيئة المائية وقلة مشاكله التشغيلية، إلا إن ما يعيبه إحداثه للتآكل في خزانات الوقود وتفسخ دهاناتها ووصلاتها المطاطية، بل والقدرة على تآكل خرسانة تلك الخزانات. ويمكن مزج وقود الديزل النفطي بديزل حيوي بنسبة تتراوح من 20 – 50% ديزل حيوي، حيث تؤدي عملية المزج الى تقليل كلفة استخدام الديزل النفطي، كما إن نسبة الانبعاث الغازية من عادم المحرك تتناسب مع نسبة الديزل الحيوي إلى نسبة وقود الديزل النفطي، إلا إن مشاكل الذوبانية تقل كلما ارتفعت نسبة الوقود الحيوي في مزيج الوقود المستخدم.

الخاصية	النسبة
الكثافة النوعية	0.89 – 0.87
اللزوجة الحركية عند (40 °C)	5.8 – 3.7
رقم السيستان	70 – 46
النسبة الوزنية للكبريت (%)	0.0024 – 0
القيمة الحرارية العليا	39293- 37369
القيمة الحرارية الدنيا	36943 - 34658

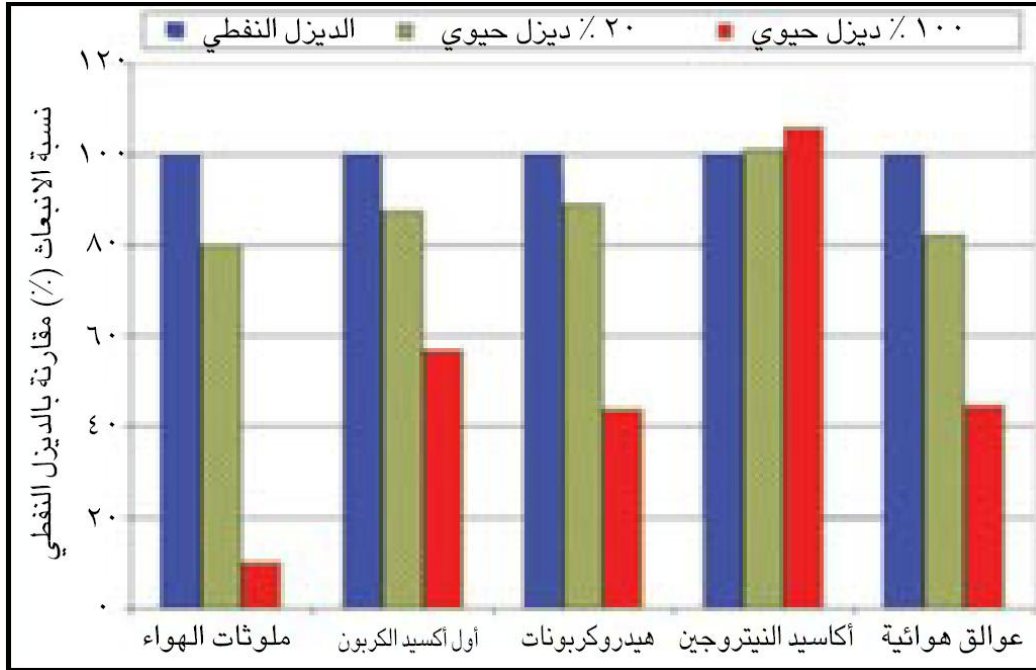
الجدول (3.9) الخوص الفيزيائية للديزل الحيوي

كما يستخدم الديزل الحيوي كمادة مضافة بنسبة تتراوح من 1-2 % لتحسين خاصية التزيت للمحرك وأظهرت اختبارات التزيت تحسين لتزيت للمحرك حتى عند استخدام نسبة

قليلة منه في حدود 0.025 %. ويمكن ملاحظة الأثر الايجابي للديزل الحيوي على حركة أجزاء المحرك علما بان ما نسبته 1-2% من الديزل الحيوي كافية لتحويل الوقود شديد اللزوجة بطيء الحركة إلى وقود ذي قدرة انزلاقية معتدلة، إضافة إلى إن هذه النسبة ليس لها تأثير ملحوظ على رقم السيتان (Cetane Number) لوقود الديزل أو أي اثر سلبي على الانبعاث الغازية المتصاعدة من عادم المحرك.

3.3.9 مميزات الديزل الحيوي:

يعد الديزل الحيوي أكثر نظافة من الديزل النفطي حيث يحتوي في تركيبه الكيميائي على عدد اقل من ذرات الكربون وعدم احتوائه على مركبات عطرية، مما يعني انه ينتج عوادم كربونية اقل، علاوة على احتوائه على نسبة اقل من 15% من الكبريت. كذلك يمتاز الديزل الحيوي بان الغازات المنبعثة عند احتراقه- باستثناء اكاسيد النتروجين- اقل من غازات احتراق الديزل النفطي، حيث تقل تلك الغازات كلما زادت نسبته في الوقود، كما في الشكل (4.9). فضلا عن ذلك فانه أعلى لزوجة من الديزل النفطي، وبالتالي فانه يحافظ على المحرك ويزيد من عمره الافتراضي. كما يمتاز الديزل الحيوي بارتفاع كفاءة الاحتراق (رقم السيتان وغيرها) كما في الجدول (4.9) وأكثر أمانا من الديزل التقليدي، حيث يحترق عند درجة حرارة تبلغ 167 م مقارنة باحتراق الديزل النفطي الذي يحترق عند درجة حرارة 70 م.



الشكل (4.9) الانبعاثات الغازية من محرك الديزل الملوثة للهواء

رقم السيتان	حرارة الاحتراق (MJ/kg)	مصدر الزيت النباتي
46.2	39.8	ميثيل زيت الصويا
48.3	40.5	ايثيل زيت الصويا
47	39.8	ميثيل زيت زهرة الصويا
54.5	-	ميثيل زيت الفول
-	40.1	ميثيل زيت الفول السوداني
-	42.4	ميثيل زيت الذرة
47.5	45.2	الديزل

الجدول (4.9) صفات الاحتراق لأنواع مختلفة من الديزل الحيوي

إلا إن ما يعاب على الديزل الحيوي احتوائه على النتروجين، وبالتالي ارتفاع نسبة تكون اكاسيد النتروجين التي تسبب زيادة ثقب الأوزون، فضلا عن ان احتراقه يبعث رائحة مثل رائحة البطاطا المقلية.

وعلى الرغم من الخواص الجيدة للديزل الحيوي من حيث عدم سميته و ملائمته لشروط السلامة وحماية البيئة الدولية، وقدرته على التحلل بيئيا عندما يستخدم بصورة منفردة، إلا انه لا يمكن ان يحل محل الوقود التقليدي كمصدر للطاقة، نظرا لارتفاع كلفة الإنتاج، وحدودية مصادره مقارنة بالنفط.

4.9 طاقة الهيدروجين:

يعتبر الهيدروجين إحدى البدائل الجديدة للطاقة واخذ يحظى باهتمام واسع كوقود مستقبلي وكوريث لأنواع الوقود التقليدية، ويعد حاليا أهم الخيارات التي تحظى بأهمية خاصة، ليس في الدول الغربية فحسب، بل أصبح خيارا شبه عالمي، حيث لا يكاد مركز أبحاث عالمي يتخلى عن البحث في مجاله: إنتاجا أو حفظا أو استخداما، خصوص انه مرتبط أساسا بتكنولوجيا خلايا الوقود التي تحظى كذلك باهتمام عالمي وتعد المجال المتاح حاليا لتطبيق طاقة الهيدروجين.

يتصدر عنصر الهيدروجين (H) قائمة العناصر الكيميائية في الجدول الدوري للعناصر ولذلك تعد ذرة الهيدروجين اخف ذرة في العناصر الكيميائية حيث تحتوي على إلكترون واحد سالب الشحنة وبروتون واحد موجب الشحنة.

يتواجد الهيدروجين تحت ظروف الضغط والحرارة القياسية كغاز عديم اللون والرائحة، وتبلغ درجة غليانه (-251.7°C) وهو سريع الاشتعال حتى عند وجوده بتركيزات قليلة، وله شعلة نظيفة لا ترى، لذلك من الصعب ملاحظة احتراقه، وعليه تعتمد بعض مصانع الغاز إلى إضافة بعض المواد إليه من أجل إضفاء لون مرئي لشعلته، ينتج عن اشتعال الهيدروجين و الأوكسجين تكوين الماء، لذلك فانه يتميز بقلة الغازات الضارة مما يجعله صديق للبيئة بالمقارنة مع الأنواع الأخرى للوقود.

1.4.9 مميزات طاقة الهيدروجين:

يتميز الهيدروجين كطاقة بمجموعة من المزايا بالمقارنة مع الأنواع الأخرى حيث ان كمية الطاقة الناتجة عن حرق كيلو غرام واحد من الهيدروجين تبلغ 142000 kJ مقارنة بكمية الطاقة الناتجة عن حرق كيلو غرام واحد من البنزين والبالغة 47200 kJ أي تعادل ثلاثة أضعاف الطاقة الناتجة من حرق البنزين. كما يعادل سبعة أضعاف الطاقة التي ينتجها نفس الوزن من الفحم كما مبين في الجدول (5.9).

المادة	الطاقة (MJ/kg)
الهيدروجين	121
الميثان	56
البنزين	47
النفط الخام	45
زيت الوقود	43
الفحم	23
الحطب	16

جدول (5.9) الطاقة المستخرجة من بعض انواع الوقود

كما يتميز الهيدروجين انه يمكن خزنه لفترات طويلة في صهاريج خاصة و استعماله عند الحاجة وبالمقادير المطلوبة دون ان يؤثر ذلك على خصائصه ويضاف إلى ذلك توفره في الطبيعة بكميات غير محدودة فهو أحد العنصرين المكونين للماء ويعد بالأصل أكثر العناصر وفرة في الكرة الأرضية، إذ يمثل 75% من مواد الكرة الأرضية، ومن النادر إن يوجد حرا وإنما يكون متحدا مع بعض العناصر، كما إن تأثير استعماله على البيئة ضئيل جدا وحين يحترق

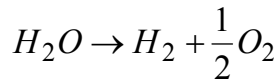
الهيدروجين فإنه يكون الماء وبالتالي فان حرق الهيدروجين لا يؤدي إلى فناءه بل عودته إلى صورته الأصلية. لهذه الأسباب ولكون الهيدروجين مادة أولية في الكثير من الصناعات الكيميائية فإن الجهود والبحوث تنصب في الوقت الحاضر على تحسين طرق إنتاجه وتخزينه ونقله. إما أهم سلبات طاقة الهيدروجين فهي متطلبات السلامة الحذرة عند التعامل معه في مراحل إنتاجه وحفظه ونقله واستخدامه.

2.4.9 طرق إنتاج الهيدروجين:

يتم إنتاج 80% من الهيدروجين من النفط والغاز الطبيعي و15% من الفحم الحجري والباقي بطرق مختلفة أخرى مثل التحليل الكهربائي ولان النفط والفحم مصادر ناضبة فيجب عدم الاعتماد عليها ومن الجدير بالذكر فان تكلفة إنتاج الهيدروجين من الوقود التقليدي سواء كان النفط او الغاز الطبيعي او الفحم مرتفعة وتصل إلى ما بين 6-14 دولار لكل 10^9 جول والتي تجعل هذه الطرق غير مجدية اقتصاديا مما يتطلب البحث عن طرق أخرى تعتمد على استخلاص الهيدروجين من الماء وتوجد عدة طرق لإنتاج الهيدروجين من الماء تختلف باختلاف الطاقة المستخدمة في الإنتاج واهم هذه الطرق هي:

1. التحليل الكهربائي:

عند امرار تيار كهربائي خلال الماء فان الماء يتحلل إلى مركباته الأصلية (الهيدروجين والأكسجين) حسب التفاعل الكيميائي الآتي:

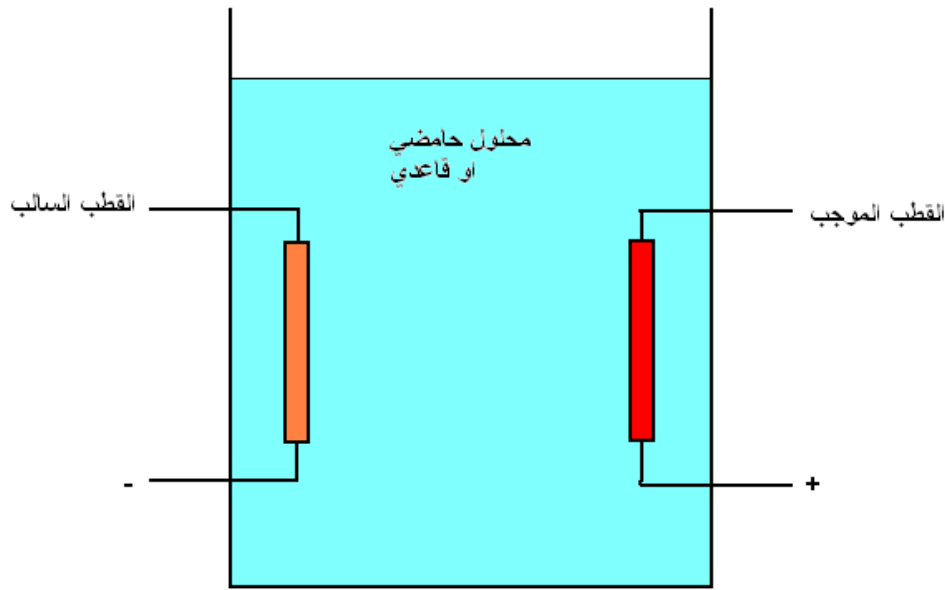


وتعتبر هذه الطريقة من ابسط الطرق المعروفة للحصول على الهيدروجين من الماء و أكثرها انتشارا. يظهر الشكل (5.9) جهاز مختبري بسيط لتحليل الماء كهربائيا، حيث يتألف من صفيحتين من البلاتين، إحداهما تتصل بالقطب الموجب لمولد كهربائي والأخرى تتصل بالقطب السالب وتوضع هذه الأقطاب في وعاء زجاجي يحوي ماء فيه القليل من حامض الكبريتيك. عند سريان التيار الكهربائي خلال هذه الدائرة المغلقة نلاحظ تجمع فقاعات من الهيدروجين عند القطب السالب وفقاعات من الأكسجين عند القطب الموجب وتصل كفاءة العملية هذه إلى حوالي 80%، غير إن التكلفة العالية لهذه الطريقة تحد بصورة كبيرة من انتشارها بصورة واسعة حيث تصل كلفة إنتاج الكيكا جول (10^9 جول) ما يقارب 20 دولار وهي أكثر من كلفة

إنتاجه من المصادر التقليدية وتتجه البحوث الحالية إلى تقليل هذه الكلفة لجعله منافسا قويا لبقية أنواع الوقود.

2. التحليل الحراري:

يتم في هذه الطريقة تسخين الماء وتحويله إلى بخار ومن ثم رفع درجة حرارة البخار إلى درجة حرارة تصل إلى 2500°C حيث يتحلل البخار الساخن إلى هيدروجين وأوكسجين، غير إن الوصول إلى هذه الدرجة صعب من الناحية التقنية بسبب عدم توفر الأجهزة التي تتحمل هذه الدرجة الحرارية العالية إضافة إلى مشكلة فصل الهيدروجين عن الأوكسجين بعد التحلل.



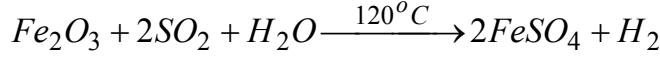
الشكل (5.9) جهاز تحليل الماء كهربائيا

3. العمليات الكيمياء-حرارية:

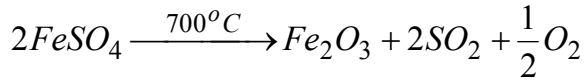
تحتاج عملية شطر الماء إلى أوكسجين وهيدروجين بالتسخين المباشر الى درجة حرارية تصل الى 2500°C ، إلا إن الوصول إلى هذه الدرجة صعب من الناحية التقنية، لذا حاول العلماء تجنب هذه الحرارة العالية بأجراء سلسلة من التفاعلات الكيميائية، مع بعض المركبات الكيميائية لغرض إنتاج الهيدروجين وبعد سلسلة من هذه التفاعلات يتحول الماء إلى أوكسجين وهيدروجين.

توجد عدة طرق لإنتاج الهيدروجين وإحدى هذه الطرق تستخدم ثلاثي اوكسيد الحديد Fe_2O_3 وثاني اوكسيد الكبريت SO_2 كعوامل مساعدة حيث يتم التفاعل على مرحلتين، في

المرحلة الأولى يتفاعل اوكسيد الحديد مع ثاني اوكسيد الكبريت والماء بدرجة حرارة 120°C معطيا كبريتات الحديد FeSO_4 وينطلق غاز الهيدروجين وفق التفاعل الكيميائي الآتي:



وفي المرحلة الثانية تتفكك كبريتات الحديد بتسخينها الى الدرجة 700°C معطية ثلاثي اوكسيد الحديد وثاني اوكسيد الكبريت من جديد وينطلق غاز الأوكسجين وفق التفاعل الكيميائي الآتي:



وبذلك تكون النتيجة الإجمالية هي تفكك الماء إلى عنصره الهيدروجين والأوكسجين بالدرجة 700°C ، كما نلاحظ إن الهيدروجين ينتج في مرحلة تختلف عن تلك التي ينتج فيها غاز الأوكسجين وبالتالي لا يحدث أي امتزاج لهما.

4. التركيب الضوئي:

تستمد النباتات الطاقة اللازمة لعملية التمثيل الضوئي من أشعة الشمس حيث تأخذ غاز ثاني اوكسيد الكربون من الهواء الجوي وتحوله بعد سلسلة من العمليات الكيميائية المعقدة إلى نشويات وسكريات كما تقوم النباتات بتحويل الماء إلى هيدروجين وأوكسجين في بعض عمليات التمثيل الضوئي ولقد حاول العلماء إجراء عملية التفكك الأخيرة (الماء إلى هيدروجين وأوكسجين) هذه صناعيا، لذلك بحثوا طويلا عن مركبات كيميائية يمكنها إن تحل محل اليخضور النباتي وتقوم بدور الوساطة وبالفعل وجدوا ان بإمكان بعض الأملاح المنحلة في الماء القيام بهذا الدور، كما توجد بعض الطحالب التي تنمو في المياه، تقوم أيضا بامتصاص الضوء وبعد سلسلة من التفاعلات تقوم بإطلاق الهيدروجين، غير إن ما يعيب هذه العملية هي الكفاءة المنخفضة والبالغة 2% وبالتالي فإننا نحتاج إلى مساحات كبيرة لتوليد كميات كافية من الهيدروجين.

3.4.9 استعمالات الهيدروجين:

الهيدروجين وقود ملائم للحلول محل أنواع الوقود المتوفرة حاليا، وبالإمكان إحلاله محلها في كافة المجالات، ويعد الهيدروجين الوقود المستقبلي لوسائط النقل واستعمال الهيدروجين لتسيير السيارات مثلا لا يتطلب سوى تعديل نظام مزج الوقود مع الهواء كما يمكن

استخدامه كوقود في الطائرات حيث إن خفة وزنه يجعله ملائماً للعمل فيها، وتفوق كفاءته كفاءة البنزين بنسبة 20% وقام مركز الفضاء الألماني بإنشاء محرك يعتمد على حرق الهيدروجين مباشرة لتوليد الطاقة بسعة 25 MJ وبكفاءة تصل إلى 99%، وذلك لتوليد الكهرباء وفي الواقع يقتصر استخدام الهيدروجين مباشرة في الوقت الحاضر على المركبات الفضائية.

كما يمكن استخدام الهيدروجين بدل الغاز المستخدم في المطابخ، حيث يتفوق بفائدة كون إن احتراقه ينتج عنه بخار الماء ولا ينتج أي غازات أخرى ملوثة للبيئة ويعد الاحتراق ألحظي أحد أفضل التقنيات وأكثرها أماناً لتسخير الهيدروجين لهذه الغاية، ويحدث الاحتراق في هذه الحالة على هيئة تفاعل كيميائي متوسط الحرارة دون وجود لهب أو حاجة إلى وسيلة إشعال، ويتم هذا بفضل استخدام إحدى المواد المحفزة كعامل مساعد على تفاعل الهيدروجين مع الهواء عند درجات حرارة تتراوح ما بين 100 إلى 800 °C، ويحدث ذلك بمجرد مرور الهيدروجين على هذه المادة المحفزة في وجود الهواء، وذلك حسب التفاعل الآتي:



ومن أهم المواد المحفزة التي يتم استخدامها عناصر البلاتين والبلاديوم، وتستخدم أكاسيد بعض المواد مثل النحاس ولكن بكفاءة أقل. ولقد طورت بعض الأجهزة المنزلية التي تعمل بهذا الأسلوب منها موقد للطبخ يعمل بتقنية الاحتراق ألحظي كما مبين في الشكل (6.9).



الشكل (6.9) موقد للطبخ يعمل بتقنية الاحتراق ألحظي

كما يدخل الهيدروجين في صناعة الامونيا والتي تشكل الجزء الأساس في صناعة الأسمدة، وينتج الهيدروجين من الغاز الطبيعي في هذه الصناعة ويمكن استعمال الهيدروجين كوقود للتوربينات الغازية في محطات توليد الكهرباء، بالإضافة إلى هذا فإن الهيدروجين يدخل في العديد من العمليات الصناعية حيث يشكل جزءا من المنتجات النهائية في العديد من الصناعات ويبين الجدول (6.9) نسب استعمال الهيدروجين في الصناعات المختلفة.

الصناعة	نسبة استخدام الهيدروجين فيها
الامونيا	47%
البتر كيمياويات	41%
الميثانول	5%
المعادن	4%
صناعات أخرى	3%

الجدول (6.9) نسب استعمال الهيدروجين في الصناعات المختلفة

4.4.9 خزن الهيدروجين:

يمكن حفظ الهيدروجين كغاز مضغوط أو كسائل، كما يمكن حفظه بطرق كيميائية أو فيزيائية مع مواد أخرى مثل هيدريدات الفلزات. تحفظ الكميات الكبيرة من الهيدروجين عادة تحت الأرض في حقول النفط أو الغاز الناضبة أو الكهوف الناتجة عن عمليات التعدين وتبلغ كلفة أنظمة تخزين الهيدروجين ثلاثة أضعاف تكلفة نظام تخزين الغاز الطبيعي لنفس مقدار محتوى الطاقة، وذلك بسبب تدني المحتوى الحراري للهيدروجين بالنسبة إلى الحجم وتطبيقا لهذا الغرض تقوم الشركات الغربية بتخزين الهيدروجين في طبقات الأرض وتفقد نسبة تتراوح ما بين 1% إلى 3% من كميته سنويا. إما للاستخدامات الصناعية الصغيرة فيحفظ الهيدروجين في اسطوانات يبلغ حجمها القياسي 50 لتر وضغطها 200 bar وقد استخدمت هذه الاسطوانات كخزانات وقود للسيارات التجريبية التي تستخدم الهيدروجين كوقود وتتميز هذه الاسطوانات بكفاءة تخزين عالية حيث تبلغ 0.05 كغم من الهيدروجين لكل كيلو غرام من الوزن الكلي.

كما يمكن خزن الهيدروجين على شكل سائل غير إن هكذا عملية (عملية تحويل الهيدروجين إلى سائل) تستهلك ثلث طاقة الهيدروجين المسال المراد تخزينه لذا فهي مكلفة

اقتصاديًا وينحسر استخدامها في العمليات التي تتطلب كثافة تخزين عالية كما في استخدام الهيدروجين للمركبات الفضائية.

