









منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

مدخل إلى الطاقات المتجددة

Introduction to Renewable Energies

الدكتور سميح الجابي

أستاذ في قسم هندسة
الطاقة الكهربائية

الدكتور كمال ناجي

أستاذ في قسم هندسة
الطاقة الكهربائية

الدكتور علي حمزة

أستاذ في قسم هندسة
الطاقة الكهربائية

1431-1430

2011-2010

جامعة دمشق



الفهرس

الصفحة	المحتويات	تسلسل
23	مقدمة الكتاب	
27	الفصل الأول لمحة عامة عن الطاقات التقليدية والمتجددة	
27	تمهيد	1-1
28	عمر الوقود الأحفوري	1-1-1
30	الانبعاثات والاحتباس الحراري	2-1-1
33	مؤشرات استهلاك الطاقة الأولية	3-1-1
34	أزمة الطاقة العالمية والمحلية	4-1-1
36	الوضع الطاقى في سورية	5-1-1
42	أنواع الطاقات المتجددة	2-1
43	أسباب الاهتمام بالطاقات المتجددة	3-1
45	أهمية الطاقات المتجددة في سوق الطاقة العالمية	4-1
48	استخدامات الطاقات المتجددة	5-1
50	الطاقات المتجددة لتوليد الكهرباء والحرارة	6-1
52	الطاقة الشمسية	1-6-1
59	طاقة الرياح	2-6-1
64	الطاقة الجوفية	3-6-1
67	الطاقة المائية	4-6-1
73	الطاقة الحيوية	5-6-1
79	اتجاهات تطور الطاقات المتجددة	7-1
84	آخر المستجدات حول الطاقات المتجددة	8-1
88	مراجع الفصل الأول	9-1

	الفصل الثاني التحليل الكمي للإشعاع الشمسي	
91	مقدمة	1-2
91	الشمس كمفاعل اندماجي	2-2
92	الطيف الشمسي	3-2
97	مدار الأرض	4-2
99	الزوايا الشمسية	5-2
99	زاوية الانحراف الشمسي	1-5-2
100	زاوية الارتفاع الشمسي	2-5-2
108	تحليل التظليل باستخدام مخططات مسار الشمس	6-2
112	التوقيات الشمسي والتوقيات المدني (التوقيات المحلي)	7-2
115	زمن شروق الشمس وزمن غروب الشمس	8-2
117	ملخص علاقات الزوايا الشمسية	9-2
118	الإشعاع الشمسي على لاقط مائل	10-2
118	مركبات الإشعاع الشمسي	1-10-2
122	حساب الطاقة الشمسية اليومية كمتوسط شهري على لاقط مائل	2-10-2
128	قياسات الإشعاع الشمسي	11-2
130	المسافة المثلى بين حوامل النظام الشمسي	12-2
135	مسائل للحل	13-2

138	ملاحق الفصل الثاني A عوامل تحويل مفيدة B قيم الاستطاعة الشمسية الساعية لخطوط عرض مختلفة C الطاقة الشمسية في اليوم كمتوسط شهري لأجل خطوط عرض وزوايا أزيমوت مختلفة	14-2
153	مراجع الفصل الثاني	15-2
	الفصل الثالث نظم تسخين المياه بالحرارة الشمسية	
155	مقدمة	1-3
160	الأنظمة الحرارية الشمسية لتسخين مياه المسابح	2-3
163	نظم التسخين الشمسي للمياه المنزلية	3-3
163	النظام الترموسيفوني (نظام الدوران الطبيعي)	1-3-3
165	نظم التدوير القسري	2-3-3
166	اللواقط الشمسية	4-3
167	اللواقط المتكاملة مع التخزين	1-4-3
168	اللواقط الشمسية المسطحة	2-4-3
176	اللواقط الأسطوانية (الأنبوبية) المفرغة	3-4-3
188	مقارنة بين اللواقط الأسطوانية المفرغة واللواقط الشمسية المسطحة	4-4-3
190	أداء اللاقط ومردوده	5-4-3
198	الجدوى الاقتصادية لجهاز تسخين شمسي منزلي ذي لواقط مسطحة تقليدية في سورية	5-3
199	مراجع الفصل الثالث	6-3

	الفصل الرابع النظم الكهروحرارية الشمسية	
201	مقدمة	1-4
202	أنواع نظم محطات CST	2-4
202	نظم ذات مراكز القطع المكافئ الدائري	1-2-4
206	نظم ذات مراكز خطية المحرق	2-2-4
211	نظم البرج المركزي	3-2-4
216	مقارنة تقنيات النظم الكهروحرارية الشمسية	3-4
218	لمحة عامة حول اقتصاديات المحطات الكهروحرارية الشمسية	4-4
219	واقع ومستقبل النظم الكهروحرارية الشمسية على المستوى العالمي	5-4
219	أوروبا	1-5-4
222	شمال إفريقيا	2-5-4
223	الولايات المتحدة الأمريكية	3-5-4
224	كمون نظم CST على الصعيد العالمي	6-4
224	تقييم الطاقة الشمسية ومصادر الأرض	1-6-4
227	نماذج أداء CST	2-6-4
230	حساب الكمون العالمي لمحطات CST	3-6-4
233	تقنية الصحراء Desertec	4-6-4
238	ملحق الفصل الرابع معلومات إحصائية حسب تقرير 2009 لمنظمات دولية في مجال توقعات (سيناريوهات) لتركيبات CST حتى 2050	7-4

	الفصل الخامس	
	مفهوم طاقة الرياح	
249	مقدمة	1-5
250	تشكل الرياح	2-5
253	خارطة الرياح العالمية	3-5
253	التجربة العالمية	4-5
257	مصادر الرياح في سورية	5-5
257	أهمية استثمار طاقة الرياح	1-5-5
258	أطلس الرياح	2-5-5
259	توزيع المناطق الريحية	3-5-5
264	الأسباب الموجبة إلى استثمار طاقة الرياح:	6-5
264	مصادر الطاقة في سورية	1-6-5
266	لمحة تاريخية عن استثمار طاقة الرياح في سورية	2-6-5
269	مزايا ومساوئ استثمار طاقة الرياح في سورية	3-6-5
270	مراجع الفصل الخامس	7-5
	الفصل السادس	
	تقديرات الرياح	
273	قياس سرعة الرياح	1-6
273	أجهزة قياس سرعة الرياح	1-1-6
279	سرعة الرياح نسبة للارتفاع	2-6

279	طريقة توزيع ويبول لاحتمالية تغيرات الرياح في الموقع	3-6
286	السرعة الاسمية للرياح	4-6
287	الجذر التكعيبي للسرعة الاسمية	5-6
288	كثافة الاستطاعة وكثافة الطاقة	6-6
288	عملية المقارنة بين سرعة قمة المنحني ويسمى المود والسرعة الاسمية والجذر التكعيبي للسرعة	7-6
289	توزيع القدرة الناتجة عن الرياح	8-6
293	مقاييس المعطيات الرقمية	9-6
294	نسبة تغير السرعة مع الارتفاع	10-6
296	معطيات وبيانات قياس سرعة واتجاه الرياح في سورية	11-6
297	المواقع المختارة لت تركيب محطات مراقبة سرعة واتجاه الرياح	12-6
305	وصف لمحطة رصد أو مراقبة الرياح	13-6
310	نتائج رصد محطة السنديانة في محافظة حمص	14-6
314	مراجع الفصل السادس	15-6
	الفصل السابع	
	أسس اختيار مواقع العنفات الريحية	
317	الاختيار الأمثل لمواقع العنفات الريحية	1-7
317	مقدمة	1-1-7
318	أسس إنشاء العنفات الريحية (اختيار الموقع الملائم)	2-1-7
320	المؤشرات البيولوجية (النباتية) لقياس كمون طاقة الرياح	2-7

320	مقدمة	1-2-7
320	طريقة اعتماد الأشجار كمؤشر لسرعة الرياح الوسطية	2-2-7
324	معدل ضغط الرياح	3-2-7
324	العلاقة بين السرعة الوسطية للرياح وانحراف شكل الشجرة	4-2-7
328	مؤشرات اتجاه الرياح	3-7
329	مؤشرات الرياح الشديدة وأثار الصقيع	4-7
331	الخلاصة	5-7
331	المؤشرات الجغرافية لتشكيلية لاختيار الموقع	6-7
332	أثر الرياح على تشكيل سطح الأرض	1-6-7
332	التشكيل الريحي للأرض	2-6-7
334	تقدير سرعة الرياح	3-6-7
334	العلاقة بين التوزيع الحجمي للحبيبات والسرعة الوسطى	4-6-7
340	العلاقة بين سرعة الرياح وارتفاع المرفعات	5-6-7
345	العلاقة بين سرعة الرياح ونشاطات تشكيل أخرى	6-6-7
345	المؤشرات التشكيلية لاتجاه الريح	7-6-7
346	خوارزميات سرعة الرياح في المواقع اعتمادا على المؤشرات النباتية	7-7
354	مراجع الفصل السابع	8-7
	الفصل الثامن مكونات العنقات الريحية	
355	التصاميم الحديثة	1-8
355	العنقات الريحية ذات المحور العمودي	1-1-8

357	العرفات الريحية ذات المحور الأفقي	2-1-8
359	مكونات العرفات الريحية ذات المحور الأفقي	2-8
361	القوى المؤثرة على الشفرات	3-8
362	ظاهرة التدرج الريحي	4-8
363	وردة الرياح	5-8
365	العوامل المؤثرة على اختيار ارتفاع الأبراج	6-8
368	الأسس التصميمية للدوار	7-8
370	الأسس التصميمية للأبراج	8-8
370	الأبراج الأنبوبية المثبتة بأمراس شد	1-8-8
371	الأبراج الشبكية	2-8-8
372	الأبراج الأنبوبية الفولاذية	3-8-8
373	معايير تصميم البرج	9-8
375	الأسس التصميمية لعلبة السرعة	10-8
378	معامل أداء العرفات الريحية (C_p)	11-8
379	العوامل التي تؤثر في C_p	1-11-8
380	المواصفات العامة للعلبة الريحية ذات المحور الأفقي	12-8
382	أجزاء العنفة ذات المحور الأفقي	13-8
382	القمرة	1-13-8
383	العناصر الموجودة داخل القمر	2-13-8
384	المحولة	4-13-8
384	الدوار	5-13-8
385	النتظيم والتحكم	6-13-8
386	الحساسات والحمايات	7-13-8

389	مراجع الفصل الثامن	14-8
	الفصل التاسع	
	نظم التبديل في العنقات الريحية	
391	مقدمة	1-9
392	أنظمة التبديل الكهربائية	2-9
392	عوامل أساسية	1-2-9
394	مخطط الاستطاعة	3-9
396	المولدات المستخدمة في العنقات الريحية	4-9
396	مولدات التيار المستمر	1-4-9
396	الأجزاء الرئيسية لمولد التيار المستمر	1-1-4-9
397	عمل مولد التيار المستمر	2-1-4-9
399	استخدام مولد التيار المستمر	3-1-4-9
400	المولدات التزامنية	2-4-9
400	بنية المولد التزامني	1-2-4-9
402	حالات عمل المولد التزامني	2-2-4-9
406	استخدام المولد التزامني في العنقات الريحية	3-2-4-9
407	المولدات التحريضية	3-4-9
407	بنية المولد التحريضي	1-3-4-9
409	حالة عمل المولد التحريضي	2-3-4-9
409	مساوئ الاستخدام	3-3-4-9
410	حالة الكبح مع إعادة التوليد	4-3-4-9
414	المقارنة الفنية بين المولدين التحريضي والتزامني	5-3-4-9
415	أنظمة تبديل الطاقة	5-9
420	المولد التحريضي مضاعف التغذية	6-9

420	عمل المولد التحريضي مضاعف التغذية في العنفات الريحية	1-6-9
423	الدارة المكافئة للمولد مضاعف التغذية	2-6-9
426	نظام قيادة المولد التحريضي مضاعف التغذية عند سرعة متغيرة للرياح	3-6-9
427	الإشارات المقاسة والإشارات المرجعية لنظام القيادة	4-6-9
429	استعراض مختصر للمبدلات الإلكترونية المستخدمة في العنفات الريحية	7-9
429	المقومات	1-7-9
430	المعرجات	2-7-9
430	المعرج ذو التبديل الخطي	1-2-7-9
432	المعرج ذو التبديل القسري	2-2-7-9
432	نماذج لربط المولدات مع الشبكة	8-9
436	مقارنة مجال التحكم لأنظمة التبديل	9-9
436	نظام التبديل الذي يعمل مع مولد تحريضي	1-9-9
438	نظام التبديل الذي يعمل بمولد تزامني	2-9-9
439	نتائج مقارنة أنظمة التبديل	3-9-9
439	المردود في العنفات الريحية	10-9
439	تحديد الضياعات	1-10-9
441	الضياعات الإيروديناميكية	2-10-9
442	الضياعات في علبة السرعة	3-10-9
442	الضياعات في المولد	4-10-9
443	ضياعات نظام القيادة الإلكترونية	5-10-9
446	الضياعات الكلية	6-10-9
447	مقارنة المردود للعنفات الريحية	7-10-9

448	تطور استخدام المولد مضاعف التغذية في الأسواق	8-10-9
452	تأثير العنفات الريحية على الشبكة الكهربائية	11-9
452	التغيير المفاجئ للتوتر	1-11-9
452	ظهور التوافقيات	2-11-9
453	اضطراب أو اختلال توازن التوتر	3-11-9
453	ظهور الموجات العابرة	4-11-9
453	الانقطاع المفاجئ القصير لموجة التوتر	5-11-9
453	ظاهرة الارتعاش	6-11-9
455	ربط العنفات الريحية مع الشبكة الكهربائية	12-9
455	العنفات الريحية المستقلة	1-12-9
456	العنفات الريحية المربوطة مع الشبكة	2-12-9
456	العنفات المركبة على الأرض	1-2-12-9
460	العنفات الريحية المركبة بعيداً عن الشاطئ	2-2-12-9
463	ملحق/1-9	13-9
473	مراجع الفصل التاسع	14-9
	الفصل العاشر المسألة البيئية والاقتصادية	
477	التأثيرات البيئية والاجتماعية الناجمة عن إنشاء العنفات و المزارع الريحية	1-10
477	مرحلة إنشاء محطة الرياح	1-1-10
478	بعد إنشاء المشروع وأثناء فترة التشغيل	2-1-10
482	أثر محطات الرياح المركبة في الماء بعيداً عن الشاطئ	2-10
483	السلامة المهنية	3-10
484	المسألة الاقتصادية	4-10

484	لماذا سعر الكهرباء المولدة من الرياح في حالة انخفاض ؟	1-4-10
485	تفحص القصور في عمل مكونات العنفة الريحية وحلها	2-4-10
485	المستقبل المشرق لطاقة الرياح	3-4-10
486	ضعف الشبكات الكهربائية	4-4-10
487	الدراسة الاقتصادية للعنفات الريحية	5-10
487	تكاليف العنفات	1-5-10
487	مقدمة	1-1-5-10
488	تكاليف التأسيس	2-1-5-10
489	تكاليف الصيانة و التشغيل	3-1-5-10
491	تكاليف القدرة الكهربائية المولدة من العنفات الريحية	4-1-5-10
492	تطور الأسعار الحالي و المستقبلي	5-1-5-10
492	تكاليف توليد الكيلو وات ساعي في المحطات الكهربائية باستخدام الوقود التقليدي	6-1-5-10
493	التكاليف الخارجية "غير الظاهرة" لإنتاج الطاقة	7-1-5-10
494	التجربة الألمانية في مجال الطاقة المتجددة وطاقة الرياح بشكل خاص	6-10
495	عائدات آلية التنمية النظيفة	7-10
497	الهيئة الدولية للطاقة المتجددة	8-10
497	المركز الإقليمي للطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة	9-10
498	مراجع الفصل العاشر	10-10
	الفصل الحادي عشر	
	الطاقة الحيوية	
503	تعريف الطاقة الحيوية	1 - 11

505	الحرق المباشر لمواد الكتلة الحيوية	2 - 11
507	استخدام الخشب كوقود	1 - 2 - 11
509	الحرق المباشر للخشب	2 - 2 - 11
510	نواتج الاحتراق الكامل لعناصر الوقود الرئيسية	3 - 2 - 11
512	الميزات الحرارية للخشب ولنفاياته	4 - 2 - 11
512	تصنيف أنظمة حرق الخشب	5 - 2 - 11
512	أنظمة حرق ذات مشابك مستوية ثابتة	1-5-2-11
514	أنظمة الحرق ذات المشابك المخروطية الثابتة	2-5-2-11
515	أنظمة الحرق ذات المشابك الميكانيكية	3-5-2-11
516	أنظمة الحرق ذات المشابك المهتزة	4-5-2-11
517	أنظمة الحرق ذات مشابك مائلة وميكانيكية	5-5-2-11
518	إنتاج الغاز العضوي	3 - 11
522	توليد الغاز العضوي بواسطة هاضم المواد الحيوية	1 - 3 - 11
522	أنواع الهاضم المستخدمة في دول العالم	2 - 3 - 11
523	مراحل الهضم اللاهوائي	3 - 3 - 11
529	الهاضم الحيوي كمصدر جديد للطاقة ومصنع للسماد الطبيعي	4 - 3 - 11
529	المميزات الفنية للهاضم الحيوي	5 - 3 - 11
529	مقارنة بين تخمر المواد العضوية الهوائية و تخمرها اللاهوائي	6 - 3 - 11
531	مميزات وفوائد تكنولوجيا الغاز الحيوي	7 - 3 - 11
532	العوامل المؤثرة على الهاضم الحيوي البسيط	8 - 3 - 11
534	استعمال السماد الطبيعي الناتج عن الهاضم في الزراعة	9 - 3 - 11
538	توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الحيوية	10 - 3 - 11

539	الوضع الراهن للطاقة الحيوية في سورية	11 - 3 - 11
539	الطاقة الحيوية الناتجة في معامل معالجة القمامة	4 - 11
545	التأثير البيئي للقمامة	1 - 4 - 11
546	طرق معالجة القمامة	2 - 4 - 11
548	طريقة المطامر	1-2-4-11
549	الطرق الحرارية	2-2-4-11
551	مراحل عملية التحويل البيولوجي للكتلة الحيوية	3 - 4 - 11
551	مرحلة تحضير الكتلة العضوية	1-3-4-11
553	مرحلة الهضم اللاهوائي	2-3-4-11
553	مرحلة تنظيف الغاز الطبيعي الناتج	3-3-4-11
553	مرحلة التخلص من الفضلات الناتجة	4-3-4-11
553	مخطط توازن الطاقة في عملية تحويل الكتلة الحيوية في المدن	4 - 4 - 11
555	مطامر ومكبات القمامة	5 - 11
557	أنواع مطامر ومكبات القمامة	1 - 5 - 11
557	المكبات والمطامر المكشوفة	1-1-5-11
559	المكبات والمطامر المراقبة	2-1-5-11
559	المكبات والمطامر الهندسية	3-1-5-11
560	المكبات والمطامر الصحية	4-1-5-11
567	اختيار مواقع مكبات ومطامر النفايات	2 - 5 - 11
568	جمع المعلومات	1-2-5-11
571	معيير التوضع	2-2-5-11
571	التقدير الأولي لرد فعل السكان	3-2-5-11
572	الاختيار النهائي للموقع	4-2-5-11
572	المحاصيل الزراعية المولدة للطاقة	6 - 11

573	محاصيل الخشب	1 - 6 - 11
574	إنتاج الكحول الإيثيلي (الإيثانول) من قصب السكر	2 - 6 - 11
575	إنتاج كحول الإيثانول من الذرة الصفراء والذرة الصفينة البيضاء	3 - 6 - 11
575	زيت الوقود النباتي	4 - 6 - 11
576	الفحم النباتي أو فحم الخشب	5 - 6 - 11
577	إنتاج الطاقة من نقل الزيتون	6 - 6 - 11
578	الفوائد البيئية الناتجة عن استخدام مصادر الكتلة الحيوية	7 - 6 - 11
579	طاقة التركيب الضوئي	8 - 6 - 11
580	مراجع الفصل الحادي عشر	7 - 11
583	الفصل الثاني عشر الطاقة المائية	
583	مقدمة	1 - 12
584	طرق استخدام الطاقة المائية	2 - 12
585	استخدام الطاقة المائية لتوليد الطاقة الكهربائية	3 - 12
589	إنتاج الطاقة الكهربائية من محطات التوليد الكهرومائية في العالم	4 - 12
593	مكونات محطة التوليد المائية	5 - 12
595	تصنيف محطات التوليد الكهرومائية	6 - 12
598	محطات الضخ والتخزين الكهرومائية المدمجة	7 - 12
608	السدود والمحطات الكهرومائية على مجرى نهر الفرات في سورية	8 - 12
613	مراجع الفصل الثاني عشر	9 - 12

	الفصل الثالث عشر طاقة المد والجزر	
615	مقدمة	1 - 13
615	توليد الطاقة الكهربائية من طاقة المد والجزر	2 - 13
616	طريقة بناء السدود في طريق مياه المد والجزر	1 - 2 - 13
619	طريقة بناء الأبراج في طريق مياه المد والجزر	2 - 2 - 13
621	مزايا استخدام طاقة المد والجزر	4 - 13
622	مراجع الفصل الثالث عشر	5 - 13
	الفصل الرابع عشر طاقة أمواج البحار والمحيطات	
625	مقدمة	1 - 14
625	كيف تتشكل الأمواج	2 - 14
627	توليد الطاقة الكهربائية من طاقة الأمواج	3 - 14
627	العمود المائي المهتز	4 - 14
629	نظام المفيض	5 - 14
630	نظام التخميد	6 - 14
631	نظام امتصاص طاقة الأمواج	7 - 14
632	مراجع الفصل الرابع عشر	8 - 14
	الفصل الخامس عشر طاقة الحرارة الجوفية للأرض	
635	المقدمة	1 - 15
637	مصادر طاقة الحرارة الجوفية للأرض	2 - 15
638	مصدر تسخين المياه من الحرارة الجوفية	1 - 2 - 15
639	الصخور الجوفية الحارة والجافة	2 - 2 - 15
640	طاقة الصخور الجوفية البركانية	3 - 2 - 15

640	استكشاف المواقع الواعدة لمصادر طاقة الحرارة الجوفية للأرض	3 - 15
641	حفر الآبار المستخدمة لاستثمار طاقة الحرارة الجوفية للأرض	4 - 15
641	تحضير الموقع ومعدات الحفر	1 - 4 - 15
642	إجراء عمليات الحفر	2 - 4 - 15
645	اتخاذ إجراءات الأمان	3 - 4 - 15
646	توليد الكهرباء باستخدام طاقة الحرارة الجوفية للأرض	5 - 15
649	استخدام المضخة الحرارية لاستثمار طاقة الحرارة الجوفية للأرض	6 - 15
649	أنواع مضخة حرارة الأرض الجوفية	7 - 15
650	الدائرة الأرضية المغلقة الأفقية	1 - 7 - 15
651	الدائرة الأرضية المغلقة العمودية	2 - 7 - 15
653	الدائرة الأرضية المغلقة ذات الحوض المائي	3 - 7 - 15
653	الدائرة المفتوحة	4 - 7 - 15
654	مراجع الفصل الخامس عشر	8 - 15
657	ثبت المصطلحات	



مقدمة الكتاب

Preface

إن الجدل الدائر حول نظرية "ذروة النفط" وصدور بعض الدراسات والتقارير ذات النظرة المتشائمة والتي تنذر عن قرب نضوب احتياطيات النفط العالمية وتشكك في أرقام الاحتياطيات المعلنة للبلدان المنتجة، خلقت جواً من التوتر والقلق حول مدى كفاية الطاقات الإنتاجية لتلبية الطلب العالمي المتزايد على الطاقة. وتزامن ذلك مع ظاهرة تصاعد وهبوط الأسعار خلال السنوات القليلة الماضية، ما عزز كثيراً من مكانة وموقع الطاقات المتجددة، ليس فقط لتتويع الطاقة ومصادر تجهيزها بل كضرورة لضمان أمن الطاقة في المستقبل كونها مصادر غير ناضبة. كل ذلك حدا بالبلدان والمنظمات العالمية بتقديم الدعم والتشجيع سواء كان ذلك للمشاريع الإنتاجية أو الأنشطة الخاصة بالبحوث والتطوير للطاقات المتجددة.

وخلال تسعينات القرن الماضي حصلت الطاقات المتجددة على دفع جديد مصدره تجدد الاهتمام العالمي بالبيئة نتيجة للدراسات العلمية التي أشارت إلى احتمالات التغير المناخي وربط ذلك بزيادة استهلاك المصادر الأحفورية. وقد تعمق الإحساس العالمي بالقضايا البيئية والمخاوف والقلق المتزايد من ظاهرة التغير المناخي والاحترار الكوني بالأخص خلال السنوات القليلة الأخيرة، ما جعل مسألة الحفاظ على البيئة في مقدمة أولويات السياسات الطاقية للبلدان والمنظمات العالمية والبحث عن تطوير مصادر طاقة نظيفة مثل الطاقات المتجددة ولأغراض تتعدى توليد الكهرباء لتشمل قطاع النقل من خلال استخدام الوقود الحيوي، والحدث العالمي الملفت مؤخراً هو القمة العالمية لتغير المناخ التي عقدت في كوبنهاغن/الدانمارك في كانون الأول 2009 والتي شارك فيها 192 دولة.

على الصعيد العربي تملك 14 دولة عربية من أصل 21 احتياطيات من النفط والغاز تتفاوت بين قليلة ومتوسطة وكبيرة، والعمر المتبقي للنفط في خمسة منها يتجاوز 80

عاما على أساس الاحتياطي الحالي والانتاج العالمي؛ ولايتجاوز لبقية الدول العربية العشرين عاما. أما العمر المقدر للغاز فهو يتعدى المائة عام والسبب يعود الى عدم استغلال الغاز حتى الآن على نطاق واسع.

وعليه ظهرت الحاجة الكبيرة لدفع عجلة استغلال الطاقات المتجددة، فمن ناحية أولى فإن معدلات الطلب على الطاقة تزداد بشكل متسارع وأسعار النفط ترتفع من حيث المبدأ والمخزون النفطي يقل، ومن ناحية أخرى فإن التغيرات المناخية المتزايدة قد تؤدي بدورها إلى مخاطر متوقعة كما ذكرنا أعلاه.

وبغض النظر عن الجانب البيئي فقد أكدت الدراسات و تحليلات أداء بعض منظومات الطاقة المتجددة قيد العمل أنها أضحت منافسة اقتصاديا لمنظومات الطاقة التقليدية، وخاصة المنظومات الكهروضوئية والمنظومات الحرارية الكهروشمسية.

وانسجاما مع التوجهات العالمية السابق ذكرها، وإسهاما في تنفيذ الخطط الحكومية، وخاصة الخطة الخمسية العاشرة، في تنمية استخدام الطاقات المتجددة في سورية، فقد تم افتتاح شعبة للطاقات المتجددة في قسم هندسة الطاقة الكهربائية وكذلك في قسم الهندسة الميكانيكية بجامعة دمشق لمرحلتى الإجازة والماجستير.

تم تأليف هذا الكتاب ليغطي بشكل رئيسي مناهج مقرر الطاقات المتجددة 1 للسنة الرابعة طاقة متجددة في قسم هندسة الطاقة الكهربائية. وهو يؤلف مدخلا إلى أهم الطاقات المتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وطاقة الكتلة الحيوية والطاقة المائية وطاقة المد والجزر وطاقة أمواج البحار والمحيطات وطاقة الحرارة الجوفية. يشمل الكتاب خمس عشرة فصلا موزعة على أنواع الطاقات المتجددة المذكورة أعلاه.

تغطي الفصول الأربعة الأولى لمحة عامة حول الطاقات التقليدية والمتجددة و موضوعات الطاقة الشمسية (الإشعاع الشمسي، ونظم التسخين الشمسي للمياه، والنظم الكهروحرارية الشمسية) وهي من تأليف أ. د. علي حمزة، وتتناول الفصول من الفصل

الخامس إلى الفصل العاشر موضوعات طاقة الرياح وهي من تأليف أ. د. كمال ناجي، أما الفصول من الفصل الحادي عشر إلى الفصل الخامس عشر فقد خُصّصت لطاقة الكتلة الحيوية والطاقة المائية وطاقة المد والجزر وطاقة أمواج البحار والمحيطات وطاقة الحرارة الجوفية وهي من تأليف أ. د. سميح الجابي. تم الاعتماد في إعداد هذا الكتاب على أحدث المراجع والدوريات وبحوث المؤتمرات الدولية وبحوث خاصة بالمؤلفين، وقد أدرجنا، لأسباب تقنية وطباعة، المراجع المعتمدة في نهاية كل فصل. ولنا وطيد الأمل أن يجد الطلاب والمهندسون في هذا الكتاب مرجعا موسعا ومصدرا شاملا للمعلومات حول أساسيات الطاقة المتجددة واستخداماتها.

المؤلفون

الأستاذ الدكتور
سميح الجابي

الأستاذ الدكتور
كمال ناجي

الأستاذ الدكتور
علي حمزة



الفصل الأول

لمحة عامة عن الطاقات التقليدية والمتجددة

Overview of conventional & renewable energy

1-1 تمهيد

يلعب قطاع الطاقة دوراً أساسياً في عملية التنمية الاقتصادية والاجتماعية. وبينما يؤلف هذا القطاع الإسهام الرئيسي في الناتج المحلي الإجمالي Gross Domestic Product (GDP) لمعظم الدول العربية المصدرة للنفط و/أو الغاز، يشكل استيراد الوقود الأحفوري عبئاً على اقتصاديات الدول العربية غير النفطية.

يتسم نموذج استهلاك الطاقة الأولية في الوطن العربي بمعدلات نمو كبيرة بالمقارنة مع تلك النماذج في المجموعات الدولية الأخرى. فقد زاد الطلب على مصادر الطاقة الأحفورية بأكثر من ثمانية أضعاف خلال ربع القرن الماضي. كما ازدادت حصة الاستهلاك المحلي من إمدادات الطاقة الأولية أكثر من أربع مرات خلال الفترة ذاتها. ومن المتوقع أن يصل الطلب العربي على الطاقة الأولية إلى 8.6 مليون برميل مكافئ نفط باليوم عام 2010.

إن مساهمة الطاقة المتجددة بما فيها الطاقة المائية في منظومة الطاقة العربية لا تتجاوز 6% في الوقت الحاضر، وهي مساهمة متواضعة للغاية إذا أخذنا بالاعتبار الكميات الهائلة من مصادر الطاقة المتجددة المتوفرة في الوطن العربي، وإذا قورنت بالنسبة العالمية والتي تقدر بحوالي 13%.

وتلقى الطاقة المتجددة حالياً اهتماماً كبيراً جداً في الأوساط العالمية وذلك لأسباب بيئية. إذ أن ثمة قناعات متزايدة بأن غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 (بجانب غاز الميثان و أكاسيد الآزوت NO_x) المنبعث من حرق الطاقة الأحفورية، يساهم مساهمة متزايدة في رفع حرارة الجو نتيجة لتأثير البيت الدفيء. وللحد من انبعاث هذه الغازات لابد من اتباع طرق منها:

- تحسين كفاءة استخدام الطاقة وترشيد استعمالها.

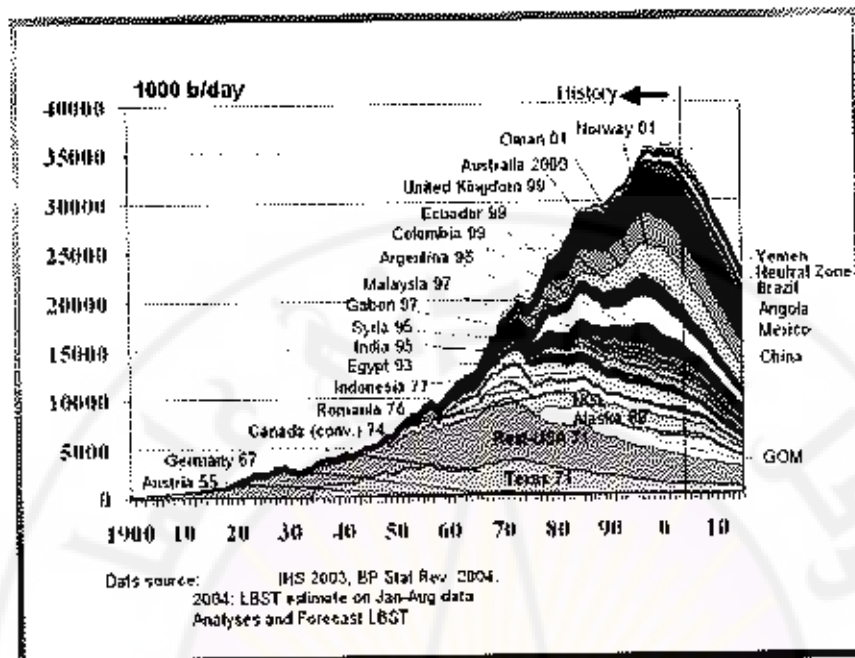
- التوسع في استخدام الطاقة المتجددة وتطوير تقاناتها وتخفيض كلفها . وهذا ما أكدت عليه المؤتمرات الدولية وخاصة مقررات مؤتمر قمة الشمس العالمي الذي عقد في هراري في صيف عام 1996 .

وبغض النظر عن الجانب البيئي فقد دلت الدراسات و تحليل أداء بعض منظومات الطاقة المتجددة قيد العمل، أنها أضحت منافسة اقتصاديا لمنظومات الطاقة التقليدية، وخاصة المنظومات الكهروضوئية (كلفة الكيلواط ساعي المنتج حوالي 5 سنتات) والمنظومات الحرارية الكهروشمسية (كلفة الكيلواط ساعي المنتج حوالي 9 سنتات) حيث تقدر كلفة الكيلواط ساعي المنتج تقليديا حوالي 5 سنتات .

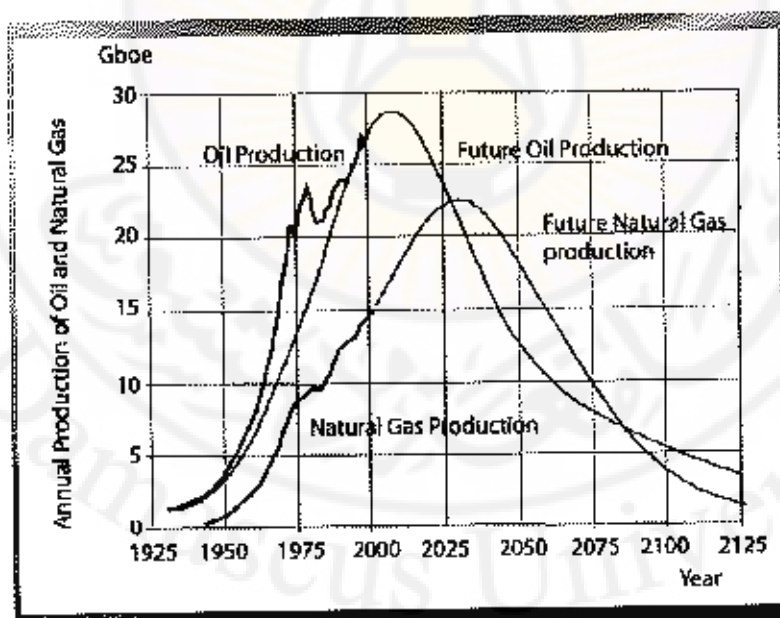
وكدليل على الاهتمام العالمي والعربي بالطاقة المتجددة ، وتوحيدا للجهود المبشرة قطريا ، فقد أحدثت في الدول الصناعية وفي معظم الدول النامية هيئات مستقلة للعناية بالطاقة المتجددة وإدارة أنشطتها منذ أكثر من عقدين من السنوات .

1-1-1 عمر الوقود الأحفوري

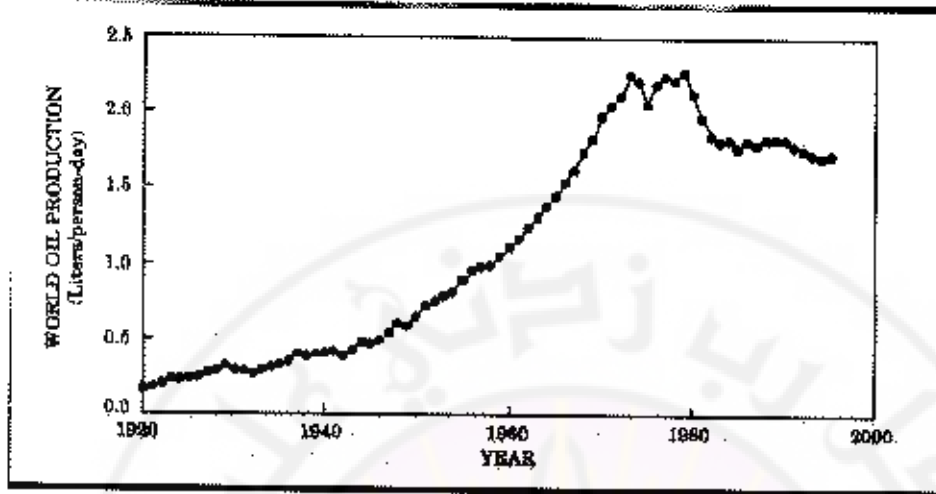
يملك 14 بلدا عربيا من أصل 21 احتياطيات من النفط والغاز تتفاوت بين قليلة ومتوسطة وهائلة . والعمر المتبقي للنفط في خمس منها يتجاوز 80 عاما على أساس الاحتياطي الحالي والإنتاج الحالي ؛ ولايتجاوز لبقية الدول العربية العشرين عاما. أما العمر المتبقي للغاز فهو أعلى منه للنفط والسبب يعود الى عدم استغلال الغاز حتى الآن على نطاق واسع. يبين الشكل 1-1 أن إنتاج النفط قد وصل إلى قمته في معظم دول العالم ويعتقد بعض الخبراء (مثل Mathew Simmons) أن إنتاج النفط السعودي سيصل لقمته قريبا. ويتوقع بعض الخبراء بلوغ قمة الإنتاج العالمي للنفط في 2010 وللغاز في 2030 كمايبين الشكل 1-2. إذا تتبعنا إنتاج النفط للشخص الواحد عالميا، نجد أن الإنتاج يراجع بشكل مستمر منذ المئتينات 1970's كمايبين الشكل 1-3.



شكل 1-1: تراجع إنتاج النفط في العالم [2]



شكل 1-2: توقعات حول بلوغ قمة الإنتاج العالمي للنفط والغاز [2]

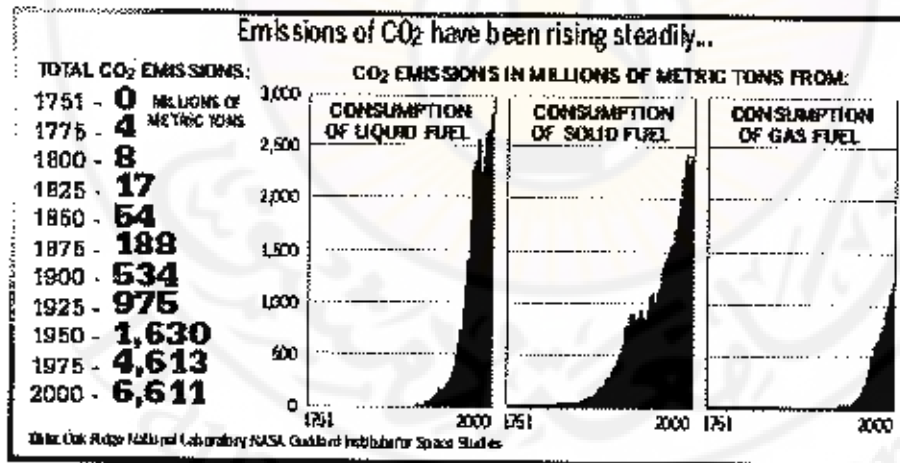


شكل 1-3: تناقص إنتاج النفط العالمي على أساس المتوسط للشخص

2-1-1 الانبعاثات والاحتراق الكوني (الاحتباس الحراري)

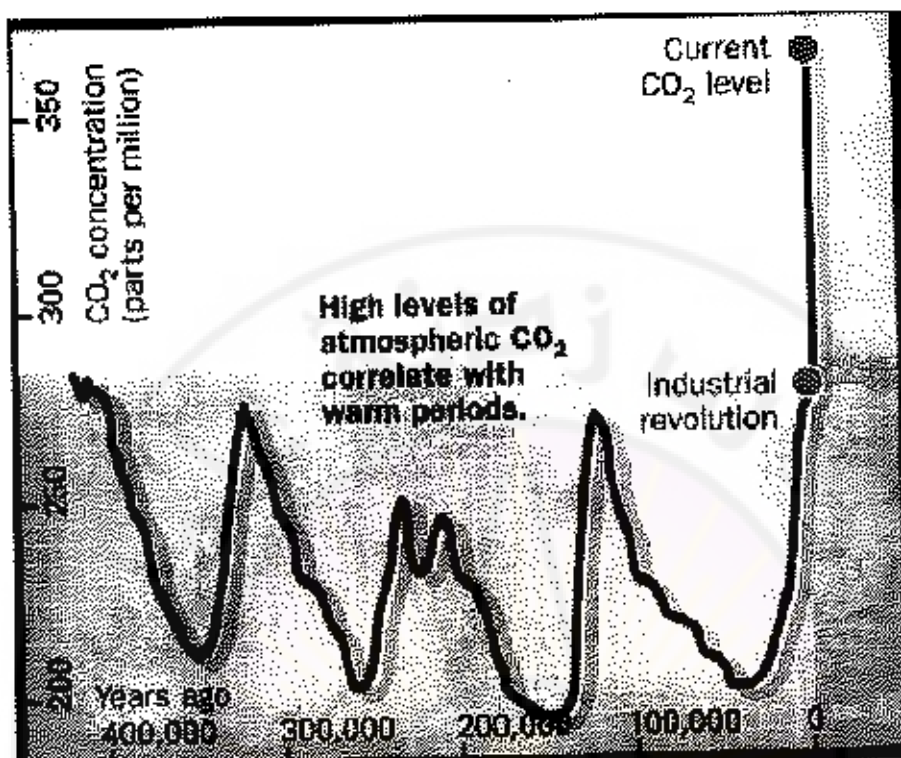
Emissions and global warming

إن عملية نضوب النفط والغاز قد سرّعت تزايد انبعاثات غاز الفحم كما يبين الشكل 1-4.



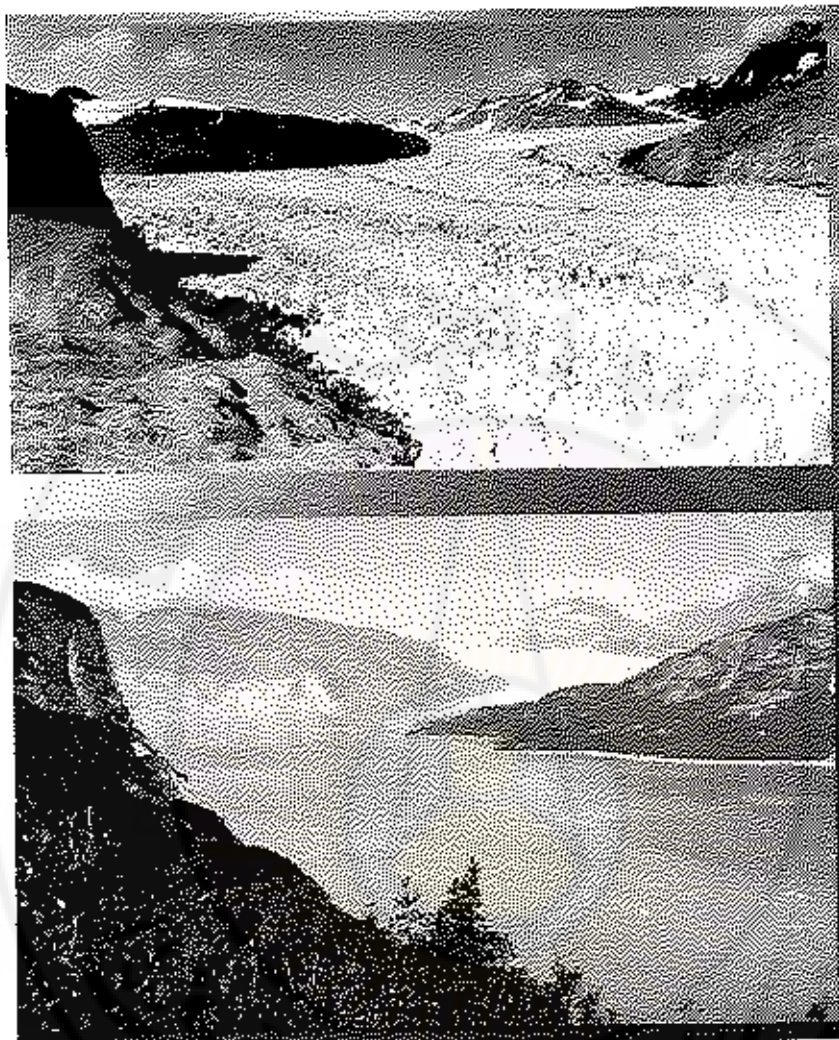
شكل 1-4: ارتفاع انبعاثات غاز الفحم بشكل مستمر نتيجة عملية نضوب الوقود الأحفوري

مستويات CO₂ الآن هي الأعلى من أي وقت في 400 ألف سنة الماضية (379 ppm at 2004) كما يبين الشكل 1-5.



شكل 1-5: مستويات CO₂ في الماضي والحاضر

يتضح من الشكل 1-6 أنه خلال 100 سنة الماضية توجد علاقة قوية بين الزيادة في عدد السكان في العالم والزيادة في إصدار CO₂ والزيادة في درجة حرارة الأرض الوسطية.



شكل 1-7: ذويان جليد في الاسكا

1-3 مؤشرات استهلاك الطاقة الأولية

تختلف نماذج استهلاك الطاقة الأولية اختلافا واسعا بين الدول العربية، و ستعرض أهم مؤشرات استهلاك الطاقة الأولية التي تبين ذلك الاختلاف الهائل.

- نصيب الفرد من الطاقة الاجمالية المستهلكة: نصيب الفرد العربي كوسطي سنوي يبلغ 1.11 طن نفط مكافئ (طنم) بينما يبلغ نصيب الفرد الوسطي في العالم 1.56

طنم. هذا من جهة ، ومن جهة أخرى هناك 11 بلد عربي يبلغ فيه نصيب الفرد أقل من الوسطي العربي وأكثر من نصف هؤلاء لا يتجاوز الرقم عندهم ثلث الوسطي العربي (مثل الصومال والسودان وموريتانيا واليمن والمغرب وجيبوتي) . بينما ثمة 8 بلدان عربية يتجاوز فيها نصيب الفرد ، ليس فقط الوسطي العربي بل الوسطي العالمي و بعدة مرات.

- كثافة الطاقة الإجمالية المستهلكة: وتعرف بأنها كمية الطاقة المستهلكة لإنتاج 1000 دولار من الناتج المحلي الإجمالي للبلد . هذا المؤشر هام جدا وييسر كفاءة استخدام الطاقة في البلد. عالميا ، كثافة الطاقة الوسطية هي 0.29 طنم/1000 دولار (0.29 toe/\$1000)، أما عربيا فلا تقل عن 0.50 . هناك فقط بلدان عربيان تقل فيهما كثافة الطاقة عن المعدل العالمي وهما المغرب و عمان ؛ و حتى الوسطي العربي فثمة 10 دول عربية تتجاوزه بنسب متفاوتة.

- تطور استهلاك الطاقة: بلغ المعدل السنوي الوسطي لنمو الاستهلاك العربي من الطاقة الأولية 5.66% بين 1991 و 1997. بينما كان هذا المعدل مساويا الى 1.28% للعالم بأسره. وفي الفترة ذاتها كان المعدل في حده الأدنى في الجزائر (1.3%) و في حده الأقصى في الكويت (26%). أما في سورية فقد كان معدل النمو 4.6% يقابله 16.7% في لبنان و 3.1 في مصر .

1-1-4 أزمة الطاقة العالمية والمحنية

في مجال استغلال الوقود الأحفوري يشغل بال البشرية أمران : الأمر الأول هو حتمية نضوب النفط والغاز خلال النصف الأول من القرن الحادي والعشرين كما لاحظنا سابقا . والأمر الثاني هو الغازات التي تنبعث أثناء الاحتراق والتي تلوث البيئة، ربما إلى حد تغيير المناخ و تهديد صلاحية الأرض للسكن في المستقبل.

والمشكلة الماثلة أمام العالم ومنها العالم العربي بالطبع هي: كيف يتسنى لنا أن نوفق بين حاجتنا المتزايدة بسرعة للطاقة، و بين حاجتنا إلى الحفاظ على نظام بيئي عالمي صالح لاستمرار الحياة من جهة ؟ و كيف سنواجه نضوب الوقود الأحفوري من جهة أخرى ؟

والجواب البسيط على هذه الأسئلة هو: إلى أن تستخدم مصادر أخرى للطاقة على نطاق واسع سيظل التحدي التقني واضحاً؛ وهو استخلاص أكبر قدر ممكن من الطاقة من المصادر التقليدية مع تقليل الإضرار بالبيئة إلى الحد الأدنى. ويحتاج المجتمع إلى نوع من الضمان التقني ضد احتمال أن يضطر العالم، بغية منع تغيير مناخ الأرض، إلى تقليص استهلاكه من الوقود الأحفوري بشكل حاسم وسريع. و منذ زمن ظهرت عدة استراتيجيات تستحق الاهتمام، وتتراوح هذه ما بين زيادة كفاءة استخدام الوقود الأحفوري (مما يقلل ما ينطلق في الجو، وذلك بإنتاج مقدار أكبر من الخدمات الطاقية بواسطة كمية الوقود نفسها)، وبين تطوير مصادر غير أحفورية محسنة يمكن أن تكون بدائل اقتصادية على نطاق واسع مثل مصادر الطاقة المتجددة كالشمس ومشتقاتها من رياح ومياه وكتلة حيوية وغيرها.

وبالرغم من ميزات الطاقة الشمسية، كونها مجانية وخالدة وخالية من التلوث، فإن لها بعض الخصائص التي تعيق استخدامها إلى هذا الحد أو ذاك؛ فكثافتها لوحدة المساحة الأرضية ضعيفة، وهي متوفرة لجزء من اليوم، بالإضافة إلى أن الغيوم والجو الملوث تقلل من الطاقة المستخدمة. لذلك يواجه نظام التوليد الكهرشمسي مشاكل فنية وتقنية لا بد من إيجاد الحلول الفنية الاقتصادية لها واعتماد الحل الأكثر اقتصادية.

تزايد الاهتمام العالمي بالطاقات المتجددة خلال السنوات القليلة الماضية بالأخص إثر موجة تصاعد أسعار النفط العالمية التي بدأت منذ عام 2004 وعبرت مستوياتها الاسمية حواجز وعتبات غير مسبقة متتالية خلال السنوات التالية ووصول سعر النفط الخام الأمريكي الخفيف وبسرعة غير متوقعة إلى ما يقرب 100 دولار/برميل في التعاملات الإلكترونية اليومية خلال النصف الثاني من شهر تشرين الثاني 2007. وما سبب ذلك من زيادة كبيرة في مبالغ فاتورة الواردات النفطية للبلدان المستهلكة وقلق حول الطاقات الإنتاجية النفطية ومدى إمكانية تلبية الطلب العالمي المتزايد على الطاقة.

وعزز من ذلك الاهتمام القلق العالمي المتزايد بصدد المسائل الخاصة بالاحتباس الحراري والتغير المناخي ومحاوله ربط ذلك بالنشاط الاقتصادي، من ضمنها

استهلاك الوقود الأحفوري، هذا بالإضافة إلى محاولة بعض البلدان المستهلكة تقليص الواردات النفطية، بالأخص من الشرق الأوسط لأسباب سياسية، وتحسين ميزان المدفوعات وتعزيز أمن الطاقة حيث أن إنتاج الطاقات المتجددة هو في معظمه ذو طابع محلي.

أما بالنسبة للأقطار العربية المصدرة للنفط فقد كان هناك تفاوت في مواقفها، فمنها من يرى بأن صناعة الوقود الحيوي تمثل مشكلة قد تؤثر في النهاية على الصناعة النفطية العالمية وبالتالي على عوائد صادراتها النفطية، بينما يرى البعض الآخر بأن التقدم في صناعة الطاقات المتجددة ما هو إلا فرصة يجب استغلالها والاستثمار فيها خصوصاً وأن منطقتنا العربية غنية ببعض المصادر المتجددة بالأخص الطاقة الشمسية.

1-1-5 الوضع الطاقى في سورية¹

يؤمن الوقود الأحفوري متمثلاً بالنفط والغاز القسم الأعظم من الطلب على الطاقة في سورية ويرتبط تطور استهلاك الطاقة بتطور المجتمع والاقتصاد بقطاعاته المختلفة. بلغ مجموع الطلب الكلي على مصادر الطاقة في سورية خلال عام 2000 حوالي 16.6 مليون طن مكافئ نفط وارتفع الطلب الكلي على الطاقة خلال عام 2008 ليصل إلى 24.108 مليون طن مكافئ نفطي موزعة كما يلي (جدول 1-1):

جدول 1-1: الطلب على مصادر الطاقة في سورية عام 2008

المصدر	مليون طن نفط مكافئ
الغاز الطبيعي والمرافق	4.45
المشتقات النفطية	18.177
الطاقة الكهربائية	0.882
الكتلة الحيوية	0.600

¹ المرجع المستخدم هو [3] للمهندس نبيل الشرع

تشيد وبناء	0.677	0.00	0.677
تجاري	0.079	0.710	0.789
النقل	4.810	0.00	4.810
دوائر حكومية	0.245	0.329	0.574
القطاع المنزلي	4.363	3.483	7.85
ضياعلت	0.326		0.326
مجموع الاستهلاك	15.117	8.991	24.108

بلغ الناتج المحلي الإجمالي بسعر السوق مقدراً بالأسعار الجارية و بالليرة السورية
للسنوات الأخيرة كما يلي (جدول 5-1):

جدول 5-1: الناتج المحلي الإجمالي في سورية 2000-2007

السنة	مليون ليرة سورية
2000	903944
2001	974008
2002	1016519
2003	1067265
2004	1263139
2005	1490798
2006	1708747
2007	2037772

الملاح العامة للوضع الطاقى في سورية

- يستهلك قطاع الكهرباء حوالي 40% من مصادر الطاقة الأولية .
- هناك فاقد كبير في قطاع الطاقة (إنتاج و توزيع النفط و الغاز و الطاقة الكهربائية.
- تزايد استهلاك الفرد من الطاقة سنوياً حيث كان في العام 2000م حوالي 950 كغ.م.ن /شخص و أصبح في العام 2007م مساوياً 1257 كغ.م.ن/شخص .
- يتركز الاستهلاك النهائي للطاقة في القطاع المنزلي حيث تبلغ نسبته 32.54% من الاستهلاك النهائي للطاقة حيث يستهلك 29% من المشتقات النفطية والغاز و 39% من الطاقة الكهربائية و التي تكافئ 18.45% من الطاقة الأولية .
- هناك عدم تناظر في استهلاك الطاقة القطاعي بالمقارنة مع مساهمة مختلف القطاعات في الناتج المحلي الإجمالي حيث تساهم الزراعة بنسبة 21 % الناتج المحلي الإجمالي بينما تستهلك 6.89 % فقط من إجمالي استهلاك الطاقة .
- ارتفاع كثافة استهلاك الطاقة حيث تتجاوز 920 كغ مكافئ نقط لكل 1000 دولار من الناتج المحلي الإجمالي في حين أن كثافة استهلاك الطاقة في دول الاتحاد الأوروبي بلغت لعام 2003م ما قيمته 194 كغ .م.ن وفي اليابان 120 والهند 1465 والصين 1435 لكل 1000 دولار أمريكي .
- ارتفاع المرونة الداخلية للطلب على الطاقة حيث ارتفع الناتج المحلي الإجمالي خلال الفترة 2000 - 2007م من 903944 مليون ليرة سورية إلى 2037772 مليون ليرة سورية أي بنسبة تقارب 12.3 % بينما ارتفع استهلاك الطاقة الأولية من حوالي 16.6 مليون طن مكافئ نفطي عام 2000م إلى 24.108 مليون طن مكافئ نفطي عام 2007م أي ازداد استهلاك مصادر الطاقة بنسبة 5.5 % و عليه فإن مرونة الطلب الداخلية على مصادر الطاقة تبلغ 2.25 بينما تبلغ في الدول المتقدمة 0.7 فقط.

خلال العام 2008 تم استهلاك كامل الطاقة الكهربائية المنتجة من مختلف المصادر عدا كمية قليلة مقدارها 581 مليون ك.و.س تم تصديرها إلى البلدان المجاورة. كما تم تبادل الطاقة عبر خطوط الربط مع الأردن بحيث كانت الطاقة المستجرة تساوي الطاقة المرسلّة.

يشير ميزان الكهرباء في المنظومة الكهربائية السورية لعام 2007 و استهلاك الطاقة الكهربائية حسب التوتر و حسب فئات الاستهلاك في العام 2007 إلى ما يلي:

- إن مجموع ما تم استهلاكه كقوة محرّكة بلغ 9405 ج.و.س و هو يشكل ما نسبته 26.92 % من مجموع الطاقة المعدة للاستهلاك و البالغ 34926 ج.و.س على التوتر 66 ك.ف وما دون.

- مجموع ما تم استهلاكه في الإنارة كان 16800 ج.و.س و هو يشكل 48.10 % من الطاقة المعدة للاستهلاك.

- بلغ الفاقد على التوتر 66 ك.ف و ما دون 8722 ج.و.س و شكل نسبة 25 % من مجموع الطاقة المعدة للاستهلاك و يلاحظ من الجدول أن نسبة الفاقد حافظت على قيمتها خلال الأعوام 2005-2007م

تتركز ذروة الطلب على الاستطاعة الكهربائية في فصل الشتاء مساءً كما يوجد فوارق كبيرة في الطلب على الاستطاعة خلال اليوم الواحد. هذه الذروة ناتجة عن ارتفاع نسبة الاستهلاك في الإنارة و التدفئة على العكس من الذروة الصيفية التي تحل في شهر آب من كل عام و تتميز هذه الذروة بتدني عامل الاستطاعة بسبب طبيعية الاستهلاك و ارتفاع استهلاك الاستطاعة الرديئة الناجم عن زيادة استخدام مضخات الماء و المراوح و التكييف. يؤدي الفارق الكبير بين حمولة الذروة و الحمولة الدنيا و التي تتراوح بين 57-62 % من حمولة الذروة إلى ضرورة تشغيل مجموعات التوليد في مجال واسع من الحمولات مما يؤدي بنوره إلى:

- تشغيل بعض المجموعات على حمولات منخفضة أثناء ساعات انخفاض الحمولة و بذلك ينخفض مردود مجموعات التوليد مما يعني زيادة الاستهلاك النوعي عند الحمولات المنخفضة للمجموعات

-- فصل بعض المجموعات الأمر الذي يؤدي بدوره إلى استهلاك إضافي للوقود عند إقلاع و فصل المجموعات الذي أيضاً يزيد من الاستهلاك النووي للوقود .

- انخفاض عامل الحمل للمجموعات على مدار العام حيث أن تغير عامل الحمل و حمولات مجموعات التوليد خلال الأعوام 2004 - 2008 ينحصر ما بين 66 - 69 % في حين أنه عالمياً بلغ 72% عام 1992 و يتوقع أن يصل إلى 75% عام 2010.

1-2 أنواع الطاقات المتجددة²

الطاقة المتجددة هي التي تتجدد مصادرها باستمرار أو أنها غير قابلة للنضوب وليس لها عمر افتراضي من الناحية العملية، وهي مصادر طاقة دائمة بخلاف مصادر الطاقة التقليدية ، كالطاقة الأحفورية، التي تنصف بالنضوب بسبب الاستخدام. كما تعتبر الطاقة المتجددة، بالأخص الجديدة منها، صديقة للبيئة بسبب ميزات البيئة المؤاتية حتى أصبح يطلق عليها "بالطاقة الخضراء".

تتواجد الطاقة المتجددة بأشكال مختلفة ومصدرها الأساسي هو أشعة الشمس، بصورة مباشرة أو غير مباشرة بالإضافة إلى حرارة جوف الأرض بالنسبة للطاقة الجوفية وجاذبية القمر التي تسبب ظاهرة المد والجزر.

تشمل الطاقة المتجددة الأنواع الرئيسية التالية: الطاقة الشمسية و طاقة الرياح و الطاقة الجوفية و الطاقة المائية و طاقة الكتلة الحيوية (طاقة البيوماس) و الوقود الحيوي.

وللعلم فإن الطاقة النووية لا تصنف ضمن الطاقات المتجددة كون مادة اليورانيوم (مصدر الطاقة النووية) مادة ناضبة ولها عمر افتراضي محدود. كما يصنف الهيدروجين في بعض الأحيان، وبصورة خاطئة، على أنه ضمن قائمة المصادر المتجددة. لكنه لا يعتبر مصدراً للطاقة بل حاملاً لها ولا يتواجد في الطبيعة بشكل حر ويجب إنتاجه من مصادر أخرى.

تاريخياً، وقبل اختراع استخراج الطاقات الكامنة في الفحم والنفط، كانت الكتلة الحيوية (Biomass) هي مصدر الطاقة شبه الوحيد الذي كان البشر يستخدمونه في القرون

² هذه الفقرة والفقرات التالية مأخوذة من المرجع [4] تباحث علي رجب في مجلة النفط والتعاون الدولي - الأوابك

الماضية، وينتج ويجمع محلياً وهو في معظمه خشب ومخلفات محاصيل وروث حيوانات. وعلى الرغم من أن معظم بلدان العالم قد تحولت عن هذا المصدر إلى الطاقة الأحفورية منذ بدء استخدام الفحم في القرن التاسع عشر وانتشار استخدام النفط في القرن العشرين، فإن الطاقة المتجددة التقليدية القائمة على الكتلة الحيوية لا تزال تشكل مصدراً رئيسياً، أو ربما الوحيد في بعض الأحيان لمئات الملايين من البشر في البلدان النامية معظمهم في جنوب آسيا وفي أواسط أفريقيا.

وعلى رغم صعوبة الوصول إلى تقديرات دقيقة لكميات الطاقة الحيوية على المستوى العالمي، تقدر نسبتها بحدود 10% من إجمالي مصادر الطاقة الأولية في العالم. ومع مرور الوقت والتقدم العلمي والتطور التكنولوجي والإجماعي والاقتصادي تم تطوير تقنيات يمكن بواسطتها استغلال أنواع أخرى من مصادر الطاقة المتجددة على نطاق واسع في بعض الأحيان. ومنذ أيام الثورة الصناعية يمكن التمييز ما بين ثلاثة أجيال من تلك التقنيات، وذلك كما يلي:

- الجيل الأول: ويشمل التقنيات التي انبثقت عن الثورة لصناعية في نهاية القرن التاسع عشر. وتشمل الطاقة الكهرومائية، احتراق الكتلة الحيوية والحرارة والطاقة التي مصدرها جوف الأرض. حيث ما زال بعضها يستخدم وبصورة واسعة في بعض بلدان العالم.
- الجيل الثاني: ويشمل التقنيات الخاصة باستخدام الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والأشكال الحديثة من الطاقة الحيوية أي الوقود الحيوي. وقد دخلت تلك الأنواع أسواق الطاقة ولكن بدرجات متفاوتة.
- الجيل الثالث: ويشمل التقنيات التي لا تزال قيد التطوير ولم تصل بعد إلى مرحلة الاستخدام التجاري الواسع. وتشمل تجميع الطاقة الشمسية وطاقة المحيطات والأنظمة المعززة لطاقة جوف الأرض وأنظمة الطاقة الحيوية المتكاملة.

3-1 أسباب الاهتمام بالطاقات المتجددة

بعد الانحسار الكبير لدور الطاقات المتجددة التقليدية وبرز الطاقات الأحفورية وانتشار وتنوع استخداماتها، عاد الاهتمام العالمي بالطاقات المتجددة ثانية وذلك يعود لعوامل عديدة من أهمها:

أسعار النفط: منذ ارتفاع أسعار النفط، وما سمي بأزمة النفط الأولى، في سبعينات القرن الماضي، بدأ الاهتمام العالمي بمصادر الطاقة المتجددة والاستثمار بتطوير تقنيات تمكن من استخدامها في المجالات المختلفة وبالأخص في توليد الكهرباء بهدف تقليص استهلاكها من النفط. مر ذلك بفترة فتور وهبوط بعد انخفاض أسعار النفط في منتصف الثمانينات، إلا أن الاهتمام العالمي بالطاقة المتجددة عاد وتعرز منذ بداية القرن الحالي بالأخص بعد تصاعد الأسعار المستمر وعبور مستوياتها الاسمية حواجز قياسية جديدة متتالية منذ عام 2004 ووصولها في الأشهر الأخيرة من عام 2007 إلى مستويات غير متوقعة وبهذه السرعة فارتفعت حاجز 100 دولار لبرميل النفط الأمريكي الخفيف في بعض الأيام، حيث ساعد ذلك في تحسين الجدوى الاقتصادية للمشاريع في المجال المذكور.

اعتبارات بيئية: خلال تسعينات القرن الماضي حصلت الطاقات المتجددة على دفع جديد مصدره تجدد الاهتمام العالمي بالبيئة نتيجة للدراسات العلمية التي أشارت إلى احتمالات التغير المناخي وربط ذلك بتزايد استهلاك المصادر الأحفورية. وقد تعمق الإحساس العالمي بالقضايا البيئية والمخاوف والقلق المتزايد من ظاهرة التغير المناخي والاحتباس الحراري بالأخص خلال السنوات القليلة الأخيرة، ما جعل مسألة الحفاظ على البيئة في مقدمة أولويات السياسات الطاقية للبلدان والمنظمات العالمية والبحث عن تطوير مصادر طاقة نظيفة مثل الطاقات المتجددة ولأغراض تتعدى توليد الكهرباء لتشمل قطاع النقل من خلال استخدام الوقود الحيوي.

أمن الطاقة: إن الجدل الدائر حول نظرية "ذروة النفط" وصدور بعض الدراسات والتقارير ذات النظرة المتشائمة والتي تنذر عن قرب نضوب احتياطات النفط العالمية وتشكك في أرقام الاحتياطات المعلنة للبلدان المنتجة، خلقت جواً من التوتر والقلق

حول مدى كفاية الطاقات الإنتاجية لتلبية الطلب العالمي المتزايد على الطاقة. وتزامن ذلك مع ظاهرة تصاعد الأسعار خلال السنوات القليلة الماضية، ما عزز كثيراً من مكانة وموقع الطاقات المتجددة، ليس فقط لتتنوع الطاقة ومصادر تجهيزها بل كضرورة لضمان أمن الطاقة في المستقبل كونها مصادر غير ناضبة. كل ذلك حدا بالبلدان والمنظمات العالمية بتقديم الدعم والتشجيع سواء كان ذلك للمشاريع الإنتاجية أو الأنشطة الخاصة بالبحوث والتطوير الطاقات المتجددة.

وقد رافق ذلك حملة وتغطية إعلامية واسعة لموضوع الطاقات المتجددة وبعض التضخيم في إمكانية أفاقها المستقبلية التي عبرت عنها بعض الدراسات والتحليل، بالأخص تلك التي تعكس مصالح سياسية أو انتخابية لبعض مجموعات الضغط التي تتخذ أمن الطاقة أو التغيير المناخي عذراً لدفع حكوماتها لتقديم المزيد من الدعم لهذه الصناعة حتى أصبح من الصعوبة، في بعض الأحيان، التفريق ما بين الخيال والحقيقة بخصوص الإمكانيات المستقبلية لبعض مصادر الطاقة المتجددة.

وفي وسط تلك الأجواء المشحونة والدعم الكبير الذي حظيت به صناعة الطاقات المتجددة العالمية أصبحت محط اهتمام المستثمرين وجذبت تلك الصناعة استثمارات هائلة بلغت حدود 50 مليار دولار في العالم لعام 2005 وساهمت فيها بعض الشركات النفطية العالمية الكبيرة مثل Shell و BB.

1-4 أهمية الطاقات المتجددة في سوق الطاقة العالمية

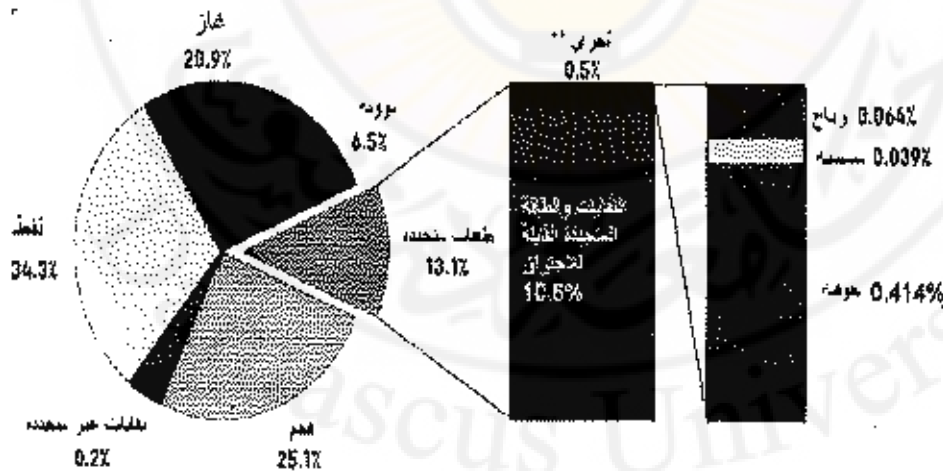
هنالك تفاوت في تحديد وتعريف دقيق للطاقة المتجددة، مما أدى إلى اختلاف في البيانات والإحصائيات الخاصة بتلك الأنواع من الطاقات الصادرة عن البلدان والمؤسسات العالمية المختلفة في أكثر الأحيان.

فمثلاً، على الرغم من أن الوقود الحيوي المستخدم في قطاع النقل هو شكل من أشكال الطاقة الحيوية، كونه مشتق من الكتلة الحيوية، إلا أنه يصنف في أغلب الأحيان ضمن صنف السوائل غير التقليدية (Non-Conventional Liquids) في البيانات

والإحصائيات الصادرة عن بعض المؤسسات العالمية الرئيسية المختصة بشؤون الطاقة التابعة لوزارة الطاقة الأمريكية.

كما تشمل بعض البيانات الخاصة بالطاقة المتجددة الصادرة عن بعض المصادر، أرقاماً عن الكتلة الحيوية التقليدية والنفايات القابلة للاحتراق، بينما تستبعد بعض المصادر الأخرى. إضافة إلى ذلك، فإن تعدد وتنوع الوحدات المستخدمة في قياس الطاقات المتجددة يضيف بعداً آخر في صعوبة مقارنة البيانات الخاصة بتلك المصادر المختلفة.

وعلى العموم، تشير بيانات وكالة الطاقة الدولية باستحواذ الطاقات المتجددة (تجارية وغير تجارية) على نسبة حوالي 13% من إجمالي إمدادات الطاقة الأولية العالمية في العام 2004، والتي تزيد عن ضعف مساهمة الطاقة النووية خلال السنة المذكورة. تمثل النفايات والطاقة المتجددة القابلة لاحتراق الجزء الأكبر، حوالي 80% من إجمالي الطاقة المتجددة (أي 10.6% من إجمالي الطاقة الأولية العالمية). تليها الطاقة الكهرومائية بنسبة 16.5% ثم الطاقات الأخرى (التي تشمل الطاقة الشمسية والرياح والجوفية والمد والجزر والمحيطات) بنسبة 3.8% من الطاقات المتجددة في عام 2004، وكما هو موضح في الشكل 1-1.

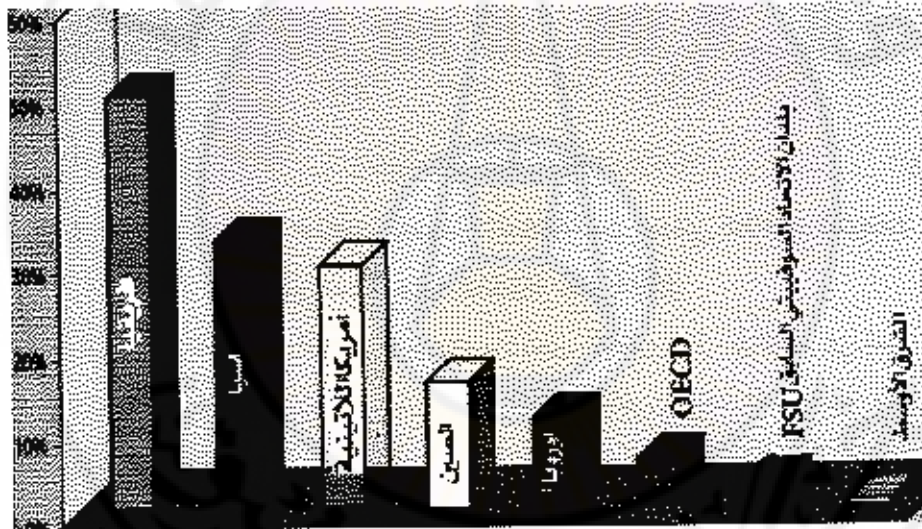


شكل 1-1: حصص أنواع الوقود من إجمالي إمدادات الطاقة الأولية في العالم لعام

2004

ولأغراض المقارنة، استحوذت الطاقات المتجددة على نسبة 7.4% من إجمالي استهلاك الطاقة في العالم في عام 2004، وفق بيانات إدارة معلومات الطاقة التابعة لوزارة الطاقة الأمريكية، مقاسة على أساس المحتوى الحراري المكافئ. علماً بأن تلك البيانات لا تشمل الطاقة الحيوية غير التجارية والنفايات والوقود الحيوي.

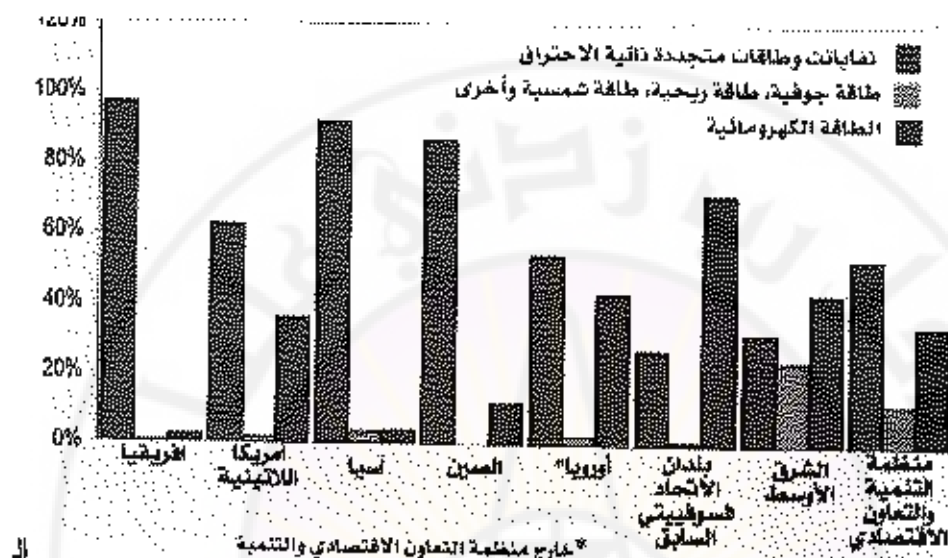
تتفاوت أهمية الطاقات المتجددة وأنواعها من إجمالي ميزان الطاقة في البلدان والمجموعات الدولية المختلفة تبعاً لاختلاف ظروفها. فقد تراوحت حصتها من إجمالي إمدادات الطاقة الأولية لعام 2004 من 0.7% بالنسبة للشرق الأوسط إلى 49% بالنسبة إلى إفريقيا، وجاءت ما بين الاثنين المجموعات الدولية الأخرى مثل آسيا بنسبة 31% وأمريكا اللاتينية بنسبة 28.9% كما يبين الشكل 1-2.



الشكل 1-2: حصة الطاقات المتجددة من إجمالي إمدادات الطاقة الأولية لعام 2004

وكان هناك تفاوت كبير في أهمية الأنواع المختلفة لمصادر الطاقة المتجددة من إجمالي تلك الطاقة (الشكل 1-3). حيث تشير بيانات وكالة الطاقة الدولية بأن النفايات والطاقة المتجددة القابلة للاحتراق تمثل الحصة الأساسية أي حوالي 97.1% من إجمالي ذلك النوع من الطاقات في إفريقيا لعام 2004. جاءت بعدها آسيا بنسبة 92.4%، وجاءت بلدان الاتحاد السوفييتي السابق في آخر السلم بأدنى نسبة (27.3%)

من إجمالي الطاقات المتجددة لعام 2004. أما بلدان الشرق الأوسط فكانت نسبتها 32%. ويرجع انخفاض النسبة في كل من بلدان الاتحاد السوفييتي السابق والشرق



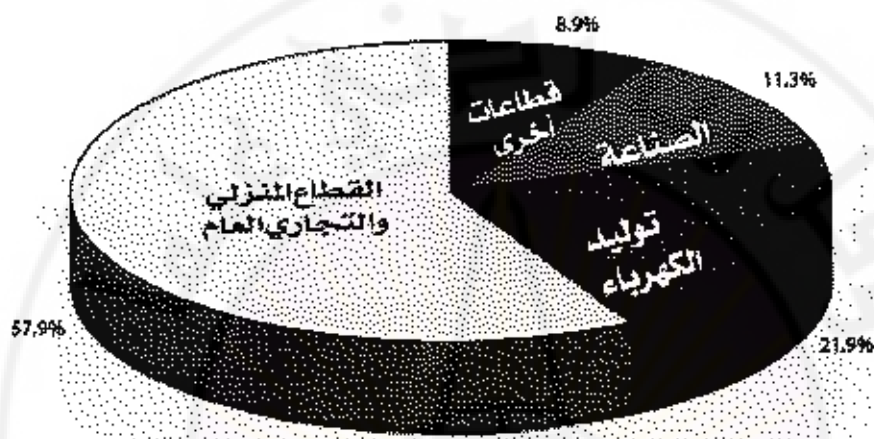
شكل 1-3 : حصة أنواع الطاقات المتجددة المختلفة من إجمالي الطاقات المتجددة للمجموعات الدولية المختلفة لعام 2004

الأوسط إلى توفر المصادر الهيدروكربونية، بالأخص النفط والغاز (والفحم في بعض بلدان الاتحاد السوفييتي السابق). أما بالنسبة للطاقة الكهربائية، فقد جاءت بلدان الاتحاد السوفييتي السابق في المقدمة بنسبة 71.4%، من إجمالي الطاقات المتجددة لتوفر مساقط المياه فيها، تلتها بلدان الشرق الأوسط بنسبة 43.4%، ثم أمريكا اللاتينية 36.1%، أما أدنى نسبة وهي 2.6%، فكانت من نصيب إفريقيا.

وشكلت الطاقات المتجددة الأخرى (جوفية وشمسية ورياح وأخرى) 24.4% من إجمالي الطاقات المتجددة في الشرق الأوسط، تلتها بلدان منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية بنسبة 12%، وآسيا 3.6%، من إجمالي طاقاتها المتجددة لعام 2004، أما الصين فكانت نسبتها 0%.

5-1 استخدامات الطاقات المتجددة

تشير بيانات وكالة الطاقة الدولية إلى أن القطاع المنزلي والتجاري العام قد استحوذ على الحصة الأكبر، ومقدارها 57.9% من استهلاك الطاقات المتجددة في العام خلال 2004. تلاه قطاع توليد الكهرباء بنسبة 21.9% فقط، والصناعة بنسبة 11.3%. أما نصيب باقي القطاعات فكان 8.9% وذلك موضح في الشكل 1-4.



الشكل 1-4: استهلاك الطاقات المتجددة في العالم حسب القطاعات المختلفة لعام 2004

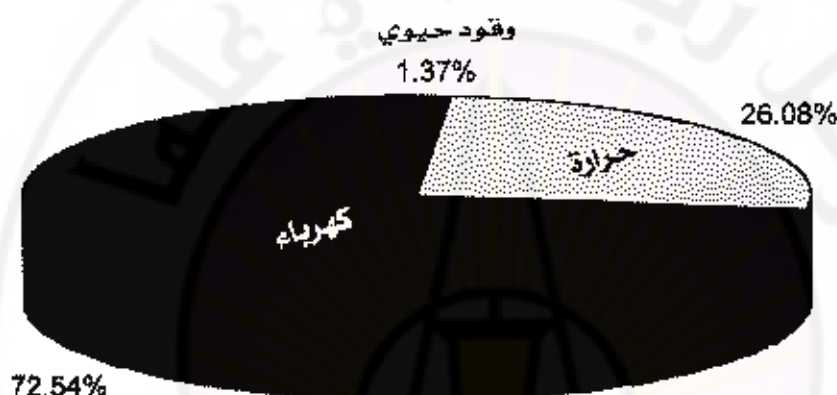
وللعلم، ففي حال استثناء الطاقة غير التقليدية والنفائات والوقود الحيوي، يصبح قطاع توليد الكهرباء مشكلاً الجزء الأساسي، وهو نحو 91% من إجمالي استهلاك الطاقات المتجددة في العالم خلال عام 2004، وذلك وفق بيانات إدارة معلومات الطاقة الأمريكية.

تُستغل الطاقات المتجددة في القطاعات الاقتصادية المختلفة بأشكال متنوعة:

- طاقة كهربائية
- تطبيقات حرارية مختلفة
- وقود سائل في قطاع النقل.

وقد يستخدم مصدر طاقة متجدد بأكثر من شكل واحد كما في حالة استخدام الطاقة

الشمسية لتوليد الكهرباء أو كمصدر للحرارة أو استخدام الطاقة الحيوية لتوليد الكهرباء أو كمصدر للحرارة أو معالجتها لإنتاج وقود حيوي لاستخدامه في قطاع النقل. ووفق السياق أعلاه تمثل الطاقة الكهربائية الجزء الأكبر من استخدام الطاقات المتجددة حيث قدرتها بعض المصادر 72.5% من إجمالي الطاقات المتجددة لعام 2005، تلتها الحرارة بحدود 26%. أما الوقود الحيوي فلا زال بشكل نمية متواضعة بحدود 1.4% وكما يبين الشكل 1-5.



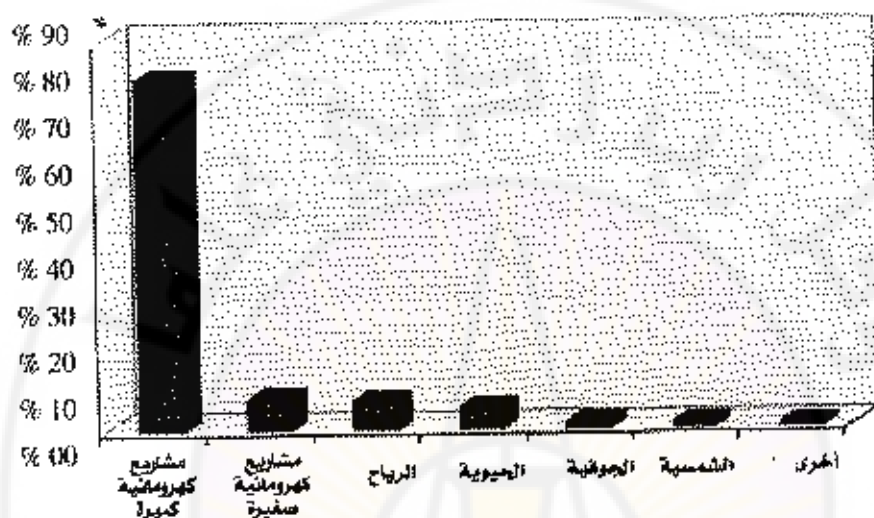
شكل 1-5: الأشكال الرئيسية لاستخدام الطاقة المتجددة في العام 2005

بعد استعراض أنواع الطاقات المتجددة وأهميتها وطبيعة استخدامها سيتم إلقاء الضوء وبقدر من التفصيل على مصادر الطاقة المتجددة المستخدمة في توليد الطاقة الكهربائية والحرارة. أما المصادر المستخدمة في إنتاج الوقود الحيوي فقد خصص لها فقرة منفصلة.

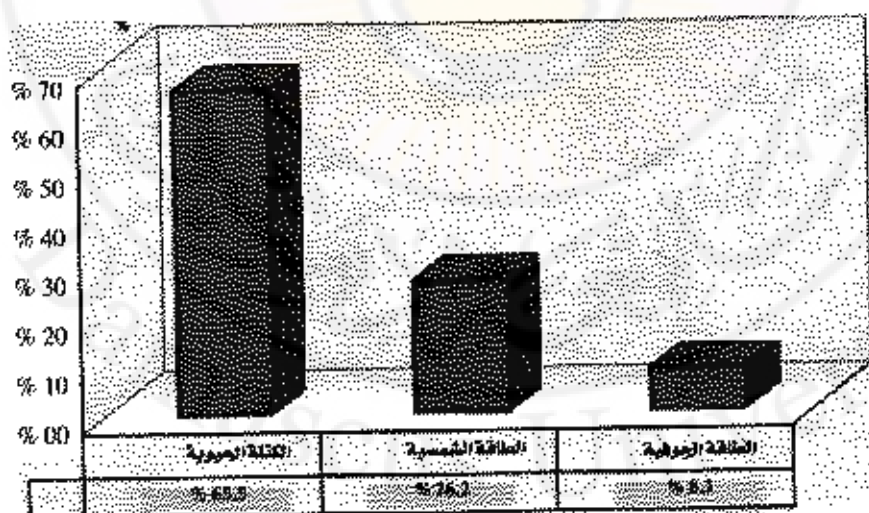
1-6 الطاقات المتجددة لتوليد الكهرباء والحرارة

عند استثناء النفايات من الطاقات المتجددة يتضح بأن الطاقة الكهرومائية تساهم بتوليد أكثر من 87% من إجمالي الطاقة الكهربائية التي تولدها الطاقات المتجددة، تليها الرياح بنسبة 6.3% والكتلة الحيوية 4.7% وبقيّة المصادر الأخرى بنسبة متواضعة جداً. أما بالنسبة للحرارة من الطاقات المتجددة فتساهم الكتلة الحيوية بالجزء الأكبر،

أي 65.5% من إجمالي الحرارة الصادرة عن الطاقات المتجددة، تليها الحرارة الشمسية بنسبة 26.2%، ثم حرارة جوف الأرض بنسبة 8.3% كما في الشكلين 1-6 و 1-7.



شكل 1-6: نسب مصادر الطاقة المتجددة في توليد الكهرباء لعام 2005



شكل 1-7: نسب مصادر الطاقات المتجددة في توليد الحرارة لعام 2005 [4]

1-6-1 الطاقة الشمسية

على رغم المساهمة المتواضعة للطاقة الشمسية من إجمالي الطاقات المتجددة فقد استقطبت اهتماماً واسعاً وتميزت بمعدلات نمو عالية نسبياً بلغت حوالي 60% سنوياً خلال الفترة 2000 - 2004 . وتتمثل الاستخدامات الرئيسية للطاقة الشمسية المستمدة من أشعة الشمس في توليد الحرارة والطاقة الكهربائية بالإضافة إلى بعض الاستخدامات الأخرى. وإن تطبيقات الطاقة الشمسية الحالية الأوسع استعمالاً هي في مجال تسخين المياه، بينما يزداد استخدامها في توليد الطاقة الكهربائية. أما التقنيات المستخدمة في مجال الطاقة الشمسية فهي:

1. الخلايا الضوئية Photovoltaic-PV: وذلك لتحويل أشعة الشمس إلى طاقة كهربائية مستمرة DC بصورة مباشرة وهي تتكون من مواد نصف ناقلة (Semi Conductors) متنوعة، بالدرجة الأولى من السيليكون، ولا تحتوي على أجزاء متحركة، وتعمل عن طريق استخدام المادة نصف الناقلة لتحويل ضوء الشمس، أي الفوتونات Photons التي تمتصها تلك المادة، إلى كهرباء بصورة مباشرة بواسطة ظاهرة التأثير الضوئي PV Effect.

إلا أن تلك التقنيات لا تزال عالية التكاليف نسبياً، وقد تكون تنافسية في حالات معينة مثل الأماكن البعيدة عن شبكات الطاقة الوطنية أو المناطق النائية التي تتمتع بدرجة تشمس عالية.

2. الأنظمة الشمسية الحرارية Solar Thermal Systems: وهي أنواع مختلفة، منها ما هو بسيط يشتمل بالدرجة الأساس على ألواح أو صحنون مسطحة شمسية توضع باتجاه ثابت لالتقاط أشعة الشمس وتوليد الحرارة.

وما يجدر ذكره هو الراجح الكبير الذي باتت تشهده السخانات الشمسية منذ تسعينات القرن الماضي في بلدان عديدة نظراً لانخفاض كلفتها، وما تحظى به من دعم وتشجيع حكومي، إضافة لكون تقنياتها ليست معقدة. ويقدر بأن هناك نحو 40 مليون منزل يستخدم الطاقة الشمسية لتسخين الماء في العالم.

أما محطات الطاقة الحرارية الشمسية، أو أنظمة التركيز الحرارية الشمسية Concentrating Solar Thermal CST فتستخدم لتوليد الحرارة ومن ذلك يتم توليد الطاقة الكهربائية بصورة غير مباشرة عبر استغلال أشعة الشمس لتسخين المياه وتوليد البخار الذي يحوّل عنفات بخارية فتولد الكهرباء، أي من خلال الحرارة ودورات البخار Steam Cycle .

تعتمد المحطات الحرارية الشمسية على السقوط المباشر لأشعة الشمس وبدرجة عالية، ولذلك فهي مناسبة للمناطق الصحراوية والسهلية. وقُدّر إجمالي الطاقة المركبة في العالم التي تنتج من المحطات الحرارية الشمسية بنحو 354 ميغواط في عام 2005. وتُعد بلدان الشرق الأوسط، وإفريقيا الصحراوية وبعض المناطق السهلية في الولايات المتحدة وأمريكا اللاتينية وصحاري آسيا، من المناطق الواعدة في هذا المجال. ورغم أن تكاليف تقنية المحطات الشمسية الحرارية تعد أقل من تكاليف تقنية الخلايا الضوئية، إلا أنها لا تزال تعتبر ذات جدوى غير اقتصادية مقارنة بهذه الأخيرة لأسباب متعددة منها:

- **الحجم:** ينبغي أن تكون المحطات الشمسية الحرارية ذات استطاعة كبيرة جداً لتكون اقتصادية، ويمكنها أن تتنافس محطات توليد الكهرباء الكبيرة العاملة بالوقود الأحفوري ذي الكلفة المنخفضة نسبياً وكذلك المحطات الكهربائية العاملة بالطاقة النووية.
- **المرونة:** تتميز أنظمة المحطات الحرارية الشمسية بقلّة درجة مرونتها بضوء إمكانية استخدامها في مناطق معينة فقط أي التي تتمتع بدرجة عالية من المركبة المباشرة لأشعة الشمس. بينما تتميز تقنية الخلايا الضوئية بدرجة عالية من المرونة بحيث يمكن استخدامها في أماكن بعيدة عن شبكات الطاقة الوطنية والاستخدامات مختلفة حسب طبيعة وحجم الاستخدام أو ربطها بالشبكات الوطنية. وهذا يفسر الاهتمام العالمي والتركيز على تقنيات الخلايا الضوئية، بينما تميزت تقنية المحطات الحرارية الشمسية بالركود وبطء التطوير.

وعلى العموم، يلاحظ أن هناك بعض التبدل في التوجه العالمي تجاه المحطات الحرارية الشمسية، ويوجد العديد من مشاريعها قيد التنفيذ، أو في مراحل متقدمة من التطور. ويجري كذلك التخطيط لإنشاء محطات حرارية شمسية في بلدان مختلفة في العالم منها الجزائر، ومصر، والمغرب، واليونان، والهند، وإيطاليا، والمكسيك، وإسبانيا، والولايات المتحدة وسورية.

مما يذكر، على الرغم أن الحرارة تشكل الاستخدام النهائي الأكبر على المستوى العالمي، فإن توليد الحرارة من الطاقة الشمسية والمصادر المتجددة الأخرى لم يحظ بنفس الاهتمام الذي حظي بها في توليد الكهرباء في سياسات الطاقة للبلدان المختلفة، ويعزى ذلك ربما إلى الاختلاف بين سوقي الحرارة والكهرباء، حيث أن الحرارة غير قابلة للتجارة بها كما هو الحال في حالة الكهرباء.

اقتصاديات الطاقة الشمسية

على رغم التقدم التكنولوجي وانخفاض تكاليف توليد الكهرباء من الطاقة الشمسية إلى النصف في العقدين الماضيين، إلا أن التكاليف لا تزال عالية مقارنة مع تكاليف الوقود الأحفوري (أو حتى الطاقات المتجددة الأخرى). ويسود اعتقاد بأنه ما لم تنخفض تكاليف تقنيات الخلايا الشمسية بحدود 3-5 مرات، فسيكون من الصعب توقع نموها على مستوى واسع على الأمد البعيد. وقد يكون هناك اختلاف كبير في تكاليف أنظمة الخلايا الضوئية وذلك تبعاً لحجم النظام، والموقع، ونوع الزبون، والربط بالشبكة الوطنية من عدمه بالإضافة إلى المواصفات الفنية.

وتختلف تقديرات تكاليف توليد الكهرباء من الطاقة الشمسية تبعاً للمصادر المختلفة. فقد قدرت بعض المصادر تكلفة الطاقة المولدة في البلدان الصناعية باستخدام الخلايا الضوئية الشمسية ما بين 180-540 دولار/ميغاواط ساعي وتكاليف الاستثمار 5000-8000 دولار/كيلوواط لعام 2005. ومن الأنظمة الحرارية الشمسية 105 - 230 دولار/ميغاواط ساعي، وتكاليف الاستثمارات 2000-2300 دولار/كيلوواط وذلك بالمقارنة مع تكاليف توليد تتراوح ما بين 20-60 و 40-60 دولار / ميغاواط ساعي وتكاليف استثمار تتراوح ما بين 1000-1200 و 450-600

دولار/كيلو واط للمحطات العاملة على الفحم والغاز الطبيعي على التوالي. بينما قُدرت مصادر أخرى تكاليف الكهرباء المولدة من الخلايا الضوئية بحدود 160-400 دولار/ميغاواط مساعي.

وفي كل الأحوال، تجمع التقديرات بأن تكاليف التوليد من الخلايا الضوئية وتكاليف استثماراتها تعتبر الأعلى ما بين مصادر الطاقات المتجددة المختلفة.

وعلى رغم تكاليفها العالية نسبياً، تمر صناعة الطاقة الشمسية العالمية، وبالأخص الخلايا الضوئية، بمرحلة ازدهار ونمو بمعدلات عالية. ومما ساعد على ذلك تصاعد أسعار النفط العالمية إلى مستويات قياسية، مما حسن من اقتصاديات مشاريعها وجعلها ذات جاذبية، بالإضافة إلى الدعم والتشجيع الذي تلقاه تلك الصناعة من حكومات البلدان المستهلكة. وتعتمد الصناعة المذكورة، وبدرجة كبيرة، على استمرارية الدعم الحكومي وتوسيعه ليشمل أسواقاً جديدة أخرى.

ومن الواضح أنه لولا الدعم والتشجيع والإجراءات التي اتخذتها بعض البلدان المستهلكة الرئيسية لما وصل الاهتمام بالطاقة الشمسية إلى هذا الحد. وتبرز في هذا المجال كل من اليابان وألمانيا كبلدين رائدين في تطوير الطاقة الشمسية. حيث لعبتا دوراً أساسياً في تقديم دعم بارز ساهم في انتعاش تلك الصناعة. ومن بين أشكال الدعم والتشجيع لمشاريع الطاقة الشمسية هو قيام مؤسسات الطاقة الوطنية بشراء فائض الطاقة الكهربائية من مشاريع الطاقة الشمسية المرتبطة بشبكات الطاقة الوطنية، مما يوجد سوقاً مضموناً لها.

بلغت الاستطاعة التراكمية المركبة للخلايا الضوئية في ألمانيا واليابان نحو 1429 ميغاواط لكل منهما. وتأتي بعد تلك الولايات المتحدة 479 ميغاواط، وكان ذلك في عام 2005، وهناك بلدان أخرى معظمها في القارة الأوروبية بلغ فيها إنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية حداً معقولاً.

مميزات الطاقة الشمسية

تمتلك الطاقة الشمسية العديد من الفوائد كونها تدخل في تطبيقات متعددة ومتنوعة لتلبية متطلبات الحياة اليومية.

- سهولة ومرونة بعض تقنياتها، كالخلايا الضوئية، التي يمكن تركيبها فوق أسطح المنازل والأبنية الأخرى واستخدامها في بعض الأماكن التي يصعب فيها الحصول على كهرباء لعدم إمكانية أو صعوبة الربط بالشبكات الوطنية أو صعوبة نقل الوقود أو ارتفاع التكاليف كما في حالة الأقمار الصناعية والمناطق النائية والسفن.
- لا تنبعث عن الكهرباء الناتجة أية غازات ضارة أو إشعاعات أو تلوث إضافة إلى صمتها المطبق، فهي إذن وبكافة المقاييس تعتبر طاقة صديقة للبيئة.
- صحيح أن الخلايا الشمسية تستهلك طاقة خلال عملية تصنيعها، إلا أن الطاقة المتراكمة التي تنتجها خلال عمرها التشغيلي تزيد بكثير عن تلك الداخلة في تصنيعها. وقد قدرت بعض المصادر بأن الإنتاج لفترة 2-5 سنوات يكفي لتعويض الطاقة المستهلكة في عملية التصنيع.

سبلات الطاقة الشمسية

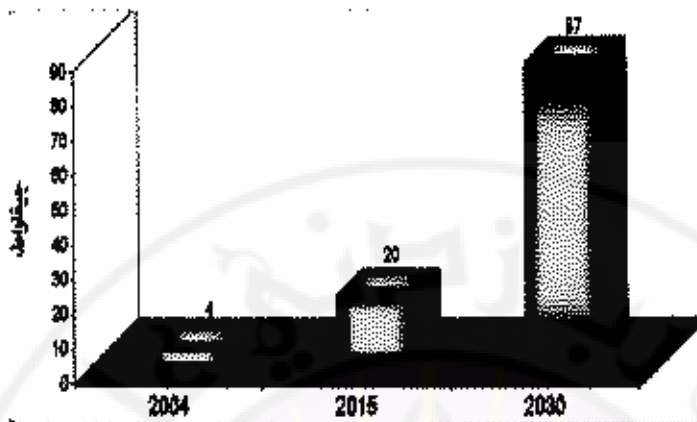
أما المحددات والعراقيل التي تجابه تطوراً واسعاً في الطاقة الشمسية في المستقبل فهي عديدة ومنها:

- التكاليف العالية التي تتميز بها الطاقة الشمسية لتوليد الكهرباء مقارنة بالتقنيات الأخرى سواء كانت تقليدية أو من مصادر متجددة أخرى. وقدرت بعض المصادر بأنها تفوق مستويات الطاقة التقليدية بنحو ثلاثة إلى أربعة أضعاف.
- عدم توفر الكهرباء أو الحرارة من الطاقة الشمسية أثناء الليل أو خلال الأحوال الجوية غير المواتية، مما يتطلب تخزينها أو ربطها بنظام طاقة مكمل لمعظم التطبيقات.
- كما تعاني الطاقة الشمسية من مشاكل بيئية تتمثل بالمساحة المطلوبة لتشبيد الألواح الشمسية ومستلزماتها. ويساور البعض القلق من الغازات التي تنبعث من تصنيع الخلايا الضوئية وتلك التي قد تنبعث من تصنيع الخلايا الضوئية وتلك التي قد تنبعث منها عند انتهاء دورة حياتها، حيث يحتوي بعضها على عناصر كيميائية مثل الكاديوم والزرنيخ وغاز الميثان بالإضافة إلى مواد كيميائية ومعادن سامة ولو بنسب قليلة جداً.

• وتواجه صناعة الخلايا الضوئية عائقاً آخر هو نقص السيليكون المناسب لصناعتها وهو المطلوب بشدة لصناعة أنصاف النواقل Semi Conductors، مما رفع أسعار إنتاج الخلايا الضوئية وخاصة وأنه يتوقع التزايد على طلب السيليكون في هذا الضرب من الصناعة من 41 ألف طن في عام 2006 إلى 120 ألف طن في عام 2010. وعلى الرغم من توافر مادة السيليكون في الطبيعة، إلا أن الحصول على سيليكون خالص لإنتاج الخلايا الضوئية لا يزال يعتبر عملية معقدة.

الآفاق المستقبلية

بناء على التطورات التي شهدتها صناعة الطاقة الشمسية بصورة عامة، والخلايا الضوئية، بصورة خاصة، خلال السنوات القليلة الماضية، يتوقع أن يستمر نمو تلك الصناعة بمعدلات عالية نسبياً في المستقبل. وقد قدرت وكالة الطاقة الدولية نمو إجمالي الطاقة الشمسية المركبة في العالم بمعدل 16.4% سنوياً خلال الفترة من 2004-2015 ويقدر لها أن تنخفض إلى 13% على الأمد الأبعد أي على امتداد الفترة 2004-2030. وطبقاً لذلك، يتوقع تزايد إجمالي الطاقة الشمسية المركبة في العالم لتصل إلى 20 جيغاواط في العام 2015 ثم إلى 87 جيغاواط في عام 2030 بالمقارنة مع 4 جيغاواط في عام 2004، أي أنها ستتزايد بأكثر من 20 ضعفاً ما بين عامي 2004 و2030. كما يبين الشكل 1-8. وأعداد المصدر المذكور النظر في تلك التقديرات لاحقاً ليصبح معدل النمو السنوي حوالي 17% للفترة 2005-2030. وقدرت مصادر أخرى نمو صناعة الخلايا الضوئية بمعدل 26% سنوياً لغاية 2015، ينخفض بعدها إلى 19% لغاية 2020 وإلى 11% ما بين عامي 2021 و2025. وهناك تفاوت كبير في مدى إمكانية مساهمة الطاقة الشمسية في إجمالي توليد الكهرباء في المستقبل في العالم، حيث تتوقع بعض المصادر ألا تتجاوز 0.5% بحلول عام 2030 أو أنها تستمر بمعدل أقل من 1% لفترة طويلة، وقد ترتفع إلى حوالي 1% بحلول عام 2030، ثم تصل بعد ذلك إلى حوالي 3% من توليد الكهرباء من الطاقات المتجددة. بينما تتوقع مصادر أخرى بلوغ أرقام متفائلة جداً قد تصل إلى 16% في عام 2040.



الشكل 1-8: إجمالي الطاقة الشمسية المركبة (جيجاواط)

وهذه التوقعات الطموحة لا تزال بعيدة المنال بسبب المعوقات التي تواجهها صناعة الطاقة الشمسية وبكلفتها الباهظة التي يتوقع أن تستمر بمستويات تفوق تكاليف توليد الكهرباء من التقنيات الأخرى لغاية عام 2030، حيث تقدر تكاليف توليد الكهرباء المتوقعة من الخلايا الضوئية بما يتراوح ما بين 70 و325 دولار/ميغاواط ساعي في عام 2030 بالمقارنة مع 35-45 و35-40 ميغاواط ساعي لكل من الغاز الطبيعي والفحم على التوالي خلال السنوات المذكورة.

وعلى العموم، فإنه ما كان باستطاعة الطاقة الشمسية أن تنهض لولا الدعم الحكومي، ويمود الانطباع بأنها ستظل في أمس الحاجة إلى ذلك الدعم ولفترة طويلة، كما أنه من غير المرجح أن تساهم، بحصة مهمة في إجمالي ميزان الطاقة العالمي على الأمد البعيد على رغم أنها قد تتمكن من الاستحواذ على نسبة مهمة من بعض الأسواق الخاصة في المناطق النائية أو البعيدة عن شبكات الطاقة الوطنية.

وبخصوص مستقبل الطاقة الشمسية لأغراض التوليد الحراري، يتوقع تزايد مساهمتها من 2.4% إلى حوالي 12% في عام 2030 من إجمالي الحرارة الناتجة عن مصادر الطاقة المتجددة في العالم، كما يتوقع أن تشهد أقل درجة من الانخفاض في التكاليف مقارنة مع الخلايا الضوئية.

1-6-2 طاقة الرياح

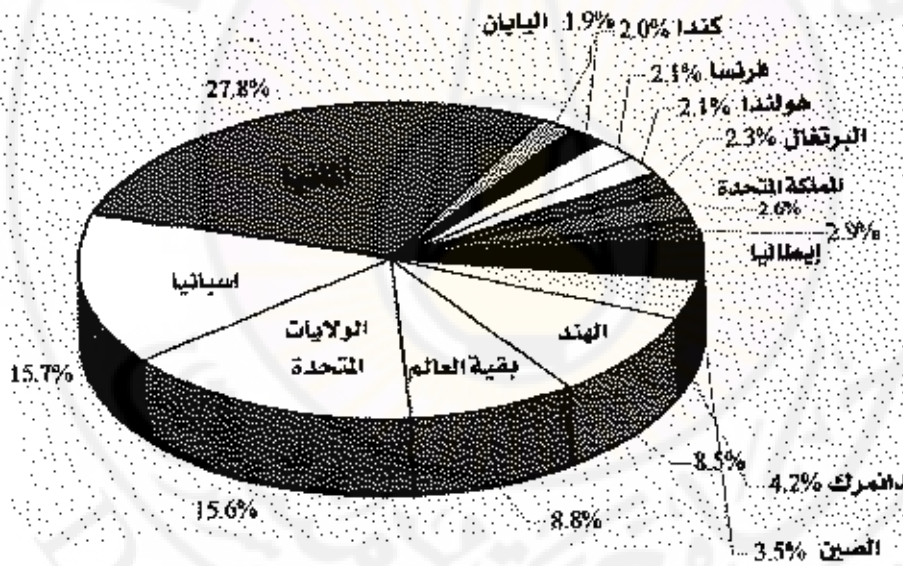
وهي الطاقة المستمدة من الرياح عن طريق تحويل حركة الرياح، أي طاقتها الحركية، إلى شكل آخر من أشكال الطاقة سهلة الاستخدام، بالدرجة الأساس طاقة كهربائية وإلى درجة أقل طاقة ميكانيكية تستخدم في عدد كبير من التطبيقات.

بدأ استخدام طاقة الرياح مع بدايات التاريخ لأغراض مختلفة، إلا أن استخدامها لتوليد الكهرباء يعتبر جديد نسبياً، حيث بدأ ولأول مرة في الولايات المتحدة في بدايات القرن الماضي. حيث تم استخدام طواحين هوائية صغيرة في عشرينات القرن الماضي، لتوليد الكهرباء في بعض المناطق الريفية البعيدة عن خدمات الكهرباء، إلا أن استخدامها قل كثيراً بعد وصول خطوط نقل القدرة الكهربائية إلى المناطق الريفية من القرن المذكور. ومجدداً عاد الاهتمام بطاقة الرياح لتوليد الكهرباء خلال مبعينات القرن الماضي، وبدأت تشهد تطوراً لا بأس به.

وَأدخلت في الخدمة حالياً، عنفات ريجية (تختلف عن الطواحين الهوائية التقليدية) لتوليد الكهرباء. وبمرور الوقت والتقدم التكنولوجي تطورت أحجام العنفات وتنوعت، وكان الحجم السائد يقل عن 100 كيلو واط لغاية منتصف الثمانينات من القرن الماضي. بعدها ازداد إلى بضعة مئات من الكيلو واط إلى أن وصل في منتصف التسعينات إلى ما بين 0.5 و1.5 ميغاواط، وأخيراً ازدادت الحجم الكبيرة للعنفات لتصل إلى 5 ميغاواط وازداد قطرها حتى بلغ 125 متر وارتفاعها إلى 90 متر.

تمثل طاقة الرياح مصدراً واعداً لتوليد الطاقة الكهربائية، وحققت معدلات نمو مضطربة تزيد عن 20% خلال السنوات الـ15 السابقة وتضاعفت خلال السنوات العشر الأخيرة. وتابعت نموها الديناميكي العالي بإضافة 15132 ميغاواط خلال عام 2006، ما يمثل زيادة بأكثر من 25% مقارنة بعام 2005 ليصل إجمالي استطاعة الرياح المركبة في العالم إلى 74223 ميغاواط في عام 2006، لكن رغم ذلك فلا تزال مساهمتها من إجمالي توليد الكهرباء في العالم متواضعة ولم تتجاوز 1% في عام 2006.

يتسم نمط توزيع طاقة الرياح في العالم بدرجة عالية من التركيز، حيث استحوذت ثلاثة بلدان (ألمانيا وإسبانيا والولايات المتحدة) على حوالي 60% من إجمالي الاستطاعة الكهروريحية المركبة في العالم في نهاية عام 2006. وتمثل البلدان الـ 13 الأكبر في الصناعة المذكورة التي تزيد الاستطاعة المركبة في كل منها عن 1000 ميغاواط في عام 2006 نحو 91% من إجمالي العالمي في السنة المذكورة. وتحتل ألمانيا المرتبة الأولى في العالم بنسبة 27.8% من إجمالي الاستطاعة الكهروريحية المركبة في العالم في عام 2006. تأتي بعدها كل من إسبانيا والولايات المتحدة بنسبة 15.7% و 15.6% على التوالي وحلت الهند في المركز الرابع بنسبة 8.5% (الشكل 1-9).



الشكل 1-9 : توزيع الاستطاعة الكهروريحية المركبة في العالم عام 2006

ومن بين البلدان الثلاثة حققت الولايات المتحدة أعلى نسبة من النمو في طاقة الرياح، 26.8% في عام 2006، بالمقارنة مع عام 2005، بينما حققت إسبانيا نسبة 15.8% وألمانيا 12% . وعلى رغم ذلك فإن إجمالي الاستطاعة الكهروريحية المركبة

في الولايات المتحدة والتي بلغت 11604 ميغاواط في عام 2006 كانت تقل بكثير عن الاستطاعة الكهروريحية المركبة في ألمانيا (تمثل 56% منها) التي وصلت إلى 20622 ميغاواط في العام المذكور.

اقتصاديات طاقة الرياح

لقد تحسن مستوى اقتصاديات طاقة الرياح بشكل كبير وانخفضت تكاليفها إلا أن مساهمتها في توليد الكهرباء لازالت متواضعة جداً. فمذ ظهور أول عتفة تجارية مرتبط بالشبكة الوطنية (استطاعة 22-35 كيلواط) في نهاية سبعينات القرن الماضي، انخفضت تكاليف توليد الكهرباء من الرياح بشكل كبير على الأخص بالنسبة للمناطق البرية. وفي عام 2004 انخفضت التكاليف إلى خمس ما كانت عليه في الثمانينات، ويعتقد البعض بأن هذا التوجه نحو الانخفاض سوف يستمر معتمداً بالدرجة الأساس على زيادة حجم العتفات المنتجة، إلا أنه لا يتوقع حدوث انخفاضات كبيرة بالنسبة للمناطق البرية في المستقبل.

وقدّرت تكاليف التوليد للعتفات في البلدان الصناعية على البر بحدود 30-80 دولار/ميغاواط ساعي في عام 2005. أما بالنسبة للمناطق البحرية فتتراوح ما بين 70-220 دولار/ميغاواط ساعي. وتراوح تكاليف الاستثمار ما بين 900-1100 و 1500-2500 دولار/كيلوواط للرياح في البر والمناطق البحرية على التوالي في عام 2005. بينما قدّرت مصادر أخرى تكاليف التوليد بحدود 40-50 دولار/ميغاواط ساعي في البر، و 60-100 دولار/ميغاواط ساعي في المناطق البحرية.

وعلى الرغم أن توليد الطاقة الكهربائية بطاقة الرياح تعتبر تنافسية وأقل تكاليفاً مقارنة بتوليدها من الخلايا الضوئية، إلا أنها تكاليفها لا تزال عالية نسبياً بالنسبة للمناطق البحرية مقارنة مع الفحم أو الغاز الطبيعي. ويقدر اتحاد طاقة الرياح البريطاني بأن تكاليف توليد الكهرباء من الرياح مقارنة لتكاليف الطاقات الجديدة من الفحم والغاز الطبيعي في الولايات المتحدة.

وعلى العموم يمكن تلخيص أهم العوامل التي تؤثر في تحديد تكاليف توليد الكهرباء من الرياح واقتصادياتها في التالي:

سرعة الريح — حجم العنفات وتصميمها — الموقع — حجم المزرعة الريحية (أي عدد العنفات) — عوامل أخرى منها طبيعة سياسات البلد البيئية ومدى دعمها لمثل تلك المشاريع وسهولة التمويل.

مميزات طاقة الرياح

أهم ما تتميز به طاقة الرياح هو:

- الرياح مجانية وتشغيل العنفات والمزارع لا يتطلب أي وقود
- لا ينتج عن تشغيلها أية انبعاثات لغازات الدفيئة أو فضلات
- يمكن زرع وفلاحة الأراضي التي تتركب عليها العنفات
- تتصف بالمرونة لأن العنفات ذات أحجام مختلفة، وهي ملائمة لتوفير الطاقة للأماكن البعيدة أو النائية، كما يمكن ربطها بشبكة الطاقة الوطنية.

سبببات طاقة الرياح

أما المحددات والمشاكل التي تعاني منها طاقة الرياح فمن أهمها ما يلي:

- عدم انتظام هبوب الرياح
- ندرة المواقع التي تكثر فيها الرياح وقلة ملاءمتها اقتصادياً أو بيئياً أو كليهما. إذ قد تكون نائية أو واقعة في عرض البحر أو غير مأهولة لا تحتاج إلى طاقة، وهو ما يستوجب نقل الطاقة الكهربائية المولدة فيها لمسافات بعيدة لإيصالها إلى مراكز الاستهلاك.
- حتى وإن حققت تكاليف طاقة الرياح انخفاضاً ملحوظاً، إلا أنها لا تزال أعلى من تكاليف التوليد بالوقود الأحفوري بالتقنيات الحالية لا سيما منه الغاز الطبيعي والفحم. إضافة إلى ذلك فقد أدت زيادة الطلب العالمي على الحديد والصلب إلى رفع أسعار العنفات بنحو 30% في عام 2005، مما عرض بعض مشاريع الطاقة الريحية لمخاطر التوقف. من جهة أخرى، فإن الجزء الأساس من الانخفاض في

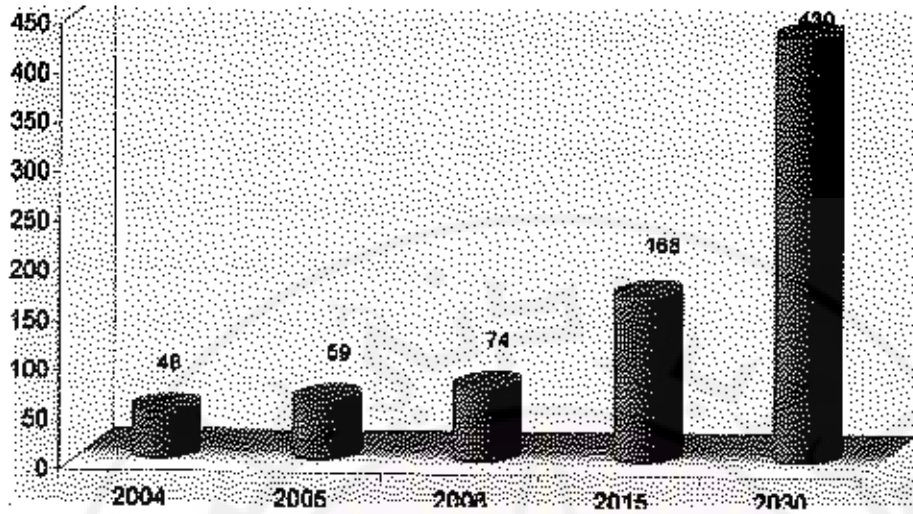
التكاليف قد حدث قبل 10 إلى 15 سنة وأن السنوات القليلة الأخيرة تميزت بـ تأثيرات تخفيض أقل نسبياً.

- تحدث العنفات الهوائية، وبالأخص القديمة، ضجيجاً وصخباً، إلا أن ذلك قد انخفض كثيراً في التصاميم الجديدة للعنفات.
- قد تشكل العنفات خطراً على الطيور.
- لم توجه لطاقة الرياح، ولمسنوات طويلة، أية انتقادات بيئية، إلا أنه بدأت تُثار ضدها تحفظات اجتماعية رئيسية من باب "ليس بجوارِي" (Not in my Backyard)، خلال السنوات القليلة الماضية، بحيث أصبح القبول الاجتماعي من العوامل المحددة التي تجابه نمو طاقة الرياح في المستقبل.
- تتطلب حقول طاقة الرياح مساحات كبيرة من الأراضي بواقع 0.1 إلى كيلومتر مربع لكل ميغاواط. وبالتالي فهي ليست مناسبة لكل البلدان خصوصاً وأن هناك بلدانا صغيرة مثل مالطا أو قبرص ليس لديها مساحات أراضي تسمح بتركيب مزارع ريحية.

الآفاق المستقبلية

تعتبر طاقة الرياح أكثر واعدية بالمقارنة مع الطاقة الشمسية وتشير بيانات وكالة الطاقة الدولية إلى توقع استمرار نمو الصناعة المذكورة بمعدلات عالية نسبياً تقدر بنحو 16% سنوياً ما بين 2004 و2015 على أن تتخفّض على المدى الأبعد إلى 10.6% سنوياً ما بين 2004 و2030.

وفي ضوء ذلك، يتوقع المصدر المذكور وصول إجمالي الاستطاعة الريحية المركبة في العالم إلى 168 جيغاواط في عام 2015، أي بزيادة 250% مقارنة بعام 2004، وإلى 430 جيغاواط في عام 2030، أي أنها ستضاعف ثمانية مرات ما بين عامي 2004 و2030، كما يبين الشكل 1-10. وتشير آخر تقديرات المصدر المذكور لمعدلات نمو طاقة الرياح بحدود 10% خلال الفترة 2005-2030. ولا يتوقع أن يحصل انخفاض هام في تكاليف طاقة الرياح على اليابسة حتى ولو تطورت تقنياتها. أما بالنسبة للمناطق البحرية فهي سوق صغيرة تنتظر مزيداً من التقدم التكنولوجي.



الشكل 1-10: طاقة الرياح المركبة في العالم لغاية عام 2030 (جيجاواط)

3-6-1 الطاقة الجوفية Geothermal Energy

الطاقة الجوفية هي الطاقة المستمدة من حرارة جوف الأرض والتي عادة ما تكون على شكل ماء حار/بخار. قد استغل البشر طاقة جوف الأرض لإمدادهم بالحرارة منذ آلاف السنين.

وتستخدم المياه الحارة الجوفية حالياً في بلدان عديدة في العالم في بعض الاستخدامات الحرارية المباشرة منها تدفئة المنازل وفي أحواض السباحة والمنتجعات السياحية والصحية بالإضافة إلى بعض التطبيقات الأخرى بالأخص في المجالات الزراعية والصناعية. وقد ساهمت الحرارة الجوفية بنسبة 8.3% من إجمالي الحرارة الصادرة عن الطاقات المتجددة ومن ضمنها الكتلة الحيوية في العالم في عام 2005.

وساهمت السويد والولايات المتحدة بالجزء الأكبر من إنتاج الحرارة الجوفية كما تعتبر الدانمارك والسويد وسويسرا بلدان مستخدمة رئيسية لهذا المصدر.

وتعد آيسلندا البلد الوحيد في العالم الذي يستغل الطاقة الجوفية ويوصلها لحوالي 88% من مجموع البيوت فيه في عام 2004. وتنتشر مصادر الطاقة الجوفية في بعض البلدان العربية مثل الجزائر والأردن وسورية وجيبوتي واليمن وغيرها. وتجري

مجال الطاقة الكهرومائية في العالم حافظت على مستويات إنتاجها الحالي أو مقاربة لها في عام 2004 مقارنة مع عام 2003.

المميزات والسلبيات

تعتبر الطاقة الكهرومائية من الطاقات المتجددة النظيفة والكفوءة لإنتاج الكهرباء ويتكاثف منخفضة تعتبر الأقل في بعض الحالات (بالنسبة للمحطات الكهرومائية الكبيرة) من بين تقنيات الطاقات المتجددة الأخرى. وبمجرد أن يكتمل المشروع، فإن التكاليف التشغيلية تغدو شبه مجانية، ومن مميزات الأخرى:

- لبناء محطات التوليد الكهرومائية الكبيرة والسدود فوائد كثيرة منها السيطرة على الفيضانات وإدارة معدل تدفق المياه خلال المواسم المختلفة، وري الأراضي الزراعية المجاورة، وإنشاء مواقع للسياحة والاستجمام وتحسين جودة المياه،
- لا تنتج الطاقة الكهرومائية نفايات أو ملوثات بيئية.
- يتسم إنتاج الكهرباء من المشاريع الكهرومائية بالاستمرارية ويمكن التعويل عليها بدرجة أكبر مقارنة مع بعض تقنيات مصادر الطاقات المتجددة الأخرى، كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح وطاقة الأمواج.

لكن المحطات الكهرومائية الكبيرة تعاني من عوائق ومشاكل وبعض الآثار السلبية الإيكولوجية والبيئية والاجتماعية والاقتصادية التي قد تفوق فوائدها المختلفة، مما قاد البعض إلى تصنيف المحطات الكهرومائية الكبيرة ضمن المصادر غير المتجددة. ومن المساوئ التي تعانيها تلك المشاريع ما يلي:

- غمر المياه: إن معظم مشاريع الطاقة الكهرومائية بوساطة مساقط المياه تتطلب بناء سدود تغمر مياهها مساحات كبيرة من الأراضي المجاورة مما قد يؤثر على النظام البيئي لتلك المناطق.
- إعادة توطين السكان: قد يتطلب إنشاء السد الضخم ترحيل وإعادة توطين كبيرة من السكان القاطنين في الأراضي التي يغمرها السد، وقد ينتج عن ذلك آثار سلبية واجتماعية واقتصادية خصوصاً وأن الأراضي المغمورة تكون عادة خصبة.

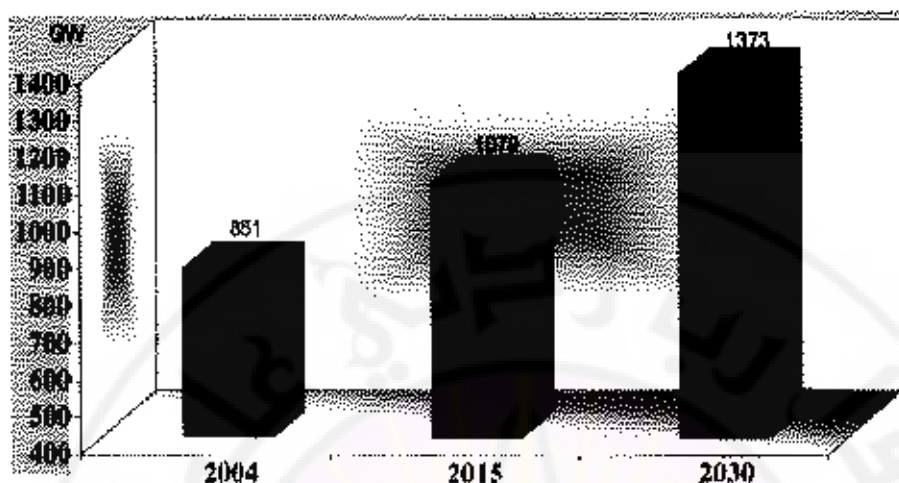
- صحيح بأن تشغيل المحطات الكهرومائية بحد ذاتها تنتج طاقة نظيفة، إلا أن عملية غمر المياه للأراضي الخضراء قد تؤدي إلى زيادة نسب ثاني أكسيد الكربون في الجو نتيجة لتحلل النباتات، تحت سطح الماء في المنطقة المغمورة.
- يتطلب بناء السدود الكبيرة تكاليف استثمارية عالية.
- من فوائد المحطات الكهرومائية الكبيرة السيطرة على الفيضانات، إلا أن السدود الكبيرة قد تكون مصدراً لمخاطر الفيضانات في بعض الحالات مثل كسر السد أو تعرضه لعمليات إرهابية.
- مع مرور الوقت تتراكم الترسبات في الخزان، ما يؤثر على سعة الخزان، ويقلص العمر الافتراضي للمحطة.

الآفاق المستقبلية

من الناحية الفنية، تتميز المحطات الكهرومائية بمستقبل واعد كونها تقنية نظيفة نسبياً ذات كفاءة عالية ومنخفضة التكاليف، بالأخص من الناحية التشغيلية، علماً بأن تقنياتها تعتبر ناضجة وبالتالي لا يتوقع تحقق خفض هام لتكاليفها في المستقبل.

وطبقاً لتقديرات وكالة الطاقة الدولية، يتوقع تزايد إجمالي طاقتها المركبة في العالم إلى 1079 جيغاواط في عام 2015 و1373 جيغاواط في عام 2030 بالمقارنة مع 851 جيغاواط في عام 2004، أي بمعدل نمو سنوي 2.2% خلال الفترة 2004-2015 و1.9% خلال الفترة 2004-2030 وكما في الشكل 1-12.

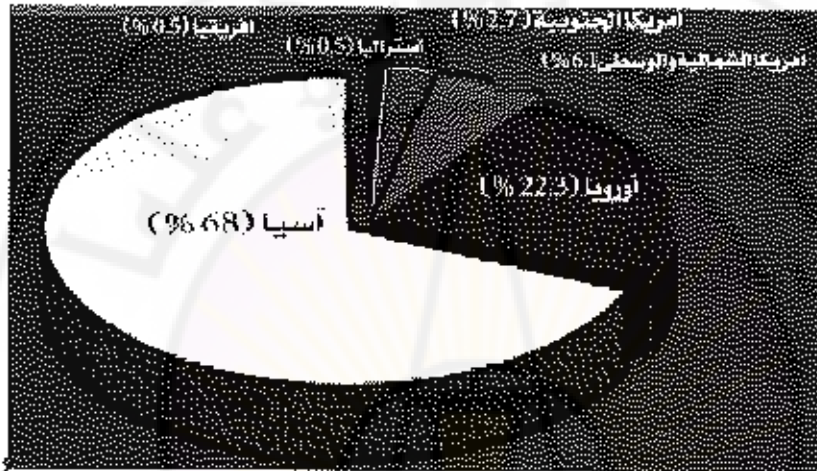
على رغم الفوائد المتعددة للمشاريع الكهرومائية، ظهرت خلال الأونة الأخيرة، أصوات كثيرة معارضة لإنشاء المحطات الكهرومائية الكبيرة، خوفاً من تأثيراتها السلبية وهو ما صعب على متخذي القرار مهمة إيجاد توازن بين فوائد ومساوئ تلك المشاريع. وفي نفس الوقت أدت بعض التشريعات التي تتطلب ديمومة حد أدنى من حجم التدفق المائي إلى تقليص فرص نجاح المشاريع الكهرومائية الكبيرة، وعلى الأخص في بلدان مثل الولايات المتحدة وفرنسا. إضافة إلى ذلك فإن معظم المواقع المناسبة لإقامة سدود الطاقة الكهرومائية قد تم تطويرها خلال القرن العشرين أو صنفت كمحميات طبيعية.



