

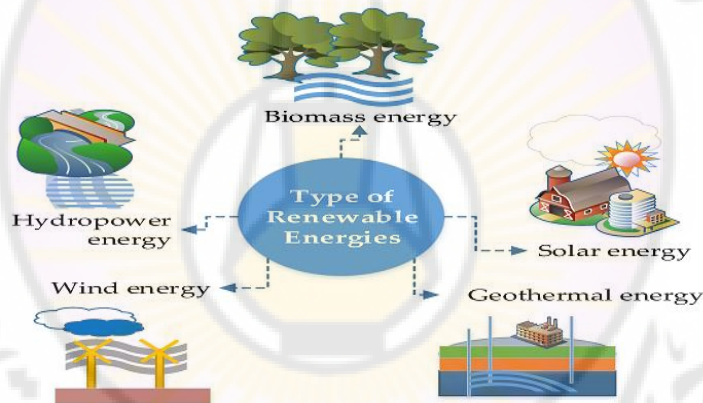


طاقات متجددة



السنة الخامسة قسم الميكانيك العام

طاقات متجددة



الدكتورة براءة حمادي

الدكتور علي سلامي

مدرسة في قسم هندسة الميكانيك العام

أستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام

1444 - 1445 هـ

جامعة دمشق

2022 - 2023م



الفهرس

الموضوع	رقم الصفحة
مقدمة الكتاب	11
الفصل الأول: الطاقات المتجددة	15
الفصل الثاني: الإشعاع الشمسي	21
1-2 الإشعاع الشمسي على سطح الأرض	23
2-2 الإشعاع الشمسي في القطر العربي السوري	24
3-2 الإشعاع الشمسي على السطح الأفقي	24
4-2 طول النهار	25
5-2 كمية الإشعاع الشمسي اليومي	26
6-2 التوضع الأمثل لمجمعات شمسية مسطحة	28
7-2 الإشعاع الشمسي على السطوح المائلة	29
الفصل الثالث: المجمعات الشمسية المسطحة	31
1-3 بنية المجمعات الشمسية المسطحة	31
2-3 الاستطاعة المفيدة للمجمعات الشمسية المسطحة والمردود	36
الفصل الرابع: استثمار الطاقة الشمسية الحرارية	43
1-4 نظم استثمار الطاقة الشمسية	44
1-1-4 تسخين مياه المسابح بالطاقة الشمسية	45
2-1-4 تسخين المياه بالطاقة الشمسية	49
3-1-4 التدفئة بالطاقة الشمسية	59
4-1-4 التكييف بالطاقة الشمسية	61
مسائل	69
الفصل الخامس : المجمعات الشمسية المركزة	79
1-5 الشكل الهندسي للقطع المكافئ	79
2-5 بنية المجمعات الشمسية المركزة	81
3-5 نسبة التركيز العظمى لمجمع قطعي مركز	84
4-5 درجة الحرارة العظمى للسطح الماص	87
5-5 نسب التركيز ودرجات الحرارة لأنماط مختلفة من المركّزات الشمسية	90
6-5 الفوائد الحرارية للمجمعات الشمسية المركزة	90

94	7-5 السطح الماص المغلف بطبقة شفافة
95	8-5 الاستطاعة المفيدة والمردود
99	الفصل السادس: توليد الكهرباء بالطاقة الشمسية الحرارية
100	1-6 نظام المزرعة الشمسية
103	1-1-6 درجة حرارة العمل والمردود
104	2-1-6 حقل المجمعات
106	3-1-6 الخزان الحراري
108	4-1-6 دارة العمل
110	5-1-6 مخطط انسياب الطاقة لمحطة توليد كهروشمسية حرارية
111	6-1-6 التحكم بعمل نظام المزرعة الشمسية الكهروحرارية
113	2-6 الأنظمة البرجية الكهروشمسية
113	1-2-6 البرج واللاقط وحقل المرايا
115	2-2-6 أسس تصميم الحقول
117	3-2-6 الفواقد الحرارية في حقل المرايا
117	فواقد الحجب
118	فواقد التظليل
118	الفواقد الجيبية
119	فواقد عيوب سطح المرآة
119	فواقد أخطاء التوجيه
119	فواقد بتأثير الرياح والتسخين
119	فواقد الانعكاس
119	4-2-6 مردود حقل المجمعات والاستطاعة المفيدة الواصلة إلى اللاقط
120	5-2-6 توجيه المرايا
122	6-2-6 اللاقط ذو الحجرة (بنيتة وآلية عمله)
123	1-6-2-6 الموازنة الحرارية للاقط
125	2-6-2-6 الفواقد الحرارية للاقط
127	3-6-2-6 مردود اللاقط
131	مسائل
143	الفصل السابع: طاقة الكتلة الحية

144	7-1 أشكال ونواتج الكتلة الحية
145	7-2 احتياطي الكتلة الحية عالمياً
149	الفصل الثامن: تقانات استثمار طاقة الكتلة الحية
149	8-1 تحويل الطاقة الحية
152	8-2 الطرق الفيزيائية
152	8-2-1 الضغط الميكانيكي للكتلة الحية
153	8-2-2 استخلاص الزيوت النباتية والكربوهيدرات
153	8-3 الطرق الترموكيميائية
153	8-3-1 الحرق
161	8-3-2 التغويز
164	8-3-3 التميع
164	8-3-3-1 طريقة الإرجاع الكيميائي
165	8-3-3-2 طريقة التفكيك الحراري
168	8-3-3-3 التحويل إلى ميثانول
170	8-4 طرق التحويل البيولوجي
171	8-4-1 إنتاج الغاز الحيوي
173	العوامل المؤثرة على عملية التخمير اللاهوائي
181	8-4-2 إنشاء وحدات إنتاج الغاز الحيوي
183	8-4-3 إنتاج الإيثانول
186	عملية التخمير والعوامل التي تحدد جودتها
188	مسائل
197	الفصل التاسع: طاقة الرياح
200	9-1 حركة الرياح (شدة واتجاه)
201	9-2 سرعة الرياح الوسطية
202	سرعة الرياح الوسطية الشهرية
203	9-2-1 بروفيل السرعة الشاقولية
204	9-2-2 تكرار سرعة الرياح
206	9-2-3 القيم الحدية لسرعة الرياح وفترات السكون الكافي

208	9-2-4 حركة الرياح عبر العوائق ومسافات التأثير
209	9-3 استطاعة التدفقات الريحية
211	9-4 الطاقة السنوية المتاحة
211	9-5 قياس سرعة الرياح
211	9-5-1 أنبوبة براندل
212	9-5-2 مقياس الضغط ذو السائل الساخن
213	9-5-3 جهاز قياس السرعة ذو الطاسات المتصلبة
215	الفصل العاشر: العنفات ومحولات الطاقة الريحية
215	10-1 لمحة تاريخية
218	10-2 أسس في ميكانيك الجريان
218	10-2-1 معامل الاستطاعة المثالي الأعظمي
222	10-2-2 معامل الاستطاعة لعجلة مقاومة
225	10-2-3 الجريان حول الجناح الحامل
226	10-3 ميكانيك الرياح (Aerodynamic) للعنفة الريحية
226	10-3-1 معامل قوة الرفع ومعامل المقاومة
229	10-3-2 سرعة الرياح والقوى المؤثرة على الأجنحة
231	10-3-3 قتل الجناح
232	10-3-4 الفواقد الأيروديناميكية على الجناح
235	10-3-5 معامل الاستطاعة وعدد السرعة
237	10-3-6 معامل العزم وعدد السرعة
239	10-3-7 تشكيل عرض الجناح
242	10-3-8 اختيار المقطع العرضي للجناح
244	10-3-9 عدد الدوران المثالي
248	10-4 الأحمال المطبقة على العنفات الريحية
249	10-4-2 قوى الرياح الكتلية
249	10-4-2-1 قوى الهواء المستقرة
251	10-4-2-2 قوى الوزن الذاتي للأجنحة
251	10-4-2-3 القوى الطاردة المركزية
251	10-4-2-4 قوى الرياح غير المستقرة

252	10-4-2-5 قوى ناتجة عن توجيه العنفة أثناء العمل
252	10-4-2-2 القوى الناتجة عن التشغيل والإيقاف
252	10-4-2-1 إقلاع العنفة
252	10-4-2-2 إيقاف العنفة
252	10-4-2-3 حالة توقف العنفة
253	10-4-2-4 مطابقة دوران العنفة مع تردد الشبكة
253	10-4-3 الاهتزازات الديناميكية
254	10-5 النظام الكهربائي
255	10-6 التحكم
255	10-6-1 التحكم في العنفات البطيئة
256	10-6-2 التحكم في العنفات السريعة
257	10-6-3 تحكم الإقلاع
258	10-6-4 التحكم بالحمل الجزئي
259	10-6-5 التحكم بالاستطاعة الكلية
261	الفصل الحادي عشر: أشكال أخرى للطاقات المتجددة
261	11-1 الطاقة الجيوحرارية
265	11-2 طاقة المد والجزر
268	11-3 طاقة الأمواج البحرية
271	11-4 طاقة التيارات البحرية
271	11-5 طاقة الوسط المحيط
271	11-5-1 محطات الطاقة الحرارية لمياه البحار
272	11-5-2 المضخات الحرارية
273	11-6 طاقة جريان الماء (الأنهار)
275	جدول الرموز والمصطلحات
281	المراجع العلمية



مقدمة الكتاب

إنَّ التطور الصناعي الهائل الذي شهده القرن العشرون وخاصة العقود الأخيرة منه ترافق بشراهة كبيرة في استهلاك الطاقة التي كان عمودها الفقري طاقة الفحم الحجري والنفط ليصبح النفط والغاز لاحقاً هما المصدر الأساسي للطاقة ويطلق على مصادر الطاقة هذه (موارد الطاقة الأحفورية).

إنَّ التسارع في استهلاك موارد الطاقات الأحفورية أدى لظهور نتائج بالغة الخطورة على مستقبل التطور الاقتصادي والاجتماعي للبشرية ككل:

أ- التلوث البيئي الذي تحول تدريجياً إلى كارثة بيئية حقيقية تصيب كل أشكال الحياة على الأرض وتهدد بأسوأ أنواع الأخطار (تلوث مادي للماء والتربة والهواء وتلوث حراري: ارتفاع درجة حرارة الأرض وثقب طبقة الأوزون).

ب- إمكانية نضوب هذه الموارد بسرعة بسبب استهلاكها الشره والجائر وما يجره ذلك من نتائج وخيمة على التطور الصناعي والاقتصادي والاجتماعي ويهدد بالعودة بالبشرية قروناً إلى الوراء.

أمام هذه المخاوف الجدية لقي البحث عن مصادر طاقة بديلة عن الطاقات الأحفورية اهتماماً كبيراً من قبل المجتمعات الأكثر استهلاكاً للطاقة أولاً. وسميت كل أشكال الطاقات الأخرى التي يمكن أن تحل محل موارد الطاقات الأحفورية بالطاقات البديلة (Alternative energy resources) ولم تدخل الطاقة النووية ضمن هذه التسمية لأنها أصلاً طاقة فلذات يمكن إضافتها لغوياً على الأقل إلى الطاقات الأحفورية وهي أيضاً قابلة للنضوب وأكثر خطورة وآثاراً سلبية على البيئة من الطاقات الأحفورية.

وتبين أنَّ أكثر أشكال الطاقات البديلة المتاحة هي أشكال متجددة أو أنَّ ما يستهلك منها يتم تعويضه بشكل مستمر، ولذلك سميت بالطاقة المتجددة (Renewable Energy).

يتضمن الكتاب أحد عشر فصلاً:

يُخصص الفصل الأول للتعريف بالطاقات المتجددة.

يشمل **الفصل الثاني** دراسة الإشعاع الشمسي على سطح الأرض وعلى كل من السطح الأفقي والسطوح المائلة وفي القطر العربي السوري وحساب كمية الإشعاع الشمسي وطول النهار والتوضع الأمثل للمجمعات الشمسية المسطحة.

أما **الفصل الثالث** يُعنى بدراسة المجمعات الشمسية المسطحة من حيث البنية والاستطاعة المفيدة التي يتم الحصول عليها من هذه المجمعات وحساب كفاءتها.

وخصص **الفصل الرابع** لدراسة نظم استثمار الطاقة الشمسية الحرارية وحساب الاستطاعة الحرارية اللازمة لتسخين الأحواض المكشوفة من خلال دراسة معادلة التوازن الحراري وحساب الفواقد الحرارية والكسب الحراري من الإشعاع الشمسي. أيضاً تم دراسة دارة التسخين ذات الدوران التثاقلي وذات الدوران القسري. التعرف على كيفية حساب مساحة المجمعات وحجم الخزان الحراري وعلاقتها بدرجة التغطية.

وفي **الفصل الخامس** تم التعرف على المجمعات الشمسية المركزة من حيث الشكل الهندسي للقطع المكافئ وبنية المجمعات الشمسية المركزة ودراسة نسب التركيز ودرجات الحرارة لأنماط مختلفة من المركّزات الشمسية. حساب الفواقد الحرارية للمجمعات الشمسية المركزة وبالتالي حساب كل من الاستطاعة المفيدة والكفاءة.

وتم في **الفصل السادس** التعرف على كيفية توليد الكهرباء بالطاقة الشمسية الحرارية من خلال دراسة نظام المزرعة الشمسية والتحكم بعملها. دراسة الأنظمة البرجية الكهرشمسية وأسس تصميم الحقول وحساب كافة الفواقد الحرارية في حقل المرايا وبالتالي الاستطاعة المفيدة الواصلة إلى اللاقط ومردود حقل المجمعات. أيضاً دراسة بنية اللاقط ذو الحجرة وآلية عمله والحسابات الحرارية له.

وخصص **الفصل السابع** لدراسة طاقة الكتلة الحية من حيث منشأها وأشكالها ونواتجها واحتياطي الكتلة الحية عالمياً.

أما **الفصل الثامن** يُعنى بدراسة تقانات استثمار طاقة الكتلة الحية وطرق تحويلها (الطرق الفيزيائية، الطرق الترموكيميائية وطرق التحويل البيولوجي). إنشاء وحدات إنتاج الغاز الحيوي والأسس التقنية لإنتاجه. العوامل المؤثرة على عملية التخمير اللاهوائي والتي تحدد جودة عملية التخمير.

يشمل **الفصل التاسع** دراسة طاقة الرياح من حيث التعرف على منشأ الرياح وحركتها ودراسة بروفييل السرعة الشاقولية، القيم الحدية لسرعة الرياح وفترات السكون الكافي. حساب استطاعة التدفقات الريحية والطاقة السنوية المتاحة. قياس سرعة الرياح من خلال أنبوبة براندل ومقياس الضغط ذو السائل الساخن وجهاز قياس السرعة ذو الطاسات المتصالية.

أما **الفصل العاشر** يُعنى بدراسة العنفات ومحولات الطاقة الريحية وحساب معامل الاستطاعة المثالي الأعظمي ومعامل الاستطاعة لعجلة مقاومة. الجريان حول الجناح الحامل والتعرف على ميكانيك الرياح (Aerodynamic) للعنفة الريحية من خلال دراسة معامل قوة الرفع ومعامل المقاومة، سرعة الرياح والقوى المؤثرة على الأجنحة، قتل الجناح، الفواقد الأيروديناميكية على الجناح، معامل الاستطاعة وعدد السرعة، معامل العزم وعدد السرعة، تشكيل عرض الجناح، اختيار المقطع العرضي للجناح، عدد الدوران المثالي. الأحمال المطبقة على العنفات الريحية (قوى الهواء المستقرة، قوى الوزن الذاتي للأجنحة، القوى الطاردة المركزية، قوى الرياح غير المستقرة، قوى ناتجة عن توجيه العنفة أثناء العمل، القوى الناتجة عن التشغيل والإيقاف). دراسة النظام الكهربائي والتحكم في كل من العنفات البطيئة والسريعة.

يشمل **الفصل الحادي عشر** دراسة أشكال أخرى للطاقات المتجددة: الطاقة الجيوحرارية، طاقة المد والجزر، طاقة الأمواج البحرية، طاقة التيارات البحرية، طاقة الوسط المحيط (محطات الطاقة الحرارية لمياه البحار، المضخات الحرارية)، طاقة جريان الماء (الأنهار).

أرجو أن يجد الطالب والقارئ في هذا الكتاب المتعة والفائدة، كما أرجو أن يكون التوفيق قد حالفني في عرض محتوياته وفي طريقة تبويبه وتنظيمه وإذا انطوى على بعض الثغرات فعذري أنني حاولت، فالكمال من صفات الله عز وجل وحده وهو ولي التوفيق.

أ. د. علي سلامي

د براءة حمادي



الفصل الأول

تعريف بالطاقات المتجددة

تتميز مصادر الطاقات المتجددة بوفرته ونظافتها، فهي صديقة للبيئة، ويتوفر منها احتياطي كبير يؤهلها لتصبح مصدراً موثوقاً للطاقة إذا بُذلت الجهود الكافية لاستثمارها وتطوير تقاناتها.

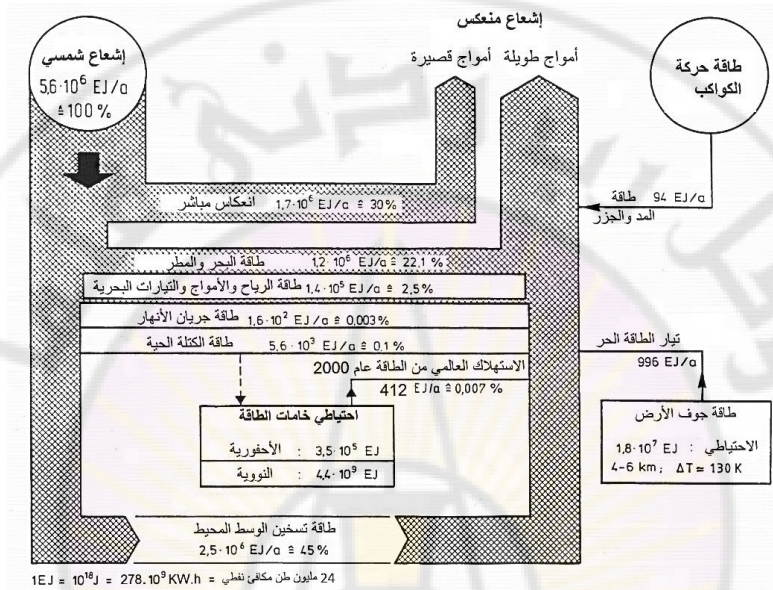
إنَّ مخطط التوازن الطاقى للأرض شكل (1-1) يقدم تصوراً واضحاً لمصادر الطاقات المتجددة ونسبته إلى أشكال الطاقة الأخرى المتاحة. يمكن إرجاع كل أشكال الطاقة على الأرض إلى المصادر التالية:

- طاقة الإشعاع الشمسي.
 - طاقة تفكك النظائر لماغما جوف الأرض.
 - طاقة جذب الكواكب.
 - طاقة خامات الأرض (مصادر الطاقة الأحفورية والطاقة الذرية للخامات المشعة).
- تصل إلى حدود الغلاف الجوي الخارجي للأرض طاقة شمسية تبلغ $5.6 \times 10^6 [EJ/a]$ (علماً بأن:
- $$1 [EJ] = 10^{18} [J] = 278 \times 10^9 [kW \cdot h]$$
- هي الطاقة التي تستهلكها دولة صناعية متوسطة حالياً).

ينعكس من هذه الطاقة إلى الفضاء الخارجي حوالي 30% أو بحدود $1.7 \times 10^6 [EJ/a]$ على شكل أمواج قصيرة ويصل إلى الأرض 70% أي $3.9 \times 10^6 [EJ/a]$. وهذه الطاقة الواصلة إلى الأرض تتحول بشكل طبيعي إلى أشكال مختلفة للطاقة حيث يصرف حوالي 22.1% أي ما يعادل $1.2 \times 10^6 [EJ/a]$ لتبخير مياه من المسطحات المائية.

يتحول إلى طاقة رياح وأمواج والتيارات بحرية ما نسبته 2.5% أي ما يعادل $1.4 \times 10^5 [EJ/a]$. أما طاقة المياه الجارية (الأنهار) فلا تزيد عن 0.003% أي حوالي $1.6 \times 10^2 [EJ/a]$.

جزء صغير نسبياً تمتصه جزيئات اليخضور (الكلوروفيل) لإنتاج الكتلة الحية، ويبلغ هذا الجزء بحدود $5.6 \times 10^3 [EJ/a]$ ، وتبقى كمية كبيرة نسبياً تذهب لتسخين سطح الأرض وتبلغ حوالي $2.5 \times 10^6 [EJ/a]$ أي حوالي 45%.



وكل ما تتلقاه الأرض من الطاقة الشمسية يتحول في النهاية إلى طاقة حرارية تثبث إلى الفضاء الخارجي.

تؤدي قوة جذب الكواكب إلى حدوث ظاهرة المد والجزر واحتياطي الأرض من هذه الطاقة يُقدَّر بـ $94 [EJ/a]$.

أما طاقة جوف الأرض فيتسرب منها إلى السطح بسبب فرق درجات الحرارة تيار حراري صغير غير ملحوظ يبلغ $0.063 [W/m^2]$ أو $63 [kW/km^2]$ وهذا يعادل حوالي $1000 [EJ/a]$ وجميع الطاقات المتحررة على سطح الأرض تتحول إلى طاقة حرارية تثبث إلى الفضاء الخارجي.

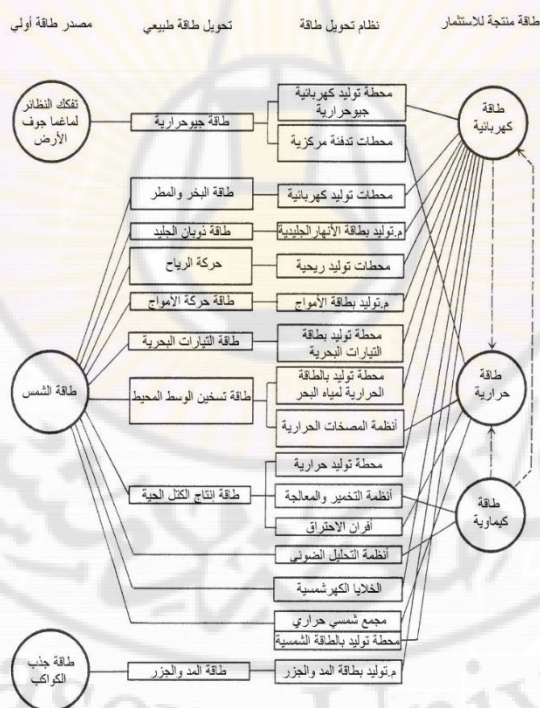
إنَّ الطاقة الشمسية التي تتلقاها الأرض تبلغ حوالي 10^4 ضعف الاستهلاك العالمي الحالي من الطاقة. أو بمعنى آخر يصلنا من الشمس طاقة أكثر مما نحتاج بآلاف المرات.

وليس من المستحيل تغطية احتياجاتنا للطاقة من الطاقة الشمسية الواصلة إلينا، وهذا يتعلق ببراعة سكان هذا الكوكب في تطوير التقانات والوسائل اللازمة لاستغلال ما يكفي حاجتهم من الطاقة من هذا المصدر الهائل.

إنّ مقارنة بسيطة لما تتلقاه الأرض من طاقات متجددة مع احتياطي الطاقات الأحفورية مثلاً تكفي لإيضاح الصورة، حيث تتلقى الأرض من هذه الطاقات سنوياً ضعافاً (حوالي 15 ضعف) من الاحتياطي الكلي من الطاقات الأحفورية.

يعطي المخطط في الشكل (1-2) تصوراً شاملاً عن مصادر الطاقات المتجددة على الأرض وتحولاتها الطبيعية، وكذلك وسائل تحويلها المعروفة إلى طاقة مفيدة لتغطية حاجة الاستهلاك البشري.

بالإلقاء نظرة على نظم تحويل الطاقة المستخدمة في استثمار الطاقات المتجددة يظهر مدى اعتماد استثمار الطاقات المتجددة على التطور العلمي بكافة نواحيه.



الشكل (1-2) أشكال وطرق استثمار الطاقة المتجددة

فإذا كان استثمار بعض أشكال الطاقات المتجددة بالإمكانات العلمية والتقنية المتاحة حالياً لا يزال مكلفاً، فإن هذه الكلفة تتناقص بسرعة مع تطور تقانات ووسائل الاستثمار

والتطور العلمي بشكل عام. كما أنَّ ارتفاع كلفة وأسعار الطاقات الأحفورية بشكل كبير أدى إلى حدوث توازن وربما أفضلية في الكلفة للطاقات المتجددة على الطاقات الأحفورية حالياً. مما يؤكد أنَّه سيكون لها الدور الأبرز في المستقبل القريب.

المخطط في الشكل (1-3) يلقي الضوء على نسب الطاقات المختلفة في تغطية حاجة العالم إلى الطاقة عبر ثلاث قرون خلت والمتوقع خلال القرنين القادمين. ففي البداية كان حرق الأخشاب وبعض المخلفات الزراعية والحيوانية كافياً لتغطية الحاجة للطاقة الحرارية. وطاقة الحيوانات والإنسان كافية لإنجاز العمليات الإنتاجية والمواصلات، ولم يكن الإنسان يفكر في مشكلة التلوث البيئي أو يعاني منها.

لقد تم الاعتماد على طاقة الكتلة الحية بوفرة في حينه والتي لم تكن تحتاج إلى تقانات متطورة لاستثمارها بينما تأخر التفكير باستثمار بقية أشكال الطاقات المتجددة حتى ظهور الثورة الصناعية وتطور التقانات، علماً بأنَّ ذلك لا ينفي استثماراً محدوداً لبعض أشكال الطاقات المتجددة الأخرى كطاقة الرياح في تشغيل الطواحين الهوائية وتسيير السفن، وطاقة المياه في النواعير والمطاحن، والطاقة الشمسية في التجفيف والتسخين وكله بشكل بسيط وبدائي.

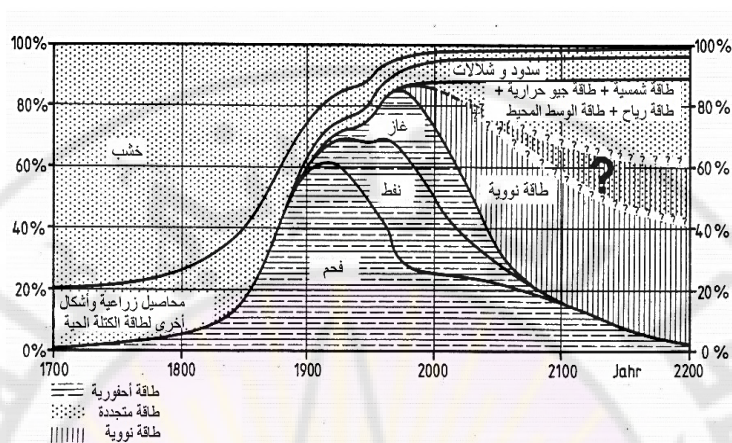
بدأ استثمار الطاقات الأحفورية بشكل واسع بالترافق مع الثورة الصناعية حيث كان الفحم الحجري في البداية ولاحقاً النفط ثم الغاز المصادر الأساسية للطاقة، وتراجع دور طاقة الكتلة الحية إلى حد كبير.

لكن الإفراط في استهلاك الطاقة الأحفورية خلق مشاكل كبيرة سبق أن نوهنا لها. وساعد التطور العلمي والتكنولوجي في البحث عن مصادر بديلة للطاقة، وبدأ استثمار الطاقات المتجددة والطاقة النووية بعد تحويلها بشكل أساسي إلى طاقة كهربائية يتطور بشكل ملحوظ.

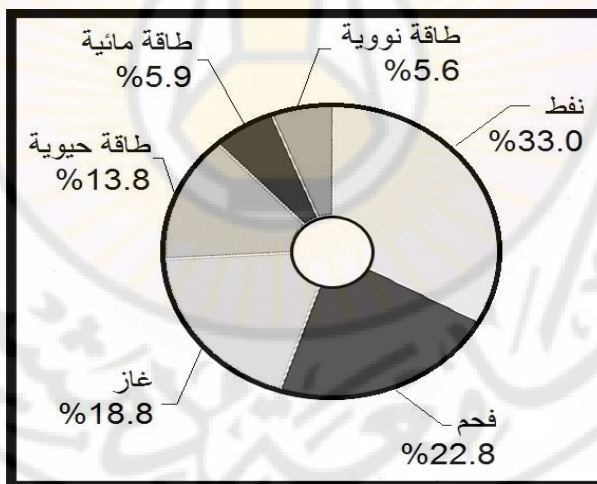
حسب المخطط يتوقع للطاقات المتجددة أن تغطي أكثر من نصف حاجة الاستهلاك العالمي من الطاقة خلال القرنين القادمين، على أن تغطي الطاقة النووية بقية الحاجة إلى الطاقة، وهذا سيعتبر مع نضوب الطاقة الأحفورية.

إلا أنَّ ارتفاع أسعار مصادر الطاقة الأحفورية بشكل هائل خلال الفترة الأخيرة يدفعنا لتتوقع استثماراً أكبر للطاقات المتجددة لتكون المصدر الأساسي للطاقة، وربما تغطي معظم حاجة العالم إلى الطاقة مع نضوب موارد الطاقة الأحفورية.

يبين الشكل (4-1) النسب المئوية لاستهلاك الطاقة من المصادر المختلفة في عام 2000 حيث لا يزال حجم الطاقات المتجددة غير ملحوظ إذا استثنينا الطاقة الحيوية والمائية.



الشكل (3-1) نسب الطاقات المختلفة في تغطية حاجة العالم إلى الطاقة عبر ثلاث قرون مضت والمتوقعة خلال القرنين القادمين



الشكل (4-1) النسب المئوية لاستهلاك الطاقة من المصادر المختلفة عام 2000



الفصل الثاني

الإشعاع الشمسي

يبلغ عمر الشمس 4.5 مليار سنة، ويقدر لها أن تستمر في إرسال أشعتها (وفق تقديرات علمية) فترة أخرى لا تقل عن عمرها الحالي. يبلغ قطر الشمس 1.39×10^6 [km]، وكتلتها 2×10^{30} [kg]، وحجمها أكبر من حجم الأرض بمقدار 3.33×10^5 مرة.

يُشكّل الهيدروجين 75% من كتلة الشمس والهيليوم 23%، أما بقية الكتلة أي 2% فتتألف من أكثر من 60 عنصر ثقيل على شكل أيونات أو ذرات مستقلة. تجري في الشمس عملية الاندماج النووي حيث تندمج أربع ذرات هيدروجين (أربعة بروتونات) لتشكل ذرة هليوم. وبما أن كتلة نواة ذرة الهيليوم أقل من كتلة أربع بروتونات فإن الفرق في الكتلة Δm يتحول إلى طاقة حسب علاقة أينشتاين:

$$E = \Delta m \cdot C_0^2 \quad (2 - 1)$$

C_0 : سرعة الضوء (3×10^8 [m/s]).

في القسم المركزي من الشمس حيث يبلغ الضغط 200×10^9 [bar] ودرجة الحرارة $(8 \div 40)$ مليون درجة مئوية يتم توليد حوالي 90% من الطاقة الكلية.

يُشكّل الجزء المركزي من الشمس 15% من حجم الشمس الكلي و 40% من الكتلة الكلية وتبلغ كثافة المادة فيه 10^5 [kg/m³]. يتم تحرير الطاقة في القسم المركزي من الشمس على شكل أشعة γ وبموجات قصيرة جداً، يزداد طولها كلما انخفضت الحرارة مع الابتعاد عن مركز الشمس.

يسمى الجزء السطحي من الشمس الفوتوسفير، وتبلغ سماكته بضع مئات من الكيلومترات وكثافته 10^{-5} . من هذا الجزء تنطلق الأشعة الشمسية إلى الفضاء الكوني.

تلي طبقة الفوتوسفير طبقة الكروموسفير بسماكة 10^4 [km] وهي طبقة ذات مادة كثافتها منخفضة جداً ودرجة حرارتها أعلى من سابقتها.

تنتشر أشعة الشمس في الفضاء الكوني حول الشمس بشكل كروي وتقل كثافة الأشعة مع الابتعاد عن الشمس.

يمكن حساب الطاقة الإشعاعية التي تحررها الشمس، وبالتالي ثابت الإشعاع الشمسي (أي شدة الإشعاع الشمسي عند حدود الغلاف الجوي للأرض) على الشكل التالي:

إشعاع الشمس يماثل إشعاع جسم أسود مطلق درجة حرارته $T_s = 5762[K]$ انطلاقاً من هذه الفرضية وأن قطر الشمس يبلغ $1.39 \times 10^6 [km]$ وباستخدام قانون ستيفان-بولتسمان ينتج:

$$J_s A_s = A_s \sigma T_s^4 = \pi D_s^2 \sigma T_s^4 \quad (2 - 2)$$

A_s : مساحة سطح الشمس $[m^2]$.

T_s : درجة حرارة سطح الشمس $[K]$.

D_s : قطر الشمس $[m]$.

σ : ثابت ستيفان-بولتسمان $(5.67 \times 10^{-8} [W/m^2 K^4])$.

فتكون طاقة الإشعاع الشمسي:

$$J_s A_s = \pi \times (1.39 \times 10^9)^2 \times (5.67 \times 10^{-8}) \times (5762)^4 \\ \Rightarrow J_s A_s = 3.8 \times 10^{26} [W]$$

أما شدة الإشعاع الشمسي:

$$J_s = \frac{(3.8 \times 10^{26})}{\pi (1.39 \times 10^9)^2} = 62.5 \times 10^6 [W/m^2]$$

وتمثل هذه الشدة شدة الإشعاع الشمسي عند سطح الشمس، وهذه الشدة تضعف بشكل كبير مع انتشارها عبر سطح كروي يكبر بالابتعاد عن الشمس.

ويمكن حساب هذه الشدة عند حدود الغلاف الجوي الخارجي للأرض إذا علمنا أن الإشعاع الشمسي عند هذا البعد يكون قد انتشر على مساحة سطح كرة قطرها وحدتين كونيتين (الوحدة الكونية $\overline{AE}$ هي المسافة بين الشمس والأرض $\overline{AE} = 1.5 \times 10^8 [km]$).

وعندها يكون:

$$J_s A_s = J_0 A_0 \quad (2 - 3) \\ J_s \pi D_s^2 = J_0 \pi D_0^2$$

أو حيث:

J_0 : شدة الإشعاع الشمسي عند حدود الغلاف الجوي الخارجي للأرض (ويسمى ثابت الإشعاع الشمسي) مقاساً بالواط.

D_0 : قطر الدائرة الكونية التي نصف قطرها المسافة بين الأرض والشمس وقطر يبلغ:

$$D_0 = 2\overline{AE} = 3 \times 10^{11} [m]$$

ومنه يمكن حساب J_0 :

$$J_0 = J_s \left(\frac{D_s}{D_0} \right)^2 = (62.5 \times 10^6) \times \left(\frac{1.39 \times 10^9}{3 \times 10^{11}} \right)^2 = 1341 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

وفق قياسات حديثة تم اعتماد $J_0 = 1360 [W/m^2]$ وتسمى هذه القيمة بثابت الإشعاع الشمسي. وتُعتمد في عمليات حساب الإشعاع الشمسي رغم أنها تتغير قليلاً بحسب تغير بعد الأرض عن الشمس. ويبلغ مقدار التغير في هذه القيمة حوالي $\pm 4.4\%$ وتتراوح شدة الإشعاع الشمسي عند حدود الغلاف الجوي الخارجي بين $1293 [W/m^2]$ صيفاً و $1412 [W/m^2]$ شتاءً.

إن طيف الإشعاع الشمسي يتراوح بين الأشعة الكونية بأمواف قصيرة جداً $10^{-20} [m]$ وحتى أمواف بطول عدة كيلومترات. إن نسبة 99% من الإشعاع الشمسي ذو موجات طولها يقع في المجال $(0.27 \div 4.96 [\mu m])$.

تقع شدة الإشعاع العظمى عند طول موجة $0.5 [\mu m]$ وسط مجال الأشعة المرئية، وبالتالي فإن حوالي 90% من الإشعاع الشمسي يقع في مجال الأشعة المرئية والأشعة تحت الحمراء. و 48% من هذا الإشعاع يقع في مجال الأشعة المرئية $(0.38 \div 0.78 [\mu m])$.

يمكن حساب شدة الإشعاع الشمسي الفعلية عند حدود الغلاف الجوي الخارجي لأي يوم من أيام السنة أيضاً من العلاقة التقريبية التالية:

$$J_0 = 1367 \times [1 + 0.33 \cos(360n/365)]$$

n: رقم اليوم في السنة $(1 \div 365)$.

1-2 الإشعاع الشمسي على سطح الأرض

يصل إلى حدود الغلاف الجوي الخارجي للأرض طاقة من الإشعاع الشمسي كما ذكرنا تبلغ $5.6 \times 10^6 [E/a]$ يقوم الغلاف الجوي بامتصاص حوالي 30% من هذه الطاقة ويعيد إشعاعها إلى الفضاء الخارجي مرة أخرى. يذهب حوالي 45% من هذه الطاقة لتسخين سطح الكرة الأرضية و 23% لتبخير الماء وتشكيل السحب. إن نسبة 0.2% من هذه الطاقة هي التي تؤدي إلى تشكيل الأمواف والتيارات البحرية في المحيطات. ونسبة 0.5% تتحول إلى طاقة رياح والتيارات هوائية في جو الأرض، ونسبة أقل تستخدم في عملية التمثيل الضوئي لإنتاج الكتلة الحية. إن نصيب اليابسة من الطاقة الشمسية التي تتلقاها الكرة الأرضية هو أقل من الربع.

تتأثر شدة الإشعاع الشمسي الذي تتلقاه الأرض بخط العرض والزمن اليومي والسنوي وكذلك بالأحوال الجوية السائدة. ويبلغ الحد الأعظمي لشدة الأشعة الشمسية الواصلة إلى سطح الأرض $1100[W/m^2]$ منها $1000[W/m^2]$ على شكل إشعاع مباشر وحوالي $100[W]$ أشعة منتشرة أو إشعاع غير مباشر.

2-2 الإشعاع الشمسي في القطر العربي السوري

يتلقى الحزام الصحراوي على جانبي خط الاستواء أكبر كمية من الإشعاع الشمسي. ويدخل في هذا الحزام المنطقة العربية ووسط آسيا وأستراليا وأجزاء من الأمريكيتين. يتراوح متوسط الإشعاع الشمسي السنوي على سطح الأرض $2500 \div 850 [kWh/m^2]$. وبما أن القطر العربي السوري يقع ضمن المناطق الأكثر تعرضاً للإشعاع الشمسي فإن معدل الإشعاع الشمسي السنوي يصل إلى $2300 [kWh/m^2]$ ، وبهذا المعدل يتلقى القطر سنوياً ما يزيد عن $4 \times 10^{14} [kW.h]$ أو ما يعادل $14.4 \times 10^2 [EJ]$ أي أكثر من ثلاثة أضعاف الاستهلاك العالمي من الطاقة، أو آلاف المرات أكثر من حاجة القطر إلى الطاقة.

2-3 الإشعاع الشمسي على السطح الأفقي

يصل إلى سطح الأرض من الإشعاع الشمسي وعلى سطح عمودي على الأشعة الشمسية إشعاع مباشر يمكن حسابه من العلاقة:

$$J_{EV} = \epsilon J_0 \sin h \quad (2-4)$$

حيث:

ϵ : معامل نفاذ الأشعة الشمسية عبر الغلاف الجوي. يختلف تبعاً للمكان والزمان ويوجد لكل دولة جداول تعطي قيمة هذا المعامل. وباعتبار لا توجد جداول مرجعية لقيم النفاذ في سورية، لذلك تم اعتبار هذا المعامل بقيمة 0.8 على مدى العام لأن هذه القيمة تحقق نتائج قريبة من القيم التجريبية المقاسة.

h : هي الزاوية بين الإشعاع الشمسي الوارد والسطح الأفقي ونطلق عليها زاوية ارتفاع الشمس.

وبالتالي تصبح العلاقة $(2-4)$ بالشكل:

$$J_{EV} = 0.8 J_0 \sin h$$

أما شدة الإشعاع الشمسي المباشر على السطح الأفقي فيمكن حسابه من العلاقة:

$$J_{Eh} = J_{EV} \sin h = 0.8 J_0 \sin^2 h \quad (2-5)$$

وذلك لأنه في هذه الحالة تكون زاوية الورود متممة لزاوية ارتفاع الشمس، أي:

$$\sin h = \cos \Psi$$

يمكن حساب زاوية ارتفاع الشمس من العلاقة التالية:

$$\sin h = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \gamma \quad (2-6)$$

φ : زاوية خط العرض للمنطقة المعنية.

δ : زاوية انحراف الشمس وتتعلق بالشهر واليوم من العام.

γ : الزاوية الساعية للشمس.

تحسب δ من العلاقة التالية:

$$\delta = 23.4 \sin[(D_y - 81)360/365] \quad (2-7)$$

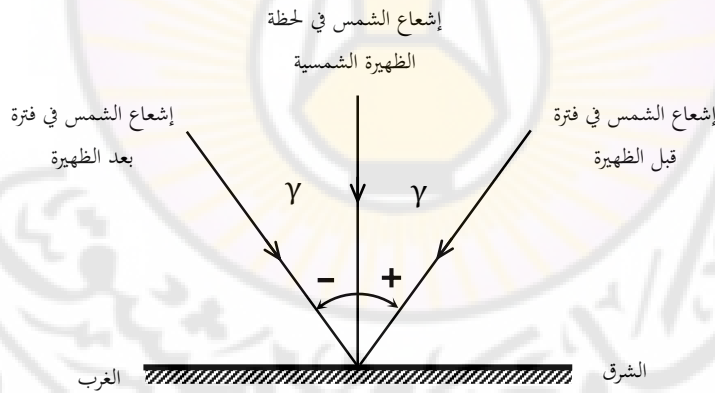
D_y : رقم اليوم في السنة من 1 وحتى 365 اعتباراً من بداية العام.

أما الزاوية الساعية للشمس γ فتحسب من العلاقة:

$$\gamma = 15(12 - Z) \quad (2-8)$$

Z : رقم الساعة في اليوم.

15: هو عدد الدرجات التي تدورها الأرض حول محورها في الساعة الواحدة، وبالتالي فإن γ تمثل الزاوية بين إشعاع الشمس في اللحظة المدروسة وإشعاع الشمس في لحظة الظهيرة الشمسية كما هو موضح في الشكل (1-2).



الشكل (1-2) مسار الأشعة الشمسية في مستوي المدار النسبي للشمس

4-2 طول النهار

استناداً إلى علاقات الإشعاع الشمسي يمكن حساب طول النهار حيث يبدأ النهار بارتفاع الشمس يساوي الصفر ليليل قيمة أعظمية في الظهيرة ويعود ليليل الصفر عند الغروب.

تتراوح γ بين الصفر في لحظة الظهيرة وقيمة معينة في لحظة الغروب أو الشروق. إذا تم تحديد قيمة هذه الزاوية يمكن تحديد الفترة التي تشع فيها الشمس. أو بالأحرى طول النهار الذي يحسب بالعلاقة:

$$S_d = (2\gamma_{h=0})/15 \quad (2-9)$$

$2\gamma_{h=0}$: هي الزاوية التي تدورها الأرض حول محورها من لحظة الشروق حتى لحظة الغروب. وتحسب $\gamma_{h=0}$ من علاقة زاوية ارتفاع الشمس h عندما يكون هذا الارتفاع مساوياً للصفر أي:

$$\begin{aligned} 0 &= \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \gamma_{h=0} \\ \Rightarrow \cos \gamma_{h=0} &= -(\sin \delta \sin \varphi) / (\cos \delta \cos \varphi) \\ \cos \gamma_{h=0} &= -\tan \delta \tan \varphi \\ \Rightarrow \langle 2-10 \rangle \gamma_{h=0} &= \arccos(-\tan \delta \tan \varphi) \end{aligned}$$

5-2 كمية الإشعاع الشمسي اليومي

إن معرفة طول النهار وشدة الإشعاع الشمسي في كل لحظة من لحظات النهار تسمح بحساب كمية الإشعاع الشمسي خلال يوم معين، وذلك بإجراء تكامل على شدة الإشعاع الشمسي طيلة نهار اليوم المعني:

$\Leftarrow$ كمية الإشعاع اليومي على السطح العمودي على أشعة الشمس:

$$G_{DV} = \int_{Z_1}^{Z_2} J_{EV}(Z) dZ \quad (2-11)$$

$\Leftarrow$ كمية الإشعاع اليومي على السطح الأفقي:

$$G_{DH} = \int_{Z_1}^{Z_2} J_{EH}(Z) dZ \quad (2-12)$$

Z_2, Z_1 : ساعة الشروق والغروب على التوالي.

يبين الشكل (2-2) شدة الإشعاع الشمسي على السطح الأفقي، وكذلك على السطح الموجه عمودياً على أشعة الشمس لمنطقة دمشق في أيام مختارة من العام. تمثل المساحة المحصورة بين المنحني ومحور التوقيت الشمسي كمية الطاقة اليومية التي يتلقاها السطح المعني في التاريخ المعني. وتمثل المساحات المهشرة الفرق اليومي في الطاقة بين السطوح الأفقية والسطوح الموجهة عمودياً على الأشعة الشمسية. يلاحظ أن تأثير التوجيه يكون كبيراً في فصل الشتاء وأقل حجماً في فصل الصيف، وذلك بسبب ميل الشمس الكبير نسبياً في فصل الشتاء.

يمكن معرفة قيمة كل من Z_2, Z_1 من طول النهار حيث:

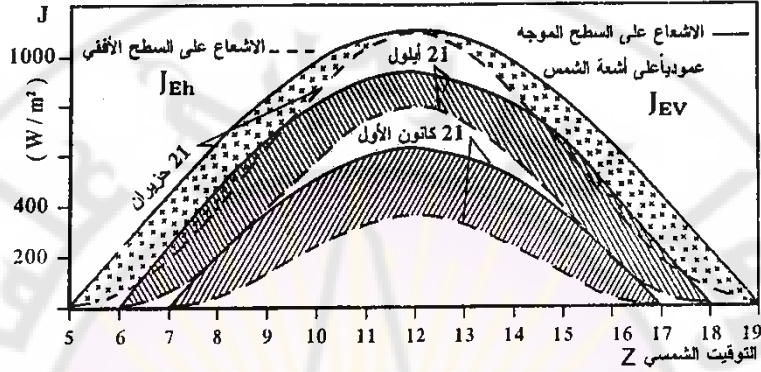
$$S_d = Z_2 - Z_1 \quad (2-13)$$

وبما أنَّ الإشعاع الشمسي خلال نهار كامل متناظر حول لحظة الظهيرة لمنطقة ما،

وأنَّ لحظة الظهيرة الشمسية هي منتصف النهار إذاً:

$$Z_1 = 12 - S_d/2 \quad (2-14)$$

$$Z_2 = 12 + S_d/2 \quad (2-15)$$



الشكل (2-2) تغير شدة الإشعاع الشمسي على سطح أفقي و سطح موجه عمودياً على أشعة الشمس لسماء صافية في دمشق في أيام مختارة من العام

أما كمية الإشعاع الشمسي حسب التكاملات السابقة فتصبح على الشكل التالي:

$$G_{DV} = \int_{Z_1=(12-S_d/2)}^{12} J_{EV}(Z) dZ + \int_{12}^{Z_2=(12+S_d/2)} J_{EV}(Z) dZ \quad (2-16)$$

لكن:

$$\int_{Z_1=(12-S_d/2)}^{12} J_{EV}(Z) dZ = \int_{12}^{Z_2=(12+S_d/2)} J_{EV}(Z) dZ \quad (2-17)$$

إذاً:

$$G_{DV} = 2 \int_{Z_1}^{12} J_{EV}(Z) dZ \quad (2-18)$$

وكذلك:

$$G_{DH} = 2 \int_{Z_1}^{12} J_{EH}(Z) dZ \quad (2-19)$$

تمثل كل من القيمتين G_{DV} و G_{DH} المساحة المحصورة بين كل من التابعين J_{EV} و J_{EH} والمحور Z على التوالي.

إذا تم رسم المنحنيين بمقياس معين يمكن تحديد المساحة، وبالتالي معرفة كمية الإشعاع الكلي دون الحاجة إلى إجراء التكامل حسابياً.

6-2 التوضع الأمثل لمجمعات شمسية مسطحة

كي يقوم المجمع الشمسي بتجميع أكبر كمية ممكنة من الإشعاع الشمسي خلال النهار فمن الطبيعي أن التوضع الأمثل هو أن يوجّه المجمع باتجاه الشمس بشكل مستمر بحيث يبقى سطحه عمودياً على الأشعة الشمسية. وهذه الطريقة لا تستعمل إلا في حالات خاصة كما في حالة الدراسة المخبرية.

توضع المجمعات الشمسية المسطحة الخاصة بتسخين الماء لأغراض الاستعمال المنزلي بشكل ثابت بحيث تحقق تجميعاً أكبر قدر ممكن من الطاقة في الفصل التصميمي لهذه التجهيزات (وهو في حالتنا فصل الشتاء)، حيث توجّه المجمعات نحو الجنوب وتعطى ميلاً مناسباً.

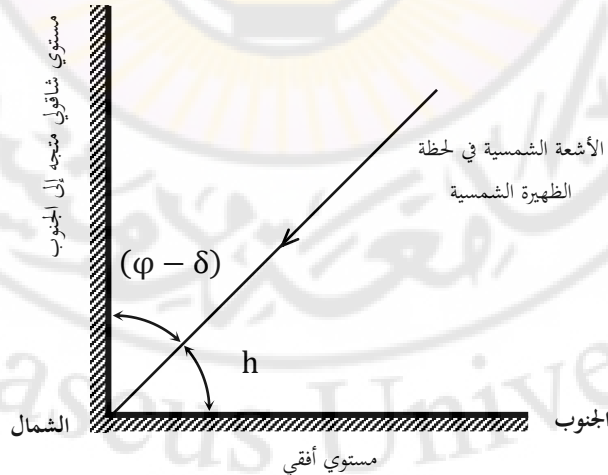
الميل المناسب يتم تحديده من الميل الوسطي لإشعاع الشمس لحظة الظهيرة عن التوضع الشاقولي خلال فصل الشتاء. والذي يمكن حسابه من العلاقة:

$$\alpha = \varphi - \delta \quad (20 - 2)$$

حيث أن φ ثابتة بالنسبة لمنطقة ما (دمشق حوالي 33.5°). أما δ في فصل الشتاء فتتراوح بين 0° و -23.4° والقيمة الوسطية هي -12° إذا فالميلان المناسب لمجمعات كهذه نحو الجنوب هو:

$$\alpha = 33.5 - (-12) = 45.5^\circ$$

إذا يتم وضع المجمعات باتجاه الجنوب بميلان قدره $\alpha = 45.5^\circ$.



الشكل (3-2) ارتفاع الشمس وعلاقته بزاوية خط العرض وانحراف الشمس δ أي بتاريخ اليوم من أيام العام

أما إذا كانت الغاية من المجمعات تسخين المياه صيفاً لأغراض التكييف فعندها تحسب α المناسبة على الشكل التالي:

$$\begin{aligned}\alpha &= \varphi - \delta \\ \delta_m &= (0 + 23.4)/2 \approx 12 \\ \alpha &= 33.5 - 12 = 21^\circ\end{aligned}$$

2-7 الإشعاع الشمسي على السطوح المائلة

يمكن حساب شدة الإشعاع الشمسي على السطوح المائلة من معرفة الزاوية بين الإشعاع الشمسي والسطح المائل وكذلك شدة الإشعاع الشمسي على السطح العمودي على أشعة الشمس التي تُحسب من العلاقة:

$$J_{EV} = 0.9 J_0 \sin h \quad (2 - 21)$$

عندها تكون شدة الإشعاع الشمسي على السطح المائل:

$$J_{Em} = J_{EV} \sin \Psi \quad (2 - 22)$$

Ψ : الزاوية بين السطح المائل والأشعة الشمسية. وتحسب من العلاقة:

$$\sin \Psi = (\cos \alpha \sin \varphi - \cos \varphi \cos \beta \sin \alpha) \sin \delta + (\sin \varphi \cos \beta \sin \alpha + \cos \alpha \cos \varphi) \cos \delta \cos \gamma + \sin \beta \sin \alpha \cos \delta \cos \gamma \quad (2 - 23)$$

α : زاوية ميل السطح.

β : زاوية انحراف السطح المائل نحو الشرق (موجب) أو نحو الغرب (سالب).

φ : زاوية خط العرض.

δ : زاوية انحراف الشمس.

γ : الزاوية الساعية للشمس.

وتكون شدة الإشعاع الشمسي على السطح المائل:

$$J_{Em} = 0.9 J_0 \sin h \sin \Psi \quad (2 - 24)$$

ويمكن حساب زاوية ارتفاع الشمس في اللحظة من النهار من نفس علاقة $\sin \Psi$

بتعويض $\alpha = 0$ و $\beta = 0$:

$$\sin h = \sin \Psi_{\substack{\alpha=0 \\ \beta=0}} = \sin \varphi \cos \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \gamma$$



الفصل الثالث

المجمعات الشمسية المسطحة

وظيفة المجمعات الشمسية هي التقاط الأشعة الشمسية وتحويل طاقتها إلى طاقة حرارية قابلة للاستثمار. وللمجمعات الشمسية نوعين أساسيين:

- مجمعات شمسية مسطحة (دون تركيز للأشعة الشمسية).
- مجمعات شمسية مركزة.

تسمى المجمعات الشمسية المسطحة في العديد من المراجع بمجمعات الحرارة المنخفضة، وذلك نظراً لأن درجات الحرارة العملية التي يمكن الوصول إليها بواسطة هذه المجمعات لا تتجاوز 120°C . أي أنه بواسطة هذه المجمعات يمكن إنتاج مصدر طاقة حرارية بمنسوب جيد يجد تطبيقات واسعة. لذلك تلقى المجمعات الشمسية المسطحة انتشاراً واسعاً، وذلك أيضاً لسهولة تصنيعها وانخفاض سعرها.

إن درجات الحرارة التي يمكن الوصول إليها بواسطة المجمعات المسطحة وكذلك مردود هذه المجمعات يتعلق بشكل رئيسي ببنية هذه المجمعات ونوعية المواد المستخدمة وذلك عند شروط خارجية معينة.

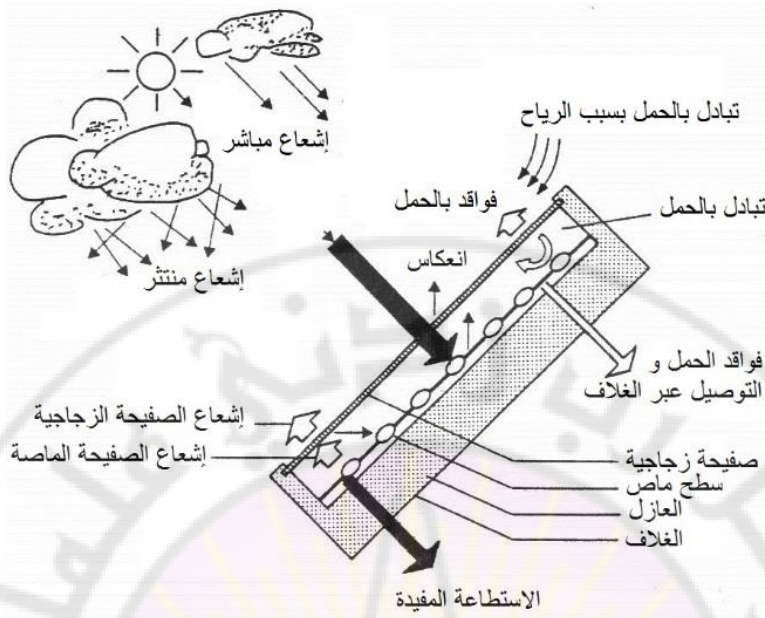
في هذا الفصل سيتم دراسة المجمعات الشمسية المسطحة وسيخصص فصل مستقل للمجمعات الشمسية المركزة.

3-1 بنية المجمعات الشمسية المسطحة

يتألف المجمع الشمسي المسطح من صفيحة معدنية سوداء تمتص الإشعاع الشمسي وتحوله إلى طاقة حرارية محسوسة، تسمى هذه الصفيحة (السطح الماص).

تحت السطح الماص تتوضع أنابيب يتدفق عبرها الوسيط الناقل للحرارة (الماء غالباً). يقوم هذا الوسيط بنقل الطاقة الحرارية من السطح الماص عبر دائرة مناسبة لاستثمار هذه الطاقة. ولتخفيض الفواقد الحرارية يتم عزل اللاقط من الأسفل وتغطيته بطبقة شفافة أو أكثر من الأعلى.

يبين الشكل (3-1) بنية مجمع شمسي مسطح وكذلك تيارات التوازن الحراري لهذا المجمع.



الشكل (1-3) مقطع عرضي في مجمع شمسي مسطح

أما الشكل (2-3) فيبين مقاطع لمجمعات شمسية مختلفة البيئة. وتعتبر المجمعات الشمسية التي تستخدم الماء كوسيط ناقل أكثر انتشاراً نظراً لسهولة وصلها على شبكات الماء الساخن والتدفئة وغيرها من التطبيقات.

يُعتبر السطح الماص الجزء الأهم في المجمع. ويتألف غالباً من صفيحة معدنية رقيقة مع جملة أنابيب نحاسية تتصل مع بعضها عبر أنبوبين (مجمعين)، سفلي يدخله الماء البارد وعلوي يجمع الماء الساخن. وتثبت الأنابيب على الصفيحة إما باللحام أو بالثبوت الميكانيكي.

يبين الشكل (3-3) نماذج مختلفة لصفائح ماصة وطرق تثبيت الأنابيب الناقلة بها. تقوم الصفائح الماصة كما ذكرنا بامتصاص الطاقة الشمسية وتحويلها إلى طاقة حرارية مفيدة. يجب أن تتمتع الصفائح الماصة بمعاملات امتصاص عالية α وفي الحالة المثالية يكون $\alpha(\lambda) = 1$ وهي حالة الجسم الأسود المطلق الذي يمتص كل الإشعاعات مهما اختلف طول الموجه λ .

من المعروف أنّ العديد من السطوح السوداء العادية لها معامل امتصاص $\alpha \geq 0.9$ لكن لهذه الأجسام وحسب قانون كيرشوف معامل إشعاع $\varepsilon(\lambda)$ أعظمي.

تتعلق النسبة بين الطاقة التي يشعها الجسم الأسود والطاقة التي يمتصها بطول الموجه ودرجة حرارة الجسم أي:

$$\frac{\varepsilon(\lambda)}{\alpha(\lambda)} = f(\lambda, t) \quad \langle 3 - 1 \rangle$$

يستفاد من هذه العلاقة في اختيار سطوح ماصة انتقائية لها معاملات امتصاص α كبيرة في مجال الأشعة المرئية، ومعاملات إشعاع صغيرة ما أمكن في مجال الأشعة تحت الحمراء.

تسمى الطبقات بالمواصفات السابقة بطبقات α/ε وحسب نوع المادة وطريقة تغطية الصفيحة الماصة يمكن الوصول إلى سطوح انتقائية بنسبة α/ε تصل إلى أكثر من 10. بينما تكون هذه النسبة عند السطوح غير الانتقائية مساوية للواحد.

رغم أن السطوح الانتقائية أدت إلى تحسين أداء المجمعات الشمسية بشكل كبير إلا أن لهذه السطوح مساوئ ملحوظة:

أولاً: حساسة بشكل كبير لدرجات الحرارة والعوامل الجوية الخارجية.

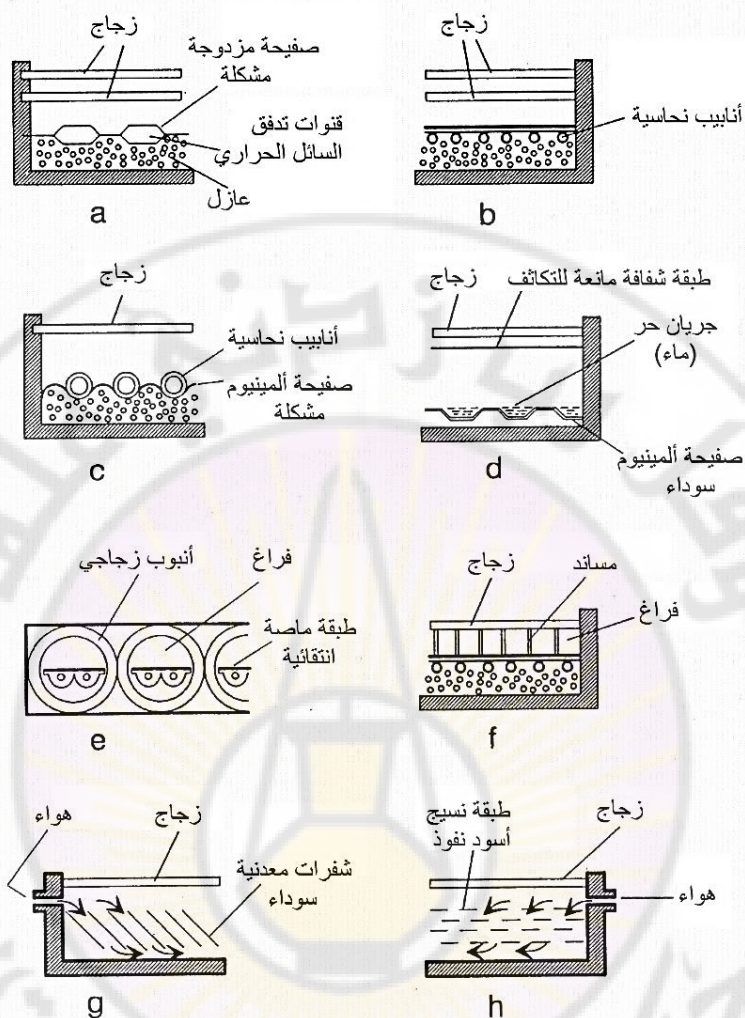
ثانياً: كلفة إنتاج عالية.

تتعلق جودة الطبقة الماصة أيضاً بمعامل الانعكاس ρ ، ومن المعروف أن للأجسام غير الشفافة معامل انعكاس يحقق العلاقة:

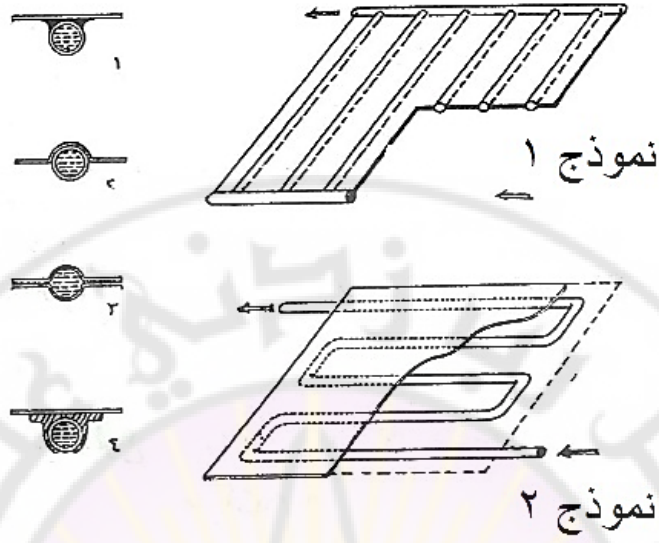
$$\alpha + \rho = 1$$

وبالتالي فالأمر محلول بالنسبة للطبقات الانتقائية ذات معامل الامتصاص الكبير في مجال الأشعة المرئية حيث تكون α أعظمية فتكون ρ صغيرة.

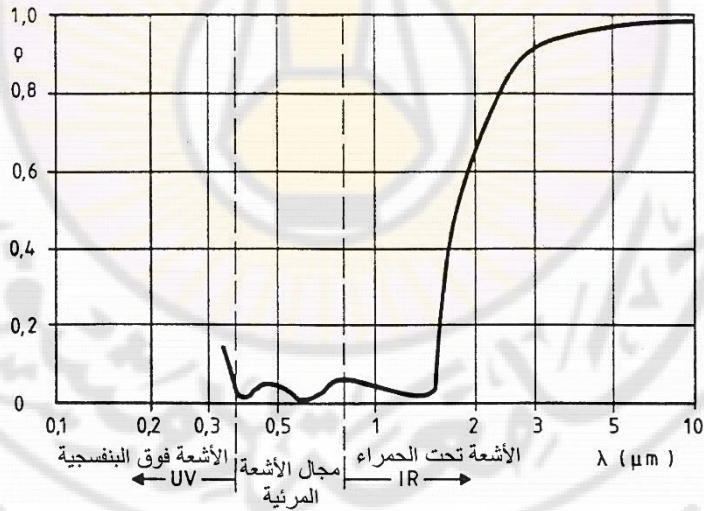
يبين الشكل (3-4) العلاقة بين معامل الانعكاس وطول الموجة لطبقات ماصة.



الشكل (2-3) أشكال مختلفة لبنية المجمعات الشمسية المسطحة



الشكل (3-3) طرق تثبيت الأنابيب الناقلة بالسطح الماص



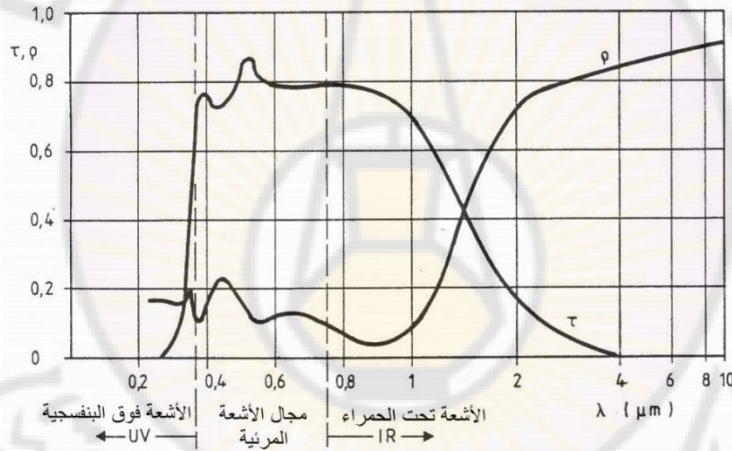
الشكل (4-3) معامل الانعكاس كتابع لطول الموجة للطبقات الماصة الانتقائية

للغطاء الشفاف أيضاً أهمية كبيرة في رفع كفاءة المجمعات الشمسية المسطحة وتخفيض فواقد الحمل بشكل كبير، ولكن الصعوبة تكمن في خفض الإشعاع من وعبر الغطاء الشفاف. لكن كما في الطبقات الماصة الانتقائية على الزجاج أن يكون ذا معامل

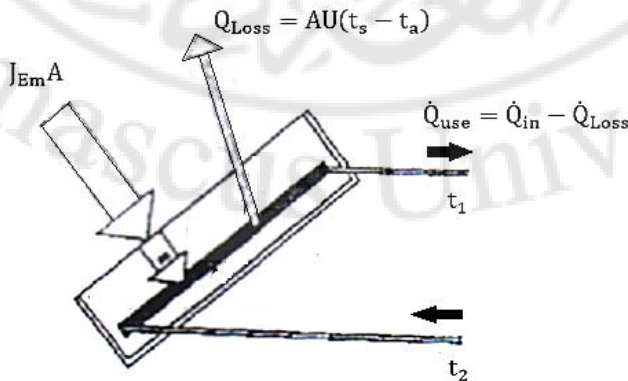
نفاذ للأشعة المرئية τ عالياً. بينما يجب أن يكون هذا المعامل أصغر ما يمكن للأمواج الطويلة. وهنا يتم الحديث عن زجاج اصطفاي. انظر الشكل (3-5) في حالة الزجاج الاصطفاي. يكون الانعكاس أيضاً أصغرياً في مجال الأشعة المرئية وفي مجال الأشعة ذات الأمواج الطويلة.

2-3 الاستطاعة المفيدة للمجمعات الشمسية المسطحة والمردود

يبين الشكل (3-6) مخططاً مبسطاً للتوازن الحراري لمجمع شمسي مسطح بإهمال الفواقد الناتجة عن الانتقال الحراري عبر السطوح المعزولة، ودمج الفواقد عبر الغطاء الزجاجي من إشعاع وانعكاس وحمل في مركبة واحدة وبمعامل انتقال حراري كلي U نحصل على الشكل المذكور.



الشكل (3-5) معاملا نفاذ الأشعة المرئية τ والانعكاس ρ لزجاج اصطفاي كتاب طول الموجة



الشكل (3-6) مخطط التوازن الطاقى لمجمع شمسي مسطح

يتلقى سطح المجمع إشعاع شمسي طاقته $J_{Em} A [W]$.
 J_{Em} : شدة الإشعاع الشمسي على السطح المائل للمجمع $[W/m^2]$.
 A : مساحة سطح المجمع $[m^2]$.

ينفذ من هذه الاستطاعة عبر الزجاج ما مقداره $J_{Em} A \cdot \tau$.

τ : معامل نفاذ الأشعة المرئية عبر الزجاج.

تصل الاستطاعة المتبقية إلى السطح الماص ويتم امتصاص ما مقداره:

$$\dot{Q}_{in} = J_{Em} A \cdot \tau \cdot \alpha [W] \quad (3-2)$$

أما الاستطاعة المفقودة فتحسب بالعلاقة التالية:

$$\dot{Q}_{Loss} = AU(T_s - T_a) [W] \quad (3-3)$$

T_s : درجة حرارة السطح الماص $[^\circ C]$.

T_a : درجة حرارة الهواء المحيط $[^\circ C]$.

U : معامل الانتقال الحراري الكلي بين سطح المجمع والجو المحيط $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$.

تتعلق قيمة U بنوع السطح الماص ونوع وعدد الأغشية الزجاجية.

يتراوح U بين $8 [W/m^2 \cdot ^\circ C]$ لمجمع بسطح ماص عادي وغطاء زجاجي واحد من

النوع غير الاصطفائي و $2 [W/m^2 \cdot ^\circ C]$ لمجمع شمسي بسطح ماص انتقائي وغطاءين

زجاجيين من النوع الاصطفائي.

تم إيجاد هذه القيم تجريبياً عند سرعة رياح $5 [m/s]$ ودرجة حرارة خارجية $10 [^\circ C]$.

تُمثل الاستطاعة المفيدة الفرق بين الاستطاعة الممتصة والاستطاعة المفقودة وعليه:

$$\dot{Q}_{use} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{Loss} [W] \quad (3-4)$$

$$\dot{Q}_{use} = J_{Em} A \cdot \tau \cdot \alpha - AU(T_s - T_a) [W] \quad (3-5)$$

أما الاستطاعة النوعية المفيدة:

$$\dot{q}_{use} = \frac{\dot{Q}_{use}}{A} = J_{Em} \cdot \tau \cdot \alpha - U(T_s - T_a) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3-6)$$

يعطى المردود بالمعادلة التالية:

$$\eta = \frac{\dot{q}_{use}}{J_{Em}} = \tau \cdot \alpha - \frac{U}{J_{Em}} (T_s - T_a) \quad (3-7)$$

أو بشكل أبسط:

$$\eta = \eta_0 - \frac{U}{J_{Em}} (T_s - T_a) \quad (3-8)$$

نلاحظ من علاقات الاستطاعة المفيدة والمردود السابقة ارتباطها بدرجة حرارة السطح الماص. وحيث أن درجة حرارة السطح الماص ليست ثابتة ويصعب تحديدها فقد طور كل من العالمين Hottel و Woertz عام 1942م نموذجاً عملياً لمجمع شمسي مسطح.

قام العالم Bliss لاحقاً بتحسينه لذلك يسمى HWB-MODELL نسبة إلى العلماء الثلاثة. ولا يزال هذا النموذج معتمداً حتى الآن في كل عمليات النمذجة للمجمعات الشمسية المسطحة. والمعادلة الأساسية لهذا النموذج هي:

$$\dot{Q}_{use} = F_R A [\tau \cdot \alpha \cdot J_{Em} - U(T_2 - T_a)] [W] \quad (3 - 9)$$

$\dot{Q}_{use}$: الاستطاعة المفيدة للمجمع [W].

F_R : معامل تحريك الحرارة.

T_2 : درجة حرارة دخول السائل إلى المجمع [°C].

بقية الرموز كما في العلاقات السابقة.

يُمثل معامل تحريك الحرارة F_R النسبة بين الاستطاعة المفيدة والاستطاعة المستفادة من نفس المجمع فيما لو كانت درجة حرارة سطحه ثابتة $T_s = T_2$ ومساوية لدرجة حرارة دخول السائل إلى المجمع عند ثبات بقية الشروط. أو:

$$F_R = \frac{\text{الاستطاعة المفيدة الفعلية}}{\text{الاستطاعة المفيدة في حالة } (T_s = T_2)}$$

في العلاقة (3 - 9) نجد أن $\dot{Q}_{use}$ هي تابع خطي لفرق درجات الحرارة بين السائل الداخل إلى المجمع والوسط المحيط. وبدلاً من T_s في العلاقة (3 - 5) والتي يصعب تحديدها تُستخدم هنا درجة الحرارة T_2 التي يسهل قياسها ومعرفتها. ويفيد F_R كمعامل تصحيح لحساب الاستطاعة المفيدة.

يتم تعويض الخطأ في اعتماد العلاقة (3 - 9) لدرجة حرارة ثابتة للسطح الماص مساوية لدرجة حرارة دخول السائل T_2 عن طريق إيجاد قيم تجريبية لمعامل انتقال الحرارة الكلي U .

يمكن حساب معامل تحريك الحرارة من العلاقة:

$$F_R = F' \cdot F'' \quad (3 - 10)$$

F' : معامل فاعلية السطح الماص.

F'' : معامل السعة الحرارية للمجمع.

معامل السعة الحرارية F'' يأخذ بالاعتبار السعة الحرارية للسائل الناقل للحرارة في واحدة السطح من المجمع والتي لم تؤخذ بالاعتبار حتى الآن.

$$F'' = \frac{\dot{m} \cdot C}{U \cdot F'} \left(1 - e^{-F' \frac{U}{\dot{m} \cdot C}} \right) \quad (3-11)$$

C: السعة الحرارية النوعية للسائل [J/kg. °C].

$\dot{m}$: التدفق الكتلي لوحدة السطح [kg/s · m²].

U: معامل انتقال الحرارة الكلي للمجمع [W/m² · °C].