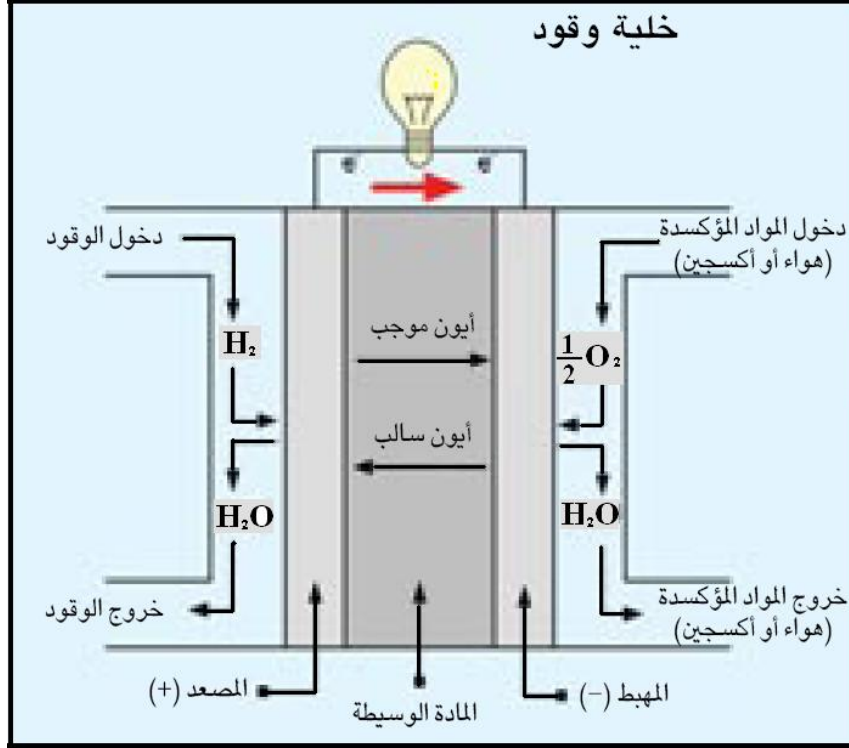
كما يمكن خزن الهيدروجين على شكل هيدرات بعد اتحاد الهيدروجين مع بعض الفلزات وقد استخدمت هذه الخاصية لخزن الهيدروجين، حيث امكن الحصول على كثافة تخزين تقدر بـ 0.7 كغم من الهيدروجين لكل كيلوغرام من هيدريد المغنيسيوم (MgH_2) وتتميز هذه التقنية بأنها أكثر سلامة من الطرق الأخرى. وهناك العديد من الطرق المبتكرة ذات كثافة تخزين أعلى من الطرق التقليدية مثل استخدام أنابيب الكربون المتناهية الصغر (Nano carbon tubes) كما يستقطب موضوع الطاقات المتجددة اهتمام الباحثين لاستثمارها في عملية إنتاج الهيدروجين خصوصاً في أوقات انخفاض الطلب على الكهرباء لاستخدامها في توليد الهيدروجين.

5.9 خلايا الوقود:

أعطى استخدام وكالة الفضاء الأمريكية (NASA) لخلايا الوقود في مركباتها الفضائية نقطة البداية لانطلاق التطبيقات الواسعة لخلايا الوقود في مختلف مجالات الحياة، ويبدو ان هذا المجال قد استحوذ على اهتمام مراكز الأبحاث العالمية، إذ يندر إن تجد مركز بحثي ليس له نشاط بحثي أو تطويري في مجال خلايا الوقود بصورة أو بأخرى حيث يعتقد أنها التقنية البديلة لمشاكل العالم في الطاقة.

خلية الوقود هي جهاز كهروكيميائي يحول الطاقة الكيميائية الناتجة من تفاعل وقود الهيدروجين مع الاوكسجين الى طاقة كهربائية ذات فولتية منخفضة بالإضافة إلى حرارة وماء. تتكون الخلية في أبسط صورها من قطب سالب وقطب موجب يحتوي كل منهما على مواد محفزة – حسب نوع الخلية- يفصل بينهما محلول الكتروليتي يمنع اختلاط الوقود بالاكسجين، كما يمنع انتقال الالكترونات من خلاله، ولكنه يسمح بانتقال الايونات كما هو موضح بالشكل (7.9). وخلال عملية التشغيل يتأكسد الوقود عند القطب السالب بوجود المادة المحفزة وتحرر الالكترونات، وفي نفس الوقت يتم اختزال الاوكسجين في القطب الموجب بوجود المادة المحفزة، فتنتقل الالكترونات المتحررة من القطب السالب إلى القطب الموجب عبر الدائرة الكهربائية الخارجية وبذلك يتولد تيار كهربائي مستمر (Direct current D.C) يمكن تحويله

إلى تيار متناوب (Alternating current A.C) لأداء مهام تشغيلية معينة وللحصول على قدرة أعلى توضع أكثر من خلية على شكل مصفوفات.



الشكل (7.9) رسم توضيحي لخلية الوقود

تتشابه خلية الوقود في بعض مكوناتها وخصائصها مع البطارية، ولكنها تختلف عنها في عدة أوجه، منها:-

1. إن البطارية جهاز لتخزين الطاقة بينما خلية الوقود هو جهاز لتحويل الطاقة الكيميائية إلى كهربائية.

2. إن الطاقة القصوى للبطارية تحدد بكمية المواد الكيميائية الموجودة فيها، ويتوقف إنتاج البطارية للطاقة الكهربائية عندما يتم استهلاك مواد التفاعل، بينما تستمر خلية الوقود في إنتاج الطاقة الكهربائية نظريا طالما تم تزويدها بوقود الهيدروجين والأكسجين.

3. عمليا تواجه خلية الوقود بعض الانخفاض في أدائها وذلك بسبب التآكل أو بسبب تعطل بعض مكوناتها.

تتميز خلايا لوقود ببساطتها وكفاءتها العالية التي تتراوح بين 50% و 65%، كما أنها لا يصدر عنها أي ضوضاء وهي غير ملوثة للبيئة ويمكن استخدام أنواع مختلفة الوقود كالغاز الطبيعي والهيدروجين والميثانول والغاز الحيوي.

1.5.9 أنواع خلايا الوقود:

تصنف خلايا الوقود عادة حسب نوع المادة الوسيطة (العازلة) المستخدمة بين الأقطاب، وهناك خمسة أنواع رئيسية من خلايا الوقود وهي⁽²⁾:-

1. الخلية ذات غشاء تبادل البروتون (Proton exchange membrane fuel cell :PEMFC)

وهي عبارة عن خلايا وقود يتكون الوسط العازل فيها من غشاء من البوليمر، وبسبب ذلك فأنها تسمى أحيانا خلايا الوقود ذات غشاء البوليمر (PEFC) او ذات اليوليمر الصلب (SPFC). تتميز هذه الخلايا بسرعة بدء التشغيل مع الاستجابة السريعة لتغير الأحمال الكهربائية، ولكن بسبب انخفاض درجة حرارتها التشغيلية ($40 - 90^{\circ}\text{C}$) فإن مقاومتها للوقود الملوثة تعد ضعيفة جدا، فمثلا يؤدي التلوث بكميات قليلة جدا-أجزاء من المليون- من ثاني اوكسيد الكربون الى انخفاض كفاءتها بدرجة عالية جدا ورغم ذلك يحظى هذا النوع من الخلايا باهتمام مراكز الأبحاث، وهو النوع الذي يستخدم عادة في وسائل النقل وخصوصا السيارات وتعد الخلايا التي تستخدم الميثانول مباشرة (Direct Methanol fuel cell – DMFC) كوقود إحدى فروع هذا النوع من الخلايا.

2. الخلايا القلوية AFC- Alkaline fuel cell:

تستخدم خلايا الوقود القلوية هيدروكسيد البوتاسيوم كمادة وسيطة، وتبلغ درجة حرارتها التشغيلية ما بين ($65 - 120^{\circ}\text{C}$). ورغم إنها تعد أكثر الأنواع تطورا إلا إن ضعف تحملها لثاني اوكسيد الكربون حتى بنسب قليلة يحد من استعمالها على نطاق واسع على الأرض، ويحظر استعمالها في المركبات الفضائية.

3. خلايا حامض الفسفور (Phosphoric acid fuel cell PAFC):

تستخدم هذه النوعية من الخلايا حامض الفسفور المركز كمادة وسيطة، وتبلغ درجة حرارتها التشغيلية بين ($150 - 200^{\circ}\text{C}$) وتعد الأكثر تطورا والأقرب للتسويق التجاري، حيث تستخدم حاليا في عدد من المستشفيات والفنادق ويستفاد أيضا من حرارتها الناتجة في أداء مهام أخرى مثل التدفئة وتسخين المياه. وتمتاز خلايا حامض الفسفور بان حرارتها التشغيلية اعلى من خلايا الوقود ذات تبادل البروتون (PEMFC)، وبأنها أكثر تحملا لتلوث الوقود بأول اكسيد

الكربون، ولكنها تحتاج إلى فترة أطول قبل إتمام عملية إنتاج الطاقة مما يحد من استخدامها في المركبات ، ولذلك يقتصر استخدامها على محطات توليد الطاقة الثابتة.

4. خلايا الكربونات المصهورة (Molten carbonate fuel cell – MCFC):

تستخدم خلايا الكربونات المصهورة مادة كربونات الصوديوم والبوتاسيوم كمادة وسيطة وتبلغ درجة حرارتها التشغيلية ما بين ($600 - 700^{\circ}\text{C}$) مما يمكن الاستفادة من حرارتها العالية لإغراض متعددة، ولكن يعاني هذا النوع من الخلايا من عملية التآكل التي تتطلب استخدام مواد قد تكون مرتفعة التكاليف.

5. خلايا الاوكسيد الصلب (Solid oxide fuel cell – SOFC):

تستخدم هذه النوعية من الخلايا أكسيد التريوم وأكسيد الزركونيوم ، كمادة وسيطة، وتعمل في درجة حرارة تتراوح ما بين ($800 - 1000^{\circ}\text{C}$)، وتتميز هذه الخلايا بقوة تحملها للشوائب الموجودة في الوقود استثناء مادة الكبريت. ويجرى العمل حاليا على تخفيض درجة حرارتها التشغيلية الى ما دون 600°C ، فيما يطلق عليه الآن خلايا الأكسيد الصلب متوسطة الحرارة (Intermediate temperature solid oxide fuel cell – ITSOFC) وبالرغم من ان التصنيف أعلاه يعتمد على نوع المادة الوسيط إلا ان هناك من يقسمها إلى صنفين حسب درجة حرارتها التشغيلية وهما خلايا الوقود ذات الحرارة العالية والمنخفضة. ويلخص الجدول (10.9) أهم خصائص الأنواع الرئيسية لخلايا الوقود⁽⁴³⁾.

2.5.9 وقود خلايا الوقود:

تستخدم خلايا الوقود غاز الهيدروجين كوقود لتشغيلها، وهي تعمل على الهيدروجين النقي، والذي يتم تصنيعه واستخلاصه من مصادر أخرى كالنفط والفحم والغاز الطبيعي او عن طريق التحليل الكهربائي للماء إلى الاوكسجين والهيدروجين وتعتمد درجة نقاوة الهيدروجين المنتج على الطريقة المستخدمة لإنتاجه، فقد يتطلب معالجة وتنقية إضافية ليكون ملائماً للاستخدام في خلايا الوقود، كما تعتمد درجة النقاوة على مصدر الوقود نفسه سواء كان الفحم أو النفط أو الغاز الطبيعي. ويمكن ان تتم عملية استخلاص الهيدروجين داخل نظام خلايا الوقود بأقل تكلفة واثراً مرونة لإمكانية الاستفادة من الحرارة الناتجة من الخلايا في عملية استخلاص الهيدروجين وتستخدم هذه الطريقة عادة في خلايا الوقود ذات الحرارة العالية. غير ان عملية استخلاص الهيدروجين داخل منظومة خلايا الوقود تكون مقبولة عندما تكون خلايا الوقود

مستخدمة لإغراض توليد الطاقة فقط ، إما في حالة استخدام خلايا الوقود في وسائط النقل فالتطبيقية أصعب وأكثر تعقيدا، وقد قامت عدة شركات لتصنيع السيارات بعدد من المحاولات التطبيقية لخن وتوليد الهيدروجين على متن السيارة عن طريق اتحاده مع مواد صلبة تسمى (Metal Hydrides)، وقد اتضح إن ذلك يزيد من وزن المركبة وجرت محاولات أخرى لخن الهيدروجين على شكل غاز سائل أو غاز مضغوط ويتطلب هذا العمل خطوات إضافية لضمان ظروف أمان وتشغيل المركبة في هذه الحالة، ولا يوجد حاليا وقود يحقق كل هذه المتطلبات منها الميثانول والكازولين والايثانول والديزل، ولكل منها مساوئ ومحاسن، فالميثانول متوفر ورخيص الثمن ولكنه يسبب تآكل المعادن بسرعة وقليل الكفاءة وسام. إما الكازولين فانه متوفر غير ان تركيبته الكيميائية معقدة مما يصعب من عملية معالجته لاستخلاص الهيدروجين منه، كما ان كفاءته قليلة مقارنة باستعمالاته في المركبات التقليدية.

النوع	درجة حرارة التشغيل (°C)	مادة القطب السالب	المادة الوسيطة	مادة القطب الموجب
ذات غشاء تبادل البروتون	90 - 40	البلاتين - كربون + تفلون	بوليمر	البلاتين / كربون + تفلون
ذات الوسط القاعدي	120-65	البلاتين - البالاديوم+تفلون	85-100% هيدروكسيد البوتاسيوم	البلاتين / الذهب + تفلون
ذات الوسط الحامضي الفسفوري	200-150	البلاتين/ كربون + تفلون	الحامض الفسفوري	البلاتين / كربون + تفلون
ذات الوسط الكاربوني المنصهر	700-600	النيكل / الكروم	كربونات الليثيوم أو البوتاسيوم او الصوديوم	أكسيد النيكل
ذات الوسط الاكسيدي الصلب	1000-650	الكوبلت / النيكل /او أكسيد الزركونيوم	أكسيد البتريوم / أكسيد الزركونيوم	السترانشيوم

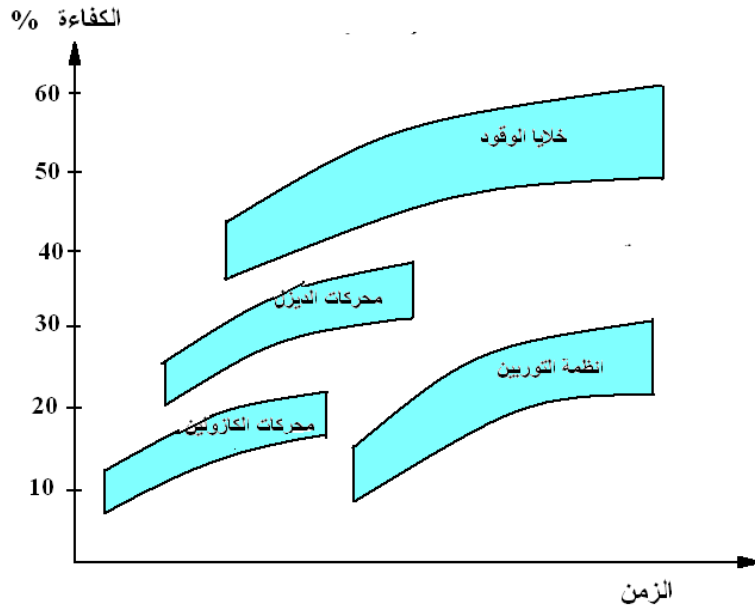
الجدول (10.9) أهم خصائص الأنواع الرئيسية لخلايا الوقود

إما الايثانول فهو خيار جيد ولكنه متوفر في أماكن محددة، وإما الديزل فعادة يحتوي على نسبة عالية من الكبريت وهو أصعب أنواع الوقود السائل من ناحية إعادة صياغة تركيبته الكيميائية ويقتصر استخدامه على الأغراض العسكرية وتجري الأبحاث حاليا على تحسين وتطوير تقنيات ومواد استخلاص الهيدروجين من هذه الأنواع السائلة من الوقود.

3.5.9 مميزات خلايا الوقود:

تتميز خلايا الوقود بعدد من المزايا الايجابية عن غيرها من مولدات الطاقة، ومن ذلك :

1. كفاءة عالية ، سواء أكانت تحت حمل تشغيلي عال أم منخفض مقارنة بمولدات الطاقة الأخرى كما في الشكل (8.9).



الشكل (8.9) كفاءة أنظمة القدرة المختلفة

2. كفاءة كلية تقدر ما بين 75 إلى 80 % (40% كهربائية + 35 - 40 % حرارية).
3. مستوى تلوث منخفض جدا.
4. مستوى صوت وإزعاج منخفض جدا.
5. لا توجد أجزاء ميكانيكية.
6. مرونة في استخدام الوقود.
7. السرعة والسهولة في التركيب.
8. إمكانية إنتاج ماء صالح للشرب خلال العملية.
9. لا تحتاج الى صيانة مكثفة.

4.5.9 تطبيقات خلايا الوقود:

تعد التطبيقات العديدة لاستخدام خلايا لوقود في مجال توليد الطاقة من المميزات الايجابية لهذه التقنية ، لإمكانية استخدامها على نطاق واسع في المنازل والفنادق والمجمعات التجارية وفي وسائل النقل مثل السيارات والشاحنات والحافلات وفي السفن والغواصات وفي المركبات الفضائية.ونظرا لطبيعة خلايا الوقود فانه يمكن تركيبها على شكل وحدات بقدرات مختلفة مما يعطيها ميزة تنافسية ومجال أوسع من التطبيقات الصغيرة، حيث يمكن استخدامها كمصدر للطاقة في بعض الوحدات الصغيرة كالحاسوب المحمول إلى التطبيقات الكبيرة كمحطات توليد الطاقة الكهربائية. وتعد الشركات الكبرى لإنتاج السيارات من أكثر الجهات التي تعمل في مجال أبحاث خلايا الوقود. حيث أنتجت نماذج تجريبية لسيارات تعمل بخلايا الوقود وأثبتت نجاحها وتسعى اليابان إلى إنتاج 50 ألف سيارة تعمل بخلايا الوقود وذلك بحلول عام 2010م، وكذلك مليون ونصف وحدة من خلايا الوقود للاستعمال السكني والتجاري⁽⁴⁴⁾.

الفصل العاشر

10

اقتصاديات وخزن الطاقات المتجددة

الفصل العاشر

اقتصاديات وخزن الطاقات المتجددة

Economics and storage of renewable energies

1.10 اقتصاديات الطاقات المتجددة:

تتوفر معظم أنواع الطاقات المتجددة بصورة دائمة في الطبيعة ولا تحتاج إلى كلف ابتدائية لاستخراجها، غير إن كثافة الطاقة المتوفرة في هذه الأنواع تكون عادة منخفضة مما يتطلب مساحات وحجوم كبيرة لاستخلاص أكبر قدر ممكن من الطاقة والتي تؤدي إلى ارتفاع كلف منظومات الطاقات المتجددة عادة. ولكي تكون هذه المنظومات منافسة من الناحية الاقتصادية، ينبغي أن يكون المردود الاقتصادي وافيًا، كما يتطلب إن تعمل هذه المنظومات لفترة طويلة من الزمن لتغطية رأس المال والكلف التشغيلية المترتبة عليها وتتوقف كلفة استغلال مصادر الطاقات المتجددة على عوامل عديدة أهمها:

1. تكاليف نصب وإنشاء هذه المنظومات.

2. العمر الافتراضي للمنظومات.

3. تكاليف التشغيل والصيانة والخزن.

4. كفاءة التحويل وقدرة المنظومة.

5. العائد المادي من رأس المال.

1.1.10 القيمة الحالية الصافية (Net Present Value):

لحساب أي قيمة مستقبلية لمقدار من المال، يجب إن يؤخذ بنظر الاعتبار مقدار الفائدة المحدد لهذا المال وعلى هذا الأساس فإن القيمة المستقبلية لهذا المقدار من المال يعطى بالمعادلة الآتية:

$$X = P * (i + 1)^t \quad (10.1)$$

إذ إن:

P = القيمة الحالية للمال

i = نسبة معدل الفائدة

t = الزمن المستقبلي بالسنوات او اعتمادا على الوقت المعتمد في تحديد قيمة الفائدة.
ويفضل معظم الاقتصاديين في الوقت الحاضر، إعادة احتساب المبالغ التي يتوقع الحصول عليها مستقبلا استنادا الى قيمتها الحالية بسبب الاختلاف في قيمة الوحدة النقدية بين الحاضر والمستقبل ولهذا يكون:

$$P = \frac{X}{(i+1)^t} = X * (i+1)^{-t} \quad (10.2)$$

إذ إن i في هذه المعادلة يمثل معدل التخفيض السنوي (Discount rate) بينما يمثل العامل $(i+1)^{-t}$ معامل القيمة الحالية (Present worth factor):

$$PWF(i,t) = \frac{1}{(i+1)^t} \quad (10.3)$$

ويمثل معامل القيمة الحالية النسبة بين القيمة الحالية لأي مبلغ الى القيمة المستقبلية بسبب انخفاض سعر العملة مع الزمن.

يطلق على الفرق بين القيمة الحالية (P) للمبالغ المتوقع الحصول عليها مستقبلا والمبالغ الابتدائية للتأسيس (C) أي مبالغ الاستثمار عند التأسيس بالقيمة الحالية الصافية (NPV):

$$NPV = P - C \quad (10.4)$$

2.1.10 سلسلة الدفعات Series of payments

تمول اغلب المشاريع عن طريق قروض مقدمة من الدولة او مؤسسات خاصة وتسترجع هذه المبالغ عن طريق دفعات سنوية أو شهرية متساوية بمقدار P_{ann} لكل منها تودع في نهاية كل سنة لمدة t من السنوات ولتحديد القيمة الحالية لهذه المبالغ المدفوعة تستخدم المعادلة الآتية:

$$S = P_{ann} * \left[\frac{1 - (i+1)^{-t}}{i} \right] \quad (10.5)$$

وعلى هذا الأساس تحسب القيمة السنوية الحالية لكل دفعة من المعادلة الآتية:

$$P_{ann} = S * \left[\frac{i}{1 - (i+1)^{-t}} \right] \quad (10.6)$$

أو :

$$P_{ann} = S * CRF(i, t) \quad (10.7)$$

إذ إن:

$CRF(i, t)$ يمثل معامل استرجاع رأس المال Capital Recovery Factor والذي يمثل النسبة بين الدفعة السنوية أو الشهرية إلى المجموع الكلي لرأس المال، فإذا كان المشروع خيريا او حكوميا دون فوائد فإن الفائدة تكون صفر ويكون معامل استرجاع رأس المال من المعادلة الآتية:

$$CRF = \frac{1}{n} \quad (10.8)$$

3.1.10 اقتصاديات منظومات التسخين الشمسية:

ان تقنية التسخين بالطاقة الشمسية هي التقنية الأكثر شيوعا في مختلف مناطق العالم وهي المؤهلة للاستخدام في معظم الدول العربية، وإذا كان استخدام منظومات التسخين والتدفئة بالطاقة الشمسية في منطقة ما سيوفر مبالغ للمستهلك فإن النظام سيكون اقتصادي، وهناك عدة طرق لمعرفة جدوى استخدام هذه المنظومات منها:

1. طريقة فترة الاسترداد Pay Back Period method:

إن الطريقة الأسلم لمعرفة جدوى أي منظومة طاقة متجددة هي مقارنة تكلفة المنظومة مع مقدار ما توفره تلك المنظومة من وقود للمنظومات التقليدية (المعتمدة على النفط أو الغاز أو الكهرباء) وعلى الرغم من حصولنا على الطاقة الشمسية مجانا إلا إن الكلفة الأولية لتلك المنظومات التي تقوم بامتصاص الإشعاع الشمسي وتحويله إلى طاقة مفيدة تكون عالية في الكثير من الأحيان. ويقصد بفترة الاسترداد الفترة الزمنية اللازمة لاسترداد التكلفة الأساسية للمشروع. ويمكن حساب فترة الاسترداد من العلاقة الآتية:

$$Np = \frac{Capital.Cost}{Energy.saving} \quad (10.9)$$

حيث ان :

فترة الاسترداد: Np

الكلفة الأولية لمنظومة التسخين: $Capital Cost$

التوفير في الطاقة الشمسية : $Energy saving$

تتميز هذه الطريقة بالبساطة وسرعة اتخاذ القرار، كما إنها تعتبر دليلاً جيداً على مدى السيولة النقدية للمشروع. إلا إن هذه الطريقة لا تأخذ بعين الاعتبار بقية العمر الإنتاجي للمشروع بعد فترة الاسترداد.