الشكل 1- 12: تطور الطاقة الكهرومائية في العالم (جيغاواط) [4]

(2) المحطات الكهرومائية الصغيرة: نظراً لما تواجهه مشاريع الطاقة الكهرومائية الكبيرة من معوقات وما يشهده الطلب العالمي على الطاقة من تزايد، غدا الاهتمام العالمي متجهاً نحو إنشاء مشاريع كهرومائية صغيرة الحجم لتفادي سلبيات المشاريع الكبيرة، ومما ساهم في ذلك أيضاً الإجراءات الخاصة بإعادة هيكلة صناعة توليد الطاقة الكهربائية و تحريرها و دخول بعض الشركات المستقلة في المجال المذكور. يتطلب إنشاء المحطات الكهرومائية الصغيرة، عادة، مبالغ استثمارات أكبر للوحدة الواحدة كما أنها تتميز بمعدل تكاليف توليد أعلى مقارنة مع المحطات الكهرومائية الكبيرة، حيث تصل التكاليف الاستثمارية للكيلواط الواحد ما بين 1800-6800 دولار مقارنة مع 1500-5500 دولار للمحطات الكبيرة (تقديرات عام 2005)، وتتراوح تكاليف توليد الكهرباء ما بين 60-150 دولار/ ميغاواط ساعي مقارنة مع 30 - 120 للمحطات الكبيرة لنفس السنة، علماً بأن من أهم العوامل التي تؤثر في الجدوى الاقتصادية ومدى واعدية مشاريع المحطات الصغيرة، هي كمية التدفق المائي وارتفاعه. و تتميز التقنية المذكورة بحظ أوفر لتحقيق انخفاض في التكاليف في المستقبل خصوصاً بالنسبة للتكاليف الاستثمارية مقارنة مع المحطات الكبيرة.

ولا تزال مساهمة تلك المحطات منخفضة نسبياً و بحدود 1-2% من إجمالي توليد الكهرباء، ويقع الجزء الأكبر (53%) من الطاقة المركبة في البلدان النامية كما في عام 2002، وتستحوذ آسيا على نسبة 68% و بالأخص في الصين التي تمتلك وحدها أكثر من 50% من إجمالي الاستطاعة المركبة في العالم، تليها أوروبا 23% و أمريكا الشمالية و الوسطى 61% و أمريكا الجنوبية 27% كما في الشكل 1- 13.



شكل 1- 13: توزيع إجمالي استطاعات المحطات الكهرومائية الصغيرة المركبة في العالم عام 2002

تتميز المحطات الكهرومائية الصغيرة بمرونة عالية، بحيث يمكن إقامة حتى على أنهر صغيرة ومن دون الحاجة لبناء السدود، في معظم الأحيان، أي باستخدام النواعير المائية، مما يجعلها ملائمة لكهربة المناطق الريفية والناحية. ويمكن أن تعود بفوائد اقتصادية مباشرة نتيجة لاستخدام الكهرباء في تطبيقات اقتصادية كفوءة مثل الري وحفظ الأغذية ومعالجة المنتجات الزراعية. وهي لا تخلف أثراً بيئياً ضاراً، كالمحطات الكبيرة، ومع ذلك قد تكون لها بعض الآثار السلبية مثل التغير في منسوب تدفق الأنهار وتراكم النفايات و الضوضاء التي تحدثها.

3) طاقة المد والجزر: يرجع تاريخ استغلال طاقة المد والجزر و المحيطات إلى القرن الحادي عشر، و تم ذلك ببناء سدود و استخدام مياه المد التي تحتجزها تلك

السود لتدوير نواعير مطاحن الحبوب، بالأخص في بريطانيا و فرنسا. وبدأ استغلال طاقة المد و الجزر لتوليد الكهرباء لأول مرة في العالم في فرنسا عام 1966، ثم لحقت بها بلدان أخرى مثل كندا و بريطانيا. لكن مساهمة الطاقة المد والجزر في توليد الكهرباء لا تذكر، و طاقتها المركبة متواضعة جداً، و تشير بيانات وكالة الطاقة الدولية إلى أن إجمالي طاقة المد والجزر المركبة في البلدان الأعضاء في الوكالة المذكورة بلغت حوالي 261 ميغاواط في عام 2004 ومن دون تغيير عن الأعوام القليلة السابقة، و تحتل فرنسا المركز الأول بـ 240 ميغاواط أي 92% بينما يتوزع المتبقي على كندا (20 ميغاواط) وبريطانيا (1ميغا واط).

تتميز طاقة المد و الجزر بكونها طاقة نظيفة، لا تنتج انبعاث غازات ضارة أو نفايات، ولا يحتاج تشغيلها إلى تكاليف أو وقود حال اكتمال المشروع، و تكاليف إدارتها منخفضة لكنها تحتاج إلى تكاليف استثمارية عالية للبناء، و المواقع الصالحة لها بالغة الندرة. و يقتصر إنتاج الكهرباء منها على فترات حركة المد و الجزر، أي 10 ساعات يومياً فقط. و أشارت بعض المصادر إلى أن تكاليف توليد الكهرباء من المد و الجزر أكثر تنافسية من الفحم و مقاربة للطاقة النووية في حالة وجود الموقع المناسب.

4) طاقة الأمواج: لا تزال تقنيات توليد الكهرباء من طاقة الأمواج في مراحلها الأولية، و تجري محاولات في بعض البلدان لاستغلال هذا المصدر، حيث أنشأت البرتغال أول محطة لتوليد الطاقة الكهربائية المستمرة من حركة أمواج البحر في شمال البلاد، كما يجري بناء محطة في اسكتلندا أيضاً، بالإضافة إلى محاولات في بلدان أخرى مثل استراليا و النرويج و الصين والهند وإيرلندا و الولايات المتحدة، وقد جوبهت جميعها بمشاكل فنية كبيرة في البداية. ومع ذلك يتوقع البعض أن تكون تقنيات طاقة الأمواج واعدة بدرجة أكبر، بالمقارنة مع تقنيات طاقة المد و الجزر.

1-6-5 الطاقة الحيوية Bio energy

الطاقة الحيوية مشتقة من الطاقة المخزونة في الكتلة الحيوية biomass ، وتشمل بالدرجة الأساس النباتات العضوية (باستثناء الوقود الاحفوري)، و يمكن استخدامها

عادة بـصور مباشرة على شكل مواد صلبة قابلة للاحتراق — من ضمنها الأخشاب ومخلفات الصناعة الخشبية والمخلفات الزراعية والخشب المقطوع من الغابات والمحاصيل الزراعية. ويضاف إليها كذلك الفضلات الحيوانية ونفايات المدن (باستثناء المواد البلاستيكية والمركبات غير العضوية)، علماً بأن الأخشاب لا تزال تمثل المصدر الأكثر شيوعاً للطاقة الحيوية. وبالإمكان استخدام الطاقة الحيوية للأغراض الرئيسية التالية: التوليد الكهربائي وإنتاج الحرارة وإنتاج الوقود الحيوي.

شكلت أنشطة إنتاج الحرارة وتوليد الكهرباء من الكتلة الحيوية نسبة 7% من إجمالي الاستثمارات العالمية في المشاريع الجديدة للمصادر المتجددة خلال عام 2005 (باستثناء المشاريع الكهرومائية الكبيرة). وقد احتلت طاقة الكتلة الحيوية المركز الأول في العالم من بين مصادر الطاقة الأولية لغاية نهاية عشرينات القرن الماضي. أما اليوم فهي تحتل المرتبة الرابعة بعد النفط والغاز والفحم وتساهم بحوالي 10% من إجمالي مصادر الطاقة الأولية في العالم 2006. يوجد الجزء الأكبر منها في البلدان النامية، حيث لا تزال الكتلة الحيوية التقليدية والتي غالباً ما تكون على شكل وقود خشبي أو روث حيواني جاف، وتعتبر مصدر طاقة المطبخ والتدفئة لحوالي ثلث سكان العالم وخاصة في البلدان النامية، ويتم جمعها واستخدامها محلياً من دون أن تدخل الأسواق التجارية. وهناك طرق وتقنيات عديدة لاستغلال الكتلة الحيوية لأغراض توليد الكهرباء والحرارة منها: الحرق المباشر والحرق المساند بالأخص مع الفحم والتحويل إلى غاز حيوي (التغويز Gasification).

توليد الكهرباء من الكتلة الحيوية: هناك تفاوت في تقديرات مساهمة الكتلة الحيوية في توليد الكهرباء، وإجمالي طاقتها المركبة في العالم خصوصاً، وإن الكتلة الحيوية يتم دمجها مع النفايات في البيانات الصادرة عن بعض المصادر، كما أن تصنيف النفايات إلى متجددة وغير متجددة لم يبدأ إلا قبل وقت قريب. فمثلاً تشير بيانات وكالة الطاقة الدولية إلى أن مساهمة الكتلة الحيوية في توليد الكهرباء وصلت 7.1% في عام 2004 من إجمالي توليد الكهرباء من المصادر المتجددة، بينما لم تبلغ تلك النسبة في بيانات مصادر أخرى 4.7% فقط.

وعلى العموم، فبالرغم من أن الكتلة الحيوية تأتي في المرتبة الثانية في توليد الكهرباء بعد الطاقة الكهرومائية من بين المصادر المتجددة في العالم، فلا يزال إجمالي الطاقة المركبة للكتلة الحيوية (ومن ضمنها النفايات) لتوليد الكهرباء في العالم متواضعاً جداً، و. بحدود 36 جيغا واط، أي حوالي 1% من الإجمالي العالمي من الطاقة المركبة لتوليد الكهرباء من المصادر المختلفة عام 2004. و قد استحوذت كل من البلدان الصناعية و النامية على حوالي 50% منها، ووصل توليد الكهرباء من الكتلة الحيوية (ومن ضمنها النفايات) إلى 227 تيرا واط- ساعة (TWh) في العالم المذكور، أي بحدود 1.3% من إجمالي توليد الكهرباء في العالم.

ومن بين البلدان العشرة المهمة في مجال توليد الكهرباء من الكتلة الحيوية هناك خمسة منها (السويد- فنلندا - النمسا- المكسيك والمملكة المتحدة) لم تشهد أي نمو في طاقتها المركبة من الكتلة الحيوية ما بين عامي 2003 و 2004 وأن بلداً واحداً (استراليا) كان نموه سالباً (26%). بينما كانت نسبة النمو الأعلى في زيادة الطاقة المركبة من نصيب اسبانيا التي زادت على أكثر من الضعف، تلتها الدنمارك 52.6% وبلجيكا (7.4%) و الولايات المتحدة (5.4%).

وما ينبغي أن يلاحظ هو أنه على الرغم من أن الولايات المتحدة قد استحوذت على حوالي 17% من إجمالي الطاقة المركبة للكتلة الحيوية في العالم، إلا أن مساهمتها في السوق الأمريكي متواضعة جداً و بحدود 1% فقط، وذلك نظراً لضخامة حجم سوق توليد الكهرباء في بعض البلدان الأوروبية الصغيرة مثل فنلندا إلى أكثر من 10%.

إنتاج الحرارة من الكتلة الحيوية: على الرغم من صعوبة التوصل إلى أرقام دقيقة لإنتاج الحرارة من الكتلة الحيوية في العالم لأسباب تعود بالدرجة الأساس إلى التنوع الكبير وطبيعة استخدامات الكتلة الحيوية، تشير التقديرات أنها تساهم بالجزء الأساسي من إجمالي الحرارة المنتجة من المصادر المتجددة في العالم. وقد قدرتها بعض المصادر بحدود 66%، بينما وصلت تقديرات مصادر أخرى إلى 96% خلال عام 2004.

أنتجت السويد حوالي 50% من إجمالي إنتاج الحرارة من الكتلة الحيوية في البلدان الأعضاء في وكالة الطاقة الدولية لعام 2001، وذلك لتلبية أكثر من 50% من إمدادات الحرارة لأنظمة التدفئة المناطقية فيها district heating systems ، تليها فنلندا والولايات المتحدة والدنمارك. ويعزى تطور استخدام الكتلة الحيوية لإنتاج الحرارة في بعض البلدان الأوروبية مثل السويد وفنلندا، إلى سياسات التشجيع التي تنتجها تلك البلدان من خلال تقديم المحفزات والدعم ضمن إطار بعيد الأمد، لتشجيع التحول من المصادر الأحفورية إلى الكتلة الحيوية في سوق الحرارة.

اقتصاديات الطاقة الحيوية : من الصعب تقدير تكاليف نموذجية لتوليد الكهرباء من الكتلة الحيوية، إذ هي تتغير تبعاً لنوع النقيع و تكاليفه و التقنيات المستخدمة. و قدرت بعض المصادر مستوى التكاليف بما يتراوح ما بين 30 دولار/ميغا واط ساعي كحد أدنى في حالة التوليد المساند (co-firing) مع الفحم (كون تلك الطريقة تتطلب تكاليف استثمارية إضافية متواضعة نسبياً) إلى 120 دولار/ ميغا واط ساعي كحد أعلى في حالة تغويز الكتلة الحيوية. و جدير بالذكر أن تقديرات التكاليف وفق بيانات وكالة الطاقة الدولية تكون قريبة من ذلك (30-100 دولار / ميغا واط ساعي).

وتعد تكاليف توليد الكهرباء من الكتلة الحيوية ذات قدرة تنافسية مقارنة مع بعض مصادر الطاقة المتجددة بالأخص الطاقة الشمسية (من الخلايا الضوئية أو الشمسية الحرارية) وطاقة الرياح في المناطق البحرية إلا أنها أعلى مقارنة مع تكاليف محطات توليد الكهرباء بالفحم أو الطاقة النووية.

لما بخصوص تكاليف إنتاج الحرارة من الكتلة الحيوية، فعلى رغم قلة توفر البيانات الدقيقة في هذا المجال فإنه يتضح بأن مستوياتها أكثر تنافسية مقارنة مع الطاقة الشمسية، إلا أنها أقل تنافسية مع الطاقة الجوفية حيث قدرتها بعض المصادر لتتراوح ما بين 10 - 60 دولار/ميغاواط ساعي مقارنة مع 20-250 دولار/ميغاواط ساعي للطاقة الشمسية و 5-50 دولار/ميغاواط ساعي للطاقة الجوفية.

وكما هو معلوم تعتبر التكلفة أحد العناصر الرئيسية في اختيار نوعية الوقود، ومن الواضح بأن تزايد أسعار النفط و المصادر الأحفورية الأخرى خلال السنوات الأخيرة كان عاملاً مهماً في تحسين تنافسية الكتلة الحيوية في سوق الحرارة.

الميزات و السلبيات: يكتسب استخدام الكتلة الحيوية العديد من الميزات منها:

- استغلال الكتلة الحيوية و بالأخص النفايات لتوليد الطاقة يساعد على التخلص من نكس النفايات و تعفنها ومن الغازات الملوثة للبيئة المنبعثة منها.
- يمكن أن يكون توليد الطاقة من الكتلة الحيوية مستمراً بعكس الطاقة الشمسية و طاقة الرياح اللتين تتصفان بالتقطع و اقتصرها على فترات سطوع الشمس وهبوب الرياح.
- يمكن استغلال الكتلة الحيوية في مشاريع صغيرة الحجم لتوفير الحرارة لبعض المباني أو المدارس أو المستشفيات أو في تطبيقات أخرى مثل تجفيف المحاصيل مما يوفر في التكاليف ويمكن استخدامها في المشاريع الكبيرة الحجم لتوفير الحرارة أو الكهرباء.
- غدت عمليات الإنتاج الطاقة الحيوية مسألة متحكم في طرقها و تقنيات تحويلها.
- يمكن استخدام الكتلة الحيوية لتوليد الكهرباء و الحرارة في آن واحد.
- يمكن استغلال الكتلة الحيوية في محطات الفحم بواسطة الحرق المساند و ما يعني ذلك من اقتصاد في التكاليف.
- وهناك معوقات تواجه التوسع في استخدام الكتلة الحيوية لتوليد الكهرباء على النطاق العالمي وتكمن بالدرجة الأساس في التكاليف العالية و مستوى الكفاءة المنخفض وتوفر النقيم. ويمكن تلخيص السلبيات في التالي:
- حرق مكونات الكتلة الحيوية هي عملية ملوثة للبيئة مقارنة مع المصادر المتجددة الأخرى بسبب بعض الانبعاثات أثناء الحرق و بالأخص في حالة التقنيات القديمة.
- على الرغم من أن استغلال الكتلة الحيوية قد يساعد على تخفيض التلوث نظراً لمحتواها المنخفض نسبياً من الكبريت مقارنة بالوقود الأحفوري إلا أنه يمكنها أن

تزيد من تفاقم الإحترار العالمي الناتج عن اختلال التوازن الطبيعي للكربون و خاصةً في حالة قطع الغابات حيث أن الكتلة الحيوية هي جزء من دورة الكربون الطبيعية و يمكن التقليل من تلك الآثار عن طريق زرع غابات لتحل محل المقطوعة منها.

- باستثناء المستخدم منها في موقع الإنتاج فإن كميات كبيرة من الكتلة الحيوية التي تنقل إلى أماكن بعيدة للاستخدام تتطلب تكاليف نقل غالباً ما تكون مرتفعة ولا سيما أن الكتلة الحيوية تنصف عادة بالضخامة Bulky.
- يتصف العديد من مشاريع الكتلة الحيوية بجوداها الفنية، لكن التكاليف العالية نسبياً تجعلها غير مجدية اقتصادياً مقارنةً مع مصادر الطاقة الأحفورية مما يجعل مستقبل صناعتها معتمداً على تطور مستويات أسعار النفط و الغاز المستقبلية.
- تعتمد اقتصاديات معظم مشاريع الكتلة الحيوية على الدعم و التشجيع الحكومي كما هو الحال في بعض البلدان الأوروبية.

الآفاق المستقبلية: تساهم الكتلة الحيوية حالياً بنسبة هامة من إجمالي الطاقة العالمي وتغطي بالدرجة الأساس الاستخدامات التقليدية للطبخ و التدفئة خاصة في البلدان النامية. إلا أنها تعتبر مصدراً مستقبلياً واعدة نسبياً لتوليد الطاقة و الحرارة كمصدر متجدد. و يجري العمل على تطوير و تحسين طرق وتقنيات استغلالها باتجاه زيادة كفاءتها وتنويع استخداماتها، لكنها لا تزال بطيئة النمو. وعلى رغم اعتقاد البعض بأن الطاقة الحيوية أكثر واعدة في المستقبل كمصدر لإنتاج الحرارة منه لتوليد الكهرباء مقارنة مع سوق الحرارة و طبقاً لبيانات وكالة الطاقة الدولية، فمن المتوقع أن تشهد التكاليف الاستثمارية لتوليد الكهرباء من الكتلة الحيوية بعض التخفيض في عام 2030، إلا أن ذلك سوف لن يؤثر كثيراً على تكاليف التوليد التي يتوقع أن تبقى مستقرة في مستوياتها لغاية عام 2030.

وتتوقع بيانات المصدر المذكور أن يتزايد إجمالي الاستطاعة المركبة للكتلة الحيوية (بضمنها النفايات) ليصل إلى 68 جيغا واط في عام 2015 أي بزيادة 90% مقارنة

مع عام 2004 و إلى 129 جيغا واط بحلول عام 2030 أي بزيادة حوالي 250% مقارنة مع عام 2004. علماً بأن معدل النمو المفترض 5.9% سنوياً خلال الفترة 2004-2015 ينخفض قليلاً إلى 5% سنوياً خلال الفترة 2004-2030.

1-7 انعكاسات تطور الطاقات المتجددة

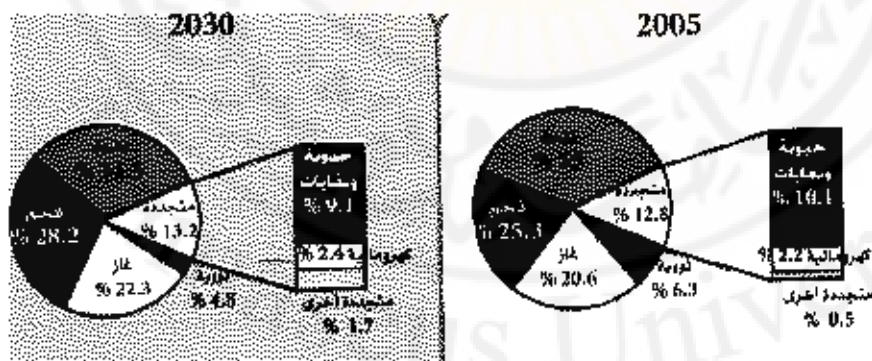
سيتم تناول انعكاسات تطور الطاقات المتجددة من خلال محورين رئيسيين، وهما الانعكاسات على أسواق النفط العالمية والانعكاسات على الأقطار العربية.

1- الانعكاسات على أسواق الوقود الأحفوري

يُتوقع تزايد الطلب العالمي الأولي على الطاقة، وفقاً للسبنايو المرجعي لوكالة الطاقة الدولية، من 11429 مليون طن مكافئ نفط في عام 2005 ليصل إلى 17721 مليون طن مكافئ نفط في عام 2030، أي بزيادة تمثل حوالي 55% وبنسبة نمو سنوية وسطية 1.8% خلال الفترة المذكورة. ورغم توقع ارتفاع الطلب على النفط بالمطلق من أكثر من 80 مليون ب/ي إلى حوالي 112 مليون ب/ي، أي بنحو 40% خلال الفترة أعلاه، فإن نمو الطلب سيكون 1.3% سنوياً، أي أقل من المعدل العام لنمو الطلب على الطاقة. وذلك يعني بأن حصة النفط ستتراجع من 35% إلى نحو 32% خلال الفترة المذكورة وسيتم تعويضه بمصادر طاقات متنوعة أهمها الطاقات المتجددة التي يتوقع أن تعوض النفط حيث تشهد زيادة في الطلب عليها بنحو 60% خلال الفترة المذكورة، أي أعلى قليلاً من الزيادة المتوقعة في إجمالي الطلب العالمي الأولي على الطاقة (55%). ويعني ذلك زيادة طفيفة في حصة مصادر الطاقات المتجددة من 12.8% في عام 2005 إلى 13.2% في عام 2030 من إجمالي الطلب العالمي الأولي على الطاقة. وهناك تفاوت في درجة نمو الطاقات المتجددة تتدرج من 1.4% سنوياً للطاقة الحيوية والنفايات إلى 2% سنوياً للطاقة الكهرومائية و 6.7% سنوياً للطاقات المتجددة الأخرى (الطاقات الشمسية والجوفية وطاقة كل من الرياح والمد الجزر والأمواج) والتي يتوقع أن يتركز الجزء الأكبر من الزيادة في استهلاكها في قطاع توليد الكهرباء.

كما يتوقع أن تشهد حصة الفحم الزيادة الأكبر لترتفع من 25.3% في عام 2005 إلى 28.2% في عام 2030 وبدرجة أقل من الغاز الطبيعي حيث ترتفع حصته من 20.6% إلى 22.3%. أما الطاقة النووية فيتوقع وفقا للسيناريو المرجعي انخفاض حصتها من 6.3% إلى 4.8% من إجمالي الطلب العالمي الأولي على الطاقة خلال ذات الفترة (الشكلان 14-1 و 15-1).

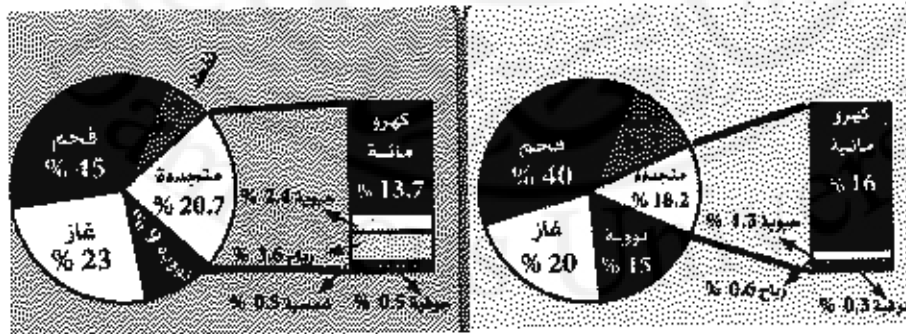
يشير السيناريو المرجعي لوكالة الطاقة الدولية إلى نمو إجمالي طاقة توليد الكهرباء في العالم بحوالي الضعف خلال الفترة 2005-2030 حيث ستنتقل من 18197 تيرا واط ساعي في عام 2005 إلى 35384 تيرا واط ساعي في عام 2030، وستخفض حصة النفط في توليد الكهرباء من 7 إلى 3%، أي أن طاقة التوليد بالنفط ستخفض في المطلق بمقدار 260 تيرا واط ساعي خلال تلك الفترة لأسباب عديدة منها التوسع في استخدام الطاقات المتجددة (الشمسية والرياح والجوفية) لتوليد الكهرباء. وللعلم سيكون الجزء الأكبر من الزيادة في استهلاك الكهرباء من حصة البلدان الصناعية التي شرع معظمها في اتخاذ إجراءات لدعم وتشجيع تلك التقنيات. وتشير البيانات إلى تزايد في الطاقة الكهربائية من المصادر المتجددة من 3320 تيرا واط ساعي في عام 2005 إلى 7315 في عام 2030، أي بزيادة 120% لتزداد مساهمتها من 18% إلى حوالي 21% خلال الفترة المذكورة من إجمالي توليد الكهرباء في العالم.



الشكلان 14-1 و 15-1: إجمالي الطلب العالمي الأولي على الطاقة 2005 و 2030

وعلى الرغم من أن جميع أنواع الطاقات المتجددة ستشهد زيادة مطلقة في القطاع المذكور، إلا أن مساهمة الطاقة الكهرومائية ستخضع من 16% إلى 14% خلال الفترة المذكورة. ويتوقع أن تشهد الأنواع الأخرى من الطاقات المتجددة زيادة في حصتها في قطاع التوليد، إلا أنه وبسبب البدء من أرضية منخفضة، فإن مساهمتها ستبقى متواضعة في إجمالي توليد الكهرباء في العالم. فرغم تزايد طاقة الرياح مثلاً بمعدل سنوي يبلغ 10.3% ما بين عامي 2005 و 2030 فمساهمتها لن تتجاوز 3.65% من إجمالي توليد الكهرباء في العالم في عام 2030، وكذلك سيكون الحال بالنسبة للطاقة الشمسية التي يتوقع لها أن تنمو بنحو 17% سنوياً، خلال الفترة المذكورة، فستظل مساهمتها بحدود 0.5% في عام 2030.

أما بالنسبة للطاقة الحيوية والنفايات والطاقة الجوفية فتقدر زيادتها بأكثر من الضعفين لكل منهما خلال الفترة المذكورة، حيث ستزداد مساهمة الطاقة الحيوية والنفايات من 1 إلى 2% ما بين عامي 2005 و 2030 ولن تزيد مساهمة الطاقة الجوفية عن 0.5% في عام 2030 مقارنة مع 0.3% في عام 2005، ويتوقع أن يكون الجزء الأكبر من الزيادة في توليد الكهرباء من الفحم ليشكل 45% في عام 2030 مقارنة مع 40% في عام 2005 من إجمالي توليد الكهرباء من العالم مع زيادة متواضعة في حالة الغاز الطبيعي في القطاع المذكور لنتزايد حصته من 20% إلى 23% بينما تنخفض حصة الطاقة النووية من 15% إلى 9% خلال تلك الفترة وهو ما يوضحه الشكلان 1-16 و 1-17.



الشكلان 1-16 و 1-17: طاقة توليد الكهرباء حسب المصدر لعام 2005 والتوقعات
لعام 2030 (%) [4]

تشهد صناعة الطاقات المتجددة تدفقاً متزايداً من الاستثمارات سواء أكان ذلك في مجال البحث و التطوير أو في مشاريع توسيع الطاقات الإنتاجية و الاستهلاكية. و قد شمل ذلك بعض الشركات الاستثمارية التي ترى في الصناعة المذكورة فرصة يجب اغتنامها، بالأخص بعد حصول هدوء نسبي في الأسواق الجاذبة للاستثمار مثل الإنترنت. فمثلاً أوردت الأنباء اعتزام شركة غوغل لخدمات الإنترنت إنفاق مئات الملايين من الدولارات للاستثمار في تقنيات إنتاج الكهرباء من المصادر المتجددة بهدف إنتاج الكهرباء بتكاليف تقل عن الفحم. أما بالنسبة لشركات النفط العالمية العملاقة فهي لا تزال مترددة و منقسمة حيال صناعة الطاقات المتجددة و خاصة الوقود الحيوي.

تدعي بلدان أوبك OPEC أنها ليست ضد تطور الطاقات البديلة والمتجددة من حيث المبدأ، بل ترحب بالتنوع في تركيبة مزيج الطاقة العالمي. وقد دخل بعضها ميدان هذه الصناعة.

2- الإنعكاسات على الأقطار العربية

هناك تفاوت في نظرة الأقطار العربية المصدرة للنفط حول الطاقات المتجددة. فبعضها يعتبرها مشكلة قد تضر بمصالحها من خلال التأثير على الطلب على النفط والغاز. أما البعض الآخر، فيعتبرها فرصة يجب اغتنامها وضرورة الاستفادة من التطور الحاصل في تلك التقنيات. إن استخدام الطاقات المتجددة في البلدان العربية، بصورة عامة، لا يزال محدوداً و محصوراً في الطاقة الكهرومائية و طاقة الرياح و الطاقة الشمسية و التي تشكل بحدود 5.3% من إجمالي توليد الكهرباء في البلدان العربية في عام 2004 والذي يقل عن المعدل العالمي. وينحصر إنتاج الطاقة الكهرومائية في بعض البلدان العربية ذات الأنهار وبصورة محدودة، مع العلم أن المنطقة تنعم بإمكانات هائلة من الطاقة الشمسية والرياح، ولكن استغلال تلك الطاقات لا يزال تجريبياً و محدوداً.

لكن بعض الأقطار بدأت تتجه نحو صناعة الطاقات المتجددة بالأخص منها الشمسية و الرياح لأسباب عديدة و منها:

- الرغبة في تنويع مصادر طاقتها، و الخروج من دائرة الاقتصاد أحادي الجانب المعتمد على النفط، والرغبة في مواكبة التطور للحصول على مصادر طاقة نظيفة ومتجددة لتحقيق تنمية مستدامة، خاصة و أن أسعار النفط المرتفعة تمنحها فرصة ذهبية لتمويل تلك المشاريع.

- التأثير ببعض الدراسات وما تنشره بعض الأدبيات حول قرب بلوغ ذروة الإنتاج النفطي المنزلة بقرب نهاية عصر النفط و ضرورة الاستعداد لما بعد النفط، بينما ترى أقطار أخرى منتجة رئيسية للنفط بأن الوضع القائم والمستقبلي لا يزال "مطمئناً" لها.

- تعاني بعض البلدان العربية من تناقص في إنتاجها النفطي وبالتالي ترغب بالدخول في صناعة الطاقات المتجددة بهدف التهيئة لسد النقص المستقبلي في إمداداتها بالطاقة.

- تشهد بلدان الخليج معدلات استهلاك نفط عالية وتواجه تحديات كبيرة في مجال توفير الطاقة الكهربائية لأغراض التكييف والتبريد وتحلية المياه. كما أنها تتميز بندرة الأمطار وتقع في نطاق الفقر المائي المطلق، حيث يكون نصيب الفرد من المياه الطبيعية أقل من 200 متر مكعب سنوياً، لكن باستطاعتها الاستفادة من الطاقة الشمسية لتوليد الكهرباء حيث تتصف المنطقة بشدة عالية من الإشعاع الشمسي لوقوعها فيما يسمى الحزام الشمسي. كما يمكنها، و بحكم المرتفعات الأرضية استغلال طاقة الرياح لنفس الغرض. حيث يمكنها استغلال المصادر المتجددة في توليد الكهرباء لتحرير مزيد من المصادر النفطية و الغازية لأغراض التصدير أو للاستخدامات الأكثر نفعاً كاستخدام الغاز في صناعة البتروكيماويات أو لتقليل الاستهلاك لإطالة عمر النفط. ولكون تحلية المياه إحدى العناصر الهامة في التنمية البشرية والصناعية المستدامة، فقد قامت بعض بلدان الخليج بإنشاء بعض المحطات التي تعمل بالطاقة الشمسية و منها الإمارات و السعودية و البحرين.

• التوصيات التي تطلقها بعض المؤتمرات و المؤسسات العالمية على ضرورة تبني البلدان العربية سياسات تساعد على زيادة انتشار الطاقة المتجددة كون المنطقة العربية مثالية ليس فقط لتصدير النفط والغاز بل لتصدير الطاقة الشمسية أيضاً. و كمثال، بإمكان بعض بلدان شمال إفريقيا أن يصبحوا بلداناً مصدرة للطاقة الشمسية لبلدان الاتحاد الأوروبي في المستقبل.

وعلى رغم قيام معظم الأقطار العربية ببعض المشاريع التجريبية بالأخص من الطاقة الريحية والشمسية ومنذ فترة طويلة، لا يزال بعضها وبالأخص البلدان المصدرة الكبيرة للنفط، يرى بأن الطاقة البديلة ومنها الطاقة المتجددة، يكون لها دور تكميلي لمصادر الطاقة التقليدية، لكنها لا تستطيع الإحلال محلها في المستقبل المنظور وأن المخاوف حول قرب بلوغ ذروة الإنتاج النفطي مبالغ فيها. بل أن مصدر القلق هو عدم منح الاهتمام الكافي لوقود النقل التقليدي في سياسات الطاقة.

تبرز دولة الإمارات (أبو ظبي) من بين البلدان العربية التي تخطط لاستغلال الطاقات المتجددة، و بالأخص من الشمس والرياح، و ذلك بإطلاقها مبادرة “مصدر” في عام 2006 بتكاليف إجمالية قدرها 250 مليون دولار تأمل من ورائها أن تصبح مركزاً إقليمياً لتطوير و تنفيذ الطاقات المتجددة و تلبي حوالي 50% من احتياجاتها من الطاقة من الشمس والرياح بحلول عام 2050. و سوف يتم إنشاء مركز للأبحاث و بناء جامعة متخصصة في الطاقات المتجددة ذات مواصفات عالمية “و منطقة خضراء” تضم شركات التكنولوجيا النظيفة، علماً بأن الخطة المذكورة تستند في فكرتها جزئياً، على نموذج وادي السليكون في الولايات المتحدة. و بموجب الخطة سيكون بإمكان الإمارات تنويع مصادر دخلها في المستقبل و تخفيض اعتمادها على النفط ليس بهدف الاستبدال بل لإطالة عمره.

1-8 آخر المستجدات حول الطاقات المتجددة [5]

تبين الجداول والأشكال التالية المعلومات الأحدث حول الطاقات المتجددة وهي مأخوذة من التقرير الشامل للطاقة المتجددة الصادر هذا العام (2009) عن شبكة سياسات الطاقة المتجددة لأجل القرن الحادي والعشرين RTN21 .

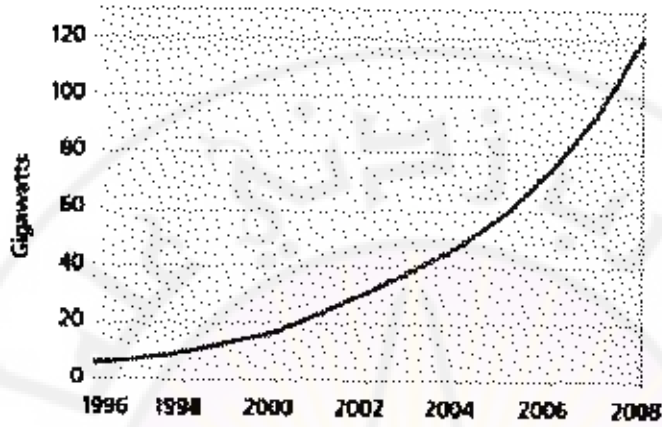
جدول 1-6: مؤشرات مختارة لحجم الاستثمارات والاستطاعات المركبة

SELECTED INDICATORS	2006	2007	2008
Investment in new renewable capacity (annual) ¹	63	101	120 billion USD
Renewables power capacity (existing, excl. large hydro)	207	240	280 GW
Renewables power capacity (existing, incl. large hydro)	1020	1070	1,140 GW
Wind power capacity (existing)	74	94	121 GW
Grid-connected solar PV capacity (existing)	5.1	7.5	13 GW
Solar PV production (annual)	2.5	3.7	6.9 GW
Solar hot water capacity (existing)	105	126	145 GWh
Ethanol production (annual)	39	50	67 billion liters
Biodiesel production (annual)	6	9	12 billion liters
Countries with policy targets		66	73
States/provinces/countries with feed-in policies ²		49	63
States/provinces/countries with RPS policies		44	49
States/provinces/countries with biofuels mandates		53	55

جدول 1-7: البلدان الخمسة الأولى

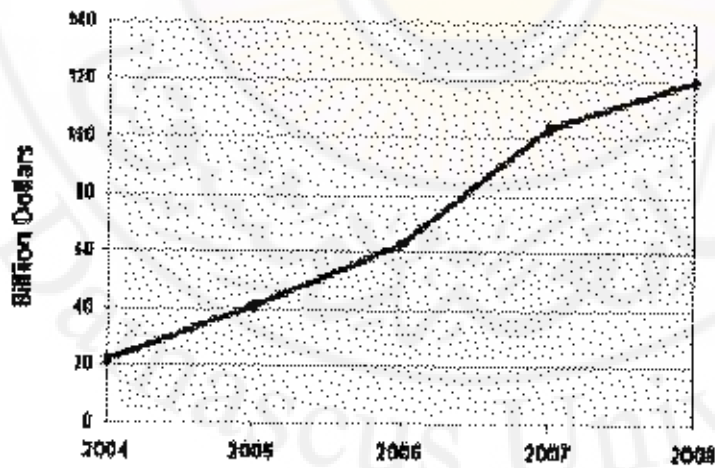
TOP FIVE COUNTRIES	#1	#2	#3	#4	#5
Annual amounts for 2008					
New capacity investment ¹	United States	Spain	China	Germany	Brazil
Wind power added	United States	China	India	Germany	Spain
Solar PV added (grid-connected) ²	Spain	Germany	United States	South Korea	Japan
			Italy		
Solar hot water/heat added ³	China	Turkey	Germany	Brazil	France
Ethanol production	United States	Brazil	China	France	Canada
Biodiesel production	Germany	United States	France	Argentina	Brazil
Existing capacity as of end-2008					
Renewables power capacity	China	United States	Germany	Spain	India
Small hydro	China	Japan	United States	Italy	Brazil
Wind power	United States	Germany	Spain	China	India
Biomass power	United States	Brazil	Philippines	Germany	
				Sweden	
				Finland	
Geothermal power	United States	Philippines	Indonesia	Mexico	Italy
Solar PV (grid-connected)	Germany	Spain	Japan	United States	South Korea
Solar hot water/heat ⁴	China	Turkey	Germany	Japan	Israel

Wind Power, Existing World Capacity, 1996-2008



شكل 1-18: الاستطاعات المركبة التراكمية للنظم الكهربية في العالم

Global Investment in Renewable Energy, 2004-2008



شكل 1-19: حجم الاستثمارات في الطاقة المتجددة كل عام من الأعوام 2004-

2008

جدول 1-8: استطاعات طاقة متجددة مضافة عام 2008 واستطاعة قائمة عام 2008

Renewable Energy Added and Existing Capacities, 2008 (estimated)		
	Added during 2008	Existing at end of 2008
Power generation (GW)		
Large hydropower	25-30	880
Wind power	27	121
Small hydropower	6-8	85
Biomass power	2	52
Solar PV, grid-connected	5.4	13
Geothermal power	0.4	10
Concentrating solar thermal power (CSP)	0.06	0.5
Ocean (tidal) power	-0	0.3
Hot water/heating (GWh)		
Biomass heating	n/a	-250
Solar collectors for hot water/space heating	19	145
Geothermal heating	n/a	-50
Transport fuels (billion liters/year)		
Ethanol production	17	67
Biodiesel production	3	12

جدول 1-9: استطاعات كهربائية متجددة قائمة عام 2008 حسب البلدان

Renewable Electric Power Capacity, Existing as of 2008 (estimated)									
Technology	World Total	Developing Countries	EU-27	China	United States	Germany	Spain	India	Japan
Gigawatts									
Wind power	121	24	65	12.2	25.2	23.9	16.8	9.6	1.9
Small hydropower	85	65	12	60	30	1.7	1.8	2.0	3.5
Biomass power	52	25	15	3.6	8.0	3.0	0.4	1.5	>0.1
Solar photovoltaic-grid	13	>0.1	9.5	>0.1	0.7	5.4	3.3	-0	2.0
Geothermal power	10	4.8	0.8	-0	3.0	0	0	0	0.5
Solar thermal power-CSP	0.5	0	0.1	0	0.4	0	0.1	0	0
Ocean (tidal) power	0.3	0	0.3	0	0	0	0	0	0
Total renewable power capacity (excluding large hydro)	280	169	96	76	40	34	22	13	8
For comparison:									
Large hydropower	860								
Total electric power capacity	4,700								

جدول 1-10: تأريخ للبلدان التي أصدرت قوانين التعرف التفضيلية للكهرباء من الطاقة المتجددة

Cumulative Number of Countries/States/Provinces Enacting Feed-in Policies		
Year	Cumulative Number	Countries/States/Provinces Added That Year
1978	1	United States
1990	2	Germany
1991	3	Switzerland
1992	4	Italy
1993	6	Denmark, India
1994	8	Spain, Greece
1997	9	Sri Lanka
1998	10	Sweden
1999	13	Iceland, Norway, Slovenia
2000	13	—
2001	15	France, Latvia
2002	21	Algeria, Austria, Brazil, Czech Republic, Indonesia, Lithuania
2003	28	Cyprus, Estonia, Hungary, South Korea, Slovak Republic, Maharashtra (India)
2004	33	Israel, Nicaragua, Prince Edward Island (Canada), Andhra Pradesh and Madhya Pradesh (India)
2005	40	Karnataka, Uttaranchal, and Uttar Pradesh (India); China, Turkey, Ecuador, Ireland
2006	43	Ontario (Canada), Argentina, Thailand
2007	49	South Australia (Australia), Albania, Bulgaria, Croatia, Macedonia, Uganda
2008	61	Queensland (Australia); California (USA); Gujarat, Haryana, Punjab, Rajasthan, Tamil Nadu, and West Bengal (India); Kenya, the Philippines, Poland, Ukraine
2009 (early)	63	Australian Capital Territory (Australia); South Africa

9-1 مراجع الفصل الأول

[1]	د. علي حمزة	اتفاق استخدام مصادر الطاقة المتجددة في توليد الطاقة الكهربائية في سورية، فرع محافظة ريف دمشق الأسبوع العلمي الهندسي الثالث عشر، دمشق 10-2002/12/12
[2]	D. E. Carlson	Fossil fuel depletion & global warming, November 3, 2005
[3]	نبيل الشرع	تطوير المنظومة الكهربائية في سورية حتى 2030 كلية الدفاع الوطني، 2008
[4]	علي رجب	تطور الطاقات المتجددة وانعكاساته على أسواق النفط العالمية والأقطار الأعضاء - مجلة النفط والتعاون العربي مجلد 34 عدد 127، 2008 صفحة 9-86، الكويت

[5]	www.ren21.net	GLOBAL STATUS REPORT, 2009 Update, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), 2009
-----	---------------	---





الفصل الثاني

التحليل الكمي للإشعاع الشمسي

Quantitative analysis of solar radiation

2-1 مقدمة

الشمس هي المصدر الأبرز للطاقة المتجددة. يمكن استغلال طاقة الشمس الهائلة مباشرة بواسطة الأنظمة الحرارية الشمسية Solar thermal أو الأنظمة الكهروضوئية PV. من حيث المبدأ، تولّد طاقة الرياح و الطاقة المائية طاقة شمسية محوّلة و تسمى أحيانا طاقة شمسية غير مباشرة. يُكرّس هذا الفصل للإشعاع الشمسي، لأن معرفة طاقة الإشعاع الشمسي في موقع ما متطلّب أساسي لتصميم وتحليل العديد من أنظمة الطاقة الشمسية.

2-2 الشمس كمفاعل اندماجي The sun as a fusion reactor

الشمس هي النقطة المركزية لنظامنا الشمسي و هي موجودة منذ خمسة مليارات سنة ومن المتوقع أن تعيش خمسة مليارات أخرى. الشمس هي كرة غازية تتألف من غاز الهيدروجين (75%-80%) وغاز الهيليوم (20%-23%) بالإضافة إلى عناصر أخرى. يبين الجدول 1-2 مقارنة بين بيانات الشمس والأرض.

جدول 1-2: بيانات الشمس و الأرض [1]

	Sun	Earth	Ratio
Diameter (km)	1,392,520	12,756	1:109
Circumference (km)	4,373,097	40,075	1:109
Surface (km ²)	$6.0874 \cdot 10^{12}$	$5.101 \cdot 10^8$	1:11,934
Volume (km ³)	$1.4123 \cdot 10^{18}$	$1.0833 \cdot 10^{12}$	1:1,303,670
Mass (kg)	$1.9891 \cdot 10^{30}$	$5.9742 \cdot 10^{24}$	1:332,946
Average density (g/cm ³)	1,409	5.516	1:0.26
Gravity (surface) (m/s ²)	274.0	9.81	1:28
Surface temperature (K)	5777	288	1:367
Centre temperature (K)	15,000,000	6700	1:2200

تولّد عمليات الاندماج النووي الاستطاعة الإشعاعية radiant power للشمس. أثناء هذه العمليات، تندمج 4 نوى هيدروجين (بروتونات ^1p) nuclei لتشكل نواة

nucleus هليوم واحدة (α particle جسيم ألفا). ولما كانت كتلة ذرة الهليوم الناتجة من التفاعل الاندماجي أقل من مجموع كتل ذرات الهيدروجين الداخلة فيه فإن فرق الكتلة هذا يتحول إلى حرارة وضوء ينبعث من السطح الخارجي للشمس الذي يدعى فوتوسفير Photosphere. استطاعة إشعاعية مقدارها 3.8×10^{26} MW. إذن، تتولد الطاقة المنبعثة من الشمس نتيجة التحول المستمر لكل أربعة ذرات من الهيدروجين إلى ذرة واحدة من الهليوم في تفاعل اندماجي نووي Nuclear Fusion reaction. تفقد الشمس 4.3 مليون طن متري من كتلتها في الثانية أي $\Delta m = 4.3 \times 10^9$ kg/s. وباعتبار سرعة الضوء $c = 2.99792458 \times 10^8$ m/s تطلق هذه الكتلة المفقودة استطاعة إشعاعية مقدارها:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \quad (2.1)$$

$$= \Delta m \times c^2 = 3.845 \times 10^{26} \text{ MW} \quad (2.2)$$

بتقسيم هذه القيمة على مساحة سطح الشمس A_s نحصل على الانبعاث (الإصدار) النوعي للشمس specific emission of the sun وقيمته 63.11 MW/m^2 ، أي أن كل متر مربع من سطح الشمس يصدر استطاعة مقدارها 63.11 MW . يصدر خمس الكيلومتر المربع من سطح الشمس طاقة سنوية مقدارها 400 EJ أي ما يعادل حاجة العالم من الطاقة الأولية لعام 2005.

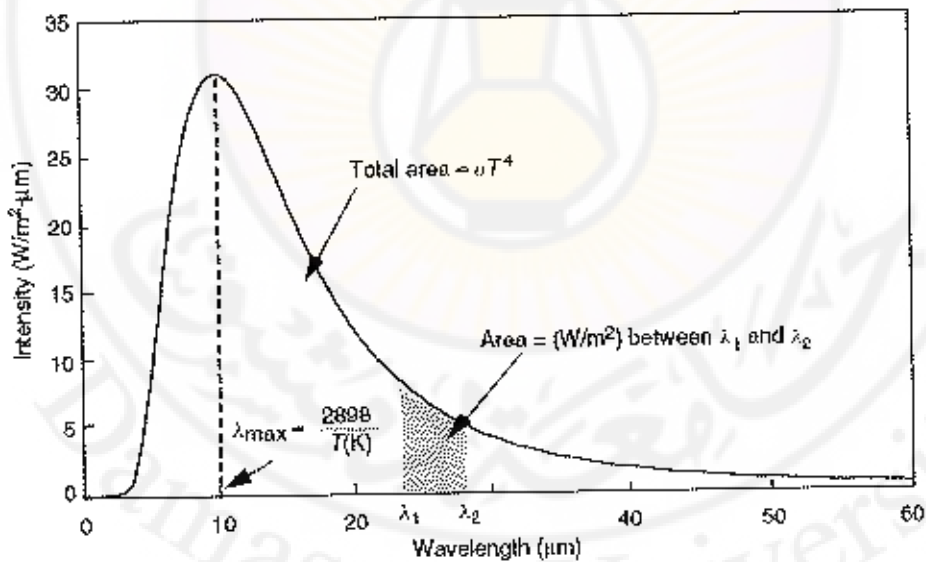
2-3 الطيف الشمسي The solar spectrum

يصدر كل جسم object استطاعة إشعاعية تتعلق قيمتها بدرجة حرارته. الطريقة المتبعة عادة لتقدير ما يشعه جسم ما من الاستطاعة هي مقارنته بجسم نظري يُسمى الجسم الأسود black body. الجسم الأسود هو تعريفاً مشعٌ مثالي perfect emitter وماصٌ مثالي perfect absorber. كمشعٌ مثالي، فإن وحدة مساحة سطحه تشع طاقة أكبر من أي جسم حقيقي لأجل درجة الحرارة نفسها. وكماصٌ مثالي، فإنه يمتص كل الإشعاع الساقط عليه؛ أي لا انعكاس للإشعاع ولا نقل للإشعاع عبره.

لم تكن الفيزياء التقليدية قادرة على تحديد الأطوال الموجية للضوء الصادر عن جسم مسخن. في عام 1900 توصل ماكس بلانك Max Planck إلى علاقة رياضية تصف ذلك على الرغم من أن الفيزيائية المتضمنة لم تفهم إلا بعد انتهاء أينشتاين من عمله حول "الكوانتا" Quanta بعد خمس سنوات. علاقة بلانك لأجل جسم أسود هي:

$$E_{\lambda} = \frac{3.74 \times 10^8}{\lambda^5 \left[\exp \left(\frac{14,400}{\lambda T} \right) - 1 \right]} \quad (2.3)$$

حيث E_{λ} هي الاستطاعة المنبعثة من وحدة المساحة لجسم أسود مقفلة بالواحدة $W/m^2 \cdot \mu m$. كتابع لدرجة حرارته المطلقة T ولأجل طول موجة λ واحدتها μm . بمحاكاة modeling الأرض كجسم أسود درجة حرارته $288 K$ ($15^{\circ}C$)، نحصل على طيف الانبعاث emission spectrum المبين في الشكل 1-2.



شكل 1-2: طيف الاستطاعة المنبعثة من جسم أسود درجة حرارته $288 K$ (أي من الأرض) [2]

إن المساحة تحت منحنى بلانك بين أي طولي موجة مكافئة للاستطاعة الصادرة عن الجسم بين هذين الطولين الموجيين، كما أن المساحة الإجمالية تحت المنحنى تكافئ الاستطاعة الإجمالية E التي يصدرها الجسم الأسود والتي تُعطى بقانون ستيفان-بولتزمان Stefan-Boltzmann law للإشعاع:

$$E = A\sigma T^4 \quad (2.4)$$

حيث σ ثابت ستيفان-بولتزمان:

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

و A مساحة سطح الجسم الأسود m^2 .

حسب قاعدة الانزياح للعالم فيين Wien's displacement rule، نحصل على الطول الموجي المقابل لقمة المنحنى:

$$\lambda_{\max}(\mu\text{m}) = \frac{2898}{T(\text{K})} \quad (2.5)$$

مثال 1-2: افترض أن الأرض جسم أسود درجة حرارته الوسطية 15°C ومساحة سطحه $5.1 \times 10^{14} \text{ m}^2$. أوجد معدل إشعاع الطاقة من الأرض وطول الموجة المقابلة لأعظم استطاعة مشعة. قارن هذا الطول الموجي مع ذلك العائد لجسم أسود 5800 K (أي الشمس).

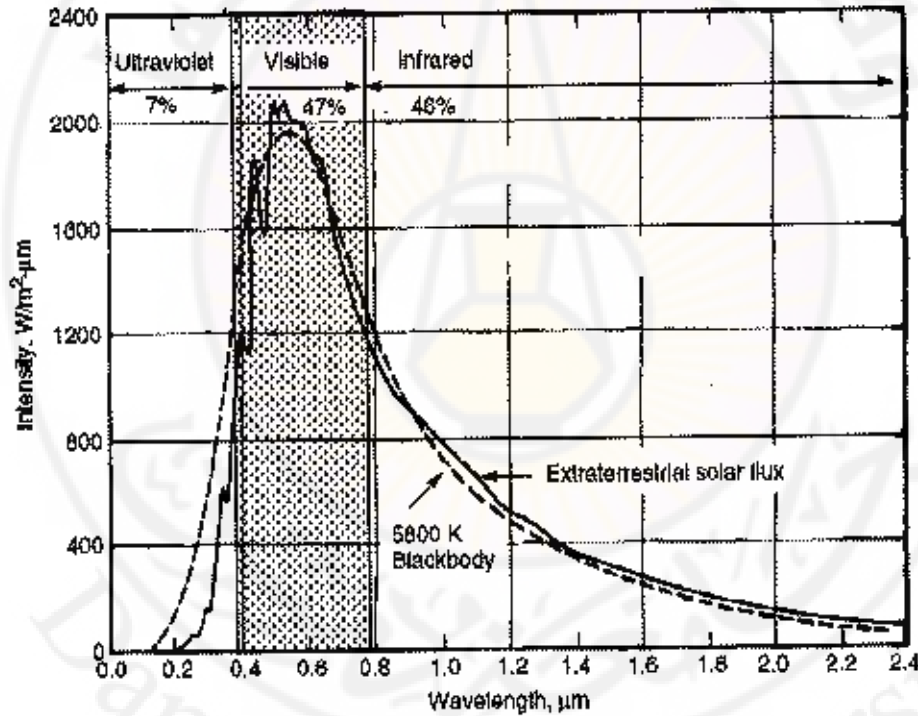
الحل: باستخدام المعادلة (2.4) نجد الاستطاعة المنبعثة من الأرض:

$$E = \sigma AT^4 = (5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4) \times (5.1 \times 10^{14} \text{ m}^2) \times (15 + 273 \text{ K})^4 \\ = 2.0 \times 10^{17} \text{ W}$$

$$\lambda_{\max}(\text{earth}) = \frac{2898}{T(\text{K})} = \frac{2898}{288} = 10.1 \mu\text{m}$$

$$\lambda_{\max}(\text{sun}) = \frac{2898}{5800} = 0.5 \mu\text{m}$$

تجدر الإشارة إلى أن الغلاف الجوي للأرض يؤثر على الأطوال الموجية الكبيرة المنبعثة من الأرض (الشكل 2-1) تأثيراً مختلفاً جداً عن الأطوال الموجية الأقصر بكثير القادمة من الشمس (الشكل 2-2). هذا الاختلاف هو المسؤول عن أثر البيت الأخضر greenhouse effect (أو الاحترار الكوني global warming). بينما تكون درجة حرارة باطن الشمس حوالي 15 مليون كلفن، يملك الإشعاع المنبعث من سطح الشمس توزيعاً طيفياً spectral distribution قريباً جداً من التوزيع الطيفي لجسم أسود 5800 K المحسوب بقانون بلانك. يبين الشكل 2-2 توافقاً جيداً بين الطيف الشمسي الفعلي وطيف جسم أسود 5800 K.



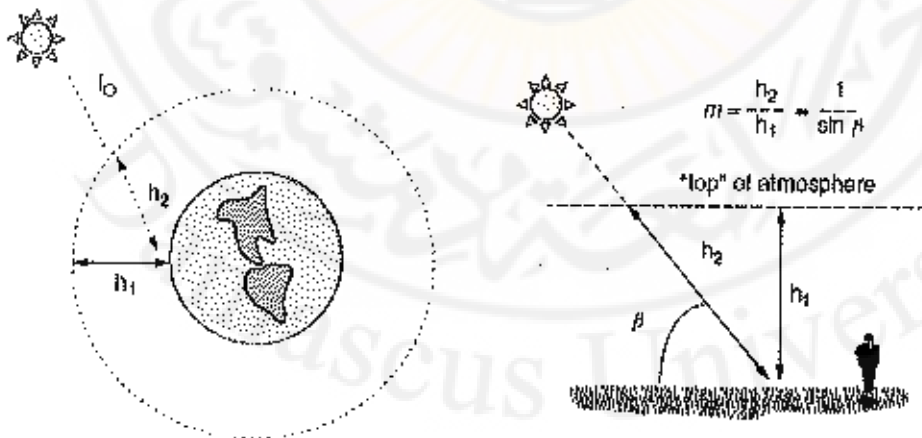
شكل 2-2: الطيف الشمسي خارج الغلاف الجوي للأرض مقارنةً مع جسم أسود

[2] 5800 K

المساحة الكلية تحت منحنى الجسم الأسود تكافئ 1.37 kW/m^2 ، وهو شدة الإشعاع الشمسي على محيط الغلاف الجوي للأرض. يبين الشكل 2-2 أيضا المساحات تحت منحنى الطيف الشمسي الفعلي خارج الغلاف الجوي المقابلة للأطوال الموجية لأجل أجزاء الطيف الثلاثة: الجزء فوق البنفسجي (ultraviolet (UV) (7%)، والجزء المرئي visible (47%)، والجزء تحت الأحمر (infrared (IR) (46%)، يقع الجزء المرئي من الطيف بين UV و IR ويغطي المجال $0.38-0.78 \mu\text{m}$.

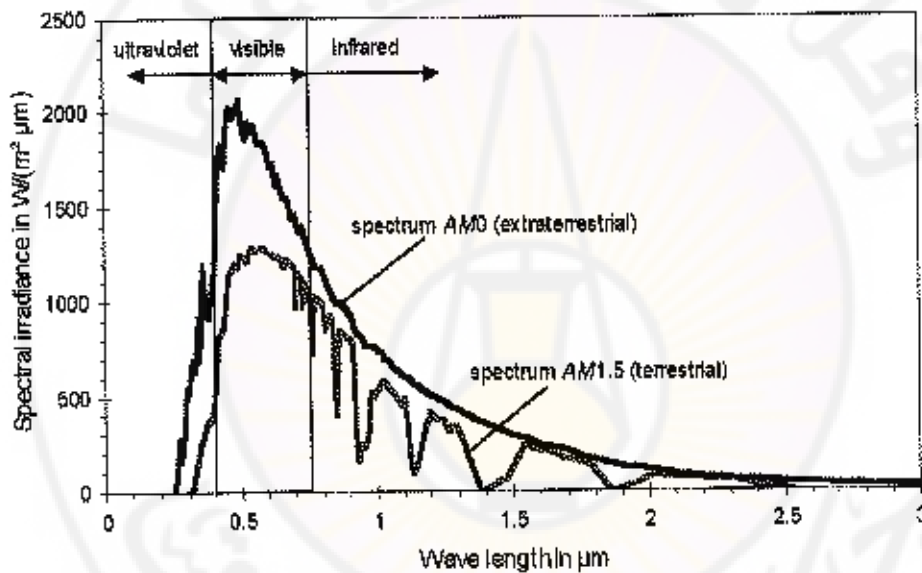
يتعرض الإشعاع الشمسي العابرة للغلاف الجوي إلى امتصاص وتبعثر جزء منه من قبل مكونات الغلاف الجوي، ما يجعل طيف الإشعاع الشمسي الواصل إلى الأرض غير منتظم ويحوي على فجوات. ويعتمد هذا الطيف أيضا على مسار الإشعاع الشمسي ضمن الغلاف الجوي. إن حاصل قسمة طول المسار الفعلي h_2 على الطول الأصغري الممكن للمسار h_1 (أي طول المسار عندما تكون الشمس فوق الراصد مباشرة)، هو ما يسمى نسبة كتلة الهواء (air mass ratio (m. حسب الشكل 2-3 تُعطى m بالعلاقة:

$$\text{Air mass ratio } m = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{\sin \beta} \quad (2.6)$$



شكل 2-3: تعريف نسبة كتلة الهواء [2]

حيث β زاوية الارتفاع للشمس altitude angle of the sun. إذن، $m=1$ ، ويُرمز لها AM1، يعني أن الشمس فوق الراصد مباشرةً overhead. AM0 تعني أنه لا يوجد غلاف جوي أي خارج الغلاف الجوي. عادةً، تُعتمد AM1.5 لأجل الطيف الشمسي المتوسطي على سطح الأرض. لأجل AM1.5 يتوزع الطيف الشمسي الأرضي كما يلي: 2% UV و 54% مرئي و 44% IR. يبين الشكل 2-4 تأثير الغلاف الجوي atmosphere على الإشعاع الشمسي الوارد لأجل AM0 و AM1.5.



شكل 2-4: الطيف الشمسي الأرضي لأجل AM0 و AM1.5 [1]

2-4 مدار الأرض حول الشمس The earth's orbit
تدور الأرض حول الشمس دورة واحدة كل 365.25 يوماً في مدار إهليلجي elliptical orbit. يُعطى بعد الأرض عن الشمس d كتابع لرقم اليوم n ($n=1$) لأجل 1 كانون ثاني و $n=365$ لأجل 31 كانون أول كما هو مبين في الجدول 2-2 بالعلاقة:

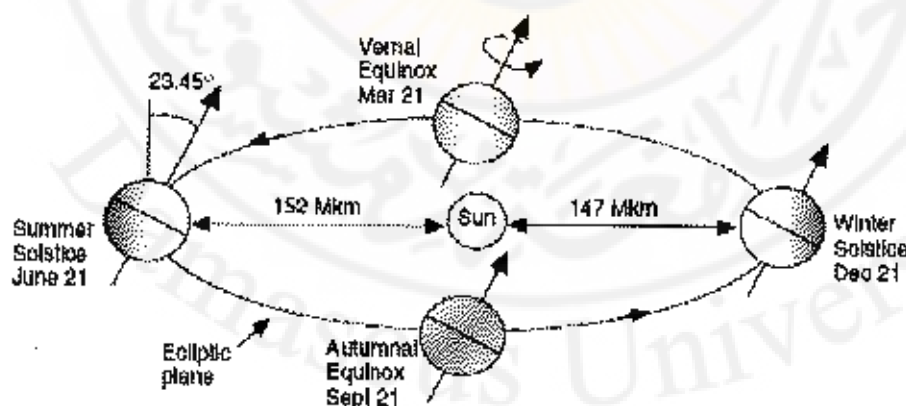
$$d = 1.5 \times 10^8 \left\{ 1 + 0.017 \sin \left[\frac{360(n - 93)}{365} \right] \right\} \text{ km} \quad (2.7)$$

تجدر الإشارة إلى أن المعادلة (2.7) وجميع معادلات هذا الفصل التي تحوي توابع مثلثية تستخدم زوايا مقاسة بالدرجات وليس بالراديان.

جدول 2-2: أرقام أيام الأول من كل شهر

January	$n = 1$	July	$n = 182$
February	$n = 32$	August	$n = 213$
March	$n = 60$	September	$n = 244$
April	$n = 91$	October	$n = 274$
May	$n = 121$	November	$n = 305$
June	$n = 152$	December	$n = 335$

أثناء تحرك الأرض حول الشمس مولدة الفصول الأربعة، تدور (تغزل spins) الأرض أيضا حول محورها 360.99° كل 24 ساعة مولدة الليل والنهار. يُسمى مستوى مدار الأرض حول الشمس المستوى الإكلبتكي ecliptic plane. يميل محور دوران الأرض حول نفسها بزاوية ثابتة حاليا مقدارها 23.45° بالنسبة لمستوى مدارها حول الشمس (شكل 2-5)، وهذا الميل هو الذي يسبب الفصول الأربعة.



شكل 2-5: ميل محور الأرض شمال-جنوب مع مستوى مدار الأرض

يوجد 4 أيام مميزة في العام وهي:

- يوم 21 آذار وهو يوم الاعتدال الربيعي vernal equinox
- يوم 21 أيلول وهو يوم الاعتدال الخريفي autumnal equinox
- في هذين اليومين يتساوى عدد ساعات الليل والنهار كما تشرق الشمس تماما من المشرق وتغرب تماما في المغرب.
- يوم 21 حزيران وهو يوم الانقلاب الصيفي summer solstice
- يوم 21 كانون أول وهو يوم الانقلاب الشتوي winter solstice

وتجدر الإشارة إلى أن يوم 21 يتغير قليلا من سنة إلى أخرى كأن يكون يوم 22 مثلاً. وسنرى في الفقرة التالية أن لهذه الأيام قيمة معينة لزاوية الانحراف الشمسي.

2-5 الزوايا الشمسية Solar angles

من المفيد بل من الضروري معرفة موقع الشمس في السماء في أي وقت، وفي أي موقع لأجل أي يوم من العام. إذا عرفنا هذه المعلومات، نستطيع مثلاً تصميم البناء بحيث يُسمح للشمس بالدخول من النوافذ شتاء وبحجبها صيفاً. لأجل الخلايا الشمسية، تساعدنا معرفة الزوايا الشمسية على تحديد زاوية الميل المثلى للوحات الشمسية بحيث تستقبل أعظم إشعاع.

2-5-1 زاوية الانحراف الشمسي (δ) Solar declination angle

هي الزاوية بين المستوى الاستوائي وبين الخط الواصل بين مركزي الشمس والأرض. أعلى قيمة لها هي 23.45° وأدنى قيمة هي -23.45° وتتغير قيمتها بين هذين الحدين تبعاً لرقم اليوم n حسب المعادلة الجيبية التقريبية التالية التي تفترض السنة 365 يوماً ويوم الاعتدال الربيعي هو اليوم 81:

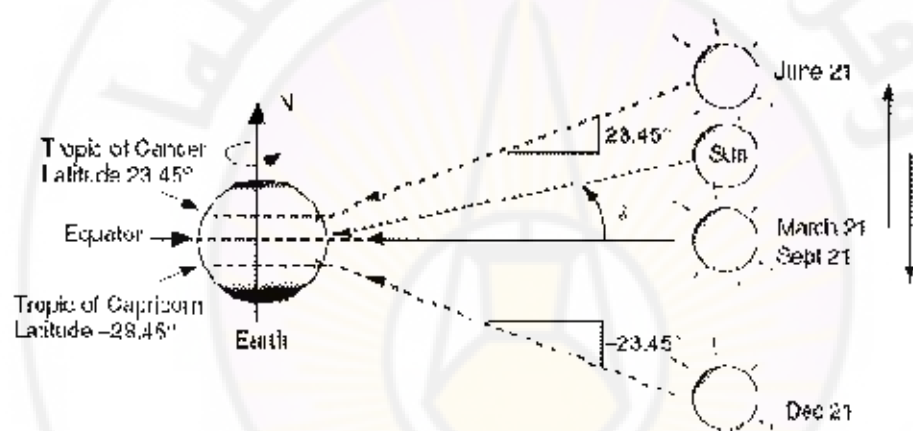
$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] \quad (2.8)$$

يبين الجدول 2-3 قيم الانحراف الشمسي بالدرجات لأجل اليوم 21 من كل شهر.

جدول 2-3: قيم الانحراف الشمسي بالدرجات لأجل اليوم 21 من كل شهر

Month:	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
δ :	-20.1	-11.2	0.0	11.6	20.1	23.4	20.4	11.8	0.0	-11.8	-20.4	-23.4

من الصعب تحديد الزوايا الشمسية المختلفة كما تُرى من سطح الأرض بواسطة الشكل 2-5 الذي يمثل الوضع الفعلي حيث الشمس ثابتة والأرض دوارة. ثمة تمثيل بديل مبين في الشكل 2-6 حيث الأرض ثابتة وتدور حول محورها شمال-جنوب، والشمس تتحرك ظاهرياً في الفضاء ببطء صعوداً ونزولاً حسب الفصول.



شكل 2-6: تمثيل بديل حيث الأرض ثابتة والشمس تتحرك صعوداً ونزولاً

في 21 حزيران تبلغ الشمس موقعها الأعلى فوق مدار السرطان Tropic of Cancer مباشرة عند خط العرض 23.45° وتكون زاوية الانحراف الشمسي 23.45° . في يومي الاعتدال تكون الشمس مباشرة فوق خط الاستواء وتكون $\delta = 0$. في 21 كانون الأول تكون الشمس تحت خط الاستواء بزاوية 23.45° التي هي خط عرض مدار الجدي Tropic of Capricorn.

2-5-2 زاوية الارتفاع الشمسي Altitude angle of the sun وزاوية الأريموت Hour angle وAzimuth angle والزاوية الساعية

تم تأمين الغاز من المصادر المحلية، أما المشتقات النفطية فقد تم تأمينها من تكرير النفط الخام السوري في مصافي محلية. إضافة إلى استيراد كميات من المازوت والغاز السائل. وقد توزع استهلاك المشتقات النفطية في العام 2008 كما في الجدول 2-1:

جدول 2-1: استهلاك المشتقات النفطية في سورية عام 2008

المشتق	مليون طن نفط مكافئ MTOE
المازوت	8.248
الغاز السائل	0.957
البنزين (غازولين)	1.614
الكبروسين	0.151
الفيول أويل	6.149
نفثا ومقطرات ثقيلة وغاز مصافي	0.453
إسفلت وفحم وكبريت	0.605
المجموع	18.177

توزع استهلاك الطاقة على القطاعات مبين في الجدول 3-1:

جدول 3-1: توزع استهلاك مصادر الطاقة الأولية على القطاعات عام 2008

الجهة المستهلكة	MTOE	النسبة %
توليد الكهرباء	8.991	37.81
استخراج ونقل وتكرير النفط والغاز	1.624	6.83
الصناعة	1.614	6.79
الزراعة والري	1.282	5.39

20.45	4.863	النقل
18.45	4.387	القطاع المنزلي
4.28	1.018	التشييد والبناء والقطاع التجاري
100	23.780	المجموع (دون اعتبار الكتل الحيوية)

يبين الجدول 1-3 أن المستهلك الأساسي للطاقة الأولية هو قطاع توليد الكهرباء والذي يستحوذ على 37 %، إلى جانب قطاع النقل 20.45 % و القطاع الصناعي 6.79 % والقطاع المنزلي 18.45 %. وعلى اعتبار أن حوالي 50% من إنتاج الطاقة الكهربائية هو استهلاك منزلي فهذا يعني أن الاستهلاك المنزلي للطاقة بما فيها الكهرباء يبلغ حوالي 7.85 مليون طن نفط مكافئ.

بلغ استهلاك حوامل الطاقة في العام 2007 من قبل قطاع توليد الطاقة الكهربائية 8.991 مليون طن مكافئ نفط موزعة بين مشتقات نفطية 4.96 وغاز 3.15 و طاقة مائية 0.882 (مليون طن نفط مكافئ Mtoe). بلغ الاستهلاك النهائي للطاقة في عام 2008 مقدار 24.108 مليون طن مكافئ نفط ويتألف من الطاقة الكهربائية والمشتقات النفطية والغاز موزعة كما في الجدول 1-4:

جدول 1-4: استهلاك القطاعات المختلفة من الطاقة عام 2008

القطاع المستهلك	مشتقات نفطية و غاز	كهرباء Mtoe	إجمالي Mtoe
الزراعة	1.269	0.393	1.661
صناعات إستخراجية	0.252	0.107	0.358
تكرير النفط ونقله	1.483	0.066	1.549
صناعات تحويلية	1.614	2.084	3.699
توليد كهرباء		1.819	1.819

دراسات لاستغلال هذا المصدر الذي لم يتم استغلاله بشكل تجاري حتى الآن إلا في جيبوتي.

ومنذ بداية القرن العشرين بدأ استغلال الطاقة الجوفية في توليد الكهرباء، حيث تم في عام 1904 بناء أول مشروع تجاري في العالم لتوليد الكهرباء في إيطاليا باستخدام البخار الصادر من جوف الأرض.

وقد استغلت الولايات المتحدة وأيسلندا ونيوزيلندا واليابان وبلدان أخرى الطاقة الجوفية لتوليد الكهرباء، والجزء الأكبر من سعة توليد الكهرباء من الطاقة الجوفية يتركز في هذه البلدان. وتعد مساهمة الطاقة الجوفية في توليد الكهرباء محدودة جداً في العالم، بلغت 0.3% من إجمالي التوليد في البلدان الصناعية في عام 2001 ونسبة 1% من إجمالي توليد الكهرباء من المصادر المتجددة في عام 2005.

اقتصاديات إنتاج الكهرباء من الطاقة الجوفية

على الرغم من انخفاض تكاليف أنظمة الطاقة الجوفية بصورة كبيرة منذ سبعينات القرن الماضي، إلا أنها لا تزال تعتبر عالية نسبياً، حيث قدرت تكاليف الإنتاج بحدود 30-90 دولار/ميغاواط ساعي، والاستثمارات الرأسمالية بحدود 1700 إلى 5700 دولار/كيلو واط في عام 2005. وبالمقارنة مع تكاليفها الرأسمالية العالية نسبياً، تتسم محطات الطاقة الجوفية لتوليد الكهرباء بمستويات منخفضة من التكاليف التشغيلية، مما يجعلها مصدر طاقة منخفضة التكاليف لبعض المواقع المناسبة فقط.

وقد وصل إجمالي سعة استخدام الطاقة الجوفية لتوليد الكهرباء في العالم إلى حوالي 9 جيجاواط في نهاية عام 2005، وذلك بالإضافة إلى 28 جيجاواط تستخدم مباشرة للتسخين. كما تم إبرام عقود بمجموع طاقة 0.5 جيجاواط في الولايات المتحدة في العام المذكور. كما توجد محطات طاقة جوفية تحت التنفيذ في 11 بلداً.

ورغم تصاعد أسعار النفط خلال السنوات القليلة الماضية وتحمين اقتصاديات مشاريع الطاقات المتجددة، لم تشهد الطاقة الجوفية في العالم نفس معدلات النمو العالية التي شهدتها بعض الطاقات المتجددة الأخرى مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح خلال تلك الفترة. فمثلاً تزايد إجمالي الطاقة الجوفية المركبة في العالم بحوالي 12% فقط خلال

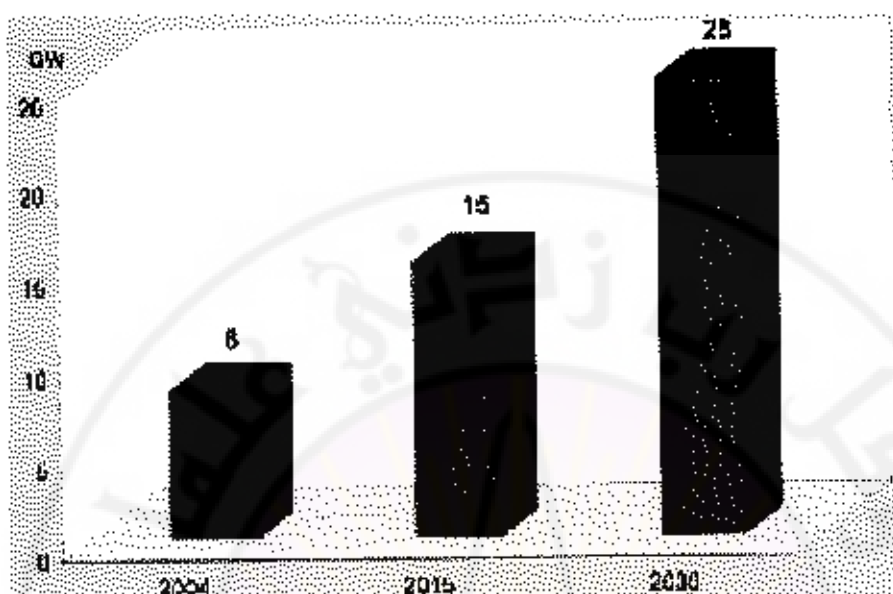
الفترة 2000-2005. وباستثناء الولايات المتحدة الأمريكية، وإلى حد أقل المكسيك، لم تستطع بعض البلدان الرئيسية في مجال الطاقة الجوفية من تحقيق أي نمو بل شهد بعضها تراجعاً في معدلها السنوي مابين عامي 2003 و 2004 ووصل إلى 10% بالنسبة لإيطاليا.

الميزات والسلبيات

تتميز الطاقة الجوفية بتكاليفها التشغيلية المنخفضة بالمقارنة مع معظم تقنيات توليد الكهرباء الأخرى. إلا أنها تعاني من معوقات جدية حتى أنها اعتبرت من قبل البعض مصدراً غير متجدد حيث أن بعض المناطق في العالم التي كانت تنفث حرارة عالية في السابق أصبحت مع مرور الزمن تعطي حرارة أقل، الأمر الذي جعل البعض وبالأخص الجيولوجيين والفيزيائيين يصنفون الطاقة الجوفية كمصدر طاقة ناضب. كما أن للطاقة الجوفية تأثيرات بيئية مشابهة تقريباً لتلك الناتجة عن الطاقة الأحفورية، حيث تنفث بعض الغازات ومنها: كبريتيد الهيدروجين وكلوريد الهيدروجين وثنائي أكسيد الكربون وقليل من غاز الميثان، والأمونيا، والرادون وبعض العناصر السامة مثل الزئبق المذاب في البخار والماء في جوف الأرض.

الآفاق المستقبلية

تتوقع بعض المصادر تزايد الطاقة الجوفية المركبة في العالم لتصل إلى 15 جيجاواط في عام 2015 وإلى 25 جيجاواط في عام 2030 بالمقارنة مع 8 جيجاواط في عام 2004، أي بمعدل نمو سنوي قدره 5.4% خلال الفترة 2004-2015 تنخفض إلى 4.4% خلال الفترة 2015-2030، كما في الشكل 1-11، ويلاحظ أنه لا يزال هنالك مجال لانخفاض أكبر في تكاليف تقنيات الطاقة الجوفية بالأخص بالنسبة لتكاليف الاستثمار والتي ستعتمد على التطور التكنولوجي. وعلى ضوء التحديات التي تواجه صناعة الطاقة الجوفية في العالم ومنها تكاليف التطوير والمشاكل البيئية، فمن المرجح بقاؤها محلية وليست عالمية، أي تستغل في البلد الذي تتواجد فيه فقط، ما جعل البعض يعتبرها تقنية غير واعدة عالمياً.



الشكل 1-11: توقع إجمالي الطاقة الجوفية في العالم لعامي 2015 و 2030

1-6-4 الطاقة المائية (الطاقة الكهرومائية و طاقة المد والجزر و طاقة الأمواج)

هي الطاقة المستمدة من حركة المياه المستمرة، والتي لا يمكن أن تنفذ، والاستفادة منها لبعض الأغراض المفيدة. وهناك أنواع عديدة من أهمها الطاقة الكهرومائية وطاقة المد والجزر وطاقة الأمواج. وتُدرج طاقة المد والجزر والأمواج، في بعض الأحيان، ضمن طاقة المحيطات Ocean Energy التي قد تشمل أيضاً أنواعاً أخرى ناتجة عن الاختلاف في درجة حرارة المحيطات Ocean Thermal Energy Conversion وطاقة الاختلاف في الملوحة Salinity Gradient.

1) محطات الطاقة الكهرومائية الكبيرة

وهي الطاقة الناتجة عن استغلال طاقة مساقط المياه وطاقة المياه الجارية. وقد لعب التدخل الحكومي المباشر والدعم والتشجيع دوراً أساسياً وراء ذلك التطور الذي قاد

إلى بناء سدود ضخمة ولأغراض متعددة، منها ضمان إمدادات المياه للمواطنين، والسيطرة على الفيضانات، بالإضافة إلى توليد الطاقة الكهربائية. وساهمت الطاقة الكهرومائية في العالم بحدود 17% من إجمالي الطاقة الكهربائية العالمية في نهاية عام 2005، وبلغ إجمالي الطاقة المركبة 730 جيغاواط مع وجود طاقة بحدود 100 جيغاواط تحت الإنشاء.

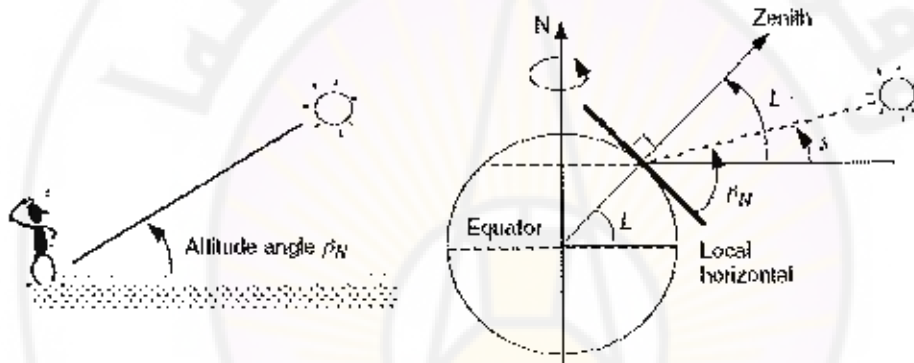
اقتصاديات الطاقة الكهرومائية الكبيرة

على رغم التكاليف الاستثمارية العالية نسبياً والتي قدرت ما بين 1500-5500 دولار/كيلو واط (للمحطات الكهرومائية الكبيرة) بالمقارنة مع 450-600 دولار/كيلو واط للمحطات الغازية، فهي لا تزال أقل من التكاليف الاستثمارية لبعض تقنيات الطاقات المتجددة الأخرى لتوليد الكهرباء، بالأخص الخلايا الضوئية (5000-8000 دولار/كيلو واط).

إضافة إلى ذلك، فإن تكاليف توليد الكهرباء في المحطات الكهرومائية الكبيرة والتي قدرت ما بين 30-120 دولار/ميغاواط ساعي تجعلها تنافسية مع معظم تقنيات التوليد من المصادر المتجددة الأخرى، وفي بعض الحالات، حتى مع المحطات العاملة بالغاز. لكن مصادر أخرى قدرت تكاليف توليد الكهرباء من محطات الطاقة الكهرومائية الكبيرة ما بين 20-40 دولار/كيلو واط ساعي والذي يعتبر الأقل بالمقارنة مع جميع الطاقات المتجددة الأخرى لتوليد الكهرباء.

ويذكر أن إجمالي الطاقة الكهرومائية المركبة في البلدان الصناعية قد بلغ 428.3 جيغاواط في عام 2004، مقارنة مع 424.6 جيغاواط في عام 2003 أي بزيادة أقل من 1% سنوياً. واحتلت الولايات المتحدة المرتبة الأولى حيث بلغ إجمالي طاقتها الكهرومائية المركبة حوالي 96.7 جيغاواط في عام 2004 مقارنة مع 96.3 جيغاواط في عام 2003، تلتها كندا في الدرجة الثانية (70.9 جيغاواط) ثم اليابان (46.7 جيغاواط) خلال السنة المذكورة. وباستثناء المكسيك (التي حققت معدل نمو بلغ 9.3%) والنمسا (2.2%) في عام 2004، فإن بقية البلدان العشرة الرئيسية في

زاوية الارتفاع الشمسي هي الارتفاع الزاوي للشمس في السماء مقاساً من الأفق (الأفق لراصد ما على الأرض هو الدائرة المتحصلة من تقاطع مماء الراصد مع الأرض). هذه الزاوية تساوي الصفر لدى شروق الشمس وغروبها و 90° عندما تكون الشمس فوق الراصد مباشرة. ثمة محدد هام في تصميم النظم الكهروضوئية وهو زاوية الارتفاع الأعظمية أي الارتفاع الأعظمي للشمس في السماء في زمن معين من السنة. وهذه الزاوية الأعظمية تحدث في الظهر الشمسي Solar noon (أي عندما تصل الشمس إلى خط الطول لمكان الراصد) وتتبع لخط العرض وزاوية الانحراف ونشير لها بالرمز β_N . من الشكل 7-2 نحصل على:



شكل 7-2: زاوية الارتفاع الشمسي عند الظهيرة

$$\beta_N = 90^\circ - L + \delta \quad (2.9)$$

حيث L خط عرض المكان. نلاحظ في الشكل مصطلح Zenith (سمت) وهو يشير إلى الشاقول المرسوم مباشرة فوق المكان.

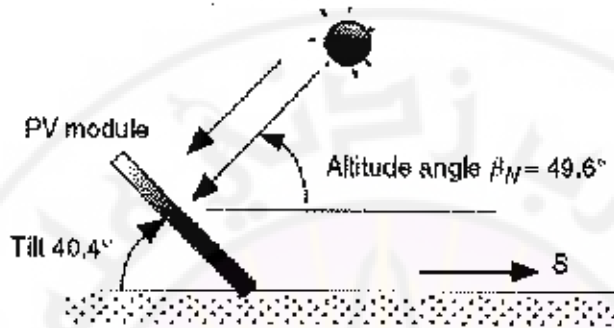
مثال 2-2: أحسب زاوية الميل المثلى tilt angle لنلحة شمسية كهروضوئية PV module في جنوب دمشق (خط العرض 32.1°) عند الظهيرة لأجل 1 آذار.

الحل:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (60 - 81)^\circ \right] = -8.3^\circ$$

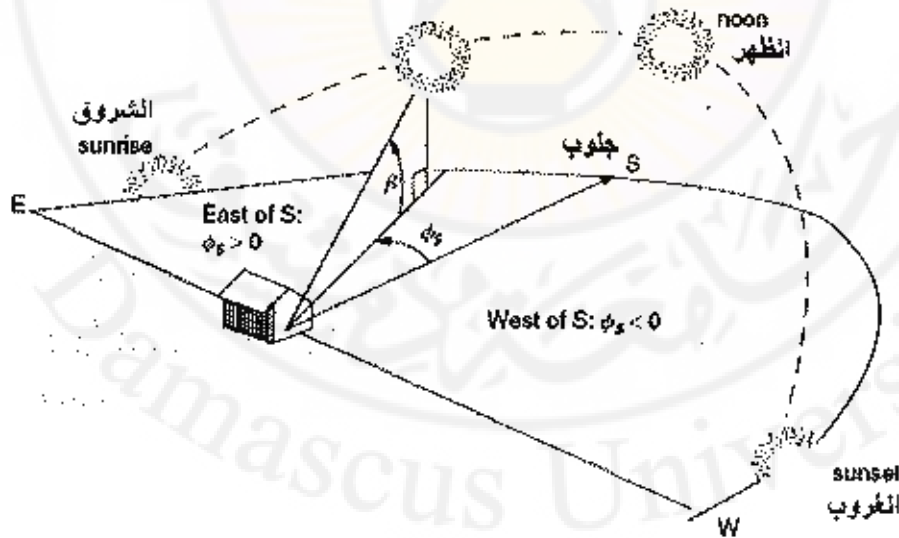
$$\beta_N = 90^\circ - L + \delta = 90 - 32.1 - 8.3 = 49.6^\circ$$

$$\text{Tilt} = 90 - \beta_N = 90 - 49.6 = 40.4^\circ$$



أي أن الزاوية المتلى هي تلك التي تجعل الأشعة الشمسية ناظمية على الموديول عند الظهيرة.

يتم تحديد موقع الشمس في أي وقت خلال اليوم بواسطة زاويتين هما زاوية الارتفاع β وزاوية الأزموت Φ_S كما هو مبين في الشكل 8-2.



شكل 8-2: تحديد موضع الشمس بواسطة زاويتي الارتفاع والأزموت

الدليل S لزاوية الأزيমوت يشير إلى أن الزاوية تخصص الشمس، إذ أننا سنعرف لاحقاً زاوية أزيموت للالقط الشمسي solar collector وسيكون رمزها Φ_c . تقاس زاوية الأزيموت في مستوى أفق الراصد وهي الزاوية بين مسقط خط الأرض- شمس على الأفق وبين جنوب الراصد (أو شمال الراصد لمواقع نصف الكرة الجنوبي). ويكون الأزيموت موجبة في الصباح وسالبة بعد الظهر.

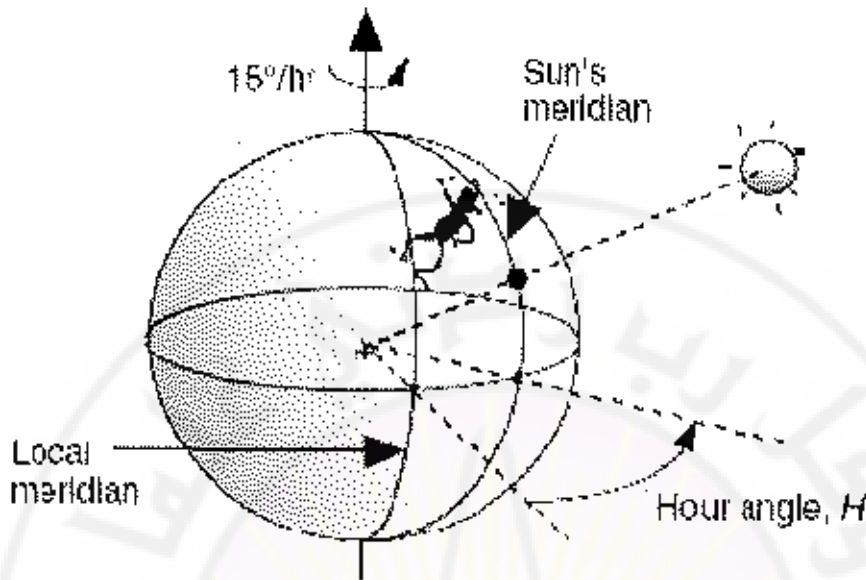
إن حساب زوايتي الارتفاع والأزيموت للشمس لأجل مكان ما على سطح الأرض يتطلب معرفة 3 محددات: خط عرض المكان، ورقم اليوم، والتوقيت خلال ذلك اليوم. حالياً، نعطي التوقيت كزمن شمسي solar time أي عدد الساعات قبل أو بعد الظهر الشمسي. فمثلاً، 11 A.M. زمن شمسي هو 1 ساعة قبل الظهر الشمسي. سنتعلم لاحقاً العلاقة بين الزمن الشمسي والتوقيت المحلي. العلاقتان التاليتان تعطيان زوايتي الارتفاع والأزيموت دون اشتقاق:

$$\sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta \quad (2.10)$$

$$\sin \phi_s = \frac{\cos \delta \sin H}{\cos \beta} \quad (2.11)$$

نجد الملاحظة أن الزمن في المعادلتين السابقتين قد تم أخذه بالحسبان عن طريق كمية تسمى الزاوية الساعية H. الزاوية الساعية لمكان ما على الأرض في أية لحظة هي عدد الدرجات التي يجب أن تدورها الأرض قبل أن تصبح فوق خط طول المكان local meridian (خط الطول المحلي) مباشرة. لتوضيح أكثر ننظر إلى الشكل 2-9. في أية لحظة زمنية، تكون الشمس مباشرة فوق خط طول خاص يُسمى خط الطول الشمسي sun's meridian. الفرق بين خط الطول المحلي وخط الطول الشمسي هو الزاوية الساعية، حيث قمها موجبة في الصباح قبل أن تقطع الشمس خط الطول المحلي. بافتراض دوران الأرض 360° خلال 24 ساعة، أو $15^\circ/h$ ، تكون الزاوية الساعية:

$$\text{Hour angle } H = \left(\frac{15^\circ}{\text{hour}} \right) \cdot (\text{hours before solar noon}) \quad (2.12)$$



شكل 2-9: تعريف الزاوية الساعية لمكان ما في لحظة زمنية ما

وعليه، الزاوية الساعية H لأجل زمن شمسي 11:00 AM هي $+15^\circ$ (أي تحتاج الأرض لتدور 15 درجة لتصل للظهر الشمسي) ولأجل 2:00 PM هي -30° .
النقطة الأخيرة هي التعقيدات المتعلقة باستخدام المعادلة (2.11) لإيجاد زاوية الأزيموت للشمس، والتي تتولد من كون $\sin x = \sin(180 - x)$. في الواقع، تكون Φ_s أكبر من 90° في الصباح الباكر و بعد الظهر المتأخر خلال الربيع والصيف. لذلك نحتاج إلى الاختبار التالي:

$$\text{if } \cos H \geq \frac{\tan \delta}{\tan L}, \quad \text{then } |\phi_s| \leq 90^\circ; \quad \text{otherwise } |\phi_s| > 90^\circ \quad (2.13)$$

مثال 2-3: أوجد زاويتي الارتفاع والأزيموت للشمس في الزمن الشمسي 3:00 PM في مكان خط عرضه 40° في يوم الانقلاب الصيفي.
الحل:

$$H = \left(\frac{15^\circ}{h} \right) \cdot (\text{hours before solar noon}) = \frac{15^\circ}{h} \cdot (-3 \text{ h}) = -45^\circ$$

$$\begin{aligned}\sin \beta &= \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta \\ &= \cos 40^\circ \cos 23.45^\circ \cos(-45^\circ) + \sin 40^\circ \sin 23.45^\circ = 0.7527 \\ \beta &= \sin^{-1}(0.7527) = 48.8^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sin \phi_S &= \frac{\cos \delta \sin H}{\cos \beta} \\ &= \frac{\cos 23.45^\circ \cdot \sin(-45^\circ)}{\cos 48.8^\circ} = -0.9848\end{aligned}$$

$$\phi_S = \sin^{-1}(-0.9848) = -80^\circ \quad (80^\circ \text{ west of south})$$

$$\text{or } \phi_S = 180 - (-80) = 260^\circ \quad (100^\circ \text{ west of south})$$

$$\cos H = \cos(-45^\circ) = 0.707 \quad \text{and} \quad \frac{\tan \delta}{\tan L} = \frac{\tan 23.45^\circ}{\tan 40^\circ} = 0.517$$

$$0.707 > 0.517$$

$$\phi_S = -80^\circ \quad (80^\circ \text{ west of south})$$

نكتب برنامجا عاما في بيئة MATLAB لحل المثال السابق بحيث تكون بيانات دخل البرنامج قابلة للتغيير وهي: n, L, H . يجب الانتباه إلى أن التتابع المثلثية في الماتلاب تقبل الزوايا بالراديان فقط. الإنقلاب الصيفي يحصل في 12 حزيران أي $n = 172$. يحوي البرنامج أيضا الاختبار الذي يحدد أي القيمتين الرياضيتين تناسب زاوية الأريمت. نص البرنامج مبين فيما يلي:

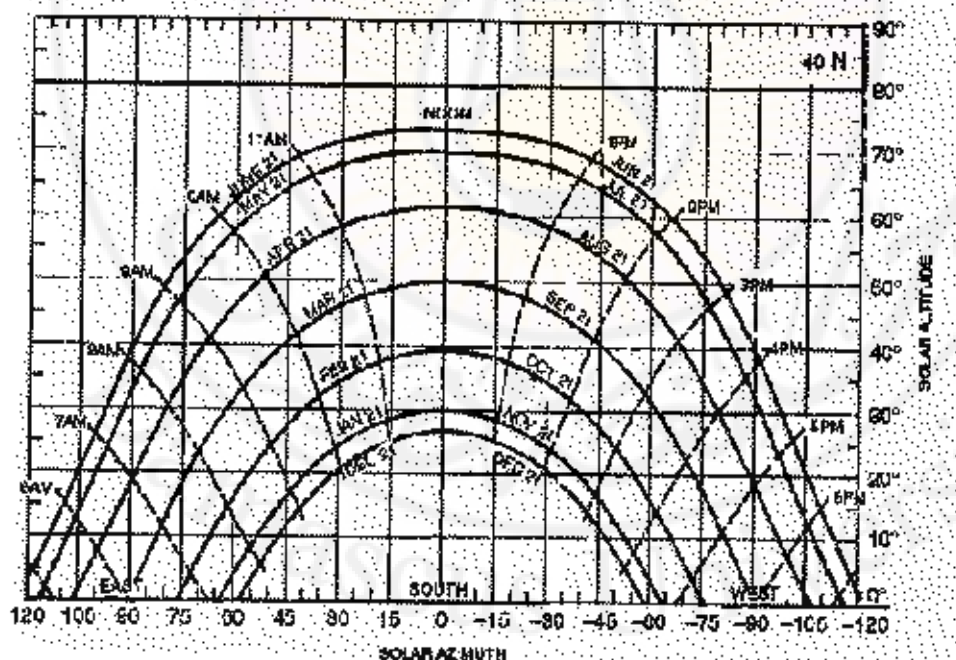
```

%Matlab Program for Calculation of solar angles:
Hour angle, solar declination, Altitude, Azimuth
% Made by Prof. Dr. Ali Hamzeh 29.12.2009
g = pi/180;
n = 172
L = 40
H = -45
delta = 23.45*sin(g*((360/365)*(n-81)))
beta = (1/g)*asin(cos(g*L)*cos(g*delta)*cos(g*H) +
sin(g*L)*sin(g*delta))
phis =
(1/g)*asin(cos(g*delta)*sin(g*H)/cos(g*beta))

if cos(g*H)>= tan(g*delta)/tan(g*L), phi =
phis, else phi = 180-(phis), end

```

يمكن تمثيل زوايا الارتفاع والأزيموت لأجل خط عرض معين بشكل بياني فنحصل على مخطط مسار الشمس sun path diagram كما هو مبين في الشكل 10-2.

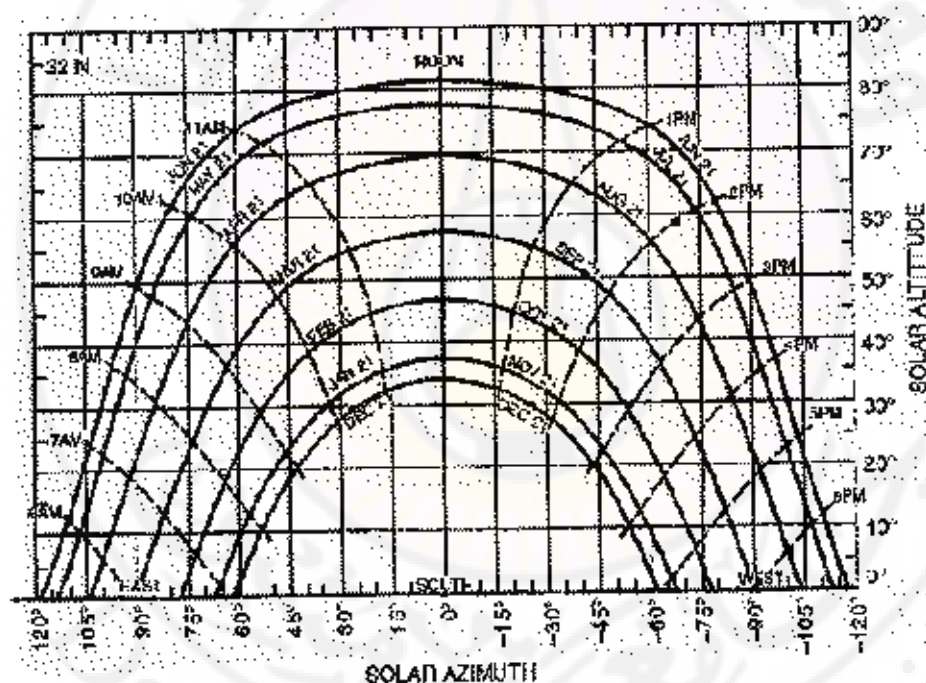


شكل 10-2: مخطط مسار الشمس لأجل خط عرض 40°

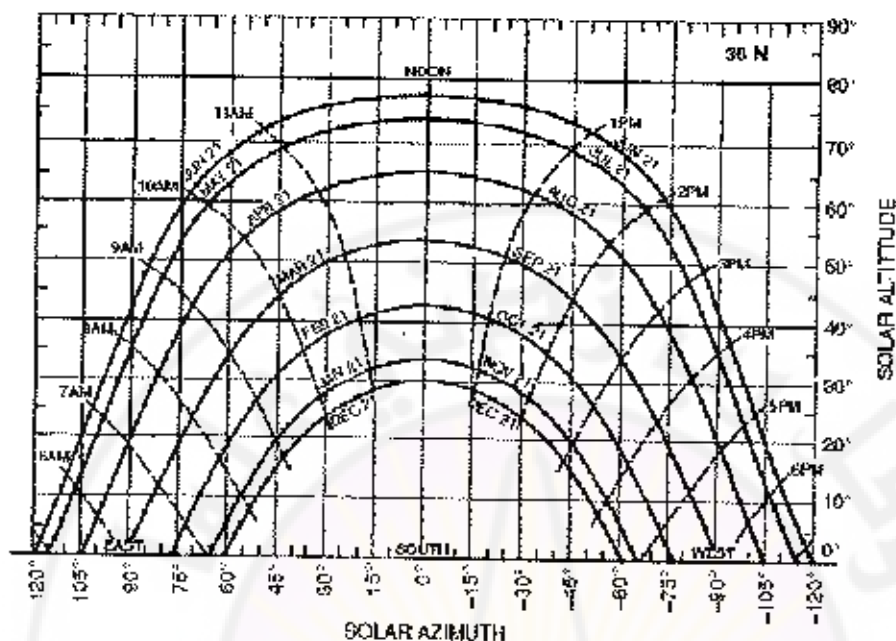
تعليق على الشكل 2-10: في الربيع والصيف تشرق الشمس وتغرب إلى الشمال قليلا من الشرق الجغرافي والغرب الجغرافي على الترتيب. في يومي الاعتدال يكون الشروق والغروب تماما من الشرق والغرب (في أي مكان على الأرض). خلال الخريف والشتاء لاتكون زاوية الإكريموت إطلاقا أكبر من 90° .

يبين الشكلان 2-11 و 2-12 مخططات مسار الشمس في سورية لخطي عرض 32 و 36 .

تفيد مخططات المسار الشمسي أيضا في تحليل التظليل للتطبيقات الشمسية وخاصة الكهروضوئية منها باعتبارها حساسة جدا لذلك.



شكل 2-11: مخطط مسار الشمس لخط العرض 32N



شكل 2-12: مخطط مسار الشمس لخط العرض 36N

2-6 تحليل الظل باستخدام مخططات مسار الشمس

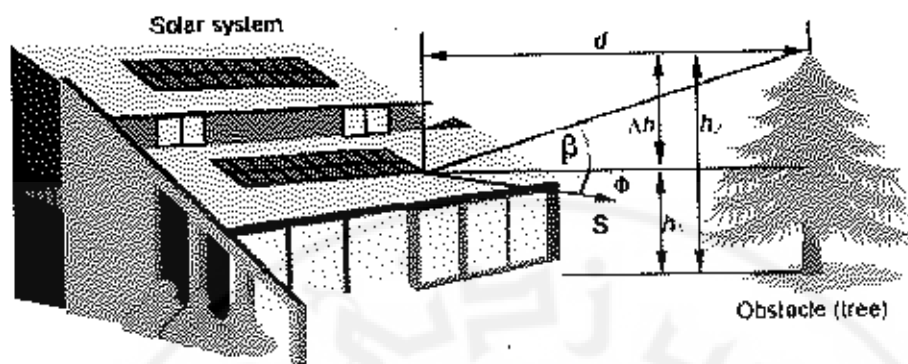
Sun path diagrams for shading analysis

سنشرح ذلك على مثال لنظام كهروضوئي مركب على سقف منزل. قد يكون هناك أشجار أو بيوت أو غوائق أخرى على مقربة من البناء تضرب ظلها على الألواح الشمسية. يجب أن نحدد أولاً نقطة مرجعية، وعادةً تُختار النقطة من النظام الشمسي ذات أعلى احتمال أن تقع في الظل.

الخطوة التالية، يجب تقدير زوايا الارتفاع والأزيموت للأجسام في المحيط بالنسبة للنقطة المرجعية. تُستخدم علاقات هندسية بسيطة لتقدير زاوية الارتفاع كما هو موضح في الشكل 2-13 لشجرة.

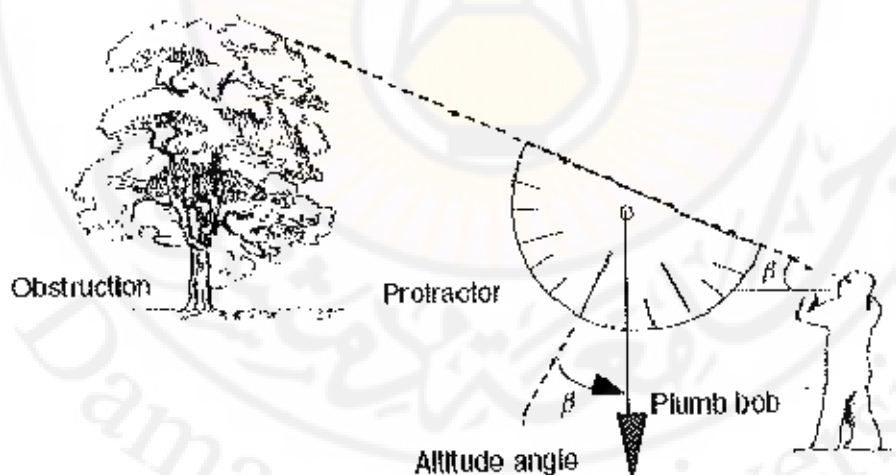
$$\beta = \arctan\left(\frac{h_2 - h_1}{d}\right) = \arctan\left(\frac{\Delta h}{d}\right) \quad (2.14)$$

يمكن أيضاً إيجاد زاوية الارتفاع للشجرة باستخدام المنقلة والشافول كما يبين الشكل 2-14.

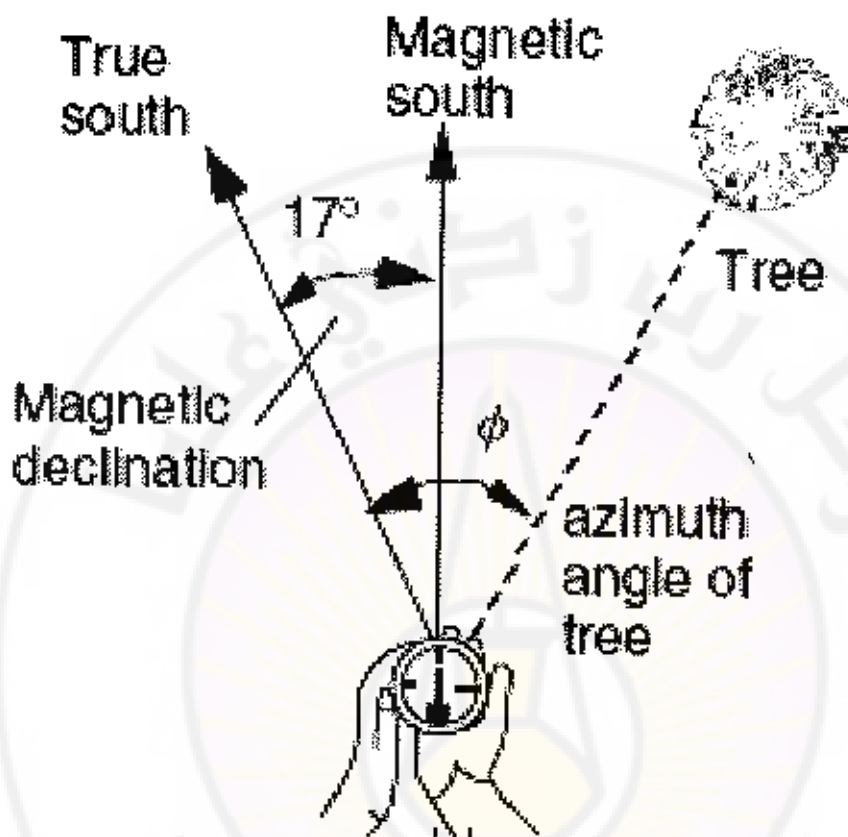


شكل 2-13: تعريف زاويتي الارتفاع والأزيموت لعائق ما (شجرة) في موقع النظام الشمسي [1]

يتم قياس زاوية الأريموت للعائق بواسطة البوصلة مع الانتباه إلى أن البوصلة تشير إلى الشمال المغناطيسي وليس الشمال الحقيقي. لذلك يجب إجراء التصحيح المطلوب باستخدام مخططات خاصة تعطي الفرق بين الشماليين (أو الجنوبيين) كما هو مبين في الشكل 2-15.

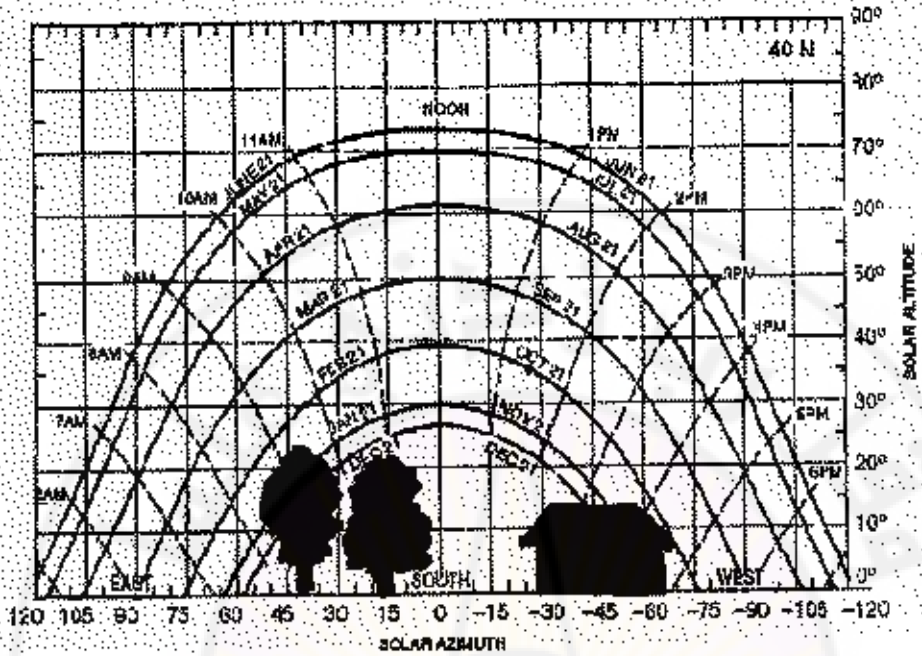


شكل 2-14: قياس زاوية ارتفاع شجرة باستخدام المنقلة والشافول



شكل 2-15: قياس زاوية الأريموت لشجرة لمدينة فيها الفرق بين الجنوبيين 17°E [2]

يبين الشكل 2-16 مثالا على كيفية استخدام مخطط مسار الشمس لتحليل التظليل لموقع يحوي تطبيقا شمسيا وبعض العوائق: شجرتين في الجنوب الشرقي ومنزل صغير في الجنوب الغربي من التطبيق الشمسي. بعد حساب زوايا الارتفاع والأريموت لكافة العوائق نرسم صورة ظلية للجوارر بشكل مضلعي على مخطط مسار الشمس، كما هو مبين في الشكل 2-16. من هذا المخطط يمكن أن نقرأ الأزمان التي سيحدث فيها التظليل.



شكل 2-16: تحليل أزمان التظليل للموقع

نلاحظ أن الموقع يستقبل الشمس دون تظليل من شباط حتى تشرين أول، بينما تحجب الأشجار الشمس من تشرين ثاني إلى كانون ثاني حوالي ساعة في اليوم - من 8:30 AM to 9:30 AM - كما يحجب المنزل المجاور الشمس بعد الساعة 3:00 PM. في حال توفر معلومات حول شدة الإشعاع الشمسي في الموقع كل ساعة W/m^2 نستطيع حساب الطاقة الشمسية الضائعة بسبب التظليل. استكمالا للمثال نفرض توفر المعلومات الميينة في الجدول 2-2.

جدول 2-2: كمية الإشعاع الشمسي (W/m^2 و $kWh/m^2.day$) للواقط شمسية في موقع خط عرضه $40^\circ N$ في شهر كانون الثاني في يوم صاف لأجل زوايا ميل ثابتة ولأجل نظم تتبع الشمس بمحور ومحورين [2]

**Clear Sky Beam Plus Diffuse Insolation at 40° Latitude in January
for South-Facing Collectors with Fixed Tilt Angle and for Tracking Mounts (hourly
W/m² and daily kWh/m².day)^a**

Solar Time	Tracking		Tilt Angles					Latitude 40°	
	One-Axis	Two-Axis	0	20	30	40	50	60	90
January 21 (W/m ²)									
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.4	439	462	87	169	204	232	254	269	266
9.3	744	784	260	424	489	540	575	593	544
10.2	857	903	397	609	689	749	788	803	708
11.1	905	954	485	722	811	876	915	927	801
12	919	968	515	761	852	919	958	968	832
kWh/m ² .day	6.81	7.17	2.97	4.61	5.24	5.71	6.02	6.15	5.47

المعادلات التي حُسبت بموجبها أرقام الجدول سترد لاحقاً في هذا الفصل.

مثال 2-4: أحسب الطاقة الشمسية المتاحة kWh/m².day على لاقط شمسي موجه نحو الجنوب بزاوية ميل 30 درجة في يوم صاف من أيام شهر كانون ثاني علماً أن الموقع يمتلك مخطط مسار شمس وعوائق كما في الشكل 2-16.

الحل: دون عوائق، يستقبل اللاقط 5.24 kWh/m².day كما يبين الجدول 2-2. يبين مخطط مسار الشمس فقد 1 ساعة شمس حوالي 9 AM، أي حوالي 0.49 kWh. بعد الساعة 3:30 PM تقريباً تُحجب الشمس عن الموقع، ما يحرم اللاقط من 0.20 kWh أخرى. الطاقة الشمسية الباقية والمستقبلة من قبل اللاقط هي إذن:

$$\text{Insolation} \approx 5.24 - 0.49 - 0.20 = 4.55 \text{ kWh/m}^2 \approx 4.6 \text{ kWh/m}^2 \text{ per day}$$

2-7 التوقيت الشمسي والتوقيت المدني (التوقيت المحلي)

Solar time and clock time

جميع كميات الزمن المستخدمة في هذا الفصل هي الزمن الشمسي (التوقيت الشمسي) ST حيث يتم قياس أي شيء بالنسبة إلى الظهر الشمسي (الذي يحدث عندما تكون

الشمس على خط الطول للراصد). ولكن في بعض الأحيان نحتاج إلى استخدام التوقيت المحلي المسمى التوقيت المدني (CT) Civil time أي التوقيت التي تشير إليه ساعاتنا clocks. لإيجاد العلاقة بين التوقيتين يجب أخذ أمرين بالحسبان:

- الأمر الأول حول ضبط خطوط الطول longitude adjustment الذي يتعلق بتقسيم أقاليم العالم إلى مناطق زمنية time zones.
- الأمر الثاني يتعلق بالمدار الإهليلجي للأرض.

الأرض مقسمة افتراضيا إلى 24 منطقة زمنية ساعية (كل منطقة زمنية هي ساعة واحدة) تغطي 15° من خطوط الطول (4 دقائق لكل درجة). تُعرف كل منطقة زمنية بواسطة خط طول زمن محلي (LTM) Local Time Meridian في منتصف المنطقة الزمنية حيث مركز هذا النظام الزمني هو جرينيتش/Greenwich/إنكلترا بخط طول 0° LTM هو 38° لسورية وبعض البلدان أكثر من منطقة زمنية وبالتالي LTMs مثل الولايات المتحدة الأمريكية حيث لها 6 مناطق زمنية كما يبين الجدول 2-3. إن تصحيح خط الطول بين التوقيت المحلي والتوقيت الشمسي يعتمد على الزمن الذي تحتاجه الشمس لتتحرك (ظاهريا طبعا) بين خط الطول LTM وخط طول الراصد. إذا كان ظهر شمسي في الخط LTM، سيكون الظهر الشمسي لراصد متأخرا 4 دقائق لكل درجة إلى الغرب من LTM. فمثلا، سيكون الظهر الشمسي في سان فرانسيسكو (خط طول 120°) بعد 8 دقائق من عبور الشمس للخط $LTM = 122^\circ$ للمنطقة الزمنية الباسيفيكية (أنظر جدول 2-3).

جدول 2-3: LTMs للولايات المتحدة الأمريكية

Local Time Meridians for U.S. Standard Time Zones (Degrees West of Greenwich)	
Time Zone	LT Meridian
Eastern	75°
Central	90°
Mountain	105°
Pacific	120°
Eastern Alaska	135°
Alaska and Hawaii	150°

يعتمد التصحيح الثاني على كون مدار الأرض إهليلجياً، ما يسبب تغير طول اليوم الشمسي solar day (أي الزمن بين ظهريين شمسيين متتاليين) خلال السنة. فيما تتحرك الأرض في مدارها، يتغير الفرق بين اليوم ذي 24 ساعة واليوم الشمسي وفق معادلة تسمى معادلة الزمن (E): Equation of time

$$E = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (\text{minutes}) \quad (2.15)$$

$$B = \frac{360}{364}(n - 81) \quad (\text{degrees}) \quad (2.16)$$

يبين الشكل 2-17 التمثيل البياني للمعادلة (2.15).

باعتبار التصحيحات الآتية الذكر نحصل على العلاقة بين ST و CT:

$$\begin{aligned} \text{Solar Time (ST)} = \text{Clock Time (CT)} + \frac{4 \text{ min}}{\text{degree}} (\text{Local Time Meridian} \\ - \text{Local longitude})^\circ + E(\text{min}) \end{aligned} \quad (2.17)$$

لأجل التوقيت الصيفي Daylight Savings Time يجب إضافة ساعة واحدة للتوقيت المحلي في الربيع وطرح ساعة واحدة في الخريف.

مثال 2-5: أحسب زمن الظهر الشمسي المحلي Eastern Daylight Time (EST) لمدينة بوسطن (خط طول 71.1°W) في 1 تموز. ثم عدل النتيجة باعتبار التوقيت الصيفي EDT.

$$B = \frac{360}{364}(n - 81) = \frac{360}{364}(182 - 81) = 99.89^\circ$$

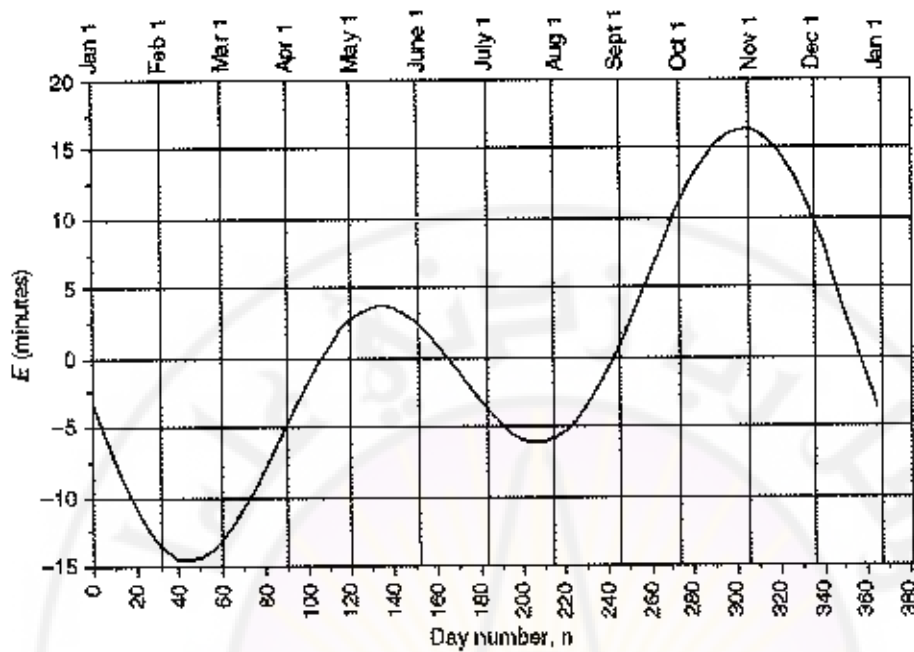
$$\begin{aligned} E &= 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \\ &= 9.87 \sin[2 \cdot (99.89)] - 7.53 \cos(99.89) - 1.5 \sin(99.89) = -3.5 \text{ min} \end{aligned}$$

$$\text{CT} = \text{ST} - 4(\text{min}/^\circ)(\text{Local time meridian} - \text{Local longitude}) - E(\text{min})$$

$$\text{CT} = 12:00 - 4(75 - 71.1) - (-3.5) = 12:00 - 12.1 \text{ min}$$

$$= 11:47.9 \text{ A.M. EST}$$

$$\text{EDT} = 11:47.9 + 1 = 12:47.9$$



شكل 2-17: التمثيل البياني لمعادلة الزمن التي تجسد انحراف محور الأرض ومدارها غير الدائري

2-8 Sunrise and sunset

تكون زاوية الارتفاع للشمس في الشروق أو الغروب صفراً، أي:

$$\sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta = 0 \quad (2.18)$$

$$\cos H = -\frac{\sin L \sin \delta}{\cos L \cos \delta} = -\tan L \tan \delta \quad (2.19)$$

وعليه تكون الزاوية الساعية عند الشروق H_{SR} :

$$H_{SR} = \cos^{-1}(-\tan L \tan \delta) \quad (+ \text{ for sunrise}) \quad (2.20)$$

حيث القيمة الموجبة للشروق والسالبة للغروب، ونظرا لأن الأرض تدور $15^\circ/h$ نحول الزاوية الساعية إلى زمن الشروق أو الغروب بالعلاقة:

$$\text{Sunrise (geometric)} = 12:00 - \frac{H_{SR}}{15^\circ/h} \quad (2.21)$$

المعادلات (2.18) إلى (2.21) هي علاقات هندسية تعتمد على زوايا مقاسة لأجل مركز الشمس؛ ومن هنا أتت التسمية "زمن الشروق الهندسي" في المعادلة (2.21). هذه المعادلات مناسبة تماما لأي نوع من الأعمال في المجال الشمسي، ولكنها لا تعطي بدقة النتائج التي نجدها في الوسائط الإعلامية لأجل زمن الشروق أو الغروب. الفرق يكمن في أن الأرصاد الجوية (خدمة الطقس) تعرف زمن الشروق بأنه اللحظة التي تبرز فيها قمة الشمس وليس مركزها، ما يعني أن النتيجة الهندسية لزمن الشروق تؤخر هذا الزمن. عامل التصحيح حسب وزارة الطاقة الأمريكية هو:

$$Q = \frac{3.467}{\cos L \cos \delta \sin H_{SR}} \quad (\text{min}) \quad (2.22)$$

تُطرح Q من النتيجة الهندسية

وهي تتراوح بين 4 إلى 6 دقائق لأجل خطوط العرض المتوسطة ($0-45^\circ$).
مثال 2-6: أوجد زمن شروق وزمن غروب الشمس (الهندسي والتقليدي) في مدينة بوسطن (خط عرض 42.3°) في 1 تموز ($n = 182$).
الحل:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{3.467}{\cos L \cos \delta \sin H_{SR}} (\text{min}) \\ &= \frac{3.467}{\cos 42.3 \cos 23.1^\circ \sin 112.86^\circ} = 5.5 \text{ min} \end{aligned}$$

$$\text{Sunrise} = 4:28.6 \text{ A.M.} - 5.5 \text{ min} = 4:23.1 \text{ A.M. (solar time)}$$

من المثال 2-5، وجدنا أن التوقيت المحلي في بوسطن في 1 تموز أبكر بمقدار 12.1 min من التوقيت الشمسي، وعليه يكون زمن الشروق لقمة الشمس (الزمن التقليدي) هو:

$$\text{Sunrise (upper limb)} = 4:23.1 - 12.1 = 4:11 \text{ AM Eastern Standard Time}$$

أما زمن الغروب الهندسي فهو 7.524 h بعد الظهر الشمسي أي 7:31.4 solar time. تغيب قمة الشمس تحت الأفق متأخرة 5.5 min وعليه يكون زمن الغروب المحلي التقليدي:

$$\text{Sunset (upper limb)} = 7:31.4 + (5.5 - 12.1) \text{ min} = 7:24.8 \text{ P.M. EST}$$

2-9 ملخص علاقات الزوايا الشمسية

نظراً لكثرة الرموز والعلاقات الواردة في الفقرات السابقة، نقدم فيما يلي لها .

δ	=	solar declination
n	=	day number
L	=	latitude
β	=	solar altitude angle. β_N = angle at solar noon
H	=	hour angle
H_{SR}	=	sunrise hour angle
ϕ_S	=	solar azimuth angle (+ before solar noon, - after)
ϕ_C	=	collector azimuth angle (+ east of south, - west of south)*
ST	=	solar time
CT	=	civil or clock time
E	=	equation of time
Q	=	correction for refraction and semidiameter at sunrise/sunset
Σ	=	collector tilt angle
θ	=	incidence angle between sun and collector face

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right]$$

$$\beta_N = 90^\circ - L + \delta$$

$$\sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta$$

$$\sin \phi_S = \frac{\cos \delta \sin H}{\cos \beta}$$

$$\text{If } \cos H \geq \frac{\tan \delta}{\tan L}, \text{ then } |\phi_S| \leq 90^\circ; \quad \text{otherwise } |\phi_S| > 90^\circ$$

$$\text{Hour angle } H = \left(\frac{15^\circ}{\text{hour}} \right) \cdot (\text{Hours before solar noon})$$

$$E = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (\text{min})$$

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

$$\text{Solar Time (ST)} = \text{Clock Time (CT)} + \frac{4 \text{ min}}{\text{degree}} (\text{Local Time Meridian} - \text{Local Longitude})^2 + E (\text{min})$$

$$H_{SR} = \cos^{-1} (-\tan L \tan \delta) \quad (+ \text{ for sunrise})$$

$$Q = \frac{3.467}{\cos L \cos \delta \sin H_{SR}} \quad (\text{min})$$

$$\cos \theta = \cos \beta \cos(\phi_S - \phi_C) \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma$$

*Opposite signs in Southern Hemisphere.

10-2 الإشعاع الشمسي على لاقط مائل

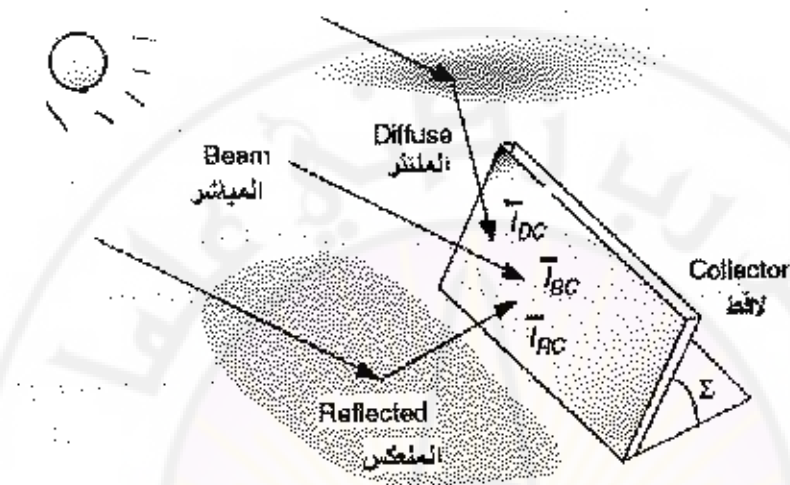
Solar radiation on a tilted collector

1-10-2 مركبات الإشعاع الشمسي Components of solar radiation

يتألف الفيض الشمسي الوارد إلى لاقط مائل مركب على الأرض من ثلاث مركبات (شكل 2-18):

- الإشعاع المباشر beam-direct radiation وهو الذي يعبر الغلاف الجوي على خط مستقيم إلى اللاقط، وهو يخلف ظلالاً shadows لأنه يأتي من الشمس مباشرة.
- الإشعاع المنتثر diffuse radiation وهو الذي يصل إلى اللاقط من اتجاهات عشوائية مختلفة بسبب تبعثر الإشعاع الشمسي من قبل جزيئات الغلاف الجوي وخاصة لأجل الأطوال الموجية القصيرة، والتبعثر من قبل دقائق الغبار ومواد خاصة.