يُمثل معامل فاعلية السطح الماص F' النسبة بين الاستطاعة المفيدة والاستطاعة التي

يمكن الحصول عليها من نفس المجمع فيما لو كانت درجة حرارة السطح الماص T_m ثابتة عند ثبات بقية الشروط.

حيث:

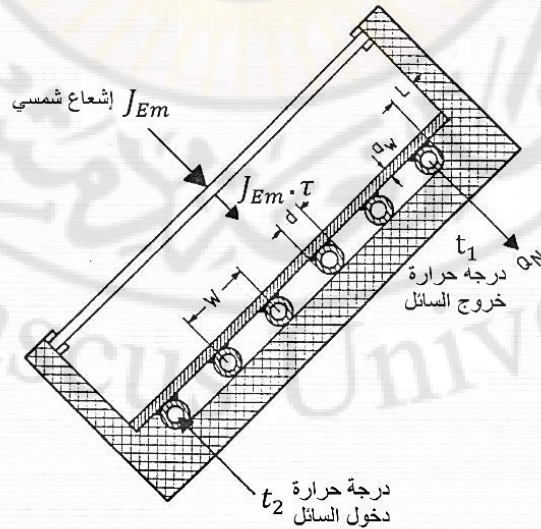
$$T_m = (T_1 + T_2)/2$$

علماً بأن $F' = 1$ للسطح الماص المثالي.

تتعلق قيمة F' بالأبعاد الهندسية للأنايب والسطح الماص وكذلك بنوعية المواد

المستخدمة. انظر الشكل (7-3). ويمكن حسابه من العلاقة التالية:

$$F' = \frac{1/U}{w \left[\frac{1}{U[d+(w-d)F^*]} + \frac{1}{\pi d \alpha_R} \right]} \quad (3-12)$$



الشكل (7-3) الأبعاد الهندسية للمجمع الشمسي المسطح

في العلاقة السابقة:

w : المسافة بين أنبوبين [m].

d : قطر الأنبوب [m].

α_R : معامل الانتقال الحراري في الأنبوب $[W/m^2 \cdot K]$.

F^* : معامل التريش. ويأخذ بالاعتبار انتقال الحرارة من الصفيحة الماصة (زعانف وأضلاع) إلى الأنبوب:

$$F^* = \frac{\tanh(b \cdot \ell)}{b \cdot \ell} \quad (3 - 13)$$

حيث:

$$b = \sqrt{\frac{U}{\lambda \cdot \alpha_w}} \left[\frac{1}{m} \right]$$

λ : معامل التوصيل الحراري للسطح الماص $[W/m \cdot K]$.

α_w : سماكة السطح الماص [m].

ℓ : طول الريشة (الزعنفة) [m].

ويعطى معامل تحريك الحرارة بالعلاقة التالية:

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot C}{U} \left(1 - e^{-F' \frac{U}{\dot{m} \cdot C}} \right) \quad (3 - 14)$$

ويكون المردود وفق نموذج HWB:

$$\eta = \frac{Q_{use}}{J_{Em} A} \quad (3 - 15)$$

وبالتعويض من العلاقة (3 - 9) نجد:

$$\eta = F_R \cdot \alpha \cdot \tau - F_R \cdot \frac{U}{J_{Em}} (T_2 - T_a) \quad (3 - 16)$$

عندما لا يكون هناك حرارة ضائعة أي $\dot{Q}_{Loss} = 0$ يمكن كتابة العلاقة (3 - 16) على الشكل التالي:

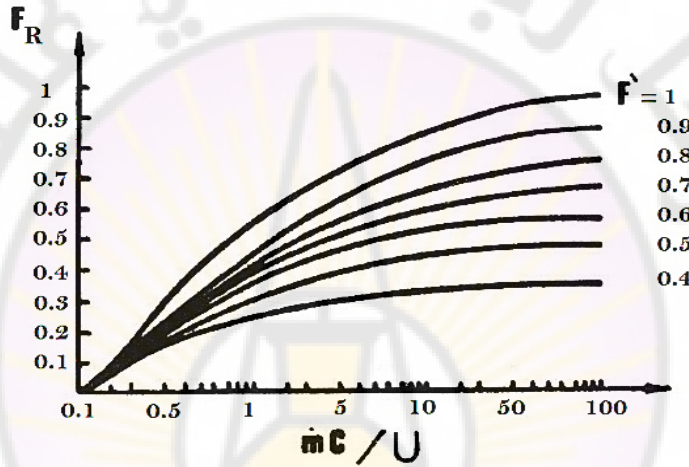
$$\eta_0 = F_R \cdot \alpha \cdot \tau$$

نلاحظ أنّ مردود المجمع من العلاقة (3 - 16) يتعلق بالعوامل

$\{\tau, F_R, U, J_{Em}, \alpha\}$ ، وبالتالي يتعلق بـ:

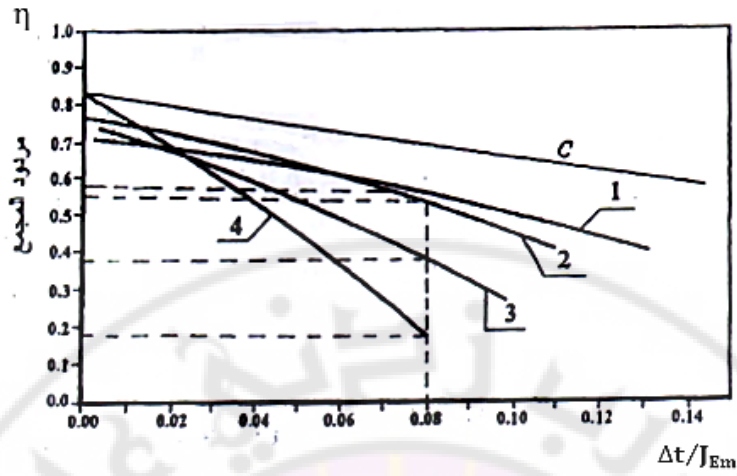
• نوع الطبقة الماصة.

- نوع وعدد الطبقات الزجاجية.
- نوع ودرجة العزل.
- بنية الطبقة الماصة وتوزيع الأنابيب.
- شروط عمل المجمع (درجة حرارة دخول السائل وخروجه، شدة الإشعاع الشمسي، توجيه المجمع، درجة الحرارة الخارجية).
- العلاقة بين F_R والتدفق الكتلي مبينة بيانياً في الشكل (8-3).



الشكل (8-3) معامل تحريك الحرارة كتابع للتدفق الكتلي من أجل قيم مختلفة لمعامل فعالية السطح الماص F'

يبين الشكل (9-3) العلاقة بين المردود والنسبة $\Delta T/J_{Em}$ من مجمعات بمواصفات مختلفة ابتداءً بمجمع مسطح عادي ذي سطح ماص أسود وغطاء زجاجي واحد مروراً بمجمعات شمسية مسطحة بسطوح ماصة انتقائية وأغطية زجاجية اصطفاائية ثم مجمع شمسي مركّز.



الشكل (3-9) منحنيات المردود لمجمعات شمسية مسطحة مختلفة كتابع للنسبة $\Delta T/J_{Em}$

- ① مجمع ذو سطح ماص انتقائي وطبقتين من الزجاج الاصطفائي أيضاً
- ② مجمع ذو سطح ماص انتقائي وطبقة زجاجية اصطفائية واحدة
- ③ مجمع بسطح ماص أسود وطبقتين زجاجيتين
- ④ مجمع بسيط بسطح ماص أسود وغطاء زجاجي واحد
- C مجمع شمسي مفرغ

الفصل الرابع

استثمار الطاقة الشمسية الحرارية

كما ذكرنا سابقاً يصلنا من الشمس كمية هائلة من الإشعاع الشمسي تبلغ أضعاف حاجة المجتمع من الطاقة. ويمكن للطاقة الشمسية أن تكون حلاً ممتازاً لمشكلة الطاقة في سورية.

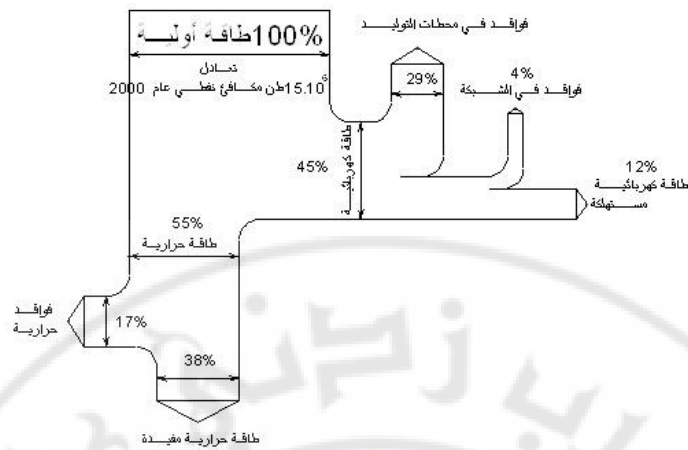
يمكن استثمار الطاقة الشمسية بشكلين رئيسيين:

أ. توليد الكهرباء بالطاقة الشمسية الحرارية أو الطاقة الشمسية الفوتو فولتية ولا يتجاوز المردود العملي لأي من النظامين $(10 \div 15)\%$. ورغم ذلك فإنه نظراً لأهمية الطاقة الكهربائية ومزاياها العديدة يتم العمل بشكل واسع على تطوير هذه الأنظمة. قد يسمح تطور تقانات الطاقة الشمسية وارتفاع أسعار الطاقة التقليدية حالياً بالحصول على طاقة كهربائية من الشمس بكلفة لا تتجاوز كثيراً توليد الطاقة الكهربائية بالطرق التقليدية وهذا الفارق يتضاءل بشكل سريع على أمل أن يصبح لصالح الطاقة الشمسية. لتوليد الكهرباء بالطاقة الشمسية ستخصص فصول أخرى، أما في هذا الفصل فستتم دراسة بعض تطبيقات الطاقة الشمسية لغير توليد الكهرباء.

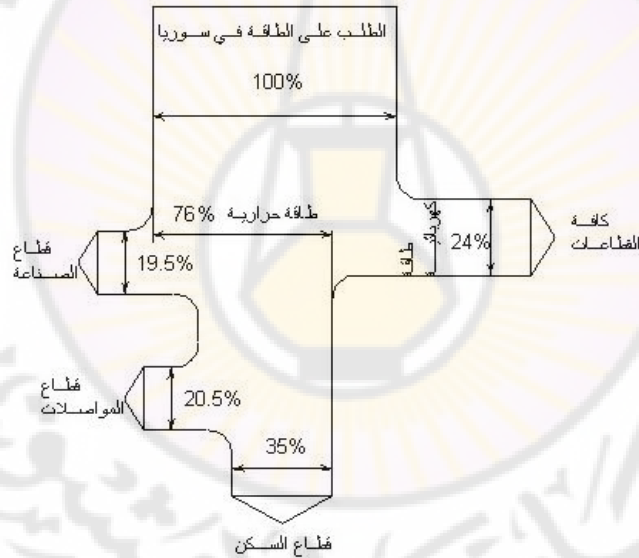
ب. استثمار الطاقة الشمسية الحرارية لغير توليد الكهرباء:

يصل مردود اللواقط الشمسية الحرارية إلى 70% وأكثر حسب نوعها ومجال استخدامها. تبلغ نسبة الطاقة التي تُستهلك في سورية على شكل طاقة حرارية إلى مجمل الطاقة المستهلكة حوالي 75% .

يبين الشكل (1-4) مخطط لانسياب الطاقة في سورية انطلاقاً من الطاقة الأولية. بينما يبين الشكل (2-4) نسب استهلاك الطاقة في شتى القطاعات الإنتاجية وغيرها، نستنتج من المخططين (1-4) و (2-4) أنّ استثمار الطاقة الشمسية الحرارية لغير توليد الكهرباء وفي معظم القطاعات أوسع وربما أهم من توليد الكهرباء بالطاقة الشمسية.



الشكل (4-1) انسياب الطاقة في سوريا



الشكل (4-2) مخطط الطلب على الطاقة في سوريا

1-4 نظم استثمار الطاقة الشمسية

يمكن الاستفادة من الطاقة الشمسية في تغطية احتياجات قطاعات سكنية وإنتاجية واسعة من الطاقة الحرارية وأهم التطبيقات التي تلاقي حالياً أو تبشر بمستقبل واسع لاستثمار الطاقة الشمسية الحرارية لتحل محل الطاقات الأحفورية أو تكون أحياناً بديلاً للطاقة الكهربائية هي التطبيقات التالية:

- التدفئة بالطاقة الشمسية.

- التكييف بالطاقة الشمسية.
 - التجفيف بالطاقة الشمسية.
 - تدفئة الدفيئة الزراعية.
 - التقطير بالطاقة الشمسية.
 - تحلية المياه بالطاقة الشمسية.
 - تسخين المياه للأغراض المنزلية وكذلك تسخين مياه المسابح.
- سنتطرق بتفصيل كاف لتسخين المياه بالطاقة الشمسية والتي يمكن الاستفادة منها في أغراض منزلية أو صناعية متعددة وتغطي مجمل الفقرات السابقة ولخصوصية تسخين مياه المسابح سيتم التطرق لها بشكل مستقل في كلتا الحالتين سنبين طريقة إجراء الحسابات اللازمة للنظام أما بقية التطبيقات فسيتم استعراضها دون إجراء الحسابات اللازمة.

4-1-1 تسخين مياه المسابح بالطاقة الشمسية

إنّ تسخين مياه المسابح بالطاقة الشمسية في سورية لا يلقى تطبيقاً واسعاً لسبب بسيط وهو ارتفاع درجات الحرارة الوسطية للهواء والماء خلال فصل الصيف. كما أنّ المساحة الكبيرة نسبياً لحوض السباحة بالنسبة لسعته من الماء تجعل من سطوح أحواض السباحة المكشوفة لواقط ممتازة للطاقة الشمسية تفي بالحاجة غالباً وتصل بدرجات حرارة مياه السباحة إلى الحدود المرغوبة دون الحاجة لأنظمة تسخين فعّالة.

يمكن الاستفادة من الطاقة الشمسية في سورية في تسخين مياه المسابح المغلقة شتاءً نظراً لما يتميز به القطر من توفر للإشعاع الشمسي معظم أيام السنة، ويتميز نظام تسخين المسابح بالطاقة الشمسية بعدم حاجته إلى خزان حراري إذ يغني حوض المسبح عن هذا الخزان.

• حساب الاستطاعة الحرارية اللازمة لتسخين الأحواض المكشوفة

تتم عملية الحساب انطلاقاً من القيم الوسطية الفصلية لدرجات الحرارة وتسمح الطريقة المقترحة بالوصول إلى دقة كافية للنتائج. حيث نبدأ بدراسة معادلة التوازن الحراري.

يمكن صياغة معادلة التوازن الحراري للمسبح المكشوف انطلاقاً من الشكل (4-3) الذي يمثل مخططاً لدارة تسخين مسبح مكشوف بالطاقة الشمسية وتكون معادلة التوازن الحراري على الشكل التالي:

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_c + \dot{Q}_R + \dot{Q}_{tr} + \dot{Q}_v - \dot{Q}_s \quad [W] \quad (4-1)$$

حيث:

$\dot{Q}_s$: الكسب الحراري من الإشعاع الشمسي المباشر.

$\dot{Q}_H$: استطاعة التسخين اللازمة.

$\dot{Q}_C$: الفقد الحراري بالحمل من سطح الحوض المكشوف.

$\dot{Q}_R$: الفقد الحراري بالإشعاع من سطح الحوض المكشوف.

$\dot{Q}_V$: الفقد الحراري بالتبخر من سطح الحوض المكشوف.

$\dot{Q}_{tr}$: الفقد الحراري بالانتقال عبر أرض وجدران الحوض.

✓ حساب الفقد الحراري بالحمل والإشعاع

نظراً لصعوبة حساب كل من الفقد الحراري بالحمل والإشعاع بشكل منفصل ودقيق يتم حسابهما معاً.

ونستخدم في هذا الحساب علاقة تجريبية تُنسب لروفل 1970 تعطي نتائج تقريبية بدقة كافية:

$$\dot{Q}_C + \dot{Q}_R = \alpha_{C.R} \cdot A_w (T_w - T_m) \quad [W] \quad (4-2)$$

حيث:

A_w : مساحة سطح الحوض $[m^2]$.

T_w : درجة حرارة ماء الحوض $[C^\circ]$.

T_m : درجة حرارة الهواء الوسطية $[C^\circ]$.

$\alpha_{C.R}$: معامل التبادل الحراري السطحي بين الماء والهواء يأخذ بعين الاعتبار الإشعاع

والحمل ويمكن اعتماد القيم التالية لهذا المعامل:

$$\alpha_{C.R} = 10.7 \left[\frac{W}{m^2.K} \right] \text{ لحوض محمي من الرياح.}$$

$$\alpha_{C.R} = 11.7 \left[\frac{W}{m^2.K} \right] \text{ لحوض عادي.}$$

$$\alpha_{C.R} = 12.7 \left[\frac{W}{m^2.K} \right] \text{ لحوض معرض للرياح.}$$

✓ حساب الفوائد الحرارية بالتبخر

يتم حساب الفوائد الحرارية بالتبخر من سطح الحوض على النحو التالي:

$$\dot{Q}_V = \dot{m}_s \cdot r \cdot A_w \quad (4-3)$$

حيث:

$\dot{Q}_V$: الفوائد الحرارية بالتبخر $[W]$.

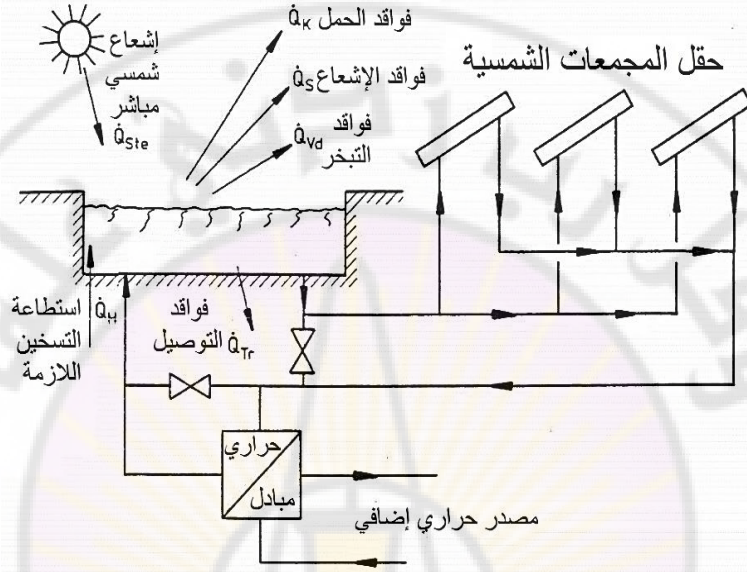
$\dot{m}_s$: معدل التبخر $[kg/m^2.s]$.

r : طاقة التبخر مقدرة $[J/kg]$ حيث $r = 2450[kJ/kg]$

تُحسب $\dot{m}_s$ لكل $1m^2$ من سطح الحوض من العلاقة التالية:

$$\dot{m}_s = \frac{\alpha_{C.R}}{C_a} (\ddot{X}_{wo} - X) \quad \left[\frac{kg}{m^2.s} \right] \quad (4-4)$$

C_a : الحرارة النوعية لهواء مشبع عند درجة حرارة مساوية لدرجة حرارة سطح الماء ويمكن اعتماد قيمة تقريبية ثابتة $C_a = 1005 [J/kg \cdot K]$.



الشكل (3-4) مخطط لدارة تسخين مسيح مكشوف بالطاقة الشمسية

X : محتوى الهواء من بخار الماء عند درجة حرارة وسطية للهواء $T_m [kg/kg]$.
 $\dot{X}_{w0}$: محتوى الهواء المشبع من بخار الماء عند درجة حرارة مساوية لدرجة حرارة سطح الماء وحيث أن درجة حرارة الهواء في الحالة العامة أقل من درجة حرارة الماء تكون درجة حرارة سطح الماء T_{w0} أدنى من درجة حرارة الماء T_w . فإذا أردنا استبدال درجة حرارة سطح الماء غير المعروفة وصعبة التحديد بدرجة حرارة الماء يجب إدخال تعديل على العلاقة (4-4) على النحو التالي:

$$\dot{m}_s = 0.7 \frac{\alpha_{C.R}}{C_a} (\dot{X}_w - X) \left[\frac{kg}{m^2.s} \right] \quad (4-5)$$

وبالتالي:

$$\dot{Q}_v = 0.7 \frac{\alpha_{C.R}}{C_a} (\dot{X}_w - X) \cdot r \cdot A_w \quad (4-6)$$

يمكن إيجاد $\dot{X}_w$ من المخطط السايكومتري للهواء من تقاطع درجة حرارة الماء مع خط الرطوبة $\phi = 100\%$.

✓ الفقد الحراري بالانتقال عبر جدران وأرض الحوض

نظراً لضآلة مقدار الفقد الحراري عبر سطوح جدران وأرض الحوض والتي لا تتجاوز 3% من إجمالي الفوائد، يمكن إهمال هذه الفوائد في الحسابات الحرارية.

✓ حساب الكسب الحراري من الإشعاع الشمسي المباشر

يتم حساب الكسب الحراري من الإشعاع الشمسي المباشر بالعلاقة التالية:

$$\dot{Q}_s = \xi \cdot J_{Ehm} \cdot A_w$$

حيث:

ξ : الجزء الممتص من الإشعاع في الحوض.

J_{Ehm} : شدة الإشعاع الفصلية الوسطية على السطح الأفقي $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.

A_w : مساحة سطح الحوض $[m^2]$.

تتعلق قيمة ξ بلون وعمق قاع الحوض وتتؤخذ من الجدول التالي:

الجدول (1-4) قيم ξ تبعاً لعمق قاع الحوض

عمق قاع الحوض [m]				
لون قاع الحوض	0.5	1	1.5	2
أبيض	0.73	0.79	0.83	0.85
أزرق فاتح	0.84	0.87	0.90	0.91
أزرق غامق	0.93	0.95	0.96	0.97

• حساب الطاقة الفصلية اللازمة

تنتج الطاقة الفصلية اللازمة من العلاقة:

$$Q_{Htot} = (\dot{Q}_c + \dot{Q}_R + \dot{Q}_v - \dot{Q}_s) \cdot t_{ss} \quad (4-7)$$

t_{ss} : مدة فصل السباحة (s/a).

تبين الخبرات العملية والمقارنة مع طرق أخرى للحساب أنّ الطريقة المعتمدة لحساب مركبات الفقد الحراري تعطي قيمة عالية نسبياً لـ $\dot{Q}_v$ وقيم منخفضة لـ $(\dot{Q}_c + \dot{Q}_R)$ لكن المجموع يكون صحيحاً، أي أنّ للطريقة دقة كافية.

يبين الجدول التالي نسبة الطاقة المطلوبة Q_{Htot} إلى كامل الطاقة التي يتلقاها الحوض

$(Q_{Htot} + \dot{Q}_s)$ في وضع محمي لحوض بتغطية أو بدون تغطية من أجل $\xi = 0.9$

ودرجة حرارة وسطية للهواء $T_{am} = 25^\circ C$.

الجدول (2-4) نسبة الطاقة المطلوبة Q_{Htot} إلى كامل الطاقة التي يتلقاها الحوض

درجة حرارة الماء [C°]	31	32	33	34	35	36	37
بدون غطاء %	31.4	40.3	47.6	53.3	58.1	62.2	65.7
مع وجود غطاء %	4.5	16.6	26.8	34.7	41.4	47.2	52.1

تزداد نسبة الطاقة اللازمة إلى الطاقة الكلية الداخلة حسب درجة حرارة الماء المطلوبة T_w .

وتكون الحاجة النوعية للطاقة منسوبة إلى واحدة المساحة لسطح الحوض هي:

$$q_{Htot} = \frac{Q_{Htot}}{A_w} \left[\frac{J}{m^2 \cdot a} \right] \quad (4-8)$$

2-1-4 تسخين المياه بالطاقة الشمسية

○ دارة التسخين ذات الدوران التثاقلي (ثيرموسيفون):

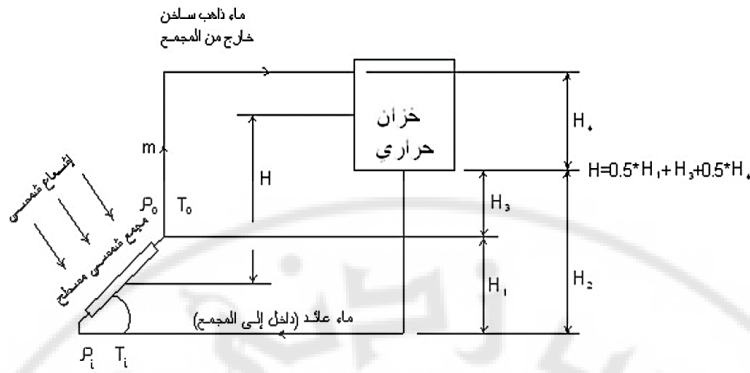
يمكن استخدام المجمعات الشمسية المسطحة لأغراض التدفئة وتسخين المياه لأغراض الاستخدام المنزلي وتمثل دارات تسخين المياه التثاقلية أبسط الأنظمة المستخدمة لتسخين المياه.

يبين الشكل (4-4) مخططاً لدارة تسخين تثاقلية تتألف من العناصر الرئيسية التالية:

المجمعات الشمسية-الخزان الحراري-شبكة الأنابيب.

يجب أن يتوضع الخزان الحراري في هذه الدارات عند منسوب أعلى من منسوب المجمعات، حيث تنتقل المياه المسخنة في المجمعات، وتحت تأثير فرق الكثافة إلى الأعلى أي إلى الخزان الحراري بينما تتحرك المياه الأقل حرارة من أسفل الخزان إلى المجمعات.

وهكذا لا تحتاج دارات كهذه إلى مضخات أو دارة تحكم وبالتالي إلى طاقة مساعدة وتتميز هذه الدارات بكلفتها التأسيسية والاستثمارية المنخفضة وتلاقي انتشاراً واسعاً في شتى بلدان العالم.



الشكل (4-4) دائرة تسخين مياه تناقلية بالطاقة الشمسية

التسخين الناتج عن الإشعاع الشمسي في المجمع يؤدي إلى نشوء فرق في درجات الحرارة بين أسفل المجمع الشمسي وأعلى وينشأ نتيجة لذلك فرق ضغط محرك قدره ΔP_A :
حيث:

$$\Delta P_A = (\rho_o - \rho_i) \cdot g \cdot H \quad \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (4-9)$$

ρ_i : كثافة الماء الداخل $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$.

ρ_o : كثافة الماء الخارج من المجمع $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$.

g : تسارع الجاذبية الأرضي $\left[\frac{m}{s^2} \right]$.

H : عمود الماء [m] حسب الشكل (4-4) حيث يبين هذا الشكل دائرة تسخين تناقلية تعمل بالطاقة الشمسية.

تكون سرعة تدفق الماء غالباً صغيرة بالتالي الجريان صفائحي ($Re < 2300$). ويسري هذا الجريان للماء أو لسوائل شبيهة وليس للهواء مثلاً كما في المجففات ذات الحركة التناقلية للهواء.

في حالة جريان الماء الصفائحي في أنابيب قطرها R وطولها L فإن التدفق الناتج عن فرق ضغط قدره ΔP يمكن صياغته بالعلاقة التالية وفق قانون (Hagen-poiseull).

$$\dot{V} = \frac{\pi \cdot R^4}{8 \eta_d \cdot L} \Delta P \quad \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (4-10)$$

η_d : اللزوجة الديناميكية $\left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]$.

واللزوجة الديناميكية هي تابع لدرجة الحرارة إلا أننا هنا نستخدم قيمة وسطية ثابتة.

بتعويض (4-9) بـ (4-10) نحصل على علاقة التدفق التالية:

$$\dot{V} = \frac{\pi.R^4}{8\eta_d.L} (\rho_i - \rho_o) \cdot g \cdot H \quad \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (4-11)$$

من أجل فوارق في درجتي حرارة الدخول والخروج $\Delta T_c = (15 \div 60 \text{ K})$ كما هو سائد في الدارات التثاقلية يمكن تقريب العلاقة بين الكثافة والحرارة إلى علاقة خطية وفق العلاقة:

$$\Delta \rho_A = (\rho_i - \rho_o) = -\beta \cdot \rho_i \cdot \Delta T_c \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (4-12)$$

β : معامل التمدد الحجمي $[1/K]$.

ΔT_c : تغير درجة الحرارة في المجمع $[K]$.

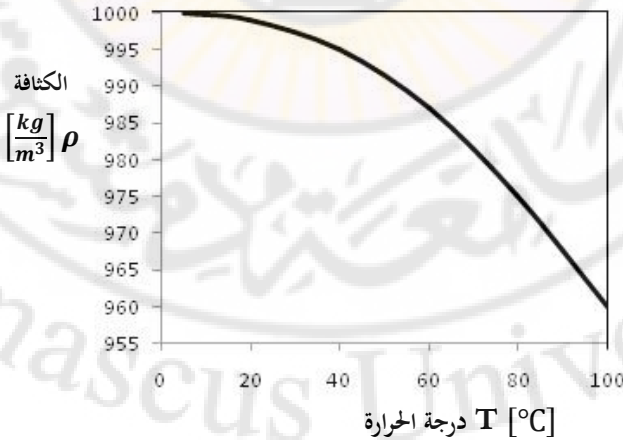
يبين الشكل (4-5) علاقة كثافة الماء بدرجة الحرارة ويُلاحظ أن العلاقة في مجال العمل هي شبه خطية عند الضغط الجوي النظامي.

إذا اعتبرنا أن درجة حرارة الدخول $T = (20 \div 30) [^\circ C]$ فعندها يكون الحديث عن $T_o = (35 \div 90) ^\circ C$ وبالتالي في مجال درجات الحرارة المذكور يمكن اعتماد قيمة تقريبية ثابتة لمعامل التمدد الحجمي بسبب العلاقة شبه الخطية بين الكثافة ودرجة الحرارة.

والقيمة المقابلة للمجال المذكور تبلغ حوالي $\beta = 3.3 \times 10^{-4} [K^{-1}]$.

بتعويض (4-12) في العلاقة (4-11) تنتج علاقة التدفق التالية:

$$\dot{V} = \frac{\pi.R^4.g.H}{8\eta_d.L} \beta \cdot \rho_i \cdot \Delta T_c \quad \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (4-13)$$



الشكل (4-5) العلاقة بين الكثافة ودرجة الحرارة للماء

لحساب التدفق نعتمد قيمة وسطية للكثافة أي:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_i + \rho_o}{2}$$

وبالتالي يكون:

$$\dot{m} = \dot{v} \cdot \bar{\rho}$$

$$\dot{m} = \frac{\pi R^4 \cdot g \cdot H}{16 \eta_d \cdot L} \beta \cdot \rho_i^2 \cdot \Delta T_c (2 - \beta \cdot \Delta T_c) \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (4-14)$$

إنَّ الاستطاعة المفيدة للمجمع تُعطى للسائل الناقل وبالتالي:

$$\eta \cdot J_{Em} \cdot A_c = \dot{m} \cdot C_c \cdot \Delta T_c \quad [W] \quad (4-15)$$

أو:

$$\dot{m} = \frac{\eta \cdot J_{Em} \cdot A_c}{C_c \cdot \Delta T_c} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (4-16)$$

A_c : مساحة سطح المجمع.

η : مردود المجمع الشمسي.

J_{Em} : الإشعاع الشمسي على السطح المائل للمجمع $\left[\frac{W}{m^2} \right]$.

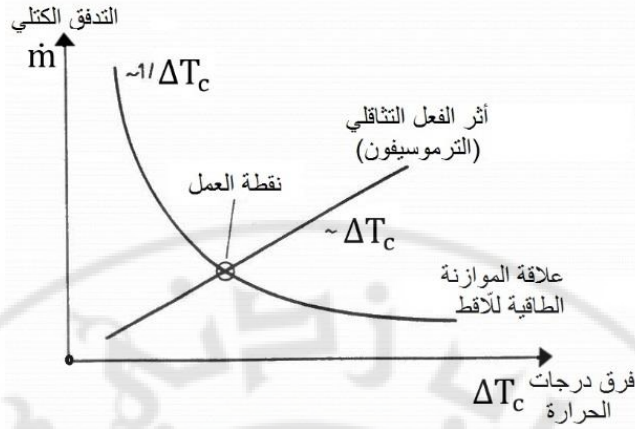
C_c : الحرارة النوعية لسائل المجمع $\left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$.

ΔT_c : فرق درجات الحرارة في المجمع $[K]$.

تبين العلاقة (4-13) أنَّ التدفق يتزايد مع تزايد ΔT_c لكن العلاقة (4-15) تبين أنَّ التدفق في المجمع عند ثبات الإشعاع الشمسي يتناقص مع تزايد ΔT_c . بتعويض (4-13) في (4-15) (أو بتقسيم العلاقتين طرفاً إلى طرف) تنتج العلاقة التي تحقق العلاقتين المذكورتين:

$$\frac{\pi \cdot C_c \cdot R^4 \cdot g \cdot H \cdot \beta \cdot \rho_i^2}{16 \eta_d \cdot L \cdot \eta \cdot J_{Em} \cdot A_c} \Delta T_c^2 (2 - \beta \cdot \Delta T_c) - 1 = 0 \quad (4-17)$$

يبين الشكل (4-6) العلاقة بين التدفق وفرق درجة الحرارة لكل من النظام التثاقلي حسب العلاقة (4-14) والنظام الشمسي حسب العلاقة (4-16).



الشكل (4-6) علاقة التدفق بفرق درجات الحرارة لكل من النظام التثاقلي والمجمع الشمسي

بما أن المقدار $\beta \cdot \Delta T_c \ll 2$ أصغر بكثير من 2 بالتالي يمكن إهماله في العلاقة (4-17) وباعتماد قيم ثابتة لـ β و η_d وإهمال علاقتهما بدرجة الحرارة فمن العلاقة (4-17) تنتج العلاقة التالية لفرق درجات الحرارة في المجمع:

$$\Delta T_c = \left[\frac{8\eta_d \cdot L \cdot \eta \cdot J_{Em} \cdot A_c}{\pi \cdot C_c \cdot R^4 \cdot g \cdot H \cdot \beta \cdot \rho_i^2} \right]^{\frac{1}{2}} [K] \quad (4-18)$$

وبتعويض العلاقة (4-18) في (4-16) والإصلاح ينتج العلاقة التالية للتدفق:

$$\dot{m} = 0.627 \cdot R^2 \cdot \rho_i \left[\frac{\eta \cdot J_{Em} \cdot A_c \cdot g \cdot H \cdot \beta}{\eta_d \cdot l_{eff} \cdot C_c} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (4-19)$$

l_{eff} : الطول الفعال للأنبوب بين المجمع والخزان [m].

في حسابات النظام التثاقلي يُحسب التدفق من أجل مردود η ومساحة سطح A_c للمجمع وفق العلاقة (4-19) ويؤخذ فرق درجات الحرارة عندها على أساس علاقة التوازن الحراري للمجمع (4-15) وقد تبين أن الحسابات النظرية تعطي نتائج مقاربة جداً للقيم العملية (التجريبية).

طول الأنبوب الفعال l_{eff}

الطول الفعال للأنبوب هو عادة أكبر من طول الدارة (من الخزان إلى المجمع وعبر المجمع إلى الخزان) بسبب وجود مقاومات محلية في الأكواع والصمامات وغيرها.

$$l_{eff} = l + l_{Ad} [m] \quad (4-20)$$

حيث:

l_{Ad} : الطول الإضافي الناتج عن المقاومات المحلية [m].

وفق Recknagel-Sprenger يمكن إيجاد l_{Ad} وفق العلاقة:

$$l_{Ad} = \xi \frac{D}{\lambda} \quad [m] \quad (4-21)$$

ξ : معامل المقاومة المحلية للأكواع والتطبيقات في الأنبوب.

D : القطر الداخلي للأنبوب $[m]$.

λ : معامل الاحتكاك في الأنبوب.

يمكن إيجاد ξ من المراجع.

أما من أجل λ للجريان الصفائحي فنجد من العلاقة:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (4-22)$$

يُحسب عدد Re من العلاقة:

$$Re = \frac{\vartheta \cdot D \cdot \rho}{\eta_d} \quad (4-23)$$

حيث:

ϑ : السرعة في الأنبوب $[m/s]$.

تم إيجاد السرعة ϑ تجريبياً من علاقة التدفق:

$$\dot{m} = A \cdot \vartheta \cdot \bar{\rho} \quad \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (4-24)$$

حيث A : مساحة مقطع الأنبوب $[m^2]$.

$\bar{\rho}$: الكثافة الوسطية للسائل $[kg/m^3]$.

$$\vartheta = \frac{\dot{m}}{A \cdot \bar{\rho}} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (4-25)$$

تتم الحسابات بعملية التكرار حيث تقدر قيمة لعدد رينولدز Re ويتم إيجاد λ وفق العلاقة

(4-22) أما ξ فيتم إيجاد قيمته من المراجع ويحسب الطول الفعال L_{eff} بالعلاقة

(4-20) ليستفاد منه في حساب التدفق حسب العلاقة (4-19).

بالإضافة لأثر معطيات الخزان والمجمع ودارة الأنابيب على قوة الرفع للنظام الثقالي فإن

لتوضع المجمع والخزان (أو المبادل الحراري) أثر واضح في هذه القوة. في الشكل (4-7)

تمثل المساحة بين منحنى الكثافة ومحور الارتفاع وفق العلاقة (4-9) ضغط الرفع ΔP_A

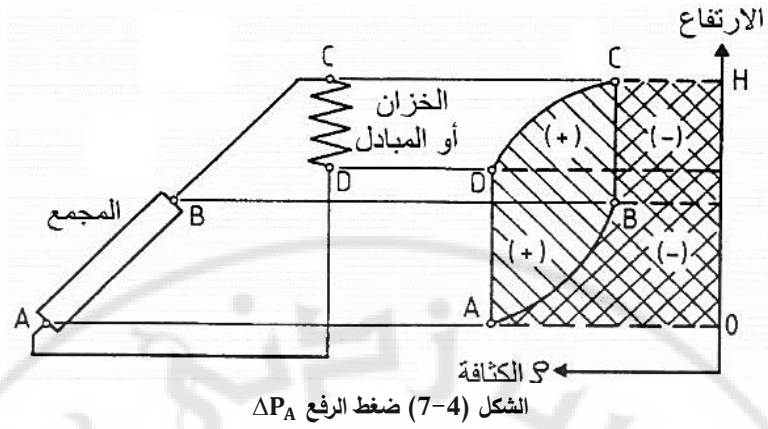
ويكون:

$$\Delta P_A = g \cdot \oint_0^H \rho(H) dH \quad \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (4-26)$$

حيث تمثل المساحة مع إشارة (-) الضغوط التي تؤثر بعكس اتجاه الحركة المرغوب بينما

تمثل المساحة مع إشارة (+) الضغوط التي تؤثر باتجاه الحركة المرغوب والمحصلة هي

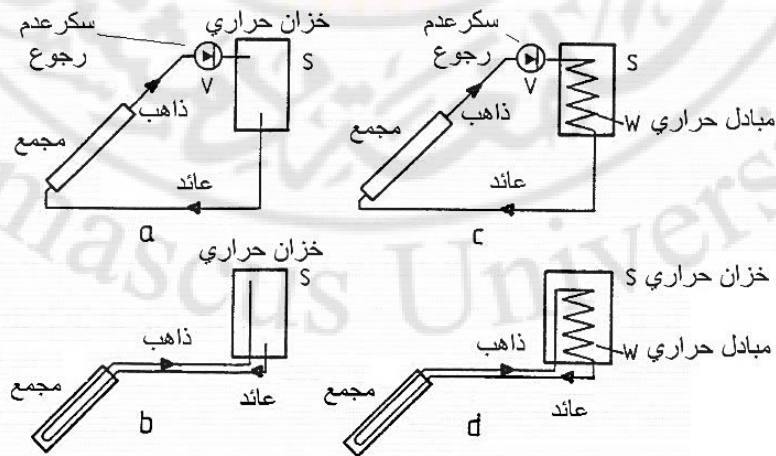
المساحة DCBA أو قيمة التكامل (4-26).



تشكيل نظام (ثيرموسيفون) التثاقلي

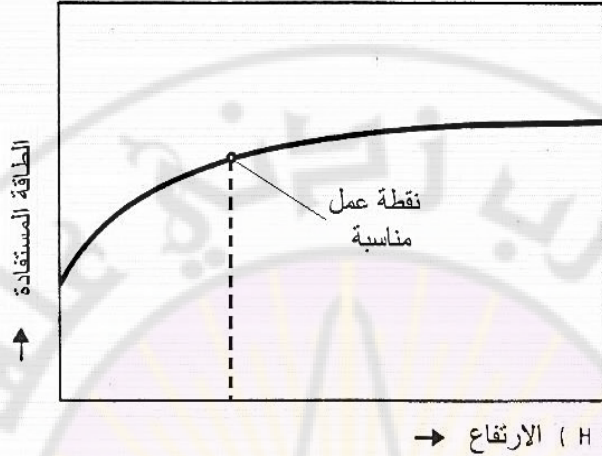
هناك أشكال عديدة ممكنة لبناء نظام تسخين شمسي تثاقلي ثيرموسيفوني. ويبين الشكل (8-4) بعض الطرق الممكنة والأكثر انتشاراً. من محاذير النظام المفتوح إمكانية تجمد الماء شتاءً في الأنابيب.

في الدارات المغلقة يمكن إضافة مانع تجمد لسائل الدارة المغلقة، كذلك هناك احتمال لحصول جريان عكسي ليلاً في النموذجين a و c ولذلك لابد من اتخاذ ما يمنع حصول هذا الجريان كوضع صمامات عدم رجوع أو عزل كافة أنابيب الدارة أو تمرير الأنابيب كما في النموذجين d و b (هذا الحل يتسبب بنقصان فرق ضغط الرفع) أما بالنسبة لطول الأنابيب وارتفاع الخزان فرغم أن زيادة ارتفاع الخزان تؤدي إلى نشوء فرق ضغط تدوير أعلى إلا أنه يجب الأخذ بعين الاعتبار أن زيادة الارتفاع تترافق بزيادة الطول في الأنابيب وبالتالي زيادة المقاومة بالإضافة إلى الكلفة الكبيرة التي تنشأ عن لوازم رفع الخزان .



الشكل (8-4) بعض الطرق الممكنة والأكثر انتشاراً لبناء نظام تسخين شمسي تثاقلي

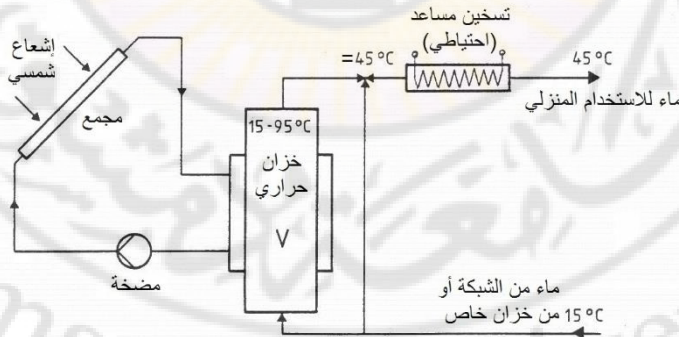
يبين الشكل (9-4) العلاقة بين الارتفاع H والطاقة المستفادة ويُلاحظ أنّ هذه الطاقة تتجه لتصبح مستقرة بعد قيمة معينة للارتفاع وتصبح بعدها زيادة الارتفاع غير عملية.



الشكل (9-4) العلاقة بين ارتفاع الخزان والطاقة المستفادة في نظام التسخين الشمسي التثاقلي

○ دائرة التسخين ذات الدوران القسري:

يبين الشكل (10-4) مخططاً لدارة تسخين مياه مغلقة بالطاقة الشمسية ذات تدوير قسري وتتميز هذه الدارة بإمكانية توضع الخزان في موقع أدنى من المجمعات الشمسية (داخل المنزل أو في القبو أو غرفة التدفئة).



الشكل (10-4) دائرة تسخين شمسية ذات دوران قسري لوسائل التسخين (ماء)

وظيفة النظام تسخين المياه من درجة حرارة ثابتة تقريباً حوالي $15[^\circ\text{C}]$ إلى مستوى صالح للاستخدام الشخصي أي حوالي $45[^\circ\text{C}]$.

يجب ألا تتجاوز درجة الحرارة في الخزان الحراري 95°C لتفادي حصول غليان. عندما تكون درجة الحرارة في الخزان أقل من 45°C يقوم الخزان المساعد برفع درجة حرارة ماء الاستخدام إلى الدرجة المناسبة.

يمكن أن يكون الخزان كهربائياً أو أن يكون مبادلاً حرارياً يستمد طاقته من نظام التدفئة المركزية إن وجد.

يسود في سورية استخدام أجهزة محلية لتسخين المياه بطاقة الوقود التقليدي تتوضع في الحمامات داخل المنازل وتقوم بوظيفتين:

تسخين المياه للاستخدام المنزلي وتدفئة الحمام شتاءً.

يمكن لهذه الأجهزة أن تقوم بدور السخان المساعد حيث يتم توصيلها مع نظام التسخين الشمسي. وعندها لا يُستخدم الوقود التقليدي إلا كطاقة مساعدة عند الحاجة. يجب تزويد النظام أيضاً بدارة تحكم في عمل المضخة.

عند تصميم نظام شمسي لمياه الاستخدام المنزلي يتم الانطلاق من مقدار الطاقة اللازمة (الحاجة إلى الطاقة) ومن الشروط الخارجية كشدة الإشعاع الشمسي ودرجات الحرارة. ويجب مراعاة طريقة وفترات استهلاك الطاقة ونسبة التغطية الاقتصادية أو المثلى. لتحقيق ذلك هناك بارامترات متعددة تؤثر في ذلك:

- المجمعات الشمسية (مساحتها، مردودها، سعتها الحرارية، التدفق الكتلي، مقاومتها).
- توضع المجمعات (ميل المجمعات، توجيهها).
- الشروط المناخية (الإشعاع الشمسي، درجات الحرارة الخارجية، سرعة الرياح).
- الخزان الحراري (الحجم، درجة العزل).
- شبكة الأنابيب (الطول، القطر، العزل، السعة الحرارية).
- طريقة وصل المجمعات (على التسلسل، على التوازي).
- التسخين الإضافي (الاستطاعة، المردود، مكان وطريقة الوصل).
- استهلاك الطاقة (كميات الاستهلاك، فترات الاستهلاك، درجة الحرارة، تدوير المياه).

حساب مساحة المجمعات وحجم الخزان الحراري وعلاقتها بدرجة التغطية:

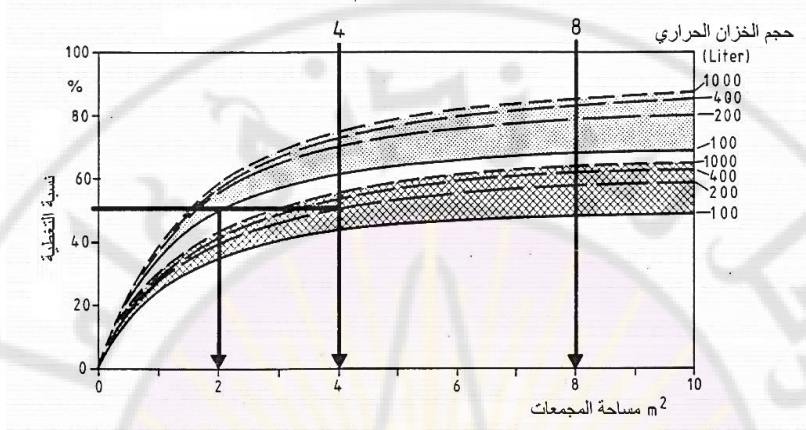
يبين الشكل (4-11) العلاقة بين درجة التغطية وكل من حجم الخزان الحراري ومساحة المجمعات من أجل نظام تسخين مياه شمسي باستطاعة 280 [L/day] بدرجة حرارة 45°C وهي كمية تكفي لـ (4÷5) أشخاص حسب المقاييس الدولية لمتطلبات متوسطة.

تمثل حزمة المنحنيات السفلية مجمعات شمسية مسطحة عادية. حيث:

$$(U = 10[W/m^2.K], \eta_0 = 0.75)$$

وتمثل الحزمة العلوية مجمعات شمسية عالية الجودة بسطوح ماصة انتقائية وزجاج

$$اصطفائي (U = 3[W/m^2.K], \eta_0 = 0.83)$$



الشكل (4-11) علاقة درجة التغطية بمساحة المجمعات وحجم الخزان الحراري

تم إجراء الحسابات للشروط المناخية لمدينة دمشق مع اعتماد ثلاث فترات استهلاك للماء الساخن صباحاً وظهراً ومساءً وميلان للمجمعات الشمسية نحو الجنوب مباشرة بزاوية 45° .

يلاحظ من الشكل (4-11) أن نسبة التغطية تتجه نحو قيم ثابتة سواء مع زيادة مساحة سطح المجمعات أو مع زيادة حجم الخزان الحراري وهذا طبيعي إذ لا بد أن يكون هناك نسبة من الأيام أو الساعات خلال العام تقتصر إلى الإشعاع الشمسي ويلاحظ أن نسبة التغطية في نظام ذي خزان بسعة 200[L] يحتاج إلى مساحة $4[m^2]$ لتأمين نسبة تغطية حوالي 50% بينما لا تؤدي زيادة مساحة المجمعات إلى $8[m^2]$ إلا إلى زيادة 10% فقط في نسبة التغطية، أما مضاعفة حجم الخزان فتؤدي إلى زيادة 5% فقط في نسبة التغطية.

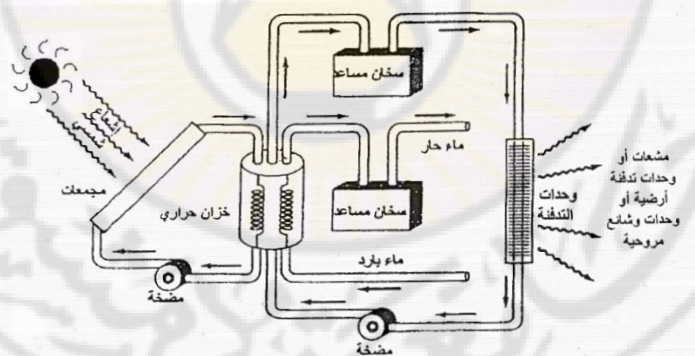
يُستنتج من الشكل أن رفع نسبة التغطية هنا بشكل ملحوظ يكون بالانتقال إلى حزمة المنحنيات العلوية أي اعتماد مجمعات ذات مواصفات عالية.

إن صغر حجم الخزان الحراري أكثر من اللازم يؤدي إلى خسائر لا مبرر لها ومردود أقل للنظام، بينما تؤدي الزيادة المفرطة في حجم الخزان إلى عدم قدرة النظام الوصول إلى درجات الحرارة المناسبة للاستهلاك لفترة طويلة من العام.

4-1-3 التدفئة بالطاقة الشمسية

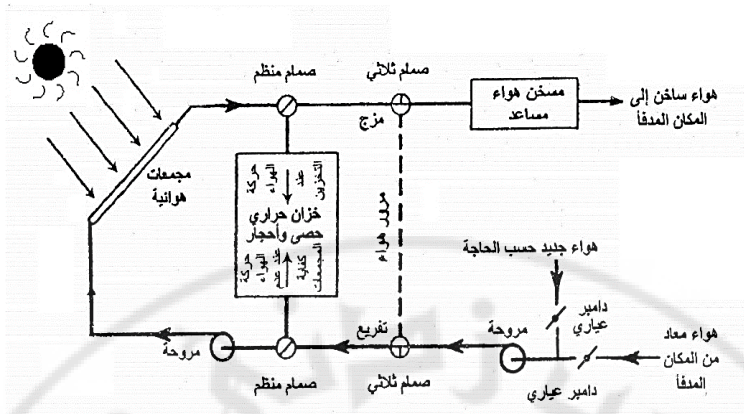
يبين الشكل (4-12) نظام تدفئة فعال وبسيط بالطاقة الشمسية. يتألف هذا النظام من مجمعات شمسية ذات دارة قسرية مغلقة وخزان حراري وأجهزة تسخين مساعدة للماء الساخن لأغراض التدفئة وتأمين ماء الاستخدام الساخن بالإضافة إلى دارة التدفئة ذات التدوير القسري وعناصر التدفئة (هنا مشعات) ويمكن أن تكون عناصر التدفئة عبارة عن عناصر تدفئة أرضية أو معدات وشائع مروحية (fan coil) وفي كلتا الحالتين الأخيرتين تكفي حرارة $^{\circ}\text{C} (45 - 55)$ ، مما يسهل الإفادة من المنسوب الحراري المنخفض الذي تؤمنه الأشعة الضعيفة نسبياً في فصل الشتاء بمرودود مقبول للمجمعات الشمسية. يتميز هذا الاستثمار للطاقة الشمسية بالتناقص بين الطلب الشديد في الأيام الباردة وغير المشمسة وانخفاض منسوب الطاقة المتاحة، وعدم توفر الإشعاع الشمسي إلا بحدود ضيقة في هذه الفترة.

لاستثمار أنظمة الطاقة الشمسية هذه بشكل فعال يجب إيجاد مستهلك للطاقة في الفترات التي تكون الطاقة المتاحة وفيرة جداً بالمقارنة مع فصل الشتاء ومن التطبيقات الممكنة في الأنظمة المنزلية الإفادة من هذه الأنظمة لأغراض التكييف صيفاً إن أمكن.



الشكل (4-12) منظومة تدفئة فعالة تستخدم الماء كناقل للحرارة

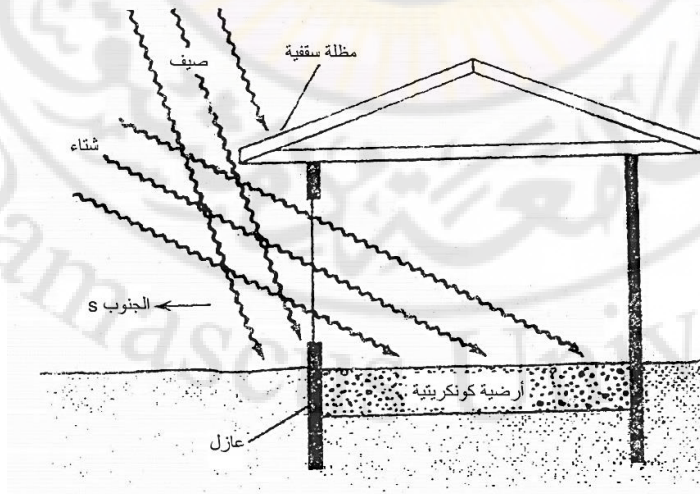
يبين الشكل (4-13) دارة لنظام تدفئة فعال بالطاقة الشمسية، المميز في هذه الدارة أن المجمعات الشمسية هي مجمعات مسطحة إلا أن الوسيط الناقل للحرارة هو الهواء وليس الماء. والخزان الحراري يمكن أن يكون نفق من الأحجار والحصى، يمكن أن يتوضع تحت البناء في البيوت المستقلة أو في نفق بجوار البناء في الأبنية متعددة المنازل.



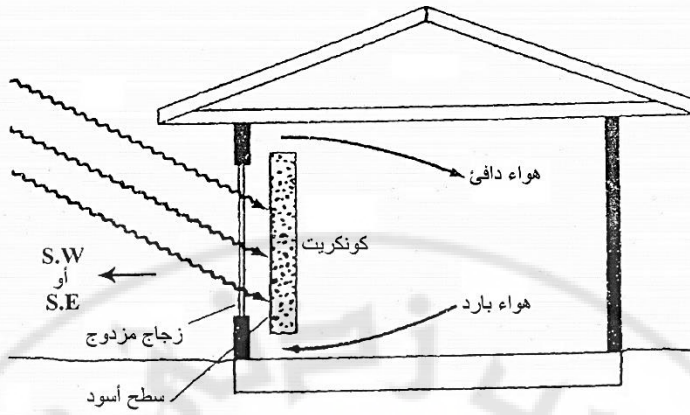
الشكل (4-13) منظومة تدفئة تستخدم الحصى كخزان للحرارة والهواء الناقل لها

بالإضافة إلى الأنظمة الفعالة المستخدمة للتدفئة بالطاقة الشمسية هناك أيضاً الأرضية. من المعروف أنّ الطاقة الشمسية تساهم في تدفئة المساكن أو الحجرات الأكثر تعرضاً للإشعاع الشمسي شتاءً ومن المعروف أنّ الجدران الجنوبية الغربية والجنوبية الشرقية بالإضافة إلى الجنوبية هي الأكثر تعرضاً للإشعاع الشمسي.

يستفاد من انخفاض ارتفاع الشمس شتاءً وكثافتها على السطوح الشاقولية لتوجيه النوافذ نحو الاتجاهات الأكثر إشعاعاً كما في الشكل (4-14)، وبسبب صغر مساحات النوافذ غالباً بالنسبة لمساحة الجدران الخارجية هناك إمكانية للاستفادة من كامل مساحة الجدار باستخدام جدار ترومب كما في الشكل (4-15).



الشكل (4-14) منظومة تدفئة سلبية تستخدم النوافذ لإمرار الأشعة الشمسية والكونكريت لخرن الطاقة



الشكل (4-15) نموذج لحائط ترومب

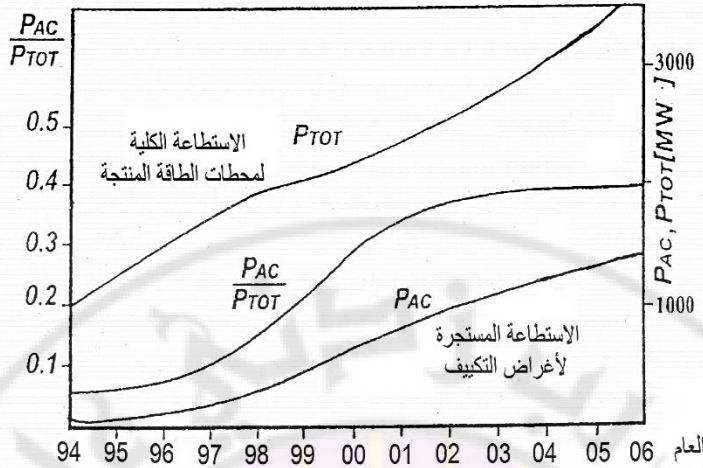
4-1-4 التكيف بالطاقة الشمسية:

لاحظنا أن الطلب على الطاقة الحرارية في سورية يتجاوز 70% من الطلب على الطاقة بشكل عام ويكون من المفيد جداً استثمار الطاقة الشمسية الحرارية في فترات العام الأكثر إشعاعاً والصعوبة في ذلك هو قلة الطلب على الطاقة الحرارية صيفاً.

مع التطور التقني وتنامي متطلبات الحياة العصرية في سورية أصبح تكييف المنشآت الصناعية والصحية والسياحية بالإضافة إلى المنازل حاجة لا يمكن الاستغناء عنها، وقد توسع استرجار الكهرباء لأغراض التكييف لدرجة أصبح هذا الاسترجار يشكل في فصل الصيف مشكلة كبيرة على استقرار الشبكة العامة وعبئاً كبيراً على محطات الطاقة العاملة. حالياً في سورية يتم استرجار أكثر من 10% من الطاقة الكهربائية المنتجة لأغراض التكييف، قد لا تبدو هذه النسبة عالية إلا أن البحث في الاستطاعة العظمى المستجرة لأغراض التكييف تعطي تصوراً أكثر وضوحاً عن المشكلة.

إذ أن النسبة المذكورة للطاقة المستهلكة لأغراض التكييف يتم استهلاكها خلال مواسم التكييف أي خلال فترة لا تتجاوز 4 أشهر أما ساعات حمل أنظمة التكييف الفعلية الوسطية فلا تتجاوز ثلاثة أشهر وبالتالي تكون الاستطاعة المستجرة هي الاستطاعة اللازمة لإنتاج حوالي 40% من الطاقة الكهربائية المنتجة سنوياً في سورية.

يبين الشكل (4-16) تزايد استرجار الطاقة الكهربائية لأغراض التكييف ونسبة الاستطاعة المستجرة لهذا الغرض صيفاً إلى الاستطاعة الكلية المولدة.



الشكل (4-16) تزايد استغلال الطاقة الكهربائية لأغراض التكييف

يتميز استثمار الطاقة الشمسية الحرارية لأغراض التكييف بميزات عديدة تجعل منه استثماراً هاماً وواعداً ومن هذه المميزات:

- التناسب الطردي بين الحاجة للطاقة لأغراض التكييف وحجم الطاقة الشمسية المتاحة صيفاً.

- إمكانية الاستفادة من الطاقة الشمسية الحرارية المباشرة بمرود جيد وعدم الحاجة لتوليد الكهرباء بالطاقة الشمسية بمرود منخفض وكلفة عالية.

- حل مشكلة الاستغلال الكهربائي لأغراض التكييف وتحرير استطاعة كبيرة للقطاعات الأخرى.

هذا بالإضافة إلى بقية الميزات الهامة لاستثمار الطاقة الشمسية كشكل من أشكال الطاقة المتجددة.

إنّ تطور تقانات الطاقة الشمسية وتقانات التبريد الخاصة بالتكييف وظهور تقانات جديدة أكثر بساطة وأقل كلفة يفتح طريقاً واسعاً أمام الاستثمار للطاقة الشمسية.

إنّ الطريقة الأكثر شيوعاً حالياً للتكييف بالطاقة الشمسية تكمن في استخدام دارات التبريد الامتصاصية كمصدر للاستطاعة التبريدية اللازمة للتكييف.

في آلات التبريد الامتصاصية تختلف بارامترات العمل (بارامترات الدارة) حسب مزيج وسيط التبريد المستخدم إذ تحتاج آلات التبريد الامتصاصية التي تعمل على مزيج الأمونيا

- ماء إلى درجات حرارة تسخين (توليد) تتجاوز 120°C للحصول على مرود جيد وتكون الأمونيا هي وسيط التبريد بينما يكون الماء هو المادة الماصة، بينما تكون درجات

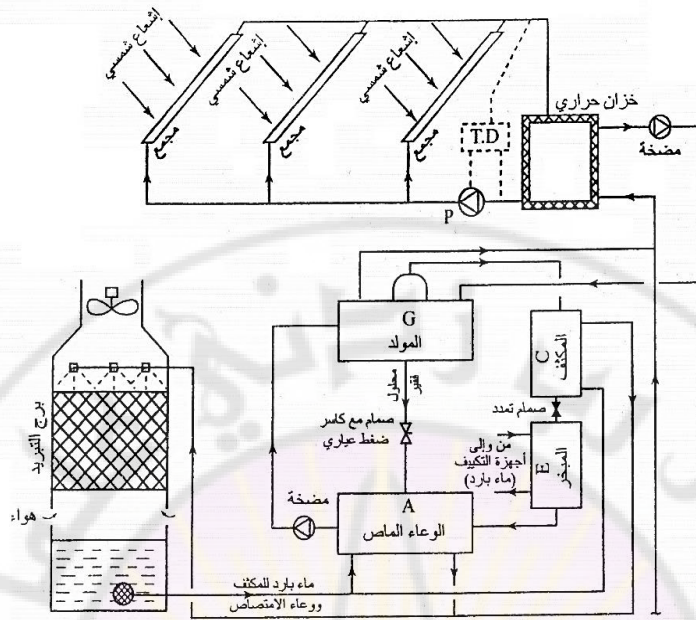
الحرارة لوسيط التسخين بحدود $90[^\circ\text{C}]$ لآلة تبريد امتصاصية تعمل بمزيج الماء - بروميد الليثيوم حيث الماء هو وسيط التبريد، وبروميد الليثيوم هو المادة الماصة. حتى فترة قريبة كانت جودة المجمعات الشمسية (المسطحة) عائقاً أمام انتشار هذه التقانات التي تعمل بالطاقة الشمسية ومع تطور تقانات هذه المجمعات من حيث نوعية السطح الماص ومن حيث نوعية الزجاج المستخدم للتغطية.

(راجع الفقرتين 2-3 و 3-3) أصبح بالإمكان الحصول على درجات حرارة تتجاوز $90[^\circ\text{C}]$ عند شدة للإشعاع الشمسي لا تتجاوز $600[\text{W}/\text{m}^2]$ (وهي متاحة في سورية طيلة فصل التكييف) وبمردود يصل إلى $\eta_c = 0.55$ في الشكل (3-9).

يبلغ المردود لمجمع شمسي مسطح بسطح ماص انتقائي وزجاج اصطفاي أيضاً عند $x = 0.08$ إلى $\eta_c = 0.55$ وهذا يقابل درجة تسخين $95[^\circ\text{C}]$ وعند شدة للإشعاع الشمسي $J_{EM} = 650 [\text{W}/\text{m}^2]$ وهكذا فالمجمعات الشمسية المسطحة عالية الجودة تكفي لتشغيل آلات تبريد امتصاصية تعمل بمحلول ماء - بروميد ليثيوم طيلة فصل التكييف في سورية.

من المناسب تزويد المجمعات الشمسية المسطحة بأجهزة توجيه نحو الشمس لضمان تحقيق مردود $\eta_c > 0.5$ خلال معظم فترة الإشعاع الشمسي.

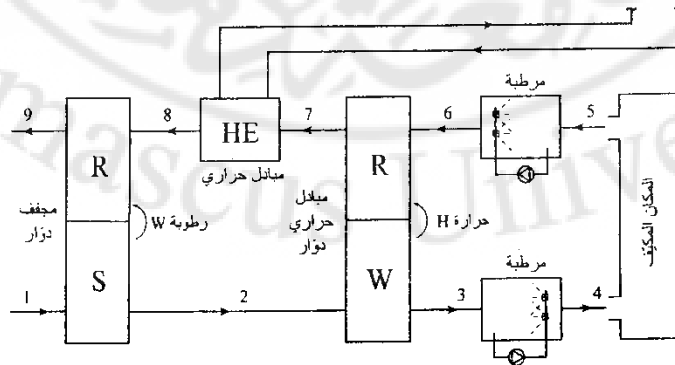
في حال استخدام آلات تبريد امتصاصية تعمل بمحلول أمونيا - ماء يكفي استخدام مجمعات شمسية مفرغة عالية الجودة وقد أصبحت متوفرة وبأسعار مناسبة. يمكن أيضاً استخدام مجمعات شمسية مركزة على شكل مجاري قطعية يمكن بواسطتها الحصول على درجات حرارة تتجاوز $200[^\circ\text{C}]$ وهي متاحة وكافية في كافة الأحوال حيث يبين الشكل (4-17) مخططاً لدارة تبريد امتصاصية تعمل بالطاقة الشمسية لأغراض التكييف.



الشكل (4-17) دائرة تبريد امتصاصية لأغراض التكييف بالطاقة الشمسية

يتم تصميم آلات التبريد الامتصاصية العاملة على الثنائي ماء-بروميد الليثيوم لتنتج الاستطاعة الاسمية بدرجة حرارة توليد $T_g > 90[^\circ\text{C}]$ عند درجة حرارة ماء تبريد المكثف والوعاء الماص حوالي $27[^\circ\text{C}]$ وهذا يعني أن الآلة لا تعمل عند $T_g > 90[^\circ\text{C}]$. إن الاستطاعة المنتجة من آلة تبريد امتصاصية تتعلق بدرجة حرارة التوليد وبدرجة حرارة ماء التبريد للمكثف والوعاء الماص.

ويبين الشكل (4-18) دائرة تبريد تبخيري تجفيفي لأغراض التكييف بالطاقة الشمسية SD-DEC.

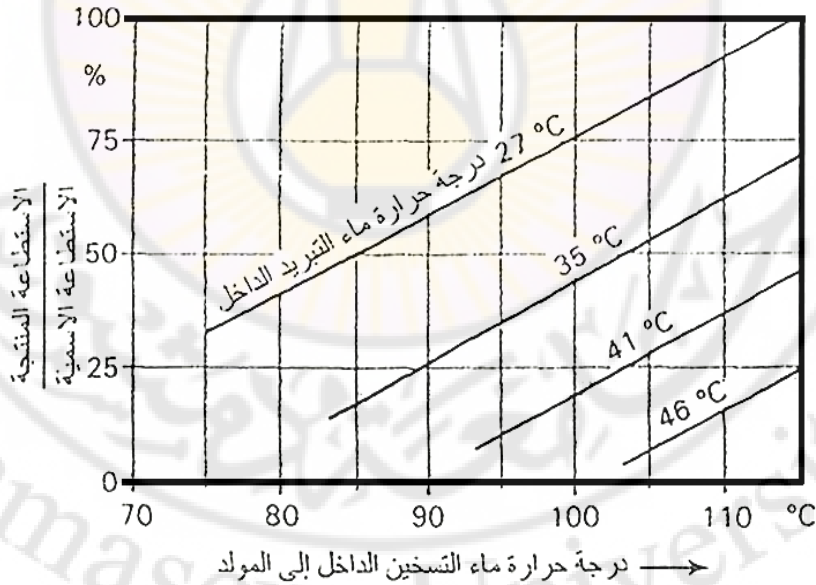


الشكل (4-18) دائرة تبريد تبخيري تجفيفي لأغراض التكييف بالطاقة الشمسية SD-DEC

يبين الشكل (4-19) العلاقة بين الاستطاعة المنتجة (كنسبة من الاستطاعة الاسمية) ودرجة حرارة ماء التسخين الداخل إلى المولد من أجل درجات حرارة مختلفة لماء تبريد المكثف والوعاء الماص لآلة تبريد امتصاصية تعمل على الثنائي ماء-بروميد الليثيوم تُنتج ماء بارد درجة حرارته 6°C ، يلاحظ من أجل ماء تبريد بدرجة حرارة 27°C فإن الاستطاعة المنتجة تصل إلى 50% وأكثر من الاستطاعة الاسمية عند درجة حرارة لماء التسخين حوالي 90°C أو أقل.

تتميز آلات التبريد الامتصاصية بعدم تأثر المردود كثيراً بتغير درجة حرارة التبريد والذي يتغير هو الاستطاعة المنتجة شريطة أن تبقى درجات حرارة ماء التبريد ثابتة 27°C .

يبين الشكل (4-20) العلاقة بين $u = \frac{\text{استطاعة التسخين}}{\text{الاستطاعة التبريدية}}$ (والتي تمثل الاستهلاك النوعي للطاقة) ودرجة حرارة ماء التسخين من أجل قيم مختلفة لدرجات حرارة مياه التبريد للمكثف والوعاء الماص لآلة تبريد عاملة على الثنائي $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ تُنتج ماء بارد درجة حرارته 6°C .



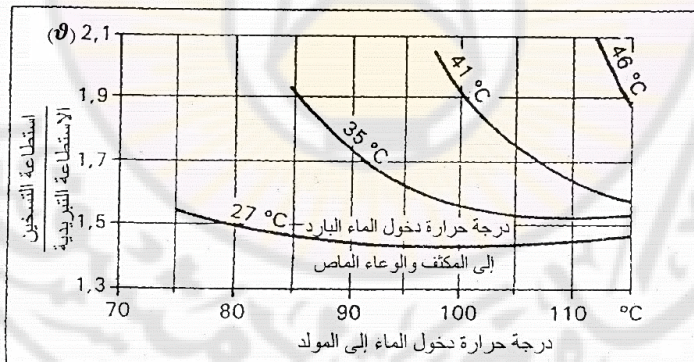
الشكل (4-19) العلاقة بين الاستطاعة المنتجة ودرجة حرارة ماء التوليد في آلة تبريد امتصاصية ($\text{LiBr-H}_2\text{O}$) من أجل قيم مختلفة لدرجة حرارة ماء التبريد للمكثف والوعاء الماص

يلاحظ أن المردود يبقى مستقرًا بعد أن تتجاوز درجة حرارة التوليد 80°C والذي يتغير هو الاستطاعة كما ذكرنا سابقاً (وذلك عند توفر ماء تبريد بدرجة حرارة حوالي 27°C).

كما يلاحظ أنّ الاستهلاك النوعي للوقود وبالتالي المردود يتأثران بشدة بدرجات حرارة ماء التبريد للمكثف والوعاء الماص ويتم تدارك ذلك برفع درجات حرارة وسيط التسخين (التوليد).

تُعتبر هذه الميزة ذات فائدة كبيرة في عملية التحكم بالاستطاعة إذ يمكن التحكم باستطاعة آلة التبريد هذه في المجال $(10 \div 100)\%$ تحكماً مستمراً (دون تدرج) مع الحفاظ على المردود ثابتاً تقريباً.

لتقانات التبريد التجفيفي التبخيري شكل (4-18) ميزات عديدة تؤهلها ليكون لها مستقبلاً واعداً في مجال التكييف باستخدام الطاقة الشمسية. إذ يكفي للتشغيل المستمر لهذه الآلات مصدر حراري بدرجات لا تتجاوز $(60 \div 70)^\circ\text{C}$ وتستطيع مجمعات شمسية مسطحة عادية تأمين هكذا درجات حرارة ضمن شروط الإشعاع الشمسي السائدة في سورية في فصل التكييف دون الحاجة إلى مجمعات عالية الجودة أو الحاجة إلى توجيه آلي للمجمعات، كما أنّ التجهيزات المستخدمة هي تجهيزات بسيطة وقابلة للتصنيع المحلي دون صعوبة كبيرة ودون الحاجة إلى تقانات عالية الكلفة.



الشكل (4-20) العلاقة بين نسبة استطاعة التسخين إلى الاستطاعة التبريدية (θ) المنتجة ودرجة حرارة الماء الداخل إلى المولد من أجل قيم مختلفة لدرجة حرارة ماء التبريد للمكثف والوعاء الماص

يبين الشكل (4-21) إجراءات معالجة الهواء للدارة المبينة في الشكل (4-18) في مخطط الهواء الرطب حيث يدخل الهواء الخارجي المعالج بمواصفات النقطة 1 إلى المجفف الدوار ليخرج إلى النقطة 2 وفي المبادل الحراري الاسترجاعي يتم تبريده إلى النقطة 3 ثم

يُرطب أديباتياً إلى النقطة 4 بمواصفات مطابقة لمواصفات هواء التغذية اللازم ويُرسَل إلى المكان المكيف.