2. طريقة كلفة طول فترة العمل Life Cycle cost:

تعتبر هذه الطريقة من أفضل الطرق المستخدمة في حسابات الجدوى الاقتصادية للأنظمة الشمسية بشكل خاص لاحتوائها على كل العناصر الاقتصادية والحرارية فضلاً عن سهولة التعامل معها رياضياً. ويمكن كتابة معادلة كلفة طول فترة العمل كالآتي:

$$LCC = \frac{Q_{aux} * P_e}{\eta_{aux}} * PWF + C_{sys} \left(1 + f_{salv} * PWF - \left[\frac{1+i}{1+r} \right]^N * f_{oamf} \right) \quad (10.10)$$

حيث ان :

LCC (\$): كلفة فترة العمل

Q_{aux} (J): الطاقة المساعدة السنوية

P_e (\$): سعر الطاقة

η_{aux} : كفاءة منظومة الطاقة المساعدة

PWF: معامل القيمة الحالية

C_{sys} (\$): كلفة منظومة الطاقة الشمسية

f_{oamf} : نسبة كلف الصيانة والتشغيل

f_{salv} : نسبة التعويض

r : نسبة الفائدة

i : نسبة التضخم

N (year): عمر المنظومة

4.1.10 مقارنة اقتصادية لمختلف مصادر الطاقة:

يبين الجدول (1.10) مقارنة لأسعار النصب، والطاقة الكهربائية المنتجة لمختلف مصادر الطاقة التقليدية، والطاقات المتجددة، وذلك للحصول على صورة كاملة لكلفة كل مصدر من مصادر الطاقة.

المصدر	كلفة النصب (\$/kW)	كلفة التشغيل والصيانة (cent/kW-Hour)	كلفة الطاقة الكهربائية (المولدة - cent/kW- Hour)
طاقة المساقط المائية	6000-2000		8-2
طاقة الرياح	1000-800	0.1-0.05	7-5
الطاقة الكهروضوئية	14000-11000		75-50
طاقة المركبات الشمسية	3500-2800		17-12
طاقة الكتلة الحيوية (الحرق المباشر)	2500		14
طاقة الكتلة الحيوية (التقنيات الحديثة)	2500-400		10-6
طاقة باطن الارض	1700-1600		
طاقة المد والجزر	1800		8
طاقة حرارة المحيطات	10000	1	25-12
الطاقة النووية	2300-2100		4-2
المحطات الغازية	650-450	0.35	4-3
المحطات البخارية (تعمل بالفحم)	1500-1200	2-1.5	10-5

الجدول (1.10) كلف أنواع مختلفة من الطاقات

2.10 خزن الطاقات المتجددة:

إن تخزين الطاقة بإشكالها المختلفة أمر أساسي في أنظمة الطاقات المتجددة، إذ تتميز هذه الطاقات بعدم انتظامها مع الوقت وذلك لأن توفرها يخضع لاعتبارات كثيرة، فالإشعاع الشمسي

تتغير شدته خلال اليوم ومن يوم لآخر، وتتغير سرعة الرياح أيضا خلال الوقت ، كما تتغير سرعة وارتفاع أمواج البحر مع الوقت، ولهذا فان تخزين الطاقة أمر ضروري في أنظمة الطاقات المتجددة، وهناك عدة طرق لحزن الطاقة وهي:

1. الحزن الحراري Thermal storage
2. الحزن الميكانيكي Mechanical storage
3. الحزن المغناطيسي Magnetic storage
4. الحزن الكهربائي Electrical storage
5. الحزن الكيميائي Chemical storage

1.2.10 الحزن الحراري Thermal storage:

يتم تحويل الطاقة الشمسية التي تم تجميعها إلى طاقة حرارية تنقل إلى وحدة التخزين بأسلوبين: الأول بواسطة الحرارة المحسوسة وفيها يتم ارتفاع درجة حرارة وسط التخزين، والثاني بواسطة الحرارة الكامنة وفيها يتحول وسط التخزين من طور إلى آخر.

1.1.2.10 التخزين في السوائل:

يعتبر الماء من أفضل المواد لتخزين الطاقة الحرارية وخاصة في منظومات الطاقة الشمسية وعادة يستخدم لدرجات حرارة دون 100°C ، وهو من ارخص المواد المستخدمة في الطبيعة ومتوفر وغير سام ويمكن استخدامه مباشرة للإغراض المنزلية، الشكل (1.10) يوضح استخدام خزانات الماء لتخزين الطاقة الشمسية ويمكن حساب السعة الحرارية للحزن في السوائل على فرض إن جميع الماء في الخزان عند درجة حرارة واحدة تقريبا من المعادلة الآتية:

$$(mC_p)_s \frac{dT_s}{dt} = Q_u - L - (UA)_s (T_s - T_{\infty}) \quad (10.11)$$

إذ إن t الزمن، Q_u هو معدل إضافة الحرارة إلى وحدة الحزن في المنظومة ، L هو معدل استخراج الطاقة من الخزان الى الحمل، U معادل الفقد الحراري من الخزان إلى المحيط الخارجي، T_s درجة حرارة الخزان، A المساحة الخارجية للخزان، T_{∞} درجة حرارة الجو المحيط بالخزان.

كما بدأ الاتجاه في السنوات الأخيرة إلى تصميم مجمعات شمسية خازنة تقوم بامتصاص وخزن الطاقة الشمسية في نفس الوقت وتتميز هذه التصاميم بالبساطة وإمكانية تصنيعها من المواد المحلية كما في الشكل (2.10). تتكون هذه المجمعات الشمسية الخازنة من خزان مقطوع



خزان الحفظ

الشكل (1.10) منظومة تسخين مياه تعمل بالطاقة الشمسية تحتوي على خزان لحفظ الطاقة الحرارية

بزاوية 45 درجة لامتصاص أكبر كمية من الإشعاع الشمسي ويطل على هذه السطح المائل بطلاء اسود ويغطى بالزجاج لتقليل الفقد الحراري وتعزل بقية الجوانب بعازل حراري ملائم ويحاط بغلاف خشبي أو معدني ويوجه هذا المجمع الخازن إلى الجنوب.

2.1.2.10 التخزين في المواد الصلبة:

يتميز التخزين الحراري في المواد الصلبة بالكثير من المميزات حيث إن تلك المواد الصلبة (مثل الأحجار) متوفرة وقليلة أو معدومة السعر، كما إنها ذات عمر تشغيلي طويل ولا وجود لمشاكل التآكل.

يبين الشكل (10.3) إحدى منظومات التسخين الشمسية التي تستخدم خزان مملوء بالحصى لغرض الخزن، حيث يمر الهواء الساخن القادم من المجمعات الشمسية خلال خزان الحصى ويكون الجريان من الأعلى إلى الأسفل في الغالب، حيث يفقد حرارته إلى الحصى ومن ثم يخرج من الأسفل ليعود مرة أخرى إلى المجمع الشمسي ليعاد تسخينه، ولغرض الحصول على الحرارة المجهزة إلى الحمل المطلوب يمرر الهواء البارد القادم من الحيز المطلوب تدفئته من الأسفل إلى الأعلى مع قطع حركة الهواء الساخن القادم من المجمع حيث يكتسب الحرارة من الحصى الساخن.



(أ)



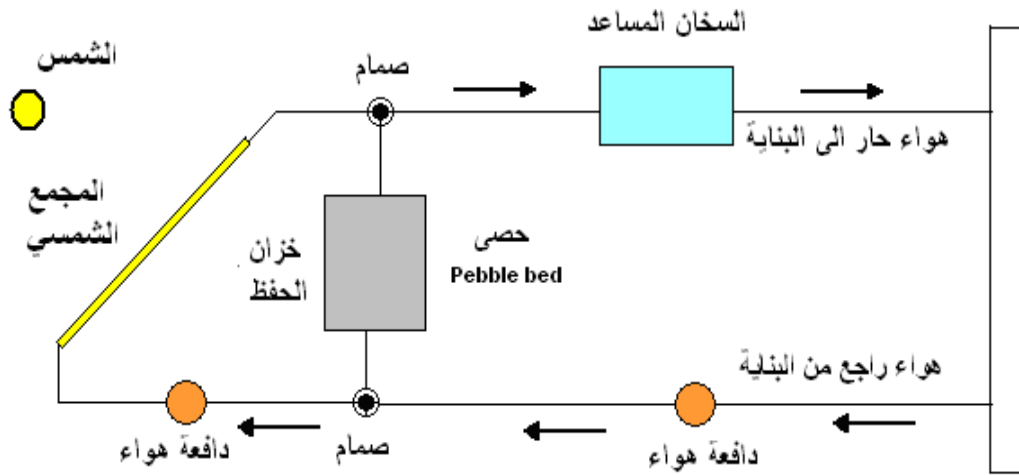
(ب)



(ت)

الشكل (2.10) أنواع مختلفة من المجمع الشمسي الخازن التي درست من قبل المؤلف

ومن الوسائل الأخرى للخرن هو حائط ترومب (الشكل 6.4) في الفصل الرابع الذي يتكون من حائط سميك من الكونكريت او الطين او من خليط من الحصى والحجر ويكون هذا الحائط في جهة الجنوب من المبنى المراد تدفئته ويغطى هذا الحائط بطبقة او طبقتين من الزجاج، حيث ينفذ الإشعاع الشمسي من خلال الزجاج و تنتقل هذه الحرارة إلى الهواء المحصور بين الزجاج و الحائط فتؤدي إلى رفع درجة حرارته و بذلك تقل كثافته و ينتقل إلى الحيز من الفتحة العلوية و يتم دخول كمية من الهواء البارد بدله من خلال الفتحة السفلية فيسخن مرة أخرى و ينتقل إلى الحيز، و هكذا تستمر العملية خلال النهار. وفي أثناء الليل يتم غلق الفتحات لمنع تسرب الحرارة إلى الخارج ، و بهذا يتم تفريغ الحرارة المخزونة في الحائط الى الحيز بواسطة الحمل والإشعاع.



شكل (3.10) منظومة تدفئة تستخدم الحصى كخازن للحرارة

3.1.2.10 التخزين بالحرارة الكامنة:

عند انصهار أي جسم صلب وتحواله الى سائل فان كمية كبيرة من الحرارة تمتص عند درجة حرارة ثابتة تسمى درجة حرارة الانصهار ،ويحدث العكس عند تجمد السائل، حيث تتحرر كمية من الحرارة عند نفس الدرجة ، وتسمى كمية الطاقة الحرارية التي تمتص عند الانصهار او التي تتحرر عند الأنجماد بالحرارة الكامنة. وقد تمكن الباحثين من الاستفادة من هذه الظاهرة في تخزين الطاقة، وهي أفضل من الخزن بالحرارة المحسوسة لصغر حيز التسخين فيها.

تصنف المواد المستخدمة للتخزين بالحرارة الكامنة إلى مركبات عضوية ومركبات لاعضوية وتتضمن المركبات اللاعضوية: الأملاح المائية الذائبة مثل سلفات الصوديوم المائية العشرية ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) والمسمى تجارياً ملح جليبرت ويستخدم أيضاً كلوريد الكالسيوم المائي السداسي ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ويوضح الجدول (2.10) بعض المواد المستخدمة في الخزن بالحرارة الكامنة.

درجة حرارة الانصهار ر °C	الكلفة \$/kg	الموصلية الحرارية W/m.°C		الحرارة النوعية J/kg.°C		الكثافة kg/m ³		حرارة الانصهار (kJ/kg)	وسط الخزن
		صلب	سائل	صلب	سائل	صلب	سائل		
27	0.07	1.09	0.54	1460	2130	1800	1560	190	CaCl ₂ .6H ₂ O
32	0.04	2.25	-	1760	3300	1460	1330	225	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O ملح جليبرت
47	0.15	0.14	-	2890	2510 0	820	770	209	شمع البرافين Sunco P-116
48	0.18	0.57	-	1460	2380	1650	-	219	Na ₂ SO ₄ .5H ₂ O
120	0.15	-	-	1590	2240	1560	-	169	MgCl ₂ .6H ₂ O

الجدول (2.10) بعض المواد المستخدمة في الخزن بالحرارة الكامنة

ومن أهم المشاكل التي تعترض هذه الطريقة هي ارتفاع سعر هذه المواد وتسببها بالتآكل وتحسب سعة الخزن بالحرارة الكامنة من المعادلة الآتية:

$$Q = m[Cp_s(T_{melt} - T_{min}) + h_{melt} + Cp_l(T_{max} - T_{melt})] \quad (10.12)$$

إذ إن:

$$M = \text{كتلة وسط التخزين (kg)}$$

$$Cp_s, Cp_l = \text{الحرارة النوعية لوسط التخزين بالحالة السائلة والصلبة على التوالي (kJ/kg)}$$

$$H_{melt} = \text{الحرارة الكامنة بالانصهار (J/kg)}$$

$$T_{melt} = \text{درجة انصهار الوسيط (}^\circ\text{C)}$$

$$T_{max}, T_{min} = \text{درجة الحرارة العظمى والصغرى للوسيط (}^\circ\text{C)}$$

2.2.10 الخزن الميكانيكي Mechanical storage:

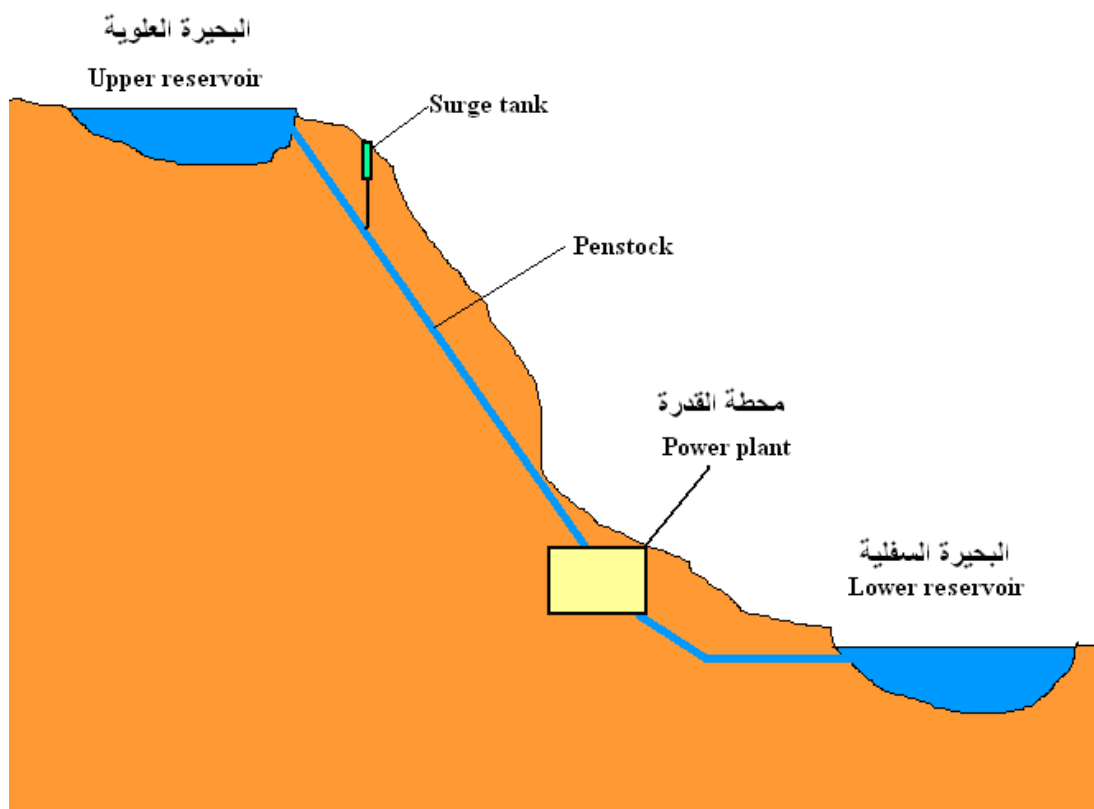
يتم في هذه الطريقة تحويل الطاقة الزائدة عن الحاجة في أوقات نقص الطلب على الطاقة إلى طاقة ميكانيكية بصور مختلفة وتوجد عدة أساليب لهذا التحويل منها:

1. بحيرات الخزن:

تعتبر هذه الطريقة من أكفأ طرق الخزن الميكانيكي وفيها يتم استخدام الطاقة الزائدة لضخ المياه من بحيرة إلى بحيرة أخرى ويوجد نوعين من هذه البحيرات هي:

أ. بحيرات الخزن فوق الأرضية Above-ground storage tank:

يتم في هذه البحيرات استخدام الطاقة الزائدة لضخ المياه من بحيرة سفلية إلى بحيرة عليا بواسطة مضخات خاصة كما في الشكل (4.10)، وفي أوقات زيادة الطلب على الطاقة يسمح للماء الموجود في البحيرة العليا بالتدفق إلى الأسفل وتدوير توربينات مائية مربوطة إلى مولدات كهربائية موجودة في الأسفل، ومن أهم متطلبات هذا النوع من الخزن هو توفر مرتفع طبيعي لغرض إنشاء البحيرة العلوية عليه.



الشكل (4.10) بحيرات الخزن فوق الأرضية

ب. بحيرات الخزن تحت الأرضية Under-ground storage tank:

يتم الاستفادة من التكهفات الموجودة في بعض المناطق او المناجم القديمة لإنشاء بحيرة سفلية، ويتم الاستفادة من الطاقة الكهربائية الفائضة لضخ المياه من البحيرة السفلى إلى العليا وفي أوقات الذروة يسمح للمياه في البحيرة العليا بالتدفق إلى الأسفل لتتمر على توربينات مائية مربوطة إلى مولدات كهربائية كما في الشكل (5.10) وهذه الطريقة ملائمة للمناطق التي لا تحتوي على مرتفعات طبيعية.

تحسب القدرة المتولدة من تدفق المياه من المعادلة الآتية:

$$P = \eta * \gamma * Q * H \quad (10.13)$$

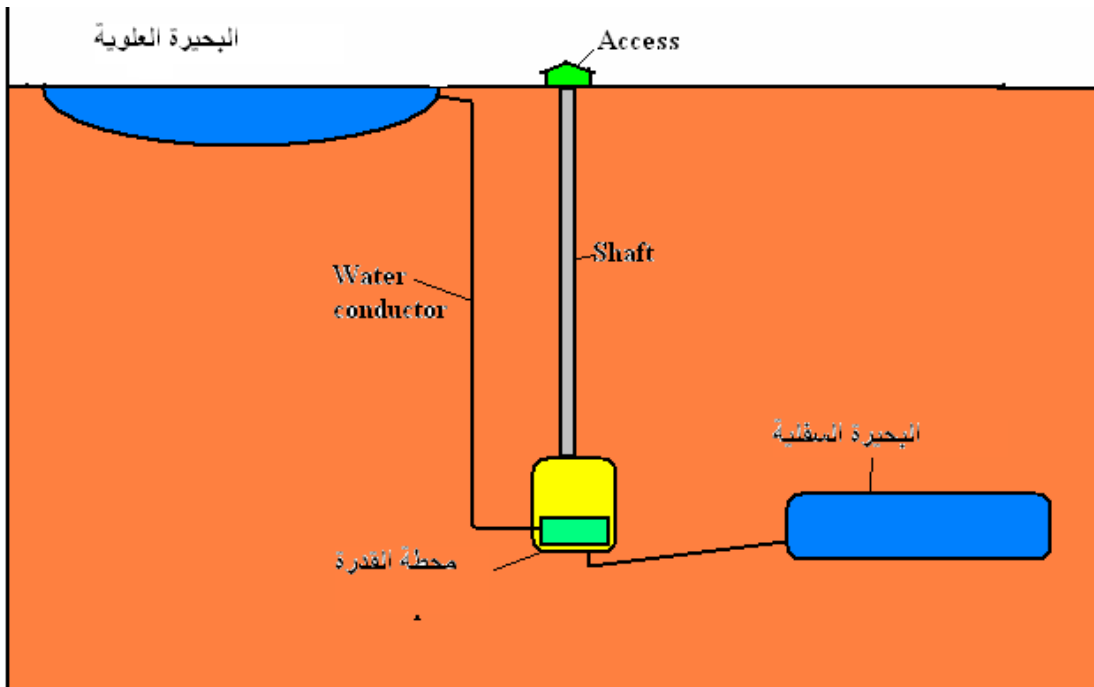
حيث ان:

η = الكفاءة (%)

H = ارتفاع المياه (m)

γ = 9810 (kg/m³) للماء

Q = التدفق الحجمي للمياه (m³/sec)



الشكل (5.10) بحيرات الخزن تحت الأرضية

2. الخزن بالهواء المضغوط:

تتضمن هذه الطريقة استعمال الطاقة الفائضة لضغط الهواء في خزانات كبيرة تحت الأرض إلى ضغوط عالية تصل إلى مئات الضغوط الجوية، ومن ثم استعمال هذا الهواء المضغوط لتشغيل توربينات موصولة مع مولدات كهربائية وحيث إن سعة هذه الخزانات تكون كبيرة في العادة فإنه يمكن أن يكون هناك مخزون من الطاقة كاف لتشغيل التوربينات ومولد الكهرباء لفترة طويلة تصل إلى أسبوع.