- الإشعاع المنعكس reflected radiation وهو الذي يصل إلى اللاقط بعد انعكاسه عن الأرض أو أجسام بجوار اللاقط.



شكل 2-18: المركبات الثلاثة للإشعاع الشمسي الساقط على لاقط مائل على الأفق

تؤثر زاوية ارتفاع الشمس أيضا على الطاقة الشمسية (Energy irradiation) (insolation) الواصلة إلى سطح الأرض، أي أن هذه الطاقة تتغير حسب التواريخ خلال السنة. كما أن الغيوم والطقس ذات تأثير بارز في هذا الصدد. يمكن أن تبلغ الطاقة الشمسية اليومية في أوروبا الوسطى قيمة أكبر من $7.5 \text{ kWh/m}^2.\text{day}$ في الصيف، فيما لا تتعدى $0.1 \text{ kWh/m}^2.\text{day}$ في بعض أيام الشتاء.

تتغير الطاقة الشمسية السنوية المستقبلة على الأرض من بلد لآخر. في أوروبا مثلا توجد فروق كبيرة بين الشمال والجنوب. ففي الشمال تكون الفروق بين الصيف والشتاء أكبر بكثير منها في الجنوب. في مدينة Bergen/النرويج (60.4°N) تكون نسبة الطاقة الشمسية الإجمالية على سطح أرضي أفقي في حزيران إلى الطاقة في كانون أول حوالي 40، بينما تنخفض هذه النسبة إلى 3.3 في ليزابون/البرتغال (38.72°N). تتراوح الطاقة الشمسية السنوية في أوروبا الوسطى والشمالية بين 700

700 kWh/m².year و 1000 kWh/m².year، وتبلغ حوالي 2700 kWh/m².year في أوروبا الجنوبية، بينما تبلغ حوالي 2000 kWh/m².year في المناطق الصحراوية وحوالي 4-2 قيم الطاقة الشمسية الإجمالية الوسطية الشهرية في اليوم سورية. يعطي الجدول 2-4 قيم الطاقة الشمسية الإجمالية الوسطية الشهرية في اليوم على سطح أفقي في بعض المدن في العالم وفي دمشق.

يتطلب تصميم وتخطيط نظم الطاقة الشمسية قيمة دقيقة للإشعاع الشمسي في الموقع المعني، لذلك يُنصح بالاعتماد على القيم المحلية المقاسة على سطح أفقي أو على قواعد البيانات databases المتاحة على مواقع الإنترنت مثل:

www.satellite.com, <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>,
<http://rredc.nrel.gov/solar/>

كما يمكن استخدام برامج حاسوبية لتقدير القيم المطلوبة لموقع معين استناداً إلى قيم مقاسة لموقع قريب من مكان المشروع الشمسي.

جدول 2-4: الطاقة الشمسية الإجمالية الوسطية الشهرية في اليوم على سطح أفقي

في بعض المواقع في العالم وفي دمشق (الجدول الملحق) [2][3]

	Bergen Norway	Berlin Germany	London UK	Rome Italy	LA US	Cairo Egypt	Bombay India	Upington RSA	Sydney Australia
Latitude	60.40°N	52.47°N	51.52°N	41.60°N	33.93°N	30.06°N	19.12°N	28.40°S	33.95°S
Jan	0.20	0.61	0.56	1.70	2.88	3.09	4.74	8.08	6.41
Feb	0.72	1.54	1.10	2.54	3.97	4.00	5.55	7.45	5.57
Mar	1.71	2.44	2.07	3.78	5.14	5.15	6.20	6.26	4.72
Apr	3.27	3.49	3.04	4.98	6.47	6.27	6.72	5.19	3.47
May	4.13	4.77	4.12	6.03	6.55	7.03	6.77	4.26	2.63
June	4.85	5.44	4.99	6.59	6.67	7.56	4.99	3.72	2.38
July	4.15	5.26	4.38	6.86	7.38	7.34	3.84	4.04	2.52
Aug	3.49	4.58	3.82	6.16	6.82	6.76	3.86	4.95	3.47
Sep	1.85	3.05	2.71	4.69	5.26	5.87	4.85	6.09	4.68
Oct	0.94	1.59	1.56	3.29	4.24	4.69	5.11	7.21	5.63
Nov	0.30	0.76	0.81	2.02	3.22	3.45	4.73	8.27	6.40
Dec	0.12	0.45	0.47	1.51	2.72	2.86	4.46	8.49	6.69
Average	2.15	2.81	2.46	4.19	5.10	5.34	5.14	6.17	4.55

Source: data from Palz and Giefl, 1996; NASA, 2003

Month	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Irradiation, kWh/m ² /day	2.30	3.03	4.16	5.36	6.76	7.90	7.94	6.74	5.62	4.97	2.75	2.09

Source: NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center

يبين الجدول 2-5 الطاقة الشمسية الوسطية الشهرية المباشرة والمنتشرة في اليوم في برلين والقاهرة. في برلين، الطاقة المنتشرة هي الأكبر، بينما في القاهرة تكون الطاقة المباشرة أكبر بكثير من المنتشرة حتى في فصل الشتاء.

**جدول 2-5: الطاقة الشمسية المباشرة والمنتشرة اليومية كمتوسطات شهرية
kWh/m².day**

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
Berlin Direct	0.17	0.40	1.03	1.42	2.13	2.58	2.29	2.05	1.38	0.54	0.22	0.10	1.20
Berlin Diffuse	0.44	0.74	1.41	2.07	2.64	2.86	2.97	2.53	1.67	1.05	0.54	0.35	1.61
Cairo Direct	1.74	2.37	3.07	3.78	4.56	5.16	4.93	4.57	3.86	3.07	1.96	1.58	3.39
Cairo Diffuse	1.35	1.63	2.08	2.49	2.47	2.40	2.41	2.19	2.01	1.62	1.49	1.28	1.96

تجدر الملاحظة أن قيم الطاقة الشمسية المنتشرة في اليوم كمتوسطات سنوية لا تختلف كثيرا باختلاف المواقع على الرغم من الفروق الكبيرة في الطاقة الإجمالية. نلاحظ من الجدول 2-6 أن مدينتي Uppington/جنوب إفريقيا و لندن تملكان ذات الطاقة المنتشرة على الرغم من كون الطاقة الإجمالية لمدينة Uppington أكبر بمرتين تقريبا من الطاقة الإجمالية في لندن.

**جدول 2-6: قيم الطاقة الشمسية المباشرة والمنتشرة في اليوم كمتوسطات سنوية
kWh/m².day**

	Bergen	Berlin	London	Rome	LA	Cairo	Bombay	Uppington	Sydney
Direct	0.86	1.20	0.99	2.41	3.03	3.39	2.75	4.70	2.42
Diffuse	1.29	1.61	1.47	1.78	2.07	1.95	2.39	1.47	2.13

تملك المناطق ذات التلوث الهوائي العالي والمناطق الاستوائية قيمة متزايدة بشكل ملحوظ للطاقة المنتشرة. أما الفروقات في الطاقة المباشرة فهي كبيرة باختلاف المواقع؛ فمثلا Uppington تملك تقريبا خمس أضعاف الطاقة المباشرة في لندن.

زوايا الأزموت موجبة في اتجاه جنوب شرقي وسالبة في اتجاه جنوب غربي.

الخوارزمية

تتألف خوارزمية الحساب من الخطوات التالية:

الخطوة 1: تشمل تحديد البيانات الخمسة التالية:

- SC الثابت الشمسي solar constant وهو قيمة تقديرية للاستطاعة الشمسية على المتر المربع كمتوسط سنوي في محيط الغلاف الجوي، تتراوح قيمته بين 1353 W/m^2 و 1377 W/m^2 . البروفسور Martin Green يعتمد القيمة 1366.1 [3] بينما NASA تعتمد القيمة في المجال $1370-1377$ اعتمادا على القياسات التي أجرتها [1].
- L زاوية خط العرض لموقع اللاقط
- Σ زاوية ميل اللاقط
- $\bar{H}$ الطاقة الشمسية الإجمالية اليومية كمتوسط شهري على سطح أفقي لكل شهر من شهور السنة وواحدتها $\text{kWh/m}^2.\text{day}$.
- الشهر موضع الاهتمام
- ρ انعكاسية الأرض Ground Reflectivity وتؤخذ من الجداول كالجدول 7-2:

الجدول 7-2 : قيم تقريبية لانعكاسية بعض أنواع الأراضي

الانعكاسية	غطاء الأرض
0.2	أرض قاحلة جافة
0.3	أرض عشبية جافة
0.4	أرض رملية صحراوية
0.5 – 0.8	ثلج

الخطوة 2: حساب زاوية الانحراف الشمسي الوسطية لأجل يوم في الشهر المعطى، وعادة يُعتمد منتصف الشهر كأبسط خيار؛ كما يمكن اعتماد أيام نموذجية للشهر كما يبين الجدول 2-8.

الجدول 2-8: الأيام النموذجية لحساب المتوسط الشهري لزاوية الانحراف

التاريخ	رقم يوم السنة
17 Jan	17
15 Feb	46
17 Mar	76
15 Apr	105
15 May	135
11 Jun	162
18 Jul	199
17 Aug	229
15 Sep	258
15 Oct	288
14 Nov	318
12 Dec	346

الخطوة 3: حساب $\bar{I}_0$ وهي الطاقة الشمسية اليومية كمتوسط شهري على سطح أفقي على حدود الغلاف الجوي average daily extraterrestrial insolation [kWh/m².day]

$$\bar{I}_0 = \left(\frac{24}{\pi} \right) SC \left[1 + 0.034 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] (\cos L \cos \delta \sin H_{SR} + H_{SR} \sin L \sin \delta) \quad (2.23)$$

حيث H_{SR} الزاوية الساعية للشروق مقاسةً بالراديان، يمكن حساب $\bar{I}_0$ لجميع أيام الشهر وإيجاد القيمة اليومية الوسطية، والطريقة الأبسط ولكن بدقة مقبولة هو حساب $\bar{I}_0$ لمنتصف الشهر أو لليوم النموذجي للشهر موضع الاهتمام.

الخطوة 4: حساب مؤشر الصفاء (Clearness index (K_T) الذي يصف الإضعاف الوسيطى للإشعاع الشمسي من قبل الغلاف الجوي لكل شهر من شهور السنة لموقع النظام الشمسي:

$$\text{Clearness index } K_T = \frac{\bar{I}_H}{\bar{I}_0} \quad (2.24)$$

المؤشر عالي القيمة يشير إلى سماء صافية clear sky حيث معظم الإشعاع الواصل إلى الأرض يكون مباشراً، بينما يدل المؤشر المنخفض على ظروف جوية سيئة مايجعل المركبة المنتثرة هي المائدة.

الخطوة 5: حساب الطاقة الشمسية المنتثرة على سطح أفقي $\bar{I}_{DH}$ بالعلاقة:

$$\frac{\bar{I}_{DH}}{\bar{I}_H} = 1.390 - 4.027K_T + 5.531K_T^2 - 3.108K_T^3 \quad (2.25)$$

الخطوة 6: حساب الطاقة الشمسية المباشرة على سطح أفقي $\bar{I}_{BH}$:

$$\bar{I}_{BH} = \bar{I}_H - \bar{I}_{DH} \quad (2.26)$$

الخطوة 7: حساب مركبات الطاقة الشمسية على اللاقط المائل: المنتثرة $\bar{I}_{DC}$ والمنعكسة $\bar{I}_{RC}$ والمباشرة $\bar{I}_{BC}$ من العلاقات التالية:

$$\bar{I}_{DC} = \bar{I}_{DH} \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) \quad (2.27)$$

$$\bar{I}_{RC} = \rho \bar{I}_H \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) \quad (2.28)$$

$$\bar{I}_{BC} = \bar{I}_{RH} \frac{\cos(L - \Sigma) \cos \delta \sin H_{SRC} + H_{SRC} \sin(L - \Sigma) \sin \delta}{\cos L \cos \delta \sin H_{SR} + H_{SR} \sin L \sin \delta} \quad (2.29)$$

حيث

H_{SR} الزاوية الساعية للشروق فوق الأفق مقدرة بالراديان وتُحسب من المعادلة (2.20)

H_{SRC} الزاوية الساعية للشروق لأجل اللاقط (عندما تضرب الشمس سطح اللاقط أولاً، $\theta = 90^\circ$)

$$H_{SRC} = \min\{\cos^{-1}(-\tan L \tan \delta), \cos^{-1}[-\tan(L - \Sigma) \tan \delta]\} \quad (2.30)$$

الخطوة 8: حساب الطاقة الشمسية الإجمالية الواردة إلى اللاقط المائل:

مثال 2-7: أحسب الطاقة الشمسية الإجمالية الوسطية في اليوم لشهر تموز على لاقط موجه للجنوب ومائل بزاوية 30 درجة مع الأفق. اللاقط مركب في موقع خط عرضه $37.73^\circ N$ حيث الطاقة الشمسية الإجمالية على سطح أفقي 7.32 kWh/m².day

الحل:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (196 - 81) \right] = 21.35^\circ$$

$$H_{SR} = \cos^{-1}(-\tan L \tan \delta) = \cos^{-1}(-\tan 37.73^\circ \tan 21.35^\circ) = 107.6^\circ = 1.878 \text{ radians}$$

$$\begin{aligned}
\bar{I}_0 &= \left(\frac{24}{\pi}\right) \text{SC} \left[1 + 0.034 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] (\cos L \cos \delta \sin H_{SR} + H_{SR} \sin L \sin \delta) \\
&= \left(\frac{24}{\pi}\right) 1.37 \left[1 + 0.034 \cos \left(\frac{360 \cdot 197}{365} \right) \right] (\cos 37.73^\circ \cos 21.35^\circ \sin 107.6^\circ \\
&\quad + 1.878 \sin 37.73^\circ \sin 21.35^\circ) \\
&= 11.34 \text{ kWh/m}^2\text{-day}
\end{aligned}$$

$$K_T = \frac{\bar{I}_H}{\bar{I}_0} = \frac{7.32 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{day}}{11.34 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{day}} = 0.645$$

$$\begin{aligned}
\frac{\bar{I}_{DH}}{\bar{I}_H} &= 1.390 - 4.027 K_T + 5.531 K_T^2 - 3.108 K_T^3 \\
&= 1.390 - 4.027 (0.645) + 5.531 (0.645)^2 - 3.108 (0.645)^3 = 0.258
\end{aligned}$$

$$\bar{I}_{DH} = 0.258 \cdot 7.32 = 1.89 \text{ kWh/m}^2\text{-day}$$

$$\bar{I}_{DC} = \bar{I}_{DH} \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) = 1.89 \left(\frac{1 + \cos 30^\circ}{2} \right) = 1.76 \text{ kWh/m}^2\text{-day}$$

$$\bar{I}_{RC} = \rho \bar{I}_H \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) = 0.2 \cdot 7.32 \left(\frac{1 - \cos 30^\circ}{2} \right) = 0.10 \text{ kWh/m}^2\text{-day}$$

$$\bar{I}_{RH} = \bar{I}_H - \bar{I}_{DH} = 7.32 - 1.89 = 5.43 \text{ kWh/m}^2\text{-day}$$

$$\begin{aligned}
H_{SRC} &= \min\{\cos^{-1}(-\tan L \tan \delta), \cos^{-1}[-\tan(L - \Sigma) \tan \delta]\} \\
&= \min[\cos^{-1}(-\tan 37.73^\circ \tan 21.35^\circ), \cos^{-1}[-\tan(37.73 - 30)^\circ \tan 21.35^\circ]] \\
&= \min[107.6^\circ, 93.0^\circ] = 93.0^\circ = 1.624 \text{ radians}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{R}_B &= \frac{\cos(L - \Sigma) \cos \delta \sin H_{SRC} + H_{SRC} \sin(L - \Sigma) \sin \delta}{\cos L \cos \delta \sin H_{SR} + H_{SR} \sin L \sin \delta} \\ &= \frac{\cos(37.73 - 30)^\circ \cos 21.35^\circ \sin 93^\circ + 1.624 \sin(37.73 - 30)^\circ \sin 21.35^\circ}{\cos 37.73^\circ \cos 21.35^\circ \sin 107.6^\circ + 1.878 \sin 37.73^\circ \sin 21.35^\circ} \\ &= 0.893\end{aligned}$$

$$\bar{T}_{BC} = \bar{T}_{BH} \bar{R}_B = 5.43 \cdot 0.893 = 4.85 \text{ kWh/m}^2\text{-day}$$

$$\bar{T}_C = \bar{T}_{BC} + \bar{T}_{DC} + \bar{T}_{RC} = 4.85 + 1.76 + 0.10 = 6.7 \text{ kWh/m}^2\text{-day}$$

يقوم معظم هيئات ومخابر الطاقة الشمسية في العالم بنشر جداول البيانات الشمسية للمدن والبلدات في دولها، وأشهرها جداول المخبر الوطني الأمريكي للطاقت المتجددة NREL. يبين الجدول 2-9 الطاقة الشمسية لكل شهر الواردة إلى لاقط مائل بزوايا ميل ثلاثة هي $L - 15^\circ$ و L و $L + 15^\circ$ (L هي زاوية خط العرض للمكان) و درجة الحرارة الوسطية المعظمى لمدينة لوس أنجلوس التي خط عرضها يساوي تقريبا خط عرض مدينة دمشق.

جدول 2-9: البيانات الشمسية لمدينة لوس أنجلوس

Los Angeles, CA: Latitude 33.93°N													
Tilt	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec	Year
Lat - 15	3.8	4.5	5.5	6.4	6.4	6.4	7.1	6.8	5.9	5.0	4.2	3.6	5.5
Lat	4.4	5.0	5.7	6.3	6.1	6.0	6.6	6.6	6.0	5.4	4.7	4.2	5.6
Lat + 15	4.7	5.1	5.6	5.9	5.4	5.2	5.8	6.0	5.7	5.5	5.0	4.5	5.4
90	4.1	4.1	3.8	3.3	2.5	2.2	2.4	3.0	3.6	4.2	4.3	4.1	3.5
I-Axis (Lat)	5.1	6.0	7.1	8.2	7.8	7.7	8.7	8.4	7.4	6.6	5.6	4.9	7.0
Temp (°C)	18.7	18.8	18.6	19.7	20.6	22.2	24.1	24.8	24.8	23.6	21.3	18.8	21.3

11-2 قياسات الإشعاع الشمسي Solar radiation measurements

ثمة كميتان شائعتان لتحديد الإشعاع الشمسي هما: الاستطاعة الشمسية solar irradiance والطاقة الشمسية solar irradiation or insolation (أو طاقة الإشعاع الشمسي). الاستطاعة الشمسية هي كثافة الاستطاعة الأنية kW/m^2 بينما الطاقة الشمسية هي الكمية الإجمالية من الطاقة الشمسية المستقبلية في موقع معين خلال فترة زمنية محددة و تقاس عادة بالوحدة $\text{kWh/(m}^2 \text{ day)}$ أو $\text{MJ/m}^2 \text{ per year}$. تتغير الاستطاعة الشمسية خلال اليوم من 0 kW/m^2 في الليل إلى قيمة أعظمية حوالي 1 kW/m^2 ، وتعتمد بشدة على الموقع والطقس المحلي. تتألف قياسات الاستطاعة الشمسية من قياسات الإشعاع الإجمالي و/أو الإشعاع المباشر التي تُنجز دورياً خلال اليوم. يستخدم جهاز البيرانوميتر pyranometer لقياس الإشعاع الإجمالي و جهاز البرهيليوميتر pyrhelimeter لقياس الإشعاع المباشر.

توجد طريقة بديلة أقل دقة ولكنها أرخص لقياس الاستطاعة الشمسية باستخدام مسجل سطوع الشمس sunshine recorder (يسمى أيضاً مسجل Campbell-Stokes). يقيس المسجل عدد الساعات من اليوم التي يكون فيها السطوع فوق مستوى معين (عادة 200 W/m^2). تستخدم البيانات المتحصلة لإيجاد الطاقة الشمسية عن طريق مقارنة عدد ساعات السطوع المقاسة مع تلك المحسوبة و استخدام عدد من عوامل التصحيح.

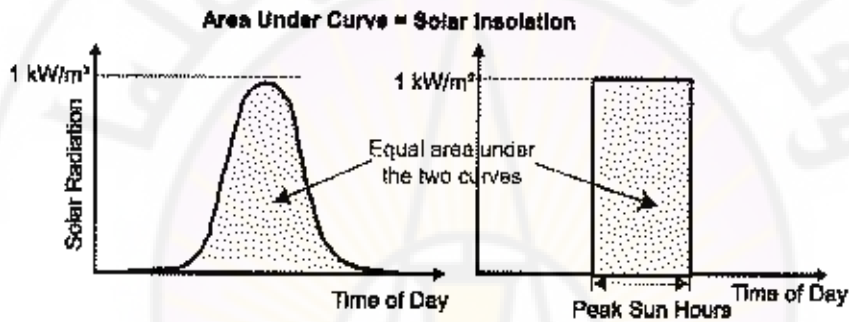
الطريقة الأخيرة لتقدير الطاقة الشمسية (طاقة الإشعاع الشمسي) هي استخدام بيانات غطاء الغيوم cloud cover data المأخوذة من صور الأقمار الصناعية المتوفرة. يُعطى الإشعاع الشمسي لموقع معين بأشكال متعددة هي:

- بيانات وسطية سنوية لموقع معين
- طاقة شمسية وسطية يومية وشهرية وسنوية لموقع معطى
- مخططات إجمالية متساوية الفيض Global isoflux contours لسنة كاملة أو ربع سنة أو لشهر معين (الشكل 1-24)
- ساعات السطوع Sunshine hours

- الطاقة الشمسية المعتمدة على بيانات الأقمار الصناعية للغطاء الغيمي
- حسابات الإشعاع الشمسي

ساعات الشمس القصوى (PSH) Peak sun hours

يُدعى المتوسط اليومي لطاقة الإشعاع الشمسي $\text{kWh/m}^2 \text{ per day}$ أحياناً ساعات الشمس القصوى PSH ويعني هذا المصطلح الطاقة الشمسية التي يستقبلها موقع ما خلال عدد من الساعات بافتراض سطوع الشمس بقيمتها القصوى أي 1 kW/m^2 . إذن، PSH يساوي عددياً المتوسط اليومي لطاقة الإشعاع الشمسي (الشكل 2-20).



الشكل 2-20: ساعات الشمس القصوى

مثلاً، لأجل موقع يستقبل $8 \text{ kWh/m}^2 \text{ per day}$ نقول إنه استقبل 8 ساعات من الشمس في اليوم باستطاعة 1 kW/m^2 . PSH مفيدة في تصميم حجم المولد الكهربائي لأن المواصفات القياسية لموديوالات PV تُحدد استناداً إلى إشعاع 1 kW/m^2 .

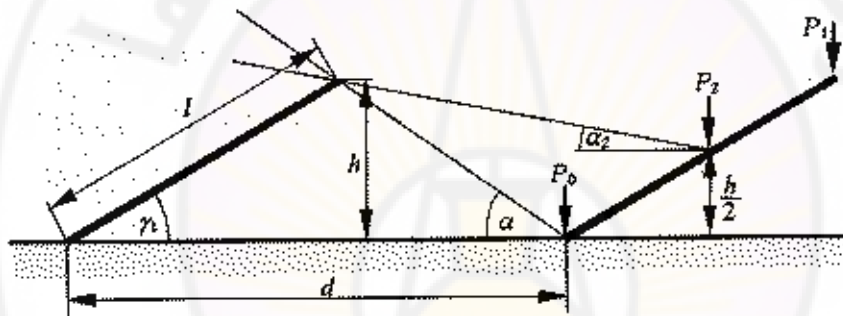
12-2 المسافة المثلى بين حوامل النظام الشمسي Optimal distance of solar energy system support structures

تُصنَّب غالباً النظم الكهروضوئية والحرارية على الأرض أو على سقوف مستوية. تُركَّب اللواقط الشمسية بزاوية ميل ما مستغلة الشمس على نحو أفضل من اللواقط الأفقية. اللواقط المائلة تنظف نفسها ذاتياً من الملوثات مثل الغبار ومخلفات الطيور بواسطة المطر. في بلدان أوروبا الوسطى تتراوح ضياعات الملوثات بين 2% و

و10% لزاوية ميل 30 درجة في حال عدم التنظيف اليدوي. تزداد هذه النسبة زيادة كبيرة في بلدان مثل سورية حيث الأمطار قليلة وخاصة في الربيع والصيف وجزء من الخريف.

تموضع اللواقط على شكل صفوف يمكن أن يسبب تظليلاً ذاتياً لها. سنشرح فيما يلي طريقة تحقق المسافة و زاوية الميل المثلى. تتحدد درجة استغلال الأرض u Degree of ground utilization بواسطة المسافة d بين الصفوف وطول اللاقط l (الشكل 21-2):

$$u = \frac{l}{d} \quad (2.32)$$



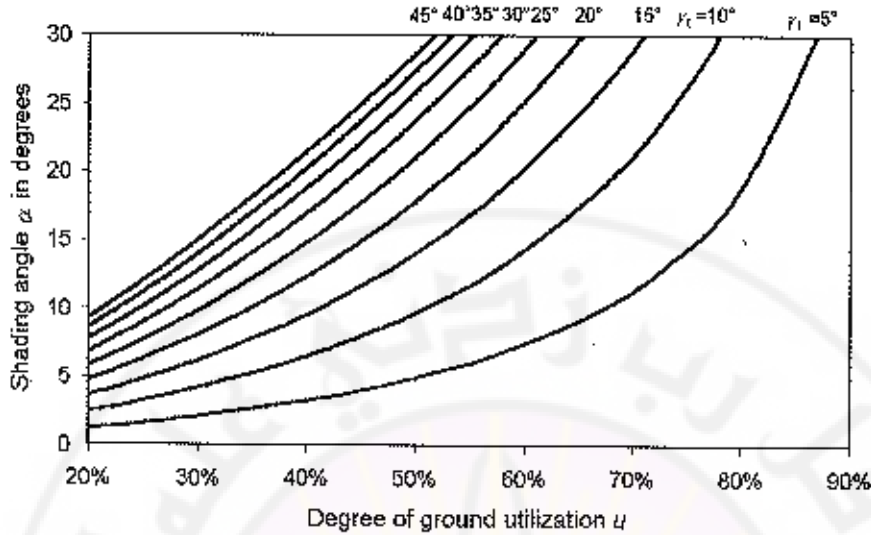
شكل 21-2: أبعاد النظام الشمسي و صفوف اللواقط

زيادة الاستغلال u تزيد ضياعات التظليل. يمتد التظليل على مواضع مختلفة من النظام الشمسي بدرجات مختلفة. النقطة الأكثر عرضة للتظليل هي P_0 .

زاوية التظليل shading angle:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{u \sin \gamma_t}{1 - u \cos \gamma_t} \right) \quad (2.33)$$

هي تابع لاستغلال الأرض u و زاوية ميل اللاقط γ_t (الشكل 22-2).



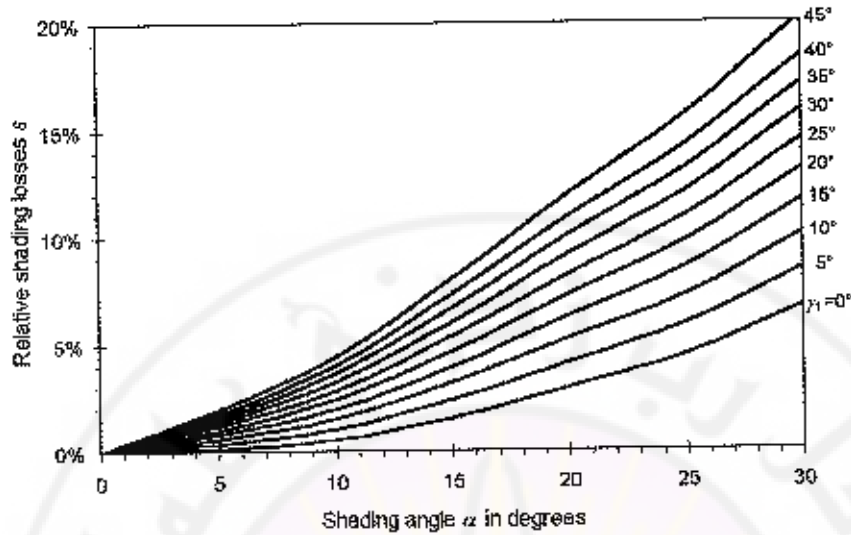
شكل 2-22: زاوية التظليل كنابع لدرجة استغلال الأرض وزاوية ميل اللواقط

إذا كانت الشمس أمام النظام الشمسي مباشرة و ارتفاع الشمس أقل من زاوية التظليل، يحدث التظليل الذاتي. مع تزايد زاوية التظليل تزداد ضياعات الإشعاع الشمسي. ولكن يجب حساب الضياعات لكل موقع بشكل منفرد. تجرى الحسابات التالية لبرلين ويمكن استخدامها لمواقع أخرى ذات خط عرض حول 50 درجة. يبين الشكل 2-23 ضياعات التظليل النسبية s في النقطة P_0 كنابع لزاويتي التظليل والميل حيث:

$$s = 1 - \frac{H_{G,tilt,red}}{H_{G,tilt}} \quad (2.34)$$

حيث $H_{G,tilt}$ الطاقة الشمسية السنوية على سطح مائل غير مظلل و $H_{G,tilt,red}$ الطاقة بوجود تظليل. يظهر الشكل 2-32 أن النظم الشمسية ذات زاوية الميل الكبيرة هي أكثر حساسية لضياعات التظليل.

نظراً للحساسية البالغة لنظم PV للتظليل، يمكن استخدام الاستطاعة الشمسية في النقطة P_0 كمراجع للنظام الكهروضوئي برمته. يبين الجدول 2-10 زاوية التظليل وضياعات التظليل لأجل درجات استغلال أرض مختلفة و لزاويتي ميل 10 و 30 درجة لمدينة برلين.



شكل 2-23: ضياعات التظليل النسبية في النقطة P_0 كتابع لزاويتي التظليل والميل لمدينة برلين $52.5^\circ N$

جدول 2-10: ضياعات التظليل وعامل الكسب وعامل التصحيح الكلي للنقطة P_0 لأجل درجات استغلال مختلفة و لزاويتي ميل 10 و 30 درجة

u	α	$\gamma_t = 30^\circ$			$\gamma_t = 10^\circ$			c
		s	g	c	s	g	c	
1:1.5	38.8°	0.246	1.193	0.900	18.6°	0.048	1.088	1.036
1:2.0	23.8°	0.116	1.193	1.055	9.7°	0.015	1.088	1.072
1:2.5	17.0°	0.074	1.193	1.105	6.5°	0.009	1.088	1.078
1:3.0	13.2°	0.048	1.193	1.136	4.9°	0.006	1.088	1.081
1:3.5	10.7°	0.035	1.193	1.151	3.9°	0.004	1.088	1.084
1:4.0	9.1°	0.029	1.193	1.158	3.3°	0.004	1.088	1.084

يمثل عامل الكسب (g) gain factor الطاقة المكتسبة بسبب زاوية ميل السطح. عامل الربح هو نسبة الطاقة الإجمالية السنوية على السطح المائل $H_{G,tilt}$ إلى تلك على سطح أفقي $H_{G,hor}$:

$$g = \frac{H_{G,tilt}}{H_{G,hor}} \quad (2.35)$$

عامل التصحيح الكلي c يمثل مكسب الميل وضياح التظليل:

$$c = (1 - s)g \quad (2.36)$$

إن إنقاص درجة استغلال الأرض إلى ما دون $1/3 = 0.33$ لايقود إلى تخفيض مهم للضياحات. لأجل زوايا ميل منخفضة، يُفضل اعتماد درجات استغلال أكبر من $1/4 = 0.4$. أخذا بالحسبان لضياحات التلوث حوالي 5% لأجل زاوية ميل 10 درجات، يوصى باعتماد زوايا ميل أخفض لأجل درجات استغلال أكبر من $1/2 = 0.5$.

النظم الشمسية الحرارية أقل حساسية للتظليل من النظم الشمسية الكهروضوئية. يمكن استخدام الاستطاعة الشمسية الوسطية لتقدير خرج النظام الشمسي الحراري. يتم ذلك بحساب ضياحات التظليل الوسطية في النقاط P_0, P_1, P_2 . الضياحات في P_0 تم حسابها؛ P_1 لا تتعرض للتظليل إطلاقاً. زاوية التظليل للنقطة P_2 الواقعة في مركز اللاقط هي:

$$\alpha_2 = \arctan \left(\frac{u \cdot \sin \gamma_i}{2 - u \cdot \cos \gamma_i} \right) \quad (2.37)$$

يبين الجدول 11-2 ضياحات التظليل النسبية الوسطية وعامل التصحيح الكلي c للنقاط $P_{0,1,2}$ لأجل درجات استغلال مختلفة و لزوايتي ميل 10 و 30 درجة لبرلين. بالمقارنة مع النقطة P_0 ، تصبح ضياحات التظليل أقل بكثير. لا تترجى تحسينات لدرجات استغلال أقل من 0.4. لا يوصى باستخدام زوايا ميل أقل.

جدول 11-2: ضياحات التظليل النسبية الوسطية وعامل التصحيح الكلي c للنقاط $P_{0,1,2}$ لأجل درجات استغلال مختلفة و لزوايتي ميل 10 و 30 درجة لبرلين

u	$\bar{s}$	$\gamma_i = 30^\circ$		$\bar{s}$	$\gamma_i = 10^\circ$	
		g	c		g	c
1:1.5	0.098	1.193	1.076	0.018	1.088	1.068
1:2.0	0.048	1.193	1.136	0.006	1.088	1.081
1:2.5	0.032	1.193	1.155	0.004	1.088	1.084
1:3.0	0.021	1.193	1.168	0.003	1.088	1.085
1:3.5	0.016	1.193	1.174	0.002	1.088	1.086
1:4.0	0.013	1.193	1.177	0.002	1.088	1.086

2-13 مسائل للحل: (بالإنكليزية كي يعتاد الطالب على المصطلحات)

- 2.1 Using (2.7), determine the following:
- The date on which the earth will be a maximum distance from the sun.
 - The date on which it will be a minimum distance from the sun.
- 2.2 What does (2.8) predict for the date of the following:
- The two equinox dates
 - The two solstice dates
- 2.3 At what angle should a South-facing collector at 36° latitude be tipped up to in order to have it be normal to the sun's rays at solar noon on the following dates:
- March 21
 - January 1
 - April 1
- 2.4 Consider June 21st (the solstice) in Seattle (latitude 47°).
- Use (2.13) to help find the time of day (solar time) at which the sun will be due West.
 - At that time, what will the altitude angle of the sun be?
 - As a check on the validity of (2.13), use your answers from (a) and (b) in (2.10) and (2.11) to be sure they yield an azimuth angle of 90° .
- 2.5 Find the altitude angle and azimuth angle of the sun at the following (solar) times and places:
- March 1st at 10:00 A.M. in New Orleans, latitude 30°N .
 - July 1st at 5:00 P.M. in San Francisco, latitude 38°
 - December 21st at 11 A.M. at latitude 68°
- 2.6 Suppose you are concerned about how much shading a tree will cause for a proposed photovoltaic system. Standing at the site with your compass and plumb bob, you estimate the altitude angle of the top of the tree to be about 30° and the width of the tree to have azimuth angles that range from about 30° to 45° West of South. Your site is at latitude 32° . Using a sun path diagram (Appendix B), describe the shading problem the tree will pose (approximate shaded times each month).

- 2.7 Suppose you are concerned about a tall thin tree located 100 ft from a proposed PV site. You don't have a compass or protractor and plumb bob, but you do notice that an hour before solar noon on June 21, it casts a 30-ft shadow directly toward your site. Your latitude is 32°N .
- How tall is the tree?
 - What is its azimuth angle with respect to your site?
 - What are the first and last days in the year when the shadow will land on the site?
- 2.8 Using Figure 2-17, what is the greatest difference between local standard time for the following locations and solar time? At approximately what date would that occur?
- San Francisco, CA (longitude 122° , Pacific Time Zone)
 - Boston, MA (longitude 71.1° , Eastern Time Zone)
 - Boulder, CO (longitude 105.3° , Mountain Time Zone)
 - Greenwich, England (longitude 0° , Local time meridian 0°)
- 2.9 Using Figure 2-17, roughly what date(s) would local time be the same as solar time in the cities described in Problem 2.8?
- 2.10 Find the local Daylight Savings Time for geometric sunrise in Seattle (latitude 47° , longitude 123°W) on the summer solstice ($n = 172$).
- 2.11 Find the local Daylight Savings time at which the upper limb of the sun will emerge at sunrise in Seattle (latitude 47° , longitude 123°) on the summer solstice.
- 2.12 Air Mass AM1.5 is supposedly the basis for a standard 1-sun insolation of 1 kW/m^2 . To see whether this is reasonable, compute the following for a clear day on March 21st:
- What solar altitude angle gives AM1.5?
 - What would be the direct beam radiation normal to the sun's rays?
 - What would be the diffuse radiation on a collector normal to the rays?
 - What would be the reflected radiation on a collector normal to the rays with $\rho = 0.2$?
 - What would be the total insolation normal to the rays?

- 2.13 What is the approximate solar irradiance on a clear day with the Sun at zenith?
(a) 1 W/cm^2 ; (b) 0.01 W/cm^2 ; (c) 0.1 W/cm^2 .
- 2.14 What are the three components of solar radiation on an inclined panel?
- 2.15 What are the main physical processes that determine the attenuation of solar radiation in the atmosphere?
- 2.16 Which of the following statements are true?
(a) The average daily irradiation over the year is maximum at the equator.
(b) Regions with high latitude experience relatively high amounts of diffuse radiation.
(c) The seasonal variation of daily solar irradiation is approximately independent of the latitude.
- 2.17 What are the main angular quantities that characterise the (a) yearly and (b) daily apparent motion of the Sun?
- 2.18 What is the maximum solar elevation at a site with latitude 40°N and when does it occur?
- 2.19 What measured solar radiation data are usually used to determine the energy input to the PV system?
- 2.20 Describe the principal steps of the calculation to determine the solar radiation on an inclined surface.
- 2.21 For a photovoltaic installation at latitude 30°N , you have the option to position the panels at an angle $0^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ$, or 90° to the horizontal plane. Which panel orientation would you choose to obtain the maximum energy: (a) over the year; (b) in the summer; (c) in the winter?

2.22

The mean daily solar radiation on the horizontal plane for a location at latitude 38.1°N is given by the following Table:

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
(kWh/m^2)	2.62	3.11	4.75	5.51	6.66	6.92	7.34	6.33	5.02	3.84	2.46	2.30

- (i) Determine the mean daily solar radiation I_0 outside the Earth's atmosphere for each month of the year. Hence, find the values of the clearness index K_T .
- (ii) Determine the daily global radiation for α angles $10^\circ, 20^\circ, \dots, 90^\circ$ assuming ground reflectivity 0.2.

- (iii) What angle of inclination would you recommend to maximise input to PV system:
- during the worst month of the year;
 - to obtain the highest energy incident on the inclined panels over the whole year;
 - to obtain the highest energy during the summer months?

14-2 ملحق الفصل الثاني [2]

Useful conversion factors عوامل تحويل مفيدة A

LENGTH

1 inch	= 2.540 cm
1 foot	= 0.3048 m
1 yard	= 0.9144 m
1 mile	= 1.6093 km
1 meter	= 3.2808 ft
	= 39.37 in.
1 kilometer	= 0.6214 mile

AREA

1 square inch	= 6.452 cm ²
	= 0.0006452 m ²
1 square foot	= 0.0929 m ²
1 acre	= 43,560 ft ²
	= 0.0015625 sq mile
	= 4046.85 m ²
	= 0.404685 ha
1 square mile	= 640 acre
	= 2.604 km ²
	= 259 ha
1 square meter	= 10.764 ft ²
1 hectare	= 2.471 acre
	= 0.00386 sq mile
	= 10,000 m ²

VOLUME

1 cubic foot	≈ 0.03704 cu yd ≈ 7.4805 gal (U.S.) ≈ 0.02832 m ³ ≈ 28.32 L
1 acre foot	$\approx 43,560$ ft ³ ≈ 1233.49 m ³ $\approx 325,851$ gal (U.S.)
1 gallon (U.S.)	≈ 0.134 ft ³ ≈ 0.003785 m ³ ≈ 3.785 L
1 cubic meter	$\approx 8.11 \times 10^{-4}$ Ac ft ≈ 35.3147 ft ³ ≈ 264.172 gal (U.S.) ≈ 1000 L $\approx 10^6$ cm ³

LINEAR VELOCITY

1 foot per second	≈ 0.6818 mph ≈ 0.3048 m/s
1 mile per hour	≈ 1.467 ft/s ≈ 0.4470 m/s ≈ 1.609 km/h
1 meter per second	≈ 3.280 ft/s ≈ 2.237 mph

MASS

1 pound (avoirdupois)	≈ 0.453592 kg
1 kilogram	≈ 2.205 lb (avoirdupois) ≈ 35.27396 oz (avoirdupois)
1 ton (short)	≈ 2000 lb (avoirdupois) ≈ 907.2 kg ≈ 0.9072 ton (metric)
1 ton (metric)	≈ 1000 kg ≈ 2204.622 lb (avoirdupois) ≈ 1.1023 ton (short)

FLOWRATE

1 cubic foot per second	= 0.028316 m ³ /s
	= 448.8 gal (U.S.)/min (gpm)
1 cubic foot per minute	= 4.72 × 10 ⁻² m ³ /s
	= 7.4805 gpm
1 gallon (U.S.) per minute	= 6.31 × 10 ⁻⁵ m ³ /s
1 million gallons per day	= 0.0438 m ³ /s
1 million acre feet per year	= 39.107 m ³ /s
1 cubic meter per second	= 35.315 ft ³ /s (cfs)
	= 2118.9 ft ³ /min (cfm)
	= 22.83 × 10 ⁶ gal/d
	= 70.07 Ac ft/d

DENSITY

1 pound per cubic foot	= 16.018 kg/m ³
1 pound per gallon	= 1.2 × 10 ⁻⁵ mg/L
1 kilogram per cubic meter	= 0.062428 lb/ft ³
1 gram per cubic centimeter	= 62.427961 lb/ft ³

CONCENTRATION

1 milligram per liter in water (specific gravity = 1.0)	= 1.0 ppm
	= 1000 ppb
	= 1.0 g/m ³
	= 8.34 lb per million gal

PRESSURE

1 atmosphere	= 76.0 cm Hg = 14.696 lb/in. ² (psia) = 29.921 in. of Hg (32°F) = 33.8995 ft of H ₂ O (32°F) = 101.325 kPa
1 pound per square inch	= 2.307 ft of H ₂ O = 2.036 in. Hg = 0.06805 atm
1 Pascal (Pa)	= 1 N/m ² = 1.45 × 10 ⁻⁴ psia
1 inch of mercury (32°F) (60°F)	= 3386.4 Pa = 3376.9 Pa

ENERGY

1 British Thermal Unit	= 778 ft-lb = 252 cal = 1055 J = 0.2930 Wh
1 quadrillion Btu	= 10 ¹⁵ Btu = 1055 × 10 ¹⁵ J = 2.93 × 10 ¹¹ kWh = 172 × 10 ⁶ barrels (42-gal) of oil equivalent = 36.0 × 10 ⁶ metric tons of coal equivalent = 0.93 × 10 ¹² cubic feet of natural gas equivalent
1 joule	= 1 N-m = 9.48 × 10 ⁻⁴ Btu = 0.73756 ft-lb
1 kilowatt-hour	= 3600 kJ = 3412 Btu = 860 kcal
1 kilocalorie	= 4.185 kJ

POWER

1 kilowatt	= 1000 J/s = 3412 Btu/h = 1.340 hp
1 horsepower	= 746 W = 550 ft-lb/s
1 quadrillion Btu per year	= 0.471 million barrels of oil per day = 0.03345 TW

B قيم الاستطاعة الشمسية الساعية لخطوط عرض مختلفة

Hourly clear-sky power insolation tables [W/m²]

Clear-Sky Irradiation Beam + Diffuse										Latitude 20°N									
Solar	Tracking		Tilt Angle Latitude 20°							Solar	Tracking		Tilt Angle Latitude 20°						
Time	1-Axis	2-Axis	0	20	30	40	50	60	90	Time	1-Axis	2-Axis	0	20	30	40	50	60	90
JANUARY 21 (W/m ²)										DECEMBER 21 (W/m ²)									
7.5	341	359	88	103	122	134	149	164	151	7.5	235	232	55	72	87	100	110	118	114
8.4	786	828	303	418	459	486	499	498	409	8.4	736	794	269	363	439	473	492	497	428
9.3	923	971	525	670	715	739	740	721	540	9.3	883	955	486	645	697	729	740	739	612
10.2	989	1030	696	860	903	923	914	878	624	10.2	951	1025	651	822	886	914	915	889	660
11.1	1030	1067	804	978	1023	1037	1021	975	673	11.1	980	1057	700	849	1005	1021	1021	985	711
12	1018	1076	841	1018	1063	1076	1053	1003	690	12	988	1066	706	898	1042	1065	1041	1017	728
kWh/day	9.10	9.60	5.61	7.08	7.51	7.72	7.70	7.46	5.48	kWh/day	8.57	9.23	5.29	6.77	7.27	7.55	7.61	7.45	5.71
FEBRUARY 21 (W/m ²)										NOVEMBER 21 (W/m ²)									
7.5	523	526	321	362	376	385	389	388	354	7.5	299	315	51	94	119	134	134	140	135
8.4	826	867	381	460	476	486	478	456	318	8.4	785	795	286	407	446	472	484	493	398
9.3	977	986	610	710	730	738	706	662	425	9.3	900	948	515	657	700	724	726	707	551
10.2	1028	1043	766	901	919	916	875	814	493	10.2	964	1019	665	845	889	907	899	864	616
11.1	1053	1069	897	1020	1037	1024	951	866	545	11.1	993	1049	792	952	1006	1020	1006	960	665
12	1061	1078	935	1061	1078	1063	1017	940	560	12	1002	1058	828	1008	1045	1069	1041	992	682
kWh/day	9.91	10.00	6.53	7.57	7.76	7.73	7.47	7.00	4.44	kWh/day	9.82	9.31	5.51	6.89	7.35	7.56	7.53	7.30	5.31
MARCH 21 (W/m ²)										OCTOBER 21 (W/m ²)									
7.5	630	630	193	203	209	206	177	156	81	7.5	456	461	112	141	161	169	172	171	141
8.4	889	881	456	481	474	452	418	375	182	8.4	808	818	368	443	462	468	461	441	313
9.3	983	983	684	724	712	686	629	559	266	9.3	937	949	593	690	709	700	686	645	439
10.2	1004	1004	809	910	896	855	790	702	331	10.2	997	1012	766	877	895	888	854	796	484
11.1	1080	1089	970	1027	1011	945	892	792	371	11.1	1026	1042	875	995	1012	1000	958	889	599
12	1067	1067	1008	1067	1051	1003	926	825	385	12	1035	1031	912	1033	1051	1058	1004	921	534
kWh/day	10.24	10.24	7.34	7.76	7.63	7.29	6.74	5.99	2.83	kWh/day	9.46	9.62	6.44	7.34	7.53	7.50	7.26	6.81	4.26
APRIL 21 (W/m ²)										SEPTEMBER 21 (W/m ²)									
6.6	84	86	24	3	8	7	7	6	4	6.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.5	654	673	258	213	196	164	128	90	32	7.5	560	560	187	194	190	181	168	150	78
8.4	847	871	510	476	430	389	330	261	41	8.4	833	833	415	467	458	437	404	360	136
9.3	937	963	137	760	657	595	516	435	88	9.3	943	945	668	703	691	669	609	542	299
10.2	986	1011	393	874	821	756	663	582	143	10.2	1002	1002	840	886	870	830	767	681	322
11.1	1013	1006	998	984	934	878	756	633	175	11.1	1030	1030	917	1000	993	939	866	769	362
12	1022	1043	1004	1023	971	892	788	661	185	12	1039	1039	984	1039	1002	975	900	799	376
kWh/day	10.06	10.32	7.04	7.55	7.08	6.43	5.59	4.59	1.19	kWh/day	9.80	9.80	7.16	7.54	7.41	7.07	6.53	5.80	2.77
MAY 21 (W/m ²)										AUGUST 21 (W/m ²)									
6.6	205	222	50	24	23	22	21	19	13	6.6	65	67	12	8	7	7	6	6	4
7.5	626	677	392	215	183	136	86	57	36	7.5	607	627	281	317	302	282	238	91	16
8.4	787	850	528	456	420	334	259	178	47	8.4	809	839	498	485	429	381	323	257	48
9.3	870	936	731	662	599	519	425	320	51	9.3	905	931	714	684	642	581	505	415	91
10.2	919	964	886	823	744	665	558	435	53	10.2	959	984	874	854	807	738	648	540	142
11.1	946	1009	964	917	853	759	643	509	55	11.1	988	1011	976	961	912	837	739	619	175
12	958	1017	1017	958	887	790	672	534	55	12	998	1020	1011	998	948	871	770	646	187
kWh/day	9.66	10.37	7.06	7.18	6.51	5.66	4.66	3.57	0.87	kWh/day	9.66	9.93	7.65	7.38	6.93	6.28	5.43	4.50	1.18
JUNE 21 (W/m ²)										JULY 21 (W/m ²)									
6.6	229	256	64	31	29	28	26	24	16	6.6	188	204	48	25	24	23	21	19	13
7.5	699	666	700	224	156	125	71	61	41	7.5	606	652	288	223	181	136	87	60	40
8.4	752	839	528	443	382	311	232	147	50	8.4	765	839	521	449	396	330	256	136	50
9.3	833	918	729	610	571	486	388	280	55	9.3	851	918	720	652	590	511	419	326	55
10.2	881	967	873	793	719	625	514	382	57	10.2	901	968	874	810	743	655	549	428	58
11.1	909	1002	967	891	814	714	594	459	58	11.1	930	994	900	809	740	646	532	500	59
12	921	1000	999	924	846	745	623	483	59	12	943	1003	1008	943	873	818	660	525	59
kWh/day	9.33	10.26	7.91	6.87	6.23	5.32	4.27	3.20	0.61	kWh/day	9.41	10.15	7.84	7.08	6.42	5.58	4.59	3.52	0.61

Clear-Sky Insolation: Beam + Diffuse										Latitude 25°N									
Solar		Tracking		Tilt Angle		Latitude 25°				Solar		Tracking		Tilt Angle		Latitude 25°			
Time	1-Axis	2-Axis	0	20	30	40	50	60	90	Time	1-Axis	2-Axis	0	20	30	40	50	60	90
JANUARY 21 (W/m ²)										DECEMBER 21 (W/m ²)									
7.5	185	195	25	50	61	71	78	83	84	7.5	59	64	6	16	20	24	27	29	30
8.4	735	774	251	367	411	442	461	466	462	8.4	673	723	213	334	381	417	441	452	406
9.3	894	943	464	623	674	706	718	710	562	9.3	853	918	421	588	648	688	708	708	585
10.2	962	1015	629	811	867	898	902	880	664	10.2	927	998	582	776	841	886	884	881	693
11.1	993	1048	733	928	987	1015	1014	983	724	11.1	960	1031	684	893	959	997	1006	985	755
12	1002	1038	769	969	1027	1055	1052	1018	744	12	970	1045	719	932	999	1037	1044	1020	775
kWh/day	8.54	9.01	4.97	6.52	7.03	7.32	7.40	7.36	5.62	kWh/day	7.91	8.52	4.53	6.15	6.70	7.05	7.19	7.13	5.72
FEBRUARY 21 (W/m ²)										NOVEMBER 21 (W/m ²)									
7.5	454	469	95	135	147	157	162	161	180	7.5	149	157	21	42	51	58	64	68	68
8.4	827	886	143	229	255	267	268	261	334	8.4	700	737	244	355	396	426	444	449	388
9.3	955	1008	264	379	408	417	404	391	463	9.3	869	916	455	607	658	690	702	693	550
10.2	1015	1068	333	469	500	504	482	454	553	10.2	941	993	618	795	850	880	885	863	653
11.1	1041	1095	340	489	520	522	493	455	599	11.1	974	1028	721	912	968	997	996	965	713
12	1049	1065	377	529	561	561	501	460	627	12	984	1039	756	942	1009	1037	1034	1001	733
kWh/day	9.63	9.76	6.03	7.23	7.52	7.59	7.45	7.08	4.82	kWh/day	8.25	8.30	4.87	6.37	6.86	7.14	7.21	7.08	5.48
MARCH 21 (W/m ²)										OCTOBER 21 (W/m ²)									
7.5	615	645	183	196	195	189	178	162	91	7.5	964	988	83	118	130	138	143	144	124
8.4	869	869	426	473	471	457	429	389	212	8.4	756	786	330	411	435	447	446	433	323
9.3	973	973	656	714	712	690	648	588	316	9.3	916	928	546	634	686	694	683	652	453
10.2	1025	1025	825	899	898	870	817	740	395	10.2	981	993	713	845	875	879	858	813	544
11.1	1051	1051	932	1016	1014	983	923	836	445	11.1	1012	1027	818	962	993	994	967	912	599
12	1069	1059	966	1056	1054	1022	959	869	462	12	1021	1037	854	1002	1033	1034	1004	946	617
kWh/day	10.12	10.12	1.03	1.65	1.64	1.40	1.35	1.20	0.54	kWh/day	9.16	9.28	5.84	6.99	7.27	7.34	7.20	6.85	4.70
APRIL 21 (W/m ²)										SEPTEMBER 21 (W/m ²)									
6.6	139	143	25	36	33	32	31	30	7	6.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.5	664	683	267	237	212	181	147	108	53	7.5	553	553	177	167	186	179	168	153	86
8.4	847	871	510	469	457	413	358	293	62	8.4	820	820	425	458	456	440	413	375	204
9.3	935	960	719	712	678	624	553	467	143	9.3	934	934	641	694	691	666	627	568	316
10.2	983	1007	830	885	849	789	707	604	210	10.2	992	992	806	875	872	844	792	717	383
11.1	1009	1032	981	994	958	894	804	693	253	11.1	1021	1021	910	989	986	954	895	810	431
12	1017	1039	1015	1032	995	930	834	721	267	12	1030	1030	946	1028	1024	992	930	842	448
kWh/day	10.17	10.43	7.78	7.70	7.33	6.76	6.00	5.07	1.68	kWh/day	9.67	9.67	6.86	7.43	7.40	7.16	6.72	6.09	3.27
MAY 21 (W/m ²)										AUGUST 21 (W/m ²)									
6.6	282	306	76	42	32	31	28	26	17	6.6	112	116	23	15	13	12	11	10	7
7.5	645	698	314	251	210	163	112	60	39	7.5	617	637	260	250	209	178	145	109	37
8.4	794	851	541	481	431	369	297	217	47	8.4	869	834	498	477	446	404	350	288	65
9.3	872	938	737	686	632	559	472	371	51	9.3	903	928	700	695	661	609	540	456	143
10.2	919	984	837	846	789	710	610	494	81	10.2	955	980	880	864	829	770	690	590	206
11.1	945	1008	981	947	889	806	699	573	119	11.1	983	1007	959	971	935	872	785	675	249
12	956	1016	1015	981	923	839	730	600	132	12	993	1015	993	1007	971	907	817	704	264
kWh/day	9.87	10.60	8.08	7.49	6.89	6.11	5.17	4.04	0.84	kWh/day	9.75	10.02	7.60	7.51	7.13	6.60	5.86	4.96	1.68
JUNE 21 (W/m ²)										JULY 21 (W/m ²)									
6.6	307	342	95	52	30	37	35	32	21	6.6	263	286	75	43	33	31	29	27	18
7.5	622	691	327	253	206	154	99	63	42	7.5	621	674	310	248	208	162	113	62	41
8.4	761	842	546	473	416	349	272	188	51	8.4	772	836	514	475	425	364	293	215	51
9.3	837	923	734	669	608	530	437	333	38	9.3	853	921	727	676	622	551	464	365	55
10.2	883	968	879	822	758	673	569	449	57	10.2	902	969	875	833	777	698	600	486	80
11.1	910	993	969	919	853	764	653	524	70	11.1	930	994	908	863	815	732	637	563	117
12	922	1001	1000	952	886	793	682	550	83	12	943	1002	999	966	908	824	713	600	130
kWh/day	9.56	10.32	8.10	7.33	6.65	5.81	4.81	3.73	0.67	kWh/day	9.62	10.36	7.98	7.38	6.79	6.02	5.09	4.03	0.86

Clear-Sky Insolation: Beam + Diffuse										Latitude 30° N											
Solar	Tracking		Tilt Angle Latitude 30°								Solar	Tracking		Tilt Angle Latitude 30°							
Time	1-Axis	2-Axis	0	20	30	40	50	60	90	Time	1-Axis	2-Axis	0	20	30	40	50	60	90		
JANUARY 21 (W/m ²)										DECEMBER 21 (W/m ²)											
7.5	31	33	1	7	9	11	13	14	14	7.5	0	4	6	6	9	9	0	0	0		
8.4	666	740	100	310	354	387	416	421	309	8.4	584	627	155	266	319	346	372	388	365		
9.3	858	940	399	564	623	664	685	686	572	9.3	818	869	351	523	587	635	663	672	584		
10.2	936	987	556	752	819	861	878	869	693	10.2	896	964	508	711	784	834	859	860	713		
11.1	971	1024	656	839	919	982	995	979	764	11.1	934	1006	602	827	905	955	978	972	796		
12	981	1035	690	909	981	1023	1035	1016	787	12	945	1018	636	866	943	996	1018	1009	819		
kWh/day	7.95	8.53	4.31	5.92	6.47	6.83	7.00	6.95	5.64	kWh/day	7.39	7.95	3.86	5.51	6.12	6.51	6.76	6.79	5.71		
FEBRUARY 21 (W/m ²)										NOVEMBER 21 (W/m ²)											
7.5	369	373	68	101	113	123	129	132	118	7.5	37	18	3	4	5	6	7	8	8		
8.4	791	802	302	394	424	441	447	439	343	8.4	628	651	190	296	338	369	391	404	362		
9.3	932	944	512	641	679	697	695	672	493	9.3	830	874	390	549	606	645	666	667	531		
10.2	995	1009	674	830	872	889	880	845	600	10.2	913	963	546	736	801	842	858	850	679		
11.1	1025	1040	776	948	993	1009	995	952	664	11.1	950	1008	644	852	921	962	978	962	790		
12	1034	1049	811	985	1034	1049	1034	988	686	12	961	1014	677	882	961	1000	1014	996	773		
kWh/day	9.26	9.39	5.48	6.81	7.20	7.37	7.32	7.07	5.12	kWh/day	7.64	8.05	4.22	5.77	6.39	6.63	6.81	6.77	5.49		
MARCH 21 (W/m ²)										OCTOBER 21 (W/m ²)											
7.5	382	383	176	188	189	183	176	163	99	7.5	386	380	59	85	96	103	106	111	99		
8.4	853	853	412	460	464	456	435	401	239	8.4	736	745	288	374	402	419	424	417	328		
9.3	960	962	622	698	706	693	661	610	361	9.3	890	902	495	619	655	672	676	649	470		
10.2	1014	1014	784	884	892	876	836	771	454	10.2	960	974	654	804	845	861	853	820	585		
11.1	1049	1049	885	990	1009	992	946	872	513	11.1	994	1008	754	929	969	979	966	925	670		
12	1048	1048	929	1035	1048	1031	983	907	533	12	1004	1018	789	969	1004	1019	1004	964	672		
kWh/day	9.97	9.97	6.07	7.48	7.50	7.41	7.09	6.54	3.87	kWh/day	8.36	8.38	5.29	6.56	6.92	7.09	7.05	6.90	4.95		
APRIL 21 (W/m ²)										SEPTEMBER 21 (W/m ²)											
6.6	193	199	38	25	15	17	16	14	10	6.6	0	0	6	6	6	6	6	6	0		
7.5	670	690	273	248	226	197	164	127	55	7.5	592	582	168	179	179	175	166	153	95		
8.4	815	808	505	467	472	433	383	323	99	8.4	804	801	402	415	413	439	417	385	229		
9.3	930	955	705	717	692	648	585	506	199	9.3	920	926	606	671	683	670	638	588	347		
10.2	957	1000	858	888	864	816	744	681	276	10.2	979	979	766	856	865	849	808	745	438		
11.1	1002	1026	955	996	973	922	845	743	323	11.1	1009	1009	805	909	979	961	916	844	496		
12	1010	1013	988	1033	1010	959	880	775	345	12	1018	1018	899	1007	1018	999	952	877	515		
kWh/day	10.24	10.51	7.66	7.77	7.50	7.03	6.35	5.50	2.23	kWh/day	9.50	9.50	6.51	7.36	7.33	7.19	6.84	6.31	3.72		
MAY 21 (W/m ²)										AUGUST 21 (W/m ²)											
6.6	348	377	103	62	40	38	35	32	21	6.6	164	166	35	24	13	17	16	15	10		
7.5	662	716	333	275	235	189	139	85	49	7.5	624	644	366	242	220	193	161	126	33		
8.4	798	868	504	503	458	400	332	256	48	8.4	806	831	494	485	460	423	374	315	99		
9.3	872	938	731	705	659	595	514	419	30	9.3	897	925	690	700	675	632	576	498	194		
10.2	917	982	880	863	817	748	658	549	149	10.2	949	974	840	867	843	795	725	635	271		
11.1	942	1006	970	962	917	845	750	633	194	11.1	976	1001	934	972	949	899	823	724	321		
12	951	1013	1001	957	931	879	784	662	219	12	985	1009	966	1008	985	934	857	755	338		
kWh/day	10.60	10.77	8.15	7.74	7.39	6.54	5.64	4.64	1.27	kWh/day	9.81	10.09	7.48	7.59	7.32	6.85	6.20	5.37	2.30		
JUNE 21 (W/m ²)										JULY 21 (W/m ²)											
6.6	372	414	127	76	45	43	42	38	25	6.6	327	356	102	63	41	39	36	33	22		
7.5	641	712	350	281	235	184	128	69	43	7.5	638	692	329	272	233	188	139	86	43		
8.4	767	849	506	499	447	384	316	229	51	8.4	777	841	543	496	451	395	328	252	51		
9.3	838	924	740	693	639	569	482	383	55	9.3	854	921	723	695	649	585	506	412	79		
10.2	882	968	877	843	799	715	619	506	102	10.2	900	967	809	850	804	736	647	540	146		
11.1	908	998	964	939	896	804	706	586	145	11.1	927	991	857	948	900	832	737	622	160		
12	919	999	993	972	949	859	737	613	159	12	936	999	987	981	936	864	768	650	206		
kWh/day	9.74	10.72	8.28	7.63	7.01	6.25	5.31	4.24	1.00	kWh/day	9.78	10.53	8.04	7.63	7.10	6.41	5.55	4.54	1.27		

Clear-Sky Insolation: Beam + Diffuse										Latitude 35°N									
Solar	Tracking	Tilt Angle Latitude 35°								Solar	Tracking	Tilt Angle Latitude 35°							
Time	1-Axis 2-Axis	0	20	30	40	50	60	90		Time	1-Axis 2-Axis	0	20	30	40	50	60	90	
JANUARY 21 (W/m ²)										DECEMBER 21 (W/m ²)									
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0		7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	
8.4	572	602	142	244	276	319	343	357	338	8.4	456	490	97	183	236	257	282	298	293
9.3	810	853	331	498	562	607	638	649	548	9.3	748	804	179	349	515	567	602	619	563
10.2	992	951	479	685	760	812	841	844	709	10.2	855	920	424	636	716	775	811	825	716
11.1	942	994	573	810	882	906	903	961	791	11.1	901	968	516	751	838	900	935	943	802
12	951	1006	605	840	923	978	1004	1031	818	12	914	984	547	790	879	942	976	983	830
kWh/day	7.41	7.81	3.65	5.30	5.90	6.33	6.57	6.62	5.65	kWh/day	6.83	7.35	3.18	4.84	5.47	5.90	6.24	6.35	5.38
FEBRUARY 21 (W/m ²)										NOVEMBER 21 (W/m ²)									
7.5	265	268	42	67	77	85	91	94	88	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	
8.4	746	755	258	353	386	408	419	417	343	8.4	829	857	136	229	268	298	321	334	315
9.3	903	915	430	596	642	669	676	694	515	9.3	729	820	322	483	543	588	616	627	549
10.2	973	986	609	781	835	863	867	885	657	10.2	873	954	469	694	741	791	819	822	691
11.1	1035	1059	706	897	955	983	983	957	711	11.1	920	970	543	783	861	914	940	949	773
12	1015	1029	739	937	996	1026	1026	995	736	12	932	983	563	822	902	956	981	978	800
kWh/day	8.80	8.92	4.88	6.33	6.79	7.05	7.16	6.95	5.32	kWh/day	7.14	7.52	3.57	5.15	5.73	6.14	6.37	6.42	5.46
MARCH 21 (W/m ²)										OCTOBER 21 (W/m ²)									
7.5	566	566	159	176	180	178	172	161	185	7.5	194	197	33	52	59	65	69	72	67
8.4	834	834	364	442	452	451	435	408	163	8.4	686	694	244	332	362	383	393	391	323
9.3	944	944	583	671	682	689	667	625	461	9.3	858	869	439	572	615	641	648	636	496
10.2	1000	999	735	854	877	874	846	797	548	10.2	935	948	589	754	805	833	836	816	619
11.1	1025	1027	831	967	993	993	959	889	575	11.1	973	985	684	864	924	952	953	926	691
12	1035	1035	864	1006	1020	1020	987	935	598	12	982	996	717	905	964	993	993	964	716
kWh/day	9.78	9.77	6.24	7.23	7.42	7.39	7.15	6.71	4.30	kWh/day	6.27	6.38	4.26	6.06	6.50	6.74	6.79	6.65	5.11
APRIL 21 (W/m ²)										SEPTEMBER 21 (W/m ²)									
6.6	243	250	52	36	27	21	20	18	12	6.6	0	0	0	0	0	0	0	0	
7.5	674	694	276	257	238	212	180	144	55	7.5	500	506	151	168	170	168	161	150	97
8.4	840	863	496	500	482	449	405	349	134	8.4	783	783	375	427	435	432	416	390	250
9.3	923	948	685	716	701	660	612	541	248	9.3	902	902	569	654	669	668	642	601	384
10.2	968	994	830	883	872	835	775	692	340	10.2	963	963	719	820	840	845	817	763	433
11.1	994	1018	921	989	984	942	878	788	399	11.1	994	994	813	938	963	959	923	868	554
12	1002	1025	952	1025	1017	979	913	821	419	12	1000	1000	845	977	1002	997	964	905	576
kWh/day	10.29	10.36	7.47	7.79	7.64	7.23	6.63	5.89	2.75	kWh/day	9.30	9.30	6.10	7.01	7.17	7.13	6.88	6.45	4.12
MAY 21 (W/m ²)										AUGUST 21 (W/m ²)									
6.6	404	437	136	84	58	44	41	37	26	6.6	207	214	48	35	27	22	21	19	13
7.5	674	729	346	247	259	214	165	113	41	7.5	628	648	369	251	252	267	277	242	37
8.4	800	863	554	520	481	429	365	292	48	8.4	801	836	485	468	469	478	494	540	133
9.3	870	936	739	713	681	625	552	463	135	9.3	890	916	670	698	683	685	695	726	243
10.2	913	979	866	872	838	780	700	600	215	10.2	940	966	812	861	849	813	754	675	331
11.1	937	1001	951	950	927	878	794	687	268	11.1	967	992	902	965	955	918	855	767	389
12	945	1008	980	1008	971	912	826	717	286	12	956	1000	932	1000	991	954	889	799	408
kWh/day	10.14	10.90	8.14	7.92	7.48	6.85	6.00	5.10	1.75	kWh/day	9.84	10.12	7.31	7.54	7.42	7.04	6.18	5.73	2.70
JUNE 21 (W/m ²)										JULY 21 (W/m ²)									
6.6	456	474	158	102	70	51	46	44	39	6.6	382	416	129	85	63	46	42	39	26
7.5	686	729	370	307	263	212	157	98	44	7.5	681	706	344	294	257	213	164	112	43
8.4	771	853	508	520	475	416	346	268	51	8.4	779	843	543	513	474	423	360	288	51
9.3	838	924	738	716	666	603	523	430	93	9.3	851	919	722	708	671	645	543	455	132
10.2	880	966	869	858	816	759	664	550	168	10.2	896	963	858	859	825	767	689	589	211
11.1	904	988	951	951	911	844	754	642	218	11.1	921	986	939	955	923	864	780	675	262
12	910	995	979	983	943	876	785	671	235	12	930	994	967	988	956	897	812	704	280
kWh/day	9.86	10.86	8.29	7.85	7.34	6.63	5.77	4.75	1.44	kWh/day	9.80	10.66	8.04	7.82	7.37	6.75	5.97	5.02	1.73

Clear-Sky Insolation: Beam + Diffuse										Latitude 40° N									
Solar Tracking		Tilt Angle Latitude 40°								Solar Tracking		Tilt Angle Latitude 40°							
Time	1-Axis 2-Axis	0	20	30	40	50	60	90		Time	1-Axis 2-Axis	0	20	30	40	50	60	90	
JANUARY 21 (W/m ²)										DECEMBER 21 (W/m ²)									
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0		7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	
8.4	439	462	87	169	264	232	254	269	266	8.4	271	292	43	99	123	144	161	172	178
9.3	744	784	268	434	489	549	575	593	544	9.3	663	712	205	364	429	481	519	542	516
10.2	857	903	397	609	689	749	788	803	708	10.2	799	863	339	551	634	689	744	766	699
11.1	905	954	485	722	811	876	915	927	804	11.1	855	920	425	668	758	828	874	895	799
12	919	968	515	761	852	919	958	968	832	12	871	937	454	703	799	871	918	937	834
kWh/day	6.81	7.17	2.97	4.61	5.24	5.71	6.02	6.15	5.47	kWh/day	6.05	6.51	2.48	4.06	4.69	5.18	5.51	5.69	5.21
FEBRUARY 21 (W/m ²)										NOVEMBER 21 (W/m ²)									
7.5	146	147	39	34	39	44	48	50	49	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	
8.4	687	696	211	366	341	367	382	386	332	8.4	392	412	80	154	184	210	229	242	239
9.3	866	877	396	544	596	630	646	644	526	9.3	709	746	251	407	469	517	550	567	528
10.2	944	957	539	725	787	827	842	833	663	10.2	828	873	388	591	668	726	763	777	686
11.1	980	993	629	834	907	949	963	950	747	11.1	880	927	474	704	789	852	890	901	783
12	990	1004	660	876	947	990	1006	989	775	12	894	942	504	742	830	894	932	943	811
kWh/day	8.24	8.35	4.25	5.77	6.29	6.62	6.77	6.71	5.11	kWh/day	6.51	6.86	2.89	4.45	5.06	5.50	5.80	5.92	5.26
MARCH 21 (W/m ²)										OCTOBER 21 (W/m ²)									
7.5	534	534	140	163	168	168	164	156	108	7.5	87	88	13	21	25	28	30	31	30
8.4	809	809	352	419	435	436	429	409	282	8.4	622	629	196	283	315	338	352	355	307
9.3	924	924	538	644	671	673	665	633	435	9.3	816	827	379	518	567	599	615	612	502
10.2	982	982	681	819	853	862	847	807	554	10.2	903	915	520	686	756	793	808	799	639
11.1	1010	1010	771	928	968	979	962	916	628	11.1	943	956	608	807	873	914	928	915	721
12	1019	1019	801	966	1007	1019	1001	953	655	12	955	968	638	845	913	955	968	954	749
kWh/day	9.54	9.54	5.76	6.91	7.19	7.27	7.13	6.79	4.67	kWh/day	7.70	7.89	4.07	5.50	5.98	6.30	6.43	6.38	5.15
APRIL 21 (W/m ²)										SEPTEMBER 21 (W/m ²)									
6.6	288	297	65	47	37	25	24	22	14	6.6	0	0	0	0	0	0	0	0	
7.5	674	684	277	264	247	224	194	160	29	7.5	475	475	135	154	158	158	153	145	99
8.4	832	836	482	498	487	464	422	372	169	8.4	757	757	344	404	417	419	416	389	266
9.3	913	918	659	708	702	677	632	570	296	9.3	881	881	526	624	647	652	638	607	416
10.2	959	964	794	870	871	846	798	726	389	10.2	944	944	666	794	825	832	816	776	531
11.1	983	1007	880	973	977	954	908	826	465	11.1	975	975	754	901	937	946	928	882	604
12	991	1015	909	1008	1014	991	939	860	488	12	985	985	784	938	975	985	966	919	629
kWh/day	10.29	10.56	7.22	7.73	7.66	7.36	6.88	6.21	3.25	kWh/day	9.05	9.05	5.63	6.69	6.85	7.00	6.86	6.52	4.46
MAY 21 (W/m ²)										AUGUST 21 (W/m ²)									
6.6	450	488	155	107	78	48	45	41	27	6.6	249	257	62	46	37	27	25	23	15
7.5	684	740	360	316	281	238	190	137	41	7.5	629	649	270	257	241	218	190	157	42
8.4	799	862	552	532	500	454	395	326	78	8.4	793	818	472	486	474	448	411	362	165
9.3	866	932	718	724	697	650	545	503	188	9.3	880	905	645	690	684	658	614	553	288
10.2	906	972	844	874	852	806	735	645	279	10.2	929	955	778	848	848	823	775	705	388
11.1	929	994	924	968	950	903	831	735	338	11.1	955	983	861	928	952	928	877	802	452
12	937	1001	951	1001	983	937	864	766	359	12	964	989	890	983	987	964	912	835	474
kWh/day	10.21	10.98	8.06	8.06	7.70	7.13	6.43	5.54	2.26	kWh/day	9.83	10.12	7.06	7.54	7.46	7.17	6.70	6.04	3.17
JUNE 21 (W/m ²)										JULY 21 (W/m ²)									
6.6	471	524	188	128	93	57	53	48	32	6.6	428	466	154	107	80	51	47	43	28
7.5	668	742	386	330	289	240	185	126	45	7.5	661	717	357	313	278	237	189	137	44
8.4	772	855	572	538	498	445	380	305	51	8.4	778	843	547	526	493	447	389	321	77
9.3	835	921	731	722	686	632	569	473	147	9.3	847	914	710	714	687	640	575	495	185
10.2	875	961	853	865	834	780	710	607	233	10.2	889	957	834	861	838	792	722	633	273
11.1	898	982	929	956	928	874	795	693	284	11.1	913	979	913	951	935	888	816	722	334
12	906	989	955	987	960	906	826	723	308	12	921	986	940	986	968	921	849	752	351
kWh/day	9.94	10.96	8.27	8.06	7.62	6.96	6.18	5.23	1.90	kWh/day	9.95	10.94	7.97	7.94	7.59	7.03	6.33	5.45	2.23

Clear-Sky Insolation: Beam + Diffuse										Latitude 45°N											
Solar	Tracking		Tilt Angle Latitude 45°								Solar	Tracking		Tilt Angle Latitude 45°							
Time	1-Axis	2-Axis	0	20	30	40	50	60	90	Time	1-Axis	2-Axis	0	20	30	40	50	60	90		
JANUARY 21 (W/m ²)										DECEMBER 21 (W/m ²)											
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
8.4	248	261	37	85	106	124	138	148	153	8.4	45	48	5	14	18	22	25	27	30		
9.3	681	686	187	338	401	451	489	512	491	9.3	536	576	131	268	322	369	406	431	429		
10.2	795	857	313	521	604	670	715	740	683	10.2	720	774	252	453	536	605	652	682	651		
11.1	854	900	393	633	727	799	848	872	790	11.1	792	852	330	566	661	737	791	822	768		
12	871	918	426	670	768	843	893	916	825	12	812	874	357	604	703	782	837	864	806		
kWh/day	5.97	6.29	2.28	5.82	6.44	6.93	7.27	7.46	6.86	kWh/day	5.99	5.37	1.79	3.20	3.78	4.24	4.58	4.79	4.56		
FEBRUARY 21 (W/m ²)										NOVEMBER 21 (W/m ²)											
7.5	36	36	4	7	9	10	11	12	12	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
8.4	610	618	163	258	288	315	333	341	308	8.4	201	213	31	70	87	101	113	121	135		
9.3	818	829	332	484	540	581	605	611	524	9.3	610	642	179	320	378	425	460	482	462		
10.2	907	949	464	659	729	778	804	807	676	10.2	762	800	263	502	581	643	687	710	656		
11.1	948	980	547	765	847	901	928	928	768	11.1	825	860	333	613	703	773	820	843	764		
12	959	975	575	805	887	942	970	969	800	12	843	888	410	650	744	816	864	887	799		
kWh/day	7.60	7.70	3.59	5.15	5.71	6.11	6.35	6.37	5.34	kWh/day	5.64	5.94	2.20	3.66	4.24	4.70	5.02	5.20	4.81		
MARCH 21 (W/m ²)										OCTOBER 21 (W/m ²)											
7.5	406	496	123	147	153	156	151	148	108	7.5	11	11	1	2	3	3	3	4	4		
8.4	779	779	318	391	411	421	418	403	295	8.4	539	545	150	229	260	283	299	306	276		
9.3	899	899	489	608	642	657	654	632	462	9.3	763	773	316	457	509	547	569	574	494		
10.2	960	999	620	775	820	841	834	810	593	10.2	861	872	445	629	695	742	766	769	646		
11.1	989	989	705	851	912	957	953	922	675	11.1	906	918	527	737	811	862	888	888	737		
12	993	998	731	917	971	996	992	960	703	12	920	932	555	773	850	903	929	929	768		
kWh/day	9.24	9.24	5.34	6.52	6.89	7.06	7.03	6.79	4.87	kWh/day	7.08	7.17	3.43	4.88	5.41	5.78	5.98	6.01	5.08		
APRIL 21 (W/m ²)										SEPTEMBER 21 (W/m ²)											
6.6	327	337	78	89	87	84	77	74	16	6.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
7.5	672	692	274	268	254	234	207	178	57	7.5	437	437	118	139	144	145	143	135	98		
8.4	822	845	464	493	487	468	436	391	201	8.4	736	726	310	376	394	401	397	382	277		
9.3	901	925	627	693	697	682	646	593	341	9.3	854	854	478	588	618	631	627	604	439		
10.2	946	971	752	848	862	849	812	752	454	10.2	919	919	607	751	782	810	805	777	566		
11.1	969	994	831	948	966	956	918	854	526	11.1	952	952	688	854	901	923	918	886	646		
12	975	1001	858	981	1001	992	954	889	551	12	962	962	716	889	939	961	956	923	673		
kWh/day	10.25	10.53	6.91	7.69	7.65	7.44	7.05	6.47	3.74	kWh/day	8.74	8.74	5.12	6.30	6.64	6.78	6.73	6.49	4.73		
MAY 21 (W/m ²)										AUGUST 21 (W/m ²)											
6.6	489	529	179	129	99	67	49	45	30	6.6	287	296	74	57	47	35	28	26	17		
7.5	690	747	369	332	300	261	214	163	42	7.5	627	647	364	261	247	227	202	171	58		
8.4	796	859	546	540	514	474	421	357	117	8.4	782	807	454	380	474	454	423	379	195		
9.3	859	925	699	725	707	669	612	539	240	9.3	866	892	614	676	693	662	627	574	330		
10.2	898	964	816	868	857	822	764	683	340	10.2	915	941	737	828	838	825	788	723	439		
11.1	919	985	889	939	953	920	860	776	465	11.1	941	966	814	924	940	929	891	828	510		
12	927	992	914	955	966	953	893	808	428	12	949	974	840	957	974	964	927	862	534		
kWh/day	10.25	11.01	7.91	8.80	8.85	8.38	7.63	6.73	5.93	kWh/day	9.78	10.07	6.76	7.41	7.47	7.25	6.85	6.28	3.63		
JUNE 21 (W/m ²)										JULY 21 (W/m ²)											
6.6	518	565	216	155	118	79	57	52	35	6.6	467	507	179	130	101	70	52	47	31		
7.5	677	751	399	351	313	266	213	155	46	7.5	668	725	366	329	298	258	213	162	44		
8.4	772	851	570	530	517	470	410	339	84	8.4	770	840	511	533	507	468	415	351	145		
9.3	830	916	717	727	701	656	592	512	200	9.3	810	907	691	715	696	658	602	529	235		
10.2	868	954	836	864	845	802	736	649	295	10.2	880	948	807	856	844	809	759	673	323		
11.1	889	975	900	952	937	895	828	737	356	11.1	903	970	879	945	938	904	845	761	396		
12	896	981	924	981	968	927	859	768	377	12	910	977	904	976	970	937	877	793	418		
kWh/day	9.98	11.01	8.19	8.38	8.23	7.26	6.53	5.66	2.41	kWh/day	9.98	10.77	7.83	7.59	7.24	6.75	6.03	5.04	2.73		

Clear-Sky Insolation: Beam + Diffuse										Latitude 50°N									
Solar	Tracking	Tilt Angle Latitude 50°								Solar	Tracking	Tilt Angle Latitude 50°							
Time	1-Axis 2-Axis	0	20	30	40	50	60	90		Time	1-Axis 2-Axis	0	20	30	40	50	60	90	
JANUARY 21 (W/m ²)										DECEMBER 21 (W/m ²)									
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0		7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	
8.4	30	32	3	9	13	14	16	18	19	8.4	0	0	0	0	0	0	0	0	
9.3	512	530	114	239	291	336	371	394	396	9.3	337	363	90	147	185	218	244	264	275
10.2	768	745	226	420	501	567	616	647	626	10.2	599	644	164	339	413	475	524	557	556
11.1	782	824	298	539	625	710	757	790	750	11.1	669	751	233	452	543	619	676	714	658
12	810	846	323	567	666	746	803	837	790	12	726	799	251	490	586	666	726	764	743
kWh/day	1.26	5.12	1.69	1.96	3.52	3.98	4.32	4.54	4.37	kWh/day	4.60	4.29	1.17	2.37	2.87	3.29	3.61	3.83	3.83
FEBRUARY 21 (W/m ²)										NOVEMBER 21 (W/m ²)									
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0		7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	
8.4	505	514	115	193	225	251	269	280	264	8.4	14	12	1	4	5	6	7	8	9
9.3	754	764	266	416	474	518	542	561	545	9.3	161	189	107	219	266	307	338	359	360
10.2	838	870	385	584	659	716	751	765	722	10.2	666	791	217	460	475	537	584	613	592
11.1	905	917	460	689	774	836	870	884	873	11.1	745	787	288	569	599	671	734	756	717
12	920	931	486	724	814	879	903	931	867	12	771	811	318	546	640	716	771	805	769
kWh/day	6.97	7.06	2.93	4.49	5.00	5.52	5.81	5.92	5.24	kWh/day	4.56	4.79	1.51	2.81	3.33	3.76	4.08	4.27	4.11
MARCH 21 (W/m ²)										OCTOBER 21 (W/m ²)									
7.5	450	450	164	129	126	140	140	136	165	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	
8.4	742	742	280	338	383	396	399	390	361	8.4	429	434	101	168	195	210	232	241	227
9.3	808	808	435	564	605	639	634	622	481	9.3	693	701	250	387	440	483	505	520	468
10.2	932	932	554	723	778	809	818	802	621	10.2	807	817	367	552	623	675	708	721	635
11.1	963	963	639	824	887	923	933	916	719	11.1	859	870	441	656	736	796	832	844	735
12	973	973	655	858	924	962	973	955	740	12	874	885	466	691	775	837	874	886	769
kWh/day	4.32	4.35	4.66	6.05	6.50	6.76	6.82	6.69	5.17	kWh/day	6.45	6.53	2.74	4.22	4.76	5.17	5.43	5.54	4.99
APRIL 21 (W/m ²)										SEPTEMBER 21 (W/m ²)									
6.6	361	372	90	70	58	44	30	27	15	6.6	0	0	0	0	0	0	0	0	
7.5	606	606	269	270	259	241	217	187	75	7.5	363	363	100	121	127	129	124	124	94
8.4	808	831	442	482	483	470	444	405	293	8.4	687	687	273	343	365	376	377	368	282
9.3	885	919	593	672	685	679	653	609	381	9.3	820	820	426	544	581	602	606	592	455
10.2	929	954	704	830	844	843	819	770	502	10.2	889	889	543	700	749	777	783	767	593
11.1	953	978	775	914	945	948	924	873	580	11.1	924	923	617	798	853	886	896	877	676
12	960	985	800	946	979	984	960	909	607	12	934	934	642	831	892	926	934	915	709
kWh/day	10.17	10.45	6.54	7.49	7.53	7.43	7.13	6.66	4.18	kWh/day	8.36	8.36	4.56	5.84	6.25	6.47	6.51	6.37	4.99
MAY 21 (W/m ²)										AUGUST 21 (W/m ²)									
6.6	521	564	202	152	121	87	52	48	32	6.6	319	330	86	69	57	45	32	29	19
7.5	644	751	374	346	317	281	237	187	43	7.5	622	641	263	262	252	234	211	182	74
8.4	791	854	535	543	524	499	444	385	155	8.4	768	792	432	466	469	456	430	392	232
9.3	850	916	674	718	719	681	624	569	289	9.3	830	875	578	655	686	699	673	589	368
10.2	887	963	736	854	855	832	785	715	367	10.2	897	923	638	798	829	810	793	745	485
11.1	906	973	847	941	948	928	881	809	467	11.1	925	948	759	896	948	923	896	845	503
12	914	989	870	971	980	961	914	841	492	12	931	956	783	922	982	955	931	880	586
kWh/day	10.21	11.93	7.69	8.08	7.93	7.56	6.90	6.27	3.29	kWh/day	9.69	9.96	6.49	7.21	7.32	7.22	6.92	6.45	4.04
JUNE 21 (W/m ²)										JULY 21 (W/m ²)									
6.6	538	599	241	181	143	103	61	55	37	6.6	499	542	301	152	122	93	55	50	34
7.5	683	758	408	369	334	290	239	183	46	7.5	672	729	371	343	315	278	235	186	45
8.4	769	851	563	558	522	491	437	371	125	8.4	770	824	531	526	517	483	437	378	152
9.3	823	909	697	725	710	673	618	546	251	9.3	831	894	607	608	609	600	623	558	282
10.2	858	944	759	856	848	817	762	685	353	10.2	864	926	712	842	842	818	771	702	388
11.1	874	964	864	939	937	908	853	774	429	11.1	898	952	728	927	933	912	865	793	457
12	885	980	886	967	970	939	885	805	443	12	897	964	789	956	964	944	897	825	480
kWh/day	9.98	11.92	8.03	8.22	7.97	7.56	6.82	6.05	2.99	kWh/day	9.66	10.76	7.62	7.98	7.82	7.45	6.87	6.16	3.49

Clear-Sky Insolation: Beam + Diffuse									Latitude: 55° N										
Solar	Tracking		Tilt Angles Latitude 55°							Solar	Tracking		Tilt Angles Latitude 55°						
Time	1-Axis	2-Axis	0	20	30	40	50	60	90	Time	1-Axis	2-Axis	0	20	30	40	50	60	90
JANUARY 21 (W/m ²)									DECEMBER 21 (W/m ²)										
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.3	293	308	46	126	152	189	202	219	250	9.3	56	66	6	21	28	33	38	42	46
10.2	566	596	139	304	371	430	476	508	514	10.2	400	436	78	199	252	298	335	362	378
11.1	672	708	201	410	499	572	629	667	693	11.1	548	589	126	315	392	458	510	547	560
12	761	799	223	447	541	619	679	719	710	12	538	632	157	353	438	509	565	605	616
kWh/day	3.76	3.96	0.99	2.11	2.58	2.98	3.29	3.53	3.52	kWh/day	2.60	2.79	0.60	1.42	1.78	2.09	2.33	2.51	2.58
FEBRUARY 21 (W/m ²)									NOVEMBER 21 (W/m ²)										
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.4	366	371	67	127	151	172	188	198	195	8.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.3	666	673	197	337	394	439	472	491	482	9.3	243	254	40	100	127	149	168	182	190
10.2	792	802	302	498	578	636	679	701	646	10.2	520	547	130	279	342	396	438	468	473
11.1	847	858	393	598	688	758	805	829	750	11.1	624	664	182	387	470	538	591	627	622
12	864	875	392	632	726	799	848	873	793	12	662	693	214	423	512	585	641	678	670
kWh/day	6.21	6.29	2.36	3.75	4.34	4.81	5.14	5.31	4.91	kWh/day	3.15	3.43	0.94	1.96	2.39	2.75	3.04	3.23	3.24
MARCH 21 (W/m ²)									OCTOBER 21 (W/m ²)										
7.5	395	395	85	108	116	121	122	121	97	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.4	695	695	299	320	347	365	373	370	300	8.4	283	286	55	101	129	136	148	156	153
9.3	829	829	377	513	569	590	604	604	489	9.3	596	604	182	306	357	397	426	443	417
10.2	897	897	481	663	725	766	785	781	637	10.2	733	742	285	465	536	592	639	651	600
11.1	930	930	551	738	810	874	900	896	731	11.1	794	804	351	563	647	711	756	778	719
12	949	949	574	790	866	936	939	935	764	12	812	822	374	597	684	752	796	821	746
kWh/day	8.43	8.43	4.05	5.51	6.02	6.36	6.51	6.47	5.21	kWh/day	5.63	5.70	2.12	3.47	4.01	4.42	4.72	4.88	4.51
APRIL 21 (W/m ²)									SEPTEMBER 21 (W/m ²)										
6.6	390	402	101	81	68	54	39	29	19	6.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.5	658	677	362	298	260	246	225	198	91	7.5	341	341	81	101	107	111	109	86	66
8.4	791	811	415	467	473	466	447	415	256	8.4	630	629	234	306	330	345	350	346	278
9.3	866	890	547	644	666	669	652	618	415	9.3	770	778	369	493	535	562	574	569	460
10.2	909	934	649	783	818	828	815	779	544	10.2	851	851	474	649	696	733	749	744	603
11.1	932	957	713	871	914	930	919	882	626	11.1	888	888	540	732	798	841	869	855	694
12	940	965	735	901	947	965	955	918	655	12	899	899	562	764	833	878	898	893	725
kWh/day	10.03	10.31	6.11	7.13	7.25	7.35	7.15	6.76	4.56	kWh/day	7.89	7.89	3.06	5.31	5.77	6.06	6.19	6.14	4.95
MAY 21 (W/m ²)									AUGUST 21 (W/m ²)										
6.6	547	592	222	173	142	108	71	50	33	6.6	347	359	98	80	68	55	40	31	21
7.5	696	752	376	356	331	298	257	210	43	7.5	613	632	256	261	253	238	218	192	96
8.4	783	845	520	541	529	502	461	408	191	8.4	751	774	465	454	450	451	432	400	246
9.3	838	903	643	706	706	687	649	593	334	9.3	829	858	536	627	646	648	631	596	390
10.2	875	930	738	833	845	833	798	739	449	10.2	876	905	636	762	791	808	789	752	523
11.1	892	958	798	914	934	926	893	833	524	11.1	901	927	699	848	887	904	890	852	603
12	899	965	818	942	964	958	925	866	549	12	909	935	720	877	919	928	924	887	631
kWh/day	10.16	10.95	7.43	7.98	7.94	7.67	7.18	6.53	3.70	kWh/day	9.51	9.83	5.98	6.94	7.13	7.15	6.92	6.53	4.39
JUNE 21 (W/m ²)									JULY 21 (W/m ²)										
6.6	563	626	264	206	168	127	83	57	38	6.6	525	571	221	174	143	110	74	53	35
7.5	686	762	413	383	352	312	264	209	46	7.5	673	731	373	353	329	296	259	218	45
8.4	763	845	552	566	541	505	459	399	164	8.4	762	826	515	534	522	495	454	402	185
9.3	814	899	671	718	711	684	638	574	298	9.3	819	885	637	693	695	676	638	582	326
10.2	846	932	762	840	844	823	780	714	408	10.2	855	922	731	821	832	819	783	725	439
11.1	865	951	820	918	928	912	876	803	478	11.1	875	942	790	901	919	916	876	817	541
12	871	957	839	945	957	943	901	834	502	12	883	949	816	928	949	942	908	848	536
kWh/day	9.95	10.99	7.88	8.19	8.05	7.67	7.09	6.35	3.37	kWh/day	9.90	10.70	7.24	7.88	7.83	7.55	7.07	6.42	3.62

Clear Sky Insolation: Beam + Diffuse										Latitude 60° N									
Solar	Tracking	Tilt Angles Latitude 40°								Solar	Tracking	Tilt Angles Latitude 60°							
Time	1-Axis 2-Axis	0	20	30	40	50	60	90		Time	1-Axis 2-Axis	0	20	30	40	50	60	90	
JANUARY 21 (W/m ²)										DECEMBER 21 (W/m ²)									
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0		7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	
8.4	0	0	0	0	0	0	0	0		8.4	0	0	0	0	0	0	0	0	
9.3	19	20	2	7	9	11	13	14	15	9.3	0	0	0	0	0	0	0	0	
10.2	332	549	56	154	198	236	267	290	306	10.2	84	87	9	35	46	56	65	71	78
11.1	490	516	166	264	333	392	440	475	493	11.1	283	304	46	141	183	220	251	271	294
12	534	562	124	300	377	443	496	534	553	12	345	370	61	180	233	279	316	345	367
kWh/day	2.22	2.33	0.45	1.15	1.46	1.72	1.93	2.08	2.18	kWh/day	1.07	1.15	0.17	0.55	0.69	0.83	0.95	1.04	1.11
FEBRUARY 21 (W/m ²)										NOVEMBER 21 (W/m ²)									
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0		7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	
8.4	178	181	25	55	68	79	88	94	97	8.4	0	0	0	0	0	0	0	0	
9.3	539	546	128	247	297	338	370	390	384	9.3	6	7	1	2	3	4	4	5	5
10.2	696	705	218	399	474	535	580	609	586	10.2	279	294	49	131	168	199	225	244	258
11.1	785	775	275	494	583	655	708	741	701	11.1	441	464	92	230	303	355	396	427	443
12	785	795	295	526	620	686	752	785	747	12	485	511	115	275	344	404	451	485	501
kWh/day	5.14	5.21	1.59	2.91	3.46	3.91	4.24	4.45	4.29	kWh/day	1.94	2.04	0.11	1.02	1.29	1.52	1.70	1.84	1.91
MARCH 21 (W/m ²)										OCTOBER 21 (W/m ²)									
7.5	330	330	65	86	94	99	101	101	88	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	
8.4	616	631	197	277	306	326	334	330	289	8.4	166	167	16	34	41	48	53	57	58
9.3	778	778	316	454	505	541	562	566	484	9.3	459	465	114	214	256	291	318	335	330
10.2	851	851	469	593	662	710	739	746	639	10.2	628	636	202	364	430	485	525	550	530
11.1	888	887	567	682	761	818	851	860	737	11.1	703	712	258	457	538	604	652	681	630
12	899	898	587	712	795	855	890	899	774	12	725	734	278	489	574	644	695	725	690
kWh/day	7.86	7.86	3.40	4.90	5.45	5.84	6.07	6.12	5.24	kWh/day	4.52	4.57	1.46	2.62	3.11	3.55	3.79	3.97	3.83
APRIL 21 (W/m ²)										SEPTEMBER 21 (W/m ²)									
6.6	414	426	111	92	79	64	48	31	21	6.6	0	0	0	0	0	0	0	0	
7.5	646	665	251	263	259	248	230	206	106	7.5	281	281	62	80	86	89	91	90	84
8.4	770	792	385	446	458	457	444	418	277	8.4	578	578	192	263	288	305	314	315	305
9.3	842	866	509	640	659	651	641	618	442	9.3	725	725	310	435	481	519	530	533	452
10.2	885	909	589	738	782	804	802	778	576	10.2	808	808	401	570	632	676	701	706	603
11.1	907	932	644	820	873	901	901	880	662	11.1	842	841	458	656	729	781	810	816	695
12	915	940	663	848	904	935	934	915	682	12	853	853	477	686	762	816	845	853	728
kWh/day	9.84	10.12	5.62	6.78	7.08	7.18	7.08	6.78	4.86	kWh/day	7.31	7.31	3.32	4.69	5.19	5.54	5.74	5.77	4.90
MAY 21 (W/m ²)										AUGUST 21 (W/m ²)									
6.6	569	646	339	193	103	128	91	52	35	6.6	371	363	108	96	76	61	49	35	22
7.5	664	750	374	563	542	515	575	531	68	7.5	601	633	246	256	251	240	222	199	103
8.4	773	854	499	553	528	508	474	428	225	8.4	729	751	377	433	443	412	428	403	365
9.3	824	888	607	685	695	686	657	610	374	9.3	804	829	493	592	619	629	620	595	424
10.2	856	922	690	800	826	836	802	755	495	10.2	850	875	577	717	758	777	774	749	553
11.1	874	940	742	878	910	915	894	848	573	11.1	874	900	632	787	846	872	872	848	636
12	880	946	759	904	939	946	926	880	600	12	882	908	650	824	877	904	906	882	665
kWh/day	10.06	10.85	7.06	7.82	7.87	7.70	7.31	6.73	4.14	kWh/day	9.31	9.62	5.51	6.59	6.87	6.95	6.84	6.51	4.67
JUNE 21 (W/m ²)										JULY 21 (W/m ²)									
6.6	584	649	384	229	192	151	106	59	40	6.6	517	594	239	194	164	130	93	55	37
7.5	687	762	414	594	567	531	486	434	31	7.5	672	729	371	360	340	310	273	229	68
8.4	753	837	535	557	545	513	477	423	200	8.4	752	815	495	517	521	504	467	420	220
9.3	801	886	639	703	705	688	651	607	342	9.3	804	870	692	676	685	674	645	598	365
10.2	831	917	719	816	831	822	790	738	457	10.2	837	904	683	792	813	812	787	740	483
11.1	848	935	769	888	911	907	878	823	530	11.1	856	922	735	866	895	899	878	834	559
12	854	940	786	913	936	937	908	854	556	12	862	930	752	894	923	929	908	862	585
kWh/day	9.87	10.91	7.51	8.09	8.04	7.77	7.29	6.60	3.86	kWh/day	9.80	10.96	7.03	7.72	7.76	7.58	7.19	6.64	4.35

C الطاقة الشمسية في اليوم كمتوسط شهري لأجل خطوط عرض وزوايا أزيমوت مختلفة

Monthly clear-sky energy insolation tables [kWh/m².day]

Daily 1 hour-Sky Insolation (kWh/m ²)													Latitude 20°N									
Azimuth		South						SE, SW						Ecc. West						Tracking		
Tilt	h	0	20	30	40	50	60	90	20	30	40	50	60	90	30	30	40	50	60	90	1-Axis	2-Axis
Jan	5:28	7.38	7.31	7.22	7.10	7.05	5.48	7.85	7.32	7.06	6.43	5.73	5.18	7.37	7.27	6.67	6.10	5.47	5.41	9.10	5.60	
Feb	5:33	7.37	7.26	7.13	7.02	7.00	5.44	7.72	7.19	6.90	6.45	5.89	5.61	7.23	7.13	6.51	5.94	5.61	5.22	9.93	10.07	
Mar	7:34	7.76	7.63	7.29	6.74	5.99	5.82	6.70	6.41	6.34	6.13	5.77	5.95	5.30	5.22	4.85	4.51	4.13	3.73	10.24	10.24	
Apr	7:84	7.55	7.19	6.43	5.16	4.52	4.14	5.67	5.29	5.41	5.41	5.25	4.98	5.00	4.77	4.36	3.85	3.18	2.99	10.05	10.37	
May	7:58	7.13	6.51	5.66	4.66	3.58	3.57	3.95	4.31	4.56	4.68	4.67	3.85	2.79	2.71	2.58	2.47	2.29	1.62	9.66	10.37	
Jun	7:01	6.43	5.74	4.37	3.77	3.21	3.61	3.76	3.98	4.23	4.41	4.43	3.08	2.49	2.32	2.21	2.13	1.93	1.44	9.37	10.25	
July	7:84	2.36	6.42	5.53	4.50	3.52	3.61	3.85	4.52	4.86	5.45	5.73	3.18	2.37	2.23	2.07	1.86	1.47	1.43	8.43	10.13	
Aug	7:68	2.38	6.43	6.23	5.47	4.53	3.56	3.22	4.19	4.90	5.45	5.89	3.61	2.73	2.40	2.00	1.56	1.01	1.22	9.66	9.95	
Sept	7:16	2.54	7.11	7.07	6.53	5.80	2.77	6.50	6.41	6.24	6.13	5.77	3.65	5.30	5.15	4.85	4.51	4.13	2.73	9.80	9.80	
Oct	5:34	7.31	7.59	7.50	7.26	5.81	5.36	5.02	5.29	5.41	5.10	5.25	3.68	3.00	2.73	2.56	2.35	2.08	2.00	9.18	9.62	
Nov	5:51	6.33	7.38	7.55	7.53	7.30	5.37	3.05	4.31	4.56	4.63	4.67	3.95	2.70	2.71	2.58	2.47	2.29	1.62	8.82	9.31	
Dec	5:20	6.77	7.27	7.55	7.64	7.45	5.71	3.56	3.95	4.23	4.43	4.43	3.78	2.30	2.34	2.24	2.15	2.00	1.44	8.57	9.25	
kWh/m ² .yr	2222	2660	2660	2483	2292	2048	1006	2367	2188	2098	2003	1920	1399	2501	1572	1276	1465	1350	882	3400	3615	

Daily Clear-Sky Insolation (kWh/m ²)													Latitude 15°N								
Azimuth		South						SE, SW						East, West					Tracking		
Tilt	h	0	20	40	50	60	90	20	30	40	50	60	90	30	30	40	50	60	90	1-Axis	2-Axis
Jan	4:57	6.52	7.03	7.32	7.49	7.26	5.62	6.20	6.26	6.24	6.23	5.98	4.51	4.74	4.53	4.36	3.93	3.59	2.32	8.54	9.01
Feb	6:00	7.25	7.52	7.59	7.45	7.08	4.82	6.29	6.91	6.83	6.56	6.15	4.12	5.76	5.50	5.13	4.76	4.32	2.78	9.60	9.76
Mar	7:00	7.66	7.64	7.42	6.95	6.20	3.73	7.35	7.26	6.86	6.51	5.92	3.57	6.70	6.34	5.91	5.43	4.87	2.64	10.2	10.2
Apr	7:78	7.36	7.33	6.75	6.00	5.07	4.68	7.52	7.27	6.75	6.15	5.36	2.86	7.39	6.99	6.50	5.92	5.25	2.11	10.7	10.43
May	8:48	7.44	6.80	6.11	5.17	4.08	3.84	7.34	6.87	6.47	5.80	4.86	2.66	6.88	6.20	5.71	5.00	4.15	2.07	9.87	10.68
Jun	7:10	7.02	6.68	5.81	4.81	3.73	3.67	7.49	6.93	6.31	5.45	4.62	2.14	7.00	6.20	5.72	5.08	4.15	2.22	9.26	10.52
July	7:08	7.05	6.79	6.02	5.08	4.03	3.85	7.47	6.97	6.32	5.60	4.78	2.52	7.58	7.16	6.63	6.04	5.35	2.21	9.62	10.36
Aug	7:60	7.51	7.15	6.62	5.86	4.56	4.68	7.43	7.09	6.58	5.97	5.23	2.70	7.22	6.82	6.34	5.76	5.12	2.11	9.75	10.02
Sept	6:86	7.42	7.40	7.15	6.72	6.09	3.27	7.15	7.82	6.75	6.30	5.72	3.44	6.54	6.19	5.76	5.28	4.73	2.94	9.67	9.67
Oct	5:44	6.96	7.27	7.34	7.29	6.85	4.73	6.36	6.68	6.60	6.34	5.95	3.98	5.38	5.32	4.90	4.59	4.15	2.63	9.16	9.28
Nov	4:47	6.17	6.86	7.14	7.23	7.08	5.46	5.86	6.11	6.19	6.04	5.81	4.30	4.65	4.43	4.17	3.83	3.53	2.75	8.75	8.70
Dec	4:53	6.14	6.70	7.05	7.19	7.13	5.73	5.91	6.08	6.03	5.98	5.77	4.36	4.31	4.14	3.87	3.58	3.25	2.69	7.91	8.57
kWh/m ² .yr	2424	2638	2691	2682	2341	2116	1175	2521	2477	2376	2215	2011	1226	2408	2180	2039	1864	1673	1037	3113	3558

Daily Clear-Sky Insolation (kWh/m ²)													Latitude 30°N									
Azimuth	South						SE, SW						East, West						Tracking			
Tilt	0	20	30	40	50	90	20	30	40	50	60	90	20	30	40	50	60	90	1-Axis	2-Axis		
Jan	4.31	5.92	6.47	5.83	7.00	6.95	5.64	5.38	5.68	5.82	5.70	5.53	4.22	4.11	3.91	3.73	3.43	3.15	2.06	7.00	8.53	
Feb	5.48	6.81	7.20	7.37	7.32	7.07	5.12	6.35	6.53	6.57	6.36	6.04	4.32	5.24	5.02	4.73	4.28	4.01	2.63	9.26	9.50	
Mar	6.57	7.48	7.57	7.44	7.09	6.54	3.87	7.13	7.11	6.90	6.50	6.01	2.75	6.60	6.04	5.63	5.21	4.70	2.93	9.57	9.57	
Apr	7.56	7.77	7.20	7.00	6.35	5.56	2.23	7.65	7.37	6.95	6.36	5.64	2.10	7.29	6.92	6.44	5.89	5.26	3.27	10.24	10.51	
May	8.45	7.96	7.20	6.51	5.61	4.61	1.27	7.77	7.32	6.73	6.08	5.21	1.62	7.73	7.33	6.80	6.18	5.51	3.35	10.03	10.77	
Jun	8.14	7.63	7.03	6.25	5.14	4.24	1.10	7.77	7.20	6.56	5.82	4.88	1.41	7.77	7.45	6.84	6.16	5.49	3.17	9.74	10.27	
July	8.10	7.63	7.10	6.31	5.13	4.24	1.02	7.65	7.17	6.60	5.95	5.17	1.61	7.60	7.25	6.78	6.08	5.43	3.12	9.78	10.33	
Aug	7.48	7.59	7.22	6.85	6.36	5.75	2.30	7.45	7.19	6.75	6.18	5.49	2.06	7.42	6.71	6.28	5.73	5.11	3.15	9.83	10.00	
Sept	6.54	7.24	7.23	7.19	6.84	6.21	3.72	6.93	6.90	6.68	6.31	5.90	2.64	6.21	5.80	5.49	5.06	4.56	2.33	9.40	9.50	
Oct	5.29	6.56	6.82	7.09	7.08	6.80	4.95	6.12	6.29	6.33	6.11	5.30	4.05	5.65	4.84	4.53	4.20	3.84	2.53	8.76	8.82	
Nov	4.22	5.77	6.50	6.65	6.81	6.77	5.49	5.23	5.34	5.67	5.64	5.48	4.10	4.60	4.83	4.62	4.34	3.97	2.83	7.64	8.05	
Dec	3.56	5.52	6.12	6.24	6.76	6.75	5.73	4.97	5.31	5.34	5.50	5.42	4.15	3.65	3.52	3.34	3.11	2.86	1.93	7.19	7.55	
kWh/m ² .yr	2310	2545	2553	2547	2368	2172	1280	2445	2423	2341	2207	2025	1280	2200	2088	1951	1790	1613	1015	3346	3490	

Daily Clear-Sky Insolation (kWh/m ²)													Latitude 36°N																			
Azimuth	South										SE, SW			East, West										Tracking								
Tilt	0	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	E-Axis	S-Axis
Jan	5.66	5.50	5.90	6.33	6.57	6.63	5.63	4.76	5.11	5.34	5.37	5.29	4.15	3.90	3.36	3.20	3.69	2.77	1.88	7.44	7.81											
Feb	4.86	4.67	5.29	5.68	5.71	4.65	5.32	5.34	6.06	5.15	6.37	5.87	4.36	4.07	4.49	4.26	3.95	3.65	3.45	3.83	3.92											
Mar	6.26	7.22	7.42	7.30	7.3	6.71	4.30	6.34	6.90	5.72	6.43	6.04	3.66	5.96	5.38	5.12	4.94	4.50	2.92	2.78	3.72											
Apr	7.47	7.75	7.61	7.75	6.65	5.89	7.75	7.5	7.41	7.04	6.55	4.89	5.46	7.17	6.76	6.17	5.81	5.77	5.11	4.75	6.76											
May	8.14	7.07	7.44	6.85	6.86	5.81	7.75	7.81	7.50	6.85	6.41	5.5	5.33	7.94	7.47	6.81	6.74	5.55	5.47	3.74	6.76											
Jun	8.20	7.55	7.34	6.63	5.72	4.75	1.44	7.00	7.57	5.85	6.14	5.32	2.71	7.87	7.43	6.35	6.25	5.53	3.39	3.85	10.86											
July	6.04	2.62	7.37	6.75	5.97	5.02	1.73	7.79	7.40	5.87	6.24	5.44	2.87	7.64	7.23	6.72	6.12	5.47	3.36	3.80	10.66											
Aug	7.34	7.55	7.42	7.04	6.48	5.73	2.70	7.42	7.22	5.86	6.35	5.71	3.25	5.96	6.50	6.7	5.66	5.03	2.98	3.84	10.12											
Sept	6.16	7.04	7.17	7.13	6.89	6.45	4.12	6.54	6.69	6.54	6.25	5.82	3.60	5.82	6.54	6.5	4.84	4.35	2.81	3.00	9.39											
Oct	4.96	6.00	6.79	6.74	6.79	6.63	3.44	5.59	5.87	5.88	5.50	2.57	4.06	4.49	4.30	4.86	3.77	3.48	2.31	3.27	8.38											
Nov	2.57	5.15	5.73	6.14	6.17	6.42	5.65	4.55	4.96	5.46	5.21	5.1	4.03	5.42	3.26	3.1	2.93	2.79	1.83	7.14	7.32											
Dec	2.18	4.84	5.47	5.94	6.24	6.35	5.54	4.40	4.68	4.65	5.34	5.01	40.7	4.06	2.46	2.81	2.66	2.45	1.91	5.85	4.28											
kWh/m ² -yr 2178	2463	2500	2470	2372	2207	1.96	2380	2349	2262	2182	2024	1826		2078	1977	1851	1708	1547	952	2271	3-12											

Daily Clear-Sky Insolation (kWh/m ²)													Latitude 40°N										Tracking									
Azimuth	South										SE, SW										East, West										Tracking	
Tilt	0	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	E-Axis	S-Axis
Jan	5.92	4.51	5.54	5.71	6.09	6.5	5.47	4.48	4.47	4.75	4.86	4.85	4.30	3.52	3.25	2.67	2.55	2.37	1.69	6.24	7.12											
Feb	4.25	5.15	6.25	6.62	6.77	6.1	5.41	3.36	5.25	5.69	5.60	5.53	4.21	4.38	3.91	3.74	3.31	2.26	2.23	8.24	8.25											
Mar	5.76	6.21	7.10	7.27	7.13	6.79	4.67	6.49	6.62	6.57	6.56	6.01	4.14	5.5	5.28	4.08	4.54	4.27	2.84	9.54	9.54											
Apr	7.22	7.73	7.66	7.76	6.88	6.2	3.25	7.51	7.34	7.10	6.65	6.07	2.71	6.89	6.55	6.16	5.70	5.16	3.34	6.28	10.56											
May	8.06	8.36	7.70	7.13	6.43	5.54	2.26	7.50	7.62	7.17	6.55	5.82	3.24	7.56	7.27	6.75	6.13	5.35	3.47	6.2	10.09											
Jun	8.27	8.36	7.62	6.96	6.13	5.21	1.90	8.02	7.68	7.09	6.41	5.64	2.99	7.35	7.41	6.87	6.26	5.61	3.45	9.54	10.36											
July	7.97	7.34	7.25	7.03	6.31	5.43	2.23	7.85	7.32	7.06	6.43	5.73	3.18	7.37	7.37	6.62	6.10	5.45	3.41	9.53	10.74											
Aug	6.16	7.54	7.47	7.15	6.70	6.04	3.77	7.77	7.19	6.90	6.46	5.80	3.51	6.73	6.49	6.08	5.54	5.01	3.77	9.73	10.17											
Sept	5.64	6.98	6.97	6.60	6.05	5.47	4.46	6.91	6.40	6.34	6.13	5.77	4.05	5.39	5.15	4.85	4.51	4.1	3.74	9.78	10.85											
Oct	4.69	5.56	5.98	6.20	6.18	6.38	5.15	5.42	5.29	5.1	5.0	5.35	3.94	3.46	3.71	3.56	3.33	3.06	2.09	7.70	7.80											
Nov	2.89	4.45	5.05	5.50	5.89	5.92	5.26	3.55	4.21	4.56	4.68	4.67	3.35	2.79	2.71	2.68	2.47	2.29	1.63	6.51	6.66											
Dec	2.46	4.36	4.65	5.10	5.51	5.49	5.21	3.56	3.95	4.23	4.40	4.43	3.24	2.39	2.54	2.24	2.15	2.00	1.44	6.65	6.51											
kWh/m ² -yr 7070	5985	5415	5446	5347	5278	447	5351	5249	5216	5140	4957	4757	4053	4548	4558	4393	4187	4050	3167	5305												

Daily Clear-Sky Insolation (kWh/m ²)													Latitude 45°N										Tracking									
Azimuth	South										SE, SW										East, West										Tracking	
Tilt	0	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	E-Axis	S-Axis
Jan	2.28	3.32	4.44	4.53	5.27	5.46	5.06	3.33	3.73	4.02	4.19	4.25	3.67	2.2	2.17	2.11	2.08	1.90	1.44	5.57	6.29											
Feb	3.59	3.15	5.11	6.11	6.34	6.37	5.38	4.64	4.07	5.4	5.25	5.15	4.08	3.46	3.54	3.20	3.34	2.95	1.60	6.61	7.70											
Mar	5.21	6.52	6.86	7.06	7.19	6.79	4.97	6.07	6.27	6.29	6.17	5.00	4.26	5.03	4.82	4.60	4.30	3.60	2.71	9.24	9.24											
Apr	6.00	7.30	7.67	7.71	7.08	6.47	3.74	7.33	7.28	7.08	6.71	6.21	3.98	4.90	4.50	3.95	3.51	3.06	1.85	9.25	10.53											
May	7.91	8.19	7.84	7.30	6.73	5.92	2.78	7.54	7.65	7.29	6.79	6.07	3.53	7.52	7.12	6.66	6.11	5.51	3.51	6.23	11.2											
Jun	8.19	8.18	7.83	7.26	6.73	5.66	2.41	8.06	7.73	7.26	6.63	5.92	3.29	7.76	7.35	6.81	6.22	5.59	3.46	9.68	11.3											
July	7.83	7.39	7.24	7.27	6.63	5.84	2.73	7.84	7.58	7.19	6.63	5.97	3.46	7.44	7.02	6.37	6.34	5.47	3.43	9.58	10.77											
Aug	6.76	7.41	7.45	7.35	6.85	6.28	3.63	7.15	7.02	6.88	6.30	5.01	3.44	6.46	6.15	5.80	5.39	4.91	3.73	9.78	10.77											
Sept	5.12	6.39	6.64	6.76	6.21	6.49	4.73	5.88	6.13	6.06	5.93	5.66	4.35	4.30	4.13	4.47	4.12	3.81	2.66	8.74	8.74											
Oct	3.40	4.32	5.44	5.78	5.98	6.0	5.08	4.40	4.71	4.28	4.94	4.86	3.35	3.30	3.15	3.04	2.88	2.67	1.87	7.08	7.17											
Nov	2.29	3.36	4.24	4.79	5.02	5.20	4.81	3.29	3.57	3.84	4.00	4.05	3.49	2.12	2.06	2.02	1.94	1.82	1.33	5.64	5.94											
Dec	1.79	3.36	3.78	4.24	4.59	4.79	4.56	2.76	3.13	3.42	3.60	3.68	3.27	1.72	1.68	1.65	1.57	1.48	1.08	5.00	5.27											
kWh/m ² -yr 1866	2215	2239	2317	2275	2157	1514	2088	2124	2111	2046	1938	1702	1282	1704	1616	1490	1372	915	3027	3609												

Daily Clear-Sky Insolation (kWh/m ²)													Latitude 50°N									
Azimuth		South							SE-SW						East-West					Tracking		
Title	h	23	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	23	30	45	60	75	90	1 Axis	2 Axis	
Jan	1.50	2.96	3.72	3.98	4.32	4.54	4.77	2.54	2.94	3.19	3.28	3.47	3.64	1.56	1.23	1.51	.45	1.35	1.04	4.00	5.12	
Feb	2.30	4.49	5.08	5.52	5.81	5.92	5.94	3.98	4.34	4.60	4.72	4.71	3.9	1.84	2.78	3.68	3.34	2.42	1.73	5.97	7.06	
Mar	4.56	6.81	6.91	5.75	6.37	6.05	5.17	5.58	5.45	5.42	5.91	5.77	4.3	4.42	4.34	4.18	1.95	1.70	1.97	8.88	8.88	
Apr	6.94	7.40	7.53	7.45	7.13	6.67	4.48	7.09	7.11	7.00	6.70	6.75	4.7	6.76	6.05	5.65	1.34	4.97	3.34	10.7	10.45	
May	7.60	8.08	7.93	7.56	6.38	6.27	3.56	7.86	7.58	7.26	6.85	6.25	3.8	7.31	6.63	6.50	6.00	5.41	3.53	10.21	1.00	
Jun	8.30	8.32	7.97	7.50	6.32	6.03	2.90	8.01	7.78	7.36	6.80	6.11	3.54	7.60	7.18	6.67	6.11	5.59	3.51	9.08	1.02	
July	7.92	7.08	7.62	7.45	6.37	6.16	3.19	7.76	7.58	7.25	6.75	6.15	3.73	7.27	6.66	6.42	5.93	5.74	3.47	7.96	0.76	
Aug	6.30	7.21	7.22	7.22	6.32	6.47	4.64	6.94	6.92	6.79	6.49	6.07	4.05	6.12	5.66	5.54	5.19	4.77	3.22	6.09	9.80	
Sept	4.56	5.84	6.25	6.47	6.31	6.37	4.90	5.41	5.54	5.71	5.66	5.45	4.99	4.37	4.23	4.06	3.82	3.37	3.73	8.36	8.26	
Oct	2.78	4.22	4.70	5.17	5.43	5.34	4.90	3.75	4.96	4.31	4.42	4.42	3.66	2.86	2.63	2.53	2.44	2.28	1.65	5.45	6.53	
Nov	1.54	2.78	3.53	3.75	4.18	4.79	4.11	2.41	2.75	3.00	3.19	3.77	3.96	1.80	1.46	1.44	.48	1.19	0.94	4.76	4.79	
Dec	1.17	2.37	2.67	3.29	3.51	3.82	3.80	2.00	2.33	2.60	2.76	2.90	3.72	1.1	1.14	1.13	.99	1.06	0.83	4.00	4.29	

Daily Clear-Sky Insolation (kWh/m ²)													Latitude 55°N								
Azimuth		South							SE-SW					East-West					Tracking		
Title	h	23	33	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	23	30	45	60	75	90	1 Axis	2 Axis
Jan	0.99	2.11	2.58	2.58	3.29	3.5	3.32	1.77	2.08	2.34	2.53	2.64	2.52	0.98	0.95	0.98	0.97	0.97	0.74	3.76	2.96
Feb	1.26	3.25	4.34	4.81	5.14	5.3	4.91	3.28	3.66	3.94	4.12	4.17	3.92	2.2	2.15	2.16	2.10	2.01	1.54	6.51	6.29
Mar	4.00	5.31	6.92	6.36	6.31	6.47	5.27	3.64	3.35	3.3	3.36	3.43	4.30	3.32	3.81	3.71	3.56	2.36	2.46	8.43	8.43
Apr	6.41	7.13	7.47	7.35	7.15	6.76	4.56	6.12	6.85	6.84	6.67	5.78	4.47	5.46	5.67	5.40	5.10	4.70	3.77	10.03	10.13
May	7.41	7.92	7.94	7.67	7.18	6.53	3.70	7.50	7.69	7.35	6.93	6.40	1.95	7.23	6.68	6.20	5.41	5.32	3.53	10.14	10.95
Jun	7.80	8.10	8.05	7.67	7.00	6.35	3.57	7.65	7.77	7.42	6.93	6.32	3.41	7.30	6.98	6.52	6.30	5.19	3.52	9.65	10.90
July	7.24	7.38	7.03	7.55	7.07	6.43	3.62	7.61	7.50	7.25	6.82	6.29	3.67	6.97	6.62	6.22	5.77	5.26	3.47	9.60	10.70
Aug	5.98	6.94	7.12	7.13	6.92	6.53	4.90	6.60	6.63	6.60	6.41	6.07	4.24	5.73	5.51	5.25	4.95	4.60	3.19	9.54	9.87
Sept	3.96	5.31	5.77	6.06	6.19	6.4	4.97	4.86	5.14	5.28	5.30	5.18	4.93	3.42	3.71	3.60	3.44	2.27	2.24	7.89	7.89
Oct	2.42	3.47	4.00	4.47	4.77	4.88	4.51	3.14	3.38	3.64	3.70	3.85	3.77	2.37	2.66	2.61	1.94	1.84	1.40	5.63	5.70
Nov	0.94	1.96	2.36	2.75	3.04	3.23	3.24	1.64	1.91	2.16	2.34	2.44	2.33	0.92	0.93	0.92	0.91	0.88	0.68	3.48	3.63
Dec	0.69	1.42	1.76	2.09	2.38	2.5	2.58	1.17	1.41	1.62	1.73	1.80	1.55	0.80	0.86	0.90	0.89	0.83	0.64	2.80	2.70
kWh/m ² -yr	17.11	1873	1934	2004	2036	1955	1472	1556	1608	1626	1799	1722	1263	1447	1303	1230	1275	1165	811	2064	2706

Daily Clear-Sky Insolation (kWh/m ²):													Latitude 60°N									
Azimuth		South							SE-SW						East-West					Tracking		
Mo	h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	1 Axis	2 Axis
Jan	0.13	1.5	1.76	1.72	.70	2.09	2.18	0.91	1.15	1.32	1.46	1.55	.56	0.15	0.15	0.15	0.16	0.15	0.35	2.22	2.33	
Feb	.39	2.9	3.46	3.91	4.24	4.45	4.29	2.59	2.87	3.17	3.34	3.43	3.12	1.38	1.58	1.51	.55	1.52	1.20	5.14	5.21	
Mar	1.49	4.96	5.43	5.84	6.30	6.12	5.34	4.42	4.77	5.09	5.11	5.05	4.19	3.35	3.57	3.20	3.13	2.97	2.27	7.86	7.26	
Apr	3.52	6.78	7.08	7.18	7.28	6.78	4.86	5.39	6.37	6.61	6.48	6.22	4.54	5.41	5.23	5.06	4.8	4.34	3.25	9.84	9.12	
May	7.06	7.87	7.87	7.73	7.31	6.77	4.14	7.48	7.41	7.18	6.84	6.47	4.10	6.86	6.38	6.03	5.64	5.10	3.57	10.06	9.85	
Jun	7.5	8.09	8.04	7.77	7.29	6.60	3.80	7.89	7.57	7.16	6.69	6.44	4.90	7.19	6.71	6.33	5.85	5.23	3.50	9.87	10.91	
July	7.29	7.12	7.26	7.58	7.19	6.61	4.05	7.13	7.36	7.17	6.53	6.35	1.20	6.47	6.32	5.97	5.58	5.13	3.45	9.80	10.68	
Aug	5.51	6.59	6.87	6.95	6.34	6.54	4.67	6.22	6.37	6.46	6.25	5.94	4.30	5.25	5.12	4.93	4.68	4.40	3.15	9.24	9.62	
Sept	3.32	4.69	5.19	5.54	5.74	5.77	4.90	4.25	4.57	4.76	4.85	4.83	3.92	3.25	3.18	3.00	2.8	2.65	2.14	7.21	7.51	
Oct	1.46	2.62	3.11	3.59	3.79	3.97	3.63	2.25	2.58	2.85	2.99	3.07	2.78	1.46	1.40	1.43	.39	1.35	1.28	4.52	4.57	
Nov	0.4	1.02	1.29	1.52	.79	1.84	1.51	0.83	.92	1.17	1.29	1.37	.37	0.41	0.41	0.41	0.4	0.40	0.24	1.94	2.04	
Dec	0.17	0.55	0.69	0.85	0.95	1.04	1.11	0.47	0.55	0.63	0.71	0.75	0.79	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.14	1.05	1.15	
kWh/m ² -yr	13.27	1679	1774	1828	1873	1760	1366	1552	1612	1635	1626	1569	1195	1273	1228	1179	1119	1246	743	2404	25.4	

15-2 مراجع الفصل الثاني

[1]	V. Quaschnig	Understanding renewable energy systems, © 2005 by Earthscan, UK, USA
[2]	G. M. Masters	Renewable and efficient electric power systems, © 2004 by John Wiley
[3]	د. علي حمزة	هندسة النظم الشمسية الكهروضوئية - تحليل وتصميم، مطبعة جامعة دمشق 2009-2008
[4]	T. Markvart	Solar Electricity, John Wiley 2000, Reprinted 2005
[5]	M. Green & others	Applied Photovoltaics, Earthscan 2007
[6]	إشراف د. علي حمزة	مشاريع تخرج سنة خامسة طاقة وطاقة متجددة ودراسات عليا وماجستير 2009-2000

الفصل الثالث

نظم تسخين المياه بالحرارة الشمسية Solar Thermal Water Heating

1-3 مقدمة

إن استخدام طاقة الشمس لتسخين المياه ليست فكرة جديدة. قبل أكثر من مائة سنة، استُخدمت في عدد من البلدان خزانات المياه المطلية باللون الأسود كسخانات مياه شمسية بسيطة. تحسنت تكنولوجيا تسخين المياه بالطاقة الشمسية (SWH) كثيراً خلال القرن الماضي، واليوم هناك أكثر من 30 مليون m^2 من اللواقط الشمسية مركبة في جميع أنحاء العالم. الشكل 1-3 يبين نظام التسخين الأبسط والذي كان الأكثر استخداماً في العالم منذ بضع سنوات. مئات الآلاف من سخانات المياه الشمسية الحديثة، كالمبين في الشكل 2-3، تُستخدم في بلدان مثل الصين والهند وألمانيا واليابان وأستراليا واليونان. في الواقع يتطلب القانون في بعض البلدان تركيب سخانات مياه شمسية مع أي مشروع بناء سكني جديد.