في المكان المكيف تكون مواصفات الهواء مطابقة للنقطة 5 يُسحب الهواء المطرود فيتم ترطيبه أديباتياً أولاً إلى النقطة 6 ثم يُسخَّن في المبادل الحراري الاسترجاعي إلى النقطة 7 ليعاد تسخينه بواسطة طاقة المجمعات الشمسية إلى النقطة 8 حيث يستفاد منه في إعادة شحن المجفف فيدخله ويخرج من العلاقة:

$$\dot{Q}_c = (i_5 - i_4) \cdot \dot{m} \quad (4-27)$$

حيث:

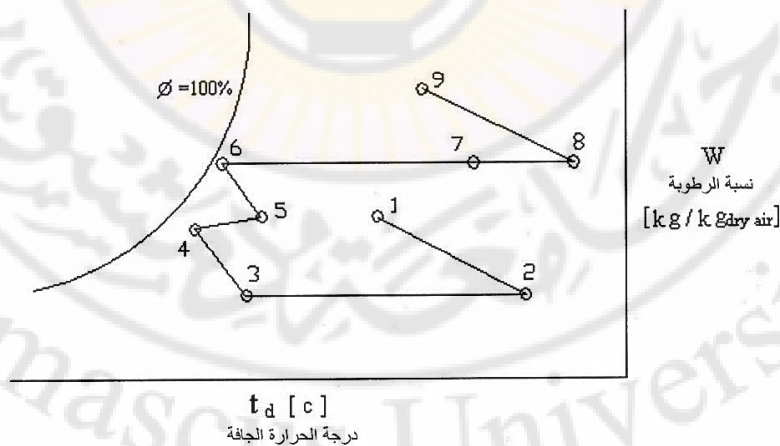
$\dot{Q}_c$: الاستطاعة التبريدية [kW].

$\dot{m}$: تدفق الهواء [kg/s].

$(i_5 - i_4)$: فرق إنتالبي الهواء الداخلي وهواء التغذية [kJ/kg] وهو يساوي $\dot{q}_c$ الإنتاجية التبريدية النوعية لـ 1 كغ هواء:

$$\dot{q}_c = i_5 - i_4 = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{m}} \quad (4-28)$$

يمكن ببساطة من مخطط الهواء الرطب شكل (4-21) حساب أيضاً الطاقة الحرارية اللازمة لإعادة شحن المجفف وكمية ماء الترطيب في كل من المرطبتين H_1 و H_2 كذلك استطاعة المبادل الحراري.



الشكل (4-21) مخطط معالجة الهواء للدارة المبينة في الشكل (4-18)



مسائل:

المسألة الأولى

أوجد ارتفاع الشمس وشدة الإشعاع الشمسي وطول النهار بالساعات وكمية الإشعاع الشمسي اليومي لخط عرض $\varphi = 33.5^\circ$ شمالاً في الأيام التالية: 21 آذار، 21 حزيران و 21 كانون الأول.

الحل:

تُعطى معادلة زاوية ارتفاع الشمس بالشكل:

$$\sin h = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \gamma$$

ففي 21 آذار $\delta = 0^\circ$ $\gamma = 15(12 - Z)$

$$\gamma = \pi - \frac{\pi}{12}Z \text{ [rad]}$$

بالتعويض نجد:

$$\begin{aligned}\sin h &= \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \gamma \\ \sin h &= \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \gamma \\ \sin h &= 0.834 \cos \left(\pi - \frac{\pi}{12}Z \right)\end{aligned}$$

في 21 حزيران تكون $\delta = 23.4^\circ$

بالتعويض نجد:

$$\sin h = 0.22 + 0.77 \cos \left(\pi - \frac{\pi}{12}Z \right)$$

في 21 كانون الأول تكون $\delta = -23.4^\circ$

بالتعويض نجد:

$$\sin h = -0.22 + 0.77 \cos \left(\pi - \frac{\pi}{12}Z \right)$$

حساب شدة الإشعاع الشمسي:

$$J_{EV} = 0.8 J_0 \sin h$$

في 21 آذار

$$J_{EV} = 0.8 \times 1360 \times 0.834 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right)$$

$$J_{EV} = 907 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right) \quad [W/m^2]$$

في 21 حزيران

$$J_{EV} = 0.8 \times 1360 \times \left[0.22 + 0.77 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right)\right]$$

$$J_{EV} = 239.4 + 838 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right) \quad [W/m^2]$$

في 21 كانون الأول

$$J_{EV} = 0.8 \times 1360 \times \left[-0.22 + 0.77 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right)\right]$$

$$J_{EV} = -239.4 + 838 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right) \quad [W/m^2]$$

حساب طول النهار بالساعات:

في 21 آذار

$$\cos \gamma_{h=0} = -\tan \delta \tan \varphi = 0$$

$$\gamma_{h=0} = 90^\circ$$

$$S_d = \frac{2\gamma_{h=0}}{15} = \frac{180}{15} = 12 [h]$$

وتكون ساعة الشروق:

$$Z_R = 12 - (S_d/2) = 12 - 6 = 6 [h]$$

وساعة الغروب:

$$Z_1 = 12 + (S_d/2) = 12 + 6 = 18 [h]$$

في 21 حزيران

$$\cos \gamma_{h=0} = -\tan \delta \tan \varphi = -0.29$$

$$\gamma_{h=0} = 106.6^\circ$$

$$S_d = \frac{2\gamma_{h=0}}{15} = \frac{2 \times 106.6}{15} = 14.2 [h]$$

وتكون ساعة الشروق:

$$Z_R = 12 - (S_d/2) = 12 - \frac{14.2}{2} = 4.9 [h] = 4h \& 54 \text{ minutes}$$

وساعة الغروب:

$$Z_1 = 12 + (S_d/2) = 12 + \frac{14.2}{2} = 19.1 [h] = 19h \& 6 \text{ minutes}$$

في 21 كانون الأول

$$\cos \gamma_{h=0} = -\tan \delta \tan \varphi = 0.29$$

$$\gamma_{h=0} = 73.4^\circ$$

$$S_d = \frac{2\gamma_{h=0}}{15} = \frac{2 \times 73.4}{15} = 9.79 [h] = 9h \& 47 \text{ minutes}$$

وتكون ساعة الشروق:

$$Z_R = 12 - (S_d/2) = 12 - \frac{9.79}{2} = 7.1 [h] = 7h \& 6 \text{ minutes}$$

وساعة الغروب:

$$Z_1 = 12 + (S_d/2) = 12 + \frac{9.79}{2} = 16.9 [h] = 16 h \& 54 \text{ minutes}$$

حساب كمية الإشعاع اليومي:

$$G_{DV} = \int_{Z_R}^{Z_S} J_{EV}(Z) dZ = 2 \int_{Z_R}^{12} J_{EV}(Z) dZ$$

في 21 آذار

$$\begin{aligned} G_{DV} &= 2 \int_6^{12} 907 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12} Z\right) dZ \\ &= 2 \int_6^{12} 907 \left(-\frac{12}{\pi}\right) \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12} Z\right) d\left(\pi - \frac{\pi}{12} Z\right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -6929 \sin\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right) \\
&= -6929 \left[0 - \sin\frac{\pi}{2}\right] = 6929 \left[\frac{W \cdot h}{m^2 d}\right]
\end{aligned}$$

أو تقريباً:

$$G_{DV} = \frac{2}{\pi} J_{EV, \max} \times S_d = \frac{2}{\pi} \times 907 \times 12 = 6929 \left[\frac{W \cdot h}{m^2 d}\right]$$

في 21 حزيران

$$\begin{aligned}
G_{DV} &= 2 \int_{4.9}^{12} \left[239.4 + 838 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right)\right] dZ \\
&= 478.8(12 - 4.9) + 1676 \int_{4.9}^{12} 907 \left(-\frac{12}{\pi}\right) \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right) d\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right) \\
&= 3400 + 1676 \left(-\frac{12}{\pi}\right) \sin\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right) \\
&= 3400 - 6402 \left[0 - \sin\left(\pi - 4.9 \frac{\pi}{2}\right)\right] \\
&= 3400 - 6402(-0.96) = 9538 \left[\frac{W \cdot h}{m^2 d}\right]
\end{aligned}$$

في 21 كانون الأول

$$\begin{aligned}
G_{DV} &= 2 \int_{7.1}^{12} \left[-239.4 + 838 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right)\right] dZ \\
&= -478.8(12 - 7.1) + 1676 \left(-\frac{12}{\pi}\right) \int_{7.1}^{12} \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right) d\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right) \\
&= 2750 \left[\frac{W \cdot h}{m^2 d}\right]
\end{aligned}$$

المسألة الثانية

مجمع شمسي مسطح مائل نحو الجنوب، المطلوب:

1. أوجد ميل المجمع المسطح α ليكون عمودياً على الأشعة الشمسية لحظة الظهيرة في 6 أيار على خط عرض 35° شمالاً.

2. أوجد شدة الإشعاع الشمسي على سطح المجمع وكذلك على السطح الأفقي وعلى السطح الشاقولي الموجه نحو الجنوب وفق المعطيات السابقة.

الحل:

1. يُحسب الميل من المعادلة:

$$\alpha = \varphi - \delta$$

$$\varphi = 35^\circ$$

$$\delta = 23.4 \sin n$$

يتم استخدام هذه العلاقة باعتبار $n = 1$ بدءاً من 21 آذار.

$$= 23.4 \sin 45 = 16.55^\circ$$

$$\alpha = 35 - 16.55 = 18.45^\circ$$

2. يتم حساب شدة الإشعاع الشمسي على سطح المجمع من المعادلة:

$$J_{EV} = 0.8 J_0 \sin h = 0.8 \times 1360 \times \sin h$$

في لحظة الظهيرة تكون:

$$\sin h = \cos(\varphi - \delta) = \cos 18.45 = 0.95$$

$$J_{EV} = 0.8 \times 1360 \times 0.95 = 1032 [W/m^2]$$

ويتم حساب شدة الإشعاع الشمسي على سطح أفقي من:

$$J_{EH} = 0.8 J_0 \sin h \cos(\alpha) = 980 [W/m^2]$$

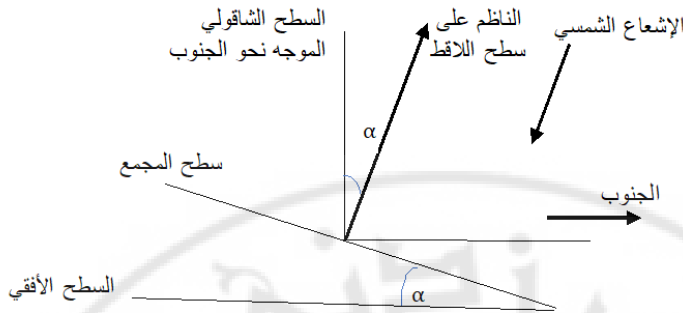
ويتم حساب شدة الإشعاع الشمسي على سطح شاقولي موجه نحو الجنوب من:

$$J_{EVS} = 0.8 J_0 \sin h \sin(\alpha) = 327 [W/m^2]$$

باعتبار α متممة لـ h أي:

$$\sin(\alpha) = \cos(h)$$

α في هذه الحالة هي زاوية السميت (المحصورة بين الشاقول وأشعة الشمس).



المسألة الثالثة:

أوجد ارتفاع الشمس وشدة الإشعاع الشمسي على السطح الأفقي وعلى السطح الشاقولي الموجه نحو الجنوب وكذلك طول النهار بالساعات لخط عرض $\varphi = 30^\circ$ شمالاً في يومي: 21 حزيران و 21 كانون الأول وذلك الساعة 12 ظهراً.

الحل:

في 21 حزيران:

$$\delta = 23.4 \sin n = 23.4 \sin 90 = 23.4^\circ$$

$$\gamma = 15(12 - Z)$$

الساعة 12 ظهراً أي $\gamma = 15(12 - 12) = 0^\circ$

في 21 كانون الأول:

$$\delta = 23.4 \sin n = 23.4 \sin(-90) = -23.4^\circ$$

$$\gamma = 15(12 - Z)$$

الساعة 12 ظهراً أي $\gamma = 15(12 - 12) = 0^\circ$

في 21 حزيران:

$$\sin h = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \gamma$$

$$= \sin 23.4 \sin 30 + \cos 23.3 \cos 30 \cos 0 = 0.99335$$

$$h = 83.4^\circ$$

$$\cos h = 0.11514$$

يتم حساب شدة الإشعاع الشمسي على سطح أفقي من:

$$J_{EH} = 0.8 J_0 \sin h \cos(\alpha)$$

لحظة الظهيرة يكون:

$$\sin(h) = \cos(\alpha)$$

بالتالي:

$$J_{EH} = 0.8 J_0 \sin^2 h = 0.8 \times 1360 \times 0.99335^2 = 1073.577 [W/m^2]$$

يتم حساب شدة الإشعاع الشمسي على سطح شاقولي موجه نحو الجنوب من:

$$J_{EVS} = 0.8 J_0 \sin(h) \cos(h) = 140 [W/m^2]$$

في 21 كانون الأول:

$$\sin h = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \gamma$$

$$= \sin(-23.4) \sin 30 + \cos(-23.3) \cos 30 \cos 0 = 0.5962$$

$$h = 36.6^\circ$$

$$\cos h = 0.803$$

يتم حساب شدة الإشعاع الشمسي على سطح أفقي من:

$$J_{EH} = 0.8 J_0 \sin h \cos(\alpha)$$

لحظة الظهيرة يكون:

$$\sin(h) = \cos(\alpha)$$

بالتالي:

$$J_{EH} = 0.8 J_0 \sin^2 h = 0.8 \times 1360 \times 0.5962^2 = 386.734 [W/m^2]$$

يتم حساب شدة الإشعاع الشمسي على سطح شاقولي موجه نحو الجنوب من:

$$J_{EVS} = 0.8 J_0 \sin(h) \cos(h) = 520.878 [W/m^2]$$

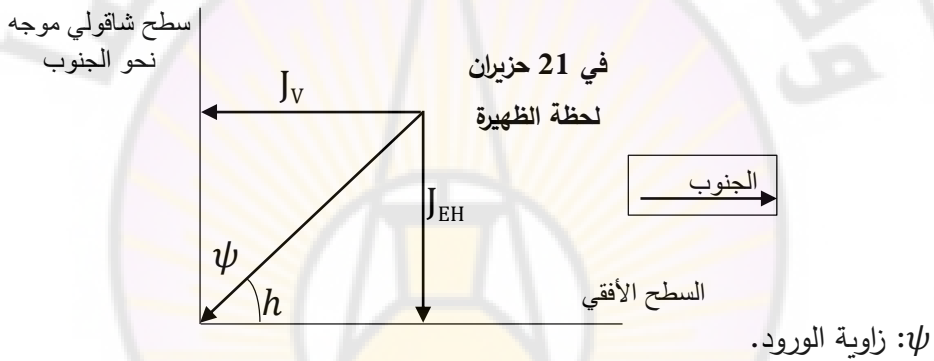
حساب طول النهار:

في 21 حزيران:

$$\cos \gamma_{h=0} = -\tan \delta \tan \varphi$$

$$\gamma_{h=0} = \arccos(-\tan \delta \tan \varphi) \\ = 104.47^\circ$$

$$S_d = \frac{2\gamma_{h=0}}{15} = 13.93 [h]$$

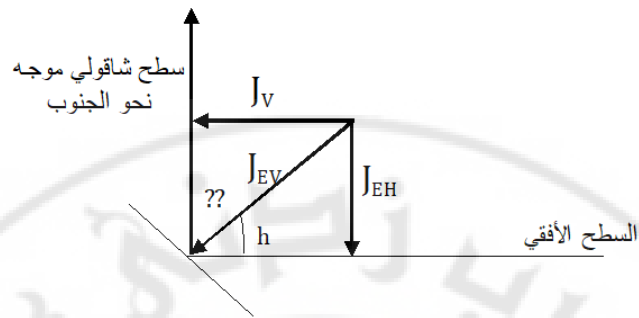


في 21 كانون الأول:

$$\gamma_{h=0} = \arccos(-\tan \delta \tan \varphi) \\ = 75.5^\circ$$

$$S_d = \frac{2\gamma_{h=0}}{15} = 10.07 [h]$$

في 21 كانون الأول
لحظة الظهيرة





الفصل الخامس

المجمعات الشمسية المركزة

1-5 الشكل الهندسي للقطع المكافئ

في القطع المكافئ ينعكس كل إشعاع موازي لمحور القطع المكافئ إلى نقطة محددة تسمى المحرق.

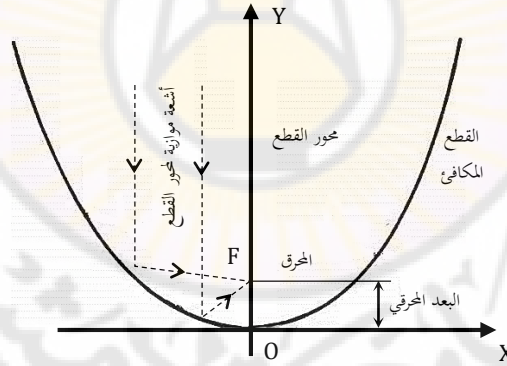
يستفاد من هذه الخاصية في المجمعات الشمسية المركزة.

تنعكس كافة الأشعة الشمسية التي تسقط على سطح المرآة المشكلة على شكل قطع مكافئ والموازية لمحور القطع المكافئ ليتم تركيزها في نقطة واحدة هي المحرق مما ينتج عنه درجة حرارة مرتفعة جداً في تلك النقطة.

يبين الشكل (1-5) قطع مكافئ يُعطى بالعلاقة التالية:

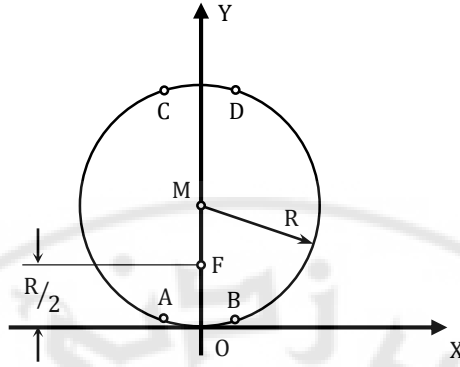
$$Y = \frac{x^2}{4f}$$

(5 - 1)



الشكل (1-5) الأبعاد الهندسية للقطع

في بعض الحالات يمكن تقريب أجزاء القطع المكافئ إلى عناصر دائرية كما في الشكل (2-5).



الشكل (2-5) القطعة الدائرية AB عنصر قطع مكافئ

معادلة هذا العنصر هي:

$$x^2 + (Y - R)^2 = R^2 \quad (5 - 2)$$

أو:

$$Y = \pm R \sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}} + R$$

ومن أجل عناصر قطع صغيرة حيث $\frac{x^2}{R^2} \ll 1$ نحصل على التقريب التالي:

$$\sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}} = 1 - \frac{x^2}{2R^2} \quad (5 - 3)$$

وبهذا يمكن تبسيط معادلة العنصر الدائري:

$$Y = \pm \left(R - \frac{x^2}{2R} \right) + R \quad [m] \quad (5 - 4)$$

تصف هذه المعادلة كل من العنصرين AB و CD وعند دراسة القطعة AB فقط يكون:

$$Y = \frac{x^2}{2R} \quad (5 - 5)$$

وحيث أن $R = 2f$ ومنه:

$$Y = \frac{x^2}{4f} \quad (5 - 6)$$

وهي نفس المعادلة (5 - 1)

2-5 بنية المجمعات الشمسية المركزة

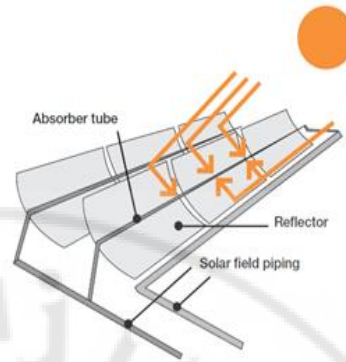
يبين الشكل (3-5) مخططاً رمزياً لبنية مجمع قطعي مركز وطريقة أدائه. يجب أن يبقى محور المرآة موجهاً دائماً نحو الشمس كي تسقط الأشعة موازية للمحور ومن ثم تنعكس كلها إلى المحرق. وهذا يعني في حالة المجمعات المركزة بخلاف المجمعات المسطحة يجب أن توجّه بشكل مستمر نحو الشمس وهذا يتطلب تحريكها وفق محورين: شرق -

الشكل (3-5) بنية المجمع الشمسي المركز

للسطح الماص الواقع في محرق المجمع المركز وظيفة النقاط الإشعاع الشمسي بأعلى كفاءة ممكنة وتحويله إلى طاقة حرارية محسومة ومن ثم نقله إلى الوسيط الناقل للحرارة المار عبر السطح الماص.

يسمى السطح الماص بالمستقبل وله ثلاثة أنواع:

- مستقبل مفتوح.
- مستقبل مغلق (بغلاف شفاف).
- المستقبل ذو الحجرة (حجرة مغلقة فيها فتحة صغيرة نسبياً لدخول الأشعة

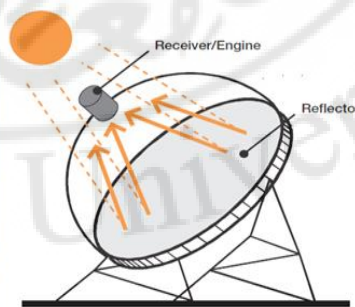


الشكل (4-5) مجمع شمسي ذو مجرى قطعي

يبين الشكل (4-5) مجمعاً شمسياً على شكل مجرى قطعي (مقطعه العرضي عبارة عن شكل قطع مكافئ) ويحتاج هذا المجمع للتوجيه وفق محور واحد فقط (شمال-جنوب). السطح الماص عبارة عن أنبوب مغطى بطبقة ماصة انتقائية ومحاط بأنبوب زجاجي لتخفيض فواقد الحمل والإشعاع. يمكن الوصول لدرجات حرارة عالية حوالي $400[^\circ\text{C}]$ ويستخدم هكذا مجمع في توليد الكهرباء من الطاقة الشمسية الحرارية.

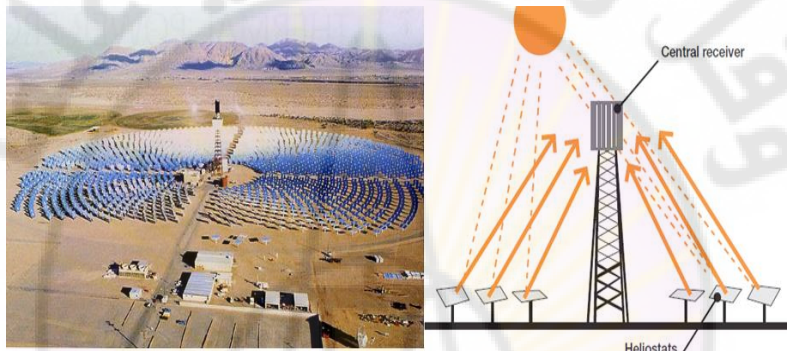
أما الشكل (5-5) فيبين مجمع شمسي قطعي مركز بمرآة دورانية وقطر $5[\text{m}]$ تتألف من عدد كبير من المرايا المسطحة الصغيرة المتوضعة على سطح داخلي لقطع مكافئ ويكون السطح الماص له على شكل كرة.

يمكن الحصول باستخدام هذه المجمعات على درجات حرارة أعلى من $4000[^\circ\text{C}]$ وتستخدم في المحطات الكهرشمسية لتوليد الطاقة الكهربائية.

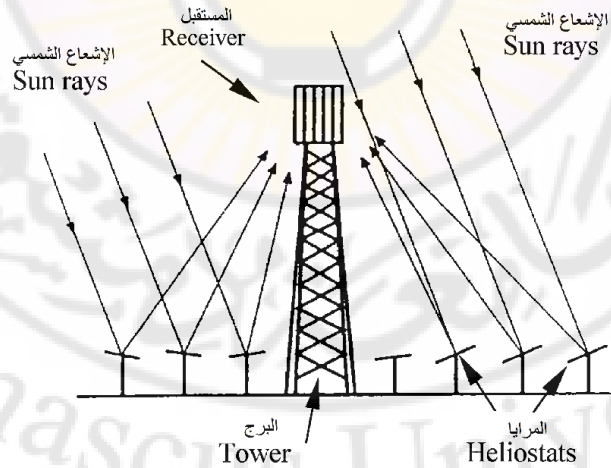


الشكل (5-5) مجمع شمسي ذو مجرى قطعي مركز بمرآة دورانية

أيضاً تُستخدم مرايا مسطحة كبيرة كمجمعات شمسية تسمى هيلوستات. يبين الشكل (5-6) هيلوستات بمساحة $23[m^2]$ وارتفاع حوالي $5[m]$ ، يتم توجيه العديد من هذه (الهيلوستات) المرايا على مستقبل متوضع على برج وتسمى مثل هذه الأنظمة بالأبراج الكهرشمسية. يلعب الحقل ككل دور مرآة قطعية عظيمة محرقها عند المستقبل في أعلى البرج ولتحقيق ذلك توجّه المرايا (الهيلوستات) بشكل مستمر ووفق محورين بحيث تبقى الأشعة المنعكسة تصيب اللاقط، الشكل (5-7).



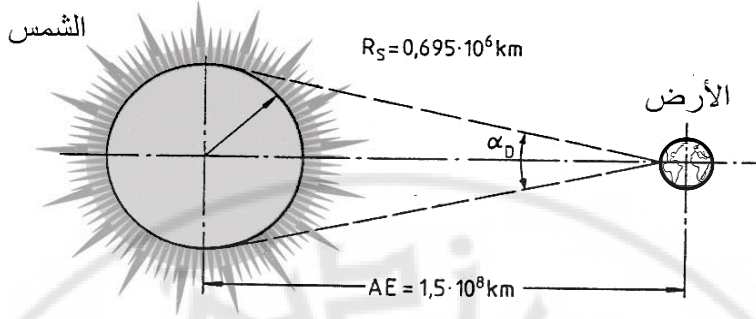
الشكل (5-6) هيلوستات (مرايا عاكسة موجهة)



الشكل (5-7) مخطط لنظام برج كهرشمسي

3-5 نسبة التركيز العظمى لمجمع قطعي مركز

إنّ الأشعة الشمسية التي تصيب الأرض ليست متوازية بشكل تام والسبب في ذلك هو أنّ المسافة بين الأرض والشمس ليست نهائية كما أنّ القطر الكبير نسبياً للشمس لا يجعلها منبعاً نقطياً تماماً.



الشكل (5-8) زاوية تفرق الأشعة الشمسية من نقطة على سطح الأرض

يُشكّل تفرق الأشعة الشمسية زاوية قدرها α_D .

من الشكل (5-8) يمكن حساب زاوية تفرق الأشعة الشمسية كما يلي:

$$\tan(\alpha_D) = \frac{2R_S}{AE} \quad (5-7)$$

وبما أنّ α_D صغيرة جداً يكون:

$$\alpha_D = \frac{2R_S}{AE} \quad [\text{rad}] \quad (5-8)$$

بالتعويض ينتج:

$$\alpha_D = 0.00927 \text{ rad} = 0.53^\circ = 32' \quad (5-9)$$

يختلف شكل ومساحة خيال الشمس في المحرق باختلاف الزاوية $\emptyset$ وعند $\emptyset = 0$ نحصل

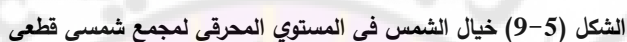
على الشكل الدائري تماماً حيث:

$$d_B = f \alpha_D \quad [\text{m}] \quad (5-10)$$

أما عندما تكون $\emptyset > 0$ فإنّ شكل المحرق يصبح على شكل قطع ناقص.

مركز المحور الكبير للقطع الناقص:

$$a_{EL} = \frac{\rho_S \cdot \alpha_D}{\cos \emptyset} \quad [\text{m}] \quad (5-11)$$


$$b_{EL} = \rho_s \cdot \alpha_D \quad [m] \quad \langle 5-12 \rangle$$

وتكون مساحة خيال الشمس في المستوى المحرقى بالشكل:

$$A_{EL} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\rho_s^2 \alpha_D^2}{\cos \emptyset} \quad [m^2] \quad \langle 5 - 13 \rangle$$

يمكن صياغة نسبة التركيز الهندسية C على شكل نسبة مساحات كما يلي:

$$C = \frac{\text{مساحة فتحة العاكس}}{\text{مساحة خيال الشمس في المحرق}} \quad \langle 5 - 14 \rangle$$

بهذا التعريف تهمل الضياعات الناتجة عن عدم دقة انعكاس الأشعة الشمسية وبالتالي يمكن استعمال هذه النسبة كنسبة لتركيز الطاقة والتي تمثل نسبة شدة الطاقة الواردة إلى العاكس إلى شدة الطاقة المنعكسة والواصلة إلى المحرق.

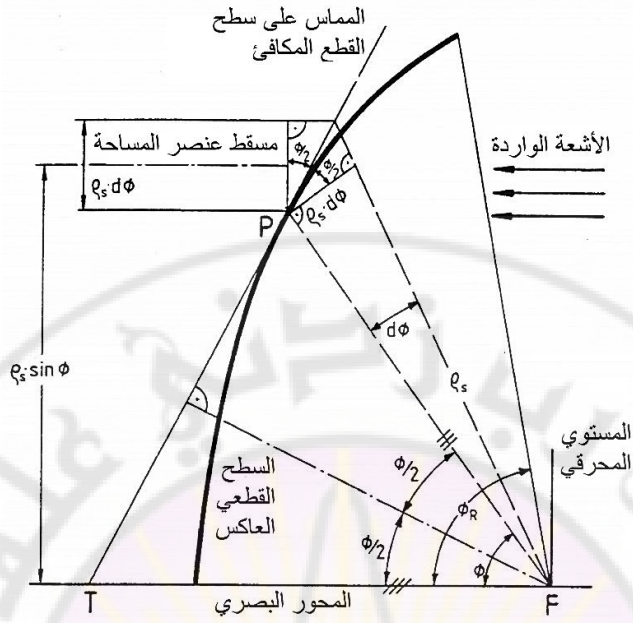
بسبب تفرّق الأشعة الشمسية يكون لهذه النسبة حتماً قيمة عظمى يمكن حسابها من إجراء التكامل على مساحة العاكس.

من الخصائص الرياضية للقطع المكافئ أن: $FT = FP$ أي أن المثلث FTP متساوي الساقين، مسقط عنصر المساحة dA على مستو عمودي على الأشعة عبارة عن حلقة

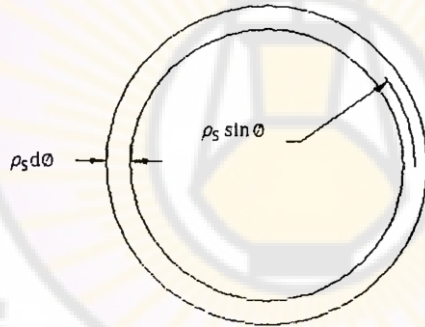
عرضها $\rho_s d\theta$ بقطر وسطي $2\rho_s \sin\theta$ فتكون مساحة المسقط dA :

$$dA = 2\pi\rho_s^2\sin\vartheta d\vartheta \quad [\text{m}^2] \quad \langle 5-15 \rangle$$

أما نسبة التركيز الهندسية حسب العلاقة (14 - 5) بالنسبة لعنصر المساحة هذا تكون بالشكل:



الشكل (10-5) إسقاط مساحة القطع لحساب نسبة التركيز العظمى



الشكل (11-5) مسقط عنصر المساحة dA على مستو عمودي على الأشعة الشمسية

$$dC = \frac{dA}{A_{EL}} \quad (5 - 16)$$

وبالتعويض من العلاقة (5 - 15) و (5 - 13) ينتج:

$$dC = 8 \sin \theta \cos \theta \frac{d\theta}{\alpha_D^2} \quad (5 - 17)$$

بالتكامل من $\theta = 0$ حتى $\theta = \theta_R$ ينتج:

$$C = \frac{4 \sin^2 \theta_R}{\alpha_D^2} \quad (5 - 18)$$

وبتعويض α_D بقيمتها بالراديان ينتج:

$$C = 46211 \cdot \sin^2 \theta_R \quad (5 - 19)$$

تتعلق نسبة التركيز فقط بقيمة الزاوية الطرفية وتكون نسبة التركيز عظمى فقط عندما

$$\cdot \emptyset_R = \frac{\pi}{2}$$

وعندها تكون:

$$C_{\max} = \frac{4}{\alpha_D^2} = 46211 \quad (5 - 20)$$

مع التطور التقني أمكن تصنيع عواكس قطعية ذات نسب تركيز تصل إلى (8000÷5000) مرة لكن نسبة التركيز العملية في مجمعات الطاقة الشمسية لا تزال أصغر من ذلك بكثير .

يمكن كتابة نسبة التركيز أيضاً على الشكل التالي عندما تكون مساحة السطح الماص على المستوي المحرقى مساوية لمساحة البقعة المحرقة أو خيال الشمس في المحرق:

$$C = \frac{\text{مساحة فتحة العاكس}}{\text{مسقط مساحة السطح الماص على المستوي المحرقى}}$$

أي:

$$C = \frac{A_R}{A_A} \quad (5 - 21)$$

5-4 درجة الحرارة العظمى للسطح الماص

يمكن الوصول إلى درجة الحرارة العظمى للسطح الماص من خلال الموازنة الحرارية لهذا السطح عند عدم تبريد السطح الماص (الحمل = الصفر).

ننتقل من الفرضية أنّ الشمس والسطح الماص هي أجسام سوداء . يتلقى السطح الماص إشعاع مساوٍ للإشعاع الوارد على العاكس أو:

$$\dot{Q}_S = J_{EV} A_R \quad [W] \quad (5 - 22)$$

ويشع طاقة قدرها:

$$\dot{Q}_R = A_A \sigma T_A^4 \quad [W] \quad (5 - 23)$$

حيث A_R و A_A هي مساقط السطح الماص والسطح العاكس على مستوٍ عمودي على الإشعاع الشمسي على التوالي $[m^2]$.

σ : ثابت ستيفان بولتزمان .

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right] \quad (5 - 24)$$

وبالتالي:

$$A_A \sigma T_A^4 = J_{EV} A_R \quad (5 - 25)$$

نحصل على شدة الإشعاع الشمسي على السطح العمودي على أشعة الشمس عند سطح الأرض من تقسيم كامل الإشعاع على سطح الكرة الإشعاعية والتي يبلغ نصف قطرها $A_E = 150 \times 10^6 [\text{km}]$ (عند إهمال الضياعات عبر الغلاف الجوي).

تبلغ مساحة سطح الشمس:

$$A_S = 4\pi R_S^2 \quad [\text{m}^2] \quad (5-26)$$

مساحة سطح الكرة الإشعاعية:

$$A_{AE} = 4\pi(AE)^2 \quad [\text{m}^2] \quad (5-27)$$

تبلغ شدة الإشعاع الشمسي:

$$J_S = \sigma T_S^2 \quad (5-28)$$

ومقدار الإشعاع الشمسي الكلي:

$$J_S A_S = \sigma T_S^4 \cdot 4\pi R_S^2 \quad [\text{W}] \quad (5-29)$$

وانطلاقاً من أن:

$$J_S A_S = J_{EV} \cdot (A_{AE}) \quad (5-30)$$

وذلك عند إهمال الفواقد في الغلاف الجوي فيكون:

$$J_{EV} = \frac{J_S A_S}{A_{AE}} = \frac{\sigma T_S^4 \cdot 4\pi R_S^2}{4\pi(AE)^2} \quad (5-31)$$

بالعودة إلى العلاقتين $(5-22)$ و $(5-23)$ وحيث أنه عند التوازن الحراري للسطح الماص بدون حمل يكون:

$$J_{EV} \cdot A_R = A_A \sigma T_A^4 \quad \text{أو} \quad \dot{Q}_S = \dot{Q}_R \quad (5-32)$$

نعوض من العلاقة $(5-31)$:

$$\frac{\sigma T_S^4 \cdot 4\pi R_S^2}{4\pi(AE)^2} \cdot A_R = A_A \sigma T_A^4 \quad (5-33)$$

أو:

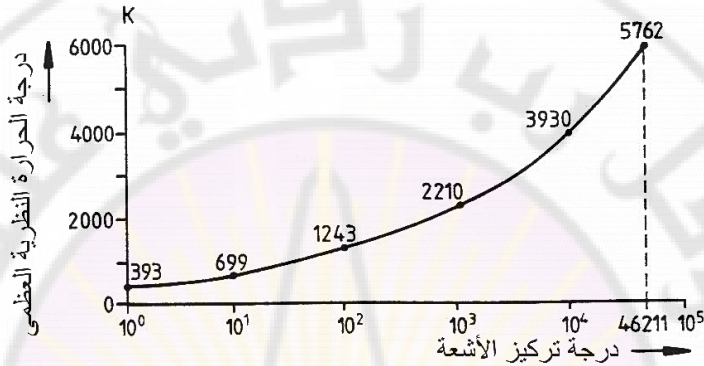
$$\frac{T_A^4}{T_S^4} = \frac{A_R}{A_A} \cdot \frac{R_S^2}{(AE)^2} = \frac{A_R}{A_A} \left(\frac{\alpha_D}{2}\right)^2 \quad (5-34)$$

$$\frac{\alpha_D^2}{4} = \frac{1}{C_{\max}} \quad \text{و} \quad C = \frac{A_R}{A_A} \quad \text{ولكن}$$

$$\frac{T_A^4}{T_S^4} = \frac{C}{C_{\max}} \quad \text{فيكون}$$

$$T_A = T_S \sqrt[4]{\frac{C}{C_{\max}}} \quad (5-35)$$

يبين الشكل (5-12) العلاقة بين درجة التركيز ودرجة الحرارة النظرية العظمى التي يمكن الحصول إليها.



الشكل (5-12) العلاقة بين درجة الحرارة العظمى للسطح الماص ودرجة التركيز

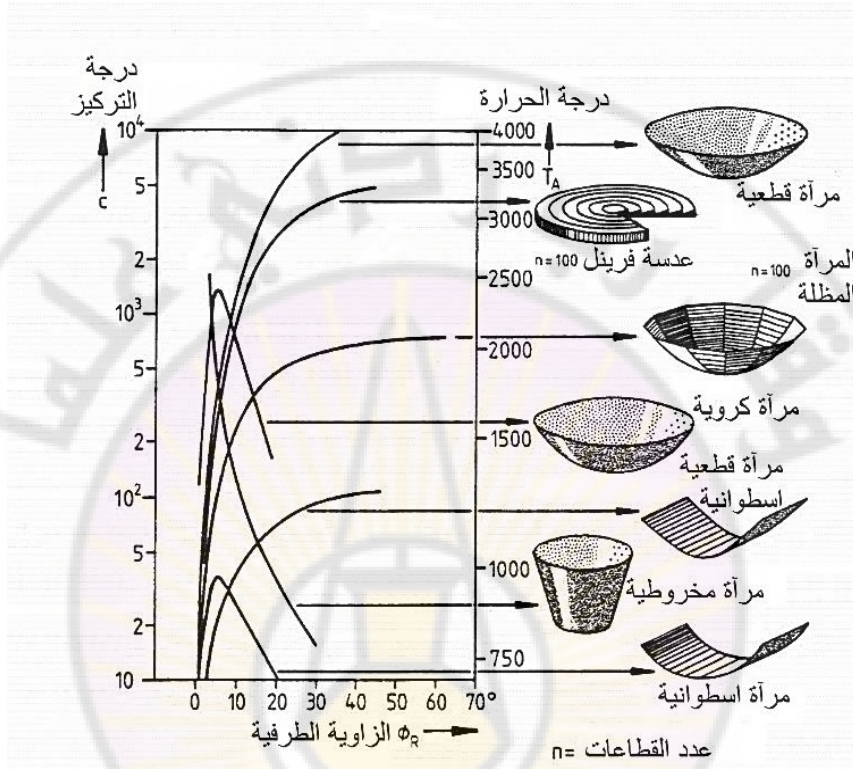
العلاقة السابقة مبنية على أساس أن السطح الماص جسماً أسوداً مثالياً يقوم بإعادة إشعاع كامل الطاقة الشمسية التي يتلقاها.

وفق الشروط المذكورة يمكن وباستخدام مجمع مسطح ذي نسبة تركيز $C = 1$ الوصول إلى درجة حرارة تبلغ $120[^\circ\text{C}]$ وذلك عند حمل مساوٍ للصفر وتبدو هذه الدرجة منخفضة إذا علمنا أننا نستطيع الحصول على درجات حرارة تتجاوز $150[^\circ\text{C}]$ عندما تكون شدة الإشعاع الشمسي $J_{\text{EV}} > 900[\text{W}/\text{m}^2]$ ويعود ذلك إلى الغلاف الزجاجي الاصطفائي والطبقة الماصة الانتقائية مما يقلل من إشعاع الأمواج الطويلة من السطح الماص عبر الزجاج.

عندما تكون نسبة التركيز $C_{\max} = C$ ، عندها تتساوى درجة حرارة السطح الماص مع حرارة سطح الشمس أي تبلغ $5752[\text{K}]$ ولا يمكن الحصول على درجات حرارة أعلى من ذلك نظرياً لأن ذلك يتناقض مع القانون الثاني للترموديناميك.

5-5 نسب التركيز ودرجات الحرارة لأنماط مختلفة من المركّزات الشمسية

يمكن الحصول على نسب التركيز الأعلى بالمرايا القطعية كما هو مبين في الشكل (5-13).



الشكل (5-13) درجة حرارة السطح الماص النظرية ونسب التركيز لأنماط مختلفة من المركّزات كتتابع للزاوية الطرفية ϕ_R

5-6 الفواقد الحرارية للمجمعات الشمسية المركّزة

تنتج الفواقد الحرارية للمجمعات الشمسية المركّزة بشكل أساسي مما يلي:

- الانعكاس غير التام عن سطح المرآة.
- عدم الدقة في تصنيع السطوح.
- عدم التوجيه الدقيق نحو الشمس.
- فواقد الانعكاس على السطح الماص.
- الإشعاع من السطح الماص.
- الفقد الحراري بالحمل من السطح الماص.

توجد سطوح ماصة مغلقة أي محاطة بغلاف شفاف أو مفتوحة أي بدون غلاف شفاف بالإضافة للواقط ذات الحجرة.

a. الانعكاس غير التام عن سطح المرآة:

يتراوح معامل الانعكاس ρ للمرايا المستخدمة في التجهيزات الشمسية بين 0.76 و 0.95 حسب المواد المستخدمة وهذا يعني أن مقداراً من الإشعاع الشمسي الذي يتلقاه العاكس ويتراوح بين 5% و 24% لن يصل إلى السطح الماص.

يبين الجدول (1-5) قيمة ρ من أجل طبقات من مواد مختلفة للمرايا:

يمكن حساب فواقد الانعكاس من العلاقة التالية:

$$\dot{Q}_R = (1 - \rho) \cdot J_{EV} \cdot A_R \quad [W] \quad (36 - 5)$$

الجدول (1-5) قيمة ρ من أجل مواد مختلفة للمرايا

نوع العاكس	معامل الانعكاس
زجاج مع طبقة المنيوم	0.76
تفلون مع طبقة المنيوم	0.79
أكريل مع طبقة المنيوم	0.8
تفلون مع طبقة فضة	0.86
زجاج مع طبقة فضة	0.87
زجاج خاص مع طبقة فضة	0.95

J_{EV} : الإشعاع الشمسي المباشر على السطح الموجّه عمودياً على الأشعة الشمسية $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.
نتيجة تموج سطح المرآة وعدم مطابقة السطح للتابع الهندسي تحدث انحرافات للأشعة المنعكسة.

A_R : مساحة فتحة العاكس $[m^2]$.

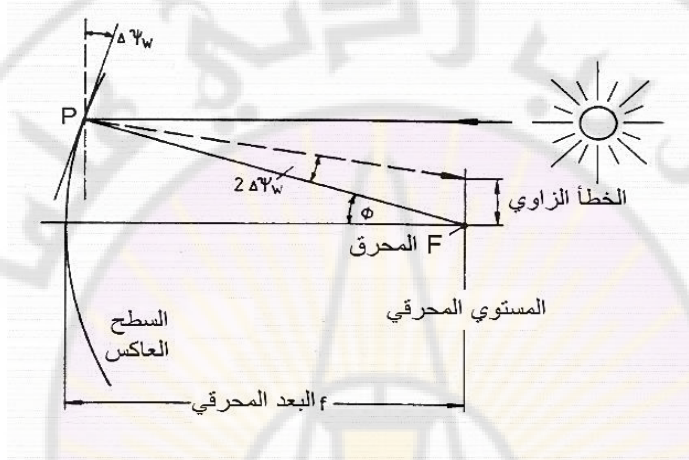
b. الفواقد السطحية:

نتيجة تموج سطح المرآة وعدم مطابقة السطح للتابع الهندسي تحدث انحرافات للأشعة المنعكسة.

ويسبب انحراف المماس الفعلي لنقطة من السطح العاكس بزاوية مقدارها $\Delta\Psi$ عن المماس الهندسي التصميمي إلى انحراف الإشعاع المنعكس زاوية قدرها $2\Delta\Psi$ مما يتسبب في انحراف زاوي وسقوط الإشعاع المنعكس بعيداً عن المحرق بمسافة قدرها:

$$L = \overline{FP} \cdot 2\Delta\Psi \quad (5 - 37)$$

يبين الشكل (5-14) الخطأ الزاوي الناتج عن تموج السطح العاكس.



الشكل (5-14) الخطأ الزاوي الناتج عن دقة سطح العاكس

c. فواقد التوجيه:

ينتج الخطأ الزاوي في توجيه المجمع نحو الشمس عن السماح التصميمي لجهاز التوجيه الخطوي غير المستمر ويسبب انحراف زاوي قدره $\Delta\Psi_0$.

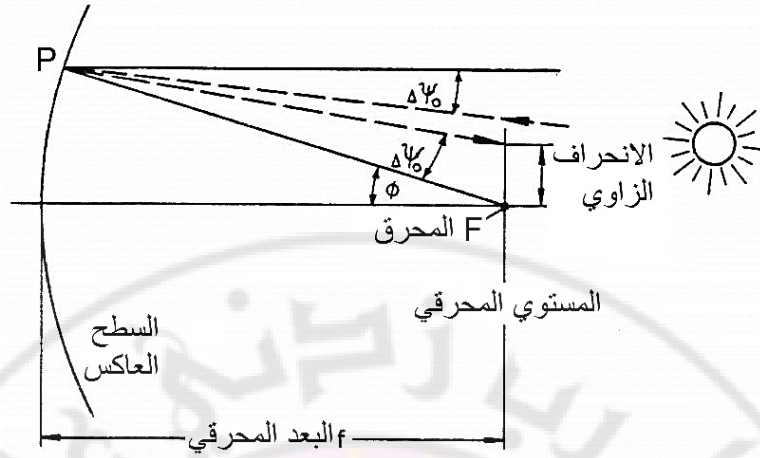
لجهاز التوجيه انحراف زاوي للأشعة المنعكسة مساوٍ لـ $\Delta\Psi_0$ أيضاً وانحراف عن المحرق:

$$L = \overline{FP} \cdot \Delta\Psi_0 \quad (5 - 38)$$

يتعلق مقدار السماح التصميمي في توجيه العاكس بدرجة التركيز، ففي حالة التركيز الضئيل

$C = (3 \div 10)$ يسمح بانحراف في التوجيه يصل إلى $\Delta\Psi_0 = 3^\circ$ بينما يكون الانحراف

المسموح به عند تركيز $C = (10 \div 500)$ أقل من 0.1° .



الشكل (5-15) انحراف إشعاع نتيجة خطأ التوجيه

d, e الفواقد بالانعكاس والإشعاع من سطح ماص مفتوح (بدون غلاف شفاف):

كما في المجمعات الشمسية المسطحة يتم تغطية السطح الماص بطبقة سوداء من مواد انتقائية. يتعلق استقرار الطبقة وعمرها بدرجة حرارة السطح الماص، وتؤثر الأشعة فوق البنفسجية UV المركزة بشكل سريع على الطبقة الماصة الحساسة مما يقلل من عمرها.

يعطى معامل الانعكاس للسطوح الانتقائية بالعلاقة:

$$\rho_A = 1 - \alpha_s \quad (5 - 39)$$

تتراوح قيمة α_s للسطوح الماصة الانتقائية بين $0.86 \div 0.98$ وعندها تتراوح قيمة ρ_A بين $0.02 \div 0.14$ حسب طبقات السطح الماص وهذا يعني أنّ ما بين $2 \div 14\%$ من الأشعة الواصلة إلى السطح الماص تضيع بالانعكاس.

تُحسب الفواقد بالإشعاع من العلاقة التالية:

$$\dot{Q}_{A,R} = \rho_A \rho_{JEV} \cdot A_R \quad [W] \quad (5 - 40)$$

ρ : معامل الانعكاس للمرآة.

A_R : مساحة السطح العاكس $[m^2]$.

أما الفواقد بالإشعاع للأمواج الطويلة فتحسب من العلاقة التالية:

$$\dot{Q}_S = \varepsilon_1 A_A \sigma (T_A^4 - T_a^4) \quad [W] \quad (5 - 41)$$

ε_1 : معامل الإشعاع للسطح الماص (نختار سطوح بمعاملات إشعاع صغيرة).

σ : ثابت ستيفان بولتزمان $[5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4]$

T_A, T_a : درجات حرارة السطح الماص والهواء المحيط على التوالي.

f. الفواقد بالحمل من السطح الماص المفتوح (بدون غلاف شفاف):

في حالة السطوح الماصة المفتوحة تتسبب الرياح بشكل رئيسي بهذه الفواقد لذلك يتم عادة حماية السطوح الماصة بغلاف زجاجي شفاف، لكن ذلك يتسبب في فواقد امتصاص وانعكاس على الغلاف الشفاف.

يتم حساب الفواقد الحرارية بالحمل من السطح الماص المفتوح بالطريقة التقليدية من العلاقة التالية:

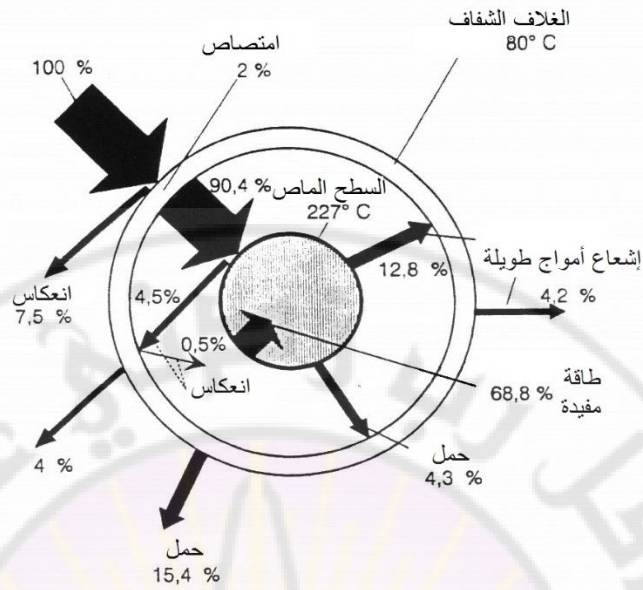
$$\dot{Q}_C = U_A A_A (T_A - T_a) \quad [W] \quad (5 - 42)$$

يتعلق معامل الانتقال الحراري للسطح الماص U_A بالشكل الهندسي للسطح الماص بالإضافة لقوة الرياح.

للتخفيف من هذه الفواقد والتأثير على U_A تُصنع سطوح ماصة على شكل حجرة بنافذة تدخل منها الأشعة المنعكسة ويتم عزل هذه الحجرات من الخارج مما يقلل من أثر الرياح ويخفّض قيمة U_A .

7-5 السطح الماص المغلف بطبقة شفافة

من خلال إحاطة السطح الماص بغلاف شفاف يتم خفض الفواقد الناتجة عن الإشعاع والحمل أما فواقد الانعكاس فتزداد. بشكل عام يتم تحسين مردود المجمع. يبين الشكل (5-16) تيارات التوازن الحراري لسطح ماص على شكل أنبوب يُستخدم في المجمعات القطعية الأسطوانية (مجرى قطعي) المركزة.



الشكل (5-16) تيارات التبادل الحراري على سطح ماص مغلق

5-8 الاستطاعة المفيدة والمردود

بإجراء الموازنة الحرارية لمجمع شمسي مركّز بسطح ماص مفتوح وبإهمال الفواقد السطحية وفواقد التوجيه للمرآة نحصل على العلاقة التالية:

$$J_{EV} \cdot A_R = \dot{Q}_R + \dot{Q}_S + \dot{Q}_{A,R} + \dot{Q}_C + \dot{Q}_N \quad (5-43)$$

J_{EV} : الإشعاع الشمسي المباشر على السطح الموجّه عمودياً على الأشعة الشمسية $\left[\frac{W}{m^2} \right]$.

$\dot{Q}_R$: فواقد الانعكاس عن العاكس $[W]$.

$\dot{Q}_{A,R}$: فواقد الانعكاس من السطح الماص $[W]$.

$\dot{Q}_C$: فواقد الحمل من السطح الماص $[W]$.

$\dot{Q}_N$: الاستطاعة المستفادة $[W]$.

A_R : مساحة فتحة العاكس $[W]$.

$$J_{EV} A_R = (1 - \rho) J_{EV} A_R + \rho_A J_{EV} A_R + U_A A_A (T_A - T_a) + \varepsilon_1 A_A \sigma (T_A^4 - T_a^4) + \dot{Q}_N \quad [W] \quad (5-44)$$

ρ : معامل الانعكاس عن العاكس.

ρ_A : معامل الانعكاس عن السطح الماص.

U_A : معامل التبادل الحراري الكلي بين السطح الماص والوسط المحيط $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$.

بعد تعويض الاستطاعة النوعية المستفادة $\dot{q}_N = \frac{\dot{Q}_N}{A_R}$ ونسبة التركيز $C = \frac{A_R}{A_A}$ في العلاقة السابقة نحصل على:

$$\dot{q}_N = J_{EV} \cdot \rho (1 - \rho_A) - \frac{U_A}{C} (T_A - T_a) - \frac{\varepsilon_1 \sigma}{C} (T_A^4 - T_a^4) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (5 - 45)$$

وبتعويض $\rho_A = 1 - \alpha_s$ في العلاقة (5 - 45) والإصلاح نحصل على:

$$\dot{q}_N = J_{EV} \cdot \rho \cdot \alpha_s - \frac{U_A}{C} (T_A - T_a) - \frac{\varepsilon_1 \sigma}{C} (T_A^4 - T_a^4) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (5 - 46)$$

لكن مردود المجمع المركز يساوي الاستطاعة المستفادة من واحدة السطح من العاكس مقسومة على الإشعاع الوارد على واحدة السطح من العاكس أي:

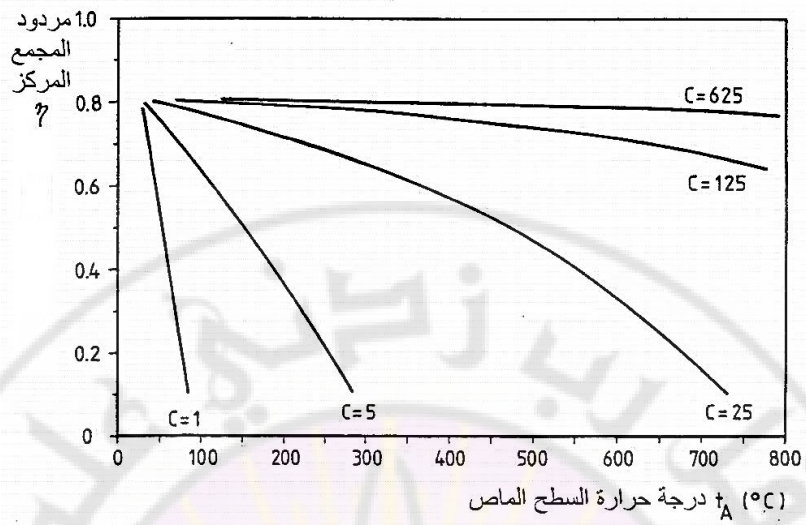
$$\eta = \frac{q_N}{J_{EV}} \quad (5 - 47)$$

$$\eta = \rho \cdot \alpha_s - \frac{U_A}{J_{EV} \cdot C} (T_A - T_a) - \frac{\varepsilon_1 \sigma}{J_{EV} \cdot C} (T_A^4 - T_a^4) \quad (5 - 48)$$

علاقة المردود بنسبة التركيز ودرجة حرارة السطح الماص عند ثبات بقية البارامترات والعلاقة (5 - 48) مبينة بيانياً في الشكل (5-17).

نلاحظ أنه مع ارتفاع درجة الحرارة للسطح الماص يتناقص المردود بسرعة لأن الفوائد الناتجة عن الإشعاع تتناسب مع الأس الرابع لدرجة حرارة السطح الماص بينما يكون التناسب خطياً بين فوائد الحمل ودرجة الحرارة للسطح الماص.

من أجل قيمة ثابتة لدرجة حرارة السطح الماص يتزايد المردود بشكل كبير مع ارتفاع نسبة التركيز لأن قيمة الفوائد بالإشعاع والحمل تتناقص بسرعة مع تزايد C لوجودها في مقام الكسر. يتعلق المردود أيضاً بشدة الإشعاع الشمسي المباشر لأن الفوائد المذكورة تنخفض عند قيم أعلى للإشعاع وذلك لنفس السبب السابق أي لوجود J_{EV} في مقام الكسر.



الشكل (5-17) أثر نسبة التركيز ودرجة حرارة السطح الماص على مردود المركز



الفصل السادس

توليد الكهرباء بالطاقة الشمسية الحرارية

لتوليد الكهرباء بالطاقة الشمسية الحرارية لا بدّ من تركيز الإشعاع الشمسي الوارد، بهدف الحصول على درجات حرارة عالية، ونقله إلى سطح ماص حيث يتحول هذا الإشعاع إلى طاقة حرارية محسوسة.

يتم استرجار الطاقة الحرارية من السطح الماص بواسطة سائل ناقل للطاقة الحرارية إلى العنفة مباشرة أو عبر دارة ثانوية ليتم تحويلها إلى طاقة ميكانيكية يتم نقلها إلى مولّد كهربائي لتتحول إلى طاقة كهربائية.

الدارة الترموديناميكية ممتثلة للدارة الترموديناميكية في محطات توليد الطاقة التقليدية، الفرق هنا أنّ المنبع الحراري ليس مرجلاً بخارياً أو حجرة احتراق بل هو سطح ماص (نسميه هنا اللاقط أو المستقبل).

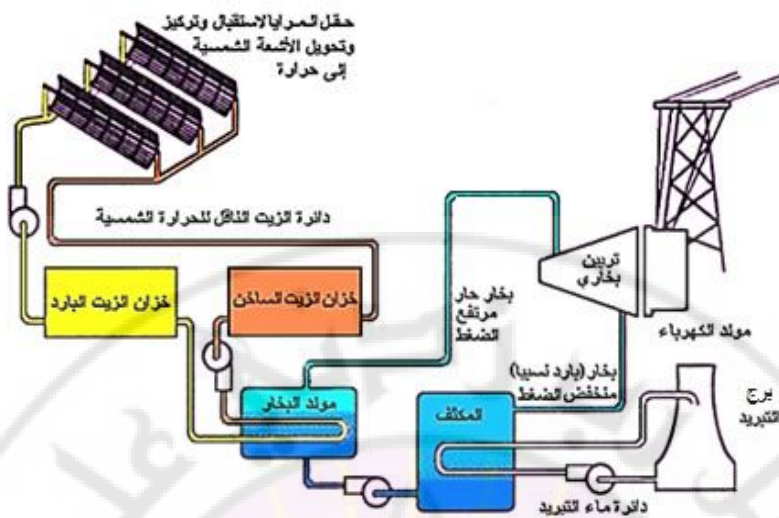
يتم توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية الحرارية بنوعين أساسيين من الأنظمة: نظام المزرعة الشمسية، ونظام البرج الشمسي، والفرق بينهما هو بنوع المجمعات الشمسية ونوع اللاقط أو المستقبل.

يبين الشكل (6-1) مخططاً لدارات العمل ودارة التسخين الشائعة في حالتي المزرعة الشمسية والبرج الشمسي.

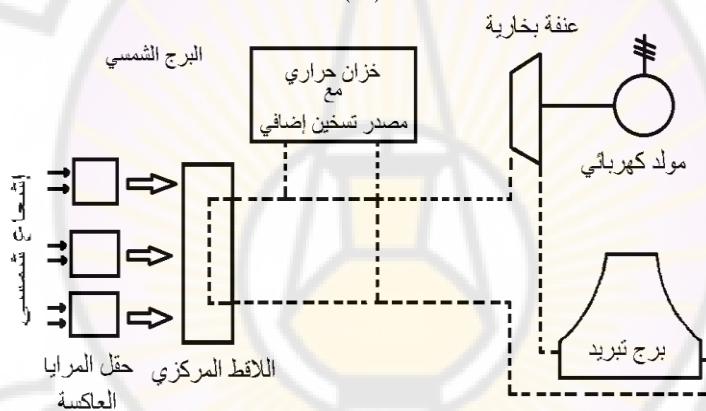
في المزارع الشمسية غالباً تُستخدم المجمعات الشمسية القطعية بينما تُستخدم المرايا المسطحة العاكسة في أنظمة الأبراج الشمسية، ويكون لكل مجمع قطعي في المزارع الشمسية لاقط (سطح ماص) خاص به بينما يكون اللاقط في النظام البرجي مركزياً وحيداً حيث توجّه كافة الأشعة المنعكسة من المرايا إلى اللاقط على البرج.

في المزارع الشمسية توجّه المجمعات القطعية لتكون فتحاتها عمودية على الأشعة الشمسية.

أما في الأنظمة البرجية يتم توجيه السطح العاكس وفق محورين ويتم توجيه المرايا لتبقى الأشعة المنعكسة عنها تسقط على سطح اللاقط في اللواقط المفتوحة أو على فتحة اللاقط في اللاقط ذي الحجرة.



(A)

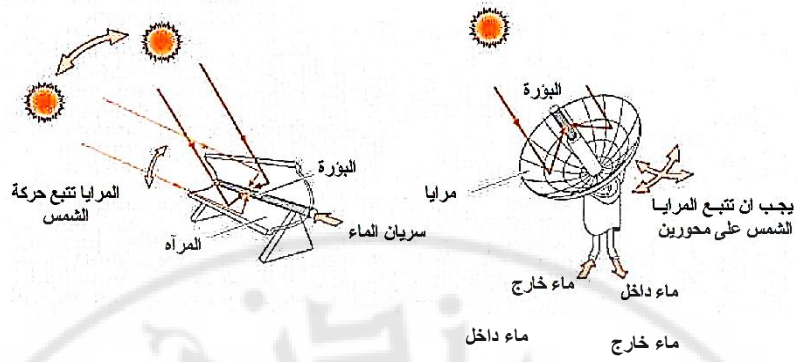


(B)

الشكل (1-6) مبدأ توليد الكهرباء من الطاقة الشمسية الحرارية وفق نظامي المزرعة الشمسية (A) والبرج (B)

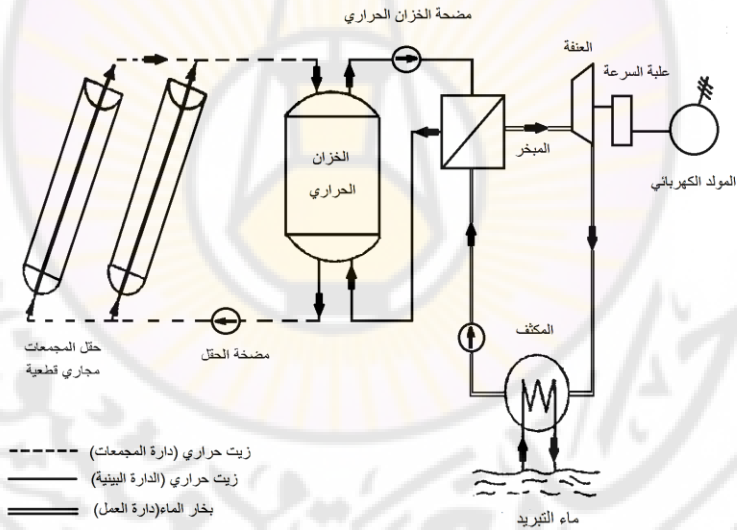
1-6 نظام المزرعة الشمسية

كما ذكرنا سابقاً يتألف نظام المزرعة الشمسية من مجموعة (حقل) من المجمعات الشمسية المركزة، لكل منها لاقط (سطح ماص) مستقل. ويتم توصيل هذه اللواقط على التوازي، ليقوم الوسيط الناقل للحرارة بنقل الطاقة الحرارية من اللواقط إلى خزان حراري أو إلى دارة العمل أي إلى (المبخر) لتوليد البخار المحمص اللازم للعنفة البخارية التي ترتبط بمولد كهربائي يحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية.



الشكل (2-6) مجمعات شمسية مركزة تتعقب حركة الشمس

يبين الشكل (3-6) دائرة وصل مبسطة لنظام مزرعة شمسية أما الشكلان (4-6) و (5-6) فيبينان صورة لمجمعين أحدهما لمجمع شمسي ذي مجرى قطعي مركّز والآخر لمجمع شمسي قطعي مركّز بنسبة تركيز $C = 200$.



الشكل (3-6) دائرة وصل مبسطة لنظام مزرعة شمسية كهحرارية



الشكل (4-6) مجمع شمسي ذو مجرى قطعي مركز



الشكل (5-6) مجمع شمسي قطعي مركز بنسبة تركيز $C = 200$

عادة تعمل دارة المجمعات بزيوت حراري يصلح للعمل حتى درجات حرارة $300 \div 400^\circ\text{C}$ مع ارتفاع بسيط في الضغط ويبقى سائلاً وهكذا تكون أقطار الأنابيب في دارة المجمعات صغيرة نسبياً ويتم تصميمها لتدفق وضغط صغيرين. في الدارة المبينة في الشكل (3-6) تُستخدم دارة ثانوية لتسخين المبخر وتقوم هذه الدارة بفصل دارة المجمعات عن دارة العمل. ولهذا النظام ميزتين:

- أ- إن دارة العمل لا تتأثر بالتذبذبات القصيرة للإشعاع الشمسي حيث تبقى درجة حرارة وسيط التسخين ثابتة تقريباً.
- ب- نظراً لفصل دارة المجمعات عن دارة العمل تصبح عملية التحكم في النظام أسهل.

6-1-1 درجة حرارة العمل والمردود

لاحظنا أنه في المجمعات المركزة تتعلق درجة حرارة السطح الماص بدرجة التركيز للأشعة فكلما ازدادت نسبة التركيز C كلما ازدادت درجة حرارة السطح الماص، إلا أن ارتفاع درجة الحرارة كما لاحظنا يزيد من الفوائد وبالتالي يقلل من مردود المجمع.

أما الدارة الترموديناميكية فيتناسب مردودها مع درجة الحرارة حيث يزداد المردود بشكل مستمر مع ارتفاع درجة الحرارة.

إن المردود الكلي (المجمعات + الدارة) ينتج من جداء مردود الحقل الشمسي والدارة الترموديناميكية بالشكل:

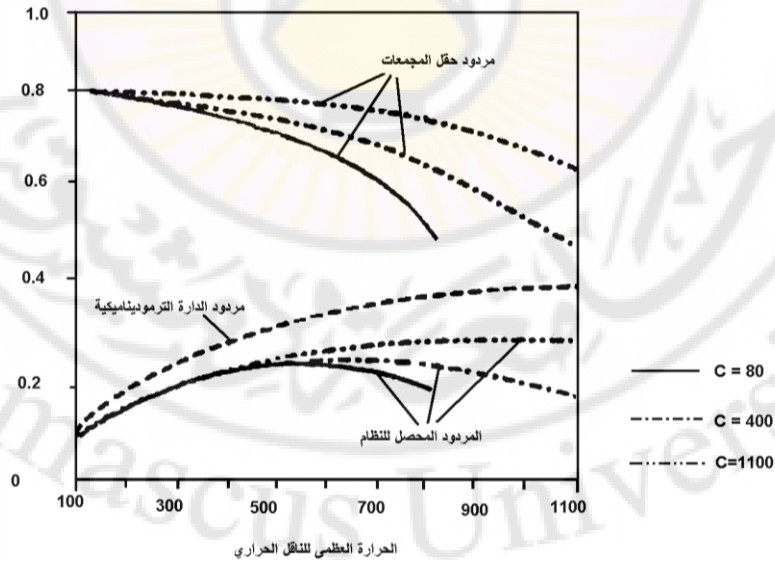
$$\eta = \eta_{CF} \cdot \eta_{TC} \quad (6-1)$$

η : المردود الكلي للنظام.

η_{CF} : مردود حقل المجمعات.

η_{TC} : مردود الدارة الترموديناميكية.

أي من جداء تابعين لدرجة الحرارة وبالتالي ينتج تابع جديد لدرجة الحرارة يكون له ذروة (قيمة عظمى) وتكون درجة الحرارة المناسبة عند هذه القيمة.



الشكل (6-6) مبدأ تغير المردود الكلي لنظام مزرعة شمسية، دارة عمل كهر حراري

6-1-2 حقل المجمعات

تُعطى الاستطاعة المفيدة لحقل المجمعات بالعلاقة:

$$\dot{Q}_{NF} = J_{EV} \cdot \eta_{CF} \cdot A_{CF} \quad [W] \quad (6-2)$$

أما الاستطاعة النوعية لواحدة المساحة فتعطى بالعلاقة:

$$\dot{q}_{NF} = J_{EV} \cdot \eta_{CF} \quad [W/m^2] \quad (6-3)$$

لكن مردود الحقل η_{CF} يكون أصغر من مردود المجمعات المنفردة η_{CC} نظراً للفواقد في دارة المجمعات.

$$\eta_{CF} = f \cdot \eta_{CC} \quad (6-4)$$

أما قيمة f فتقع في المجال:

$$0.8 \leq f \leq 0.95$$

نعلم أنّ مردود المجمعات η_{CC} يُحسب بالعلاقة:

$$\eta_{CC} = \rho \cdot \alpha - \frac{U_A}{J_{EM} \cdot C} (T_A - T_a) - \frac{\varepsilon_1 \sigma}{J_{EM} \cdot C} (T_A^4 - T_a^4) \quad (6-5)$$

تنتقل الاستطاعة المفيدة لمجمع مركزي عبر الجدار الداخلي للسطح الماص إلى السائل وتعطى بالعلاقة:

$$\dot{Q}_{NC} = \alpha_i \cdot \Delta T_m \cdot A_i \quad [W] \quad (6-6)$$

تُعطى هذه الاستطاعة نفسها للسائل وبالتالي يكون:

$$\dot{Q}_{NC} = C_1 \cdot \dot{m} \cdot (T_1 - T_2) \quad [W] \quad (6-7)$$

في العلاقتين السابقتين:

A_i : السطح الداخلي للاقط من جهة السائل $[m^2]$.

ΔT_m : فرق درجات الحرارة بين السطح الماص والسائل $[K]$.

α_i : معامل الانتقال الحراري السطحي بين السائل والسطح الداخلي للاقط $[W/m^2 \cdot K]$.

$\dot{Q}_{NC}$: الاستطاعة المفيدة للمجمع $[W]$.

$\dot{m}$: التدفق الكلي $[kg/s]$.

C_1 : الحرارة النوعية للسائل $[J/kg \cdot K]$.

أما استطاعة حقل المجمعات فتكون:

$$\dot{Q}_{NF} = \dot{Q}_{NC} \cdot n_c \cdot f \quad [W] \quad (6-8)$$

f : معامل الفقد في دارة المجمعات.

η_c : عدد المجمعات في الحقل.

يمكن تقييم كفاءة نظام شمسي ما من خلال معامل الاستفادة والذي يمثل النسبة بين الطاقة المستفادة والطاقة الواصلة إلى المجمعات خلال فترة معينة (يوم، شهر، سنة) فمثلاً خلال يوم يعطى بالعلاقة:

$$v_d = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}_{NF} dt}{A_{cf} \int_{t_1}^{t_2} J_{EV} dt} \quad (9-6)$$

t_1, t_2 : لحظة الغروب والشروق على التوالي.

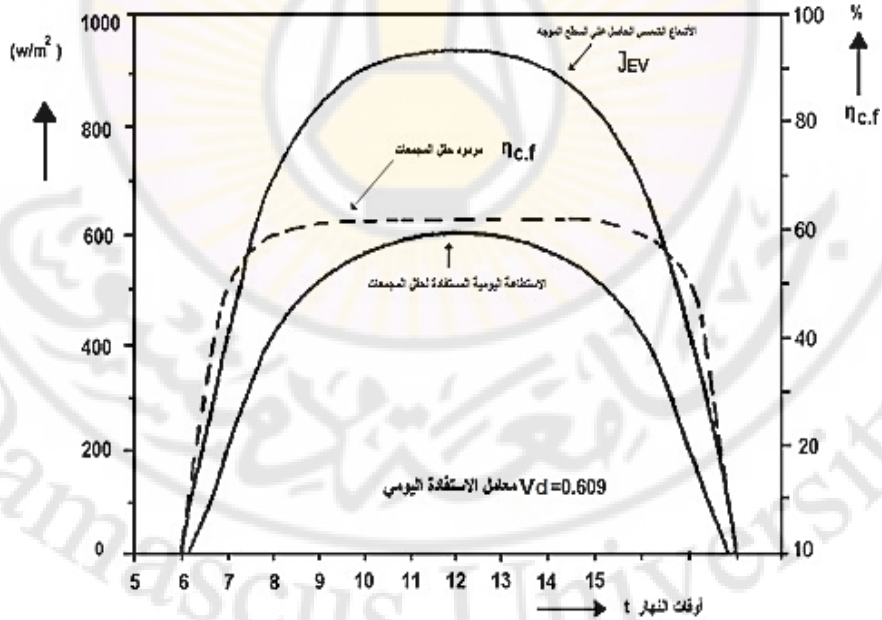
معطيات المجمع:

$$\rho = 0.85, \quad c = 50, \quad T_a = 25 [^\circ\text{C}], \quad f = 0.89$$

$$\alpha = 0.95, \quad T_A = 265 [^\circ\text{C}], \quad \varepsilon_1 = 0.15$$

$$U_A = 8 [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$$

في الشكل (6-7) تمثل النسبة بين المساحة التي يحصرها منحنى الاستطاعة النوعية المفيدة لحقل المجمعات والمساحة التي يحصرها منحنى الإشعاع الشمسي J_{EV} مع محور الوقت معامل الاستفادة اليومي ويبلغ في حالتنا $v_d = 0.609$.