يبين الشكل (6.10) مخطط لمحطة طاقة تستخدم الهواء المضغوط كوسيط خزن، خلال فترة انخفاض الطلب على الطاقة، تستخدم الطاقة الفائضة الموجودة في الشبكة الكهربائية لتشغيل الضاغط (C) وضغط الهواء إلى حفرة في باطن الأرض (R) وخلال عملية الانضغاط هذه ترتفع درجة حرارة الهواء استناداً إلى القانون الآتي:

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (10.14)$$

حيث أن :

$T(^{\circ}C)$ = درجة الحرارة

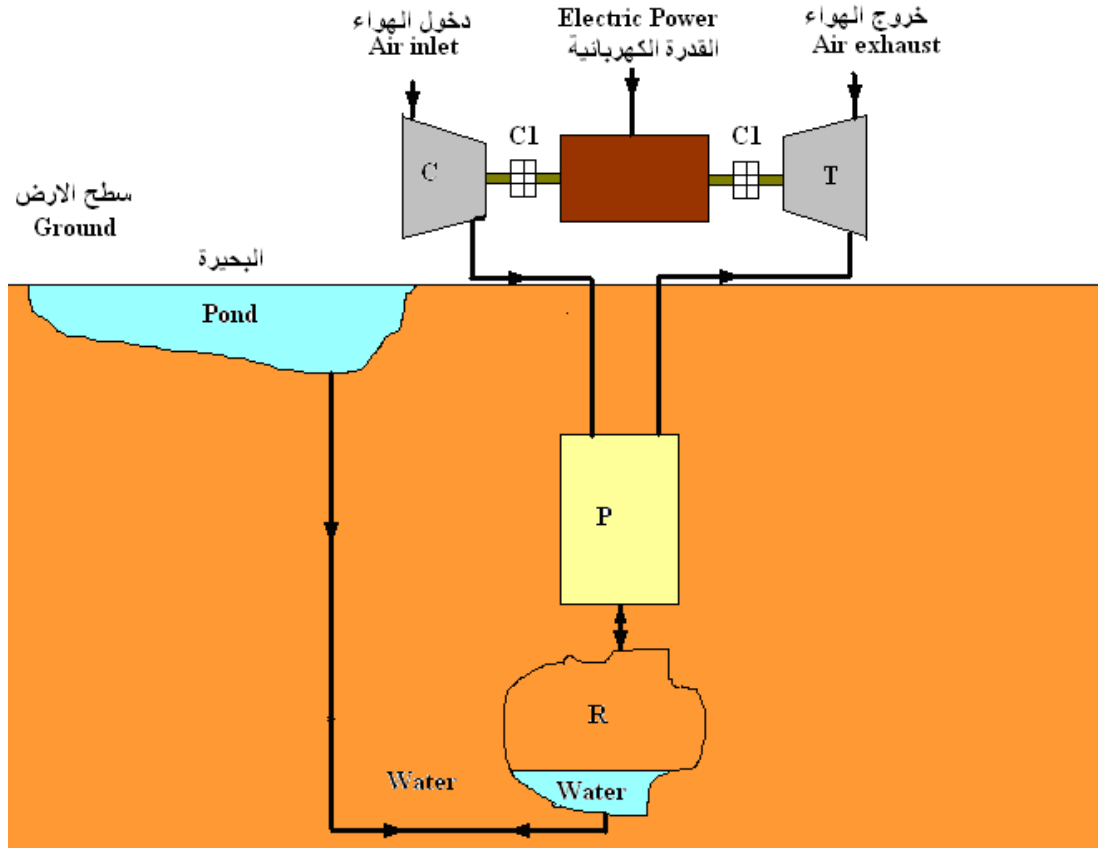
P (Pa) = الضغط

الحالة قبل وبعد الانضغاط = 1,2

n = الأس البولتروبي

تتم المحافظة على كمية الحرارة التي تم اكتسابها خلال عملية الانضغاط عن طريق إمرار الهواء المضغوط على خزان للحصى (P) Rocked storage لخزن الحرارة في الحصى. في أوقات الذروة يسمح للهواء بالتدفق خلال التوربين المربوط إلى مولد ومحرك مشترك (MG) لغرض توليد الكهرباء، تحتوي الحفرة (R) على كمية من الماء لغرض المحافظة على ضغط ثابت للهواء داخل الحفرة وبالتالي الحصول على توليد مستقر للطاقة الكهربائية. توجد محطة في ألمانيا تستخدم هذه التقنية لغرض خزن الطاقة في أوقات الذروة وتتكون من حفرة حجمها 300000 m^3 على عمق 650-800 m ويتم ضغط الهواء إلى 70 bar في أوقات انخفاض الطلب على الكهرباء ومن ثم يخلط هذا الهواء المضغوط مع الغاز

الطبيعي ويستخدم كوقود في غرفة احتراق ثم يمرر مزيج الاحتراق ليدور توربين غازي مربوط الى مولد كهربائي لتوليد الطاقة الكهربائية.



الشكل (6.10) مخطط لمحطة قدرة تستخدم الهواء المضغوط لخرن الطاقة

3. الخزن بالدولاب الطيار Fly wheel:

استخدم الدولاب الطيار في بعض المحركات الكبيرة للمساعدة على إبقاء السرعة الدورانية ثابتة المقدار تقريبا، لذا فان العزوم الخارجية الصغيرة لا تحدث تغييرا محسوسا في مقدار السرعة الدورانية لتلك المحركات لامتلاكها زخما زاويا كبيرا، كما بدأ الباحثون في الفترة الأخيرة استخدام الدولاب الطيار لغرض خزن الطاقة حيث تتناسب الطاقة المخزونة مع مربع السرعة بالشكل الآتي:

$$E = \frac{1}{2} * m * V^2$$

$$V = 2 * \pi * R * n = \text{السرعة الخطية للدولاب}$$

$$E = \frac{1}{2} * m * (2 * \pi * R * n)^2 = 2 * m * \pi^2 * R^2 * n^2 \quad (10.15)$$

إذ إن :

$E(J)$ = الطاقة المخزونة

$m (kg)$ = كتلة الدولاب الطيار

$R (m)$ = نصف قطر الدلاب الطيار

n (revolution/sec) = السرعة الدورانية للدولاب

وتكون كمية الطاقة المخزونة او المتحررة عند حدوث تغير في سرعة دوران الدولاب الطيار تساوي:

$$\Delta E = 2 * \pi^2 * m * R^2 * (n_2^2 - n_1^2) \quad (10.16)$$

إذ إن :

n_2 = السرعة النهائية للدولاب

n_1 = السرعة البدائية للدولاب

3.2.10 الخزن المغناطيسي Magnetic storage:

تعتبر هذه الطريقة من احدث التقنيات المستخدمة لخرن الطاقة الكهربائية المتولدة من مصادر الطاقات المتجددة، يتم في هذه الطريقة تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة مغناطيسية في ملفات مصنوعة من معادن فائقة التوصيل وذات مقاومة كهربائية صغيرة. يتم في هذه الطريقة إمرار تيار كهربائي عالي مرتفع على ملف يعمل على تحويل هذا التيار الى طاقة مغناطيسية وتحسب الطاقة المغناطيسية المخزونة من المعادلة الآتية:

$$E = \frac{1}{2} * L * I^2 \quad (10.17)$$

إذ ان:

$E (J)$ = الطاقة المغناطيسية المخزونة

L (Henry) = (Inductance) محاثة الملف

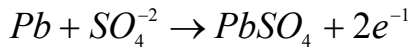
I (Ampere) = التيار الكهربائي

تعتمد محادثة الملف على الشكل الهندسي له، تعد هذه الطريقة من اكفا طرق خزن الطاقة لعدم الحاجة الى تحويل الطاقة إلى إشكال أخرى مثل الطاقة الميكانيكية وغيرها، ثم تحويلها الى طاقة كهربائية وبالتالي زيادة الخسائر الناتجة.

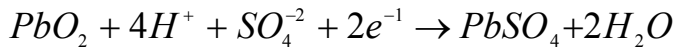
4.2.10 الخزن الكهربائي بالبطاريات Electrical Battery storage:

تلعب البطاريات دورا مهما في تشغيل محركات الاحتراق الداخلي وخزن طاقتها، ومن أهم هذه البطاريات هي بطارية الرصاص الحامضية Lead acid Battery والتي تتميز بانخفاض سعرها وتوفرها في الأسواق وكفاءتها العالية. التفاعل الأساسي لبطارية الرصاص الحامضية يكون بالشكل الآتي:

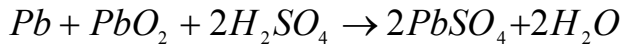
عند القطب السالب (الانود):



وعند القطب الموجب (الكاثود):

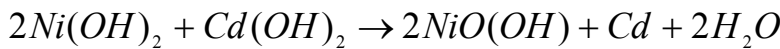


ويكون ملخص التفاعل داخل البطارية:



ومن اهم مساوئ هذا النوع من البطاريات هي القيمة المنخفضة لنسبة الطاقة الى الكتلة التي تجعل امر استخدامها لخزن كميات كبيرة من الطاقة غير ممكن.

حاول الباحثون التوصل إلى بطاريات ذات سعة خزن كبيرة وإحدى هذه البطاريات هي بطارية النيكل- كادميوم Nickel-cadmium battery والتفاعل الأساس لهذه البطارية هو:



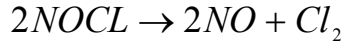
كما يوجد نوع اخر من البطاريات ذو كثافة طاقة عالية وهي بطارية الكبريت-الصوديوم Sulfur – Sodium battery والتي تعمل عند درجة حرارة 250 °C وتستخدم اوكسيد الألمنيوم كالكتروليت في البطارية وتستخدم هذه البطارية في السيارات الكهربائية.

5.2.10 الخزن الكيميائي Chemical storage:

تتضمن هذه الطريقة تحويل الطاقة الفائضة الى وقود كيميائي يمكن خزنه بسهولة ومن اهم هذه الأساليب هو إنتاج غاز الهيدروجين والذي يعتبر إحدى البدائل الجديدة للطاقة والذي

يحظى باهتمام واسع كوقود مستقبلي وكوريث لأنواع الوقود التقليدية، حيث يتميز بمجموعة من المزايا بالمقارنة مع الأنواع الأخرى وجرى التطرق إليه في الفصل السابع.

تتحلل بعض المركبات الكيميائية عند تعرضها إلى الإشعاع الشمسي ومن هذه المركبات مركب النيتروسكلورايد والذي يتحلل وفق المعادلة الآتية:



وعند استهلاك الطاقة فإن اتجاه التفاعل ينعكس إذ يتفاعل الكلور مع اوكسيد النتروجين ليكونا مركب النيتروسكلورايد مع توليد حرارة يمكن استخدامها للإغراض المختلفة.

ومن طرق الخزن الأخرى هو تحلل مركب الامونيوم بايوسلفيت بالشكل الآتي:



حيث تنتج الامونيا والتي يمكن جمعها عكسيا مع ملح مناسب في درجة حرارة مقاربة لدرجة حرارة المحيط في حين ان الماء وثالث اوكسيد الكبريت يتكثقان إلى سائل في درجة مقاربة إلى درجة حرارة المحيط.

أمثلة محلولة

مثال 1.10:

إذا كان ثمن منظومة تسخين مياه باستخدام الطاقة الشمسية 150 دولار ويعطي فائدة 50 دولار كل سنة بسبب التوفير في الطاقة الكهربائية المستهلكة ولمدة خمس سنوات حيث تستهلك المنظومة بعد السنة الخامسة. فإذا كان معدل الفائدة هو 8% . ما القيمة الحالية لجميع المبالغ المتوقعة الحصول عليها.

الحل:

القيمة الحالية للمبالغ المستقبلية P تساوي مجموع القيم الحالية لكل مبلغ من المبالغ الخمسة، أي:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = \sum_{i=1}^{i=5} P_i$$

$$P_1 = \frac{50}{(1 + 0.08)^1} = 46.3$$

$$P_2 = \frac{50}{(1 + 0.08)^2} = 42.87$$

$$P_3 = \frac{50}{(1 + 0.08)^3} = 39.69$$

$$P_4 = \frac{50}{(1 + 0.08)^4} = 36.75$$

$$P_5 = \frac{50}{(1 + 0.08)^5} = 34.03$$

القيمة الحالية للمبالغ المستقبلية P تساوي مجموع القيم الحالية لكل مبلغ من المبالغ الخمسة:

$$P = 199.64 \$$$

بما ان القيمة الحالية الكلية لجميع المبالغ المتوقعة الحصول عليها مستقبليا هو \$ 199.64. اذن الفائدة الحالية للاستثمار أو القيمة الحالية للاستثمار هي:

$$NPC = P - C$$

$$NPC = 199.64 - 150 = 49.64 \$$$

مثال 2.10:

احسب مقدار الدفعة السنوية المطلوب دفعها مقابل منظومة طاقة شمسية تم شرائها بقرض يسدد على مدى عشرين سنة وبفائدة مقدارها 8% وضمن المتطلبات الآتية:

الخواص	العامل
20 m ²	مساحة المجمعات الشمسية المستخدمة A _c
100	كلفة المجمع (\$/m ²)
6.25	كلفة الخزن (\$/m ²)
100	كلفة أنظمة السيطرة (\$)
200 + 5*A _c	كلفة الأجهزة المساعدة (مضخات، أنابيب، محركات، الخ)

الحل:

تحسب الكلفة الكلية لهذه المنظومة من جمع الكلف أعلاه:

$$S = 100*20 + 6.25*20 + 100 + [200+5*20]$$

$$S = 2525 \$$$

يحسب معامل استرجاع رأس المال من المعادلة الآتية:

$$CRF(i, t) = \left[\frac{i}{1 - (i + 1)^{-t}} \right]$$

$$CRF(0.08, 20) = \left[\frac{0.08}{1 - (0.08 + 1)^{-20}} \right] = 0.102$$

$$P_{ann} = 2525 * 0.102 = 257.55 \$/\text{year} \text{ (مقدار الدفعة السنوية)}$$

مثال 3.10:

استخدم ملح جليبرت Na₂SO₄.10H₂O في منظومة طاقة شمسية لتخزين الطاقة الفائضة، احسب كمية ملح جليبرت اللازمة لتخزين طاقة مقدارها 500 kW.hr اذا كان الملح في البداية عند درجة حرارة مقدارها 15 °C وارتفعت درجة حرارته الى 45 °C .

الحل:

تحسب كمية الحرارة من المعادلة (10.12) :

$$Q = [1760 * (45 - 32) + 22500 + 3300 * (32 - 15)] = 101.48 \text{ kJ/kg}$$

وتحسب كتلة وسيط التخزين من المعادلة الآتية:

$$m = \frac{400 * 3600}{101.48} = 14189.988 \text{ kg}$$

مثال 4.10:

منظومة طاقة شمسية تستخدم الماء كوسيط خزن، وكان حجم الوعاء 1 m^3 ومقدار التغير في درجة الحرارة 10°C . تم اقتراح استخدام شمع البرافين بدلا عن الماء كوسيط خزن. قارن بين الحجم الذي يشغله البرافين والحجم الذي يشغله الماء.

الحل:

تحسب كمية الحرارة المخزونة في الماء من المعادلة الآتية:

$$Q = m * Cp * \Delta T = \rho * V * Cp * \Delta T = 1000 * 1 * 4180 * 10 = 41800 \text{ kJ}$$

تحسب كمية الحرارة المخزونة في البرافين كالآتي:

$$Q = m_s * h_{melt}$$

$$m_s = \frac{Q}{h_{melt}} = \frac{41800}{209} = 200 \text{ kg}$$

$$V_p = \frac{m_p}{\rho_p} = \frac{200}{820} = 0.242 \text{ m}^3$$

وبمقارنة هذا الحجم الصغير مع حجم الماء نجد:

$$\frac{V_p}{V_w} = \frac{0.244}{1} = 24.4\%$$

مثال 5.10:

احسب كمية المياه المطلوبة لتوليد 2 MW لمدة يوم بفرض ان كفاءة التوربين 90% والعلو المؤثر 40 m .

الحل:

يحسب كمية التدفق من المعادلة الآتية:

$$Q = \frac{P}{\eta * \gamma * H} = \frac{2 * 10^6}{0.9 * 9810 * 40} = 5.663 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_{day} = 5.663 * 24 * 3600 = 0.4893 * 10^6 \text{ m}^3$$

مثال 6.10:

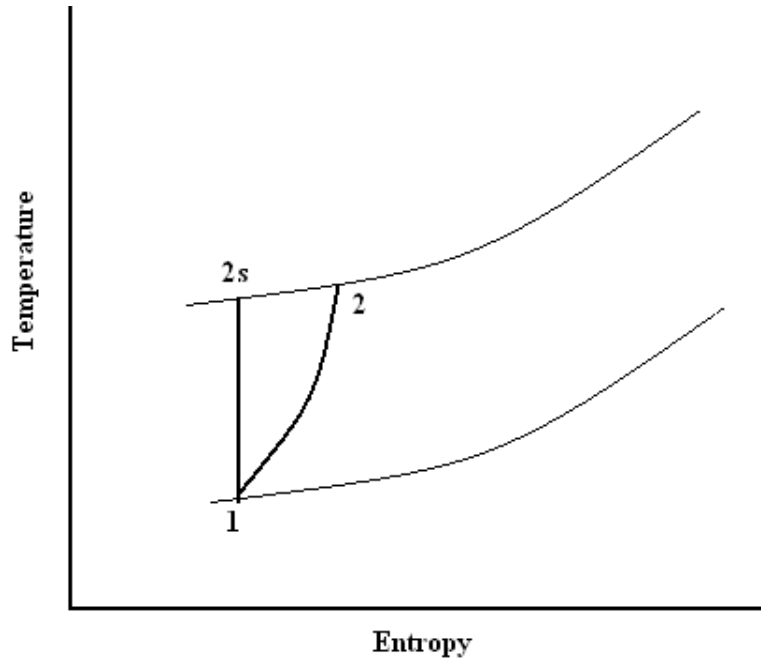
احسب التدفق الحجمي ودرجة حرارة الهواء المضغوط و حجم الخزين اللازم لتوليد 1500 MWh لمدة 7.5 hour، علما ان الهواء الداخل الى الضاغط تحت ضغط 1 bar ودرجة حرارة 20 °C ويخرج من الضاغط تحت ضغط مقداره 100 bar وكفاءة الضاغط البولتروبية 0.7 وكفاءة التوربين البولتروبية 0.6.

الحل:

تحسب كفاءة الضاغط من المعادلة الآتية:

$$0.7 = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

حيث ان 1، 2، 2s تمثل النقاط الموضحة في الشكل أدناه:



$$T_{2s} = T_1 * \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = (20 + 273) * \left(\frac{100}{1}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 1092 \text{ K} = 819 \text{ °C}$$

$$\therefore T_2 = \frac{819 - 20}{0.7} + 20 = 1162 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ولما كانت كفاءة التوربين 0.6 فان القدرة المجهزة من قبل الهواء اليه تساوي:

$$Storage.capacity = \frac{1500}{0.6} = 2500 \text{ MWh}$$

$$\text{Mass of air} = \frac{2500 * 10^6 * 3600}{1050 * (1162 - 20)} = 7.5 * 10^6 \text{ kg}$$

نحسب الحجم الكلي للهواء من القانون العام للغازات:

$$PV = MRT$$

$$V = \frac{7.5 * 10^6 * 284.75 * (20 + 273)}{10^7} = 62574 \text{ m}^3$$

$$\text{كمية التدفق الحجمي} = \frac{Volume}{time} = \frac{62575}{7.5 * 3600} = 2.3175 \text{ m}^3/\text{sec}$$

الملاحق

الملحق أ- أسئلة للمراجعة

الفصل الأول:

1. عرف الطاقات المتجددة و ما هي مميزاتها ومساوئها ؟
2. عدد أنواع المفاعلات النووية مع شرح موجز لكل منها؟
3. ما هو طول عمر الاحتياطي وما تأثيره على استمرارية توفر مصادر الطاقة؟
4. عدد خصائص مصادر الطاقة المتجددة؟
5. ضغط غاز بإجراء زائدي المقطع من ضغط مقداره 100 kPa وحجم 0.056 m^3 الى حجم مقداره 0.007 m^3 . احسب الضغط النهائي والشغل المنجز على الغاز.
6. مصنع بخاري يستخدم 3.045 طن من الفحم في الساعة، يدخل البخار الى التوربين وينتج قدرة مقدارها 410 kW. اذا كانت القيمة السعرية للفحم 28 MJ/kg، احسب الكفاءة الحرارية للمصنع.
7. في إجراء لا جرياني كانت الخسارة في الحرارة 1055 kJ والزيادة في الطاقة الداخلية 210 kJ، ما مقدار الشغل المنجز وهل كان الإجراء تمديدا ام انضغاطيا.
8. كمية من بخار الماء نسبة جفافه 0.7 يشغل حجما مقداره 0.197 m^3 تحت ضغط مقداره 1.4 MPa. إذا أبقينا الضغط ثابتا، احسب الحرارة التي يجب تجهيزها لجعل البخار جافا ونسبة الحرارة التي تظهر بصفة شغل خارجي، إذا أبقينا الآن الحجم ثابتا في حين تستخرج الحرارة حتى ينخفض الضغط الى 1.25 MPa جد نسبة الجفاف والحرارة المنتقلة من بخار الماء.
9. بخار ماء تحت ضغط مقداره 1.5 MPa يتكون من خليط من بخار ماء تحت ضغط مقداره 1.5 MPa ونسبة جفاف 0.9 ودرجة حرارة 210°C وبنسبة كتلة واحدة الى اثنين (2:1) خنق الخليط الى ان اصبح ضغطه 0.28 MPa احسب:
(أ) كثافة الخليط قبل الخنق. (ب) درجة حرارة البخار بعد الخنق.

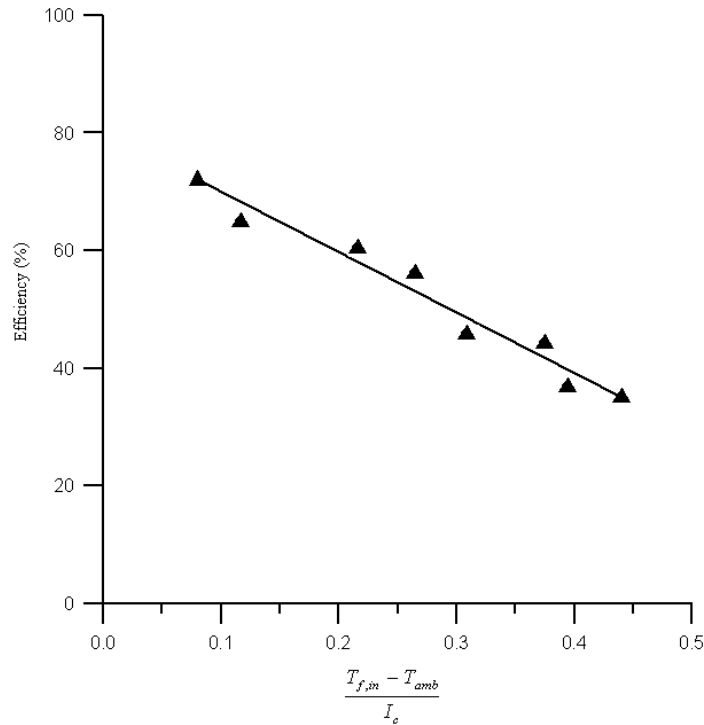
الفصل الثاني:

1. عرف الثابت الشمسي وما سبب تغيره مع الزمن ؟
2. ما المقصود بالإشعاع الشمسي المباشر والمنتشر ؟
3. اشرح زوايا الأرض-الشمس الرئيسية ؟
4. في أي الفصول تكون الأرض اقرب إلى الشمس وفي أي الفصول تكون الأرض ابعد عن الشمس؟
5. احسب زاوية ارتفاع الشمس في مدينة بغداد في الساعة التاسعة صباحا في الثاني عشر من شهر أيلول لعام 2006 واحسب وقت غروب الشمس في هذا اليوم.
6. احسب شدة الأشعة الشمسية الكلية على مجمع شمسي في مدينة الموصل، يميل بزاوية 45° مع الأفق ويواجه الجنوب في الساعة الرابعة عصرا بالتوقيت المحلي في 24 أيار لعام 2004 عند خط العرض $39^\circ 19'$ درجة شمالا.
7. احسب وقت غروب الشمس (وقت الإفطار) لشخص صائم يسكن مدينة السليمانية ($35^\circ 33'N, 45^\circ 26'E$) في الأول من شهر تشرين الأول لعام 2006.
8. جد وقت الغروب والشروق وساعات النهار المضيئة وزاوية السميت عند الظهر وعند الشروق والغروب لراصد في مدينة كربلاء ($32^\circ 36'N, 44^\circ 02'E$).
9. في 6 كانون الثاني في مدينة الرطبة ($33^\circ 02'N, 40^\circ 17'E$)، يلعب فريق كرة القدم في ساحة دائرية تحيط بها الأشجار لتشكل دائرة نصف قطرها 3.2 km وارتفاع الأشجار يبلغ 0.4 km. جد عدد ساعات النهار التي يستطيع فيها الفريق مواصلة تدريباته.
10. حدد خط العرض الحرج الذي يستمر عنده وبعده النهار طيلة الأربع والعشرين ساعة وذلك في 1 كانون الأول.