شكل 1-3: نظام تسخين شمسي ذو لواقط مسطحة ودوران طبيعي (ثيرموسيفوني)



شكل 2-3: نظام تسخين شمسي ذو لواقظ ذات أسطوانات مفرغة مركبة في الصين

[1]

بالإضافة إلى تحقيق وفورات في تكاليف الطاقة في تسخين المياه، هناك العديد من المنافع الأخرى المتأتية من استخدام طاقة الشمس لتسخين المياه. معظم سخانات المياه الشمسية تأتي مع خزان إضافي للمياه، الذي يغذي خزان المياه الساخنة التقليدية. وفي هذا فائدة للمستخدمين لتحصيل أكبر سعة تخزين المياه الساخنة وانخفاض احتمال نفاد الماء الساخن. بعض سخانات المياه الشمسية لا تحتاج إلى كهرباء لتشغيلها، ما يعني عدم التبعية لانقطاع التيار الكهربائي ما دام هناك ما يكفي من أشعة الشمس لتشغيل النظام. ويمكن لنظم تسخين المياه بالطاقة الشمسية أن تستخدم أيضا لتسخين مياه المسابح، مع فائدة إضافية لتمديد موسم السباحة لتقديم الطلبات للسباحة في الهواء الطلق.

تشمل الأنظمة الحرارية الشمسية المجالات التالية:

- Solar swimming pool heating التسخين الشمسي لمياه المسابح
 - Solar domestic water heating التسخين الشمسي للمياه المنزلية
 - Solar low-temperature space heating التدفئة الشمسية منخفضة الحرارة للمنازل
 - Solar process heat التسخين الشمسي للمياه في التطبيقات الصناعية
 - Solar thermal electricity توليد الكهرباء بواسطة الحرارة الشمسية generation
- يتناول هذا الفصل بشكل رئيسي مدخلا إلى أنظمة تسخين المياه المنزلية ومياه المسابح، ويعالج الفصل الرابع النظم الكهروحرارية الشمسية.
- يبين الجدول 3-1 معظم الكميات الترموديناميكية اللازمة لهذا الفصل.

جدول 3-1: الكميات الترموديناميكية الضرورية للحسابات الحرارية [2]

Name	Symbol	Unit
Heat, energy	Q	Ws (= J) or kWh
Heat flow	$\dot{Q}$	W
Temperature	θ	°C
Thermodynamic temperature	T	K (Kelvin, $0\text{ K} = -273.15^\circ\text{C}$)
Specific heat capacity	c	J/(kg K)
Thermal conductivity	λ	W/(m K)
Heat transition coefficient	k'	W/(m K)
Coefficient of heat transfer	k	W/(m ² K)
Surface coefficient of heat transfer	α	W/(m ² K)

ترتبط الحرارة Q والتدفق الحراري $\dot{Q}$ heat flow بالعلاقة:

$$Q = \int \dot{Q} dt \quad (3.1)$$

يسبب كل تغير في درجة الحرارة $\Delta\theta$ temperature change تغيراً في الحرارة
heat change ΔQ :

$$\Delta Q = c m \Delta\theta \quad (3.2)$$

حيث c السعة الحرارية و m كتلة المادة المعنية mass of the affected material. يبين الجدول 2-3 السعة الحرارية لبعض المواد.

جدول 2-3: السعة الحرارية لبعض المواد

Name	c in Wh/(kg K)	c in kJ/(kg K)	Name	c in Wh/(kg K)	c in kJ/(kg K)
Aluminium	0.244	0.879	Copper	0.109	0.394
Ice (-20°C to 0°C)	0.58	2.09	Air (dry, 20°C)	0.280	1.007
Iron	0.128	0.456	Brass	0.107	0.386
Ethanol (20°C)	0.665	2.395	Sand, dry	0.22	0.80
Gypsum	0.31	1.1	Water	1.163	4.187
Glass, glass wool	0.233	0.840	Heat transfer fluid		
Wood (spruce)	0.58	2.1	Tylocor55% (50°C)	0.96	3.45

وتوضح المعادلات التالية العلاقة بين وحدات درجة الحرارة:

$$[^{\circ}\text{F}] = [^{\circ}\text{C}] \times 9/5 + 32$$

$$[\text{K}] = [^{\circ}\text{C}] + 273.15 \quad (3-3)$$

$$[\text{K}] = ([^{\circ}\text{F}] + 459.67) \times 5/9$$

القيمة العددية لفروق درجة الحرارة هي ذاتها لأجل $^{\circ}\text{C}$ أو K .

التدفق الحراري $\dot{Q}$ الذي يسبب التغير الحراري لأجل سعة حرارية ثابتة هو:

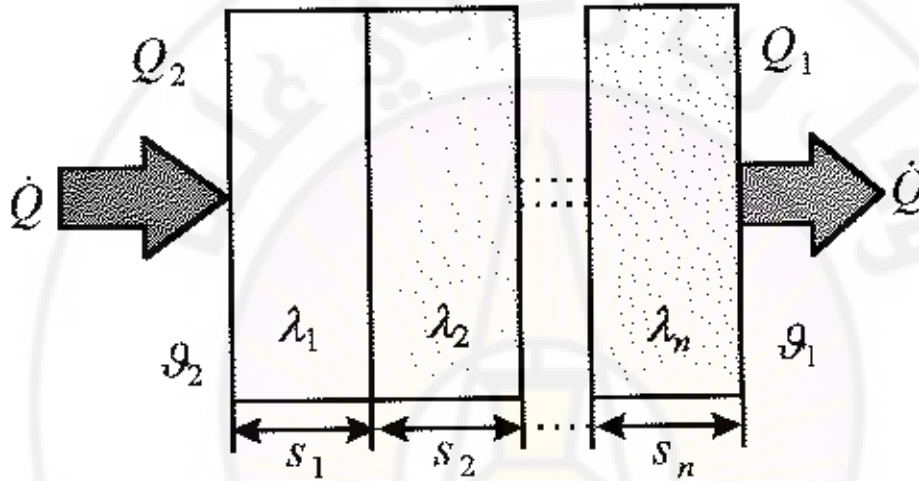
$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = c \frac{dm}{dt} \Delta\theta + c m \frac{d\Delta\theta}{dt} \quad (3.4)$$

يبين الشكل 3-3 جسما مؤلفا من n طبقة مساحة سطح كل منها A . درجة حرارة أحد الجانبين θ_1 والآخر θ_2 . يؤكد هذا الفرق في درجة الحرارة تدفقا حراريا عبر الطبقات حسب العلاقة:

حيث k معامل انتقال الحرارة معطى بالعلاقة:

$$k = \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} \right]^{-1} \quad (3.6)$$

حيث α_1 و α_2 معامل انتقال الحرارة للسطح لكلي الجانبين و λ_i الناقلية الحرارية thermal conductivity للطبقة i و s_i سمك الطبقة i .



شكل 3-3: انتقال حرارة عبر n طبقة كل منها ذات سطح A

يسبب هذا التدفق الحراري زيادة حرارة في الجانب ذي درجة الحرارة الأقل ونقصان حرارة في الجانب ذي درجة الحرارة الأعلى إلى أن تتساوى درجات حرارة الجانبين. يمكن إهمال تغير درجة الحرارة للجانب ذي المحتوى الحراري heat content الأكبر بكثير من المحتوى الحراري للجانب الآخر. مثلاً، المحتوى الحراري للجو المحيط ببناء ما أعلى بكثير منه لداخل البناء. إن التدفق الحراري عبر جدران البناء لا يغير درجة الحرارة الخارجية، وهذا صحيح سواء كانت درجة الحرارة الخارجية أعلى أو أقل من درجة حرارة البناء الداخلية.

يبين الجدول 3-3 مقارنة بين درجات الحرارة لبعض الحالات وبوحدات مختلفة.

جدول 3-3: مقارنة بين درجات الحرارة لبعض الحالات وبوحدات مختلفة [3]

Comparison of temperature scales

Comment	Kelvin	Celsius	Fahrenheit
Absolute zero	0.00	-273.15	-459.67
Lowest recorded surface temperature on Earth (Vostok, Antarctica - July 21, 1983)	184.15	-89.00	-128.20
Fahrenheit's ice/salt mixture	255.37	-17.78	0.00
Ice melts (at standard pressure)	273.15	0.00	32.00
Average surface temperature on Earth	288.15	15.00	59.00
Average human body temperature *	309.95	36.60	98.24
Highest recorded surface temperature on Earth (Al 'Aziziyah, Libya - September 13, 1922)	331.15	58.00	136.40
Water boils (at standard pressure)	373.15	100.00	211.97/102
Titanium melts	1941.15	1668.00	3034.00
The surface of the Sun	5799.15	5526.00	9980.00

يعطي الجدول 3-4 الناقلية الحرارية لبعض المواد.

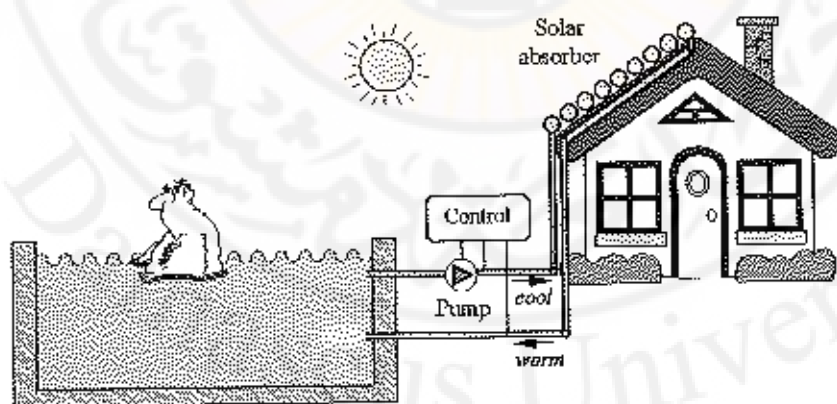
جدول 3-4: الناقلية الحرارية لبعض المواد

Material	Heat conductivity λ in W/(m K)	Material	Heat conductivity λ in W/(m K)
Steel	60	Cork	0.045
Iron	81	Sheep's wool	0.040
Ice (0°C)	2.23	Glass wool	0.040
Reinforced concrete	1.80	Rock wool	0.040
Glass	0.81	Polystyrene (PS)	0.034
Water (20°C)	0.60	Polyurethane (PUR)	0.030
Gypsum	0.45	Air (dry, 20°C)	0.026
Wood (spruce)	0.14	Glass fibre vacuum	0.003

3-2 الأنظمة الحرارية الشمسية لتسخين مياه المسابح

إن الطلب على الحرارة تحت درجات حرارة منخفضة للمساح تسمح باستخدام نظم طاقة شمسية بسيطة واقتصادية. تحتاج المساح في المناطق معتدلة المناخ إلى نظم تسخين؛ وإلا فهي قابلة للاستخدام لبضعة أسابيع فقط في العام. ففي ألمانيا مثلاً يوجد حوالي 500000 مسبح، ونظراً لأن درجة حرارة الجو الوسطية أقل من 20 درجة مئوية حتى في الصيف، فيوجد كمون عال للتسخين الشمسي الذي أصبح في بعض الحالات منافساً للنظم التقليدية.

يتعلق الطلب الحراري للمساح الخارجية تعلقاً كبيراً بطاقة الإشعاع الشمسي المتاحة في المكان. في الشتاء، حيث الإشعاع الشمسي ضعيف، تُقل هذه المساح، فيما يكون التسخين الشمسي خياراً جيداً في موسم السباحة في فصل الصيف والفترات الانتقالية. يبين الشكل 3-4 مبدأ التسخين الشمسي للمساح. درجات حرارة المياه للمناطق المكشوفة في أوروبا الوسطى هي بين 16 و 19 درجة مئوية خلال موسم السباحة، وبالتالي نحتاج إلى رفع درجة حرارة الماء بضع درجات ليكون مناسباً. يقوم الماص الشمسي solar absorber بتحويل الإشعاع الشمسي إلى حرارة تسخن الماء البارد القادم من المسبح بمساعدة مضخة حيث يجري الماء الساخن عائداً إلى المسبح. النظام ليس بحاجة إلى خزان ماء ساخن كما هو الحال في النظم المنزلية إذ أن المسبح نفسه يؤلف خزاناً للماء الساخن.



شكل 3-4: مبدأ التسخين الشمسي لمياه المساح [2]

لا توجد حاجة لاستخدام ماص معقد، بل يكفي في معظم الحالات تركيب أنابيب سوداء على مساحات كبيرة مثل سطوح الأبنية. مادة الماص هي من البلاستيك عادة، الذي يجب أن يتحمل الأشعة الشمسية فوق البنفسجية والماء المكلور chlorinated. المواد المناسبة هي البولي إثيلين PE و البولي بروبيلين PP و EPDM. لا يسمح باستخدام PVC لأسباب بيئية، إذ أنه يطلق مواد عالية السمية لدى احتراقه.

يجب أن تعمل المضخة فقط في حال تمكن الماص من رفع درجة حرارة الماء الوارد إليه. إذا اشتغلت المضخة في يوم غائم جدا أو في الليل، فالذي يحصل هو تبرّد الماء في الماص الذي يعمل عندها كمبرد radiator. لضبط عمل المضخة يُستخدم متحكم ثنائي الخطوة مع تباطؤ بحيث يتم تشغيل المضخة حالما تكتشف المستشعرات تجاوز الفرق في درجة الحرارة للمسيح والماص عتبة معينة.

يمكن أن يُرفد النظام الشمسي بنظام تسخين تقليدي مساعد بحيث نضمن درجة الحرارة المرغوبة لماء المصباح.

الطلب الحراري النموذجي لمصباح خارجي في ظروف مناخية معتدلة يتراوح بين 150 kWh و 450 kWh لكل متر مربع من سطح المصباح. يحقق نظام التسخين الشمسي المصمّم جيدا درجة حرارة 23°C ، وبالتالي لا حاجة لنظام تسخين بالوقود الأحفوري. لأجل مصباح مساحته 2000m^2 ، يمكن لنظام التسخين الشمسي أن يتجنب في كل موسم حرق 75000 لتر من الفيول و إطلاق 150000 كغ من CO_2 (مردود الرجل 80%). تخفّف تغطية المصباح ليلا من الضياع الحراري وتوفر طاقة إضافية.

كقاعدة عملية، يجب أن يكون سطح الماص الشمسي 50-80% من مساحة المصباح، ويعتمد هذا اعتمادا كبيرا على الطقس. كلفة الماص حوالي 100 EURO/m². عادة تكون كلفة النظام الشمسي أقل من كلفة النظام التقليدي.

تحتاج المضخة إلى الكهرباء لتشغيلها، ويمكن تأمينها بواسطة مولد PV صغير. وفي هذه الحالة لا حاجة لنظام التحكم، إذ أن المولد الشمسي يدور محرك المضخة أثناء سطوع الشمس.

3-3 نظم التسخين الشمسي للمياه المنزلية

Solar thermal domestic water heating systems

يتطلب تسخين المياه المنزلية درجات حرارة أعلى بكثير من مياه المسابح. إن السطوح الماصة البسيطة المستخدمة في نظم تسخين المسابح غير مناسبة لنظم تسخين المياه المنزلية، لأن ضياعات السطوح الماصة بسبب الحمل والمطر والتلج والإشعاع عالية بشكل غير مقبول. تستخدم نظم التسخين الشمسي للمياه المنزلية لواقط ذات ضياعات أقل بكثير. لأجل درجات حرارة مياه أعلى. تكون هذه اللواقط إما مسطحة flat-plate أو مسطحة مفرغة evacuated flat-plate أو أسطوانية مفرغة evacuated tube أو لواقط متكاملة مع نظم التخزين.

يتألف النظام الكامل النموذجي من لاقط و خزان ماء ساخن و مضخة ووحدة تحكم ذكية، وبذلك يستطيع النظام تزويد ماء ساخن بمستوى مناسب كما هو متوقع من نظام تسخين تقليدي. سنتناول فيما يلي نظامين شائعي الاستخدام.

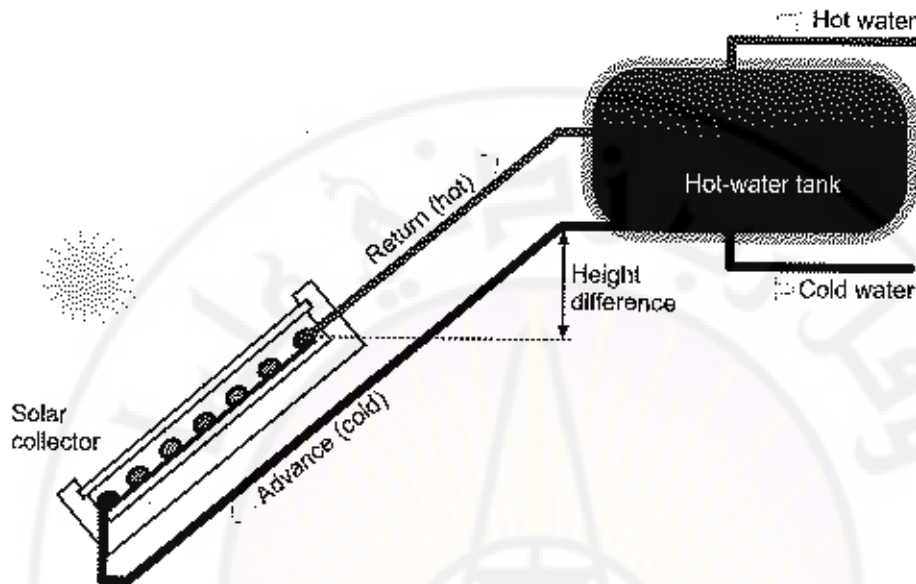
3-3-1 النظام الترموسيفوني (نظام الدوران الطبيعي)

Thermosyphon system

يستخدم النظام الترموسيفوني (النظام ذو الدوران الطبيعي) المبين في الشكل 3-5-5 الثقالة gravity، إذ يملك الماء البارد كثافة نوعية specific density أعلى من الماء الساخن وبالتالي أثقل فينزل إلى القعر.

يُنصَّب اللاقط دائماً تحت خزان الماء الساخن، وينساب الماء البارد من قعر الخزان إلى اللاقط الشمسي عبر أنبوب ماء نازل. عندما يسخن اللاقط الماء، يصعد الماء ثانية عائداً عبر أنبوب ماء صاعد من نهاية اللاقط العلوية إلى الخزان. يتم تسخين الماء في المنظومة المؤلفة من الخزان و أنابيب المياه واللاقط حتى يتحقق توازن درجة الحرارة. يستطيع المستهلك سحب الماء الساخن من أعلى الخزان، ويتم تعويض الماء المستهلك بواسطة ماء بارد جديد عبر فوهة سفلية في الخزان، ويُسَخَّن الماء الجديد في اللاقط على النحو ذاته المذكور سابقاً. لأجل الإشعاع الشمسي العالي يصعد الماء الساخن بسرعة أكبر من سرعته لأجل الإشعاع الضعيف وذلك بسبب فروق درجة

الحرارة الأعلى للماء. لذلك يكتف جريان الماء نفسه بشكل كامل تقريبا مع الإشعاع الشمسي المتاح.



شكل 3-5: مخطط رمزي لنظام ثرموسيفوني

يوضع الخزان واللاقط عادة على سطح البناء أفقي السقف، أما لأجل البناء ذي السقف المائل فيتم وضع اللاقط على الجهة الجنوبية من السقف المائل والخزان في أعلى نقطة ممكنة تحت السقف و أعلى من اللاقط. تجدر الإشارة إلى أن البعد الشاقولي بين الخزان واللاقط يجب أن يكون كافيا لتجنب تبرّد ماء الخزان بواسطة اللاقط في الليل أو في الأيام الغائمة جدا.

يسمى النظام الذي ينساب فيه الماء مباشرة عبر اللاقط، نظام وحيد الدارة -single circuit system. مثل هذا النظام مناسب فقط للمناطق غير المتجمدة، وإلا يتجمد الماء في اللاقط والأنابيب ويخرب النظام. في المناطق التي يحصل فيها تجمد، يُستخدم غالبا نظام تسخين شمسي مضاعف الدارة double-circuit system، الذي يتألف من دارتي مياه منفصلتين: الدارة الشمسية المغلقة وفيها ماء مخلوط بمائع تجمد مفصول عن ماء الخزان، ودارة ماء الاستخدام الساخن، ويربط بين الدارتين مبادل

حراري يقوم بنقل الحرارة من دائرة اللاقط إلى ماء الخزان. تُستخدم غالباً مواد الغليكولز glycols كموانع تجمد؛ و يجب الانتباه إلى ضرورة كون موانع التجمد غير سامة لتجنب تلويث ماء الاستخدام في حال تعطل النظام، وأن تكون متوافقة مع المواد المستخدمة في تصنيع النظام لتجنب التآكل.

سلبيات النظام الثرموسيفوني

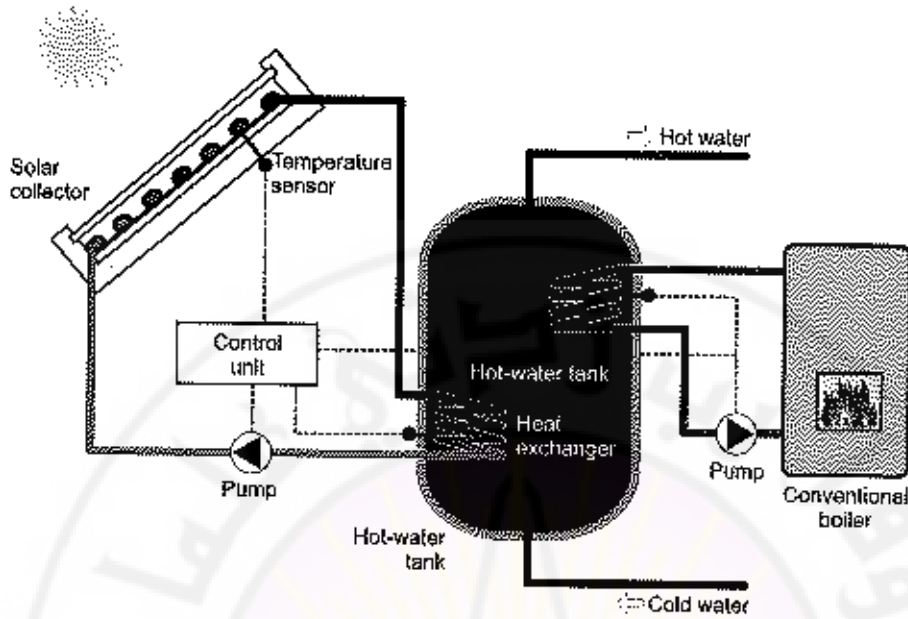
- النظام ذو عطالة كبيرة ولايستطيع الاستجابة للتغيرات السريعة للإشعاع الشمسي
- النظام غير مناسب للأجهزة الكبيرة ذات مجتمعات أكبر من 10 متر مربع
- في الواقع العملي لايمكن في بعض الحالات تحقيق وضع الخزان أعلى من اللاقط
- يمكن أن ينخفض مردود اللاقط بسبب درجات الحرارة العالية في الدائرة الشمسية

إيجابيات النظام الثرموسيفوني

- اقتصادي بسبب عدم الحاجة إلى مضخة أو تحكم
- أعطاله قليلة.

2-3-3 نظم التدوير القسري Systems with forced circulation

خلافًا للنظم الثرموسيفونية، تستخدم نظم التدوير القسري مضخة كهربائية لتحريك الماء في الدائرة الشمسية، مايعني أنه يمكن تركيب الخزان واللاقط دون ضرورة وجود فرق في الارتفاع بينهما، لكن يجب العمل على استخدام أقصر طول ممكن من أنابيب المياه وذلك لتجنب الضياعات الحرارية فيها. يبين الشكل (3-6) نظام تدوير قسري. النظام مجهز بدائرة تحكم تستخدم مستشعر درجة حرارة اللاقط ومستشعر درجة حرارة الخزان، بحيث يتم تشغيل المضخة حالما تصبح درجة حرارة اللاقط أكبر من درجة حرارة الخزان بقيمة عتبة معينة تتراوح بين 5 و 10 درجات. عندما يهبط فرق درجة الحرارة إلى ما دون قيمة عتبة ثانية، يتم الأمر بإيقاف المضخة. يجب اختيار القيمتين العتبتين بحيث لايتدخل المضخة في حالة تشغيل وتوقف متكرر تحت ظروف الإشعاع الشمسي الضعيف.



شكل 3-6: نظام تدوير قسري مضاعف الدارة

يمكن استخدام مضخات التدوير التقليدية في منشآت التسخين الشمسي، فهي موثوقة واقتصادية. وتتملك معظم المضخات إمكانية العمل بسرعات مختلفة، ما يؤهلها لتكييف معدل التدفق مع الإشعاع الشمسي المتاح. تُصمّم المضخات عادة لأجل معدلات تدفق تبلغ 30 إلى 50 ليتر بالساعة لكل 1 متر مربع من مساحة اللاقط. تُختار معدلات تدفق أعلى لمصابات المسابح لأن درجة الحرارة المطلوبة أقل وحاجة الماء للحرارة أقل. غير أنه لأجل معدل تدفق منخفض جداً، ترتفع درجة حرارة اللاقط وبالتالي ينخفض مردود النظام. ومن جهة أخرى، لأجل معدل تدفق عال جداً، تحتاج المضخة إلى طاقة كبيرة.

يُغذى محرك المضخة عادة من الشبكة العامة أي بتيار متناوب، ويُستخدم أيضاً محرك تيار مستمر في بعض الحالات، ما يسمح باستخدام مولد كهروضوئي لتغذية المحرك، وعليه كل الطاقة المطلوبة للنظام تأتي من الشمس.

3-4 اللواقيط الشمسية Solar collectors

يمكن تصنيف اللواقط الشمسية المتوفرة إلى:

- اللواقط المتكاملة مع التخزين (ISC) Integral storage collectors

- اللواقط المسطحة Flat-plate collectors

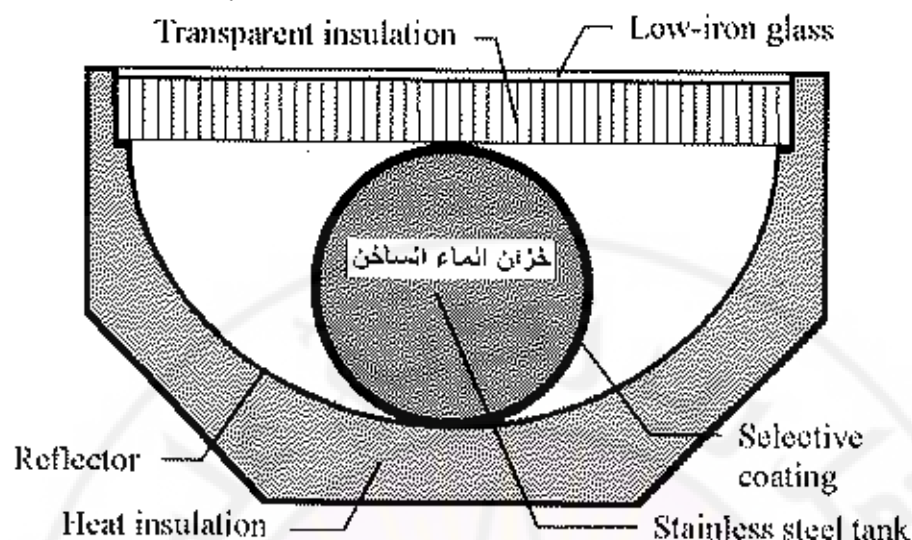
- اللواقط المسطحة المفرغة Evacuated flat-plate collectors

- اللواقط الأسطوانية المفرغة Evacuated tube collectors

تحتاج اللواقط المسطحة واللاقط الأسطوانية المفرغة دائما إلى خزان. حجم ماء اللاقط نفسه قليل جداً، ويمكن أن تبلغ درجة حرارة الماء داخل اللاقط قيمة أكبر بكثير من 100 درجة إذا لم يُعوض الماء باستمرار. كما ينخفض مردود اللاقط انخفاضاً كبيراً لأجل درجات حرارة تشغيل عالية. لذلك تحتاج جميع نظم التسخين الشمسي لمياه المنازل إلى خزان ماء ساخن كي يتخزن فيه كميات كبيرة من الحرارة الممتصة بواسطة اللاقط ولتزويد الماء الساخن في الليل وفي الظروف الجوية السيئة.

3-4-1 اللواقط المتكاملة مع التخزين

يكون خزان الماء الساخن المصنوع من الفولاذ عديم الصدأ متكاملًا مع اللاقط نفسه. يبين الشكل 3-7 مخططاً مبسطاً لهذا النوع من النظم. الغطاء العلوي مركب مؤلف من زجاج منخفض الحديد low-iron glass وتحتة مادة عازلة شفافة transparent insulation material (TIM) ذات نفاذية transmittance أقل بقليل من الزجاج ولكنها تملك معامل انتقال حرارة أخفض بكثير من الزجاج. يعطي الجدول 3-5 مقارنة بين الغطاء الزجاجي التقليدي والغطاء المركب من حيث معامل انتقال الحرارة k ومعامل انتقال الطاقة الكلية g . الجدار الخلفي معزول جيداً وبسطحه الداخلي عاكس جيد لضوء الشمس إلى الخزان. يخزن النظام الذي يغطي 2 m^2 حوالي 160 ليتر من الماء الساخن. من سلبيات النظام وزنه الثقيل وأبعاده الكبيرة ومردوده المنخفض نسبة إلى النظم ذات الدوران القسري؛ ما يجعله غير شائع الاستخدام حتى الآن.



شكل 3-7: مقطع في نظام متكامل مجمع وتخزين

جدول 3-5: مقارنة بين الغطاء الزجاجي التقليدي والغطاء المركب

Material	Conventional glass covers		TIM between low-iron glass with air gap		
	k in $W/(m^2 \cdot K)$	g-value	Material	k in $W/(m^2 \cdot K)$	g-value
1 layer of glass (4 mm)	5.9	0.86	Aero gel granulate (20 mm)	0.85	0.4
2 layers of insulating glass (20 mm)	3.0	0.77	Polycarbonate honeycomb structure (100 mm)	0.7	0.68
3 layers of glass with IR coating (36 mm)	1.0-1.2	0.50-0.62	Polycarbonate capillary structure (100 mm)	0.7	0.64

Note: IR = infrared reflecting

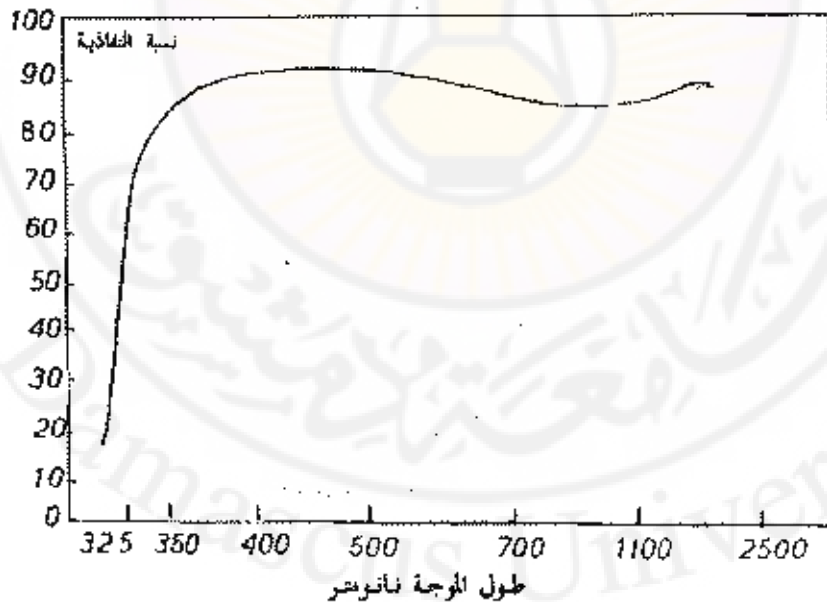
3-4-2 اللواظ الشمسية المسطحة Flat-plate collectors [4][2]

يتألف اللاظ الشمسي المسطح من ثلاث مركبات: الغطاء الشفاف وصندوق اللاظ collector housing (box) والسطح الماص absorber. يحول السطح الماص الإشعاع الشمسي إلى حرارة يتم نقلها إلى الماء في شبكة أنابيب الماص المثبتة على

صفحة السطح الماص. الصندوق معزول جيداً من الخلف والجوانب لتقليل الضياعات الحرارية إلى حدّها الأدنى؛ ولكن لا يزال يوجد ضياعات حرارية في اللاقط التي تتعلق بشكل رئيسي بفرق درجة الحرارة بين السطح الماص والجو المحيط باللاقط. تُصنّف هذه الضياعات إلى ضياعات حمل convection بسبب حركة الهواء الخارجي و ضياعات إشعاع radiation losses.

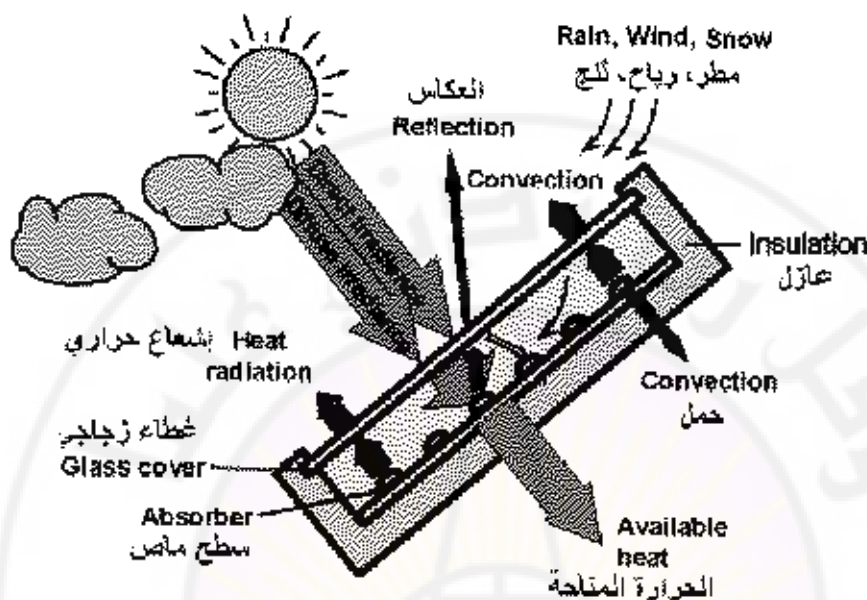
غطاء اللاقط

غطاء اللاقط مؤلف غالباً من الزجاج الشفاف المعالج حرارياً والحوالي على نسبة قليلة جداً من الحديد مما يكسبه مقاومة ميكانيكية ضد الكسر. (وإذا انكسر يفتت إلى أجزاء صغيرة)، ومقاومة ضد الصدمات الحرارية التي يتعرض لها اللاقط أثناء عمله. ينصف الزجاج المستخدم بنفاذية للأشعة الشمسية كما هو موضح بالشكل 3-8. يمنع الغطاء معظم ضياعات الحمل كما يقلل من إشعاع الحرارة من السطح الماص إلى المحيط على طريقة عمل البيت لأخضر greenhouse. ولكن يعكس الزجاج جزءاً صغيراً من الإشعاع الشمسي الذي لا يدرك السطح الماص.

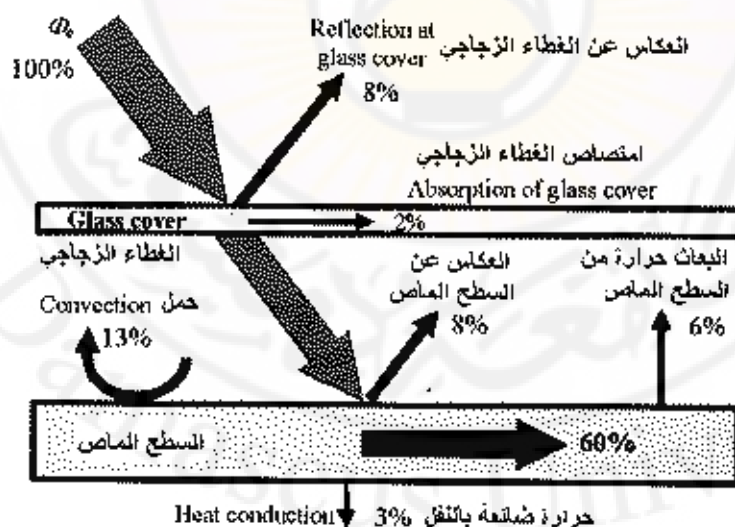


شكل 3-8: نفاذية الغطاء الزجاجي كتابع لطول موجة الإشعاع الشمسي [4]

يبين الشكل 9-3 العمليات التي تحصل في اللاقط ويبين الشكل 10-3 جريان الطاقة في اللواقط المسطحة.



شكل 9-3: العمليات الجارية في لاقط شمسي مسطح



شكل 10-3: جريان الطاقة في اللاقط الشمسي والضيعات الممكنة

يعكس ويمتص الغطاء الزجاجي جزءاً من الاستطاعة الشمسية الساقطة عليه Φ_e ومعظم الإشعاع يعبر الزجاج كما هو مبين في الشكل 3-11. ثمة ثلاثة محددات تصف العمليات الجارية في اللاقط: الانعكاسية (p) reflectance و الامتصاصية absorptance (α) و النفاذية (τ) transmittance حيث

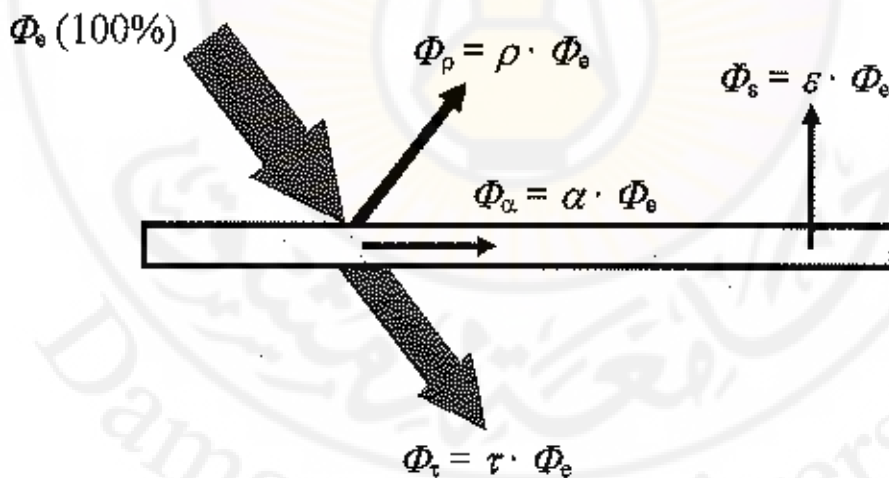
$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (3.7)$$

معادلة اتزان الاستطاعات هي:

$$\Phi_e = \Phi_\rho + \Phi_\alpha + \Phi_\tau = \Phi_e(\rho + \alpha + \tau) \quad (3.8)$$

إذا كان الزجاج في وضع التوازن الحراري، يجب أن يطلق الزجاج الإشعاع الممتص، وعندها تكون الاستطاعة المنبعثة emitted مساوية للاستطاعة الممتصة، وإلا سيحمى الزجاج على نحو غير محدد. إذن، الانبعاثية (ε) emittance تساوي الامتصاصية:

$$\alpha = \varepsilon \quad (3.9)$$



شكل 3-11: العمليات في الغطاء الزجاجي للاقط الشمسي المسطح

تستخدم معظم اللواقط غطاء زجاجيا وحيد الطبقة وهي تتفوق على الأغشية البلاستيكية لأن عمر البلاستيك محدود بسبب مقاومته الضعيفة للأشعة فوق البنفسجية وللتأثيرات الجوية. الزجاج المضاعف قد يقلل من الضياعات الحرارية ولكن يقلل أيضا الاستطاعة المنقولة بزيادة التكاليف.

صندوق اللاقط

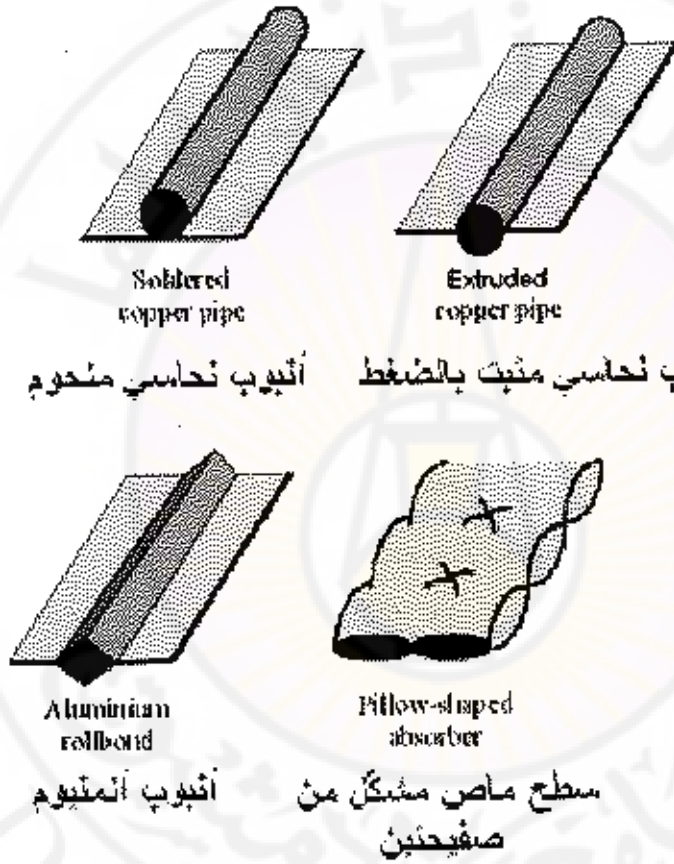
يُصنع صندوق اللاقط من صفائح معدنية (ألومنيوم أو المنيوم مسحوق ومطلي كهربائيا بطبقة من الأكسيد، أو صفائح من الفولاذ المغلفن بطريقة التغطيس في أحواض الزنك الحار، أو صفائح الفولاذ غير القابل للصدأ)، أو من اللدائن البلاستيكية أو من الألياف الزجاجية. وتحدد نظم المواصفات القياسية سماكة كل نوع من الصفائح المعدنية المستخدمة. يتصمم الصندوق بحيث يكون محكم الإغلاق ولا يسمح بتهديب الحرارة من داخله ويمنع دخول الماء والغاز إليه من الخارج ويمنع حدوث أي تكاثف داخلي يقلل من مردود اللاقط ويحدد من أدائه.

العوازل الحرارية في اللاقط

فيما يتعلق بالعازل الحراري، يجب أن يحيط العازل بالسطح الماص من الخلف والجوانب ويحويهما معا الصندوق لكي يؤمن عدم حدوث تسرب حراري من السطح الماص إلى خارج اللاقط. يجب أن يكون العازل مقاوما لدرجة الحرارة وألا تتغير خواصه من جراء التقادم الحراري والدورات الحرارية الناتجة في اللاقط أثناء عمله الطبيعي. يُصنع العازل الحراري من الصوف الزجاجي fiber glass (ناقليته الحرارية $0.030-0.042 \text{ W/(m.K)}$) أو من مادة البوليوريثان polyurethane وهي مادة بلاستيكية ناقليتها الحرارية $0.021-0.029 \text{ W/(m.K)}$ أو من مادة البوليستيرين (ستيريوبور) وهي مادة بلاستيكية أيضا ناقليتها الحرارية $0.030-0.035$. لكل من المواد السابقة الذكر خواصها ومميزاتها وسلبياتها المشروحة في الكودات الخاصة باللواقط الشمسية المسطحة مثل الكود العربي السوري لنظم التسخين الشمسي للمياه في الأبنية السكنية الذي أصدرته نقابة المهندسين السوريين [4].

السطح الماص

يعتبر السطح الماص ماصاً وناقلًا للحرارة ويتكون من صفيحة معدنية نحاسية أو أوفولاذية أو ألومنيومية، وشبكة من الأنابيب (المجاري) من نفس معدن الصفيحة. تُثبت شبكة الأنابيب على الصفيحة بطرق مختلفة كما يبين الشكل 3-12.



شكل 3-12: تصميمات مختلفة للسطح الماص الشمسي [2]

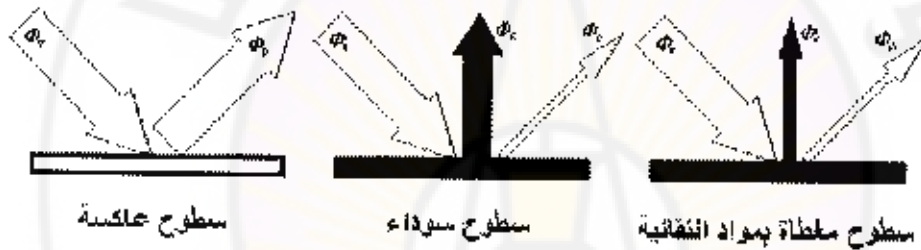
الألومنيوم قليل الاستعمال كسطح ماص لسببين: الأول أنه غير مقاوم للتآكل والثاني هو أن إنتاجه يتطلب طاقة أكبر من المواد الأخرى.

يجب أن يحقق السطح الماص أمرين معا:

- أن يمتص أكبر نسبة من الأشعة الشمسية الواردة إليه

-- وأن يصدر أقل نسبة من الطاقة الحرارية الممتصة كأشعة حرارية.

أحد الخيارات هو طلاء السطح الماص بطلاء أسود مقاوم لدرجة الحرارة. الخيار الآخر هو استخدام مواد انتقائية selective materials سوداء اللون كغطاء للصفحة مثل الكروم الأسود chrome أو النيكل الأسود nickel أو تينوكس TiNOX التي تثبت على الصفحة الماصة بطرق أكثر تعقيدا من الطلاء الأسود وبالتالي تكون أغلى. يبين الشكل 3-13 أداء المواد المختلفة. من الضروري فحص طيف الإشعاع الحراري بهدف التعرف على مبدأ عمل السطوح الماصة المغطاة بمواد انتقائية.



شكل 3-13: أداء مواد مختلفة

تعتمد الإشعاعية الحرارية L_e radiance على درجة الحرارة المطلقة T وطول الموجة λ وتعطى حسب بلانك Planck بالمعادلة:

$$L_{e,\lambda}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1} \cdot \frac{1}{\Omega_0} \quad (3.10)$$

$$c_1 = 2 \cdot h \cdot c^2 \approx 1.191 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2 \quad (3.11)$$

$$c_2 = \frac{h \cdot c}{k} = 1.439 \times 10^{-2} \text{ mK} \quad (3.12)$$

$$\Omega_0 = 1 \text{ sr}$$

ستيراديان sr هي واحدة الزاوية الصلبة solid angle. المساواة الأخيرة ضرورية لتحقيق توازن الواحدات.

معظم الطيف الشمسي يقع في مجال طول موجة أقل من $2 \mu\text{m}$ ، لذلك يجب أن تكون امتصاصية السطح الماص عالية جداً في هذا المجال. تسخن الشمس السطح الماص إلى حوالي 350 K. القيمة العظمى لطيف الانبعاث emittance spectrum المقابل أكبر من $2 \mu\text{m}$ ، نظراً لأن الامتصاصية α مساوية تماماً للانبعاثية ϵ ، يجب أن تكون الامتصاصية أقل ما يمكن في المجال الأكبر من $2 \mu\text{m}$ بحيث يصدر السطح الماص الممتحن قليلاً من الإشعاع الحراري إلى الجو المحيط.

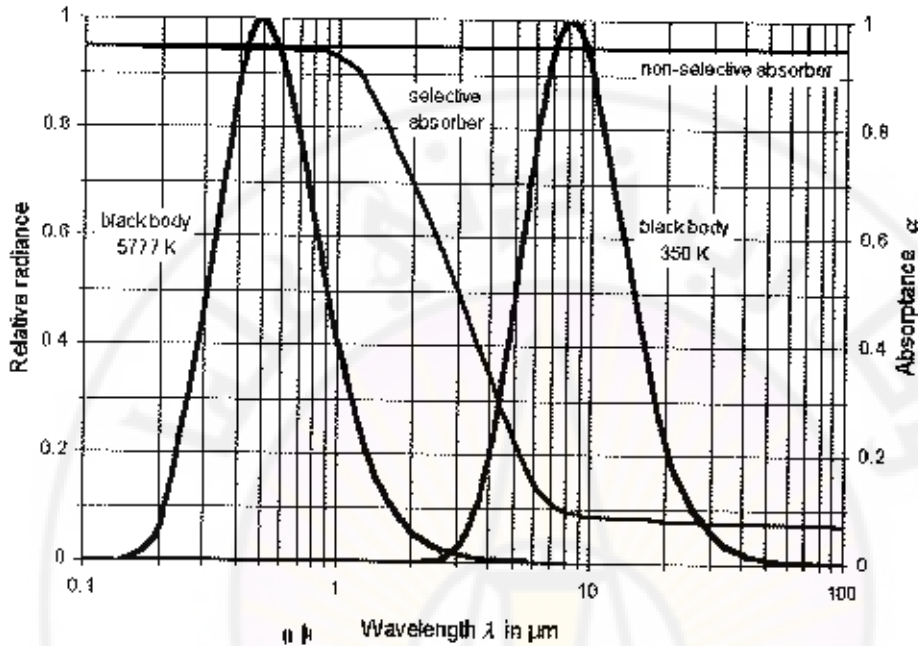
يبين الشكل 3-14 الإشعاعية النسبية منسوبة إلى قمة الطيف المقابلة لأجل 350 K و 5777 K (درجة حرارة سطح الشمس) وكذلك امتصاصية سطح ماص انتقائي و آخر غير انتقائي. يلخص الجدول 3-6 محددات بعض المواد الانتقائية وغير الانتقائية.

جدول 3-6: محددات بعض المواد الانتقائية وغير الانتقائية للسطح الماص

Material	Visible			Infrared		
	$\alpha = \epsilon$	τ	ρ	$\alpha = \epsilon$	τ	ρ
Non-selective absorber	0.97	0	0.03	0.97	0	0.03
Black chrome	0.87	0	0.13	0.09	0	0.91
Black nickel	0.88	0	0.12	0.07	0	0.93
TINOX (TIN + TiO ₂)	0.96	0	0.05	0.05	0	0.95

تغذية الهواء vacuum بين الغطاء الزجاجي والسطح الماص من شأنه أن يقلل ضياعات الحمل الحراري بسبب حركة الهواء داخل اللاقط، وهذا هو مبدأ اللاقط المسطح المفرغ. ولكن من الصعب المحافظة على الخلاء لمدة طويلة، إذ إن الهواء الجوي يجد دوماً مساراً بين الزجاج وصندوق اللاقط ليدخل إلى اللاقط. لذلك ينحتم

تفريغ الهواء من وقت لآخر. إن اللاقط الأسطوانى المفرغ يمكن أن يتجنب هذه السليبيات.



شكل 3-14: طيفوف الأجسام السوداء لأجل 350 و 5777 كلفن وامتنصاصية السطوح الماصة الانتقائية وغير الانتقائية [2]

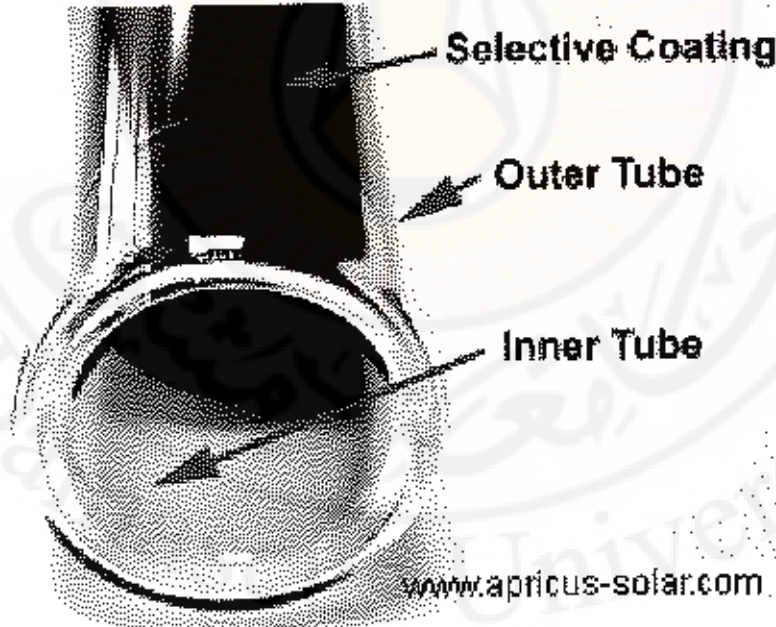
3-4-3 اللواقط الأسطوانية (الأنبوبية) المفرغة Evacuated tube collectors

تستخدم هذه التقنية منذ سنوات عديدة في ألمانيا وكندا والصين والمملكة المتحدة و يكثر استخدامها مؤخراً في سورية (النوع مزدوج الأسطوانات). يمكن لهذا النوع من اللواقط بلوغ درجات حرارة عالية في المجال من 77 إلى 177 درجة مئوية. كما يمكنها أن تعمل بمرودود عال جداً إذا توفرت ظروف تشغيل مناسبة. وهي مناسبة جداً للتطبيقات الحرارية الصناعية والتجارية، كما يمكن أن تكون بديلاً كفوئاً للواقط المسطحة لأجل التدفئة المنزلية وكذلك لتسخين المياه المنزلية.

يتألف هذا اللاقط من عدد من الأسطوانات الزجاجية المتوازية، وكل أسطوانة تكون مفرغة من الهواء، ما يمنع الضياعات الحرارية بالحمل والتوصيل. تُصنّف هذه اللواقط إلى مجموعتين رئيسيتين هما لواقط ذات جريان مباشر ولواقط ذات أنابيب حرارية.

لواقط أسطوانات مفرغة ذات جريان مباشر Direct-flow evacuated tube collectors

تُصنع هذه اللواقط بأشكال متعددة وتُستخدم على نطاق واسع في التسخين الشمسي للمياه المنزلية. أكثر أشكالها استخداماً في سورية هو النوع ذو الأسطوانتين الزجاجيتين Twin-tube glass. تتألف كل أسطوانة مفرغة من أسطوانتين زجاجيتين متمركزتين واحدة خارجية والأخرى داخلية (الشكل 3-15). الزجاج المستخدم هو من النوع القوي للغاية مثل borosilicate glass. الأسطوانة الخارجية شفافة بحيث تسمح لكافة مركبات أشعة الشمس المباشرة والمنتشرة والمنعكسة بالمرور عبرها بأدنى انعكاس.



شكل 3-15: أسطوانة شمسية مضاعفة مفرغة Twin-glass tube [6]

الأسطوانة الداخلية مغطاة بطلاء انتقائي خاص (مثلا Al-N/Al) الذي يمتاز بامتصاصية ممتازة وانعكاسية أصغرية للإشعاع الشمسي. تُلحم الأسطوانتان معا من إحدى نهايتيهما ويُخلَى الهواء من الفضاء بين سطحي الأسطوانتين فيتشكّل فراغ vacuum. يُولف هذا الفراغ عاملا مهما في أداء نظم الأسطوانات المفرغة، إذ أنه عازل ممتاز، مما يمنع ضياع الحرارة للوسط الخارجي، وبالتالي تكون الأسطوانة الخارجية باردة على الرغم من بلوغ درجة الحرارة داخل الجهاز حوالي 150°C . هذا يعني أن الجهاز يعمل بكفاءة في ظروف الطقس البارد، فبتفوق بذلك على اللواقط المسطحة بسبب فقدتها الحراري الكبير في هذه الظروف.

للمحافظة على الوسط مفرغا بين الأسطوانتين، تُستخدم حلقة من الباريوم barium getter (تُستخدم الإجراء ذاته في صمامات التلفزيون) مبنية في الشكل 3-16.



شكل 3-16: حلقة من الباريوم في قعر الأسطوانة لتعزيز خلاء الهواء [6]

خلال تصنيع الأسطوانة المفرغة، تُعرض الحلقة إلى درجات حرارة عالية، ما يسبب تشكل غطاء نقي من الباريوم على قعر الأسطوانة. تمتص طبقة الباريوم أي غازات تنشأ في الأسطوانة أثناء التخزين أو التشغيل مثل CO , CO_2 , N_2 , O_2 , H_2O , H_2 ، ما يساعد على المحافظة على الخلاء. تقدم طبقة الباريوم أيضا مؤشرا مرئيا لحالة الخلاء. اللون الفضي يدل أن الخلاء في حالة جيدة، واللون الأبيض هو مؤشر على تعطل الخلاء (الشكل 3-17).



شكل 3-17: الأسطوانة اليمينية: الخلاء مفقود - الأسطوانة اليسارية: الخلاء موجود

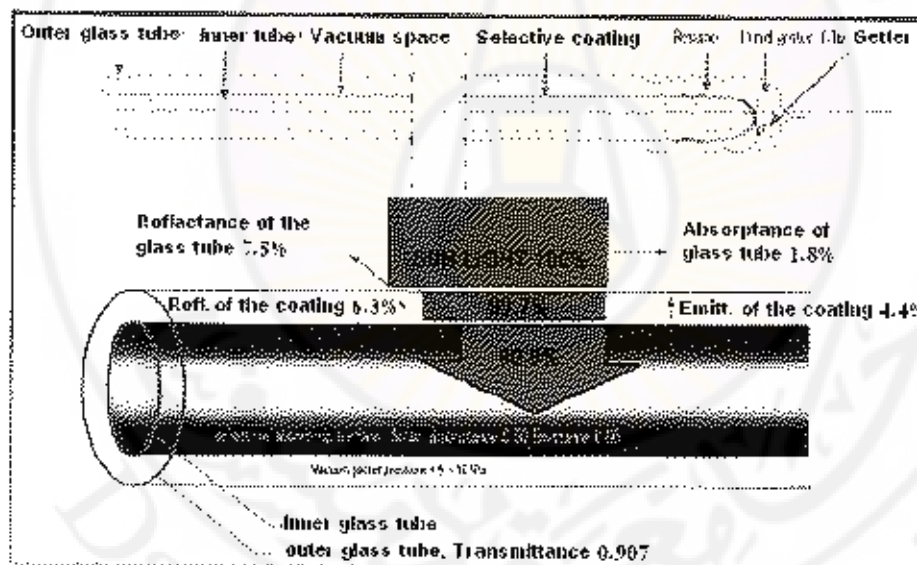
يبين الجدول 3-7 المواصفات الفنية الأساسية للأسطوانات المفرغة.

جدول 3-7: المواصفات الفنية الأساسية للأسطوانات المفرغة

Length (nominal)	1500mm /1800mm
Outer tube diameter	58mm
Inner tube diameter	47mm
Glass thickness	1.6mm
Thermal expansion	$3.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$
Material	Borosilicate Glass 3.3

Absorptive Coating	Graded Al-N/Al
Absorptance	>92% (AM1.5)
Emittance	<8% (80°C)
Vacuum	$P < 5 \times 10^{-3}$ Pa
Stagnation Temperature	>200°C
Heat Loss	<0.8W/ (m ² °C)
Maximum Strength	0.8MPa

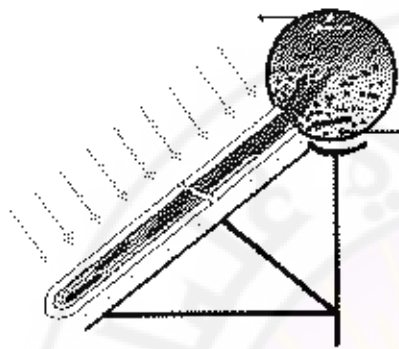
يبين الشكل 3-18 جريان الطاقة في الأسطوانة الشمسية حيث أن حوالي 80% من الاستطاعة الشمسية تنتقل إلى الأسطوانة الداخلية. تتوزع النسبة 20% بين انعكاسية الزجاج الخارجي (7.5%) و امتصاصية الزجاج الخارجي (1.8%) وانعكاسية طلاء الأسطوانة الداخلية (6.3%) وانبعاثيتها (4.4%).



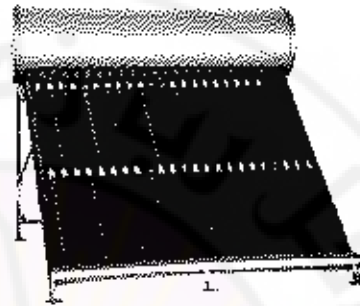
شكل 3-18: جريان الطاقة في الأسطوانة المفرغة ذات الجريان المباشر [9]

في الأجهزة المستخدمة في سورية، تُلبّت الأسطوانات الشمسية بالخزان بواسطة جوانات سيليكون حراري خاصة، و تتصل الأسطوانات الداخلية مباشرة مع خزان الماء ، إذ يدخل الماء البارد إلى الخزان من فتحة الدخول ومنه إلى الأسطوانات

الداخلية حيث يسخن ويجري راجعا إلى الأعلى وفق مبدأ الحمل الحراري (النوران الطبيعي أو التيرموسيفوني)، كما هو مبين في الشكل 3-19. يمتزج الماء البارد مع الماء الساخن في الخزان، ما يجعل درجة الحرارة متجانسة تقريبا على كامل الخزان [5].



مبدأ عمل الأسطوانة الشمسية
المفرغة ذات الخزان المباشر



السخان الشمسي الكامل

شكل 3-19: مبدأ عمل الأسطوانة الشمسية المفرغة ذات الجريان المباشر [5]

يبين الجدول 3-8 المواصفات الفنية للمخانات الأسطوانية المفرغة المتوفرة في السوق المحلية.

نواقل اسطوانات مفرغة ذات أنابيب حرارية Heat pipe evacuated tube collectors

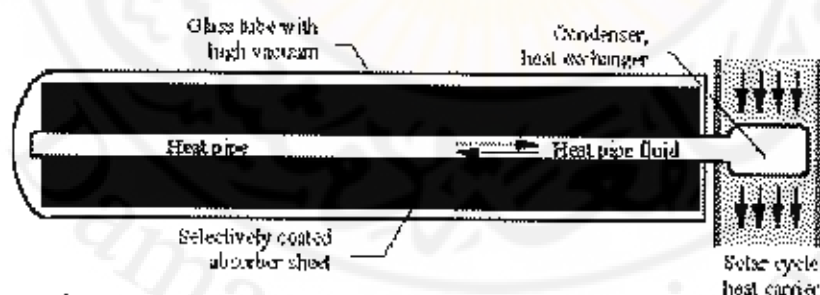
تتألف الأسطوانة الشمسية المفرغة هنا من أسطوانة زجاجية خارجية مفرغة من الهواء، وفي داخلها صفيحة ماصة معدنية (نحاسية) يتوسطها أنبوب حراري معدني (نحاسي غالبا) مفرغ من الهواء أيضا. يوجد ضمن الأنبوب الحراري كمية قليلة (حوالي 9% من حجم الأنبوب) من وسيط مائع (ماء نقي مع بعض الإضافات الخاصة، أو الميتانول... إلخ). يتبخّر الوسيط المائع بالحرارة الشمسية عند درجات حرارة $25-30^{\circ}\text{C}$ ويرتفع البخار إلى المكثف الذي يعمل أيضا كمبادل حراري مع

الماء البارد المطلوب تسخينه (الشكل 3-20 والشكل 3-21). يجري الوسيط المنكاثف عائداً إلى قعر الأنبوب الحراري حيث تتكرر العمليات من جديد.

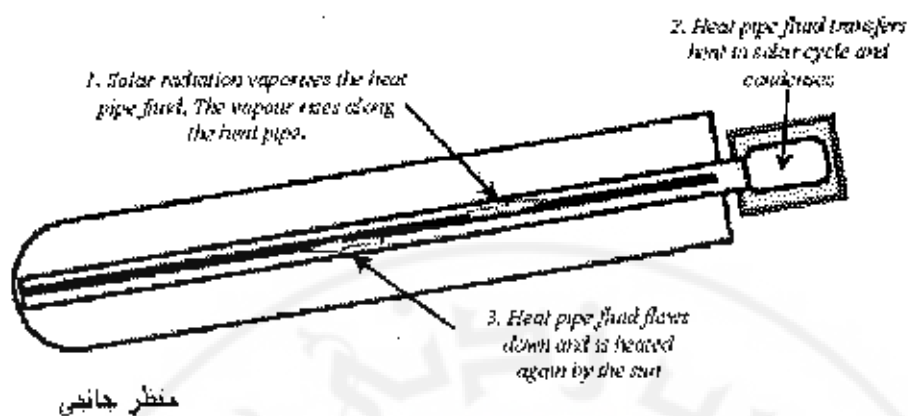
جدول 3-8: المواصفات الفنية للسخانات الأسطوانية المفرغة المتوفرة في السوق

المحلية [5]

عدد الأنابيب	سمالة الطبقة شعيرية mm	سعة التخزين liter	عدد الأنابيب	طول الأنبوب mm	قطر الأنبوب mm	الطراز نظام الأنابيب عدد الأنابيب - الطول (قطر) - حجم التخزين
2	50	90	15	1500	47	90-1500/47-15
3-2	50	105	18	1500	47	105-1500/47-18
4-3	50	130-120	20	1500	47	120-1500/47-20
5-4	50	155-140	24	1500	47	140-1500/47-24
6-5	50	190-170	30	1500	47	170-1500/47-30
4-3	50	130-120	15	1500	58	120-1500/58-15
5	50	150	18	1500	58	150-1500/58-18
6-4	50	165	20	1500	58	165-1500/58-20
6-5	50	200	24	1500	58	200-1500/58-24
8-6	50	250	30	1500	58	250-1500/58-30
5-4	50	180-140	16	1800	58	180-58/1800-16
6-4	50	200-155	18	1800	58	200-58/1800-18
6-5	50	240-180	20	1800	58	240-58/1800-20
8-6	50	270-220	24	1800	58	270-58/1800-24
10-8	50	330-250	30	1800	58	330-58/1800-30



منظر من الأعلى



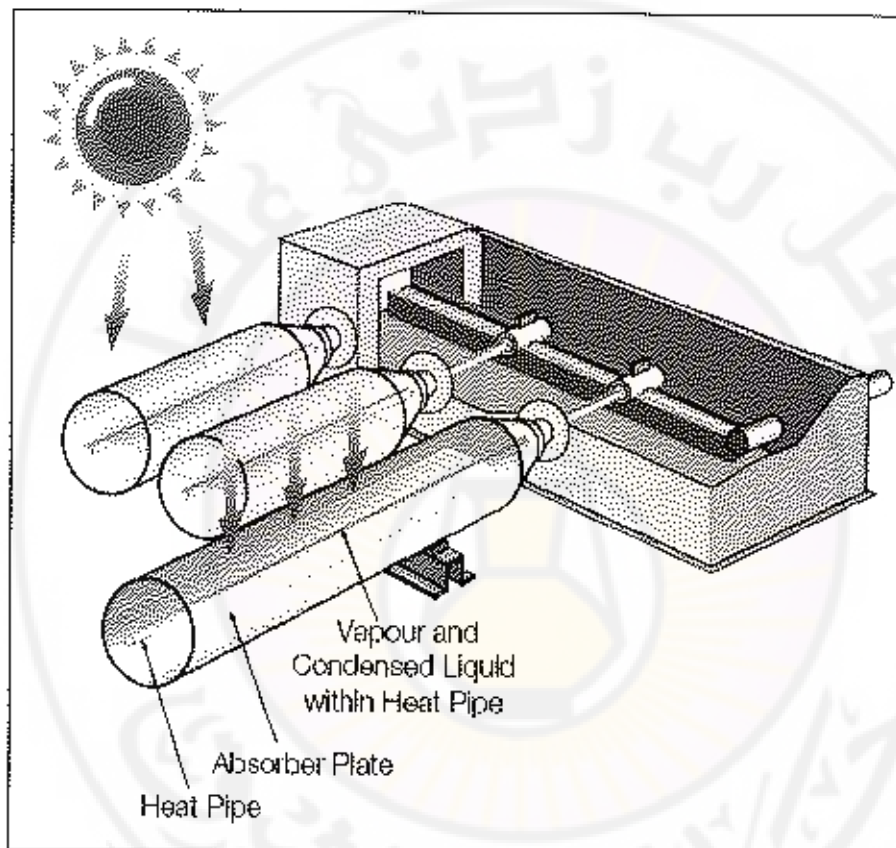
شكل 3-20: لاقط أسطواني مفرغ ذو أنبوب حراري [2]



شكل 3-21: تمثيل تخطيطي لمبدأ عمل اللاقط الأسطواني المفرغ ذي الأنبوب الحراري [8]

لكي يعمل اللاقط بشكل ملائم، يجب أن يملك زاوية ميل ما كافية لتحرك البخار نحو الأعلى الأنبوب وعودة الوسيط المتكاثف إلى قعره.

يبين الشكل 22-3 توضيحا أعمق لمكونات النظام الأسطوانى المفرغ ذي الأنابيب الحرارية وكيفية اتصالها مع الجزء العلوي من السخان الشمسي.

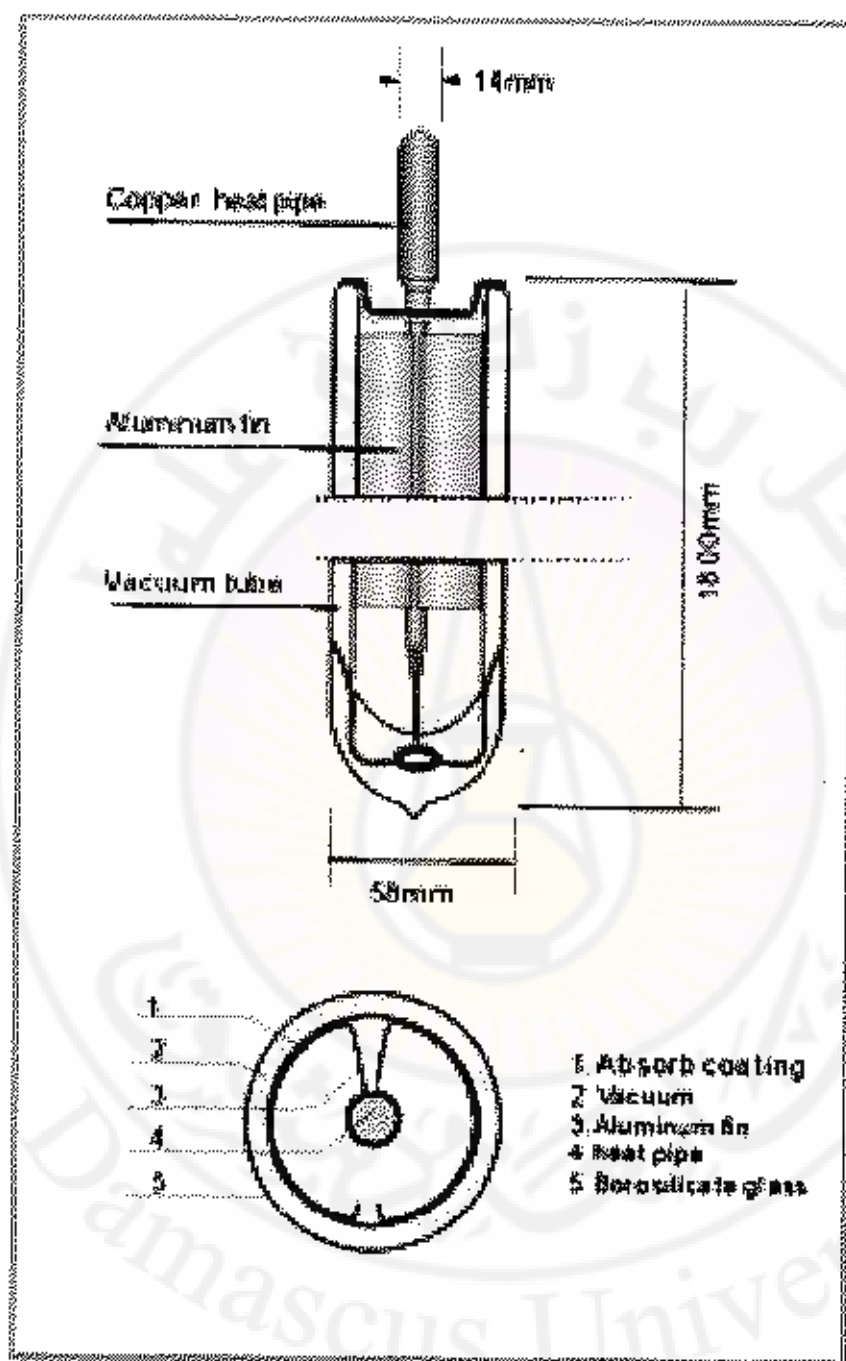


شكل 22-3: مخطط شديد الوضوح للاقط الأسطوانى المفرغ ذي الأنابيب الحرارية

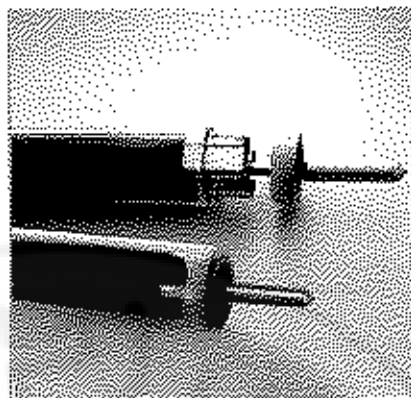
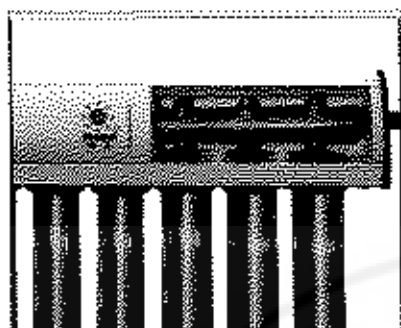
تتبع الأشكال 23-3 و 24-3 و 25-3 سخانا شمسيا أسطوانيا ذا أنابيب حرارية مع بعض التفصيلات المتعلقة به، كما يبين الجدول 9-3 المواصفات الفنية لمسخانات شمسية متكاملة أسطوانية ذات أنابيب حرارية.



شكل 3-23: صورة للاقط أسطوانتي مفرغ ذي أنبوب حراري [8]



شكل 3-24: مواد وأبعاد السخان الشمسي في الشكل 3-22 [8]



شكل 3-25: الأنابيب الحرارية وتوصيلها من الأعلى للسخان في الشكل 3-22 [8]

جدول 3-9: بعض المواصفات لموديلات معينة من السخانات الأسطوانية ذات

الأنابيب الحرارية [8]

MODEL	Heating area (m ²)	Heat-pipe vacuum tube			Supply hot water (L/ hour)
		diameter	length	No.	
SCM-01-47-22	2.04	Φ47mm	1500mm	22	110
SCM-01-47-30	2.77	Φ47mm	1500mm	30	150
SCM-01-58-12	1.53	Φ58mm	1800mm	12	100
SCM-01-58-15	1.93	Φ58mm	1800mm	15	130
SCM-01-58-20	2.58	Φ58mm	1800mm	20	175
SCM-01-58-30	3.82	Φ58mm	1800mm	30	260

Solar Collectors

Manifold Casing Material	1.6mm thickness /Aluminum
Frame Material	1.5mm thickness /Galvanized or Aluminum
Header Pipe Material	1.2mm thickness /Copper
Insulation	Polyurethane /Rockwool
Rubber Seals and Rings	UV stabilized high temperature silicone rubber
Operating Pressure	6bar-12bar
Pressure Drop	7bar 3.3L/min for 20 tube manifold
Optimal flow rate	0.1L/min/tube-0.026G/min/tube

لا يمكن تجنب دخول الهيدروجين الجوي إلى الوسط المفرغ حتى مع توفر الإغلاق التام تقريبا للأسطوانة الزجاجية، وذلك بسبب كون ذرات الهيدروجين صغيرة للغاية، ما يؤدي على المدى الطويل إلى تخريب الخلاء. لذلك تتركب حلقة باريوم في قعر الأسطوانة لامتناس الهيدروجين.

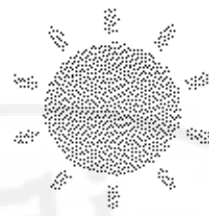
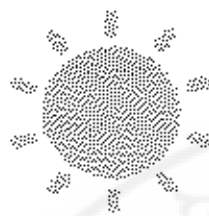
3-4-4 مقارنة بين اللواقط الأسطوانية المفرغة واللواقط الشمسية المسطحة
يبين الجدول 3-10 تلخيصا للمقارنة بين اللواقط الأسطوانية المفرغة واللواقط الشمسية المسطحة.

جدول 3-10: مقارنة بين اللواقط الأسطوانية المفرغة واللواقط المسطحة [5]

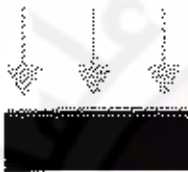
اللواقط الأسطوانية المفرغة	اللواقط الشمسية المسطحة (التقليدية)
فعالية عالية صيفا و متوسطة شتاء	فعالية متوسطة صيفا و متدنية شتاء
رد فعل سريع حين تعرضه للشمس	رد فعل بطيء جدا حين تعرضها للشمس
لا تتأثر بدرجات الحرارة الباردة و الرياح الشديدة	تتأثر كفاءتها مع وجود رياح و درجات الحرارة الباردة
سوف تفر درجات حرارة تصل إلى 7- (فهرن شيدز) و 500° (التيوب ثيرمية)	تتأثر من مشاكل تتجمد حين تصل الحرارة إلى الصفر
لا تعاني من مشاكل التكلس	تتأثر من مشاكل التكلس
لا يوجد هواء بين الزجاج و سطح المصنوع للإشعاع و بالتالي	يمكن لغاز الهواء أن يتكثف على الأسطح قدخلية للزجاج مما يحجب أشعة الشمس
لا يجمع الغبار على أسطحها بسبب الشكل الأسطوانى لها	من السهل تجمع الغبار عليها لأن أسطحها مسطحة
تصل درجة حرارتها إلى 150 درجة مئوية	لا تزيد درجة حرارة الماء فيها عن 70 درجة مئوية
تستخدم في تنقية المنزلية و تدفئة البيوت شتاء	ليست فعالة بشكل يمكن استخدامه في التدفئة
تصنعها صعب و يجب إنتاج كميات كبيرة لتقليل تكلفة	تصنعها سهل و غير مكلف إن تم بكميات قليلة
دوما تكون الشمس عمودية على أجزاء من المقطع الدائري	الشمس عمودية فقط عند الظهيرة

تقدم اللواقط الأسطوانية المفرغة ربحا طاقيا أعلى بشكل ملحوظ وعلى الأخص في الشهور الباردة من السنة. على الرغم من أن السعر النوعي للواقط الأسطوانية المفرغة أعلى منه للواقط المسطحة، فإن الكلفة الكلية للسخان الأسطوانى قد تكون أرخص منها للسخان الشمسي التقليدي لأن النظام الحراري الشمسي عندها يتطلب مساحة لواقط أقل. علاوة على ما تقدم، ربما يكون تكامل السخان الشمسي الأسطوانى مع السطح المائل أعقد وتحتاج إلى تصميمات هندسية إضافية. يبين الشكل 3-26

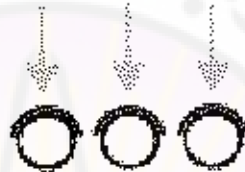
توضيحاً تخطيطياً لميزة الأستوانة بأن الإشعاع الشمسي المباشر عامودي على الأستوانة طيلة النهار.



Both collectors perpendicular to sun's rays

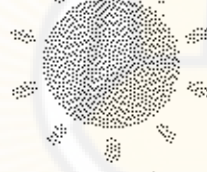


**Flat Plate
Solar Panel**

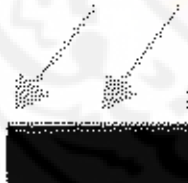


**Tubes perpendicular
to sun's rays**

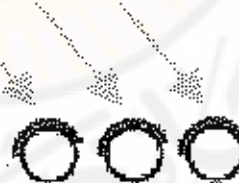
SOLAR DIRECT



Only tubes perpendicular to sun's rays



**Flat Plate
Solar Panel**



**Tubes still
perpendicular to
sun's rays**

شكل 3-26: توضيح ميزة الأستوانة بأنها عامودية على الإشعاع الشمسي الساقط عليها طيلة النهار

3-4-5 أداء اللاقط ومربوده Collector performance and collector efficiency

ينفذ الإشعاع الشمسي الوارد إلى اللاقط (استطاعته $I_C \text{ W/m}^2$) عبر الزجاج الخارجي (أي الأسطوانة الخارجية في اللواقط المفرغة أو الغطاء الزجاجي في اللواقط المسطحة) ذي النفاذية τ إلى السطح الماص ذي المساحة A_C الذي يحول الإشعاع الشمسي مباشرة إلى حرارة. الضياعات الحرارية التي تنشأ منذ سقوط الإشعاع على السطح الماص للاقط هي:

- ضياعات إشعاع السطح الماص $\dot{Q}_{rad}$ وهي لأجل السطح الماص الانتقائي أقل بكثير منها للسطح الماص غير الانتقائي
- ضياعات الحمل $\dot{Q}_{conv}$ وهي أصغرية بوجود الخلاء
- ضياعات الانعكاس عن السطح الماص $\dot{Q}_{ref}$
- استطاعة خرج اللاقط الشمسي $\dot{Q}_{out}$ هي:

$$\dot{Q}_{out} = \tau I_C A_C - \dot{Q}_{ref} - \dot{Q}_{conv} - \dot{Q}_{rad} \quad (3.13)$$

$$\dot{Q}_{ref} = \rho \tau I_C A_C$$

$$\dot{Q}_{RC} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad}$$

$$\dot{Q}_{out} = (1 - \rho) \tau I_C A_C - \dot{Q}_{RC} \quad (3.14)$$

وباعتبار أن الامتصاصية للسطح الماص تساوي 1 - الانعكاسية، نجد:

$$\dot{Q}_{out} = \alpha \tau I_C A_C - \dot{Q}_{RC} = \eta_0 I_C A_C - \dot{Q}_{RC} \quad (3.15)$$

$$\eta_0 = \alpha \tau \quad (3.16)$$

η_0 = المردود البصري للآقط Optical efficiency، وهو يمثل مردود الآقط إذا أهملنا ضياعات الإشعاع والحمل، وهي الحالة التي تتسوى فيها درجات حرارة الآقط والمحيط.

الضياعات الحرارية المدمجة جراء الإشعاع والحمل $\dot{Q}_{RC}$ تابعة للعوامل التالية:

- درجة حرارة الآقط θ_c أي درجة الحرارة الوسطية للماء الداخل والخارج

- درجة حرارة المحيط θ_A

- معامل ضياع الإشعاع a_1

- معامل ضياع الحمل a_2

وهي معطية بالعلاقة التجريبية التالية:

$$\dot{Q}_{RC} = a_1 A_c X + a_2 A_c X^2 \quad \text{where } X = \theta_c - \theta_A \quad (3.17)$$

يبين الجدول 11-3 المردود البصري ومعاملات الضياع للواقط مسطحة ولواقط أسطوانية مفرغة عملية.

جدول 11-3: المردود البصري ومعاملات الضياع ومساحة السطح الماص للواقط

حقيقية

Name	Type	η_0	a_1 in $W/(m^2 K)$	a_2 in $W/(m^2 K^2)$	A_c in m^2
Paradigma Solar 500	Flat-plate	0.805	3.79	0.009	4.7
Solahart M	Flat-plate	0.746	4.16	0.0084	1.816
Solahart OYSTER Ko	Flat-plate	0.803	2.49	0.0230	1.703
Sonnenkraft SK 500	Flat-plate	0.800	3.02	0.0013	2.215
Wagner Euro C18	Flat-plate	0.789	3.69	0.007	2.305
Microtherm Sydney SK-6	Evacuated tube	0.735	0.65	0.0021	0.984
Thermolux 2000-6R	Evacuated tube	0.601	1.13	0.008	1.05
Ritter CPC 12 OEM	Evacuated tube	0.617	1.04	0.0013	2.01
Sunda SEIDO 5-16	Evacuated tube	0.736	1.78	0.0130	2.582

Source: SPF Institut für Solartechnik 2002

نلاحظ من الجدول 11-3 أن معاملات الضياع للواقط الأسطوانية المفرغة أقل بكثير منها للواقط المسطحة، وبالتالي المردود الأعلى لأجل درجات حرارة محيط منخفضة أو إشعاع شمسي ضعيف. يتم الحصول على معاملات الضياع بواسطة الاختبارات

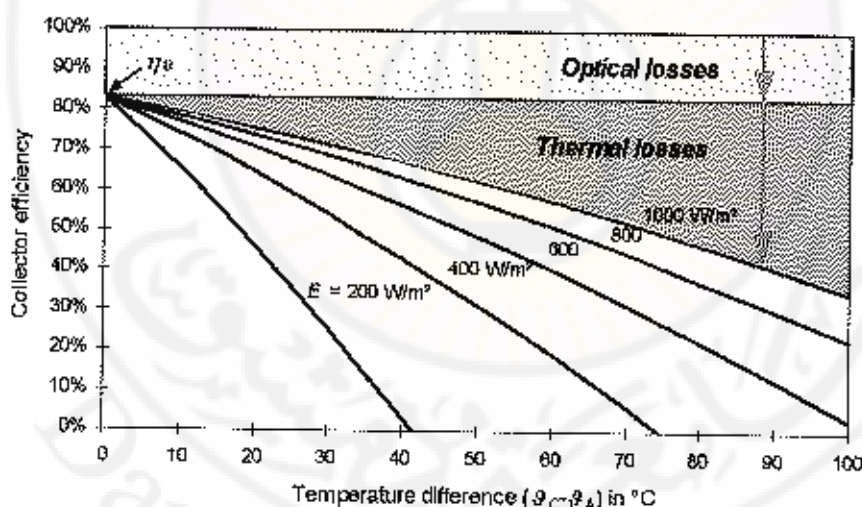
المجراة على اللاقط. يجب أن يعطي الصانع المساحة المرجعية للاقط A_C مع معاملات الضياع له. المساحة المرجعية للاقط قد تكون مساحة السطح الماص absorber area (مستخدم في أوروبا) أو المساحة النافذة للشمس aperture area (مستخدم في أوروبا أيضا) أو المساحة الإجمالية للاقط Gross area (مستخدم في الولايات المتحدة الأمريكية). نستخدم هنا مساحة السطح الماص كمساحة مرجعية لجميع الحسابات.

مردود اللاقط collector efficiency η_C هو:

$$\eta_C = \frac{\dot{Q}_{out}}{I_C A_C} = \eta_0 - \frac{\dot{Q}_{RC}}{I_C A_C}$$

$$\eta_C = \eta_0 - \frac{a_1 X + a_2 X^2}{I_C} \quad (3.18)$$

يبين الشكل 3-27 المردود النموذجي للاقط مسطح بدلالة X وشدة الإشعاع الشمسي.



شكل 3-27: مردود لاقط مسطح بدلالة فرق درجات الحرارة بين اللاقط والمحيط

وشدة الإشعاع الشمسي [2]

نلاحظ من الشكل 3-27 ما يلي:

- إن الضياعات الحرارية تزداد مع ازدياد $X = \theta \Delta$ ، وكذلك يفعل المردود لأجل إشعاع معين.

- يتناقص المردود بشكل أسرع كلما ضعف الإشعاع

- كلما ضعف الإشعاع ينعدم المردود لأجل فرق درجة حرارة أقل فمثلا، ينعدم المردود عند $40^\circ\text{C} - X$ لأجل 200 W/m^2 و $75^\circ\text{C} - X$ لأجل 400 W/m^2 .

طريقة حساب المردود السابقة الذكر تهمل تأثير الرياح، إذ أن ضياعات الحمل الحرارية تزداد مع ازدياد سرعة الرياح. كما أن المردود البصري يعتمد على زاوية ورود الشمس وعلى الطيف الشمسي. فإذا أردنا حسابا دقيقا جدا للمردود، يجب أخذ هذه التأثيرات بالحسبان.

مثال 3-1: لاقط سخان شمسي من نوع Apricus محددات أدائه حسب الصانع:

$$\eta_0 = 0.717; \quad a_1 = 1.52 \text{ W/(m}^2\text{K)}; \quad a_2 = 0.0085 \text{ W/(m}^2\text{K}^2)$$

إذا علمت أن العوامل البيئية الثلاثة هي:

الاستطاعة الشمسية عند سطح اللاقط = 800 W/m^2 ، درجة حرارة المحيط = 25

درجة، درجة حرارة الماء الوسطية = نصف (درجة حرارة الماء الداخل + درجة

حرارة الماء الخارج) = 50 درجة. أحسب مردود اللاقط.

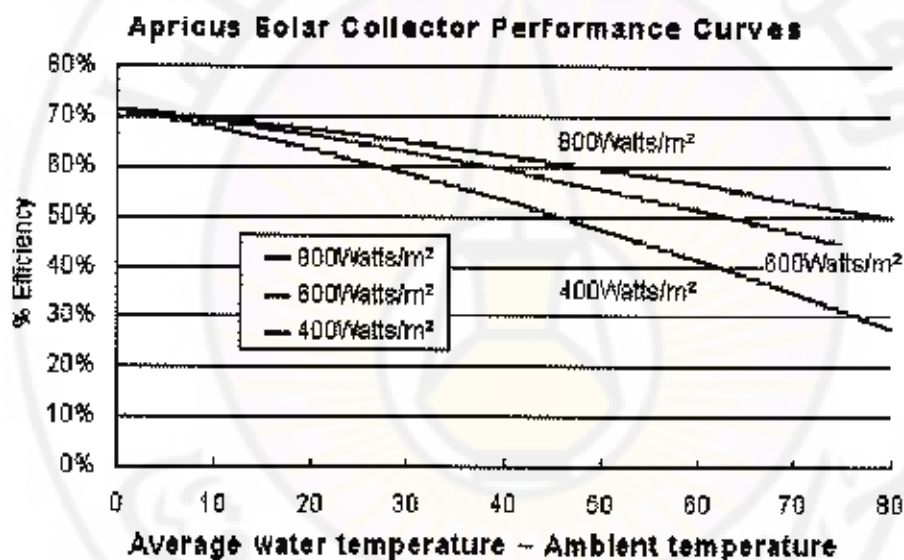
الحل:

$$X = \theta_c - \theta_A = 50 - 25 = 25$$

$$\eta_c = 0.717 - \frac{1.52 \times 25 + 0.0085 \times 25^2}{800}$$

أي أن 66.3% من الطاقة المقدمة من الشمس تُستخدم لتسخين الماء. يفرض أن العوامل البيئية الثلاثة تبقى مستقرة لمدة ساعة واحدة، فإن $800 \times 0.663 = 530.4 \text{ Wh}$ لكل متر مربع من السطح الماص، ما يكفي 456 kcal، تُستخدم لتسخين الماء. وهذه الكمية من الحرارة كافية لرفع درجة حرارة 100 ليتر من الماء بمقدار 4.56 درجة مئوية.

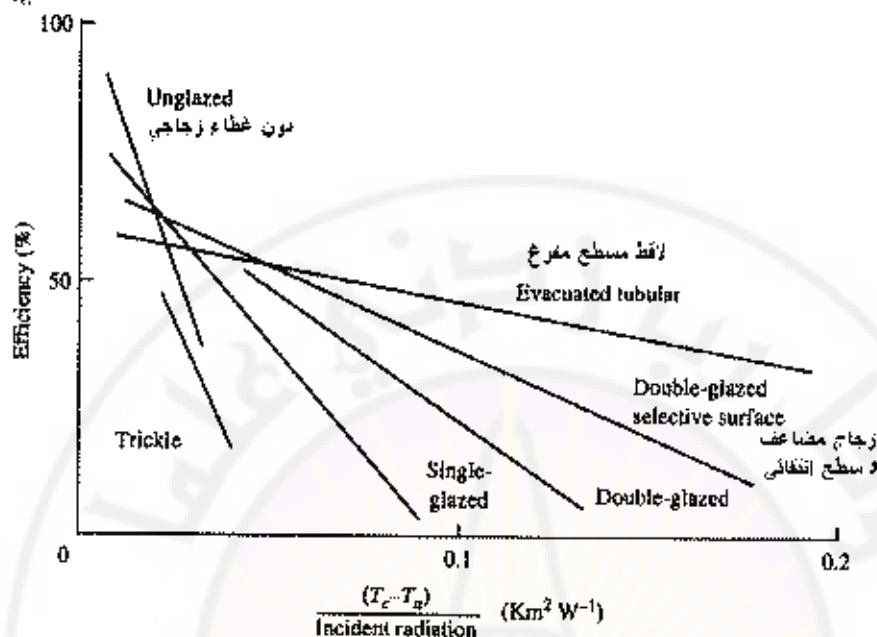
يبين الشكل 3-28 منحنيات المردود للاقط شمسي موديل Apricus لأجل 3 سويات إشعاع شمسي.



شكل 3-28: منحنيات المردود للاقط شمسي موديل Apricus لأجل 3 سويات إشعاع شمسي.

في معظم الحالات، يكون فرق درجة الحرارة في المجال 20-50 درجة حيث القيم الأعلى تكون لأجل طقس بارد جداً. نظراً لتذبذب درجة حرارة الجو وتغير شدة الإشعاع الشمسي خلال اليوم/الشهر/العام فإن الحساب الدقيق للمردود يقتضي اعتبار عوامل بيئية أكثر وحسابات متكررة خلال اليوم.

يبين الشكل 3-29 منحنيات كفاءة للمردود لأجل أنواع مختلفة من اللواقط بدلالة $\frac{\Delta\theta}{I_c}$.



شكل 3-29: منحنيات كفاءة للمردود لأجل أنواع مختلفة من اللواقط المسطحة بدلالة

$$\frac{\Delta\theta}{I_c}$$

[10]

طرق رفع مردود اللاقط: من معادلات اشتقاق المردود يمكن استنتاج أهم إجراءات

زيادة المردود وهي:

- زيادة الامتصاص الشمسية الساقط على سطح اللاقط وذلك باختيار زاوية الميل المثلى و تركيز Concentration الإشعاع و استخدام نظم ملاحقة الشمس.

- زيادة النفاذية عن طريق استخدام نوافذ انتقائية (زجاج خاص ...) مما يقلل ضياعات الإشعاع

- زيادة الإمتصاصية للسطح الماص عن طريق طلاء انتقائي أفضل

- إنقاص درجة حرارة الوسيط المائع

- إجراءات تتعلق بالتصميم الهندسي للاقط

- تحسين العزل

مثال 2-3: يزود لاقط شمسي مسطح خزاناً سعته 227 لتر. معدل جريان الماء المضغوط هو $20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec}$. درجة حرارة المحيط 15°C . ترتفع درجة حرارة ماء اللاقط وسطياً 22°C خلال 6 ساعات تشغيل النظام. إذا كان ارتفاع درجة حرارة ماء الخزان 16.5°C ، أحسب المردود الحراري للنظام، والاستطاعة الاسمية للاقط collector power rating.

الحل:

$$\begin{aligned}\text{Volume of water transferred} &= \frac{20}{10^6} \times 6 \times 3600 \text{ m}^3 \\ &= \frac{20}{10^6} \times 6 \times 3600 \times 10^6 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

$$\text{Mass of water transferred (1 g} = 1 \text{ cm}^3) = \frac{20}{10^6} \times 6 \times 3600 \times 10^6 \text{ g}$$

$$\text{Quantity of heat} = \text{mass} \times \text{temp rise} \times \text{specific heat}$$

$$\begin{aligned}&= \frac{20}{10^6} \times 6 \times 3600 \times 10^6 \times 22 \times 1 \\ &= 9.504 \times 10^6 \text{ cal}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Heat energy collected} &= 4.2Q = 4.2 \times 9.504 \times 10^6 \\ &= 39.91 \times 10^6 \text{ joules}\end{aligned}$$

Energy transferred to storage tank, at a system efficiency $X\%$

$$= X/100 \times 39.91 \times 10^6 \text{ joules}$$

$$\text{Capacity of storage tank} = 227 \text{ litres} = 227 \text{ kg}$$

$$= 227,000 \text{ cm}^3$$

Amount of heat needed to raise tank temperature by 16.5°C

$$= 227,000 \times 16.5$$

$$= 3.745 \times 10^6 \text{ cal}$$

$$\text{Efficiency of collector system} = \frac{\text{heat transferred to tank}}{\text{heat collected}}$$

$$= \frac{3.745 \times 10^6}{9.504 \times 10^6} = 39.4\%$$

$$\begin{aligned} \text{Power rating of collector} &= \frac{\text{energy collected}}{\text{time of collection}} \\ &= \frac{39.91 \times 10^6}{6 \times 3600} = 1848 \text{ watts} \end{aligned}$$

مثال 3-3:

(a) يُستخدم لاقط شمسي مسطح ذو غطاء زجاجي ومعزول حرارياً لتسخين الماء بشكل غير مباشر في خزان منزلي حجمه 227 ليتر. يتم ضخ الماء في اللاقط بمعدل $20 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ في يوم مشمس عندما يكون الفرق الوسطي بين درجة حرارتي الماء الداخل لللاقط والماء الخارج منه 17°C inflow and outflow. إذا كان السطح الفعال لللاقط 3 m^2 ومردوده 50%، أحسب ارتفاع درجة حرارة ماء الخزان بعد 4 ساعات تشغيل، واحسب الاستطاعة الإسمية لللاقط الشمسي لوحدة المساحة.

(b) إذا خُفض مردود اللاقط في a إلى 42%، أحسب معدل جريان الماء الضروري لتحقيق ارتفاع درجة الحرارة ذاته في الخزان.

الحل:

(a) Mass of water through the collector in 4 hours

$$= \frac{20}{10^6} \times 10^6 \times 4 \times 3600 \text{ g}$$

Heat transferred to collector water

$$\begin{aligned} &= \frac{20}{10^6} \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 3600 \cdot 17 \\ &= 4,896,000 \text{ cal} \end{aligned}$$

Energy collected in 4 hours = $4,896,000 \times 4.2 = 20,563,000$ joules

Energy transferred to storage tank

= 50% of energy collected

= 10,281,000 joules

Mass of water in storage tank = 50 gal = 227 litres = 227 kg

Temperature rise of storage tank = $\frac{\text{heat transferred from collector to storage}}{\text{mass of water}}$

$$= \frac{\frac{1}{2} \cdot 4,896,000}{227,000} = 10.8^\circ\text{C}$$

Power rating of collector = $\frac{\text{energy collected}}{\text{time of collection}} = \frac{20,563,000}{4 \times 3600}$

$$= 1428 \text{ W} = \frac{1428}{3} = 476 \text{ W/m}^2$$

- (b) If the temperature rise of the storage tank is fixed, so is the ratio heat transferred/mass of water. If the heat transferred is reduced by a factor 42/50, the mass of water (i.e. pumping rate) must be increased by the same factor.

$$\begin{aligned}\text{New flow rate} &= \frac{50}{42} \times 20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 23.81 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}\end{aligned}$$

3-5 الجدوى الاقتصادية لجهاز تسخين شمسي منزلي ذي لواقط مسطحة تقليدية في

سورية [7]

سنستخدم طريقة بسيطة ولكنها ذات دلالة كافية لحساب الجدوى الاقتصادية لاستخدام أجهزة التسخين الشمسي ذات اللواقط المسطحة التقليدية للمياه في المنازل. سنشرح الطريقة عن طريق مثال عملي.

نفرض أن الجهاز مؤلف من لواقط شمسية مساحتها 3.88 م² ومعدة الخزان الساخن 233 ليترًا وسعر الجهاز 45000 ل.س. الطاقة الحرارية المنتجة من الجهاز 2500 ك و س في السنة.

المقارنة مع جهاز تقليدي يعمل بالمازوت (الأظان)

يعطي كل واحد ليتر مازوت طاقة تعادل 5 ك و س لأجل مردود 50%. باعتبار سعر لتر المازوت هو 20 ل.س فإن تكلفة الكيلو واط الساعي المنتج من الجهاز التقليدي هي 4 ل س. الوفر الذي يمكن تحقيقه في حال استخدام جهاز تسخين مياه بالطاقة الشمسية هو 10000 ل س ($10000 = 4 \times 2500$).

فترة استرداد رأس المال للجهاز الشمسي هي حاصل قسمة سعره على الوفر السنوي أي 4.5 سنة. وإذا أخذنا بعين الاعتبار العمر الافتراضي للجهاز الشمسي 20 عاماً، فهذا يعني أن الجدوى الاقتصادية من اقتناء الجهاز الشمسي محققة. إن اقتناء جهاز شمسي كالجهاز الموصف أعلاه يوفر 500 ليترًا من المازوت سنوياً.

المقارنة مع سخان مياه كهربائي

بفرض السخان الكهربائي يعمل عند مردود 100%، وأن سعر مبيع الكيلو واط الساعي 3 ل.س فإن الوفر الذي يمكن تحقيقه في حال استخدام تسخين مياه بالطاقة الشمسية هو 7500 ل.س في السنة. إن فترة استرداد رأس المال للجهاز الشمسي في هذه الحالة هي 6 سنوات.

3-6 مراجع الفصل الثالث

[1]	www.RETScreen.net	Solar water heating, 2008 project analysis, Canada 2008
[2]	V. Quaschnig	Understanding renewable energy systems, © 2005 by Earthscan, UK, USA
[3]	http://en.wikipedia.org/wiki/Temperature_conversion_formulas	
[4]	د. علي حمزة، د. محمد قرضاب، د. رئيف مهنا	الكود العربي السوري لنظم التسخين الشمسي للمياه في الأبنية السكنية - نقابة المهندسين - دمشق 1993
[5]	د. محمد باكير، د. نايف العبود	المسخنات المائية الشمسية ذات الأنابيب المفرغة، الندوة العلمية حول الجدوى الاقتصادية لاستخدام الطاقة

		الشمسية في تسخين المياه وتوليد الطاقة الكهربائية في سورية، السويداء 2008/5/4
[6]	http://www.apricus.com/html/evacuated_tubes.htm	Solar water heater, Copyright © Apricus Solar Co., Ltd 2008
[7]	المركز الوطني لبحوث الطاقة، دمشق	الجدوى الاقتصادية للسخان الشمسي، جريدة الثورة السورية صفحة الاقتصاد 2005/7/28
[8]	http://www.solardirect.co.za/	Solar water heating systems, 2007
[9]	WSE Technologies	Solar Thermal fundamentals- SWH, 2009
[10]	W. Shepherd, D.W. Shepherd	Energy studies /Second edition 2009

الفصل الرابع

النظم الكهروحرارية الشمسية

Solar thermal systems for electricity generation

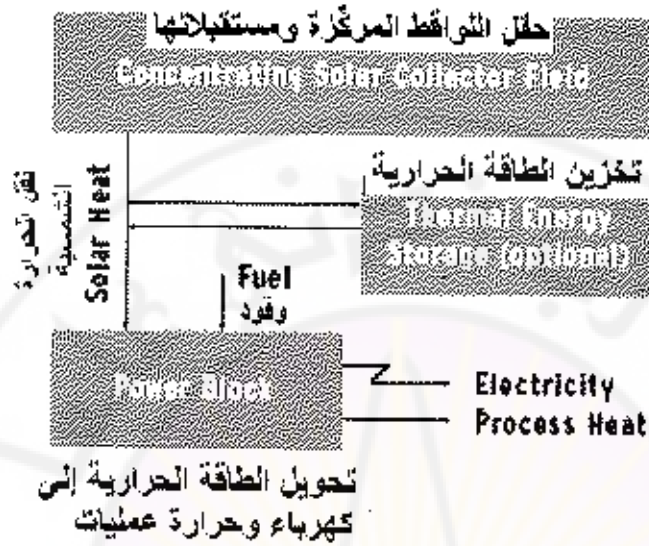
4-1 مقدمة

إحدى التقنيات التي تستخدم الشمس لتوليد الكهرباء هي تقنية التوليد الشمسي الحراري أو ما اصطلح على تسميتها تقنية التركيز الكهروحراري الشمسي Concentrating solar thermal (CST) (المصطلح العام لأنظمة التركيز الكهروشمسي هو Concentrating solar power (CSP) ويوجد نوعان منها هما تركيز شمسي ضوئي CPV وتركيز شمسي حراري CST). تقوم نظم CST بالنقاط الإشعاع الشمسي المباشر وتركيزه عددا من المرات وتحويله إلى حرارة متوسطة أو عالية درجة الحرارة، والتي يمكن استخدامها لتوليد الكهرباء بواسطة العنفات البخارية أو الغازية أو محركات ستيرلنغ.

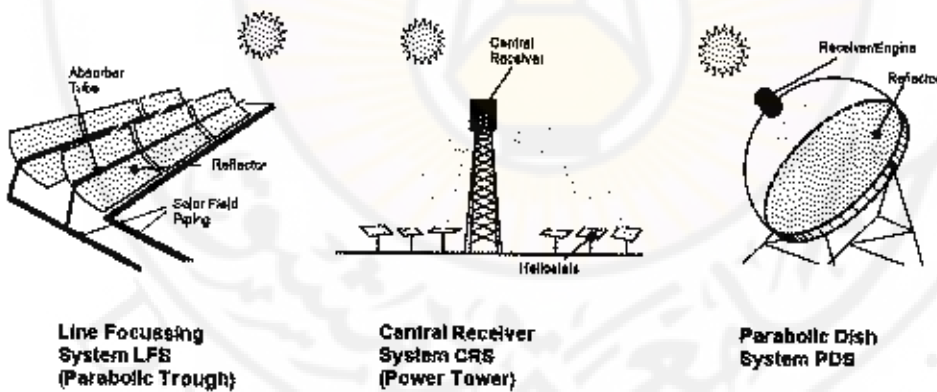
المركبات الرئيسية لنظام CST هي (الشكل 4-1): المرکز الشمسي solar concentrator، والمستقبل receiver ونظام نقل الحرارة heat transfer ونظام تحويل الطاقة الحرارية إلى كهرباء أو إلى كهرباء وحرارة عمليات.

تُصنف نظم المرايا المركزة إلى نظم ذات محرق خطي line-focusing (درجة التركيز حوالي 100 مرة، ودرجة حرارة مائع التشغيل 550°C (1022°F)) ونظم ذات محرق نقطي point-focusing (درجة التركيز حوالي 1000 مرة، ودرجة حرارة مائع التشغيل 1000°C (1832°F)) وتستخدم في نظم المرايا القطعية الدائرية ونظم البرج المركزي.

يوجد ثلاثة أنواع من المركبات التي حققت مستوى مقبولا من التطور الفني والاقتصادي وهي: مركبات القطع المكافئ الدائري ومركبات القطع المكافئ الأسطواني (المركبات ذات المحرق الخطي) ومركبات البرج المركزي (الشكل 4-2).



الشكل 1-4: مبدأ النظام CST

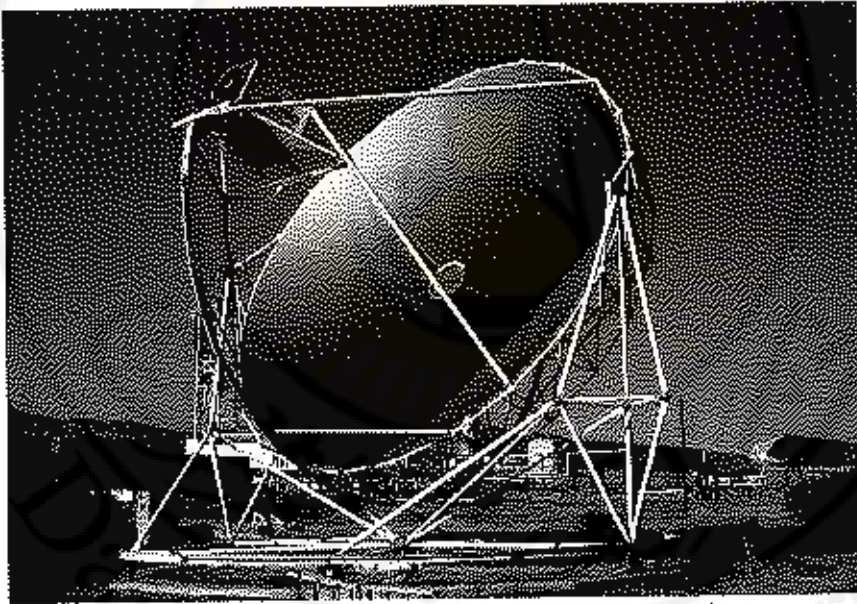


الشكل 2-4: أنواع المراكز [1]

2-4 أنواع نظم محطات CST

1-2-4 نظم ذات مراكز القطع المكافئ الدائري
Parabolic dish systems (PDS)

يتكوّن المركّز من مرآيا متعددة تُجمَع بحيث تُؤَلَف صحنًا على شكل قطع مكافئ Parabolic dish مجهز بنظام ملاحقة للشمس (شكل 3-4). يقوم الصحن بتركيز الإشعاع الشمسي على مستقبل حراري Thermal receiver يوضع في بؤرة الصحن ويمتص الطاقة الشمسية ويحولها إلى حرارة تُسلّم لمحرك خاص يسمى محرك ستيرلنغ. يتألف المستقبل من مجموعة من الأنابيب تحوي وسيطا ناقلا للحرارة مثل الهيليوم أو الهيدروجين والذي يستخدم أيضا كمائع تشغيل Working fluid للمحرك. يُحافظ على برودة الجانب البارد من محرك ستيرلنغ باستخدام نظام مشع Radiator مبرد بالماء ومجهز بمروحة تبريد على غرار نظام التبريد في السيارات. ونظرا لأن نظام التبريد دائرة مغلقة فالماء اللازم كتعويض هو بالحد الأدنى، الأمر الذي يُعدّ ميزة كبيرة مقارنة مع تقنيات CST الأخرى.



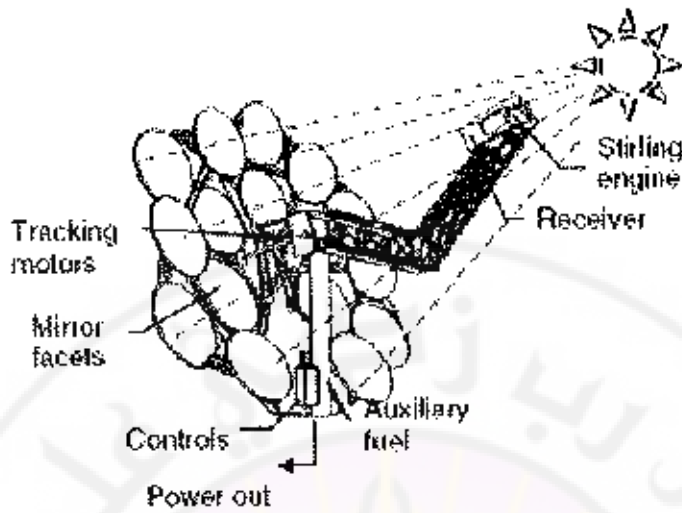
شكل 3-4: مركّز قطعي دائري مع نظام ملاحقة الشمس ومحرك ستيرلنغ (مركب في إسبانيا) [2]

شمة وحدات موجودة مصممة لتعمل كنظام هجين Hybrid mode بحيث يعمل المنبع الحراري على حرق وقود تقليدي عندما لا تتوفر الشمس، مما يرفع وثوقية النظام ويؤمن التغذية للأحمال الليلية. يفوق المردود الوسطي لنظام PDS 20% (من الإشعاع الشمسي إلى طاقة الخرج الكهربائية) وقد تم تسجيل مردود قياسي لوحدات قائمة حوالي 30%، وبذلك تتفوق هذه التقنية من حيث المردود على كافة نظم التحويل الشمسي الأخرى.

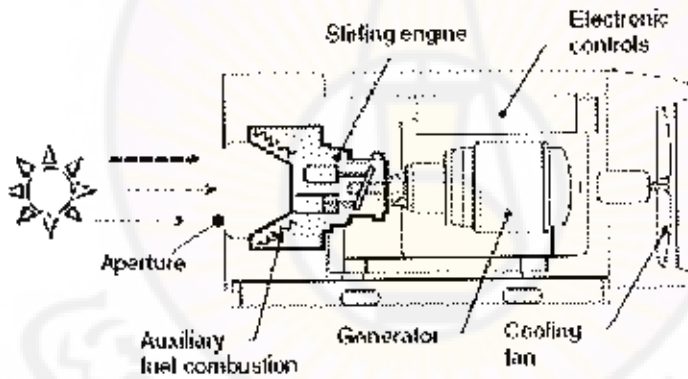
يمكن ربط وحدات متعددة من هذه الأنظمة لإنتاج الاستطاعة المطلوبة كما يبين الشكل 4-4. وتجدر الإشارة إلى أن 1 MW تحتاج إلى أرض مساحتها 1.6 هكتار. لقد أنجز إنشاء وتشغيل عدد من النماذج لهذه النظم باستطاعات محدودة مثل محطة SAIC/STM التجريبية المبنية في الشكل 4-5 حيث تبلغ درجة حرارة الدخل لمحرك ستيرلنج حوالي 725°C .



شكل 4-4: محطة CST مركبة في إسبانيا ومؤلفة من 6 صحن مركزة [2]



(a) The complete SAIC/STM system



(b) The 5TH Stirling engine.

شكل 5-4 a و h: نظام صحن/ستيرلينج لمحطة SAIC/STM

يبين الجدول 1-4 قيم المردود واستطاعة الخرج لمكونات هذه المحطة التجريبية اعتباراً من الإشعاع الشمسي حتى الاستطاعة الكهربائية الصافية على خرج المولد مع الأخذ بالحسبان لمردود محرك ستيرلينج (36.1%) والضياعات في المرايا العاكسة والمستقبل وعلية المسننات والمولد والاستهلاك الذاتي للنظام.

جدول 4-1: قيم المردود لمكونات المحطة SAIC/STM

Step Description	Step Efficiency (%)	Cumulative Efficiency (%)	Power (kW)
Solar insolation	100.0	100	113.5
Reflected by mirrors	93.1	93.1	105.7
Intercepted at aperture	90.3	84.1	95.4
Absorbed by receiver	85.0	71.5	81.1
Receiver heat loss	98.0	70.0	79.5
Engine mechanical efficiency	36.1	25.3	28.7
Gear box efficiency	98.0	24.8	28.1
Gross generator output	92.0	22.8	25.9
Electrical parasites	-2.2 kW	20.9	23.7

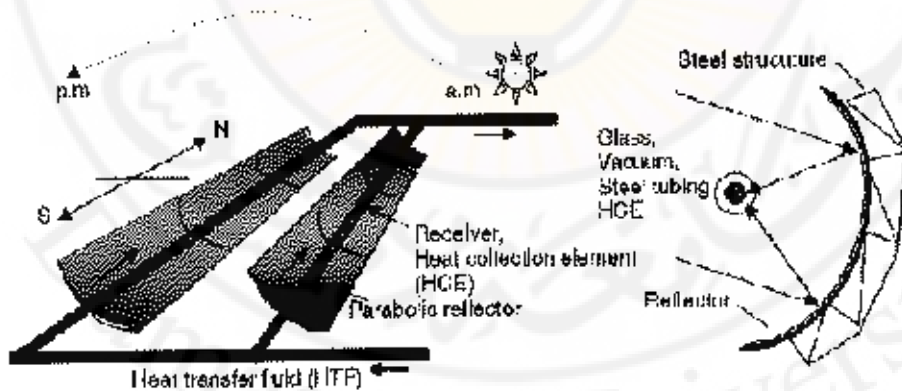
^a Insolation is direct normal solar radiation at 1000 W/m².

كي تتميز أسواق مقبولة لنظم مركزات القطع الدائري، سواء منفردة أو بالربط مع الشبكات، ينبغي خفض كلفة إنتاج الكهرباء إلى 0.15 \$/kWh. وتعمل معاهد البحوث والشركات المعنية في أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية وأستراليا على تحقيق ذلك عبر السبل التالية:

- تحسين نوعية المرايا والهياكل المستخدمة للمركزات
 - تصميم مستقبلات حرارية متطورة تجمع بين الأنابيب الحرارية والمستقبلات الحجمية وربطها مع المحركات الحرارية
 - تطوير التصاميم بما يوفر الامكانية الكاملة للتشغيل والتحكم الذاتي للوحدات مع تقليل الضياعات بتحقيق تكامل النظم.
- وتتعدد برامج تطوير هذه النظم حالياً في أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية وأستراليا، وتتضمن تطوير نظم باستطاعات 1-10 MW بالارتباط مع وحدات غازية ودورة مركبة التي قد تؤدي إلى خفض تكاليف الإنتاج والتوليد إلى أقل من 50% [3].

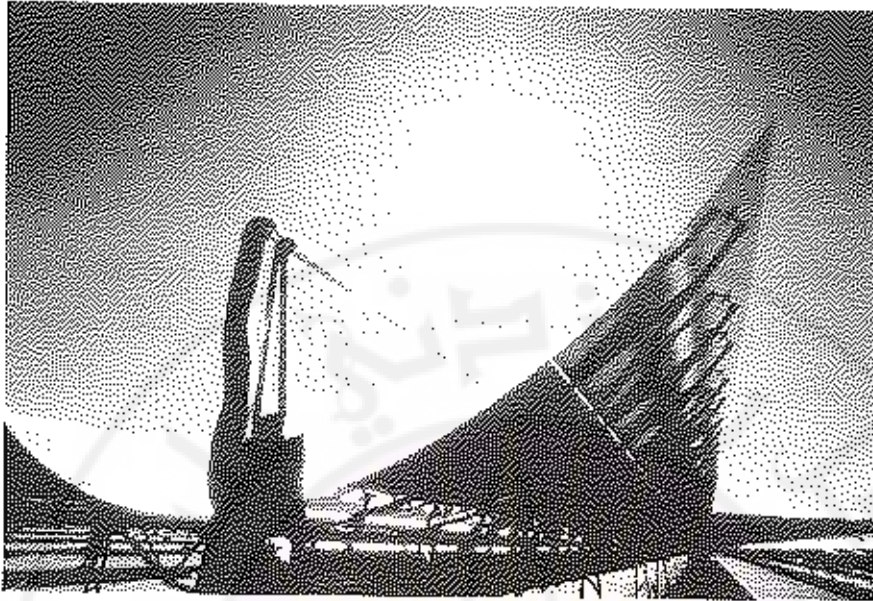
4-2-2 نظم ذات مركزات خطية المحرق (LFS) Line Focusing systems

تسمى أيضا مركّزات القطع الأسطواني parabolic trough، تتكون مركّزات القطع الأسطواني من أسطح عاكسة على شكل قطع مكافئ أسطواني تركيب في صفوف متوازية في اتجاه شمال-جنوب، بحيث تتبع الحركة الظاهرية للشمس بالدوران حول محورها الطولي من الشرق إلى الغرب. تقوم المركّزات بتركيز الإشعاع الشمسي المباشر الساقط عليها في بؤر طولية تحتوي على مستقبلات حرارية خطية (تسمى أيضا عناصر تجميع الحرارة Heat Collector Elements HCE) مؤلفة من أنبوب فولاذي ستانلس Stainless steel tube محاط بغلاف زجاجي مفرغ لتقليل الضياعات (شكل 4-6). تحوي المستقبلات مانعا ناقلا للحرارة عند درجات حرارة تصل إلى حوالي 400 درجة مئوية. وتستخدم الزيوت الحرارية في النظم التي تعمل حاليا. ويمكن للمركّزات الشمسية من هذا النوع تحقيق معدلات تركيز للإشعاع الشمسي تتراوح بين 10 و 100 ضعف الإشعاع الشمسي المباشر الذي يسقط عليها. كما تصل كفاءة تجميع الإشعاع الشمسي في بؤر هذه المركّزات إلى حوالي 60%. وتضخ زيوت التسخين من بؤر المركّزات إلى مبادلات حرارية حيث تستخدم لإنتاج البخار اللازم للدورة الحرارية لتوليد الكهرباء [10].



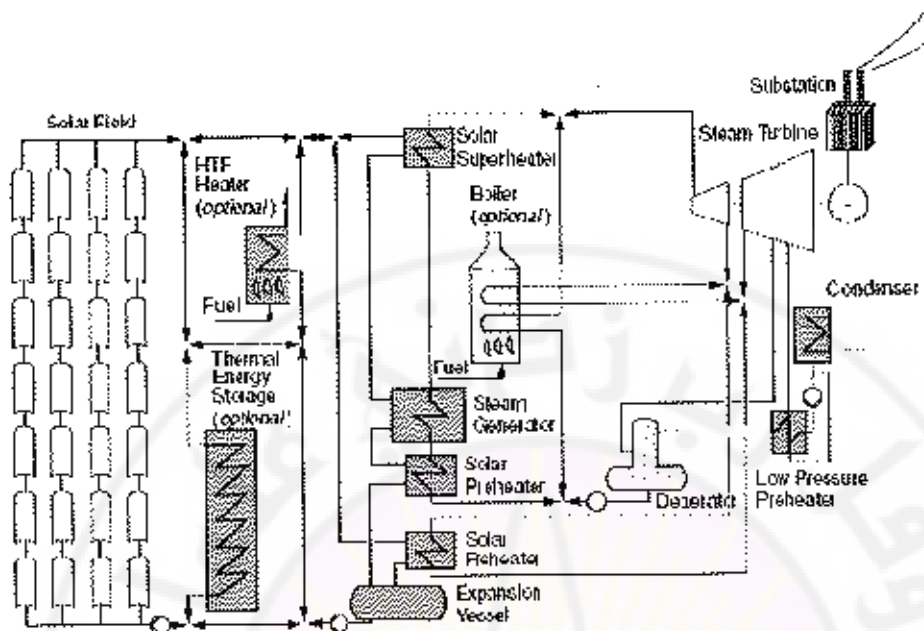
شكل 4-6: نظام تركيز شمسي ذو محرق خطي [2]

يبين الشكل 4-7 صورة طبيعية لمركز قطع أسطواني.



شكل 4-7: صورة طبيعية لمركز قطع دائري [2]

يبين الشكل 4-8 مخطط النظام الكامل لمحطة توليد كهروشمسية حرارية LFS نمطية. ينتقل وسيط التسخين (ITF) Heat transfer fluid عبر سلسلة من المبادلات الحرارية لتوليد بخار محمّص عالي الضغط يُنقل إلى العنفة البخارية لتوليد الكهرباء واستكمال دورة رانكين الحرارية. ونظراً لعدم استمرارية المصدر الشمسي يمكن أن يملك النظام نظام تخزين حراري كما يمكن إضافة مصدر تقليدي للوقود ليساعد في التشغيل المختلط Hybrid operation للمحطة في حال عدم توفر الإشعاع الشمسي المناسب كما هو موضح في مخطط المحطة في الشكل 4-8. في الواقع يبين الشكل 4-8 خيارين للتشغيل المختلط، الخيار الأول هو سخان غازي يقوم بتسخين HFT على التوازي مع الحقل الشمسي، والخيار الثاني هو مرجل غازي يولد البخار للعنفة وفي هذه الحالة يؤول النظام إلى محطة توليد بخارية تقليدية مع وحدة شمسية مساعدة.

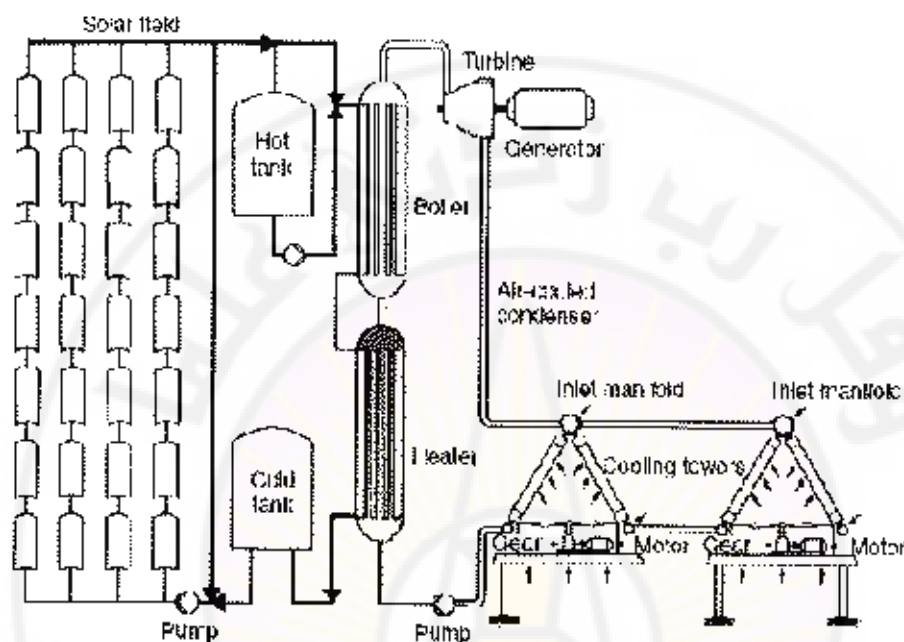


شكل 4-8: محطة توليد شمسية PTS بنظام عنفة بخارية/مولد مع تخزين حراري اختياري ومصدرين حراريين تقليديين مساعدين [2]

يحتاج النظام الموصوف أعلاه إلى كميات كبيرة من المياه لتبريد المكثفات كأية محطة بخارية تقليدية، مما يقيّد الاستخدام الملائم لهذا النظام الشمسي في المناطق الصحراوية التي تفتقر للمياه. لذلك من المفيد جداً تطوير نظام LFS يسمح بإزالة هذا القيد. إحدى الطرق مبينة في الشكل 4-9، حيث تُستخدم دائرة رانكين معدلة ومائع تسخين عضوي قابل للتكثيف تحت ضغوط أعلى من الضغط الجوي باستخدام أبراج تبريد مبردة بالهواء ومجهزة بمراوح. يصلح هذا النظام المعدل لمحطات باستطاعات صغيرة نسبياً (100 kW-10 MW).

تُعدّ النظم الشمسية الحرارية للكهرباء باستخدام LFS أكثر النظم تطوراً، وقد جرى تشغيل العديد من مشروعاتها واكتسبت خبرات عالية في تصميم وتشغيل نظمها. وتؤلف المحطات الشمسية التسع التي أُنشئت خلال عقد الثمانينات في ثلاثة مواقع في كاليفورنيا أهم وأكبر النظم التي ارتبط بها تطوير هذه التقنيات وقد تراوحت استطاعة

كل من هذه المحطات بين 14-80 MW وبلغت استطاعتها الإجمالية حوالي 355 MW ويوضح الجدول 2-4 خصائص وتكاليف كل من هذه المحطات التسع.



شكل 4-9: محطة توليد شمسية LFS ذات تبريد هوائي

أنشئت هذه النظم باستخدام مركبات القطع المكافئ الاسطواناني بالارتباط مع دورة رائكن الحرارية ونظام تخزين حراري إضافي لتوفير حوالي 25% من الكهرباء المولدة على مدار العام، بينما ينتج 75% من الطاقة الشمسية .