الشكل (6-7) الإشعاع والاستطاعة المفيدة والمردود ومعامل الاستفادة اليومي لحقل مجمعات على شكل مجاري قطعية

6-1-3 الخزان الحراري

الخزان الحراري في المحطات الكهحرارية الشمسية وظيفتان:

- التغلب على التذبذبات القصيرة للإشعاع الشمسي خلال النهار.
- تأمين الطاقة خلال ساعات الليل.

غالباً ما يُستخدم السائل في دارة المجمعات كوسيط تخزين للطاقة الحرارية حيث يتم تخزين الطاقة الحرارية على حساب رفع درجة حرارة هذا السائل (شريطة عدم حصول تحولات كيميائية) بمقدار:

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6-10)$$

$T_{\max}$: درجة الحرارة العظمى لأعلى الخزان الحراري $[^{\circ}\text{C}]$.

$T_{\min}$: درجة الحرارة الصغرى لأسفل الخزان الحراري $[^{\circ}\text{C}]$.

حيث يتوضع السائل على طبقات حارة في الأعلى وأقل حرارة في الأسفل ويتم تحقيق تنضيد حراري جيد وعدم خلط الطبقات من خلال تدفق ملائم داخل الخزان وسحب ملائم أيضاً وكذلك أبعاد مناسبة للخزان. هذا الفرق في درجات الحرارة عند إهمال الفواقد في الخزان الحراري والدارة يساوي إلى الفرق في درجات حرارة سائل التسخين للمبخر ويساوي الفرق بين درجات حرارة السائل الخارج والداخل إلى المجمعات.

يمكن حساب فواقد الخزان الحراري تقريباً بالعلاقة:

$$\dot{Q}_{vs} = \frac{\lambda_I}{\delta_I} \cdot A_{sp} \cdot (T_{sp} - T_a) \quad [W] \quad (6-11)$$

λ_I : معامل التوصيل الحراري للعازل $[W/m \cdot K]$.

δ_I : سماكة الطبقة الحدية $[m]$.

A_{sp} : مساحة سطح الخزان الحراري $[m^2]$.

T_{sp} : درجة حرارة سطح الخزان $[^{\circ}\text{C}]$.

T_a : درجة حرارة الوسط المحيط $[^{\circ}\text{C}]$.

ويتم عزل الخزان الحراري بحيث لا يكون الهبوط في درجة الحرارة خلال الليل يتجاوز 1 درجة مئوية.

يُحسب حجم الخزان الحراري اللازم من العلاقة:

$$V_{sp} = \frac{Q_{NSd} + Q_{vs}}{C_{sp} \cdot \rho_{sp} \cdot \Delta T_{sp}} \quad (6-12)$$

V_{sp} : حجم الخزان اللازم $[m^3]$.

Q_{NSd} : السعة الحرارية للخزان $[J]$.

Q_{vs} : الطاقة اليومية المفقودة من الخزان الحراري [J].

C_{sp} : الحرارة النوعية لسائل التخزين الحراري [J/kg · K].

ρ_{sp} : كثافة وسيط التخزين (السائل الحراري) [kg/m³].

ΔT_{sp} : فرق درجات الحرارة [K].

حسب العلاقة (10 – 6) يؤمن الخزان توليد الطاقة الكهربائية باستطاعة ثابتة خلال فترة العمل التصميمية، وفي حالة الخزان الشكل (6-8) من حوالي الساعة الثامنة صباحاً وحتى الساعة السابعة مساءً أي بعد غروب الشمس بحوالي ساعة.

تبلغ الطاقة المخزنة في الخزان الحراري في حالة الذروة وفق مخطط عمل نظام المزرعة الشمسية مع الخزان الحراري لمحطة كهروشمسية حرارية باستطاعة 100[kW] حسب الشكل المذكور حوالي 1800[kW.h] وعند فرق أعظمي في درجة حرارة الخزان الحراري $\Delta T_{sp} = 100[K]$ وكثافة الزيت $\rho_{sp} = 830[kg/m^3]$ والحرارة النوعية للسائل الحراري $C_{sp} = 2.3[kJ/kg.K]$ ويكون حجم الخزان حوالي $V_{sp} = 35[m^3]$. يُشكل هذا الحجم مشكلة في المحطات الكبيرة نظراً لكمية الزيت الكبيرة المطلوبة ولذلك يتم اللجوء إلى حلول مساعدة بإضافة أجسام صلبة ذات ساعات حرارية كبيرة نسبياً إلى داخل الخزان. في بعض المحطات يُستغنى عن الخزان ويُستخدم مصدر طاقة إضافي لتأمين عمل مستقر للمحطة الكهروشمسية الحرارية وتكون المحطة في هذه الحالة محطة هجينة.

تُحسب نسبة التخزين (الحالة التخزينية) للخزان الحراري من العلاقة التالية:

$$L = \frac{Q_{NS}}{Q_{NSd}} 100\% \quad (6 - 13)$$

Q_{NS} : المحتوى الحراري الحالي للخزان.

يمكن حساب Q_{NS} من العلاقة:

$$Q_{NS} = \int_{t_1}^t \dot{Q}_{NF} \cdot dt - Q_{ve}(t - t_0) \quad [J] \quad (6 - 14)$$

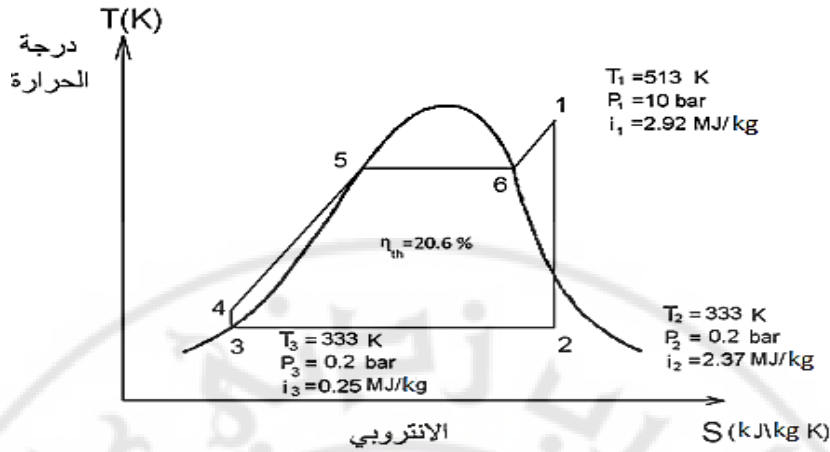
t_1 : لحظة بدء حقل المجمعات (لحظة الشروق) [s].

t : اللحظة المدروسة [s].

t_0 : لحظة بدء عمل المبخر [s].

أو من العلاقة:

$$Q_{NS} = \int_{t_1}^t \dot{Q}_{NS} dt \quad [J] \quad (6 - 15)$$



الشكل (6-9) المخطط (T-S) (الدائرة الترموديناميكية)

2-1 تمدد في العنفة.

3-2 تكاثف (انتزاع طاقة من المكثف).

4-3 رفع الضغط بواسطة مضخة التغذية.

5-4 تسخين مسبق.

6-5 تبخر.

1-6 تحميم.

تُحسب الطاقة المقدمة للمبخر $\dot{Q}_{ev}$ من العلاقة:

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{m} \cdot (i_1 - i_4) \quad (6-16)$$

$\dot{m}$: التدفق الكلي لوسيط العمل (الماء). [kg/s]

$(i_1 - i_4)$: فرق الإنتالبي للماء الداخل والخارج من المبخر. [kJ/kg]

أما المردود الحراري فيحسب من:

$$\eta_{th} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_4} \quad (6-17)$$

أما الاستطاعة الحرارية المقدمة للعنفة فتحسب من:

$$p_{th} = \dot{m}(i_1 - i_4) \cdot \eta_{th} \quad [kW] \quad (6-18)$$

وتتعلق الاستطاعة الكهربائية المنتجة بالعوامل التالية:

η_m : الفواقد الميكانيكية والتي يعبر عنها بالمردود الميكانيكي.

η_{th} : المردود الترموديناميكي للدائرة.

η_g : مردود المولد الكهربائي.

η_s : الاستهلاك الذاتي لعناصر النظام (مضخات، تحكم،).

وعندها تكون الاستطاعة الكهربائية المنتجة:

$$P_{el} = \dot{m} \cdot (i_1 - i_4) \cdot \eta_{th} \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_s \quad [kW] \quad (6-19)$$

أو

$$P_{el} = P_{th} \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_s \quad [kW] \quad (6-20)$$

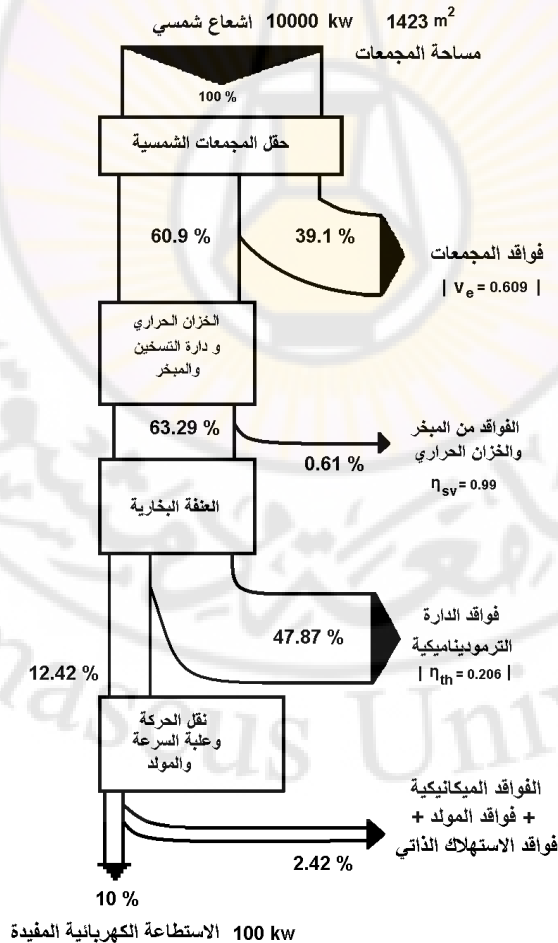
5-1-6 مخطط انسياب الطاقة لمحطة توليد كهترشمسية حرارية

يبين الشكل (6-10) مخطط انسياب الطاقة لمحطة توليد كهترشمسية حرارية لمزرعة شمسية ليوم محدد تبلغ فيه كمية الإشعاع الشمسي $8.46 [kW \cdot h/m^2 \cdot day]$ حسب

المثال المدروس سابقاً لنظام مزرعة شمسية باستطاعة كهربائية $P_{el} = 100 [kW]$

أما المراتيد الواردة فتُمثل المراتيد الوسطية اليومية.

يبلغ المردود اليومي الكلي للمزرعة والمحطة معاً 10% وهو مردود مقبول وشائع لمزرعة شمسية صغيرة بينما يصل لأنظمة حديثة وكبيرة من فئة $30 [MW]$ إلى حوالي 15%.



الشكل (6-10) مخطط انسياب الطاقة لمحطة توليد كهترشمسية حرارية

6-1-6 التحكم بعمل نظام المزرعة الشمسية الكهحرارية

الغاية من التحكم بعمل نظام المزرعة: الحصول على استطاعة كهربائية ثابتة أو حسب حاجة المستهلك دون التأثير بشدة الإشعاع الشمسي اللحظية، أو بمعنى آخر تأمين استقرار في عمل المحطة عند الحمل الكامل أو الجزئي.

يبين الشكل (6-11) نظام تحكم لمزرعة شمسية كهحرارية. يتم الإبقاء على درجة حرارة السائل الخارج من المجمعات T_0 ثابتة بواسطة المنظم R_1 ، عن طريق التحكم بتدفق السائل عبر المجمعات وذلك بغض النظر عن التذبذبات في شدة الإشعاع الشمسي. لإيضاح ذلك ننطلق من علاقة T_0 التي يمكن صياغتها على الشكل التالي:

$$T_0 = \frac{J_{EV} A_{CF} \eta_{CF}}{C_C m} + T_e \quad [^{\circ}C] \quad (6-21)$$

J_{EV} : شدة الإشعاع الشمسي على السطح العمودي على أشعة الشمس $[W/m^2]$.

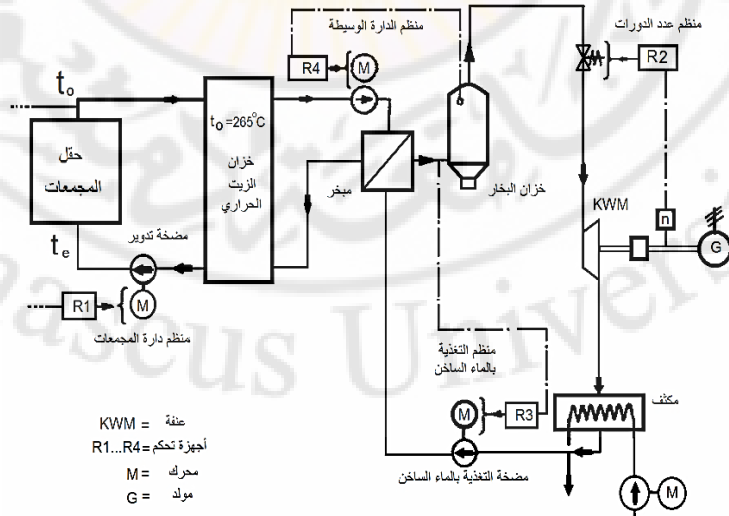
A_{CF} : مساحة حقل المجمعات $[m^2]$.

η_{CF} : مردود حقل المجمعات.

C_C : الحرارة النوعية للزيت الحار $[J/kg \cdot K]$.

$\dot{m}$: تدفق السائل $[kg/s]$.

T_e : حرارة السائل الداخل إلى المجمعات $[^{\circ}C]$.



الشكل (6-11) نظام التحكم بمزرعة شمسية

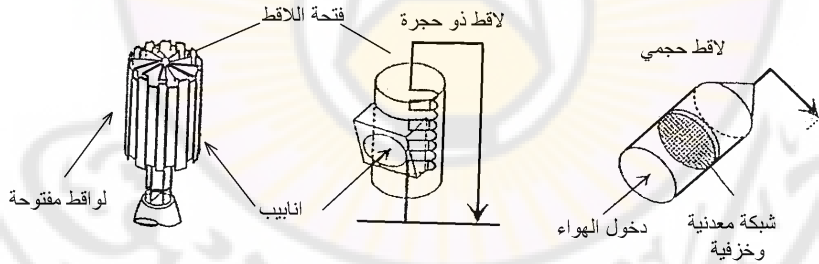
في نظام المزرعة الشمسي تكون T_e ، η_{CF} ، A_{CF} ، C_C ثابتة وللحفاظ على T_0 ثابتة عند تغيير J_{EV} يتم التحكم بتدفق السائل $\dot{m}$. عند انخفاض أو ازدياد الإشعاع الشمسي يزداد أو ينخفض تدفق الزيت عبر المجمعات بحيث تبقى درجة حرارة السائل الخارج من المجمعات ثابتة. أما التحكم بالاستطاعة الكهربائية المنتجة فيتم بواسطة التحكم بعدد دورات العنفة وهذا يحققه المنظم R_2 الذي يتحكم بتدفق البخار مما يؤدي إلى ازدياد أو نقصان عدد دورات العنفة حسب الحاجة، وفي حال وجود فائض في كمية البخار المنتجة في المبخر يتم تخزينها في خزان البخار، عند ازدياد أو نقصان الضغط في خزان البخار يقوم المنظم R_4 بتمرير كمية أقل أو أكبر من زيت التسخين من الخزان الحراري إلى المبخر لإنتاج كمية أقل أو أكبر من البخار. أما المنظم R_3 فيقوم بتغذية المبخر (مولد البخار) بالماء حسب الحاجة.

6-2 الأنظمة البرجية الكهرشمسية

6-2-1 البرج واللاقط وحقل المرايا

يبين الشكل (6-12) أنواع اللواقط المستخدمة في الأنظمة البرجية وهي ثلاث أنواع:

لواقط مفتوحة - لواقط ذات الحجرة - اللواقط الحجمية



الشكل (6-12) أنواع اللواقط المستخدمة في الأنظمة البرجية

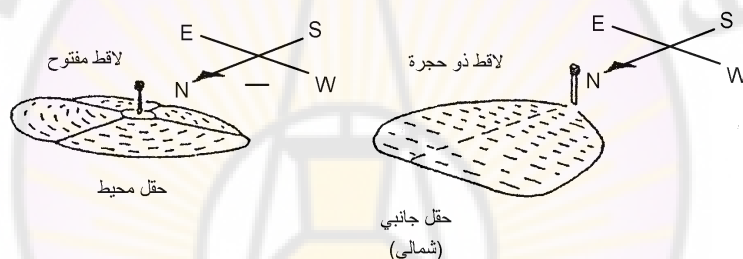
تتميز اللواقط المفتوحة بكلفتها المنخفضة نسبياً إلا أنها تعتبر غير محمية من ناحية الضياعات الحرارية. بواسطة هكذا لواقط يمكن الحصول على مردود جيد فقط عند تراكيز عالية للأشعة الشمسية وبالتالي حمل نوعي كبير لللاقط. يتألف سطح اللاقط من مجموعة متلاصقة من الأنابيب كمبادلات حرارية مغطاة بطبقة ماصة مناسبة أما اللواقط ذات الحجرة فهي مؤلفة من حجرة كبيرة نسبياً معزولة جيداً بنافذة أو فتحة مناسبة لدخول الأشعة الشمسية المركزة وعبر هذه الفتحة تحصل فواقد بالإشعاع.

تتوضع أنابيب المبادل الحراري على الجدران الداخلية ونظراً لكبر المساحة وقلة الفواقد تُحقق هذه اللواقط مردوداً جيداً أعلى من مردود اللواقط المفتوحة.

اللواقط الحجمية هي لواقط شبه مغلقة ويكون سطح التبادل الحراري عبارة عن شبكة معدنية أو خزفية تمتص الإشعاع المركز ويتم تبريدها بتيار هوائي قسري.

يتم بناء الأبراج من المعدن أو من البيتون المسلح وتكون الأبراج المعدنية أرخص في حال اللواقط الخفيفة وارتفاعات أقل من $100[m]$ أما الأبراج البيتونية المسلحة فتكون أكثر اقتصادية في حال اللواقط الثقيلة وارتفاعات تتجاوز $100[m]$ وحتى $250[m]$ انظر الشكل (4-6).

تتوضع المرايا الموجهة (Heliostats) على شكل حقول من المرايا حول برج فنميز حالتين: حقول محيطة وحقول جانبية.



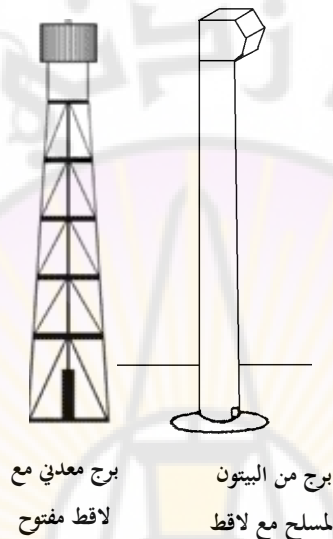
الشكل (6-13) مبدأ توزيع حقل المرايا حول البرج في الأنظمة البرجية الكهرشمسية في نصف الكرة الشمالي

تُستخدم الحقول المحيطة فقط في حالة اللواقط المفتوحة وعند خطوط عرض دون 40° شمالاً في المناطق الشمالية فتكون الفائدة من المرايا المتوضعة جنوب البرج قليلة جداً. لكي تؤدي المرايا وظيفتها في عكس الأشعة الواردة إليها إلى اللاقط في أعلى البرج يتم توجيهها بشكل مائل أو منحرف عن الأشعة الشمسية بحيث تعكس الأشعة الواردة إلى اللاقط.

إنّ هذا الوضع المنحرف عن الإشعاع الشمسي للمرايا يتسبب في النقاط وعكس كمية أقل من الإشعاع الشمسي حيث تتعلق شدة الإشعاع الشمسي الواردة على سطح المرآة بتجيب زاوية الورود أي الزاوية بين الناظم على سطح المرآة والإشعاع الشمسي الوارد.

في حالة اللواقط ذات الحجرة تتوضع المرايا في حقل واحد يقع شمال البرج في نصف الكرة الشمالية وجنوب البرج في جنوب الكرة الجنوبي. وبهذه الطريقة يتم تخفيض الفواقد الناتجة عن الزوايا إلى حد كبير.

إنَّ التوضع البعيد عن البرج يتطلب دقة عالية جداً في توجيه المرايا لأنَّ أي انحراف زاوي مهما صغر يؤدي إلى انحراف لسقوط الأشعة المنعكسة يتعلق بهذه المسافة. يبين الجدول (1-6) المساحات اللازمة لتوليد استطاعة كهربائية معينة.



الشكل (14-6) أنواع الأبراج للمحطات البرجية الكهرشمسية

الجدول (1-6) المساحات اللازمة لتوليد استطاعة كهربائية معينة

مساحة المرايا [m ²]	بعد المرآة الأخيرة عن البرج [m]	مساحة الحقل [m ²]	الاستطاعة الكهربائية [MW]
6.10 ³	200	24.10 ³	1
120.10 ³	500	500.10 ³	20
880.10 ³	1300	3300.10 ³	100

2-2-6 أسس تصميم الحقول

يبين الشكل (15-6) مقطعاً باتجاه شمال - جنوب الساعة الثانية عشر (الظهر الشمسي) في حقل نظام برج كهرشمسي. يكون الناطم على سطح المرآة منصفاً للزاوية بين

الإشعاع الوارد والإشعاع المنعكس. لكل مرآة زاوية ميل خاصة بها حسب بعدها عن البرج. يبين الشكل (6-16) علاقات هذه الزوايا.

تُحسب زاوية الورد من العلاقة:

$$90 - n = h - \psi \quad (6-22)$$

$$90 - n = \arctg((Z_T - Z_S/2)/x) + \psi \quad (6-23)$$



الشكل (6-15) مقطع في حقل برج لاقط ومرايا عاكسة باتجاه شمال - جنوب الساعة 12 في نصف الكرة الشمالي

بجمع العلاقتين (6-22) و (6-23) طرفاً لطرف ثم الإصلاح ينتج لدينا قيمة زاوية الميل اللازمة للمرايا n :

$$n = \frac{180 - h - \arctg\left(\frac{Z_T - Z_S/2}{x}\right)}{2} \quad [^\circ] \quad (6-23)$$

حيث:

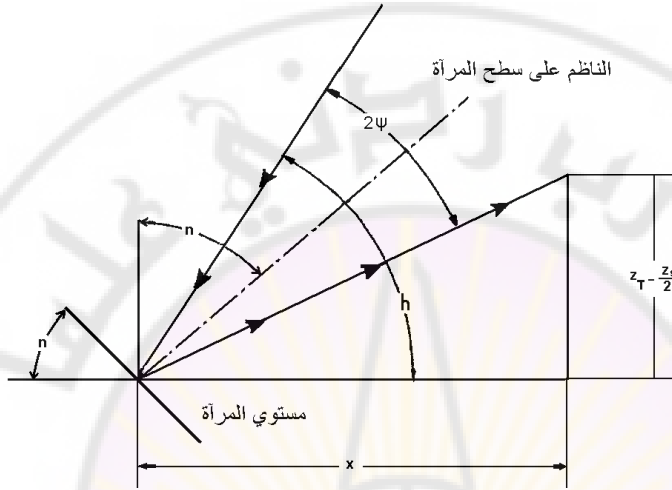
Z_T : ارتفاع البرج [m].

$Z_S/2$: ارتفاع مركز المرآة [m].

x : بعد المرآة عن البرج [m].

عند اقتراب الظهيرة ومع ارتفاع الشمس (الارتفاع h) تصغر زاوية الميل n . وتكبر زاوية الميل n كلما ازداد x أو كلما بعدت المرآة عن البرج، بينما تصغر زاوية الميل مع زيادة ارتفاع البرج Z_T وبهذا يكون لكل مرآة زاوية ميل خاصة بها.

نظراً للعوامل الكثيرة التي تحدد ميل المرآة اللازم حيث يتأثر بالإضافة إلى العوامل السابقة بالساعة الشمسية والتوضع الجغرافي والتاريخ السنوي فإن تصميم الحقل يحتاج بشكل دقيق إلى برامج حاسوبية دقيقة ومناسبة.



الشكل (6-16) الزوايا في حقل المرايا المبين في الشكل (6-15)

3-2-6 الفواقد الحرارية في حقل المرايا

تحدث في حقل المرايا فواقد متنوعة تؤثر إلى حد كبير على المردود الكلي للنظام البرجي الكهرشمسي وتنشأ هذه الفواقد عن الحجب أو التظليل أو الفواقد الجيبية أو عيوب المرايا أو فواقد الانعكاس وكذلك خطأ التوجيه وتأثير الشمس والرياح على البرج والمرايا من حيث الانحراف.

• فواقد الحجب

المقصود بالحجب إمكانية أن تحجب المرايا في الصفوف المتقدمة الأشعة المنعكسة إلى اللواقط من المرايا في الصفوف التي تليها.

يتم تقادي الحجب بتحقيق مسافة كافية ΔX بين صفين أو بين مرآتين متتاليتين. يتم التحقق من ذلك بأن يستطيع المماس المشترك على دائرتي الدوران لمرآتين متتاليتين i و $i + 1$ باتجاه الإشعاع المنعكس التقاطع مع سطح اللاقط.

وفق الشكل (6-15) يمكن كتابة العلاقة التالية للحالة واللحظة المبينة في المخطط.

$$\frac{\Delta X}{Z_s} \approx \frac{X}{Z_T} \quad (6-25)$$

ومنه ينتج:

$$\Delta X \geq X \frac{Z_s}{Z_T} \quad (6 - 26)$$

حيث:

Z_T : ارتفاع البرج [m].

Z_s : ارتفاع مركز المرآة [m].

X : بعد المرآة عن البرج [m].

من العلاقة السابقة يتبين أنّ المسافة بين مرآتين متتاليتين تكبر كلما بعدت المرايا عن البرج وكلما ازدادت النسبة Z_s/Z_T لكن ΔX يجب أيضاً ألا تكون أكبر مما يلزم لأنّ المساحة المشغولة تصبح أكبر بكثير والتوجيه يصبح أكثر كلفة وأقل دقة.

• فواقد التظليل

يقصد بالتظليل وقوع إحدى المرايا في ظل مرآة مجاورة في لحظة ما بسبب تغير وضع الشمس ودوران المرايا. يحدث التظليل عادة عندما تكون الشمس قريبة من الأفق أو ارتفاعها قليل بالإضافة إلى أنّ البرج يُسبب تظليلاً محدوداً لقسم من الحقل.

• الفواقد الجيبية

إنّ الأشعة الشمسية تُشكّل دائماً زاوية ورود مع الناظم على سطح المرآة ولا يمكن أن تكون هذه الزاوية صفراً لأنّ ذلك يعني أنّ الإشعاع الوارد والإشعاع المنعكس على استقامة واحدة وبالتالي يجب أن يقع اللاقط على هذا الخط وعندها سيحجب الأشعة الشمسية عن المرآة. بسبب ميل الأشعة عن سطح المرآة يكون السطح الفعال للمرآة أصغر من الفعلي. من الشكل (6-17) يمكن إيجاد العلاقة بين المساحة الفعلية والمساحة الفعالة للمرآة.

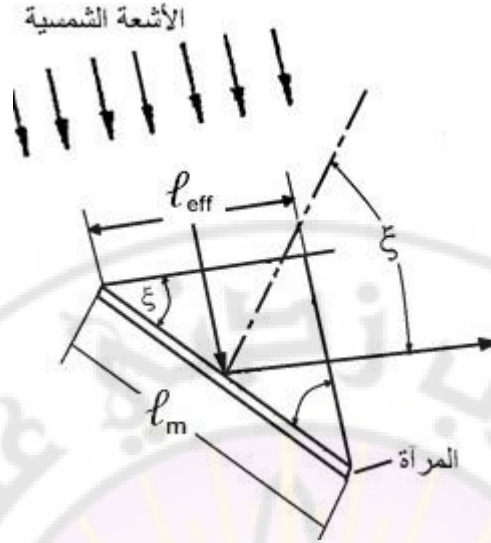
تُعطى زاوية ورود الأشعة الشمسية بالشكل:

$$\frac{A_{eff}}{A_m} = \frac{\ell_{eff}}{\ell_m} = \cos \xi \quad (6 - 27)$$

A_{eff} : المساحة الفعالة للمرآة.

A_m : المساحة الفعلية للمرآة.

ξ : زاوية الورد للأشعة الشمسية.



الشكل (6-17) الفواقد الجيبية للمرايا

• فواقد عيوب سطح المرآة

إن انحراف شكل سطح المرآة عن الشكل المستوي الهندسي يؤدي إلى تبديد (نثر) الأشعة الشمسية وبالتالي حصول فواقد لا تصل إلى اللاقط.

• فواقد أخطاء التوجيه

يبلغ الانحراف الأعظمي المسموح به في توجيه المرايا للمحطات البرجية الكهرشمسية باستطاعات تتراوح بين [20 MW] و 1 حوالي 3.5 mrad (انحراف زاوي) أو بمعنى آخر ما يقابل 12 دقيقة من محيط الدائرة، والتي نصف قطرها بعد المرآة عن اللاقط. فإذا كان البعد 100[m]، يجب ألا يتجاوز انحراف الأشعة المنعكسة عن المكان الحسابي لسقوطها مسافة [350 mm] كحد أقصى وهذا يتطلب كلفة تقنية عالية.

• فواقد بتأثير الرياح والتسخين

تحت تأثير قوة الرياح تحصل اهتزازات للمرايا والبرج تؤثر على انعكاس الأشعة وتؤدي إلى انحرافها عن موقعها المرغوب على اللاقط. انزياح للأشعة مشابه قد يسببه التسخين الشمسي لهيكل البرج أو قواعد المرايا مما يتسبب في فواقد أيضاً.

• فواقد الانعكاس

يؤثر على معامل الانعكاس للمرآة ثلاث عوامل رئيسية هي نوع وجودة الزجاج - نوع الطبقة الخلفية للمرآة - زاوية الانعكاس حيث يتناقص معامل الانعكاس مع ازدياد زاوية الورود وبالتالي زاوية الانعكاس.

6-2-4 مردود حقل المجمعات والاستطاعة المفيدة الواصلة إلى اللاقط

ينتج المردود الإجمالي لحقل المجمعات كقيمة مكتملة وسطية لمردود المرايا الذي ينتج بدوره من جداء المراديد المختلفة لكل مرآة. يبين الجدول (6-2) قيم المراديد المختلفة للمرآة كعنصر من عناصر الحقل.

ينتج من ذلك المردود الإجمالي للمرآة i:

$$\eta = \eta_{B,A} \cdot \eta_C \cdot \eta_F \cdot \eta_{W,T} \cdot \eta_R \cdot \eta_{OI} \quad (6-28)$$

$$\eta_{sfi} = (0.45 \div 0.85)$$

أما المردود الكلي للحقل فنحصل عليه من العلاقة:

$$\eta_{sf} = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_{sfi} A_{cfi}}{A_{cf}} \quad (6-29)$$

n: عدد المرايا.

A_{cfi} : مساحة المرآة رقم i $[m^2]$.

A_{cf} : مساحة الحقل الكلية $[m^2]$.

$$\eta_{sf} = (0.55 \div 0.80)$$

الاستطاعة الواصلة إلى اللاقط:

$$\dot{Q}_{N.H} = A_{sf} \cdot \eta_{sf} \cdot J_{ev} \quad (6-30)$$

J_{ev} : شدة الإشعاع الشمسي على السطح الموجّه عمودياً على الأشعة الشمسية.

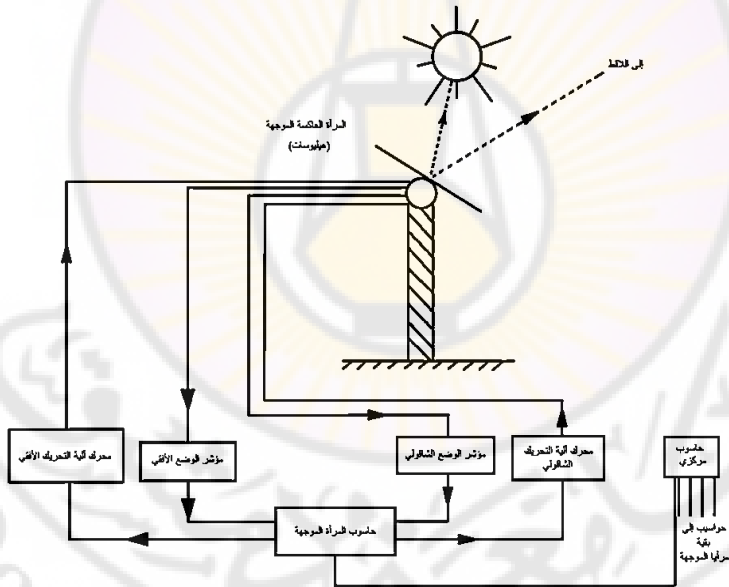
الجدول (6-2) قيم المراديد المختلفة للمرآة

رمز المردود	قيمة المردود	نوع الفواقد
$\eta_{B,A}$	0.98÷0.99	الحجب والتظليل
η_C	0.70÷0.95	الفواقد الجيبية
η_F	0.90÷0.99	فواقد التوجيه وعيوب المرآة
$\eta_{W,T}$	0.93÷0.97	تأثير الرياح وحركة البرج
$P = \eta_R$	0.8÷0.95	فواقد الانعكاس
η_{OI}	0.98 ÷ 1.00	تقادم المرآة

6-2-5 توجيه المرايا

يبين الشكل (6-18) مخططاً مبسطاً لتوجيه حقل المرايا لنظام برجى كهر شمسي. يمكن تلخيص وظيفة التوجيه في النقاط التالية:

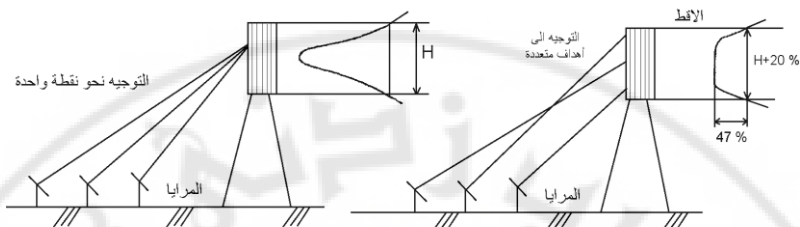
- التوجيه بما يعادل الانحراف الناتج عن حركة الأرض حول محورها وحول الشمس وهذا يتطلب دقة عالية يؤمنها حاسوب المرآة الموجهة.
 - تحريك مرآة ما وتدويرها لحاجات الصيانة ويؤمنها الحاسب المركزي.
 - قلب المرايا جميعها في حال الطقس السيء وفي الليل ويتم ذلك بمساعدة الحاسب المركزي.
 - تدوير المرآة في حالة الطوارئ بمساعدة الحاسب المركزي.
- لكل مرآة حاسوب خاص بها يتم برمجة وضع الشمس وتخزينه في ذاكرته بواسطة حساسات خاصة يتم النقاط الوضع الشاقولي والأفقي وعبر مؤشر الوضع تنتقل إشارة مناسبة إلى الحاسب يتم مقارنتها مع الوضع المبرمج وتصدر الأوامر لتعديل الوضع إلى محركات لآلية الوضع الشاقولي والأفقي فنقوم بالتنفيذ وفق الإشارة التي تتلقاها.



الشكل (6-18) مخطط مبسط لدارة توجيه حقل المرايا لنظام برجى كهر شمسي

يتم التوجيه عادة نحو نقطة واحدة أو نحو عدة نقاط من السطح الماص. ويتغير الجهد الحراري على امتداد السطح الماص تبعاً لذلك، حيث يمكن تخفيض الإجهاد الحراري على السطح الماص إلى 50% من القيمة العظمى مما يساهم في عمر أطول للطبقة الماصة. يبين الشكل (6-19) نموذجان لتوجيه المرايا نحو نقطة واحدة ونحو عدة نقاط، في حالة التوجيه إلى عدة نقاط، وبسبب الانزياح المحتمل في سقوط الأشعة نتيجة الأخطاء الواردة

في الفقرة السابقة، يجب أن تكون أبعاد اللاقط (أو فتحة اللاقط) أكبر بحوالي 20% لتلافي فقدان بعض الأشعة المنعكسة.



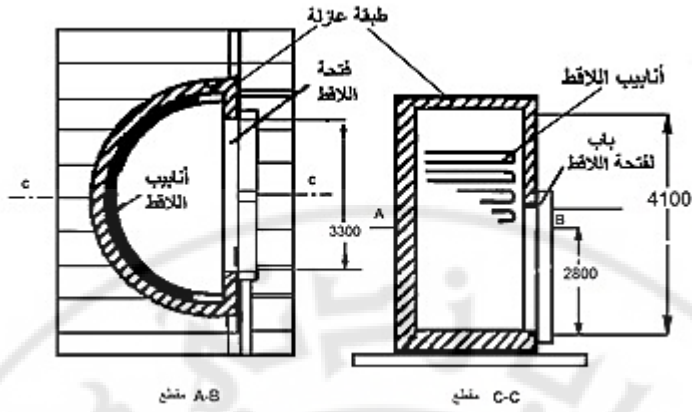
الشكل (6-19) توجيه المرايا نحو هدف أو عدة أهداف

6-2-6 اللاقط ذو الحجرة (بنيته وآلية عمله)

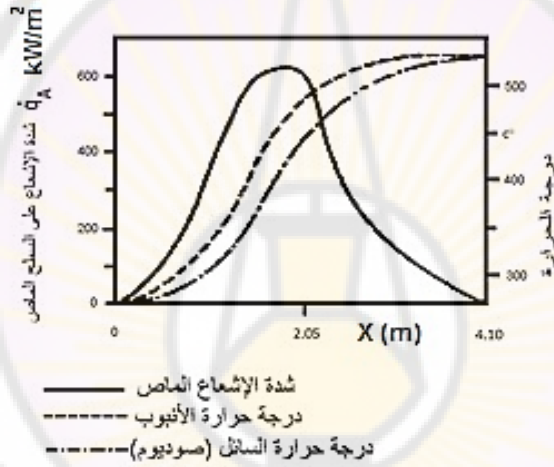
يبين كل من الشكلين (6-20) و (6-21) نموذج للاقط محطة برجية كهروشمسية بدارة سائل من الصوديوم المصهور.

التجويف (حجرة الامتصاص) عبارة عن نصف أسطوانة محاطة بوشيعية من الأنابيب المقوسة وفق جدار الحجرة. تتوضع خلف الأنابيب طبقة تخزين حراري من السيراميك وخلف هذه الطبقة يتوضع العازل الحراري. فتحة اللاقط مزودة بباب يمكن إغلاقه لمنع الفقد الحراري وبالتالي التبريد عند حجب الشمس (مرور الغيوم) أو أثناء الليل تتوزع كثافة الإشعاع على السطح الماص على امتداد ارتفاع اللاقط ومن المنحني في الشكل (6-21) وبسبب اشتراك جميع المرايا العاكسة باستهداف نقطة الوسط فإن كثافة الإشعاع هنا أعظمية وتبلغ حوالي 620 kW/m^2 والسبب في تحمل السطح الماص لهذه الشدة هو القدرة العالية للصوديوم كناقل حراري، وترتفع درجة حرارة الصوديوم دائماً من $270 \div 530^\circ\text{C}$ حيث تكون درجة حرارة الأنابيب أعلى قليلاً من درجة حرارة السائل. في نهاية اللاقط العلوية والسفلية تتساوى درجات حرارة الأنابيب والسائل حيث لا يوجد تبادل حراري وحيث كثافة الإشعاع معدومة.

من المهم عند تصميم اللاقط تحقيق قدرة عالية على امتصاص طاقة إشعاعية بأعلى كثافة ممكنة بالإضافة إلى قدرة اللاقط على تحمل شروط عمل استثنائية كالتسخين الشديد المفاجئ أو التبريد السريع المفاجئ أيضاً.



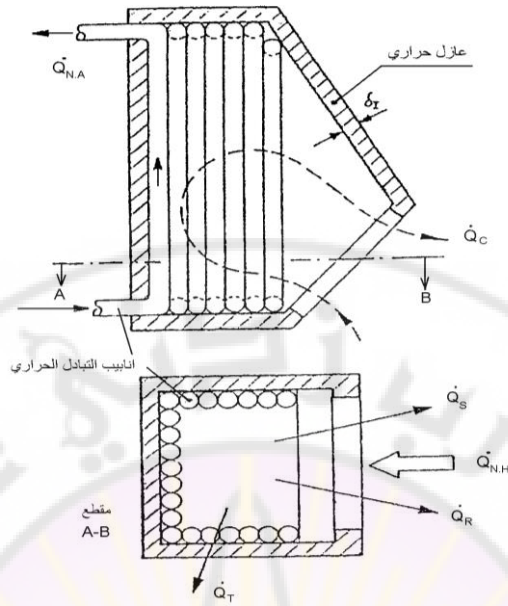
الشكل (6-20) لاقط لمحطة برجية كهترشمسية باستطاعة $500[kW_{el}]$



الشكل (6-21) شدة الإشعاع على السطح الماص وتوزع درجات الحرارة على امتداد ارتفاع اللاقط لمحطة برجية كهترشمسية باستطاعة $500[kW_{el}]$

1-6-2-6 الموازنة الحرارية للاقط

يبين الشكل (6-22) مخطط لمقطعين أفقي وشاقولي في لاقط ذي حجرة مع تيارات التبادل الحراري.



الشكل (6-22) تيارات التبادل الحراري في لاقط ذي حجرة

عند إجراء الموازنة الحرارية لللاقط نحصل على:

$$\dot{Q}_{NA} = \dot{Q}_{NH} - \dot{Q}_C - \dot{Q}_R - \dot{Q}_S - \dot{Q}_T \quad (6-31)$$

$\dot{Q}_{NA}$: الاستطاعة المفيدة لللاقط [W].

$\dot{Q}_{NH}$: الاستطاعة المفيدة المعكوسة من حقل المرايا [W].

$\dot{Q}_C$: فواقد الحمل [W].

$\dot{Q}_R$: فواقد الانعكاس [W].

$\dot{Q}_S$: فواقد الإشعاع [W].

$\dot{Q}_T$: فواقد الانتقال عبر الجدران [W].

أما المردود:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{NA}}{\dot{Q}_{NH}} \quad (6-32)$$

$$\eta = 1 - \frac{\dot{Q}_C}{\dot{Q}_{NH}} - \frac{\dot{Q}_R + \dot{Q}_S}{\dot{Q}_{NH}} - \frac{\dot{Q}_T}{\dot{Q}_{NH}} \quad (6-33)$$

وذلك عند افتراض أن كافة الأشعة المنعكسة من الحقل تسقط في فتحة اللاقط.

2-6-2-6 الفواقد الحرارية لللاقط

✓ فواقد الحمل:

يتسبب ارتفاع الحرارة داخل حجرة اللاقط في نشوء تيارات هوائية عبر فتحة اللاقط كما هو مبين في الشكل (6-22).

وتتسبب هذه التيارات في فواقد حرارية عن طريق الحمل، تُحسب هذه الفواقد من العلاقة:

$$\dot{Q}_C = \alpha_C (T_A - T_a) A_{RA} \quad (6 - 34)$$

α_C : معامل التبادل الحراري السطحي $[W/m^2 \cdot K]$.

T_A : درجة الحرارة داخل حجرة اللاقط $[K]$.

T_a : درجة حرارة الوسط المحيط $[K]$.

A_{RA} : مساحة فتحة اللاقط $[m^2]$.

تتراوح قيم α_C للواقط باستطاعة $38 \div 1$ MW ضمن المجال $7.8 \div 5.9 [W/m^2 \cdot K]$.

✓ فواقد الانتقال الحراري عبر السطوح المحيطة:

نظراً لأن اللاقط يتم عزله بشكل كاف فإنّ الفواقد بالانتقال عبر السطوح المحيطة تكون عادة صغيرة نسبياً ويمكن حسابها بالعلاقة:

$$\dot{Q}_T = U (T_A - T_a) (A_A - A_{RA}) \quad [W] \quad (6 - 35)$$

ويمكن حساب معامل الانتقال الحراري الكلي بالعلاقة:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i \lambda_i} + \frac{1}{\alpha_a}} \quad [W/m^2 \cdot K] \quad (6 - 36)$$

A_A : المساحة الكلية لسطح اللاقط $[m^2]$.

α_i : معامل التبادل الحراري السطحي الداخلي $[W/m^2 \cdot K]$.

α_a : معامل التبادل الحراري السطحي الخارجي $[W/m^2 \cdot K]$.

δ_i : سماكة العازل $[m]$.

λ_i : معامل التوصيل للعازل $[W/m \cdot K]$.

ونظراً لتأثير الانتقال الحراري بشكل رئيسي بسماكة وناقلية العازل λ_i ، δ_i يمكن

إهمال α_a ، α_i بتقريب أولي وتصبح العلاقة على الشكل:

$$\dot{Q}_T = \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_A - T_a) (A_A - A_{RA}) \quad [W] \quad (6 - 37)$$

✓ فواقد الإشعاع والانعكاس:

يتلقى اللاقط من حقل المرايا استطاعة إشعاعية $\dot{Q}_{N,H}$ يمكن حسابها بالعلاقات:

$$\dot{Q}_{N,H} = \dot{q}_{RA} A_{RA} \quad [W] \quad (6 - 38)$$

$$\dot{Q}_{N,H} = \dot{q}_A A_A \quad [W] \quad (6 - 39)$$

$\dot{q}_{RA}$: الاستطاعة الوسطية عبر واحدة سطح فتحة اللاقط $[W/m^2]$.

A_{RA} : مساحة فتحة اللاقط $[m^2]$.

$\dot{q}_A$: الاستطاعة الوسطية على واحدة سطح اللاقط $[W/m^2]$.

A_A : مساحة اللاقط الكلية $[m^2]$.

لتسهيل الحسابات يتم إدخال نسب المساحات التالية:

$$f_1 = \frac{A_A - A_{RA}}{A_A} \quad (6 - 40)$$

$$f_2 = \frac{A_A}{A_{RA}} \quad (6 - 41)$$

إنّ الأشعة الداخلة إلى حجرة اللاقط تنعكس عدة مرات باتجاهات مختلفة وعند كل انعكاس يضيع جزء من الأشعة عبر فتحة اللاقط وتتعلق كمية الأشعة ذات الأمواج القصيرة المنعكسة في كل مرة بمعامل الانعكاس ρ .

ونظراً لتسخين سطح اللاقط فإنّ هذا السطح الساخن يقوم أيضاً بإشعاع طاقة ذات أمواج طويلة تتعلق بمعامل الإشعاع لمادة السطح ε_1 . يسقط هذا الإشعاع أيضاً على السطح الداخلي للاقط وينعكس مرات عديدة، وفي كل مرة يضيع جزء منه عبر فتحة اللاقط.

لانعكاس الأمواج الطويلة هناك معامل انعكاس آخر:

$$\rho_1 = 1 - \varepsilon_1 \quad (6 - 42)$$

إنّ الإشعاع الكلي المفقود عبر فتحة اللاقط إلى الخارج يتألف من مركبات عديدة من الأشعة القصيرة والطويلة التي تضعف بعد كل انعكاس.

عندما تسقط الأشعة الواردة من الحقل لأول مرة على سطح اللاقط بشدة $\dot{q}_A$ ينعكس إشعاع شدته $\rho\dot{q}_A$ وينعكس منه في عملية الانعكاس التالية إشعاع شدته $\rho(\rho\dot{q}_A)f_1$ وعند الانعكاس الثالث تكون شدة الإشعاع المنعكس $(\rho^3\dot{q}_A)f_1^2$ وهكذا.

أما الأشعة ذات الأمواج الطويلة المنبعثة من السطح الساخن للاقط فتحسب شدتها بالعلاقة:

$$\dot{q}_S = \varepsilon_1 \sigma (T_A^4 - T_a^4) \quad (6 - 43)$$

ε_1 : معامل الإشعاع لسطح اللاقط.

σ : ثابت ستيفان بولسمان $[W/m^2 \cdot K^4]$ 5.67×10^{-8} .

T_A : درجة حرارة السطح الداخلي للاقط $[K]$.

T_a : درجة حرارة الوسط المحيط $[K]$.

وتكون الضياعات بالانعكاس والإشعاع:

$$\begin{aligned} & \dot{Q}_R + \dot{Q}_S \\ &= A_{RA} \left(\rho\dot{q}_A + \rho^2\dot{q}_A f_1 + \rho^3\dot{q}_A f_1^2 + \dots + \rho^{n+1}\dot{q}_A f_1^n \right) + A_{RA} (\dot{q}_S + \\ & \quad \rho_1\dot{q}_S f_1 + \rho_1^2\dot{q}_S f_1^2 + \dots + \rho_1^n\dot{q}_S f_1^n) \end{aligned} \quad (6 - 44)$$

$$\dot{Q}_R + \dot{Q}_S = A_{RA}\rho\dot{q}_A \left(1 + \rho f_1 + \rho^2 f_1^2 + \dots + \rho^n f_1^n \right) + A_{RA}\dot{q}_S (1 + \rho_1 f_1 + \rho_1^2 f_1^2 + \dots + \rho_1^n f_1^n) \quad (6-45)$$

ونظراً لأن $\rho f_1 \ll 1$ وكذلك $\rho_1 f_1 \ll 1$ فإن قيم الصفوف داخل الأقواس يمكن تعويضها بالقيمتين $\frac{1}{1-\rho f_1}$ و $\frac{1}{1-\rho_1 f_1}$ على التوالي ويكون:

$$\dot{Q}_R + \dot{Q}_S = A_{RA}\rho\dot{q}_A \left(\frac{1}{1-\rho f_1} \right) + A_{RA}\dot{q}_S \left(\frac{1}{1-\rho_1 f_1} \right) \quad (6-46)$$

بإصلاح العلاقة السابقة تصبح:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_R + \dot{Q}_S &= \frac{A_{RA}\rho\dot{q}_A}{1-\rho\frac{A_A-A_{RA}}{A_A}} + \frac{A_{RA}\varepsilon_1\sigma(T_A^4-T_a^4)}{1-(1-\varepsilon_1)\frac{A_A-A_{RA}}{A_A}} \quad (6-47) \\ &= \frac{A_{RA}A_A\rho\dot{q}_A}{A_A - \rho(A_A - A_{RA})} + \frac{A_{RA}A_A\varepsilon_1\sigma(T_A^4 - T_a^4)}{A_A - (1 - \varepsilon_1)(A_A - A_{RA})} \end{aligned}$$

3-6-2-6 مردود اللاقط

لحساب مردود اللاقط نعوض في العلاقة:

$$\eta = 1 - \frac{\dot{Q}_C}{\dot{Q}_{NH}} - \frac{\dot{Q}_R + \dot{Q}_S}{\dot{Q}_{NH}} - \frac{\dot{Q}_T}{\dot{Q}_{NH}}$$

من العلاقات (34-6) و (37-6) و (38-6) و (39-6) و (40-6) و (41-6) و (47-6):

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - \frac{\alpha_C(T_A - T_a)A_{RA}}{\dot{q}_{RA}A_{RA}} - \frac{A_{RA}A_A\rho\dot{q}_A}{[A_A - \rho(A_A - A_{RA})]\dot{q}_A.A_A} - \\ &\quad \frac{A_{RA}A_A\varepsilon_1\sigma(T_A^4 - T_a^4)}{[A_A - (1 - \varepsilon_1)(A_A - A_{RA})]\dot{q}_{RA}.A_{RA}} - \frac{\lambda_i(T_A - T_a)(A_A - A_{RA})}{\delta_i\dot{q}_{RA}A_{RA}} \quad (6-48) \end{aligned}$$

بإصلاح العلاقة السابقة نحصل على مردود اللاقط ذي الحجرة:

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - \frac{\alpha_C(T_A - T_a)}{\dot{q}_{RA}} - \frac{\rho}{f_2 - \rho(f_2 - 1)} - \\ &\quad - \frac{f_2\varepsilon_1\sigma(T_A^4 - T_a^4)}{[f_2 - (1 - \varepsilon_1)(f_2 - 1)]\dot{q}_{RA}} - \frac{\lambda_i(T_A - T_a)(f_2 - 1)}{\delta_i\dot{q}_{RA}} \quad (6-49) \end{aligned}$$

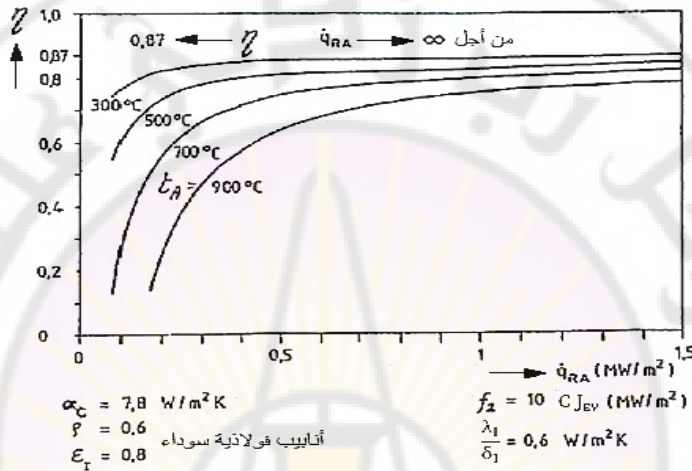
إذا كان اللاقط مفتوحاً يكون $f_2 = \frac{A_A}{A_{RA}} = 1$ ومنه:

$$\begin{aligned} \eta_{OR} &= 1 - \frac{\alpha_C(T_A - T_a)}{\dot{q}_A} - \rho - \frac{\varepsilon_1\sigma(T_A^4 - T_a^4)}{\dot{q}_A} \\ \eta_{OR} &= 1 - \rho - \frac{\alpha_C(T_A - T_a) + \varepsilon_1\sigma(T_A^4 - T_a^4)}{\dot{q}_A} \quad (6-50) \end{aligned}$$

بالعودة إلى العلاقة (6-49) التي تعطي علاقة مردود اللاقط ذو الحجرة، ومع الأخذ بالاعتبار أن:

$$\dot{q}_{RA} = \frac{\eta_{SF} A_{CF} J_{EV}}{A_{RA}} = C \cdot J_{EV} \quad [W/m^2]$$

يمكن الحصول على علاقة مردود اللاقط بكثافة الإشعاع عبر فتحة اللاقط بيانياً شكل (23-6) علماً بأن شكل منحنى تابع المردود لدرجة التركيز يبقى نفسه إذا كانت شدة الإشعاع الشمسي ثابتة.



الشكل (23-6) تأثير درجة حرارة السطح الماص وكثافة الإشعاع على مردود اللاقط

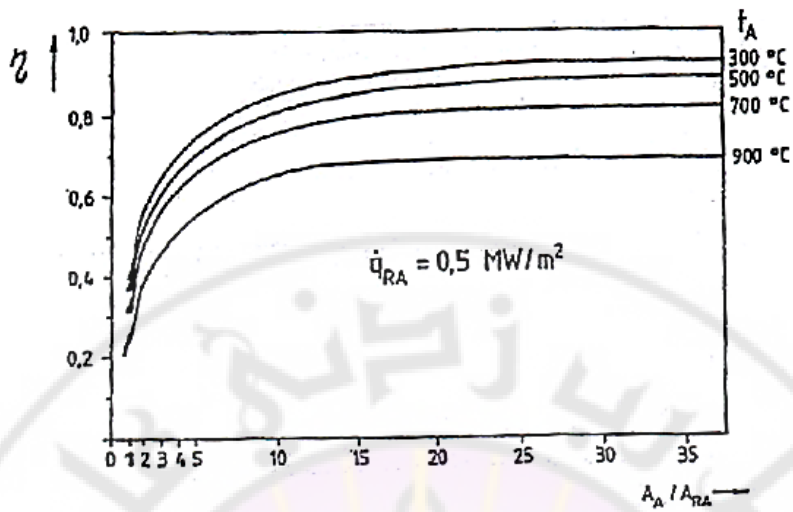
كلما ارتفعت درجة حرارة السطح الماص ازدادت الفواقد ونقص المردود، بينما تقل الفواقد ويزداد المردود مع ازدياد كثافة الإشعاع (أي زيادة التركيز عند قيم معينة لشدة الإشعاع). يبين الشكل (24-6) تأثير مساحة فتحة اللاقط ذو الحجرة ودرجة حرارة السطح الماص على مردود اللاقط من أجل نفس المعطيات في الشكل (23-6).

عندما تكون $\frac{A_A}{A_{RA}} = 1$ فإن اللاقط من النوع المفتوح ويكون عنده المردود أصغري.

يتحسن مردود اللاقط كلما كبرت النسبة $\frac{A_A}{A_{RA}}$ حتى حد معين، فعند نسبة $\frac{A_A}{A_{RA}} > 15$

يقل تأثير ازدياد النسبة على المردود وتتعدم الحاجة إلى تصغير فتحة اللاقط.

لا يعني الشكل (24-6) أن مردود اللاقط المفتوح هو دائماً منخفض بل يمكن الحصول على مردود عالٍ للواقط المفتوحة عند استخدام سطوح ماصة انتقائية وتبريد فعال وزيادة التركيز.



الشكل (24-6) مردود اللاقط نو الحجرة وعلاقته بالنسبة $\frac{A_A}{A_{RA}}$ وذلك من أجل درجات حرارة مختلفة للماص وعند كثافة إشعاع $0.5 [MW/m^2]$

يبين الجدول (3-6) قيم مقاسة لمراديد بعض اللواقط في محطات برجية كهترشمسية عاملة في بعض الدول.

الجدول (3-6) قيم مقاسة لمراديد بعض اللواقط في محطات برجية عاملة في بعض الدول

نوع اللاقط	السائل الناقل للحرارة	مجال المردود [%]	مكان العمل
مغلق	صوديوم	81 ÷ 91	اسبانيا
مفتوح	صوديوم	63 ÷ 76	اسبانيا
مفتوح	بخار ماء	65 ÷ 81	الولايات المتحدة
مغلق	بخار ماء	75 ÷ 91	اسبانيا
مغلق	أملاح مصهورة	78 ÷ 92	فرنسا

مسائل:

مسألة (1):

مزرعة شمسية تعمل خلال فترة الإشعاع الشمسي على خط عرض 30° شمالاً، استطاعتها الكهربائية $P_{el} = 1 [MW]$ عند $\eta_{TC} = 0.25$. تُعطى الاستطاعة المفيدة لحقل المركزات بالعلاقة:

$$\dot{Q}_{NF} = A \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right) \quad [kW]$$

ومردوده $\eta_{CF} = 0.7$. المطلوب:

1. إيجاد مساحة الحقل.
2. الاستطاعة التخزينية $\dot{Q}_{NS}$ والطاقة اليومية المخزنة Q_{NSd} .

الحل:

من التابع $\dot{Q}_{NF} = 0$ نجد لحظة الشروق وبالتالي طول النهار أو:

$$\cos\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right) = 0$$

أي:

$$\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right) = \frac{\pi}{2}$$

بالتالي:

$$Z_R = 6$$

وتكون ساعة الغروب

$$Z_S = 12 + (12 - 6) = 18$$

وطول النهار:

$$S_d = Z_S - Z_R = 12 [h]$$

الطاقة اليومية اللازمة لعمل المبخر:

$$Q_{evd} = \dot{Q}_{ev} \times S_d = \frac{P_{el}}{\eta_{TC}} \times 12 = 4000 \times 12 = 48000 [kW.h]$$

الطاقة اليومية المستفادة من الحقل:

$$Q_{NFd} = Q_{evd} = 48000 = 2 \int_{Z_R}^{12} \dot{Q}_{NF} \cdot dZ$$
$$= 2 \int_6^{12} A \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12} Z\right) \cdot dZ = 2A \frac{12}{\pi}$$

بالتالي:

$$A = 48000 \frac{\pi}{24} = 6283$$

وبالتالي:

$$\dot{Q}_{NF} = 6283 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12} Z\right) \quad [kW]$$

نجد:

$$\dot{q}_{NF} = \eta_{CF} \times J_{EV} = 0.7 \times 0.8 \times 1360 \sin(\alpha)$$

لدينا:

$$\sin h = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \gamma$$

$$\sin \delta = 0 \quad \text{لأن طول النهار } 12 [h] \text{ فهذا يعني يوم اعتدال أي } \delta = 0$$

$$\sin h = \cos 30 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12} Z\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12} Z\right)$$

$$\dot{q}_{NF} = 0.7 \times 0.8 \times 1.360 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12} Z\right)$$
$$= 0.66 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12} Z\right) \quad [kW]$$

وتكون مساحة الحقل:

$$A_{CF} = \frac{\dot{Q}_{NF}}{\dot{q}_{NF}} = \frac{6283 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12} Z\right)}{0.66 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12} Z\right)} = 9520 [m^2]$$

الاستطاعة التخزينية:

$$\dot{Q}_{NS} = \dot{Q}_{NF} - \dot{Q}_{ev} = 6283 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12} Z\right) - 4000 [kW]$$

والطاقة اليومية المخزنة:

$$Q_{NSd} = 2 \int_{Z_1}^{12} \dot{Q}_{NS} \cdot dZ$$

نجد Z_1 من:

$$6283 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12} Z_1\right) = 4000$$

$$\cos\left(\pi - \frac{\pi}{12} Z_1\right) = \frac{6283}{4000} = 0.637$$

$$\pi - \frac{\pi}{12} Z_1 = \frac{50.5 \pi}{180}$$

بالتالي:

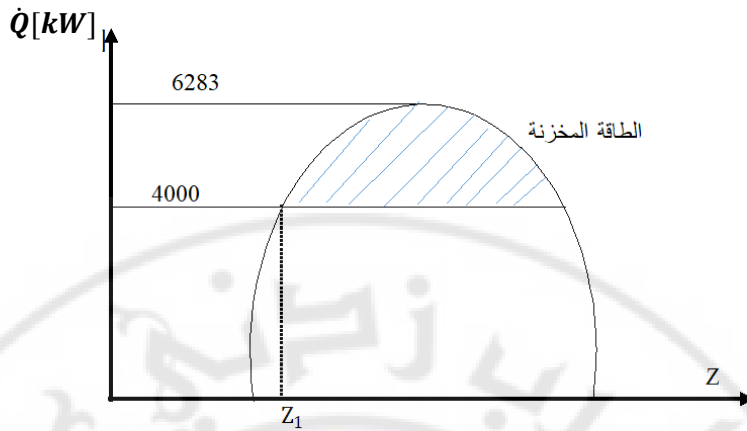
$$\frac{Z_1}{12} = 1 - 0.28 = 0.72$$

$$Z_1 = 8.64$$

$$Q_{NSd} = 2 \int_{8.64}^{12} 6283 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12} \times Z\right) \cdot dZ - 2 \times 4000(12 - 8.64)$$

$$Q_{NSd} = 2 \times 6283 \frac{12}{\pi} \sin\left(\pi - \frac{\pi}{12} \times Z_1\right) - 26880$$

$$Q_{NSd} = 37037 - 26880 = 10157 [kW.h]$$



مسألة (2):

مزرعة شمسية كهحرارية تعمل خلال فترة الإشعاع الشمسي على خط عرض 30° شمالاً
ليوم 21 حزيران، استطاعتها الكهربائية $P_{el} = 500 [kW]$ بمردود لدارة العمل
 $\eta_{TC} = 0.25$. يُعطى مردود المركّزات المستخدمة بالعلاقة:

$$\eta_{CF} = 0.72 - \frac{50}{J_{EV}}$$

حيث: J_{EV} بالواط.

المطلوب:

1. إيجاد مساحة الحقل اللازم.
2. حجم الخزان الحراري من أجل: $\Delta T_{SP} = 200 [K]$, $\rho_{SP} =$
 $C_{SP} = 2.4 [kJ/kg.K]$, $800 [kg/m^3]$.

الحل:

1. لإيجاد مساحة الحقل:

$$A_{CF} = \frac{Q_{NFd}}{q_{NFd}}$$

يمكن إيجاد Q_{NFd} من استطاعة المبخر اللازم والذي يستهلك كامل الطاقة المنتجة من الحقل.

$$Q_{NFd} = Q_{evd} = \dot{Q}_{ev} \cdot \tau$$

نجد:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{ev} &= \frac{P_{el}}{\eta_{TC}} \\ &= \frac{500}{0.25} = 2000 [kW] \end{aligned}$$

أما فترة العمل τ فهي مساوية لطول النهار أي:

$$\begin{aligned} \tau &= S_d = \frac{2\gamma_{h=0}}{15} \\ \gamma_{h=0} &= \arccos(-\tan \delta \tan \varphi) = 104.5^\circ \end{aligned}$$

بالتالي:

$$\tau = \frac{209}{15} = 13.93[h] \approx 14 [h]$$

$$Z_R = 12 - \frac{S_d}{2} = 12 - 7 = 5$$

$$Z_S = 12 + 7 = 19$$

$$Q_{NFd} = 2000 \times 14 = 28000[kW.h]$$

أما q_{NFd} فنجد من التكامل:

$$\begin{aligned} q_{NFd} &= 2 \int_{Z_R}^{12} \dot{q}_{NF} \cdot dZ \\ \dot{q}_{NF} &= \eta_{CF} \cdot J_{EV} = \left(0.72 - \frac{50}{J_{EV}}\right) J_{EV} \end{aligned}$$

$$= (0.72 J_{EV} - 50)$$

$$J_{EV} = 0.8 J_0 \sin(h)$$

$$= 0.8 \times 1360 \sin(h)$$

$$\begin{aligned}
&= 1088 \left[\sin(30) \sin(23.4) + \cos(30) \cos(23.4) \cos \left(\pi - \frac{\pi}{12} Z \right) \right] \\
&= 1088 \left[0.199 + 0.795 \cos \left(\pi - \frac{\pi}{12} Z \right) \right] \\
&= 216.5 + 865 \cos \left(\pi - \frac{\pi}{12} Z \right) \\
\dot{q}_{NF} &= 0.72 \left[216.5 + 865 \cos \left(\pi - \frac{\pi}{12} Z \right) \right] \\
&= 623 \cos \left(\pi - \frac{\pi}{12} Z \right) + 156 \\
\dot{q}_{NFd} &= 2 \int_{Z_R}^{12} \left[623 \cos \left(\pi - \frac{\pi}{12} Z \right) + 156 \right] \cdot dZ \\
&= 2 \int_5^{12} 623 \cos \left(\pi - \frac{\pi}{12} Z \right) dZ + (2 \times 156 \times (12 - 5)) \\
q_{NFd} &= 2 \left[623 \left(-\frac{12}{\pi} \right) \sin \left(\pi - \frac{\pi}{12} Z \right) \right] + 2184 \\
&= 4597 + 2184 = 6781 [W \cdot h / m^2]
\end{aligned}$$

بالتعويض:

$$\begin{aligned}
A_{CF} &= \frac{Q_{NFd}}{q_{NFd}} = \frac{28000}{6.781} = 4130 [m^2] \\
\dot{Q}_{NF} &= A_{CF} \times \dot{q}_{NF} = 4130 \times \left[0.623 \cos \left(\pi - \frac{\pi}{12} Z \right) + 156 \right] \\
&= 2573 \cos \left(\pi - \frac{\pi}{12} Z \right) + 644.3 [kW]
\end{aligned}$$

2. حساب حجم الخزان الحراري:

$$\begin{aligned}
V_{SP} &= \frac{Q_{NSd}}{\rho_{SP} \cdot C_{SP} \cdot \Delta T_{SP}} \\
Q_{NSd} &= 2 \int_{Z_1}^{12} \dot{Q}_{NF} \cdot dZ - 2 \dot{Q}_{ev} (12 - Z_1)
\end{aligned}$$

لايجاد Z_1 :

$$\dot{Q}_{NF} = \dot{Q}_{ev}$$

$$2000 = 2573 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right) + 644.3$$

$$\cos\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right) = 0.5269$$

$$180 - 15Z_1 = 58.2$$

$$Z_1 = 8.12 \text{ h}$$

$$\begin{aligned} Q_{NSd} &= 2 \int_{8.12}^{12} 2573 \cos\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right) \cdot dZ + 2 \int_{8.12}^{12} 644.3 \cdot dZ \\ &\quad - [2 \times 2000(12 - 8.12)] \\ &= 2 \times 2573 \left(-\frac{12}{\pi}\right) \sin\left(\pi - \frac{\pi}{12}Z\right) + [2 \times 644.3(12 - 8.12)] \\ &\quad - [4000 \times (12 - 8.12)] = 16705.7 + 4999.8 - 15520 \\ &= 6185.5 [kW \cdot h] \end{aligned}$$

بالتعويض:

$$V_{SP} = \frac{6185.5 \times 3600}{2.4 \times 800 \times 200} \approx 58 [m^3]$$

مسألة (3):

محطة شمسية كهحرارية هجينة استطاعتها الكهربائية $P_{el} = 3 [MW]$ تعمل خلال فترة الإشعاع الشمسي فقط بمردود ترموديناميكي $\eta_{TC} = 0.3$. تُعطى الاستطاعة المفيدة لحقل المركزات بالعلاقة:

$$\dot{Q}_{NF} = 10000 \sin\left(\frac{\pi}{12}Z - \frac{\pi}{2}\right) [kW]$$

ومردوده $\eta_{CF} = 0.7$ المطلوب:

1. إيجاد الطاقة اليومية اللازمة لعمل المبخّر.
2. إيجاد الطاقة اليومية المستفادة من الحقل ونسبة التغطية.
3. إيجاد التابع الزمني للاستطاعة المفيدة لمصدر الطاقة التقليدي المساعد $\dot{Q}_{oil}$.
4. رسم التوابع الزمنية للاستطاعات وبيان المساحات وما تمثله.

الحل:

1. حساب الطاقة اليومية اللازمة لعمل المبخر.

$$Q_{evd} = \dot{Q}_{ev} \cdot S_d$$

يتم إيجاد $\dot{Q}_{ev}$ من:

$$\dot{Q}_{ev} = \frac{P_{el}}{\eta_{TC}} = \frac{3000}{0.3} = 10000[kW]$$

$$S_d = 2(12 - Z_R)$$

تُحسب Z_R من:

$$\dot{Q}_{NF} = 0$$

$$\sin\left(\frac{\pi}{12}Z - \frac{\pi}{2}\right) = 0$$

$$\frac{\pi}{12}Z_R - \frac{\pi}{2} = 0$$

$$Z_R = 6$$

وعليه:

$$S_d = 12 h$$

$$Q_{evd} = 10000 \times 12 = 120000[kW.h]$$

2. إيجاد الطاقة اليومية المستفادة من الحقل ونسبة التغطية.

$$Q_{NFd} = 2 \int_{Z_R}^{12} \dot{Q}_{NF} \cdot dZ$$

$$= 2 \int_6^{12} 10000 \sin\left(\frac{\pi}{12}Z - \frac{\pi}{2}\right) \cdot dZ$$

$$= 20000 \times \frac{12}{\pi} = 76394[kW.h]$$

نسبة التغطية:

$$\partial = \frac{Q_{NFd}}{Q_{evd}} = \frac{76394}{120000} = 0.64$$

3. إيجاد التابع الزمني للاستطاعة المفيدة لمصدر الطاقة التقليدي المساعد.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{oil} &= \dot{Q}_{ev} - \dot{Q}_{NF} \\ &= 10000 - 10000 \sin\left(\frac{\pi}{12}Z - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}$$

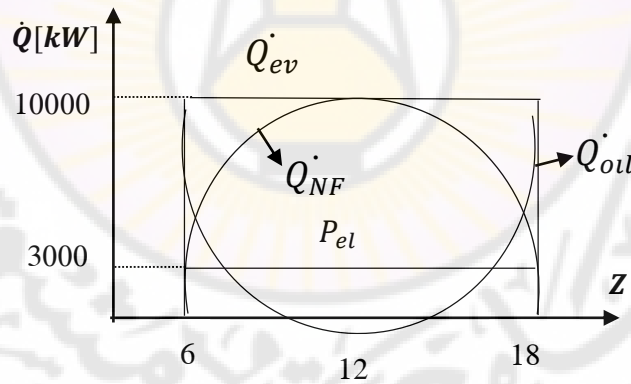
4. بيان المساحات وما تمثله.

1- المساحة المحصورة بين $\dot{Q}_{ev}$ والمحور Z تُمثل الطاقة اليومية اللازمة لعمل المبخّر.

2- المساحة المحصورة بين $\dot{Q}_{NF}$ والمحور Z تُمثل الطاقة اليومية المستفادة من الحقل.

3- المساحة المحصورة بين $\dot{Q}_{oil}$ والمحور Z تُمثل الطاقة التقليدية اليومية المستهلكة.

4- المساحة المحصورة بين P_{el} والمحور Z تُمثل الطاقة الكهربائية المنتجة يومياً.



مسألة (4):

مزرعة شمسية كهحرارية تنتج الكهرباء خلال فترة الإشعاع الشمسي فقط، بمرود $\eta_{TC} = 0.2$. تُعطي الاستطاعة المفيدة لحقل المركّزات بالعلاقة:

$$\dot{Q}_{NF} = 5000 \sin\left(\frac{\pi}{12}Z - \frac{\pi}{2}\right) \quad [kW]$$

المطلوب:

1. إيجاد استطاعة المبخر اللازم والاستطاعة الكهربائية المنتجة.
2. إيجاد الطاقة العظمى الواجب تخزينها.
3. إيجاد تابع الاستطاعة التخزينية $\dot{Q}_{NS}$.