الفصل الثالث:

1. ما هي أنواع المجمعات الشمسية وما مميزات كل منها؟
2. ما فائدة الغطاء الزجاجي المستخدم في المجمعات الشمسية؟

3. اشرح دور ظاهرة الاحتباس الحراري في المجمعات الشمسية؟
4. احسب معامل فقدان الحرارة الكلي لمجمع ثنائي الغطاء الزجاجي وفق المواصفات الآتية:
- المسافة بين الصفيحة الماصة والغطاء الزجاجي (3 cm)
 - المسافة بين الغطاء الزجاجي الأول والثاني 3 cm.
 - ابتعاثية الصفيحة الماصة ε_p (0.9) وابتعاثية الصفيحة الماصة ε_p (0.88)
 - درجة حرارة الهواء المحيط T_a (275 K) وسرعة الرياح 3 m/s
 - سمك العازل الحراري الخلفي (5 cm) والموصلية الحرارية للعازل الخلفي 0.04 W/m.K
 - معدل درجة حرارة الصفيحة الماصة T_c (340 K) وميلان المجمع الشمسي β (45°)
5. يبين الشكل أدناه منحنى الكفاءة لمجمع شمسي مستوي أحادي الغطاء الزجاجي، فإذا كانت نفاذية الغطاء الزجاجي 0.9 وامتصاصية الصفيحة الماصة 0.92 ، احسب:



- معامل طرح الحرارة للمجمع F_R .
- معامل فقدان الحرارة الكلي للمجمع U_c .
- عامل كفاءة المجمع F' ، اذا كان معدل التدفق الكتلي خلال المجمع 68.04 kg/hr ومساحة الصفيحة الماصة 0.929 m^2 .
- 6. صفيحة ماصة مصنوعة من النحاس (380 W/m.K) بسمك 1 mm ، اوجد المسافة التي يلزم وضع الأنابيب عليها للحصول على كفاءة زعنفه η_f مقدارها 95% إذا كان معامل فقدان الحرارة الكلي يساوي $3 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ وقطر الأنبوب الخارجي 2 cm.
- 7. اوجد معادلة منحنى الكفاءة للمجمع الشمسي الاسطواني المركز المذكور في المثال (3.3).

الفصل الرابع:

1. اشرح مبدأ عمل السخانات ذات التدوير الطبيعي؟
2. ما هي المنظومات المستخدمة في تدفئة البيوت باستخدام الطاقة الشمسية، عددها مع ذكر مميزات كل منظومة.
3. اشرح دورات التبريد الامتصاصية باستخدام الطاقة الشمسية مع ذكر الاختلافات الرئيسية عن دورات التبريد الامتصاصية الأخرى؟
4. ما هي البحيرات الشمسية وما هي مجالات استخدامها؟
5. ما هي مجال الاستفادة من الطاقة الشمسية للإغراض الزراعية وما هي محدداتها؟
6. اشرح مبدأ تقطير المياه باستخدام الطاقة الشمسية و ما هي المحددات التي تمنع انتشارها للاستخدامات المنزلية؟
7. اكتب تقرير عن أهم أنظمة المستقبل المركز الحالية المستخدمة لتوليد الطاقة الكهربائية؟
8. ما هي أهم العوائق أمام انتشار استخدام أنظمة الطاقة الشمسية بواسطة الأقمار الصناعية؟

الفصل الخامس:

1. اشرح ميكانيكية حركة الرياح في المناطق القريبة من الشواطئ؟
2. ما هي مميزات و مساوئ التوربينات ذات المحور الشاقولي؟
3. لماذا لا تتجاوز كفاءة التوربينات الريحية أكثر من 60%؟ برهن ذلك.

4. تتغير الرياح التي تهب في منطقة ما خلال اليوم على شكل موجة جيبية ذات سعة (Amplitude) مقدارها 9.313 m/sec ، يوجد توربين في هذه المنطقة يبلغ قطر مروحته 30.5 m ويعمل هذا التوربين ضمن الحدود التالية:

$$\text{Cut in} = 3.386 \text{ m/sec}$$

$$\text{Rating} = 6.773 \text{ m/sec}$$

$$\text{Cut out} = 10.16 \text{ m/sec}$$

احسب ما يأتي:

- القدرة المولدة بالكيلوواط-ساعة خلال اليوم، إذا كانت الكفاءة الكلية للتوربين ومنظومة التوليد هي 0.34.

- معدل سرعة طاقة الرياح.

5. تهب رياح على منطقة ما بسرعة 15 m/sec مقاسة عند الارتفاع القياسي وبالظروف الجوية الآتية (ضغط 1 ضغط جوي ودرجة حرارة 20 °C) احسب :

- كثافة الطاقة عند الارتفاع القياسي.

- كثافة الطاقة عند ارتفاع 60 m فوق سطح الأرض.

- كثافة الطاقة العظمى المولدة من قبل توربين ذو مروحة قطرها 60 m.

6. توربين ريحي ذو قطر 100 m، يعمل طوال يوم ما وخلال هذا اليوم تتغير سرعة الرياح وفق العلاقة الآتية:

$$V(\theta) = V_m \sin(\pi\theta / 24)$$

حيث ان θ تمثل الوقت بالساعة، وقيمة الثابت V_m تساوي 10⁵ m/sec وكثافة الهواء 1.2 kg/m³، احسب ما يأتي:

■ الطاقة العظمى للتوربين خلال اليوم بالكيلوواط-ساعة

■ معدل سرعة الرياح.

الفصل السادس:

1. اذكر مساوئ ومميزات النواعير المائية؟
2. اشرح مع المخططات مبدأ عمل نواعير الدفع السفلي والعلوي؟
3. ما هي مميزات التوربينات المائية؟
4. ما الفرق في مبدأ العمل بين التوربينات الدفعية والتوربينات التفاعلية؟
5. ناعور مائي مسير بالدفع بالأمامي يبلغ قطره 7.5 m وعرض وعمق الدلو هو 1.2 m و 50 cm على التوالي ويعمل تحت ارتفاع ماء مؤثر مقداره 20 m ، فإذا كان مقدار امتلاء كل دلو حوالي 1/3 من حجمه وكفاءة الناعور 60% احسب القدرة الكلية المولدة من قبل الناعور.
6. توربين من نوع Pelton يعمل تحت ارتفاع مؤثر يبلغ 550 m ، فعلى فرض ان معامل السرعة $C_v = 0.98$ و نسبة السرعة $v = 0.41 * V$ احسب سرعة الجزء الدوار.
7. محطة كهرومائية يبلغ ارتفاع الماء المؤثر فيها 172m ومقدار التدفق الحجمي 190 liter/sec ويستخدم فيها توربين مائي نوع Pelton ذات سرعة دورانية مقدارها 1000 r.p.m وزاوية الريشة 40° ، احسب مقدار القدرة المولدة والكفاءة الهيدروليكية.
8. توربين فرانسس ذو كفاءة كلية مقدارها $\eta_o = 75\%$ مصمم لتوليد قدرة مقدارها 180 kW ويعمل تحت ارتفاع ماء مؤثر مقداره 9 m وتبلغ والسرعة المحيطية تساوي $3.47 * \sqrt{H}$ وسرعة الجريان $1.15 * \sqrt{H}$ على التوالي. فإذا كان التوربين يدور بسرعة دورانية مقدارها 300 r.p.m و نسبة الخسائر الهيدروليكية في التوربين 12% احسب:

■ زاوية توجيه الريشة عند الدخول (α)

■ زاوية الريشة عند الدخول (θ)

■ قطر التوربين عند الدخول D

9. توربين Francis ، قطره الخارجي 90 cm ويدور بسرعة دورانية مقدارها 200 r.p.m ويعمل تحت ارتفاع ماء مؤثر مقداره 9.5 m. سرعة الجريان فيه ثابتة وتبلغ قيمتها 3 m/sec. فإذا كان الجريان قطريا وعرض التوربين 15 cm احسب:

- الشغل المنجز
- الكفاءة الهيدروليكية
- القدرة المولدة

10. توربين كابلان يعمل تحت ارتفاع ماء مقداره 5.5 m وينتج قدرة مقدارها 10000 kW بكفاءة كلية مقدارها $\eta_o = 85\%$ وبالمواصفات الآتية:

$$\frac{v}{\sqrt{2gH}} = 2.10, \frac{V_f}{\sqrt{2gH}} = 0.71, D_b = 0.33D$$

احسب قطر وسرعة التوربين.

11. احسب السرعة الدورانية وقطر الجزء الدوار لتوربين من نوع كابلان وبالمواصفات الآتية: القدرة المولدة = 15400 kW، الارتفاع المؤثر = 4.3 m، الكفاءة الكلية = 90 % ،

$$D_b = 0.3D, \frac{v}{\sqrt{2gH}} = 2, \frac{V_f}{\sqrt{2gH}} = 0.65,$$

12. محطة قدرة كهرومائية مقامة على سد معين يتوفر فيها الماء بتدفق حجمي مقداره $260 \text{ m}^3/\text{sec}$ وارتفاع الماء المؤثر الموجود يبلغ 1.7 m، فإذا فرضنا إن التوربين يدور بسرعة مقدارها 50 r.p.m وبكفاءة كلية تبلغ 82.5 %، احسب عدد التوربينات المستخدمة إذا كانت السرعة النوعية لها 890.

الفصل السابع:

1. اشرح مبدأ عمل الدورات التي تستخدم لتوليد الطاقة الكهربائية بالاستفادة من الفرق في درجة حرارة المحيطات وما هي الأماكن الملائمة لإنشاء هذه المحطات؟
2. ما هي الكفاءة الحرارية لمحطة توليد كهرباء تستخدم حرارة مياه المحيطات عندما تكون درجة حرارة مياه السطح 33°C ودرجة حرارة العمق 5°C ؟

3. كيف تحدث ظاهرة المد والجزر؟
4. اشرح منظومات استخلاص الطاقة من حركة المد والجزر؟
5. ما سبب تكون الأمواج؟
6. ما هي المنظومات التي تستخدم لاستخلاص الطاقة من الأمواج؟ اشرحها بالتفصيل.
7. تستلم مياه البحر في منطقة ما، إشعاع شمسي ذو كثافة مقدارها 650 W/m^2 ، فإذا كان معامل الامتصاص مقداره $\mu = 0.4 \text{ m}^{-1}$ احسب:
 - معدل الطاقة الممتصة لكل وحدة حجم عند السطح وعلى عمق 1 m من سطح الماء.
 - مقدار المسافة أسفل سطح البحر التي يحدث فيها امتصاص 99.99% من الطاقة الشمسية الساقطة.
8. محطة طاقة بحرية تعمل بنظام الدورة المفتوحة تعمل في منطقة تصل درجة حرارة سطح الماء 25°C ودرجة حرارة الأعماق 15°C وتنتج طاقة إجمالية مقدارها 1 MW، أحسب:
 - التدفق الكتلي للبخر بـ kg/sec .
 - التدفق الكتلي للماء الساخن إذا انخفضت درجة حرارته خلال المبخر 2°C .
 - التدفق الكتلي للماء البارد إذا انخفضت درجة حرارته خلال المكثف 2°C .
 - قطر أنبوب الماء البارد إذا كانت سرعة الماء البارد خلال الأنابيب لا تتعدى 2 m/sec .
9. محطة قدرة بحرية تعمل بنظام الدورة المفتوحة، تستعمل كمية مياه دافئة مقدارها 1260 kg/s ودرجة حرارتها 21°C ، تبلغ درجة حرارة المبخر 19°C وضغط المكثف 1.724 kPa وكفاءة التوربين البولتروبية 0.84 وكفاءة التوليد الإجمالية 0.87، احسب:
 - التدفق الكتلي للبخر الداخل الى التوربين.
 - كفاءة الدورة.
 - قطر أنبوب المياه الباردة والتي درجة حرارتها 13.5°C وسرعتها 0.3046 m/s .

10. محطة قدرة من ذوات الدورة المغلقة (Anderson cycle) تولد طاقة مقدارها 150 MW مصممة للعمل في موقع معين وسط البحر وتستخدم الامونيا كمائع تشغيل، يدخل بخار الامونيا المشيع الى التوربين عند 21°C ويكثف عند 10°C . يبلغ مقدار الانخفاض في درجة حرارة الماء الساخن في المبادل الحراري ومقدار الارتفاع في درجة حرارة الماء البارد في المكثف 8°C لكل منها، اذا كانت كفاءة التوربين البولتروبية 0.80 وكفاءة التوليد الإجمالية 0.88 ، احسب:

- التدفق الكتلي لبخار الامونيا الداخل الى التوربين.
- التدفق الكتلي للماء البارد والساخن الداخل والخارج من المحطة.
- كفاءة الدورة.

11. يستخدم البروبان كمائع تشغيل لمحطة طاقة بحرية تعتمد دورة اندرسون كنظام لها. يدخل بخار البروبان المشيع الى التوربين عند 21°C ليتمدد داخله ويدخل بعد ذلك إلى المكثف عند 10°C ، يدخل ماء البحر الدافئ الى المبادل الحراري بتدفق كتلي مقداره 100800 kg/s ودرجة حرارة 28°C ويخرج منه عند 23°C ، تشكل القدرة المستهلكة في المضخات و الأجهزة المساعدة الأخرى حوالي 2% من القدرة الكلية المنتجة، فاذا كانت كفاءة التوربين البولتروبية 0.80 وكفاءة التوليد الإجمالية 0.88 ، احسب:

- التدفق الكتلي لبخار البروبان الداخل الى التوربين.
- التدفق الكتلي للماء البارد الخارج من المحطة.
- كفاءة الدورة.

12. احسب كمية الطاقة المتولدة لمحطة أحادية الخزان أحادية المفعول تعمل على طاقة المد والجزر، فإذا كانت مساحة خزان حفظ المياه أثناء المد 28 km^2 وكثافة ماء البحر 1025 kg/m^3 وارتفاع المد 10 m ويتوقف التوربين عندما ينخفض مستوى الماء إلى 2.7 m ، احسب كمية الطاقة المتولدة بوحدات kW-hour اذا كانت كفاءة التوليد 0.73.

13. احسب الكمية الطاقة المتولدة لمحطة أحادية الخزان ثنائية المفعول تعمل على طاقة المد والجزر ويمكن التعبير عن تغير سطح الماء في الخزان بالعلاقة $0.0625R(\theta_2 - \theta_1)$ ، فإذا كانت مساحة خزان حفظ المياه أثناء المد حوالي 10000 km^2 وكثافة ماء البحر 1025 kg/m^3 وارتفاع المد $R=12 \text{ m}$ وقيمة الثابت a هي 0.0625 h^{-1} وفترة التوليد الأولى $\theta_1 = 1.5 \text{ h}$ وفترة التوليد الثانية $\theta_2 = 4.5 \text{ h}$. احسب كمية الطاقة المتولدة.

14. موجة قادمة من المحيط بارتفاع 2.5 m وطولها الموجي 60 m ، فإذا كان عمق المحيط 10 m وكثافة مياه البحر 1025 kg/m^3 ، أحسب:

- طول المدرات الأفقية والعمودية لحركة المياه (Vertical and horizontal semi axis) عند السطح وعلى عمق 5 m .
- كثافة القدرة للموجة لكل متر من طول الموجة.

الفصل الثامن:

1. ما هو أصل طاقة باطن الأرض؟
2. تكون المناطق الملائمة لإنشاء محطات الطاقة الجيوحرارية مناطق ذات نشاط بركاني، وضح ذلك؟
3. ما الفرق بين أنظمة البخار الجاف والماء الساخن من حيث توليد الطاقة وأيهما أفضل في توليد الطاقة الكهربائية؟
4. ما هي الطرق المستخدمة لاستخلاص الطاقة من حقول الصخور الجافة الساخنة؟
5. ما هي الاستخدامات المباشرة للطاقة الجيوحرارية؟
6. ما هي الآثار البيئية الناتجة عن استخدام مصادر الطاقة الجيوحرارية؟
7. يتواجد بئر للبخار الجاف في منطقة ما قادر على تجهيز بخار مشبع إلى محطة جيوحرارية بتدفق كتلي 2500 kg/s وبدرجة حرارة 215°C ، يدخل البخار إلى التوربين بعد أن يتعرض إلى عملية خنق بضغط مقداره 6 bar ، يعمل المكثف عند ضغط 0.4 bar ويستلم ماء بارد بدرجة حرارة 26°C قادم من أبراج التبريد ، فإذا علمت أن كفاءة التوربين البولتروبية 0.8 وكفاءة منظومة التوليد 0.875 ، احسب:

- السعة الكلية للحقل بوحدات واط اذا كانت نسبة البخار المستنزف عن طريق مضخة نفث البخار تبلغ 1% وتستهلك الأجهزة المساعدة للمحطة نسبة 25% من طاقتها.
 - كفاءة المحطة.
 - كمية الماء اللازمة للتبريد في المكثف.
8. محطة جيوحرارية تعمل بنظام البخار أوميضي كما في الشكل (8.5) تستخدم ماء ساخن مسحوب من الأرض بدرجة حرارة 204.4°C وضغط الفاصل فيها 1034 kPa، تحتوي المحطة على مكثف من نوع التماس المباشر ضغطه 34.47 kPa، فإذا علمت إن كفاءة التوربين البولتروبية 0.75 و القدرة المنتجة من المحطة 10 MW ، احسب:
- التدفق الكتلي للبخار الداخل الى التوربين.
 - التدفق الكتلي للماء الخارج من البئر.
 - التدفق الكتلي للماء الراجع الى الارض.
9. محطة جيوحرارية تعمل بنظام البخار أوميضي الثنائي كما في الشكل (8.6) تستخدم ماء ساخن مسحوب من الأرض بدرجة حرارة 226°C وضغط الفاصل الاول فيها 1034 kPa، وضغط الفاصل الثاني 557 kPa، تحتوي المحطة على مكثف من نوع التماس المباشر ضغطه 34.47 kPa، فإذا علمت إن كفاءة التوربينات البولتروبية المستخدمة في المحطة هي 0.75 و القدرة المنتجة من المحطة 10 MW ، احسب:
- التدفق الكتلي للبخار الداخل الى التوربين.
 - التدفق الكتلي للماء الخارج من البئر.
 - التدفق الكتلي للماء الراجع إلى الأرض. (قارن النتائج مع المسألة (8))
10. محطة جيوحرارية مزدوجة (Binary cycle) تستخدم غاز الفريون Freon-12 كمائع تشغيل (الشكل 9.7)، يدخل الماء الساخن المالح بتدفق كتلي 630 kg/s وبدرجة حرارة 138°C الى مبادل حراري من نوع الأنبوب والغلاف Shell and tube heat exchanger ويخرج منه بدرجة حرارة مقدارها 43.33°C ليعاد حقنه مرة أخرى إلى باطن الأرض. يخرج بخار الفريون المشبع من المبادل الحراري بدرجة حرارة مقدارها 110°C ليتمدد خلال توربين ذي كفاءة

مقدارها 0.7 الى مكثف عند ضغط 884.189 kPa ، فاذا كانت كفاءة منظومة التوليد 0.9 وكفاءة مضخة التكثيف (Condensate pump) هي 0.65، احسب:

- التدفق الكتلي لبخار الفريون الداخل إلى التوربين.
- قدرة وكفاءة المحطة.

11. محطة جيواحرارية مزدوجة (Binary cycle) ذات قدرة 10 MW تستخدم غاز الامونيا كمائع تشغيل (الشكل 9.7)، يدخل الماء الساخن المالح بدرجة حرارة 160°C الى مبادل حراري ويخرج منه بدرجة حرارة مقدارها 49°C ليعاد حقنه مرة أخرى إلى باطن الأرض. يخرج بخار الامونيا من المبادل الحراري بدرجة حرارة مقدارها 110°C وضغط 1378.96 kPa ليتمدد خلال توربين ذي كفاءة مقدارها 0.7 الى مكثف عند ضغط 827.376 kPa ، فإذا كانت كفاءة منظومة التوليد 0.8 ، احسب:

- الشغل المنجز خلال التوربين والدورة.
- التدفق الكتلي لبخار الامونيا الداخل إلى التوربين.
- التدفق الكتلي للماء المسحوب من الأرض.
- قدرة وكفاءة المحطة.

الفصل التاسع:

1. عرف طاقة الكتلة الإحيائية.
2. ما المقصود بمحاصيل الطاقة.
3. ما هي مميزات استخدام الخشب كوقود.
4. ما هو الغاز الحيوي؟ وكيف يتم إنتاجه من مصادر الكتلة الإحيائية.
5. ما هي طرق استخلاص الطاقة من النفايات.
6. ما هي عملية التحلل الحراري.
7. ما أهمية استخدام الهيدروجين كوقود.
8. ما هي طرق إنتاج الهيدروجين المستخدمة حالياً.
9. ما هي استعمالات الهيدروجين في الصناعة.

10. عدد انواع خلايا الوقود مع شرح بسيط لكل منها.

الفصل العاشر:

1. ما القيمة الحالية لقرض مقداره \$1000 تم دفعه لشراء منظومة طاقة ومطلوب تسديده بعد 6 سنوات، إذا كان معدل الفائدة %7 ؟

2. احسب مقدار الدفعة السنوية المطلوب دفعها مقابل منظومة طاقة شمسية تم شرائها بقرض مقداره \$6000 يسدد على مدى عشرين سنة وبفائدة مقدارها %8.

3. ما هي أنواع الخزن الميكانيكي؟

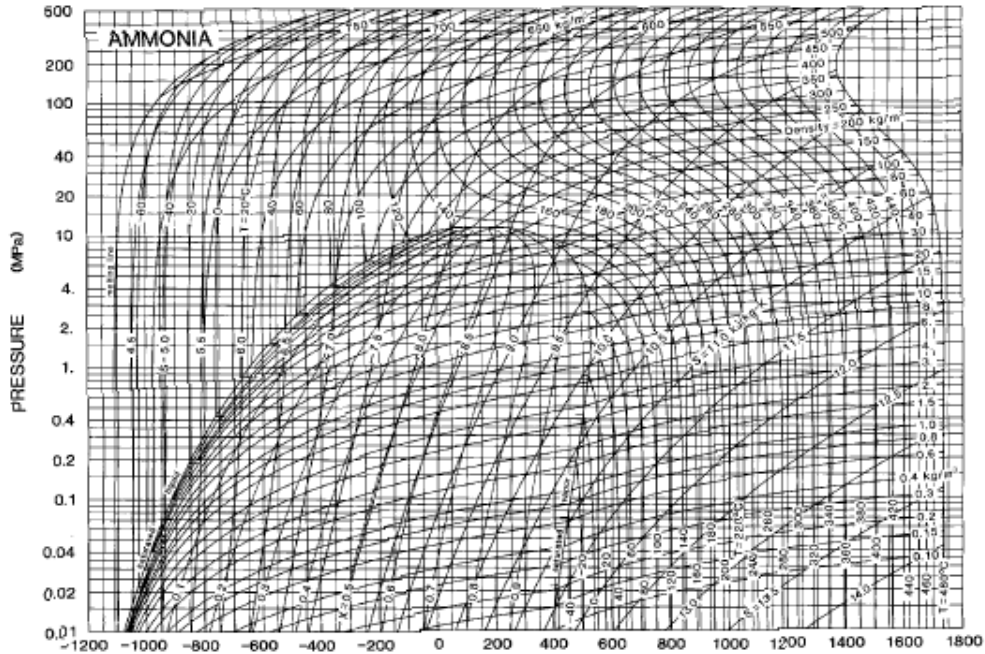
4. كيف يتم استخدام البطاريات لخزن الطاقة؟

5. اذا كانت الحرارة التي يمكن تجميعها في يوم صحو من المجمع الشمسي تبلغ 11.3 MJ/m^2 ، احسب حجم الماء اللازم لتخزين تلك الطاقة إذا كان الارتفاع في درجة حرارة الماء لا يتعدى 15°C .