الجدول 2-4 خصائص وتكاليف محطات CST في كاليفورنيا

Power Plant name	Year of Operation	Capacity [MW]	Solar Production GWh/year	Overall Efficiency %	Installation cost \$/kW
SEG 1	1984	13.4	30.1	9.3	4490
SEG 2	1985	30	80.5	10.7	3200
SEG 3	1986	30	91.3	10.2	3600

SEG 4	1986	30	91.3	10.2	3720
SEG 5	1987	30	99.2	10.2	4120
SEG 6	1988	30	90.9	12.4	3870
SEG 7	1988	30	92.6	12.3	3870
SEG 8	1990	80	252.8	14.0	2890
SEG 9	1991	80	256.1	13.6	3440

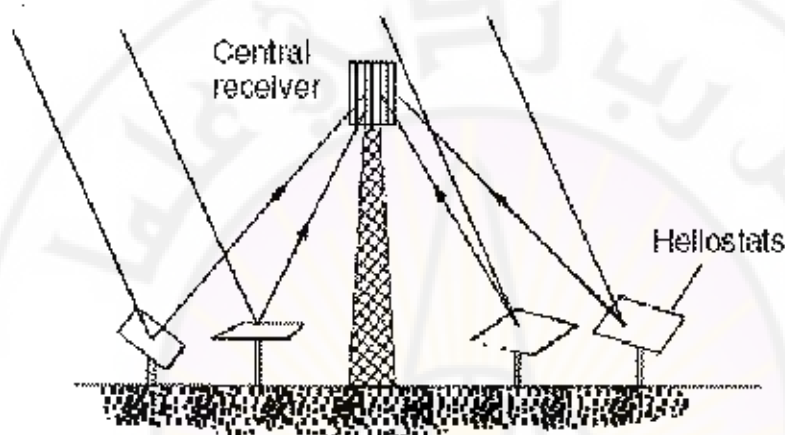
تم تجهيز المحطة الأولى بنظام تخزين حراري يضمن تشغيل المحطة عدة ساعات إضافية بعد غياب الشمس. يعتمد التخزين على رفع درجة حرارة زيت معدني قابل للاشتعال يسمى Caloria. عام 1999 حصل حادث أدى إلى احتراق نظام التخزين كلياً. أما بقية المحطات فلا تحوي تخزيناً حرارياً ولكنها مجهزة بنظام حرق وقود تقليدي مساعد يؤمن تشغيل العنفة البخارية في حال غياب الشمس.

دلّت الخبرات التشغيلية للمحطتين الأخيرتين أن المردود شمسي-كهرباء كان حوالي 10% وكلفة الطاقة المنتجة $0.12 \text{ \$/kWh}$ ، مما يجعل هذه التقنية المصدر الأرخص للكهرباء الشمسية حتى اليوم. وتجدر الإشارة إلى أن 1 MW يحتاج إلى موقع إنشاء مساحته 1.6-2 ha هكتار.

3-2-4 نظم البرج المركزي (CRS) Central receiver systems [3]

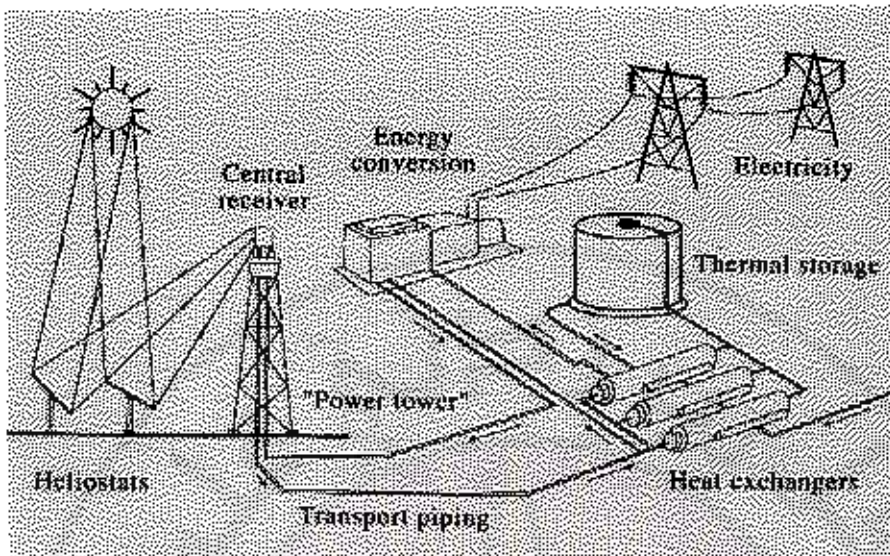
يتألف نظام البرج المركزي من مرايا مستوية مقادة بواسطة الحاسوب computer-controlled mirrors تسمى هليوستات Heliostats وظيفتها توجيه ضوء الشمس إلى مستقبل مركب على قمة برج كما هو موضح في الشكل 4-10. بدأ تطوير هذه الأبراج عام 1976 مع تأسيس مركز اختبارات النظم الحرارية الشمسية في مختبرات سانديا Sandia National Laboratories في نيومكسيكو في الولايات المتحدة الأمريكية. بُعيد ذلك، تم إنشاء عدد من النظم التجريبية حول العالم، كان أكبرها نظام برج مركزي ارتفاعه 90 متر واستطاعته 10 MW سُمّي Solar 1 رُكّب في كاليفورنيا قرب Barstow (الشكل 4-11). في تلك المحطة، كان الماء يُضخّ إلى المستقبل ليتحوّل إلى بخار ينساب عائداً إلى أسفل البرج ليغذي مجموعة عنفة/مولد. كان ثمة ترتيب لتحويل جزء من البخار إلى خزان حراري يحوي زيتاً

وصخوراً ورملاً لاختبار مدى إمكانية استمرار إنتاج الكهرباء خلال الظروف الشمسية غير المواتية أو بعد غياب الشمس. وعلى الرغم من أن التخزين الحراري كان ناجحاً من حيث المبدأ، إلا أنه كان يحصل عدم توافق mismatch بين درجة حرارة الخزان ودرجة الحرارة اللازمة لتشغيل العنفة بمردود أعظمي.

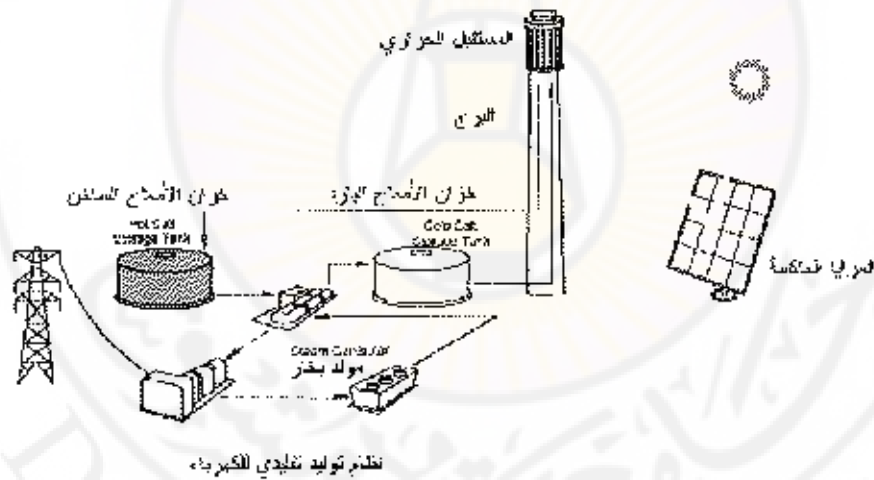


شكل 4-10: نظام برج مركزي CRS

أُشغلت المحطة Solar I من 1982 حتى 1988 وتم تفكيكها بعد ذلك مع الاحتفاظ بالمرايا التي كان عددها 1818 مرآة والبرج نفسه يُقام في نفس الموقع محطة تجريبية أخرى سُميت Solar II (الشكل 4-12) باستطاعة 10 MW وبدأت العمل عام 1996.

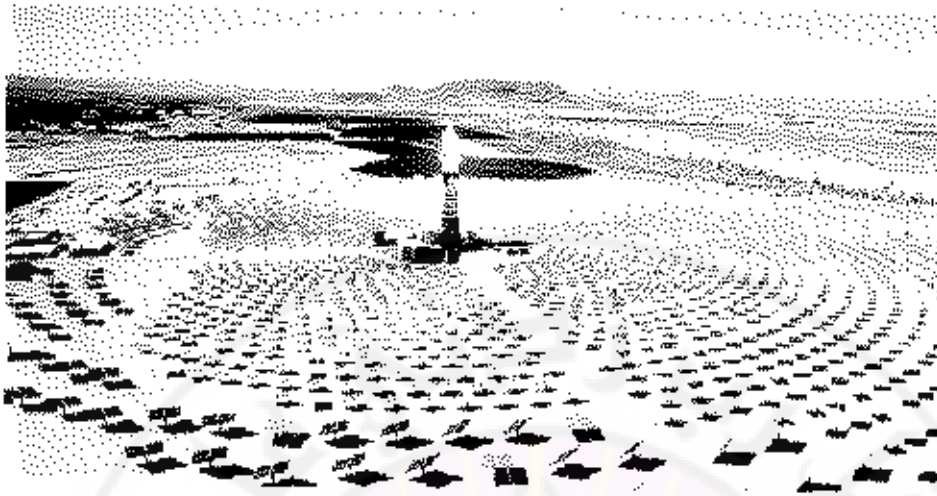


الشكل 4-11: المحطة Solar I ذات البرج المركزي



شكل 4-12: مخطط المحطة Solar II ذات البرج المركزي

يبين الشكل 4-13 صورة هذه المحطة.

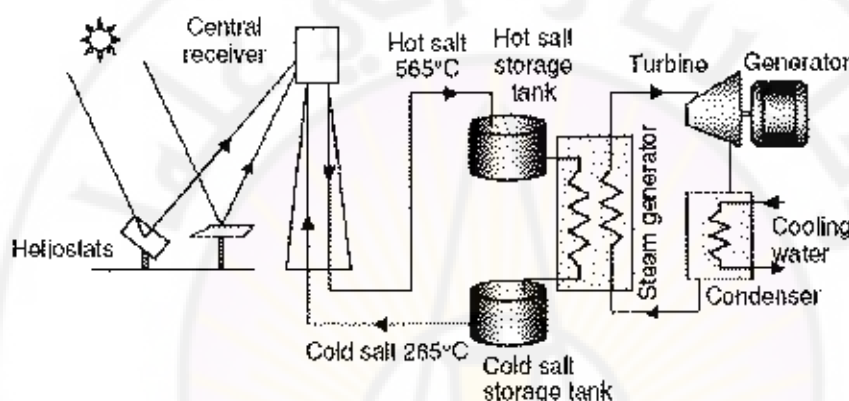


الشكل 4-13: صورة للمحطة Solar II ذات البرج المركزي

بينما استخدمت Solar I الماء كوسيط ناقل للحرارة، استخدمت أملاح مذابة molten salts (60% نترات الصوديوم و40% نترات البوتاسيوم) في Solar II. بدلا من الخزان الحراري الرملي الصخري القديم، تم استخدام نظام تخزين حراري ذي ملح مذاب مؤلف من وعائين أحدهما للملح الساخن القادم من المستقبل والآخر للملح البارد الخارج من مولد البخار والمبادل الحراري كما يبين الشكل 4-14 تخطيطيا. لقد حقق نظام الملح المذاب الجديد نجاحا عظيما، إذ حققت درجة حرارة الملح الخارج من البرج (565°C) توافقا جيدا مع احتياجات العنفة البخارية وتم الحصول على مردود حراري (نسبة حرارة خرج المستقبل إلى حرارة دخله) أكبر من 97%. كان النظام قادرا على الاستمرار في توليد استطاعة 10 MW لثلاث ساعات بعد غياب الشمس لفترات أطول بكثير في حال تم تشغيل المحطة باستطاعة أقل من الاستطاعة الاسمية.

بعد إيقاف المحطة Solar II عام 1999، قام فريق تصميم أمريكي-إسباني باقتراح إنشاء محطة Solar III باستطاعة 15 MW في مكان ما في إسبانيا. اعتمد تصميم المحطة الثالثة مقارنة مع المحطة الثانية، نسبة أكبر من مساحة المرايا لوحدة استطاعة الخرج الكهربائي، ونظام تخزين ملح مذاب أكبر بكثير، بحيث يستطيع النظام العمل

بإستطاعته الكاملة لأطول من 12 ساعة إضافية بالاعتماد على التخزين لوحده. كانت وجهة نظر فريق التصميم أن النظام الذي يجوي مساحة مرابا أكبر من اللازم ونظام تخزين كبير بمقدار كاف ليستوعب الطاقة الشمسية الزائدة عن الحاجة لاستخدامها لاحقاً، يجعل المحطة منبعاً كهربائياً أكثر وثوقية وجاهزية لتلبية الطلب الأعظمي على الطاقة في ساعات بعد الظهر والمساء.



شكل 4-14: نظام برج مركزي ذو ملح مذاب كمائع ناقل للحرارة

إن مستقبل CRS واعد ولكن غير مؤكد إلى حد ما. صحيح أن تقنية أبراج الملح المذاب هي التقنية الأكثر فهماً، ولكن كي تكون كلفتها معتدلة يجب بناء محطات كبيرة الاستطاعة من مرتبة 100 MW مثلاً، ما يعني استثمارات بمئات الملايين من الدولارات، وبالتالي مجازفة مالية كبيرة قد تجعل المستثمرين يحجمون أو يترددون في ولوج هذا المضمار. هناك تكنولوجيات CRS حديثة تستخدم الهواء بدلاً من الملح المذاب. في هذه الحالة يمكن استخدام الهواء المسخن شمسياً مباشرة في العنفة البخارية لأجل محطة تقليدية تعمل وفق دورة رانكين، أو يمكن استخدام الهواء الساخن لأجل التسخين المسبق للهواء المغادر للمضاغط في طريقه إلى غرفة الاحتراق لعنفة غازية في محطة توليد ذات دارة مركبة.

3-4 مقارنة تقنيات النظم الكهروحرارية الشمسية Comparison of CSTs

تشارك التقنيات الثلاث للنظم الكهروشمسية الحرارية في استخدامها للسطوح العاكسة المرآتية mirrored التي تعكس وتركز الإشعاع الشمسي على مستقبل يحوي مانع تشغيل مناسباً ترتفع درجة حرارته بمقدار كاف لتشغيل محرك حراري بمردود معقول. على الرغم من ذلك، تختلف هذه التقنيات عن بعضها البعض في العديد من الأمور. ثمة معايير متعددة تُقارَن على أساسها هذه التقنيات مثل معدل التركيز والمردود ومساحة الأرض اللازمة والوثوقية والطلب على المياه والجنوى الاقتصادية. هناك ارتباط وثيق بين المردود ومعدل التركيز، إذ تستخدم جميع تقنيات CST محركات حرارية، ما يعني أنه كلما كانت درجة حرارة المنبع الحراري أعلى كلما كان المردود الأعظمي الممكن أكبر. المفتاح لدرجات الحرارة العالية هو شدة الإشعاع الشمسي الواصل إلى المستقبل والتي تُقاس بوحدة تُدعى "sun" وتعاادل 1000 kW/m^2 . القيمة المرجعية 1 sun تعني لا يوجد تركيز.

- معيار نسبة التركيز Concentration ratio: نسب التركيز الأعظمية لتقنيات CST هي:

3000 suns	نظم مراكز القطع الدائري PDS
1000 suns	نظم مراكز البرج المركزي CRS
100 suns	نظم مراكز المحرك الخطي LFS

تتبع قيم المردود لنفس الترتيب وفق معيار نسبة التركيز فأعلى مردود هو للتقنية PDS وأخفض مردود هو لتقنية LFS.

- معيار المردود (الكفاءة) Efficiency: من حيث المبدأ يوجد قيمتان للمردود: المردود التصميمي (أي المردود لأجل الظروف التي صُمم النظام على أساسها) والمردود الميداني السنوي (أي المردود الذي يُقاس في ظروف التشغيل الواقعية). قيم المردود السنوي النمطية، باعتبار طاقة الدخل للنظام هي طاقة الإشعاع الشمسي

عند المرايا، وطاقة الخرج هي الطاقة الكهربائية المسلمة للشبكة الكهربائية المضيفة، هي:

21%	نظم مراكز القطع الدائري PDS
16%	نظم مراكز البرج المركزي CRS
14%	نظم مراكز المحرق الخطي LFS

– معيار مساحة موقع الإنشاء Required land area

بسبب المساحة غير المشغولة بين البرج والمرايا لنظم البرج المركزي، يختلف ترتيب التقنيات من حيث مساحة الأرض اللازمة لوحدة الاستطاعة الكهربائية (ha/MW) عن الترتيب وفق المعيارين السابقين الذكر:

1.6 ha/MW	نظم مراكز القطع الدائري PDS
2.0 ha/MW	نظم مراكز المحرق الخطي LFS
3.2 ha/MW	نظم مراكز البرج المركزي CRS

$$ha = 10000 m^2$$

– معيار الوثوقية Reliability: الأمر الآخر الجدير بالاهتمام للنظم الشمسية عموماً هو مدى قدرتها على توليد الكهرباء في وقت الحاجة لها. التقنيات الثلاثة قابلة للعمل مع مصدر حراري مساعد يعتمد الوقود التقليدي؛ إذن جميعها متماثلة إلى هذا الحد أو ذاك في هذا الأمر. ولكن يوجد إجراء آخر يعزز الوثوقية وهو التخزين الحراري الشمسي؛ في هذا الإطار تتفوق تقنيات LFS و CRS على تقنية PDS. عندما يُستخدم التخزين الحراري الشمسي بدلا من حرق الوقود التقليدي لأجل التزويد بالكهرباء وقت الحاجة، يكون من الأسهل الحصول على رخصة إنشاء المحطة لأنها تصبح محطة شمسية 100%.

– معيار الطلب على مياه التبريد Cooling water demand: يتعين استخدام نظم CST في المناطق ذات الإشعاع الشمسي العالي وغالبا في المناطق الصحراوية التي

تفتقر للمياه. ومن هذا المنطلق، تتفوق نظم PDS التي لا تحتاج لمياه تبريد على التصاميم الراهنة لنظم LFS و CRS.

- **المعيار الاقتصادي Economics:** في المراحل المبكرة لتطور التقنيات وانتشارها، تؤلف عوامل هامة مثل المجازفة الاقتصادية وحجم الاستثمارات اللازمة، على سرعة نمو سوق هذه التقنيات. على الرغم من أن نظم CRS و LFS باستطاعة 100 MW مثلا أكثر اقتصادية من نظم PDS الصغيرة الاستطاعة 25 kW، من الأسهل توفر مستثمرين يرغبون بتوظيف عشرات الآلاف من الدولارات في نظم PDS ذات عامل المجازفة الأقل بدلا من التورط في استثمار الملايين في النظم الأخرى.

4-4 لمحة عامة حول اقتصاديات المحطات الكهحرارية الشمسية [5]

ثمة عاملان يؤثران على كلفة إنتاج الطاقة الكهربائية Levelized electricity cost (LEC) لمحطات CST وهما الإشعاع الشمسي المتوفر وتكاليف التأسيس والتمويل والتشغيل. في حال تماثل السعر وظروف التمويل تكون LEC لمحطات مركبة في الجنوب الغربي للولايات المتحدة أو جنوب مصر أقل بحوالي 20%-30% من تلك المركبة في جنوب إسبانيا أو شمال إفريقيا، السبب هو أن طاقة الإشعاع الشمسي المباشر أكبر بحوالي 30% (2600-2800 kWh/m².year بالمقارنة مع 2000-2100 kWh/m².year). المورد الشمسي هو حتى أخفض في فرنسا وإيطاليا والبرتغال، بينما أفضل مورد شمسي في العالم يتوفر في صحاري جنوب إفريقيا وتشيلي حيث يقدم الإشعاع الشمسي المباشر طاقة تساوي 3000 kWh/m².year.

تعتمد الجدوى الاقتصادية لمشروع CST على المورد الشمسي المتاح في المكان وبدرجة ثانية على ظروف بيع الطاقة. إذا كان سعر شراء الطاقة المحلية لا يغطي كلفة إنتاجها، فلا بد من حوافز incentives أو قروض ميسرة لردم فجوة السعر بين كلفة الطاقة والتعرفة المتاحة. فضلا عن ذلك تؤلف آليات السوق البيئي كشهادات الطاقة المتجددة RE certificates دخلا إضافيا وخصوصا في البلدان النامية.

تبين الخبرة الأمريكية أن كلفة التوليد الكهحراري الشمسي حاليا هي حوالي \$ 15 cents/kWh (11 € cents/kWh) في المواقع ذات الإشعاع الشمسي العالي جدا. أهم العوامل التي يمكن أن تخفض الكلفة هي: تحسين التقنية، والإنتاج الكبير mass production، وتحسين التشغيل. تقترب محطات CST لتكون منافسة للمحطات التقليدية لأجل أحمال الذروة، وإن ارتفاع حصة CST في ميزان التوليد يمكن أن تساعد في استقرار أسعار الكهرباء، و تعيق الازدياد الدراماتيكي للأسعار مع ندرة النفط وتكاليف الكربون.

هناك بعض العوامل التي من شأنها تعزيز الجدوى الاقتصادية لمشاريع CST مثل إصلاح قطاع الكهرباء، وتزايد الطلب على الطاقة الخضراء وتطور أسواق الكربون العالمية. فضلا عن ذلك تولف برامج الدعم المباشر دفعا قويا، مثل قوانين التعريفات التفضيلية feed-in laws للطاقة الكهربائية المتجددة.

4-5 واقع و مستقبل النظم الكهحرارية الشمسية على المستوى العالمي
يبين الجدول 4-3 المحطات المركبة في العالم حتى نهاية التسعينيات ونلاحظ أن معظمها موجود في الولايات المتحدة الأمريكية. لقد

4-5-1 أوروبا

نعد إسبانيا حاليا الدولة الرائدة في العالم في تطوير CST للأسباب التالية:
- خططها لعام 2010 تقضي بتحقيق استطاعة مركبة 500 MW.
- إنها أول دولة أوروبية جنوبية تطلق نظام تعرفه تفضيلية feed-in tariff. كانت التعرفة (cents/kWh \$ 17) € cents/kWh 12 عام 2002 ثم غُلت عام 2004 لتصبح، حسب المرسوم الملكي 661 الصادر عام 2007، التعرفة الحالية المحفزة لبيع الطاقة من محطات CST ذات الاستطاعة الأقل من 50 MW هي € 26.9 cents/kWh (38 \$ cents/kWh) لمدة 25 سنة لتهبط بعد ذلك إلى € 21.5 cents/kWh (30 \$ cents/kWh).

الجدول 3-4: محطات CST المركبة في العالم حتى نهاية التسعينيات

Project Name	Year of Commission	Capacity [MW]	Type
Themis, France	1976	2.5	CRS
Eurelios, Adrano, Italy	1980	1.0	CRS
Sunshine, Japan	1981	1.0	CRS
IEA, SSPS	1981	5.0	CRS
IEA, SSPS	1982	0.5	LFS
Solar I, Barstow, California, USA	1982	10.0	CRS
Lajet Plant, Texas, USA	1984	4.9	PDS
Lenino, former USSR	1985	5.0	CRS
SEG 1, Mojave Desert, California	1984	14.7	LFS
SEG 2	1985	30	LFS
SEG 3	1986	30	LFS
SEG 4	1986	30	LFS
SEG 5	1987	30	LFS
SEG 6	1988	30	LFS
SEG 7	1988	30	LFS
SEG 8	1990	80	LFS
SEG 9, Mojave Desert, California	1990	80	LFS
Solar II, Barstow, California, USA	1996	10.0	CRS
Phoebus, Europe	planned	30	CRS
TOTAL	424.6 MW		

إن أفضل برهان على نجاح نظام الدعم الإسباني هو مسار تطور مشاريع CST فيها. يوجد حاليا 6 محطات عاملة باستطاعة إجمالية 81 MW، إضافة إلى 12 محطة قيد الإنشاء ستضيف 839 MW. يبين الجدول 4-4 واقع ومستقبل CST في إسبانيا (الوضع في نيسان 2009).

جدول 4-4: واقع ومستقبل محطات CST الإسبانية (الوضع في نيسان 2009)

MW	
81	محطات عاملة
839	محطات قيد الإنشاء
2083	محطات تحت التطوير (على وشك البدء بالإنشاء)
7830	محطات مقترحة (في بداية مرحلة الترخيص)
10813	مجموع المحطات تحت التطوير
3418	محطات إضافية (ضمنت رسوم الربط مع الشبكة)
14231	المشاريع الإجمالية الممكنة (تقديرات نيسان 2009)
500	الهدف الكلي لعام 2010

اللجنة الوطنية الإسبانية للطاقة مسؤولة عن نشر سجل منشآت CST. إذ لها موقع على الانترنت تنشر فيه التقدم الحاصل نحو الهدف الموضوع عن طريق سرد المحطات التي حصلت على الترخيص بحيث حالما يتحقق 85% من الخطة الهدف تقوم بتحديد الفترة الزمنية المتبقية التي يستطيع خلالها من يريد التسجيل لمحطات أن يحصل على حق الاستفادة من التعرفة التفضيلية. هذه الطريقة تخلق تنافسا لدى المستثمرين لتمجيل مشاريعهم قبل الوصول إلى نسبة 85%.

في أيار 2009، صدر مرسوم في إسبانيا يحدد متطلبات إضافية للاستفادة من التعرفة التفضيلية على أساس التقدم المنجز للمشروع (متطلبات مثل الشروع في تهيئة أرض المشروع، التعاقد على 50% من تجهيزات المشروع، إنجاز الدراسة حول توفر المياه

(...). يتم العمل الآن على تحضير قانون معزل سيرفع سقف الاستطاعة المركبة سنويا انسجاما مع التطورات التقنية المتحصلة والتي تجعل الحد الفني الأمثل أعلى من 50 MW.

تستعد دول أوربية جنوبية أخرى مثل فرنسا وإيطاليا والبرتغال واليونان لتحضير الأرضية لانتشار CST عن طريق قوانين تعرفه تفضيلية مناسبة. ففي إيطاليا، يجري العمل على إنشاء محطة ذات مراكز قطعية أسطوانية 5 MW ملحقه بمحطة تقليدية قائمة تعمل على الغاز ومن المتوقع أن تدخل بالخدمة في 2010. الميزة الابتكارية لهذه المحطة هي استخدام الملح المذاب كمائع توصيل حراري في الحقل الشمسي ووسيط التخزين الحراري.

في ألمانيا، يشجع قانون التعرف التفضيلية لاستخدام الطاقة المتجددة على انتشار CST، ولكن المورد الشمسي غير مناسب. من المتوقع أن تصل البحوث التي تجري هناك على محطة برج مركزي 1.5 MW دخلت بالخدمة في نهاية 2008، إلى نتائج ترفع من مردود تقنية المستقبل الهوائي.

4-2-5 شمال إفريقيا

تملك الجزائر موارد شمسية ممتازة تتجاوز 2000 kWh/m^2 في السنة من الإشعاع الشمسي المباشر. على المستوى الوطني، وضعت الجزائر خطة تهدف إلى تحقيق 10% طاقة متجددة بحلول 2025 وإلى زيادة الجزء الشمسي في مزيج الطاقة إلى 5% بحلول عام 2015. في ضوء الشراكة مع أوروبا التي تقضي بأن تزود الجزائر الطاقة إلى أوروبا كي تتمكن الأخيرة من بلوغ أهدافها الطاقية، تأسست شركة جديدة إسمها (New Energy Algeria (NEAL لتحسين إسهام القطاع الخاص المحلي والدولي في مجال الطاقة المتجددة.

في عام 2004، أصدرت الجزائر القانون الأول للتعرف التفضيلية الذي يسمح لأي دولة من دول منظمة التعاون الاقتصادي والتنمية Organization of Economic Co-operation and Development (OECD) الاستفادة من أسعار تفضيلية لأجل

مشاريع الكهرباء الشمسية وفق تقنية منظومات الدارة المركبة الشمسية المتكاملة Integrated Solar Combined Cycle Systems (ISCCS) وتزداد التعرف مع تزايد نسبة الإسهام الشمسي في المنظومة. في عام 2005، أعلنت شركة NEAL عن طلب عروض لإنشاء محطة ISCCS باستطاعة 150 MW بحيث يشكل التوليد CST منها استطاعة 25 MW_e بتقنية LFS. تضمن دفتر الشروط كون التعرف أقل من (6 \$ cents/kWh) 4 € cents/kWh والطاقة الكهربائية المنتجة أكبر من 5% ومعدل عائد داخلي internal rate of return في المجال 10%-16%. فاز بالعرض مجموعة Abengoa Group الإسبانية والمحطة الآن قيد الإنشاء في موقع Hassi Rmel في الجزائر. يوجد أيضا مشروعان مخططان بين 2010 و2015: استطاعة كل محطة 400 MW بتقنية ISCCS منها 70 MW شمسي. سيتم إنجاز دراسة الجدوى لهذه المشاريع هذا العام (2009).

4-5-3 الولايات المتحدة الأمريكية

كما يبين الجدول 4-3، كانت الولايات المتحدة لفترة طويلة البلد الوحيد الذي أقام محطات CST باستطاعة إجمالية حوالي 350 MW في صحراء موحا في كاليفورنيا منذ منتصف الثمانينات.

تم مؤخرا تطوير المحطة Solar one المقامة في نيفادا باستطاعة 64 MW، ووُضعت بالخدمة في حزيران 2007. وهناك الآن مشاريع CST عديدة وكبيرة قيد التحضير باستطاعة حتى 280 MW وخاصة في الجنوب الغربي من البلاد حيث المورد الشمسي المباشر ممتاز والطلب على الطاقة متزايد.

من بين الإجراءات الداعمة لتنمية إنشاء CST في الولايات المتحدة هو 30% investment Tax Credit الذي تمت الموافقة عليه مؤخرا الساري المفعول حتى 2017. ولكن بسبب الأزمة المالية في عام 2008 فمن غير المعروف كيف سيتم تطبيق هذه الأداة التمويلية الهامة على المدى البعيد. ولكن لأجل فترة سنتين سيستعيد أي مشروع 30% عند الاستلام.

علاوة على ذلك، هناك العديد من مبادرات الولايات، مثل كاليفورنيا التي فرضت على شركات الكهرباء على إنتاج 20% من مبيعاتها من الطاقة المتجددة بحلول 2017، ونيفادا التي فرضت على شركات الكهرباء على إنتاج 15% من مبيعاتها من الطاقة المتجددة بحلول 2013.

كما طلب الكونغرس عام 2002 من وزارة الطاقة وضع خطة وتنفيذها لإنشاء محطات CST جديدة في الجنوب الغربي باستطاعة 1000 MW بحلول 2006.

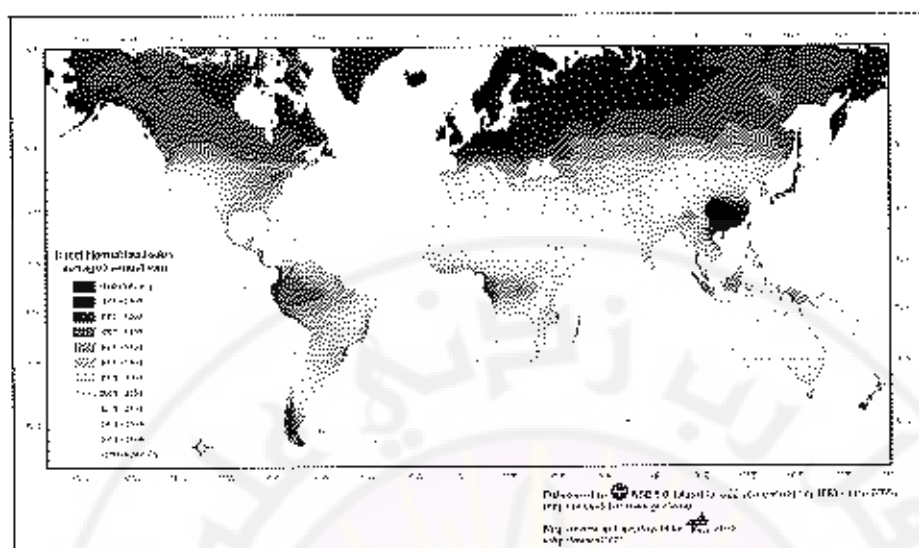
4-6 كمون نظم CST على الصعيد العالمي Global potential of CST

قُدم باحثان مرموقان يعملان في مركز الفضاء الألماني، معهد الترموديناميك الفني، ورقة علمية في مؤتمر SolarPaces Conference Berlin, September 2009 الذي عقد في برلين في أيلول من هذا العام (2009)، حول الكمون العالمي لنظم CST [6]. ونظرا لحدثة البحث، نورد ملخصا له في هذا الفصل.

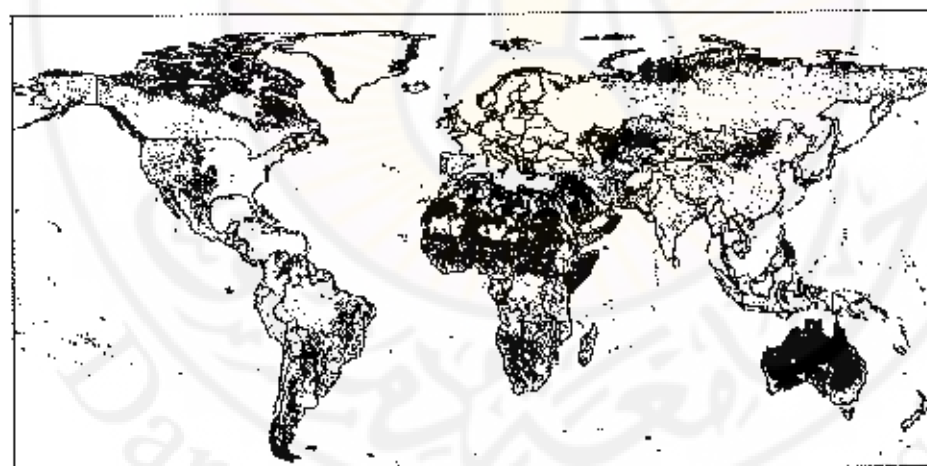
يتضمن البحث تحليلا للكمون الفني لنظم CST على الصعيد العالمي في إطار مشروع أوروبي Risk of Energy Availability: Common Corridors for European Supply Security (REACCESS). يعتمد التحليل على معلومات NASA حول الإشعاع السنوي المباشر الناطمي Direct Normal Irradiation (DNI) (الشكل 4-15).

4-6-1 تقييم الطاقة الشمسية ومصادر الأرض Assessment of Solar Energy and Land Resources

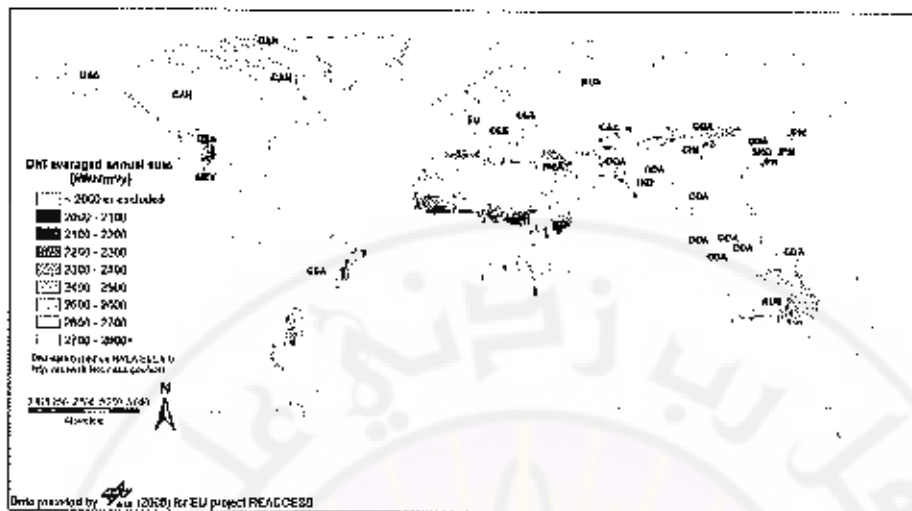
تمت معالجة الخارطة في الشكل 4-15 رقميا وتم تحديد المناطق المستتاة من تركيب محطات CST وفق معايير معينة مثل الميل $> 2.1\%$ ، الغطاء المائي، الأراضي الزراعية، المناطق الجليدية، حقول النفط والغاز، المناجم، محطات التحلية، المناطق المحمية والمناطق المحظور استعمالها. النتيجة هي الخارطة في الشكل 4-16. بعد ذلك تم دمج الخارطتين فتم الحصول على خارطة نهائية عالمية تبين الإشعاع الشمسي DNI والمناطق المناسبة (الشكل 4-17). ثم تم إنجاز تحليل إحصائي أدى إلى



شكل 4-15: خارطة DNI السنوي [kWh/m²/y] حسب NASA



شكل 4-16: المواقع المستثناة من إقامة محطات CST



Resulting map of the annual sum of direct normal irradiation for potential global CSP sites as identified within the EU-project REACCESS. For definition of world regions (abbreviations) please refer to Table 4-5

شكل 4-17: الخارطة النهائية للمناطق المناسبة لإقامة محطات CST

الجدول 4-5 الذي يعطي مساحات الأرض المناسبة المتاحة لكل إقليم ولأجل أصناف مختلفة للإشعاع DNI.

جدول 4-5: مساحات المناطق المناسبة لكل إقليم ولأجل DNI مختلفة

DNI Class kWh/m ²	Africa km ²	Australia km ²	Central Asia Caucase km ²	Canada km ²	China km ²	Central South America km ²	India km ²	Japan km ²
2000-2099	1,082,820	70,164	151,105		88,171	114,058	83,522	
2100-2199	1,395,800	187,746	3,825		184,605	207,927	11,510	
2200-2299	1,351,050	355,198	3,594		415,720	232,678	5,310	
2300-2399	1,308,170	612,512	1,642		263,101	191,767	7,181	
2400-2499	1,862,850	1,315,560	580		95,528	57,941	3,783	
2500-2599	1,743,270	1,775,570			85,835	31,434	187	
2600-2699	1,468,970	1,172,760			17,938	42,139	978	
2700-2800+	2,746,100	393,850			24,435	93,865	120	
Total (km ²)	12,858,360	6,087,450	159,839	0	1,190,338	1,106,948	112,497	0

DNI Class kWh/m ²	Middle East km ²	Mexico km ²	Other Developing Asia km ²	Other East Europe km ²	Russia km ²	South Korea km ²	EU27+ km ²	USA km ²
2000-2099	36,315	18,989	47,520	58			8,163	149,165
2100-2199	125,682	34,129	52,262	129			5,016	172,865
2200-2299	378,854	35,263	105,768	23			8,381	210,128
2300-2399	557,299	53,755	284,983				1,498	151,870
2400-2499	633,994	139,455	172,843				800	212,467
2500-2599	298,755	80,972	37,855				591	69,384
2600-2699	285,541	12,626	2,084				257	19,144
2700-2800+	282,408	14,903	1,082				278	
Total (km ²)	2,588,848	368,168	703,577	211	0	0	23,975	985,065

يبين الجدول 4-5 أن معظم أقاليم العالم ماعدا كندا واليابان وروسيا وكوريا الجنوبية يملك مناطق واحدة لأجل CST ذات إشعاع DNI أعلى من $2000 \text{ kWh/m}^2/\text{y}$. ويأتي في مقدمة هذه الأقاليم الواعدة إفريقيا و أستراليا والشرق الأوسط، يليها الصين وأمريكا الوسطى والجنوبية.

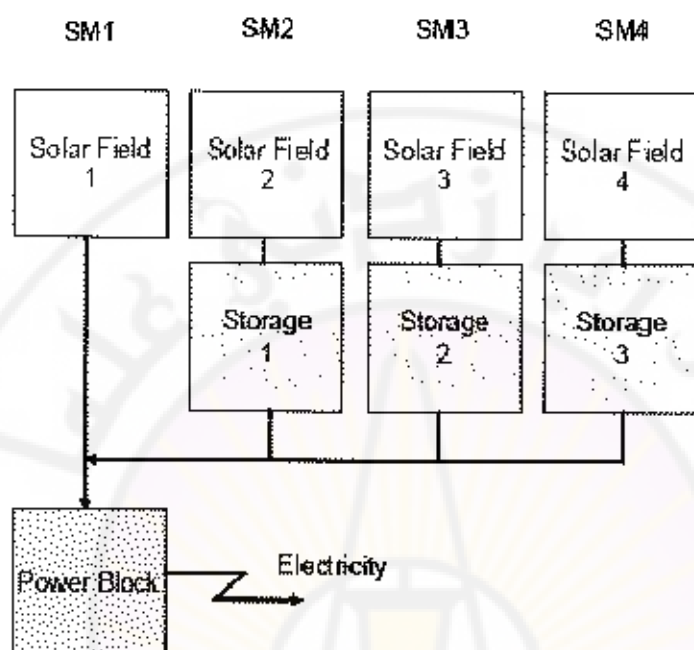
4-6-2 نماذج أداء المحطات الشمسية الكهحرارية CST Performance Model في الوقت الحاضر، يبلغ عامل السعة capacity factor حوالي 20-25% لمحطات CST دون تخزين حراري لأجل إشعاع DNI أكبر من $2000 \text{ kWh/m}^2/\text{y}$ ، ما يكافئ 2000 ساعة تشغيل بحمل كامل full load operation hours خلال عام. ويمكن تمديد زمن التشغيل الشمسي لتلبية حمل الأساس عن طريق التخزين الحراري وتكبير حقول اللواقط الشمسية. بهدف إمكانية التقييم الكمي تم ابتكار موديل بسيط يعطي عدد الساعات السنوية للتشغيل الشمسي بالحمل الكامل كتابع لهيكلية المحطة. الطريقة الأفضل لتمثيل هيكلية محطة CST هي مايسمى المضاعف الشمسي Solar Multiple (SM). فعلى سبيل المثال:

- محطة CST ذات SM1: تملك حقلا شمسيا واحدا كافيا لتشغيل العنفة البخارية باستطاعتها الإسمية تحت ظروف الإشعاع الإسمية، مثلا 800 W/m^2 على سطح اللاقط.

- محطة CST ذات SM2: تملك حقلا شمسيا هو ضعف الحقل SM1 بحيث يقوم الحقل الأول بتشغيل العنفة مباشرة، ويقوم الحقل الثاني بتزويد المخزن الحراري بالحرارة الكافية لتشغيل الليلي.

بالإمكان أيضا زيادة كمية التخزين وحجم الحقل الشمسي إلى SM3 و SM4 كما يبين الشكل 4-18. إن تكبير الحقل الشمسي أكثر من ذلك ليس ذا فائدة، لأن الطاقة المولدة أثناء الإشعاع الشمسي العالي ستكون طاقة فائضة غير مستعملة.

يُعتبر الموديل المستخدم أن SM1 تقابل حقل لواقط بمساحة 6000 m^2 لكل 1 MW استطاعة مركبة، وأن كل وحد تخزين تستطيع تشغيل الحمل الكامل لفترة 6 ساعات.



شكل 4-18: تمثيل محطات 'CST' بواسطة المضاعف الشمسي SM

التقنية المرجع هي LFS مع تخزين ملح مذاب وعنفه بخارية وبرج تبريد جاف حيث المردود الكهربائي الشمسي الصافي السنوي هو حوالي 12%.
يبين الجدول 4-6 والشكل 4-19 الساعات السنوية لتشغيل محطة CST بالحمل الكامل لأجل SM و DNI و خطوط عرض مختلفة.

جدول 4-6: الساعات السنوية لتشغيل محطة CST بالحمل الكامل لأجل SM و

DNI و خطوط عرض مختلفة

SM1	DNI 1800	DNI 2000	DNI 2200	DNI 2400	DNI 2600	DNI 2800
Lat. 0°	1613	1669	2128	2362	2584	2836
Lat. 10°	1607	1674	2130	2344	2601	2808
Lat. 20°	1559	1601	2082	2269	2502	2725
Lat. 30°	1450	1559	1977	2128	2350	2580
Lat. 40°	1310	1524	1819	1920	2127	2340

SM2	DNI 1800	DNI 2000	DNI 2200	DNI 2400	DNI 2600	DNI 2800
Lat. 0°	5425	5853	6221	6645	6931	7282
Lat. 10°	3401	3817	4187	4612	4909	5222
Lat. 20°	3310	3719	4090	4495	4810	5096
Lat. 30°	3147	3530	3943	4283	4606	4987
Lat. 40°	2911	3265	3749	3984	4301	4604

SM3	DNI 1800	DNI 2000	DNI 2200	DNI 2400	DNI 2600	DNI 2800
Lat. 0°	4869	5414	5810	6405	6713	7137
Lat. 10°	4629	5358	5752	6365	6690	7074
Lat. 20°	4711	5223	5630	6229	6501	6929
Lat. 30°	4499	4995	5434	5970	6352	6676
Lat. 40°	4199	4674	5163	5601	5997	6322

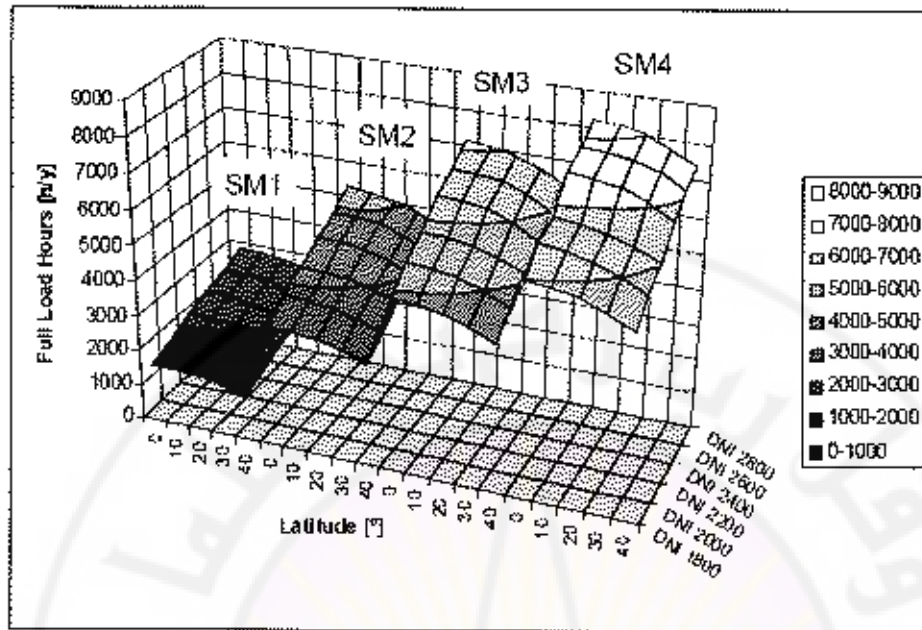
SM4	DNI 1800	DNI 2000	DNI 2200	DNI 2400	DNI 2600	DNI 2800
Lat. 0°	5837	6520	6780	7563	7659	8243
Lat. 10°	5918	6430	6713	7614	7631	8166
Lat. 20°	5761	6260	6503	7380	7724	8000
Lat. 30°	5506	5999	6340	7110	7497	7738
Lat. 40°	5155	5650	6045	6717	7115	7348

Annual full load hours (h-y) of CSP plants for different Solar Multiple (SM), different annual direct normal irradiation (DNI) and different latitudes (Lat.) from hourly time series modeling.

مثال: معطي محطة CSP ذات SM4 مركبة في جنوب إسبانيا (خط عرض 35°) حيث $DNI = 2000 \text{ kWh/m}^2/\text{y}$ والمطلوب حساب مساحة الحقل الشمسي لكل 1 ميغاواط وعدد ساعات التشغيل بالحمل الكامل الذي يؤمنها التخزين والتي تؤمنها المحطة ككل. أعدد الحل لأجل جنوب مصر (خط عرض 25°) وإشعاع 2800. الحل: مساحة الحقل هي:

$$4 \times 6000 = 2400 \text{ m}^2/\text{MW}$$

التخزين يغذي الحمل الكامل لفترة هي: $3 \times 6 = 18 \text{ h}$ من الجدول 4-5 والشكل 4-19 لأجل خط عرض 35° وإشعاع 2000 نجد ساعات التشغيل بالحمل الكامل سنويا تساوي 5900 ساعة أما لأجل خط عرض 25° وإشعاع 2800 فهي 8000 ساعة.



Model results (annual full load hours) for varying SM, DNI and Latitude.

شكل 4-19: نتائج الموديل (ساعات التشغيل بالحمل الكامل) لأجل SM و DNI و خطوط عرض مختلفة

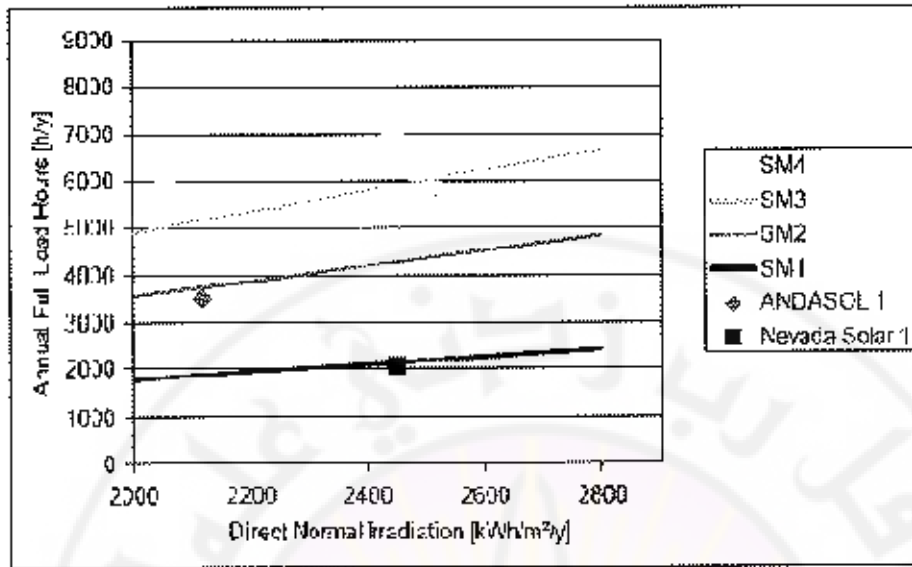
تعطي المعادلة التجريبية التالية عدد ساعات التشغيل بالحمل الكامل Flh سنويا لأجل محطة CST ذات SM و DNI سنوية وهي:

$$Flh = (2.5717 \times DNI + 694) \times (-0.0371 \times SM^2 + 0.4171 \times SM - 0.0744) \quad (4.1)$$

يبين الشكل 4-20 تمثيلا بيانيا للمعادلة وهو يعطي تقريبا جيدا للمواقع لأجل خطوط العرض 25-35° ولكنها تبدي فرقا نسبته 10%+ و 10%- لأجل خطي العرض 0 و 40° على الترتيب.

4-6-3 حساب الكمون العالمي لمحطات CST

تستخدم التعاريف التالية لحساب المردود شمس-كهرباء لمحطات التوليد الكهربائي الشمسية CST باعتبار مساحة الأرض الإجمالية اللازمة:



شكل 4-20: التمثيل البياني للمعادلة (4.1)

$$\text{Solar Electric Efficiency} = \frac{\text{Annual Net Power Generation}}{\text{Annual Direct Irradiance on Aperture}}$$

$$\text{Land Use Factor} = \frac{\text{Aperture Area of Reflectors}}{\text{Total Land Area Required}}$$

$$\text{Land Use Efficiency} = \text{Solar Electric Efficiency} \times \text{Land Use Factor}$$

يستخدم الموديل محطة CST بخارية بتقنية LFS مع تخزين حراري كمرجع لحساب مردود التحويل الشمسي إلى كهرباء. المردود الوسطي السنوي لمحطة ذات تبريد رطب هو حوالي 15%، بينما ينقص إلى 12% لأجل التبريد الجاف المفضل للمناطق الصحراوية. هذا يعني أن 12% من الإشعاع الشمسي الساقط على سطح اللاقط يتحول إلى كهرباء صافية تُسلم للشبكة المضيفة. يغطي الحقل الشمسي لنظم LFS حوالي 37% من مساحة الأرض الإجمالية. وعليه يكون مردود استغلال الأرض:

Land use efficiency

$$12\% \times 37\% = 4.5\%$$

الذي يمثل خرج المحطة باعتبار الطاقة الشمسية السنوية الساقطة على سطح الأرض الكامل للمحطة. يبين الجدول 4-7 المردود الشمسي الكهربائي وعامل استغلال الأرض ومردود استغلال الأرض لتقنيات مختلفة لمحطات CST.

جدول 4-7: المردود الشمسي الكهربائي وعامل استغلال الأرض ومردود استغلال الأرض لتقنيات مختلفة لمحطات CST

Collector & Power Cycle Technology	Solar-Electric Aperture Related Efficiency	Land Use Factor	Land Use Efficiency
Parabolic Trough Steam Cycle	11 - 16%	25 - 40%	3.5 - 6.6%
Central Receiver Steam Cycle	12 - 16%	20 - 25%	2.5 - 4.0%
Linear Fresnel Steam Cycle	8 - 12%	60 - 80%	4.8 - 9.6%
Central Receiver Combined Cycle*	20 - 26%	20 - 25%	4.0 - 6.3%
Multi-Tower Solar Array Steam or Combined Cycle*	15 - 25%	60 - 80%	9.0 - 20.0%

لحساب الكمون العالمي الكهربائي الفني لمحطات CST نضرب المساحات المتاحة لتركيب محطات CST (من الجدول 4-5) بمردود استغلال الأرض 4.5% المحسوب سابقا (الجدول 4-8). على الرغم من بساطة هذه الطريقة فهي تعطي تقديرات جيدة للكمون على أساس تقنية LFS المجربة جيدا.

جدول 4-8: الكمون الفني [TWh/y] لنظم CST لأقاليم مختلفة لأجل DIN

متعددة

DNI Class	Africa	Australia	Central Asia	Canada	China	Central South America	India	Japan
kWh/m ² /y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y
2000-2099	102,254	6,831	14,280	0	8,332	31,872	7,899	0
2100-2199	130,194	18,567	300	0	18,276	20,580	5,140	0
2200-2299	139,834	30,767	372	0	43,027	24,082	550	0
2300-2399	141,066	87,751	177	0	30,415	20,711	774	0
2400-2499	209,571	148,001	64	0	11,197	6,417	425	0
2500-2599	203,963	207,763	0	0	11,330	3,678	13	0
2600-2699	178,480	142,490	0	0	2,180	5,120	119	0
2700-2800+	346,809	48,826	0	0	3,079	11,827	15	0
Total [TWh/y]	1,499,370	697,609	15,193	0	125,636	123,882	18,528	0

DNA Class	Middle East	Mexico	Other Developing Asia	Other East Europe	Russia	South Korea	EU27+	USA
TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y
2000-2099	3,432	1,606	1,491	6	0	0	866	14,098
2100-2199	12,443	3,375	5,174	13	0	0	497	17,114
2200-2299	39,191	3,650	10,347	2	0	0	660	21,748
2300-2399	60,188	5,897	30,776	0	0	0	162	16,482
2400-2499	71,304	15,888	19,356	0	0	0	50	23,903
2500-2599	34,954	7,134	4,429	0	0	0	68	8,116
2600-2699	32,263	1,534	253	0	0	0	21	2,326
2700-2800+	36,843	1,676	136	0	0	0	34	0
Total (TWh/y)	290,630	40,876	75,561	21	0	0	2,408	103,704

تعطي نتيجة التحليل كمونا عالميا إجماليا مقداره 2,945,926 TWh/y الذي يؤلف أضعاف الاستهلاك الكهربائي العالمي البالغ 18000 TWh/y.

4-6-4 تقنية الصحراء Desertec [9] [8] [7]

لقد اقترح مؤسسو مؤسسة تقنية الصحراء وهم الجمعية الألمانية لمبتدئ روما العلمي (German Association Club of Rome) وأعضاء شبكة التعاون عبر المتوسط للطاقة المتجددة (TREC) بأن إعادة توجيه المسار في مجال الطاقة في الوقت المناسب - والذي يمكن التعجيل به باستخدام الكهرباء من الصحراء - يتطلب وجود منظمة مستقلة قوية.

ستكون تقنية الصحراء مفيدة بشكل خاص للشركات التي:

- تقوم بهندسة وتصميم وإنتاج محطات الكهرباء الشمسية الحرارية وخطوط نقل التيار المستمر فائق التوتر.

- تبحث عن فرص استثمار مستدامة في قطاع البنية التحتية

- تستهلك كميات كبيرة من الكهرباء أو تنتج منتجات تستهلك كمية كبيرة من الكهرباء ولذلك يهمها استخدام الكهرباء النظيفة بسعر ثابت.

- تقوم بهندسة أو تصميم أو إنتاج محطات تحلية مياه البحر.

إن مؤسسة تقنية الصحراء تجمع الاهتمام السياسي والاقتصادي والاجتماعي لتأمين الطاقة مع الحفاظ على المناخ، وبذلك تزيد من تأثيرها السياسي. والمؤسسة تروج لمخطط تقنية الصحراء عن طريق العلاقات العامة لكسب أكبر عدد من الداعمين

للمخطط، وإضافة لذلك فالمؤسسة تعمل في الاستشارات السياسية على مستوى وطني وإقليمي في أوروبا ومنطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا وكذلك حول العالم مع المشرعين والقادة الاجتماعيين المؤثرين بهدف التعجيل بتنفيذ مخطط تقنية الصحراء.

هذه المشروعات والإجراءات هي الأولى في جدول الأعمال:

- الاستفادة الكاملة من الإمكانيات الجديدة للتعاون الناشئ عن تأسيس "الإتحاد من أجل المتوسط" بين أوروبا والدول العشر الجنوبي وشرقي البحر المتوسط، وعلى الأخص يجب تنفيذ المشروع الرئيسي وهو "الخطة الشمسية للبحر المتوسط - "على وجه السرعة- واعتباره ذا أولوية كبرى كمنهج طوارئ لمكافحة تغير المناخ.
- البدء فوراً في مفاوضات لإنشاء شراكة بين دول أوروبا من ناحية ودول الشرق الأوسط وشمال إفريقيا من ناحية أخرى بهدف تطبيق مخطط تقنية الصحراء.
- حملة إعلامية تغطي جميع دول أوروبا والشرق الأوسط وشمال إفريقيا بغرض نشر فكرة مخطط تقنية الصحراء وإمكانيات التطبيق العملي لهذا المخطط.
- إعداد "أطلس للإشعاع الشمسي" خاص بمحطات الكهرباء الشمسية الحرارية يكون متاحاً للجميع ويوضح بالنسبة للزمان والمكان شدة الإشعاع الشمسي الساقط على المناطق الصحراوية.

بحلول عام 2050 سيصبح عدد سكان الأرض 10 مليار نسمة سيحتاجون إلى طعام وماء وطاقة ومنتجات، إن ثلث سكان العالم في وقتنا الحالي لا يحصلون إلا على قدر محدود من هذه المتطلبات الأساسية - بل هناك عدة ملايين من البشر ليس لديهم الكفاف. في ظل الأنظمة الاقتصادية الحالية سيكون من المستحيل على الدول الرائدة إقتصادياً أن تحافظ على مستوى إزدهارها أو تزيد منه بينما هناك في نفس الوقت عدة مليارات من البشر يكافحون من أجل مستوى مشابه من الازدهار. وسوف تتفاقم الصراعات حول الموارد الطبيعية - وخاصة الماء والطاقة - وسوف يستمر المناخ في التغير وتصبح المتطلبات الأساسية للحياة بالنسبة لغالبية سكان الأرض مهددة بعنف. في ضوء هذه

الحقيقة المقابلة لم يعد السؤال الأساسي اليوم هو هل أو متى سنبدأ في تقليل الضغط على الأرض. بدلا من ذلك ، يجب أن يكون السؤال:

”كيف يمكننا تقليل الضغط على الأرض بدءا من اليوم؟“

- بحيث أنه في خلال 40 سنة سيجد 10 مليار نسمة ما يكفيهم من الغذاء والماء والطاقة،

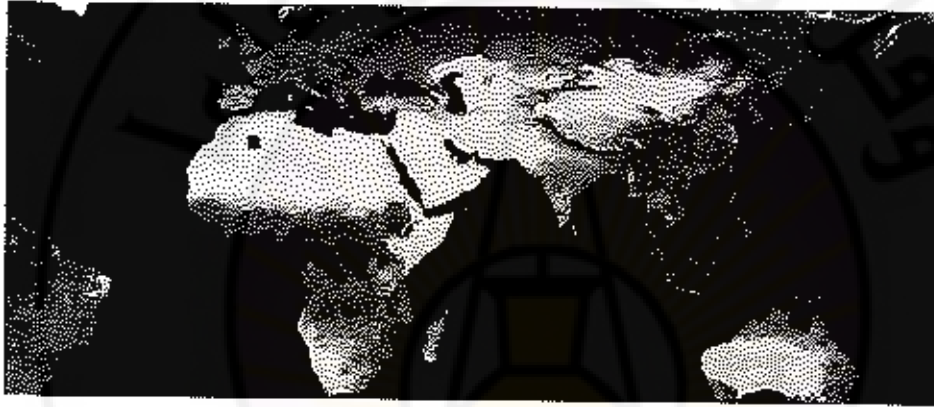
- و لكي نمنع استمرار الارتفاع في درجة حرارة الجو وما يتبع ذلك من تغيرات مهددة لظروف الحياة؟“

أوضحت الدراسات التي أجراها المركز الألماني لشؤون الطيران ومجال الفضاء German Aerospace Center DLR أنه في خلال ٤٠ سنة على أقصى تقدير ستصبح - بالأخص - محطات الطاقة الشمسية الحرارية قادرة على أن تنتج أكثر من نصف الطلب على الكهرباء في منطقة أوروبا والشرق الأوسط وشمال إفريقيا (EUMENA) على وجه إقتصادي. ولكي توفر الطلب العالمي على الكهرباء في وقتنا الحالي وهو 18000 تيراوات ساعة في السنة فإنه يكفي أن نرود ثلاثة من ألف من مساحات الصحراء في العالم (الشكل 4-21) والتي تبلغ تقريبا 40 مليون كم ٢ بحقول من المرايا وهي المراكز الخاصة بمحطات الطاقة الشمسية الحرارية. وذلك حيث أن حوالي 20 م ٢ من الصحراء تكفي للمواف بمتطلبات الطاقة للإنسان الواحد يوما وليلة - وذلك خال تماما من ثاني أكسيد الكربون. فإذا وجدت الرغبة لدى القادة السياسيين لوضع إطار لأسس العمل سيتمكن إتمام التنفيذ لمخطط تقنية الصحراء على مستوى العالم في أقل من 30 عاما.

مخطط خاص بمنطقة أوروبا والشرق الأوسط وشمال إفريقيا

يمكن لمنطقة أوروبا والشرق الأوسط وشمال إفريقيا أن تحظى بتميز فريد من تنفيذ مخطط تقنية الصحراء. فإذا تخيلنا الآتي: لتغطية متطلباتها المتزايدة من الكهرباء تنشئ بلاد جنوبي وشرقي البحر الأبيض المتوسط وكذلك بلاد الجزيرة العربية محطات كهرباء شمسية حرارية في الصحراء معززة بطاقة الرياح والطاقة المائية مع مراعاة الطاقة - المطلوبة بشكل عاجل - لتحلية مياه البحر. و بالإضافة إلى ذلك يمكنها تحقيق عائد مستدام من تصدير الكهرباء إلى أوروبا. إن الإستثمار في الطاقات المتجددة

والتجارة بها يعزز التطور الاقتصادي في المنطقة ويُتيح فرص عمل محلية في كل من إنتاج المركّزات الشمسية والإنشاءات: على سبيل المثال يتطلب إنشاء محطة كهرباء باستطاعة ٢٥٠ ميغاوات بالمركّزات الشمسية ذات القطع المكافئ 1000 عامل ومهندس لفترة تمتد لعامين أو ثلاثة أعوام. وبذلك تستطيع دول الشرق الأوسط وشمال إفريقيا بما فيها الدول المنتجة للنفط والغاز أن تحقق عائداً من تصدير الكهرباء النظيفة كما تتخذ خطوة فعالة نحو حل مشكلتي البطالة وهجرة العقول. وستحقق الدول الأوروبية بدورها أهدافها المعلنة لتقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بشكل أسرع وبتكلفة أقل حيث أن الكهرباء المستوردة من محطات الكهرباء الشمسية الحرارية يُمكنها

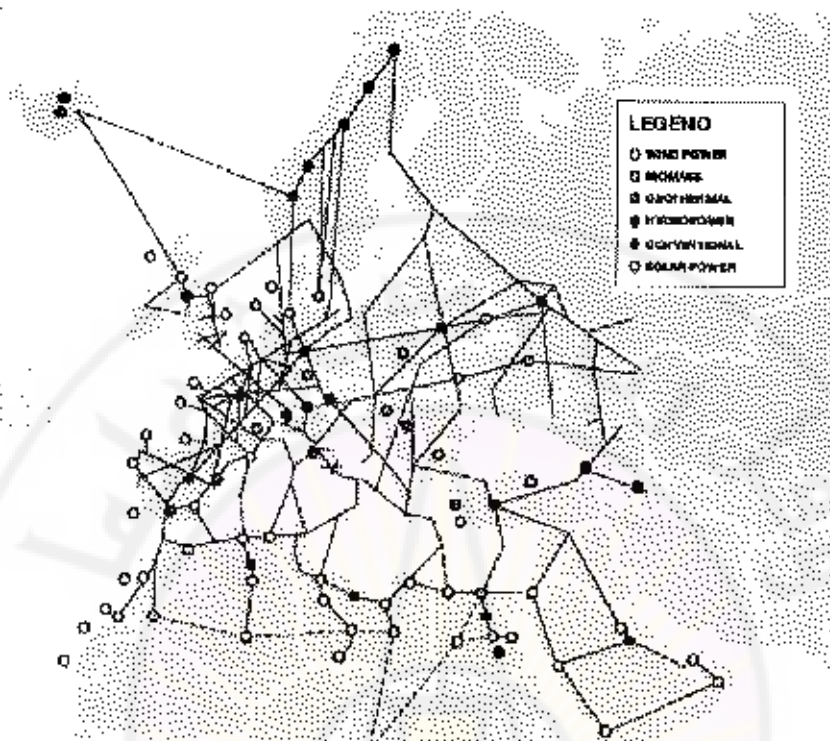


شكل 4-21: الحزام الصحراوي في شمال إفريقيا والشرق الأوسط (وأماكن أخرى)

[9]

أن تؤدي دور "استطاعة الموازنة" المُنتجة حالياً من الوقود الأحفوري. وبذلك تستفيد المنطقة كلها من التجارة بكهرباء الصحارى.

في ضوء ما تقدم تنوي حوالي 20 شركة ألمانية (من بينها Siemens, Deutsche Bank, E.ON, Munich RE) تأسيس شركة خاصة لتنفيذ المشروع-الحلم Desertec الذي يهدف إلى بناء محطات كهربائية شمسية في صحراء شمال إفريقيا باستطاعة إجمالية مقدارها 100 GW حتى عام 2050 (الشكل 4-22).



شكل 4-23: شبكة نقل HVDC الواصلة بين محطات CST وأوروبا

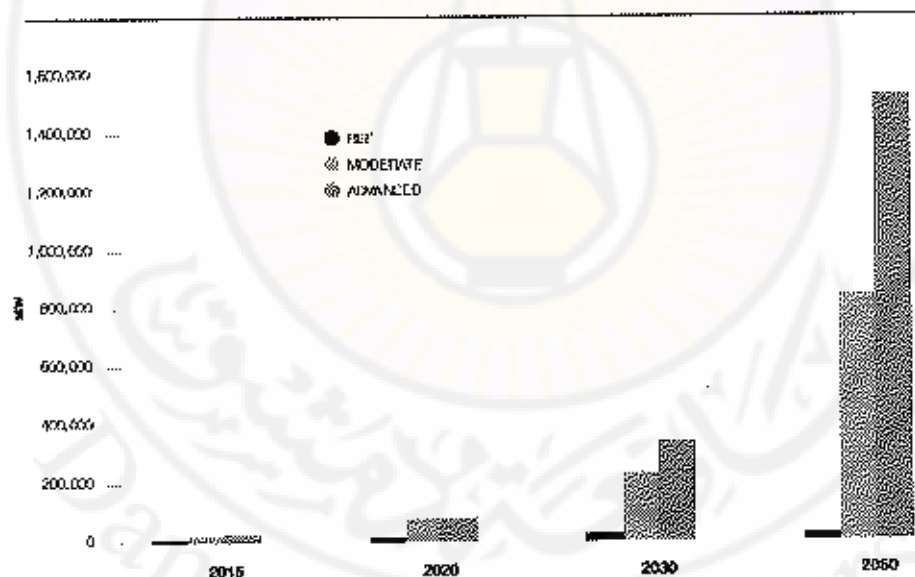
7-4 ملحق الفصل الرابع

معلومات إحصائية حسب تقرير 2009 لمنظمات دولية في مجال توقعات
(سيناريوهات) لتركيبات CST حتى 2050

صدر مؤخراً (23 أيار 2009) تقرير بعض المنظمات المهمة بالمحطات CST [10] يتضمن ثلاث سيناريوهات لمحطات CST حتى عام 2050 وهي: سيناريو مرجعي (متشائم) Reference، وسيناريو وسط (معتدل) moderate وسيناريو متقدم (متفائل) advanced. وتبين الجداول والأشكال التالية ملخصاً لهذه السيناريوهات.

جدول 4-9: التركيبات السنوية، كلفة التأسيس €/kW، الإستثمار السنوي Billion
 €، فرص العمل السنوية

	2015	2020	2030	2050
Reference				
Annual Installation (MW)	566	681	552	1400
Cost € / kW	3,400	3,000	2,800	2,400
Investment billion € / year	1,924	2,043	1,546	3,363
Employment Job-year	9,611	13,739	17,798	19,295
Moderate				
Annual Installation (MW)	5,463	12,602	19,895	40,557
Cost € / kW	3,230	2,850	2,600	2,280
Investment billion € / year	17,545	35,917	52,921	92,470
Employment Job-year	89,358	200,279	428,232	1,187,611
Advanced				
Annual Installation (MW)	6,814	14,697	35,462	80,827
Cost € / kW	3,080	2,700	2,520	2,180
Investment billion € / year	20,852	39,883	89,356	174,585
Employment Job-year	99,523	200,998	629,546	2,106,123



شكل 4-24: التركيبات المتراكمة [MW] حتى 2050

جدول 4-10: التركيبات المتراكمة [MW] والطاقة الكهربائية المولدة [TWh]

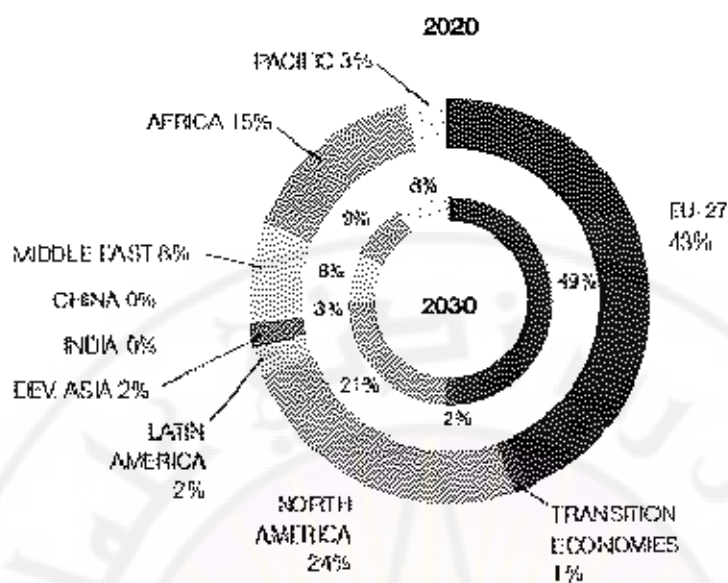
	2016	2020	2030	2050
Reference				
MW	4,065	7,271	12,765	18,018
TWh	1	22	40	60
Moderate				
MW	24,468	85,694	251,332	460,707
TWh	8	240	871	3,638
Advanced				
MW	28,419	84,336	342,361	1,524,172
TWh	110	365	1,400	7,878

جدول 4-11: التركيبات المتراكمة [MW] حسب الإقليم لأجل 2020

	EUROPE (EU 27)	TRANSITION ECONOMIES	NORTH AMERICA	LATIN AMERICA	MIDDLE EAST ASIA	INDIA	CHINA	MIDDLE EAST	AFRICA	PACIFIC
Advanced										
2020 (MW)	11,200	474	29,508	2,298	2,441	3,170	8,050	15,049	4,764	9,020
Moderate										
2020 (MW)	6,887	328	21,530	2,198	2,575	2,700	8,334	9,034	3,968	2,848
Reference										
2020 (MW)	3,365	100	1,724	121	0	30	30	012	1,113	475

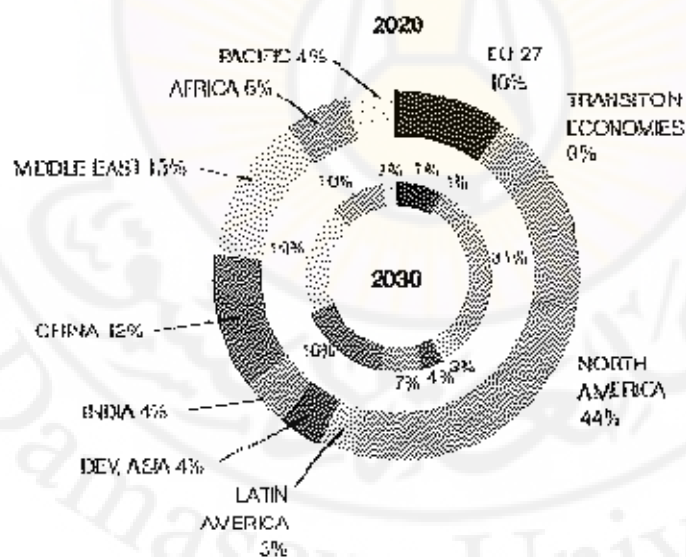
جدول 4-12: التركيبات المتراكمة [MW] حسب الإقليم لأجل 2030

	EUROPE (EU 27)	TRANSITION ECONOMIES	NORTH AMERICA	LATIN AMERICA	MIDDLE EAST ASIA	INDIA	CHINA	MIDDLE EAST	AFRICA	PACIFIC
Advanced										
2030 (MW)	40,312	2,027	106,806	12,452	9,655	21,451	44,410	50,393	31,238	17,500
Moderate										
2030 (MW)	17,813	1,730	70,940	8,034	8,986	15,815	37,461	43,457	22,736	8,034
Reference										
2030 (MW)	6,240	201	2,724	339	0	30	30	1,050	1,113	1,325



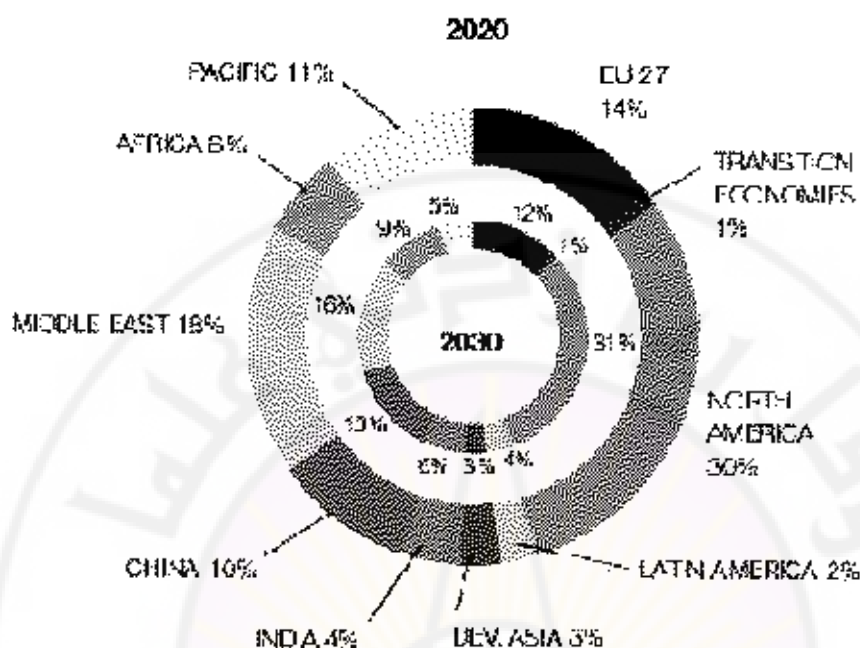
شكل 4-25: الحصص المئوية للتركيبات الإقليمية حسب السيناريو المتشائم

Reference



شكل 4-26: الحصص المئوية للتركيبات الإقليمية حسب السيناريو المتوسط

Moderate



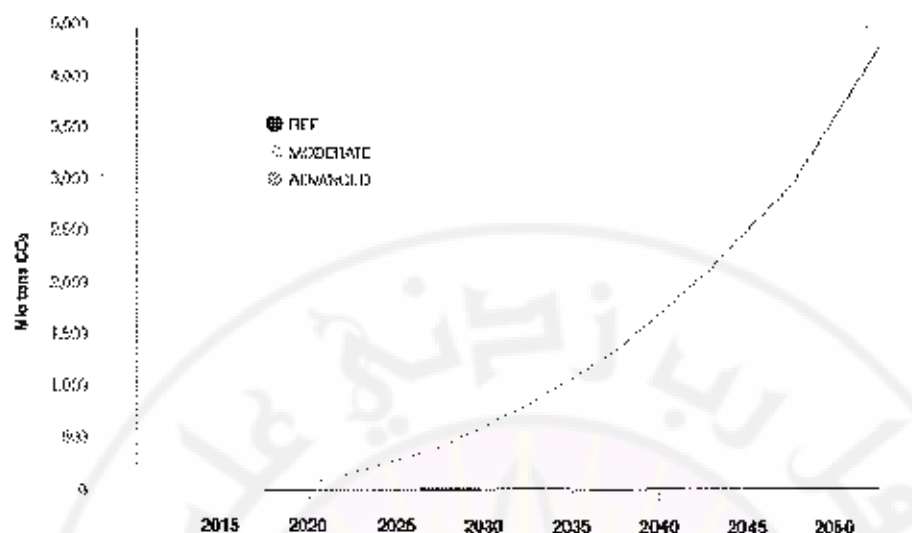
شكل 4-27: الحصص المئوية للتركيبات الإقليمية حسب السيناريوهات المتفائل
Advanced

جدول 4-13: أعداد فرص العمل لكل MW مركب حسب السيناريوهات الثلاثة

Year	REFERENCE		MODERATE		ADVANCED	
	Jobs Manufacturing & Installation (Job years)	Jobs O&E (Jobs/MW)	Jobs Manufacturing & Installation (Job years)	Jobs O&E (Jobs/MW)	Jobs Manufacturing & Installation (Job years)	Jobs O&E (Jobs/MW)
2005	10	1	10	1	10.70	1.00
2010	10	1	10	1	10.00	1.00
2015	10	1	10	1	8.32	0.80
2020	10	1	10	1	8.15	0.81
2030	9	1	10	1	8.10	0.77
2040	9	1	9	1	7.35	0.72
2050	8	1	9	1	7.20	0.66

جدول 4-14: نقصان CO₂ سنويا وتراكيميا جراء تركيبات CST

	ANNUAL CO ₂ REDUCTION (MIO TONS CO ₂)	CUMULATIVE CO ₂ REDUCTION (MIO TONS CO ₂)
Reference		
2010	3	0
2015	7	31
2020	13	82
2025	18	162
2030	24	267
2035	28	400
2040	33	552
2045	34	721
2050	40	901
Moderate		
2010	6	0
2015	49	143
2020	148	630
2025	302	1,814
2030	523	3,920
2035	774	7,270
2040	1,157	12,113
2045	1,549	19,060
2050	2,183	28,318
Advanced		
2010	27	70
2015	70	176
2020	213	887
2025	472	2,672
2030	900	6,189
2035	1,444	12,265
2040	2,219	21,659
2045	3,107	35,724
2050	4,727	55,250



شكل 4-28: وفورات انبعاث CO_2 حسب السيناريوهات الثلاثة

جدول 4-15: تكلفة التأسيس €/kW وعامل هبوط السعر (مثلاً، هبوط سعر 20% يكافئ $\text{PR} = 0.8$) حسب السيناريو

Year	BASIC CASE		MODERATE		ADVANCED	
	Progress ratio	Investment cost (Euro/kW)	Progress ratio	Investment cost (Euro/kW)	Progress ratio	Investment cost (Euro/kW)
2005	0.90	4,000	0.90	4,000	0.90	4,000
2010	0.85	3,800	0.80	3,800	0.80	3,800
2015	0.80	3,400	0.92	3,200	0.80	3,000
2020	0.91	3,000	0.90	2,850	0.89	2,700
2030	0.95	2,800	0.98	2,600	0.91	2,520
2040	0.96	2,600	0.98	2,470	0.91	2,340
2050	0.98	2,400	1.00	2,280	0.93	2,100

جدول 4-16: محطات CST العامة والمحطات قيد الإنشاء في منتصف 2009

Major solar thermal and CSP plants operating and under construction in mid-2009
(Status indicates U = operating; C = under construction/commissioning; P = proposed)

Occupied	Alghero: Request for tender	P	Through	220	220	2012
Pales line	Two solar thermal power plants, each with an installed capacity of between 20MW to 125MW and in the aggregate up to 220MW installed capacity.					
Morocco	Morocco ISOC Plant 2	C	Through	6	6	TBD
Morocco	Abi San Marh: ONE / Abengoa	C	ISOC/Through	470	20	TBD
Algeria	Hass Rime: Abengoa (GSR Funding) NEA issued a request for build-own-transfer bids to national and international investors for this 150-MW hybrid solar/gas power plant	C	ISOC/Through	150	20	2010
Egypt	Komahat: Iscar/Al-Fayed/ICO The first plant will be co-financed by a US\$100 million loan for US\$100 million. The project will be owned by NEA which will cover the local currency required for the project. GSR Funding	C	ISOC/Through	150	25	2010
Algeria	2 x ISOC plants: NEA Two plants of 400MW each, with 70 MW each of solar energy	P	ISOC/Through	800	140	2015
South Africa	Northern Cape Province: Eskom	P	Tower	100	150	TBD
Spain	Solar PS-10: Abengoa Located near Seville, the first Spanish CSP project to connect to the grid. The PS-10 project received US\$1 million from the European Union for its research programme. It will generate 24 GWh of solar electricity annually.	C	Tower	11	11	2008
Spain	Andasol 1-4: Abengoa	C	Dish Stirling	8 x 0.01	0.05	TBD
Spain	Andasol 1 & 2: Solar Millennium/AGS Cobra Two plants of 50 MW each	C	Through	100	100	2006/2008
Spain	Andasol 3: Solar Millennium 50 MW, 7.5 h storage	C	Through	50	50	2011
Spain	Andasol 4: Solar Millennium 50 MW, 7.5 h storage	C	Through	50	50	2011
Spain	PS-20: Abengoa Construction has already started and will be completed in 2009 at the same site as the PS-10, producing 4.8 GWh / annum.	C	Tower	20	20	2009
Spain	Solnova Redundant 1, 3 and 4: Abengoa Three 50 MW plants in construction with another two proposed. Solnova 1, 2, 3, 4 and 5 will produce 114.6 GWh / annum.	C	Through	150	150	2009-2010
Spain	Labrie: Sacyr, Solel (Valencia)	C	Through	50	50	2010/11
Spain	Andasol Ciudad Real: Ionindia Will produce 1.1 GWh per annum, over 25 years.	C	Through	40	40	2008
Spain	Andasol 1: Acciona	C	Through	50	50	2009
Spain	Palma de Rio 1 & 2: Acciona Two plants of 50 MW each, the second starts construction June 2009.	C	Through	100	100	2010
Spain	Andasol 1: Abengoa	C	Through	50	50	TBD
Spain	Andasol 1: AGS Cobra Two plants of 50 MW each	C	Through	100	100	2009/11
Spain	Andasol 1 & 2: AGS Cobra Two plants of 50 MW each	C	Through	100	100	2009/10/11
Spain	Genesolar (Solar Test): Sener, Masdar The first utility grade solar power plant with central tower and heliostats technology. It will generate about 100 MWh / a.	C	Tower	50	17	2008
Spain	Andasol 3: Solar Millennium	P	Through	50	50	2011
Greece	Solar capacity using steam cycle	P	Through	50	50	TBD
Germany	Solar Tower Jülich	C	Tower	1.5	1.5	2008

Country	Project Name / Description	Technology	Capacity (MW)	Capacity (MW)	Year	
USA	SEGS VI and VII: Luz / Solar Two plants of 80 MW each	O	Trough	160	160	1982/83
USA	SEGS II- VI: Luz / Solar Six plants of 80 MW each	O	Trough	160	160	1984-89
USA	SEGS I: Luz / Solar	O	Trough	13.6	13.6	1984
USA	Sequoia APS Plant: Solargenik	O	Trough	1	1	2006
USA	Nevada Solar One: Audena Construction started in 2005. Commercial operation will produce more than 130 GWh annually.	O	Trough	64	64	2007
USA	Kimberlin: Aures	O	LPF	5	5	2008
USA	Idaho Demonstration plant: Sopogy	O	Micro CSP	0.05	0.05	
USA	MySolar: Solar This plant would power 400,000 homes. A power purchase agreement was made in 2007.	P	Trough	558	558	2011
USA	Solar One, Phase 1: Soling Energy Systems (SES)	P	Dish-Engine	300	300	2009-2012
USA	Solar Two, Phase 1: SES Soling Energy Systems (SES) have secured a power purchase agreement with Southern California Edison Company for 500 MW of power from their Soling Engines, with expansion option to 600 MW.	P	Dish-Engine	600	600	2013-2016
USA	Solaris: Abengoa Located in Arizona, the developer has signed a contract with Arizona Public Service to build and operate.	P	Trough	280	280	2012
USA	Carlin (California): Aures The components of this installation are being manufactured at a purpose-built facility in the United States.	P	LPF	177	177	2010
USA	Harper Lake (California): NextEra	P	Trough	250	250	2011
USA	Beacon (California): NextEra	P	Trough	250	250	2011
USA	Inverness 1: BrightSource Energy	P	Tower	100	100	2010
USA	Inverness 2: BrightSource Energy	P	Tower	300	300	2012-2013
USA	California: BrightSource Power purchase agreement with PG&E	P	Tower	900	900	TBD
USA	California: BrightSource Power purchase Agreement with Southern California Edison	P	Tower	1900	1900	TBD
USA	Florida: Florida Power And Light, Aures	P	LPF	300	300	No date
USA	New Mexico: eSolar	P	Tower	105	105	2011
USA	Southern California: eSolar Power purchase agreement with SCE	P	Tower	140	140	2011
USA	College: Marlin Renewable	P	Trough	107	107	2011
USA	Next Generation Solar Center: NextEra	P	Trough sold on to ISCC	75	75	2011
USA	Solar Two, Phase 2: SES	P	Dish-Engine	800	800	2011
USA	Solar One, Phase 2: SES	P	Dish-Engine	300	300	2013-2014
USA	Nevada: Solar Millennium	P	Trough	250	250	2013/2014

Mexico	Hybrid Solar Thermal Plant: GDF Suez, contract not awarded	P	Trough	400	31	TBD
USA	California: Bethel Energy	P	Parabolic trough	100	100	TBD
USA	Palmate Hybrid: Inland Energy	P	Trough add-on to CSP	50	50	TBD
USA	Victorville Hybrid: Inland Energy	P	Trough add-on to CSP	50	50	TBD
China	China Plant Expansion: Solar Millennium	C	Trough		50	TBD
Australia	Littell Power Station: Ausra/Macquarie Generation	C	IPR	2000	2	2009
				550 MW		
				554 MW		
				7,453 MW		

8-4 مراجع الفصل الرابع

[1]	Hamzeh A.	Solar thermal systems for electricity generation, Rakka workshop on optimal utilization of energy and its resources in Syria, 27-28 April 2005, Rakka, Syria
[2]	Internet 2009	http://en.wikipedia.org
[3]	اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغربي آسيا (الإسكوا)	إمكانيات وأفاق توليد الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة في دول الإسكوا- الجزء الثاني: النظم الشمسية الحرارية، الأمم المتحدة 2001
[4]	Cédric Philibert	The present and future use of solar thermal energy as a primary source of energy, International Energy Agency, Paris, France
[5]	Richter C., Teske S.	Focused on solar power, Renewable Energy World Magazine, Vol. 12, No. 4, July-august 2009
[6]	Franz Trieb, Christoph Schillings	Global Potential of Concentrating Solar Power, SolarPaces Conference Berlin, September 2009
[7]	Editing Board	Deutschland Magazine, Vol. 5, 10/11 2009, pp. 32-37, Frankfurt, Germany
[8]	هيئة التحرير	"أوروبا تمتص شمس إفريقيا ب 400 مليار يورو"، الأخبار اللبنانية عدد 846، 17 حزيران 2009، ص 16، بيروت/لبنان
[9]	WWW.deserte	DESERTEC Foundation

	c.org	Initiative of the CLUB OF ROME Office Hamburg, Ferdinandstr. 28-30 D-20095 Hamburg, Germany
[10]	Greenpeace International, SolarPACES and ESTELA	Concentrating solar power global outlook 2009



الفصل الخامس

مفهوم طاقة الرياح

Wind Energy Understanding

1-5 مقدمة

بدأ استغلال طاقة الرياح وتحويلها إلى أشكال أخرى من الطاقة منذ آلاف السنين وعلى الأخص في دفع السفن الشراعية، ومنذ مئات السنين في ضخ المياه وطحن الحبوب. والشكل 1-5 يبين صورة لاثنتين من الطواحين الهوائية التي استخدمت منذ عام 1897 في الدنمرك لطحن الحبوب على مبيد المثال.



الشكل 1-5: طواحين هوائية قديمة مركبة في الدنمرك [10]

وفي بداية السبعينات من القرن الماضي بدأت مجموعات علمية في مناطق متعددة من العالم بالتفكير في استغلال طاقة الرياح لتوليد الكهرباء، مما استلزم عمل مسح عام

لطاقة الرياح المتاحة في مناطق مختلفة من العالم. ومن أشهر هذه الدراسات أطلس طاقة الرياح للولايات المتحدة الأمريكية الذي أنجزته مختبرات شمال غرب المحيط الهادي في الولايات المتحدة عام 1980 وأطلس رياح الدنمرك الذي وضعته مختبرات ريزو (RISO) الوطنية عام 1980. فضلا عن كثير من الدراسات الأخرى التي عنت بتحديد مواقع الاستفادة من طاقة الرياح مثل الأطلس المنشور عن كندا سنة 1984 وعن هولندا سنة 1986 وأطلس الرياح الأوروبي عام 1989 وعن مصر (أطلس رياح خليج السويس) عام 1996 وأطلس الرياح في سورية عام 1994.

وقد ازدهرت سوق العنفات الريحية wind turbines في الثمانينات من القرن الماضي وأنشئ الكثير من العنفات التجريبية في الولايات المتحدة وأوروبا. وصارت لها سوق واعدة لكنها كانت متعثرة في البداية. وقد آل العديد من مشاريع طاقة الرياح في ذلك الوقت إلى الفشل. و كان السبب الرئيسي لذلك في كثير من الحالات هو سوء اختيار موقع العنف، وعدم وجود تقديرات دقيقة لطاقة الرياح المتاحة أو ما يسمى كمون الرياح (wind potential) في المواقع المختارة.

وقد أدت تجارب طاقة الرياح الفاشلة والاعتبارات الاقتصادية الأخرى إلى تركيز الاهتمام على " تقدير طاقة الرياح المتاحة تقديرا دقيقا"، مما ساهم في ظهور منافسة كبيرة في التسعينات بين المؤسسات العلمية والصناعية من أجل تطوير نماذج حسابية نظرية وتطبيقات تجريبية وبرمجيات حاسوبية قادرة على هذا التقدير الدقيق لطاقة الرياح.

5-2 تشكل الرياح Wind Formation

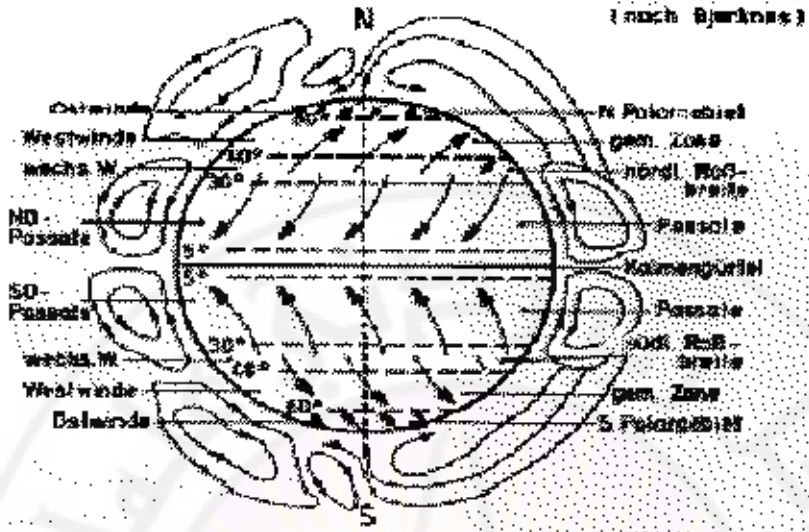
إن الرياح شكل من أشكال الطاقة الشمسية (حيث تقدر بحوالي 2% من طاقة الشمس المرسلة إلى الأرض). فضوء الشمس يسقط بكميات غير متساوية على مناطق الأرض المختلفة مما يجعل بعض أجزاء الجو أشد حرارة من الأجزاء الأخرى. وبما أن الهواء الدافئ أخف من الهواء البارد فإنه يصعد إلى طبقات الجو العليا ويحل محله الهواء

البارد مما يسبب تشكل الرياح. ويظهر ذلك جلياً أثناء حركة الرياح في الليل والنهار بالقرب من الشواطئ كما هو مبين في الشكل 5-2.



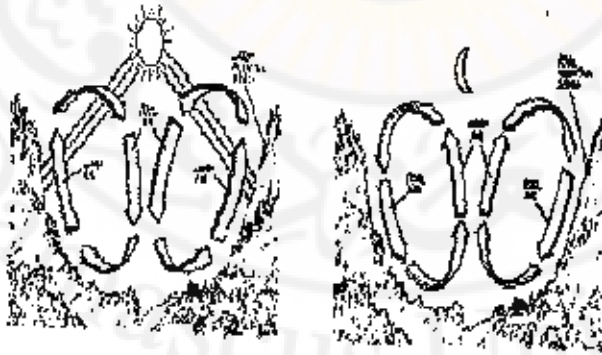
الشكل 5-2: حركة الرياح أثناء النهار والليل بجوار البحار والمحيطات [10]

وبشكل أكثر تفصيلاً فعندما تزداد سخونة الهواء على سطح الأرض يخف وزنه وبالتالي يقل ضغطه أي أن ضغط الهواء يتناسب عكساً مع زيادة حرارته. وبما أن مياه البحر والمحيطات تستطيع تخزين درجة الحرارة نجد أن الهواء يسخن في النهار على اليابسة أكثر من مياه البحر والمحيطات بينما يبرد بسرعة كبيرة خلال الليل مما يؤدي إلى اختلاف درجة حرارة الهواء بين النهار والليل وعلى اليابسة أو البحر وبالتالي اختلاف ضغطه مما يؤدي إلى حركة مستمرة في الهواء. هذه الحركة تزداد سرعتها تبعاً لطبيعة الأرض وحسب أيام السنة. وتختلف سرعات الرياح الوسطية من منطقة إلى أخرى وتتغير هذه السرعات باستمرار وبالتالي يمكن تصنيفها من السرعات الخفيفة حتى العواصف، ويبين الشكل 5-3 اتجاه حركة الهواء على سطح الأرض مع الوضع بالحساب دوران الأرض حول نفسها.



الشكل 5-3: اتجاه حركة الرياح على سطح الأرض [8]

والشكل 5-4 يبين حركة الرياح أثناء النهار والليل بجوار المناطق الجبلية والشكل 5-5 يبين صورة بالأشعة تحت الحمراء للأرض مأخوذة عن طريق القمر الصناعي NOAA-7 في شهر تموز 1984 ويوضح فرق درجات الحرارة بين خط الاستواء والقطبين الجنوبي والشمالي (المناطق الساخنة مبينة باللون الأحمر لأعلى درجات الحرارة ثم البرتقالي ثم الأصفر حيث درجات الحرارة الأقل في اتجاه القطبين).



الشكل 5-4: حركة الرياح أثناء النهار والليل بجوار المناطق الجبلية [8]



الشكل 5-5: صورة بالأشعة تحت الحمراء لفروق درجات الحرارة على الأرض [16]

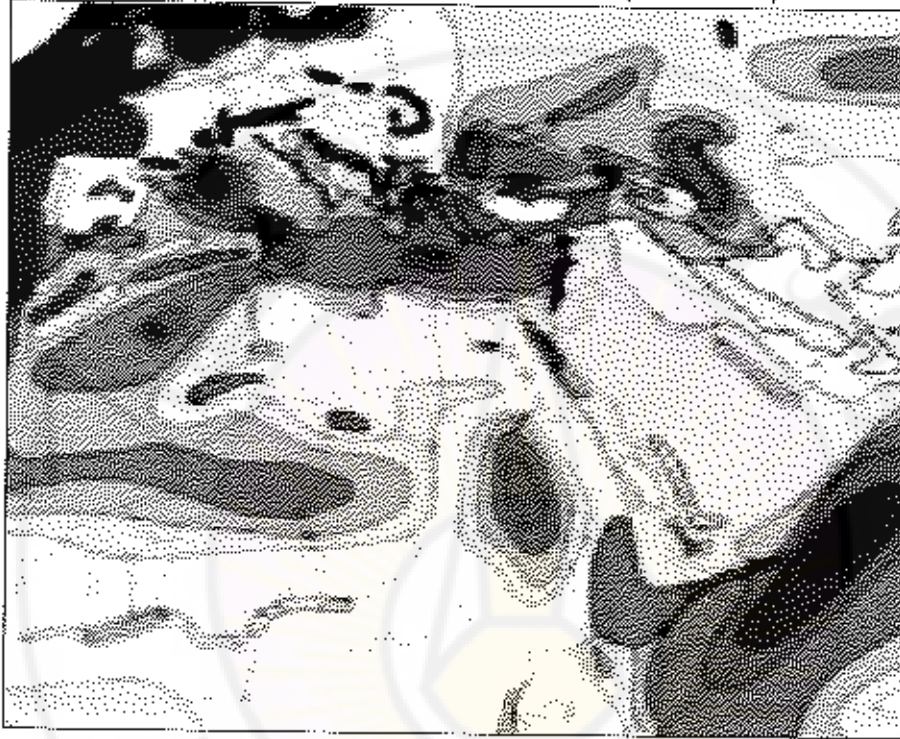
3-5 خارطة الرياح العالمية Global wind map:

من خلال الدراسات العالمية ورصد الأقمار الصناعية للرياح على كامل الكوكب تم إعداد خريطة الرياح العالمية والتي تبين أهم مواقع الرياح في العالم حيث يظهر من الصورة في الشكل 5-6 الجبهة الغربية لسورية والتي هي الحدود الشرقية للبحر الأبيض المتوسط (اللون الغامق) وهي تتمتع بأعلى مستويات سرعات الرياح والتي سوف تكون بمثابة مصدر ريحي لإنتاج الطاقة لا ينضب.

4-5 التجربة العالمية Global Experience

بعد عدد من المشاريع الرائدة التي نفذت في عدد من دول أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية خلال الثمانينات من القرن الماضي بدأت المشاريع الاستثمارية لتوليد الكهرباء على نطاق واسع عن طريق إنشاء العنفات والمزارع الريحية وذلك منذ بداية التسعينات، حيث أدت نتائج البحث والتطوير إلى قفزة نوعية في تطبيقاتها وازدادت استطاعة العنف الريحية من 300 ك.وات عام 1990 إلى 1500 ك.وات عام 2002

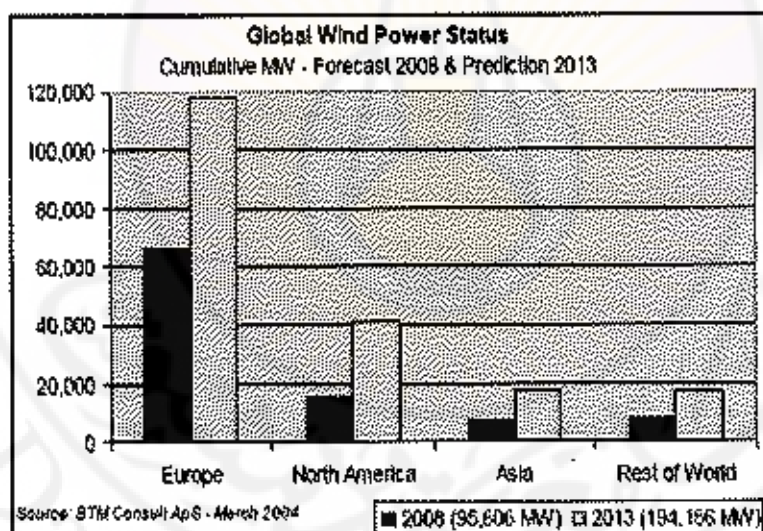
وذلك للعنف الواحدة وازداد ارتفاع الأبراج 30 متراً إلى أكثر من 100 متراً ومازال البحث والتطوير مستمراً حيث أصبحت الإمكانيات مؤمنة حالياً لتركييب عنفات باستطاعة 5000 ك.وات (5 ميغا وات) وخاصة على سواحل بحر الشمال والمحيط الأطلسي.



الشكل 5-6: خارطة الرياح العالمية لأوروبا والشرق الأوسط [15]

وكانت الدنمرك من أوائل وأهم الدول التي شجعت أبحاث طاقة الرياح منذ الثمانينات من القرن الماضي حيث حققت مختبرات ريزو لأبحاث الرياح نجاحات كبيرة في وضع الأسس التصميمية للعنفات الكهروريحية الحديثة و اختباراتها وخاصة ذات المحور الأفقي وهي الأكثر انتشاراً في العالم. وتحتل الدنمرك حالياً المرتبة الرابعة في العالم في إجمالي الاستطاعة المركبة والتي وصلت عام 2008 إلى أكثر من 6000 ميغاوات، بينما تحتل ألمانيا المرتبة الأولى حيث وصل مجموع الاستطاعة المركبة فيها عام 2008 إلى حوالي 25000 ميغاوات. أما إسبانيا فقد خطت خطوات واسعة في هذا المجال وتحديداً بعد عام 1997 حيث وصلت عام 2008 إلى 10000 ميغاوات وتحتل

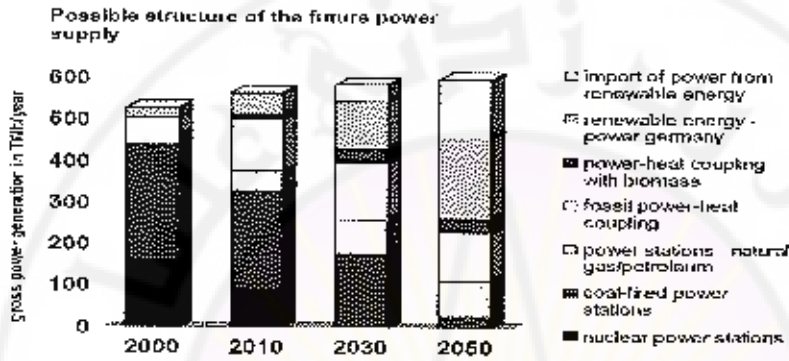
حاليا المرتبة الثانية. وتأتي الولايات المتحدة في المرتبة الثالثة حيث بلغ مجموع الاستطاعة المركبة عام 2008 وعلى الأخص في ولاية كاليفورنيا إلى 7000 ميغاوات. وفي هولندا إضافة إلى المزارع الريحية يمكن رؤية عدد كبير من العنفات الريحية الكبيرة المركبة بصورة افراكية ومربوطة مع شبكة التغذية الكهربائية في مناطق عديدة وأحيانا على جوانب الطرق الدولية فيها (الأنومستراذات) حيث وصلت الاستطاعة المركبة هناك إلى أكثر من 1000 ميغاوات. وفي الصين تم تركيب عنفات ريحية باستطاعة 1000 ميغاوات وفي الهند 2100 ميغاوات وفي بريطانيا 700 ميغاوات. وحسب قرار اللجنة الأوروبية لطاقة الرياح فمن المقرر أن تصل الاستطاعة المركبة في أوروبا عام 2013 إلى 120000 ميغاوات. يبين الشكل 5-7 مجموع الاستطاعة المركبة من العنفات الكهروريحية في أوروبا عام 2008 والمزمع تركيبها عام 2013 بالمقارنة مع مناطق أخرى من العالم، حيث تم تقدير هذه الاستطاعات عام 2004.



الشكل 5-7: مجموع الاستطاعة المركبة من العنفات الكهروريحية في أوروبا عام 2008 والمزمع تركيبها عام 2013 بالمقارنة مع مناطق أخرى من العالم [15].

والجدير بالذكر أن هذه التقديرات تم تجاوزها بالنسبة لعام 2008، وقد تم إقرار خطة جديدة لها حتى عام 2020.

ويبين الشكل 5-8 خطة ألمانيا على سبيل المثال لإنتاج القدرة الكهربائية من المصادر التقليدية والمتجددة عام 2050، بما في ذلك المصادر الأحفورية والنووية.



الشكل 5-8: خطة ألمانيا لإنتاج القدرة الكهربائية من المصادر التقليدية والمتجددة للطاقة حتى عام 2050 [15].

وقد تطورت تقنيات العنفات الريحية بعد عدد من المشاريع الرائدة والتطبيقات المختلفة، بحيث ازدادت استطاعة العنفة الريحية من 300 ك.وات في بداية التسعينات إلى 5000 كيلووات أو 5 ميغاوات للعنفة الواحدة، كما ذكرنا سابقاً، عام 2008. ومن المتوقع أن تصل إلى 10 ميغاوات خلال السنوات العشر القادمة.

و بعد تركيب عدد كبير من المزارع الريحية على اليابسة اتجهت أوروبا إلى تركيب عنفات ريحية باستطاعات كبيرة في عرض البحر (Off Shore) وبخاصة في منطقة بحر الشمال وعلى سواحل المحيط الأطلسي.

وتطورت تقنيات العنفات الريحية ونظم التحكم فيها والإنتاج الكبير في عدد من بلدان أوروبا وخاصة ألمانيا والدنمارك وإسبانيا، مما أدى إلى ظهور صناعة جديدة وضعت لها استثمارات كبيرة، وانخفضت تكاليف تركيبها وكلفة إنتاج الكيلو.وات الساعي

بشكل أصبحت تنافس المحطات الكهربائية الحرارية التقليدية، مما يدل على أن هذا الاتجاه أصبح راسخاً وأسس لمستقبل واعد.

ومن المفترض أن تساهم طاقة الرياح مع الطاقة الشمسية وطاقة الكتلة الحيوية في ميزان الطاقة في أوروبا على سبيل المثال إسهاماً يصل إلى 20% حتى عام 2020.

5-5 مصادر الرياح في سورية Wind Resources in Syria

5-5-1 أهمية استثمار طاقة الرياح: إن الاستثمار الأمثل لطاقة الرياح وإنشاء المزارع الريحية يتطلب معلومات وبيانات دقيقة عن سرعات الرياح في المواقع الواعدة والتي يتوقع إنشاء المحطات الكهروريحية فيها، كما أنه يتطلب معلومات عن درجات الحرارة والضغط الجوي واتجاه الريح السائدة على مدار السنة ، والتي يجب أن تسجل على ارتفاعين، أحدهما 10 متر والآخر يجب أن لا يقل عن 40 متر عن سطح الأرض ويمكن أن يصل إلى أكثر من مائة متر والذي يقارب مركز دوران العنفات الريحية متوسطة وكبيرة الاستطاعة من 800 إلى 3000 كيلو وات. ويتم ذلك عن طريق إنشاء محطات رصد ريحية في المواقع الواعدة وتحديث المعلومات الواردة في أطلس الرياح السوري وتطويرها بما يتلاءم مع تطلعات الدولة والقطاع الخاص على ضرورة الإسراع في استثمار طاقة الرياح وبالشكل الاقتصادي الأمثل.

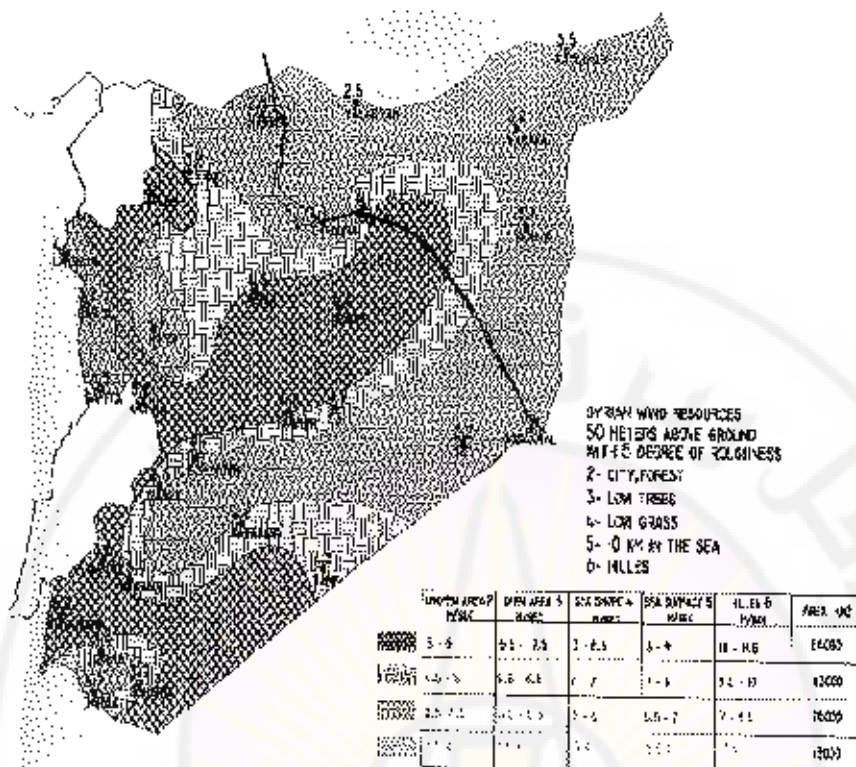
لقد تم الحصول على 20 محطة رصد ريحية متطورة من خلال التعاون مع الاتحاد الأوروبي ومن خلال المنحة المخصصة لدعم قطاع الكهرباء، وقسم المركز الوطني لبحوث الطاقة بتركيب هذه المحطات. ويقوم حالياً بسحب البيانات المسجلة في كل محطة، على ارتفاعي 10 و 40 متراً، وتخزينها في الحاسوب من أجل تحليلها واستخلاص البيانات بالشكل المقروء والاستفادة منها في تحديد مواقع العنفات المثلى والقدرة الكهربائية التي يتوقع الحصول عليها من المحطات بشكل دقيق.

لقد تم تركيب المحطات وتحديد مواقعها بالتعاون مع شركة Decon الألمانية الاستشارية والمتخصصة في هذا المجال. وقد تم اختيار عدد من المواقع من أصل 30 موقع محدد، وذلك حسب عدد المحطات المتوفرة. وهي مواقع السندانية وقطينة

وبرشين وصلنفة وحسياء والتياس وتدمر والسخنة وأثريا والثورة والتيم و إدلب والقنيطرة ونبل الحارة وجبل السويداء والهيجانة والنبك، والتي بمجملها تغطي أفضل المناطق الريحية الواعدة والتي يمكن أن تنشأ فيها مزارع ريفية ذات مردود اقتصادي عالي والتي يمكن أن يشارك في إنشائها واستثمارها القطاع العام والخاص وبالتعاون مع وزارة الكهرباء والمركز الوطني لبحوث الطاقة.

إننا لا ننتج كهرباء حالياً من طاقة الرياح الهائلة التي نملكها في سورية سوى 300000 كيلو وات ساعي سنوياً من عنة القنيطرة التي تم تركيبها عام 1994. لكن هناك بعض الخطط والخطوات الواعدة التي أنجزت في هذا السياق سنأتي على ذكرها لاحقاً.

2-5-5- أطلس الرياح Wind Atlas: بالاستفادة من منحة البرنامج الإنمائي للأمم المتحدة و من خبرة مخبر " ريزو " الدانمركي تم إنجاز أطلس للرياح باللغتين العربية والإنكليزية. ويحتوي أطلس الرياح معلومات عن سرعات الرياح مأخوذة من 60/ محطة رياح في القطر مركبة سابقاً، على ارتفاع 10 متر فقط، تغطي معظم المناطق المناخية في القطر . وهذه المعلومات تتضمن نتائج القياسات الريفية لمدة 10/ أعوام (1979-1989)، و يمكن اعتبار هذه المعلومات أساساً أولياً لتقدير الطاقة الريفية المتاحة للاستفادة منها في توليد الكهرباء . و وفقاً لهذا الأطلس تم إعداد خارطة الرياح في القطر العربي السوري كما يبين الشكل 5-9 حيث تم تقسيم القطر إلى 4/ مناطق ريفية ، تبلغ مساحة المنطقة الأولى و التي تتوفر فيها سرعة رياح مجدبة و تتراوح من 5 / إلى 11.5 م / ثا على ارتفاع افتراضي يعادل 50 متراً حوالي 54 ألف كم². وتبلغ مساحة منطقة الأمل الثانية حوالي 43000 كم² ومساحة المنطقة الثالثة حوالي 75000 كم² ومساحة المنطقة الرابعة حوالي 3000 كم². حيث يمكن اعتبار هذه المساحات كمناطق مرشحة للدراسات التفصيلية اللازمة لاستخدام طاقة الرياح في مجال توليد الكهرباء.



الشكل 5-9: خارطة الرياح في سورية [1]

3-5-5 توزيع المناطق الريحية Distribution of the windy areas :

إن صناعة تقنيات طاقة الرياح والطاقت المتجددة الأخرى هي في حالة بحث و تطوير مستمرين. ومع تقدم التكنولوجيا فإن كلفة الكيلو وات ساعي المولد من هذه الطاقة في حالة انخفاض ، مما يساهم في تقليل اعتمادنا على النفط القابل للنضوب مع مضي السنين، وأن توفر جزءا من مصادر الطاقة الأحفورية للأجيال القادمة. ومسئولنا البيئية فباستخدامنا لمصادر الطاقة النظيفة، كالشمس والرياح فإننا نحد من انتشار التلوث البيئي.

من خلال قراءة متأنية لخارطة الرياح في سوريا يمكن تقسيم الأجزاء الملائمة لاستثمار الرياح من الدرجة الأولى إلى خمس مناطق جغرافية. وهذه المناطق تمتلك

سرعة ومطية للرياح أكبر من 5 متر/ثانية على ارتفاع 10 متر عن سطح الأرض، وهي سرعة كافية لاستغلالها في توليد القدرة الكهربائية.

__ منطقة الجبال الساحلية:

وتمتد من إذلب وحتى غربي حماة وغربي مدينة حمص " شين '، وتمتلك هذه المناطق رياحاً جيدة ولكن امتداد السلاسل الجبلية و وجود الغابات والمناطق الزراعية (أشجار مثمرة) يحيق إنشاء المزارع الريحية فيها بالإضافة إلى ارتفاع ثمن الأرض.

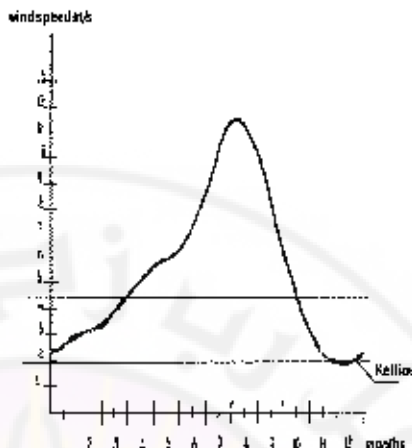
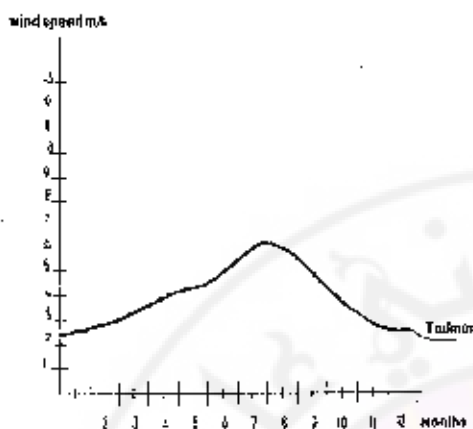
__ المنطقة الوسطى:

وتمتد من بحيرة قطينة وباتجاه الشرق حتى تدمر وإلى غربي دير الزور وشرقي الرقة ثم العودة مروراً بقرية الكروم وقرية اثريا حتى السلمية.

تمتاز هذه المنطقة باتساع المساحات الملائمة لإنشاء المزارع الريحية ورخص ثمن الأرض (أرض رعوية وصحراوية)، وتعتبر بحيرة قطينة (إضافة إلى موقع السندانية) من أفضل مناطق القطر لإنشاء مزارع ريحية على الرغم من كون الأراضي المحيطة زراعية وارتفاع ثمن الأرض فيها، إلا أن قربها من شبكة التوتر العالي ورياحها الجيدة تعوض ذلك.

وتأتي منطقة تدمر في المرتبة الثانية أهمية بعد بحيرة قطينة وموقع السندانية، وعلى الرغم من بعد الشبكة الكهربائية عنها فإنها تمتلك أراضي شاسعة رخيصة الثمن. والمنحني في الشكل 5~10 يوضح معدل سرعة الرياح خلال أشهر السنة وهو يشبه منحنى التوزيع لمنطقة قطينة مع انخفاض في معدل السرعة عن 12م/ثا عند الذروة في شهري تموز وأب.

ومن المناطق الملائمة لإنشاء مزارع ريحية في المنطقة الوسطى منطقة اثريا وتقع إلى الشمال الشرقي من السلمية بحوالي 100 كم على الطريق الرئيسية المؤدية إلى مدينة الثورة. أما منطقة الكوم (جنوبي مدينة الرقة بحوالي 100 كم) فهي تمتلك رياح جيدة ويمكن استثمارها إلا أن عدم وجود طريق رئيسية قريبة منها في الوقت الحاضر يضعها في المرتبة التالية بعد المناطق المذكورة أعلاه.



الشكل 5-10: متحنيات معدل سرعة الرياح خلال أشهر السنة

في المنطقة الوسطى (تدمر) [12]

- المنطقة المحيطة بالطريق الدولية (حمص - دمشق):

على الرغم من انخفاض معدل سرعة الرياح في هذه المنطقة (5-6 متر على الثانية على ارتفاع 50 م) إلا أنها تمتاز بعدة ميزات هامة:

- وقوعها بالقرب من الطريق الدولية حمص - دمشق

- وقوعها بالقرب من خط التوتر العالي (سهولة الربط بشبكة جيدة)

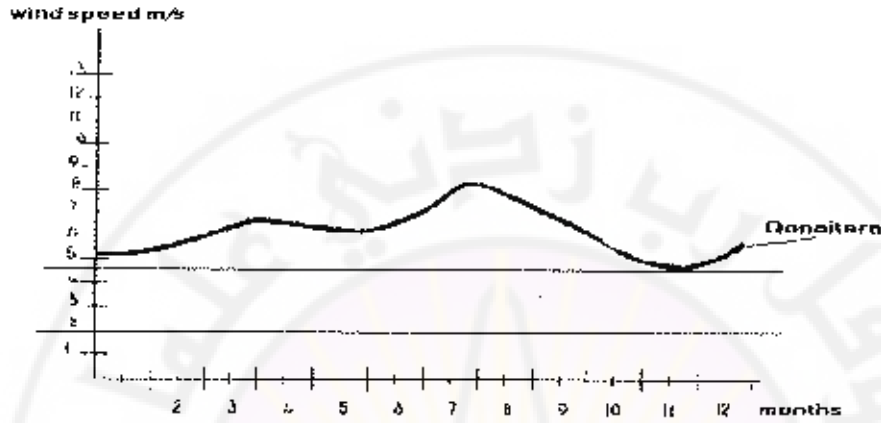
- رخص الأراضي واتساعها (أراضي رعوية)

- المنطقة الجنوبية الغربية:

تمتد من جنوب مدينة دمشق وحتى مدينة القنيطرة ومرتفعات الجولان وتتميز هذه المنطقة بمعدل سرعة رياح أعلى من 5 كم/ثا على مدار العام كما يظهر في الشكل 5-11 وبالقرب من مدينة القنيطرة (شمالي مدينة البعث) تم إنشاء أول عفة ريحية في القطر بامتطاعة 150 كيلو واط عام 1994 .

- المنطقة الجنوبية الشرقية: وتمتد من مطار دمشق الدولي حتى سبع بيار والتنف ونزولاً إلى أقصى الجنوب على حدود الأردن، تمتلك هذه المنطقة رياح جيدة إلا أن

بعدها عن شبكات الطرق العامة والشبكة الكهربائية يضعف من أهميتها في الوقت الحاضر.



الشكل 5-11: منحنى معدل سرعة الرياح على مدار العام في

المنطقة الجنوبية الغربية [12]

ومن خلال عملية المسح السابقة للمناطق الريحية في القطر نلاحظ أن المناطق الملائمة في الوقت الحاضر لإقامة مزارع ريحية كمرحلة أولى وبجدوى اقتصادية هي:

- منطقة قطينة وموقع السندية.
- محافظة القنيطرة.
- منطقة تكمر ومحيطها.
- منطقة أثريا ومحيطها.
- المنطقة المحيطة باتوستراد حمص - باتجاه دمشق حتى موقع المدينة الصناعية بحسياء.
- محافظة درعا وبخاصة منطقة الحدود السورية الأردنية.

وقد تم اختيار هذه المناطق للاعتبارات التالية:

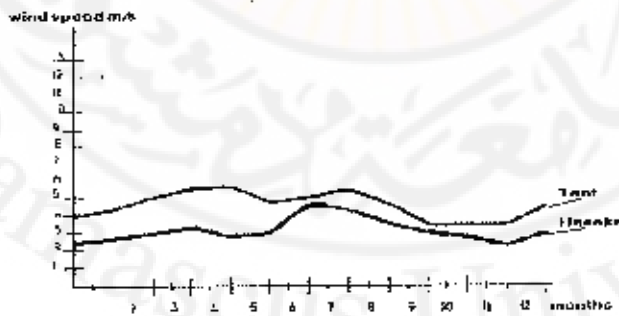
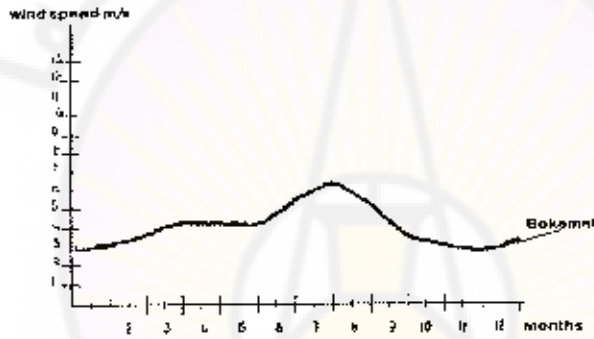
- ... امتلاك مصادر رياح جيدة.
- ... رخص الأراضي اللازمة لإنشاء المزرعة الريحية وإمكانية التوسع.

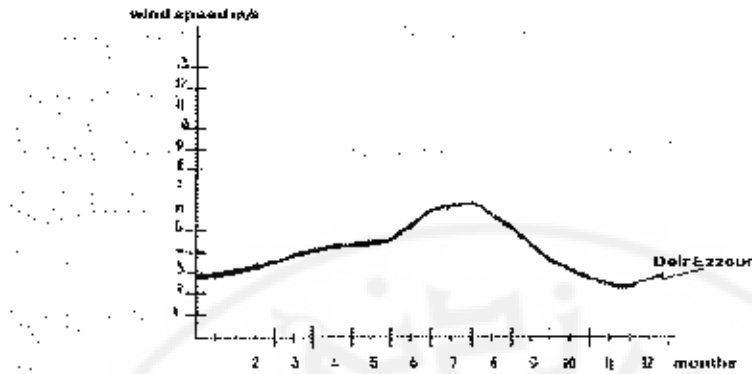
- قريبا من شبكة التوزيع العالي أو المتوسط.

- قريبا من شبكات الطرق العامة.

كما أنه يمكن استثمار طاقة الرياح في مناطق عديدة من القطر لأغراض ضخ المياه عن طريق العنفات الريحية الإفرادية وهي تكون عادة مستقلة عن الشبكة الكهربائية العامة.

ونلاحظ في الشكل 5-12 من منحنيات معدل السرعة خلال أشهر العام لمناساطق مثل الحسكة _ دير الزور _ النتف _ البوكمال _ ارتفاع معدل السرعة خلال موسم السقاية صيفاً مما يلاءم استخدام العنفات لضخ المياه على سبيل المثال كما في الأشكال التالية:





الشكل 5-12: منحنيات معدل السرعة خلال أشهر العام لمناطق مثل الحسكة _ دير الزور _ التنف _ البوكمال [12]

5-6 الأسباب الموجبة إلى استثمار طاقة الرياح:

5-6-1- مصادر الطاقة في سورية Energy Resources in Syria:

لا زال النفط والغاز الطبيعي يشكلان المصدرين الأساسيين للطاقة المستثمرة في سورية حتى الآن ويقدر الاحتياطي الجيولوجي للنفط الخام بحوالي 3813 مليون متر مكعب والاحتياطي القابل للإنتاج بحوالي 1071 مليون متر مكعب والاحتياطي المتبقي القابل للإنتاج بحوالي 428 مليون م³ أما الاحتياطي الجيولوجي للغاز الطبيعي بكافة أنواعه فيقدر بحوالي 680 مليار متر مكعب والاحتياطي القابل للإنتاج بحوالي 300 مليار متر مكعب، وهناك جهود حثيثة لتنفيذ خطط رفع أرقام الاحتياطي المؤكد لكل من النفط الخام والغاز الطبيعي، ووضع الحقول المكتشفة في الإنتاج والجدول 5-1 يبين تطور إنتاج النفط الخام والغاز الطبيعي الفعلي والمتوقع خلال الفترة 2000 - 2010.

الجدول 5-1 تطور إنتاج النفط الخام والغاز الطبيعي الفعلي والمتوقع خلال الفترة

[3] 2010 ~ 2000

الإنتاج	السنة الحام	نفط خام		الغاز الطبيعي		غاز طبيعي / ألف م ³	
		ألف برميل	متر مكعب	ألف برميل	متر مكعب	متر مكعب	ألف م ³
2000	2000	58016	131102	189118	5030720	1970632	7001352
	2001	574394	126721	184160	5034761	1888035	6922796

6417290	1500031	4917259	182256	121927	60329	2002	3 2002-2010
6567730	1969029	4598701	175015	113381	61634	2003	
5934696	1883015	4051681	161784	99841	61943	2004	
5466932	1821690	3645242	152649	89208	63441	2005	
-	-	-	139299	71802	67497	2006	
-	-	-	137417	62514	74903	2007	
-	-	-	128350	51144	77206	2008	
-	-	-	119153	40698	78455	2009	
-	-	-	111666	32269	79397	2010	

ويعتمد إنتاج الطاقة الكهربائية بشكل رئيسي على مصادر الوقود التقليدية النفط و الغاز و قد ازداد دور الغاز في إنتاج الطاقة الكهربائية حيث بلغت نسبة الطاقة الكهربائية المنتجة في عام 2004 باستخدام الغاز حوالي 44 % و يبين الجدول 5-2 تطور الطلب على الوقود خلال الفترة 1990 - 2004 الوحدة ألف ط م ن.