الحل:

1. إيجاد استطاعة المبخر اللازم والاستطاعة الكهربائية المنتجة.

$$Q_{NFd} = 2 \int_{Z_R}^{12} 5000 \sin\left(\frac{\pi}{12}Z - \frac{\pi}{2}\right) \cdot dZ$$

نجد Z_R من:

$$\sin\left(\frac{\pi}{12}Z_R - \frac{\pi}{2}\right) = 0$$

$$\frac{\pi}{12}Z_R - \frac{\pi}{2} = 0$$

$$Z_R = 6$$

بالتالي:

$$Q_{NFd} = 2 \times 5000 \times \frac{12}{\pi} = 38197 [kW.h]$$

وعليه:

$$S_d = 2(12 - Z_R) = 12 h$$

$$\dot{Q}_{ev} = \frac{Q_{NFd}}{S_d} = \frac{38197}{12} = 3183 [kW]$$

- 2- إيجاد الطاقة العظمى الواجب تخزينها.

$$\begin{aligned} P_{el} &= \dot{Q}_{ev} \cdot \eta_{TC} \\ &= 3183 \times 0.2 = 636.6 [kW] \end{aligned}$$

- 3- إيجاد تابع الاستطاعة التخزينية $\dot{Q}_{NS}$.

$$\dot{Q}_{NS} = \dot{Q}_{NF} - \dot{Q}_{ev}$$

$$Q_{Nsd} = 2 \int_{Z_1}^{12} 5000 \sin\left(\frac{\pi}{12}Z - \frac{\pi}{2}\right) \cdot dZ - 2 \int_{Z_1}^{12} \dot{Q}_{ev} \cdot dZ$$

لإيجاد Z_1 :

$$5000 \sin\left(\frac{\pi}{12}Z_1 - \frac{\pi}{2}\right) = 3183$$

$$\sin(15Z_1 - 90) = \frac{3183}{5000} = 0.637$$

$$Z_1 = 8.633$$

$$\begin{aligned} Q_{Nsd} &= 2 \times 5000 \times \frac{12}{\pi} \cos((15 \times 8.633) - 90) \\ &\quad - [2 \times 3183 \times (12 - 8.633)] \\ &= 8040 [kW.h] \end{aligned}$$



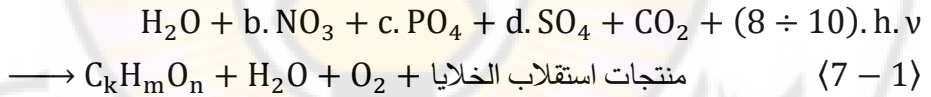
الفصل السابع

طاقة الكتلة الحية

المقصود بالكتلة الحية هي كافة المواد الموجودة في الطبيعة من أصل عضوي أو بمعنى آخر كل المادة الحية والنامية وكذلك المخلفات العضوية للكائنات الحية ونفاياتها بعد الموت. إذن يندرج تحت مفهوم الكتلة الحية كافة النباتات والحيوانات ومخلفاتها وبقاياها وكذلك المواد العضوية التي يتم تحويلها صناعياً بعد تلفها كالورق والمواد السيللوزية ومخلفات الصناعات الغذائية وغيرها.

تعتبر عملية التمثيل الضوئي في النباتات هي المصدر الرئيسي للكتلة الحية وتتم هذه العملية كما هو معروف في جزيئات اليخضور بالاستعانة بالطاقة الشمسية أو بشكل أدق بالأشعة الشمسية المرئية ذات الأمواج بطول $0.4 \div 0.8 [\mu m]$ ويتم تشكيل جزيئات هيدروكربونية من الهيدروجين الموجود في الماء وثاني أكسيد الكربون الموجود في الهواء لتتطلق بذلك عملية تطور الكائنات الحية والحياة على الأرض.

يمكن وصف عملية التمثيل الضوئي بالعلاقة التالية:



حيث أن:

$d.SO_4$ و $c.PO_4$ و $b.NO_3$: من التربة والماء.

CO_2 : من الهواء.

$(8 \div 10).h.v$: من الشمس.

منتجات استقلاب الخلايا: فيتامينات وأملاح وغيرها.

(b, c, d) : أعداد تمثل أصغر نسب مليونية مختلفة [PPM].

h : ثابت بلانك $h = 6.625 \times 10^{-34} [J.s]$.

ν : التردد $\nu = c/\lambda [s^{-1}]$.

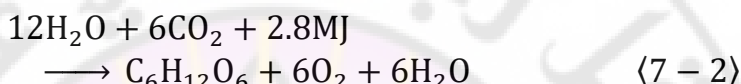
λ : طول الموجة [m].

c : سرعة الضوء $c = 2.99 \times 10^8 [m/s]$.

يبين الطرف الأيسر من العلاقة أنه بالإضافة لثاني أكسيد الكربون من الهواء والماء من التربة أيضاً هناك مجموعة عناصر كالآزوت والفوسفور والكبريت وغيرها من التربة يتم استخدامها أيضاً في هذه العملية.

وبسبب نسبها الصغيرة جداً فلا تُشكّل كتلة ذات أهمية وهي لا تدخل في تركيب جزيء الكربوهيدرات وإنما تبقى في النباتات كنواتج تبادل وتكون مفيدة للكائنات الحية الأخرى وكذلك كسماد جيد.

يمكن صياغة العلاقة السابقة بشكل تقريبي بالمعادلة التالية:



ومن هذه المعادلة يتم تشكّل سكر الجلوكوز (الأحادي) في العنب. في عملية استخدام طاقة الكتلة الحية (حرق المواد العضوية) ينتج ثاني أكسيد الكربون الذي تم تثبيته من قبل النبات وتم سحبه من الهواء وإذا أخذنا بالاعتبار أنّ النبات يعود لينمو ويستخدم ثاني أكسيد الكربون مجدداً فإنّ استخدام طاقة الكتلة الحية تعتبر من منظور بيئي غير ملوثة ويؤخذ ذلك بالاعتبار عند مناقشة موضوع التلوث البيئي.

7-1 أشكال ونواتج الكتلة الحية

تمثّل كل المركبات العضوية في جسم الكائن الحي شكلاً من أشكال الكتلة الحية. يُعتبر السيللوز الشكل الأوسع انتشاراً وهو عبارة عن مركب سكري معقد يتألف من سلاسل جلوكوز (سكر أحادي) نقية ترتبط ببعضها بواسطة روابط هيدروجينية. لا ينحل السيللوز في الماء أو المحاليل العضوية ويتحول في الأحماض والقلويات إلى هيدرات السيللوز التي تتفكك في الأحماض المركزة وفي درجات حرارة عالية إلى سكر أحادي. يُعتبر السيللوز مادة خام ذات أهمية خاصة للصناعات الكيميائية. يتواجد الهيموسيللوز في بنية النباتات الخشبية بنسب تتراوح بين 20 ÷ 40% وهو أيضاً مركب سكري معقد إلا أنه لا يتألف من سلاسل جلوكوز نقية بل يحتوي على سكر ثنائي وثلاثي.

يُشكّل اللغنين حوالي 30% من الخشب وهو قابل للانحلال في بيسولفيت الكالسيوم وقلويات الصوديوم ولا ينحل في الماء.

للاستحصال على السيللوز من الخشب يُسبب اللغنين صعوبات كبيرة.

تُشكّل بقية أشكال نواتج الكتلة الحية نسبة صغيرة بالمقارنة مع السيللوز والهيموسيللوز واللغنين.

يبين الجدول (7-1) ما تمثله المركبات العضوية المختلفة من النمو السنوي للكتلة الحية عالمياً.

يُمثّل النشاء أيضاً مركباً سكرياً ذا جزيئات مركبة إلا أنّ روابطها أضعف بكثير من تلك في السيللوز والهيموسيللوز.

لا يُشكّل النشاء والسكر والدهون والبروتين والملونات إلا نسبة 1% من النمو السنوي للكتلة الحية معظمها على شكل نشاء.

الجدول (7-1) ما تمثله المركبات العضوية المختلفة من النمو السنوي للكتلة الحية عالمياً

النمو السنوي		نوع المادة العضوية
[Md · t/a]	[%]	
100	65	السيليلوز
27	17	الهيموسيللوز
27	17	اللغنين
1.05	0.82	النشاء
0.1	0.08	السكر
0.13	0.1	الدهون
		البروتين
		الملونات

7-2 احتياطي الكتلة الحية عالمياً

يُقدّر حجم الكتلة الحية على الأرض بحوالي $[EJ] 3 \times 10^4$ على اليابسة فقط أو ما يعادل 10^{12} طن مكافئ نفطي. تحتوي هذه الكمية على حوالي $10^{11} \times 8$ طن من

الكربون المثبت، يُشكّل الخشب نسبة تبلغ حوالي 80%. إنّ الاستثمار المستمر للكتلة الحية يتطلب مراعاة معدل النمو السنوي الذي يبلغ حوالي $[EJ/a] 3000$ وهذا ما يُشكّل

حوالي 10% من الكتلة الحية على اليابسة وبالتالي فإن مجموع الكتلة الحية التي تموت وتندثر بالإضافة إلى ما يمكن استثماره لا يجوز أن يتجاوز هذه النسبة. ويبين الجدول (2-7) توزيع إنتاج الكتلة الحية على اليابسة.

الجدول (2-7) توزيع إنتاج الكتلة الحية على اليابسة

نوع اليابسة	المساحة 10^6 [km ²]	الإنتاجية النوعية [g/m ² .a]	الإنتاجية الإجمالية 10^9 [t/a]	محتوى الطاقة النوعي للمادة الجافة [MJ/kg]	المكافئ الطاقوي السوي		نسبة امتصاص الطاقة الشمسية
					[kW.h/m ²]	[10 ⁹ MW.h]	
غابات	57	1205	68	18	5.3	343	0.54
أحراش	26	90	2.4	18.8	0.5	12	0.04
أعشاب	24	600	15	17.6	2.9	70	0.3
صحراء	24	1	0	16.7	0	0	0
أراضي زراعية	14	650	9	17.2	3.1	44	0.3
مياه عذبة	4	1250	5	18	6.3	25	0.5
مجموع اليابسة	149	669	100	18	3.4	496	0.3
المحيطات	361	155	55	18.8	0.8	303	0.07
الكرة الأرضية	510	305	155	18.4	1.6	799	0.14

تبلغ مساحة اليابسة حوالي 149×10^6 [km²] منها حوالي 83×10^6 [km²] غابات وأحراج من اليابسة تُنتج حوالي 70×10^9 [t/a] من الكتلة الحية تعادل 44×10^9 [t] طن مكافئ نفطي، حوالي 70% من هذه الكتلة تنتجها الغابات.

وبسبب توزع اليابسة فإن 60% من إنتاج الكتلة الحية على اليابسة يحصل في النصف الشمالي من الكرة الأرضية و 40% في النصف الجنوبي.

يُمثل العمود الأخير من الجدول مردود استثمار الطاقة الشمسية من قبل المساحات الخضراء حيث تصل هذه النسبة في الغابات إلى 0.55% بينما تصل في الغابات الاستوائية 0.8% أما المحاصيل الزراعية فبعضها يصل إلى 5.4% كالشمندر و 4.8% لقصب السكر و 3.2% للذرة.

من الكتلة الحية على اليابسة يمكن جني نسبة محدودة للاستثمار إذ أن حوالي 50% من أجزاء النباتات (جذور وأوراق) ليست عملياً قابلة للاستثمار.

باختصار فإنّ المتاح فعلاً من احتياطي طاقة الكتلة الحية وفق تقديرات حسابية لا يتجاوز (3 ÷ 4) أضعاف استهلاك العالم من المصادر الأولية للطاقة.



الفصل الثامن

تقانات استثمار طاقة الكتلة الحية

8-1 تحويل الطاقة الحية

يقصد بتحويل الكتلة الحية (هنا المعنى الطاقى للكلمة) استخلاص الطاقة من الكتلة الحية على شكل طاقة حرارية. أو تحويل الكتلة الحية إلى شكل آخر من حوامل الطاقة صلباً أو سائلاً أو غازياً.

وتقسم طرق تحويل الكتلة الحية إلى:

- طرق فيزيائية.
- طرق ترموكيميائية.
- طرق بيولوجية.

أما نواتج طرق التحويل فتكون على شكل:

- وقود صلب.
- وقود سائل.
- وقود غازي.
- كهرباء.
- طاقة ميكانيكية.
- حرارة.

ويمكن الاستفادة من هذه المنتجات في الزراعة والصناعة والنقل وكذلك في الاستخدامات المنزلية.

أبسط طرق تحويل الكتلة الحية هي الطريقة الميكانيكية (إحدى أشكال الطرق الفيزيائية)، حيث يتم ضغط بقايا الخشب والقش على شكل كريات أو متوازي مستطيلات بأحجام مناسبة. ومن الطرق الفيزيائية استخلاص الزيوت النباتية والكربوهيدرات كوقود سائل (قصب السكر - عباد الشمس - الشمندر السكري - الزيتون - فول الصويا).

بواسطة الطرق الترموكيميائية يتم تحويل الكتلة الحية بمساعدة الطاقة الحرارية والتفاعلات الكيميائية إلى شكل من أشكال حوامل الطاقة.

أما الطرق البيولوجية فتعتمد على تأثير العضوات الدقيقة (ميكروبات - فطور) التي تقوم بتفكيك المركبات العضوية المعقدة، وبالتالي تحويل المادة العضوية إلى شكل من أشكال الوقود الغازي أو السائل.

يختلف مردود الطرق المختلفة لتحويل الكتلة الحية ويتراوح بين 20 ÷ 90%، بعض الطرق تلاقي اليوم انتشاراً واسعاً ومعظمها لا يزال قيد البحث والاختبار.

8-2 الطرق الفيزيائية

8-2-1 الضغط الميكانيكي للكتلة الحية

بهذه الطريقة يتم ضغط المواد العضوية (وخاصة نشارة وبقايا الخشب، وكذلك القش والقمامة العضوية) إلى كتل على شكل متوازي مستطيلات أو كريات تُستخدم كوقود صلب. تترافق عملية الضغط الميكانيكي غالباً بعملية تجفيف للمادة العضوية.

تحتوي المادة العضوية على الماء وتُمثل رطوبة المادة العضوية النسبة بين ما تحتويه من الماء والكتلة الكلية للمادة العضوية. وقد تصل قيمة الرطوبة إلى 90% أو أكثر. وتتراوح رطوبة الخشب الأخضر بين 40 ÷ 60، أما الخشب المجفف في الهواء فتتراوح رطوبته بين 10 ÷ 20. أما القيمة الحرارية للكتلة الحية فتتسب عادةً إلى الكتلة الجافة (odm) أي الكتلة الجافة من الماء بشكل مطلق.

ينتج عن عملية كبس (ضغط) الكتلة الحية إلى شكل من أشكال الوقود الصلب (كريات أو متوازي مستطيلات) رطوبة نهائية بحدود 15 ÷ 18%.

تتم عملية تحضير المادة قبل عملية الكبس، حيث يتم طحنها أو تكسيرها جيداً قبل ضغطها وتشكيلها. تؤدي أيضاً عملية الكبس إلى رفع مقدار الكتلة الحجمية بشكل ملحوظ، إذ تتراوح كثافة القش ونشارة الخشب والمواد الأولية قبل المعالجة بين $200 \div 600 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ ، بينما تتراوح كثافة المنتج بين $500 \div 1400 \text{ [kg/m}^3\text{]}$.

تتراوح الطاقة النوعية اللازمة لمعالجة وكبس الطن الواحد من المادة الأولية بين $30 \div 90 \text{ [kW.h/t]}$. وتبلغ القيمة الحرارية للقش الخام حوالي 4.4 [MW.h/t] . بالتالي تبلغ الطاقة النوعية اللازمة لعملية الكبس حوالي 1 ÷ 2%. تُصرف طاقة أيضاً لعملية الجني والتحضير والتجفيف، وبالتالي يتراوح المردود الكلي لعملية الكبس بين 85 ÷ 90%.

8-2-2 استخلاص الزيوت النباتية والكربوهيدرات (Extraction)

الطريقة الفيزيائية الثانية المتبعة في معالجة الكتلة الحية هي استخلاص (أو بمعنى آخر استخراج) حوامل الطاقة من الكتلة الحية عن طريق الكبس والمعالجة بالبخار والحموض وغيرها.

تستخدم هذه الطريقة حالياً بشكل رئيسي في الصناعات الغذائية والكيميائية، ويمكن تطويرها لاستخلاص الزيوت النباتية وحوامل الطاقة الأخرى من الكتلة الحية للاستفادة منها كمصدر طاقة.

8-3 الطرق الترموكيميائية

بواسطة الطرق الترموكيميائية يتم تحويل الكتلة الحية إلى حامل طاقة ثانوي باستخدام عملية الأكسدة والتفاعلات الكيميائية مع التسخين وتشمل هذه الطرق ثلاثة أشكال:

1. **الحرق:** التحويل إلى طاقة حرارية.
 2. **التغويز:** الحصول على غاز كحامل للطاقة.
 3. **التميع:** الحصول على سائل كحامل للطاقة.
- غالباً تتم هذه العمليات وتحدث في بعض التجهيزات المستخدمة على التوالي.

8-3-1 الحرق

الحرق هو أقدم طريقة معروفة في تحويل الكتلة الحية إلى طاقة والمادة الأولية الأساسية المستخدمة هي الخشب، حتى اليوم تم حرق نصف الاحتياطي العالمي من أخشاب الغابات وتجري هذه العملية على قدم وساق لاسيما في الدول النامية. ويتم حرق المخلفات الزراعية وروث الحيوانات إلى جانب الخشب للحصول على الطاقة. عند الحرق التام للكتلة الحية ($C_K K_M O_N$) (المقصود هنا الخشب بشكل رئيسي) ينتج غاز ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء والرماد. في حال وجود الكبريت يتم حرقه أيضاً إلى (SO_2). وتُشكّل البقايا المعدنية (الرماد) حوالي 1% من الكتلة.

تسمى الطاقة الحرارية الناتجة عن حرق واحدة الكتلة من الكتلة الحية بالقيمة الحرارية الدنيا H_u وتتعلق هذه القيمة بالقيمة الحرارية للمركبة الجافة ونسبتها ($1 - x$) إلى الكتلة الحية وكذلك بحرارة التبخر للماء الموجود في الكتلة على شكل رطوبة والبالغ 2.441 [MJ/kg] وبالتالي:

$$H_u = (1 - x)H_{UDC} - x \times 2.441 \quad [\text{MJ/kg}] \quad (8 - 1)$$

H_{UDC} : القيمة الحرارية الدنيا للمادة الجافة التي تُشكّل ($1 - x$) من الكتلة الحية. يبين الجدول (8-1) قيم H_{UDC} من أجل أشكال مختلفة للكتلة الحية.

تتراوح رطوبة خشب الأشجار المقطوعة حديثاً بين 40 ÷ 60 % ، هذه الرطوبة أكثرها تملأ الفراغات بين الخلايا على شكل رطوبة حرة (غير مرتبطة)، أما كمية الماء (الرطوبة) الباقية فتوجد داخل الخلايا ويُطلق عليها رطوبة مرتبطة.

الرطوبة في الكتلة الحية (Biomass) تعني كمية الماء الكلية في الكتلة أو:

$$x = \frac{M_{H_2O}}{M_{Biomass}} = \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2O} + M_{odm}}$$

M_{odm} : الكتلة العضوية الجافة.

تسمى x أيضاً المحتوى المائي أو الرطوبة المطلقة.

هناك قيمة أخرى U تسمى محتوى الخشب من الرطوبة، وهي النسبة بين كتلة الماء وكتلة المادة الجافة أو:

$$U = \frac{M_{H_2O}}{M_{odm}} = \frac{x}{1-x} \quad (8-2)$$

هذه القيمة تزيد على الـ 100% عندما تزيد الرطوبة x عن 50%.

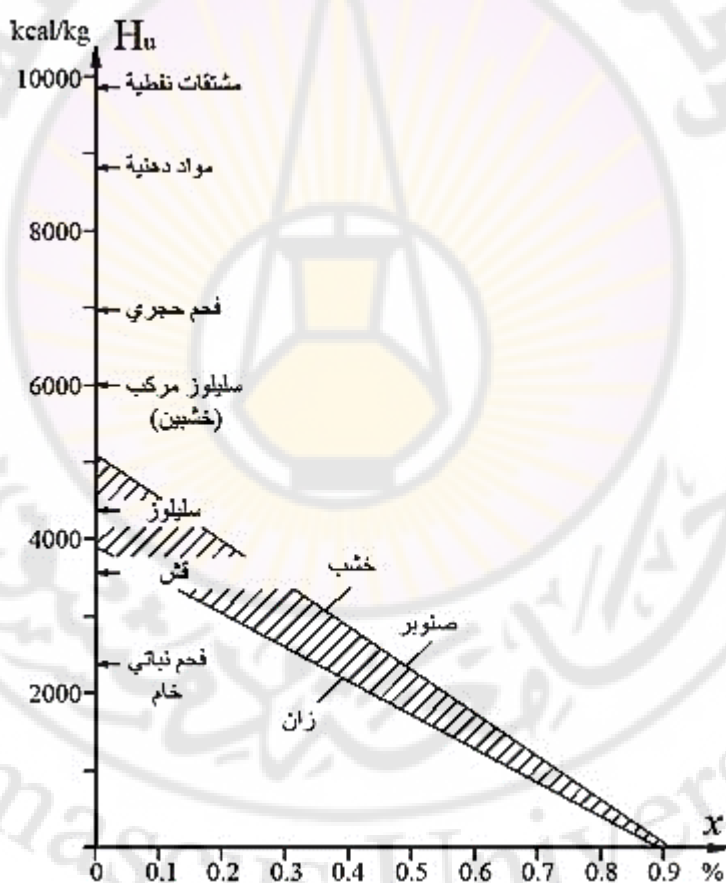
الجدول (1-8) قيم H_{UDC} من أجل أشكال مختلفة للكتلة الحية

المادة	$H_{UDC} [MJ/kg]$
أخشاب	19
قمامة منزلية	10 ÷ 15
ورق	17
قش	16
قصب السكر	15
حمأة محطات المعالجة	13
دهون	39
مشتقات نفطية	43

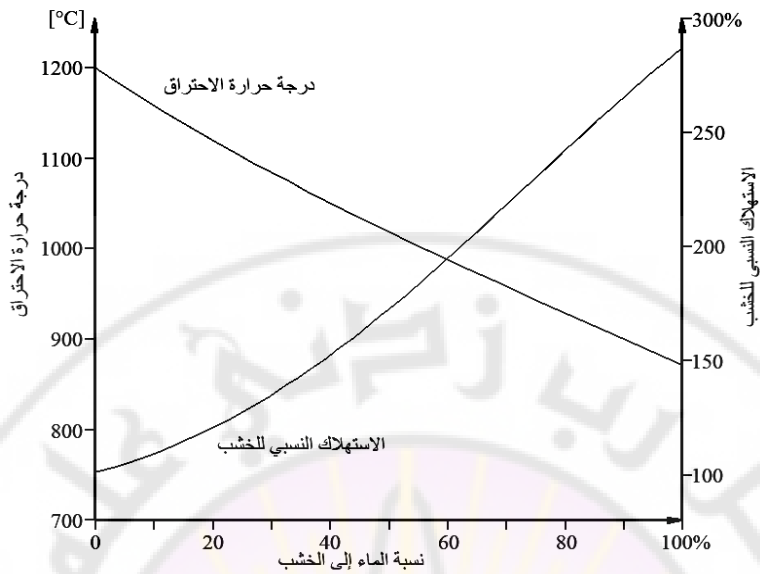
أما الجدول (2-8) فيبين القيم الحرارية الدنيا H_u لبعض المواد:

الجدول (2-8) القيم الحرارية الدنيا H_u لبعض المواد

المادة	$H_u [MJ/kg]$	الرطوبة $x[\%]$
خشب أخضر	6 ÷ 8	40 ÷ 60
خشب مجفف بالهواء	14 ÷ 16	10 ÷ 20
قش مضغوط	11 ÷ 16	15 ÷ 18
قمامة عضوية منزلية	5 ÷ 8	25 ÷ 38



الشكل (1-8) أثر الرطوبة على القيمة الحرارية الدنيا H_u للخشب و بعض المواد



الشكل (2-8) أثر الرطوبة (نسبة الماء إلى الخشب) U على درجة حرارة الاحتراق والاستهلاك النسبي للخشب

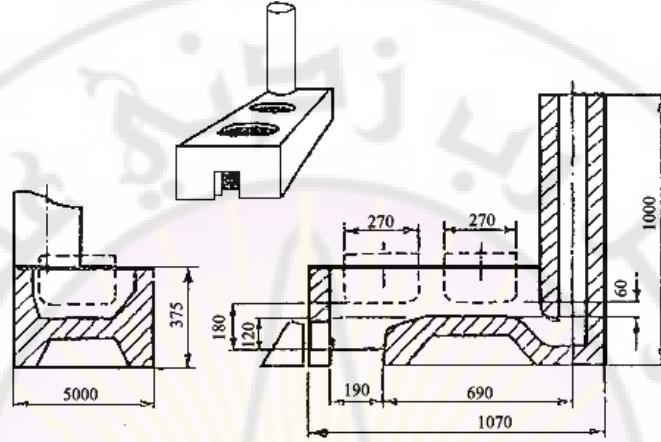
في عمليات حرق الخشب تُستخدم العديد من التقانات حسب إمكانيات الاستخدام ومعالجة الخشب وتتميز كل وسيلة عن الأخرى بشكل ملحوظ بمردود العملية. يبين الجدول (3-8) مردود بعض طرق حرق الخشب.

الجدول (3-8) مردود بعض طرق حرق الخشب

تقانة الحرق	المردود %
نار مفتوحة	5 ÷ 10
فرن بسيط	20 ÷ 30
كابين مفتوح	10 ÷ 30
مدفأة أو موقد منزلي	40 ÷ 50
أفران حرق نظامية	60 ÷ 80

عالمياً يتم حرق ما طاقته حوالي 1[mrd] طن مكافئ نفطي سنوياً من الكتلة الحية وغالباً في مواقع حجرية مفتوحة حيث يضع ما نسبته 90 ÷ 95% من الطاقة المنتجة. يبين الشكل (3-8) فرناً مقترحاً من مئات الأشكال الممكنة والموضوعة قيد البحث، يُقترح تعميمه في بلدان العالم الثالث التي تستهلك طاقة الكتلة الحية بشكل واسع كمصدر للطاقة.

إنّ نشر هكذا تقانة في دول العالم الثالث لاسيما تلك التي تستهلك طاقة الكتلة الحية بشكل رئيسي كمصدر للطاقة يمكن أن يساهم في حل أزمة الطاقة في تلك البلدان بشكل كبير. وعندها تكفي شجرة واحدة بدل ثلاث شجرات لتغطية الحاجة إلى الطاقة في موضوع معين، لأنّ مردود هذا الفرن أعلى بثلاث مرات من مردود المواقد المفتوحة.

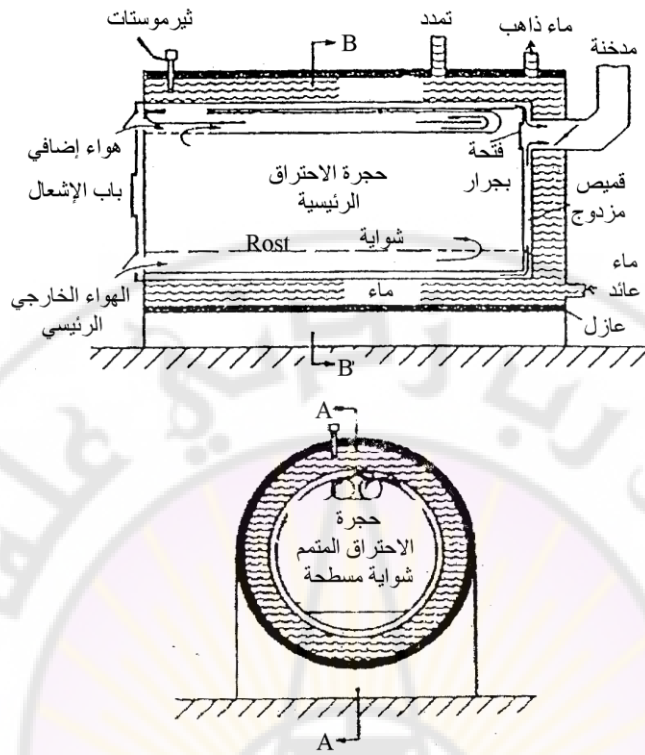


الشكل (8-3) فرن بسيط بديل للمواقد المفتوحة

يجب أن تتميز مواقد الخشب عن مواقد الفحم أو المواقد الأخرى نظراً لطبيعة الخشب من حيث الشكل والتركيب.

يبين الشكل (8-4) مرجلاً للحرق الكامل للخشب والحصول على الماء الساخن.

يتألف المرجل من حجرة احتراق أسطوانية يتم تبريدها بواسطة الماء المحيط الموجود في أسطوانة ثانية ذات قميصين تحيط بحجرة الاحتراق. في حجرة الاحتراق الرئيسية يتم تسخين وتجفيف الكتلة الحية على شواية مسطحة، ومع ارتفاع درجة الحرارة نتيجة الاحتراق بمساعدة الهواء الخارجي تحصل عملية تغويز الوقود. تقوم حجرة الاحتراق المساعدة بإتمام عملية حرق الغازات الهاربة التي لم يتم حرقها في الحجرة الرئيسية وبمساعدة هواء خارجي يتم تسخينه مسبقاً.



الشكل (4-8) فرن حديث للحرق الكامل للخشب والحصول على ماء ساخن

تتم عملية حرق الكتلة الحية وفق أربع مراحل:

المرحلة الأولى: تسخين وتجفيف.

المرحلة الثانية: تغويز وتفكك حراري.

المرحلة الثالثة: حرق الوقود الصلب.

المرحلة الرابعة: حرق متمم للغازات الهاربة من حجرة الاحتراق الرئيسية.

وليس بالضرورة أن تنتهي أية مرحلة لتبدأ الأخرى بل تحصل عدة مراحل معاً بعد نضوج المرحلة الأولى.

بسبب المحتوى العالي للخشب من الأوكسجين يمكن له أن يحترق بأقل كمية من الهواء الخارجي.

حوالي 80% من الهواء الخارجي يتم إدخاله كهواء خارجي رئيسي عبر الشواية. أما كمية الهواء اللازمة الباقية 20% فيجب تسخينها ما أمكن ومزجها جيداً مع غازات الاحتراق للحصول على حرق كامل.

والعوامل الأساسية اللازمة للحرق الكامل هي:

1. هواء خارجي كافي مقسّم بين هواء رئيسي وثانوي.
2. مزج جيد للهواء الثانوي مع غازات الاحتراق.
3. حجرة احتراق كبيرة وكافية للتفاعلات والتفكك.
4. درجة حرارة اشتعال كافية (جدران ساخنة).

يجب ألا تقل استطاعة المراحل الخشبية عن $15[kW]$ ، ويجب أن تعمل بكامل استطاعتها. وفي هذه الحالة فقط يكون الدخان المنبعث من الموقد عبر المدخنة مقبول نسبياً. وتبقى مواقد الخشب والكتلة الحية أكثر تلويثاً للبيئة من الوقود التقليدي.

في المرحل المذكور سابقاً يتم تغويز وتفكيك وحرق الكتلة في مكان واحد تقريباً هو حجرة الاحتراق بينما يبين الشكل (8-5) نموذج آخر لمرجل أكثر تطوراً وخاصة للحرق المستمر والاستطاعات الأكبر.

تتم عملية الحرق للكتلة الحية في المرحل السابق كاملةً في حجرة واحدة. بينما يتم في هذا المرحل انتقال الكتلة المطلوب حرقها عبر نفق التغذية وتحت تأثير الثقل بحيث تنفصل العمليات الأربعة الواردة في آلية الحرق في المرحل السابق من حيث الفراغ عن بعضها فيتم التسخين والتجفيف في القسم الأعلى من النفق بينما يتم التغويز والتفكك الحراري في وسط النفق، أما حرق الوقود الصلب فيتم عند الشوابة في أسفل النفق ويتم حرق الغازات الناتجة والهاربة في حجرة الاحتراق 3 بوجود مزيد من الهواء الجديد المسخن مسبقاً.

يتم تزويد نفق التغذية بآلية للتعبئة دون تعريض النفق للفتح والاتصال بالجو الخارجي أثناء العمل مما قد يؤدي إلى اندفاع الغازات المتشكلة والتي لم يتم حرقها بعد إلى الخارج.

تتميز هذه المراحل بمردود يزيد عن سابقها بحوالي 10% وكلا النموذجين يُستخدم حالياً لحرق القش حيث تُزوّد الأنظمة الأكبر بأجهزة تغذية آلية وأنظمة تصفية دخان. وبالتالي فإنّ أنظمة حرق القش تُعتبر أكثر كلفة.

لا يزال استخدام هكذا تقانات مقتصرراً في البلدان المتطورة على الحالات التي يجب التخلص فيها من الكتلة الحية (بقايا أخشاب وقش ينتجان كمخلفات صناعية وزراعية)، ولم تنتشر هذه التقانات في بلدان العالم الثالث ولا تزال قيد التجارب في المختبرات والدراسات والأبحاث.

8-3-2 التغويز

التغويز هو تحويل حامل الطاقة في الكتلة الحية إلى حالة غازية باستخدام مواد مغوّزة كالأوكسجين وبخار الماء بالإضافة إلى درجات عالية من الحرارة يتم الحصول عليها بحرق جزء من الكتلة الحية.

في عملية التغويز يتم إدخال كمية محدودة من الهواء إلى حجرة الاحتراق بحيث تكون النواتج الأساسية هي الهيدروجين H_2 وأول أكسيد الكربون CO . إن تركيب مزيج الغاز الناتج يتعلق بعدة عوامل منها نسب وجود الكربون والهيدروجين والأوكسجين وبخار الماء وكذلك بالمواد المغوّزة من حيث النوعية والكمية والضغط. في مفاعل التغويز يمكن تمييز مناطق مختلفة أو أجزاء مختلفة للمفاعل:

- 1- جزء التجفيف بدرجات حرارة حتى $200^\circ C$.
 - 2- جزء الحرق الجزئي والتفكك الحراري بدرجات حرارة حتى $500^\circ C$.
 - 3- جزء التقحم بدرجات حرارة حتى $700^\circ C$.
 - 4- جزء تتم فيه عملية الأكسدة بدرجات حرارة حتى $1400^\circ C$.
 - 5- جزء تتم فيه عملية الإرجاع بدرجات حرارة حتى $500^\circ C$.
- يبين الشكل (8-6) هذه الفراغات وتوضعها ودرجات الحرارة السائدة فيها. في منطقة الإرجاع وعن طريق تخفيض درجات الحرارة إلى حوالي $500^\circ C$ وبوجود بخار الماء والتفحم يتم إرجاع CO_2 جزئياً إلى CO . إن الكتلة الحية التي يتم إدخالها إلى جهاز التغويز يجب أن تكون جافة ما أمكن.

من السليبيات الكبيرة لعمليات التغويز باستخدام الهواء هو المحتوى العالي للهواء من الآزوت N_2 مما يؤدي للحصول على غاز منتج ذي قيمة حرارية منخفضة حوالي $5 [MJ/m^3]$ بينما تبلغ القيمة الحرارية للبيوغاز حوالي $21.5 [MJ/m^3]$ وللغاز الطبيعي حوالي $40 [MJ/m^3]$. يبين الجدول (8-4) النسب التقريبية لمحتويات الغاز المنتج.

إذا تم التغويز باستخدام الأوكسجين وبخار الماء يمكن الحصول على غاز منتج ذي مواصفات أفضل بكثير بشكل مزيج رئيسي من H_2 و CO .

يتم إدخال مواد التغويز (الهواء + بخار الماء) إلى حجرة الإرجاع مباشرة بحيث تساعد أيضاً في تحريك نواتج الاحتراق. وحسب طريقة إدخال هذه المواد نميز ثلاث طرق لعملية التغويز:

- 1- طريقة التيار المتعاكس أو الاتجاه الصاعد.
- 2- طريقة التيار المباشر أو الاتجاه النازل.
- 3- الطريقة المختلطة تُشكّل منطقة تغويز إعصارية.

الجدول (4-8) النسب التقريبية لمحتويات الغاز المنتج

25%	حتى	10%	من	H ₂
30%	حتى	20%	من	CO
15%	حتى	2%	من	CO ₂
4%	حتى	0%	من	CH ₄
60%	حتى	45%	من	N ₂

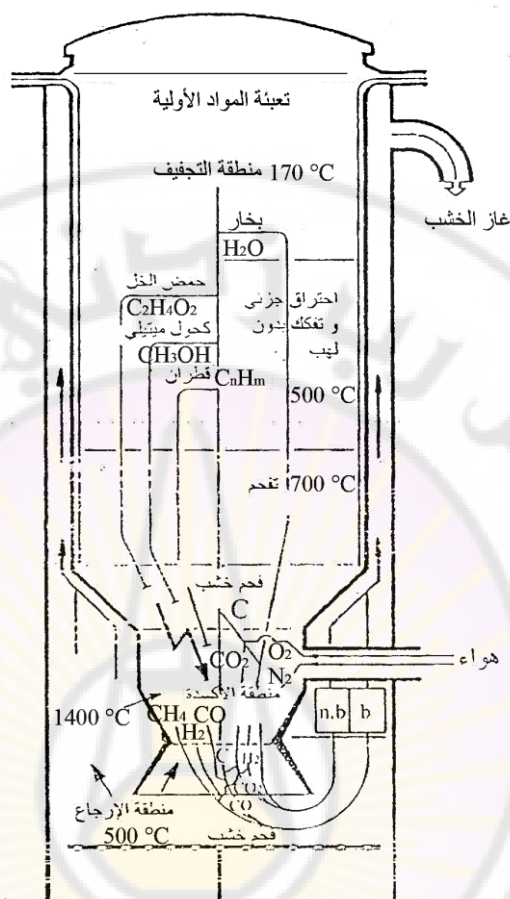
يتراوح مردود أجهزة التغويز بين 55 ÷ 85% حسب طريقة التغويز والمواصفات المتوخاة من الغاز الناتج من حيث المحتوى من المركبات السامة حيث يمكن الحصول على أعلى مردود بطريقة التيار المتعاكس لكن الغاز الناتج يحتوي في هذه الحالة على مواد أكثر سمية ويعتبر بيئياً أقل جودة. في حالة التيار المباشر يكون المردود أقل نسبياً إلا أنّ المنتج يعتبر أكثر جودة بيئياً.

الطريقة الثالثة تتطلب إدخال الكتلة الحية إلى الجهاز على شكل قطع صغيرة ونحصل على مردود جيد إنّما يحتوي الغاز المنتج على بعض المركبات سريعة الانصهار والتبخر من الرماد، لاسيما في حالة المواد الأولية التي تحتوي على نسبة عالية من هذه المركبات.

إن نسب ونوعية تركيب الغاز المنتج تتعلق بعوامل متعددة أهمها:

- 1- الشكل الهندسي للمادة الأولية.
- 2- الوزن النوعي أو الكثافة للمادة الأولية.
- 3- تركيب المادة الأولية.
- 4- نسبة الرطوبة في المادة الأولية.
- 5- المواصفات الترموكيميائية للمادة.

6- محتوى المادة الأولية من الرماد ودرجة الانصهار.



الشكل (6-8) مغويز إمبرت

للحصول على مردود أعلى يجب تجفيف المادة الأولية تجفيفاً مسبقاً. ويمكن استخدام الطاقة الحرارية المحسوسة في الغاز المنتج لتجفيف المادة الأولية في مجفف منفصل قبل إدخالها إلى جهاز التغويز.

لاقت أجهزة التغويز بالتيار المباشر انتشاراً واسعاً بعد الحرب العالمية الثانية، وجهاز التغويز الشكل (6-8) مثال على هذا النوع.

تدخل المادة الأولية على شكل قطع برطوبية لا تتجاوز 20%. يتم سحب الغاز المنتج بواسطة مروحة أو بالدفع الطبيعي، ويتم سحب الهواء اللازم للتغويز أيضاً بشكل طبيعي وحسب الحاجة (يتم تصميم فتحة الهواء والمجرى بشكل يحقق ذلك). يتم تحطيم الجزيئات العضوية المركبة المتبقية على الجمرات المتوضعة على الشواية في أسفل الفرن مما يقلل من محتوى الغاز المنتج من الغبار العضوي $[5 \div 0.5 \text{ g/m}^3]$. يتم استعادة كمية كبيرة

من الطاقة الحرارية المحسوسة من الغاز المنتج عن طريق تمريره إلى قميص محيط بالفرن قبل سحبه. ويجب تنظيف وتبريد الغاز قبل استخدامه.

يمكن تشغيل محركات البنزين أو الديزل بالغاز المنتج إلا أنَّ المردود يكون غالباً صغيراً (حوالي 30%) بسبب المحتوى العالي من N_2 . ويتم رفع المردود بمزج الغاز بالوقود التقليدي (مازوت) بنسبة $10\% \div 8\%$.

تتراوح استطاعة محطات توليد الطاقة العاملة بغاز الخشب بين $30 \div 800[kW]$ عند استخدام مولدات الاحتراق الداخلي.

يمكن الحصول على استطاعات حتى $10[MW]$ بمحطات ثابتة وربط مختلط لعدة مولدات. ولا تُعتبر استطاعات أكبر ذات أهمية لما يتطلبه ذلك من مساحات وتأمين كميات كبيرة من المواد الأولية ونقلها.

تتراوح كلفة التجهيزات اللازمة لإنتاج $1[kW]$ ما بين $1000 \div 2000$ دولار أمريكي دون كلفة تحضير الخشب وأنظمة توليد الكهرباء. لا توجد مقارنة دقيقة بين مولدات غاز الخشب ومولدات الديزل. ولا تزال عملية البحث عن استخلاص الطاقة من الكتلة الحية بواسطة التغويز جارية ولا توجد معطيات نهائية. كما أنَّ التقانات نفسها لا تزال قيد البحث والتطوير.

3-3-8 التميع

يتم تميع الكتلة الحية بثلاث طرق مختلفة:

الطريقة الأولى: التميع عن طريق الإرجاع الكيميائي مع إضافة مواد منشطة وحرارة وضغط مناسبين.

الطريقة الثانية: التفكيك الحراري (Pyrolyse).

الطريقة الثالثة: التحويل إلى ميثانول بعد التغويز وبمساعدة مواد منشطة.

3-3-8-1 طريقة الإرجاع الكيميائي

عند إضافة CO في درجات حرارة تتراوح بين $250 \div 400[^\circ C]$ وضغوط عالية تتراوح بين $140 \div 180[Bar]$ وبمساعدة مواد قلووية منشطة يمكن تميع الكتلة الحية بشكل مباشر.

يتم استخدام (إضافة) الماء بكميات كبيرة لحل السيلولوز الناشئ.

تبلغ القيمة الحرارية للوقود السائل الناتج حوالي $40 \div 30$ [MJ/kg] وهي قيمة عالية تصل إلى حوالي 90% من القيمة الحرارية للوقود الأحفوري إلا أن المواصفات الأخرى للوقود الناتج لا تضاهي مواصفات الوقود الناتج بطريقة التفكيك الحراري (Pyrolyse) كما أن كلفة إنتاج الوقود بهذه الطريقة تُعتبر مرتفعة مما لا يتوقع لهذه الطريقة نجاح تجاري وبالتالي تطور كبير للتقانات اللازمة.

8-3-3-2 طريقة التفكيك الحراري (Pyrolyse)

تتم عملية التفكيك الحراري للمادة العضوية هنا بإضافة الهواء ومصدر طاقة خارجي وبمفاعلات دوارة ومزج جيد ودرجات حرارة بين $300 \div 1000$ [°C] حيث تتفكك المادة العضوية لوقود غازي وسائل وبقية حرارية $15 \div 10$ [MJ/m³] للوقود الغازي و $30 \div 23$ [MJ/kg] للوقود السائل و $30 \div 20$ [MJ/kg] للوقود الصلب.

تتعلق نسب المركبات الثلاث وكذلك مردود عملية التفكيك بالعوامل التالية:

1- تركيب وشكل قطع المادة الأولية وأحجامها.

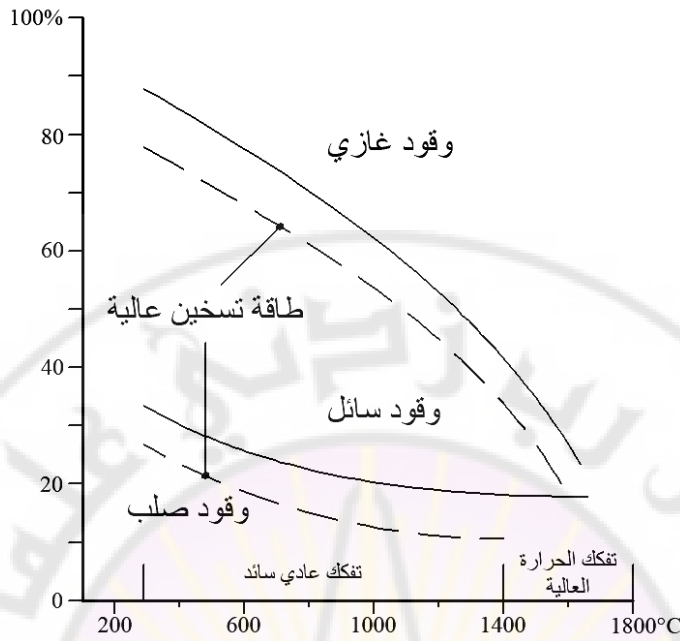
2- درجة حرارة التفكك.

3- حجم طاقة التسخين الخارجي.

4- فترة البقاء في المفاعل.

يبين الشكل (7-8) العلاقة بين نسب منتجات التفكك ودرجات حرارة التفكك السائدة.

من الواضح أنه عند درجة حرارة تتجاوز 1600 [°C] تتحول المنتجات السائلة التي كانت تُشكل النسبة الأكبر عند درجات حرارة منخفضة نسبياً، إلى منتجات غازية وعندها يتم الحديث عن تغويز تفككي (Pyrolytic Gasification). المادة الأولية الأساسية المستخدمة حالياً هي الخشب.



الشكل (7-8) العلاقة بين نسب نواتج التفكك ودرجات حرارة التفكك وحجم طاقة التسخين

لا تزال عملية التفكك الحراري للخشب غير محددة ومدروسة علمياً بشكل كافٍ حتى إنّ بعض المراحل غير معروفة جيداً، إنّما بشكل عام يمكن تقسيم العملية إلى المراحل التالية:

1- حتى $150[^\circ\text{C}]$ ، طرد الرطوبة وتشكّل محدود من حمض الخل والأحماض الأمينية و CO و CO_2 .

2- حتى $270[^\circ\text{C}]$ ، تشكّل كميات متزايدة من الماء كمادة متفككة من المادة العضوية وكذلك تشكّل الكحول الميثيلي وحمض الخل و CO و CO_2 .

3- عند $280[^\circ\text{C}]$ ، تبدأ عمليات التفكك وبشكل سريع حيث يتفكك حوالي $8 \div 10\%$ من المحتوى الحراري للخشب، وتتشكل كميات أكبر من الغاز والسائل (حمض الخل والميثانول والهيدروجين والميثان والإيثيلين).

4- حتى $380[^\circ\text{C}]$ ، ترتفع درجات الحرارة تحت تأثير عمليات الأكسدة بدون طاقة خارجية وتقل كميات الغاز والسائل المنتجة.

5- تسخين خارجي إضافي بغية الحصول على التركيب المطلوب لأطوار الوقود المنتج.

تبلغ نسب أطوار الوقود المنتج بدرجات حرارة تتراوح بين $400 \div 600[^\circ\text{C}]$ كما يلي:

صلب حوالي 35%. سائل بدون ماء حوالي 25%. غازي $15 \div 20\%$. ماء حوالي 20%.

أقدم طريقة معروفة لعملية التفكيك الحراري هي طريقة إنتاج الفحم الخشبي المعروفة بالتفحيم التي تجري بدرجات حرارة حوالي $500[^\circ\text{C}]$. ولا تزال الطريقة المعروفة مستخدمة حتى الآن في البلدان النامية بينما يتم إنتاج فحم الخشب في الدول المتطورة داخل أفران أنبوبية.

في عملية التفحيم القديمة يتم تغطية كمية من الخشب بارتفاع حوالي 1[m] بالتراب وتترك بعض فتحات التهوية ويتم الاشتعال. كان سابقاً يُجمع السائل من أسفل مكان التفحيم ويتم استخدامه كقطران في بعض الصناعات اليدوية.

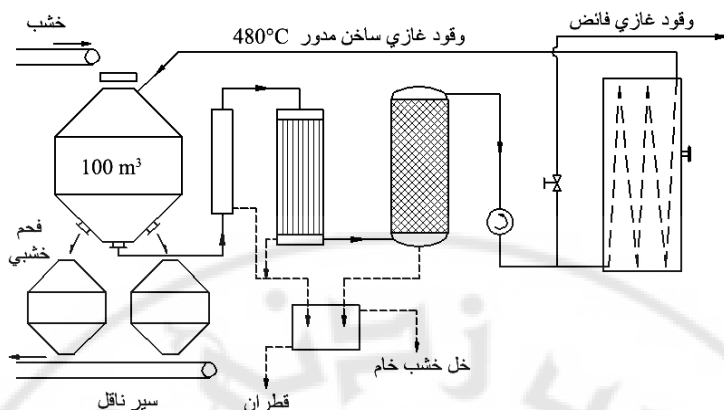
يتم إنتاج الطاقة اللازمة للتفحيم عن طريق حرق جزء من الخشب حيث يتم إنتاج $20\% \div 10\%$ من وزن الخشب على شكل فحم ويبلغ المردود الأعظمي 30% .

وإنَّ الانتقال إلى إنتاج الفحم بالأفران الأنبوبية الشكل (8-8) سمح بالاستفادة من المنتجات السائلة.

حتى عام 1800 تم إنتاج خل يصلح للطعام وب نوعية جيدة، ولاحقاً تم إنتاج الميثانول وأسيئات الميثانول والأسيتون. ونظراً لإمكانية الحصول على هذه المنتجات في المعامل البتروكيميائية ببساطه فقد عاد الفحم والقطران ليصبغا المنتجين الرئيسيين في نظام التفحيم المبينة في الشكل (8-8).

في الثمانينات تم إنتاج حوالي $10000000[t/a]$ من فحم الخشب على مستوى عالي بشكل صناعي. لا يدخل في هذا الرقم الفحم المنتج بالطريقة البدائية المعروفة والمذكورة سابقاً والتي تصل إلى 10% من استهلاك الخشب عالمياً.

في النظام المبين بالشكل (8-8) يجب تجفيف الخشب قبل إدخاله بحيث لا تتجاوز نسبة الرطوبة 20% وهذا يتطلب مجفف وفترة تجفيف تصل إلى 18 ساعة.



الشكل (8-8) التفحيم بطريقة تدوير الغاز

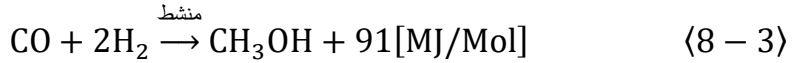
تبلغ سعة المفحم في الشكل السابق حوالي 100 m^3 يتم تغذيته بالمواد الأولية بواسطة سير ناقل. وتتألف منشأة التفحيم من 7 ÷ 6 مفحومات يكون أحدها احتياطياً دائماً. يتم تسخين المفحم بواسطة الغاز المعاد بدرجة حرارة حوالي 500°C ويتم استخراج الفحم كما هو مبين عبر فتحات في أسفل المفحم إلى حاويات تجميع وتبريد، أما السائل فيكون في البداية بسبب ارتفاع الحرارة على شكل غازات يتم تمريرها إلى فاصل القطران ثم إلى مبرد ليتم فصل القطران والخل ثم نقلها إلى جهاز ترقيد حيث يتم فصلها.

أما الغاز المتبقي فيمر إلى مصفاة إضافية تفصل ما تبقى من سائل ويتم دفع الغاز الخارج من المصفاة بواسطة مروحة تدوير إلى جهاز تسخين ليعاد ويستخدم كمصدر طاقة في الفحم. في حال وجود فائض من الغاز المنتج يتم استجراره عبر وصلة فرعية إلى مستهلك مناسب. تستمر عملية التفحيم لقطع الخشب الكبيرة حوالي 10 إلى 15 ساعة. في أغلب الأحيان لا تحتاج العملية إلى طاقة خارجية مساعدة.

إن معالجة وتفحيم 1000 kg من الخشب تحتاج إلى حوالي 2.75 GJ من الطاقة الخارجية بما في ذلك الطاقة اللازمة للتجفيف وتبلغ القيمة الحرارية للفحم المنتج حوالي 30 MJ/kg .

3-3-3-8 التحويل إلى ميثانول

يعتبر الميثانول CH_3OH أبسط المركبات الكحولية وهو قابل للاستخدام كوقود للسيارات ويمكن الحصول عليه من مزيج غازات التفكك H_2 و CO بنسب ملائمة وبمساعدة مواد منشطة.



تتم العملية عند ضغط منخفض $50 \div 60[\text{bar}]$ أو متوسط $100 \div 150[\text{bar}]$ أو مرتفع $230 \div 360[\text{bar}]$. أما درجة الحرارة عند الضغط المنخفض والمتوسط فتكون $230 \div 260[^\circ\text{C}]$ وعند الضغط المرتفع تكون $300 \div 400[^\circ\text{C}]$.

يُستخدم كموااد منشطة النحاس والزنك والكروم وأكاسيدها.

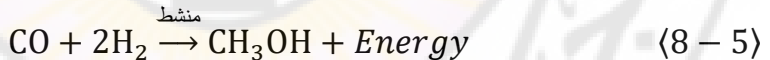
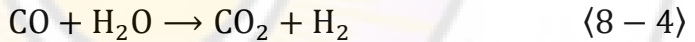
بعد عملية تشكّل الكحول تتم عملية التقطير للحصول على نقاوة تصل إلى 99.5% إذا أردنا مزج الكحول بالبنزين حتى نسبة 15%. لكن الميثانول له سلبيات بالنسبة للبنزين منها:

1- قيمة حرارية دنيا $19.7 [\text{MJ}/\text{kg}]$ مقابل $45.5 [\text{MJ}/\text{kg}]$ للبنزين.

2- لا يمكن إشعاله دون رفع درجة حرارته إلى ما فوق $10[^\circ\text{C}]$.

3- سام ومؤكسد للمعادن.

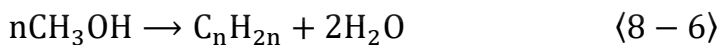
إحدى الطرق المتبعة طحن الأخشاب برطوبة لا تزيد عن 10% وإضافة O_2 وبخار الماء عند ضغط $10[\text{bar}]$ و $950[^\circ\text{C}]$ لتتم عملية التغويز والغاز الناتج وبمساعدة منشط يتم تحويله كما يلي:



يمكن الحصول على $1[\text{ton}]$ ميثانول من $3.3[\text{ton}]$ خشب برطوبة 30% ويصل مردود النظام إلى 48%.

حيث يعادل $1[\text{ton}]$ من الميثانول حوالي $650[\text{Litter}]$ من البنزين. وبعد أخذ الكثافة بالاعتبار فإن $1[\text{Litter}]$ من الميثانول يعادل $0.82[\text{Litter}]$ من البنزين.

يمكن تحويل الميثانول إلى بنزين بمساعدة منشط الزيوليت وبمردود يصل إلى 92.4% وفق المعادلة:



وبعملية تقطير سهلة يتم الحصول على البنزين. يتألف المنتج من 88% بنزين و 12% غاز سائل، وللمنتج مواصفات البنزين الممتاز (أو أوكتان 97) ويمكن استعماله مباشرة.

8-4 طرق التحويل البيولوجي

بواسطة الطرق الترموكيميائية كالحرق والتغويز والتميع يتم تفكيك الكتلة الحية بمساعدة الطاقة الحرارية. على العكس من ذلك فإنّ العمليتين البيوكيماوية أو البيولوجية تتم عند درجات الحرارة المنخفضة بمساعدة العضويات الدقيقة. ويتم الحديث هنا عن التخمير أو التعتين.

من الناحية الطاقة توجد طريقتين رئيسيتين:

- إنتاج البيوغاز أو الغاز الحيوي.
- إنتاج الإيثانول.

تتم العمليتين السابقتين في جو معزول عن الأوكسجين وتسمى عملية التخمير لا هوائية (anaerobic) حيث تتم العملية في وسط مائي (معلق عضوي في وسط مائي). تتم العملية من خلال مراحل متعددة وينتج خلال هذه المراحل مركبات كثيرة ومتنوعة وزيادة نسبة الماء تقلل من سرعة التفاعلات. أما التخمير بإضافة أو تمرير الهواء فتسمى تخمير هوائي (aerobic) وينتج طاقة حرارية مباشرة يمكن استثمارها في حالة أكوام القمامة عن طريق وشائع تبادل حراري داخلها. لا تحتاج الكتلة الحية إلى معالجة مسبقة قبل إدخالها إلى المخمر في حالة إنتاج البيوغاز.

المخمر هو عبارة عن حجرة أو خزان تجري داخله التفاعلات البيولوجية. المنتج عبارة عن غاز ثلثيه ميثان (CH_4) وثلثه (CO_2) ونسبي هذا الغاز غاز حيوي أو بيوغاز قيمته الحرارية حوالي $21.5 [MJ/m^3]$ بينما تتراوح القيمة الحرارية للغاز الطبيعي بين $35 \div 40 [MJ/m^3]$. أما المواد الصلبة المتبقية من عملية التخمير فتشكل سماداً ذو قيم عالية.

إنّ عملية إنتاج الطاقة من التخمير اللاهوائي للمواد العضوية لاسيما مخلفات الحظائر تم اكتشافها منذ القرن السابع عشر، كما أجريت تجارب كثيرة وأبحاث على هذه الطريقة قبل وبعد الحرب العالمية الثانية. لكن الأسعار المناسبة لمصادر الطاقة الأحفورية وسهولة استخدامها والحصول عليها أدى إلى تراجع نشاطات البحث في هذا المجال. واستخدمت هذه التقنية بشكل رئيسي في عمليات معالجة مياه الصرف الصحي.

تقوم العديد من الدول حالياً ببناء أنظمة تخمير لاهوائي لإنتاج الغاز الحيوي في المزارع الريفية كألمانيا والهند والصين والعديد من دول العالم الثالث. ويقدر عدد الوحدات العاملة حالياً بمئات آلاف الوحدات الصغيرة.

ورغم تراجع انتشار هذه التقانات مع انخفاض أسعار البترول يتوقع لها قفزة نوعية مع الارتفاع الكبير في أسعار النفط حالياً.

في عملية إنتاج الإيثانول تُستخدم المواد العضوية ذات المحتوى العالي من السكر أو الكربوهيدرات (النشاء والسليلوز) في عملية التخمير للحصول على الكحول (إيثانول) C_2H_5OH بالإضافة إلى انبعاث CO_2 ، ويتم الحصول على الكحول بعد التخمير بإجراء عملية التقطير. ويتبع في ذلك نفس عملية الحصول على الكحول لأغراض الشرب. ويمكن أن يُشكّل الإيثانول بديلاً للبنزين في محركات الاحتراق الداخلي.

تقوم بعض الدول حالياً بإضافة ما نسبته حوالي 20% من الإيثانول إلى البنزين في إطار برنامج لاستخدامه سعياً لاستبدال البنزين به.

أكبر البرامج في هذا الإطار تتبعه البرازيل ومن سلبيات هذا البرنامج مضاربه وتأثيره على إنتاج السلع الغذائية لاسيما السكر والمنتجات الزراعية الأخرى. لهذا السبب يُعتبر برنامج كهذا غير مرغوب لدى العديد من الدول ولا تتصح به المؤسسات الدولية.

8-4-1 إنتاج الغاز الحيوي

في عملية التخمير اللاهوائي (التخمير الميثاني) تقوم مجموعات متعددة ومتنوعة من الجراثيم بالعمل معاً وبعمليات متبادلة أحياناً ومعقدة لتحويل المادة العضوية وبغياب الأوكسجين إلى غاز حيوي هو عبارة عن مزيج من الميثان وثنائي أوكسيد الكربون كما ذكرنا:



ويُعتبر الميثان الناتج ذو قيمة أعلى بكثير (من الناحية الطاقية) من الطاقة الحرارية المنتجة من عملية التخمير الهوائي (aerobic).

إنّ تشكيل الميثان من المخلفات العضوية يتم على ثلاثة مراحل. تُمثّل المرحلة الأولى والثانية خطوات تحضيرية لتشكيل وانبعاث الميثان الذي يتم في المرحلة الثالثة فقط. في كل مرحلة من مراحل التخمير تعمل مجموعة مختلفة من البكتيريا التي تتكاثر أثناء عملية التخمير. أما المراحل الثلاث فهي:

1. مرحلة تشكيل الحموض أو الهدرجة (Hydrolyse).

2. مرحلة تفكك الحموض.

3. مرحلة تشكّل الميتان.

التفاعلات الحاصلة خلال المراحل المختلفة معقدة جداً ويمكن وصفها فقط على شكل تخطيطي.

1- مرحلة تشكّل الحموض (Hydrolyse):

في هذه المرحلة يتم تفكيك المركبات العضوية المؤلفة من بروتينات ودهون وكربوهيدرات بوجود ومساعدة الماء. حيث تتم عملية تفكيك الجزيئات العضوية المعقدة بإدخال جزيئات الماء إليها لتصبح جزيئات بسيطة. يتم تسريع عملية التفاعل بواسطة الأنزيمات التي تفرزها البكتيريا.

وتنتج المركبات التالية:

الدهون ← أحماض دهنية.

البروتينات ← أحماض أمينية.

الكربوهيدرات ← سكر.

أما الجزيئات العضوية البسيطة المتشكلة فتتابع بكتريا التخمر تفكيكها إلى منتجات مرحلية متعددة أهمها:

• H_2, H_2O, CO_2, NH_4 .

• حمض الخل (CH_3COOH) .

• كحول وأحماض عضوية أخرى.

بعضهم يرى أنّ المرحلة الأولى يمكن تقسيمها إلى مرحلتين هدرجة وإمالة كمرحلة أولى، ثم تخمير كمرحلة ثانية.

2- المرحلة الثانية (تفكيك الأحماض):

في هذه المرحلة يتم تفكيك الكحول والأحماض العضوية بمساعدة جراثيم الخل (Bac. Acetogene) إلى المنتجات التالية:

• H_2O, CO_2, H_2 .

• حمض الخل (CH_3COOH) .

وَمُنتَج التخمير هو حمض الخل.

3- المرحلة الثالثة (مرحلة تشكيل الميثان):

في هذه المرحلة تعمل جراثيم التخمير الميثاني على تفكيك حمض الخل الناتج بعد المرحلتين الأولى والثانية وإنتاج الميثان.

تسير العمليات الثلاث للتخمير (اللاهوائي) جنباً إلى جنب بحيث تخدم منتجات التفكك من مرحلة ما جراثيم المرحلة التي تليها كمادة غذائية لها. البكتريا لكل مرحلة عبارة عن مجموعات متنوعة تستطيع الاستفادة من المركبات العضوية المتاحة لها لتتغذى عليها مُنتجة مركبات جديدة. وبذلك تتعاون المجموعات من المراحل المختلفة للحفاظ على استقرار تركيبي معين، ومنع التأثيرات الخارجية لحد ما حتى تتم عملية التخمير بشكل كامل. يحتوي الغاز الحيوي المنتج على كميات ضئيلة من الهيدروجين والأمونياك وكبريت الهيدروجين H_2S .

❖ العوامل المؤثرة على عملية التخمير اللاهوائي:

إنَّ الحصول على أكبر كمية من الغاز الحيوي يتعلق بشكل كبير بالعوامل التالية:

1. نوع البقايا العضوية.
2. نسبة المادة الجافة في المواد العضوية.
3. درجة الحرارة.
4. زمن التخمير (فترة بقاء المادة العضوية في المخمر).
5. درجة الحموضة (قيمة PH).
6. تغذية المخمر.

1. نوع المادة العضوية:

المواد الأساسية المستخدمة لإنتاج الغاز الحيوي هي مخلفات الحظائر، النفايات النباتية ومخلفات الصناعات الغذائية وحماة محطات معالجة مياه الصرف الصحي، وكلها تحتوي مواداً قابلة للتفكك من بروتينات ودهون وكربوهيدرات (سكر، نشاء، سيليلوز). من هذه المركبات الثلاثة يمكننا الحصول على كميات متفاوتة من الغاز الحيوي حسب الجدول (5-8).

الجدول (5-8) كمية الغاز الناتج لواحد كيلو غرام من المادة الجافة

نوع المركبة العضوية	كمية الغاز الناتج لواحد كيلو غرام من المادة الجافة [Litter]	CH ₄ [%]	CO ₂ [%]
بروتين	700	70	30
دهون	1200	67	33
كربوهيدرات	800	50	50

يُشكّل بول الحيوانات مادة ممتازة لإنتاج الغاز. بينما يرافق إنتاج الغاز من الروث الصلب الممزوج بالقش وبقيايا العلف صعوبات تقنية ملحوظة، تُعتبر النواتج الأخيرة المتبقية من عملية التخمير ذات أهمية خاصة للزراعة وتُعتبر سماداً متكاملًا ممتازاً. يبين الجدول (6-8) كميات وخواص مخلفات المزارع المختلفة حسب نوع الحيوان.

يلاحظ أنّ الإنتاج الممكن من الغاز الحيوي من [1kg] من الروث الجاف أقل بكثير من الإنتاجية لـ [1kg] من أحد المركبات الأساسية المنتجة للغاز (بروتين - دهون - سكريات) وذلك لأنّ مخلفات الحيوانات تحتوي على مركبات أخرى لا تتفكك، وتبلغ نسبة المادة العضوية القابلة للتفكك في مخلفات الأبقار مثلاً حوالي 51% وفي مخلفات الطيور تبلغ 59% أما في مخلفات الخنزير فتبلغ 61%.

الجدول (6-8) كميات وخواص مخلفات المزارع المختلفة حسب نوع الحيوان

نوع الحيوان ←	المواصفة ↓	بقرة	عجول	عجول	أغنام	خيول	إنس	دجاج	دجاج	إوز
		حلوب	تسمين كبيرة	تسمين متوسط			ان	بيض	تسمين	كبير
وزن الحيوان [kg]		450	450	200	30	380	68	2.3	1.5	6.8
الطرح اليومي [kg/d]		50	40	15	2.3	23	1.4	0.11	0.05	0.22
نسبة الروث %		70	70	70	66	70	20	-	-	-
نسبة البول %		30	30	30	34	30	80	-	-	-
كمية المادة العضوية الجافة [kg _{odm} /d]		5	4	1.5	0.3	4	0.1	0.036	0.03	0.07
إنتاجية الغاز [L _{gas} /d]		1500	1200	450	105	1200	40	14.4	12	28
إنتاجية الغاز L _{gas} /kg _{odm}		300	300	300	350	300	400	400	400	400
نسبة الميثان %		60	60	60	65	60	70	70	70	70
القيمة الحرارية [MJ/m ³ _{gas}]		20	20	20	21	20	23	23	23	23
نسبة المخلفات إلى الوزن الحي %		11	8.9	7.5	7.5	6	2	5	3.3	3.3

يعطي تخمير المخلفات الزراعية إنتاجية من الغاز منسوبة إلى 1[kg] من المادة العضوية الجافة أكبر من روث الحيوانات. والجدول (7-8) يعطي تصور عن هذه الإنتاجية.

الجدول (7-8) إنتاجية الغاز الحيوي من بعض المخلفات الزراعية

المادة	إنتاجية الغاز الحيوي [l/kg _{odm}]	فترة التخمير المطلوبة بالأيام
قش القمح	367	78
الجزء الخضري للشمندر السكري	501	14
الجزء الخضري للبطاطا	606	53
الجزء الخضري للذرة	514	52
الأعشاب	557	25

لا يُستخدم الخشب في عملية إنتاج البيوغاز أما القش فبكميات محدودة.

تُعتبر مخلفات الصناعات الغذائية جيدة جداً لإنتاج الغاز الحيوي كبقايا المسالخ وبقايا صناعة المشروبات والكونسروة.

في محطات معالجة مياه الصرف الصحي حيث ينتج الغاز بشكل عرضي، وتجرى عملية التخمير لتنظيف المياه من حيث المبدأ، يمكن استثمار الغاز الحيوي الناتج وهذا يحدث في حالات كثيرة.

توجد سلسلة من المواد المضادة للبكتيريا والتي تعرقل عملية التخمير وأهمها:

- المعادن الثقيلة في حمأة محطات معالجة مياه الصرف الصحي.
- مواد تعقيم الحظائر.
- المضادات الحيوية المستخدمة في معالجة الحيوانات.

ويجب الانتباه إلى ضرورة خلو مخمرات البيوغاز من هذه المواد.

2. محتوى المادة العضوية من الكتلة الجافة

إنَّ التركيب المثالي للخليط في المخمر هو بين 10% ÷ 3 مادة جافة ويتم الوصول إلى هذه النسبة بإضافة الماء.

انخفاض تركيز المادة الجافة العضوية Odm كثيراً ينعكس على حجم المخمر وعلى الكلفة التأسيسية.

عند التركيز العالي للمادة العضوية الجافة يزداد إنتاج البيوغاز. ولكن يحذر في هذه الحالة من نشوء مواد سامة قاتلة للعضويات الدقيقة بسبب تراكم وزيادة نسبة بعض مركبات التفكك.

3. درجة الحرارة

توجد مجموعتان من البكتيريا المشكّلة للميثان لكل منها درجات حرارة مناسبة وضرورية للنمو وهي:

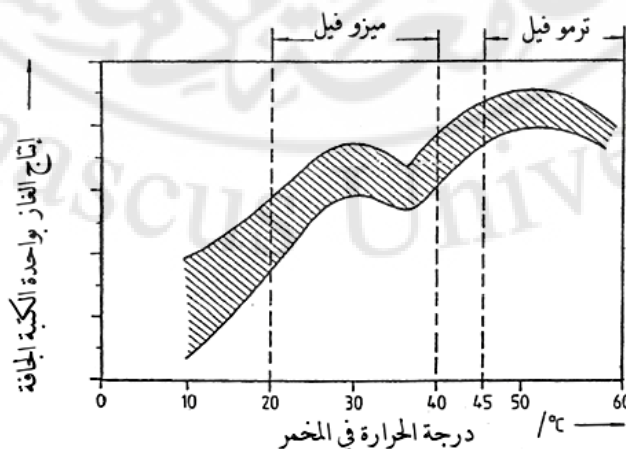
- بكتيريا ميزوفيلية: تنمو بدرجات حرارة تتراوح بين $20 \div 40^{\circ}\text{C}$.
- بكتيريا ترموفيلية: تنمو بدرجات حرارة تتراوح بين $45 \div 60^{\circ}\text{C}$.

وكل مجموعة تحتاج إلى ثلاثة أنواع من البكتيريا (بكتيريا التخمر وبكتيريا الخل وبكتيريا إنتاج الميثان).

يجب المحافظة على درجة حرارة ثابتة ما أمكن داخل المخمر (المفاعل البيولوجي) لأنّ البكتيريا تكون حساسة جداً لتغير درجات الحرارة. إنّ تعبئة المخمر بمواد باردة أو وجود طبقات بدرجات حرارة مختلفة أو عدم تأمين عزل كافٍ للمخمر يمكن أن ينعكس كل ذلك سلباً على أداء المخمر وعلى إنتاج الغاز.

تُعتبر الميكروبات الترموفيلية أكثر حساسية لتغيرات الحرارة، ومع ارتفاع درجة الحرارة يصبح إنتاج الغاز أفضل. درجة الحرارة الأكثر مناسبة للمجال الميزوفيلي هي 30°C وللجال الترموفيلي هي 50°C .

من سلبيات المجال الترموفيلي حاجة المخمر لاستهلاك كمية من الغاز للحفاظ على درجة الحرارة المطلوبة. ويمكن تقادي ذلك جزئياً بتأمين عزل جيد للمخمر.



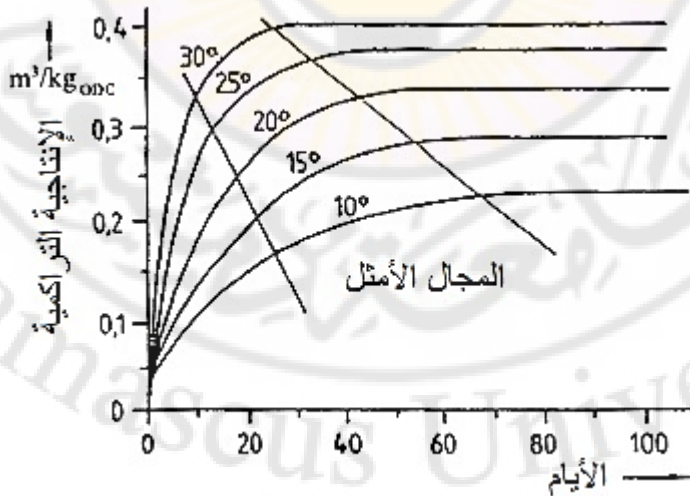
الشكل (8-9) تأثير درجات الحرارة على إنتاج الغاز

4. زمن التخمير (فترة بقاء المادة العضوية في المخمر)

فترة التخمير الأكثر مناسبة تتعلق بشكل وثيق بدرجة الحرارة. يبين الشكل (8-10) هذه العلاقة للبكتيريا الميزوفيلية حيث يزداد إنتاج الغاز بشكل مضطرب في البداية ومع مرور الوقت تصل إلى قيمة شبه ثابتة (القيمة العظمى). وبعد فترة يصبح من غير المجدي انتظار إنتاج مزيد من الغاز.

للـبكتيريا الميزوفيلية بدرجات حرارة 30°C يتراوح عدد أيام التخمير الأنسب بين 25 ÷ 20 يوماً أما البكتيريا الترموفيلية التي لم تلاحظ في الشكل (8-10) تحتاج لإنهاء التخمير من 10 ÷ 3 أيام فقط أي أنها تنتج كمية كبيرة من الغاز في وقت قصير. بقايا التخمير وبعد فترة تخمير طويل نسبياً تصبح خالية من الجراثيم الممرضة وبلا رائحة وتعتبر سماد عضوي ممتاز.

يبين الشكل (8-10) أن درجة الحرارة السائدة في المخمر هي التي تحدد فترة التخمير المناسبة، فعند درجة حرارة 30°C تكفي 20 يوماً وأي فترة تخمير إضافية تكون دون فائدة تذكر، بينما تكون فترة التخمير المناسبة عند درجة حرارة 15°C حوالي 50 يوماً أو أكثر.



الشكل (8-10) الإنتاجية التراكمية للغاز الحيوي لكل 1[kg] من المركبات العضوية الجافة كتابع لدرجة الحرارة و فترة التخمير

5. درجة الحموضة (قيمة PH)

الإنتاج الأمثل للغاز يكون عند درجة حموضة PH في المجال $6.5 \div 7.2$.

6. تغذية المخمر

تعمل أنظمة إنتاج الغاز الحيوي بشكل مستمر. ولذلك يجب تغذيتها يومياً بكمية من الكتلة العضوية كما يجب انتزاع كمية مقابلة من نواتج التخمر.