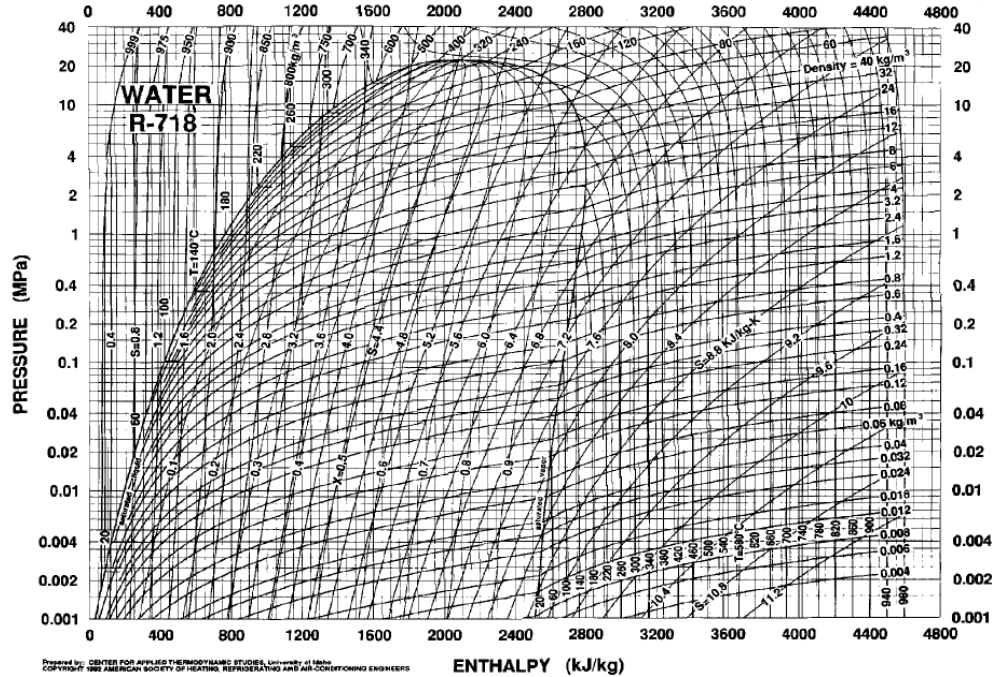
6. محطة توليد كهرباء قدرتها 50 MW، احسب حجم البحيرة اللازمة للتخزين الميكانيكي للطاقة الناتجة خلال عشرة ايام بضخ الماء خلال علو مؤثر قدره 120 m. يمكن فرض الكفاءة الكلية لمحطة الضخ هي %80، احسب كمية الطاقة الكهربائية المستعادة عند رجوع الماء الى البحيرة السفلى خلال توربين مائي المربوط الى مولد كهربائي اذا كانت كفاءة مجموعة التوربين والمولد %75.

7. شباك يستقبل إشعاع شمسي مقداره 89683.5 kJ احسب كمية الماء اللازمة لخزن هذه الطاقة بخزان ذو درجة تغير مقدارها 10°C ؟

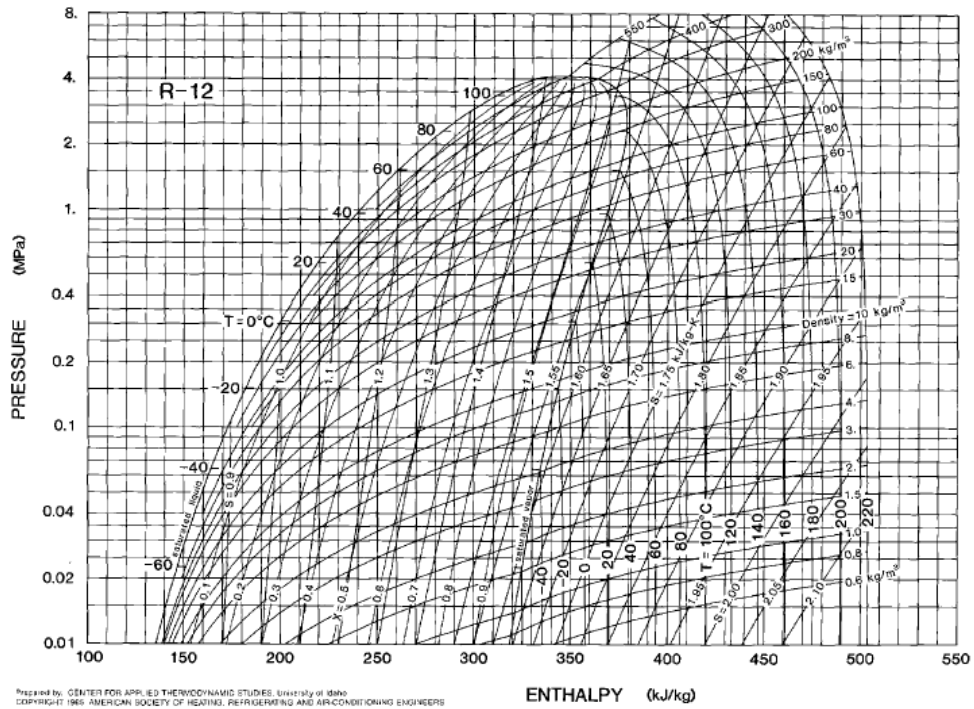
الملحق – ب- الجداول



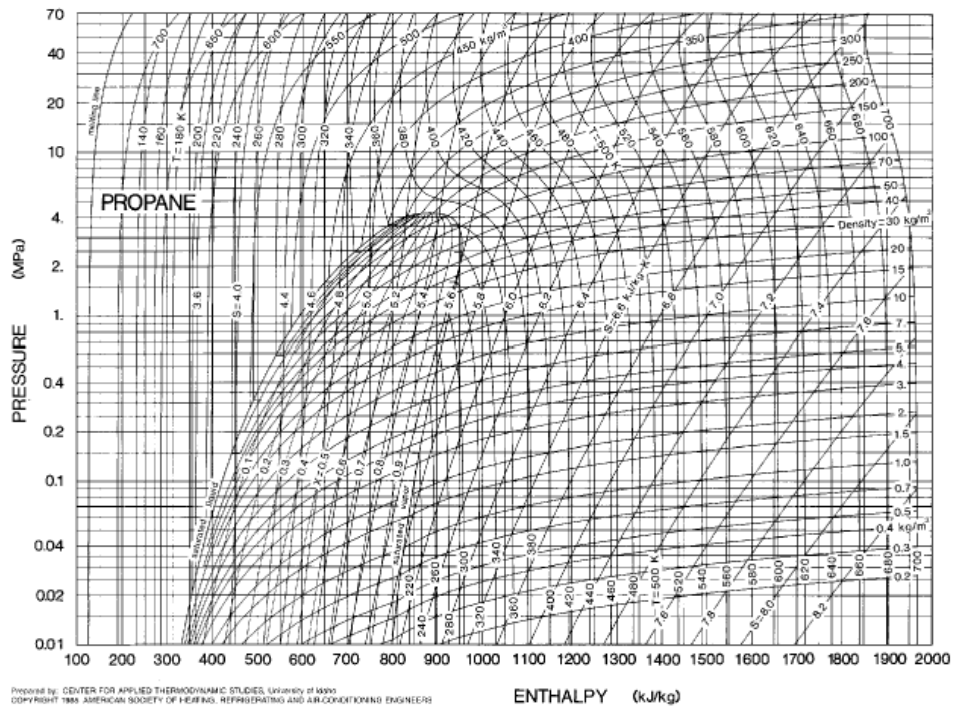
شكل (1) مخطط الضغط – الانثالبية للامونيا



شكل (2) مخطط الضغط – الانثالبية للماء



شكل (3) مخطط الضغط – الانثالبية للفریون-12



شكل (4) مخطط الضغط – الانثالبية للبروبان

Temp.* °C	Absolute Pressure, MPa	Density, kg/m ³	Volume, m ³ /kg	Enthalpy, kJ/kg		Entropy, kJ/(kg·K)		Specific Heat c_p , kJ/(kg·K)			Velocity of Sound, m/s		Viscosity, μPa·s		Thermal Cond., mW/(m·K)		Surface Tension, mN/m	Temp.* °C
				Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor		
-77.66	0.00604	733.9	15.732	-147.36	1342.85	-0.4930	7.1329	—	1.988	1.335	—	356	505.8	6.86	—	12.83	—	-77.66
-70.00	0.01089	725.3	9.0520	-111.74	1357.04	-0.3143	6.9179	—	2.008	1.337	—	362	460.4	7.06	—	13.65	42.44	-70.00
-60.00	0.02185	713.9	4.7166	-67.67	1375.00	-0.1025	6.6669	—	2.047	1.341	—	370	391.8	7.33	—	14.68	40.17	-60.00
-50.00	0.04081	702.0	2.6300	-24.17	1392.17	0.0968	6.4444	—	2.102	1.346	—	377	333.1	7.61	—	15.72	37.91	-50.00
-40.00	0.07168	689.9	1.5535	19.60	1408.41	0.2885	6.2455	4.395	2.175	1.352	1538	384	287.0	7.90	601.4	16.79	35.65	-40.00
-38.00	0.07970	687.4	1.4068	28.41	1411.54	0.3260	6.2082	4.405	2.192	1.353	1533	385	279.1	7.96	597.3	16.99	35.20	-38.00
-36.00	0.08844	684.9	1.2765	37.24	1414.62	0.3634	6.1717	4.417	2.210	1.355	1529	386	271.5	8.02	593.2	17.20	34.76	-36.00
-34.00	0.09795	682.5	1.1603	46.09	1417.66	0.4005	6.1359	4.427	2.229	1.356	1525	387	264.3	8.08	589.1	17.41	34.31	-34.00
-33.33b	0.10133	681.6	1.1241	49.08	1418.67	0.4129	6.1240	4.430	2.235	1.357	1524	388	261.9	8.10	587.8	17.48	34.16	-33.33
-32.00	0.10826	680.0	1.0566	54.97	1420.65	0.4374	6.1008	4.437	2.248	1.358	1521	388	257.4	8.13	585.1	17.62	33.86	-32.00
-30.00	0.11944	677.5	0.96377	63.86	1423.60	0.4741	6.0654	4.448	2.268	1.360	1517	389	250.7	8.19	581.0	17.83	33.41	-30.00
-28.00	0.13153	675.0	0.88062	72.78	1426.51	0.5105	6.0327	4.458	2.289	1.361	1514	390	244.4	8.25	576.9	18.04	32.97	-28.00
-26.00	0.14459	672.5	0.80595	81.72	1429.36	0.5467	5.9997	4.469	2.310	1.363	1510	391	238.3	8.31	572.9	18.26	32.52	-26.00
-24.00	0.15866	670.0	0.73877	90.68	1432.17	0.5828	5.9672	4.479	2.332	1.365	1506	392	232.4	8.37	568.8	18.49	32.07	-24.00
-22.00	0.17382	667.4	0.67822	99.66	1434.93	0.6186	5.9354	4.490	2.355	1.368	1501	393	226.8	8.43	564.8	18.72	31.63	-22.00
-20.00	0.19011	664.9	0.62356	108.67	1437.64	0.6542	5.9041	4.501	2.379	1.370	1497	394	221.3	8.49	560.7	18.96	31.18	-20.00
-18.00	0.20760	662.3	0.57413	117.69	1440.30	0.6896	5.8734	4.512	2.404	1.372	1492	395	216.1	8.55	556.7	19.21	30.74	-18.00
-16.00	0.22634	659.8	0.52936	126.74	1442.91	0.7248	5.8433	4.523	2.429	1.375	1487	396	211.0	8.61	552.6	19.47	30.29	-16.00
-14.00	0.24640	657.2	0.48874	135.82	1445.47	0.7599	5.8137	4.534	2.455	1.377	1482	397	206.1	8.67	548.6	19.74	29.85	-14.00
-12.00	0.26785	654.6	0.45182	144.91	1447.97	0.7947	5.7846	4.545	2.482	1.380	1476	397	201.4	8.73	544.5	20.01	29.41	-12.00
-10.00	0.29075	652.0	0.41823	154.03	1450.42	0.8294	5.7559	4.556	2.510	1.383	1470	398	196.8	8.79	540.5	20.29	28.97	-10.00
-8.00	0.31517	649.3	0.38761	163.18	1452.81	0.8638	5.7278	4.568	2.538	1.386	1463	399	192.3	8.85	536.5	20.59	28.52	-8.00
-6.00	0.34117	646.7	0.35966	172.35	1455.15	0.8981	5.7001	4.580	2.567	1.389	1456	400	188.0	8.91	532.4	20.89	28.08	-6.00
-4.00	0.36882	644.0	0.33411	181.54	1457.43	0.9323	5.6728	4.592	2.597	1.393	1449	401	183.8	8.97	528.3	21.20	27.64	-4.00
-2.00	0.39821	641.3	0.31073	190.76	1459.65	0.9662	5.6460	4.604	2.628	1.396	1441	401	179.7	9.03	524.3	21.51	27.20	-2.00
0.00	0.42941	638.6	0.28929	200.00	1461.81	1.0000	5.6196	4.617	2.660	1.400	1433	401	175.8	9.09	520.2	21.84	26.76	0.00
2.00	0.46248	635.9	0.26962	209.27	1463.91	1.0336	5.5936	4.630	2.692	1.404	1424	402	171.9	9.15	516.2	22.17	26.32	2.00
4.00	0.49749	633.2	0.25154	218.57	1465.94	1.0671	5.5679	4.643	2.726	1.408	1415	402	168.2	9.21	512.1	22.50	25.88	4.00
6.00	0.53454	630.4	0.23491	227.89	1467.91	1.1004	5.5426	4.656	2.760	1.413	1406	403	164.6	9.27	508.0	22.85	25.45	6.00
8.00	0.57370	627.6	0.21959	237.24	1469.82	1.1335	5.5177	4.670	2.795	1.417	1396	403	161.0	9.33	503.9	23.19	25.01	8.00
10.00	0.61504	624.8	0.20545	246.62	1471.66	1.1666	5.4931	4.683	2.831	1.422	1387	403	157.6	9.40	499.8	23.55	24.57	10.00
12.00	0.65865	622.0	0.19240	256.03	1473.43	1.1994	5.4688	4.698	2.868	1.427	1376	404	154.2	9.46	495.7	23.90	24.14	12.00
14.00	0.70461	619.1	0.18034	265.46	1475.13	1.2321	5.4448	4.712	2.906	1.433	1366	404	150.9	9.52	491.6	24.27	23.70	14.00
16.00	0.75301	616.2	0.16917	274.93	1476.75	1.2647	5.4212	4.727	2.945	1.439	1355	404	147.8	9.58	487.5	24.63	23.27	16.00
18.00	0.80392	613.3	0.15882	284.43	1478.30	1.2972	5.3977	4.742	2.985	1.445	1343	404	144.6	9.64	483.3	25.00	22.83	18.00
20.00	0.85744	610.4	0.14923	293.96	1479.78	1.3295	5.3746	4.758	3.027	1.451	1332	404	141.6	9.71	479.2	25.38	22.40	20.00
22.00	0.91364	607.5	0.14032	303.52	1481.18	1.3617	5.3517	4.774	3.069	1.458	1320	405	138.7	9.77	475.0	25.75	21.96	22.00
24.00	0.97262	604.5	0.13204	313.11	1482.49	1.3937	5.3290	4.791	3.113	1.465	1308	405	135.8	9.83	470.9	26.13	21.53	24.00
26.00	1.0345	601.5	0.12434	322.73	1483.72	1.4257	5.3066	4.808	3.158	1.473	1295	405	133.0	9.90	466.7	26.52	21.10	26.00
28.00	1.0993	598.4	0.11717	332.39	1484.87	1.4575	5.2844	4.825	3.204	1.481	1283	405	130.3	9.96	462.5	26.91	20.67	28.00
30.00	1.1671	595.4	0.11048	342.08	1485.93	1.4892	5.2623	4.843	3.252	1.489	1270	405	127.6	10.02	458.3	27.30	20.24	30.00
32.00	1.2381	592.3	0.10424	351.81	1486.90	1.5208	5.2405	4.862	3.301	1.498	1257	404	125.0	10.09	454.1	27.70	19.81	32.00
34.00	1.3123	589.1	0.09842	361.58	1487.78	1.5523	5.2188	4.881	3.352	1.507	1243	404	122.5	10.15	449.9	28.10	19.38	34.00
36.00	1.3898	586.0	0.09297	371.38	1488.56	1.5837	5.1972	4.901	3.405	1.517	1230	404	120.0	10.22	445.6	28.51	18.95	36.00
38.00	1.4708	582.8	0.08788	381.23	1489.24	1.6149	5.1759	4.922	3.459	1.527	1216	404	117.6	10.29	441.4	28.92	18.53	38.00
40.00	1.5553	579.5	0.08311	391.11	1489.82	1.6461	5.1546	4.943	3.516	1.538	1202	404	115.2	10.35	437.1	29.34	18.10	40.00
42.00	1.6434	576.3	0.07864	401.03	1490.30	1.6772	5.1334	4.965	3.574	1.549	1188	403	112.9	10.42	432.8	29.76	17.68	42.00
44.00	1.7352	573.0	0.07445	411.00	1490.67	1.7083	5.1124	4.989	3.635	1.562	1173	403	110.7	10.49	428.5	30.20	17.25	44.00
46.00	1.8308	569.7	0.07051	421.01	1490.92	1.7392	5.0914	5.013	3.698	1.574	1159	402	108.5	10.56	424.2	30.64	16.83	46.00
48.00	1.9303	566.3	0.06682	431.07	1491.07	1.7701	5.0705	5.039	3.764	1.588	1144	402	106.4	10.63	419.9	31.09	16.40	48.00
50.00	2.0339	562.9	0.06334	441.18	1491.09	1.8009	5.0497	5.066	3.832	1.602	1129	401	104.3	10.70	415.6	31.54	15.98	50.00
52.00	2.1415	559.4	0.06007	451.33	1491.00	1.8316	5.0289	5.095	3.903	1.617	1114	401	102.2	10.78	411.2	32.01	15.56	52.00
54.00	2.2534	555.9	0.05699	461.54	1490.78	1.8623	5.0082	5.124	3.977	1.633	1099	400	100.2	10.85	406.8	32.49	15.14	54.00
56.00	2.3696	552.4	0.05409	471.80	1490.43	1.8929	4.9875	5.156	4.055	1.650	1083	399	98.3	10.93	402.4	32.98	14.72	56.00
58.00	2.4903	548.8	0.05136	482.12	1489.94	1.9235	4.9667	5.190	4.136	1.668	1068	399	96.4	11.00	398.0	33.49	14.30	58.00
60.00	2.6154	545.2	0.04878	492.50	1489.32	1.9541	4.9460	5.225	4.221	1.687	1052	398	94.5	11.08	393.6	34.00	13.88	60.00
62.00	2.7452	541.5	0.04634	502.94	1488.55	1.9846	4.9252	5.263	4.310	1.707	1036	397	92.7	11.16	389.1	34.54	13.47	62.00
64.00	2.8798	537.7	0.04404	513.45	1487.63	2.0151	4.9044	5.303	4.404	1.728	1020	396	90.9	11.24	384.6	35.09	13.05	64.00
66.00	3.0193	534.0	0.04186	524.03	1486.56	2.0456	4.8836	5.346	4.502	1.751	1004	395	89.1	11.32	380.1	35.66	12.64	66.00
68.00	3.1637	530.1	0.03980	534.68	1485.33	2.0762	4.8626	5.392	4.606	1.775	987	394	87.4	11.41				