الجدول 5-2: يبين تطور الطلب على الوقود خلال الفترة 1990-2004

لوحة ألف ط م ن [3].

1997	1996	1995	1994	1993	1992	1991	1990	البيانات
1304	1249	1511	1926	1796	1897	1878	1812	الوقود الثقل
2297	2088	1768	952	704	495	425	349	الغاز الطبيعي
16	12	14	114	241	253	174	161	المحاروت
3617	3349	3294	2991	2741	2645	2478	2322	المجموع

2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998	البيانات
2972	2399	2282	2814	2644	2284	1506	الوقود الثقل
3037	3355	3315	2680	2479	2312	2429	الغاز الطبيعي
11	3	8	6	11	11	8	المحاروت
6019	5757	5605	5501	5134	4607	3943	المجموع

5-6-2 لمحة تاريخية عن استثمار طاقة الرياح في سورية

يعود استثمار طاقة الرياح في سورية إلى بداية عقد الخمسينات من القرن الماضي حيث نقل بعض المغتربين السوريين العائدين من أمريكا الجنوبية تقانة المراوح الريحية الميكانيكية متعددة الشفرات لضخ المياه ، و تم تصنيع ما يقارب الـ /4000/ مروحة في ورش صغيرة ، وجرى تركيبها في منطقتي حمص و القلمون، و عملت هذه المراوح بنجاح لسنوات عديدة قبل أن يتوقف معظمها عن العمل بسبب ندرة المياه الجوفية.

- في عام 1979 أنشأت وزارة الكهرباء محطة ريحية / شمسية في عدرا بقدره /2/ كيلو وات منها /1/ كيلو وات عنفة ريحية موصلة مع مولد يعمل على توتر 220 / 280 فولت و محول خافض للتوتر إلى /24/ فولت لتغذية البطاريات . و قد تم نقل هذا المشروع إلى كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية بجامعة دمشق لتدريب الطلبة.

- في عام 1984 أصدرت مديرية البحوث في وزارة الكهرباء تقويم أولي لطاقة الرياح في سوريا بالتعاون مع البرنامج الإنمائي للأمم المتحدة .

- في عام 1994 تم إصدار أطلس الرياح، كما ذكرنا سابقا، باللغتين العربية و الإنكليزية ، وذلك بالاستفادة من خبرة مخبر " ريزو " الدانمركي ضمن منحة البرنامج الإنمائي للأمم المتحدة بالتعاون مع الأرصاد الجوية و الجهات المعنية في القطر.

- في عام 1994 تم تركيب مجموعة توليد كهربائية ريحية باستطاعة /150/ كيلووات في مدينة البعث (محافظة القنيطرة) كما ذكرنا و ربطها بالشبكة العامة.

- تم إعداد دراسة الجدوى الاقتصادية الفنية لإنشاء مزرعة ريحية في محافظة حمص (موقع المنديانة) تتألف من عشرة وحدات ريحية باستطاعة /500/ كيلووات لكل منها أي استطاعة إجمالية /5/ ميغا وات بالاشتراك مع مخبر " ريزو " الدانمرك و بالتعاون مع المديرية العامة للأرصاد الجوية.

- تمويل من البرنامج الإنمائي للأمم المتحدة و بالتعاون مع قسم الشؤون الاقتصادية و الاجتماعية للأمم المتحدة قامت وزارة الكهرباء بإعداد دراسة المخطط العام لتنمية و تطوير استخدامات الطاقات المتجددة في سورية لغاية عام 2012.
 - ضمن منحة المجموعة الأوروبية المخصصة لقطاع الكهرباء ، تم لحظ مبلغ /450/ ألف يورو لتزويد /20/ محطة قياس متطورة في مواقع مختلفة في القطر كما ذكرنا سابقا لتحديد أفضل المواقع الملائمة فنياً و اقتصادياً لإنشاء مزارع ريحية في القطر .
 - تشارك وزارة الكهرباء في الآلية الإقليمية لتنمية استخدام الطاقة المتجددة في قسم الطاقة بالاسكوا (اللجنة الاقتصادية و الاجتماعية لغربي آسيا) و التي تهدف إلى تنمية و تطوير التعاون بين دول الاسكوا.
 - تم إعداد دفاتر الشروط الفنية لكهربة قرية الكوم في بادية حمص و قرية الفاسدة في بادية حماه باستخدام طاقة الرياح و قد أدرجت هذه المشاريع ضمن خطط المؤسسة العامة لتوزيع القدرة الكهربائية.
 - في عام 1990 تم تأسيس شركة خاصة باسم شركة النظم الطليعية تقوم بتصنيع عنفات ريحية لأغراض توليد الكهرباء وضخ المياه باستطاعات تتراوح ما بين /150/ وات إلى /50/ كيلو وات . وقد بلغ مجموع الاستطاعات المركبة من قبل هذه الشركة /750/ كيلو وات (لصالح وزارة الري و وزارة الزراعة) . كما قسم مركز الدراسات و البحوث العلمية بتصميم و تنفيذ مشروعين ريحيين، الأولي صغيرة باستطاعة 100 وات لشحن مدخرة، و الثانية ميكانيكية متعددة الشفرات لضخ المياه من عمق /100/ م و هي باستطاعة /5/ كيلو وات.
- 5-3 مزايا ومساوئ استثمار طاقة الرياح في سورية

المزايا:

- مصدر طاقة متوفر في عدد من مناطق سورية.
- مصدر دائم ونظيف بيئياً وبلا ثمن.

- أسعار الاستطاعة المركبة والقدرة المنتجة بانخفاض مع الزمن.
 - التقنيات والتجربة العالمية تحسنت كثيراً.
 - الزيادة المضطردة للاستطاعات، حيث وصلت إلى 5000 - 6000 ك. و.ات للعنفة الواحدة، مع ظهور مشاريع رائدة باستخدام المواد ذات النفاذية العالية وباستطاعات يمكن أن تصل إلى 10000 كيلووات للعنفة الواحدة.
 - إمكانية جذب كبيرة لإنشاء مزارع ريفية باستطاعات تجاري محطات التوليد الكهربائية التقليدية.
 - إتاحة الفرصة لمساهمة القطاع الخاص.
 - إمكانيات التصنيع المحلي في المستقبل.
 - إعداد الكادرات الهندسية والفنية المحلية، مثال جامعة دمشق.
- العيوب أو المساوي:**
- عدم توفر الرياح بشكل دائم على مدار العام حوالي 4000 ساعة.
 - تغيرات الرياح باستمرار وبالتالي تغيرات القدرة المنتجة.
 - صعوبات فنية تواجه مسائل وصل وفصل العنفات مع الشبكة العامة.
 - مسائل الصنعيح.
 - الكلفة العالية نسبياً بالمقارنة مع المحطات الكهربائية التقليدية.
 - صعوبات الاستثمار والصيانة والتشغيل في المراحل الأولى للتركيب.
 - دورها في ميزان التوليد الكهربائي على مستوى القطر محدود على المدى المنظور.
 - الإمكانيات المحلية لتأمين روافع وإنشاء بنية تحتية مازالت محدودة.
 - الآثار الجانبية على مسار هجرة الطيور. والبعض يراها ملوثة بصرياً.
 - خريطة وأطلس الرياح في سورية لا يقدمان معلومات دقيقة ويحتاج الأمر للمزيد من التطوير.

وكي لا نفع في التضليل بالاستناد إلى هذه المساوئ والذي يمكن أن يعتمد البعض بحجة عدم جدوى التوجه إلى استثمار هذا المصدر من مصادر الطاقة لتوليد القدرة الكهربائية يتوجب علينا توضيح ما يلي:

1- نظراً لإمكانية نضوب مصادر الطاقة الأحفورية ومنها النفط على وجه الخصوص مع الزمن فإن مصادر الطاقة المتجددة وبالأخص الشمس والرياح وبسبب عدم توفرهما على مدار الساعة وتغير قيمهما باستمرار أصبحت الآن السبيل المشاغل لاستغلالها في كل أنحاء العالم. ولا يمكن بحال من الأحوال تجاهلها أو انتظار الوقت الذي ستفرض ثقافتها علينا. وقد أكدت الدراسات التي شاركنا في إعدادها أن تأخرنا في استغلال طاقة الرياح حتى الآن سبب في هدر مبالغ طائلة نصرفها في توفير الوقود اللازم لتوليد القدرة الكهربائية من محطات التوليد التقليدية. فكل كيلو وات ساعي تنتجه هذه المحطات يحتاج إلى حرق حوالي 240 غرام مكافئ نفط. وعلى سبيل المثال فإن عتفة ربحية واحدة باستطاعة 5 ميغا وات ، كما سنبين في الفصل الثامن، تستطيع إنتاج حوالي 17 مليون كيلو وات ساعي سنوياً، مما يوفر حرق حوالي 4080 طن مكافئ نفط.

2- صحيح أن سرعات الرياح متغيرة، وكذلك شدة الإشعاع الشمسي، وبالتالي يصعب مقارنة إنتاج الكهرباء منها بالمقارنة مع المصادر التقليدية إلا أن استراتيجية استغلال الرياح والشمس يجب أن تبنى على أساس ضخ القدرة الكهربائية المنتجة في منظومة القدرة الكهربائية في أي وقت تكون فيه سرعات الرياح أو شدة الإشعاع الشمسي كافية لإنتاج القدرة الكهربائية. ومن هنا نؤكد أن النظر إلى الرياح والشمس كمصادر بديلة أو أنها ستحل محل المصادر التقليدية يعتبر خاطئاً وإنما يجب النظر لمصادر الطاقة المتجددة فقط كدرف للمصادر التقليدية.

3- تخطط بلدان الاتحاد الأوروبي وعدد من بلدان العالم ومنها مصر والمغرب للوصول إلى نسبة إسهام مصادر الطاقة المتجددة في توليد القدرة الكهربائية تعادل 20% من مجموع إنتاج القدرة الكهربائية عام 2020.

4- لقد قامت بلدان العالم التي بدأت باستغلال طاقة الرياح بوضع تشريعها السلازم للأسس والمعايير الفنية والاقتصادية وسياسات الاستثمار والتمويل و التمتعير وشراء القدرة الكهربائية من المستثمرين المحليين والأجانب. لذلك لا يمكن إتاحة فرص الاستثمار في هذا المجال إلا إذا قامت وزارة الكهرباء بوضع مثل هذا التشريع وهذا الامر يعتبر بنظرنا من أهم أسباب تأخرنا في استغلال طاقة الرياح وغيرها من مصادر الطاقة التقليدية في سورية حتى تاريخه.

5-7 مراجع الفصل الخامس

- [1] أطلس الرياح، مديرية الأرصاد الجوية، دمشق 1994.
- [2] التقرير السنوي لوزارة الكهرباء في سورية، دمشق 2003.
- [3] م.سفيان العللو - الطاقة الكهربائية في الجمهورية العربية السورية. الندوة العلمية حول كفاءة الطاقة الكهربائية، وزارة الكهرباء، دمشق 2003.
- [4] د.أنهار حجازي مصادر الطاقة المتجددة في دول الإيسكوا. اجتماع خبراء الإيسكوا، بيروت 2003.
- [5] د.إبراهيم حداد الثروة البترولية في سورية حاضراً ومستقبلاً. ندوة الثلاثاء الاقتصادية، دمشق 2004.
- [6] وثائق هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة في جمهورية مصر العربية. القاهرة - الزعفرانة، 2003 - 2004.
- [7] د.كمال ناجي د.علي حمزة أداء العنفة الربحية الأولى الموصولة للشبكة العامة في سورية، مجلة جامعة دمشق، دمشق 1998.
- [8] د. كمال ناجي :طاقة الرياح ودورها في توليد الطاقة الكهربائية حاضراً ومستقبلاً حلقة الحوار حول مستقبل الطاقة وبدائلها في القرن الحادي والعشرين . بانياس- سورية 1999.
- [9] د.كمال ناجي آفاق استثمار طاقة الرياح في سورية - ورشة العمل حول ترشيد استهلاك الطاقة و استخدام الطاقة المتجددة. حمص- سورية 2006.

[10] د.كمال ناجي: مشاريع تخرج في كلية الهندسة الكهربائية و الميكانيكية. 2005-2009.

[11] محاضرات في طاقة الرياح (1) للدكتور كمال ناجي ، كلية م.م.ك. 2009.

[12] م.معن كعدان تقانات الطاقة المتجددة ودورها في الحفاظ على البيئة – حلقة حوار حول التقانات النظيفة في مجال السلامة و البيئة – باناس 2003.

[13] Renewable Energy World-VOL.5 NO 3 .2002.

[14] Master plan of Renewable Energy in Syria
Ministry of Electricity -UNDP-UNDESA Damascus 2002.

[15] Kamal Naji - Technical Fundamentals of Generating Electricity
by Wind_Energy. Study During Visiting Scholarship at
Wisconsin- Madison University – USA .(1984).

[16] www.german-renewable-energy.com

[17] www.windtest-nrw.de



تقديرات الرياح Wind Assessments

1-6 قياس سرعة الرياح Wind Measurement

إن الاختيار المناسب للموقع يتطلب معرفة دقيقة بالشروط الريحية السائدة كعامل هام وأساسي. وتجر الإشارة أن الطاقة الكهربائية المنتجة من الرياح تتعلق بشكل رئيسي بمكعب سرعة الرياح كما سنبين لاحقاً. كما أن طبيعة الأرض، استناداً إلى ما يسمى علم الجبال (Orography) و خشونة السطح (Roughness) والعوائق (الحواجز) بالقرب من الموقع، التي يمكن أن تؤدي إلى ما يسمى الاضطراب الميكانيكي (Mechanical turbulence) وكثافة الهواء ودرجة الحرارة ومعدل سطوع الشمس تحد من حركة وممار وفوة الرياح ويمكن أن تشكل ما يسمى الاضطراب الحراري (Thermal Turbulence). إضافة لذلك يمكن إدخال عوامل أخرى مثل زمن الاستهلاك والتكلفة. ومن الواجب الوضع في الحسبان التغيرات الموسمية (الفصلية) عند أخذ القياسات الدورية وكذلك التباين في مناسيب وارتفاعات أبراج القياس.

مما سبق يمكن حساب تأثير المتوسط السنوي أو المعدل السنوي لسرعة الرياح على إنتاج الطاقة. وكذلك على كلفة الطاقة المولدة من الرياح وبالتالي على دراسة الجدوى الاقتصادية. مما يستلزم تحري الدقة في قياسات سرعة الرياح واختيار أماكن وضع أبراج القياس وارتفاعاتها، بحيث تكون بعيدة عن العوائق وعلى ارتفاع مناسب من سطح الأرض (ويفضل أن يكون نفس ارتفاع العنفة الريحية المزمع تركيبها في الموقع).

1-1-6 أجهزة قياس سرعة الرياح:

لإجراء عملية قياس سرعة الرياح يستخدم العديد من الأجهزة منها:

الانيمومتر ذو المغارف (Cup Anemometer) الذي يسجل عدد اللفات إلكترونياً ويحولها إلى سرعة الرياح (m/s). ويوجد أنواع أخرى من الانيمومتر مثل انيمومتر الضغط والانيمومتر المروحي (propeller Anemometer) والليزري (Laser) والموجات فوق الصوتية (ultra sonic) وانيمومتر السلك الساخن (Hot-wire Anemometer). وتستخدم ريشة ذات الذيل الريحي (Wind Vane) لتحديد الاتجاه، ويتم القياس خلال دورة كاملة (360 درجة)، والغرض من قياس الاتجاه هو معرفة الاتجاه السائد للرياح وكذلك توزيع السرعات المقاسة على الاتجاهات المختلفة ويؤخذ هذا في الاعتبار عند تحليل البيانات وتخطيط مزارع الرياح. والشكل 6-1 يبين نماذج من أجهزة قياس سرعة الرياح.

يجب أن تكون الأجهزة المستخدمة في قياسات الرياح على درجة عالية من الدقة وتتوفر فيها كذلك سرعة رد الفعل. وهنا يجب التنويه إلى أنه في الأرصاد الجوية لا تقاس الرياح لمعرفة تقديرات الطاقة ولكن لأغراض أخرى مثل التوقعات الجوية وأحوال الطقس، لذلك يكون استخدام هذه البيانات في تقدير مصادر الرياح بصفة استرشادية. وتكون هذه التقديرات كمؤشر لحصر المناطق الواعدة وأساساً لعمل قياسات أكثر دقة.

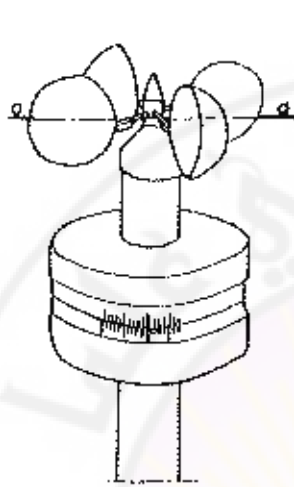
إن أنسب الطرق لقياس سرعة الرياح في موقع ما هو وضع الانيمومتر أعلى برج القياس حتى لا يتأثر الانيمومتر بالبرج. ويفضل أن يكون ارتفاع البرج نفس ارتفاع العنفة المزمع تركيبها.

وكمثال على ذلك يتم قياس سرعة الرياح في الشكل 6-2 على ارتفاعات مختلفة (10، 25، 47.5) متر، واتجاه الرياح على ارتفاع 45 متر، بالإضافة إلى قياس الضغط الجوي ودرجة الحرارة، ويتم تسجيل البيانات كل عشر دقائق، وتخزن في ملف بذاكرة الحاسوب.

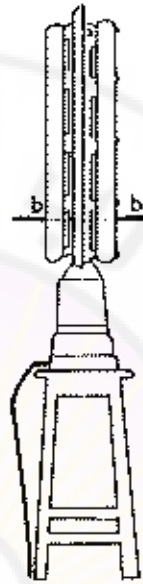
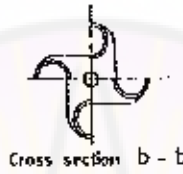
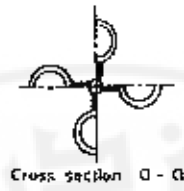
بعد تجميع بيانات سنة كاملة على الأقل يتم تحليل البيانات ويستنتج منها ما يلي:

- رسم وردة الرياح (Wind Rose).

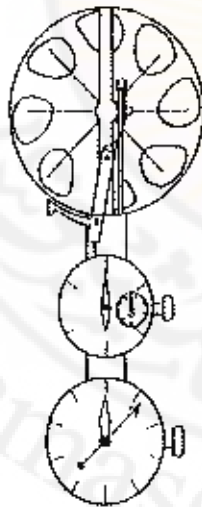
- حساب المتوسط السنوي لسرعة الرياح.
- حساب تغير سرعة الرياح خلال ساعات اليوم.



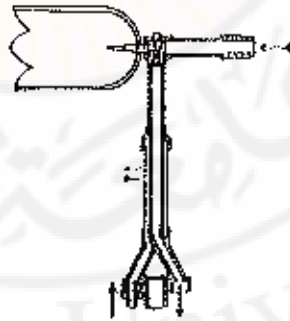
Robinson hand anemometer.



- Ailfert - C&C anemometer.



Jules Richard anemometer.



- Dines anemometer.

الشكل 6-1: نماذج من أجهزة قياس سرعة الرياح [12]

- حساب تغير سرعة الرياح خلال ساعات اليوم موسمياً وسنوياً.

- حساب المتوسطات الشهرية.

- حساب التوزيع التكراري لسرعات الرياح خلال السنة.

ومن المفيد التذكير هنا بأن المعطيات المطلوبة لإنشاء المحطة الريحية تتطلب بيانات عتقين من الزمن وصولاً لنتائج مؤكدة. إلا أن الحصول على بيانات عام واحد يعطي مؤشراً كافياً من حيث المبدأ.

أما الحساسات أو المجسات والأجهزة المستخدمة في قياس الرياح في العنفة الريحية فهي:

- جهاز قياس سرعة الرياح (Anemometer):

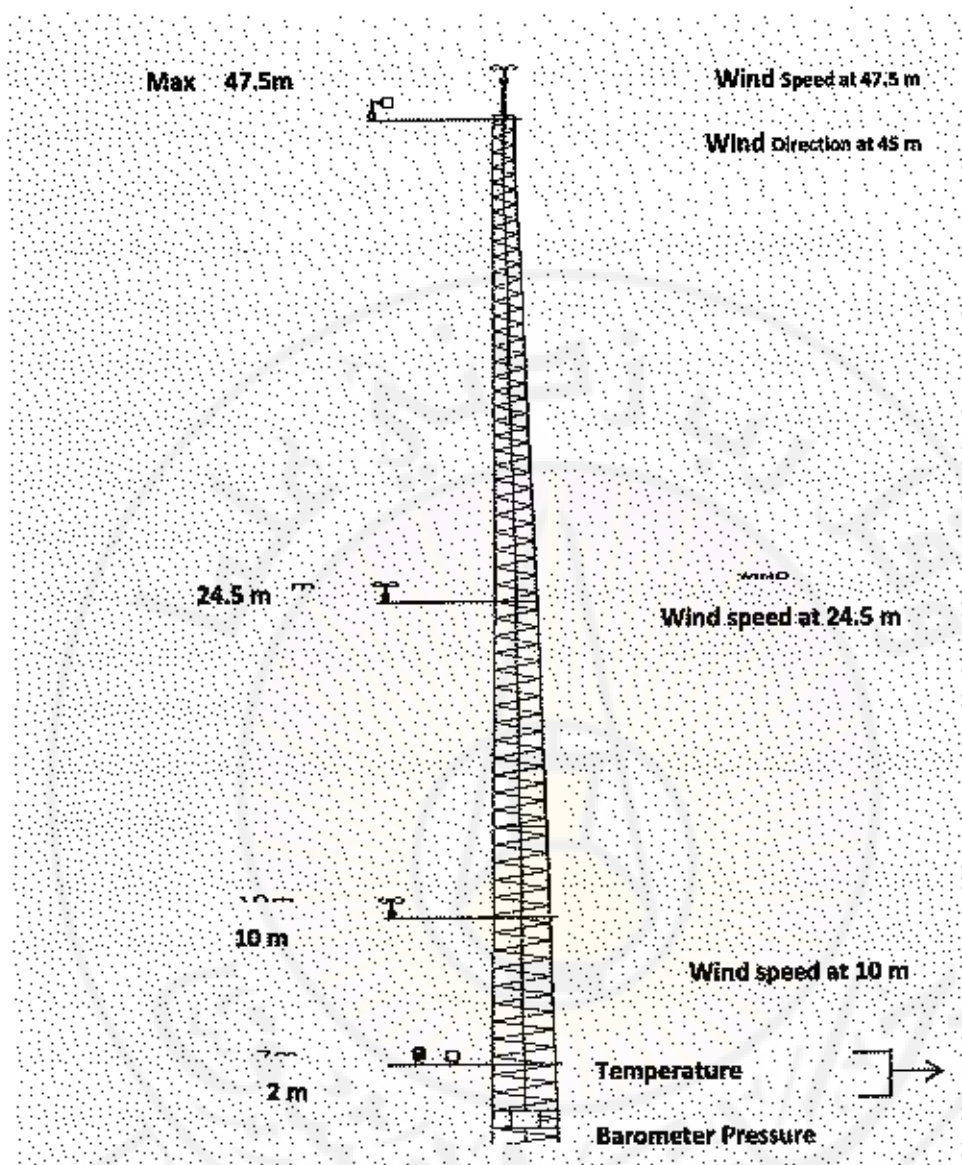
ويثبت أعلى حاوية الأجزاء الدوارة وتسمى القمرة (Nacelle)، ويقوم بقياس سرعة الرياح. وفي حال السرعات العالية (مثلاً 25 م/ثا لمدة عشر دقائق) تتوقف العنفة عن العمل ذاتياً. وتعرف هذه السرعة بسرعة خروج العنفة أو إيقافها عن العمل (Cut out speed). وعندما تقل هذه السرعة تعمل العنفة ذاتياً من جديد. وبصفة عامة تساوي سرعة بداية العمل عند العنفة (cut in speed) حوالي (3.5 م/ثا إلى 4 م/ثا).

- حساس أو مجس اتجاه الرياح (Wind Vane Sensor):

ويقوم بتحديد اتجاه الرياح بالنسبة إلى المحور المركزي لحاوية الأجزاء أو القمرة (Center line of Nacelle) ويثبت بجوار حساس سرعة الرياح. ويتم توجيه حاوية الأجزاء تبعاً للإشارة القادمة من حساس اتجاه الرياح والمرسلة إلى الحاسوب، ولا تتم عملية التوجيه إذا انخفضت سرعة الرياح عن (3 م/ثا).

- مجسات (حساسات) قياس سرعة الدوران (RPM Sensors):

ويكون أحدهما مخصصاً لقياس سرعة دوران المولد (Generator RPM)، ويقوم الحاسوب من خلال الإشارات المرسلة من هذا الحساس بتحديد لحظة الدخول على الشبكة (Cut in) ولحظة الخروج (Cut out). ويقوم حساس آخر بقياس سرعة العضو الدوار (Rotor RPM). ويقوم الحاسوب بمتابعة السرعتين باستمرار تبعاً



الشكل 2-6 برج قياس سرعات الرياح على ارتفاعات مختلفة مع تحديد اتجاه الرياح على مدار العام [12].

النسبة الرفع الخاصة بصندوق التروس أو علبة السرعة (Gear Box Ratio) والمحددة بالبرنامج حتى تتم مراقبة الأداء وإيقاف المروحة في الحال في حال حدوث زيادة لسرعة المولد أو العضو الدوار عن الحد المطلوب.

- مجسات قياس درجات حرارة أجزاء العنفة (Temperature Sensors) :

وتنتشر هذه المجسات في أماكن عديدة في العنفة وتعطي إشارات إلى الحاسوب، وفي حال ارتفاع درجة الحرارة في أحد هذه الأجزاء عن الحد المسموح به تتوقف العنفة ذاتياً. وتوضع هذه المجسات في علبة السرعة لقياس الزيت الخاص بها وبكراسي تحميل المولد الأمامية والخلفية وعلى ملفات المولد وعند المكابح وكراسي تحميل السرعة البطيئة وفي لوحة التحكم.

- مجسات قياس ضغط الأنظمة الهيدروليكية (Hydraulic pressure Sensors) :

وتقوم بقياس ضغط المائع الموجود في أنظمة الإيقاف أو الفرملة (المكابح) (Brake systems).

- مجسات قياس اهتزاز العنفة (Vibration Sensors) والتفاف الكابلات (Cable twist Sensor) :

في حال تعرض العنفة لاهتزازات يعطي هذه المجسات إشارة إلى الحاسوب لإيقافها. وتثبت هذا المجسات في مؤخرة العنفة. أما في حالة دوران حاوية الأجزاء الدوارة (القمرة) حول محور البرج أكثر من ثلاث لفات يعطي مجس التفاف الكابلات إشارة إلى الحاسوب لإيقاف العنفة وذلك حفاظاً على سلامة الكابلات.

أما قياس خصائص الشبكة الكهربائية فهي تتم من خلال قيام الحاسوب بمراقبة عناصر الشبكة الموصل إليها مثل: الجهد (Voltage) والتيار (Current) والتردد (Frequency) ومعامل الاستطاعة (Power Factor) و الاستطاعة الناتجة على الخرج (output power).

تأثير مزرعة الرياح على الحياة الطبيعية في المنطقة المعنية:

_ الطيور : يمكن أن يؤدي دوران شفرات الدوار إلى ارتطامها بالطيور وقتلها، لذا يجب قبل إنشاء المشروع عمل دراسة مستفيضة عن مسارات الطيور بالمنطقة والبعد قدر الإمكان عن هذه المسارات، حتى لا يسبب وجود محطة الرياح في انقراض هذه الطيور ولو على المدى البعيد. كما يجب مراعاة أن بعض الطيور تعتمد على الماء كمصدر غذاء، ويبين الشكل 10-2 اصطدام الطيور مع شفرات العنفة في اليابسة



الشكل 10-2: اصطدام الطيور مع شفرات العنفة في اليابسة، حيث كما يبدو ركبت في موقع قريب من مسار هجرتها [1].

لقد أظهرت دراسة دانمركية أن الطيور تعتاد على وجود مثل هذه العنفات وتتأقلم مع لتعديل مسارها، بحيث تطير حولها، من حيث المبدأ يمكن التعامل مع كل القضايا المذكورة أعلاه بالتصميم والتخطيط الدقيقين.

- العنفات ذات الأبراج الاسطوانية هي الأجمل والأكثر راحة للنظر وهي المعتمدة حالياً.

- يراعى أن يكون لون العنفات أبيضاً أو رمادياً فاتحاً، وقد أشارت نتائج الاستقصاءات أن هذين اللونين هما أكثر الألوان تقبلاً للعين البشرية.

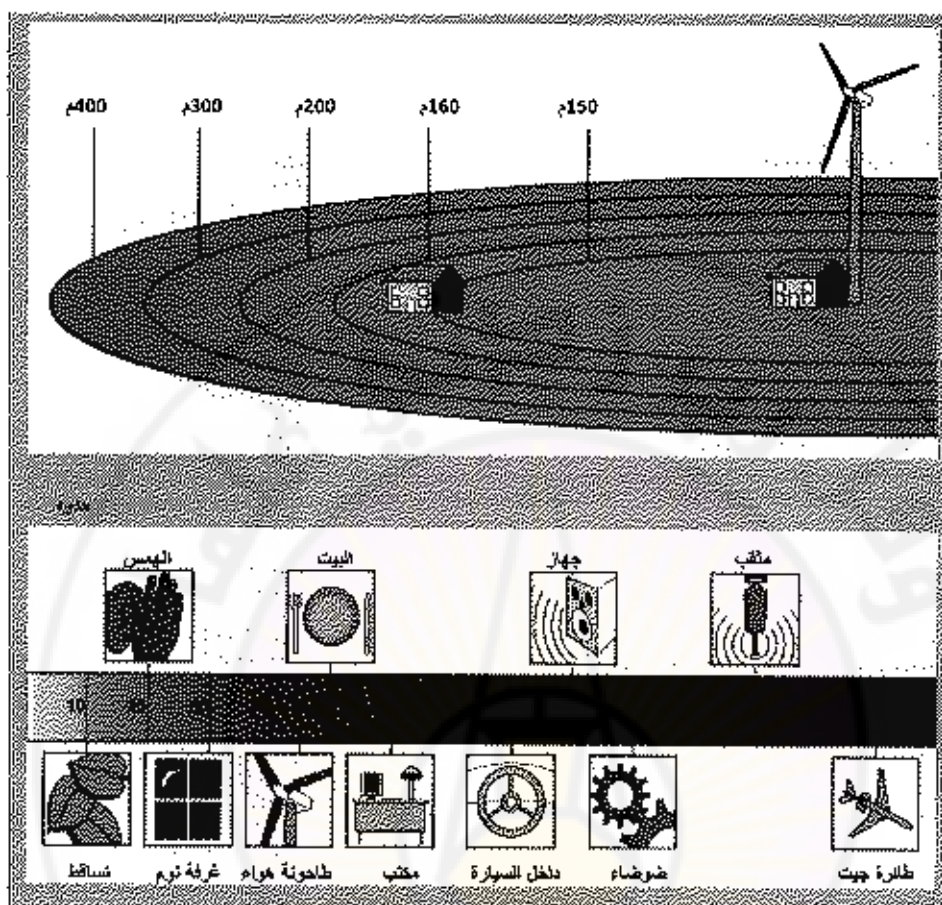
3- الوميض الصادر عن حركة الشفرات : أثناء حركة شفرات الدوار يصدر منها وميض قد يؤدي العين البشرية أو يعوقها عن الرؤية المستمرة، وقد يؤثر على السائقين وسكان المناطق القريبة لذا يجب أن تبعد المحطة عن الطرق السريعة بمسافات كافية.

4- تداخل الاتصالات : قد يؤثر وجود محطة الرياح على الاتصالات السلكية واللاسلكية بالمنطقة بإحداث بعض التشويش، لذا يجب إقامة محطة الرياح على بعد كاف عن المناطق السكنية أو مناطق محطات الإرسال والاستقبال أو المطارات كما ذكرنا سابقاً.

5- المحميات : يجب إنشاء محطات الرياح بعيداً عن مناطق المحميات حتى لا تؤثر على انقراض الأنواع النادرة من الحيوانات والكائنات الحية الأخرى.

6- التوظيف : يترتب على إنشاء محطات الرياح تشغيل العمالة الدائمة، وهجرة المجتمعات إلى مواقع محطات الرياح مما يغير من طبيعة الحياة الاجتماعية ونشاط السكان بالمنطقة. وهذا تأثير إيجابي كما ذكرنا قبل قليل.

7- التأثير على الحياة البرية والموطن الطبيعي : فترة التركيب لمزرعة الرياح تكون تقليدياً أقل من سنة وتحدث هذه العملية في البداية بعض التخريب في جزء صغير فقط من الأرض المخصصة للمنشأة. وحالما يكتمل البناء يمكن إعادة الموقع إلى حالته السابقة. والمهم أن يتم تخطيط تطوير مزرعة الرياح ومراقبتها لمنع التداخل أو التخريب غير الضروريين. بل يمكن لعملية إنشاء المزرعة الريحية أو محطة الرياح أن تحول الأرض الجرداء للموقع إلى مساحة خضراء ومنطقة حضرية.



الشكل 10-1 مستويات الضجيج للعتقة الريحية ومقارنته بفعاليات أخرى [3].

2- التأثير البصري Visual Impact: يؤثر وجود محطة الرياح في الشكل العام للمنطقة. ولمحاولة الحد من تشويه المنطقة يجب أخذ الآتي في الاعتبار :

- يجب أن تكون العتقات الريحية (ويقصد بذلك المزرعة الريحية في الموقع) بنفس الشكل والحجم.
- يجب أن تدور العتقات جميعها في نفس الاتجاه.
- يفضل أن يكون توزيع العتقات في صفوف متوازية، وأن يكون التوزيع متجانساً.

الجدول 1-10: مستوى الضجيج لفعاليات مختلفة مقارنة بعتقات الرياح مقاساً بالديسيبل db [2].

المصدر	مستوى الضجيج (db)
طائرة نفاثة (جيت) على علو 250 م	105
متقارب كهربائي	95
شاحنة تسير بسرعة 48 كم/ما	65
دائرة من دوائر العمل المزدحمة	60
سيارة تسير بسرعة 64 كم / ما	55
عتقة ريحية على بعد 500 م من موقعها وفي موقع العتقة وتحديداً عند قاعدتها	45-25 110-80
غرفة نوم هادئة	20

ويبين الشكل 1-10 مستويات الضجيج للعتقة الريحية حسب البعد عنها ومقارنته مع فعاليات أخرى.

إبعاد السكان المقيمين على بعد أقل من 500 م في المناطق القريبة من موقع الإنشاء.

إقامة سور حول منطقة الإنشاءات.

تمهيد طرق تخصص للنقل الثقيل فقط، بحيث تكون بعيدة عن الطرق التي يسلكها السكان.

4- الضجيج Noise: قد تسبب أعمال الإنشاء ضوضاء أو ضجيجاً ولكنها لا تتعدى الضوضاء الصادرة عن أي مشروع آخر في مرحلة إنشائه. ومن التأثيرات الإيجابية:

5- التوظيف: يترتب على إنشاء المشروع تعيين عمالة مؤقتة ودائمة للاشتراك في عمليات الإنشاء مما يؤثر إيجاباً في تغيير الحياة الاجتماعية بمنطقة المشروع والمناطق المجاورة.

10-1-2 بعد إنشاء المشروع وأثناء فترة التشغيل:

1- الضجيج : ينجم الضجيج بسبب الاحتكاكات الميكانيكية لأجزاء العنفة ، وكذا بسبب حركة شفرات الدوار واصطدامها بالهواء المحيط. (مع العلم أنه عند زيادة سرعات الرياح عن 10 م/ث فإن صوت الرياح نفسها يفوق الصوت الناجم عن حركة شفرات الدوار في العنفة الريحية).

لهذا السبب ينصح بأن يتم اختيار موقع محطة الرياح على بعد لا يقل عن 500 م من المناطق السكنية المحيطة بمنطقة المشروع.

يبين الجدول 10-1 مستوى الضجيج لمختلف الفعاليات مقارنة بالعنفات الريحية.

الفصل العاشر
المسألة البيئية و الاقتصادية
Environmental and Economic Issue

10-1 التأثيرات البيئية والاجتماعية الناجمة عن إنشاء العنقات و المزارع الريحية:
يؤدي إنشاء العنقات و المزارع الريحية (وتسمى أيضاً المحطات الكهروريحية واختصاراً محطات الرياح) إلى منع انبعاث الملوثات التي كان من الممكن انبعاثها في حالة إنشاء محطات كهربائية تقليدية، ولكنه يجب في نفس الوقت عدم تجاهل التأثيرات البيئية الناجمة عن إنشاء المحطات الكهروريحية أو محطات الرياح ، والتي يتوقف حدوثها على المراحل المختلفة التي تمر بها المحطة.
ونوضح ذلك فيما يلي:

10-1-1 مرحلة إنشاء محطة الرياح:

1- إثارة الأتربة: نظراً لوجود محطة الرياح في مواقع تتميز بسرعات رياح عالية بالإضافة إلى وجود معظمها في مناطق صحراوية أو تلال جرداء، فإن عمليات نقل مكونات العنقات الريحية عن طريق النقل الثقيل تسبب إثارة الأتربة بمنطقة المشروع والمناطق المجاورة. هذا فضلاً عما تسببه أعمال الحفر والردم بموقع المشروع من تآثر الأتربة. لهذا يجب التحكم بقدر الإمكان في كميات الأتربة المتناثرة، وذلك أثناء تنفيذ أعمال الإنشاء التي تسبب تآثر الأتربة على مراحل متعاقبة.

2- التأثير على البيئة الزراعية: تؤثر أعمال الإنشاء على البيئة الزراعية إن وجدت بموقع الإنشاء تأثيراً سلبياً، لذا يجب حماية المساحات المزروعة بأسوار لعدم تخطي وسائل النقل الثقيل لها.

3- التأثير على المناطق السكنية المحيطة: في حالة وجود مناطق سكنية قريبة من موقع إنشاء المحطة، يجب إتباع إجراءات الأمان اللازمة لتفادي تعريض السكان لأيّة مخاطر قد تلحق بهم أثناء عمليات الإنشاء.
ومن أمثلة إجراءات الأمان ننصح بما يلي :



[24] www.windtest-nrw.de

[25] www.bwca.com

www.eeve.energy.gov [26]

[27] www.windpower.org

[28] www.vestas.com



Wind Energy Explained Theory, Design and Application
University of Massachusetts Amherst John Wiley & Sons. Ltd
2002.

- [14] Anca D. Hansen, Clemens Jauch, Poul, S. Rensen, Florin Iov and, Freda Blaabjerg. Dynamic wind turbine models in power system simulation tool. RISO National Laboratory, Roskilde-December 2003.
- [15] Roy Maclean- Electrical System Design for the Proposed One Giga watt. Beatrice Offshore Wind Farm _ University of Strathclyde 2004.
- [16] Tove Feld, Jørgen Lorin Rasmussen & Pia Hald Sørensen Stucural and Economic Optimization of Offshore Wind Turbine Support Structure and Foundation. Denmark 2005.
- [17] Andreas Peterson
Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines, Sweden 2005.
- [18] Siegfried Heier
Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems (Kassel University , Germany) . WILEY 2006.
- [19] Dr Michael Conlon
Development of Wind Energy Resources, Turbine Control, Configuration of Wind Generators and Integration into Supply Networks-- School of Control Systems and Electrical Engineering
Dublin -2006.
- [20] Gary L. Jonhnson
Wind Energy Systems Manhattan KS, 2006.
- [21] Frede Blaabjerg and Zhe Chen
Power Electronics from wind Turbines - Institute of Enacrgy Technology Aalborg University Denmark Morgan & Claypool Publishers 2006.
- [22] EWEA-Wind Energy- The Facts-Report- 2006.
- [23] Florin Iov, Freda Bleiberg
Advanced Power Converters for Universal and Flexible Power Management in Future Electricity Network - AREVA-2007.

9- 14 مراجع الفصل التاسع

- [1] مواصفات العنفات الريحية الممنقولة المصنعة في سورية. النظم الطليعية (ساج). دمشق 2000.
- [2] د.هاشم ورفوزق، الكترونيات القدرة الكهربائية (2)، جامعة دمشق، 2006.
- [3] د.هاغوب بوغوص - د.علي الجازي - الآلات اللائزمانية جامعة دمشق - 2007.
- [4] د.كمال ناجي، م.معن كعدان - آفاق استخدام طاقة الرياح لتوليد الكهرباء في سورية و لبنان - الندوة الهندسية العلمية السورية الألمانية الثالثة - جامعة حلب 2004
- [5] د.كمال ناجي، د. صالح الأيوبي، د. مازن غندور - دراسة الجدوى الفنية الاقتصادية والدراسة التصميمية لاستخدام العنفات الريحية في سورية و لبنان - برنامج التعاون البحثي السوري اللبناني (الإعلان الثالث 2004 - 2005).
- [6] د.كمال ناجي ، د.محمد عمر ورد - القيادة الكهربائية الآلية الجزء الأول . جامعة دمشق 2004.
- [7] د.كمال ناجي، المولدات الكهربائية المستخدمة في العنفات الكهروريحية. ندوة مصادر الطاقة المتجددة وآفاق استخدامها، بيروت 2003.
- [8] د.كمال ناجي مشاريع تخرج في كلية الهندسة الكهربائية و الميكانيكية -، (2009-2007).
- [9] د. كمال ناجي محاضرات في طاقة الرياح (1) جامعة دمشق كلية ه.م.ك. 2009.
- [10] م.محمد الزليد - ربط المولدات الريحية على الشبكة العامة باستخدام نظام AC-DC-AC Converter رسالة ماجستير بإشراف د.هاشم ورق جامعة دمشق 2007.
- [11] م. إسماعيل الوائ - دراسة مقارنة للمولدات التحريضية واللازمانية المستخدمة في العنفات الريحية رسالة ماجستير بإشراف د.كمال ناجي جامعة دمشق 2008.
- [12] Dejan Schreiber
State of the art of variable Speed Wind Turbines -- Nuremberg -- Germany 2001.
- [13] J.F Mawell J.G Mc Gowan and A.L Regers

$$Q_c = Q_G + Q_L$$

$$Q_c = 3 \cdot U_c \cdot I_c = 3 \cdot U_c \cdot \frac{U_c}{X_c}$$

$$Q_c = 3 \cdot U_c \cdot W_c = 3 \cdot U_c \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot c \Rightarrow$$

$$Q_c = 6 \cdot \pi \cdot f \cdot U_c^2 \cdot C$$

$$Q_c = 6 \cdot \pi \cdot f \cdot U_c^2 \cdot C = P_G \cdot \operatorname{tg} \varphi_G + P_L \cdot \operatorname{tg} \varphi_L$$

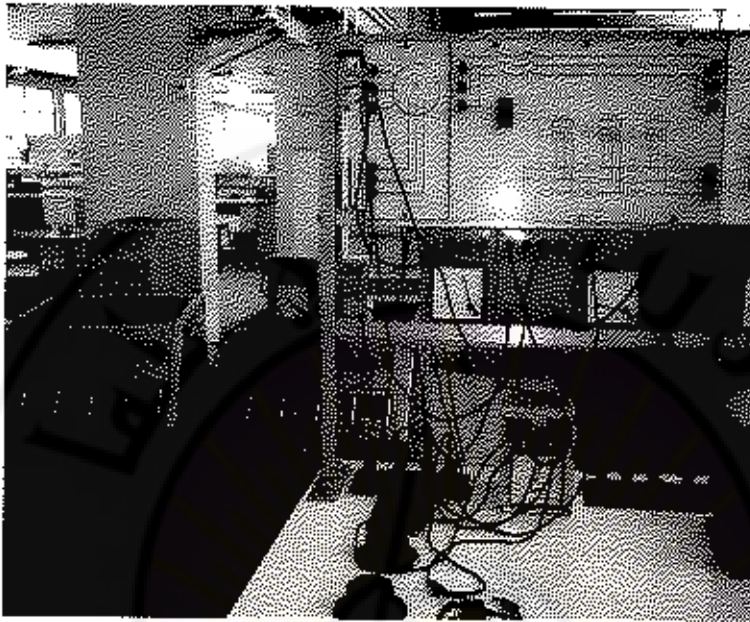
$$P_G = P_L = P_n \quad \text{أقصى حمولة نستطيع التحميل بها:}$$

$$6 \cdot \pi \cdot f \cdot U_c^2 \cdot C = P_n (\operatorname{tg} \varphi_G + \operatorname{tg} \varphi_L)$$

وبالتالي سعة المكثفات اللازمة لحدوث عملية التهييج الذاتي لتوليد الطاقة الكهربائية تتناسب عكساً مع التردد والتوتر وطرذاً مع استطاعة الآلة:

$$C = \frac{P_n (\operatorname{tg} \varphi_G + \operatorname{tg} \varphi_L)}{6 \cdot \pi \cdot f \cdot U^2}$$

الغاية من إضافة المكثفات إلغاء استجرار الاستطاعة الردية من الشبكة وذلك بهدف تحسين عامل الاستطاعة والحفاظ على ثبات التوتر، حيث أنه مع استجرار Q من الشبكة ينخفض التوتر U.

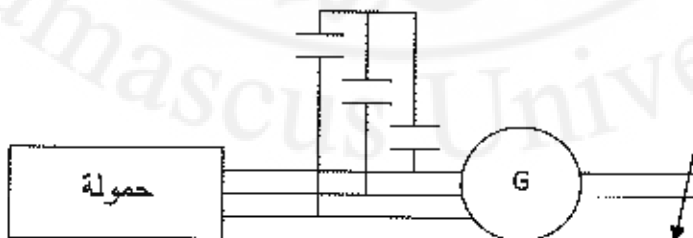


• استخدام المكثفات:

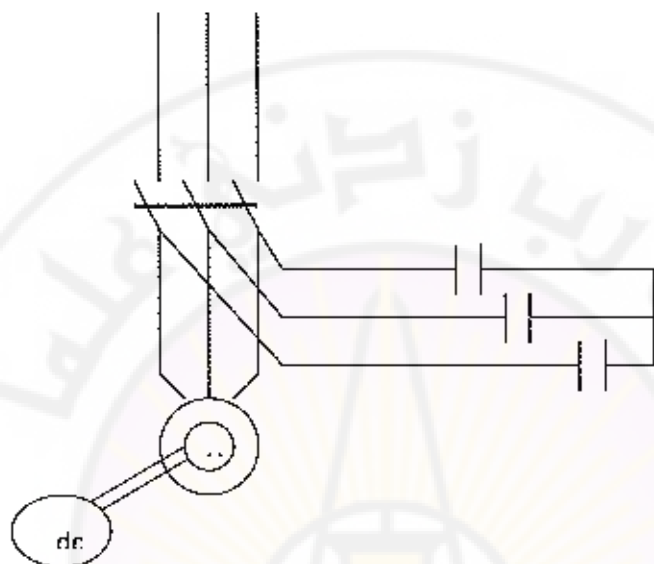
تصنع الآلة التحريضية من مواد فيرو مغناطيسية التي تحتفظ بمغناطيسية متبقية 2% وبطريق التهيج الذاتي يزداد التوتر اسياً ليصل إلى القيمة الإسمية لتوتر الآلة.

• اختيار سعة مكثفات مناسبة:

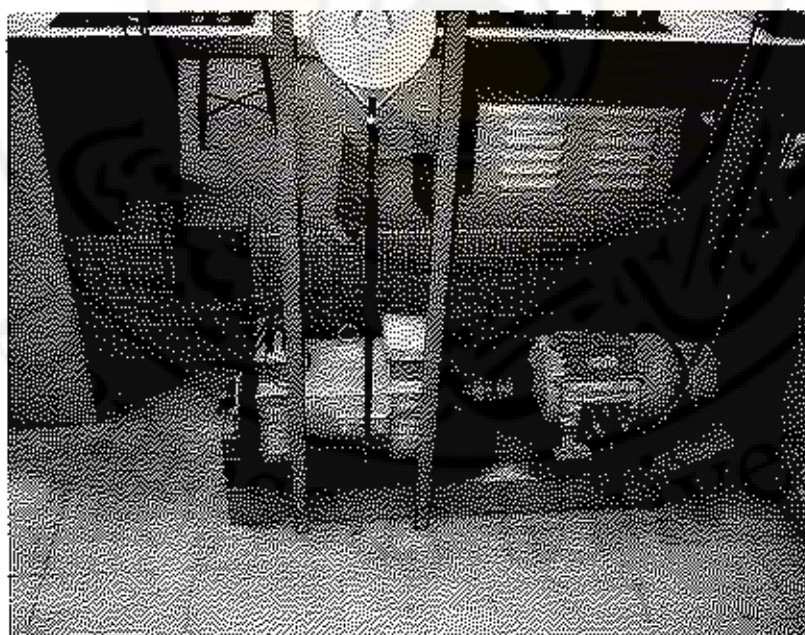
إذا كانت الحمولة تحريضية فإنها تستجر استطاعة ردية. لذلك فإن استطاعة المكثفات الردية يجب أن تغطي استطاعة الحمولة والآلة.



دائرة التجربة:



صور التجربة:



الجزء الثاني من التجربة:

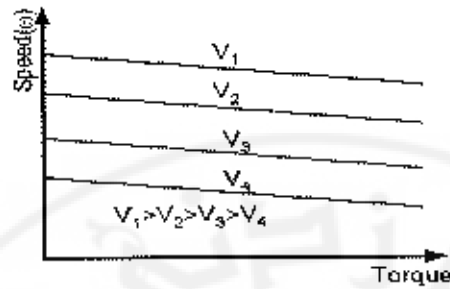
ربط مكثفات مع المولد التحريضي كمعوضات ردية، حيث سنرى تأثير ذلك على تيار الشبكة ونلاحظ ثبات تيار المولد واختلاف تيار الشبكة.

n [rpm]	I_{ac} [A]	I_{net} [A]	I_o [A]	I_{Dc} [A]	Q المضافة VAR	Q من الشبكة KVAR
rpm 1575	7	7	7	4.2	0	2
	7	5.5	7	4.2	666±50%	1.5
	7	4.6	7	4.2	999±41%	1.21
	7	4	7	4.2	1265±40%	1
	7	3.6	7	4.2	1931±43%	0.76
	7	3.6	7	4.2	2264±26%	0.6

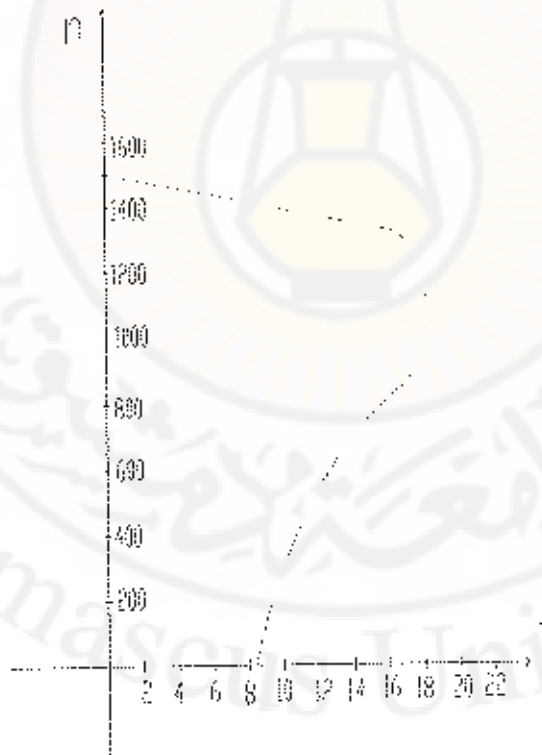
$$I_o \sim Q, I_o = \text{const.}$$

نلاحظ من الجدول: أن المولد التحريضي يجب أن يربط إلى الشبكة حتى يحصل على الفيض المغناطيسي حتى يولد استطاعة كهربائية.

ولكن نستطيع أن نقدم للمولد التحريضي استطاعة ردية من مصدر آخر ربطناه بمكثفات تزوده بتيار التحريض اللازم، حيث يحصل على تيار المغنطة من المكثفات (من الاستطاعة الردية).



يتم بعد ذلك إنشاء مميزات المحرك التحريضي عندما ينتقل من حالة العمل كمحرك على اللا حمل إلى حالة الكبح باعادة القدرة الى الشبكة الكهربائية والتي تسمى حالة الكبح باعادة التوليد Regenerative Braking. وذلك وفقاً للمنحني المبين في الشكل التالي:



النتائج:

n	I_{ac}	I	I_{De}	I_O	V	f	Q
1570	7	5.6	7	4.4	220	50	2.01
1560	6.4	4.82	5.2	4.4	220	50	1.95
1545	6.2	4.56	5	4.4	220	50	1.92
1530	4.6	1.87	2.8	4.8	220	50	1.8
1515	4.4	1.3	0.16	5	220	50	1.75
1500	4.2	0	0.04	5.4	220	50	1.7
1490	4.2	0	0	5.6	200	50	1.7
1460	0.9		0	5.8	100	50	0.3
1425	0.3		0	5.8	75	50	0.1

يحسب التيار الفعلي I من العلاقة:

$$I_0 = 4.2 \text{ A} = \text{const} \quad \text{حيث:} \quad I = \sqrt{(I_{ac}^2 - I_0^2)}$$

• من الخصائص الميكانيكية نجد:

$$T_m(G) > T_m(M)$$

محرك: $E < U$ ، مولد: $E > U$

• مميزات محرك الـ DC:

السرعة تقل عند زيادة العزم.

5. مقياس استطاعة ردية Q (KVar).

الإجراء التجريبي:

i. للتأكد محددات محرك التيار المتناوب. التحريضي AC قمنا بتحميله بحمولته الاسمية بمولد تيار مستمر DC وكانت القيم الاسمية له:

$$n=1425 \text{ rpm}, \quad I_{ao}=7A, \quad I_{dc}=7A, \\ I_f=5.6A, \quad Q=1.8KVar, \quad v=220v, \quad f=50 \text{ hz}$$

ii. ندور محرك الـ DC الموصول مع محور محرك الـ AC (حيث يمثل محرك DC دوار العنفة الريحية).

iii. نضبط التهيج الموافق للسرعة الاسمية.

iv. نبدأ في إنقاص التهيج فتزداد السرعة وتزداد استطاعة الدخل حيث تكافئ عملياً زيادة سرعة الرياح التي تدور ريش العنفة، ونأخذ قيم مختلفة للسرعة ونسجل عندها البارامترات المطلوبة.

v. نأخذ القياسات عند نقطة الانزلاق للمحرك. وفي حالتنا هذه سنلاحظ أنها السرعة 1500 rpm، وذلك حسب المواصفات الاسمية للمحرك المستخدم في التجربة. وعند نقطة الانزلاق نلاحظ أن التيار الفعلي للمحرك التحريضي المستجر من الشبكة أصبح معدوماً ولا يستجر سوى I_o ، ولكن يستجر استطاعة ردية فقط Q.

vi. نستمر برفع السرعة فوق 1500 rpm وعندها سنلاحظ تحول المحرك ليعمل كمولد ويقدم تيار إلى الشبكة العامة ونقيس الاستطاعة الردية التي يستجرها من الشبكة.

vii. لزيادة السرعة ننقص التهيج (علاقة عكسية).

من المفيد جداً كخاصية ميكانيكية أن المولد سيزيد أو ينقص سرعته بشكل طفيف إذا تغير العزم، هذا يعني تخريب واهتراء أقل في علب السرعة.

$$n_{slip} = n_s - n \quad (40-9) \quad \text{سرعة الانزلاق:}$$

الانزلاق:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (41-9)$$

عند التحميل: في المحركات الصغيرة: 0.02 - 0.01

في المحركات الكبيرة: 0.05 - 0.03

— إذا دار المحرك التحريضي بانزلاق سالب فإنه يقدم استطاعة حقيقية إلى الشبكة لكنه يستجر استطاعة ردية.

والجدير بالذكر هنا أنه وبالرغم من المذكور أعلاه فإنه لا ينبغي مبدأ انتقال المحرك ليعمل كمولد على امتداد مميزاته في الربع الثاني وذلك في حالة الكبح مع إعادة القدرة إلى الشبكة عندما يدور المحرك بانزلاق سالب.

العناصر المستخدمة في التجربة:

1. محرك تحريضي ذو دائرة ملفوف.

لوحته الاسمية:

HP:3 Freq:50 HZ n_n :1420 rpm

220 volt Amp:7 Δ

2. محرك تيار مستمر يؤمن استطاعة الدخل (يكافئ عملياً حركة دوار العنفة).

لوحته الاسمية:

220 volt

1.5 kw

7A

1500 rpm

3. مقاييس توتر وتيار.

4. مقياس سرعة digital taco meter.

ونظراً لأن ملفات الدوار مقصورة يمر فيها تيار يؤدي إلى نشوء عزم دوران يدفعه إلى الدوران في نفس اتجاه السيلالة الدوارة:

$$I_{20} = \frac{E_{20}}{Z_{20}} = \frac{E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + X_{20}^2}} \quad (39-9)$$

عمل المولد التحريضي:

الآن ماذا يحدث إذا دورنا الجزء الدوار بسرعة قريبة جداً من سرعته التزامنية (1500 rpm)؟

الجواب: لا يحدث شيء طالما أن الحقل المغناطيسي يدور عند سرعة الدوار نفسها بالضبط، ولا نرى أية ظاهرة تحريض في الدوار ولن يتفاعل الدوار مع الثابت، أي يندم العزم والتيار ولذلك تنقص السرعة.

ولكن ماذا إذا زدنا السرعة فوق 1500 rpm ؟

في هذه الحالة الدوار سيدور بسرعة أكبر من سرعة الحقل المغناطيسي الدوار للجزء الثابت وهذا يعني أنه ومرة أخرى أن الثابت سيولد تيار كبير جداً في الدوار. الطاقة الإضافية مستتفل كقوى كهرومغناطيسية إلى الثابت وتباعاً تتحول إلى كهرباء تغذى الشبكة الكهربائية.

انزلاق المولد:

السرعة في المولد التحريضي سوف تتغير مع القوى الدوارة المطبقة عليه (مع الزمن ومع العزم).

عملياً الفرق بين السرعة في ذروة الاستطاعة وفي الاستطاعة المثلى صغير جداً حوالي 1% هذا الفرق الذي يزيد عن السرعة التزامنية يسمى انزلاق المولد. مثلاً: مولد بأربعة أقطاب سيدور بشكل مثالي بسرعة 1500 rpm إذا ربط بشبكة ترددها 50 HZ.

إذا كان المولد يولد عند استطاعته العظمى سيدور بسرعة 1515 rpm.

9-13 ملحق

تجربة مخبرية لعمل المولد التحريضي في العنفة الريحية :
أُنجزت هذه التجربة في مخابر قسم هندسة الطاقة الكهربائية كلية الهندسة
الميكانيكية والكهربائية- جامعة دمشق
الغاية من التجربة:

تحقيق ربط المولد التحريضي مع الشبكة الكهربائية وإمكانية تعويض الاستطاعة
الردية.

المبدأ النظري:

— عمل المحرك التحريضي:

عند توصيل ملفات الثابت إلى منبع ثلاثي الطور يمر تيار مغنطة في الملفات وعند
مرور هذا التيار ينشأ فيض مغناطيسي يدور في الاتجاه الموجب وبسرعة n .
يتشابه هذا الفيض المغناطيسي الدوار مع ملفات كل من العضو الدوار
والثابت $\Phi_m [wb/pole]$ وهذه القيمة ثابتة لا تتأثر بمقدار الحمل على المحرك.
نتيجة لقطع المجال المغناطيسي لملفات الثابت تتولد قوة محرقة كهربائية عكسية:

$$E_1 = 4.44 \cdot f_1 \cdot \Phi_m \cdot N_1 \quad \text{Volts} \quad (37-9)$$

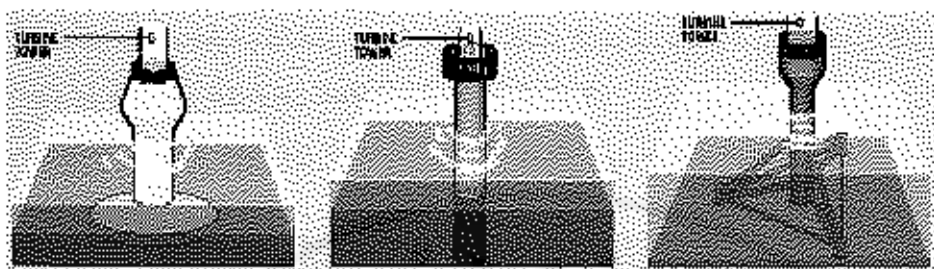
وهنا الدائر في حالة سكون ← السبالة الدوارة تقطع ملفات الدوار فتتولد قوة محرقة
كهربائية:

$$E_{20} = 4.44 \cdot f_1 \cdot \Phi_m \cdot N_2 \quad \text{volts} \quad (38-9)$$

f_1 : تردد المنبع.

N_1 : عدد لفات العضو الثابت لكل طور.

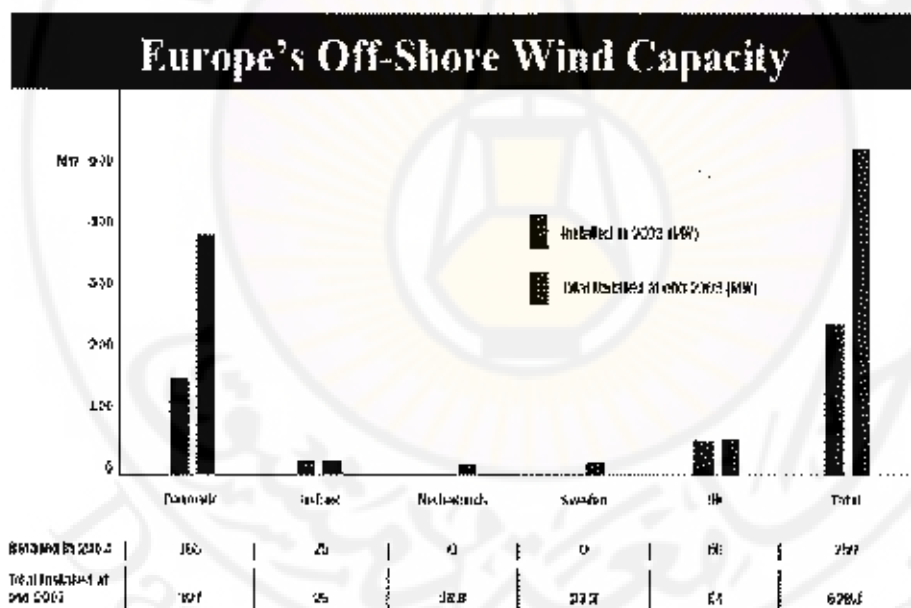
N_2 : عدد لفات العضو الدوار لكل طور.



الشكل 9-39: أشكال القواعد التي تحمل العنفات والتي تتركب على الأرض

تحت الماء [16].

يبين الشكل 9-40 عدد العنفات المركبة بعيداً عن الشاطئ في بعض الدول الأوروبية عام 2003، بالمقارنة مع مجموع العنفات الإجمالية المركبة في ذلك العام على مسيل المثال.



الشكل 9-40 عدد العنفات المركبة بعيداً عن الشاطئ في بعض الدول الأوروبية عام 2003، بالمقارنة مع مجموع العنفات الإجمالية المركبة في ذلك العام [16].

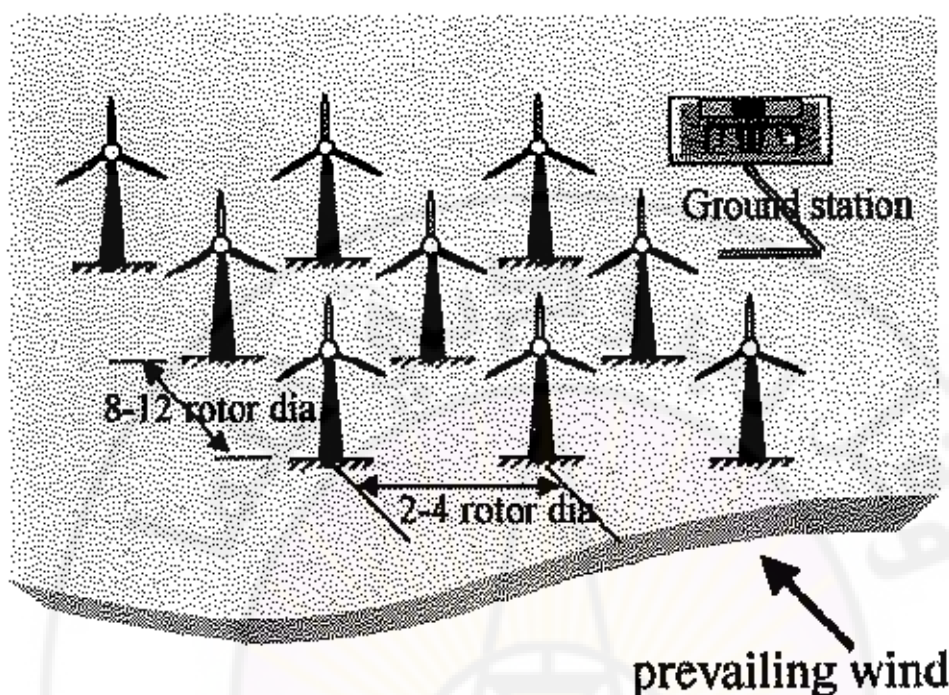
المسافات بين مواقعها والشاطئ بعيدة نسبياً. وكانت الدنمرك من أوائل الدول التي قامت بتركيب هذا النوع من العنفات والمزارع الريحية. يبين الشكل 9-38 عدداً من العنفات الريحية المركبة في عرض البحر بعيداً عن الشاطئ.



الشكل 9-38: عدد من العنفات الريحية المركبة

في عرض البحر بعيداً عن الشاطئ [16].

ويبين الشكل 9-39 أشكال القواعد التي تحمل هذه العنفات والتي تتركب على الأرض تحت الماء (قعر البحر أو البحيرة). وتتبع طرق معقدة لتركيب هذه العنفات وتكون هذه العنفات مرتفعة الثمن بالمقارنة مع العنفات المركبة على اليابسة، لذلك تكون الاستطاعة المركبة للعنفة كبيرة نسبياً ولا تقل عن 2 إلى 3 ميغاوات لكل منها. ونظراً لنوعية سطح الماء بالمقارنة مع سطح اليابسة تصمم الأبراج الحاملة لهذه العنفات بارتفاعات أقل من العنفات المركبة على اليابسة ولنفس الاستطاعة وسيتم شرح أسباب ذلك في مؤلف آخر.

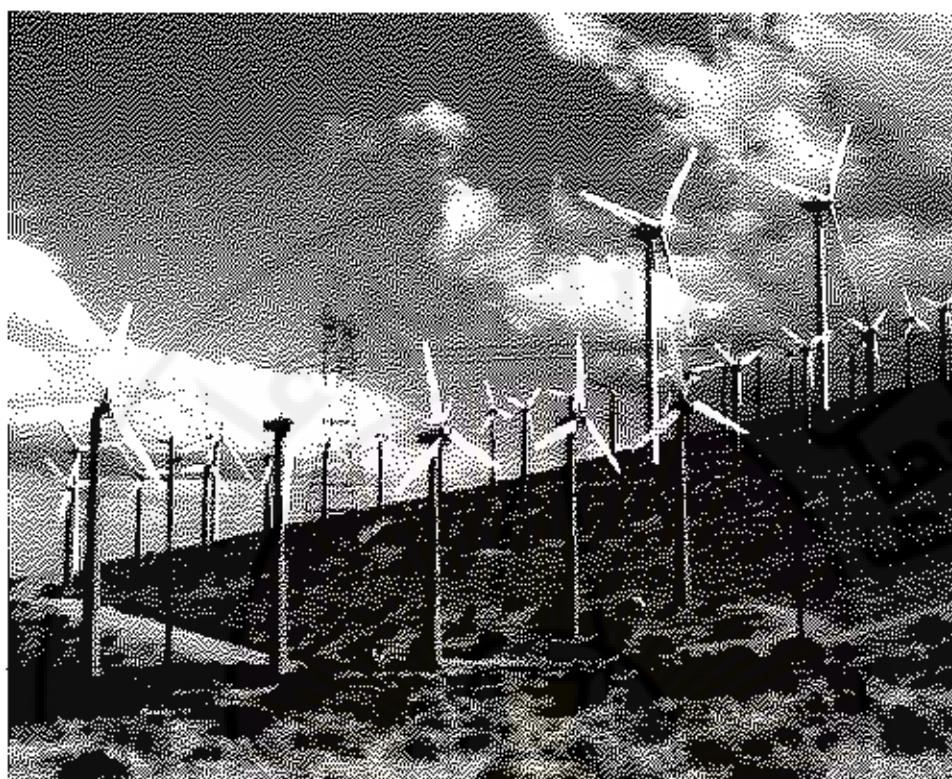


الشكل 9-37: توزيع العنفات في المزرعة الريحية [10].

9-12-2-2 العنفات الريحية المركبة بعيداً عن الشاطئ:

Off Shore Wind Turbines

في المناطق الشاطئية التي لا تتوفر فيها أراضي كافية لتركيب العنفات أو مجموعة عنفات (مزارع ريحية)، مع توفر سرعات رياح كبيرة وملثمة وأيضاً في البلدان التي لا تسمح أراضيها باقتطاع مساحات كبيرة يتم استغلال عرض البحر بعيداً عن الشواطئ أو بالقرب من الشواطئ، والتي تسمح بتركيب مجموعات من العنفات في مياه البحار أو البحيرات أو المحيطات وذلك حسب توفرها في هذه السبلات. وتتسروح أعماق المياه التي يتم فيها تركيب العنفات أو المزارع الريحية بين 10 و 40 متراً. وتختلف طريقة ربط هذه العنفات كهربائياً مع الشبكة العامة عن العنفات المركبة على اليابسة. وعادة تكون كابلات التوصيل مغمورة في الماء. وفي غالبية الأحيان يتم نقل القدرة الكهربائية بكابلات ذات توتر عالي بالتيار المستمر HVDC، خاصة إذا كانت



الشكل 9-36: مزرعة ريحية مركبة على أحد المواقع الأرضية (مرتفع) [22].

يبين الشكل 9-37 مجموعة عنفات ريحية مركبة في الموقع وفقاً لقواعد تركيب المزارع الريحية.

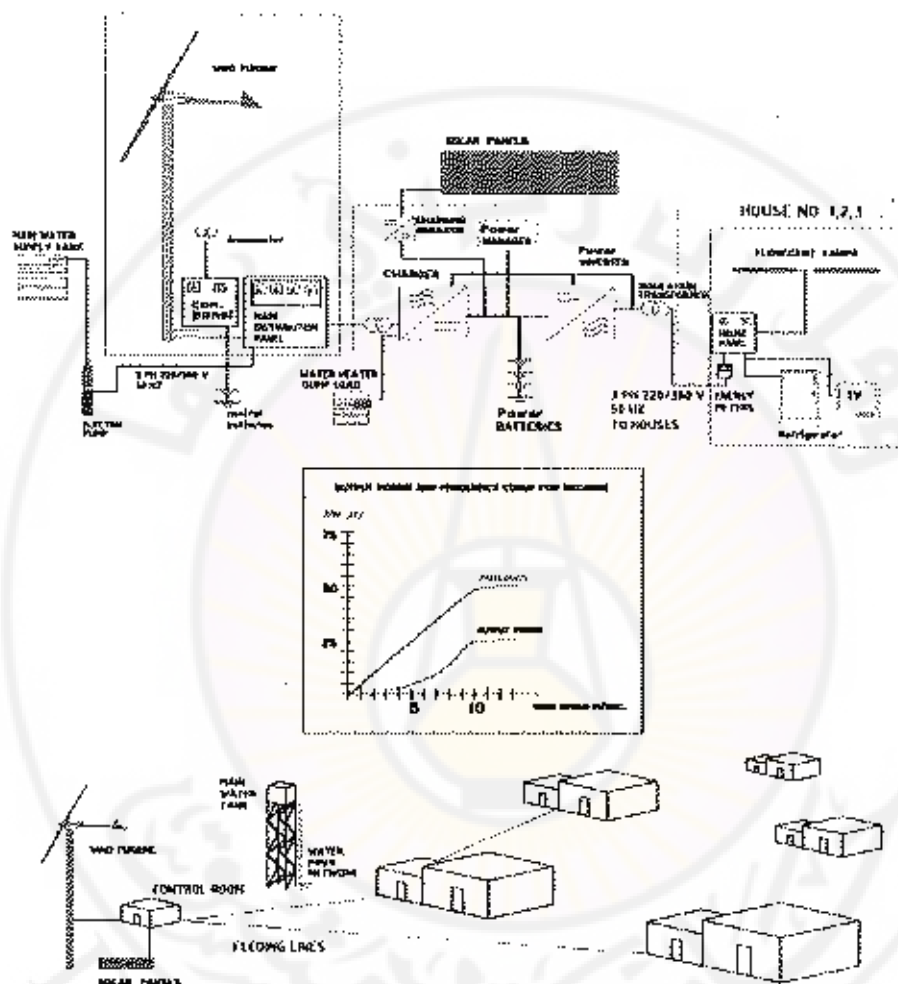
ويتم توزيع العنفات الريحية التي تكون عادة متساوية الاستطاعة فيما بينها، بحيث تكون المسافات بينها في الصف الواحد بمواجهة الرياح محددة ومحسوبة والمسافات بين الصفوف أيضاً محددة ومحسوبة وتقاس المسافات بأضعاف قياس قطر الدوار (Diameter)، حيث يبين الشكل 9-37 على سبيل المثال البعد بين كل عنفتين في الصف الواحد من 2 إلى 4 قطر الدوار وبين الصفوف من 8 إلى 12 قطر الدوار. وتخضع هذه المسافات لحسابات تفصيلية سيأتي شرحها في مؤلف خاص بالمزارع الريحية.



الشكل 9-35: عنفة ريحية كبيرة الاستطاعة مربوطة مع الشبكة الكهربائية [22].

أما مجموع الاستطاعة المركبة التي يمكن أن تصل إليها المزارع الريحية فتصل إلى عدة مئات من الميغاوات. يبين الشكل 9-36 مزرعة ريحية مركبة في أحد المواقع الأرضية. نظام التوليد الكهربائي في هذه العنفات متنوع حسب طبيعة الموقع وسرعة الرياح التي تهب فيه. ويتم اختياره استناداً إلى اعتبارات تقنية واقتصادية وتكون المولدات الكهربائية إما تحريضية أو تزامنية، ووفقاً للنظم تبديل مختلفة تم شرحها بالتفصيل في فقرة المولدات الكهربائية في الفصل السابق.

FEEDBACK AND VOLTAGE
WITH ELECTRIC POWER FROM WIND
FLUTTER AND SOLAR SYSTEM



الشكل 9-34: مخطط توضيحي لعنفه ريحية مستقلة تغذي بيتاً أو عدة بيوت (قرية مثلاً) في موقع ملائم لسرعة الرياح [4].

ويمكن تركيب أكثر من عنفة ريحية مستقلة في نفس الموقع تتصل مع بعضها على التفرع. تصمم العنفات الريحية المستقلة على استطاعات صغيرة ومتوسطة تبدأ من بضعة كيلووات إلى حوالي 200 كيلووات.

نظام التوليد الكهربائي في العنفات الريحية المستقلة يعمل عادة على مولدات تزامنية وذلك لتفادي مسألة استهلاك الاستطاعة الردية التي تحتاجها المولدات التحريضية. وبما أن هذه العنفات مستقلة عن الشبكة الكهربائية العامة فلا توجد حاجة لتحقيق شروط التزامن. تستطيع هذه العنفات ذات المولدات التزامنية أن تعمل على استطاعتها الاسمية عند السرعات المناسبة وتسمى السرعة الاسمية للرياح التي تهب على مستوى ارتفاع البرج. ويمكن إضافة نظام التحكم بزاوية ميل الشفرات عندما تزداد قيمة السرعة الاسمية.

9-12-2 العنفات الريحية المربوطة مع الشبكة

Connected with Grid Wind Turbines

9-12-2-1 العنفات المركبة على الأرض On Land Wind Turbine

وهي الأكثر انتشاراً وتركب في المواقع البعيدة نسبياً عن أماكن السكن وبالقرب من خطوط التوتر المتوسط أو العالي وإما أن تكون إفرادية، حيث تركيب في المزارع التقليدية أو بالقرب من المنشآت الصناعية أو بالقرب من الطرق الدولية، حيث تربط مع خطوط التوتر الكهربائي عن طريق مراكز تحويل خاصة بها. وإما أن تكون على شكل مجموعات وتسمى المزارع الريحية حيث تتصل مع محطات تحويل كهربائية عن طريق مراكز تحويل خاصة بكل عنفة. وتقوم محطة التحويل بدورها بحقن القدرة الكهربائية المنتجة إلى خطوط التوتر الكهربائي. وتتراوح استطاعة هذه العنفات عادة من مائة كيلووات وتصل إلى عدة ميغاوات. يبين الشكل 9-35 عنفة ريحية مربوطة مع الشبكة باستطاعة 5 ميغاوات.

9-12 ربط العنفات الريحية مع الشبكة الكهربائية:

مقدمة: تتوفر عدة طرق لربط العنفات الريحية مع الشبكة الكهربائية، حيث تسمى العنفات حسب طريقة الربط مع الشبكة وهي:

1- العنفات المستقلة عن الشبكة Stand Alone Wind Turbines:

ويقصد بها العنفات الريحية التي لا تتصل مع الشبكة الكهربائية العامة وليس لها علاقة بمنظومة القدرة الكهربائية في القطر. وإنما تتصل بشبكة كهربائية محلية أو تغذي أحمال كهربائية بعيدة عن الشبكة الكهربائية العامة. وتسمى أيضاً العنفات المعزولة التي تغذي ما يسمى جزيرة معزولة (Isolated Island) ويقصد بها منطقة معزولة عن الشبكة العامة.

2- العنفات الريحية المربوطة مع الشبكة

Connected with Grid Wind Turbines

وهي العنفات التي ترتبط مع الشبكة الكهربائية العامة وتصبح جزءاً من منظومة القدرة الكهربائية. وإما أن تكون عنفة واحدة أو مجموعة عنفات في الموقع وتسمى مزرعة ريحية وتقسّم بدورها إلى قسمين:

- العنفات المركبة على الأرض.

- العنفات المركبة في عرض البحر خلف الشاطئ أو بعيداً عن الشاطئ.

9-12-1 العنفات الريحية المستقلة Stand Alone Wind Turbines :

يبين الشكل 9-34 مخططاً توضيحياً لعنفة ريحية مستقلة تغذي بيتاً أو عدة بيوت (قرية مثلاً) في موقع ملائم لسرعة الرياح. وعادة يكون هذا الموقع بعيداً عن الشبكة الكهربائية العامة.

كما يمكن أن يكون منشأة صغيرة أو مضخة مياه جوفية تغذي من القدرة الكهربائية التي تنتجها العنفة الريحية المستقلة.

وعادة تتركب هذه العنفات وفقاً لنظام هجين Hybrid System مع مجموعة توليد كهربائية تقليدية تعمل على المازوت مثلاً، بحيث تتوقف المجموعة عن العمل عندما تكون الرياح كافية لعمل العنفة الريحية.

-- معامل خطوة الاضطراب $K_f(\Psi_k)$ و المنبعث عن تشغيل المولد و يعطى بالعلاقة :

$$P_{st} = 18(N_{10})^{0.31} \cdot K_f(\Psi_k) S_n / S_k \quad (42-9)$$

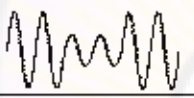
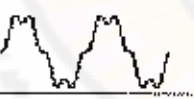
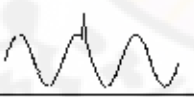
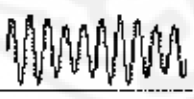
حيث: N_{10} - عدد مرات التشغيل خلال 10 دقائق.

$K_u(\Psi_k)$ - معامل تغير التوتر وهو يعبر عن مقدار تغير قيمة موجة التوتر كنسبة مئوية و يعطى بالعلاقة :

$$D = 100K_u(\Psi_k) S_n / S_k \quad (43-9)$$

وتعطي النورمات العالمية القيم الحدية المسموح بها لهذه المعاملات حيث يمكن مقارنتها مع القيم المحسوبة.

الجدول 5-9: مختلف تأثيرات العنفات الراحية على الشبكة الكهربائية [11].

Disturbance		Origin	Consequences
Voltage sag under-voltage 2.2		Short circuits in the network grid passing or on another radial. Start up of large motors	Disconnection of sensitive loads Fail functions.
Voltage swell Over-voltages 2.3		Short fault on another phase Start down of large loads Lightning strike on network structure Incorrect setting in substations	Aging of insulation Disconnection of equipment May harm equipment with inadequate design margins
Harmonic distortion 5.2-5.3		Non-linear loads Resonance phenomena Taps former saturation Switches	Extended heating Fail function of electronic equipment
Transients 1.1-1.2		Lightning strike Switching event	Insulation failure Reduced lifetime of transformers, motors etc.
Voltage fluctuations/ Flicker 6.0		Arc furnaces Sawmill crushing mill Welding Wood trimblers Start up of large motors	Aging of insulation Fail functions Flicker
Short duration interruptions 2.1		Direct short circuit Disconnection False tripping Load shedding	Disconnection Disconnection
Unbalanced 4.0		One phase loads Weak connections in the network	Voltage quality for overloaded phase Overload and noise from 3-phase equipment

9-11-3 اضطراب أو اختلال توازن التوتر (Unbalanced) :

تنتج هذه الظاهرة عن عدم انتظام الأعمال الكهربائية على الأطوار الثلاثة مما يؤدي إلى زيادة الحمل وارتفاع صوت الضجيج للأجهزة التي تعمل على توتر ثلاثي الطور .

9-11-4 ظهور الموجات العابرة (Transients) :

و تنتج هذه الظاهرة عن حالات الفصل و الوصل و ضربات البرق للشبكة و تؤدي هذه الظاهرة إلى فشل العوازل في الشبكة الكهربائية كما تؤثر على عمل المحولات الكهربائية و الآلات و التجهيزات المربوطة مع الشبكة.

9-11-5 الانقطاع المفاجئ القصير لموجة التوتر :

وهو انقطاع قصير لموجة التوتر ينتج عن فصل نتيجة تماس مباشر أو خطأ في الحماية . ويؤدي إلى انقطاع التوتر عن التجهيزات المربوطة مع الشبكة.

9-11-6 ظاهرة الارتعاش (Flicker) :

وهي تقلب في موجة التوتر تنتج عن عمل العنفات الريحية و خصوصا " العنفات متغيرة السرعة أو إقلاع العنفات أو التوقفات المفاجئة نتيجة الأعطال في النظام . وتؤثر بشكل كبير في الشبكات الضعيفة و تؤثر بشكل ملحوظ على المنابع الضوئية المتوهجة كما تؤثر على عمر المواد العازلة.

ويمكن قياس هذه الظاهرة بالمعاملات التالية :

- معامل الاضطراب turbulence coefficient : ويعبر عن خصائص

الاضطراب للموجة المنبعثة من العنفات الريحية بشكل متواصل

$$P_{lt} = C_l (\Psi_k V_n) S_n / S_k \quad (41-9)$$

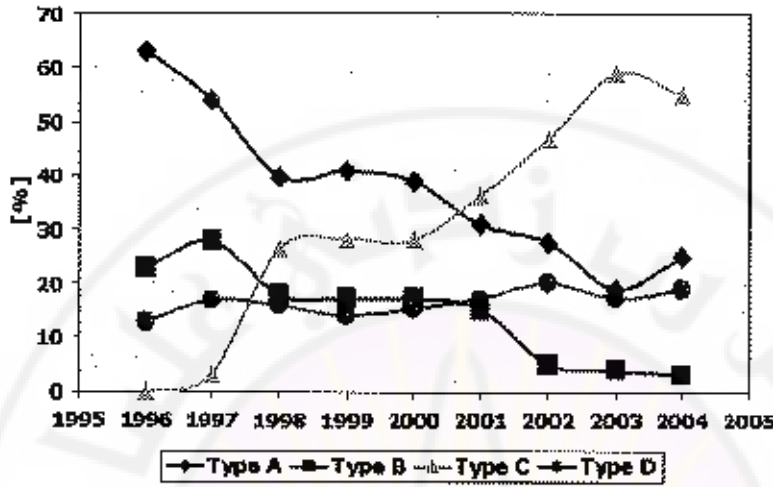
حيث: Ψ_k - زاوية فرق الصفحة لإدارة القصر .

V_n - متوسط سرعة الرياح السنوية.

S_n - الاستطاعة الظاهرية للعنفة الحركية.

S_k - الاستطاعة الظاهرية لإدارة القصر.

World Share of Wind Turbine Concepts



الشكل 9-33 : منحنى دراسة حصة المولد التحريضي مضاعف التغذية في السوق العالمية [11].

9-11 تأثير العنفات الربحية على الشبكة الكهربائية :

الجدول 9-5 يوضح مختلف تأثيرات العنفات الربحية على الشبكة الكهربائية وهي.

9-11-1 التغيير المفاجئ للتوتر :

و يكون إما بارتفاع القيمة العظمى لموجة التوتر (voltage swell over voltages)

أو انخفاض القيمة العظمى لموجة التوتر (voltage sag under voltages) .

وتنتج هذه الظاهرة عن دارات القصر أو فصل ووصل مجموعة من العنفات الربحية

أو التبديل بينها و تؤدي هذه الظاهرة إلى فصل بعض الأعمال الحساسة .

9-11-2 ظهور التوافقيات (Harmonics) :

تظهر التوافقيات و بشكل رئيسي للتوافقية الخامسة و التوافقية السابعة فسي بعض

الشبكات الضعيفة و خصوصاً عند ذروة الحمل مساءً . وقد تؤدي هذه الظاهرة إلى

فشل تشغيل بعض الدارات الإلكترونية .

وبدراسة خطط هذه الشركات و اتجاهاتها من حيث المولدات المستخدمة لديها و نظم القيادة من خلال الجدول 9-4 الذي يعتمد على دراسة تمت في نهاية عام 2006 نلاحظ

- إن جميع الشركات الخمس الكبرى تستخدم حالياً" نظام القيادة متغير السرعة من النموذج C أو D مع وجود علبة سرعة ما عدا شركة SIEMENS التي لا تزال تقدم نماذج بدون علبة سرعة و أحد هذه النماذج بدون نظام التحكم بالانحراف للشفرات و بسرعة ثابتة وتحديد النموذج A .

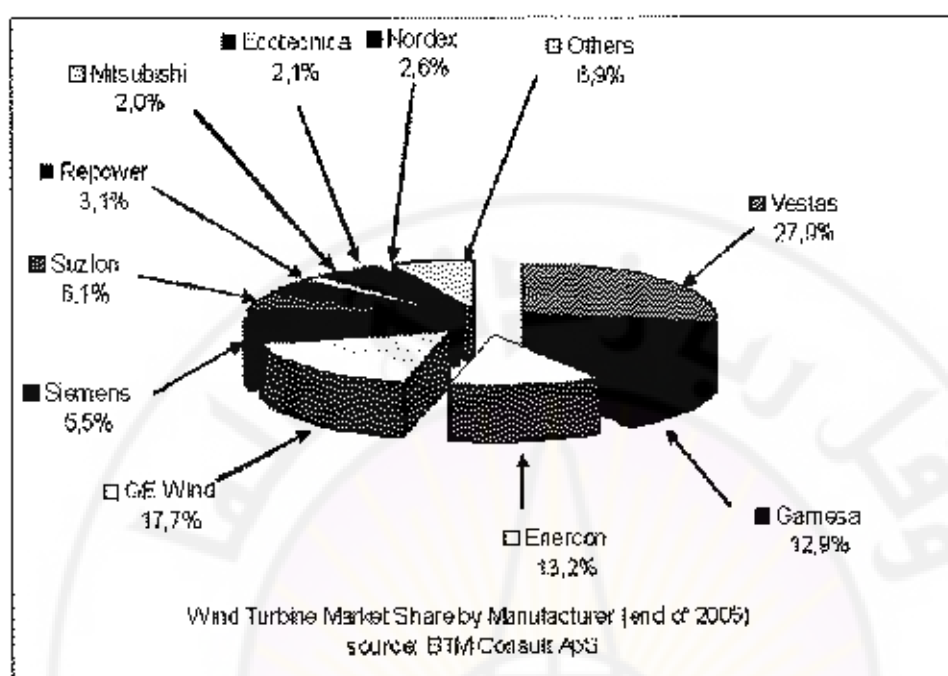
- جميع الشركات الخمس الكبرى تستخدم المولد مضاعف التغذية ما عدا شركة SIEMENS التي تستخدم مولدات تزامنية . وشركة ENERCON التي تستخدم المولد التحريضي ذو الدائر الملفوف و بدون علبة سرعة و إحدى نماذج شركة GE يستخدم مولد تزامني مع تصميم خاص لملف الدائر .

- بدراسة حصة المولد التحريضي مضاعف التغذية في السوق العالمية نلاحظ من خلال المنحني في الشكل 9-33 و الذي تم استنتاجه بناء" على دراسة شملت أكثر من 75% من العنفات المركبة حتى عام 2004 نلاحظ من المنحني تزايد انتشار النموذج C الذي كان يستخدم المولد التحريضي مضاعف التغذية من 2% من حصة السوق العالمي لعام 1997 للترداد إلى ما فوق 50% لعام 2004 . مع انخفاض نسبة استخدام النماذج A ,B,D خلال السنوات الأخيرة .

- مع ملاحظة أن الاستطاعات المركبة لعام 2006 للعنفة الواحدة تراوحت من 2MW حتى 4-5 MW . وما تزال في ازدياد مستمر مع تطور صناعتها والأبحاث العلمية في هذا المجال .

الجدول 9-4: إحصائية تطور استخدام المولد مضاعف التغذية في الأسواق حتى نهاية عام 2005 [11].

Manufacturer	WT rated power	Concept	Control	Generator
Vestas	V120-4.5 MW off-shore	Type C	Variable speed variable pitch gearbox	DFIG (WRIG) 4.5 MW/6 kV
	V90-3 MW	Type C	Variable speed variable pitch gearbox	DFIG (WRIG) 3 MW/1 kV
	V100-2.75 MW low wind sites	Type C	Variable speed variable pitch gearbox	DFIG (WRIG) 2.75 MW/1 kV
Ganessa	G90-2MW	Type C	Variable speed variable pitch gearbox	DFIG (WRIG) 2 MW/0.69 kV
Enercon	E112-4.5MW	Type D	Variable speed variable pitch Direct driven	Multipole WRSG 4.5MW/440V(?)
GE Wind	3.6 MW	Type C	Variable speed variable pitch gearbox	DFIG 3.6 MW/(?)
	2.x MW	Type D	Variable speed variable pitch gearbox	WRSG with full scale power converter
Siemens Power Generation	SWT 3.6-107	Type D	Variable speed variable pitch	SCIG with full scale power converter 3.6 MW/690V
	SWT 2.3-82 VS	Type D	Variable speed variable pitch	SCIG with full scale power converter 2.3 MW/690V
	SWT 2.3-82/93	Type A	Active stall	SCIG 2.3 MW/690V



الشكل 9-32: تطور استخدام المولد مضاعف التغذية في الأسواق [11].

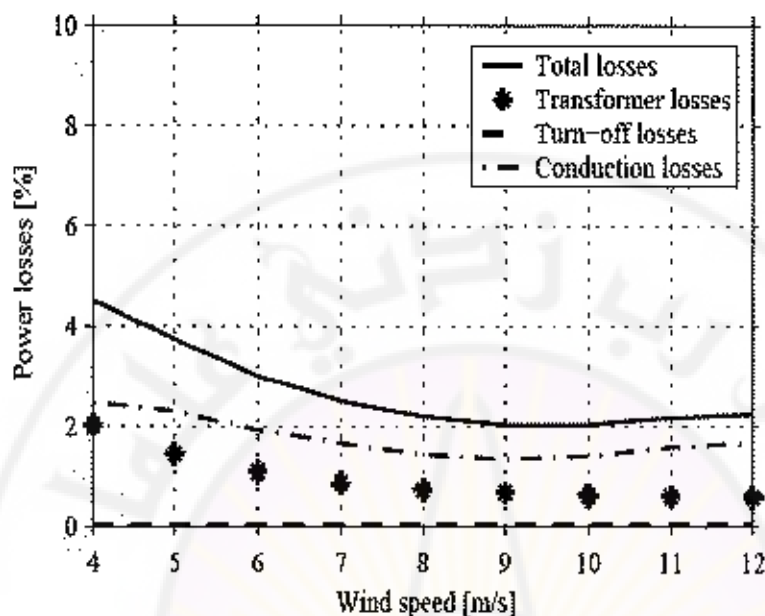
و هذه الإحصائية حتى نهاية عام 2005 ومن الملاحظ أن الشركة للدانمركية VESTAS لا تزال تتربع على أعلى حصة في السوق العالمية 28% لتترك المركز الثاني والثالث للشركات الألمانية ENERCON 13% و SUZLON 6% . كما أن الجدول 4-9 يوضح ذلك بصورة أخرى .

الجدول 9-3: مقارنة المردود للعنفات الريحية [19].

System	Type A	Type B	Type C	Type D
Variable	NO	NO	Yes	Yes
Control active power	Limited	Limited	Yes	Yes
Control reactive power	NO	NO	Yes	Yes
Short circuit (fault - active)	NO	NO	YES	Yes
Standby function	NO	NO	Yes+	Yes++
Flicker (sensitive)	Yes	Yes	NO	NO
Soft starter needed	Yes	Yes	NO	NO
Rolling capacity on grid	,Yes partly	,Yes partly	YES	YES
Reactive compensator (C)	Yes	Yes	NO	NO
Investment	++	++	+	0
Maintenance	++	++	0	+

9-10-8 تطور استخدام المولد مضاعف التغذية في الأسواق :

يمكن تحديد عشرة شركات عالمية تسيطر على سوق طاقة الرياح عالميا و هي موضحة بالشكل 9-32.



الشكل 9-31: منحنيات الضياعات الكلية الكهربائية للمحول ونظام القيادة الإلكترونية [19]

الخط المتصل يمثل الضياعات الكلية والخط على شكل النجوم يمثل ضياعات المحوثة والخط المتقطع يمثل ضياعات الفصل والخط المتقطع النقطي يمثل ضياعات التوصيل

9-10-7 مقارنة المردود للنفقات الريحية :

سوف يتم المقارنة بين الأنظمة المختلفة المدروسة سابقا من ناحية قيادة السرعة والاستطاعة وتيار القصر والتأثير على الشبكة بالإضافة للتكاليف والصيانة وغيرها من خلال الجدول 9-3.

ونلاحظ من هذه المقارنة تقارب الميزات للنموذج C والنموذج D ، مع أفضلية من ناحية التكاليف الاستثمارية للنموذج C ، وأفضلية للنموذج D من حيث الصيانة.

$$P_{\text{loss}} = 3(P_c + P_{s,T} + P_{s,D})$$

$$= 3 \left((V_{IGBT} + V_{sw,T} + V_{sw,D}) \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_{\text{rms}} + r_{IGBT} I_{\text{rms}}^2 \right). \quad (39-9)$$

وعلى اعتبار أنه يوجد نظام تقويم من جهة (GSC) ونظام تعريج من جهة الشبكة MSC تكون فإن قيمة الضياعات الكلية لنظام القيادة الإلكترونية تكون :

$$P_{\text{loss,converter}} = P_{\text{loss,GSC}} + P_{\text{loss,MSC}}. \quad (40-9)$$

الشكل 9-31 يوضح قيمة الضياعات الكلية الكهربائية للمحولة ونظام القيادة الإلكترونية وهي تتراوح من 2-4 % من الاستطاعة الاسمية وباستخدام المولد مضاعف التغذية Type C تنخفض هذه الضياعات إلى 0.8-1.5 % لأن نظام القيادة الإلكترونية للنظام DFIG يعمل فقط على 30% من الاستطاعة الكهربائية الاسمية.

9-10-6 الضياعات الكلية:

إن قيمة الضياعات الكلية هي مجموع الضياعات الأربعة التي يتم حسابها في الفقرات السابقة (ضياعات إيروديناميكية، ضياعات علبة السرعة، ضياعات المواد ، ضياعات نظام القيادة الإلكترونية) .

ومن جمع الضياعات السابقة، والمقارنة بين الأنظمة المختلفة ويسفتراض أن العنفسات تعمل عند نفس السرعة الأعظمية وعند متوسط سرعة رياح 6m/s على سبيل المثال. يتبين أن قيمة الضياعات المؤثرة بشكل رئيسي هي الضياعات العائدة لنظام القيادة الإلكترونية ، لذلك فإن المردود الأفضل يتحقق في نظام DFIG، وينسبة تتراوح من 1-2 % فقط.

حيث : I_{rms} : التيار المكافئ للشبكة أو المولد .

M_i : ثابت التمثيل .

ϕ : فرق الطور بين التوتر والتيار .

وبالاعتماد على جداول المصنعين:

ويافتراض $r_{IGBT} = r_{ce} \approx r_t$ و $V_{IGBT} = V_{ceo} \approx V_{to}$ يمكن تقريب العلاقات

35-9 و 36-9 و كتابتها على النحو التالي :

$$P_c = P_{c,T} + P_{c,D} = V_{IGBT} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_{rms} + r_{IGBT} I_{rms}^2 \quad (36-9)$$

ويمكن تمثيل ضياعات التبديل (الفصل والوصل) بشكل متناسب مع التيار حسب

المعادلات التالية :

$$P_{s,T} = (E_{on} + E_{off}) \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_{rms}}{I_{C,nom}} f_{sw} \approx V_{sw,T} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_{rms} \quad (37-9)$$

$$P_{s,D} = E_{rr} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_{rms}}{I_{C,nom}} f_{sw} \approx V_{sw,D} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_{rms} \quad (38-9)$$

وباعتبار $I_{C,nom}$ ($E_{on} + E_{off}$) و $I_{C,nom}$ / E_{rr} نسب كافية وباعتبار

القيم في الجدول (6-2) يمكن اعتبار ضياعات التوصيل هبوط في جهد ثابت

ومستقل عن التيار الاسمي. هذه الافتراضات تعتمد على اعتبار تردد التبديل

5 KHz

ويمكن تبسيط هذه المعادلات وتقريب مقبول إلى :

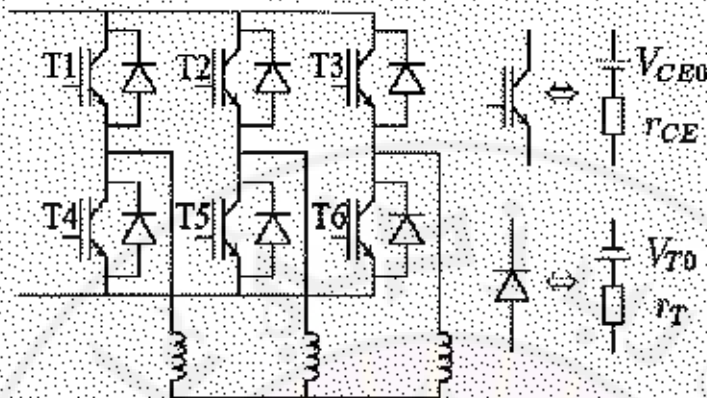


Fig. 3.4. Converter scheme.

الشكل 9-30: دائرة نموذجية تمبدلة القيادة الإلكترونية لمحرك تحريضي [18].

والشكل يوضح الدارة المكافئة لهذه العناصر .

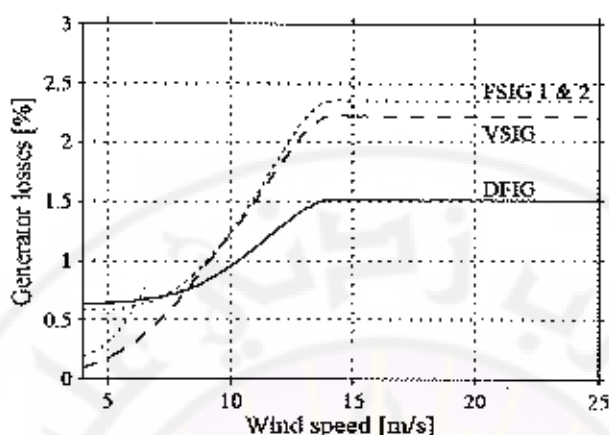
بشكل عام يمكن تقسيم الضياعات في العناصر الإلكترونية إلى نوعين :

- ضياعات الفصل عن العمل Turn-off وضياعات التشغيل وتسمى ضياعات التوصيل Conduction.

ويمكن الاعتماد على المعادلات التالية لتحديد ضياعات التوصيل مع الشبكة .

$$P_{c,T} = \frac{V_{CE0} I_{rms} \sqrt{2}}{\pi} + \frac{I_{rms} V_{CE0} m_i \cos(\phi)}{\sqrt{6}} + \frac{r_{CE} I_{rms}^2}{2} + \frac{r_{CE} I_{rms}^2 m_i}{\sqrt{3} \cos(\phi) 6\pi} - \frac{4 r_{CE} I_{rms}^2 m_i \cos(\phi)}{45\pi \sqrt{3}} \quad (34-9)$$

$$P_{c,D} = \frac{V_{T0} I_{rms} \sqrt{2}}{\pi} - \frac{I_{rms} V_{T0} m_i \cos(\phi)}{\sqrt{6}} + \frac{r_T I_{rms}^2}{2} - \frac{r_T I_{rms}^2 m_i}{\sqrt{3} \cos(\phi) 6\pi} + \frac{4 r_T I_{rms}^2 m_i \cos(\phi)}{45\pi \sqrt{3}} \quad (35-9)$$



الشكل 9-29: منحنيات الضياعات في المولدات الكهربائية حسب تغيرات سرعة الرياح [18].

ونلاحظ من المنحنيات أن الضياعات في النظام DFIG أعلى من الضياعات للنظام DFIG عند السرعات العالية ويعود السبب لتغير نسب التبديل في علبة السرعة .

9-10-5 ضياعات نظام القيادة الإلكترونية :

لقيادة المولد التحريضي عند سرعة متغيرة يتم استخدام معرج ثلاثي الطور ويتم التوصيل عن طريق تايرستور أو ترائستور مع ديود كما في الشكل 9-30.

ويكون المردود متقارب لجميع الأنظمة المدروسة عندما تكون سرعة الرياح قريبة من السرعة الاسمية للنظام

وهذا يعني أن النظام DFIG والنظام VSIG يفقدان ضياعات أقل من النظامين FSIG , 1. وبشكل عام فإن اختيار السرعة الاسمية للعنفه الريحية مهم جداً في الحصول على أفضل مردود .

ويتم اعتماد السرعة الاسمية التي يجب اختيار المولد المناسب للعمل عليها وبالتسلي النظام المناسب بعد دراسة الموقع بشكل جيد وتحديد المعدل السنوي لسرعة الرياح فيه.

9-10-3 الضياعات في علبه السرعة :

تعطى الضياعات في علبه السرعة بالعلاقة التالية :

$$P_{loss,GB} = \eta P_{low speed} + \xi P_{nom} \frac{\Omega_r}{\Omega_{r,nom}} \quad (33-9)$$

حيث η : ثابت الضياع للمسننات .

ξ : ثابت الضياع للاحتكاك .

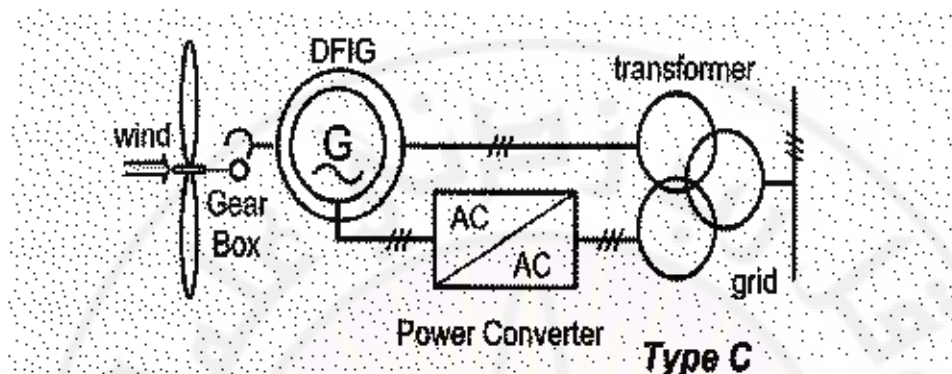
ومن أجل استطاعة 2 MW على سبيل المثال تعطى قيم لهذه الثوابت : $\eta = 0.02$, $\xi = 0.005$.

والضياعات مقاربية في الأنظمة التي تستخدم علبه سرعة, بينما تكون هذه السضياعات معدومة عندما يعمل النظام بدون علبه سرعة.

9-10-4 الضياعات في المولد :

بالاعتماد على المخططات الكهربائية المبينة في الأشكال 9-26 وحتى 9-28 وبإهمال هبوط التوتر على حلقات الانزلاق يبين الشكل 9-29 الضياعات في المولدات حسب تغيرات سرعة الرياح .

4- نظام متغير السرعة مع مولد مضاعف التغذية (Doubly Fed Induction Generator (DFIG) كما في الشكل 9-28 (Type C).



الشكل 9-28: نظام متغير السرعة مع مولد مضاعف التغذية [18].

وسوف يتم مقارنة الضياعات التالية :

- أ- الضياعات الإيروديناميكية .
- ب- الضياعات في علبة السرعة .
- ج- الضياعات في المولد .
- د- الضياعات في نظام القيادة الكهربائية .

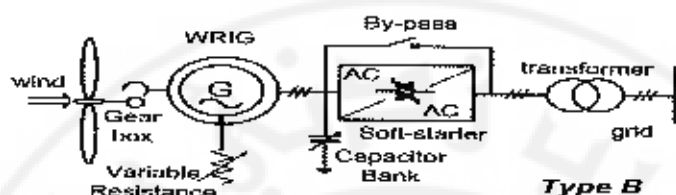
9-10-2 الضياعات الإيروديناميكية :

تعطى الاستطاعة الميكانيكية بالعلاقة:

$$P_{mech} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p (\lambda, B) \quad (9-32)$$

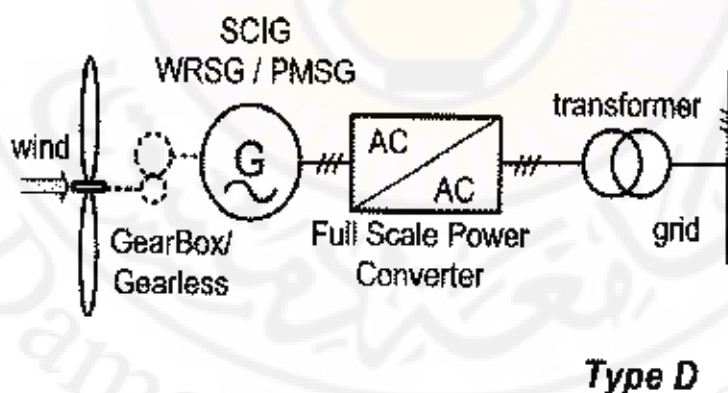
ومن المعادلة نلاحظ أن C_p معامل الاستطاعة الذي يتعلق بمحدد (λ) وهو بدوره متعلق بالسرعة الخطية للشفرة، وبعبارة أخرى متعلق بقطر الدائر . أما المحدد الآخر (B) فهو يتعلق بزاوية الانحراف للشفرات وهذا يعني أنه عند السرعات القليلة يكون المردود ضعيفاً في الأنظمة التي تعمل على سرعات ثابتة .

2- نظام السرعة المتغيرة بشكل محدود باستخدام مقاومات متغيرة مربوطة مع دائرة مولد تحريضي ذو دائرة ملفوف Wound Rotor Induction Generator (WRIG) كما في الشكل 9-26 (Type B).



الشكل 9-26: نظام السرعة المتغيرة بشكل محدود باستخدام مقاومات متغيرة مربوطة مع دائرة مولد تحريضي ذو دائرة ملفوف (WRIG) [18].

3- نظام متغير السرعة مع نظم قيادة إلكترونية SCIG - PMSG - WRSG. أي يمكن أن يكون المولد تحريضي أو تزامني ذو مغناطيس دائم Permanent Magnet Synchronous Generator أو تزامني مع ملف تهييج كما في الشكل 9-27 (Type D).



الشكل 9-27: نظام متغير السرعة مع نظام قيادة إلكترونية كامل SCIG - PMSG - WRSG [18].

1- نظام تبديل بمولد تزامني ذو مغناطيس دائم وبدون علبة سرعة. ويتم ربط ملف الثابت عن طريق حلقة تبديل الكترونية AC / AC. ولا يمكن لهذا النظام التحكم بالاستطاعة الردية. أما مجال القيادة الكهربائية للسرعة :

$$n = (0.8 \div 1.2) 60f/P$$

3-9-9 نتائج مقارنة أنظمة التبديل :

من مقارنة أنظمة التبديل المستخدمة و المشروحة سابقاً نلاحظ أن نظام القيادة باستخدام مولد تحريضي مضاعف التغذية يملك أوسع مجال للقيادة الكهربائية للسرعة بالمقارنة مع جميع الأنظمة الأخرى وقد وصلت التصميمات الحديثة إلى حدود:

$$n = (0.6 \div 1.4) 60f/P$$

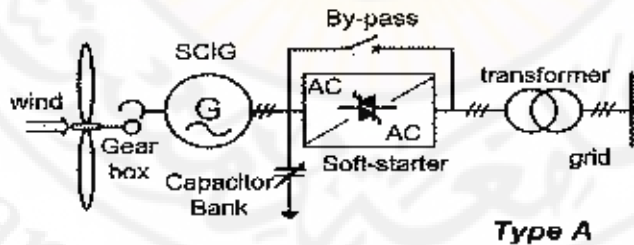
بالاستطاعة الفعلية المتبادلة مع الشبكة الكهربائية.

10-9 المردود في العنقات الريحية :

1-10-9 تحديد الضياعات :

الدراسة ستتم على أربعة أنظمة تبديل مستخدمة في طاقة الرياح وهي :

1- نظام السرعة الثابتة بمولد تحريضي ذو قفص سنجابي مربوط مباشرة مع الشبكة (SCIG) Squirrel Cage Induction Generator كما في الشكل 25-9 (Type A).



الشكل 25-9 : نظام السرعة الثابتة بمولد تحريضي ذو قفص سنجابي مربوط مباشرة مع الشبكة (SCIG) [18].

بنظام تعديل عرض النبضة و يعمل على نقل الاستطاعة من و إلى الشبكة و يمكن من خلاله التحكم بالاستطاعة الردية.

$$n = (0.6 \div 1.4) 60 f/P \quad \text{مجال القيادة الكهربائية للسرعة:}$$

9-2 نظام التبديل الذي يعمل بمولد تزاملي :

g- نظام تبديل بمولد تزاملي بتهييج خارجي مع عتبة سرعة. يتم ربط ملف الثابت مباشرة مع الشبكة بينما يتغذى الدائر من الشبكة أيضا" عن طريق مقوم ديودي. هذا النظام يستطيع التحكم بالاستطاعة الردية و لكن لا يمكنه العمل إلا عند سرعة ثابتة و لا يمكن قيادة السرعة كهربائيا" $n = 60f/P$.

h - نظام تبديل بمولد تزاملي بتهييج خارجي مع عتبة سرعة يتم ربط ملف الثابت مباشرة مع شبكة تيار مستمر DC مع مقوم، و يتم تغذية الدائر عبر مقوم ديودي . يستخدم هذا النظام في حال الربط مع شبكة DC و مجال القيادة الكهربائية للسرعة $n = (0.5 \div 1.2) f/p$.

i - نظام تبديل بمولد تزاملي بتهييج خارجي مع عتبة سرعة يتم ربط ملف الثابت مع الشبكة عبر مبدلة الكترونية. يستخدم نظام تعديل عرض النبضة للقيادة و يتم تغذية الدائر بواسطة مقوم ديودي. يمكن من خلال هذا النظام التحكم بالاستطاعة الردية و العمل في مجال قيادة كهربائية للسرعة: $n = (0.5 \div 1.2) 60f/P$

j- نظام تبديل بمولد تزاملي بنفس مواصفات النظام في الفقرة i و لكن بدون عتبة سرعة. وبالتالي يدور بسرعة الدوا. ويصمم دائر المولد التزامنسي بعدد كبير من الأقطاب.

k - نظام تبديل بمولد تزاملي ذو مغناطيس دائم، وبدون عتبة سرعة. ويتم ربط ملف الثابت عن طريق مبدلة اكترونية و يقاد بنظام تعديل عرض النبضة و يستطيع هذا النظام التحكم بالاستطاعة الردية و العمل في مجال قيادة كهربائية للسرعة: $n = (0.6 \div 1.2) 60f/P$

a - نظام تبديل بمولد تحريضي ذو قفص سنجابي مربوط بشكل مباشر مع الشبكة و مع الشفرات بواسطة علبة سرعة . هذا النظام يستهلك للاستطاعة الردية و مجال التحكم الكهربائي هو فقط في حدود التحكم بالانزلاق $(-0.08 \div 0)$ و السرعة $n = (1-s)f/p$. ويصلح للعمل مع شبكة كهربائية ضعيفة وهو طبعاً مستهلك للاستطاعة الردية.

b - نظام تبديل بمولد تحريضي ذو قفص سنجابي مع علبة سرعة و مربوط مع الشبكة من خلال مبدلة الكترونية . وهذا النظام يستهلك الاستطاعة الردية . و يمكن تخفيض هذه الاستطاعة بإضافة مجموعة مكثفات على التوازي مع ملف الثابت.

مجال التحكم الكهربائي للسرعة يتراوح: $n = (0.8 \div 1.2) 60 f/P$

c - نظام تبديل بمولد تحريضي ذو قفص سنجابي مع علبة سرعة و مربوط مع الشبكة من خلال مبدلة الكترونية مع قيادة بطريقة تعديل عرض النبضة، النظام يستهلك الاستطاعة الردية.

مجال التحكم الكهربائي بالسرعة يتراوح: $n = (0.8 \div 1.2) 60 f/P$

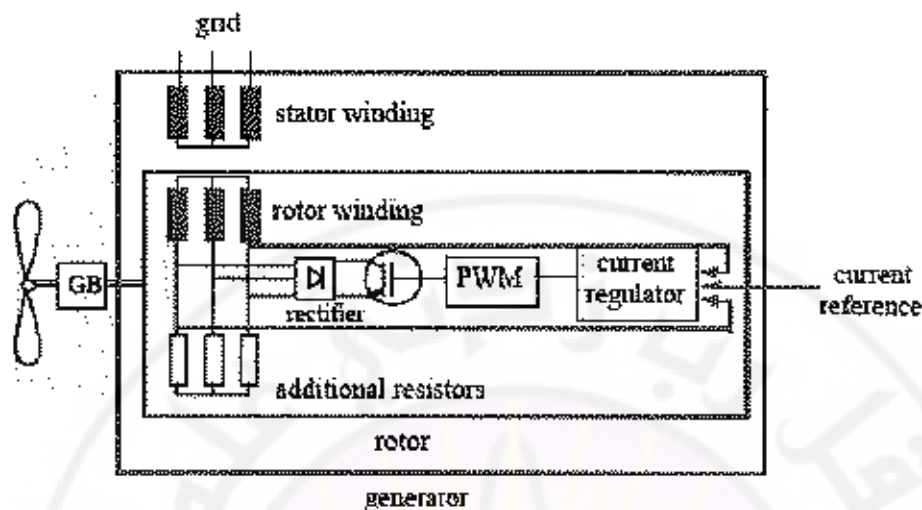
d - نظام تبديل بمولد تحريضي ذو دائر ملفوف يتم ربط ملف الثابت بشكل مباشر مع الشبكة و يربط الدائر إلى مجموعة مقاومات و مقطع ثايرستوري لقيادة الانزلاق الديناميكي . هذا النظام يستهلك الاستطاعة الردية و مجال التحكم الكهربائي بالسرعة

يتراوح: $n = (1-S) f/P$ حيث: $S = 0 \div 0.3$

e - نظام تبديل بمولد تحريضي ذو دائر ملفوف مع علبة سرعة، ويتم ربط ملف الثابت بشكل مباشر مع الشبكة و يربط الدائر مع الشبكة بنظام تبديل الكتروني يعمل على قيادة الانزلاق ونقل الاستطاعة باتجاه الشبكة فقط و بالتالي فهو مستهلك للاستطاعة الردية ولا يمكن العمل تحت سرعة التزامن .

و يكون مجال القيادة الكهربائية للسرعة: $n = (1 \div 1.3) 60 f/P$.

f - نظام تبديل بمولد تحريضي ذو دائر ملفوف (مضاعف التغذية) يتم فيه ربط ملف الثابت مباشرة للشبكة و الدائر يربط مع الشبكة عن طريق مبدلة الكترونية يتم قيادته



الشكل 9-24: شكل ربط المولد التحريضي مباشرة مع الشبكة وربط الدوائر إلى مجموعة مقاومات إضافية عن طريق دائرة إلكترونية لقيادة تيار الدوائر [2].

وتجدر الإشارة إلى أن المبدلات الإلكترونية في نظم التوليد الكهربائي التي جرى استعراضها في هذه الفقرة والفقرة السابقة ليست سوى جزءاً من موضوع كبير ويعتبر علماً قائماً بذاته ويدرس كمقرر مستقل .

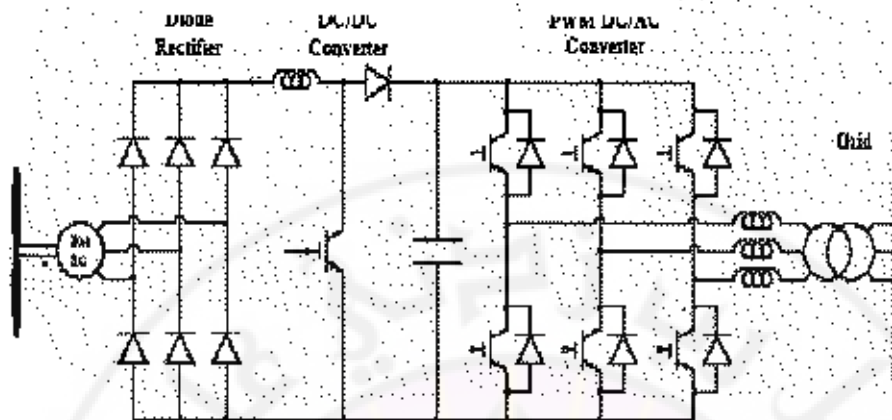
9-9 مقارنة مجال التحكم لأنظمة التبديل :

بالعودة للشكل 9-14 يمكن تقسيم أنظمة التبديل إلى قسمين رئيسيين الأول يعمل مع مولد تحريضي و الثاني يعمل مع مولد تزامني .

وقد تم استعراض هذه الأنظمة في الفقرة 9-5. وبعد الدراسة التفصيلية لعمل العنفات الريحية مع مختلف هذه النظم في الفقرات التالية لهذه الفقرة سنستعرض فيما يلي مجالات التحكم لمختلف التصنيفات التي وردت في الشكل 9-14.

9-9-1 نظام التبديل الذي يعمل مع مولد تحريضي :

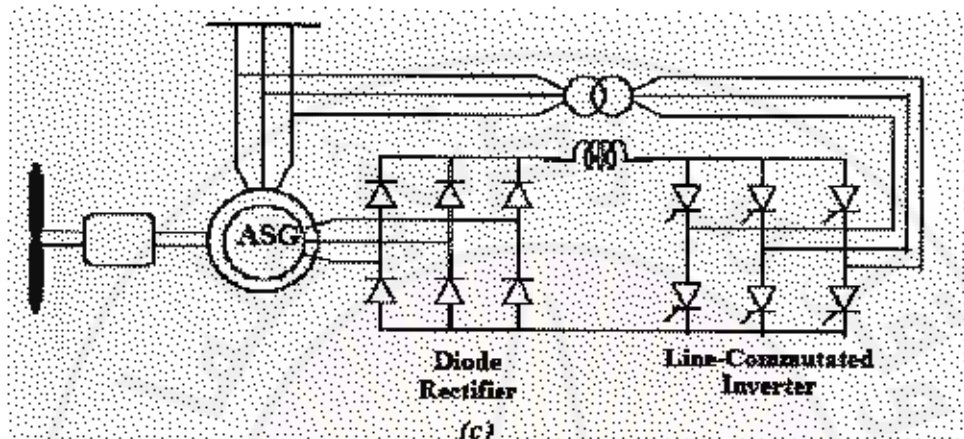
هناك عدة نماذج موجودة حالياً في الأسواق سوف يتم استعراضها .



الشكل 9-23 نظام توليد كهربائي لعنفة ريحية باستخدام مولد تزامني ذو مغناطيس دائم وبدون علبة سرعة [2].

الشكل 9-24 يظهر شكل آخر لربط المولد التحريضي مباشرة مع الشبكة وربط الدائر إلى مجموعة مقاومات مقادة عن طريق دائرة الكترونية لقيادة تيار الدائر. هذه الطريقة مفضلة لبعض المصنعين لبساطتها ولكنها لا تتيح تغيير المبرعة أكثر من 10% وبالتالي لا يمكن الحصول على أكبر استطاعة ممكنة على الخرج، ولقد حقق المولد التحريضي مضاعف التغذية انتشاراً واسعاً في الأسواق العالمية.

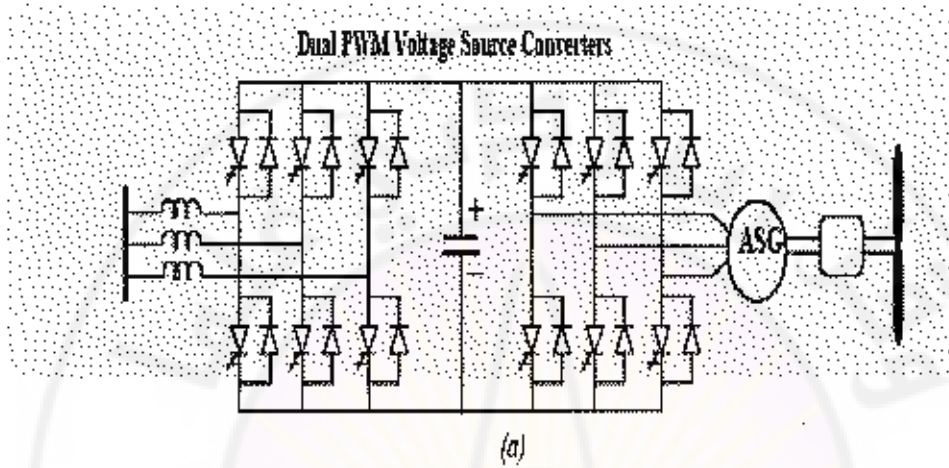
والشكل C22-9 يظهر مولداً تحريضياً ذو دوائر ملفوف و جسر تقويم من الديودات مربوط مع دائرة المولد و معرج ثايرستوري ذو تبديل خطي من جهة الشبكة.



الشكل C 22-9: مولد تحريضي ذو دوائر ملفوف و جسر تقويم من الديودات مربوط مع دائرة المولد و معرج ثايرستوري ذو تبديل خطي من جهة الشبكة [2].

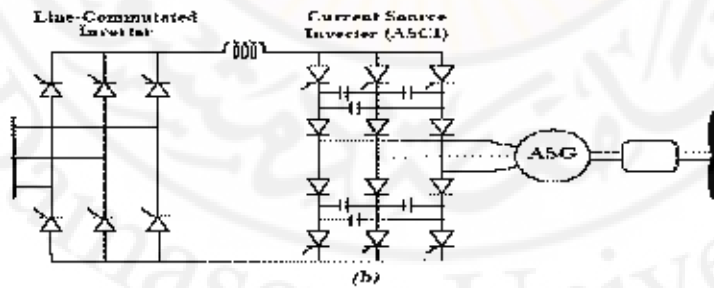
المولد التزامني المستخدم في الدارة 23-9 من النوع الدائم المغناطيسية ويسمح بإلغاء عتبة السرعة مع تصميم متعدد الأقطاب وخرج المولد يربط مع مقوم من الديودات أما من جهة الشبكة فيستخدم معرج ثايرستور وعناصر IGBT.

يعتمد على معرج ثوتر متعاقب التبديل والعناصر الالكترونية التي تظهر في الشكل هي GTOs وأصبحت اليوم أيضاً عناصر IGBTs متاحة حتى 1 MW .



الشكل 9-22 a: مولد تحريضي ذو قفص سنجابي يربط مع الشبكة عن طريق جسر مضاعف [2].

أما الشكل 9-22 b فيظهر أيضاً مولد تحريضي ذو قفص سنجابي مع معرج تيار ذاتي التبديل من جهة المولد. أما من جهة الشبكة فيستخدم معرج ثايرستوري ذو تبديل خطي.



الشكل 9-22 b : مولد تحريضي ذو قفص سنجابي مع معرج تيار ذاتي التبديل من جهة المولد أما من جهة الشبكة فيستخدم معرج ثايرستوري ذو تبديل خطي [2].

9-7-2-2 المعرج ذو التبديل القسري:

في هذه المعرجات يمكننا الاختيار بشكل حر متى يفتح العنصر الإلكتروني و متى يغلق و هذا يعني أن المعرج يمكنه أن يضع الأطوار الثلاثة للثوتر و إذا كان المعرج موصول للشبكة فإنه يمكننا اختيار عامل الاستطاعة و اتجاه تدفق الاستطاعة . عادة يتم العمل عند أعلى عامل استطاعة ممكن و باستخدام تقنية النبضات العريضة (PWM) فإن التوافقيات ذات التردد المنخفض سوف تلغى و التوافقيات الأولى سوف يكون ترددها قريب من تردد الفصل للمعرج و هو عادة يتراوح بين 5 K HZ - 10 عند استخدام الترانستور IGBT أما في حال استخدام الثايرستور ذو بوابة قطع (GTO) فإن تردد القطع الأعظم يكون حوالي 1KHZ إن مزايا استخدام الثايرستور (GTO) هي أنه يتحمل استطاعة أكبر من الثايرستور IGBT و لكنه يحتاج إلى دائرة تحكم أكثر تعقيداً أو بالتالي مردود المعرج يكون أقل .

إن المصنعين يختارون العناصر IGBT عندما نستطيع تحمل الاستطاعة المطلوب تمريرها .

إن صناعة IGBT تتطور بشكل سريع و تنخفض أسعارها أيضاً و الشكل 9-21 يوضح دائرة المعرج .