إن من المؤشرات الهامة للأنظمة العاملة بشكل مستمر هو درجة تحميل المخمر فراغياً R_b . ودرجة التحميل تعني كمية الكتلة العضوية الجافة اليومية التي يمكن إضافتها يومياً إلى كل $1[m^3]$ من الحجم الفعّال للمخمر.

$$R_b = \frac{\dot{m}_{Biomass} \cdot C_{Odm}}{V_R} \left[\frac{kg/day}{m^3} \right] \quad (8-8)$$

$\dot{m}_{Biomass}$: الكتلة العضوية المضافة يومياً $[kg/day]$.

C_{Odm} : تركيز المادة الجافة في كتلة التغذية $[kg/kg]$.

V_R : الحجم الفعّال للمخمر $[m^3]$.

وإذا كان المخمر ممتلئ عندها $V_R = V_{biomass}$.

$V_{biomass}$: حجم المواد المتخمرة في المخمر.

أما C_{Odm} فهي:

$$C_{Odm} = \frac{m_{Odm}}{m_{Biomass}} = \frac{V_{Odm} \cdot \rho_{Odm}}{V_{Biomass} \cdot \rho_{Biomass}} \quad (8-9)$$

حيث:

ρ : الكثافة $[kg/m^3]$.

يمكن تعريف فترة بقاء المادة العضوية في المخمر t_{vw} بالأيام على الشكل التالي:

$$t_{vw} = \frac{m_{biomass}}{\dot{m}_{biomass}} \quad (8-10)$$

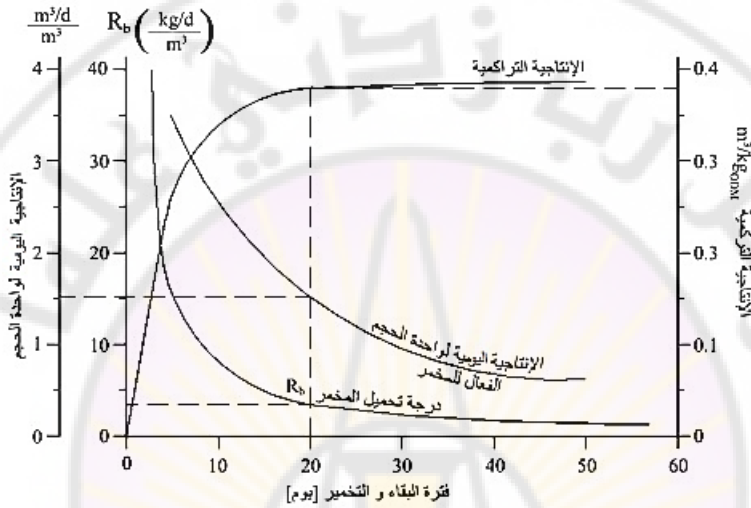
بالتعويض واعتبار $V_R = V_{biomass}$ ينتج:

$$\Rightarrow t_{vw} = \frac{\rho_{Biomass} * V_R}{R_b * V_R / C_{Odm}}$$

أو:

$$t_{vw} = \rho_{\text{Biomass}} \cdot \frac{C_{\text{Odm}}}{R_b} \quad (8-11)$$

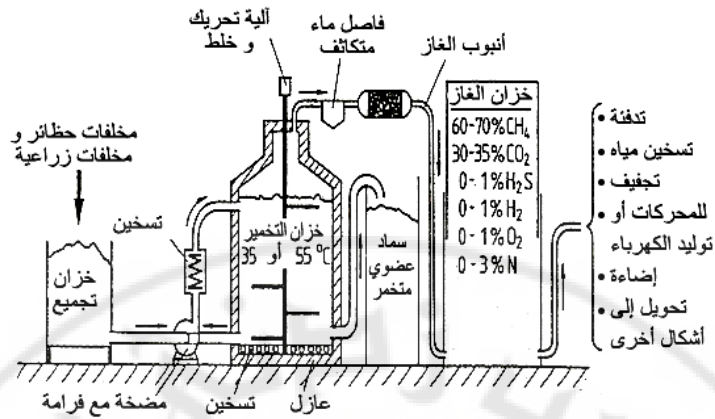
نلاحظ أنه مع انخفاض درجة تحميل المخمر R_b تزداد الفترة اللازمة للتخمير. يبين الشكل (8-11) العلاقة بين مؤشرات وبارامترات عملية التخمير.



الشكل (8-11) العلاقة بين مؤشرات وبارامترات عملية التخمير

8-4-2 إنشاء وحدات إنتاج الغاز الحيوي:

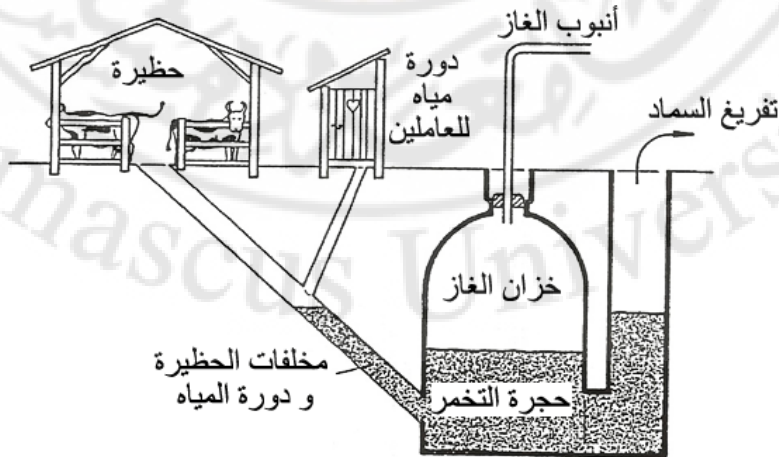
يبين الشكل (8-12) رسم تخطيطي لبنية وحدة إنتاج غاز حيوي ذات أداء مستمر. تختلف وحدات إنتاج الغاز الحيوي الموجودة في التطبيق من حيث طريقة التنفيذ وبالتالي من حيث العناصر والبنية ولكنها تشترك بالمبدأ وبالعناصر الأساسية المؤلفة من المخمر وخزان الغاز وخزان التغذية أو المجمع. في المخطط المبين في الشكل (8-12) يتم تجميع مخلفات الحظائر والمخلفات الزراعية في خزان تجميع أولي، وبواسطة مضخة مزودة بفرامة يتم تغذية المخمر، وللحفاظ على درجة حرارة مناسبة يمكن تزويد الدارة بمبادل حراري ويجب عزل المخمر. ولزيادة فاعلية التخمير ومنع حصول تسربات تؤذي الإنسان يزود المخمر بآلية عزل المخمر. ولزيادة فاعلية التخمير ومنع حصول ترسبات تؤدي إلى الانسداد يزود المخمر بآلية خلط وتحريك.



الشكل (8-12) مخطط وحدة إنتاج غاز حيوي بأداء مستمر

تخرج بقايا التخمير الصلبة والسائلة والتي تُمثّل سماداً عضوياً جيداً من أسفل المخمر إلى خزان تجميع ويتم تفريره حسب الحاجة. أما الغاز المنتج فينطلق من أعلى المخمر إلى خزان الغاز المناسب. يساعد فاصل ماء التكاثف والفيلتر على الحصول على نوعية أفضل من الغاز.

يبين الشكل (8-13) مخططاً لوحدة إنتاج غاز حيوي لمنزل ريفي أو مزرعة صغيرة ذات بنية بسيطة جداً، حيث يخرج السماد مع الماء من أسفل حجرة التخمير، بينما ينطلق الغاز إلى القسم العلوي من المخمر الذي يُمثّل خزان غاز، بينما يُمثّل الجزء السفلي من المخمر حجرة التخمير. ويمكن الاستفادة من الغاز المنطلق للاستخدام المنزلي. أما نواتج التخمير الصلبة والسائلة فتستخدم في الزراعة للري وكسماد جيد.



الشكل (8-13) وحدة إنتاج غاز حيوي لمنزل ريفي مع حظيرة

8-4-3- إنتاج الإيثانول:

إنّ مبدأ الحصول على الإيثانول هو نفس مبدأ إنتاج المشروبات الكحولية وهو تخمير السكر أو المحاليل السكرية للنباتات (التي تحتوي السكر) تخميراً لاهوائياً وذلك بمساعدة العضويات اللاهوائية الدقيقة في شكل خمائر للحصول على الكحول C_2H_5OH :

يوجد ثلاثة أنواع من المواد العضوية المناسبة لإنتاج الإيثانول:

1. المواد العضوية السكرية (الحاوية على السكر).

2. المواد العضوية النشوية (الحاوية على النشاء).

3. المواد العضوية السيللوزية (الحاوية على السيللوز).

باختصار يمكن إنتاج الكحول من المركبات الكربوهيدراتية كما في الجدول (8-8).

أما إنتاجية المحاصيل النباتية المختلفة من الإيثانول فيبينها الجدول (8-9).

الجدول (8-8) أنواع المواد العضوية المناسبة لإنتاج الإيثانول

المواد العضوية السكرية	المواد العضوية النشوية	المواد العضوية السيللوزية
قصب السكر	ذرة	الخشب
الشمندر السكري	قمح	القش
بعض الأعلاف	بطاطا	

إنّ إنتاج الإيثانول من النشاء والسيللوز يختلف عن إنتاجه من السكر، حيث يحتاج السيللوز والنشاء إلى عمليات تحضير أولية كي تتفكك إلى سكر. أما تخمر السكر وتحوله إلى كحول فيتم بشكل مبسط من المعادلة التالية:



ثاني أكسيد الكربون + إيثانول → سكر

$$100kg \rightarrow 51kg + 49 kg$$

الجدول (8-9) إنتاجية المحاصيل النباتية من الإيثانول

نوع الكتلة العضوية	المحصول السنوي t/ha	المحتوى من السكر والنشاء %	إنتاجية الكحول %	إنتاجية وحدة المساحة من الإيثانول t/ha	إنتاجية وحدة المساحة من الإيثانول l/ha
شمندر سكري	51÷34	15	8	2.7÷4.1	33÷5125 75
قمح	6.3÷3.6	60	32	1.2÷2.1	15÷2625 20
بطاطا	33÷20	14	7	1.4÷2.3	17÷2890 50
قصب السكر	70÷56	12.5	6	3.1÷4.9	38÷6125 75
الخشب	6÷5	-	15	0.75÷0.9	940÷1125

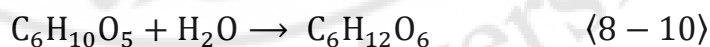
يوجد ثلاث أنواع من السكر :

➤ سكر العنب (الغلوكوز) $(C_6H_{12}O_6)$.

➤ سكر الفواكه (فركتوز) $(C_6H_{12}O_6)$.

➤ سكر القصب أو الشمندر (سكروز) $(C_{12}H_{22}O_{11})$.

أما النشاء ذو الصيغة $(C_6H_{10}O_5)$ يتم تحويلها بالإمهاء إلى سكر عنب، ثم تخمر إلى كحول. وتحصل الإمهاء وفق العلاقة:

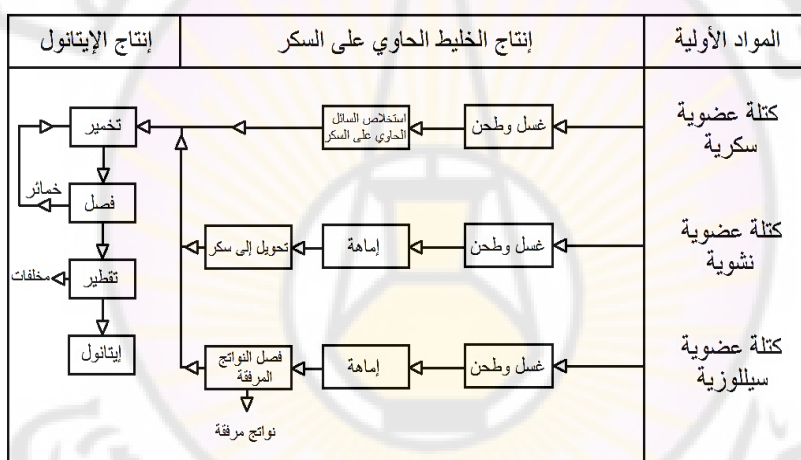


سكر عنب → ماء + نشاء

يبين الشكل (8-14) مخططاً للخطوات الرئيسية للعملية الإنتاجية انطلاقاً من مركبات سكرية ونشوية وسيللوزية. يتم استخلاص السائل الحاوي على السكر من النباتات السكرية لينتج السكر لاحقاً وهي طريقة متبعة على نطاق واسع منذ زمن بعيد في معامل السكر. أما النباتات النشوية فيستخلص منها النشاء. وبما أن النشاء لا يذوب في الماء البارد،

يضاف الماء الساخن وتحصل عملية الإماهة وتتفكك جزيئات النشاء ونحصل في النهاية على سكر العنب. يخمر السكر بإضافة الخمائر (في مخمرات مناسبة) وفي النهاية يتم الحصول على الإيثانول كمنتج نهائي من عملية تقطير.

يرافق إنتاج الإيثانول من السيللوز صعوبات كثيرة، وغالباً تتم الإماهة بإضافة الأحماض المناسبة، حيث يتم تحويل حوالي 40% من الكتلة العضوية الجافة إلى سكر يخضع بعدها للتخمير. أما النواتج المتبقية (حوالي 60%) فيتم فصلها واستخدامها في الصناعات الكيميائية. تحدث عملية التخمير في مخمرات خاصة (عملية تخمر لاهوائي) ويستفاد من الخمائر المفصولة من الخليط بعد التخمير في تأمين عملية تخمير مستمرة وبالتالي عملية إنتاج مستمرة وذلك عن طريق إعادتها إلى المخمر من جديد.



الشكل (8-14) مخطط مبسط لإنتاج الإيثانول من مواد كربوهيدراتية مختلفة

✓ عملية التخمير والعوامل التي تحدد جودتها:

1. محتوى السكر.
 2. درجة حرارة التخمير.
 3. درجة الحموضة PH.
 4. تركيز الخمائر.
 5. زمن التخمير.
- ويجب اختيار هذه العملية لتأمين بيئة مثالية للخمائر.

1- محتوى السكر:

يحبذ أن يكون تركيز السكر بين 18% ÷ 10. وأي تركيز أعلى يعيق عملية التخمير.

2- درجة حرارة التخمير:

درجات الحرارة المناسبة تقع بين $30 \div 40 [^{\circ}\text{C}]$. ونظراً لطرح الحرارة أثناء عملية التخمير يتم عادة تبريد وعاء التخمير. عند درجات حرارة أعلى تتشكل الرغوة وتفقّد كمية من الكحول.

3- درجة الحموضة PH:

تعيش الخمائر في وسط تتراوح درجة PH فيه بين $3 \div 6$ أما درجة PH الأكثر ملائمة فهي 4 أو أكثر بقليل.

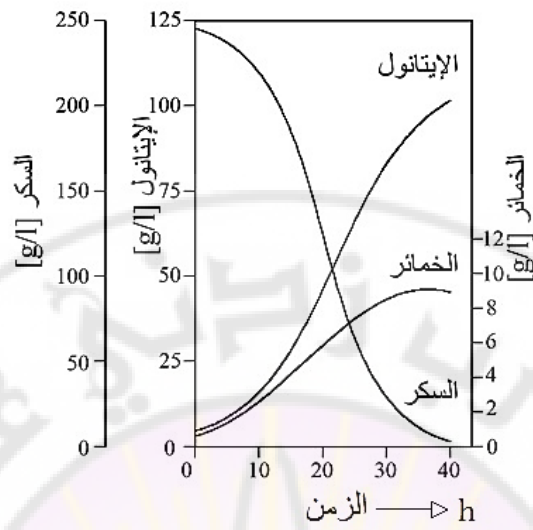
4- تركيز الخمائر:

إنّ التركيز المستقر للخمائر في أنظمة التخمير العاملة بشكل مستمر يتراوح بين $40 \div 60 \text{ [g/l]}$. تتكاثر الخمائر في المخمر بشكل هوائي، وبالتالي لتأمين توفر الخمائر بكمية مناسبة يجب حقن المخمر بالهواء بين الفينة والأخرى.

5- زمن التخمير:

تسعى عمليات الإنتاج الحديثة إلى التقليل من زمن التخمير حيث يسود زمن تخمير في المخمرات العادية يتراوح بين $36 \div 48$ ساعة، بينما في الطرق الحديثة يكفي من $5 \div 1$ ساعات.

يبين الشكل (8-15) سير عملية التخمير خلال زمن التخمير حيث تتزايد كمية الكحول في البداية بشكل سريع لتبدأ بالاستقرار في عملية التخمير العادي بعد $30 \div 40$ ساعة. وتقل نسبة السكر أيضاً بنفس السرعة. أما كمية الخمائر فتزداد بسرعة في البداية لتبلغ حد أعظمي لتعود لتتخفّض مع طول عملية التخمير.



الشكل (8-15) سير عملية التخمير في مخمر مستمر (عادي) لإنتاج الإيثانول



مسائل:

مسألة (1):

في مزرعة تحوي 50 بقرة حلوب و 100 عجل تسمين نصفها كبير ونصفها متوسط بالإضافة لدجاج عدد 1000 نصفها دجاج بيض والنصف الآخر دجاج تسمين.

يراد بناء مخمر لا هوائي لمعالجة مخلفات المزرعة وإنتاج الغاز الحيوي.

أوجد حجم المخمر الفعال V_R اللازم ودرجة التحميل R_B وكذلك الإنتاج اليومي من الغاز الحيوي عند الأداء المستقر لعمل المخمر V_{gd} علماً بأن درجة الحرارة في المخمر هي $30[^\circ\text{C}]$ بشكل دائم ونسبة المادة العضوية الجافة في خليط التغذية للمخمر هي $C_{ODM} = 8\%$ (نسبة تركيز المادة العضوية الجافة).

الحل:

لإيجاد المطلوب يجب أولاً تحديد كميات ومواصفات الطرح اليومي من حيوانات المزرعة. ثم تحديد كمية الماء الواجب إضافته للحصول على خليط التغذية المناسب للمخمر وتحديد مواصفات هذا الخليط.

الطرح اليومي لحيوانات المزرعة $S_T = \sum S_i \cdot n_i [kg/d]$

حيث:

S_T : الطرح اليومي لحيوانات المزرعة.

S_i : الطرح اليومي للحيوان i بـ $[kg/d]$.

n_i : عدد الحيوانات من النوع i .

n_1 : عدد الأبقار الحلوب.

n_2 : عدد عجول التسمين الكبيرة.

n_3 : عدد عجول التسمين المتوسطة.

n_4 : عدد دجاج البيض.

n_5 : عدد دجاج التسمين.

نجد S_i من جدول مواصفات طرح الحيوانات.

$$S_T = (50 \times 50) + (40 \times 50) + (15 \times 50) + (0.11 \times 500) + (0.05 \times 500)$$

$$= 2500 + 2000 + 750 + 55 + 25 = 5330 [kg/d]$$

الطرح اليومي لحيوانات المزرعة من الكتلة العضوية الجافة:

$$S_{T,ODM} = \sum S_{ODM,i} \cdot n_i [kg/d]$$

$$= (5 \times 50) + (4 \times 50) + (1.5 \times 50) + (0.036 \times 500) + (0.03 \times 500)$$

$$= 250 + 200 + 75 + 18 + 15 = 558 [kg/d]$$

حيث:

$S_{ODM,i}$: الطرح اليومي للحيوان i من الكتلة العضوية الجافة $[kg/d]$.

لتحديد مواصفات خليط التغذية نحدد أولاً كمية الرطوبة في المخلفات:

$$W_{ST} = 5330 - 558 = 4772 [kg/d]$$

ثم نحدد خليط التغذية اليومي:

$$\dot{V}_{Biomass} = \frac{\dot{m}_{Biomass}}{\rho_{Biomass}} [m^3/d]$$

لكن $\rho_{Biomass}$ كثافة خليط التغذية اليومي مساوية تقريباً لكثافة الماء بسبب النسبة المتدنية للمادة العضوية الجافة أي: $\rho_{Biomass} = 1000 [kg/m^3]$.

ومنه:

$$\dot{V}_{Biomass} = \frac{6975}{1000} = 6.975 \approx 7 [m^3/d]$$

كمية الماء الواجب إضافته:

$$W_d = \dot{m}_{Biomass} - S_T = 6975 - 5330 = 1645 [kg/d]$$

بما أنّ درجة حرارة المخمر $30[^\circ C]$ بشكل دائم تكون الفترة اللازمة للتخمير هي 25 يوماً كحد أقصى ويكون الحجم الفعال للمخمر:

$$V_R = t_{vw} \times \dot{V}_{Biomass} = 25 \times 7 = 175 [m^3]$$

أما درجة تحميل المخمر تُحسب كما يلي:

$$R_B = \frac{S_{T,ODM}}{V_R} = \frac{558}{175} = 3.2 \text{ [kg/m}^3 \cdot \text{d]}$$

حيث:

t_{vw} : فترة التخمير (يوم).

$\dot{V}_{Biomass}$: حجم خليط التغذية اليومي.

$S_{T,ODM}$: وزن المادة العضوية الجافة في خليط التغذية اليومي.

أما الإنتاج اليومي من الغاز بعد استقرار عمل المخمر فهو نفس إنتاجية الغاز لكتلة التغذية اليومية والتي يمكن حسابها من العلاقة التالية بعد العودة إلى جدول مواصفات الطرح اليومي للمزرعة.

$$V_{gd} = \sum n_i \cdot S_{ODM,i} \cdot V_{g,ODMi}$$

حيث:

n_i : عدد الحيوانات من النوع i .

$S_{ODM,i}$: الطرح اليومي للحيوان i من الكتلة العضوية الجافة $[kg/d]$.

$V_{g,ODMi}$: إنتاجية الغاز لواحدة الكتلة العضوية الجافة للحيوان i بـ $[m^3]$.

$$V_{gd} = (50 \times 5 \times 0.3) + (50 \times 4 \times 0.3) + (50 \times 1.5 \times 0.3) + (500 \times 0.036 \times 0.4) + (500 \times 0.03 \times 0.4)$$

$$= 75 + 60 + 225 + 7.2 + 6 = 170.7 \text{ [m}^3/d]$$

أما القيمة الحرارية للإنتاج اليومي فتبلغ:

$$\dot{Q}_d = 170.7 \times 21.5 = 3670 \text{ [MJ/d]}$$

$$\frac{3670}{3.6} \approx 1000 \text{ [kW.h]}$$

أي ما يقارب المحتوى الحراري لـ 100 [L] من المازوت.

مسألة (2):

يُراد بناء مخمر لا هوائي لإنتاج الغاز الحيوي من مخلفات مزرعة لتربية الحيوان تطرح يومياً $S_T = 2000 [kg/d]$ مخلفات ذات كثافة مادة عضوية $C'_{ODM} = 15\%$ ومحتوى نوعي للغاز الحيوي $V_g = 400 [l/kg_{ODM}]$. ليعمل عند درجة حرارة $T = 30[^\circ C]$

$$C_{ODM} = 0.1 \quad \rho_{Biomass} = 1000 [kg/m^3]$$

المطلوب:

1. اشرح العوامل المؤثرة على عملية التخمير اللاهوائي.
2. أوجد الحجم الفعال للمخمر اللازم وكمية الماء الواجب إضافتها يومياً.
3. احسب درجة التحميل وكمية الغاز المنتجة يومياً.

الحل:

حساب الحجم الفعال للمخمر:

الحجم الفعال للمخمر يساوي إلى حجم الكتلة العضوية طيلة فترة التخمير أي:

$$V_R = V_{bio}$$

$$V_{bio} = \frac{\dot{m}_{bio}}{\rho_{Biomass}} \tau_{vw}$$

فترة التخمير المناسبة من أجل $T = 30[^\circ C]$ هي $\tau_{vw} = 20 [days]$.

أما كتلة التغذية اليومية فنجدها على النحو التالي:

نجد أولاً محتوى المخلفات من المادة العضوية الجافة.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{bio} &= S_T \times C'_{ODM} \\ &= 0.15 \times 2000 = 300 [kg/d] \end{aligned}$$

ثم نجد معدل التغذية اليومية للمخمر:

$$\dot{m}_{bio} = \frac{\dot{m}_{bio}}{C_{ODM}} = \frac{300}{0.1} = 3000 [kg/d]$$

$$\dot{V}_{bio} = \frac{3000}{1000} = 3 [m^3/d]$$

ويكون الحجم الفعال للمخمر:

$$R_B = \frac{\dot{m}_{ODM}}{V_R} = \frac{300}{60} = 5$$

كمية الماء الواجب إضافتها:

$$\dot{m}_w = 3000 - 2000 = 1000 [kg/d]$$

كمية الغاز المنتجة يومياً:

$$\begin{aligned} V_{gd} &= \dot{m}_{ODM} \times V_g = 300 \times 400 = 120000 [l/d] \\ &= 120 [m^3/d] \end{aligned}$$

مسألة (3):

أولاً: مرجل لتسخين الماء باستخدام الخشب كوقود ينتج ماءً ساخناً بمعدل $\dot{m}_w = 1 [kg/s]$ عند فرق في درجات حرارة الماء الداخل والخارج $\Delta T_w = 50^\circ C$.

المطلوب:

1. إيجاد الاستطاعة المفيدة للمرجل.
2. إيجاد معدل استهلاك الخشب علماً أن: القيمة الحرارية للمادة الجافة $H_{UDC} = 20 [MJ/kg]$ ، نسبة الرطوبة في الخشب $x=0.2$ ومردود المرجل $\eta_b = 0.7$.

ثانياً: مخمر لا هوائي درجة التخميل فيه $R_b = 4 [kg/m^3 \cdot day]$ ومعدل التغذية اليومية من الكتلة العضوية $\dot{m}_{biomass} = 5000 [kg/day]$ ،
 $C_{odm} = 8\%$ ، $\rho_{biomass} = 1000 [kg/m^3]$

المطلوب:

- 1- أوجد الحجم الفعال للمخمر.
- 2- أوجد فترة بقاء المادة العضوية في المخمر.

الحل:

- 1- الاستطاعة المفيدة للمرجل.

$$N_N = \dot{m}_w \cdot C_w \cdot \Delta T_w$$

$$= 1 \times 4.18 \times 50 = 209 [kW]$$

استطاعة المرجل.

$$N_b = \frac{N_N}{\eta_b} = \frac{209}{0.7} = 299 [kW]$$

2- القيمة الحرارية للخشب.

$$H_U = (1 - x)H_{UDC} - (x \times 2440) \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$= 0.8 \times 20 \times 10^3 - (0.2 \times 2440) = 15512 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

معدل استهلاك الخشب.

$$\dot{m}_{wood} = \frac{N_b}{H_U} = \frac{299}{15512} = 19.28 \times 10^{-3} \left[\frac{kg}{s} \right] = 69.4 \left[\frac{kg}{h} \right]$$

ثانياً: المخمر.

1- الحجم الفعال للمخمر.

$$V_R = \frac{\dot{m}_{bio}}{R_b} C_{odm}$$

$$= \frac{5000 \times \frac{8}{100}}{4} = 100 [m^3]$$

2- فترة التخمر.

$$\frac{V_R}{\tau} = \dot{V}_{bio}$$

$$\tau = \frac{V_R}{\dot{m}_{biomass} / \rho_{biomass}} = \frac{100}{5000/1000} = 20 [days]$$

مسألة (4):

أولاً: مرجل لتسخين الماء باستخدام الخشب كوقود ينتج ماءً ساخناً بمعدل $\dot{m}_w = 2 [kg/s]$ عند فرق في درجات حرارة الماء الداخل والخارج $\Delta T_w = 60^\circ C$ المطلوب:

1- إيجاد الاستطاعة المفيدة للمرجل.

2- إيجاد معدل استهلاك الخشب علماً أن: القيمة الحرارية للمادة الجافة $H_{UDC} = 20 [MJ/kg]$ ، نسبة الرطوبة في الخشب $x = 0.2$ ومردود المرجل $\eta_b = 0.7$.

ثانياً: مخمر لا هوائي درجة التحميل فيه $R_b = 2 [kg/m^3 \cdot day]$ ومعدل التغذية اليومية من الكتلة العضوية $\dot{m}_{biomass} = 2000 [kg/day]$ ، $\rho_{biomass} = 1000 [kg/m^3]$ ، $C_{odm} = 5\%$ المطلوب:

1- أوجد الحجم الفعال للمخمر.

2- أوجد فترة بقاء المادة العضوية في المخمر.

الحل:

1- الاستطاعة المفيدة للمرجل.

$$N_N = \dot{m}_w \cdot C_w \cdot \Delta T_w$$

$$= 2 \times 4.18 \times 60 = 501.6 [kW]$$

استطاعة المرجل.

$$N_b = \frac{N_N}{\eta_b} = \frac{501.6}{0.7} = 716.6 [kW]$$

2- القيمة الحرارية للخشب.

$$H_U = (1 - x)H_{UDC} - (x \times 2440) \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$= (1 - 0.15) \times 20 \times 10^3 - (0.15 \times 2440) = 16634 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

معدل استهلاك الخشب.

$$\dot{m}_{wood} = \frac{N_b}{H_U} = \frac{716.6}{16634} = 43.1 \times 10^{-3} \left[\frac{kg}{s} \right] = 155.1 \left[\frac{kg}{h} \right]$$

ثانياً: المخمر.

1- الحجم الفعال للمخمر.

$$V_R = \frac{\dot{m}_{bio}}{R_b} C_{odm}$$

$$= \frac{2000 \times \frac{5}{100}}{2} = 50 [m^3]$$

2- فترة التخمر.

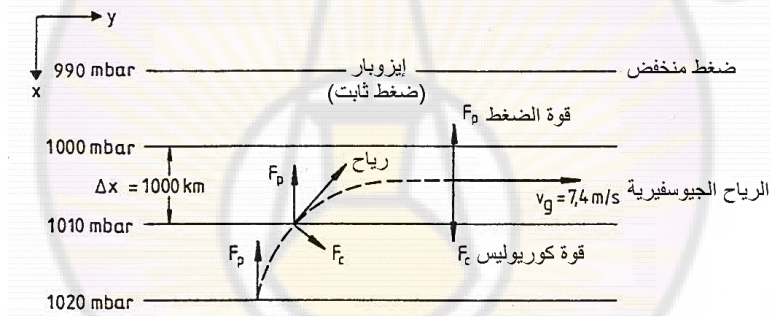
$$\frac{V_R}{\tau} = \dot{V}_{bio}$$

$$\tau = \frac{V_R}{\dot{m}_{biomass} / \rho_{biomass}} = \frac{50}{2000/1000} = 25 [days]$$

الفصل التاسع

طاقة الرياح

نتيجة الاشعاع الشمسي متفاوت على مساحات واسعة من الكرة الأرضية تنشأ فوارق ملحوظة في درجات الحرارة وبالتالي في الضغط الجوي مما يتسبب في اندفاع الهواء من مناطق الضغط المرتفع إلى مناطق الضغط المنخفض. حركة الهواء هذه تدعى الرياح. إن التأثير الأولي للقوة F_p (قوة فرق الضغط) يضاف إلى القوة الناتجة عن تأثير دوران الأرض (الحركة النسبية للكتلة الهوائية) أو قوة كوريوليس F_c . يبين الشكل (1-9) آلية تأثير هذه القوى على حركة الرياح.



الشكل (1-9) مثال عددي على الرياح الجيوسفيرية في النصف الشمالي للكرة الأرضية

في نصف الكرة الشمالي تؤثر قوة كوريوليس دافعة التيارات الهوائية نحو اليمين عند النظر باتجاه حركة الرياح، بينما يكون الدفع نحو اليسار في نصف الكرة الجنوبي. إن الرياح التي تنشأ تحت تأثير القوتين السابقتين تسير وفق خطوط الضغط الثابت أو موازية لها عندما تتساوى القوتين F_c , F_p وتسمى بالرياح الجيوسفيرية. تساوي قوة كوريوليس إلى جداء تسارع كوريوليس الذي يسود على خط عرض معين وكتلة جزيئة الهواء المتحركة أو:

$$F_c = 2\omega \sin \beta \vartheta g \Delta x \Delta y \Delta z. \rho a \quad [N] \quad (9 - 1)$$

ω : السرعة الزاوية لدوران الأرض عند القطبين $[1/s]$.

$\sin \beta$: السرعة الزاوية لدوران الأرض عند خط العرض β $[1/s]$.

$\Delta x \Delta y \Delta z$: حجم جزيئة الهواء المدروسة $[m^3]$.

ρ_a : كثافة الهواء $[\text{kg/m}^3]$.

ϑg : سرعة الرياح الجيوسفيرية $[\text{m/s}]$.

تساوي قوة الضغط المؤثرة على جزيئة الهواء إلى جداء فرق الضغط والمساحة التي تشغلها الجزيئة أو:

$$F_p = \Delta p \Delta y \Delta z \quad [\text{N}] \quad (9-2)$$

Δp : فرق الضغط المؤثر على جزيئة الهواء $[\text{N/m}^2]$.

$\Delta y \Delta z$: المساحة التي تشغلها الجزيئة $[\text{m}^2]$.

من العلاقة (9-1) والعلاقة (9-2) ينتج من أجل $F_p = F_c$:

$$\Delta p = 2\omega \sin \beta \vartheta g \Delta x \cdot \rho_a \quad [\text{N}] \quad (9-3)$$

وتحسب السرعة الجيوسفيرية من العلاقة:

$$\vartheta g = \frac{\Delta p}{\Delta x} \cdot \frac{1}{2\omega \rho_a \sin \beta} \quad [\text{m/s}] \quad (9-4)$$

نلاحظ أنّ نسبة تغير الضغط $\Delta p / \Delta x$ تُعتبر مقياساً للسرعة الجيوسفيرية عند خط عرض معين.

مثال:

أوجد السرعة الجيوسفيرية عند خط عرض 50 شمالاً إذا بلغ معدل تغير الضغط $\Delta p = 10 [\text{mbar}]$ لكل مسافة $\Delta x = 1000 [\text{km}]$.

الحل:

نحسب سرعة دوران الأرض:

$$w = \frac{2\pi}{24 \times 60 \times 60} = 7.3 \times 10^{-5} \quad [\text{s}^{-1}]$$

$$\rho_a = 1.2 \quad [\text{kg/m}^3]$$

ونعتبر

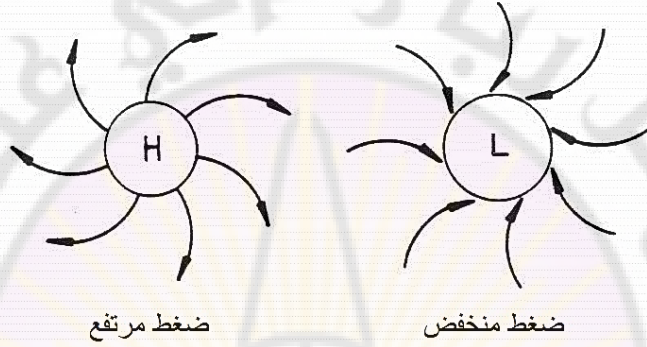
عندها:

$$\vartheta g = \frac{\Delta p}{\Delta x} \cdot \frac{1}{2\omega \rho_a \sin \beta}$$
$$\vartheta g = \frac{1000}{1000 \times 10^3} \times \frac{1}{2 \times 7.3 \times 10^{-5} \times 1.2 \times \sin 50}$$
$$\vartheta g = 7.4 \quad [\text{m/s}]$$

إذا كان مسار الرياح منحنيًا تؤثر على جزيئة الهواء قوة طاردة مركزية إضافة إلى قوتي الضغط وكوريوليس ولا تكون الرياح عندها جيوسفيرية. تؤثر على حركة الرياح قرب سطح الأرض أيضاً قوة الاحتكاك بسطح الأرض وتتشكل طبقة حدية بارتفاع يتراوح بين

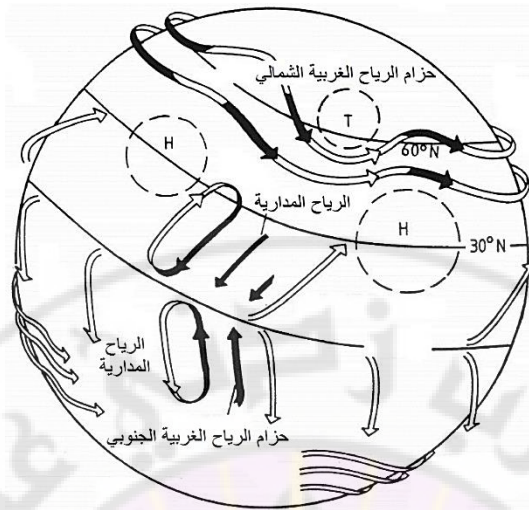
300m – 600m تكون فيها سرعة الرياح أقل من السرعة الحرة في الطبقات الأعلى ويؤدي ذلك إلى انحراف مسار الرياح عن خطوط الضغط الثابت، ويزداد هذا الانحراف مع الاقتراب من سطح الأرض، بينما تكون تيارات الهواء في الطبقات فوق الحدية أقرب إلى مسايرة خطوط (إيزوبار) الضغط الثابت.

يبين الشكل (2-9) مبدأ حركة التيارات الهوائية قرب سطح الأرض في مناطق الضغط المنخفض والمرتفع في نصف الكرة الشمالي.



الشكل (2-9) حركة التيارات الهوائية قرب سطح الأرض في مناطق الضغط المرتفع والضغط المنخفض في نصف الكرة الشمالي

يُميز على الأرض نوعان أساسيان من الرياح: الرياح المدارية وحزامي الرياح الغربية الشمالي والجنوبي كما في الشكل (3-9) والقوة الأساسية المحركة للرياح المدارية هي شدة الإشعاع الشمسي في منطقة خط الاستواء التي تُسخّن الهواء فيتجه نحو الأعلى ثم شمالاً وجنوباً في الارتفاعات العليا وبسبب قوة كوريوليس تنحرف التيارات شرقاً وقبل وصولها إلى خط عرض 30° شمالاً وجنوباً تكون قد بردت فتتخفض وتعود لتتجه إلى خط الاستواء وتنحرف بسبب قوة كوريوليس نحو الغرب. فأغلب الأحيان تتأثر هذه التيارات بتيارات ناشئة عن التسخين المحلي ولا تبقى الصورة واضحة كما هو مبين في الشكل (3-9).



الشكل (9-3) مخطط مبسط لنظام حركة الرياح الرئيسي على الأرض

في المناطق الشمالية والجنوبية من الكرة الأرضية وعند خط عرض $60^\circ = \beta$ تسود الرياح الغربية التي تُشكّل ما يشبه الحزام حول الأرض. وتختلف طبيعة وشدة هذه الرياح إلى حد كبير حسب شدة تأثيرها بالتيارات المحلية.

مثال على رياح مميزة وشديدة: رياح شمال الأطلسي المعروفة للطيارين حيث تحتاج الطائرة في عبورها من أوروبا إلى أمريكا الشمالية وقت أكبر بكثير من الوقت اللازم للاتجاه المعاكس. وتكون الرياح هنا شديدة بسبب تأثيرها بالتيارات المحلية الناتجة عن التيارات البحرية المتجهة من أمريكا جنوباً إلى شمال شرق المحيط الأطلسي.

القوة المحركة لحزامي الرياح الغربية الشمالي والجنوبي هي الفوارق الكبيرة في الضغط والحرارة بين خطي عرض 30° و 70° شمالاً وجنوباً. وتُعتبر الرياح الغربية شمالاً وجنوباً أوفر طاقة وأكثر جدوى لاستثمار الرياح كأحد أشكال الطاقات المتجددة من المناطق المدارية.

9-1 حركة الرياح (شدة واتجاه)

تقسم سرعة الرياح وفق مقياس بيوفورت (Beaufort) إلى 12 درجة وفق الجدول (9-1).

تعتمد عادة كاتجاه الرياح الجهة التي تهب منها الرياح. يتوضع القطر العربي السوري على خطوط عرض تقع شمال المنطقة المدارية مباشرة ولا تنتمي إلى منطقة الرياح الغربية الشمالية وبالتالي لا يُعتبر القطر غنياً بموارده الريحية. ومع ذلك يؤدي انزياح الكتلة

الهوائية النشطة ووجود ساحل على بحر متوسط النشاط إلى نشوء فعاليات جوية مقبولة وخاصة على بعض مناطق القطر المفتوحة نسبياً على البحر .
الاتجاه الأكثر شيوعاً للرياح ذات القيمة الاستثمارية. هو الاتجاه الغربي وجزئياً الشمال الغربي والجنوب الغربي.

الجدول (9-1) شدة الريح حسب مقياس بيوفورت

شدة الريح	مجال سرعة الرياح [m/s]	تأثير الرياح
0 ساكنة	0 ÷ 0.2	يتحرك الدخان عامودياً
1 خفيف جداً	0.3 ÷ 1.5	يتحرك الدخان بشكل مائل
2 خفيفة (نسيم)	1.6 ÷ 3.3	حركة الهواء محسوسة
3 رياح ضعيفة	3.4 ÷ 5.4	حركة أوراق الشجر
4 رياح معتدلة	5.5 ÷ 7.9	حركة أغصان الشجر
5 رياح نشيطة	8 ÷ 10.7	حركة فروع الشجر
6 رياح قوية	10.8 ÷ 13.8	يسمع عويل الرياح
7 رياح شديدة	13.9 ÷ 17.1	حركة جذوع الأشجار
8 شبه عاصفة	17.2 ÷ 20.7	انحناء جذوع الأشجار - صعوبة في السير
9 عاصفة	20.8 ÷ 24.4	انتزاع قرميد الأسطح
10 عاصفة شديدة	24.5 ÷ 28.4	اقتلاع الأشجار
11 عاصفة إعصارية	28.5 ÷ 32.6	تأثير مدمر
12 إعصار	32.7 - 36.9	تدمير شامل

9-2 سرعة الرياح الوسطية:

يمكن حساب القيمة الوسطية السنوية لسرعة الرياح لمنطقة معينة من العلاقة التالية:

$$\bar{\theta}_1 = \frac{\int_1^2 \theta \cdot dt}{t_2 - t_1} \quad [m/s] \quad (9-5)$$

من العلاقة السابقة:

$\bar{\theta}_i$: القيمة الوسطى لسرعة الرياح في سنة معينة i [m/s].

θ : سرعة الرياح [m/s].

t : الزمن [s].

$t_2 - t_1$: الفترة الزمنية [s].

يتم إيجاد القيمة الوسطية السنوية لسرعة الرياح لسنوات عديدة n ثم إيجاد متوسط القيم وتُعمد كسرعة وسطية سنوية حسابية:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \bar{\theta}_i \quad [m/s] \quad (9-6)$$

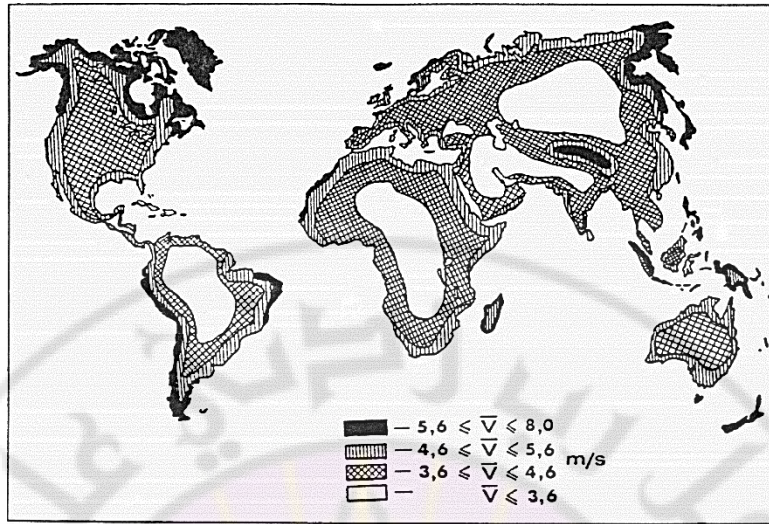
إنَّ سرعة الرياح فوق البحر المتوسط تبدأ بالتناقص بعد وصولها إلى الشاطئ بسبب الاحتكاك بتضاريس الأرض وبالتالي فالسرعة على الشاطئ تكون أكبر منها في المناطق الداخلية.

يبين الشكل (9-4) ذلك جيداً حيث يكون متوسط سرعات الرياح في المناطق الداخلية القارية (اللون الأبيض) منخفضاً. بينما يكون متوسط سرعات الرياح على الشواطئ هو الأعلى (لا سيما في منطقتي حزامي الرياح الغربيين، الشمالي والجنوبي).

سرعة الرياح الوسطية الشهرية:

تُحسب سرعة الرياح الوسطية الشهرية بنفس طريقة حساب السرعة الوسطية السنوية حيث تُمثل القيمة الوسطية للسرعات الآلية خلال الفترة الزمنية للشهر المعني.

وتُعطي السرعة الوسطية الشهرية تصوراً أكثر وضوحاً لسرعة الرياح في منطقة معينة من السرعة الوسطية السنوية.



الشكل (9-4) توزيع سرعة الرياح الوسطية السنوية على اليابسة

9-2-1 بروفيل السرعة الشاقولية:

بسبب عدم استواء سطح الأرض تتشكل بالقرب من سطح الأرض طبقة حدية تكون سرعة الرياح فيها بسبب الاحتكاك والموانع أقل من سرعة التيارات الحرة في الأعلى، وتختلف سماكة هذه الطبقة حسب نوع العوائق والتضاريس وقد يصل ارتفاع هذه الطبقة إلى 600[m] وأكثر.

في حالة الكثير من العنفات الريحية يتطلب الحصول على كفاءة عالية ارتفاع يصل إلى 200[m].

يمكن إيجاد السرعة الوسطية على ارتفاع H من العلاقة التالية:

$$\bar{\theta}_H = \bar{\theta}_{10} \left(\frac{H}{10} \right)^g \quad [m/s] \quad (9-7)$$

H : الارتفاع [m].

g : معامل الخشونة لسطح الأرض [-].

$\bar{\theta}_H$: السرعة الوسطية على ارتفاع H [m/s].

$\bar{\theta}_{10}$: السرعة الوسطية على ارتفاع 10[m] [m/s].

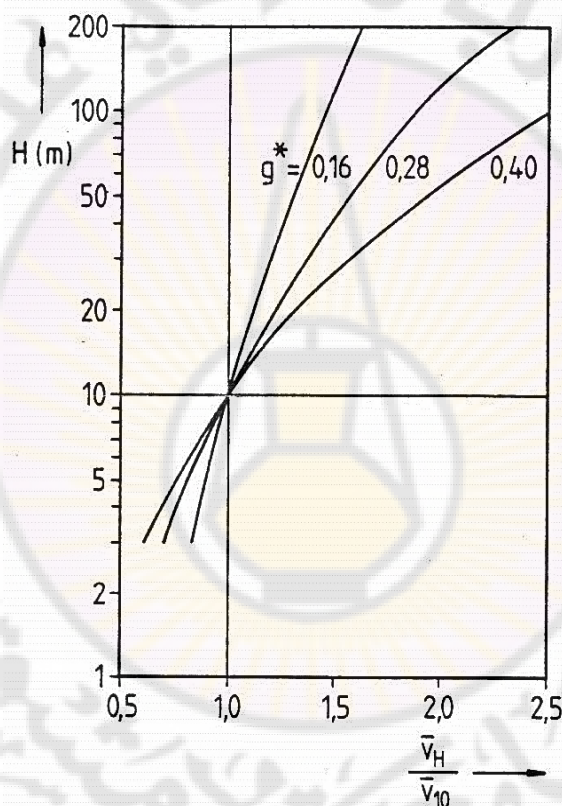
أما قيم g فهي:

0.16: للمناطق المنبسطة السهلية.

0.28: لمناطق ذات عوائق متوسطة بارتفاعات من 10 إلى 15 متر.

0.4: المناطق ذات عوائق كبيرة نسبياً مثل الأشجار العالية والأبنية الشاهقة وكذلك التلال والجبال.

وتكفي دقة العلاقة السابقة لارتفاعات تصل إلى 200[m] أما لارتفاعات أكبر فيؤثر تغير درجات الحرارة على سرعة الرياح، يبين الشكل (9-5) تأثير احتكاك سطح الأرض على سرعة الرياح على ارتفاعات مختلفة وتكون سرعة الرياح عند ارتفاع 100[m] أكبر بـ 2.5 مرة من تلك التي تكون على ارتفاع 10[m] عندما تكون العوائق كبيرة.



الشكل (9-5) تأثير احتكاك سطح الأرض على سرعة الرياح عند ارتفاعات مختلفة

9-2-2 تكرار سرعة الرياح:

يفيد فهم تكرار سرعة الرياح في إبراز صورة أكثر وضوحاً لميزات الرياح الطاقية بينما لا تُقدّم السرعة الوسطية المعلومات الكافية حيث يتم دراسة السرعات المختلفة على مدى ساعات العام البالغة 8760 ساعة.

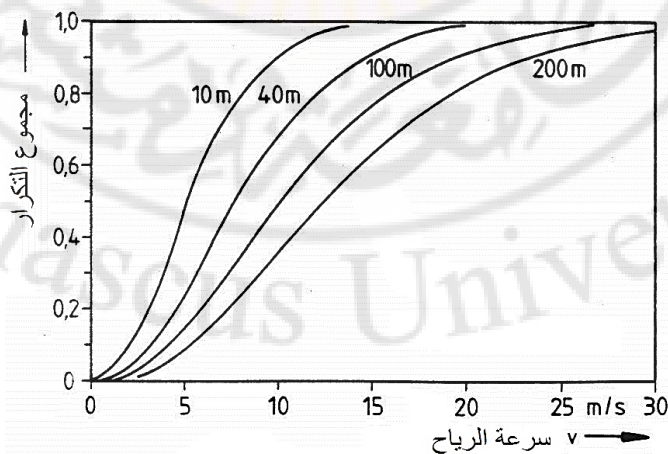
يبين الجدول (9-2) تكرار السرعة لثلاث مناطق غنية ومتوسطة الغنى وفقيرة بمحصول طاقة الرياح. قياسات السرعة مأخوذة على ارتفاع 15 متر.

الجدول (2-9) تكرار السرعة لمناطق مختلفة الغنى بطاقة الرياح

السرعة الوسطية السبوية	تكرار السرعة				غنى المنطقة بطاقة الرياح
	15-20	10-15	5-10	0-5 $\left[\frac{m}{s}\right]$	
7.5	0.03	0.17	0.55	0.25	غنية
5.5	0.00	0.05	0.5	0.45	متوسطة الغنى
2.5	0.00	0.03	0.17	0.8	فقيرة

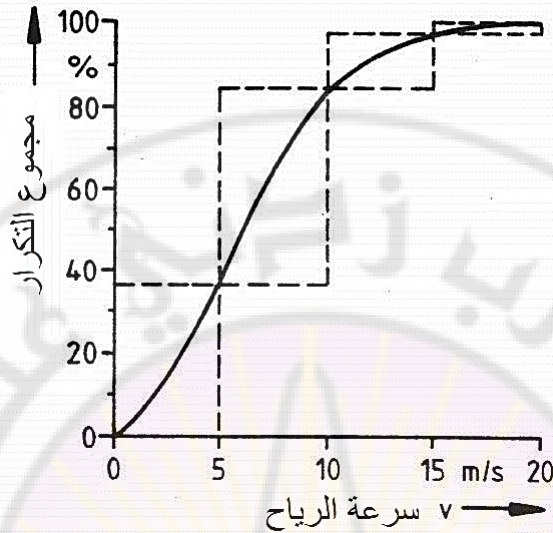
يُلاحظ أنه في المناطق الفقيرة يأخذ المجال الأول قيمة عظمى بينما تكون القيمة العظمى في المناطق الغنية في المجال التالي ويكون مجموع التكرار للمجال الثاني والثالث والمفادين اقتصادياً يبلغ حوالي 0.72 للمناطق الغنية و0.2 للمناطق الفقيرة و0.55 للمناطق المتوسطة الغنى. يبين الشكل (6-9) مجموع تكرار لمنطقة غنية بطاقة الرياح من أجل ارتفاعات مختلفة. تفيد مخططات كهذه في حساب محصول الطاقة في منطقة معينة عند تحديد نوع العنفات الريحية.

بينما يبين الشكل (7-9) مجموع التكرار لنفس المنطقة إنما على ارتفاع 17 متر. يبين الشكل كذلك مجموع التكرارات للمجالات الواردة في الجدول (2-9) بشكل مفصل.



الشكل (6-9) مجموع التكرار لمنطقة غنية بطاقة الرياح من أجل ارتفاعات مختلفة

(من أجل ارتفاع ١٧ متر)



الشكل (7-9) مجموع التكرار لنفس المنطقة الواردة في الشكل (6-9) من أجل ارتفاع 17 متر

3-2-9 القيم الحدية لسرعة الرياح وفترات السكون الكافي:

بسبب الحركة الغير منتظمة للرياح تتغير سرعة الرياح واتجاهها بشكل مفاجئ وفترات قصيرة. وتنتج القيم الحدية لسرعة الرياح في حالتي الهبوب الشديد أو السكون. فقد تحدث فترات تكون فيها سرعة الرياح أقل من السرعة اللازمة لتشغيل العنفة الهوائية.

تسمى هذه الفترات بفترات السكون الطاقى لا تعمل خلالها العنفة الريحية، أما القيم العظمى لسرعة الرياح فلها أهمية خاصة للحسابات التصميمية لمئات الريش وعناصر الحركة واستقرار العنفة.

بشكل عام تُعتبر السرعة الحدية للسكون الطاقى للعنفات الحديثة $5 [m/s]$ رغم أن القيمة المتعارف عليها مترينولوجياً هي $3 [m/s]$.

تعمل بعض العنفات الحديثة عند سرعات أدنى من $5 [m/s]$. أي أن السرعة الحدية للسكون الطاقى تكون بين $3 \div 5 [m/s]$ بينما تكون السرعة الحدية للعنفات البطيئة غالباً بحدود $3 [m/s]$.

تزداد فترات السكون الطافي في المناطق الفقيرة بطاقة الرياح وتكون أقل في المناطق الغنية بطاقة الرياح ويقل أو يزداد الإنتاج النوعي للطاقة للعنفات الريحية ويلعب ذلك الدور الرئيسي في اختيار المناطق المناسبة لاستثمار طاقة الرياح.

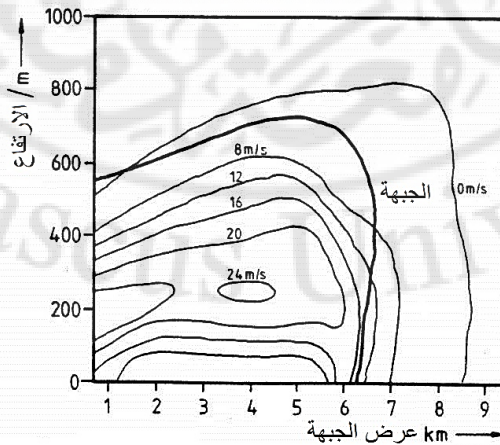
كذلك تكون الرياح أقل نشاطاً في فصل الصيف وتزداد فترات السكون الطافي أما شتاء فتكون أكثر نشاطاً مما يتيح مزيداً من الطاقة يمكن استثمارها لأغراض التدفئة.

يتسبب الهبوب المفاجئ في إحداث سرعات حدية عالية لفترات قصيرة، يمكن الحكم على شدتها بمعامل الهبوب $k = \vartheta_{\max}/\bar{\vartheta}$ والذي يُمثل النسبة للسرعة العظمى والسرعة الوسطية خلال فترة زمنية قصيرة (حوالي 10 دقائق) وتتراوح قيمة الهبوب غالباً بين 1.1 و 1.9 وتصل القيمة العظمى لسرعة الرياح في حالة الهبوب إلى 6 أو 7 أضعاف السرعة الوسطية السنوية ويتم مراعاة ذلك في الحسابات التصميمية للريش والعنفة.

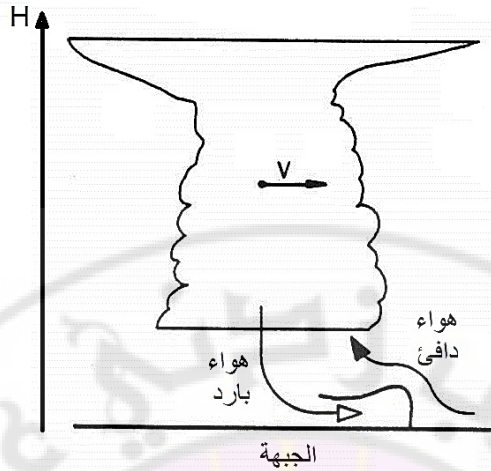
وعندها يجب أخذ أثر الارتفاع بالحسبان أيضاً حيث تكون سرعة الهبات عند ارتفاع 150 متر مثلاً أعلى بحوالي 50%.

وبسبب التبريد السريع للهواء في الغيوم المثانة غالباً ما تحدث تيارات صاعدة وهابطة تتسبب في زيادة سرعة الرياح عند الارتفاع المذكور إلى ضعفين أو ثلاثة أضعاف أحياناً.

يبين الشكل (8-9) طريقة تشكّل هبات كهذه وتوزع سرعات الرياح في مقطع شاقولي لجهة هبوب بينما يوضح الشكل (9-9) التيارات الصاعدة والهابطة مع تغيير السرعة شاقولياً (طريقة تشكّل الهبات).



الشكل (8-9) توزع سرعات الرياح في مقطع شاقولي لجهة هبوب

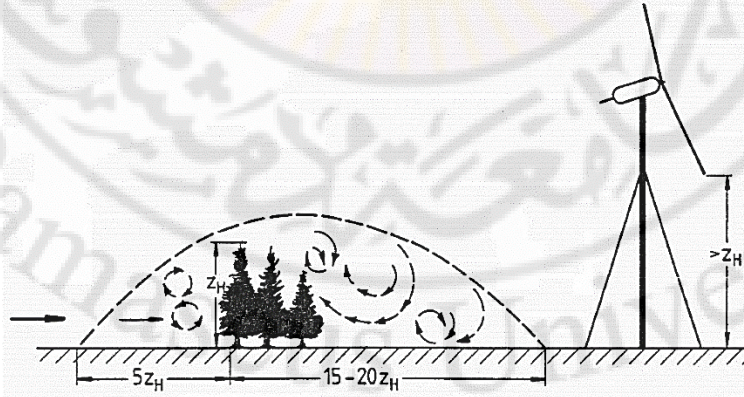


الشكل (9-9) تشكّل جهة هبوب ناتج عن التبريد في غيوم باردة (مثلجة) وحدث تيارات صاعدة وهابطة

4-2-9 حركة الرياح عبر العوائق ومسافات التأثير:

يبين الشكل (9-10) طريقة تأثير العوائق على حركة الرياح وكذلك مسافة تأثير العائق حسب ارتفاعه.

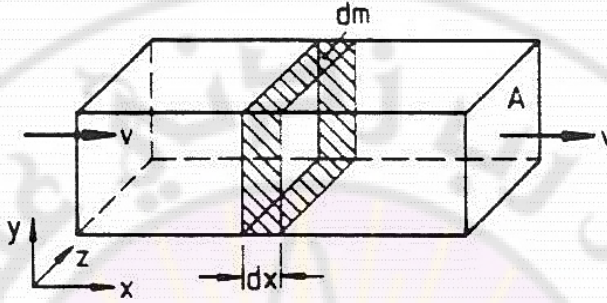
ويجب مراعاة ذلك عند اختيار موقع العنفة، عند تصميم مزرعة ريفية يؤخذ بالحسبان التأثير المتبادل للعنفات التي تُشكّل كل منها عائقاً بالنسبة للآخرى، ولكي يكون التأثير المتبادل أصغرياً تترك مسافات كافية وتختلف حسابات المسافات اللازمة حسب المراجع، لكن غالباً تُترك مسافة تعادل 8 إلى 10 أضعاف قطر العنفة في اتجاه الهبوب الرئيسي ومسافة 3 إلى 5 أضعاف قطر العنفة في الاتجاهات الأخرى.



الشكل (9-10) مجال وطريقة تأثير العوائق على حركة الرياح

3-9 استطاعة التدفقات الريحية:

تحسب استطاعة التدفقات الريحية على السطح العمودي على اتجاه الرياح حسب الشكل (11-9).



الشكل (11-9) استنتاج كثافة الاستطاعة

تُحسب الطاقة الحركية لعنصر الكتلة dm من العلاقة التالية:

$$dE = \frac{1}{2} dm \vartheta^2 \quad [J] \quad (9-8)$$

ϑ : سرعة الرياح $[m/s]$.

يحسب عنصر الكتلة من العلاقة:

$$dm = \rho_a dV \quad [kg] \quad (9-9)$$

ρ_a : كثافة الهواء $[kg/m^3]$.

V : حجم الهواء $[m^3]$.

وعنصر الحجم من العلاقة:

$$dV = A dx \quad [m^3] \quad (9-10)$$

أما السرعة:

$$\vartheta = \frac{dx}{dt} \quad [m/s] \quad (9-11)$$

أو:

$$dx = \vartheta \cdot dt$$

ويكون عنصر الكتلة:

$$dm = A \rho_a \vartheta dt \quad [kg] \quad (9-12)$$

وينتج:

$$dE = \frac{1}{2} A \rho_a \vartheta^3 dt \quad [J] \quad (9-13)$$

وتحسب الاستطاعة من العلاقة:

$$P = \frac{dE}{dt} \quad [W] \quad (9-14)$$

أو:

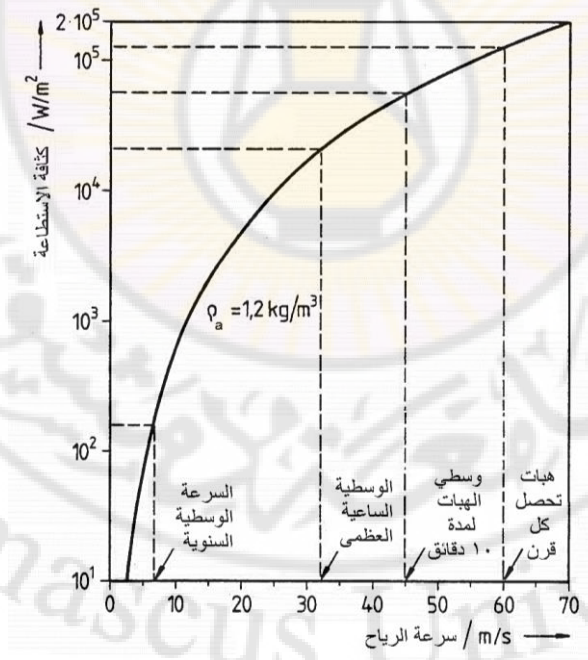
$$p = \frac{1}{2} \rho_a A \vartheta^3 \quad [W] \quad (9-15)$$

أما الاستطاعة لوحدة المساحة فتصبح:

$$p = \frac{1}{2} \rho_a A \vartheta^3 \quad [W] \quad (9-16)$$

أي أنّ استطاعة الرياح تتناسب مع مكعب السرعة.

يبين الشكل (9-12) العلاقة بين السرعة والاستطاعة وكذلك الاستطاعة الخاصة ببعض السرعات المميزة عند كثافة للهواء ثابتة قدرها $\rho_a = 1.2 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ لمنطقة تبلغ فيها سرعة الرياح الوسطية السنوية $\bar{\vartheta} = 7.2 \text{ [m/s]}$.



الشكل (9-12) كثافة الاستطاعة كتابع لسرعة الرياح

نلاحظ أنّ استطاعة الرياح تتغير في مجال كبير لدى تغير سرعة الرياح في مجال واقعي.

فقد تصل استطاعة الرياح سنوياً عند هبات قوية إلى $70 \text{ [kW/m}^2\text{]}$ وفي الأعاصير تتجاوز $100 \text{ [kW/m}^2\text{]}$ وهذه الاستطاعة عند سرعة رياح مساوية إلى السرعة الوسطية السنوية في منطقة غنية بطاقة الرياح لا تتجاوز $200 - 300 \text{ [W/m}^2\text{]}$.

إنّ الاستطاعة الكبيرة المحتملة تتسبب في مصاعب تصميمية كبيرة.

9-4 الطاقة السنوية المتاحة

يمكن حساب طاقة الرياح المتاحة خلال فترة زمنية معينة من إجراء تكامل على الاستطاعة الناتجة عن واحدة السطوح خلال عام فتكون هذه الطاقة لواحدة السطح:

$$E_a = \frac{\rho_a}{2} \int_1^2 \vartheta^3 dt \quad [\text{J/m}^2 \cdot a] \quad (9-17)$$

$(t_2 - t_1)$: فترة العام الكامل $[s/a]$.

إذا تم حساب الطاقة المتاحة سنوياً على أساس السرعة الوسطية السنوية وليس وفق التكامل السابق فنحصل على قيمة صغيرة جداً فهي لا تتجاوز لمنطقة غنية بالرياح $1500 \text{ [kW.h/m}^2 \cdot a\text{]}$ بينما تبلغ لنفس المنطقة عند حساب الطاقة وفق التكامل $4000 \text{ [kW/m}^2 \cdot a\text{]}$ حوالي $(9-17)$.

9-5 قياس سرعة الرياح

9-5-1 أنبوبة براندل:

في الجريانات الصفائحية للسوائل المثالية وبدون احتكاك فإنّ علاقة برنولي:

$$\rho_g = \rho_s + \frac{1}{2} \rho_a \vartheta^2 \quad [\text{N/m}^2] \quad (9-18)$$

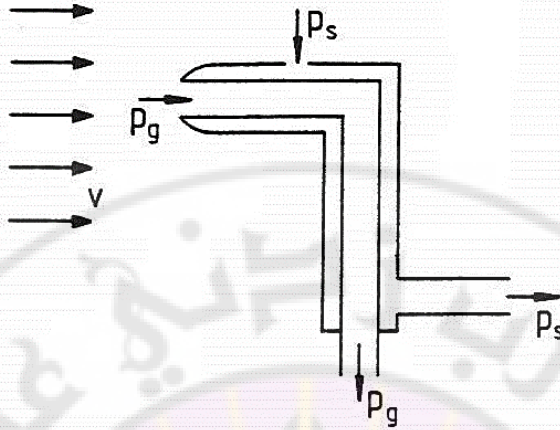
تُبين المعادلة السابقة العلاقة بين الضغط الكلي $p_g [\text{N/m}^2]$ والضغط الاستاتيكي $p_s [\text{N/m}^2]$ وسرعة السائل $\vartheta [\text{m/s}]$ وتستخدم هذه العلاقة بدقة كافية في حساب سرعة الرياح رغم عدم توفر الشروط السابقة في الجريانات الهوائية الحرة.

ينتج من العلاقة السابقة علاقة السرعة التالية:

$$\vartheta = \sqrt{2 \frac{p_g - p_s}{\rho_a}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (9-19)$$

يمكن حساب ϑ من مقادير مقاسة للضغط الكلي والضغط الاستاتيكي.

وتُستخدم أنبوبة براندل شكل (9-13) لقياس كلا الضغطين المذكورين.



الشكل (9-13) قياس سرعة الرياح بواسطة أنبوبة براندل

من المهم توجيه الأنبوب باتجاه الرياح تماماً وإلا تكون النتائج غير دقيقة، ومن سلبيات هذه الطريقة صعوبة القياس عند سرعات عادية للرياح بسبب الحصول على قيم صغيرة لفرق الضغط ($p_g - p_s$) وبالتالي فاستخدام هذه الطريقة غير شائع في القياسات المتروولوجية بل تُستخدم عند سرعات كبيرة وفي الأنفاق الهوائية.

9-5-2 مقياس الضغط ذو السائل الساخن:

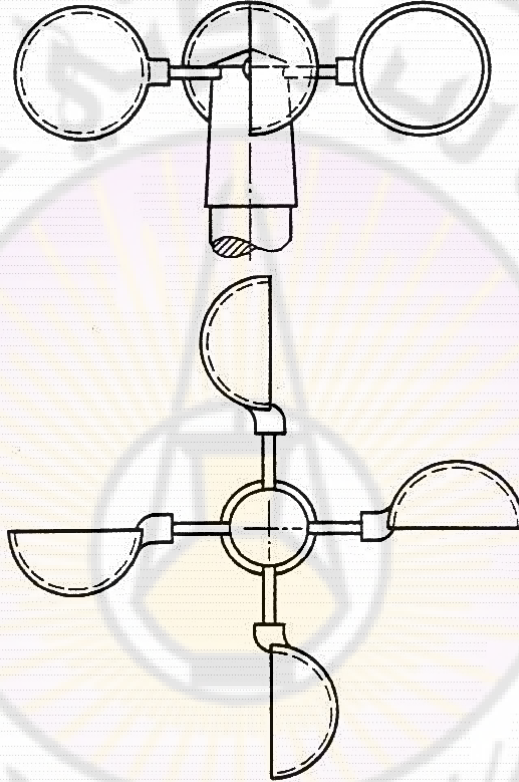
يُستخدم تأثير تبريد التيارات الهوائية لسلك من البلاتين، حيث يُسخن السلك كهربائياً بتيار ثابت وعندها يكون الفرق في درجات الحرارة بين السلك T_d والهواء T_a يتناسب مع معامل التبادل الحراري وبالتالي مع سرعة الهواء ويكون التناسب عكسياً بين فرق درجات الحرارة وجذر السرعة أو:

$$(T_d - T_a) \sim \frac{1}{\sqrt{v}} \quad (9-20)$$

يمكن قراءة السرعة من جهاز القياس مباشرة بواسطة دارات كهربائية مناسبة. تُعتبر أجهزة قياس السرعة ذات السلك الساخن مناسبة للاستخدام في حالات السرعات الصغيرة نظراً للفرق الكبير نسبياً في درجات الحرارة وتُستخدم هذه الأجهزة كأجهزة يدوية. يتوضع السلك الحساس في حجرة أنبوبية محمية من التأثيرات الجانبية، ولتكون القياسات دقيقة يجب توجيه الأنبوب باتجاه الرياح تماماً.

9-5-3 جهاز قياس السرعة ذو الطاسات المتصالبة:

في هذا الجهاز يُستخدم لقياس سرعة الرياح حقيقة أنّ مقاومة السطوح المقعرة للتيارات الهوائية أكبر من السطوح المحدبة. ويبين الشكل (9-14) بنية جهاز قياس السرعة ذو الطاسات المتصالبة.



الشكل (9-14) جهاز قياس السرعة ذو الطاسات المتصالبة

على محور شاقولي يوضع تصالب من طاسات نصف كروية ذات فتحات متوضعة شاقولياً ولا يحتاج الجهاز إلى توجيه باتجاه الرياح بل يكفي أن يبقى المحور شاقولياً، وتكون العلاقة بين سرعة الرياح ودورات الجهاز طردية أو:

$$\theta = a_A + b_A U \quad [m/s] \quad (9-21)$$

b_A : معامل التناسب.

θ : سرعة الرياح $[m/s]$.

a_A : ثابت الاحتكاك $[m/s]$.

U : السرعة المحيطية للمقياس $[m/s]$.

للأجهزة الأكثر شيوعاً القيم التالية:

$$b_A \cong 2.6$$

$$0.2 \leq a_A \leq 1$$

يُلاحظ من العلاقة السابقة أنه لا يمكن قياس سرعات $a_A \leq \theta$ وأن سرعات قريبة من a_A تكون قياساتها غير دقيقة، وتكون القياسات مقبولة فقط عندما تكون السرعات المقاسة $\theta > 3[m/s]$ إلا أنه تم تطوير أجهزة أكثر حداثة باحتكاك قليل وعطالة قليلة أيضاً، يمكن بواسطتها قياس سرعات أقل من ذلك بكثير.

لتحسين أداء الجهاز يتم البحث عن قيم صغيرة ما أمكن لثابت الاحتكاك ويتم ذلك باستخدام مضاجع قليلة الاحتكاك وطاسات ذات أصغر كتلة ممكنة وعدد دورات دون ملامسة (الكثروني مثلاً) بسبب التغيير المفاجئ في سرعة الرياح. تؤثر عطالة الأجزاء المتحركة بشكل ملحوظ على دقة الجهاز، ومع ذلك فإن هذه الأجهزة تلاقي انتشاراً واسعاً بسبب سهولة تسجيل القياسات وعدم تأثر المؤشر بجهة الرياح.

تتم معايرة الجهاز وإيجاد قيم a_A في نفق هوائي لمعرفة سرعة الرياح ويجب معرفة عدد دورات الجهاز في واحدة الزمن n وبذلك تكون سرعة الرياح:

$$v = a_A + b_A 2r_A \pi n \quad [m/s] \quad (9 - 22)$$

r_A : نصف قطر الدوران من محور الدوران وحتى مركز الطاسات $[m]$.

n : عدد الدورات في الثانية $[s^{-1}]$.

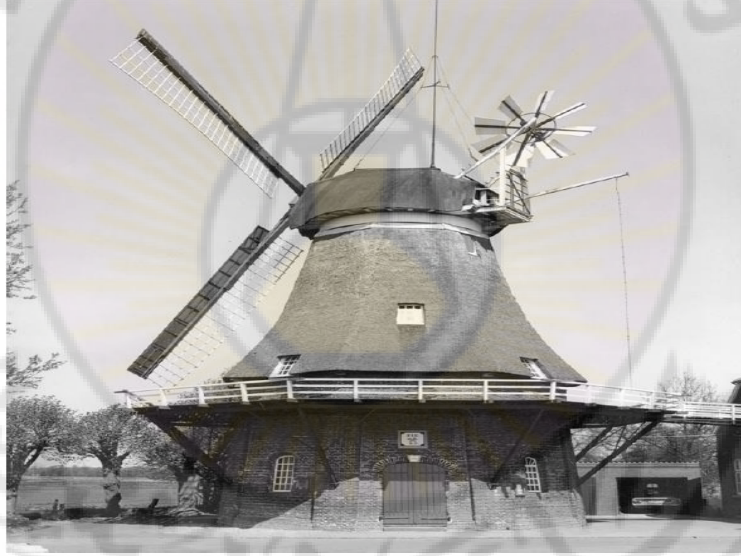
يمكن قياس عدد الدورات ميكانيكياً (بنظام نقل للحركة) أو كهربائياً دون ملامسة (بخلايا كهروضوئية).

الفصل العاشر

العنفات ومحولات الطاقة الريحية

1-10 لمحة تاريخية

استخدمت العجلات الهوائية في الشرق منذ الألف الثاني قبل الميلاد أما في أوروبا فلاقى استخدام العجلات الريحية انتشاراً بين القرنين الثاني عشر والسادس عشر لا سيما لأغراض طحن القمح وسميت بالطواحين الهوائية الشكل (1-10).