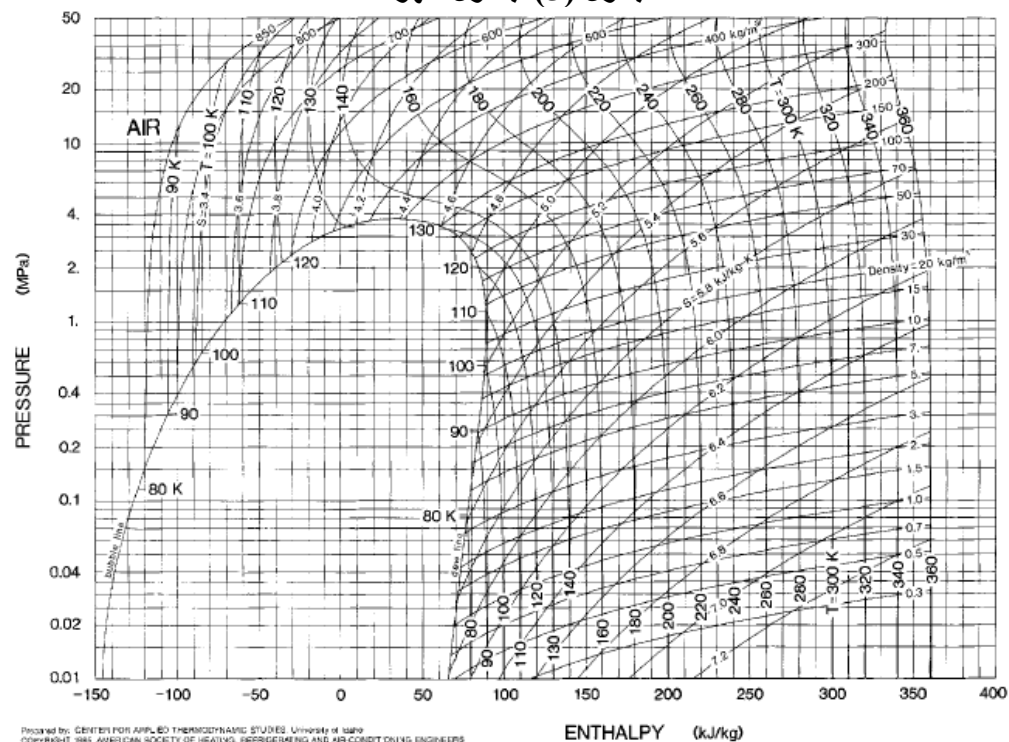
Temp,*	Absolute Pressure	Density, kg/m ³	Volume, m ³ /kg	Enthalpy, kJ/kg		Entropy, kJ/(kg·K)		Specific Heat c _p , kJ/(kg·K)		Velocity of Sound, m/s		Viscosity, μPa·s		Thermal Cond. mW/(m·K)		Surface Tension, mN/m	Temp,*	
°C	MPa	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor		°C	
0.01a	0.00061	999.8	205.98	0.0	2500.5	0.0000	9.1541	4.229	1.868	1.330	1401.	409.	1702.4	9.22	561.0	17.07	75.65	0.01
5.00	0.00087	999.9	147.02	21.0	2500.7	0.0763	9.0236	4.200	1.871	1.330	1426.	413.	1519.1	9.34	570.5	17.34	74.95	5.00
10.00	0.00123	999.7	106.32	42.0	2518.9	0.1510	8.8086	4.188	1.874	1.330	1448.	417.	1306.6	9.46	580.0	17.62	74.22	10.00
15.00	0.00171	999.1	77.900	62.9	2528.0	0.2242	8.7792	4.184	1.878	1.330	1467.	420.	1138.2	9.59	589.3	17.92	73.49	15.00
20.00	0.00234	998.2	57.777	83.8	2537.2	0.2962	8.6651	4.183	1.882	1.330	1483.	424.	1002.1	9.73	598.4	18.23	72.74	20.00
25.00	0.00317	997.0	43.356	104.8	2546.3	0.3670	8.5558	4.183	1.887	1.330	1497.	427.	890.5	9.87	607.1	18.55	71.98	25.00
30.00	0.00425	995.6	32.895	125.7	2555.3	0.4365	8.4513	4.183	1.892	1.330	1509.	431.	797.7	10.01	615.4	18.88	71.20	30.00
35.00	0.00563	994.0	25.221	146.6	2564.4	0.5050	8.3511	4.183	1.898	1.330	1520.	434.	719.6	10.16	623.2	19.23	70.41	35.00
40.00	0.00738	992.2	19.528	167.5	2573.4	0.5723	8.2550	4.182	1.905	1.330	1528.	437.	653.2	10.31	630.5	19.60	69.60	40.00
45.00	0.00959	990.2	15.263	188.4	2582.3	0.6385	8.1629	4.182	1.912	1.330	1535.	441.	596.3	10.46	637.3	19.97	68.78	45.00
50.00	0.01234	988.0	12.037	209.3	2591.2	0.7037	8.0745	4.182	1.919	1.330	1541.	444.	547.0	10.62	643.5	20.36	67.95	50.00
55.00	0.01575	985.6	9.5730	230.2	2600.0	0.7680	7.9896	4.182	1.928	1.331	1546.	447.	504.1	10.77	649.2	20.77	67.10	55.00
60.00	0.01993	983.2	7.6746	251.2	2608.8	0.8312	7.9080	4.183	1.937	1.331	1549.	450.	466.5	10.93	654.3	21.18	66.24	60.00
65.00	0.02502	980.5	6.1996	272.1	2617.5	0.8935	7.8295	4.184	1.947	1.331	1552.	453.	433.4	11.10	658.9	21.62	65.37	65.00
70.00	0.03118	977.8	5.0447	293.0	2626.1	0.9549	7.7540	4.187	1.958	1.332	1553.	456.	404.0	11.26	663.1	22.07	64.49	70.00
75.00	0.03856	974.8	4.1333	314.0	2634.6	1.0155	7.6813	4.190	1.970	1.333	1553.	459.	377.8	11.42	666.7	22.53	63.59	75.00
80.00	0.04737	971.8	3.4088	334.9	2643.1	1.0753	7.6112	4.194	1.983	1.334	1553.	462.	354.5	11.59	670.0	23.01	62.68	80.00
85.00	0.05781	968.6	2.8289	355.9	2651.4	1.1343	7.5436	4.199	1.996	1.335	1551.	465.	333.4	11.76	672.8	23.50	61.76	85.00
90.00	0.07012	965.3	2.3617	376.9	2659.6	1.1925	7.4784	4.204	2.011	1.336	1549.	467.	314.5	11.93	675.3	24.02	60.82	90.00
95.00	0.08453	961.9	1.9828	398.0	2667.7	1.2501	7.4154	4.210	2.027	1.338	1546.	470.	297.4	12.10	677.4	24.55	59.88	95.00
100.00b	0.10132	958.4	1.6736	419.1	2675.7	1.3069	7.3545	4.217	2.044	1.339	1542.	473.	281.8	12.27	679.1	25.09	58.92	100.00
105.00	0.12079	954.8	1.4200	440.2	2683.6	1.3630	7.2956	4.224	2.062	1.341	1537.	475.	267.7	12.44	680.6	25.66	57.95	105.00
110.00	0.14324	951.0	1.2106	461.3	2691.3	1.4186	7.2386	4.232	2.082	1.344	1532.	478.	254.8	12.61	681.7	26.24	56.97	110.00
115.00	0.16902	947.1	1.0370	482.5	2698.8	1.4735	7.1833	4.240	2.103	1.346	1525.	480.	243.0	12.78	682.6	26.84	55.98	115.00
120.00	0.19848	943.2	0.89222	503.8	2706.2	1.5278	7.1297	4.249	2.126	1.349	1518.	482.	232.1	12.96	683.2	27.46	54.97	120.00
125.00	0.23201	939.1	0.77089	525.1	2713.4	1.5815	7.0777	4.258	2.150	1.352	1511.	485.	222.2	13.13	683.6	28.10	53.96	125.00
130.00	0.27002	934.9	0.66982	546.4	2720.4	1.6346	7.0272	4.268	2.176	1.355	1503.	487.	213.0	13.30	683.7	28.76	52.94	130.00
135.00	0.31203	930.6	0.58234	567.8	2727.2	1.6873	6.9780	4.278	2.203	1.359	1494.	489.	204.5	13.47	683.6	29.44	51.91	135.00
140.00	0.36119	926.2	0.50898	589.2	2733.8	1.7394	6.9302	4.288	2.233	1.363	1484.	491.	196.6	13.65	683.3	30.13	50.86	140.00
145.00	0.41529	921.7	0.44643	610.8	2740.2	1.7910	6.8836	4.300	2.265	1.368	1475.	493.	189.3	13.82	682.8	30.85	49.81	145.00
150.00	0.47572	917.1	0.39287	632.3	2746.4	1.8421	6.8381	4.312	2.299	1.373	1464.	495.	182.5	13.99	682.1	31.59	48.75	150.00
155.00	0.54299	912.3	0.34680	654.0	2752.3	1.8927	6.7937	4.325	2.335	1.378	1453.	496.	176.2	14.16	681.1	32.35	47.68	155.00
160.00	0.61766	907.5	0.30709	675.6	2758.0	1.9429	6.7503	4.338	2.374	1.384	1441.	498.	170.3	14.34	680.0	33.12	46.60	160.00
165.00	0.70029	902.6	0.27270	697.4	2763.3	1.9927	6.7078	4.353	2.415	1.391	1429.	499.	164.8	14.51	678.6	33.92	45.51	165.00
170.00	0.79147	897.5	0.24283	719.3	2768.5	2.0421	6.6662	4.369	2.460	1.398	1416.	501.	159.6	14.68	677.1	34.74	44.41	170.00
175.00	0.89180	892.3	0.21679	741.2	2773.3	2.0910	6.6254	4.386	2.507	1.406	1403.	502.	154.7	14.85	675.3	35.58	43.31	175.00
180.00	1.0019	887.1	0.19403	763.2	2777.8	2.1397	6.5853	4.403	2.558	1.414	1389.	503.	150.2	15.02	673.4	36.44	42.20	180.00
185.00	1.1225	881.7	0.17406	785.4	2782.0	2.1879	6.5459	4.423	2.612	1.423	1375.	504.	145.9	15.20	671.2	37.32	41.08	185.00
190.00	1.2542	876.1	0.15650	807.6	2785.8	2.2358	6.5071	4.443	2.670	1.433	1360.	505.	141.8	15.37	668.8	38.23	39.95	190.00
195.00	1.3976	870.5	0.14102	829.9	2789.4	2.2834	6.4689	4.465	2.731	1.443	1345.	506.	138.0	15.54	666.2	39.15	38.82	195.00
200.00	1.5536	864.7	0.12732	852.4	2792.5	2.3308	6.4312	4.489	2.797	1.455	1329.	506.	134.4	15.71	663.4	40.10	37.68	200.00
205.00	1.7229	858.9	0.11517	875.0	2795.3	2.3778	6.3940	4.515	2.867	1.467	1313.	507.	130.9	15.89	660.3	41.08	36.54	205.00
210.00	1.9062	852.8	0.10438	897.7	2797.7	2.4246	6.3572	4.542	2.943	1.480	1296.	507.	127.6	16.06	657.1	42.07	35.39	210.00
215.00	2.1042	846.6	0.09475	920.5	2799.7	2.4712	6.3208	4.572	3.023	1.495	1279.	507.	124.5	16.23	653.5	43.10	34.24	215.00
220.00	2.3178	840.3	0.08615	943.5	2801.3	2.5175	6.2847	4.604	3.109	1.510	1262.	508.	121.6	16.41	649.8	44.15	33.08	220.00
225.00	2.5479	833.9	0.07846	966.7	2802.4	2.5637	6.2488	4.638	3.201	1.527	1243.	507.	118.7	16.59	645.7	45.24	31.91	225.00
230.00	2.7951	827.2	0.07155	990.0	2803.1	2.6097	6.2131	4.675	3.300	1.546	1225.	507.	116.0	16.76	641.4	46.35	30.75	230.00
235.00	3.0604	820.5	0.06534	1013.5	2803.3	2.6556	6.1777	4.715	3.405	1.565	1206.	507.	113.4	16.94	636.9	47.51	29.58	235.00
240.00	3.3447	813.5	0.05974	1037.2	2803.0	2.7013	6.1423	4.759	3.519	1.587	1186.	506.	110.9	17.12	632.0	48.70	28.40	240.00
245.00	3.6488	806.4	0.05469	1061.2	2802.1	2.7470	6.1070	4.806	3.641	1.610	1166.	505.	108.5	17.31	626.8	49.94	27.23	245.00
250.00	3.9736	799.1	0.05011	1085.3	2800.7	2.7926	6.0717	4.857	3.772	1.636	1145.	504.	106.2	17.49	621.4	51.22	26.05	250.00
255.00	4.3202	791.5	0.04596	1109.7	2798.8	2.8382	6.0363	4.912	3.914	1.664	1124.	503.	103.9	17.68	615.6	52.57	24.88	255.00
260.00	4.6894	783.8	0.04219	1134.4	2796.2	2.8838	6.0009	4.973	4.069	1.694	1102.	502.	101.7	17.88	609.4	53.98	23.70	260.00
265.00	5.0823	775.9	0.03876	1159.3	2793.0	2.9294	5.9652	5.039	4.236	1.728	1080.	500.	99.6	18.07	603.0	55.47	22.52	265.00
270.00	5.4999	767.7	0.03564	1184.6	2789.1	2.9751	5.9293	5.111	4.418	1.765	1057.	499.	97.5	18.28	596.1	57.04	21.35	270.00
275.00	5.9431	759.2	0.03278	1210.1	2784.5	3.0209	5.8931	5.191	4.617	1.806	1033.	497.	95.5	18.48	588.9	58.72	20.17	275.00
280.00	6.4132	750.5	0.03016	1236.1	2779.2	3.0669	5.8565	5.279	4.835	1.851	1009.	494.	93.6	18.70	581.4	60.52	19.00	280.00
285.00	6.9111	741.5	0.02777	1262.4	2773.0	3.1131	5.8195	5.377	5.077	1.902	984.	492.	91.6	18.92	573.5	62.47	17.84	285.00
290.00	7.4380	732.2	0.02556	1289.1	2765.9	3.1595	5.7818	5.485	5.345	1.959	959.	489.	89.7	19.15	565.2	64.59	16.68	290.00
295.00	7.9952	722.5	0.02354	1316.3	2757.8	3.2062	5.7434	5.607	5.644	2.024	933.	486.	87.8	19.39	556.6	66.91	15.52	295.00
300.00																		

Temp., °C	Absolute Pressure, MPa	Density, kg/m ³	Volume, m ³ /kg	Enthalpy, kJ/kg		Entropy, kJ/(kg·K)		Specific Heat c_p , kJ/(kg·K)			Velocity of Sound, m/s		Viscosity, μ Pa·s		Thermal Cond., mW/(m·K)		Surface Tension, mN/m	Temp., °C
				Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor		
-90.00	0.00288	1652.4	4.3671	121.33	310.39	0.6526	1.6849	0.835	0.470	1.176	812.	121.	—	—	—	—	24.91	-90.00
-80.00	0.00623	1626.0	2.1227	129.72	314.99	0.6972	1.6564	0.843	0.487	1.171	802.	124.	—	—	—	—	23.35	-80.00
-70.00	0.01235	1599.2	1.1226	138.19	319.69	0.7400	1.6334	0.850	0.504	1.168	786.	127.	569.0	—	—	—	21.82	-70.00
-60.00	0.02272	1572.0	0.63710	146.72	324.44	0.7809	1.6147	0.856	0.521	1.166	765.	129.	508.9	8.78	99.8	5.50	20.30	-60.00
-50.00	0.03925	1544.3	0.38362	155.32	329.23	0.8203	1.5996	0.863	0.537	1.165	741.	131.	453.8	9.39	95.9	6.02	18.81	-50.00
-45.00	0.05053	1530.3	0.30346	159.66	331.63	0.8395	1.5933	0.868	0.546	1.166	728.	132.	428.3	9.68	94.0	6.27	18.08	-45.00
-40.00	0.06426	1516.1	0.24281	164.01	334.03	0.8583	1.5875	0.873	0.554	1.166	714.	133.	404.2	9.95	92.1	6.52	17.35	-40.00
-35.00	0.08077	1501.7	0.19633	168.40	336.42	0.8769	1.5824	0.878	0.563	1.167	699.	134.	381.5	10.22	90.2	6.78	16.63	-35.00
-30.00	0.10044	1487.2	0.16029	172.81	338.81	0.8951	1.5779	0.884	0.572	1.169	684.	134.	360.2	10.48	88.3	7.03	15.91	-30.00
-29.80b	0.10132	1486.6	0.15899	172.99	338.90	0.8959	1.5777	0.884	0.572	1.169	684.	134.	359.4	10.49	88.2	7.04	15.88	-29.80
-28.00	0.10929	1481.4	0.14817	174.58	339.76	0.9024	1.5762	0.886	0.575	1.170	678.	135.	352.1	10.58	87.5	7.13	15.62	-28.00
-26.00	0.11872	1475.5	0.13716	176.35	340.70	0.9096	1.5745	0.888	0.579	1.171	672.	135.	344.1	10.68	86.8	7.23	15.34	-26.00
-24.00	0.12878	1469.6	0.12714	178.14	341.65	0.9167	1.5730	0.891	0.583	1.172	666.	135.	336.4	10.79	86.0	7.33	15.06	-24.00
-22.00	0.13949	1463.6	0.11800	179.93	342.59	0.9239	1.5715	0.894	0.586	1.173	660.	135.	328.8	10.89	85.3	7.43	14.78	-22.00
-20.00	0.15088	1457.6	0.10965	181.72	343.53	0.9309	1.5701	0.896	0.590	1.174	653.	136.	321.5	10.99	84.5	7.53	14.50	-20.00
-18.00	0.16296	1451.6	0.10202	183.52	344.46	0.9380	1.5688	0.899	0.594	1.175	647.	136.	314.3	11.09	83.8	7.63	14.22	-18.00
-16.00	0.17578	1445.5	0.09503	185.32	345.39	0.9450	1.5675	0.902	0.598	1.177	640.	136.	307.3	11.18	83.0	7.73	13.94	-16.00
-14.00	0.18937	1439.4	0.08862	187.14	346.32	0.9520	1.5662	0.905	0.602	1.178	634.	136.	300.5	11.28	82.3	7.84	—	-14.00
-12.00	0.20374	1433.3	0.08273	188.95	347.25	0.9589	1.5651	0.908	0.606	1.180	627.	136.	293.9	11.38	81.5	7.94	—	-12.00
-10.00	0.21893	1427.1	0.07731	190.78	348.17	0.9658	1.5639	0.911	0.611	1.181	621.	136.	287.5	11.48	80.8	8.04	—	-10.00
-8.00	0.23498	1420.9	0.07233	192.61	349.08	0.9727	1.5629	0.915	0.615	1.183	614.	136.	281.2	11.58	80.1	8.15	—	-8.00
-6.00	0.25190	1414.7	0.06773	194.45	349.99	0.9796	1.5618	0.918	0.619	1.185	607.	137.	275.1	11.68	79.3	8.25	—	-6.00
-4.00	0.26974	1408.3	0.06348	196.29	350.89	0.9864	1.5608	0.921	0.624	1.187	601.	137.	269.2	11.78	78.6	8.36	—	-4.00
-2.00	0.28851	1402.0	0.05956	198.14	351.79	0.9932	1.5599	0.925	0.628	1.189	594.	137.	263.4	11.89	77.8	8.47	—	-2.00
0.00	0.30827	1395.6	0.05593	200.00	352.68	1.0000	1.5590	0.928	0.633	1.192	587.	137.	257.8	11.99	77.1	8.57	—	0.00
2.00	0.32902	1389.2	0.05256	201.87	353.57	1.0068	1.5581	0.932	0.638	1.194	580.	137.	252.3	12.09	76.4	8.68	—	2.00
4.00	0.35082	1382.7	0.04944	203.74	354.45	1.0135	1.5573	0.936	0.643	1.197	573.	137.	246.9	12.20	75.6	8.79	—	4.00
6.00	0.37368	1376.1	0.04654	205.62	355.32	1.0202	1.5565	0.940	0.648	1.200	566.	137.	241.7	12.30	74.9	8.90	—	6.00
8.00	0.39765	1369.5	0.04384	207.51	356.19	1.0269	1.5557	0.944	0.653	1.203	559.	137.	236.7	12.41	74.2	9.02	—	8.00
10.00	0.42276	1362.8	0.04134	209.41	357.05	1.0335	1.5550	0.948	0.658	1.206	552.	137.	231.8	12.52	73.5	9.13	—	10.00
12.00	0.44903	1356.1	0.03900	211.31	357.90	1.0402	1.5542	0.953	0.664	1.209	545.	136.	227.0	12.62	72.7	9.24	—	12.00
14.00	0.47651	1349.3	0.03682	213.23	358.75	1.0468	1.5535	0.957	0.669	1.213	537.	136.	222.3	12.74	72.0	9.36	—	14.00
16.00	0.50523	1342.5	0.03479	215.15	359.58	1.0534	1.5529	0.962	0.675	1.216	530.	136.	217.8	12.85	71.3	9.48	—	16.00
18.00	0.53521	1335.5	0.03289	217.09	360.41	1.0600	1.5522	0.966	0.681	1.220	523.	136.	213.3	12.96	70.6	9.60	—	18.00
20.00	0.56651	1328.6	0.03111	219.03	361.23	1.0666	1.5516	0.971	0.687	1.224	516.	136.	209.0	13.08	69.8	9.72	—	20.00
22.00	0.59914	1321.5	0.02945	220.98	362.04	1.0731	1.5510	0.976	0.693	1.229	508.	136.	204.8	13.20	69.1	9.84	—	22.00
24.00	0.63315	1314.4	0.02789	222.94	362.83	1.0796	1.5504	0.981	0.700	1.233	501.	135.	200.7	13.32	68.4	9.96	—	24.00
26.00	0.66857	1307.2	0.02643	224.92	363.62	1.0862	1.5498	0.987	0.707	1.238	494.	135.	196.8	13.44	67.7	10.09	—	26.00
28.00	0.70544	1299.9	0.02505	226.90	364.40	1.0927	1.5493	0.992	0.714	1.244	486.	135.	192.9	13.57	67.0	10.21	—	28.00
30.00	0.74379	1292.5	0.02376	228.89	365.16	1.0992	1.5487	0.998	0.721	1.249	479.	135.	189.1	13.70	66.3	10.34	—	30.00
32.00	0.78366	1285.0	0.02255	230.90	365.92	1.1057	1.5481	1.004	0.728	1.255	471.	134.	185.4	13.83	65.5	10.47	—	32.00
34.00	0.82509	1277.4	0.02141	232.91	366.66	1.1121	1.5476	1.010	0.736	1.262	463.	134.	181.9	13.96	64.8	10.60	—	34.00
36.00	0.86811	1269.8	0.02034	234.94	367.39	1.1186	1.5470	1.017	0.744	1.268	456.	134.	178.4	14.10	64.1	10.74	—	36.00
38.00	0.91277	1262.0	0.01932	236.98	368.10	1.1251	1.5465	1.023	0.753	1.276	448.	133.	175.0	14.24	63.4	10.87	—	38.00
40.00	0.95909	1254.2	0.01837	239.03	368.81	1.1315	1.5459	1.030	0.762	1.283	440.	133.	171.6	14.38	62.7	11.01	—	40.00
42.00	1.0071	1246.2	0.01747	241.10	369.49	1.1380	1.5454	1.038	0.771	1.292	433.	132.	168.4	14.53	62.0	11.15	—	42.00
44.00	1.0569	1238.1	0.01661	243.18	370.16	1.1444	1.5448	1.045	0.780	1.300	425.	132.	165.3	14.68	61.3	11.29	—	44.00
46.00	1.1085	1229.8	0.01581	245.27	370.82	1.1509	1.5443	1.053	0.791	1.310	417.	131.	162.2	14.83	60.6	11.44	—	46.00
48.00	1.1618	1221.5	0.01505	247.38	371.45	1.1573	1.5437	1.062	0.801	1.320	409.	131.	159.2	14.99	59.9	11.58	—	48.00
50.00	1.2171	1213.0	0.01432	249.51	372.07	1.1638	1.5431	1.071	0.812	1.331	401.	130.	156.3	15.15	59.2	11.73	—	50.00
52.00	1.2742	1204.3	0.01364	251.65	372.67	1.1703	1.5425	1.080	0.824	1.342	393.	130.	153.4	15.31	58.5	11.88	—	52.00
54.00	1.3333	1195.6	0.01299	253.80	373.25	1.1767	1.5418	1.090	0.837	1.355	385.	129.	150.7	15.48	57.8	12.04	—	54.00
56.00	1.3944	1186.6	0.01237	255.97	373.81	1.1832	1.5412	1.100	0.850	1.369	377.	128.	148.0	15.65	57.1	12.20	—	56.00
58.00	1.4575	1177.5	0.01179	258.16	374.35	1.1896	1.5405	1.111	0.865	1.383	369.	128.	145.3	15.83	56.4	12.35	—	58.00
60.00	1.5227	1168.2	0.01123	260.37	374.86	1.1961	1.5398	1.123	0.880	1.399	361.	127.	142.7	16.01	55.7	12.52	—	60.00
62.00	1.5901	1158.7	0.01070	262.60	375.35	1.2026	1.5390	1.135	0.896	1.417	352.	126.	140.2	16.19	55.0	12.68	—	62.00
64.00	1.6595	1149.0	0.01020	264.85	375.81	1.2091	1.5382	1.148	0.914	1.436	344.	125.	137.8	16.38	54.4	12.85	—	64.00
66.00	1.7312	1139.0	0.00972	267.12	376.24	1.2157	1.5374	1.163	0.933	1.456	336.	125.	135.4	16.58	53.7	13.02	—	66.00
68.00	1.8052	1128.9	0.00926	269.42	376.64	1.2222	1.5365	1.178	0.954	1.479	327.	124.	133.1	16.78	53.0	13.19	—	68.00
70.00	1.8814	1118.5	0.00882	271.73	377.01	1.2288	1.5356	1.194	0.977	1.505	319.	123.	—	—	—	—	—	70.00
75.00	2.0825	1091.2	0.00781	277.65	377.77	1.2454	1.5330	1.242	1.043	1.581	297.	120.	—	—	—	—	—	75.00
80.00	2.2991	1061.8	0.00690	283.75	378													