إن المعرجات ذات التبديل القسري تحتاج لملف بينها و بين الشبكة لكي تعمل و بالنسبة للتوافقيات ذات التردد المنخفض فيمكن إلغائها باستخدام تقنية PWM أما التوافقيات ذات التردد المرتفع فيمكن إلغائها باستخدام مرشح صغير بالنتيجة فإن المرشح المستخدم أصغر و أقل كلفة من المرشح المستخدم في المعرجات الثايرستورية .

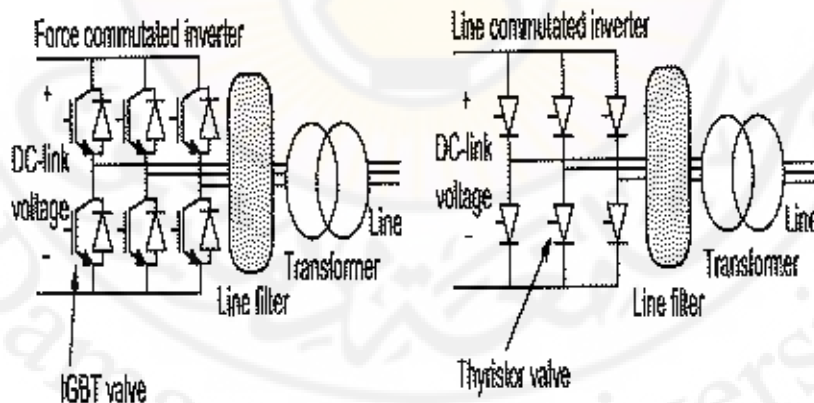
9-8 نماذج لربط المولدات مع الشبكة:

الشكل 9-22 يظهر طرق ربط المولدات التحريضية مع الشبكة حيث يظهر في الشكل 9-22 a مولد تحريضي ذو قفص سنجابي يربط مع الشبكة عن طريق جسر مضاعف

ويكون التيار في الشبكة متناسباً مع التيار في جهة التوتر المستمر لكن معامل الاستطاعة يكون مختلفاً ويكون مساوياً أو أقل من 0.9 من أجل المعرجات الثايرستورية.

هذا يعني أن المعرج الثايرستوري يستهلك طاقة ردية، وهذا المعرج معروف جداً و تقنياته ناضجة أي أن تكاليفه لا يتوقع أن تنخفض في المستقبل . كما أنه يمكن للثايرستور التعرض للحمل الزائد دون أن ينهار و المعرج الثايرستوري متاح للعمل على استطاعات كبيرة للعتفات الريحية حتى 5MW، ولحماية المعرج الثايرستوري في حال فصل الشبكة فإننا بحاجة لتركيب دائرة فصل خاصة .

تحتاج دائرة التحكم بالمعرج لزمن حتى 3.3ms و عرض نبضة 20 HZ تقريباً .
لن المعرج الثايرستوري ينتج تيارات توافقية غير التيار الأساسي و هذه التيارات التوافقية تتحول إلى توترات توافقية في الشبكة. ويمكن تقليل هذه التوافقيات بواسطة المرشحات . عادة تكون الضياعات أكبر عند التوافقيات ذات الترددات المنخفضة. ولإلغاء هذه التوافقيات يحتاج هذا المعرج إلى مرشح أكبر .
في الواقع لا يتم إلغاء جميع التوافقيات و يكفي عادة حذف التوافقيات الخامسة و السابعة. والمرشحات تولد طاقة ردية ما يزيد من معامل الاستطاعة للمعرج .



الشكل 9-21 المعرج ذو التبديل الخطي والمعرج ذو التبديل القسري [2].

9-7-2 المعرجات (Inverters):

المعرج عبارة عن جهاز ساكن يقوم بتزويدنا بتيار متناوب يتغير بشكل دوري انطلاقاً من منبع تيار مستمر وبشكل مستقل عن الشبكة وهناك ثلاثة أنواع من المعرجات :

1- معرجات تيار (CSI) current inverter تعتمد على منبع تيار ثابت.

2- معرجات توتر (VSI) voltage inverter تعتمد على منبع توتر ثابت.

3- معرجات نبضية.

يمكن قيادة جسور التعرّيج بنظامين:

--- تعديل عرض النبضة (pulse-width-modulation(PWM).

--- الموجة المربعة (square-wave-VSI).

إن الفرق الأساسي بين معرجات التيار والتوتر يكمن فيم يلي:

إن معرجات التوتر (VSI) يجب أن يكون دخلها من منبع توتر مستمر (DC-

voltage source) ونحصل عليه من وضع مكثف تفرعي مع منبع التوتر المستمر

لأما معرجات التيار فإن دخلها يكون من منبع تيار مستمر (DC-current source)

ونحصل عليه من إضافة ملف على التسلسل من منبع التيار المستمر.

يمكن أن نقارن أيضاً بين نوعين من المعرجات: معرج ذو تبديل خطي ومعرج ذو

تبديل توتر قصري. وهذان النوعان يحتاجان لنوعين مختلفين من المرشحات Filters.

9-7-2-1 المعرج ذو التبديل الخطي:

الاسم الآخر لهذا المعرج هو المعرج الثايرستوري ويجب ربطه مع الشبكة

حتى يعمل وهو موضح في الشكل 9-21.

7-9 استعراض مختصر للمبدلات الالكترونية المستخدمة في العنفات الريحية:

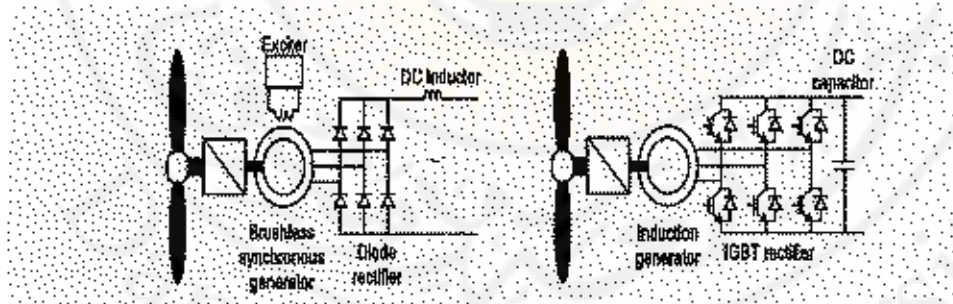
تتألف المبدلات الالكترونية في نظم التوليد الكهربائي للعنفات الريحية من مقومات و معرجات والتي سنستعرض عملها بشكل مختصر فيما يلي:

1-7-9 المقومات (Rectifiers):

إن المقوم المؤلف من أنصاف النواقل أو ما يسمى بالديودات شائع جداً بسبب بساطته وتكاليفه الأقل. لكن توليده تيار غير جيبي في المولد وعدم قدرته على قيادة التوتر أو التيار يجعل استخدامه محصوراً في المولدات التي يمكنها القيام بقيادة التوتر ويقوم المعرج بقيادة التيار أما عدم جيبيية تيار المولد فيؤدي إلى ضياعات في المولد بحدود 5% وبنفس النسبة تكون ضياعات التبدل للديودات لأنها تؤدي لهبوط التوتر بحوالي 5-10%. وبجميع الأحوال فإن ثابت المولد التزامني لا يحتاج لاستطاعة ظاهرية أعلى من مثيله في المولد التحريضي عند نفس الاستطاعة الفعلية.

النوع الثاني الشائع من المقومات هو المقوم ذو التبدل القسري ويمكن أن يستخدم عدة أنواع من العناصر الالكترونية (ثايرستور أو ترانزستور) لكنه وجد أن الخيار الأفضل هو استخدام الترانزستور ثنائي القطبية ذو البوابة المعزولة (IGBT).

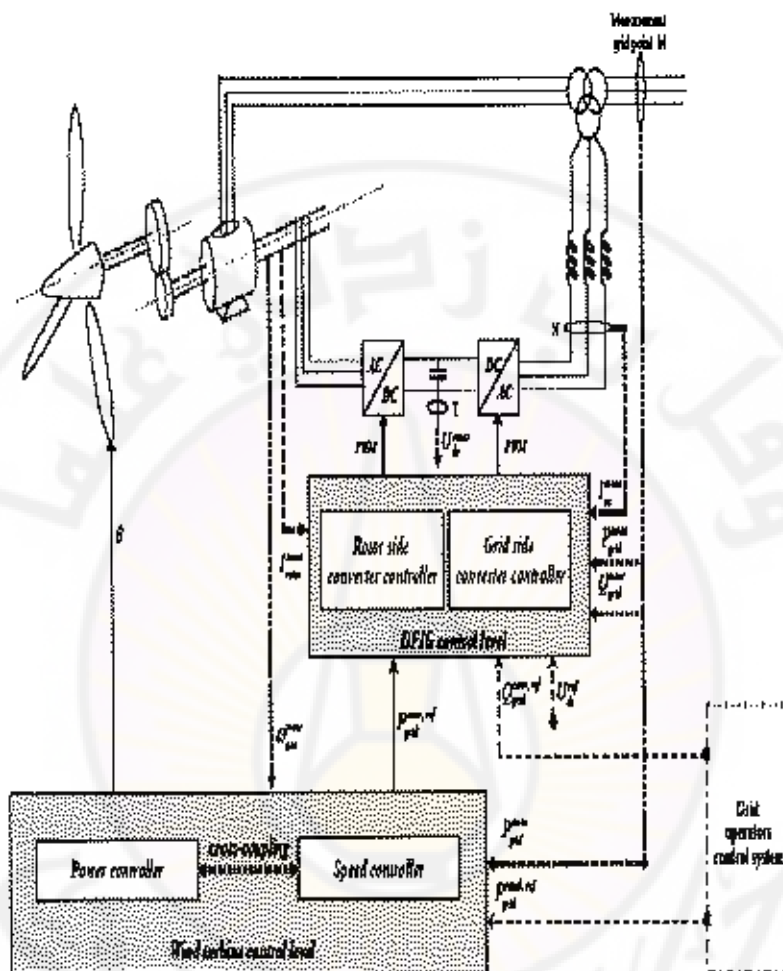
يستطيع هذا المقوم قيادة تيار وتوتر المولد والشكل 9-20 يوضح المخطط الكهربائي لهذين النوعين من المقومات وهما الأكثر استخداماً لتقويم تيار المولد التزامني والمولد التحريضي في العنفات الريحية .



الشكل 9-20 المقومات الأكثر استخداماً لتقويم تيار المولد التزامني والمولد التحريضي في العنفات الريحية [7].

- الاستطاعة الفعلية P_{grid}^{meas} و الاستطاعة الردية Q_{grid}^{mcas} المتبادلة مع الشبكة عند النقطة M.

- التوتر المستمر على خرج المبدل : (U_{dc}^{mean}) .
- تيار المبدلة من جهة الشبكة عند النقطة N (I_{ac}^{mcas}) .
- تيار الدائر (I_{rotor}^{mcas}) .
- السرعة الزاوية للدائر (W_{gen}^{mcas}) .
- أما الإشارات المرجعية التي يتم تزويدها لنظام القيادة فهي :
 - الاستطاعة الفعلية P_{grid}^{meas} و يتم الحصول عليها من نظام قيادة العنفة الذي بدوره يعتمد على الاستطاعة المقاسة عند النقطة في الشبكة و سرعة التوليد و سرعة الرياح.
 - الاستطاعة الردية المرجعية $Q_{grid}^{conv,ref}$ ويتم تحديدها من قبل مشغل الشبكة حسب حاجة الشبكة للاستطاعة الردية.
- (في حال الشبكات الضعيفة أو في حال حصول عطل في الشبكة) فيمكن للمولد التحريضي أن يقدم استطاعة ردية للشبكة .
- التوتر المستمر المرجعي U_{dc}^{meas} يعتمد على حجم المبدلة التايستورية و نسبة جهد الدائر للثابت .
- زاوية انحراف شفرات العنفة يتم توليدها من نظام قيادة العنفة بالاعتماد على سرعة الرياح و الاستطاعة الاسمية للعنفة $P_{grid}^{conv,ref}$ و الاستطاعة المقدمة للشبكة P_{grid}^{mcas} .
- وهكذا فإن نظام القيادة يحافظ و بشكل مستمر على سرعة مولد فادرة علسي توليد أقصى استطاعة ممكنة وذلك عندما تكون سرعة الرياح أقل من السرعة الاسمية أما عندما تكون سرعة الرياح عالية فتكون القيادة محافظة على مستوى التوليد من خلال التحكم بزاوية انحراف الشفرات للحصول على الاستطاعة الاسمية للعنفة الريحية .



الشكل 9-18: نظام القيادة لمولد مضاعف التغذية يعمل بسرعة رياح متغيرة [4].

9-6-4 الإشارات المقاسة والإشارات المرجعية لنظام القيادة:

من الشكل 9-19 يمكن أن نلاحظ ثلاثة مستويات من القيادة فالخط المضاعف المنقط يدل على عمل الإشارات المقاسة، و الخط المفرد المنقط يدل على عمل الإشارات المرجعية، أما الخط المتصل فهو يحمل خرج إشارة قيادية والقيم المقاسة و التي يحتاج إليها نظام القيادة هي:

والجدول 2-9 يبين القيم المميزة النموذجية لبعض المولدات لهذه الآلة عند عدد أزواج أقطاب np .

الجدول 2-9 يبين القيم المميزة النموذجية لبعض المولدات لهذه الآلة عند عدد أزواج أقطاب np [12].

		Small Machine 4 kW	Medium Machine 100 kW	Large Machine 800 kW
Stator and rotor resistance	R_s and R_r	0.04	0.01	0.01
Leakage inductance	$L_{s\lambda} + L_{r\lambda} \approx L_\sigma$	0.2	0.3	0.3
Magnetizing inductance	$L_m \approx L_{Ml}$	2.0	3.5	4.0

9-6-3 نظام قيادة المولد التحريضي مضاعف التغذية عند سرعة متغيرة للرياح:

إن الهدف من نظام القيادة هو قيادة الاستطاعة الفعلية و الردية المتبادلة بين المولد و الشبكة بالإضافة لتحديد الاستطاعة العليا عند السرعات العالية و الحصول على الاستطاعة المثلى عند السرعات تحت السرعة الاسمية .

نظام القيادة يتألف من ثلاثة أنظمة فرعية - نظام إروديناميكي - نظام قيادة ميكانيكي - نظام قيادة كهربائي .

ويختلف زمن الاستجابة لهذه الأنظمة فنظام القيادة الكهربائي مثلاً هو أسرع استجابة من النظام الميكانيكي مما يؤدي إلى الحاجة لأنظمة قيادة ثانوية.

و الشكل 9-18 يظهر نظام القيادة لمولد مضاعف التغذية يعمل بسرعة رياح متغيرة المؤلف من نظامين رئيسيين مرتبطين مع بعضهما بشكل وثيق .

وكما هو مبين في الشكل 9-18 يتألف نظام قيادة المولد من مجموعتي تبديل ثايرستوريتين واحدة من جهة الدائر و الأخرى من جهة الشبكة و يتم قيادتهما باستخدام نظام تعديل عرض النبضة (PWM)

ويمكن حساب الإنزلاق من القانون :

$$S = \frac{W1 - Wr}{w1} = \frac{W2}{W1} \quad (23-9)$$

حيث Wr : سرعة الدائر و $W2$ سرعة تردد الانزلاق.

وإذا ما تم تحديد التدفق المغناطيسي في الفجوة الهوائية بين الثابت و الدائر حسب المعادلات:

$$\Psi_m = L_m(I_s + I_r + I_{Rm}) \quad (24-9)$$

$$\Psi_s = L_{s\lambda}I_s + L_m(I_s + I_r + I_{Rm}) = L_{s\lambda}I_s + \Psi_m \quad (25-9)$$

$$\Psi_r = L_{r\lambda}I_r + L_m(I_s + I_r + I_{Rm}) = L_{r\lambda}I_r + \Psi_m \quad (26-9)$$

فإن المعادلات المكافئة يمكن أن تكتب على النحو التالي :

$$V_s = R_s I_s + j\omega_1 \Psi_s \quad (27-9)$$

$$\frac{V_r}{s} = \frac{R_r}{s} I_r + j\omega_1 \Psi_r \quad (28-9)$$

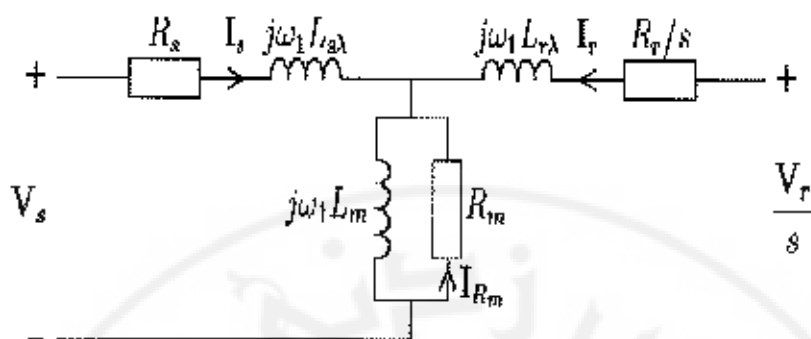
$$0 = R_m I_{Rm} + j\omega_1 \Psi_m \quad (29-9)$$

وضياعات الاستطاعة تعطى بالـ

$$P_{loss} = 3 (R_s |I_s|^2 + R_r |I_r|^2 + R_m |I_{Rm}|^2) \quad (30-9)$$

ويمكن التعبير عن العزم الكهروميكانيكي بالمعادلة :

$$T_c = 3n_p \text{Im} [\Psi_m I_r^*] = 3n_p \text{Im} [\Psi_r I_r^*] \quad (31-9)$$



الشكل 9-17: الدارة المكافئة للمولد مضاعف التغذية متضمنة الضياعات

المغناطيسية [11].

$$V_s = R_s I_s + j\omega_1 L_{s\lambda} I_s + j\omega_1 L_m (I_s + I_r + I_{R_m}) \quad (20-9)$$

$$\frac{V_r}{s} = \frac{R_r}{s} I_r + j\omega_1 L_{r\lambda} I_r + j\omega_1 L_m (I_s + I_r + I_{R_m}) \quad (21-9)$$

$$0 = R_m I_{R_m} + j\omega_1 L_m (I_s + I_r + I_{R_m}) \quad (22-9)$$

حيث :

VS	توتر الثابت	RS	مقاومة الثابت
Vr	توتر الدائر	Rr	مقاومة الدائر
Is	تيار الثابت	Rm	المقاومة التحريضية
Ir	تيار الدائر	Lsλ	التسريب التحريض في الثابت
Irm	تيار الممانعة المغناطيسية	Lrλ	التسريب التحريض في الدائر
S	الانزلاق	Lm	المفاعلة التحريضية

وكما في الآلة التزامنية، ففي حالة المولد ذي التغذية المضاعفة يمكن العمل عند حالة تحت التهيج (تحت الإشباع) و فوق الإشباع و العمل الطبيعي. وهذا يسمح بتغيير سرعة دوران العنفة و الآلة.

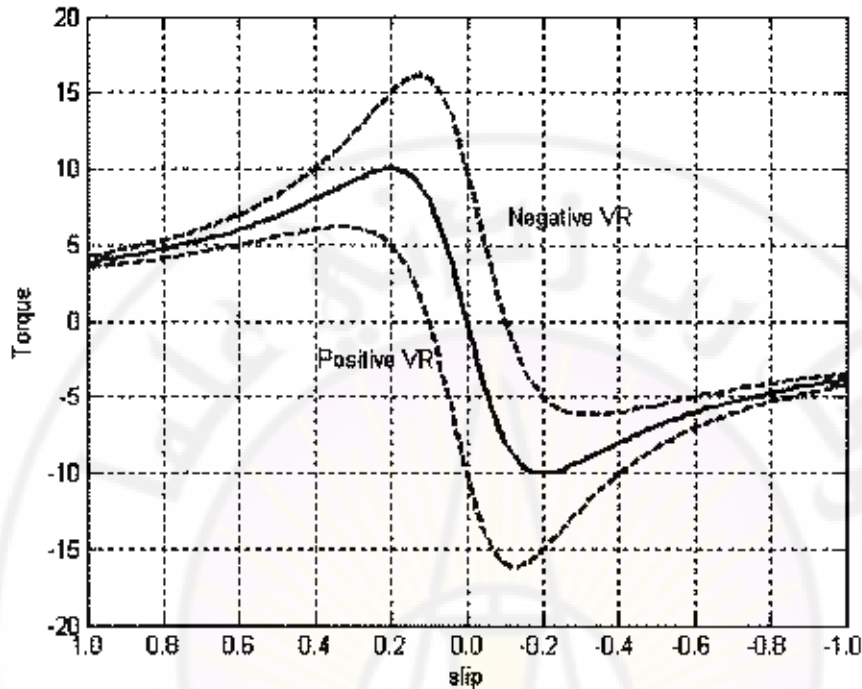
وفي هذه الحالة تؤمن المبدلة الالكترونية التغذية الإضافية بالتردد أو تحصل على التغذية من ملف الدائر المتصلة به عبر حلقات الانزلاق وبالتالي تقوم بقيادة العزم و السرعة للمولد بالإضافة إلى التحكم بمعامل الاستطاعة على أطراف الثابت بينما يؤمن المعرج الموصول مع الشبكة حقن قدرة كهربائية من ملف الثابت ذات تسوتر وتردد ثابتين .

وباستخدام المعرجات ذات عناصر IGBT في دارة ملف الدائر يمكن تخفيض نسبة توليد التوافقيات في الشبكة ، و العمل عند أحمال تحريضية و سعوية للشبكة و عليه فإن العنفات الريحية باستخدام المولدات مضاعفة التغذية تستطيع وخاصة في الشبكات الضعيفة تقديم مجال مميز للربط السعوي.

كما أن استخدام المبدلات الترانزستورية IGBT في الآلات التحريضية مضاعفة التغذية تسمح باستجابة جيدة للنظام مع تغيرات الشبكة .

9-6-2 الدارة المكافئة للمولد مضاعف التغذية:

الشكل 9-17 يوضح الدارة المكافئة للمولد متضمنة الضياعات المغناطيسية. وهذه الدارة صالحة للعمل في الحالة المستقرة ، ويمكن من الدارة المكافئة واستناداً إلى قانون كيرشوف الثاني كتابة المعادلات الحاكمة لهذه الآلة.

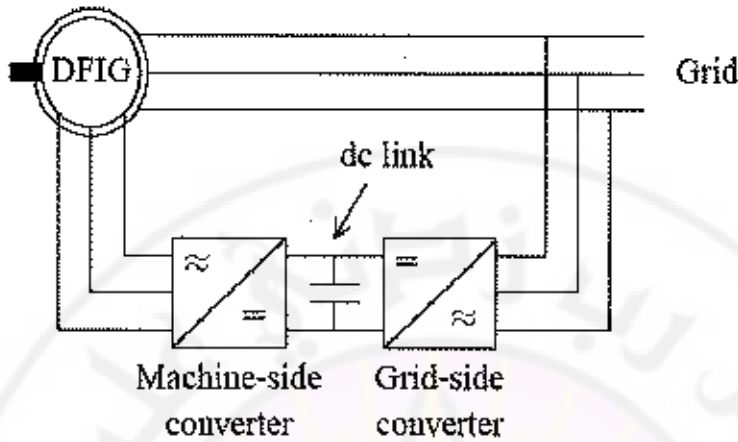


الشكل 9-16: منحنيات تعديل مميزات العزم - الانزلاق عن طريق حقن توتر في ملف الدائر [11].

و الاستطاعة الفعالة المتبادلة عبر الدائر تعطى بالعلاقة :

$$Pr - S * Pm \quad (9-19)$$

وفي نظام يعمل بسرعة متغيرة $\pm 30\%$ من سرعة التزامن يمكن تحديد الاستطاعة التي تمر من خلال مبدل التردد و هي تتراوح بين 20-30 % من الاستطاعة الاسمية للآلة مما يقلل من كلفة نظام التوليد والمفايد الكهربائية في هذا المولد بالمقارنة مع المولد التحريضي التقليدي الذي يتصل ملف الثابت فيه عبر مبدلة الكترونية.



الشكل 9-15: عمل المولد التحويلي مضاعف التغذية في العنقفة الريحية [3].

السرعة الزاوية للحقل الدوار للثابت هي:

$$W1/p1 = Wmech \pm W2/p1$$

وهي مساوية لمجموع السرعة الزاوية للدوران الميكانيكي $Wmech$ و لتردد التيار في الدائر.

بالاعتماد على الاتجاه و تردد المنبع ، فإن هذه الآلة يمكنها أن تعمل في كلا الحالتين فوق و تحت التزامن.

ويتم تعديل مميزات العزم - الانزلاق عن طريق حقن توتر في ملف الدائر كما هو موضح في الشكل 9-16.

- مولد تزامني موصول إلى الشبكة الكهربائية من خلال نظام تبديل إلكتروني AC/DC/AC.

- مولد تزامني موصول إلى الشبكة الكهربائية من خلال نظام تبديل إلكتروني AC/DC/AC ولكن يعمل هذا المولد على سرعة منخفضة بدون عتبة سرعة.

D- الأنظمة التي تستخدم مولدات تزامنية ذات التهيج بمغناطيس دائم وتقسّم بدورها إلى:

- مولد تزامني ذو مغناطيس دائم موصول مع الشبكة عن طريق نظام تبديل إلكتروني AC/DC/AC.

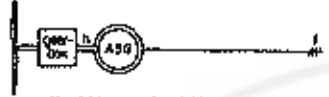
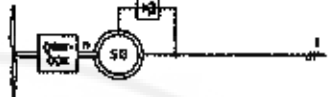
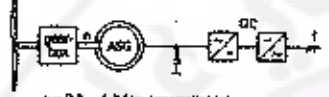
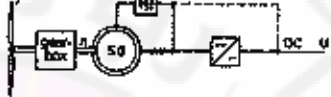
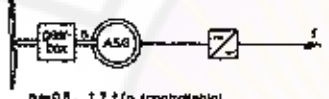
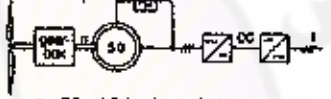
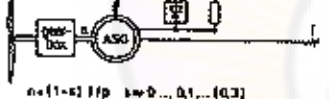
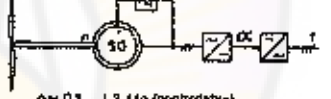
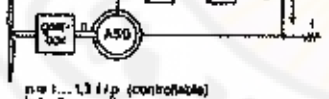
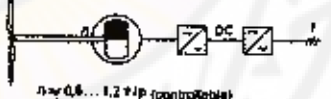
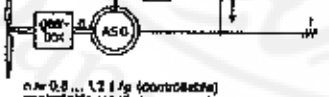
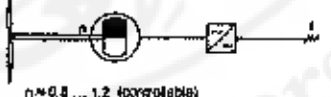
- مولد تزامني ذو مغناطيس دائم موصول مع الشبكة عن طريق نظام تبديل إلكتروني AC/AC.

وسينم استعراض مجالات التحكم لمختلف نظم التبديل المبينة في الشكل 9-14 لاحقاً وتحديدًا في الفقرة 9-9.

9-6 المولد التحريضي مضاعف التغذية:

9-6-1 عمل المولد التحريضي مضاعف التغذية في العلفات الريحية:

من جهة التصميم فإن المولد التحريضي مضاعف التغذية يشابه تماماً المولد التحريضي ثلاثي الطور ذو الدائر الملفوف، والذي تتصل ملفات الدائر فيه بثلاث حلقات الانزلاق. وبدلاً من قصر ملفات الدائر عبر حلقات الانزلاق كما فالمولد التحريضي فإن ملفات الدائر في المولد التحريضي مضاعف التغذية يمكن تغذيتها من أنظمة ثلاثية الطور ذات توتر و تردد متغيرين، ويتم ذلك من خلال مبدلات إلكترونية تكون عادة متصلة مع نفس الشبكة الكهربائية التي تتصل بها ملفات الثابت ويشكل مباشر. الشبكة و عندئذ يغذى كما هو مبين في الشكل 9-15.

conversion system with asynchronous generator (ASG)		conversion system with synchronous generator (SG)	
short-circuit rotor machines	a) direct grid connection (normal plant for grid operation)	machines with excitation system	g) direct grid connection (normal plant for independent operation)
			
	$n = (1-s) f/p$ $s = 0 \dots 0.05$ (output dependent) inductive reactive power consumer		$n = f/p$ controllable reactive power output
slip ring machines	b) grid connection via direct-current intermediate circuit 1) with thyristor converter 2) with pulse inverter		h) coupling to direct current grid
			
	$n = 0.5 \dots 1.2 f/p$ (controllable) 1) inductive reactive power consumer 2) controllable reactive power output		$n = 0.5 \dots 1.2 n_N$
slip ring machines	c) grid connection via direct d.c. converter	permanently excited machines	i) grid connection via direct-current intermediate circuit 1) with thyristor converter 2) with pulse inverter
			
	$n = 0.5 \dots 1.2 f/p$ (controllable) inductive reactive power consumer		$n = 0.5 \dots 1.2 f/p$ (controllable) 1) inductive reactive power consumer 2) controllable reactive power output
slip ring machines	d) dynamic slip control	permanently excited machines	j) grid connection via direct-current intermediate circuit 1) with thyristor converter 2) with pulse inverter
			
	$n = (1-s) f/p$ $s = 0 \dots 0.1 \dots (0.3)$ (output dependent, dynamic) inductive reactive power consumer		$n = 0.5 \dots 1.2 f/p$ (controllable) 1) inductive reactive power consumer 2) controllable reactive power output
slip ring machines	e) oversynchronous static converter system	permanently excited machines	k) grid connection via direct-current intermediate circuit 1) with thyristor converter 2) with pulse inverter
			
	$n = 1 \dots 1.3 f/p$ (controllable) inductive reactive power consumer		$n = 0.5 \dots 1.2 f/p$ (controllable) 1) inductive reactive power consumer 2) controllable reactive power output
slip ring machines	f) double fed asynchronous generator	permanently excited machines	l) grid connection via direct d.c. converter
			
	$n = 0.5 \dots 1.2 f/p$ (controllable) controllable reactive power output		$n = 0.5 \dots 1.2$ (controllable) (purely) reactive power consumer

الشكل 9-14: أنظمة تبديل طاقة الرياح حسب نوع المولد الكهربائي المستخدم في العنقات الريحية [18].

والتوافقيات الناتجة ولا يوجد بشكل واضح نظام مفضل لقيادة العنفات الريحية بشكل مطلق.

الشكل 9-14 يبين أنظمة تبديل طاقة الرياح حسب نوع المولد الكهربائي المستخدم في العنفات الريحية، وتصنف هذه الأنظمة إلى الفئات التالية:

A- الأنظمة التي تستخدم مولدات تحريضية ذات الدائر المقصور وتقسّم بدورها إلى:

... مولد تحريضي موصول مباشرة مع شبكة التغذية.

- مولد تحريضي موصول مع الشبكة عن طريق نظام تبديل الكتروني AC/DC/AC مع مكثفات موصولة مع ملف الثابت لتعويض الاستطاعة الردية جزئياً.

- مولد تحريضي موصول مع الشبكة عن طريق نظام تبديل الكتروني AC/AC.

B- الأنظمة التي تستخدم مولدات تحريضية ذات حلقات الانزلاق وتقسّم بدورها إلى:

- مولد تحريضي موصول مباشرة مع الشبكة ويتم فيه تحكم ديناميكي بالانزلاق.

- مولد تحريضي موصول مباشرة مع الشبكة ويتم فيه ربط ملف الدائر مع الشبكة من خلال ما يسمى نظام كرامر غير المتوافقت للتحكم الستاتيكي.

- مولد تحريضي مضاعف التغذية. (وسيتّم شرح هذا النظام بالتفصيل نظراً لكونه الأكثر استخداماً في العنفات الريحية على المدى المنظور بين جميع الأنظمة المبيّنة في هذا الشكل).

C- الأنظمة التي تستخدم مولدات تزامنية، وتسمى الآلات ذات نظم التهيج المستقل، وتقسّم بدورها إلى:

- مولد تزامني موصول إلى شبكة محلية. والذي يستخدم في العنفات الريحية المستقلة عن الشبكة الكهربائية العامة، وتعرف باللغة الانكليزية Stand Alone Wind Turbines.

- مولد تزامني موصول إلى شبكة محلية كما في الفقرة السابقة ولكن يغذي شبكة تيار مستمر.

A- مولدات تحريضية أو تزامنية مع نظام تبديل الكتروني موصول مع الشبكة الكهربائية.

B- مولدات تحريضية مع تحكم بالانزلاق وتسمى المولدات التحريضية مضاعفة التغذية.

C- مولدات تزامنية ذات مغناطيس دائم .

D- مولدات تزامنية تعمل على سرعة دوران العنفة الريحية وبدون علبة سرعة.

جميع هذه الأنظمة موضحة في الشكل 9-14. وقبل استعراض أنظمة التبديل الكهربائي المبينة في هذا الشكل من المهم توضيح الأسس التالية:

يمتاز نظام العمل بسرعة ثابتة ببساطة التصميم وانخفاض التكاليف ومع المولد التحريضي يجب تزويد النظام بتجهيزات خاصة للتحكم بالاستطاعة الردية.

أما العمل بسرعة متغيرة فيقدم استطاعة أكبر و إجهاد ميكانيكي أقل على الأجزاء الميكانيكية من النظام. وتدفق استطاعة لا يعتمد بشكل كبير على تغيرات سرعة الرياح. إن العنفات التي تعتمد على المولد التحريضي وترتبط مباشرة مع الشبكة هي المولدات الأكثر انتشاراً و مجال استطاعتها عادة من 50 kw حتى 3 MW. والكبيرة منها تستخدم عادة نظام التحكم بانحراف الشفرات.

أما المولدات التزامنية المربوطة مباشرة مع الشبكة فتستخدم فقط في عدد قليل من العنفات ذات الاستطاعات الصغيرة وبشكل رئيسي في أنظمة التوليد المستقلة عن الشبكة (stand alone). بينما المولدات التزامنية ذات الاستطاعة الكبيرة فتربط مع الشبكة من خلال نظم تبديل الكترونية.

إن تقنيات العمل عند سرعة متغيرة تعتمد بشكل أساسي على عناصر القيادة الالكترونية المناسبة للمولد المراد قيادته وبشكل عام تستخدم المبدلات AC/DC/AC لربط المولدات بالشبكة. إن لكل نظام قيادة مساوئ ومحاسن حسب تكاليفه وميزات عمله والتحكم بمجال السرعة المتغيرة على منحنى الاستطاعة ومعامل الاستطاعة والمردود

الأول يعمل بسرعة ثابتة والثاني يعمل عند سرعات متغيرة.
 في العنفات التي تعمل عند سرعة ثابتة يكون المولد التحريضي مربوطاً مباشرة إلى الشبكة وتردد الشبكة هو الذي يحدد سرعة المولد أي سرعة الدائر .
 أما في حال استخدام المولد التزامني فيجب تحقيق شروط التزامن قبل إجراء عملية الربط المباشر مع الشبكة.
 السرعة المنخفضة للعنف الريحية يتم رفعها عن طريق علبة السرعة لتصل للمولد بالسرعة المطلوبة أما سرعة المولد فتعتمد على عدد الأقطاب وتردد الشبكة.
 في نظام السرعة المتغيرة يكون المولد سواء التحريضي أو التزامني موصولاً للشبكة عن طريق نظام تبديل إلكتروني. و يكون ملف التهيج للمولد التزامني مغذى عن طريق مقوم مستقل . ويتم التحكم بالتردد وبالتالي بسرعة دوران الدائر للمولد حسب سرعة الرياح.

بعد أن تصل سرعة الرياح إلى قيمة محددة، وعادة عندما تصل سرعة الرياح إلى القيمة التي يبدأ عندها المولد العمل على استطاعته الاسمية يتم التحكم بسرعة دوار العنف الريحية عن طريق نظام التحكم بانحراف الشفرات عن المحور الطولي للشفرة، بحيث يحافظ الدوار على سرعته ثابتة مهما ازدادت سرعة الرياح عن تلك القيمة. وبهذه الآلية يتم خفض الطاقة الميكانيكية المقدمة من الرياح حسب خواص العنف. مع الوضع في الحسبان ضرورة إيقاف العنف عن العمل عندما تصل سرعة الرياح إلى القيمة المسموح بالعمل عليها.

إن معظم العنفات المركبة حالياً يمكن تصنيفها كما يلي:

I - عنفات تعمل بسرعة ثابتة ومربوطة مباشرة مع الشبكة.

A - عنفات بمولد تحريضي.

B - عنفات بمولد تزامني.

II - عنفات تعمل بسرعة متغيرة.

الجدول 9-1: مقارنة فنية بين المولدين التحريضي والتزامني [15].

المولد التحريضي	المولدات التزامني
لا يحتاج إلى سرعة ثابتة مع ألتة المحركة	يحتاج إلى سرعة ثابتة مع ألتة المحركة
يربط مباشرة مع الشبكة .وعند أي تردد.	يربط على التوازي مع الشبكة . ولكن يجب تحقيق شروط التزامن (من أجل عدم التآرجح)
الأجهزة المساعدة التي يحتاجها قليلة	يحتاج إلى أجهزة مساعدة
من مساوئه أنه يحتاج إلى تيار مغنطة% (25-40) من التيار الكلي وبالتالي يحتاج إلى استطاعة ردية لإنتاج هذا للتيار بنفس النسبة من الشبكة الكهربائية وبالتالي مردوده منخفض لذا يربط معه مكثفات للتعويض ولو جزئياً عن الاستطاعة الردية المستهلكة من الشبكة الكهربائية	يحتاج إلى منبع مستمر لتغذية ملفات الأقطاب

ومن الميزات الأساسية للمولد التحريضي أنه مفيد عندما لا تدور الآلة المحركة الأساسية بسرعة ثابتة أي بسرعة متغيرة وبالتالي يمكن الاستفادة القصوى من طاقة الرياح . بالإضافة إلى سهولة تركيبه وخدمته . وهناك مزايا أخرى في حال استخدام المولد التحريضي ستظهر عند دراستنا لأنواع أكثر تطوراً ظهرت في السنوات الأخيرة .

5-9 أنظمة تبديل الطاقة Energy Conversion Systems :

يمكن تصنيف العنفات الريحية حسب سرعة الدوران - ضمن نظامين رئيسيين:

$$S_{cr} = \pm \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (17-9)$$

ويقابل الانزلاق الحدي في الآلة التحريضية العزم الأعظمي T_{max} الذي يساوي:

$$T_{max} = \frac{3V ph^2}{2\omega_0 [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}]} \quad (NM) \quad (18-9)$$

حيث:

Vph - توتر الطور في الآلة التحريضية. وتوافق الإشارة (+) في العلاقة السابقة حالة عمل الآلة التحريضية كمحرك تحريضي ثلاثي الطور (في الربع الأول من الشكل 15-9) بينما إشارة (-) حالة عمل الآلة التحريضية كمولد تحريضي (في الربع الثاني من الشكل 15-9) وذلك من أجل $\omega > \omega_0$ أو $S < 0$.

5-3-4-9 المقارنة الفنية بين المولدين التحريضي والتزامني:

يمكننا تلخيص مزايا ومساوئ المولدين التحريضي والتزامني من خلال الجدول 1-9 المبين فيما يلي:

$$T = \frac{2 \cdot T_{max} (1 + a S_{cr})}{\frac{S}{S_{cr}} + \frac{S_{cr}}{S} + 2a S_{cr}} \quad (N.M) \quad (13-9)$$

حيث: $R'_2, a=R$

R_1 - المقاومة الأومية لملف الجزء الثابت Ω

R'_2 - المقاومة الأومية الداخلية لملف الجزء الدائر منسوبة إلى الثابت Ω

S - انزلاق المحرك slip ويساوي:

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad (14-9)$$

حيث:

ω_0 - السرعة التزامنية للحقل المغناطيسي المتولد في الثغرة الهوائية وأيضاً للجزء

الدائر ونقاس بالراديان على الثانية Rad/sec

ω - السرعة الآنية للجزء الدائر Rad/sec

وتساوي السرعة التزامنية:

$$\omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60} = \frac{2\pi f_1}{P} \quad (15-9)$$

حيث:

n_0 - سرعة اللاحمل ونقاس بالدورة في الدقيقة rpm.

f_1 - تردد شبكة التغذية

P - عدد أزواج الأقطاب في الآلة التحريضية.

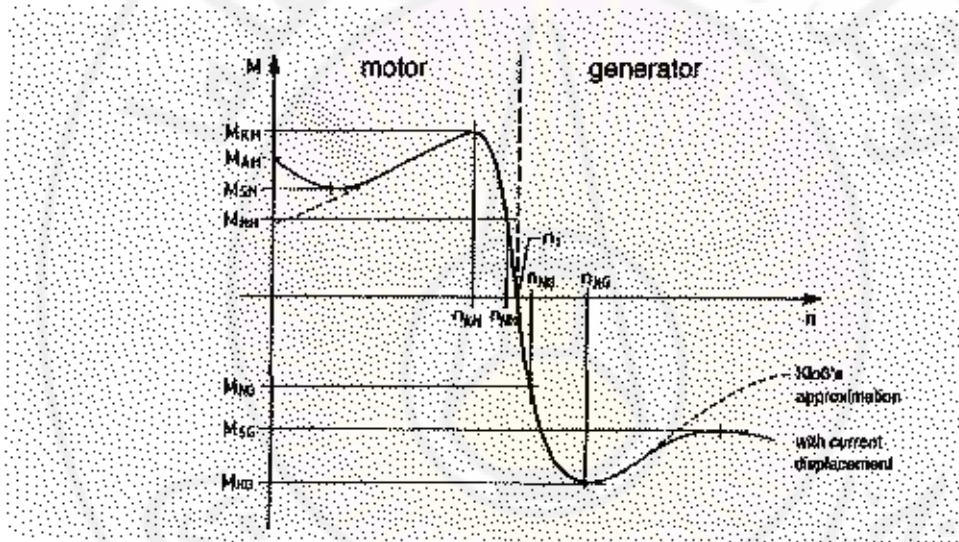
أما السرعة الزاوية الآنية فتساوي:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ Rad/sec} \quad (16-9)$$

n - السرعة الآنية للجزء الدائر rpm.

S_{cr} فتعبر عن الانزلاق الحدي critical Slip

سرعته قريبة من السرعة التزامنية ω_0 ، إلى حالة الكبح بإعادة التوليد، وهذا يعني حالة العمل كمولد مربوط مع الشبكة الكهربائية حيث يبقى مستهلكاً للاستطاعة الردية ويحقق في الشبكة العامة الاستطاعة الفعالة الناتجة تحت تأثير القوى الخارجية الميكانيكية أو الطاقة الحركية بفعل حزمة الرياح التي تصطدم مع شفرات دوار العنفة. يبين الشكل 9-13 مميزات الأداء للآلة التحريضية في حالة العمل كمحرك وحالة العمل كمولد والتي تعتمد عادة عند دراسة عملها في العنفات الريحية.



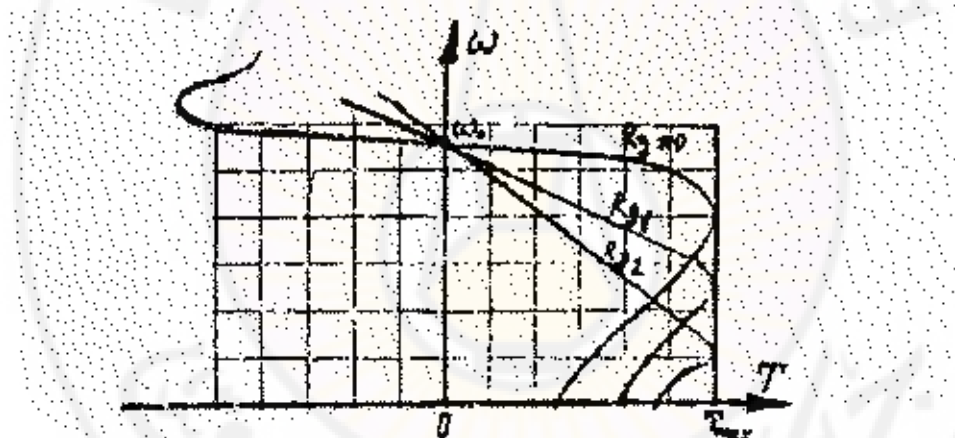
الشكل 9-13 مميزات الأداء للآلة التحريضية في حالتي العمل

كمحرك ومولد في العنفات الريحية [3].

وتعبر العلاقة التالية عن مميزات الأداء أو المميزات الميكانيكية ويقصد بها علاقة العزم المتولد في الآلة التحريضية T بالانزلاق S الذي يتعلق بدوره بسرعة الدوران n أو السرعة الزاوية ω المبينة في الشكلين 9-12 و 9-13:

وكما هو مبين في الشكل 9-12 فإن المحرك ينتقل للعمل على امتداد مميزاته من الربع الأول إلى الربع الثاني استناداً إلى معادلة المميزات الميكانيكية أو مميزات الأداء للمحرك التحريضي في حالة العمل كمولد ، وذلك من أجل عدة قيم مختلفة للمقاومات المضافة (R_g) إلى دائرة ملف الجزء الدائر ويسمى أيضاً ثانوي المحرك (أو المولد التحريضي) في هذا النوع من الكبح.

في العنفات الريحية يعمل المولد التحريضي حسب مميزاته المبينة في الشكل 9-12 عند سرعة أكبر قليلاً من السرعة التزامنية ω_{01} ، أي أكبر ببضعة دورات في الدقيقة من سرعة اللاحمل، في الربع الثاني على امتداد المميزات الطبيعية مسن أجل $R_g=0$ (حيث لا توجد ضرورة في هذه الحالة لإضافة مقاومات خارجية).



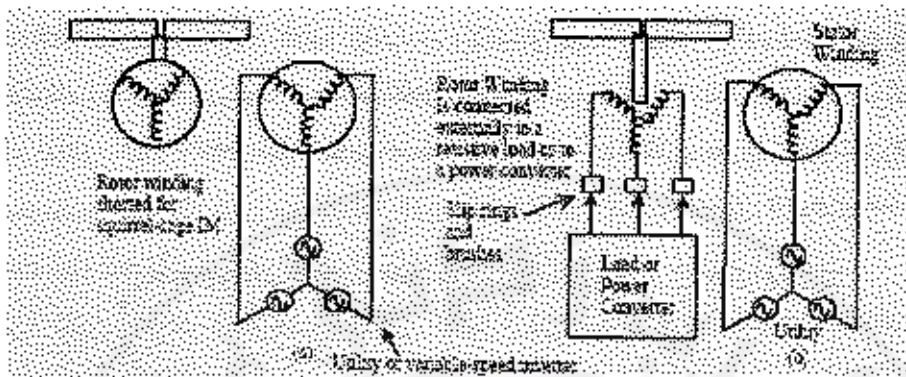
الشكل 9-12: منحني انتقال المحرك للعمل من حالة العمل كمحرك من الربع الأول إلى حالة الكبح بإعادة التوليد أو كمولد تحريضي موصول مع شبكة التغذية الكهربائية في الربع الثاني [6].

يبين الملحق 9-1/ في نهاية هذا الفصل تفاصيل تجربة مخبرية أنجزت في قسم هندسة الطاقة الكهربائية في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق، التي بينت كيفية الانتقال من حالة العمل كمحرك تحريضي يعمل على اللاحمل، حيث تكون

25-40% من الاستطاعة الكلية المتولدة، بالإضافة إلى الاستطاعة الضائعة الأخرى في المولد، مما يجعل مردود المولد منخفض بالمقارنة مع المولدات المتوافقة. كذلك يتأخر التيار I_m عن الجهد عملياً 90 درجة وبالتالي يؤدي عمل المولد التحريضي على التوازي مع الشبكة الكهربائية لإنفاص قيمة معامل الاستطاعة $\cos \theta$ لهذه الشبكة حتى ولو كانت الحمولة الخارجية عبارة عن حمل أومي بحت. ونظراً لكون المولد التحريضي الأكثر انتشاراً في مجال الربط المباشر للعنفات الكهربائية مع الشبكة العامة، فمن المفيد توضيح الأسس العلمية لعمل هذه المولدات في العنفات الريحية والتي تستند إلى حالة العمل المسماة الكبح الكهربائي بإعادة التوليد Regenerative Braking التي سيتم شرحها في الفقرة التالية.

9-4-3 حالة الكبح مع إعادة التوليد Regenerative Braking:

إن الكبح بإعادة التوليد في المحرك التحريضي يعبر عن حالة العمل للمولد التحريضي المربوط مع الشبكة الكهربائية، حيث يتم عندها فقط حقن القدرة الكهربائية المولدة في الجزء الثابت والمنقولة من الجزء الدوار في المولد التحريضي (الدائر) إلى الشبكة الكهربائية. وبشكل أكثر دقة يتم حقن الاستطاعة الفعالة المتولدة في ملف الثابت إلى الشبكة الكهربائية الموصول معها، مع الاستمرار في استهلاك الاستطاعة الرديئة من الشبكة الكهربائية، تماماً كما في حالة العمل كمحرك تحريضي. ويمكن تحقيق حالة الكبح بإعادة التوليد أو حالة العمل كمولد تحريضي عند بلوغ سرعة المحرك (أو الآلة التحريضية) قيمة أعلى من قيمة السرعة التزامنية، حيث يبقى المحرك (أو الآلة التحريضية) موصولاً إلى الشبكة وبالتالي يعمل المحرك بانزلاق ($S < 0$) ويصبح في حالة العمل كمولد تحريضي مربوط على التفرع مع الشبكة، حيث يقوم بتحويل الطاقة الميكانيكية المقدمة على محوره عن طريق القوى الخارجية (وتعتبر الطاقة الحركية للرياح هي القوى الخارجية في العنفات الريحية) إلى طاقة كهربائية ويقدمها إلى شبكة التغذية التي تقوم بدورها بتغطية المفاقد الرديئة في ثابت المحرك واللازمة لإنتاج الطاقة المغناطيسية وذلك استناداً إلى مبدأ عمل المولدات التحريضية.



الشكل 9-11: مخططات كهربائية للمولد التحريضي ذي الدائر المقصور أو القفص

السنجاني (a) والمولد التحريضي ذي الدائر الملفوف (b) [11].

9-4-3 حالة عمل المولد التحريضي:

يتميز المولد التحريضي بأنه لا يحتاج إلى منبع تيار مستمر لتغذية أقطابه حيث يستجر تيار التغذية اللازم من الشبكة المربوط أو الموصول إليها. وعلى ذلك فهو لا يعمل إلا إذا ربط على التوازي مع الشبكة الكهربائية أي المنبع الكهربائي الذي يقوم بإمداده بالاستطاعة الردية اللازمة لتزويده بتيار المغنطة I_m لإنتاج السيالة المغناطيسية.

ومن ميزاتة أيضا قلة الأجهزة المساعدة بالمقارنة مع المولدات التزامنية أو التوافقية بالإضافة إلى أن تشغيل المولدات التحريضية على التوازي مع الشبكة يمكن أن يتم عند أي تردد دون تحقيق شروط التزامن التي يجب أن تحققها المولدات التزامنية حيث أنه عند ربط المولدات التحريضية على التوازي يجب أن يدور الدوار بسرعة قريبة بل أكبر قليلاً من السرعة المتوافقة أو التزامنية أو ما يسمى سرعة اللاحمل وبنفس اتجاه السيالة المغناطيسية مع ملاحظة أنه عند ربطها تظهر نفس الظواهر التي تحدث عند ربط المحولات والمحرك التحريضية مع الشبكة الكهربائية.

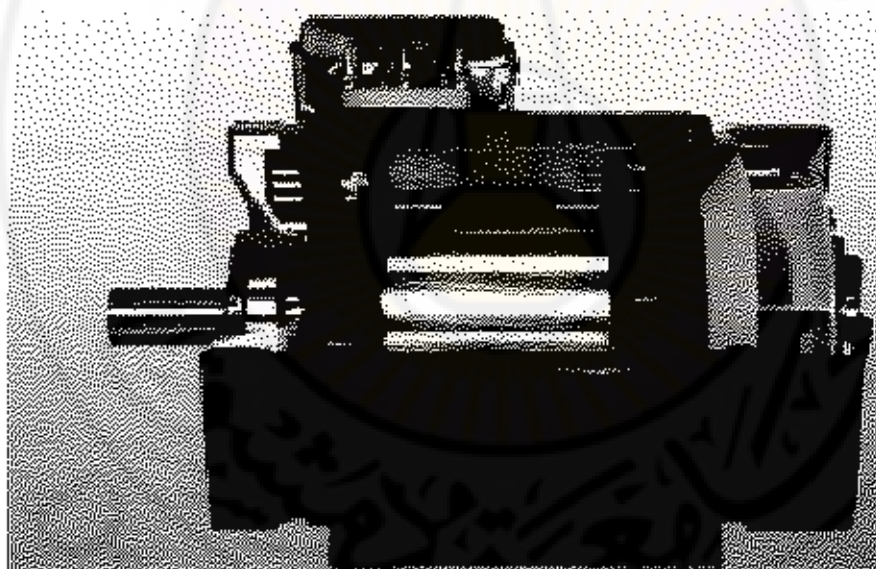
9-4-3 مساوئ الاستخدام:

بما أن تيار المغنطة في المحرك أو الآلة التحريضية يساوي 25-40% من التيار الاسمي لذلك وعند توفر ثوتر ثابت في الشبكة تبلغ الاستطاعة الردية اللازمة للتهيج

الريحية، إلى ملف الثابت من خلال التحريض المتبادل عبر الثغرة الهوائية. وتستخدم حلقات الانزلاق لإجراء عمليات التغذية الإضافية أو استرجار جزئي للاستطاعة الكهربائية وفقاً لتصميمات خاصة ومنها ما يسمى المولدات التحريضية مضاعفة التغذية التي سنأتي على شرحها لاحقاً.

أما المولدات التحريضية ذات القفص السنجابي، كما هو مبين في الشكل 9-10 فتتملك قضبان من الألمنيوم مذبذبة في مجاري الدائر. هذه النواقل موصلة مع بعضها البعض عند كل نهاية من الدائر. بكلمات أخرى فهي مقصورة ولذلك تسمى أيضاً المولدات التحريضية ذات الدائر المقصور، وتزود عادة بمراوح للتبريد.

المحركات التحريضية ذات القفص السنجابي تتميز ببساطة تصميمها وتركيبها، وقوة بنيتها، والأمان في تشغيلها مع قلة الصيانة وبالتالي موثوقيتها الكبيرة ورخص ثمنها.



الشكل 9-10 صورة لمقطع الآلة التحريضية ذات القفص السنجابي [11].

يبين الشكل 9-11 مخططات كهربائية للمولد التحريضي ذي الدائر المقصور أو القفص السنجابي والمولد التحريضي ذي الدائر الملفوف المستخدمة في العنفات الريحية.

من مبادئ المولد التزامني ضرورة تأمين منبع للتيار المستمر وضرورة العمل على سرعة ثابتة وضرورة تأمين شروط التزامن مع الشبكة. وقد تم حل جزء كبير من هذه المسائل بواسطة عناصر القيادة الإلكترونية.

9-4-3 المولدات التحريضية Asynchronous Generators:

كما هو معلوم فإن معظم العنفات الريحية المركبة حديثاً تستخدم المولد التحريضي لعدة أسباب:

- تكلفة أقل.
- موثوقية (Reliability) في التصميم أفضل.
- المرونة في مميزات الأداء.
- توفر المولد بجميع مجالات الاستطاعة في الأسواق.
- الخبرة الكبيرة والمكتسبة في التقنيات المستخدمة في تصميم وتصنيع المولد.

9-4-3-1 بنية المولد التحريضي

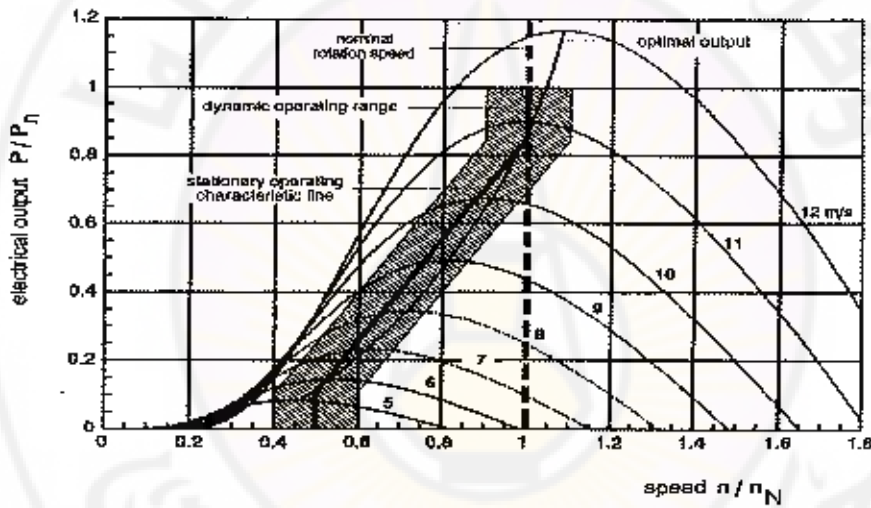
: Asynchronous Generator Structure

تصنع المولدات التحريضية من أجل العنفات الريحية عادة من وحدة مغلقة لمنع دخول الغبار وغيرها من المواد الضارة في الوسط المحيط. تتألف الآلات التحريضية من قسم ثابت يتوضع فيه ما يسمى ملف الثابت، الذي يتصل عادة مع الشبكة الكهربائية. وقسم دوار يحتوي ما يسمى ملف الدائر. فإذا استجرت الآلة التحريضية التغذية الكهربائية وتحديداً الاستطاعة الفعالة والرديئة من الشبكة فتصبح محركاً تحريضياً. وإذا قامت هذه الآلة بتغذية الشبكة الكهربائية وتحديداً بالاستطاعة الفعالة (حيث تبقى مستهلكة للاستطاعة الرديئة، كما سنشرح ذلك لاحقاً) فتصبح مولداً تحريضياً.

في المولدات التحريضية ذات الدائر الملفوف، والتي تحتوي حلقات الانزلاق، تتوضع ملفات التيار المتناوب في مجاري الدائر، حيث تقوم بنقل الاستطاعة الكهربائية المتولدة فيه نتيجة دوران الدائر بواسطة قوى خارجية، وفي حالتنا هذه بواسطة دوار العنفات

النتيجة:

إن تسريع المولد يؤدي لكبر زاوية الحمل θ وبالتالي الحصول على استطاعة أكبر. مع الانتباه إلى أن تسريعه يكون ضمن حدود، حيث تبقى θ محصورة بسين (0-90) درجة لأنه إذا زادت θ عن 90 درجة فإن المولد يخرج عن الاستقرار. ويبين الشكل (9-9) المميزات الخارجية لمولد تزامني يعمل على سرعات دوار متغيرة حيث يتم الحصول على سرعة تزامنية ثابتة عند قمم هذه المميزات واستطاعة الخرج تتغير قيمتها مع تغير سرعة الدوار.



الشكل 9-9: المميزات الخارجية لمولد تزامني يعمل على سرعة دوار متغيرة [10].

9-4-2-3 استخدام المولد التزامني في العتقات الريحية:

يمكن أن يعمل المولد التزامني بشكل مستقل عن الشبكة أو أن يوصل مع الشبكة لكنه بحاجة بصورة مستمرة إلى التهيج بالتيار المستمر ويعتبر ذلك من مساوئه. لكنه يمتاز بإمكانية ربطه مباشرة مع الشبكة الكهربائية للعمل عند سرعة تزامنية ثابتة وهذا يتطلب تثبيت سرعة دوران الشفرات بواسطة التحكم بزوايا انحرافها مما يسبب ضياع جزء من طاقة الرياح.

تسارع المنوبة (المولد) المربوطة إلى محور الحركة وبالتالي توليد عزم كهربائي واستطاعة كهربائية تستهلك في الحمل المربوط.

$$P = \frac{m \cdot u \cdot E_0}{\omega d} \cdot \sin \theta \quad (11-9)$$

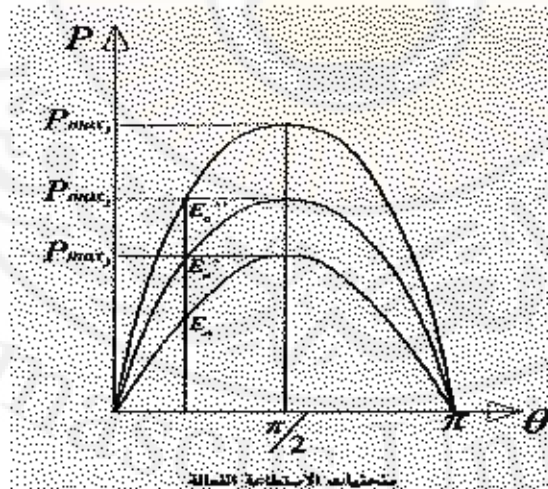
m: عدد الأطوار

فإذا أردنا تغيير استطاعة الخرج الفعالة المولدة من المنوبة فلا بد من تغيير الاستطاعة الميكانيكية المقدمة من الآلة المحركة (وهذا ما نصادفه في العنفات الريحية) حيث أن سرعة الرياح التي تدور العنفة ليست ثابتة.

ويوضح الشكل 8-9 منحنيات الاستطاعة الفعالة كدالة مع زاوية الحمل عند قيم متغيرة للقوة المحركة الكهربائية والتي نحصل عليها ($E_0 = V \cdot a \cdot r$) عندما نغير تيار التهيج I_c والتيار المستخرج من الحمل I_a بثبات التونر:

$$(U = I_a \cdot Z = \text{const}) \text{ المطبق على الحمل ذي الممانعة المتغيرة:}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = [V \cdot a \cdot r] \quad (12-9)$$



الشكل 8-9: منحنيات الاستطاعة الفعالة للمولد التزامني [10].

توضع على الجزء المتحرك بتيار مستمر ويتم تحريكها عن طريق ربط محور المولد التزامني مع مصدر حركة خارجي (محرك _ عنفة بخارية _ عنفة ريشية...) فالتسبب الناتجة عن ملفات التهييج بعد دورانها بسرعة N تولد في الثابت قوة محرقة كهربائية تعطى بالعلاقة:

$$e_o = \frac{-w_l \cdot d\Phi_o}{dt} \quad (9-9)$$

حيث:

e_o : القيمة اللحظية للقوة الكهربائية المتولدة في كل طور من أطوار المتحرض.

w_l : عدد موصلات الطور في الثابت.

Φ_{eo} : القيمة اللحظية لميالة التهييج لكل قطب.

وتعطى القيمة الفعالة للقوة المحركة الكهربائية المتولدة في طور من المتحرض بالعلاقة:

$$E_o = 4.44 \cdot w_l \cdot k_{w1} \cdot f_l \cdot \Phi_{e_o \max} \quad (10-9)$$

حيث:

E_o : القوة المحركة الكهربائية [Volts/phase]

K_{w1} : معامل لف المتحرض.

f : تردد الجزء الدائر.

Φ_{eomax} : مطال ميالة التهييج.

- عند إغلاق دائرة المولد على حمل خارجي يمر فيه تيار I_a سببه القوة المحركة الكهربائية E_o .

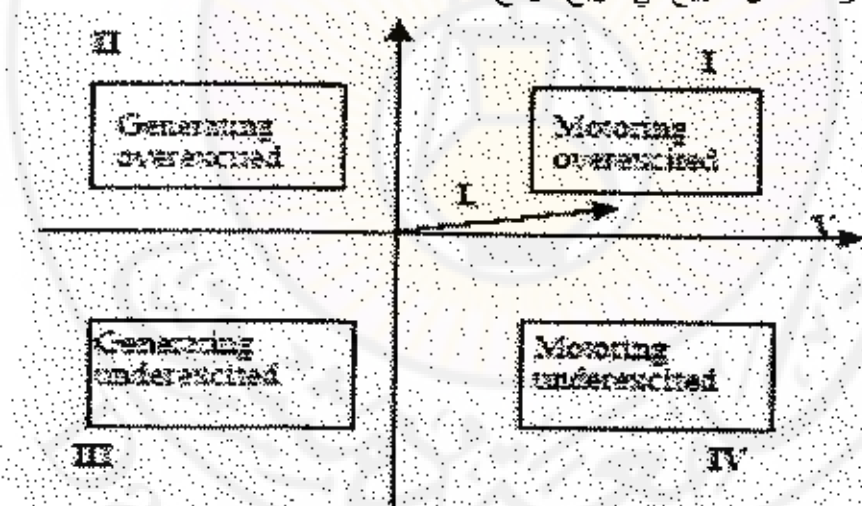
-- تعطى علاقة استطاعة الخرج للمولد الأسطوانى بدلالة ثوابته X_d المفاعلة التوافقية للمولد ومعطياته من التوتر والقوة المحركة الكهربائية وأيضا زاوية الانزياح θ ، حيث:

θ : محصورة بين شعاع التوتر U (ويرمز له أيضاً V) وشعاع القوة المحركة الكهربائية E ، والتي تحدث بتأثير تطبيق عزم دوران ميكانيكي خارجي يؤدي إلى

أ- كمحرك زائد التهيج: وتعتمد زيادة التهيج على زيادة شدة التحريض وفي هذه الحالة فإن المحرك يقدم استطاعة ردية واستطاعة ميكانيكية ويستهلك استطاعة كهربائية فعلية أو فعالة.

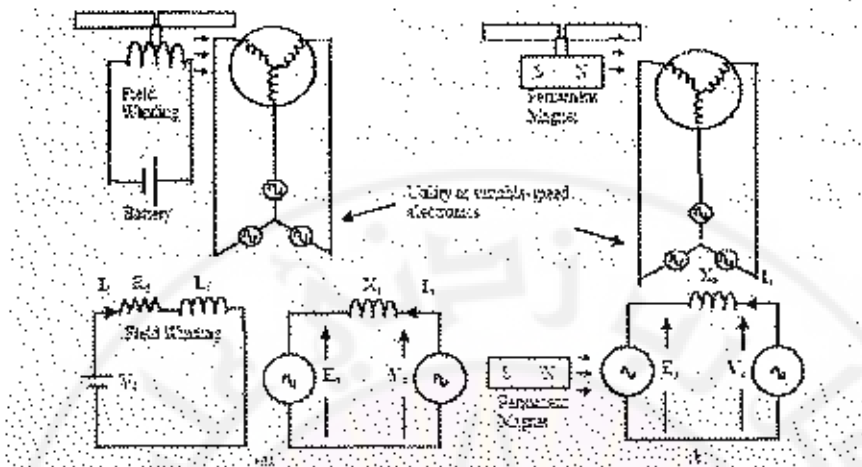
ب- كمولد ناقص التهيج: إذا أنقصنا شدة التحريض في المحرك السابق وقدّمنا لمحور الآلة استطاعة ميكانيكية لنقود الآلة بنفس جهة الدوران فإن الاستطاعة ستجري هنا بالاتجاه المعاكس وستحول الآلة للعمل كمولد لكنه سيكون مستهلكاً للاستطاعة الردية.

هاتان الحالتان تعبران عن حالات خاصة من عمل الآلة التزامنية في الأجزاء الأربعة الأربعة الموضحة في الشكل 7-9 حيث تعمل الآلة كمحرك زائد التهيج في الربع الأول وكمولد زائد التهيج في الربع الثاني وكمولد ناقص التهيج في الربع الثالث وكمحرك ناقص التهيج في الربع الرابع.



الشكل 7-9: حالات عمل الآلة التزامنية [8].

فالآلة التزامنية تتكون من جزأين ثابت ودائر يفصل بينهما ثغرة هوائية وعلى الأغلب يكون الدائر هو جزء التحريض (التهيج) والثابت هو المتحريض الذي نحصل من ملفاته على القوة المحركة الكهربائية ذات الطبيعة المتناوبة حيث تتغذى ملفات التهيج التي



الشكل 9-6: المخططات الكهربائية للمولد التزامني ذي التهيج من مغناطيس دائم

(الشكل اليميني) ومن منبع تيار مستمر (الشكل اليساري) [11].

والمعادلات التالية تحكم عمل المولد في حالة العمل الممتنع مع الافتراض أن قيمة مقاومة ملفات الثابت بالنسبة لقيمة مفاعلة الثابت مهملة وسوف نفترض أن جميع القيم

الكهربائية المتغيرة تتغير بشكل جيبى مع الزمن:

$$E_s = V_s - I_s \cdot X_s \quad (7-9)$$

$$P_{out} = (3E_s V_s / X_s) \sin \delta \quad (8-9)$$

E_s - القوة المحركة الكهربائية المتولدة في الطور [V]

V_s - التوتر على طرفي الثابت [V]

I_s - تيار ثابت [A]

$X_s = W \times L_s$ مفاعلة الطور الواحد من الثابت [Ω]

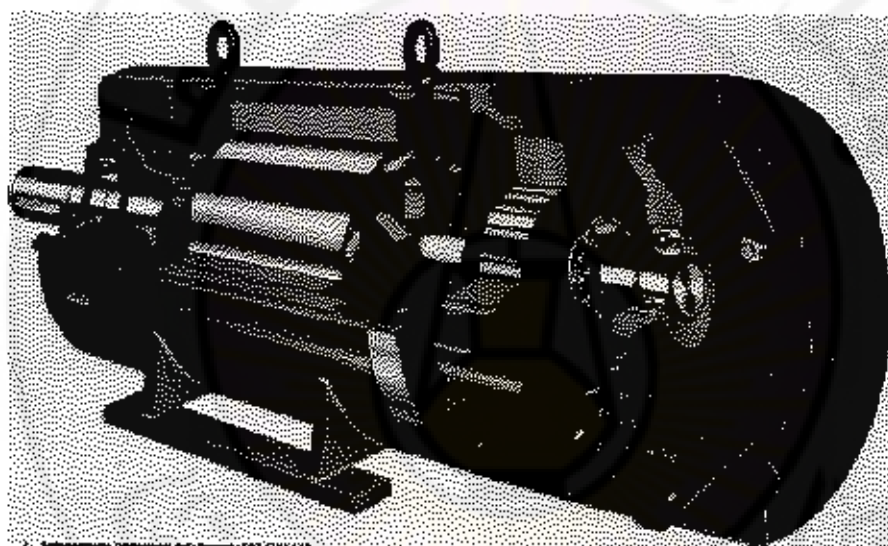
P_{out} - استطاعة الخرج [KW]

9-2-2 حالات عمل المولد التزامني

Synchronous Generator Operation Moods :

هناك أربع حالات لعمل الآلة المتزامنة:

اليمن، يبين المقطع للمولد التزامني المهيّج exciter، الثابت، المحور الذي يحمل مراوح التبريد، الرولمانات، القاعدة وعلبة الوصل المشابهة للمولد التحريضي. من المعروف أن المولدات التزامنية كبيرة الاستطاعة والتي تصل إلى عدة ميغاوات في العنفات الريحية وقد تصل إلى عدة مئات من الميغاوات في المحطات الكهربائية التقليدية. وهي عادة مولدات تزامنية ذات أقطاب أسطوانية . ومجاري الدوائر تحمل المحرض المتناوب وملفات التخميد.



الشكل 5-9 مقطع لمولد تزامني ذاتي التنظيم [4].

يبين الشكل 6-9 المخططات الكهربائية للمولد التزامني ذي التهيج بواسطة مغناطيس دائم والمولد التزامني ذي التهيج من منبع تيار مستمر

9-4-1-3 استخدام مولد التيار المستمر :

يستخدم مولد التيار المستمر لتوليد التيار المستمر على خرج العنفة الريحية و الاستفادة منه في تغذية التجهيزات و المنشآت التي تعتمد على التيار المستمر وهي محدودة. و كذلك في تخزين الطاقة الكهربائية بواسطة المدخرات و مجالها محدود أيضا. و بشكل عام يمتاز المولد بالعمل عند سرعات متغيرة و مردود جيد و يستخدم بشكل واسع في مجال الاستطاعات التي لا تتجاوز 10KW. و إذا زادت الاستطاعة عن ذلك فإن نظام التوليد الكهربائي يتطلب تبديل التيار المستمر إلى تيار متناوب. كذلك لا ينصح باستخدام هذه المولدات في مجال استطاعة تزيد عن 20KW. و يعود ذلك إلى مشاكلها التصميمية و بخاصة ظهور تيارات التبديل على المجمع مما يدعو إلى إجراءات صيانة إضافية. لذا لم ينتشر استخدام مثل هذا النوع من المولدات في إنتاج الطاقة الكهربائية بواسطة العنفات الريحية بهدف رفق الشبكة العامة للكهرباء، و إنما بقيت مجالات استخدامها محصورة بالتغذية المستقلة للمنازل ومضخات المياه و غير ذلك.

9-4-2 المولدات التزامنية Synchronous Generators:

9-4-2-1 بنية المولد التزامنسي Synchronous Generator Structure:

يتألف المولد من الثابت الذي يحمل مجموعة ملفات تشكل ثلاثة أطوار وهي التي تغذي الحمل، والدوائر الذي يؤمن الحقل المغناطيسي. تتم تغذية الدوائر من مغناطيس دائم أو من منبع تيار مستمر يمر في ملفاته.

هذه المولدات تعمل بسرعة ثابتة وتملك مميزات قاسية ولكن وجود علية السرعة والعمل على سرعات متغيرة يظهر بعض عيوب المولدات التزامنية في التطبيقات الثابتة للتردد. وتتعلق سرعة الدوران للدوائر بتردد الثابت وعدد الأقطاب حسب العلاقة.

$$N (r.p.m) = 12 \times \text{frequency} / \text{poles}$$

ومقارنة مع الآلة التحريضية يعتبر المولد التزامني أكثر كلفة. الشكل 5-5 يبين مقطعاً لمولد تزامني ذاتي التنظيم. بمتابعة الرموز الواردة في هذا الشكل من اليسار إلى

$$\Phi = K_f . I_f \quad (1-9)$$

$$I_f = V_f / R_f \quad (2-9)$$

$$E_a = K_c . \Phi . W_r \quad (3-9)$$

$$E_a = V_t + I_a . R_a \quad (4-9)$$

$$T = K_r . \Phi . I_a \quad (5-9)$$

$$P_{out} = V_t . I_a \quad (6-9)$$

حيث :

I_f : تيار التهييج A

V_f : توتر التهييج V

R_f : مقاومة ملف التهييج Ω

E_a : القوة المحركة التحريضية المتولدة في المتحرض V

W_r : السرعة الزاوية للمتحرض rad/sec

V_t : التوتر على ملفات المتحرض V

I_a : تيار المتحرض A

R_a : مقاومة المتحرض Ω

T : العزم الكهربائي N.m

P_{out} : استطاعة الخرج KW

K_f, K_r, K_c : ثوابت المولد و تتعلق بالتصميم الهندسي و يمكن تحديدها بالقياس.

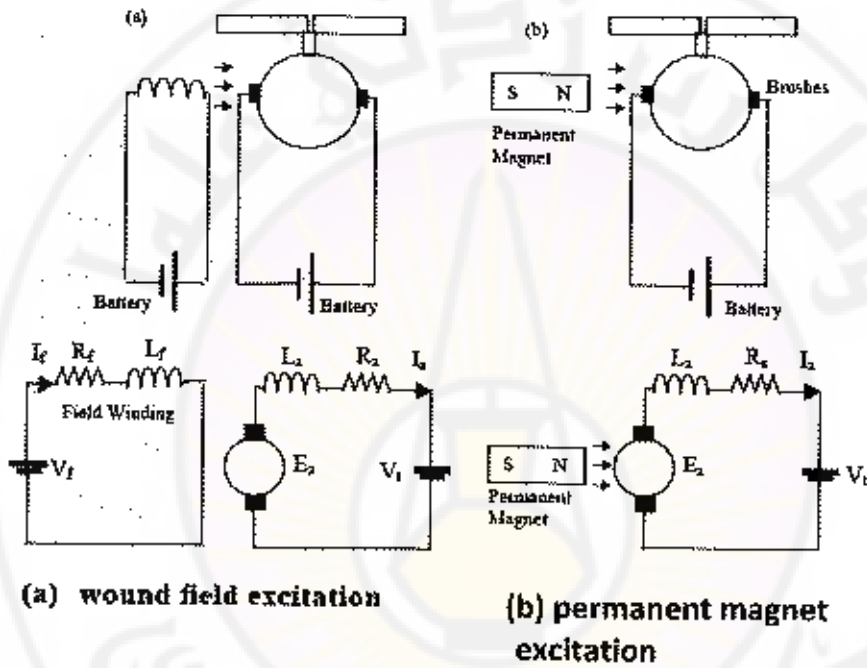
في المولدات الريحية يفضل أن يكون لدينا القدرة على التحكم بسالعزم الكهربائي و

استطاعة الخرج. و من المعادلات نلاحظ أن ذلك يمكن أن يتم عن طريق تغيير تيار

التهييج . لذا فنحن بحاجة للتحكم بتيار التهييج عن طريق مجموعة تبديل ثايرستورية

أو مقاومة متغيرة.

المغناطيس الدائم فلا يحتاج لهذا المنبع و بالتالي فإن مردود المولد الذي يعتمد على المغناطيس الدائم يكون أعلى.



الشكل 9-4: المخططات الكهربائية لمولدات التيار المستمر ذات التهيج المستقل والتهيج بالمغناطيس الدائم التي استخدمت في العنفات الريحية على استطاعات صغيرة [11].

كما يوجد طريقتان لتغذية ملف التهيج، إما أن يكون المنبع مستقلاً و يسمى المولد ذو التهيج المستقل أو تتم التغذية من المتحرض و يسمى المولد ذو التهيج التسلسلي. وهذا مبين أيضاً في الشكل 4-9. أما بقية الأنواع للمولدات المستمرة فهي ليست في مجال بحثنا .

و فيما يلي المعادلات التي تحكم مولد التيار المستمر في الحالة المستقرة :

يعرف مولد التيار المستمر بأنه جهاز كهروميكانيكي يقوم بتحويل القدرة الميكانيكية إلى قدرة كهربائية بشكل تيار مستمر و يتألف من جزئين رئيسيين:

أ- الجزء الثابت: وهو الجزء الحامل لكافة أجزاء الآلة و هو الجزء الذي يؤمن الوسيط المغناطيسي اللازم لتحويل القدرة من ميكانيكية إلى كهربائية .

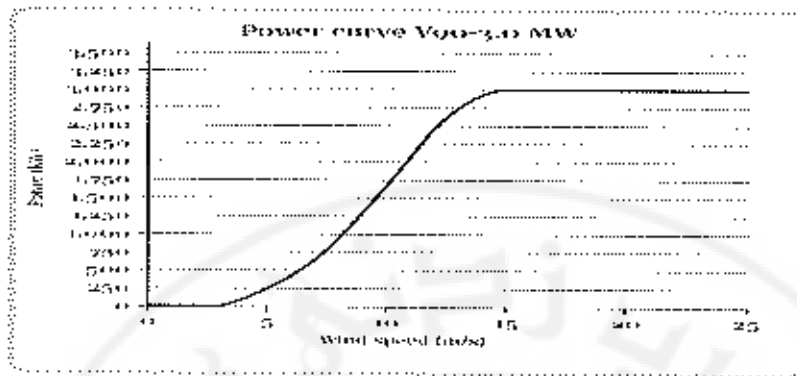
و يتكون الجزء الثابت من ملفات الأقطاب المسئولة عن توليد القوة المحركة الكهربائية ومن نوى الأقطاب و الإطار الخارجي و يعرف الجزء الثابت بالمحرض .

ب - الجزء الدائر: و هو الجزء الذي تتولد في نواقله القوة المحركة الكهربائية و يعرف بالمتحرض و يعرف هذا الجزء بأنه الجزء الحامل للقدرة الكهربائية. و يعتبر ذلك من مساوئ مولد التيار المستمر و ذلك نظراً لصعوبة نقل القدرة الكهربائية من خلال النقاط المتحركة، بالإضافة إلى أن كتلة الجزء الدائر تتناسب مع الاستطاعة المتحولة، حيث أنه كلما زادت استطاعة الآلة كلما كبر هذا الجزء الأمر الذي يحد من استخدام المولد عند الاستطاعات الكبيرة و تعتبر الاستطاعة العظمى لمولد التيار المستمر حالياً في حدود 50 KW.

وصممت في البدء عنفات ريشية باستخدام هذه المولدات على استطاعات صغيرة تغذي مدخرات كهربائية، حيث قامت المعرجات بتحويل التيار المستمر إلى تيار متناوب، إلا أن مشاكل التبديل في مجمع هذه المولدات والقوس الكهربائية واهتزاز المسفرات بعد عدد محدد من ساعات العمل أدى إلى الحد من تطوير هذا النوع من العنفات بشكل عام، ولكن ذلك لا يمنع من شرح طريقة عمل هذه المولدات في الفقرة التالية.

9-4-1-2 عمل مولد التيار المستمر:

يعتمد التيار المستمر على التحريض في الجزء الثابت و هناك طريقتان للتهييج أما باستخدام المغناطيس الدائم أو عن طريق ملف تهييج مستقل كما هو موضح في الشكل 9-4. النوع الثاني يحتاج لمنبع تغذية مستمر لتوليد الميالة المغناطيسية أما استخدام



الشكل 9-3 منحنى الاستطاعة لعنفة محددة من طراز V90 باستطاعة 3 ميغا وات والتي يستخدم فيها نظام التحكم بميل الشفرات [8].

9-4 المولدات المستخدمة في العنفات الريحية

Electrical Generators used In Wind Turbines

إن التطور التقني الكبير طرأ على العنفات الكهروريحية ومكوناتها من أبراج وشفرات ونظم تحكم جعل من طاقة الرياح أحد أهم مصادر الطاقة المتجددة التي يمكن أن ترفد الشبكات الكهربائية القومية بنسبة 15-5% من إجمالي الاستطاعة المركبة، إضافة لكونها مصدر نظيف ومنافس اقتصادياً. ويعتبر المولد الكهربائي العنصر الرئيس في العنفة الريحية وتحديداً في نظام تبديل طاقة الرياح Wind Energy Conversion (WECS) System حيث تقع على عاتقه مهمة تحويل الطاقة الحركية الناتجة عن الرياح إلى طاقة كهربائية تغذي الشبكة المحلية بشكل مستقل عن طريق ما يسمى العنفات الريحية المستقلة Stand alone Wind Turbines، أو العنفات الريحية الموصولة (المربوطة) مع الشبكة Grid Connected Wind Turbines وسنمعرض هنا المولدات الكهربائية الأكثر استخداماً في العنفات الريحية.

9-4-1 مولدات التيار المستمر :

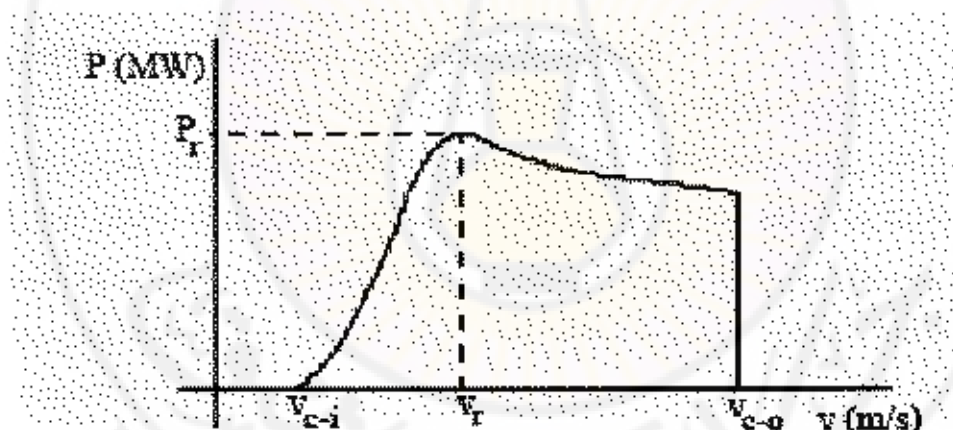
9-4-1-1 الأجزاء الرئيسية لمولد التيار المستمر:

عادة P_n وذلك باستخدام نظام التحكم بميل الشفرات Pitch Control التي سيتم شرحها بالتفصيل لاحقاً.

حيث:

$(P_n)Pr$: الاستطاعة الاسمية وهي أكبر استطاعة يمكن أن تحصل عليها العنفة.
 $(V_n)Vr$: السرعة الاسمية التي صممت عليها العنفة الريحية للحصول على الاستطاعة الاسمية.

V_{c-I} : أدنى سرعة يمكن للعنفة العمل عليها لتوليد الطاقة وتسمى سرعة بدء التشغيل (cut in speed) وتتراوح بين 3-4 متر على الثانية.
 V_{c-o} : سرعة القطع العليا وهي أعلى سرعة مسموح للعنفة العمل عندها وتسمى سرعة الإيقاف (cut off speed) وتساوي عادة 25 متر على الثانية.



الشكل 9-2: منحنى الاستطاعة للمولد الكهربائي في العنفة الريحية [11].

يبين الشكل 9-3 منحنى الاستطاعة لعنفة محددة من طراز V90 باستطاعة 3 ميغا وات والتي يستخدم فيها نظام التحكم بميل الشفرات.

أ- مولدات تيار متناوب ذات مجمع (AC) commutation Generators.

ب- مبدلات تردد دوارة.

ج- معدل سعة الموجة ومبدلات تردد.

د- مجال التعديل وتقنيات إزالة التعديل.

(1) مفاتيح تشغيل عالية تردد.

(2) مفاتيح تشغيل منخفضة التردد.

إلا أن جميع وسائل التوليد المذكورة في هذه الفقرة انقضت بفضل تطور الإلكترونيات القدرة الكهربائية Power Electronics. ويستخدم حالياً إما نظم التوليد الكهربائي المباشر أو نظم التوليد غير المباشر عن طريق المبدلات الإلكترونية أي حلقة AC-DC-AC والتي سيتم شرحها لاحقاً.

9-3 مخطط أو منحنى الاستطاعة:

إن العمل عند سرعات رياح متغيرة يتطلب نظام قيادة إلكترونية والذي يمكن أن يتحكم بالعديد من المحددات. وعند الربط مع الشبكة عن طريق هذا النظام فإننا بحاجة لدارات الترشيح والمعوضات التي يمكن أن تستخدم لتعديل معامل الاستطاعة وتحسين شروط التوافقية في النظام.

وتكون أجهزة الفصل والوصل مع الشبكة موجودة للربط مع الشبكة وتأمين العمل دون حدوث اضطرابات.

أما نظام التحكم والقيادة فقد يكون على درجة كبيرة من التنوع والتعقيد.

وبما أن الاستطاعة التي يمكن الحصول عليها من العنفة الريحية تابعة لسرعة الرياح فإن هذا التابع يأخذ عادة شكل المنحني. والشكل 9-2 يبين منحنى الاستطاعة للمولد الكهربائي في العنفة الريحية Power Curve، حيث نجد أن نظام التوليد الكهربائي يعمل بسرعات متغيرة. كما يمكن أن يكون الجزء العلوي من المنحني بين سرعة الرياح التي تحقق الاستطاعة الاسمية للمولد $V_r(V_n)$ و سرعة الرياح المسموح بها وتسمى سرعة الخروج V_{c-o} خطياً ومساوياً للاستطاعة الاسمية للمولد P_r ويرمز لها

التوصيل مع نظام تخزين بملفات حرارية للتسخين، أو غير ذلك من نظم التخزين ومنها رفع المياه بالضخ على سبيل المثال.

وبشكل عام فإن سرعة العنفة يجب أن تكون ثابتة. وفي حال العمل على سرعات متغيرة من الممكن أن يستعمل المقوم rectifier للحصول على تيار مستمر (DC) مباشرة، ثم يتم استخدام عاكس inverter للحصول على تيار متناوب (AC) بتوتر وبتردد ثابتين، وذلك من خلال نظم تبديل إلكترونية التي سيتم شرحها لاحقاً.

التوليد الكبير للقدرة الكهربائية من طاقة الرياح يجب أن يكون بتوتر (جهد) وبتردد ثابتين للتيار المتناوب (AC)، وذلك لضخ القدرة الكهربائية الناتجة إلى الشبكة الكهربائية العامة. إن الرغبات الأولية للتشغيل المفيد لعنفات الرياح ذات السرعة الثابتة تقود إلى استخدام مولدات تقليدية للتيار المتناوب. فالمولدات التزامنية تحتاج بالضرورة إلى عنفات ذات سرعة ثابتة تقريباً وذلك لتوليد جهد كهربائي ذو تردد ثابت ملائم للضخ أو الحقن الكهربائي في خطوط الشبكة الكهربائية العامة.

إن الحصول على تردد ثابت من دوار العنفة الريحية المتغير السرعة تنحصر في النظريتين التاليتين:

• طرائق متباينة:

1- آليات ميكانيكية للحصول على سرعة ثابتة لتشغيل مولدات تزامنية للتيار

المتناوب عن طريق:

أ- مسننات ذات نمب تحويل متنوعة.

ب- أنظمة مسننات لولبية.

ج- نظام التحويل الهيدروليكي.

2- تقنيات كهربائية للحصول على تردد ثابت:

أ- تنظيم التوتر والتردد في المولد.

• حلقة AC-DC-AC :

3- وسائل توليد خاصة عن طريق:

العنفات الريحية لا يحتوي نظام التوليد الكهربائي فيها على سرعة. لذلك وريدت في هذا الشكل كخيار .

9-2 أنظمة التحويل الكهربائية Electrical Conversion Systems

9-2-1 عوامل أساسية Basic Factors :

العوامل الأساسية التي تشرح التقانة الكهربائية والمتعلقة بتحويل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية هي:

1- نوع المخرج:

أ- تيار مستمر DC

ب- تيار متناوب وتردد متغير AC & variable Frequency

ج- تيار متناوب وتردد ثابت AC & constant Frequency

2- السرعة الدورانية للعنفة الريحية:

أ- سرعة ثابتة constant speed

ب- سرعة ثابتة تقريباً nearly constant speed

ج- سرعة متغيرة variable speed

3- الاستفادة من خرج الطاقة الكهربائية:

أ- تخزين بالمدخرات الكهربائية.

ب- أشكال أخرى من التخزين.

ج- الربط مع شبكة التيار المتناوب (AC) .

إن التوليد الكهربائي المباشر بالتيار المستمر (DC) نادر بالوقت الحاضر وهو محدود ولا يتجاوز استطاعة من 10-20 KW ولا يستوجب أن تكون سرعة العنفة ثابتة. ونظام التخزين بالمدخرات الكهربائية مناسب جداً للأماكن النائية حيث تكون متطلبات القدرة قليلة وصغيرة. أما تخزين طاقة الرياح بشكل حراري لاستخدام لاحق في مجال حراري فيمكن أن يكون فعالاً باستخدام تردد متغير لنظام (AC) أو (DC) في

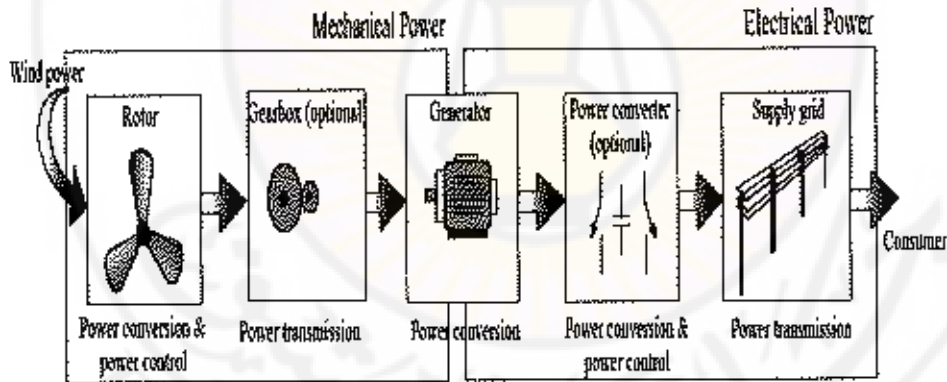
الفصل التاسع

نظم التبديل في العنفات الريحية

Conversion Systems in Wind Turbines

1-9 مقدمة:

تقوم العنفات الريحية بالاستفادة من الطاقة الحركية للرياح عن طريق الدوار (Rotor) الحامل للشفرات (Blades). ويعتبر الدوار الجزء المسئول عن استخلاص أكبر طاقة ممكنة من حزمة الهواء (وفق قوانين الايروديناميك)، التي تصطدم بالشفرات وتحول هذه الطاقة إلى طاقة كهربائية بواسطة المولد الكهربائي عن طريق محور الدوران وعجلة السرعة. حيث يتم تحويل هذه الطاقة حسب نظام التبديل المختار، ثم تنقل إلى الشبكة الكهربائية العامة والمستهلك النهائي كما في الشكل 1-9.



الشكل 1-9: آلية تحويل الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة كهربائية [5].

وتجدر الإشارة هنا إلى ملاحظتين: فكما يبين الشكل 1-9 فإن الحديث أو الدراسة في هذا الفصل تجري حول العنفات ذات المحور الأفقي، حيث أنها الأكثر انتشاراً في نظم تبديل طاقة الرياح. والملاحظة الثانية وكما سنبين لاحقاً فإن بعض التصميمات في

- [8] Dr Michael Conlon–Development of Wind Energy Resources,
Turbine Control, Configuration of Wind Generators and
Integration into Supply Networks– School of Control Systems and
Electrical Engineering DIT, Dublin –2006.
- [9]EWEA-Wind Energy- The Facts-Report- 2006.
- [10] www.windtest-nrw.de
- [11]www.bwea.com
- [12] www.eewe.energy.gov
- [13]www.windpower.org
- [14]www.vestas.co

خلال الحاسب الثابت في مركز التحكم وباستخدام برنامج خاص لجمع وتحليل المعلومات الخاصة بالعنفة.

• درجة الحرارة:

تصمم العنفة الريحية للعمل عند درجة حرارة للجو تتراوح بين $20^{\circ}\text{C} + 40^{\circ}\text{C}$ وكافة أجزاء العنفة التي تحوي سوائل يتم تصميمها بحيث تتحمل انخفاض في درجة الحرارة يصل إلى 40°C . وعند انخفاض الحرارة إلى قيم أدنى فإن إجراءات وقاية خاصة يتم اتخاذها. وإذا ازدادت درجة الحرارة داخل القمرة عن 50°C يتم إيقاف العنفة.

8-14 مراجع الفصل الثامن

- [1] دنيل كشكية سمحاضرات طاقة الرياح - النظم الميكانيكية جامعة دمشق 2009
- [2] د.كمال ناجي، م.معن كعدان - أفاق استخدام طاقة الرياح لتوليد الكهرباء في سورية و لبنان- الندوة الهندسية العلمية السورية الألمانية الثالثة - جامعة حلب 2004.
- [3] د.كمال ناجي، د. صالح الأيوبي، د. مازن غنمور- دراسة الجدوى الفنية الاقتصادية و الدراسة التصميمية لاستخدام العنفات الريحية في سورية و لبنان - برنامج التعاون البحثي السوري اللبناني (الإعلان الثالث 2004 - 2005).
- [4] Kleinkauf W. Wind Energy, control concepts and applications
Solar Energy : Research And Applications
Fourth Arab International Solar Energy Conference .
Amman -- Jordan November 20-25, 1993.
- [5] Dejan Schreiber -State of the art of variable Speed Wind Turbines - Nuremberg -Germany 2001.
- [6] Siegfried Heier
Grid Integration of WECS Wiley 2006.
- [7] Erich Hau
Wind Turbines fundamentals , technologies, application, economics Germany 2006

يتم حماية المحولة ولوحات المفاتيح على طرف التوتر المنخفض من القوس الكهربائي باستخدام نظام حماية، عند نشوء قوس كهربائي فإن هذا النظام سيفتح القاطع الرئيسي بشكل فوري ويوقف مرور التيار من العنفة.

• الحماية من الصواعق:

تجهز العنفة الريحية بنظام حماية من الصواعق ، ويقوم بحماية كامل العنفة من قمة الشفرة إلى القاعدة . هذا الحماية تسمح بإيجاد مسار فرعي لتيار الصاعقة ضمن الشفرة والقمرة والبرج دون أن يسبب أي أضرار ، وكإجراء احتياطي لزيادة الأمان يتم حماية وحدات التحكم والمعالجة في القمرة بنظام حجب عن تيار الصاعقة.

يتم تصميم الحماية من الصواعق وفقاً للمواصفة الدولية IEC 61024 (الخاصة بالحماية من الصواعق لمولدات العنفات الريحية).

توضع كاشفات الصواعق على شفرات الدوار الثلاث حيث يتم تسجيل البيانات بواسطة هذه الكاشفات مما يمكن المشغل من معرفة الشفرة التي تعرضت للصاعقة ومعرفة وقت التعرض للضربة بشكل دقيق وتحديد مقدار قوة هذه الصاعقة وهذه البيانات مفيدة جداً من أجل التنبؤ المستقبلي بالضرر المحتمل حصوله على العنفة.

ملاحظة : بالنسبة لتصميم البرج والقاعدة فإنه يختلف حسب المكان الذي ستركب فيه العنفة (على اليابسة أو على البحر) وهو ما سيشرح بالتفصيل لاحقاً.

• الحماية الضوئية:

يتم تزويد البرج بمصباح ضوئي يومض بشكل نبضي خلال الليل من أجل المواقع التي يمكن أن تمر فيها طائرات على ارتفاع منخفض أو التي تكون قريبة من المطارات، ويتم تغذية تجهيزات المحطة بواسطة خلية كهروضوئية باستطاعة 20 وات مع مدخنة

ومنظم شحن لحماية المدخنة والتجهيزات كما يتم تزويد مجمع المعلومات Data Logger بإمكانية سحب ملفات البيانات المسجلة مباشرة بوصل حاسب نقال إليه أو عن طريق الاتصال الهاتفي عبر الشبكة الثابتة أو الخلوية، حيث يمكن تزويد كل موقع بكرت SIM في حال توفر التغطية ويتم الاتصال بالمحطة على رقمها المحدد ومن

- حساسات الآلة: درجات الحرارة - مستوى وضغط الزيت - مستوى ماء التبريد - الاهتزازات.
- حساسات عمل الدوار: - سرعة الدوران والميل.
- حساسات جسم العنفة: - الاهتزازات وكواشف الصواعق.
- حساسات الربط مع الشبكة: - الاستطاعة الفعلية - الاستطاعة الردية - التوتر - التيار - $\cos \varphi$.

• حساسات الرياح:

القمرة مجهزة بحساسة رياح فوق صوتيين لزيادة الثقة والدقة في مقاييس الرياح. حساسات الرياح تقيس سرعة واتجاه الرياح وهي تمثل وسيلة اختبار ذاتية للرياح حيث عند حدوث عيب في إشارة دخل الحساس (وهي الرياح) فإن الحساس سيستجيب بحيث ينقل العنفة إلى الوضعية الآمنة لتحسين الأداء في ظروف درجات الحرارة المنخفضة يتم تجهيز الحساس بمصدر حراري.

تتوضع الحساسات في أعلى القمرية بحيث يتم حمايتها من ضربات الصواعق.

• كواشف الدخان:

البرج والقمرة مجهزة بحساسات دخان بصرية عند اكتشاف الدخان يتم إرسال إنذار عبر جهاز تحكم عن بعد بحيث يعمل القاطع الرئيسي.

• كواشف الصواعق:

تتواجد كواشف الصواعق على كل شفرة من شفرات الدوار.

• الـ GPS (مؤقتات الزمن الحقيقي):

يستعمل هذا الجهاز لمزامنة العنفة حيث دقته تكون خلال 1second وبواسطة هذا النظام يمكن مقارنة التغيرات في مختلف العنفات ضمن المنطقة نفسها (الموقع نفسه) ومثال على ذلك :- التغيرات في الاستطاعة - الشبكة - ضربات صاعقة.

• الحماية من القوس الكهربائي:

2- المتحكم المتعدد المهام

:Multi Processor Controller MP-Controller

كافة وظائف العنفة الريحية يتم مراقبتها والتحكم بها من خلال معالج صغري يعتمد وحدات تحكم يدعى MP-Controller وهذا الجهاز يتألف من عدة أنظمة تحكم أحادية. كل نظام له مهامه العملية الخاصة ويرتبط عبر شبكة بصرية Arc Not وتتوزع مكونات هذا المتحكم في أسفل البرج وفي القمرة وفي السصرة. المتحكم MP مجهز بنظام تخزين كهربائي (مدخرة كهربائية).

المتحكم MP يقوم بالمهام التالية :

- مراقبة وإشراف على العمل
- تأمين التزامن بين المولد والشبكة عند الربط بينهما
- إيقاف وتشغيل العنفة عند حدوث أو إصلاح الأعطال المختلفة
- التحكم الآلي بانحراف القمر حـسب اتجاه الرياح
- التحكم بالميل الأمثل للشفرة
- التحكم بالامتطاعة الردية والاستجابة اللازمة لعمل نظام التوليد مع تغيرات سرعة الرياح
- التحكم بالضوضاء
- مراقبة الشروط البيئية (رياح، درجة حرارة،)
- مراقبة الشبكة
- مراقبة وتسجيل ضربات الصواعق
- الإشراف على نظام كشف الدخان
- الإنذار في حالة درجات الحرارة العالية الحرجة

7-13-8 الحساسات والحمايات:

يتم الحصول على بيانات التحكم بالعنفة وإنتاج الطاقة بواسطة حساسات مختلفة:

- حساسات الظروف الجوية : اتجاه وسرعة الرياح ودرجة الحرارة.

2- منظم الميل أو انحراف الشفرة Pitch Control:

وهو مجهز عادة بمعالج صغري للتحكم بالميل يدعى Opti tip ويستند على شروط الريح السائدة . ويتم تحريك الشفرات إلى زاوية الميل الأمثلية، حيث تتوضع الآلية الميكانيكية للتحكم بالميل على الصرة. وهي عبارة عن اسطوانات هيدروليكية تكون قادرة على إدارة الشفرة حتى 90 درجة، ويكون لكل شفرة اسطوانتها الهيدروليكية الخاصة بها.

2- النظام الهيدروليكي:

هذا النظام يولد ضغطا على أنظمة التحكم بالميل في الصرة، بحيث يؤدي إلى انحراف الشفرات إلى الزاوية المطلوبة لتحقيق ثبات دوران الدوار مع زيادة سرعة الرياح. وفي حال حدوث أي عطل في العنفة أو الشبكة الكهربائية أو زيادة كبيرة في سرعة الرياح فإن الخزان الاحتياطي الهيدروليكي المركب في العنفة يولد ضغطا كافيا لحرف الشفرات بزاوية 90 درجة وإيقاف العنفة عن العمل.

4- الشفرات:

تصنع الشفرات من الألياف الزجاجية المدعومة بالأنسجة الكربونية. وكل شفرة تتألف من لوح داخلي محاط بغلافين ويتم تصميم الشفرة بحيث تعطي الخرج الأمثل مع الأخذ بعين الاعتبار ضوضاء أقل وتأثير بصري أقل وتقليل الأحمال الميكانيكية المطبقة على العنفة ويتم وصل الشفرة مع الصرة عن طريق أربع نقاط وصل كروية. كل شفرة تملك نظام حماية ضد الصواعق يتألف من مستقبلات صواعق على رأس الشفرة وقاطع آلي داخل الشفرة.

8-13-6 التنظيم والتحكم:

1- توصيف السرعة المتغيرة

نظام السرعة المتغيرة يضمن إنتاج طاقة كهربائية ثابتة ومستقرة من العنفة وهو يتألف من مولد تحريضي أو تزامني ومبدلة استطاعة هذه المبدلة تكون مربوطة مع الدوار للتحكم بالمولد عند السرعة المتغيرة (عند هبات الرياح).

منها بمقدار 90 درجة. . وعلاوة على ذلك يوجد نظام هيدروليكي آخر يؤمن ضغطاً ميكانيكياً على القرص الكابح المتوضع على الترس الرئيسي على محور السرعة العالية.

6- نظام التبريد والتهوية:

إذا تجاوزت درجة الحرارة الداخلية للقمرة حداً معيناً سيتم فتح صماماتها إلى الخارج، وبإستخدام محرك مساعد سيتم سحب الهواء الخارجي لتبريد الهواء داخل القمرة. أما نظام تشحيم التروس والمولد ووحدة السرعة المتغيرة فيتم تبريدها من منفذ هوائي منفصل وبإستخدام أنظمة تبريد مائية/هوائية منفصلة حيث يتم عزل مبردات الماء حرارياً عن باقي أجزاء القمرة وتوجد مروحة منفصلة تقوم بتبريد المحولة.

8-13-4 المحولة Transformer:

تتوضع المحولة إما في القسم الخلفي من القمرة في حيز منفصل وهي من النوع ثلاثي الطور الجاف الراتنجي والمصنعة خصيصاً لتطبيقات العنفات الريحية، أو في أسفل البرج وأحياناً إلى جانب البرج.

يتم ربط الملفات بشكل دلتا على جانب التوتر المتوسط ما لم يذكر خلاف ذلك أما الملفات على جانب التوتر المنخفض (400V-1000V) فتوصل بشكل نجمي. المحولة تقوم برفع توتر الخرج من التوتر المنخفض إلى التوتر 20 KV وهو التوتر المتوسط المعمول به في سورية.

ويكون نظام التأسيس من نوع TN، حيث يتم وصل نقطة النجمة مع الأرض. نظام تشحيم التروس. والمولد ووحدة السرعة المتغيرة يتم تبريدها من منفذ هوائي منفصل وبإستخدام أنظمة تبريد مائية/هوائية منفصلة حيث يتم عزل مبردات الماء حرارياً عن باقي أجزاء القمرة وتوجد مروحة منفصلة تقوم بتبريد المحولة.

8-13-5 الدوار ويتألف من:

1- الصرة Hub:

تتوضع الصرة بشكل مباشر بحيث تغطي علب التروس وتعمل على نقل استطاعة الرياح إلى المولد عبر المحور الرئيسي وعلبة السرعة.

1- الجزء الأمامي الحديدي : والذي يشكل قاعدة تحمل المولد والتروس (علبة السرعة) ومحور دوران المولد والمحور الرئيسي (Main Shaft) .

2- الجزء الخلفي الذي يكون متصلاً مع آلية التوجيه (Yaw Drive).

8-13-2 العناصر الموجودة داخل القمرة:

1- المحور الرئيسي Main Shaft:

يتصل المحور الرئيسي بين الدوار وعلبة السرعة ويسمى أيضاً علبة التروس ويدور بنفس سرعة الدوار، وتكون سرعة الدوران هذه في حدود 30-40 دورة في الدقيقة.

2- علبة التروس Geer Box:

وحدة التروس تتكون من علبة سرعة كوكبية ثنائية المراحل وعلبة سرعة حلزونية أحادية المراحل حيث يتم تثبيت هذه الوحدة على سرير القمر، وتقوم بمهمة رفع السرعة بنسبه نقل تتراوح عادة بين 20 و 25 .

نظام تشغيل علبة التروس عبارة عن نظام تغذية فورية تتم في أوقات محددة.

3- المولد الكهربائي:

تختلف أنواع المولدات الكهربائية في العنفة الريحية، والتي تقوم بمهمة تحويل الطاقة الميكانيكية المقدمة من الرياح إلى دوار العنفة إلى طاقة كهربائية. وسيتم شرح نظام التوليد الكهربائي بالتفصيل في الفصل التالي.

4- نظام التحكم بالتوجيه (Yaw Drive):

وهو نظام بسيط يعتمد على مبدأ الاحتكاك الداخلي ويؤمن عملية تحريك القمر على قمة الدراج وتوجد أربعة تروس للتحكم بالتوجيه تتصل مع محركين كهربائيين صغيرين. وبالتالي يتم تدوير القمر إلى الوضعية المطلوبة، بحيث يكون الدوار بمواجهة الرياح مهما تغير اتجاهها، وذلك استناداً إلى المعلومات الواردة من حساس اتجاه الرياح المركب إلى جانب حساس قياس سرعة الرياح أعلى القمر.

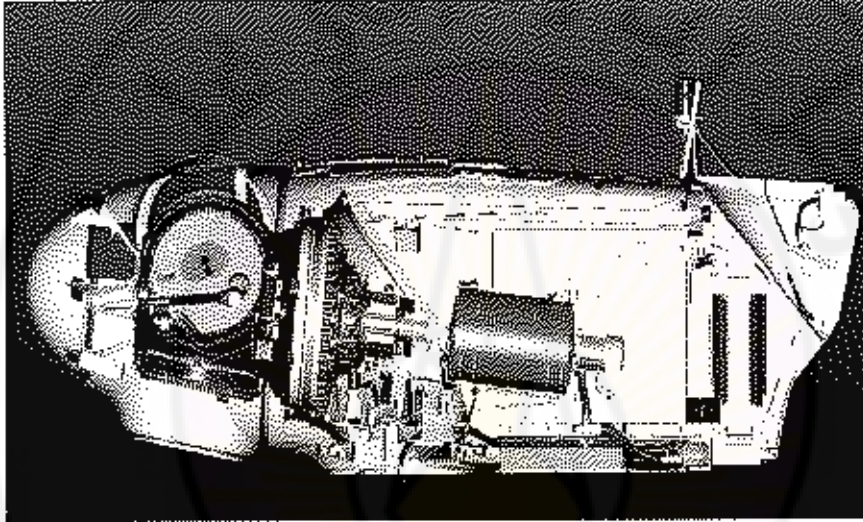
5- نظام الكبح : كوابح العنفة يتم تثبيتها بالكامل من خلال نظام قيادة هيدروليكية مع شفرات الدوار حيث يضمن تحقيق زلوية انحراف كامل للشفرات وأحياناً للجزء الطرفي

قطر الدوار يجب أن يتناسب مع استطاعة العنفة، وعلى سبيل المثال يساوي 90m- 100m من أجل عنفة ذات استطاعة المواد الاسمية 3MW. وتجدر الإشارة إلى أن حسابات قطر الدوار أكثر تعقيداً وتتعلق بمستوى سرعات الرياح في الموقع.

13-8 أجزاء العنفة ذات المحور الأفقي:

1-13-8 القمرة The Nacelle:

يبين الشكل 8-21 مقطعاً عرضياً للقمرة، والتي تتركب أعلى البرج.

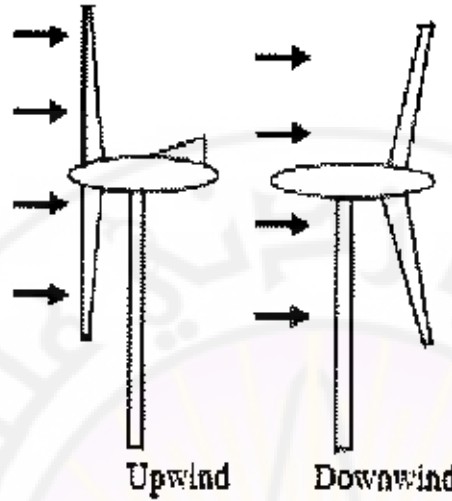


الشكل 8-21: مقطع عرضي للقمرة [4].

غطاء القمرة مصنوع من الألياف الزجاجية (الفيبركلاس)، حيث توجد فتحة في أسفل القمرة تؤمن الوصول إلى داخل القمرة وفي أعلى القمرة توجد فتحات تؤمن الوصول إلى سطح القمرة وبالتالي الوصول إلى حساسات الرياح .

إن الجزء الأمامي من القمرة يحتوي عناصر نقل الحركة والذي ينقل القوى والعزوم من الدوار إلى البرج من خلال نظام التحكم بالانحراف وهذا الجزء مصنوع من الفولاذ .cast steel

سرير القمرة يتألف من جزئين رئيسيين :



الشكل 8-20: عنفة ذات دوار أمامي وعنفة ذات دوار خلفي [3].

ثانياً: التحكم بالانحراف

يتم التحكم غالباً بزاوية ميلان الشفرة وهي ذات تحكم فعال بالانحراف Pitch Control وذلك عندما تزداد سرعة الرياح عن القيمة التي تبدأ عنفة أو المولد الكهربائي بتوليد القدرة الكهربائية عند القيمة الاسمية للاستطاعة، وبالتالي يدور الدوار بسرعة ثابتة مهما ازدادت سرعة الرياح ابتداء من سرعة التوليد الاسمية وحتى سرعة إيقاف العنفة والتي تساوي عادة 25 متراً على الثانية.

ثالثاً: عدد الشفرات

يصمم دوار العنفة الريحية كما ذكرنا سابقاً بثلاث شفرات وأحياناً بشفرتين ونادراً بشفرة واحدة مع نقل معاكس. وبالإضافة إلى ما شرحنا سابقاً فإن الدوار ذو الثلاث شفرات أكثر توازناً.

رابعاً: قطر الدوار

تغيير زاوية الخطوة للشفرة، ولكن ذلك يصعب تطبيقه عملياً لما يحتاج إليه من تعقيد في التصميم وارتفاع التكاليف.

ثانياً: كفاءة تصميم الشفرة

تعتمد قيمة معامل كفاءة التحويل المروحة (Cp) على تصميم الشفرة. ويتضح ذلك من الشكل 8-20 حيث يبين نماذج لتصميمات مختلفة للعضو الدوار وكيف تتغير قيمة (Cp) تبعاً لذلك.

وكما يبين الشكل 8-20 فإن عدد الشفرات في العنفات ذات المحور الأفقي يؤثر على زيادة مساحة الدوار ومعامل كفاءة التحويل وبالتالي مردود العنفة. فأكبر نسبة للسرعة الطرفية تكون لدى العنفة بشفرة واحدة مع ثقل معاكس، بينما أفضل مردود يكون لدى العنفة بثلاث شفرات. ونلاحظ في هذا الشكل أن قيمة المردود في إحدى أنواع العنفات ذات المحور العمودي ويسمى عنفة سافونيوس متدنية كثيراً بالمقارنة مع العنفات ذات المحور الأفقي. وهذا ما يفسر أيضاً عدم انتشار العنفات ذات المحور العمودي بشكل عام.

وتجدر الإشارة أن الشكل 8-19 يبين أن المردود الفعلي لدى جميع أنواع التصميمات في العنفات الريحية لا يتجاوز في حال من الأحوال 0.5، بينما قيمة المردود النظري أو ما يسمى بمعامل كفاءة تحويل طاقة الرياح تقترب من 0.6 كما هو مبين في هذا الشكل. وتساوي تحديداً 0.593 كما أشرنا سابقاً.

8-12 المواصفات العامة للعنفة الريحية ذات المحور الأفقي:

أولاً: نوع العنفة

- تصمم العنفات الريحية بحيث تكون عادة أمامية الدوار وتسمى العنفات رافعة الرياح Upwind، وتصمم أحياناً خلفية الدوار وتسمى العنفات خافضة الرياح Downwind، إلا أن هذه الأخيرة لم تنتشر بسبب حدوث اضطراب في حركة الدوار نتيجة لما يسمى ظاهرة ظل البرج Tower Shadow. والشكل 8-20 يبين مخططاً لهذين النوعين من العنفات.

8-11-1 العوامل التي تؤثر في (Cp):

أولاً : السرعة النسبية لطرف الشفرة (λ) Tip- speed ratio

وهي النسبة بين السرعة الخطية لطرف الشفرة إلى سرعة دخول الرياح u_1

$$\lambda = \omega * r / u_1 \quad (3-8)$$

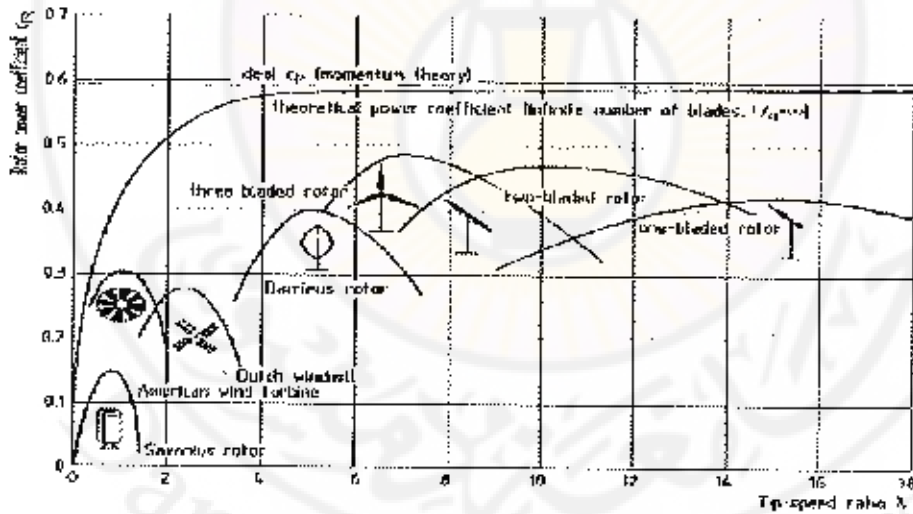
حيث:

λ - هي السرعة النسبية لطرف الشفرة

ω - السرعة الزاوية لطرف الشفرة

r - هو نصف قطر الدوران

ويوضح الشكل 8-19 تغير مقدار Cp مع تغير السرعة النسبية لطرف الشفرة لأنواع مختلفة من العنفات الريحية.



الشكل 8-19: منحنيات تغير كفاءة التحويل Cp مع تغير السرعة النسبية [8].

ويمكننا العمل عند أقصى قيمة لكفاءة التحويل (السرودود) (Cp) وذلك بالمحافظة على تغير مربع طرف الشفرة مع تغير سرعة دخول الريح إما عن طريق تغيير الحمل أو

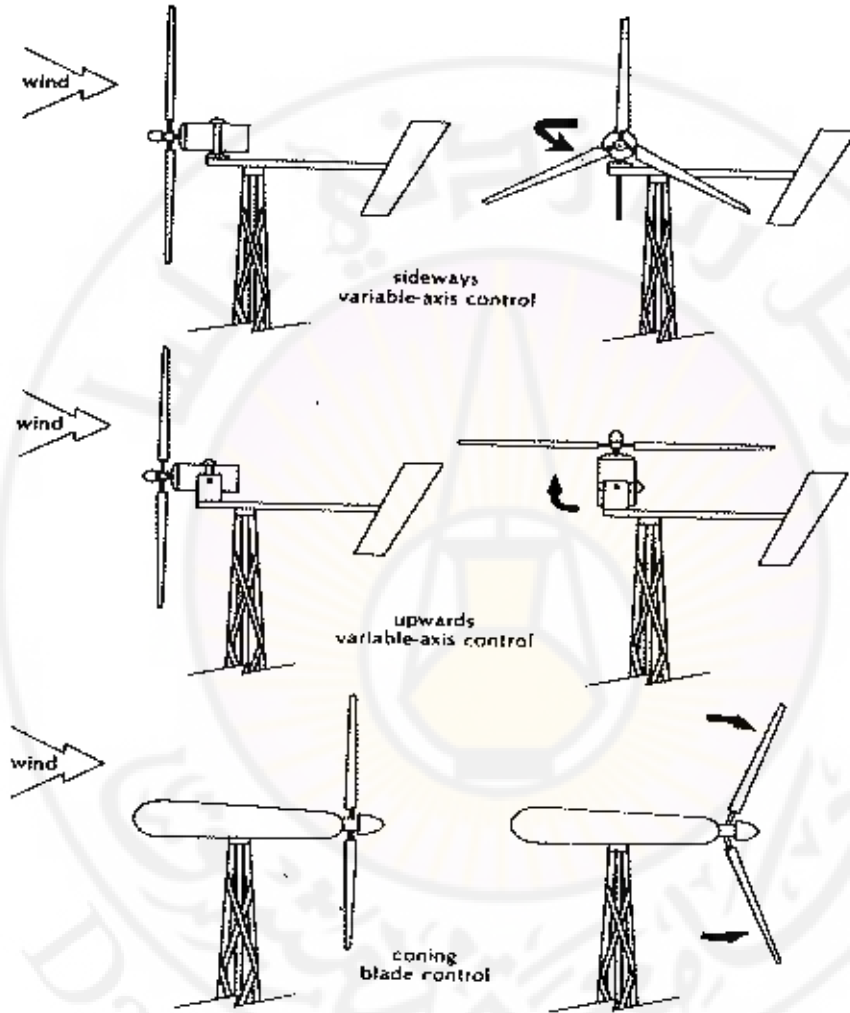
الجدول 8-1 يبين استطاعة العنفة وقطر المناظر لها ، والتي تستند الى الخبرة العالمية ويمكن اعتبارها مؤشرا عند تصميم العنفات الريحية.

الجدول 8-1: علاقة استطاعة خرج العنفة الريحية بقطر الدوار [9].

تغير استطاعة خرج الدوار بتغير قطر الدوار	
قطر الدوار (m)	استطاعة الخرج (kw)
10	25
17	100
27	225
33	300
40	500
44	600
48	750
54	1000
64	1500
72	2000
80	2500
Sources: Danish Wind Industry Association, American Wind Energy Association	

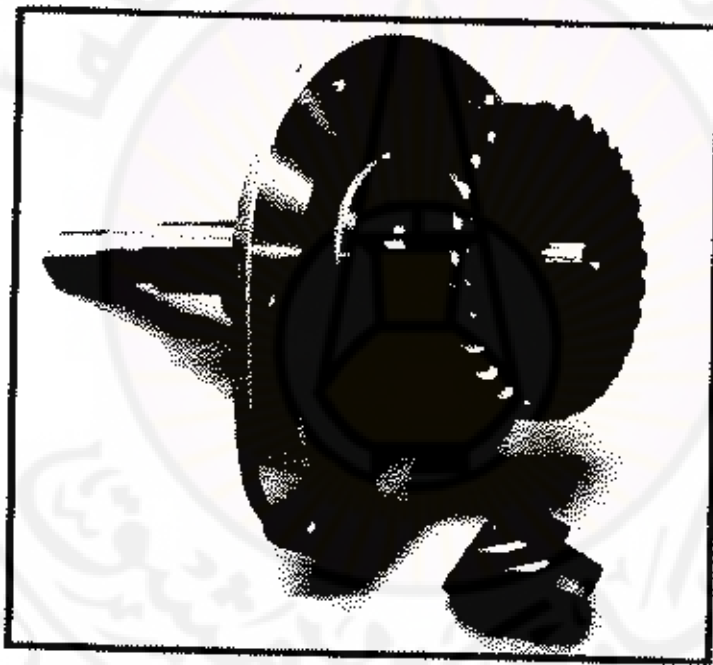
8-11 معامل كفاءة تحويل طاقة الرياح أو معامل أداء العنفات الريحية (C_p) ويقصد به كفاءة تحويل طاقة الرياح إلى طاقة يمكن الاستفادة منها سواء كانت كهربائية أو ميكانيكية. وقد أثبت العالم الألماني ألبرت بيتز (Albert Betz) المتخصص في علم ديناميك الهواء أن أقصى قيمة نظرية لهذا الثابت هو $\frac{16}{27}$ حوالي 0.593 ويعرف بحد بيتز (Betz limit)

مع الرياح كما في الشكل 18-8 الذي يبين أيضاً عدة تصميمات للعنفات الريحية التي تم اختبارها قبل أن يتم اعتماد العنفة ذات المحور الأفقي والدوار الأمامي بشكل عام.



الشكل 18-8 عدة تصميمات للعنفات الريحية التي تم اختبارها قبل أن يتم اعتماد العنفة ذات المحور الأفقي والدوار الأمامي بشكل عام [1].

ستكون 200W بدلاً من 1Kw. إن نسب نقل الحركة لعطب السرعة المستخدمة في أنظمة طاقة الرياح تتراوح بين $1/2$ و حتى $1/100$. هناك طريقة أخرى يمكن من خلالها وصل محور دوران العنفة مباشرة مع المولدة و ذلك باستخدام مولدات تعمل عند سرعات دوران منخفضة. هذه الطريقة تسمى بطريقة الوصل المباشر، و في هذه الطريقة يعطي المولد طاقته الكاملة عند سرعة دوران منخفضة، مثلاً 180 rpm، و تكون المولدات في هذه الحالة أكبر حجماً و وزناً بالمقارنة مع استخدام وصل الحركة عن طريق علبة السرعة.



الشكل 8-17: علبة السرعة [1]

التحكم بوضعية محور الدوران تعتمد على ضغط الرياح على الدوار لتحريكه إما بشكل جانبي بالنسبة للرياح أو بشكل شاقولي، وفي الحالتين يصبح الدوار بحالة عدم مواجهة

وكما ذكرنا سابقا فقد وصل لارتفاع الأبراج الاسطوانية في التصميمات الحديثة إلى ما يزيد عن 160 مترا وبلغت استطاعة بعض العنفات التي جرى تصميمها مؤخرا 8 ميغا وات. ون المتوقع زيادة الاستطاعة للعنفة الواحدة خلال السنوات القادمة إلى 10 ميغا وات مع تطور استخدام المواد ذات الناقلية العالية (Super Conductivity) في المولدات الكهربائية.

8-10 الأسس التصميمية لعنفة السرعة

Designing principles of Gearing Box

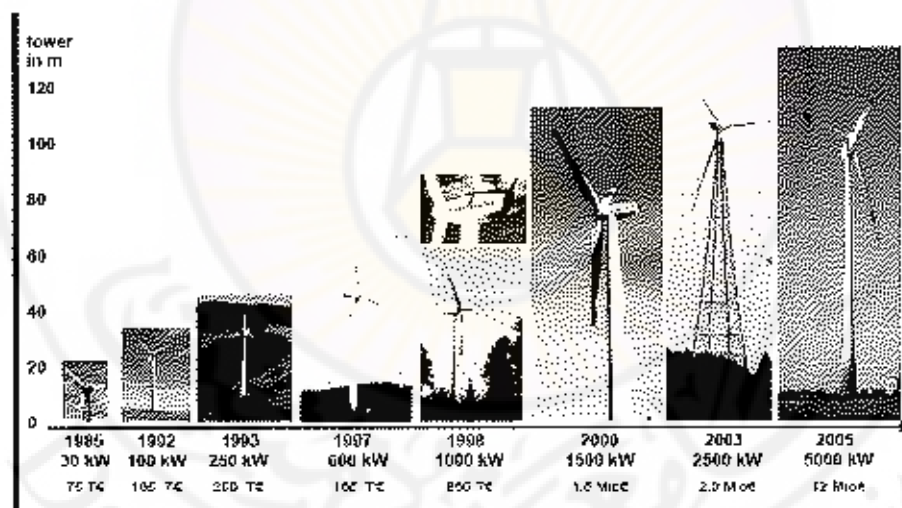
إن الاستطاعة الناتجة من المولد تقريبا متناسبة مع سرعة دوران المولد. و معظم المولدات تصمم لتعمل عند سرعة دوران ثابتة إما تكون 1800 أو 3600 rpm (هذا بالنسبة للمولدات التي تعطي تيار متناوب بتواتر 60Hz). هذه السرعات القياسية التي تصنع على أساسها المولدات الكهربائية. و عند استخدام هذه المولدات في أنظمة طاقة الرياح فإن المشكلة تظهر. فإن معظم الدورات في أنظمة طاقة الرياح تدور من 200 وحتى 400 rpm. و هذه السرعات غير كافية لتدوير المولدات عند السرعات التي صممت على أساسها , لذا يجب استخدام علب سرعة لترفع من سرعة الدوران. فمثلا إذا كان لدينا مولد باستطاعة 1 Kw و يعمل عند سرعة دوران 1800، و كانت سرعة محور الدوران المتصل مع دوار العنفة 360 rpm فعندها يجب استخدام علبة سرعة نسبة نقل الحركة فيها تساوي 5، أي يجب أن تزيد سرعة الدوران على محور الخرج خمسة أضعاف سرعة الدوران على محور الدخول لعنفة السرعة. و علبة السرعة هذه بداخلها يوجد مسننين واحد منهم قطره يقابل خمسة أضعاف قطر الآخر. حيث يتصل محور دوران دوار العنفة مع المسنن الكبير و يتصل محور المولدة مع المسنن الصغير. و في مثالنا هذا فإن لم نستخدم علبة سرعة فإن الطاقة الناتجة من المولدة

- أن تتوفر فيه وسائل آمنة للوصول إلى قمة العنفة عند الحاجة. و بالنسبة للعنفات ذات الاستطاعات الصغيرة، يجب أن يتمتع البرج بسهولة خفضه إلى الأرض عند الحاجة للصيانة.