الشكل (1-10) طاحونة هواء قديمة استخدمت لطحن القمح في أوروبا حتى القرن الثامن عشر

في القرن التاسع عشر أدى تطوير العجلات الريحية إلى ظهور العجلات عديدة الشفرات شكل (2-10) وقد استخدمت هذه العجلات بشكل رئيسي وبسبب توفر عزم حركي كافٍ لتحريك مضخات ماء مكبسية لرفع الماء.

تعمل هذه العجلات عند عدد دورات صغير وسميت تبعاً لذلك بالعجلات بطيئة الدوران. وقد وصل عددها في منتصف القرن التاسع عشر إلى الملايين في الولايات المتحدة فقط.

في نهاية القرن التاسع عشر بنيت مئات الآلاف من طواحين الهواء وفي تلك الفترة ومع الثورة الصناعية بدأت الآلات التي تعمل بمحركات الاحتراق الداخلي والتي تستعمل الوقود الأحفوري تحد من انتشار العجلات الهوائية كونها أرخص وأسهل استعمالاً.



الشكل (10-2) عجلات متعددة الشفرات

لكنّ التطور التكنولوجي الهائل خلال القرن العشرين وما رافقه من شراهة في استهلاك مصادر الطاقة الأحفورية خلق مشاكل كبيرة أهمها: التلوث البيئي والاحتباس الحراري واحتمال نضوب مصادر الطاقة التقليدية (الأحفورية) أو على الأقل احتمال نشوء أزمة لهذه المصادر. كل ذلك كان حافزاً على إعادة العمل على تطوير التقانات لاستثمار الطاقات المتجددة لا سيما طاقة الرياح التي يُعَلَّق عليها اليوم آمالاً في المساهمة في حل أزمة الطاقة بشكل عام.

في العنفات الريحية المستخدمة لتوليد الكهرباء يكون عدد الدورات نسبياً كبيراً وذلك بغرض التخفيض من حجم جهاز نقل الحركة والمؤد الكهربائي وبالتالي تخفيض الكلفة. وهذا أدى إلى ظهور ما يسمى بالعنفات السريعة ذات العدد القليل من الأجنحة ذات التصميم الايروديناميكي المثالي والتي تقيد بأغراض التحكم بقابليتها للدوران حول محورها الطولي.

يبين الشكل (10-3) نموذج بعنفة سريعة، وتتراوح استطاعة العنفات السريعة بين بضعة كيلو واط وبضع ميغا واط ويُعتبر المستوى التقني للعنفات الصغيرة والمتوسطة على درجة عالية من التطور.

يمكن أن تكون العنفات السريعة وحيدة الجناح أو ثنائية الجناح أو ثلاثية الجناح وهي الأكثر شيوعاً.



الشكل (10-3) عنفة ريفية حديثة بجناح واحد

الأشكال (10-4) و (10-5) هي عنفات ريفية حديثة وحيدة وثلاثية الأجنحة.



الشكل (10-4) عنفة ريفية حديثة بجناحين



الشكل (5-10) عنفة ربحية حديثة بثلاث أجنحة باستطاعة 600[kW]

أما الشكل (6-10) فيمثل نموذجاً خاصاً ذا محور شاقولي وهو نوع قليل الانتشار.

2-10 أسس في ميكانيك الجريان

1-2-10 معامل الاستطاعة المثالي الأعظمي.

يُمثل النسبة العظمى للطاقة التي يمكن لعجلة هوائية انتزاعها من الرياح.

انطلاقاً من قانون الاستمرار فإن التدفق $\dot{m}$ في المقاطع A, A_0, A_2 يجب أن يكون هو نفسه.

يمكن حساب التدفق في مستوى العنفة بالعلاقة التالية:

$$\dot{m} = \rho_a \vartheta_0 A_0 \quad [\text{kg/s}] \quad (10 - 1)$$

من المعادلة (10 - 1) يكون:

$$\rho_a: \text{كثافة الهواء } [\text{kg/m}^3].$$

$$\vartheta_0: \text{سرعة الرياح في مستوى العنفة } [\text{m/s}].$$

$$A_0: \text{مساحة الدائرة المسوَّحة بالأجنحة } [\text{m}^2].$$

يبين الشكل (7-10) مخطط لجريان الرياح عبر عجلة هوائية.



الشكل (10-6) عنفة داربوس ذات المحور الشاقولي استطاعة [kW] 30 وقطر دوران [m] 13

تكون السرعة في مستوي العنفة ϑ_0 مساوية للقيمة الوسطية بين ϑ و ϑ_2 أو:

$$\vartheta_0 = \frac{\vartheta + \vartheta_2}{2} \quad [\text{m/s}] \quad (10 - 2)$$

حيث ϑ و ϑ_2 سرعة الرياح قبل وبعد العنفة [m/s].

الاستطاعة النظرية للعنفة هي الفرق في الاستطاعة لتيار الهواء الداخل والخارج من العنفة وتُعطى بالشكل:

$$p = p_1 - p_2 \quad [\text{W}] \quad (10 - 3)$$

انطلاقاً من (16-9) يكون:

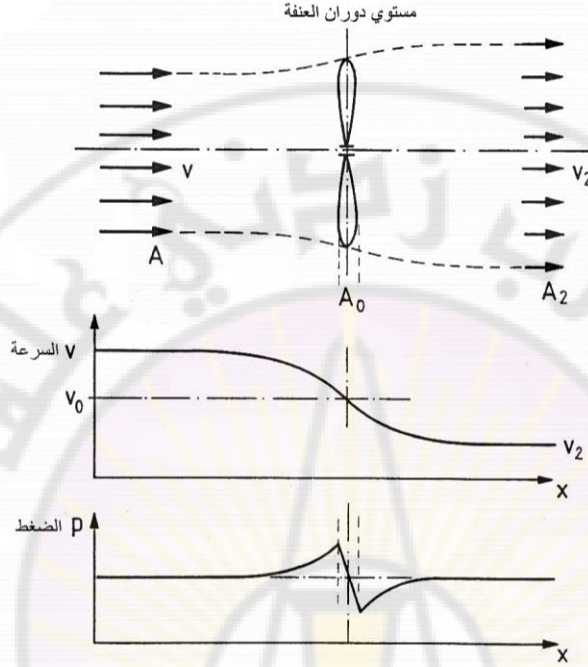
$$p = 0.5\rho_a A\vartheta^3 - 0.5\rho_a A_2\vartheta_2^3 \quad [\text{W}] \quad (10 - 4)$$

أو:

$$p = \frac{A\rho_a\vartheta}{2}\vartheta^2 - \frac{A_2\rho_a\vartheta_2}{2}\vartheta_2^2 \quad [\text{W}] \quad (10 - 5)$$

ينتج:

$$p = \frac{\dot{m}}{2} (\vartheta^2 - \vartheta_2^2) \quad [W] \quad \langle 10 - 6 \rangle$$



الشكل (10 - 7) مبدأ الجريان ضمن عنفة ربحية

بتعويض قيمة $\dot{m}$ من العلاقة (10-1) والعلاقة (10-2) ينتج:

$$P = \frac{\rho_a \left(\frac{\vartheta + \vartheta_2}{2} \right) \cdot A_0}{2} \cdot (\vartheta^2 - \vartheta_2^2) \quad [W]$$

أو:

$$\begin{aligned} p &= \frac{\rho_a A_0 \vartheta}{4} \left(1 + \frac{\vartheta_2}{\vartheta} \right) \vartheta^2 \left[1 - \left(\frac{\vartheta_2}{\vartheta} \right)^2 \right] \quad [W] \quad \langle 10 - 7 \rangle \\ &= \frac{\rho_a A_0 \vartheta^3}{2} \cdot 0.5 \left(1 + \frac{\vartheta_2}{\vartheta} \right) \left[1 - \left(\frac{\vartheta_2}{\vartheta} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

الاستطاعة العظمى للرياح عبر مقطع مساوٍ لمقطع العنفة:

$$p_{\max} = 0.5 \rho_a A_0 \vartheta^3 \quad [W] \quad \langle 10 - 8 \rangle$$

أما معامل الاستطاعة العظمى للعنفة والاستطاعة العظمى للرياح عبر مقطع العنفة فهو:

$$C_p = \frac{P}{P_{\max}} \quad \langle 10 - 9 \rangle$$

وبالتعويض ينتج أن:

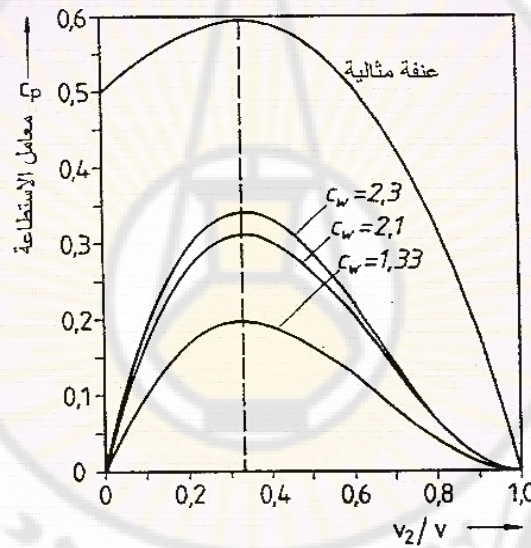
$$C_p = 0.5 \left(1 + \frac{\theta_2}{\theta}\right) \left[1 - \left(\frac{\theta_2}{\theta}\right)^2\right] \quad (10 - 10)$$

العلاقة بين C_p والنسبة $\frac{\theta_2}{\theta}$ مبينة تخطيطاً في الشكل (8-10).

يلاحظ أن القيمة العظمى لمعامل الاستطاعة C_p أو $C_{p_{max}}$ تكون عند $\frac{\theta_2}{\theta} = \frac{1}{3}$ وتكون قيمة $C_{p_{max}} = 0.593$.

ولكن:

$$\theta_0 = \frac{\theta + \theta_2}{2} = \frac{\theta + \frac{\theta}{3}}{2} = \frac{2}{3} \theta \quad (10 - 11)$$



معامل	$c_w = 2,3$: مقطع بشكل حرف C
المقاومة	$c_w = 2,1$: صفيحة مربعة الشكل
	$c_w = 1,33$: طاسات متصالية

الشكل (8-10) مقارنة لمعاملات الاستطاعة لعنفة مثالية حسب (BETZ) مع عدة أشكال عنفات

وبالتالي فإن عنفة مثالية تستطيع تحويل 59.3% من طاقة الرياح إلى طاقة مفيدة ويجب تصميم العنفة بحيث تكون سرعة الرياح بعد العنفة مساوية 1/3 من سرعة الرياح قبل العنفة أو $\theta_2 = \frac{\theta}{3}$.

لكن القيمة الفعلية للاستطاعة المفيدة الناتجة من العنفة هي دائماً أصغر من معامل الاستطاعة المثالي الأعظمي ولا علاقة لنوع العنفة بقيمة هذا المعامل، بهذه الطريقة استطاع العالم (Betz) عام 1926 استنتاج قيمة الاستطاعة النظرية العظمى.

في أبحاث أكثر حداثة وجد (Holscher) عام 1991 قيمة جديدة لمعامل الاستطاعة العظمى $C_{p,max} = 0.5$ ، لاحقاً في هذا الكتاب سيتم التعامل مع قيمة هذا المعامل حسب (Betz) $C_{p,max} = 0.593$.

10-2-2 معامل الاستطاعة لعجلة مقاومة:

إذا وضعت قطعة من صفيحة عمودياً على اتجاه الرياح فستؤثر على هذه القطعة قوة تسمى قوة المقاومة وعندما لا تتحرك القطعة أي تثبت في مكانها تكون قوة المقاومة.

$$F_W = C_W \frac{\rho_a}{2} \cdot \vartheta^2 \cdot A \quad [N] \quad (10 - 12)$$

F_W : قوة المقاومة [N].

ρ_a : كثافة الهواء $[kg/m^3]$.

ϑ : سرعة التدفق $[m/s]$.

A : مساحة الصفيحة الموجهة عمودياً على التيار $[m^2]$.

C_W : معامل المقاومة.

في حالة أجسام ذات أشكال هندسية مختلفة تتعلق قيمة C_W (معامل المقاومة) بالشكل الهندسي للجسم. يبين الشكل (9-10) معامل المقاومة لأجسام ذات أشكال هندسية مختلفة بنهايات حادة.

في هذه الأشكال لا يتأثر معامل المقاومة بعدد رينولدز.

أما من أجل ورقة دولاب دوار كما في الشكل (10-10) فإن قوة المقاومة للوضع المبين يمكن إيجادها وفق العلاقة:

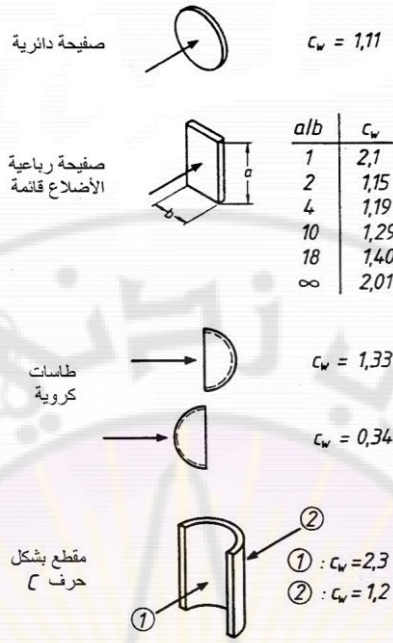
$$F_W = C_W \frac{\rho_a}{2} \cdot (\vartheta - u)^2 \cdot A \quad [N] \quad (10 - 13)$$

F_W : قوة المقاومة [N].

C_W : معامل المقاومة للجناح.

ϑ : سرعة الرياح قبل العجلة $[m/s]$.

u : السرعة المحيطة للعجلة $[m/s]$.



الشكل (9-10) معامل المقاومة لأجسام ذات أشكال هندسية مختلفة

عندما يكون كل من الجناح والسرعة المحيطية باتجاه حركة الرياح فإن المقاومة تتعلق بفرق السرعتين.

الاستطاعة المطبقة على العجلة هي:

$$P = F_W \cdot U \quad [W] \quad (10 - 14)$$

من العلاقة (10 - 13) و (10 - 14) ينتج:

$$P = C_W \frac{\rho_a}{2} \cdot (\vartheta - u)^2 \cdot UA \quad (W) \quad (10 - 15)$$

الاستطاعة العظمى للرياح المطبقة على مساحة الجناح A هي:

$$P_{MAX} = \frac{\rho_a}{2} \cdot (\vartheta)^3 \cdot A \quad (W) \quad (10 - 16)$$

ويكون معامل الاستطاعة C_{PW} هو النسبة بين استطاعة العجلة P واستطاعة الرياح العظمى الممكنة P_{MAX} أو:

$$C_{PW} = \frac{C_W \frac{\rho_a}{2} \cdot (\vartheta - u)^2 \cdot UA}{\frac{\rho_a}{2} \cdot (\vartheta)^3 \cdot A} \quad (10 - 17)$$

وينتج:

$$C_{PW} = C_W \left(1 - \frac{U}{9}\right)^2 \cdot \frac{U}{9} \quad (10 - 18)$$

يتم استنتاج القيمة العظمى لمعامل الاستطاعة لعجلة مقاومة من العلاقة (10 - 18) وبتعويض $\frac{U}{9} = \frac{1}{3}$ يكون.

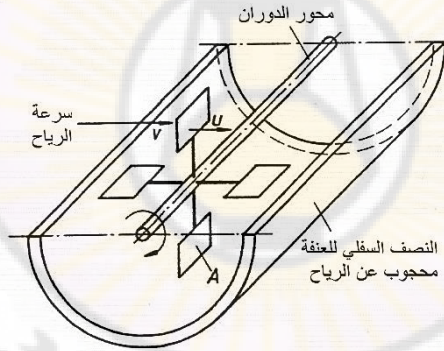
$$C_{P.WMAX} = C_W \cdot \frac{4}{27} \quad (10 - 19)$$

نعتبر أن سرعة الرياح بعد العجلة مساوية للسرعة المحيطية U، عندها تصبح العلاقة (10 - 18) على الشكل التالي:

$$C_{PW} = C_W \left(1 - \frac{92}{9}\right)^2 \cdot \frac{92}{9} \quad (10 - 20)$$

يبين الشكل (9-10) كما ذكرنا مقارنة لمعامل المقاومة لأشكال أجسام مختلفة.

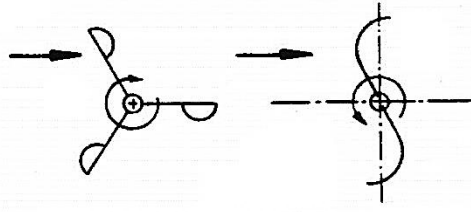
يبين الشكل (8-10) أن أعلى قيمة لمعامل الاستطاعة C_P عند أعلى قيمة لمعامل المقاومة $C_W = 2.3$ تبلغ 34%.



الشكل (10-10) مبدأ عمل عجلة المقاومة

تعتبر عجلة المقاومة وبسبب القيم المنخفضة لمعامل الاستطاعة قليلة المردود وغير مناسبة من حيث طريقة تشكيل الأجنحة.

يبين الشكل (11-10) نموذجين شهيرين لعجلة المقاومة هما: مقياس السرعة وعنفة سافونيوس.



مقياس السرعة

مروحة سافونيويس

الشكل (10-11) نموذجين معروفين لعجلة المقاومة (منظر علوي)

بواسطة أجنحة مدروسة ايروديناميكياً يمكن الوصول إلى قيم أعلى بشكل ملحوظ لمعامل الاستطاعة.

10-2-3 الجريان حول الجناح الحامل:

للحصول على أعلى معامل استطاعة ممكن، لا بد من الوصول إلى التصميم الأمثل للأجنحة وقد تم التفكير مباشرة بالأجنحة الحاملة للطائرات وكذلك بريش العنفات الغازية. يبين الشكل (10-12) التدفق حول مقطع لجناح حامل مع منحنى الضغط على امتداد شكل المقطع.

بسبب الشكل المنحني للمقطع يحصل تسارع على الجهة العليا للمقطع أي تصبح السرعة أكبر من السرعة في بداية المقطع بينما يحدث عكس ذلك على الجهة السفلية.

وحيث تزداد السرعة (حسب برنولي) يقل الضغط الستاتيكي في الأعلى ويزداد في الأسفل لأن السرعة تصبح أقل وبالتأثير المشترك للضغط المنخفض في الجهة العليا والمرتفع في الجهة السفلى تنشأ قوة تسمى قوة الرفع.

يمكن حساب قوة الرفع للجناح الحامل من التكامل التالي:

$$F_A = \int_a^b (P_V - P_O) \cdot L \cdot dx \quad [N] \quad (10 - 21)$$

$$F_A = \int_{x_s}^{x_h} (P_V - P_O) \cdot L \cdot dx \quad [N] \quad (10 - 22)$$

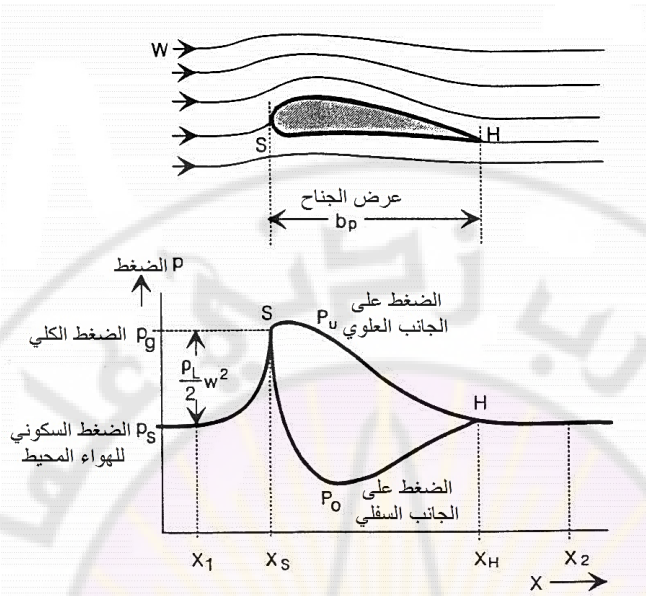
F_A : قوة الرفع [N].

P_V : الضغط على الجانب السفلي للجناح $[N/m^2]$.

P_O : الضغط على الجانب العلوي للجناح $[N/m^2]$.

L : طول الجناح [m].

B_p : عرض الجناح [m].



الشكل (10-12) توزيع على جناح حامل ذو تشكيل إيروديناميكي مناسب

10-3 ميكانيك الرياح (Aerodynamic) للعنفة الريحية

10-3-1 معامل قوة الرفع ومعامل المقاومة:

يؤثر على الجناح عند وصفه في مجرى هوائي شكل (10-12) قوتان: قوة الرفع F_A التي تكون عمودية على اتجاه الرياح وقوة المقاومة F_{RS} التي تكون موازية لاتجاه الرياح الشكل (10-13).

تسمى الزاوية α_A الواقعة بين الخط الوسيط للمقطع (الخط الواصل بين بداية ونهاية المقطع) واتجاه الرياح بزاوية العمل.

تنشأ قوة المقاومة F_{RS} من الاحتكاك على سطح الجناح ويمكن صياغتها بالعلاقة التالية:

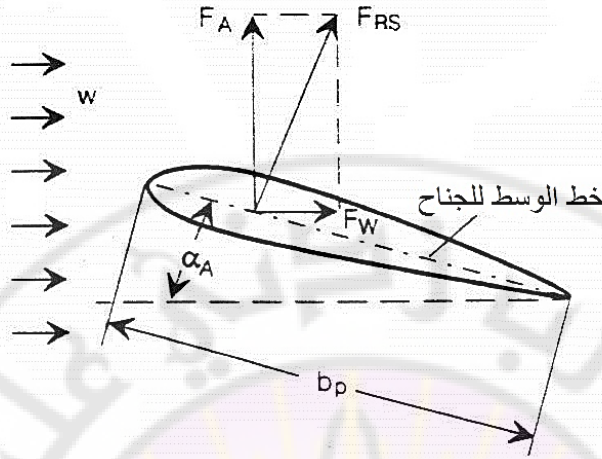
$$F_R = C_r \frac{\rho_a}{2} \cdot (\vartheta)^2 \cdot A \quad [N] \quad (10-23)$$

C_r : معامل المقاومة.

ρ_a : كثافة الهواء $[kg/m^3]$.

ϑ : سرعة الرياح $[m/s]$.

A : مساحة كافة الأجنحة $[m^2]$.



الشكل (10-13) القوى المؤثرة على الجناح الحامل: قوة الرفع F_A ، قوة المقاومة F_{RS} ، القوة المحصلة α_A ، زاوية العمل ϕ_p ، عرض الجناح

عندما يكون المقطع الطولي للجناح مستطيل الشكل تكون مساحته:

$$A = l_p \cdot L \cdot Z_F \quad [m^2] \quad (10 - 24)$$

l_p : عرض الجناح [m].

L : طول الجناح [m].

Z_F : عدد الأجنحة ويمكن صياغة قوة الرفع F_A بنفس الطريقة:

$$F_A = C_A \cdot \frac{\rho_a}{2} (\vartheta)^2 \cdot A \quad [N] \quad (10 - 25)$$

F_A : قوة الرفع [N].

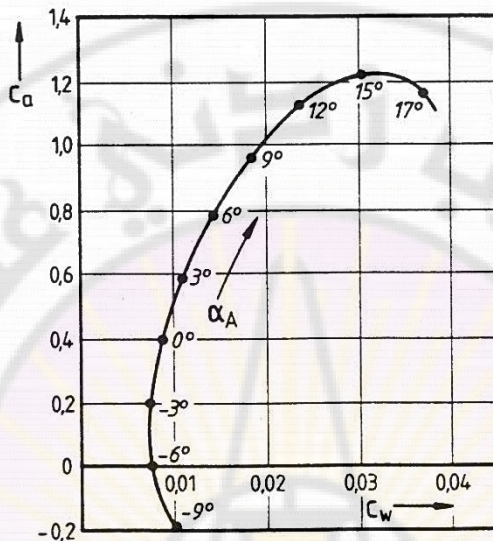
C_a : معامل المقاومة.

A : مساحة الأجنحة $[m^2]$.

تُعتبر العلاقتان (10 - 24) و (10 - 25) صالحتان للاستخدام في حال تم وبطريقة مناسبة إيجاد قيم وسطية للمتغيرات ϑ و C_r و C_a على طول الجناح وإلا يجب إجراء التكامل للعلاقتين على طول الجناح.

ينتج من جمع القوتين F_A و F_R قوة محصلة F_{RS} ، يتم إيجاد قيم C_r و C_a لجناح ما تجريبياً ويُرسم مخطط العلاقة بينهما مع قيم مختلفة لزاوية العمل α_A . يسمى المخطط القطبي كما في الشكل (10-14)، نلاحظ أنَّ الجناح في هذا المقطع تكون له قوة رفع موجبة حتى مع زاوية عمل α_A سالبة $\alpha_A = -6^\circ$.

القيمة العظمى للرفع تكون عند زاوية حمل $\alpha_A = 15.5^\circ$ وتبدأ قيمة الرفع تتناقص مع زيادة الزاوية حيث يبدأ التيار بالاصطدام بالسطح الخلفي للجناح. النسبة C_a/C_r يرمز لها بالرمز E_G ويسمى عدد الانزلاق.



الشكل (14-10) مثال لمخطط قطبي بسيط لجناح حامل ($R_e = 10^5$)

استفيد من هذا العدد في توصيف الأجنحة لاسيما من ناحية الكفاءة، الشكل (14-10) خاص لعدد رينولدز محدد $R_e = 10^5$ لكي يتم حساب الجناح الحامل يجب معرفة المنحنيات من الشكل (14-10).

لأعداد رينولدز واقعة في مجال التصميم في العنفات البطيئة يكون عدد رينولدز عند القطر الخارجي للعنفه من الفئة 10^5 بينما في العنفات الحديثة السريعة تكون أعداد رينولدز من الفئة 10^6 إلى 10^7 . يُحسب عدد رينولدز وفق العلاقة:

$$R_e = \frac{\omega \cdot b_p}{\vartheta'} \quad (10 - 26)$$

ω : سرعة الرياح النسبية وتقاس $[m/s]$.

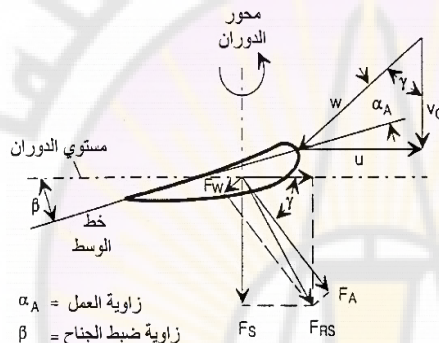
b_p : عرض القطع $[m]$.

ϑ' : اللزوجة $[m^2/s]$.

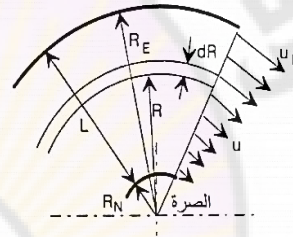
10-3-2 سرعة الرياح والقوى المؤثرة على الأجنحة:

يبين الشكل (10-15) السرعة والقوى التي تؤثر على مقطع جناح العنفة. يدور الجناح في مستوي الدوران بسرعة محيطية u حول محور الدوران. أما الرياح فتهب بسرعة v_0 وبذلك تنتج سرعة الرياح النسبية w . تسمى الزاوية بين الخط الوسط للمقطع والسرعة النسبية α_A بزاوية العمل أما الزاوية β بين خط الوسط ومستوي الدوران فتسمى زاوية ضبط (عيار) الجناح. تنتج قوى الرفع F_A والمقاومة F_R من السرعة النسبية.

ينتج من هاتين القوتين القوة المحصلة F_{RS} وهذه القوة يمكن تحليلها إلى قوتين: مماسية F_t ومحورية F_s .



- α_A = زاوية العمل
- β = زاوية ضبط الجناح
- γ = الزاوية بين سرعة الرياح و السرعة النسبية
- u = السرعة المحيطية
- v_0 = سرعة الرياح في مستوي الدوران
- w = سرعة الرياح النسبية
- F_W = قوة المقاومة
- F_A = قوة الرفع
- F_{RS} = القوة المحصلة
- F_T = المركبة المماسية للقوة المحصلة
- F_S = المركبة المحورية للقوة المحصلة



- R_E = نصف القطر الخارجي للعجلة
- R_N = نصف قطر الصرة
- L = طول الجناح
- u = السرعة المحيطية
- u_E = السرعة المحيطية عند نهاية الجناح

الشكل (10-15) السرعة وقوى الرياح التي تؤثر على مقطع جناح العنفة عند العمل

تنتج الحركة الدورانية وبالتالي الاستطاعة عن القوة F_T . يحسب عنصر الاستطاعة dp على جزء الجناح d_r من العلاقة:

$$dp = u dF_T \quad [W] \quad (10-27)$$

dF_T : عنصر القوة المماسية المؤثرة على عنصر الجناح d_r [N].

u : السرعة المحيطية عند نصف القطر R [m/s].

عند نظام العمل الأمثل تكون C_r أصغر بكثير من C_a وبالتالي تكون F_R أصغر بكثير من F_A أو $F_A \approx F_{RS}$ وعندها تنتج القوة المماسية من القوة F_A ويكون:

$$dF_T = dF_A \cos \gamma \quad [N] \quad (10 - 28)$$

وتصبح الاستطاعة:

$$dp = u \cos \gamma dF_A \quad [W] \quad (10 - 29)$$

أو:

$$dp = u \cos \gamma C_a \frac{\rho_a}{2} \omega^2 dA \quad [W] \quad (10 - 30)$$

ومن الشكل (10-15) يمكن صياغة $\cos \gamma$ كما يلي:

$$\cos \gamma = \frac{\theta_0}{\omega} = \frac{\theta_0}{\sqrt{\theta_0^2 + u^2}} \quad (10 - 31)$$

أما المساحة dA :

$$dA = b_p Z_F \cdot dR \quad (10 - 32)$$

وبالتالي بتعويض العلاقتين (10 - 31) و (10 - 32) في العلاقة (10 - 30)

وكذلك تعويض قيمة $\omega^2 = u^2 + \theta_0^2$ في نفس العلاقة ينتج:

$$dp = C_a \frac{\rho_a}{2} U \theta_0 \sqrt{\theta_0^2 + u^2} b_p \cdot Z_F \cdot dR \quad [W] \quad (10 - 33)$$

تتغير قيمة u غالباً مع تغير القطر وبالتالي تنتج الاستطاعة الكلية للعنفة p من تكامل

العلاقة (10 - 33) في المجال R_N إلى R_E .

حيث: R_N نصف قطر الصرة.

R_E نصف قطر العنفة.

تبين العلاقة (10 - 33) أن الاستطاعة عند مقطع محدد يحددها معامل الرفع C_a ومن

أجل نظام عمل معين تحددها السرعة u و θ أي سرعة الدوران وسرعة الرياح وتبين هذه

العلاقة أيضاً أثر شكل المقطع على الاستطاعة الناتجة.

بطريقة مشابهة يمكن إيجاد قوة الدفع المحورية:

$$dF_S = dF_A \cdot \sin \gamma \quad [N] \quad (10 - 34)$$

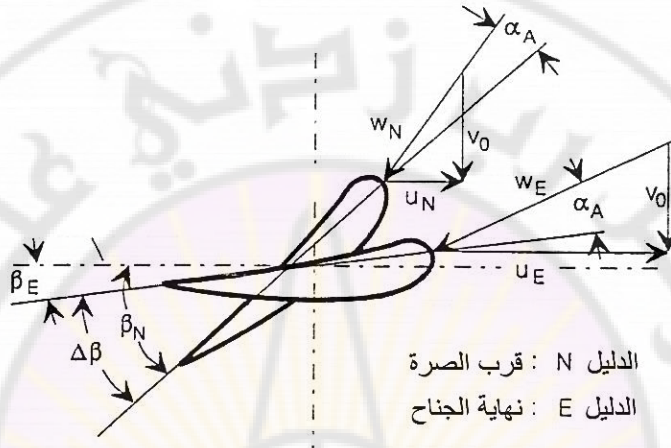
أو:

$$dF_S = C_a \frac{\rho_a}{2} u \sqrt{\theta_0^2 + u^2} dA \quad [N] \quad (10 - 35)$$

أو:

$$F_s = \int_{R_N}^{R_F} C_a \cdot \frac{\rho_a}{2} u \cdot \sqrt{u^2 + v_0^2} \cdot b_p \cdot Z_F \cdot dR \quad [N]$$

هذه القوة يجب احتواؤها بواسطة مضجع (رولمان) أفقي على محور الدوران.



- α_A = زاوية العمل
- β = زاوية ضبط الجناح
- u = السرعة المحيطية
- v_0 = سرعة الرياح في مستوي الدوران
- w = السرعة النسبية

الشكل (10-16) فتل الجناح بزاوية قدرها $\Delta\beta$

10-3-3 فتل الجناح:

نظراً لزيادة السرعة المحيطية مع الابتعاد عن محور الدوران فإن السرعة النسبية تزداد قيمتها ويتغير اتجاهها على امتداد الجناح وللحصول على قيم واتجاه أمثل للسرعة النسبية أي للحفاظ على زاوية عمل ثابتة $\alpha_A = \text{Const}$ يجب فتل الجناح بمقدار $\Delta\beta$ بشكل منتظم من بداية الجناح وحتى نهايته كما في الشكل (10-16).

يتم فتل الجناح عادة من أجل زاوية عمل ثابتة أي من أجل سرعة رياح معينة أو نقطة عمل معينة ويتم ذلك عامة من أجل السرعة النسبية لدوران العنفة. عند سرعات أعلى أو أدنى تكون الضياعات حتمية في الشكل (10-15). يتم فتل الجناح من بدايته وحتى نهايته باتجاه عقارب الساعة.

10-3-4 الفواقد الايروديناميكية على الجناح:

يبلغ المعامل الأعظمي حسب Betz، $C_{p_{max}} = 0.593$ ، هذه القيمة هي قيمة نظرية لأنه عملياً تنشأ في الجريانات الحقيقية فواقد تؤدي إلى انخفاض معامل الاستطاعة الأعظمي وهذه الفواقد هي:

- a- الفواقد الإعصارية خلف الجناح.
- b- فواقد الاحتكاك مع سطح الجناح.
- c- فواقد طرفية عند عدد معين من الأجنحة.
- d- فواقد نتيجة في الاختلاف في زاوية العمل بسبب تغير سرعة الرياح واختلافها عن السرعة التصميمية.

a- الفواقد الإعصارية:

بسبب القوة المماسية ينشأ عزم دوران على المحور وتدور العنفة ويؤثر نفس العزم على التيار (الرياح) بالاتجاه المعاكس. لذلك تصل حركة إعصارية باتجاه معاكس لدوران العنفة ويتحول جزء من طاقة الرياح إلى طاقة إعصارية.

يبين المخطط في الشكل (10-17) العلاقة بين الفواقد الايروديناميكية وعدد السرعة λ_a الذي يمثل النسبة بين السرعة المحيطية عند نهاية الجناح U_E وسرعة الرياح أو:

$$\lambda_s = \frac{U_E}{9} \quad (10 - 37)$$

عندما $\lambda_s = 0$ تكون العنفة متوقفة ولا ينتج أي استطاعة وعندها تتحول كامل طاقة الرياح إلى طاقة إعصارية. وتتناقص قيمة الفواقد الإعصارية بشكل حاد مع زيادة λ_s ، وعند $\lambda_s \rightarrow \infty$ تصبح هذه الفواقد صفراً والعلاقات الرياضية التي تصف هذه العلاقة لا يمكن حلها إلا بواسطة عمليات تكامل رقمية.

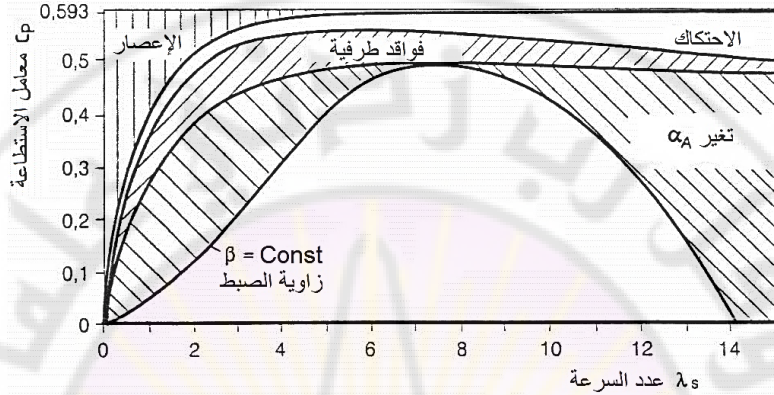
b- فواقد الاحتكاك مع سطح الجناح:

بسبب الاحتكاك تنشأ قوة المقاومة. يعطى عدد الانزلاق بالشكل:

$$E_G = \frac{C_a}{C_r}$$

والذي يُعرّف بأنه النسبة بين معامل الرفع ومعامل المقاومة. ويمكن إيجاد القيمة المثلى لهذا العدد بإنشاء المماس على المنحني القطبي الذي يمر عبر مبدأ الإحداثيات كما في الشكل (10-15).

كلما كان عدد الانزلاق أكبر كانت فواقد الاحتكاك أقل ولمعرفة علاقة فواقد الاحتكاك بعدد السرعة يجب الانتباه إلى أنّ فواقد الاحتكاك تتناسب مع مربع السرعة وعند قيم عالية λ_s تصبح قيم فواقد الاحتكاك عالية جداً وتنخفض السرعة C_p كما في الشكل (10-17).



الشكل (10-17) الفواقد الأيروديناميكية على الجناح

c- فواقد طرفية عند عدد من الأجنحة:

عند نهاية الأجنحة وبسبب فرق الضغط بين أسفل وأعلى الجناح تحصل حركة جانبية للهواء بين الجهتين لتساوي الضغط على الجانبين أو ليصبح فرق الضغط أقل نسبياً.

قد يمتد هذا التأثير الطرقي إلى عمق معين وصولاً إلى الصرة وكلما زاد عرض الجناح وقل طوله كلما ازداد هذا التأثير وهذا يتطلب أن تكون النسبة بين العرض والطول b_p/L أصغر ما يمكن.

بما أنّ قطر الصرة أصغر بكثير من قطر المروحة فإنّ:

$$L \approx R_E$$

R_E : نصف قطر الدوران الخارجي [m].

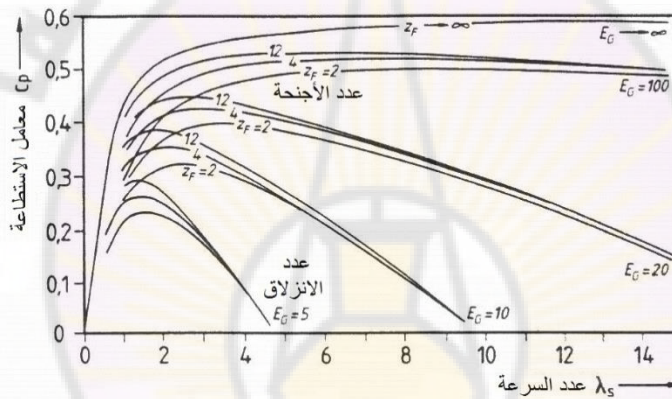
من أجل قيم ثابتة λ_s و C_A نحصل على التناسب التالي:

$$\frac{b_p}{L} \sim \frac{1}{Z_F}$$

أي أنّ النسبة بين عرض الجناح وطوله تتناسب عكساً مع عدد الأجنحة عند عدد لا نهائي من الأجنحة $b_p/L = 0$ وهذا يؤدي لانعدام الفواقد الطرفية وكلما قلّ عدد الأجنحة ازدادت النسبة b_p/L وبالتالي ازدادت الفواقد الطرفية وقلّ معامل الاستطاعة C_p .

في الواقع: عند أعداد سرعة كبيرة يكون تأثير عدد الأجنحة على معامل الاستطاعة قليلاً ويظهر ذلك في الشكل (10-18).

حسب المعادلة (19 - 10) تصغر النسبة b_p/L عند قيم كبيرة لعدد السرعة λ_s مما يؤدي إلى فواقد طرفية أقل.



الشكل (10-18) أثر عدد الانزلاق E_G وعدد الأجنحة Z_F على معامل الاستطاعة من أجل قيم مختلفة لـ λ_s

من الشكل (10-18) يمكن الحصول على الاستنتاجات التالية:

1. عند أعداد انزلاق كبيرة وعدد قليل من الأجنحة Z_F نحصل على قيم أمثل لمعامل الاستطاعة C_p عند أعداد سرعة عالية فقط وبالتالي فالأجنحة عالية الجودة ذات أعداد الانزلاق الكبيرة تتناسب العنفات السريعة جداً.
2. الأجنحة البسيطة بأعداد انزلاق E_G صغيرة يكون عملها الأمثل عند قيم لعدد السرعة λ_s هكذا أجنحة تتناسب العنفات البطيئة.
3. في الأجنحة البسيطة ذات أعداد الانزلاق الصغيرة يكون لعدد الأجنحة أثر كبير على معامل الاستطاعة ويمكن الحصول على معامل استطاعة أمثل بشكل ملحوظ مع عدد أكبر من الأجنحة أي أنّ العنفات البطيئة يجب أن تكون كثيرة الأجنحة.

4. عند أعداد انزلاق كبيرة وأعداد سرعة كبيرة أيضاً لا يتأثر معامل الاستطاعة C_p بعدد الأجنحة وبالتالي من المفيد أن يكون عدد الأجنحة المرتفع الثمن للعنفات السريعة قليلاً.

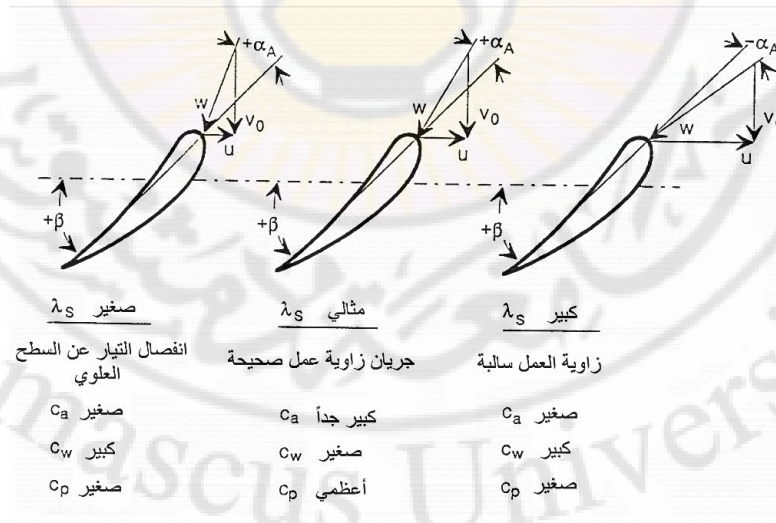
d- فواقد زاوية العمل:

نحصل على القيمة الأمثل لعدد الانزلاق $E_G = C_a/C_r$ كما لاحظنا في الشكل (10-14) عند قيمة معينة لزاوية العمل α_a وتكون هذه القيمة محددة لجناح معين عند سرعة معينة للرياح (السرعة التصميمية) وسرعة دوران ثابتة عند زيادة أو نقصان سرعة الرياح تزداد أو تنقص α_a حسب الشكل (10-19) وبالتالي يتناقص C_a/C_r ومن ثم C_p لأن C_a/C_r و C_p تكون مثالية فقط لأعداد سرعة U_E/ϑ واقعة في المجال التصميمي.

يبين الشكل (10-18) أنه عندما تزداد أو تنقص النسبة $\lambda_S = U_E/\vartheta$ عن القيم التصميمية فإن فواقد زاوية العمل تزداد بشكل ملحوظ.

10-3-5 معامل الاستطاعة وعدد السرعة:

إن عدد السرعة $\lambda_S = U_E/\vartheta$ هو عدد مميز لنوع محدد من الأجنحة:

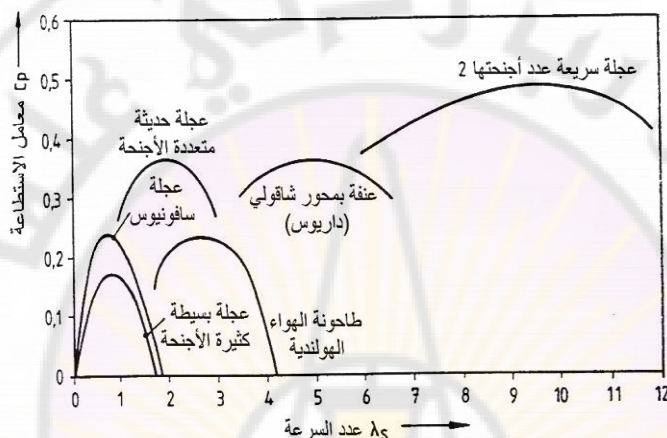


الشكل (10-19) أثر زاوية العمل على معامل الاستطاعة

يبين الشكل (10-20) أنه يمكن إجراء مقارنة لأعداد السرعة ومعاملات الاستطاعة لأنواع مختلفة من العنفات.

العنفات ذات أعداد السرعة الصغيرة نسميها عنفات بطيئة وينتمي إلى هذا النوع عنفات المقاومة مثل عنفات سافونيوس والعنفات كثيرة الأجنحة ويكون عدد السرعة لهذه العنفات من أجل قيم مثلى لمعامل الاستطاعة $\lambda_s < 3$.

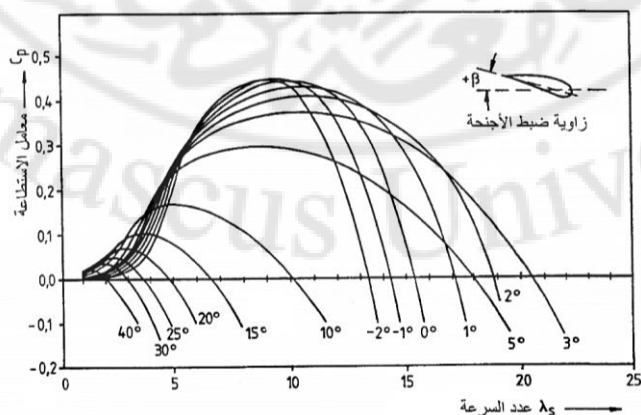
وعندما يكون معامل الاستطاعة الأمثل للعنفة واقعاً عند قيم أكبر لعدد السرعة أو $\lambda_s < 3$ تكون العنفة سريعة.



الشكل (10-20) المجالات المميزة لأشكال مختلفة من العنفات

يبين الشكل (10-21) العلاقة بين معامل الاستطاعة وعدد السرعة لعنفة حديثة وذلك من أجل قيم مختلفة لزواية ضبط (عيار) الجناح β .

نلاحظ أنه لكل زاوية عيار قيمة مثلى مختلفة لعدد السرعة. القيمة العظمى لمعامل الاستطاعة هي $C_p = 0.44$ وذلك عند زاوية ضبط $\beta = -2^\circ$ وعدد سرعة $\lambda_s \approx 9$.



الشكل (10-21) العلاقة بين معامل الاستطاعة وعدد الدوران من أجل قيم مختلفة لزواية ضبط (عيار) الأجنحة

10-3-6 معامل العزم وعدد السرعة:

يعطى العزم على محور الدوران بالعلاقة:

$$M_d = \frac{P}{W} \quad [N.M] \quad \langle 10 - 38 \rangle$$

P: الاستطاعة الناتجة عن المروحة [W].

W: السرعة الزاوية [1/S].

معامل العزم C_M يعطى بالعلاقة:

$$C_M = \frac{M_d}{\frac{1}{2} \rho_a \vartheta^2 A_0 R_E} \quad \langle 10 - 39 \rangle$$

$A_0 = \pi R_E^2$: مساحة فتحة المروحة [m²].

R_E : نصف قطر المروحة [m].

لكن:

$$W = \frac{U_E}{R_E} \quad \left[\frac{1}{S} \right] \quad \langle 10 - 40 \rangle$$

$$\lambda_S = \frac{U_E}{\vartheta} \quad \langle 10 - 41 \rangle$$

أما C_P :

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho_a \vartheta^3 A_0} \quad \langle 10 - 42 \rangle$$

بتقسيم العلاقة $\langle 10 - 39 \rangle$ على العلاقة $\langle 10 - 42 \rangle$ طرفاً إلى طرف ينتج:

$$\frac{C_M}{C_P} = \frac{\frac{P}{\omega}}{\frac{\frac{1}{2} \rho_a \vartheta^2 A_0 R_E}{\frac{1}{2} \rho_a \vartheta^3 A_0}} = \frac{1}{\omega \frac{R_E}{\vartheta}} = \frac{1}{\frac{U_E}{\vartheta}}$$

أو:

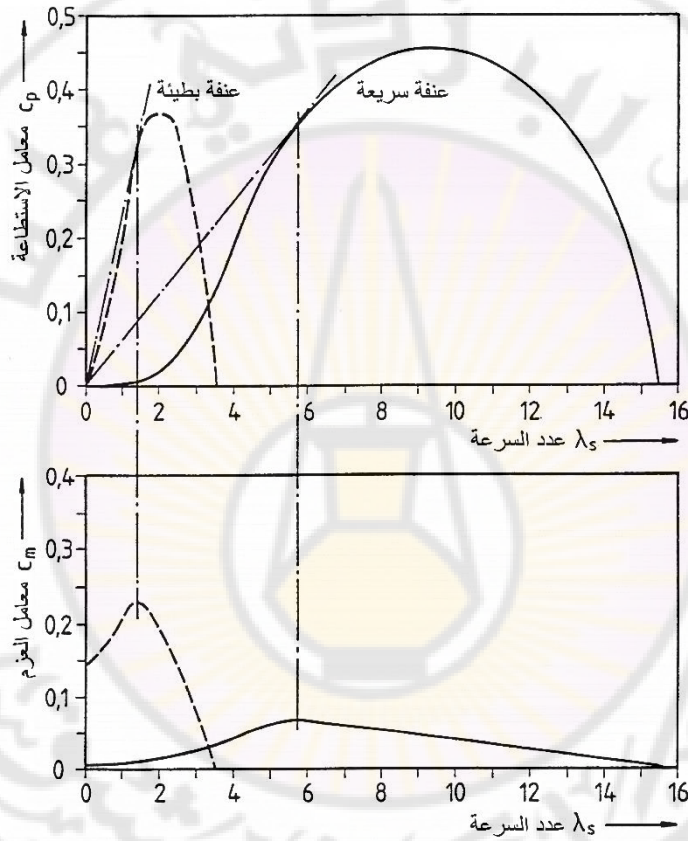
$$\frac{C_M}{C_P} = \frac{1}{\lambda_S}$$

ومنه:

$$C_M = \frac{C_P}{\lambda_S} \quad \langle 10 - 43 \rangle$$

يبين الشكل (10-22) مقارنة لمعامل الاستطاعة ومعامل العزم لعنفه بطيئة وأخرى سريعة وتغيرها حسب عدد السرعة λ_s .

نحصل على القيمة العظمى لمعامل العزم من المماس على منحنى معامل الاستطاعة المار في بداية جملة الإحداثيات. وتُحدد نقطة التماس قيمة عدد السرعة المقابل لمعامل العزم الأعظمي.



الشكل (10-22) معامل الاستطاعة ومعامل العزم لعنفه بطيئة وأخرى سريعة

المميز في الشكل هو الفرق الكبير في عزم الإقلاع عند $\lambda_s = 0$ حيث تحتاج العنفات البطيئة عزم إقلاع كبير وهذا يعني أن العنفات تستطيع الدوران (الإقلاع) حتى عند سرعات هواء صغيرة جداً بعكس العنفات السريعة التي تحتاج إلى سرعة كافية للهواء لتحصل على عزم إقلاع كاف للدوران.

10-3-7 تشكيل عرض الجناح:

عند تزويد العنفة الريحية بالأجنحة تفيد النسبة B كمقياس. وتمثل B النسبة بين ما تشغله الأجنحة من محيط الدائرة التي ترسمها المروحة إلى محيط الدائرة نفسها.

أو:

$$B = \frac{Z_f \cdot b_p}{2\pi R} \quad \langle 10 - 44 \rangle$$

Z_f : عدد الأجنحة.

b_p : عرض الجناح [m].

R : نصف القطر [m].

يمكن إيجاد النسبة B من توازن القوى باتجاه الرياح وفق ما يلي:

يتم حساب عنصر قوة الدفع المحورية على عنصر العجلة dR من العلاقة:

$$dF_s = C_a \frac{\rho_a}{2} U \sqrt{U^2 + \vartheta_0^2} dA \quad [N] \quad \langle 10 - 45 \rangle$$

وهي نفس العلاقة $\langle 10 - 35 \rangle$ حيث ϑ_0 : سرعة الرياح في مستوي الدوران [m/s].

قوة الدفع هذه توقف اندفاع التيار الهوائي (تخفف من السرعة). ومن علاقة دفع القوة فإن قوة الدفع F_s يمكن صياغتها بالشكل:

$$F_s = m \cdot (\vartheta - \vartheta_2) \quad [N] \quad \langle 10 - 46 \rangle$$

ϑ : سرعة الرياح قبل العجلة [m/s].

ϑ_2 : سرعة الرياح بعد العجلة [m/s].

عندما تعمل العنفة في الحالة المثالية لمعامل الاستطاعة يكون:

$$\vartheta_2 = \frac{\vartheta}{3} \quad [m/s] \quad \langle 10 - 47 \rangle$$

وبتعويض $\langle 10 - 47 \rangle$ في $\langle 10 - 46 \rangle$ نحصل على:

$$F_s = m \cdot \vartheta \frac{2}{3} \quad [N] \quad \langle 10 - 48 \rangle$$

من أجل عنصر مساحة على شكل حلقة نصف قطرها R وعرضها dR يكون:

$$dm = 2\pi dR \rho_a \vartheta_0 \quad [g/s] \quad \langle 10 - 49 \rangle$$

ويكون:

$$dF_s = 2\pi R dR \rho_a \vartheta_0 \vartheta \frac{2}{3} \quad \langle 10 - 50 \rangle$$

ولكن:

$$\vartheta_0 = \frac{\vartheta + \vartheta_2}{2} = \frac{\vartheta + \frac{\vartheta}{3}}{2}$$

أو:

$$\vartheta_0 = \frac{2}{3}\vartheta \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (10 - 51)$$

بتعويض (10 - 51) في (10 - 50) ينتج:

$$dF_s = 2\pi R \rho_a \frac{4}{9} \vartheta^2 dR \quad [N] \quad (10 - 52)$$

من العلاقتين (10 - 52) و (10 - 45) ينتج:

$$C_a \frac{\rho}{2} U \sqrt{U^2 + \vartheta_0^2} dA = dF_s = 2\pi R \rho_a \frac{4}{9} \vartheta^2 dR$$

$$dA = b_p Z_f dR \quad \text{وبما أن:}$$

ينتج:

$$C_a b_p Z_f U \sqrt{U^2 + \vartheta_0^2} = dF_s = \frac{4}{9} \pi R \vartheta^2 \quad [N] \quad (10 - 53)$$

وبالإصلاح نحصل على النسبة B الواردة في العلاقة (10 - 44).

$$\frac{Z_f b_p}{2\pi R} = \frac{8}{9C_a} \frac{\vartheta^2}{U \sqrt{U^2 + \vartheta_0^2}} = \frac{8}{9C_a} \frac{\vartheta^2}{U \sqrt{U^2 + \vartheta^2 \frac{9}{4}}}$$

بالإصلاح:

$$\frac{Z_f b_p}{2\pi R} = \frac{8}{9C_a} \frac{1}{\frac{U^2}{\vartheta^2} \sqrt{1 + \frac{9\vartheta^2}{4U^2}}} \quad (10 - 54)$$

من الحركة الدورانية للعنفة:

$$\omega = \frac{U_E}{R_E} = \frac{U}{R}$$

أو:

$$U_E = U \frac{R_E}{R} \quad (10 - 55)$$

يكون:

$$\lambda_s = \frac{U_E}{9} = \frac{U}{9} \frac{R_E}{R} \quad \langle 10 - 56 \rangle$$

نعوض (10 - 56) في (10 - 54) وبعد الإصلاح ينتج:

$$\frac{b_p}{R_E} = \frac{16\pi}{9C_a Z_f} \frac{1}{\lambda_s \sqrt{\lambda_s^2 \left(\frac{R}{R_E}\right)^2 + \frac{4}{9}}} \quad \langle 10 - 57 \rangle$$

تصف المعادلة (10 - 57) العلاقة بين شكل الجناح وعدد الأجنحة وبقية البارامترات الايروديناميكية وستتم مناقشة هذه العلاقة.

• تأثير عدد السرعة:

تبين العلاقة (10 - 57) أنّ عرض مقطع الجناح يتناقص مع زيادة عدد السرعة عند ثبات بقية البارامترات.

يتراوح عدد السرعة للعنفات السريعة بين 5.5 و15، والقيم الصغيرة للعنفات ثلاثية الأجنحة، أما القيم الوسطى للعنفات ثنائية الأجنحة والقيم الكبيرة للعنفات وحيدة الجناح، انظر الشكل (10-20). إذاً يجب دراسة تأثير عدد السرعة مع عدد الأجنحة أو عند مناقشة تأثير عدد السرعة يجب الأخذ بالاعتبار عدد الأجنحة وكلما ازداد عدد السرعة كلما نقص عرض الأجنحة أي أصبحت الأجنحة أضيق.

• تأثير عدد الأجنحة:

يلاحظ أنّ عرض الجناح يتناسب عكساً مع عدد الأجنحة. في العنفات القديمة والبطيئة يتراوح عدد الأجنحة بين 16 و32 بينما في العنفات السريعة الحديثة يكون العدد بين 1 و3 والأكثر شيوعاً 2.

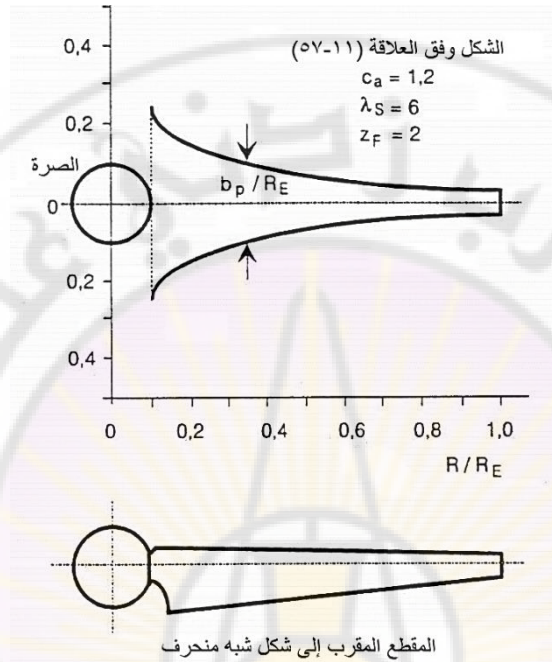
مع ثبات بقية البارامترات يتناسب عرض الجناح عكساً مع عدد الأجنحة.

• تأثير نصف قطر العجلة:

عند ثبات كل البارامترات ما عدا نصف القطر يظهر أنّ عرض الجناح يتناسب عكساً مع نصف القطر وهذا يقود إلى أجنحة عريضة جداً قرب الصرة إلى درجة عدم إمكانية تحقيقها عملياً. لذلك فإنّ الشكل المثالي يتم تقريبه إلى شكل شبه المنحرف حسب الشكل (10-23).

عند الصرة، يُشكّل الجناح للحصول على معبر إلى مقطع دائري غالباً لوصله بالصرة.

عند تصميم الأجنحة يؤخذ بالاعتبار أيضاً وإلى جانب المواصفات الايروديناميكية المتانة والمواد المستخدمة وإمكانية الإنتاج وكذلك كلفة الإنتاج.



الشكل (10-23) المقطع المقرب إلى شكل شبه منحرف في الأسفل، بينما الشكل الأمثل في الأعلى والمقرب في الأسفل لمقطع طولي في جناح عنفة سريعة

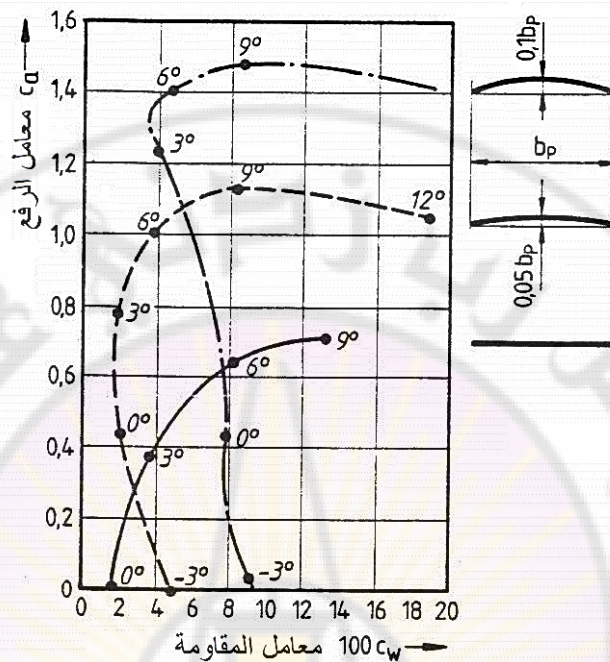
8-3-10 اختيار المقطع العرضي للجناح:

من الخطوات الأكثر أهمية في عملية تصميم العنفات الريحية هي تطوير واختيار مقطع الجناح المناسب.

لتسهيل عملية المصمم تم تطوير سلاسل مدروسة من أشكال مختلفة للمقاطع. وغالباً تم الانطلاق من تطبيقات الجناح الحامل في الطائرات والعنفات مع الأخذ بالاعتبار خصوصيات العنفات الريحية.

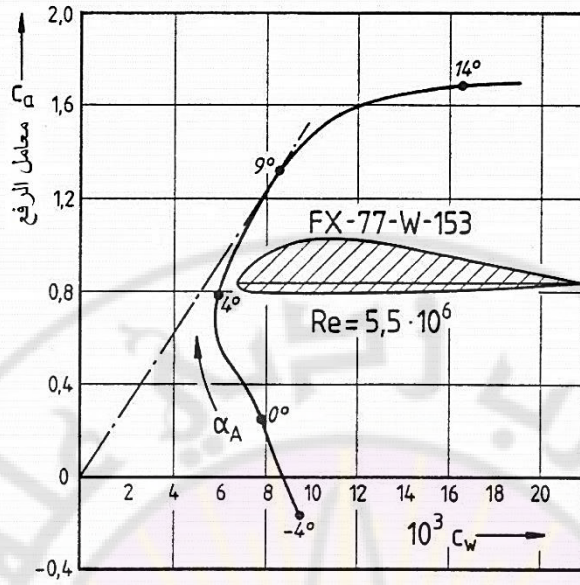
قام العالم Betz مبكراً باختيار بعض المقاطع ومنذ عام 1993 تم في الولايات المتحدة تطوير منهجية واسعة لدراسة وتطوير أشكال مختلفة للمقاطع لاسيما من قبل ناسا (وكالة الفضاء الأمريكية). وتوجد وفق ناسا الآن جداول واسعة للمواصفات الهندسية والايروديناميكية للمقاطع بالإضافة إلى ما هو موجود أو موضوع من قبل مؤسسات بحثية أخرى.

يبين الشكل (24-10) مخططاً لـ Betz للمواصفات الايروديناميكية لبعض العنفات البطيئة تم وضعه عام 1926.



الشكل (24-10) مقاطع مستوية أو مقوسة لعنفات بطيئة حسب Betz عام 1926

يتم اختيار الموقع المناسب بطريقة سهلة وأكثر المقاطع استخداماً وفق Betz هي لصفحة مستوية أو منحنية كجزء من دائرة. ويمكن بواسطة مقاطع كهذه الوصول إلى أعداد انزلاق $E_G < 40$ ($E_G = C_a/C_r$) عند اختيار مقاطع لعنفات سريعة يجب البحث عن أعداد E_G أكبر من ذلك بكثير. وقد تم التوصل لأعداد انزلاق تصل إلى 150 أو 160 لمقاطع خاصة بالعنفات السريعة، انظر الشكل (25-10).



الشكل (10-25) مقاطع أجنحة لعنفات سريعة حسب Wartman 1979

10-3-9 عدد الدوران المثالي:

يُقصد بعدد الدوران المثالي ذلك العدد الذي تستطيع العنفة عنده إنتاج محصول سنوي أعظمي من طاقة الرياح. يمكن صياغة المحصول الكهربائي السنوي لعنفة ريحية بالعلاقة:

$$E_{a,el}(n) = t_a \sum_{\theta=\theta_l}^{\theta=\theta_n} P(\theta, n) h(\theta) \quad \left[\frac{J}{a} \right] \quad (10-58)$$

θ : سرعة الرياح [m/s].

θ_L : السرعة الدنيا اللازمة لتشغيل العنفة [m/s].

t_a : فترة السنة [s/a].

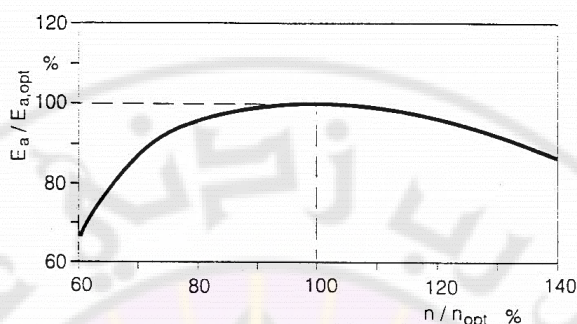
$h(\theta)$: تكرار السرعة.

$P(\theta, n)$: الاستطاعة الكهربائية عند سرعة الرياح وعدد دورات n . يؤخذ من مخططات المنحنيات المميزة للعنفة المعنية كما في الشكل (10-27).

يؤخذ تكرار السرعة من مخططات توضع لكل منطقة على انفراد وتنتج عن قياسات مسجلة لفترة طويلة (سنين عديدة).

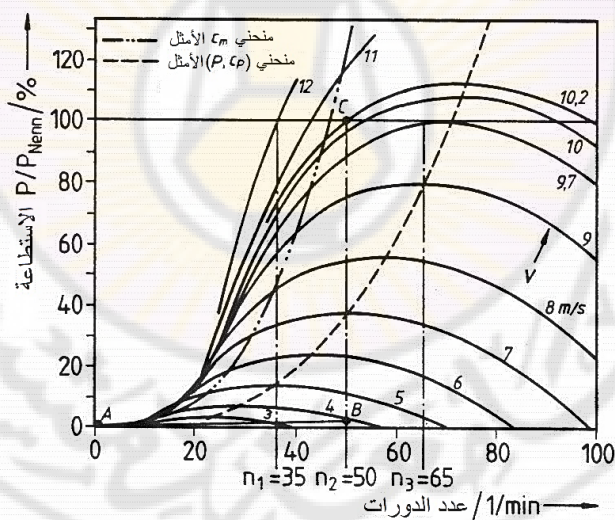
يبين الشكل (10-26) مخططاً بالأرقام لعنفة ريحية سريعة ويظهر العلاقة بين المحصول السنوي وعدد الدورات. فإذا انخفض عدد الدورات بمقدار 30% عن العدد الأمثل، انخفض

المحصول السنوي بمقدار 15% عن المحصول الأمثل وإذا زاد عدد الدورات عن العدد الأمثل بمقدار 30% انخفض المحصول السنوي بمقدار 10% عن المحصول السنوي الأمثل.



الشكل (10-26) العلاقة بين المحصول السنوي وعدد الدورات

يبين الشكل (10-27) حقل (الاستطاعة - عدد الدورات) لعجلة سريعة من أجل سرعة مختلفة للرياح.



الشكل (10-27) حقل (p-n) المميز لعنفة ريشية سريعة

في الشكلين السابقين:

$E_{a,opt}$: المحصول السنوي الأمثل $[J/a]$.

p_{nenn} : الاستطاعة الاسمية.

يُمثل خط الوصل بين قمم حزمة المنحنيات منحني الاستطاعة الأمثل بينما يُمثل الخط المنقط إلى اليسار منحني العزم الأمثل.

يمكننا من الشكل (10-27) تسجيل القراءات التالية من أجل عدد دورات $n_2=50$ ، $n_1=35$ ، $n_3=65$.

من أجل $n_1=35$ تكون سرعة الرياح 5 [m/s] من أجل p_{opt} ومن أجل p_{nenn} تكون 12 [m/s] ، السرعة الدنيا اللازمة لإقلاع العنفة 3 [m/s] θ والمحصول السنوي أقل من الأمثل.

من أجل $n_2=50$ تكون سرعة الرياح 7 [m/s] من أجل p_{opt} ومن أجل p_{nenn} تكون 10.2 [m/s] ، والسرعة الدنيا للإقلاع 4 [m/s] θ والمحصول السنوي أعظماً.

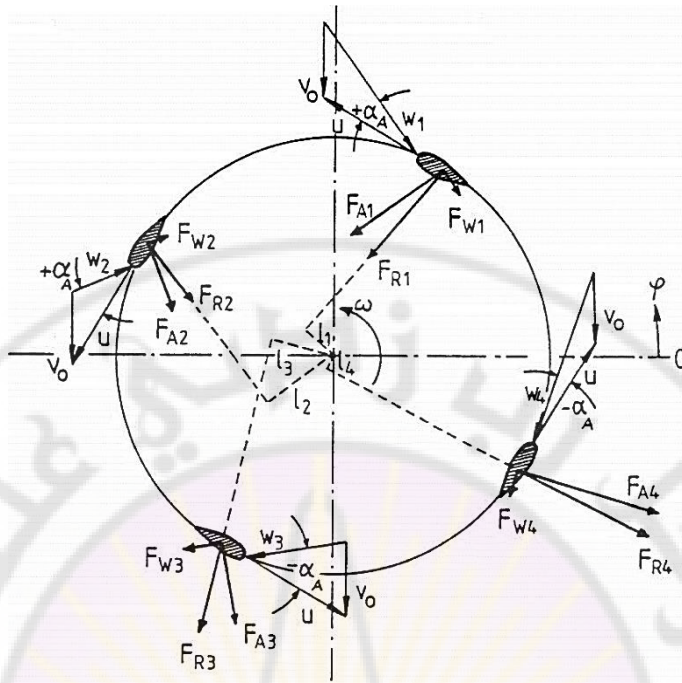
من أجل $n_3 = 65$ تكون سرعة الرياح 9 [m/s] من أجل p_{opt} ومن أجل p_{nenn} تكون 9.7 [m/s] والسرعة اللازمة للتشغيل 5 [m/s] والمحصول السنوي أقل من الأمثل. إذا اختلف عدد الدورات زيادة أو نقصان عن n_2 الذي يعطي محصول سنوي أعظمي فإن طاقة الرياح المتاحة عند السرعة المتوسطة ذات التكرار الأكبر لا تستمر بشكل أمثل وبالتالي يكون المحصول السنوي ليس أعظماً.

من محاذير اختيار عدد الدورات الأكبر أيضاً نشوء الضجيج إذ من غير المرغوب زيادة السرعة المحيطية عن 70 [m/s] إلى 80 .

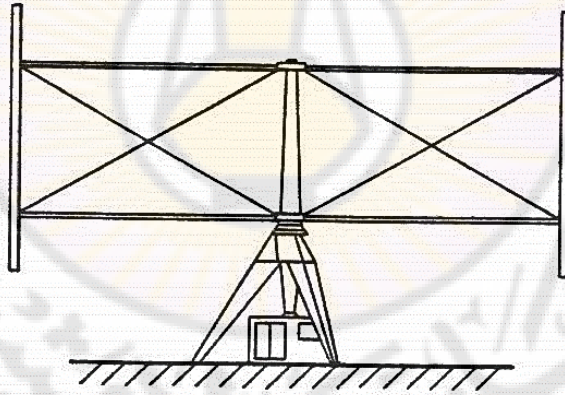
عنفة داريوس:

لعنفة داريوس محور شاقولي تدور حوله الأجنحة كما في الشكل (10-6) وهكذا تتغير زاوية العمل وشروط التدفق بشكل مستمر خلال الدوران. يبين الشكل (10-28) مقطعاً أفقياً في عنفة داريوس يكون للأجنحة نفس المقاطع ولكن المقاطع تتوضع بشكل متناظر حول محور الدوران وتكون قوى الرفع موجّهة مرة نحو الداخل ومرة نحو الخارج وهكذا يتقلب توزع الضغط على جانبي المقطع.

لأنّ السرعة النسبية تتغير حسب زاوية العمل التي تتغير بشكل مستمر وتكون α_A موجبة في المجال $0 \leq \varphi \leq 180$ وسالبة في المجال $180 \leq \varphi \leq 360$ ، ويكون لقوة المقاومة دائماً نفس اتجاه السرعة النسبية W أما قوة الرفع F_A فتكون عمودية عليها.



الشكل (10-28) مثلث السرعة وقوى الرياح على عجلة داريوس



الشكل (10-29) عنفة ذات محور شاقولي وأجنحة مستقيمة

تنشأ قوة الرفع على المقطع المتناظر عندما تكون $\alpha_A \neq 0$ في الوضعين:

$$\varphi = 180^\circ, \quad \varphi = 0^\circ$$

لا تكون هناك قوة رفع وفي كل الأوضاع الأخرى تكون القوة المحصلة F_R لقوى الرفع والمقاومة موجّهة بحيث يكون لها عزم بذراع L حول المحور وتكون كافة العزوم بنفس الاتجاه وهكذا تدور العنفة وتنتج استطاعة.

في حال توقفت العنفة $u = 0$ فإنها لن تستطيع عند رياح ضعيفة الانطلاق ذاتياً من جديد كما في العنفات السريعة ذات المحور الأفقي ولا بد من طاقة مساعدة للإقلاع أو يتم تزويد العنفة بعجلة مقاومة صغيرة وكافية للمساعدة في الإقلاع كعجلة داريوس مثلاً تُركب على نفس المحور.

من مزايا عنفات داريوس:

- بساطة في البناء وعدم التأثير باتجاه حركة الرياح.
- بسبب الوضع الشاقولي يمكن استخلاص الاستطاعة قرب سطح الأرض.
- بساطة في بنية الأجنحة وكلفة إنتاج قليلة نسبياً.

أما مساوئ هذه العنفات فهي:

- عدم القدرة على الإقلاع الذاتي.
 - معامل استطاعة أصغر من العنفات السريعة.
 - اهتزازات أقوى عند التغير المستمر والدوري.
 - لا يزال التحكم بالاستطاعة يُشكّل صعوبة.
- وبسبب هذه الصعوبات لم تلقَ عنفة داريوس حتى الآن انتشاراً واسعاً.