Temp,* °C	Absolute Pressure, MPa	Density, kg/m ³ Liquid	Volume, m ³ /kg Vapor	Enthalpy, kJ/kg		Entropy, kJ/(kg·K)		Specific Heat <i>c_p</i> , kJ/(kg·K)		Velocity of Sound, m/s		Viscosity, μPa·s		Thermal Cond., mW/(m·K)		Surface Tension, mN/m	Temp,* °C	
				Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor			
-150.00	0.00001	695.1	4328.1	-123.22	402.27	-0.6864	3.5807	1.958	1.020	1.227	1868.	169.	1338.4	3.63	196.9	4.35	31.83	-150.00
-140.00	0.00003	685.1	867.23	-103.58	412.62	-0.5331	3.3437	1.970	1.052	1.219	1799.	175.	986.6	3.88	191.8	4.84	30.29	-140.00
-130.00	0.00012	675.0	224.29	-83.82	423.27	-0.3899	3.1524	1.984	1.083	1.211	1731.	181.	763.5	4.12	186.1	5.35	28.76	-130.00
-120.00	0.00041	664.8	71.028	-63.89	434.20	-0.2554	2.9969	2.001	1.115	1.204	1664.	186.	612.4	4.37	180.1	5.89	27.24	-120.00
-110.00	0.00116	654.6	26.472	-43.79	445.38	-0.1283	2.8700	2.020	1.148	1.198	1597.	192.	504.7	4.62	173.7	6.45	25.72	-110.00
-100.00	0.00289	644.3	11.263	-23.48	456.80	-0.0075	2.7663	2.043	1.183	1.193	1532.	197.	424.6	4.88	167.2	7.06	24.23	-100.00
-90.00	0.00643	633.9	5.3427	-2.92	468.41	0.1079	2.6814	2.068	1.221	1.189	1467.	201.	363.1	5.14	160.5	7.68	22.74	-90.00
-80.00	0.01301	623.3	2.7726	17.91	480.17	0.2186	2.6119	2.098	1.263	1.186	1402.	206.	314.5	5.41	153.8	8.36	21.26	-80.00
-70.00	0.02493	612.6	1.5505	39.06	492.05	0.3253	2.5551	2.131	1.308	1.183	1337.	210.	275.3	5.68	147.2	9.08	19.81	-70.00
-60.00	0.04261	601.6	0.92303	60.58	504.00	0.4285	2.5088	2.168	1.358	1.182	1273.	213.	242.9	5.96	140.6	9.85	18.36	-60.00
-50.00	0.07046	590.5	0.57907	82.40	515.97	0.5287	2.4713	2.210	1.412	1.183	1209.	216.	215.8	6.24	134.3	10.67	16.94	-50.00
-42.096	0.10133	581.4	0.41329	100.15	525.43	0.6063	2.4468	2.247	1.459	1.185	1158.	218.	192.7	6.47	129.4	11.36	15.82	-42.09
-40.00	0.11100	579.0	0.37968	104.86	527.92	0.6265	2.4410	2.257	1.471	1.185	1145.	219.	192.7	6.53	128.1	11.55	15.53	-40.00
-38.00	0.12093	576.7	0.35058	109.39	530.31	0.6458	2.4358	2.267	1.484	1.186	1132.	219.	188.4	6.59	126.9	11.74	15.25	-38.00
-36.00	0.13153	574.3	0.32417	113.95	532.69	0.6650	2.4307	2.277	1.497	1.187	1119.	219.	184.3	6.65	125.7	11.92	14.97	-36.00
-34.00	0.14284	572.0	0.30017	118.52	535.06	0.6841	2.4259	2.288	1.509	1.188	1106.	220.	180.4	6.71	124.5	12.11	14.70	-34.00
-32.00	0.15489	569.6	0.27832	123.12	537.43	0.7032	2.4212	2.298	1.523	1.189	1093.	220.	176.5	6.77	123.3	12.30	14.42	-32.00
-30.00	0.16770	567.2	0.25840	127.74	539.80	0.7221	2.4168	2.309	1.536	1.190	1080.	220.	172.7	6.83	122.1	12.50	14.15	-30.00
-28.00	0.18131	564.8	0.24020	132.38	542.16	0.7411	2.4126	2.320	1.550	1.191	1067.	221.	169.1	6.89	121.0	12.70	13.87	-28.00
-26.00	0.19576	562.4	0.22356	137.04	544.52	0.7599	2.4086	2.332	1.564	1.192	1054.	221.	165.5	6.95	119.8	12.89	13.60	-26.00
-24.00	0.21106	560.0	0.20831	141.73	546.87	0.7787	2.4048	2.343	1.578	1.193	1041.	221.	162.0	7.01	118.6	13.10	13.32	-24.00
-22.00	0.22726	557.5	0.19432	146.44	549.21	0.7974	2.4011	2.355	1.592	1.195	1029.	221.	158.6	7.07	117.5	13.30	13.05	-22.00
-20.00	0.24439	555.0	0.18147	151.18	551.55	0.8160	2.3976	2.367	1.607	1.196	1016.	221.	155.3	7.14	116.4	13.51	12.78	-20.00
-18.00	0.26248	552.6	0.16965	155.94	553.88	0.8346	2.3943	2.380	1.622	1.198	1003.	222.	152.1	7.20	115.2	13.72	12.51	-18.00
-16.00	0.28157	550.0	0.15876	160.72	556.20	0.8532	2.3911	2.392	1.637	1.199	990.	222.	148.9	7.26	114.1	13.93	12.24	-16.00
-14.00	0.30169	547.5	0.14872	165.53	558.51	0.8717	2.3881	2.405	1.652	1.201	977.	222.	145.9	7.33	113.0	14.15	11.97	-14.00
-12.00	0.32287	545.0	0.13944	170.37	560.81	0.8901	2.3852	2.419	1.668	1.203	964.	222.	142.9	7.39	111.9	14.37	11.71	-12.00
-10.00	0.34516	542.4	0.13087	175.24	563.11	0.9086	2.3825	2.432	1.685	1.206	951.	222.	139.9	7.46	110.8	14.59	11.44	-10.00
-8.00	0.36858	539.8	0.12293	180.13	565.39	0.9269	2.3799	2.446	1.701	1.208	938.	222.	137.1	7.52	109.7	14.82	11.18	-8.00
-6.00	0.39317	537.2	0.11557	185.06	567.66	0.9452	2.3774	2.461	1.718	1.210	925.	221.	134.3	7.59	108.7	15.05	10.91	-6.00
-4.00	0.41897	534.5	0.10873	190.01	569.91	0.9635	2.3750	2.475	1.735	1.213	912.	221.	131.5	7.66	107.6	15.28	10.65	-4.00
-2.00	0.44602	531.8	0.10239	194.99	572.16	0.9818	2.3728	2.490	1.753	1.216	899.	221.	128.8	7.73	106.5	15.52	10.39	-2.00
0.00	0.47434	529.1	0.09649	200.00	574.39	1.0000	2.3706	2.506	1.771	1.219	886.	221.	126.2	7.79	105.5	15.76	10.13	0.00
2.00	0.50398	526.4	0.09099	205.04	576.61	1.0182	2.3686	2.522	1.789	1.222	872.	221.	123.6	7.86	104.4	16.00	9.87	2.00
4.00	0.53498	523.7	0.08587	210.12	578.81	1.0364	2.3666	2.538	1.808	1.225	859.	220.	121.1	7.93	103.4	16.25	9.61	4.00
6.00	0.56737	520.9	0.08109	215.23	580.99	1.0545	2.3648	2.555	1.828	1.229	846.	220.	118.6	8.01	102.4	16.50	9.35	6.00
8.00	0.60119	518.1	0.07663	220.37	583.16	1.0726	2.3630	2.572	1.848	1.232	833.	220.	116.2	8.08	101.4	16.76	9.10	8.00
10.00	0.63648	515.2	0.07246	225.54	585.30	1.0907	2.3613	2.590	1.868	1.236	820.	219.	113.8	8.15	100.3	17.02	8.85	10.00
12.00	0.67328	512.3	0.06855	230.75	587.43	1.1088	2.3597	2.608	1.889	1.241	807.	219.	111.5	8.23	99.3	17.28	8.59	12.00
14.00	0.71162	509.4	0.06489	236.00	589.54	1.1269	2.3581	2.627	1.911	1.245	794.	218.	109.2	8.30	98.3	17.55	8.34	14.00
16.00	0.75154	506.4	0.06146	241.28	591.63	1.1449	2.3566	2.646	1.933	1.250	780.	218.	106.9	8.38	97.3	17.82	8.09	16.00
18.00	0.79310	503.5	0.05825	246.60	593.69	1.1630	2.3551	2.666	1.956	1.255	767.	217.	104.7	8.45	96.3	18.10	7.84	18.00
20.00	0.83631	500.4	0.05522	251.96	595.73	1.1810	2.3537	2.687	1.980	1.261	754.	217.	102.5	8.53	95.4	18.38	7.59	20.00
22.00	0.88123	497.3	0.05238	257.36	597.74	1.1991	2.3523	2.708	2.005	1.267	740.	216.	100.4	8.61	94.4	18.67	7.35	22.00
24.00	0.92790	494.2	0.04971	262.80	599.72	1.2171	2.3510	2.730	2.030	1.273	727.	215.	98.3	8.70	93.4	18.96	7.10	24.00
26.00	0.97636	491.1	0.04719	268.29	601.67	1.2352	2.3497	2.753	2.057	1.280	714.	215.	96.2	8.78	92.4	19.26	6.86	26.00
28.00	1.0266	487.8	0.04481	273.81	603.60	1.2533	2.3484	2.777	2.085	1.287	700.	214.	94.2	8.86	91.5	19.56	6.62	28.00
30.00	1.0788	484.6	0.04258	279.39	605.49	1.2714	2.3471	2.802	2.113	1.295	687.	213.	92.1	8.95	90.5	19.87	6.38	30.00
32.00	1.1325	481.3	0.04046	285.00	607.34	1.2895	2.3458	2.828	2.144	1.303	674.	212.	90.2	9.04	89.6	20.18	6.14	32.00
34.00	1.1886	477.9	0.03846	290.67	609.16	1.3076	2.3445	2.854	2.175	1.312	660.	211.	88.2	9.13	88.6	20.51	5.91	34.00
36.00	1.2465	474.5	0.03657	296.38	610.93	1.3257	2.3432	2.882	2.208	1.322	647.	210.	86.3	9.22	87.7	20.83	5.67	36.00
38.00	1.3070	471.0	0.03478	302.15	612.67	1.3439	2.3419	2.912	2.243	1.333	633.	209.	84.4	9.32	86.7	21.17	5.44	38.00
40.00	1.3692	467.4	0.03309	307.97	614.35	1.3621	2.3405	2.942	2.279	1.344	619.	208.	82.5	9.42	85.8	21.52	5.21	40.00
42.00	1.4335	463.8	0.03148	313.84	615.99	1.3804	2.3391	2.975	2.318	1.356	606.	207.	80.6	9.52	84.9	21.87	4.98	42.00
44.00	1.4996	460.1	0.02996	319.77	617.58	1.3987	2.3377	3.008	2.358	1.369	592.	205.	78.8	9.62	83.9	22.24	4.75	44.00
46.00	1.5687	456.4	0.02851	325.76	619.11	1.4170	2.3362	3.044	2.402	1.384	578.	204.	77.0	9.72	83.0	22.61	4.53	46.00
48.00	1.6397	452.5	0.02713	331.81	620.58	1.4354	2.3346	3.082	2.448	1.400	565.	203.	75.2	9.83	82.1	23.00	4.31	48.00
50.00	1.7130	448.6	0.02582	337.92	621.99	1.4539	2.3330	3.122	2.498	1.417	551.	201.	73.4	9.95	81.1	23.40	4.09	50.00
55.00	1.9068	438.3	0.02282	353.50	625.20	1.5004	2.3284	3.235	2.639	1.468	516.	197.	69.1	10.25	78.8	24.48	3.54	55.00
60.00	2.1164	427.4	0.02014	369.57	627.88	1.5475	2.3229	3.370	2.813	1.534	480.	193.	64.8	10.58	76.5	25.69	3.02	60.00
65.00	2.3426	415.7	0.01775	386.19	629.92</													

Temp. °F	Density, lb/ft ³	Enthalpy, Btu/lb	Entropy, Btu/lb·°F	c_p , Btu/lb·°F	c_p/c_v	Vd. Sound, ft/s	Vbcs- lb, ft/lb·h	Thermal Cond., Btu/lb·h·°F	Temp. °F	Density, lb/ft ³	Enthalpy, Btu/lb	Entropy, Btu/lb·°F	c_p , Btu/lb·°F	c_p/c_v	Vd. Sound, ft/s	Vbcs- lb, ft/lb·h	Thermal Cond., Btu/lb·h·°F
-312.6a	0.2806	33.86	1.3237	0.2630	1.448	580.3	0.0138	0.00439	300.0	0.0522	182.15	1.7231	0.2430	1.394	1348.9	0.0574	0.01978
-300.0	0.2561	37.11	1.3449	0.2547	1.438	608.6	0.0150	0.00480	320.0	0.0508	187.01	1.7294	0.2433	1.394	1366.2	0.0584	0.02019
-280.0	0.2255	42.13	1.3745	0.2483	1.428	649.6	0.0169	0.00545	340.0	0.0496	191.88	1.7356	0.2437	1.393	1383.1	0.0595	0.02059
-260.0	0.2017	47.06	1.4005	0.2454	1.422	687.3	0.0188	0.00611	360.0	0.0484	196.76	1.7416	0.2442	1.392	1399.8	0.0605	0.02099
-240.0	0.1827	51.95	1.4239	0.2437	1.417	722.5	0.0206	0.00677	380.0	0.0472	201.65	1.7475	0.2446	1.391	1416.3	0.0616	0.02140
-220.0	0.1670	56.81	1.4451	0.2427	1.414	755.9	0.0224	0.00764	400.0	0.0461	206.54	1.7533	0.2451	1.389	1432.5	0.0626	0.02180
-200.0	0.1538	61.66	1.4645	0.2420	1.412	787.7	0.0241	0.00799	420.0	0.0451	211.45	1.7589	0.2455	1.388	1448.5	0.0636	0.02220
-180.0	0.1426	66.50	1.4824	0.2415	1.410	818.2	0.0258	0.00856	440.0	0.0441	216.36	1.7644	0.2460	1.387	1464.3	0.0646	0.02260
-160.0	0.1329	71.32	1.4991	0.2412	1.409	847.5	0.0275	0.00913	460.0	0.0431	221.29	1.7698	0.2465	1.386	1479.9	0.0656	0.02299
-140.0	0.1245	76.14	1.5147	0.2409	1.408	875.7	0.0291	0.00968	480.0	0.0422	226.22	1.7752	0.2471	1.385	1495.3	0.0666	0.02339
-120.0	0.1171	80.96	1.5293	0.2407	1.407	903.0	0.0307	0.01023	500.0	0.0413	231.17	1.7804	0.2476	1.384	1510.5	0.0675	0.02378
-100.0	0.1105	85.77	1.5431	0.2405	1.406	929.5	0.0322	0.01076	520.0	0.0405	236.13	1.7855	0.2482	1.382	1525.5	0.0685	0.02418
-80.0	0.1047	90.58	1.5561	0.2404	1.405	955.2	0.0337	0.01128	540.0	0.0397	241.10	1.7905	0.2487	1.381	1540.2	0.0694	0.02457
-60.0	0.0994	95.39	1.5684	0.2403	1.405	980.2	0.0351	0.01179	560.0	0.0389	246.08	1.7954	0.2493	1.380	1554.9	0.0704	0.02496
-40.0	0.0946	100.19	1.5801	0.2403	1.404	1004.6	0.0366	0.01229	580.0	0.0381	251.07	1.8003	0.2499	1.379	1569.3	0.0713	0.02536
-20.0	0.0903	105.00	1.5913	0.2402	1.404	1028.3	0.0380	0.01278	600.0	0.0374	256.08	1.8051	0.2505	1.377	1583.6	0.0722	0.02575
0.0	0.0863	109.81	1.6020	0.2402	1.403	1051.5	0.0393	0.01326	620.0	0.0367	261.09	1.8097	0.2511	1.376	1597.8	0.0732	0.02614
20.0	0.0827	114.61	1.6122	0.2402	1.403	1074.2	0.0407	0.01372	640.0	0.0360	266.12	1.8144	0.2517	1.375	1611.8	0.0741	0.02653
40.0	0.0794	119.42	1.6221	0.2403	1.403	1096.3	0.0420	0.01419	660.0	0.0354	271.16	1.8189	0.2524	1.374	1625.6	0.0750	0.02692
60.0	0.0763	124.22	1.6315	0.2403	1.402	1118.0	0.0433	0.01465	680.0	0.0348	276.22	1.8234	0.2530	1.372	1639.3	0.0759	0.02731
80.0	0.0735	129.03	1.6406	0.2404	1.402	1139.3	0.0446	0.01510	700.0	0.0342	281.28	1.8278	0.2536	1.371	1652.8	0.0768	0.02770
100.0	0.0709	133.84	1.6493	0.2405	1.401	1160.1	0.0458	0.01554	720.0	0.0336	286.36	1.8321	0.2543	1.370	1666.2	0.0776	0.02808
120.0	0.0684	138.65	1.6578	0.2407	1.401	1180.6	0.0470	0.01599	740.0	0.0330	291.45	1.8364	0.2549	1.368	1679.5	0.0785	0.02847
140.0	0.0661	143.47	1.6659	0.2408	1.400	1200.6	0.0483	0.01642	760.0	0.0325	296.56	1.8406	0.2555	1.367	1692.7	0.0794	0.02885
160.0	0.0640	148.28	1.6738	0.2410	1.400	1220.3	0.0495	0.01685	780.0	0.0320	301.68	1.8448	0.2562	1.366	1705.7	0.0802	0.02924
180.0	0.0620	153.11	1.6815	0.2412	1.399	1239.6	0.0506	0.01728	800.0	0.0315	306.81	1.8489	0.2568	1.365	1718.6	0.0811	0.02962
200.0	0.0601	157.93	1.6889	0.2414	1.398	1258.6	0.0518	0.01771	820.0	0.0310	311.95	1.8529	0.2574	1.363	1731.4	0.0820	0.03001
220.0	0.0583	162.76	1.6961	0.2417	1.398	1277.3	0.0529	0.01813	840.0	0.0305	317.10	1.8569	0.2581	1.362	1744.1	0.0828	0.03039
240.0	0.0567	167.60	1.7032	0.2420	1.397	1295.6	0.0541	0.01854	860.0	0.0300	322.27	1.8609	0.2587	1.361	1756.7	0.0836	0.03078
260.0	0.0551	172.44	1.7100	0.2423	1.396	1313.7	0.0552	0.01896	880.0	0.0296	327.45	1.8648	0.2594	1.360	1769.1	0.0845	0.03116
280.0	0.0536	177.29	1.7166	0.2426	1.395	1331.5	0.0563	0.01937	900.0	0.0292	332.64	1.8686	0.2600	1.359	1781.5	0.0853	0.03154

جدول (5) جداول الهواء



شكل (5) مخطط الضغط الإنشائية للهواء

المراجع References

1. BP Statistical Review of World Energy is available online at www.bp.com/statisticalreview, June, 2009.
2. مجلة العلوم والتقنية، مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية، السنة العشرون، العدد التاسع والسبعون، 2006.
3. د. وهيب عيسى الناصر و د. علي القرغولي، حقبة تعليمية تدريبية في مجال الطاقات المتجددة، المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم، تونس ، 2000.
4. د.سعود يوسف عياش، تكنولوجيا الطاقات البديلة، سلسلة عالم المعرفة، الكويت، 1981.
5. حيان عبد الغني عبد الزهرة، مبادئ التبريد والتكييف، هيئة المعاهد الفنية، بغداد، العراق، 1992.
6. Duffie, J. and Beckman, W., Solar energy thermal processes, John Wiley and Sons, New York. 1980.
7. مقدمة في الطاقة الشمسية، ترجمة د.شاكر جابر شاكر وآخرون، جامعة الموصل، العراق، 1989.
8. Coventry J. Sydney, A solar concentrating photovoltaic / thermal collector, Ph.D.Thesis, Australian National University, Australia, 2004.
9. د.علي الجبوري ، تكييف الهواء ، الكلية الهندسية العسكرية ،بغداد، العراق، 1991.
10. د. الطاقة الشمسية، معهد الانماء العربي.
11. ASHRAE, Handbook of fundamentals, American society of heating, Refrigeration and air conditioning engineers, Atlanta, W.S.A, 1981.
12. Joudi, K.A.; Some aspects of solar irradiance calculation, Proceeding of the third Arab international solar water energy conversion, edited by N.I. Al-Hamdani, Naman, S.A., Solar energy research center, Baghdad, 1988.

13. Lunde, P.J.; Solar thermal engineering-Space heating and hot water system, John Wiley and sons, New York,1980.
14. المركز الوطني لبحوث الطاقة ، حقبة السخان الشمسي، المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم، تونس ، 2000.
15. Hottel, H.C., A simple model for estimating for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmosphere, Solar energy, Vol. 18, pp. 129-134.
16. د. مصطفى محمد السيد وآخرون، النماذج الحسابية للنظم الحرارية الشمسية، جامعة الملك عبد العزيز، جدة ، السعودية، 1994.
17. د. برهان محمود العلي وآخرون، أسس انتقال الحرارة، جامعة الموصل ، العراق، 1991.
18. د. وهيب عيسى الناصر و د. علي القرغولي، مبادئ الطاقات المتجددة وتطبيقاتها ، البحرين ، 2002.
19. Brandemuehl, M.J. and Beckman, Transmission of diffused radiation through CPC and flat-plate collector glazing, Solar energy, Vol. 24, 1980.
20. Kreith, F. and Kreider, J., Principles of solar engineering, McGraw-Hill Book company, 1978.
21. د.علي الجبوري وآخرون ، الأساسيات الهندسية لديناميكا الحرارة، الكلية الهندسية العسكرية،بغداد، العراق، 1984.
22. Klein, S.A., Calculation of flat-plate loss coefficient, Solar energy, Vol. 17, 1975.
23. Martin Kaltschmitt et. Al, Renewable energy, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
24. Graziani,M and Paolo,F, Renewable resources and renewable energy, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC,2007.

25. Volker Quaschnig, Understanding Renewable Energy Systems, Carl Hanser Verlag GmbH & Co KG, 2005
26. Bent Sørensen, Renewable Energy, Elsevier Science, 2004.
27. Jha, A.R., Solar cell technology and application, Taylor and Francis Group, 2009.
28. El-Wakil, M.M., Power plant technology, McGraw-Hill Book Company, 1985.
29. Julia Koller.et.al, Offshore Wind Energy, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
30. Tony Burton .et. al., Wind energy, John wiley and sons company, 2001.
31. Sathyajith Mathew, Wind Energy, Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg company, 2006.
32. المركز الوطني لبحوث الطاقة ، حقبة الكهرباء من طاقة الرياح، المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم، تونس ، 2000.
33. Mukund R. Patel, Wind and Solar Power Systems, CRC Press LLC, 1999.
34. Celso Penche, On how to develop a small hydro site, Eurpoean small hydropower association,1998.
35. Khurmi, R.S., A text book of hydraulic machines, Chand and company ltd, 1987.

36. Al.wakil,M.M, Power technology, McGraw-Hill book Co,1985 .
37. Gupta.H and Roy.S, Geothermal energy an alternative resource for 21 century, ALSEIVER company, 2007.
38. د. محمد المعالج وآخرون، تطوير الموادر التقليدية لإعداد الخبز والطهي عنصر هام في مكافحة التصحر، المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم، 2001.
39. Klass.D, Biomass for renewable energy, fuel, and chemicals.
40. Pandey.A, Handbook of plant-based biofuels, C RC press Taylor and Francis group, 2009.
41. د. الياس الكبة ود. سهيل فاضل، مبادئ الطاقة الشمسية وتطبيقاتها، دار الحداثة للطباعة والنشر والتوزيع، لبنان، 1987.
42. Sjaak van Loo, and Jaap Koppejan, Handbook of biomass combustion and co-firing, Earthscan Co,2008.
43. Larminie,J. and Dick, A, Fuel cell system explained, John Wiley & Sons Ltd, 2003.
44. Hoogers,G, Fuel cell technology handbook, CRC press, 2003.