10 - 4 الأحمال المطبقة على العنفات الريحية

ربما يكون إيجاد حلول للتغلب على مشاكل الحمولات المطبقة على العنفات الريحية هو الأصعب في عملية تصميم العنفة وليس الحسابات الايروديناميكية حيث تتعرض مولدات الطاقة الريحية إلى حمولات سكونية وديناميكية متعددة ومتغيرة وحتى متناوبة ودورية والأصعب يحدث عند البحث في الاهتزازات الممكنة حيث تُمثل العنفات الريحية بنية مرنة سواء في الأجنحة أو البرج يجعلها معرضة بشدة لأخطار ناجمة عن الاهتزازات ويهدف تصميم العنفات من حيث المتانة إلى:

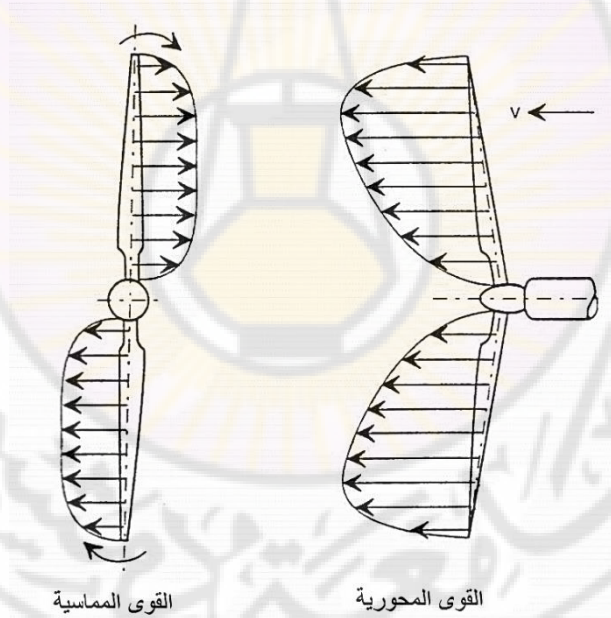
- تصميم منشآت للعمل لفترة طويلة تمتد إلى عشرين وثلاثين سنة دون حدوث اهتلاكات أو أعطال ذات أهمية تتطلب التوقف لعمل العجلة لفترة طويلة نسبياً.
- استقرار وتحمل للحمولات الاستثنائية كالأعاصير مثلاً.
- تحديد ووضع حلول لمشاكل الاهتزازات وتحديد الترددات الذاتية لعناصر النظام لتلافي العمل بالقرب من حالات الطنين. العنصر الأكثر حساسية في المنشآت هو العنصر الدوار بأجزائه المختلفة الذي يجب أن يلقي اهتماماً خاصاً أثناء عملية التصميم.

10-4-1 قوى الرياح الكتلية (الوزن والعطالة):

تؤثر على الأجنحة الدوارة قوى الرياح والكتلة التالية:

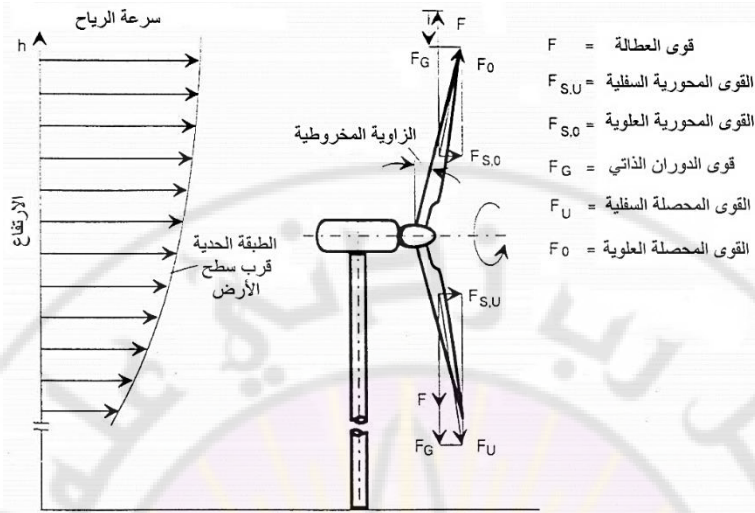
- أ- قوى الهواء المستقرة.
- ب- قوى الوزن الذاتي للأجنحة.
- ت- القوى الطاردة المركزية.
- ث- قوى الرياح الغير مستمرة.
- ح- قوى ناجمة عن توجيه العنفة أثناء العمل.
- أ- قوى الهواء المستقرة:

تُمثل القوى المماسية الواقعة في مستو الدوران والقوى الدافعة المحورية العمودية على مستو الدوران باتجاه المحور، الشكل (10-30).

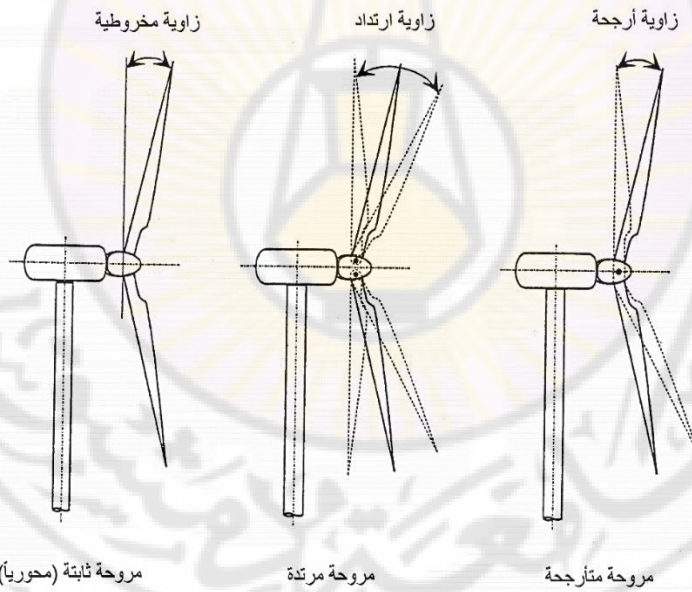


الشكل (10-30) مخطط لتوزيع القوى المماسية والمحورية على الأجنحة

وتتطلب القوى المماسية استقرار على الانحناء الممكن بعكس اتجاه الحركة الدورانية أما القوى المحورية فلها متطلبات استقرار للانحناء باتجاه الرياح. ويجب الأخذ بعين الاعتبار أن العمل عند سرعات للرياح غير السرعة التصميمية، وهو ما يحدث غالباً، يتسبب في توزيع آخر للقوى على الجناح تزداد خطورتها عند السرعات الكبيرة.



الشكل (10 - 31) القوى المؤثرة على الأجنحة والزاوية المخروطية



الشكل (10 - 32) طرق مختلفة لتثبيت الأجنحة

ب- قوى الوزن الذاتي للأجنحة:

تؤثر قوى الوزن الذاتي للأجنحة أثناء العمل وتتحول من قوى شد إلى قوة ضغط عند الوضع الشاقولي ذات عزم انحناء في الأوضاع الأخرى لا سيما الوضع الأفقي. وتكون

هذه القوى ذات تأثير ملحوظ وكبير في حالة العنفات ذات الأقطار الكبيرة وبالتالي الاستطاعة الكبيرة.

ت - القوى الطاردة المركزية:

نظراً للسرعة المنخفضة نسبياً لدوران العنفات الريحية بالمقارنة مع الآلات العنفيه الأخرى فإن قوى العطالة لا تُمثّل مشكلة ذات أهمية ملحوظة. كما أنّ قوى العطالة لها عزم انحناء على الجناح معاكس لاتجاه عزم الانحناء الناتج عن القوى المحورية (وذلك بسبب الزاوية المخروطية لاتصال الأجنحة بالصرة) يقلل من تأثيره.

مع تغير سرعة الدوران وسرعة الرياح تتغير القوة المحصلة المؤثرة على الجناح بالقيمة والاتجاه وليس بالضرورة أن تؤثر على المحور الطولي للجناح كما أنه في كثير من الحالات لا يكون هناك زاوية مخروطية للأجنحة.

للحصول على موازنة أفضل للقوى المتغيرة بشكل مستمر على الجناح يتم اللجوء إلى طرق مختلفة لربط الأجنحة بالصرة.

يبين الشكل (10-32) ثلاث طرق أكثر شيوعاً: إما اللجوء إلى الزاوية المخروطية سابقاً أو استخدام وصلات قابلة للارتداء أو تكون المروحة قابلة للأرجحة عند نقطة الاتصال كما هو مبين في الشكل (10-32) وتؤدي هذه الإجراءات إلى خفض قيمة القوة المحصلة والحصول على موازنة جزئية للقوى المؤثرة على الأجنحة.

ث - قوى الرياح غير المستقرة:

يعود نشوء الأحمال الديناميكية على العنفة الريحية من القوى غير المستقرة لتيار الرياح للأسباب التالية:

أ- عند تركيب العنفة خلف البرج من جهة الرياح وعند كل دورة يمر الجناح (وبقية الأجنحة) في منطقة حجب الرياح من قبل البرج حيث تنشأ تيارات إعصارية، وعند تركيب العنفة أمام البرج تمر أيضاً كافة الأجنحة أمام البرج في كل دورة حيث يتأثر جريان الرياح بالاصطدام بالبرج وتتغير خطوط السرعة بشكل مفاجئ وفي كلتا الحالتين (التركيب الخلفي أو الأمامي) تنشأ قوى ديناميكية على الأجنحة.

ب- تنشأ أيضاً قوى الرياح غير المستقرة بسبب بروفيل السرعة الشاقولي لا سيما في حالة الأقطار الكبيرة، حيث تكون السرعة في الأعلى كما في الشكل (10-31) وبالتالي

تتعرض الأجنحة عند وجودها في الجانب العلوي إلى قوى ديناميكية أعلى من القوى التي تؤثر على الأجنحة في الجانب السفلي.

ج- تنشأ أحمال كبيرة جداً نتيجة العواصف الشديدة المفاجئة، إذ يسبب التغير القوي لفترات قصيرة في سرعة واتجاه الرياح بمضاعفة الأحمال الديناميكية، بشكل يشبه الصدمات، عدة أضعاف وذلك لأن قوى الرياح تتناسب مع مربع سرعته.

ح- قوى ناتجة عن توجيه العنفة أثناء العمل:

عند توجيه العنفة أثناء دورانها باتجاه الرياح تنشأ قوى دورانية تكون صغيرة في حال كان التوجيه يتم ببطء بواسطة آلية تحريك مع محرك أما عندما يكون التوجيه سريع وبواسطة الرياح نفسها فعندها يجب أخذ هذه القوى بالاعتبار عند تصميم العنفة.

10-4-2 القوى الناتجة عن التشغيل والإيقاف:

10-4-2-1 إقلاع العنفة:

في العنفات آلية لتدوير الأجنحة (بهدف التحكم بالاستطاعة مثلاً) وعندما تكون الأجنحة في وضع الإقلاع شكل (10-35) فإن الوزن الذاتي للأجنحة يحمل على مقاطع الأجنحة المتوضعة أفقياً حيث يكون عزم عطالة المقطع صغير إلى حد بعيد مما يتسبب في أحمال كبيرة على الأجنحة المتوضعة أفقياً تتسبب هذه الأحمال في انحناءات لا يمكن إهمالها.

10-4-2-2 إيقاف العنفة:

عند إيقاف العنفة في الحالات الطارئة وعند سرعات عالية تنتج أحمال كبيرة. إذ يتم تدوير الأجنحة بحيث يصبح خط الوسط باتجاه الرياح وعندها تنتج زاوية عمل سالبة مما يؤدي إلى ارتداد القوى المؤثرة على الجناح، وفي حالة العنفات ذات الزاوية المخروطية شكل (10-31) تصبح عزوم قوى الدفع المحورية وعزوم القوى الطاردة المركزية باتجاه واحد، أي تجمع بدل أن توازن بعضها.

10-4-2-3 حالة توقف العنفة:

أكبر قوى تتحملها العنفة وهي ساكنة تكون في حالة التوقف عند رياح إعصارية وهي أكثر الحالات شيوعاً لإيقاف العنفة.

10-4-2-4 مطابقة دوران العنفة مع تردد الشبكة (Netsynchronisation):

عند الوصل المباشر (الصلب) للمولد والعنفة، بدوران بعدد دورات ثابت بشكل قسري. وعندما تتغير سرعة الرياح تنشأ قوى ديناميكية عالية ويمكن تجنب أو التخفيف من هذه القوى بالربط المرن للعنفة والمولد.

10-4-3 الاهتزازات الديناميكية:

عند دراسة ديناميك الاهتزازات للعنفة الريحية عند التصميم يجب مراعاة ألا تحدث حالات طنين ناتجة عن ربط عناصر النظام وخلال العمل ألا تحدث حالات تحريض في مجال الترددات الذاتية لعناصر النظام أو مضاعفاتها. وتتركز مشاكل الاهتزازات الميكانيكية للأنظمة الريحية في المجالات التالية:

- اهتزازات الأجنحة.
- اهتزازات دورانية للمحور الدوار وما يُربط به من عناصر دوار أخرى.
- اهتزازات ناتجة عن توجيه العنفة أثناء العمل.
- اهتزازات الانحناء للبرج.
- اهتزازات جملة النظام.

يوضع للعنفة مخططات طنين كما في الشكل (10-33) يخصص المحور الأفقي لعدد دورات 1/min والمحور الشاقولي للترددات Hz. وتوضع الترددات الذاتية لعناصر النظام أو الجملة ومضاعفاتها (الخطوط شبه الأفقية) على المخطط حزمة الخطوط المستقيمة المارة عبر بداية جملة الإحداثيات تمثل عدد الدورات الكاملة للعنفة ومضاعفاتها.

عدد الدورات الاسمي للعنفة ممثل بخط شاقولي على المخطط.

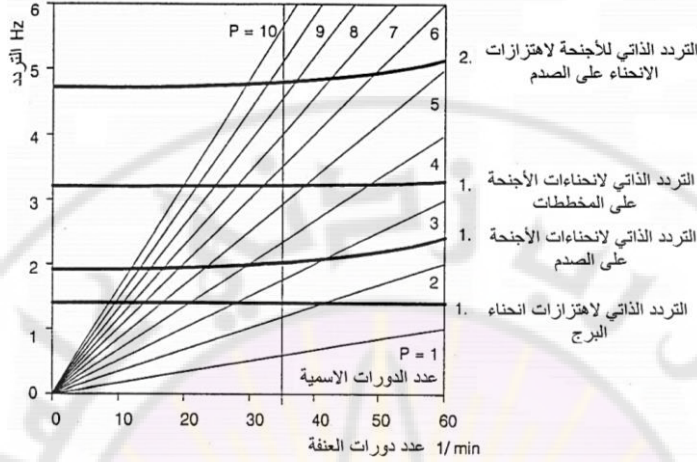
لتجنب حالات الطنين يجب ألا تقع نقاط تقاطع خط عدد الدورات الاسمي مع الترددات الذاتية على أحد خطوط عدد الدورات الكاملة للعنفة ومضاعفاتها ($p = 1, 2, 3 \dots$) إذ يكون تردد التحريض:

$$f = \frac{n \cdot P}{60} \text{ [Hz]}$$

f: تردد التحريض [Hz].

n: عدد دورات العنفة [1/min].

$$1 \leq P$$



الشكل (10-33) مخطط الطنين لعنفة ريحية (عدد الدورات الاسمي 35 دورة/دقيقة)

5-10 النظام الكهربائي

تُستخدم العنفات الريحية السريعة بشكل رئيسي لتوليد كهرباء (تيار متناوب) وتقسّم طرق التشغيل حسب طريقة الوصل على الشبكة إلى ثلاثة طرق:

- 1- ربط مباشر.
 - 2- ربط غير مباشر.
 - 3- نظام الجزيرة المستقلة.
- ✓ الربط المباشر:

تكون عدد دورات العنفة مساوياً لعدد دورات المولد الذي يجب أن يدور بعدد محدد من الدورات حسب التردد المطلوب للتيار الكهربائي (أي حسب تردد الشبكة) يسمى ربط العنفة بالمولد في هذه الحالة ربطاً صلباً ويتسبب في نشوء أحمال ديناميكية كبيرة على العناصر المتحركة.

✓ الربط غير المباشر:

في حالة الربط غير المباشر يمكن العمل بعدد دورات متغير للعنفة والمولد، والتيار الكهربائي الناتج يحتاج أولاً إلى معالجة التردد لي مطابق تردد الشبكة (وهذا يحتاج إلى معدل تردد الشبكة والمولد) حيث يُنتج المولد تياراً متغيراً من حيث التوتر والتردد يتم تحويله أولاً

إلى تيار مستمر وبواسطة نظام تنويب مناسب يتم تحويله إلى التوتر والتردد المرغوبين. وبعد ذلك يتم الربط مع الشبكة أي (ربط غير مباشر).

من محاسن الربط غير المباشر أنه في مجال عدد دورات يتراوح بين 50% و120% من عدد الدورات الاسمي يعمل النظام بشكل أمثل ايروديناميكياً، وإن عدد الدورات المتغير يؤدي إلى التقليل من الأحمال الديناميكية.

✓ نظام الجزيرة المستقلة:

عندما تعمل مجموعة عنفات لتغذية منطقة أو مستهلك محلي بعيداً عن الشبكة العامة تنتفي الحاجة إلى دقة في الحصول على تردد معين كما في طريقة الربط على شبكة بمواصفات دقيقة.

10-6 التحكم

بسبب تغير سرعة الرياح باستمرار وبالتالي تغير الطاقة المتاحة من الرياح، تحتاج العنفات الريحية إلى تحكم لحمايتها من الحمل الزائد ولضمان نوعية جيدة للكهرباء المنتجة وكذلك لضمان عمل العنفة بشكل أئوماتيكي تماماً. ويجب التمييز بين التحكم بعدد الدورات والتحكم بالاستطاعة.

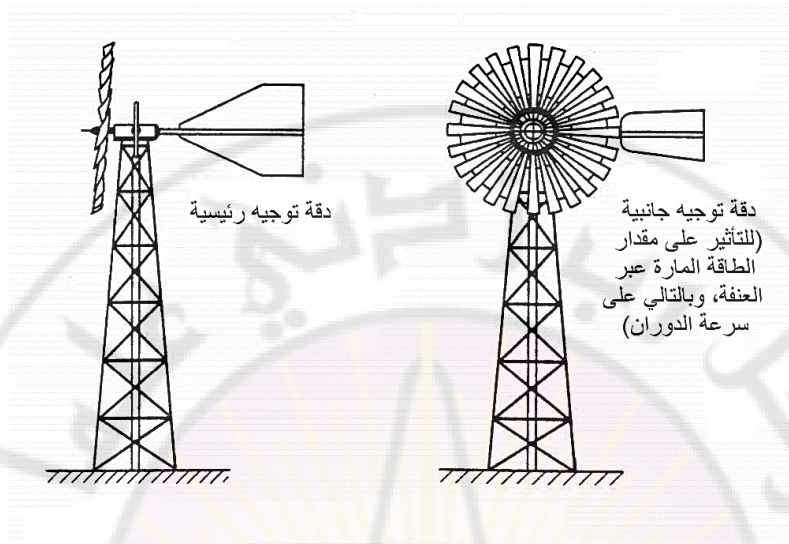
في حالة الربط المباشر يكون عدد الدورات ثابت وبالتالي يكون من الممكن التحكم بالاستطاعة فقط.

أما التحكم بالاستطاعة وعدد الدورات فيكون ممكناً في حالة الربط غير المباشر أو نظام عمل الجزيرة.

10-6-1 التحكم في العنفات البطيئة:

في العنفات البطيئة كثيرة الأجنحة تكون الأجنحة في الغالب مصنوعة من وريقات من صفيحة معدنية مثبتة على الصرة دون قابلية للتحريك. وبالتالي لا يمكن التحكم بعدد الدورات عن طريق تحريك الأجنحة. يمكن التأثير على سرعة الدوران عن طريق قتل العنفة بشكل كامل عن اتجاه الرياح الرئيسي بحيث تتلقى كمية أقل من طاقة الرياح ويمكن أن يتم ذلك بواسطة آلية هيدروليكية أو بالطريقة القديمة التقليدية أي بتزويد العنفة بدقة توجيه إضافية جانبية تقوم بقتل العنفة بما يتناسب مع شدة الرياح كما في الشكل (10-34).

لتجهيزات قتل العنفة (الدفة أو النظام الهيدروليكي) مهمة أخرى وهي حماية العنفة في حالة العواصف الشديدة لأن مقدار القتل يتناسب مع شدة الرياح.



الشكل (10-34) عنفات بطيئة بموجّه جانبي

10-6-2 التحكم في العنفات السريعة:

يهدف التحكم في العنفات السريعة إما إلى زيادة قوى الرياح المؤثرة على الأجنحة أو إلى خفض هذه القوى، ولتحقيق ذلك هناك طريقتان إيروديناميكيتان يمكن اتباعهما:

- التحكم عن طريق تغيير زاوية ضبط (عيار) الأجنحة.
- التحكم عن طريق فصل هادف للتيار عن مقطع الجناح مع بقاء زاوية الضبط (التغيير) β ثابتة.

تُزود كافة العنفات الريحية الكبيرة وحتى الصغيرة حالياً بآلية تحريك لتغيير وضع الأجنحة (تغيير الزاوية β). تتوضع الآلية اللازمة لتدوير الأجنحة حول محورها الطولي في الصرة وتكون قادرة على تدوير الأجنحة بزاوية حتى 90° وهي آلية ذات كلفة عالية نسبياً. طريقة التحكم هذه تسمى أيضاً (pitching).

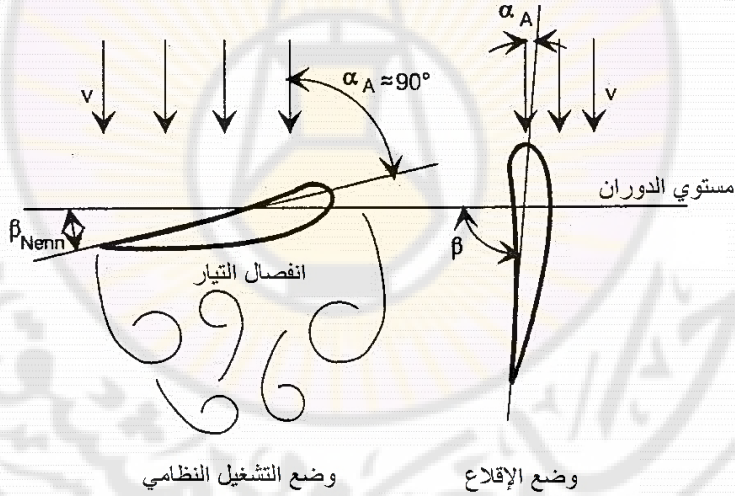
في الكثير من العنفات الصغيرة وبعض العنفات المتوسطة تكون الأجنحة مثبتة في الصرة دون قابلية للتدوير حول محورها الطولي. عند زيادة سرعة الرياح عن السرعة التصميمية تتم عملية التحكم ذاتياً بانفصال التيار عن سطح مقطع الجناح بالتدريج (من الجهة العلوية للجناح) وهكذا تنخفض قوة الرفع على الجناح وتتوقف استطاعة العنفة عن الازدياد يسمى هكذا تحكم بـ (التحكم عن طريق الخنق).

10-6-3 تحكم الإقلاع:

بسبب عدد الأجنحة القليل للعنفات السريعة فإنها غالباً لا تمتلك عزم إقلاع كاف ولكي نتمكن من الإقلاع يجب أن تكون زاوية عيار الجناح β أكبر ما يمكن. يبين الشكل (10-35) وضع مقطع الجناح في حالتي العمل والإقلاع.

عند بداية عملية الإقلاع تكون السرعة المحيطية صفرًا. إذا كانت الأجنحة في وضع العمل فإنَّ العنفة لا تستطيع الإقلاع والسبب هو كبر الزاوية α_A (زاوية العمل) مما يؤدي إلى انفصال تيار الرياح عن الجهة الخلفية للجناح وبالتالي عدم وجود قوة رفع كافية. وتنشأ قوة رفع كافية فقط عن طريق زيادة زاوية ضبط الأجنحة β حتى يلتصق التيار بالجهة الخلفية للجناح من جديد.

عندما تبدأ العنفة بالدوران يجب العودة لخفض قيمة β بشكل مستمر حتى تعود إلى القيمة التصميمية (القيمة في حالة العمل النظامي للعنفة).



- α_A = زاوية العمل
- β = زاوية عيار الأجنحة
- v = سرعة الرياح
- Nenn = اسمي (تصميمي)

الشكل (10-35) وضع مقطع الجناح في حالتي العمل والإقلاع للعنفات السريعة

في الشكل (10-27) تتم عملية التحكم بالإقلاع وفق الخط $A \leftarrow B$. أي أنَّ الاستطاعة المطبقة على محور العنفة هي فقط الاستطاعة اللازمة للتغلب على مقاومة الاحتكاك في المضاجع طيلة عملية الإقلاع.

لإيقاف العنفة يتم قتل الأجنحة لتصبح في وضع الإقلاع، حيث يتم زيادة الزاوية β ببطء وبشكل مستمر حتى تصبح قيمة معامل الاستطاعة صفراً أو $C_a = 0$ ويسمى هذا الوضع بوضع الراية (يكون وضع الجناح مشابهاً لوضع الراية في مهب الرياح). في العنفات ذات الأجنحة المثبتة على الصرة (غير قابلة للتدوير حول محورها الطولي) تكون عملية الإقلاع غالباً صعبة وربما غير ممكنة تلقائياً، ولذلك في حالة العنفات ذات الربط المباشر على الشبكة يكون من السهل الاعتماد على قوة محرك كهربائية مساعدة.

10-6-4 التحكم بالحمل الجزئي:

التحكم الجزئي بالاستطاعة (أو بالحمل) يتم عادة مع إبقاء β ثابتة تقادياً للتشغيل المستمر لآلية قتل الأجنحة وما ينجم عنه من تلف واهتلاك مبكر لهذه الآلية المكلفة.

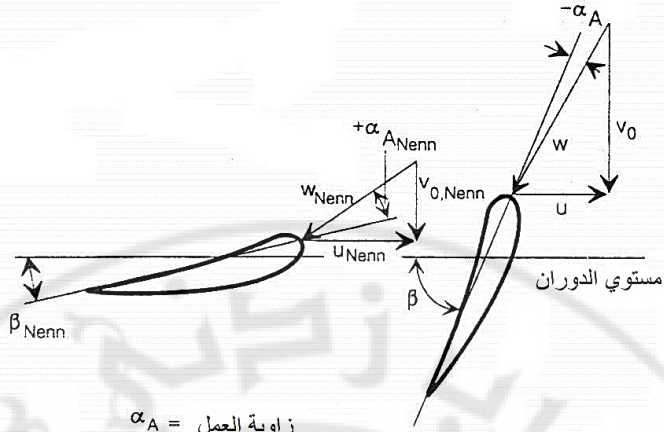
في حالة الربط المباشر والعمل بعدد دورات ثابت يتم التحكم الجزئي بالاستطاعة عن طريق تغيير (أو التحكم بـ) مقدار الاستطاعة المغذية للشبكة.

في مخطط الحقل المميز (استطاعة-عدد دوران) شكل (10-27) يتم ذلك وفق الخط $B \leftarrow C$ من أجل سرعات للهواء تتراوح بين $10.2 \div 3.6$ [m/s] في حالة الربط غير المباشر أو نظام الجزيرة حيث يكون عدد الدورات متغير حسب سرعة الرياح، لا بد من مراقبة سرعة الدوران في شتى حالات العمل. وتتم عملية التحكم بعدد الدورات وبالأستطاعة الجزئية في حالة الربط غير المباشر عن طريق تغييرات على الشبكة الكهربائية وليس عن طريق قتل الأجنحة.

10-6-5 التحكم بالاستطاعة الكلية:

عندما تصبح سرعة الرياح كبيرة ولتقادي ازدياد الاستطاعة عن الاستطاعة التصميمية يتم التحكم عن طريق زاوية الضبط (التعير) β . يبين الشكل (10-36) كيف يمكن التأثير على زاوية العمل α_A عن طريق تغيير زاوية الضبط β .

في حال بقيت β دون تغيير يؤدي ذلك إلى زيادة α_A وبالتالي تزداد القوة المحركة (قوة الرفع) ويتم تجاوز الاستطاعة التصميمية، ويتجنب ذلك يتم زيادة β وبذلك يتم خفض مقدار α_A وبالتالي قوة الرفع، ويحافظ على قيمة أعلى للزاوية β حتى تعود الاستطاعة الناتجة من الرياح لتساوي الاستطاعة التصميمية أو حتى تعود سرعة الرياح إلى السرعة التصميمية.



- α_A = زاوية العمل
 β = زاوية التغيير
 U = السرعة المحيطية
 v_0 = سرعة الرياح في مستوي الدوران
 w = سرعة الدخول النسبية
 $Nenn$ = اسمي (تصميمي)

الشكل (10-36) التحكم بالاستطاعة الكلية عن طريق تدوير (فتل) الأجنحة

عند سرعات عالية جداً تنشأ أعمال غير مسموحة على الأجنحة عندها يجب فتل الأجنحة أي $\beta > 90^\circ$ ، $C_a = 0$ في العنفات ذات الأجنحة ذات الزاوية β الثابتة لا يكون التحكم بالاستطاعة دقيقاً كما في العنفات ذات الأجنحة المتحركة محورياً، وتتراوح الاستطاعة في مجال معين. السبب هو عدم انتظام انفصال التيار عن الجهة الخلفية للجناح، وعند سرعات عالية جداً للرياح لابد من إيقاف العنفة ميكانيكياً.

توجيه العنفة باتجاه الرياح:

للحصول على استثمار أمثل لطاقة الرياح يجب توجيه العنفة بشكل دائم حسب اتجاه الرياح وهذا يتطلب وجود آلية محركية لتوجيه العنفة تستمد التوجيه اللازم من جهاز لتحديد اتجاه الرياح.



الفصل الحادي عشر

أشكال أخرى للطاقات المتجددة

11-1 الطاقة الجيوحرارية

تسود في الأرض درجات حرارة تتراوح ضمن المجال $3000 \div 4000[^\circ\text{C}]$ ويُسبب فرق درجات الحرارة مع سطح الأرض نشوء تيار حار نحو سطح الأرض بمعدل عالمي يبلغ $0.063[\text{W}/\text{m}^2]$ أو $63[\text{kW}/\text{km}^2]$. وتبلغ الطاقة السنوية الناتجة عن هذا التيار الحراري حوالي $3 \times 10^{20}[\text{J}/\text{a}]$ أو $300[\text{EJ}/\text{a}]$ أي ما يعادل أكثر من نصف الاستهلاك العالمي للطاقة.

تُمثل الطاقة الحرارية لجوف الأرض احتياطي هائل لا يمكن مقارنته بما يخرج منه تلقائياً للسطح. وفق تقديرات عالمية محسوبة على أساس عمق يتراوح بين $4 \div 6[\text{km}]$ وطاقة حرارية مستجرة عند منسوب لا يتجاوز $130[^\circ\text{C}]$ ، يبلغ الاحتياطي العالمي من الطاقة الجيوحرارية حوالي $1.8 \times 10^{25}[\text{J}]$. لا يزال استثمار الطاقة الجيوحرارية مركزاً على المناطق النشطة جيولوجياً حيث تتوفر شروط استثمار مناسبة إذ تكون صهارة جوف الأرض غير بعيدة عن السطح وتتسبب في تسخين غير عادي للطبقات السطحية وما تحويه من أحواض أو جيوب مائية.

تتزايد درجة الحرارة بحدود $1[^\circ\text{C}]$ لكل $30[\text{m}]$ عمقاً داخل القشرة الأرضية في المناطق الطبيعية، لكن هذه الزيادة تكون أكبر بشكل ملحوظ في المناطق النشطة جيولوجياً، وعندما يجد الماء المخزون في هذه الطبقات طريقاً طبيعياً إلى السطح فإنه يندفع على شكل بخار أو مزيج من الماء الساخن والبخار أو على شكل ينابيع حارة تتواجد في العديد من بقاع العالم التي تعتبر مناطق ذات نشاط جيولوجي (بركاني أو زلزالي) عند حواف الصفائح التكتونية المتحركة

(عند حواف المحيط الأطلسي وفي وسط المحيط، إيطاليا، إندونيسيا) ويمكن تصنيف أهم الاستثمارات المتاحة تقنياً واقتصادياً للطاقة الجيوحرارية على النحو التالي:

1. بخار جاف ومحمص يُستخرج من مكان حرارية أو يندفع تلقائياً عبر القشرة الأرضية، يُستعمل مباشرة في تدوير عنفة لإنتاج الكهرباء.

2. بخار رطب من بعض الخزانات المائية المضغوطة ضمن صخور حارة وعند وجود مجال للتسرب، تندفع تيارات من الماء الحار المضغوط مع البخار بدرجات حرارة تتراوح بين $180 \div 370 [^{\circ}\text{C}]$ بعد فصل الماء عن البخار يُستخدم الأخير لتوليد الكهرباء أو للصناعات التي تستخدم البخار بينما يمكن استخدام الماء الحار لأغراض التدفئة والتكييف (أي مستهلك آخر للماء الساخن).
3. ينبع الماء الحار: يتدفق ماء دافئ أو حار قليلاً تحت ضغط نظامي (جوي عادي) وذلك من طبقات سطحية متأثرة بدرجة حرارة عالية لطبقات أعمق ويمكن الاستفادة منه لأغراض التدفئة أو التزود بالماء الساخن.
4. الطاقة الحرارية للصخور الحارة في المناطق النشطة جيولوجياً والخالية من الخزانات المائية الجوفية يمكن استثمارها وذلك عن طريق ثقب الطبقات السطحية والوصول لها ثم حقن الماء المضغوط عبر هذه الطبقات ليسخن ويُستخرج على شكل ماء حار أو بخار يُستخدم لأغراض التدفئة أو التكييف والإمداد بالماء الساخن أو توليد الكهرباء عند كفاية درجات الحرارة لذلك.
5. في المناطق النشطة جيولوجياً، كثيراً ما تتواجد جيوب مغلقة مليئة بالماء والغازات الساخنة بضغط عالية وأحجام ضخمة وذلك على أعماق تتجاوز $5[\text{km}]$ ويتطلب استثمارها إمكانية السيطرة على درجات الحرارة وضغوط هائلة لدى الوصول لها تكنولوجياً.
6. في المناطق الأكثر نشاطاً جيولوجياً تتواجد في طبقات على عمق أقل من $5[\text{km}]$ الماغما المنصهرة وهي قابلة نظرياً للاستثمار، والصعوبة تكمن في درجات الحرارة والضغط الهائلة لهذه الماغما.
- يتجاوز الإنتاج (الاستثمار) العالمي للطاقة الجيولوجية حالياً $30[\text{kW}]$ ، حوالي نصفها يُستخدم لتوليد الكهرباء أما النصف الآخر فيُستثمر على شكل طاقة حرارية مباشرة لأغراض التدفئة والتكييف والتزويد بالماء الساخن بالإضافة إلى بعض الأحمال التكنولوجية. طبعاً يكاد يكون هذا الرقم لا يُذكر بالمقارنة مع الاحتياطي العالمي وبالتالي فإن آفاق استثمار الطاقة الجيولوجية هي آفاق واعدة ولا تزيد كلفة إنتاج واحدة الطاقة الكهربائية من هذا المصدر في المنشآت العاملة حالياً عن كلفة الإنتاج في محطات الطاقة.

لا تُعتبر الطاقة الجيوحرارية صديقة للبيئة تماماً بسبب التدفقات الغازية والملحية الضارة كالكبريت والبور والأمونياك وحمض الكبريت وأملاح أخرى، وذلك لأن إعادة حقن هذه المواد إلى الطبقات التي خرجت منها ليست دائماً ممكنة كما أنّ ذلك يتسبب في زيادة كلفة الإنتاج في حال كان الحقن ممكناً بالإضافة إلى ذلك فإنّ هذه المواد تتسبب بضرر لشبكة الأنابيب والتجهيزات المستخدمة في دارات تحويل الطاقة.

من سلبيات الاستثمارات المذكورة:

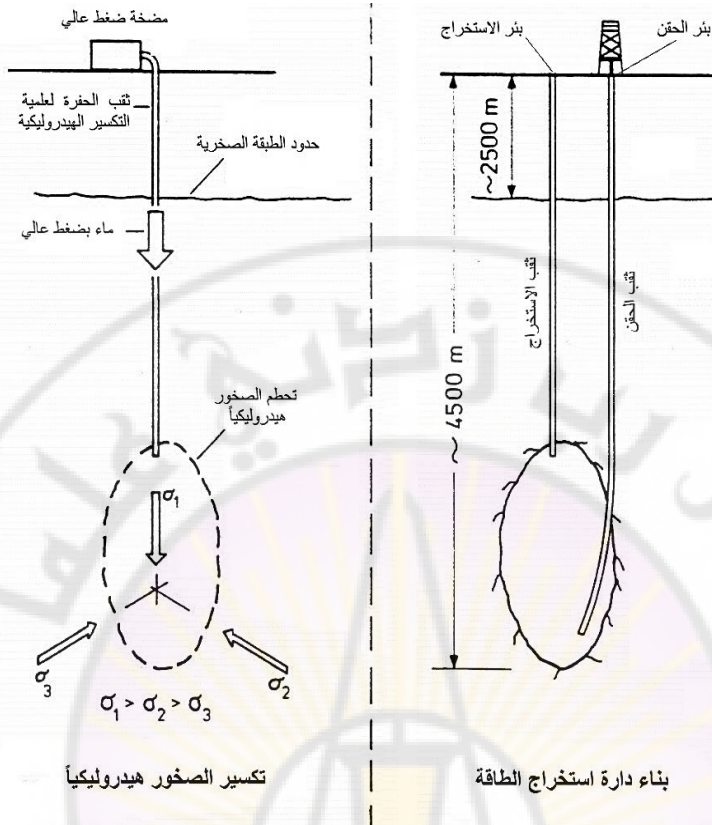
انخفاض المردود في حال انخفاض درجات الحرارة حيث أنّ مردود توليد الكهرباء في هكذا منشآت لا يتجاوز 15%، إلا أنّ كمية كبيرة من الطاقة المهدورة يمكن الاستفادة منها في مجالات أخرى (تدفئة، ماء ساخن).

إنّ الاستمرار المستمر للماء والغازات من طبقات نشطة جيولوجياً ولفترة طويلة ليس مضمون النتائج من الناحية الزلزالية ويجب مراعاة ذلك في حال الاستمرار طويل الأمد ربما كانت طريقة استثمار طاقة الصخور الحارة الجافة (في المناطق النشطة حرارياً) هي الأكثر موضوعية وقابلية للانتشار الواسع.

يبين الشكل (1-11) طريقة الحفر والتحضير لبناء منشأة لاستثمار الطاقة الحرارية من الصخور الحارة الجافة.

ويبين الشكل (2-11) طريقة الاستفادة من حرارة الصخور الجافة الحارة التي تم تطويرها في الولايات المتحدة تحت عنوان Hot-Dry-Rock-Method. بينما

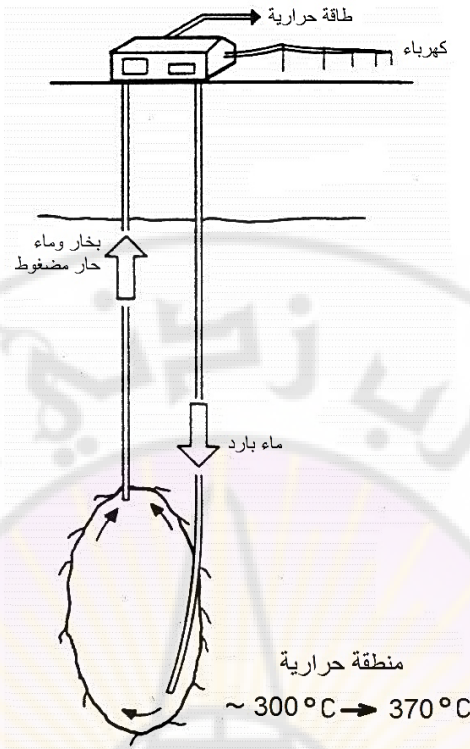
بالوصول إلى صخور على عمق حوالي 5 [km] ÷ 4 درجات حرارة $300 \div 370 [^{\circ}\text{C}]$ يمكن الحصول على بخار جاف ومحمص مضغوط كفاية لتشغيل عنفة لتوليد الطاقة الكهربائية.



الشكل (1-11) طريقة الصخور الحارة الجافة لاستثمار الطاقة الجيولوجية

يبين الشكل (2-11) دارة استخراج واستثمار الطاقة الحرارية للصخور الحارة وإنتاج الطاقة الكهربائية.

ينمو استثمار الطاقة الجيولوجية عالمياً بشكل سريع ويشمل التطوير البحث عن مصادر لهذه الطاقات بالإضافة إلى تطوير التقانات والطرق المستخدمة.



الشكل (2-11) معمل إنتاج الطاقة الكهربائية من الطاقة الجيوحرارية

11- 2 طاقة المد والجزر

تؤثر قوة جذب القمر والشمس للأرض على منسوب مياه المحيطات والبحار وبسبب دوران الأرض حول محورها يكون هذا التأثير دورياً، ويؤدي ذلك إلى ما يسمى الرفع المدي الذي يبلغ في المحيطات المفتوحة حوالي $1[m]$ لكن هذا الرفع المدي يمكن أن يصل في بعض المناطق الشاطئية (الخلجان ومصبات الأنهار) حتى $20[m]$. والسبب في ذلك هو ظاهرة الطنين التي تؤدي إلى تراكم طاقة الأمواج، وكذلك ما يسمى بالتأثير القمعي لهذه المناطق حيث تكون الخلجان عادة ذات فم واسع ونهاية ضيقة على شكل قمع يؤدي إلى جمع وتركيز طاقة الأمواج في بقعة ضيقة.

يُقدّر الاحتياطي العالمي من طاقة المد والجزر بحوالي $3 \times 10^6 [MW]$ أو حوالي $95 [EJ/a]$ لكن تُعتبر هذه الطاقة قابلة للاستثمار تقنياً فقط في المناطق التي تتجاوز فيها الرفع المدي $3[m]$. أما الاستثمار الاقتصادي لمحطات توليد كهربائية بطاقة المد والجزر يتطلب رفع مدى يتجاوز $5[m]$ يبين الشكل (3-11) توزيع مناطق المد والجزر القابلة نظرياً للاستثمار في العالم.



الشكل (11-3) توزيع مناطق المد والجزر القابلة للاستثمار في العالم

تشير تقديرات الأبحاث في مناطق المد والجزر إلى قيمة احتياطي لا تتجاوز [360GW]، وبناءً على اعتبارات واقعية للتقانات المتاحة والكلفة فإن حوالي 10% فقط من هذا الاحتياطي يُعتبر قابلاً تقنياً واقتصادياً للاستثمار في الوقت الحاضر.

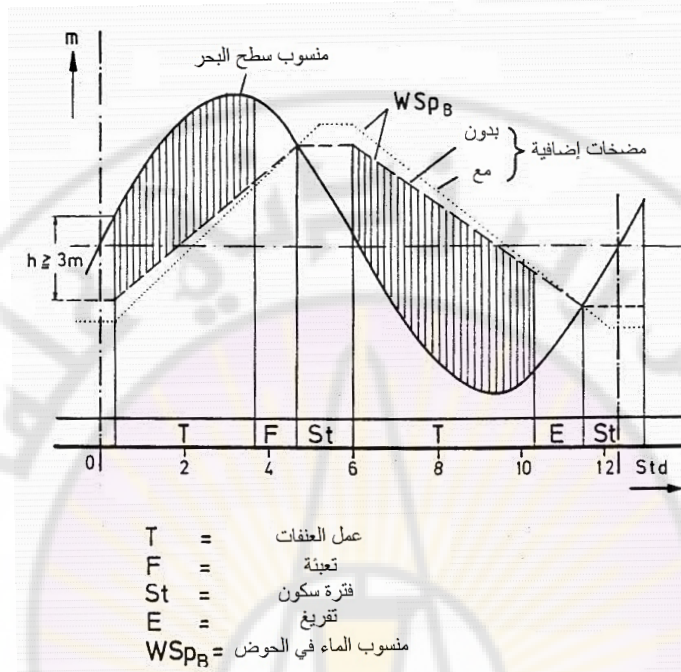
يوجد عالمياً فقط القليل من محطات الطاقة العاملة بطاقة المد والجزر ومن هذه المحطات واحدة في خليج رانس في فرنسا وفي مدينة غوبسلوغوبسك في روسيا ومحطة في كندا واثنان في الصين وتُعتبر محطة خليج لانس هي الأكبر والوحيدة التي يمكن النظر إليها كمحطة ذات أهمية اقتصادية مقنعة، يبلغ الرفع المدي الوسطي لهذه المحطة حوالي [240MW] وتنتج حوالي 8.5[m] وتُنشأ منذ عام 1966.

يبين الشكل (11-4) مخطط العمل التصميمي المبدئي لهذه المحطة، ويظهر من المخطط أنه ورغم إضافة مضخات مساعدة فإن توليد الكهرباء يتوقف مرتين يومياً.

تبلغ فترة المد الوسطي حوالي 12 ساعة و25 دقيقة مما يؤدي إلى انزياح فترات التوقف يومياً بمقدار 35 دقيقة مما يتسبب في وجودها أحياناً ضمن فترات الحمل الأعظمي وهي سلبية يصعب تجاوزها.

إنّ الاحتياطي العالمي القابل للاستثمار تقنياً واقتصادياً من طاقة المد والجزر يُعتبر صغير نسبياً ولا يمكن النظر إليه كأحد الأشكال الهامة للطاقات المتجددة بالإضافة إلى ذلك فإنّ المتاح من هذه الطاقة يتواجد في أماكن محدودة في العالم كما لاحظنا ولا يمكن

للقطر العربي السوري الإفادة من هذا الاحتياطي. وما تم التطرق له يهدف إلى إيضاح هذه الطاقة وليس إلى العمل على استثمارها.



الشكل (4-11) مخطط العمل التصميمي لمحطة طاقة المد والجزر

يبين الشكل (5-11) مخطط مبسط لتوضيح محطة التوليد بالنسبة للحوض والبحر في محطة طاقة المد والجزر



الشكل (5-11) مخطط مبسط لتوضيح محطة التوليد بالنسبة للحوض والبحر في محطة طاقة المد والجزر

11 - 3 طاقة الأمواج البحرية

تُعتبر طاقة الأمواج البحرية أحد أشكال التحولات الطبيعية لطاقة الرياح أو بمعنى آخر: تنتج عن طاقة الرياح للأمواج البحرية طاقة حركية وطاقة كامنة. تتناسب استطاعة الأمواج البحرية لكل [m]1 من جبهة الموجة طرذاً مع جداء مربع ارتفاع الموجة والتردد شريطة عدم وجود احتكاك مع اليابسة (أي في عرض البحر).

$$P \sim H^2 f \left[\frac{W}{m} \right] \quad \text{أو :}$$

p: الاستطاعة الكلية [W/m].

H: ارتفاع الموجة [m]

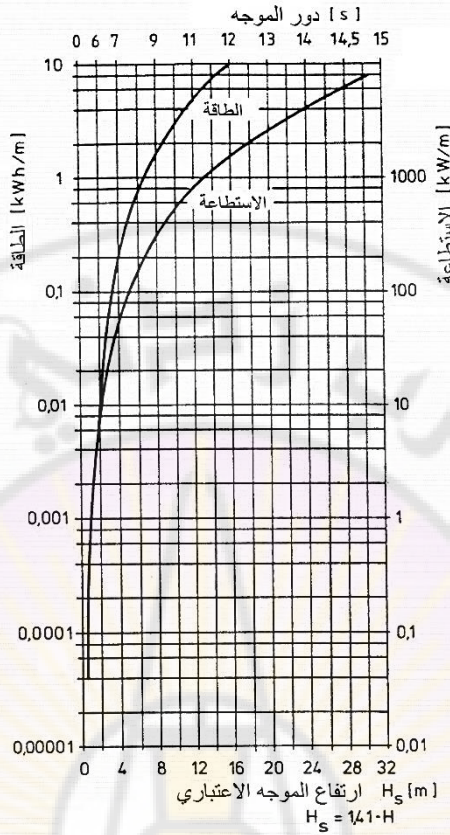
f: تردد الموجة [1/s].

لتقويم الطاقة المتاحة من الأمواج يتم الاستعانة بمخططات تسمى الطيف القياسي للأمواج وتُمثل هذه المخططات العلاقة بين ارتفاع الأمواج ودورها وتسمح هذه المخططات باستنتاج الاستطاعة وبالتالي الطاقة المتاحة كتابع لارتفاع الأمواج وترددها، يبين الشكل (6-11) مخططاً لطيف قياسي لمنطقة متوسطة الغنى بالأمواج.

ونظراً لعدم توفر قياسات لمناطق كثيرة في العالم فإنه يصعب تقدير الاحتياطي العالمي من هذه الطاقة.

في منشآت طاقة الأمواج يكون الارتفاع الاعتباري (الفعال) للأمواج H_s أكبر من الارتفاع المقاس وذلك بسبب توزع الطاقة على عرض الموجة وعدم تركّزها في نقطة الارتفاع الأعظمي (المقاس) أو $H_s = 1.41H$.

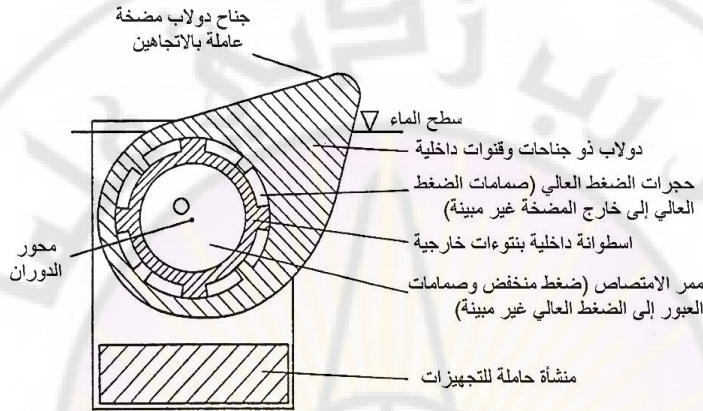
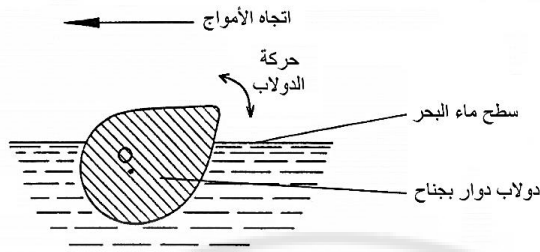
يلاحظ من الشكل أنه عند ارتفاع الأمواج $H = 1.5[m]$ ودور موجة قدره $6.2[s]$ يكون الارتفاع الاعتباري $H_s = 2.11[m]$ وتكون استطاعة الموجة النوعية تساوي $14[kW]$ لكل متر من جبهة الموجة وهذا يعني طاقة متاحة قدرها $14[MW]$ لكل $1[km]$ من جبهة الموجة.



الشكل (11-6) طيف الأمواج القياسي لمنطقة متوسطة الغنى بطاقة الأمواج

يبين الشكل (11-7) مبدأ محطة طاقة أمواج منسوبة للعالم Salter.

عناصر العمل الرئيسية للنظام عبارة عن أسطوانتين: خارجية ذات جناح قابل للدوران حول محور 0 (دوران محدود) بفعل حركة الأمواج صعوداً وهبوطاً، الدولاب مفرغ من الداخل على شكل أسطوانة داخلية ذات نتوءات داخلية أيضاً.



الشكل (11-7) مخطط مبدئي لمحطة طاقة أمواج حسب Salter

أما الأسطوانة الداخلية فتأبته وذات نتوءات خارجية تتداخل مع نتوءات الأسطوانة الخارجية لتُشكّل حجرات، تعمل النتوءات الخارجية لمكبس المضخة على مسح الحجرات يمينا ويساراً عند صعود وهبوط مستوى سطح الماء وتدفع سائل العمل الذي يتم امتصاصه عبر صمامات سحب تصل جوف الأسطوانة الداخلية (ممر الامتصاص) بالحجرات بين الأسطوانتين. وعند ضغط السائل داخل الحجرات يندفع عبر صمامات الضغط العالي (صمامات الدفع) إلى دارة العمل. تُستخدم في دارة العمل سوائل خاصة (زيوت) وتكن منفصلة تماماً عن الماء المحيط.

وتتألف دارة العمل من نظام عنفة ومولّد كهربائي.

حتى يصبح هذا النظام ذو جدوى لا بدّ من توفر عدة شروط منها العمر الكافي وتحمل ظروف العمل الاستثنائي بالإضافة إلى حل مشكلة تخزين ونقل الطاقة المنتجة.

في الوقت الحاضر لا تجد هذه الأنظمة تطبيقاً واسعاً في مجال إنتاج الطاقة بشكل اقتصادي ومع ذلك هناك تطبيقات محدودة في حالات خاصة لإنتاج كميات محدودة من الطاقة عند الحاجة لها في أعالي البحار.

11 - 4 طاقة التيارات البحرية

تحدث في البحار نتيجة للفوارق الحرارية وتباين تدفقات الأنهار من بحر لآخر تيارات ذات طاقة عظيمة يمكن الاستفادة منها نظرياً لتوليد الطاقة وتكون هذه التيارات أكثر وضوحاً وسرعة عند الخلجان والمضايق لكن الاستفادة من هذه الطاقة لها صعوبات تقنية هائلة ما يجعل البحث في استثمارها دون معنى على الأقل في الوقت الحاضر.

11 - 5 طاقة الوسط المحيط

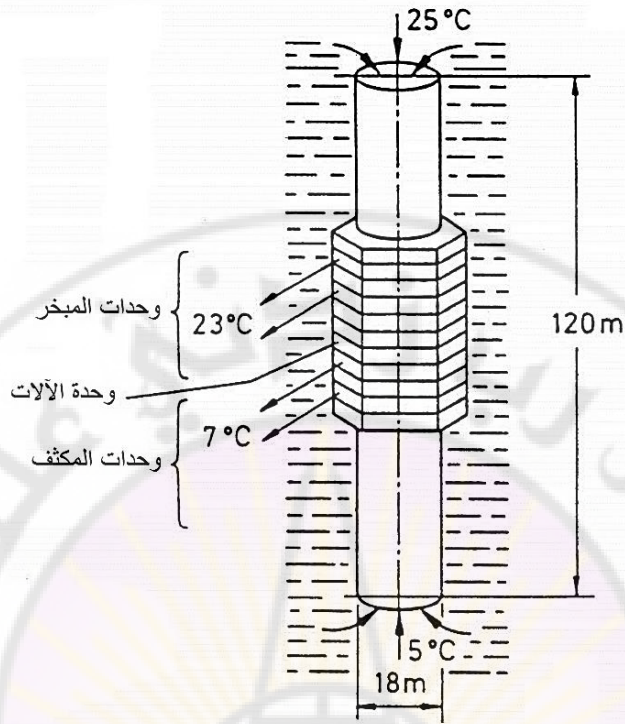
11 - 5 - 1 محطات الطاقة الحرارية لمياه البحار:

لاحظنا عند دراسة الموازنة الحرارية للكرة الأرضية أنّ القسم الأعظمي من الإشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض يتم امتصاصه ليتحول إلى طاقة حرارية ترفع درجة حرارة الأرض والبحر والهواء.

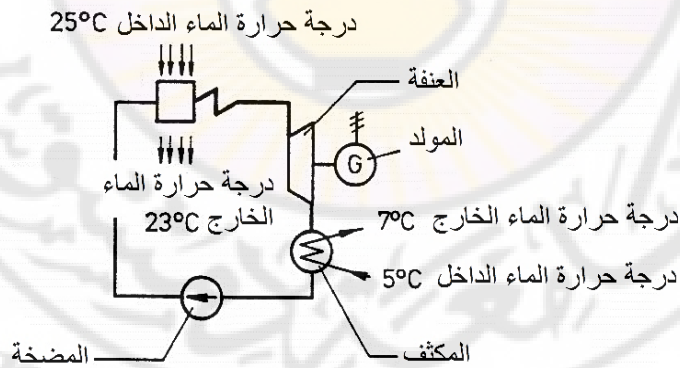
في البحار الاستوائية يتم تحويل أكثر من 20% من الإشعاع الشمسي إلى طاقة حرارية في الماء مما يجعل سطح البحر ذو درجة حرارة تزيد عن درجة حرارة الأعماق بمقدار $20 \div 30 [^{\circ}\text{C}]$ مما يسمح بالاستفادة من فرق درجات الحرارة هذا لبناء محطة طاقة تعمل وفق دورة رانكين.

يبلغ الاحتياطي العالمي من هذه الطاقة حوالي $0.72 \times 10^6 [\text{EJ/a}]$ أو ما يعادل آلاف المرات من الطلب العالمي على الطاقة إلا أنّ مردود عملية الاستفادة من هذه الطاقة لا يتجاوز 3% ÷ 1 وذلك بسبب فرق درجات الحرارة المتاح والصغير نسبياً $\Delta T = 20 \div 30 [^{\circ}\text{C}]$ مما يحتاج إلى تدوير كميات كبيرة من (حامل الطاقة) الماء.

وبسبب صعوبة نقل الطاقة لا تزال إمكانية الاستفادة من هذه الطاقة مقتصرة على المناطق القريبة من السواحل. بالإضافة إلى صعوبة النقل هناك صعوبة التخزين وسلسلة أخرى من الصعوبات التقنية. يبين الشكل (11-8) مخطط مبدئي لمحطة طاقة بحرية تعمل على فرق درجات الحرارة المذكورة بينما يبين الشكل (11-9) دارة العمل لمحطة الطاقة المذكورة.



الشكل (8-11) محطة طاقة بحرية تعمل على فرق الحرارة بين سطح البحر وأعماقه



الشكل (9-11) دائرة العمل لمحطة الطاقة المبينة في الشكل (8-11)

2-5-11 المضخات الحرارية:

يمكن استخدام المضخات الحرارية للإفادة من طاقة الوسط المحيط لا سيما تلك الناتجة عن التسخين الشمسي لرفع المنسوب الحراري لهذه الطاقة والحصول على طاقة حرارية عند درجات حرارة مناسبة لأغراض التدفئة وتحضير الماء الساخن.

كمصادر طاقة طبيعية (حرارية) يمكن أن تكون التربة أو الماء أو الهواء ويمكن الاستفادة من الطاقة الشمسية بنظم فعالة (أي بواسطة نظام تسخين ماء أو هواء شمسي) ويمكن أيضاً الاستفادة من الطاقة الجيوحرارية ذات المنسوب المنخفض عند توفرها أما المصادر الصناعية المتاحة فهي غالباً إما هواء مطرود أو ماء تبريد تم رفع درجة حرارته في مكثفات محطات الطاقة أو حتى مياه الصرف ذات درجات الحرارة المناسبة ومن المضخات الحرارية شائعة الاستخدام المضخات الحرارية المكثسية وكذلك المضخات الحرارية الامتصاصية.

يمكن لمحركات الضواغط أن تعمل على الغاز أو الديزل وعندها يمكن الاستفادة أيضاً من الحرارة المنبعثة لتدويرها وإعادة استخدامها في المضخة الحرارية نفسها أو إضافتها إلى الطاقة الناتجة من المضخة الحرارية.

11-6 طاقة جريان الماء (الأنهار)

إنّ الماء المتبخر من المسطحات المائية والنباتية على الأرض بفعل طاقة الإشعاع الشمسي يكتسب طاقة كاملة بعد صعوده إلى طبقات الجو، وعند هطوله مطراً أو ثلجاً يتخلى عن هذه الطاقة جزئياً لدى الهطول والجزء الآخر عند جريان الماء على سطح الأرض مندفعاً نحو المنخفضات وغالباً نحو البحر يمكن الاستفادة من ضغط الجريان لهذا الماء وتحويله إلى طاقة ميكانيكية بواسطة عنفات ومن ثمّ إلى طاقة كهربائية عبر مولّدات كهربائية مناسبة. ولتأمين استقرار الطاقة المنتجة عند وفر الهطول أو قلته يتم الاستعانة عادة في بناء أحواض تخزين مناسبة (سدود) تفيد ليس فقط في توليد الطاقة بل أيضاً في حفظ الماء إلى الفترات التي تزداد فيها الحاجة له، يستفاد أيضاً من طاقة جريان الماء لإدخال الطاقة في خزانات أو بحيرات طبيعية أو صناعية متوضعة على ارتفاعات مناسبة حيث يتم ضخ الماء من أنهار أو أحواض سفلية في فترات الطلب القليل على الطاقة ليعاد استخدام طاقة هذا الماء بواسطة محطة طاقة مائية مناسبة في فترات الطلب على الطاقة وذلك بعد أن تكون قد تحولت إلى طاقة كهربائية.

يتم استثمار طاقة المياه الجارية بشكل واسع ومكثّف في البلدان المتطورة وينتشر هذا الاستثمار بشكل كبير في البلدان النامية.

يبلغ الاحتياطي العالمي من هذه الطاقة حوالي 160 EJ/a أما القابل تقنياً للاستثمار من هذا الاحتياطي قد يتجاوز 48 EJ/a ، أما القابل للاستثمار بشكل اقتصادي فيتجاوز 33 EJ/a . والمستثمر حالياً هو في حدود 11.5 EJ/a عالمياً.

معظم الاحتياطي غير المستثمر يتواجد في الدول النامية، وذلك بسبب صعوبات اقتصادية (مادية) وبيئية. بينما يتم استثمار أكثر من 79% من الاحتياطي في أوروبا حيث يتم استثمار حوالي 3.2 EJ/a من أصل احتياطي قدره 3.3 EJ/a .



جدول الرموز والمصطلحات:

سرعة الضوء	$C_0 [m/s]$
مساحة سطح الشمس	$A_s [m^2]$
درجة حرارة الشمس	$T_s [K]$
قطر الشمس	$D_s [m]$
شدة الإشعاع الشمسي	$J_s [W/m^2]$
ثابت الإشعاع الشمسي	$J_0 [W/m^2]$
رقم اليوم في السنة	n
شدة الإشعاع الشمسي المباشر على السطح العمودي	$J_{EV} [W/m^2]$
شدة الإشعاع الشمسي المباشر على السطح الأفقي	$J_{EH} [W/m^2]$
معامل نفاذ الأشعة الشمسية عبر الغلاف الجوي	ϵ
ثابت ستيفان-بولتزمان	σ
زاوية ارتفاع الشمس	h°
زاوية الورود	ψ°
زاوية خط العرض	φ°
زاوية الانحراف	δ°
الزاوية الساعية للشمس	γ°
طول النهار	$S_d [h]$
كمية الإشعاع اليومي على السطح العمودي على أشعة الشمس	G_{DV}
كمية الإشعاع اليومي على السطح الأفقي	G_{DH}
ساعة الشروق	Z_1
ساعة الغروب	Z_2
زاوية ميل السطح	α°
زاوية انحراف السطح المائل	β°

شدة الإشعاع الشمسي على السطح المائل	$J_{Em}[W/m^2]$
مساحة سطح المجمع	$A[m^2]$
معامل نفاذ الأشعة المرئية عبر الزجاج	τ
درجة حرارة السطح الماص	$T_s[^\circ C]$
درجة حرارة الهواء المحيط	$T_a[^\circ C]$
معامل الانتقال الحراري الكلي بين سطح المجمع والجو المحيط	$U[W/m^2 \cdot ^\circ C]$
الاستطاعة المفيدة	$\dot{Q}_{use} [W]$
الاستطاعة الممتصة	$\dot{Q}_{in}[W]$
الاستطاعة المفقودة	$\dot{Q}_{Loss} [W]$
الاستطاعة النوعية المفيدة	$\dot{q}_{use}[W/m^2]$
معامل تحريك الحرارة	F_R
معامل فاعلية السطح الماص	F'
معامل السعة الحرارية للمجمع	F''
السعة الحرارية النوعية للسائل	$C[J/kg \cdot ^\circ C]$
التدفق الكتلي لواحدة السطح	$\dot{m}[kg/s \cdot m^2]$
المسافة بين أنبوبين	$w[m]$
قطر الأنبوب	$[m] d$
معامل التريش	F^*
معامل التوصيل الحراري للسطح الماص	$\lambda[W/m \cdot K]$
سماكة السطح الماص	$[m] \alpha_w$
طول الريشة (الزعنفة)	$\ell[m]$
الكسب الحراري من الإشعاع الشمسي المباشر	$\dot{Q}_s[W]$
استطاعة التسخين اللازمة	$\dot{Q}_H[W]$
الفقد الحراري بالحمل من سطح الحوض المكشوف	$\dot{Q}_c[W]$
الفقد الحراري بالإشعاع من سطح الحوض المكشوف	$\dot{Q}_R[W]$

الفقد الحراري بالتبخر من سطح الحوض المكشوف	$\dot{Q}_v [W]$
الفقد الحراري بالانتقال عبر أرض وجدران الحوض	$\dot{Q}_{tr} [W]$
درجة حرارة الهواء الوسطية	$T_m [C^\circ]$
معامل التبادل الحراري السطحي بين الماء والهواء	$\alpha_{C.R} [W/m^2 \cdot K]$
معدل التبخر	$\dot{m}_s [kg/m^2 \cdot s]$
طاقة التبخر	$r [J/kg]$
محتوى الهواء من بخار الماء عند درجة حرارة وسطية للهواء	X
محتوى الهواء المشبع من بخار الماء عند درجة حرارة مساوية لدرجة حرارة سطح الماء	$\dot{X}_{wo}$
الجزء الممتص من الإشعاع في الحوض	ξ
شدة الإشعاع الفصلية الوسطية على السطح الأفقي	$I_{Ehm} [W/m^2]$
مدة فصل السباحة	$t_{ss} [s/a]$
اللزوجة الديناميكية	$\eta_d \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]$
الطول الفعال للأنبوب	$l_{eff} [m]$
الطول الإضافي الناتج عن المقاومات المحلية	$l_{Ad} [m]$
زاوية تفرق الأشعة الشمسية	α_D°
نسبة التركيز الهندسية	C
درجة حرارة السطح الماص	$T_A [^\circ C]$
المردود الكلي للنظام	η
مردود حقل المجمعات	η_{CF}
مردود الدارة الترموديناميكية	η_{TC}
الاستطاعة المفيدة لحقل المجمعات	$\dot{Q}_{NF} [W]$
معامل الفقد في دارة المجمعات	f
فواقد الخزان الحراري	$\dot{Q}_{vs} [W]$

سماعة الطبقة الحدية	$\delta_I [m]$
مساحة سطح الخزان الحراري	$A_{sp} [m^2]$
درجة حرارة سطح الخزان	$T_{sp} [^{\circ}C]$
معامل التوصيل الحراري للعازل	$\lambda_I [W/m \cdot K]$
حجم الخزان اللازم	$V_{sp} [m^3]$
الطاقة اليومية المفقودة من الخزان الحراري	$Q_{vs} [J]$
المحتوى الحراري الحالي للخزان	Q_{NS}
الطاقة المقدمة للمبخر	$\dot{Q}_{ev} [W]$
المردود الميكانيكي	η_m
مردود المولد الكهربائي	η_g
الاستهلاك الذاتي لعناصر النظام (مضخات، تحكم،)	η_s
الاستطاعة الكهربائية المنتجة	$p_{el} [kW]$
درجة حرارة السائل الداخل إلى المجمعات	$T_e [^{\circ}C]$
ارتفاع البرج	$Z_T [m]$
بعد المرأة عن البرج	x
ارتفاع مركز المرأة	Z_s
المساحة الفعالة للمرأة	$A_{eff} [m^2]$
المساحة الفعلية للمرأة	$A_m [m^2]$
محتوى الخشب من الرطوبة	U
درجة تحميل المخمر	$R_b \left[\frac{kg/day}{m^3} \right]$
الكتلة العضوية المضافة يومياً	$\dot{m}_{Biomass} [kg/day]$
تركيز المادة الجافة في كتلة التغذية	$[kg/kg] C_{odm}$
الحجم الفعال للمخمر	$V_R [m^3]$
فترة بقاء المادة العضوية في المخمر	$t_{vw} [day]$
الطرح اليومي للحيوان i من الكتلة العضوية الجافة	$S_{ODM,i} [kg/d]$

قوة الضغط	$F_p [N]$
فرق الضغط المؤثر على جزيئة الهواء	$\Delta p [N/m^2]$
السرعة الجيوسفيرية	$\vartheta g [m/s]$
القيمة الوسطية السنوية لسرعة الرياح	$\bar{\vartheta}_1 [m/s]$
الطاقة السنوية المتاحة	$E_a [J/m^2 \cdot a]$
الضغط الكلي	$p_g [N/m^2]$
الضغط الاستاتيكي	$p_s [N/m^2]$
معامل الاستطاعة العظمى للعنفة	C_p
قوة المقاومة	$F_w [N]$
معامل المقاومة	C_w
السرعة المحيطة للعجلة	$u [m/s]$
قوة الرفع	$F_A [N]$
الضغط على الجانب السفلي للجناح	$P_v [N/m^2]$
الضغط على الجانب العلوي للجناح	$P_o [N/m^2]$
طول الجناح	$L [m]$
عرض الجناح	$B_p [m]$
قوة المقاومة	$F_{RS} [N]$
عدد الانزلاق	E_G
نصف قطر الدوران الخارجي	$R_E [m]$
عدد السرعة	λ_s
العزم على محور الدوران	$M_d [N \cdot M]$
معامل العزم	C_M
تردد التحريض	$f [Hz]$



References:

1. Zekai ,S. (2008 Springer) *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques. Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy*. Istanbul Technical University.
2. Kaltschmitt, M., Streicher, W., *Renewable Energy- Technology economics and environment*. Springer verlage Berlin 2007.
3. Becker M, Klimas P. *Second Generation Central Receiver Technologies*; C.F. Mueller Verlage, Karlsruhe, A Status Report of (DLR).
4. Becker M, Meinecke W, Klaiss H; *Comparative Studies of Solar Thermal Technologies for Electricity Generation*; Springer- Verlage 1992.
5. Becker M, Gupta B, Meinecke W; *Solar Energy Concentrating Systems, Applications and Technologies*; DLR, C.F. Muller 2006.
6. Kleeman M, Meliss M. *Regenerative Energiequellen*; Springer-Verlag, Berlin- London- Paris 2004.
7. Khartchenko N. *Thermische solaranlagen, Grundlagen, Planung and Auslegung*; Springer- Verlag Berlin Heidelberg New York 2002.
8. Streuber, C; *Second Generation of Thermal Storage*; Wiesbaden 1996.
9. Disier – Werke, "Storage Costs for Second Tower Generation Study" DLR- Koeln 1992.
10. Streicher, W; *Sonnenenegenutzung; Institute of thermal engineering*, Graz University of Technology 2005.
11. Prof. en Horst, D. (5- March, 2012) *Performance Simulation for Parabolic Trough Concentrating Solar Power Plants and Export Scenario Analysis for North Africa*. University of Kassel
12. A. Breyer. (15 April 2011). *Overview of the Kuraymat 150 MWe Integrated Solar Combined Cycle Power Plant (ISCC)*, Kuraymat, Egypt.
13. Khaled, A. (February, 2012) *Technical and Economic Performance of Parabolic Trough in Jordan*. University of Kassel.
14. Atul A Sagade, Satish Aher & Nilkanth N Shinde. (2013). *Performance Evaluation of Low-Cost FRP Parabolic Trough Reflector with Mild Steel Receiver*. International Journal of Energy and Environmental Engineering. Doi: 10.1186/2251 -6832-4-5.
15. Avadhesh Yadav, Manoj Kumar, Balram. (2013) Vol: 7, No:12. *Experimental Study and Analysis of a Parabolic Trough Collector with Various Reflectors*. International Journal of Mathematical, Computational, Physical and Quantum Engineering.

16. Tadahmun Ahmed Yassen. (3 April, 2012) Vol: 5, No: 1. *Experimental and Theoretical Study of a Parabolic Trough Solar Collector*. Anbar Journal for Engineering Sciences.
17. Duffie J & Beckman W: *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, INC. New York (2006).
18. *Solar Energy Engineering Processes and Systems*, 2009. NREL (USA). Elsevier Inc.
19. O.A. Jaramillo, E. Venegas, J.O Aguilar. (2013) 529- 539. *Parabolic Trough Concentrators for Low Enthalpy Processes*. Renewable Energy. Elsevier Inc.
20. Gianluca Coccia, Giovanni Di Nicola & Marco Sotte. (2015) 727-736. *Design, Manufacture, and Test of a Prototype for a Parabolic Trough Collector for Industrial Process Heat*. Renewable Energy. Elsevier Inc.
21. Duffie J & Beckman W: *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, INC. New York (1991).
22. J.Macedo-Valenciaa, J. Ramírez-Ávilaa, R. Acostaa, O.A. Jaramillob & J.O Aguilara. Energy Procedia 57 (2014) 989 – 998. *Design, Construction and Evaluation of Parabolic Trough Collector as Demonstrative Prototype*. Elsevier Inc.

اللجنة العلمية:

أ. د. جمال العباس

أ. د. علي خلوف

أ. د. عيسى مراد

المُدقق اللغوي

د. علي كردي

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات الجامعية

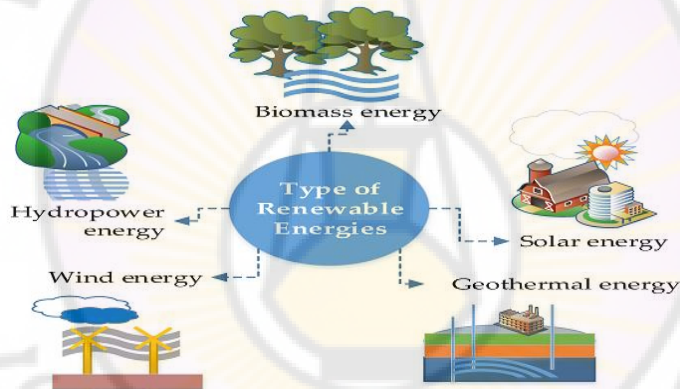


Damascus University

**Mechanical & Electrical
Engineering Faculty**



Renewable Energies



Dr. Baraah Hamadi

Professor at Mechanical Department

Dr. Ali Salameh

Professor at Mechanical Department

1444-1443

2023-2022

Damascus University