- أن يتمتع على السطح الخارجي للبرج بمقاومة كبيرة للظروف الجوية المختلفة التي يمكن أن يتعرض لها.

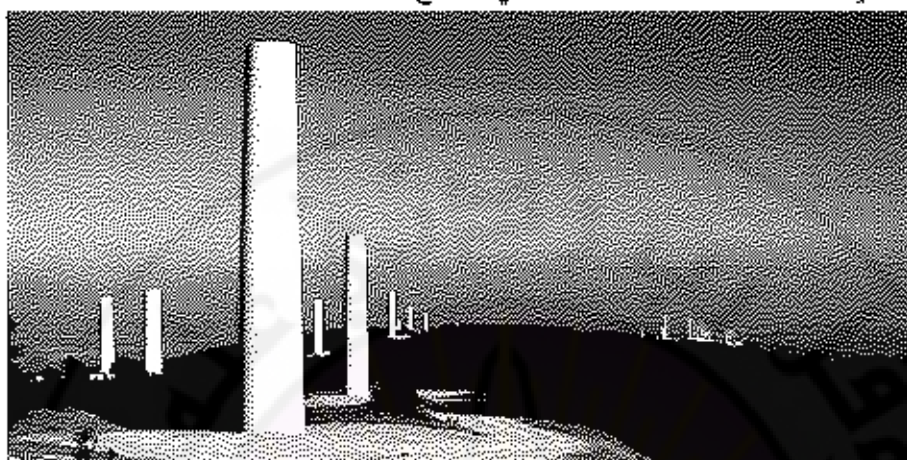
-- أن يكون للبرج الشكل الهندسي الجميل، و أن لا يكون لشكله تأثير على الطيور المهاجرة.

يبين الشكل 8-16 أنواع الأبراج الشبكية والأنبوبية و العنفات المركبة عليها ومختلف استطاعاتها التي تطورت وازدادت في السنوات الأخيرة بشكل ملحوظ، مع فكرة عن أسعار العنفات التقديرية تبعاً لتطور استطاعاتها.



الشكل 8-16: أنواع الأبراج الشبكية والأنبوبية وتطور ارتفاعاتها وأسعار العنفات التقديرية [3].

بها لنقله من المصنع أو الميناء إلى الموقع المطلوب يتم تصنيعه بعدة أجزاء ، حيث يجري تركيبها وتثبيتها فوق بعضها في الموقع وفقا لطرق ومواصفات ومعايير عالمية.



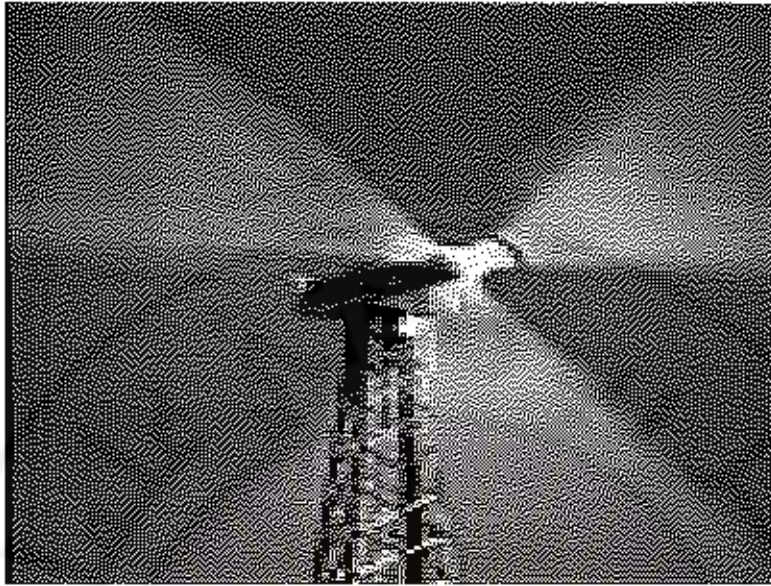
الشكل 8-15: الأبراج الأنبوبية الفولاذية Tubular Steel Towers [6].

8-9 معايير تصميم البرج : Criteria of Tower Design

يجب أن تتوافر في التصميم الجيد للبرج الأمور التالية:

- أن يحقق البرج الارتفاع المناسب للدوار بحيث تتوافر عند هذا الارتفاع الطاقة المطلوبة، بالإضافة إلى الاستقرار الريحي الكافي، مع تحقيق الكفاءة الاقتصادية.
- أن يكون قادرا على تحمل كل الأحمال و القوى التي يمكن أن يتعرض لها سواء في حالة تشغيل العنفة، أو في حالات التوقف عند زيادة سرعات السريح عن الحدود المسموح بها.

- أن يكون التواتر الطبيعي للبرج لا يتطابق مع تواتر العنفة أثناء عملها ، و ذلك لتجنب حدوث التجاوب الميكانيكي و الذي يسبب إجهادات التعب في البرج.



الشكل 8-14: الأبراج الشبكية Lattice Towers [6].

3-8-8 الأبراج الأنبوبية الفولاذية Tubular Steel Towers:

يستخدم هذا النوع في العنفات ذات الاستطاعات الكبيرة و الكبيرة جدا. كما يستخدم حاليا للاستطاعات المتوسطة والصغيرة أيضا. ويعتبر هذا النوع هو الأكثر انتشارا في العالم بسبب متانته العالية و شكله المحبب وإمكانية تركيب تجهيزات التحكم وحتى مركز التحويل الخاص بالعنفة الريحية ضمن البرج على قاعدته. وذلك بالرغم من الظل الريحي (ظل البرج) المرتفع الذي يتشكل خلفه و كلفته العالية بالمقارنة مع الأبراج الشبكية. بالنسبة إلى العنفات الكبيرة تشكل كلفة البرج 20% من كلفة المنشأة (العنفة) التأسيسية.

الشكل 8-15 يبين صورة لهذه الأبراج، حيث يتم تصنيعها في مصانع التعدين على شكل مخروطي، بقطر قاعدة أكبر، وإذا زاد ارتفاعه (أي طوله) عن الحدود المسموح



الشكل 8-13: الأبراج الأنبوبية المثبتة بأمراس شد Guy Towers [6].

8-8-2 الأبراج الشبكية Lattice Towers:

يستخدم هذا النوع في العنفات ذات الاستطاعات المتوسطة و الكبيرة أحياناً. و يكون البرج بشكل هرمي قاعدته الكبرى عند الأرض. و يشيع استخدامه في العنفات الريحية الخلفية بسبب قلة الظل الريحي (ظل البرج) المتشكل خلفه. و الشكل 8-14 يبين هذا النوع من الأبراج.

ذات الثلاث شفرات والتي تقل سرعتها عن ذات الشفرة الواحدة وذات الشفرتين تعتبر الأكثر توازناً، ويمكن اعتبارها الأمثل من نواحي التصميم والمردود والقوى الميكانيكية المتناظرة على شفراتها الثلاث، كما تبين ذلك منحنيات كفاءة التحويل (المردود) في الشكل 8-19 الوارد في الفقرة. لذلك أضحت العنفات ذات الثلاث شفرات الأكثر انتشاراً في العالم.

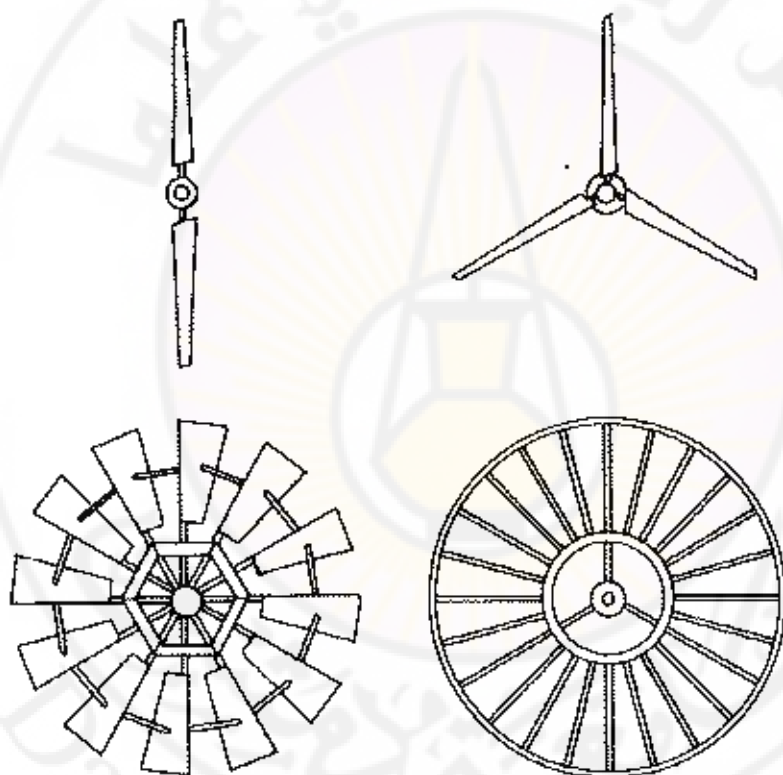
8-8 الأسس التصميمية للأبراج Designing Principles of Towers

يقوم البرج بحمل القمرة مع كل الأجزاء التي تحتويها بالإضافة إلى الدوار ، و مهمة البرج تأمين الارتفاع المناسب الذي يتم من خلاله جني أكبر قدر ممكن من استطاعة الرياح المتوفرة. فكلما زاد الارتفاع تزداد سرعة الرياح و يزداد أيضا استقرارها. و يتحدد ارتفاع البرج وفق عدد من العوامل التقنية و الفنية و الاقتصادية. و لهذه الأبراج نماذج مختلفة تصنع منها حسب استطاعة العنفة و الارتفاع المطلوب و هذه النماذج هي:

8-8-1 الأبراج الأنبوبية المثبتة بأمراس شد Guy Towers:

تستخدم هذه الأبراج في العنفات ذات الاستطاعات الصغيرة، و تشد لتثبت بواسطة أمراس معدنية إلى نقاط تثبيت في الأرض (Pole). تتميز هذه الأبراج بخفة الوزن و الكلفة المنخفضة و أيضا تتميز بسهولة نصبها و تركيبها. لكن سلبيتها أنها تحتاج لمساحة واسعة حول البرج من أجل تثبيت البرج. و الشكل 8-13 يبين هذا النوع من الأبراج.

عدد الشفرات في الدوار: إن نسبة السرعة المحيطية التي ستعرض له بالتفصيل لاحقاً تتعلق أيضاً بعدد شفرات الدوار. و يحدد ذلك النسبة بين مساحة سطح الدوار التي تواجه الريح بالنسبة للسطح الذي يتم عبوره التدفق. فكلما ازداد عدد الشفرات في الدوار نقصت نسبة السرعة المحيطية. لذا فالدوارات ذات العدد الكبير من الشفرات تكون سرعة دورانها أقل من الدوارات التي لها نفس القطر و لكن عدد أقل من الشفرات و ويوضح ذلك الشكل 8-12.



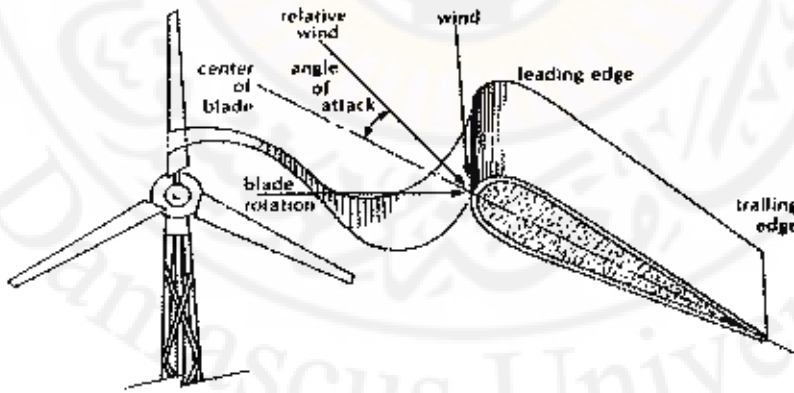
الشكل 8-12: الدوارات ذات الشفرتين وثلاث شفرات ومتعددة الشفرات [1].

فالعنفة ذات الشفرة الواحدة (مع ثقل معاكس) تستطيع تحقيق أكبر سرعة دوران من أجل نفس سرعة الرياح. بينما العنفة متعددة الشفرات، والتي تصمم على شاكلة الدراجة الهوائية تدور على سرعات بطيئة. لذلك استخدمت لضخ المياه الجوفية. ولكن العنفة

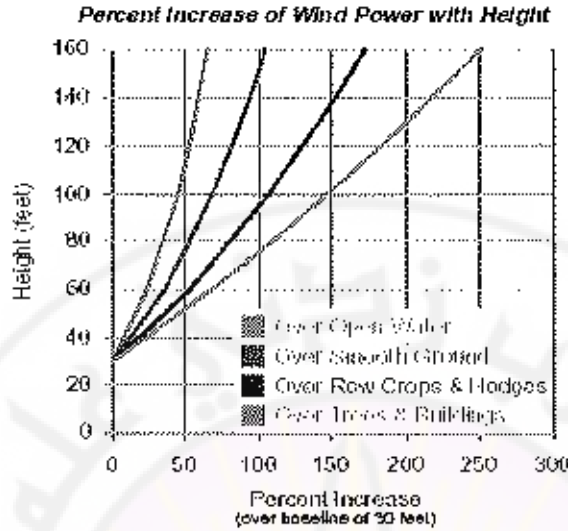
7-8 الأسس التصميمية للدوار :Designing Principles of Rotor

الدوار هو الجزء الأهم في العنفة الريحية ذات المحور الأفقي. فالتصميم غير الجيد للدوار يقلل من مقدار الطاقة التي تنتجها العنفة الريحية. فالدوار يجب أن يقوم بتدوير المولد بالسرعة الكافية لتوليد أكبر قدر ممكن من القدرة الكهربائية لكن ضمن حدود السرعة التي لا تؤدي إلى حدوث أي أضرار على النظام تسببها السرعات الزائدة. إن شفرات دوار العنفة الريحية تشبه أجنحة الطائرات و الفرق الوحيد أن شفرات الدور تتحرك بحركة دائرية حول مركز الدوار بينما أجنحة الطائرات تتحرك بحركة أفقية مستقيمة.

وكما هو الحال في جناح الطائرة ، فإن الحافة الأمامية لشفرة الدوار تكون مسميكة و مدورة، لكن تتناقص باتجاه الخلف لتصبح رقيقة جداً عند حافة الشفرة. و الجانب الأمامي للشفرة المواجه للرياح يكون مستقيماً أو منحنيّاً قليلاً أما الجانب الخلفي غير المواجه للرياح فيكون منحنيّاً. و تثبت كل شفرة بحيث يكون لها وضع زاوي معين بالنسبة للرياح أي على شكل زاوية وتسمى زاوية الهجوم. و كلما كانت زاوية الهجوم أصغر كلما ازدادت سرعة دوران الدوار. والشكل 8-11 يوضح مقطعاً في جناح الشفرة.



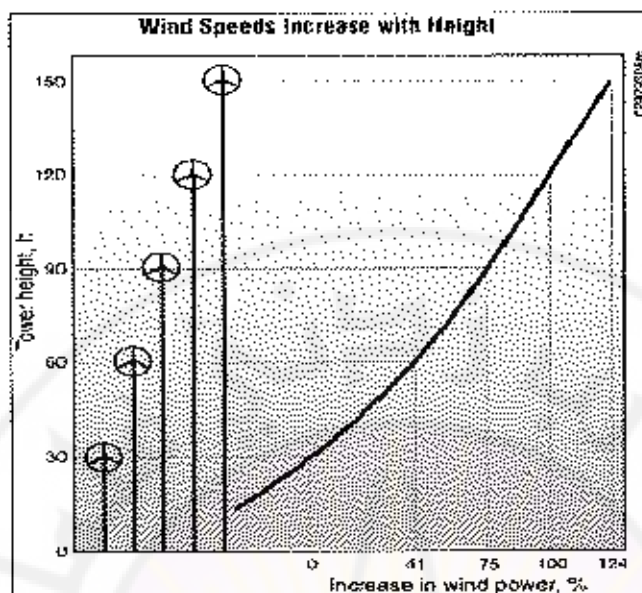
الشكل 8-11: مقطع في جناح الشفرة [1].



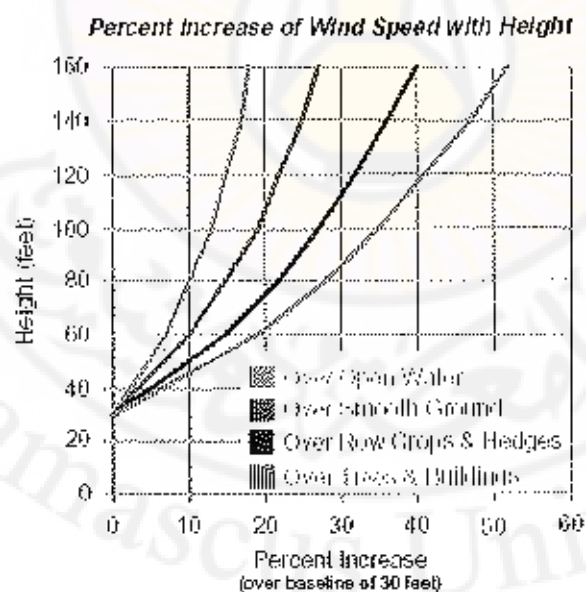
الشكل 8-10: اثر زيادة الارتفاع على زيادة السرعة (الشكل العلوي) وعلى زيادة

الاستطاعة في الموقع، حسب طبيعة الأرض [5].

من جهة ثانية، عند مرور الرياح فوق الأرض بقليل فإنها تصطدم بالمنازل و الأشجار و التلال و الهضاب التي يمكن أن تواجهها ، بالإضافة إلى تأثير خشونة الأرض على سرعة الرياح، مما يخفف من سرعة الرياح و يشكل ما يسمى بالتدرج الريحي (Wind Shear)، حيث أنه نتيجة تأثير خشونة الأرض و العوائق المختلفة تقل سرعة الجريان المركزي للرياح . و لهذا السبب تفضل الشواطئ والأماكن المكشوفة كمواقع مثالية للمزارع الريحية. الشكل 8-6 بين تأثير أحد العوائق على انتظام الرياح ، حيث تظهر مباشرة منطقة عالية الاضطراب لتدفق الرياح وتشكل ظاهرة التدرج الريحي. إن ارتفاع البرج المثالي يتحدد إذا بالسرعة اللازم توفرها و التي يتم تصميم الآلة على أساسها، أي بمعنى آخر يجب أن يرفع البرج العنفة إلى الارتفاع الذي يحقق هذه السرعة، مع الوضع في الحسبان المعدل السنوي لسرعة الرياح في الموقع. و هذا يتحدد بدراسة دقيقة للمنطقة، و تحليل حركة الرياح عند ارتفاعات مختلفة في هذه المنطقة. و هذا يستغرق وقتاً للحصول على نتائج دقيقة.



الشكل 8-9: أثر زيادة ارتفاع أبراج العنفات الريحية على زيادة استطاعتها [5].



6-8 العوامل المؤثرة على اختيار ارتفاع الأبراج

The Factors, which effect on choosing the Tower Height

يتم رفع العنفات الريحية ذات المحور الأفقي إلى ارتفاعات عالية و ذلك لسببين، الأول هو ظاهرة زيادة سرعة الرياح في الموقع مع زيادة الارتفاع ، و الثاني هو ظاهرة اضطراب الرياح التي تقل مع زيادة الارتفاع عن سطح الأرض في الموقع وذلك لتجاوز ظاهرة التدرج الريحي في الموقع حتى بدون وجود عوائق طبيعية أو اصطناعية.

إن العلاقة المبسطة التي تحدد كمية الاستطاعة التي يتم الحصول عليها من الرياح هي:

$$P = 1 / 2 * \rho * A * V^3 \quad (1-8)$$

حيث أن: P - الاستطاعة الكهربائية الناتجة من الاستطاعة الميكانيكية المقدمة من الرياح وتقدر بالوات (Watt) أو الكيلو وات أو الميغا وات.

ρ - الكتلة الحجمية للهواء أو كثافة الهواء تقدر بـ (Kg / m^3) .

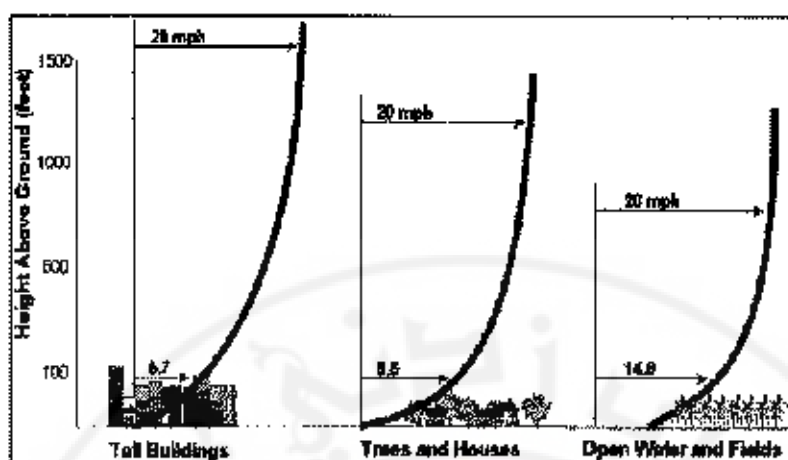
A - مساحة سطح الدوار المجابه للرياح و يقدر بـ (m^2) .

V - سرعة الرياح و تقدر بـ (m/sec) .

من هذه العلاقة نلاحظ أن أكثر العوامل المؤثرة على الاستطاعة هي السرعة ، حيث إن السرعة V مرفوعة في العلاقة للأس 3، أي أنه أي زيادة بسيطة في السرعة يقابلها زيادة كبيرة في الاستطاعة.

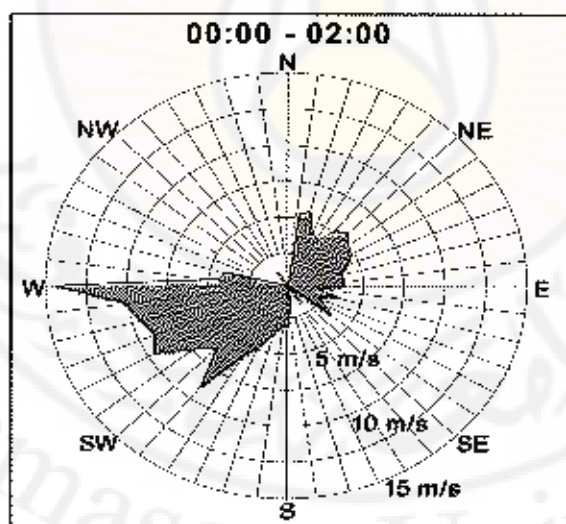
و الشكل 8-9 يوضح زيادة الاستطاعة مع زيادة ارتفاع البرج. كما يوضح الشكل 8-

10 زيادة السرعة و الاستطاعة مع زيادة الارتفاع في مناطق مختلفة، وذلك حسب طبيعة الأرض في الموقع.

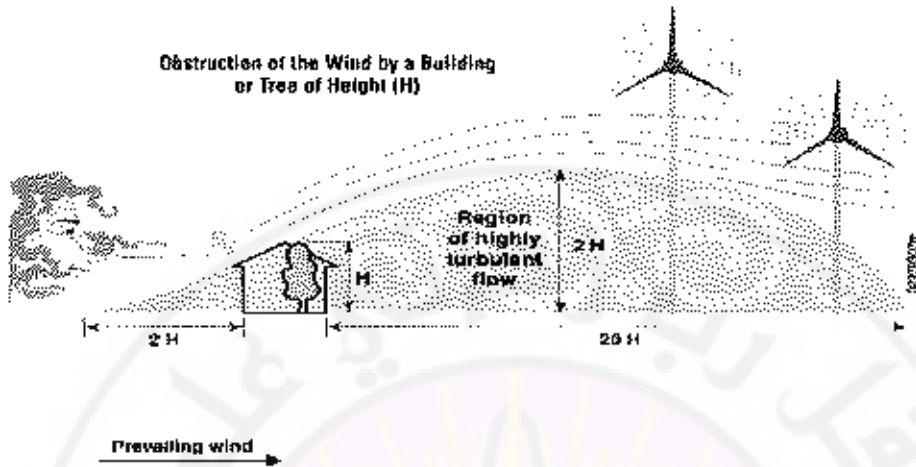


الشكل 8-7: أثر العوائق الطبيعية والاصطناعية على ظاهرة التدرج الريحي [3].

ومن الجدير بالذكر أن أكبر نسبة لسرعات الرياح السائدة في سورية تأتي من الغرب وجنوب -غرب. ذلك بسبب الموقع الجغرافي لمورية على الضفة الشرقية للبحر الأبيض المتوسط. لذا يجب وضع هذه المسألة في الحسبان عند تصميم المزارع الريحية في المواقع المختلفة من القطر.



الشكل 8-8: مثل على ورده الرياح في موقع محدد يبين نسب سرعات الرياح السائدة في هذا الموقع على مدار العلم حسب اتجاهها [2].



الشكل 8-6: أثر خشونة الأرض والأجسام المختلفة على تدفق الرياح في الموقع أو ما يسمى ظاهرة التدرج الريحي [3].

8-5 ورده الرياح:

من ناحية أخرى فإن الرياح التي تهب في الموقع بالإضافة إلى تغير سرعتها على الدوام فأنها تغير اتجاهها بشكل وبآخر على مدار العام لذلك تتركب في أعلى البرج في محطات رصد الرياح حساسات مراقبة اتجاه الرياح . واستناداً لهذه معطيات هذه الحساسات يتم رسم ما يسمى ورده الرياح Wind Rose والتي تبين عادة نسبة سرعات الرياح التي تهب على مدار العام من كل اتجاه. هذا الأمر ضروري عند إنشاء ما يسمى المزارع الريحية في الموقع أو المزرعة الريحية في الموقع Wind Farm حيث يتم أخذ الاتجاه الأكثر نسبة لسرعات الرياح على مدار العام لتصميم المسافات بين العنفات الريحية في الصف الواحد والمسافات بين الصفوف بحيث تكون هذه العنفات في مواجهة الرياح القادمة من هذا الاتجاه. يبين الشكل 8-8 مثلاً على ورده الرياح في موقع ما.

عندما تتحرك الرياح على الوجه المنحني الذي يكون باتجاه الرياح تزداد حركتها بسرعة أكبر للوصول إلى نهاية الشفرة في الوقت المناسب لتقابل الرياح المتحركة على الوجه الآخر من الشفرة.

على الجانب الآخر للشفرة فإن الرياح تتحرك بشكل أبطأ وتتسبب منطقة ضغط مرتفع تعيق حركة الشفرة محاولة إبطاءها.

وبشكل مشابه لتصميم جناح الطائرة فإن قوة رفع عالية تكون ضرورية عند تصميم عفة ريشية ذات كفاءة عالية. وبما أن شفرات العنفة تكون بشكل منحني فإن التصميم يجب أن يتم عند زاوية تظهر فيها قوة الرفع المثالية.

إن القوى الأيروديناميكية ليست المحدد الوحيد عند التصميم الأمثل للعنفة الريحية، ولكن مسائل الحجم وطول شفرات الدوار وبالتالي قطر الدوار الذي يتم حسابه بدقة، بحيث تستطيع العنفة أن تستجر طاقة أكبر لتوليد الكهرباء. وبشكل عام فإن مضاعفة قطر الدوار تنتج أربعة أضعاف زيادة في طاقة العنفة، ولكن يصبح من الضروري زيادة ارتفاع البرج.

4-8 ظاهرة التدرج الريحي Wind Shear

خشونة الأرض والأجسام أو العوائق الطبيعية والاصطناعية المتواجدة على سطح الأرض تؤثر أيضاً على تدفق الرياح كما هو مبين في الشكل 6-8 وتتسبب ما يسمى ظاهرة التدرج الريحي (Wind Shear). وتفسر هذه الظاهرة على النحو التالي:

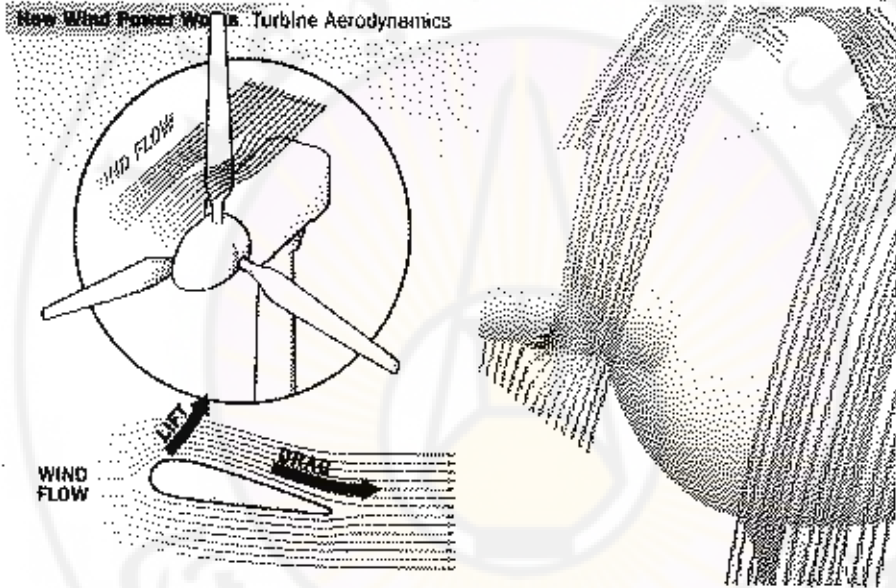
بالعودة إلى العلاقة 6-16 والشكل 6-11 لاحظنا أن السرعة تزداد مع الارتفاع في الموقع. ولكن نسبة ازديادها تتعلق بخشونة الأرض أو ما يسمى معامل الاحتكاك.

إلا أن العوائق الطبيعية كالأشجار والاصطناعية كالأبنية يمكن أن تعيق نسبة هذه الزيادة مع الارتفاع، بحيث تعود هذه النسبة إلى قيمتها الحسابية وفقاً للعلاقة 6-16 بعد مسافة خلف العائق الطبيعي أو الاصطناعي أكبر من المسافة التي تصلها وفقاً للعلاقة المذكورة فيما لو لم يوجد هذا العائق وذلك نتيجة للاضطراب الريحي الذي يحدثه هذا العائق كما يبينه الشكل 8-7 والفقرة التالية توضح هذه الظاهرة أيضاً .

بعض التصميمات الحديثة للعنفات ذات الاستطاعات الكبيرة تتركب في أعلى البرج ضمن تجهيزات القمرة.

3-8 القوى المؤثرة على الشفرات (Blades):

إن القوتين الديناميكتين الهوائيتين الأساسيتين في العنفة الريحية هما قوة الرفع Lift Force والتي تكون بشكل عمودي على اتجاه تدفق الرياح والقوة المعيقة Drag Force والتي تكون بشكل مواز لاتجاه الرياح كما هو مبين في الشكل 5-8.



الشكل 5-8: قوة الرفع وقوة الإعاقة اللتان تؤثران في حركة شفرات العنفة الريحية

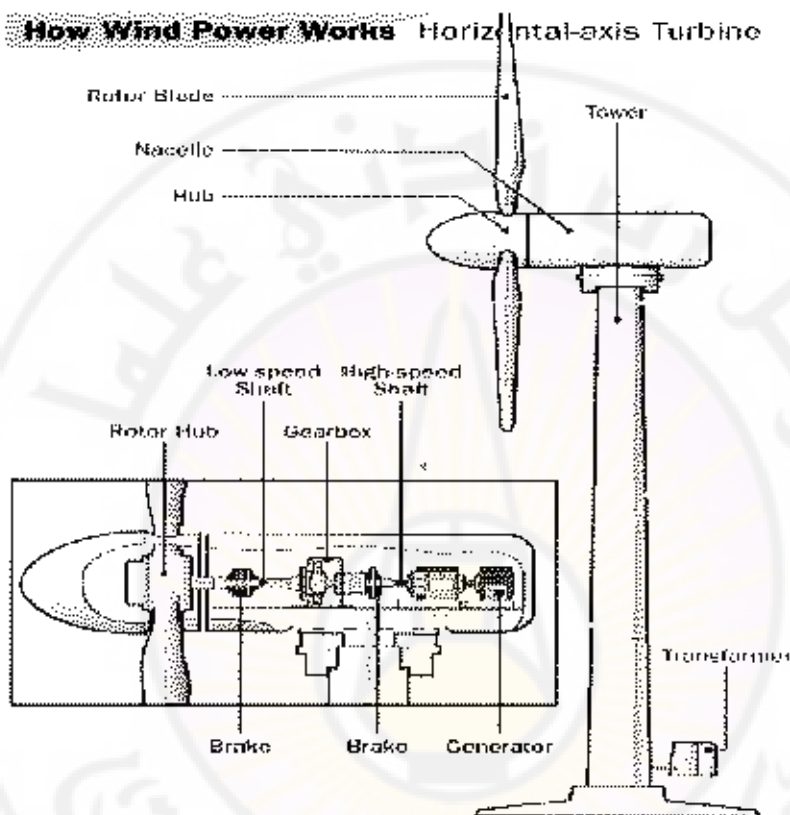
ذات المحور الأفقي [1].

إن شفرات العنفة تشبه بشكل كبير أجنحة الطائرة، حيث يتم تصميم سطحها بشكل انسيابي. وأحد وجوه الشفرة يتم تصميمه بشكل منحني قليلاً أما الوجه الآخر فيكون مستوي نسبياً.

قوة الرفع هي ظاهرة معقدة جداً لفهمها بشكل دقيق ولكن يمكن تفسيرها بشكل مبسط كما يلي:

- الدورار Rotor: ويحتوي الشفرات Blades التي تقوم باستخراج طاقة الرياح وتحويلها إلى طاقة دورانية على محور العنفة.
- ... المحور الرئيسي: وظيفته تقديم الطاقة الدورانية المشار إليها في الفقرة السابقة إلى المولد الكهربائي عن طريق علب السرعة.
- القمرة Nacelle: تحوي وتحمي كلا من المولد الكهربائي وعلبة السرعة والكابح وباقي التجهيزات.
- علب السرعة: وظيفتها زيادة سرعة دوران المحور بين صرة الدورار والمولد.
- المولد الكهربائي Generator: يستقبل الطاقة الدورانية (الميكانيكية) عن طريق محور العنفة ويحولها إلى قدرة كهربائية.
- وحدة التحكم الإلكترونية: وتشمل نظام التوليد الكهربائي ونظام المراقبة وإيقاف العنفة في حالة الأعطال ونظام قيادة التحكم بآلية فتل أو انحراف شفرات الدورار.
- ... متحكم التوجيه: ويتضمن نظام قيادة التحكم بآلية توجيه دوران القمرة ويبقي الدورار باتجاه الريح.
- الكوابح: تقوم بمهمة إيقاف دوران المحور في حالة زيادة السرعة عن الحدود المسموح بها، أو عند إجراء الصيانة أو عند فشل النظام .
- البرج: يحمل القمرة والدوار بما في ذلك الصرة بحيث يمكن للشفرات أن تدور بشكل آمن .
- الكابلات الكهربائية: تنقل القدرة الكهربائية من المولد إلى أسفل البرج، وتنقل إشارات الحساسات والتحكم بين القمرة والدوار من جهة ولوحة التحكم والمنحولة أسفل البرج.
- المنحولة الكهربائية Transformer: وتقوم بتحويل الجهد الكهربائي المنخفض من المولد الكهربائي إلى جهد متوسط، ويساوي في سورية 20 كيلو فولت. وتركب المنحولة عادة أسفل البرج. فمن أجل الاستطاعات الصغيرة والمتوسطة تركيب إلى جانب البرج. ومن أجل الاستطاعات الكبيرة للعنفة تركيب داخل قاعدة البرج. وفي

مواجهة الرياح دائما لاستمرار أكبر استطاعة ربحية ممكنة. في هذه العنفة تركيب القمرة أعلى البرج (Tower) لذا فإن هذه العنفات تحتل مكانا صغيرا نسبيا على الأرض.



الشكل 8-4: مكونات العنفة ذات المحور الأفقي [8].

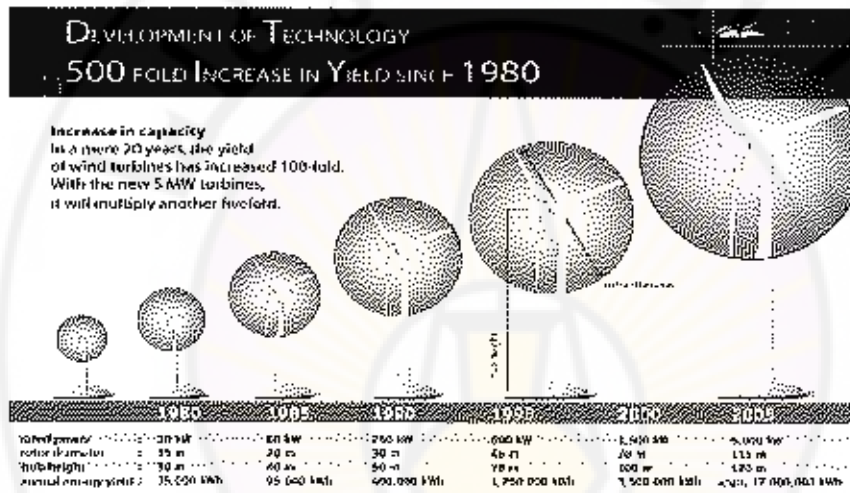
8-2 مكونات العنفات الريحية ذات المحور الأفقي:

استنادا إلى الشكل 8-4 فإن مكونات العنفة الريحية ذات المحور الأفقي تتألف من:

- الصرة (Hub) : وتعتبر صلة الوصل بين دوار العنفة والمحور الرئيسي Main Shaft .

السلام الركبة داخل البرج. وفي العنقات الكبيرة تركيب مصاعد كهربائية خاصة داخل البرج أيضا.

وكما نلاحظ من الشكل 3-8 فإن كمية القدرة الكهربائية التي يمكن أن تنتجها أكبر العنقات المبنية فيه وهي باستطاعة 5 ميغا وات قد تصل إلى 17 مليون كيلووات ساعي سنوياً وذلك إذا عملت في ظروف رياحية مثالية. وسيتم العودة إلى هذا الموضوع في الفصل العاشر عند دراسة المسألة الاقتصادية.



الشكل 3-8: التطور التقني في العنقات ذات المحور الأفقي منذ عام 1980 إلى عام

2005 وأبعادها وكمية القدرة الكهربائية المنتجة سنوياً بالكيلو وات ساعي [3].

وكما هو واضح من التسمية فإن محور هذه العنقات يكون أفقياً بشكل مواز للأرض، حيث يظهر الشكل 4-8 مخططاً لمكوناتها. هذه العنقات تحتاج لتعديل وضعيتها دوماً باتجاه الرياح باستعمال آلية تعديل الانحراف من خلال نظام تعديل الانحراف أو قيادة التوجيه بالدوران (Yaw Drive) والذي يشمل المحركات الكهربائية وعنده اثنان عادة التي تحرك بدورها كامل القمرة إلى اليمين أو إلى اليسار عند التغيرات الصغيرة لاتجاه حركة الرياح. ويقوم نظام القيادة بمهمة توجيه القمرة أو تدويرها، بحيث يبقى الدوار في

لذلك فإن العنفات ذات المحور العمودي تكون أقل كفاءة من العنفات ذات المحور الأفقي. ولكن من جهة أخرى فإن كافة الأجهزة تكون على مستوى الأرض وهذا ما يوفر سهولة في عمليات التركيب والصيانة، انظر الشكل 2-8.

هذه العنفات تستعمل على نطاق ضيق الآن أما الآن فإن غالبية ما ينتج بشكل تجاري هو العنفات الريحية ذات المحور الأفقي.

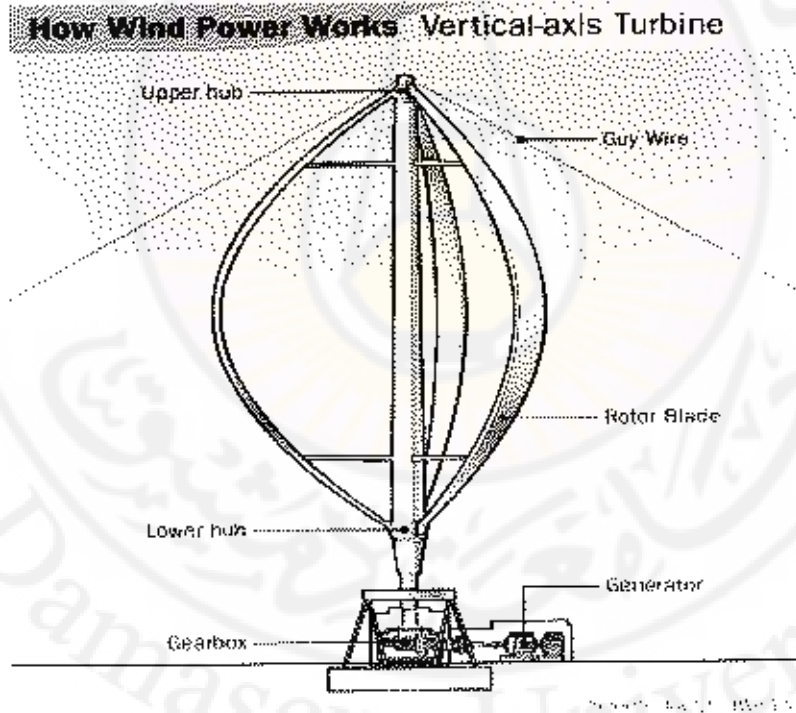
وبالرغم من الميزة الرئيسية لعنفة داربوس المتمثلة بتركيب نظام التوليد الكهربائي في أسفل البرج بالمقارنة مع العنفات ذات المحور الأفقي التي يتوجب فيها تركيب نظام التوليد الكهربائي والدوار الحامل للشفرات في أعلى البرج، إلا أن عنفة داربوس تمتلك سببة رئيسية تتمثل باختلاف الاجهادات الميكانيكية الواقعة على شفراتها والتي تزداد بشكل ملحوظ على الأجزاء العلوية لشفراتها نتيجة زيادة السرعة مع الارتفاع. وبالتالي زيادة القوى المؤثرة في هذه الأجزاء والتي تتناسب مع مكعب السرعة كما ذكرنا قبل قليل، مما يؤدي إلى تشوه شكل الشفرات خاصة إذا صممت عنفة داربوس أو العنفات ذات المحور العمودي بشكل عام على استطاعات كبيرة.

2-1-8 العنفات الريحية ذات المحور الأفقي

horizontal-axis wind turbines (HAWTs)

يبين الشكل 3-8 التطور التقني الذي طرأ على العنفات الريحية ذات المحور الأفقي منذ عام 1980 وحتى عام 2005 من جهة زيادة الاستطاعة وارتفاع البرج الحامل للتقسرة والدوار وبالتالي زيادة القدرة الكهربائية المنتجة سنوياً. وما زالت هذه التقنيات في تطور مستمر، حيث وصل ارتفاع البرج في العنفات الحديثة إلى أكثر من 160 متراً وزادت استطاعة العنفة الواحدة عن 8 ميغا واط، مما أدى إلى انقراض العنفات ذات المحور العمودي. فمسألة تركيب القمرة والدوار في أعلى البرج تتولاها الروافع الضخمة التي تطورت تقنياتها أيضاً مع الزمن وأحياناً تقوم الطائرات العمودية الضخمة بهذه المهمة. أما الاجهادات والقوى الميكانيكية الواقعة على شفراتها فتكون متوازنة مع دورة العمل للدوار. وفيما يخص مسألة الصيانة لمحتويات القمرة في أعلى البرج فقد حلت من خلال

هذه العنفات ذات محور عمودي دائماً على الأرض وهي تصطف باتجاه الرياح دوماً بعكس نظرائها ذات المحور الأفقي. لذا ليس هناك ضرورة لأي تعديل عندما يتغير اتجاه الرياح. وهذا النوع من العنفات يستعمل أسلاك تثبيت للدعم لذلك فإن ارتفاع البرج يكون منخفضاً من حيث المبدأ وبالتالي لا تستطيع هذه العنفات الاستفادة من السرعات التي تتحقق على ارتفاعات عالية في الموقع. وبما أن الاستطاعة الناتجة في العنفة الريحية تتناسب مع مكعب السرعة فإن هذا النوع من العنفات يصمم على استطاعات منخفضة والتي لم تتجاوز بضعة عشرات من الكيلو وات. بينما العنفات ذات المحور الأفقي يمكن أن تصمم على ارتفاعات عالية ووصلت التصميمات الحديثة فيها إلى عدة آلاف من الكيلو وات كما سنرى لاحقاً.



الشكل 8-2: مكونات عنفة داربوس ذات المحور العمودي [9].

الفصل الثامن

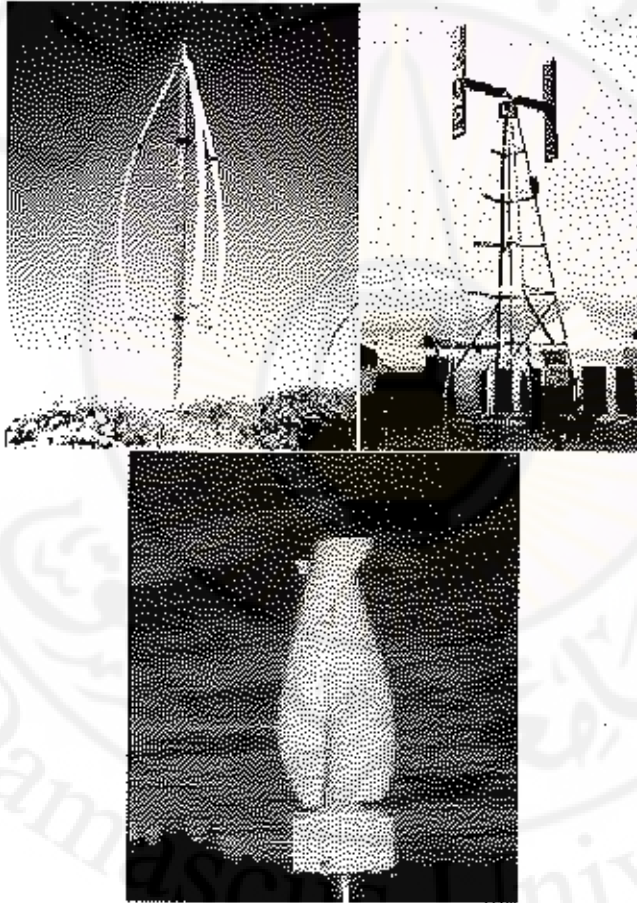
Wind Turbines Components مكونات العنفات الريحية

1-8 Modern Designs التصميم الحديث

1-1-8 العنفات الريحية ذات المحور العمودي

Vertical-axis wind turbines (VAWTs)

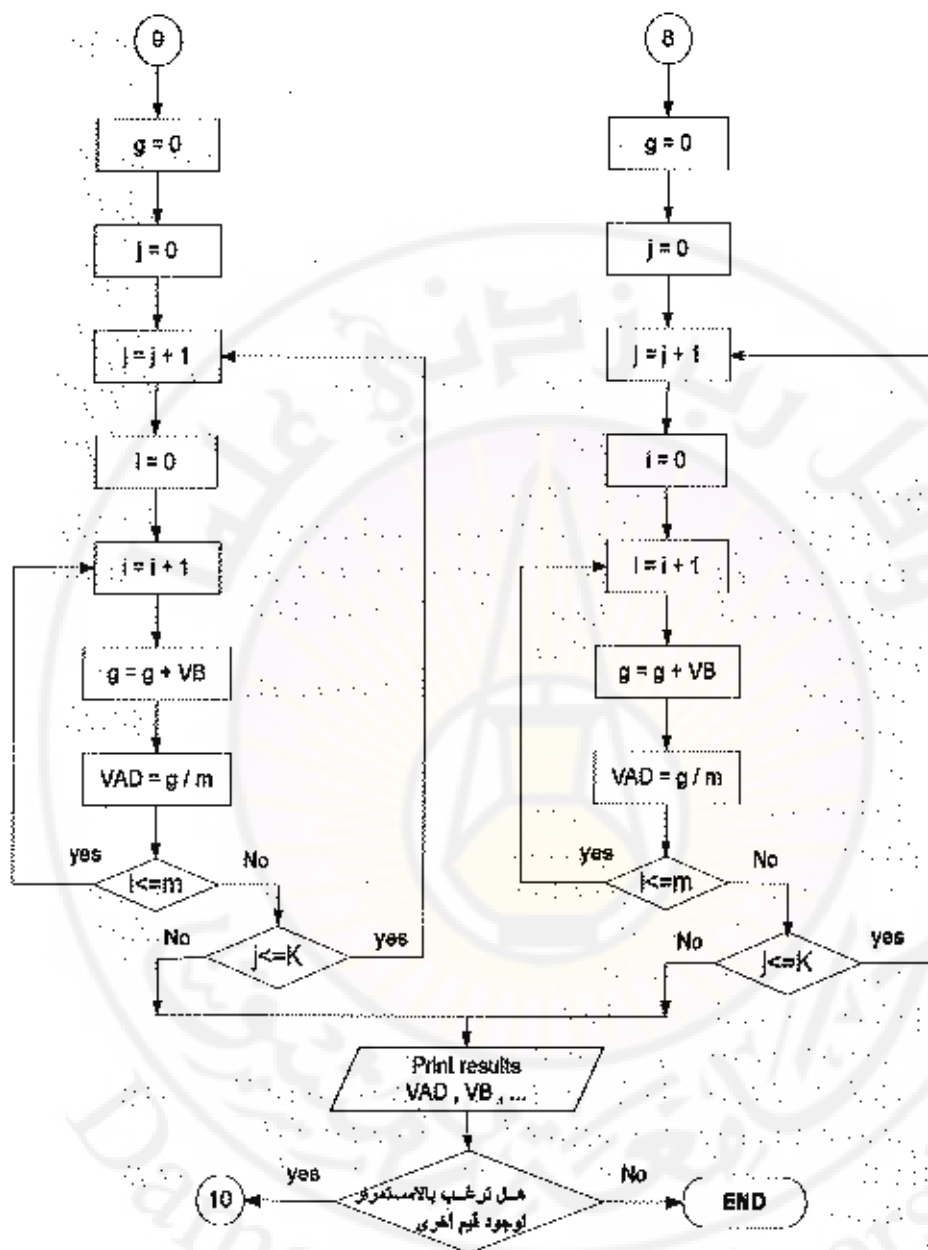
هذه العنفات نادرة جداً والوحيدة منها حالياً في الإنتاج التجاري هي عنفات داريوس و عنفات سافونيوس و عنفات على شكل H انظر الشكل 1-8.



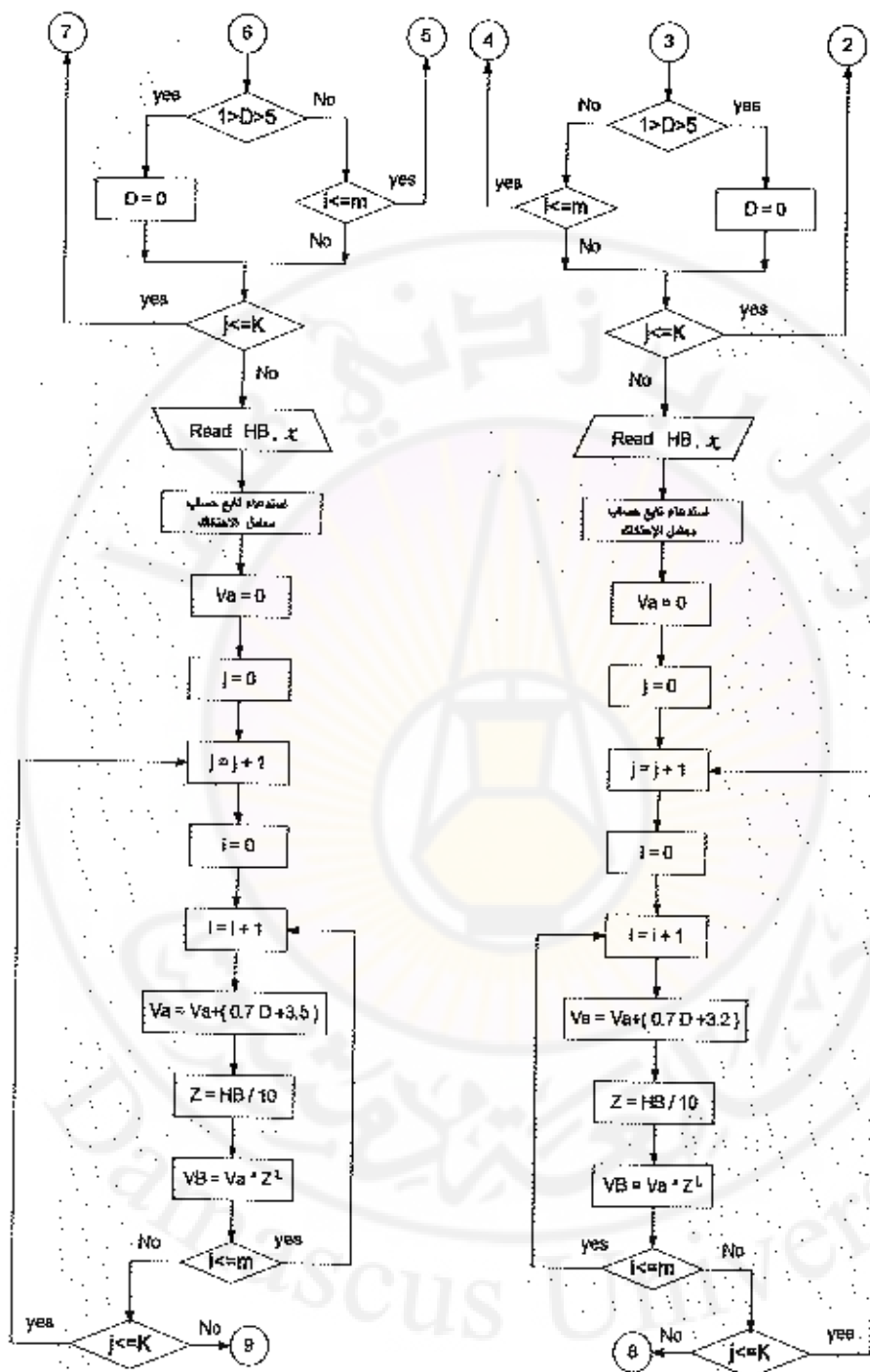
الشكل 1-8: عنفات داريوس و عنفات سافونيوس و عنفات H [8].

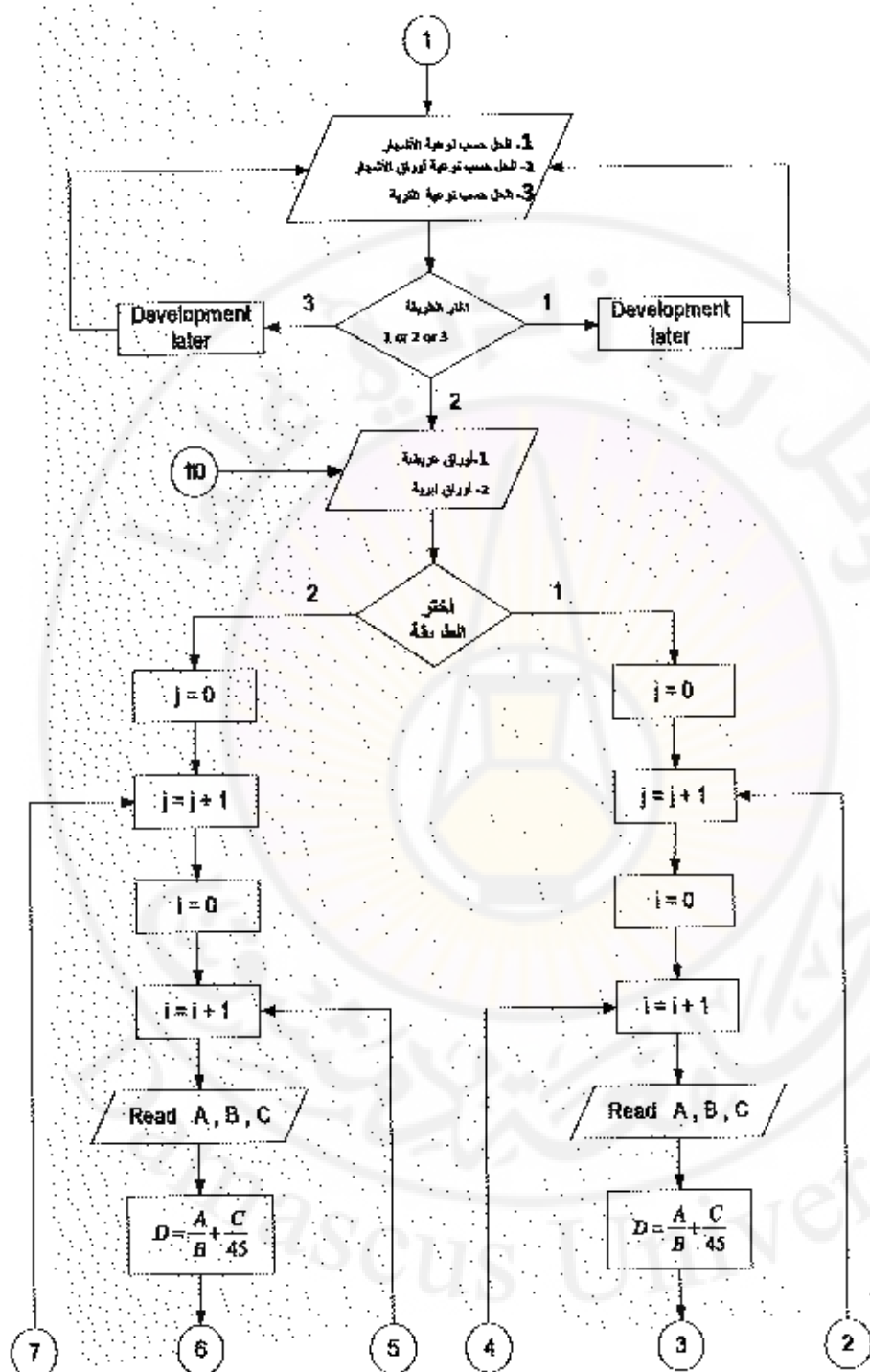
المراجع العلمية:

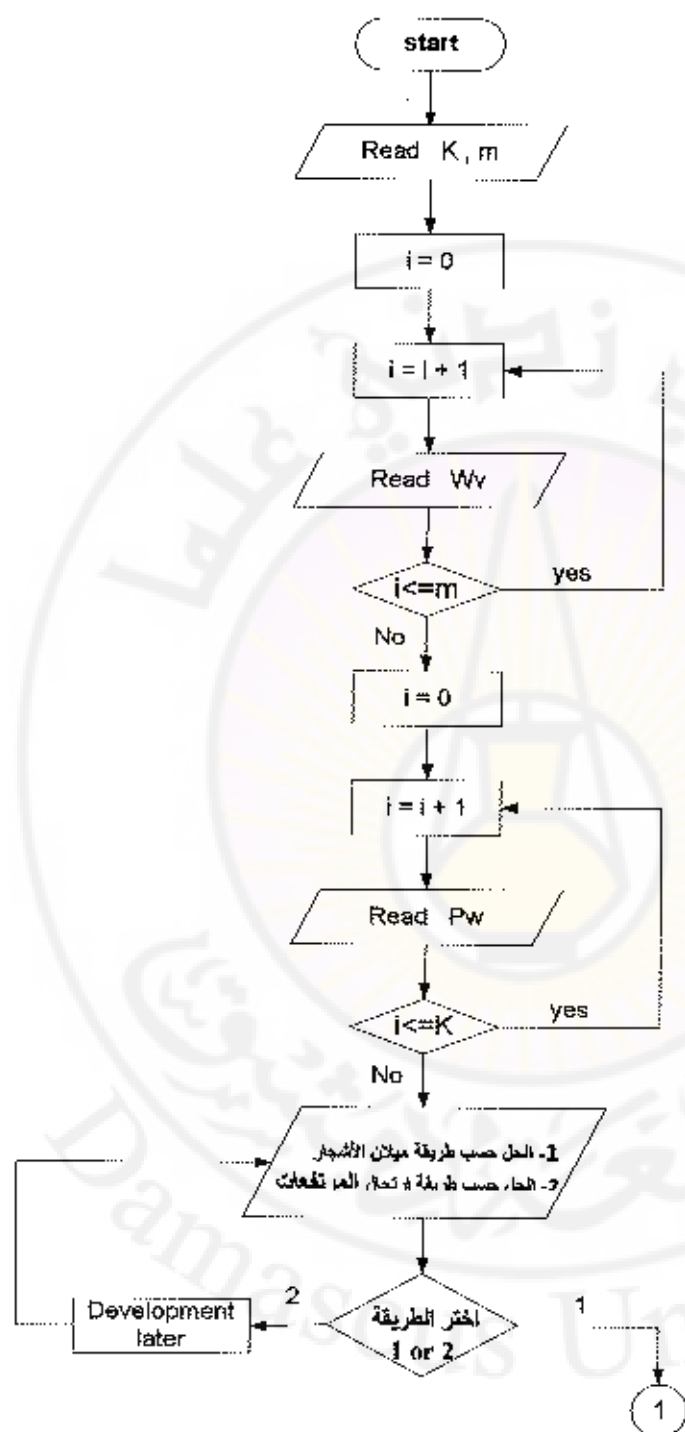
- [1] د.كمال ناجي - آفاق استثمار طاقة الرياح لتوليد الكهرباء في سورية ولبنان الندوة العلمية الألمانية السورية الثالثة. جامعة حلب 2004.
- [2] د.كمال ناجي - الاختيار الأمثل لمواقع المزارع الكهروريحية. ورشة العمل حول الاستثمار الأمثل للطاقة ومصادرها في سورية. ليرة - سورية 2005.
- [3] د.كمال ناجي - د. صالح الأيوبي - د. مازن غندور دراسة الجدوى الفنية الاقتصادية و الدراسة التصميمية لاستخدام العنقبات الريحية في سورية و لبنان . برنامج التعاون البحثي السوري اللبناني (الإعلان الثالث 2004 - 2005) .
- [4] Hewson, E.W. and J.E.. Wade
A Handbook on the Use of Trees as Indicators of Wind Power Potential. RLO/ 2227-79-3 Available from National Technical Information Service, Springfield, Virginia.. 1979.
- [5] Belly, P.Y. C and J.E. Wade
Sand Movement by Wind. Technical Report, Hydraulic Engineering Laboratory , Wave Research Projects, University of California, Berkeley , California.. 1979.
- [6] Marrs, R.w. and D.R. gaylord.
A Guide to the Interpretation of wind flow characteristics from Eolian Landforms. RLO/2343-79/2. Available from National Technical Information service, Springfield, Virginia. 1979.
- [7] Wade, j.E.and E.W. Hewson.
A Guide to Biological Wind Prospecting.
DOE.Et.20316- 80-2. Available from National Technical Information Service, Springfield , Virginia.1980.
- [8] T.R. Hiestor The Siting Handbook for Large Wind Energy Systems New York 1983.
- [9] j.F.Manwell
Wind Energy Theory , Design and Application. University of Massachusetts, Amherst USA. John Wiley NewYork 2002.



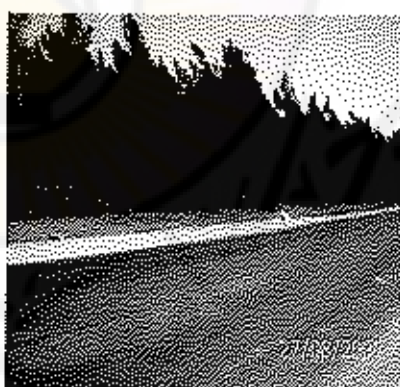
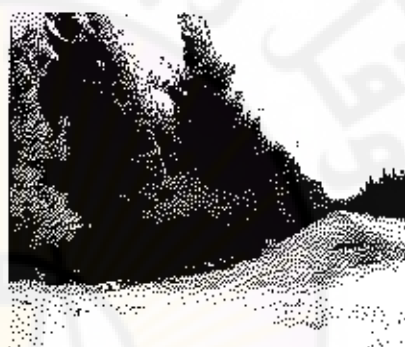
الشكل 7-16: المخطط الانسيابي (Flow Chart) لحساب سرعة الرياح استناداً إلى المؤشرات البيولوجية للأشجار الأثرية والأشجار ذات الأوراق العريضة [3].



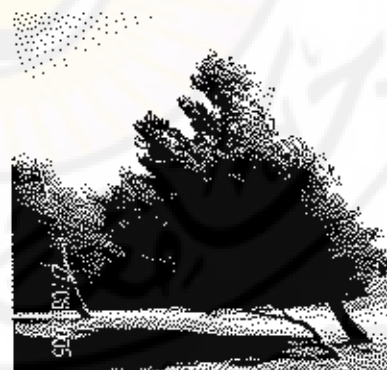
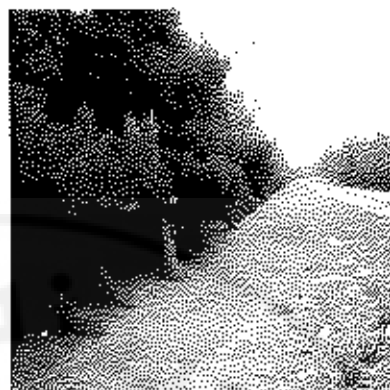




في الدراسة العلمية التي قدمت إلى المجلس الأعلى للعلوم حول الجدوى الاقتصادية لاستثمار طاقة الرياح في سورية ولبنان تم وضع المخططات الانسيابية لخوارزمية حساب سرعة الرياح استنادا للمؤشرات النباتية للأشجار الأبرية كالصنوبر والسرو وللأشجار ذات الأوراق العريضة كالسنديان كما هو مبين في الشكل 7-16. واستنادا لهذه المخططات يمكن وضع البرنامج الملائم للحساب.



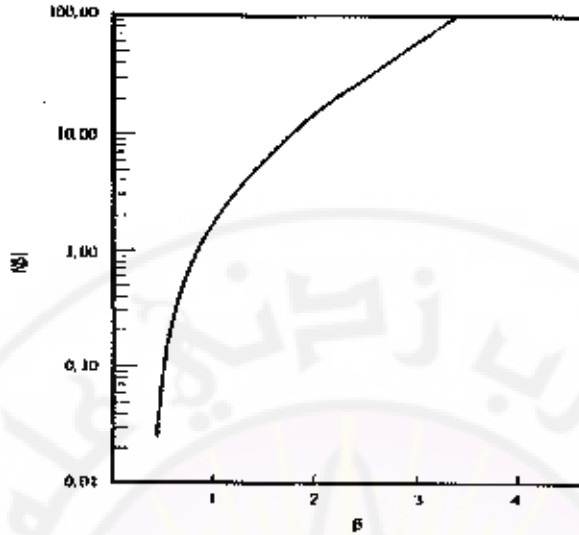
الشكل 7-15: صور بعض الأشجار التي تم إدخال معطياتها للبرنامج للحصول على سرعات الرياح التقريبية في مواقع جنوب مدينة حمص [3].



يظهر الشكل 7-9 أن كل مرتفع أو منحدر رملي يتعلق تكوينه الجغرافي باتجاه هبوب الرياح على مر الزمن وبطريقة خاصة بطبيعة تربته. أن الطبيعة المؤقتة أو الزمنية للعملية الجغرافية تشكلية يجب أن يعاد استعراضها قبل وصف هبوب الرياح في المنطقة المدروسة وبالتالي يدرس أثر الرياح على تكوينها الحالي.

لذلك يجب أخذ الحيلة عند تقدير سرعة وحركة الرياح استناداً إلى الأشكال المختلفة للطبيعة الجغرافية للواديان التي تهب فيها هذه الرياح. ويفضل الحصول على الصور الجوية لهذه المرتفعات والمنحدرات ومقارنة التشكيل الجغرافي لها مع المعلومات المناخية المتوفرة لدينا لتحديد استراتيجيات حركة الرياح المؤثرة فيها وقياس ذلك على المنحدرات والمرتفعات التي لا تتوفر معلومات مناخية كافية عنها. ولزيادة الدقة لابد من وضع مقاييس سرعة واتجاه الرياح في هذه المناطق لتتكمّل عملية تقديرها خلال أفصر فترة زمنية ممكنة.

7-7 خوارزميات سرعة الرياح في المواقع اعتماداً على المؤشرات النباتية. يبين الشكل 7-15 صوراً لعدد من المواقع جنوب مدينة حمص التي يظهر فيها ميلان الأشجار حيث اعتمدت في الدراسة الحقلية كمداخلات لبرنامج حساب سرعات الرياح استناداً إلى المؤشرات النباتية.



الشكل 7-14: استنتاج قيمة β [9].

7-6-6 العلاقة بين سرعة الرياح ونشاطات تشكيل أخرى:

بين العالم Bagnold عام 1941 العلاقة بين تموجات ripples للرمال التي تنتقل من موقع إلى آخر بفعل الرياح وبين اتجاه الرياح. ولكن عندما تزداد شدة الرياح عن ثلاثة أضعاف عتبة السرعة V_T تختفي هذه التموجات.

و بين العالم shaip عام 1963 أن ارتفاع هذه التموجات والمساحات التي تتوضع فيها

تتأثر أيضاً بحجم حبيبات الرمل. وبالتالي أظهر أن الحبيبات الخشنة وذات التصنيف الضعيف في قواماتها تكون ذات تموجات أعلى من الرمال ذات الحبيبات الناعمة والمصنفة جيداً.

إلا أن هذه الطريقة على الرغم من بساطتها لم تعتمد بصورة واسعة في تقنية تحديد مواقع العنقبات الريحية.

7-6-7 المؤشرات التشكيلية لاتجاه الريح:

تعتبر المؤشرات التشكيلية للمناطق أو الأقاليم الطبوغرافية مؤشراً لاتجاه الرياح فيها.

$$\beta = \frac{\bar{U}^*}{U_{*T}} \quad \text{حيث:}$$

$\bar{U}^*$ - وسطي سرعة الاحتكاك طول الأمد.

$(\beta)f$ - تابع يظهر المعدل الوسطي لانتقال الرمال كما هو مبين في الشكل 7-14 والذي تم استنتاجه تحليلياً.

للحصول على القيمة التقديرية لوسطي سرعة الرياح الأصغري، علينا أن نأخذ القيمة التقديرية لـ $\langle \vec{q} \rangle$ التي نحصل عليها من معدل ارتحال المرتفع ثم نقدر تحليلياً قيم

a و U_{*T} ونحل العلاقة (2-13) من أجل $(\beta)f$ ونستنتج قيمة β من الشكل 7-14 نضرب β بـ U_{*T}

للحصول على قيمة $\bar{U}^*$ ، وبإعطاء قيم $\bar{U}^*$ و K^1 انظر الشكل 7-11 يمكن تقدير وسطي سرعة الرياح عند ارتفاع ما قرب السطح من خلال العلاقة التالية :

$$\bar{V}(z) = V_T + \frac{\bar{U}_*}{K} \ln \frac{z}{K^1} \quad (15-7)$$

من أجل قيم صغيرة لـ β فإن أي خطأ في تقدير $\langle \vec{q} \rangle$ يؤدي إلى خطأ أكبر في تقدير $\bar{V}$. والشكل 7-14 يبين كيفية استنتاج قيمة β .

أخيراً قام العالمان Marrs و Gayford عام 1979 بحساب العلاقة بين توزيع رايلي المقدر لوسطي سرعة الرياح في حقل مرتفعات Ferris في الولايات المتحدة الأمريكية وشبكة مراقبة معدل انتقال الرمال فيه حيث قدرت قيمة الشعاع $\langle \vec{q} \rangle$ بـ:

$$\langle \vec{q} \rangle = 8.9 \times 10^{-3} \text{ k.g m}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$$

والقيم التقديرية لوسطي سرعة للرياح الصغري يمكن أن تزداد إلى حدود 12m/sec. ولكن الرمال لم تتحرك عندما كانت الأرض مبللة أو متجمدة. وبالتالي فإن نظرية Bagnold أثبتت دقتها بالمقارنة مع توزيع رايلي.

حيث: $\vec{q}(A, \theta, U_*)$ معدل شعاع انتقال الرمال كتابع لسرعة الرياح (U_*) واتجاه الرياح

(θ) ونشاط المرتفع الرمل (A).

حيث A كتابع تقع قيمته في المجال من 0 إلى 1. ويشير إلى درجة نشاط المرتفع حسب تأثيره بالمزروعات والرطوبة المتواجدة فيه.

$p(U_*, \theta, A)$ تابع الكثافة النظامية المشتركة الاحتمالي.

Normalized Joint Probability density function.

يبدأ التكامل فوق سرعة الرياح عند U_{*T} لأنه عندما تكون سرعة الرياح أصغر من U_{*T} ولا تتحرك الرمال.

من أجل توزيع معطى سابقاً لسرعة الرياح فإن أثر اتجاه الرياح والفترات لسرعة الرياح فإن أثر اتجاه الرياح والفترات الزمنية للنشاط المتقلص للمرتفعات تقلل قيمة

التكامل حسب العلاقة 3-12 وهذا يعني إذا قدرنا $\vec{q}$ حسب العلاقة:

$$\langle \vec{q} \rangle = \int q(U_*) dU_* \quad (13-7)$$

حيث يحل مقياس معدل انتقال الرمال محل شعاع انتقال الرمال باستخدام العلاقة 7-8

وبالتالي تصبح قيمة $\vec{q}$ التي يمكن الحصول عليها من العلاقة 7-12.

وهذا الأمر هام خاصة إذا كان لدينا معروفاً لائحة توزيع رايلي Rayleigh أو

Weibull لسرعات الرياح. عند ذلك فإن القيمة المقاسة $\vec{q}$ يجب أن تشير إلى السرعة الوسطية الصغرى في هذه المنطقة.

إذا اعتمد توزيع احتمالات السرعة على توزيع رايلي فإن التكامل حسب العلاقة 3-13 يمكن حله تحليلياً.

وبالتالي من السهل عرضه بيانياً باستخدام العلاقة التالية:

$$\langle \vec{q} \rangle = a U_{*T} f(\beta) \quad (14-7)$$

وبهذه المناسبة يمكن استخدام وصف Bagnold حسب العلاقة (7-8) وذلك باعتبار قيمة U ، صغيرة.

إن مقدار شعاع المعدل الوسطي لانتقال الرمال $\langle \vec{q} \rangle$ يمكن الحصول عليه بصورة تقريبية من خلال مراقبة طويلة الأمد قد تمتد سنوات لارتحال مجموعة مرتفعات في المنطقة باستخدام العلاقة التالية:

$$\langle \vec{q} \rangle = \frac{x\sigma H}{t} \quad (11-7)$$

حيث:

X - مسافة ارتحال المرتفع

σ - كثافة مجموعة الرمال

H - ارتفاع التلة

t - الفترة الزمنية بين المراقبات المتتالية.

إذا كانت الرياح تهب باستمرار وفي نفس الاتجاه والسرعة وبالتالي تصبح هذه المرتفعات غير مستقرة فإن العلاقة 7-7 تستخدم لتحديد سرعة الرياح من مراقبتنا لانتقال الرمال فيها.

يمكن للعلاقة 8-7 أيضا أن تستخدم لاستنتاج العلاقة بين $\langle \vec{q} \rangle$ والسرعة الوسطية الاسمية لعدة سنوات $\bar{V}$.

وقد تم بناء على ذلك تقييم التكامل التالي:

$$\langle \vec{q} \rangle = \int_{U_T}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \vec{q}(U, \theta, A) P(U, \theta, A) dA \cdot d\theta \cdot dU \quad (12-7)$$

$$a=c \frac{\rho}{g} \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (8-7)$$

حيث:

U_{*T} - أثر سرعة عتبة الاحتكاك

U - عتبة الاحتكاك

$C=1.5$ من أجل الرمال موحدة الشكل

$C=1.8$ من أجل الرمال المتوسطة على المرتفعات

$C=2.8$ من أجل الرمال ذات الأحجام مختلفة الأشكال

d - نصف قطر الحبيبات المتعلق بحجمها.

$$D = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ متر}$$

ρ - كثافة الهواء

g - التسارع الأرضي

وهناك نظريات بديلة على سبيل المثال نظرية العالم Lettau عام 1978 و

1951Kawamra التي تقترح:

$$q = c_1 \frac{\rho}{g} (U_* - U_{*T}) U_* + U_{*T})^2 \quad (9-7)$$

استناداً إلى تجربة النفق الريحي مع رمال ذات حبيبات موحدة الحجم أو المقاييس والتي تساوي $4.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ حيث U_{*T} وجدت تجريبياً بحدود 0.30 m/scc فإن

العالم Belly قدر عام (1962) $C_1=3.1$

أما العالم Lettau فأقترح عام 1978 علاقة أخرى هي:

$$q = C_2 \frac{\rho}{g} \left(\frac{d}{D}\right)^n U_*^2 (U_* - U_{*T}) \quad (10-7)$$

والتي يبين تطابقها مع نظرية العالم Belly إذا كانت:

$$C_2 \frac{\rho}{g} \left(\frac{d}{D}\right)^n = 6.5$$

الجدول 7-2: يبين سرعة الرياح على أساس التوزيع الحجمي للرمال [5].

Physical Link To Eolian Processes Method of Calculation	Approximate Mode Of Sand Moving Wind Energy Distribution Threshold of Modal Size Grains	Frequent Enough To Sustain Active Dunes Threshold of Largest Grains	Suspension of Smallest Grains	Occasional Extreme Kinds Suspension of Modal Size Grains
u_{*T}	0.22	6.38		0.38
z_0	4.8×10^{-5}	4.8×10^{-5}	4.8×10^{-5}	
Settling Velocity			1.6	3.8
$U_{0.1}$			8.0	19.0
$V_T = V_T(z=0.01)$ $u_{*T}(z_0)$				5.8
Effective u_*				2.0
Effective z_0				3.6×10^{-3}
U_{10}	7.7	13.3	12.8	45.0
Uncertainty	?	?	?	?
Frequency of Occurrence	?	?	?	?

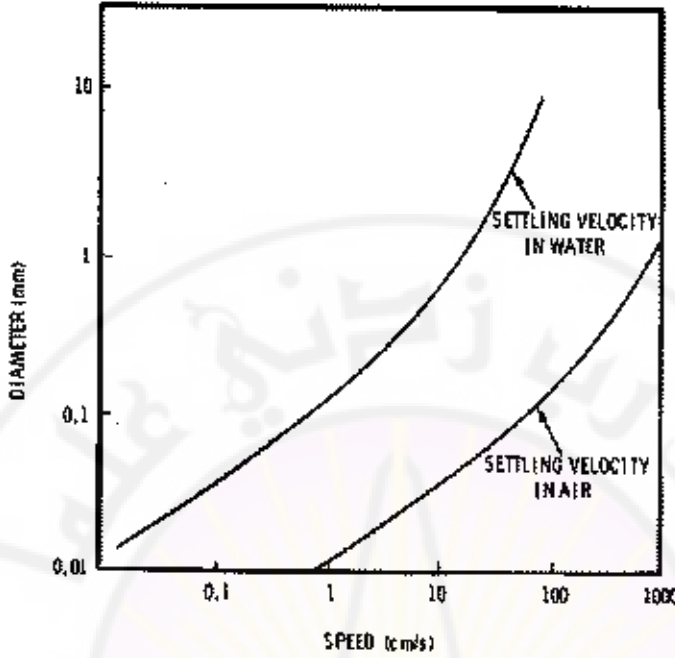
5-6-7 العلاقة بين سرعة الرياح وارتفاع المرتفعات:

نبين فيما يلي نظرية Bagnold حول ارتفاع المرتفعات وسرعة الرياح:

معدل انتقال كتلة الرمال المتدفقة مع الرياح هو:

$$q = au^3 \quad (7-7)$$

وذلك من أجل $U \leq U_*$



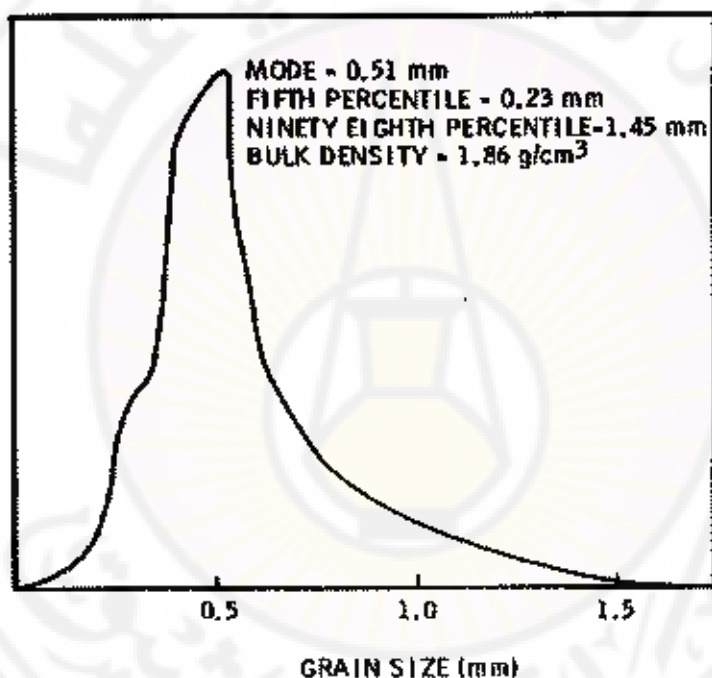
الشكل 7-13: مقارنة بين سرعات التوضع لكرات الكوارتز في الماء والهواء [7].
استناداً إلى ما تقدم ولاستنتاج العلاقة بين قفزات حبيبات الرمل والكوارتز وعتبة السرعة في الموقع وباستخدام العلاقات السابقة يبين الجدو 7-2 ملخصاً تقديرياً لسرعة الرياح على أساس التوزيع الحجمي للرمال.
إن عملية توليف أو طريقة عمل mode توزع الرمال يجب أن يبنى أو يعكس ما يسمى بتوليفة أو أسلوب حركة الرمال Sand moving المتعلقة بطاقة توزيع الرياح. وبالتالي فإن حساب عتبة السرعة المبينة على توليفة التوزيع الحجمي للرمال يصبح مؤشراً لأكثر دورات التوزيع الريحي للرمال.
وعملياً يتم الحصول على هذه المعلومات عن حركة الرياح الرملية خلال شهرين فقط في العام وبمعنى آخر فإن الرياح الشديدة تظهر بشكل أكثر تكراراً عندما تكون التربة مبللة أو متجمدة.

وجوانب الريح تتركز عند النقطة ذات الإحداثيات (V_T, K^1) التي يسميها Bagnold ببساطة عتبة السرعة.

ويمكن استخدام العلاقات 1-6، 4-6، 3-6 والمكافئ التقديري K^1 لتحديد V_T

$$V_T = \frac{A}{K} \sqrt{\frac{\sigma - \rho}{\rho}} g d \ln \frac{30K^1}{d} \quad (6-7)$$

و كمثال يبين الشكل 7-12 توزيع أحجام الحبيبات في مرتفعات Ferris في ولاية Wyoming في الولايات المتحدة الأمريكية.



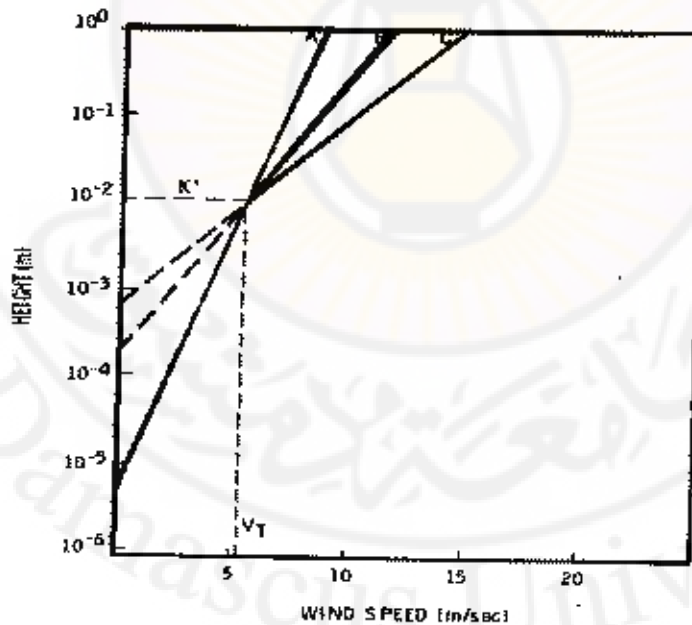
الشكل 7-12: توزيع أحجام الحبيبات في مرتفعات Ferris في ولاية Wyoming في الولايات المتحدة الأمريكية [7].

ويبين الشكل 7-13 عملية مقارنة بين سرعات التوضع Settling Velocities لكرات الكوارتز Quartz Spheres في الماء والهواء.

ولاستنتاج سرعة عتبة الاحتكاك من أجل أي ارتفاع قرب السطح تستخدم العلاقة 2-3 عندما تزداد سرعة الرياح على المرتفعات تبدأ الحبيبات الصغيرة بالوثوب أو بالقفز وبالتالي تنتقل من مكانها وعندما تصبح الرياح أكثر شدة فإن الحبيبات الخشنة تبدأ بالقفز من مكانها.

يبين الشكل 7-11 علاقة سرعة الرياح بمستوى القفز لحبيبات التربة في المرتفعات. حيث يبين المنحنى أو الخط A جانب الريح Wind Profile عند أثر عتبة السرعة للحبيبات الخشنة. وتظهر هذه المنحنيات بشكل مستقيم حيث تعبر عن جانب السرعة اللوغاريتمي.

وعندما تزداد سرعة الرياح فإن شدة القفز تزداد مع اتجاه الريح. أما المنحنى B والمنحنى C فيبينان المعدل المحدد لجانب الريح عند أثر عتبة السرعة تحت الارتفاع الذي يرمز له العالم Bagnold K^{-1} . ويتراوح هذا الارتفاع بين 0.3 cm من أجل الرمل عالي النقاوة و 1 cm للرمل العادي على المرتفع.



الشكل 7-11: علاقة سرعة الرياح بمستوى القفز لحبيبات التربة في المرتفعات [6].

$$U_{*T} = A \sqrt{\frac{\sigma - \rho}{\rho}} g d \quad (5-7)$$

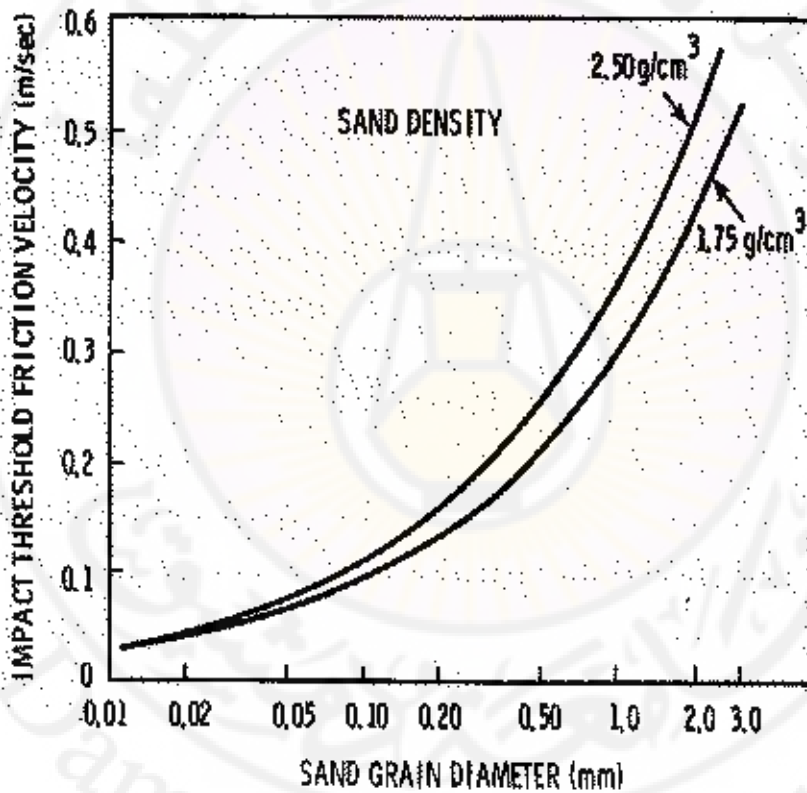
حيث:

A - ثابت التناسب والذي يساوي 0.08 من أجل سرعة العتبة ويساوي 0.1 من أجل تدفق سرعة العتبة.

σ - كثافة الرمل.

g - تسارع جاذبية الأرض.

وتظهر مجموعة المنحنيات المستندة إلى العلاقة 4-7 على الشكل 10-7.



الشكل 10-7: مجموعة المنحنيات المستندة إلى العلاقة 4-7 [6].

بما أن سرعة الرياح تزداد في المناطق ذات السطوح الملية فإن الضغط المترتب على هذه السطوح تزداد حتى تبدأ حبيبات الرمل فيها بالحركة. وبالتالي فإن سرعة الرياح تظهر على شكل تدفقات ريحية كما بين ذلك العالم Bagnold عام 1941. وتسمى هذه الظاهرة بآثر العتبة لسرعة الرياح Threshold Velocity Impact.

عندما تتساوى سرعة الرياح مع آثر العتبة تتحقق العلاقة التالية:

$$U(z) = U_{*k} \ln z/z_0 \quad (2-7)$$

حيث: U - سرعة الرياح عند الارتفاع z
 U_{*k} - سرعة الاحتكاك

$k = 0.35$ ثابت Von Karman

Z - الارتفاع عن مستوى الأرض

z_0 - خشونة السطح

سرعة الاحتكاك U_{*k} تمثل مقياس سرعة الاضطرابات المتعلقة بعزم تدفق الاضطراب (turbulent momentum flux)

$$U_{*k} = \sqrt{\tau/\rho} \quad (3-7)$$

حيث: ρ - كثافة الهواء

وتصبح عتبة الاحتكاك مساوية إلى U_{*k}

واستناداً إلى النتائج التي توصل إليها العالم Nikuradse عام 1933 فإن الخشونة z_0 تقدر بالعلاقة:

$$z_0 = d/30 \quad (4-7)$$

حيث: d - قطر حبة الرمل.

$1/30$ - ثابت التناسب.

وحسب نظرية Bagnold فإن عتبة سرعة الاحتكاك U_{*k} تتعلق بكثافة وقطر حبات الرمل أي:

على أن الرياح الشديدة لا تسمح عادة باستقرار شكل هذه التلال أو الكثبان وأيضاً المرتفعات والمنخفضات الرملية.

أضف إلى ذلك أن حرارة الجو وعوامل الرطوبة وخصائص الرمال تؤثر أيضاً في تطور وتشكل هذه التلال والمرتفعات والمنخفضات.

يمكن الاعتماد على خصائص جزئية لهذه التلال أو المنحدرات كمنعكس لحركة الرياح فيها من خلال قياس ميلان واتجاه المنحدرات وارتفاع التلال وأحجامها وكثافة الرمال وطبوغرافيتها بشكل عام.

تكون المناطق المفرغة على شكل سلاسل مصقولة وتتصف بوضعها فسي اتجاه الرياح الشديدة وتتكون عادة في المناطق للجافة من الأراضي الصخرية. وتعطي مؤشرات أكيدة حول وجود رياح قوية.

وتقوم الرياح بنقل الترسبات عبر ثلاث عمليات مختلفة وهي:

- حبيبات دقيقة لا تشكل رواسب محسوسة.
- حبيبات ثقيلة تشكل ترسبات على شكل هياكل كبيرة لمسطح التربة.
- حبيبات ذات أشكال متداخلة عادة تكون ذات طبيعة ملحية.

وبالتالي تحتاج الحبيبات الصغيرة إلى رياح أقل قوة لنقلها وترسيبها بالمقارنة مع الحبيبات الثقيلة أو الوسطى التي نحتاج إلى رياح أكثر شدة.

استناداً إلى ما تقدم قام العالمان Bagnold عام 1941 و Lettau عام 1978 بدراسة التشكل الريحي لسطح التربة وإنتاج المؤشرات المحددة لسرعة الريح العابرة عليها.

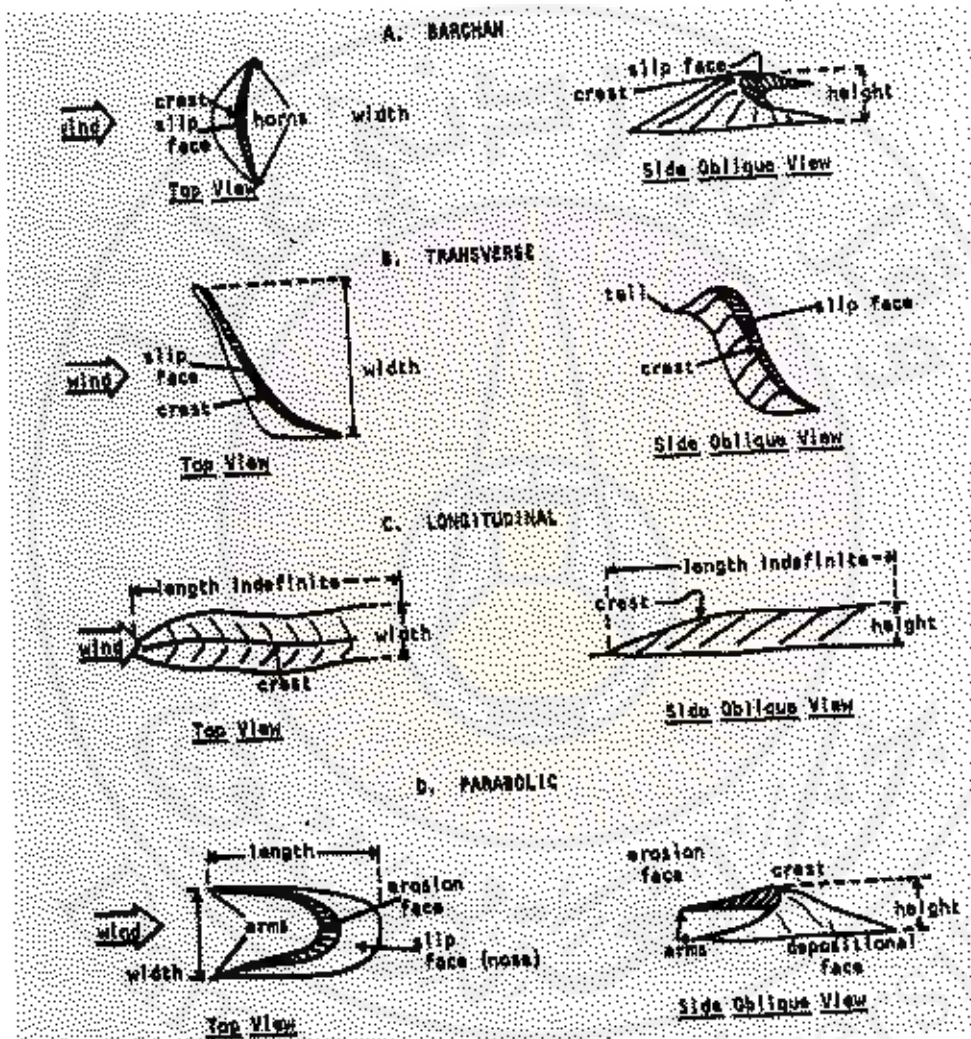
3-6-7 تقدير سرعة الرياح: Wind Speed Assessment

يمكن تقدير سرعة الرياح الوسطية في الموقع من دراستنا لحجم الحبيبات المترسبة فيه ونوزعها في المنطقة بشكل عام وارتحال التلال فيها. ومن الضروري الاستناد أيضاً إلى المعلومات المناخية المتوفرة عن الرياح في ذلك الموقع أو تلك المنطقة.

4-6-7 العلاقة بين النوزع الحجمي للحبيبات والسرعة الوسطى:

• تلال أو كثبان رملية. وأيضاً مرتفعات ومنخفضات رملية ممتدة على مساحات واسعة.

تظهر التلال الرملية والمرتفعات والمنخفضات في الصحراء على عدة أشكال كما هو مبين في الشكل 7-9.



الشكل 7-9: أشكال التلال الرملية والمرتفعات والمنخفضات في الصحراء [5].

وما زالت ميكانيكية تولدها أو ظهورها على شكل أو آخر معقدة وغير مفهومة بشكل عام. إلا أن التدخلات الزراعية في تربتها يمكن أن تؤثر بشكل ملحوظ في تكوينها.

7-6-1 أثر الرياح على تشكيل سطح الأرض:

عندما تصطدم الرياح أو تتداخل مع سطح الأرض فإنها تؤثر بشكل أو بآخر على شكل هذا السطح وينتج ما يسمى بالتشكيل الريحي للأرض Eolian Land form. وتلاحظ هذه الظاهرة في المناطق الخالية من الأشجار والمزروعات حيث تنتقل بسهولة الرمال والغبار بفعل الرياح. وتبدو هذه التشكيلات الأرضية أكثر فاعلية ووضوحاً في الأماكن الخالية من السكن والبعيدة عن التدخلات البشرية فيها، ولا توجد عوائق تجنب حركة الرياح فيها، لذلك يمكن اعتماد هذه التشكيلات كمعطيات تشير إلى حركة وسرعة الرياح الوسطية التي تعبت في هذه المواقع على مر الزمن. وبالتالي يمكن اعتماد علم التشكيل الجغرافي لتحديد عوامل سرعة الرياح بشكل سريع وبجهود بسيطة نسبياً. ويمكن أن تقدم الأقمار الصناعية أو التصوير الجوي معلومات هامة لتحديد سرعات الرياح الوسطية في المواقع المقاسة. وبالرغم من سهولة أخذ هذه المعطيات إلا أن القياسات تعتمد بشكل كبير على الخبرة في مجال الاستشعار عن بعد. ويعتبر الريح الحاصل باعتماد هذه التقنية مبنياً على كمية ونوعية الحممات أو القياسات. ويظهر ذلك جلياً من خلال رسوم تخطيطية للموقع المقاس ولكن ذلك يتطلب معرفة بالطبيعة المناخية للموقع المقاس ولعوامل التربة أو التضاريس فسي المنطقة بشكل عام.

7-6-2 التشكيل الريحي للأرض EOLIAN LANDFORM:

بشكل عام يكون التشكيل الريحي للأرض إما على شكل تلال أو مرتفعات رملية أو مناطق منخفضة حيث تهب فيها الرياح وتتداخل مع طبيعة التربة والتدخلات الزراعية في الموقع وتتشكل نتيجة ذلك أنواع مختلفة يمكن حصرها في ثلاث أشكال طبوغرافية وهي:

- مرتفعات تحفها الرياح مشكلة فيها انكسارات طبوغرافية حادة.
- منخفضات على شكل صفائح مائلة أو تجويف مستور.

تتأثر حركتها ببعضها وانحناءاتها من خلال كثافة كمياتها مما يضعف الحكم على سرعة الرياح الوسطية في موقعها.

و بفضل بشكل عام قياس عدة أشجار في المواقع ذات ارتفاع متساوي ويجب أن يكون ارتفاع الشجرة في حدود 10 متر أو أعلى.

بالنسبة لأنواع الأشجار فهناك أنواع تتحسس أكثر لسرعات الرياح التي تزيد عن 5m/s وأخرى أقل تحسناً.

وفي المواقع القريبة من السواحل تكون الأشجار عادة أكثر ميلاناً لسرعة الرياح لذلك يجب مقارنتها مع بعضها فقط في السواحل وعدم مقارنتها مع مثيلاتها في المناطق الداخلية حيث يجب أن تخضع لمقارنة خاصة بها.

كذلك يجب الوضع في الحسبان موقع الأشجار على أعلى التلال أو أسفلها حيث تتأثر المؤشرات المقاسة فيها.

تتطلب القياسات خبرة واسعة وضرورة أخذ نماذج عديدة في الموقع وذلك كي تتحقق نسبة خطأ أقل، ففي حال عدم الخبرة والقياسات غير المتعددة قد تصل نسبة الخطأ من 20% إلى 40% ويمكن أن تقل هذه النسبة مع زيادة الخبرة بحيث تصل إلى 5%.

وبالرغم من عدم الدقة في استخدام الأشجار لوضع مؤشرات تركيب العنفات الريحية في المواقع المختارة تبقى هذه الطريقة سهلة وبسيطة وسريعة لإعطائنا مؤشرات هامة خاصة إذا أضيفت للمعلومات المناخية المتوفرة أصلاً.

5-7 الخلاصة:

يمكن الاعتماد على شكل وانحراف الأشجار لتحديد المواقع المرغوبة أو المثالية لتركيب نظم تبديل طاقة.

6-7 المؤشرات الجغرافية-تشكيلية Geomorphologic Indicators لاختيار

الموقع

من جهة أخرى قام العالم Wald عام 1934 بوضع خارطة تشكل الصقيع الشديد والثقيل من خلال دراسة حلقات مقاطع الأشجار التي تضيق في بعض أجزائها وتتسع في أجزاء أخرى.

يبين الشكل 7-8 استراتيجية اختيار الموقع للعنفات الريحية ذات الاستطاعة الكبيرة.



الشكل 7-8: استراتيجية اختيار الموقع للعنفات ذات الاستطاعة الكبيرة [6].

وهذه المؤشرات العضوية يمكن أن تضاف بالطبع إلى القياسات التقليدية التي يتم الحصول عليها من المعلومات المناخية ومقاييس سرعة الرياح anemometers التي تتواجد في المناطق القريبة من المواقع المقاسة.

هناك مجموعة من العوامل التي يمكن أن تؤثر سلباً أو إيجابياً على المؤشرات العضوية. وعلى سبيل المثال أنواع الأشجار وقربها من بعضها ووجود غابات حيث

ولكن هذا المؤشر يخضع لعدة اعتبارات منها أثر الموقع المزروع فيه الأشجار وطبوغرافيه هذا الموقع.

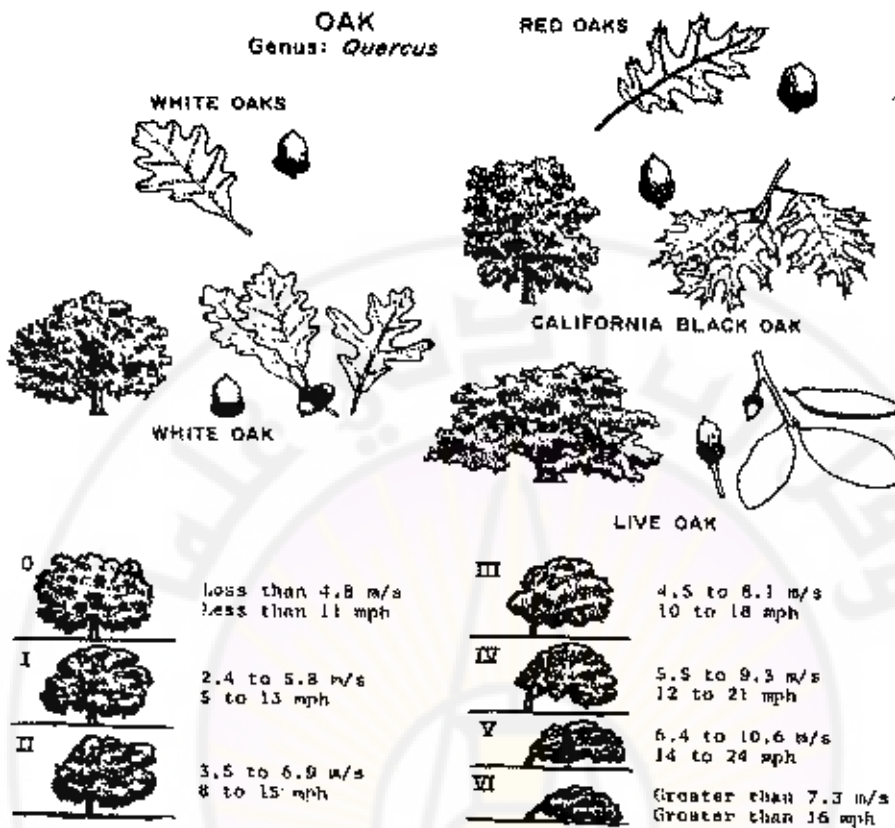
كذلك أثر رياح الشتاء والرياح الفصلية الأخرى والتي يمكن أن تتغير بشكل طفيف أو كبير. إلا أن رياح الشتاء هي التي تعطي المؤشر الأكبر لاتجاهها وتؤثر بشكل عام على اتجاه العلم فيها ولكن في بعض المواقع الجغرافية وبعض البلدان يمكن أن تختلف اتجاهات الرياح بين الصيف والشتاء والتي يمكن أن تكون قوية في كلا الفصولين أو حتى في جميع فصول السنة.

4-7 مؤشرات الرياح الشديدة وآثار الصقيع:

يمكن الاعتماد على دراسة فروع الأشجار المنكسرة نتيجة الرياح الشديدة وتشكل الجليد عليها نتيجة الصقيع لاتخاذ القرارات المناسبة لتكوين أو عدم تركيب العنقات الريحية في المواقع المناسبة.

حيث تظهر مؤشرات نقص هذه الأشجار أو فروعها المحاذير التي يمكن الأخذ بها لتحديد درجة سرعة الرياح في الموقع أو المنطقة بشكل عام. وتعتبر نقصات الأغصان والميلان الشديد للشجر ووقوعها على الأرض نتائج وأحداث تدل على شدة الرياح في الموقع المقاس والتي نتلخص بـ:

- وقوع الأشجار.
 - الميلان الشديد للشجر.
 - نقصات الأغصان ورؤوس الأشجار.
 - تموت بعض أغصان الأشجار.
 - الجنوع متعددة العقد ووصلات الأغصان المتآكلة.
- وتعتبر هذه المؤشرات ضرورية لاعتماد الشروط الفنية اللازمة لتكوين العنقات أو المزارع الريحية، بحيث تستطيع مقاومة حالات الرياح الشديدة في الموقع. يمكن التحقق من حلقات مقطع الأشجار التي تدل على حدوث أعاصير كما بين العالم Pillow في فلوريدا عام 1931 بعد حدوث إعصار 1926.



Note: Live oaks are evergreen and, thus, should provide better evidence of winter wind than other oaks. Most white oaks have rounded lobes and sweet acorns. Most red oaks have spiny lobes and bitter acorns. Certain species of oak which prefer moist bottomland soil are unlikely to be found in windy locations. These include Bur Oak, Swamp Oak, Shumard Oak, and Laurel Oak.

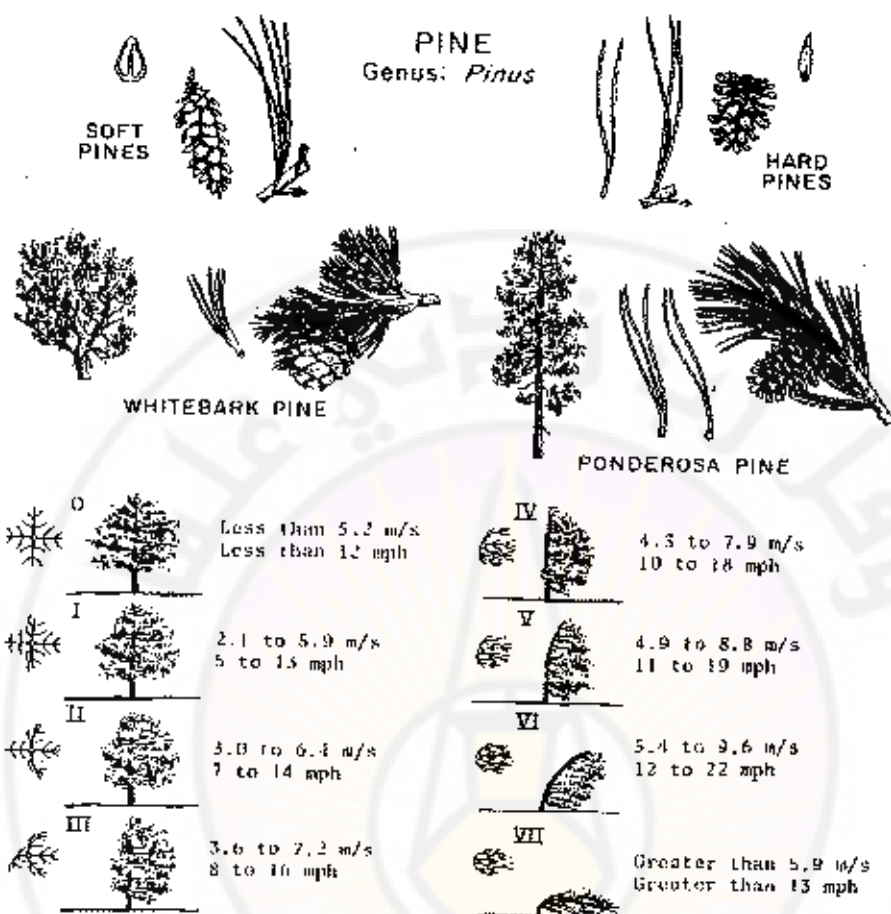
The relationships between mean annual wind speed ($\bar{V}$) the indices of wind deformation are $V = 1.1B + 3.0$ or $\bar{V} = .7D + 3.2$

(rms error = ± 0.9 m/s) (rms error = ± 1.1 m/s)

الشكل 7-7: يبين مثالاً عن قياسات شجر السنديان [7].

3-7 مؤشرات اتجاه الرياح:

بين العالم Holroyd عام 1970 إمكانية التحقق من اتجاه الريح من خلال انحراف العلم Flagging لمجموعة الأشجار والذي يشير إلى اتجاه الريح في الموقع المقاس.



Note: soft pine needles are usually in bundles of 5 and occasionally 1 to 4. Their cones have a stalk. Hard pine needles usually are in bundles of 2 to 3, occasionally 5 to 8. Their cones are often armed with prickles. Pines growing at high elevations or along the coast are likely to be also affected by wind-blown sand, salt, ice, and snow which would add to the wind deformation.

The relationships between mean annual wind speed ($\bar{V}$) and the indices of wind deformation are: $\bar{V} = 0.7G + 3.3$ or $\bar{V} = .7D + 3.5$

(rms error = ± 0.7 m/s) (rms error = ± 0.7 m/s)

الشكل 6-7: قياسات شجر الصنوبر والسرو [7].

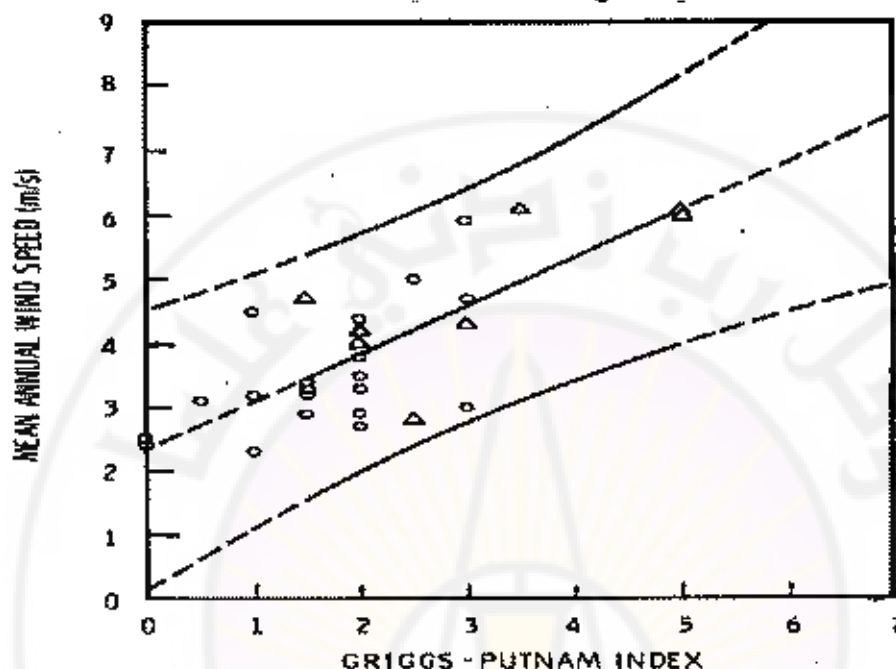
(2) $\Rightarrow$ Let m and n be any two positive integers.

Table 1: Summary of Data for Various Parameters									
Parameter	Unit	Value 1	Value 2	Value 3	Value 4	Value 5	Value 6	Value 7	Value 8
1.1	mm	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0	3.3
1.2	mm	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6
1.3	mm	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9
1.4	mm	2.1	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2
1.5	mm	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2	4.5
1.6	mm	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2	4.5	4.8
1.7	mm	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2	4.5	4.8	5.1
1.8	mm	3.3	3.6	3.9	4.2	4.5	4.8	5.1	5.4
1.9	mm	3.6	3.9	4.2	4.5	4.8	5.1	5.4	5.7
2.0	mm	3.9	4.2	4.5	4.8	5.1	5.4	5.7	6.0
2.1	mm	4.2	4.5	4.8	5.1	5.4	5.7	6.0	6.3
2.2	mm	4.5	4.8	5.1	5.4	5.7	6.0	6.3	6.6
2.3	mm	4.8	5.1	5.4	5.7	6.0	6.3	6.6	6.9
2.4	mm	5.1	5.4	5.7	6.0	6.3	6.6	6.9	7.2
2.5	mm	5.4	5.7	6.0	6.3	6.6	6.9	7.2	7.5
2.6	mm	5.7	6.0	6.3	6.6	6.9	7.2	7.5	7.8
2.7	mm	6.0	6.3	6.6	6.9	7.2	7.5	7.8	8.1
2.8	mm	6.3	6.6	6.9	7.2	7.5	7.8	8.1	8.4
2.9	mm	6.6	6.9	7.2	7.5	7.8	8.1	8.4	8.7
3.0	mm	6.9	7.2	7.5	7.8	8.1	8.4	8.7	9.0
3.1	mm	7.2	7.5	7.8	8.1	8.4	8.7	9.0	9.3
3.2	mm	7.5	7.8	8.1	8.4	8.7	9.0	9.3	9.6
3.3	mm	7.8	8.1	8.4	8.7	9.0	9.3	9.6	9.9
3.4	mm	8.1	8.4	8.7	9.0	9.3	9.6	9.9	10.2
3.5	mm	8.4	8.7	9.0	9.3	9.6	9.9	10.2	10.5
3.6	mm	8.7	9.0	9.3	9.6	9.9	10.2	10.5	10.8
3.7	mm	9.0	9.3	9.6	9.9	10.2	10.5	10.8	11.1
3.8	mm	9.3	9.6	9.9	10.2	10.5	10.8	11.1	11.4
3.9	mm	9.6	9.9	10.2	10.5	10.8	11.1	11.4	11.7
4.0	mm	9.9	10.2	10.5	10.8	11.1	11.4	11.7	12.0
4.1	mm	10.2	10.5	10.8	11.1	11.4	11.7	12.0	12.3
4.2	mm	10.5	10.8	11.1	11.4	11.7	12.0	12.3	12.6
4.3	mm	10.8	11.1	11.4	11.7	12.0	12.3	12.6	12.9
4.4	mm	11.1	11.4	11.7	12.0	12.3	12.6	12.9	13.2
4.5	mm	11.4	11.7	12.0	12.3	12.6	12.9	13.2	13.5
4.6	mm	11.7	12.0	12.3	12.6	12.9	13.2	13.5	13.8
4.7	mm	12.0	12.3	12.6	12.9	13.2	13.5	13.8	14.1
4.8	mm	12.3	12.6	12.9	13.2	13.5	13.8	14.1	14.4
4.9	mm	12.6	12.9	13.2	13.5	13.8	14.1	14.4	14.7
5.0	mm	12.9	13.2	13.5	13.8	14.1	14.4	14.7	15.0

[7] 1-7 292

[illegible]

معاملات ارتداد Regression Coefficients وهذه القياسات يمكن أخذها من أجل عشرة أجيال للشجر في الموقع كما هو مبين في الجدول 7-1.



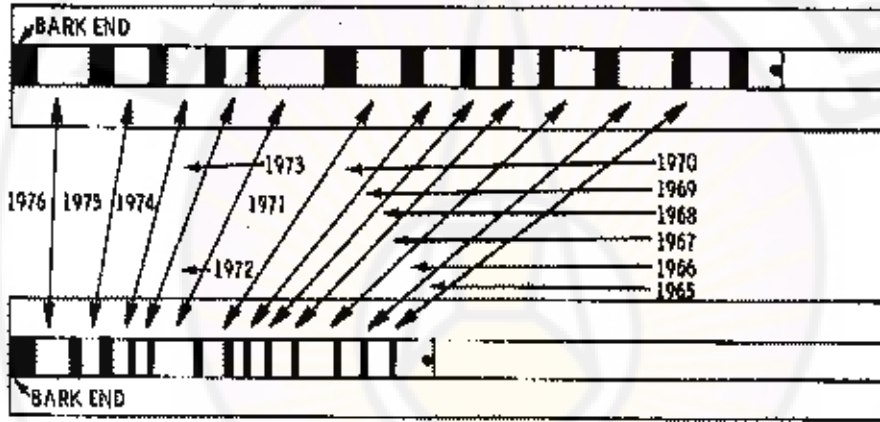
الشكل 5-7 : قياسات وسطي سرعة الرياح [7].

يمكن تعزيز القياسات من خلال تصوير جوي بواسطة الطائرة العمودية وبين الشكل 6-7 مثلاً عن قياسات شجر الصنوبر والسرو والشكل 7-7 يبين مثلاً عن قياسات شجر السنديان Quercus.

3-2-7 معدل ضغط الرياح (Wind Pressure Average) :

ويتم قياسه على أساس التشوه Deformation ويعتبر المؤشر الثالث لانحراف أو تشكل الشجرة، حيث يؤخذ مقطع لإحدى الأشجار في الموقع ويجري قياس طبقاته في النهايتين اليمنى واليسرى خلال السنوات الخمس الأخيرة. ولكن هذا المؤشر لم ينتشر استخدامه. انظر الشكل 4-7 حيث تؤخذ النسبة بين شريحة مواجهة الريح windward وشريحة اتجاه الريح leeward في مقطع الشجرة.

CORE FROM LEEWARD SIDE
OF CONIFER



الشكل 4-7: قياس ضغط الرياح على أساس التشوه [7].

4-2-7 العلاقة بين السرعة الوسطية للرياح وانحراف شكل الشجرة:

تتبع عملية قياس معدل Griggs-Putnam والذي يرمز له بـ G ومعدل انحراف الشكل D ومعدل ضغط الرياح C وأيضا ما يسمى مؤشر Barch ويرمز له B إلى ما يسمى تقنية إحصاء Jack-Knife.

ويستند معدل G و D إلى معامل الدائرة ويقاس كمربع نصف القطر (R^2) يمكن الحصول على قياسات وسطية سرعة الرياح في حدود من الثقة تعادل 95% كما هو مبين في الشكل 5-7 وعلى أساس قياسات سرعة في حدود 1m/sec وتستند إلى

استناداً للشكل 3-7 فإن معدل التشوه أو الانحناء هو:

$$D = A/B + C/45^0 \quad (1-7)$$

حيث:

A - المسافة بين الجذع ويمين الشجرة

B - المسافة بين الجذع ويسار الشجرة علماً أن اتجاه الريح المعتمد يكون من الأيسر إلى الأيمن.

C - زاوية انحناء جذع الشجرة بالنسبة للعمود المنشأ من أسفل الجذع على التربة.

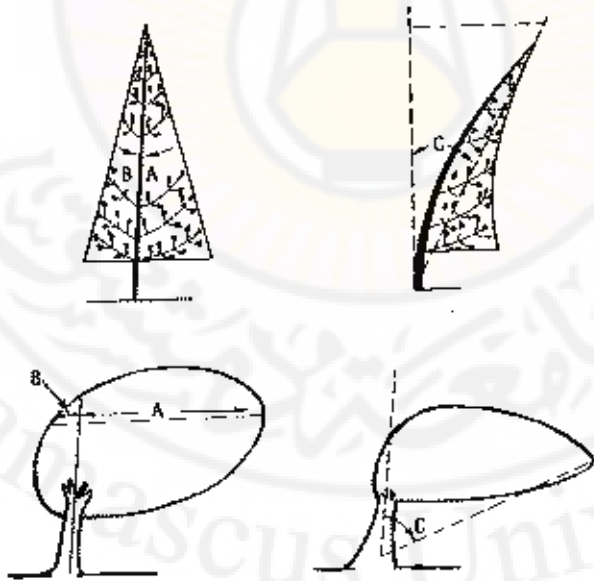
حيث:

$$5 \geq A/B \geq 1$$

بينما القيمة الصغرى لـ D هي 1.

والقيمة العظمى للزاوية C هي 90° وبالتالي فإن القيمة العظمى للمعدل D هي 7.

تؤخذ هذه المؤشرات بالتصوير من موقع الزاوية اليمينية على اتجساع حركة العلم. وعلى هذا الأساس يتم حساب سرعة الرياح.

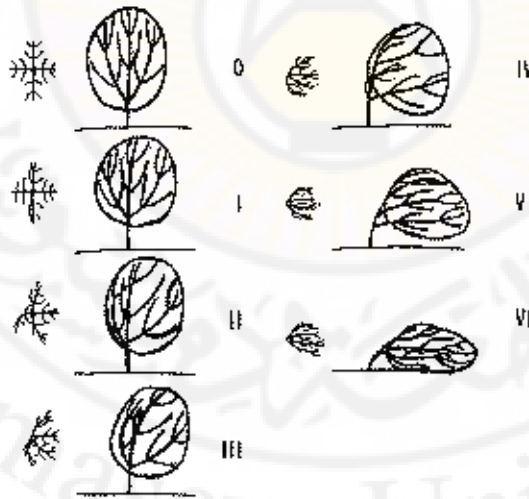


الشكل 3-7: حساب سرعة الرياح استناداً إلى انحناء الأشجار [4].

- I -- انحناء أغصان فقط
 II -- حركة علم ضعيفة لفروع الشجرة
 III - حركة علم متوسطة لفروع الشجرة
 IV - حركة علم قوية لفروع الشجرة
 V - انحناء جزئي للجذع
 Partial Throwing
 مع التأكد من قوة التربة وسلامة الزراعة للشجرة حيث يكون القسم الأسفل من الجذع عمودياً عليها.

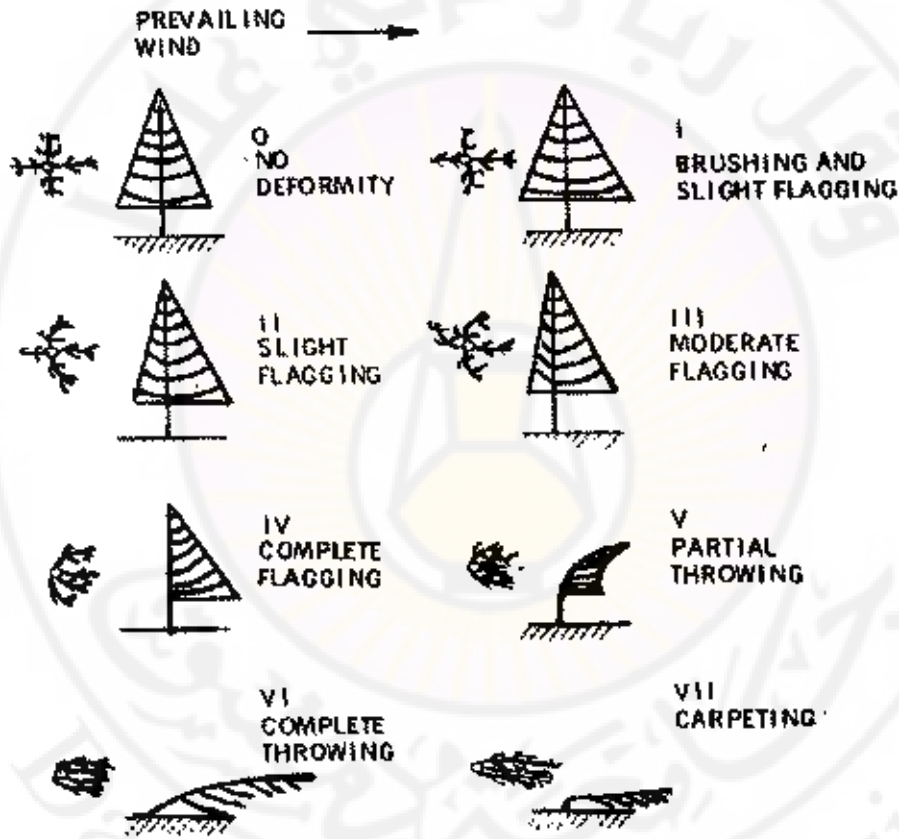
VI - انحناء كامل للجذع ويكون اتجاه الجزء تقريباً موازي للتربة
 Complete Throwing

VII - انحناء الجذع على شكل السجادة وتبدو كشجيرة ملقاة على التربة.
 من جهة أخرى قدم العالم Barsch سبعة تصنيفات ولكنه اعتمد على الأشجار عريضة الأوراق Broad leaf Tree كالسنديان مثلاً الشكل 2-7 حيث يكون الجذع عمودياً في الأصناف الخمسة الأولى ومنحنيّاً قليلاً في الصنف السادس ومنحنيّاً بصورة أكبر في الصنف الأخير.



الشكل 2-7: تصنيفات الأشجار عريضة الأوراق للعالم Barsch [4].

السرعة الوسطية للرياح ويقصد بها على مدار العام.
 السرعة الوسطية الفصلية للرياح الذي تنمو خلاله الشجرة.
 السرعة الوسطية للفصل الساكن حيث ينعدم نمو الأشجار.
 إن أفضل المؤشرات يمكن الحصول عليها من أشجار السرو والصنوبر.
 يبين الشكل 1-7 ثمانية تصنيفات لانحناء الأشجار نتيجة لأثر الرياح عليها استناداً
 إلى نظرية العالمين Griggs و Putnam وهي:



الشكل 1-7: تصنيفات إنحناء الأشجار نتيجة لأثر الرياح [4].

No Effect

0 - لا أثر

ويمسح بالعمل على سرعات رياح أكبر في هذا الموقع علماً أن استطاعة العنفة تتعلق بمكعب سرعة الرياح كما بينا في الفصل السابق.

7-2 المؤشرات البيولوجية (النباتية) لقياس كمون (Potential) طاقة الرياح.

7-2-1 مقدمة:

يمكن للعمليات الفيزيولوجية والكيميائية في موقع ما من الأرض أن تؤثر في طبيعة نمو الأشجار المزروعة فيه. وهذه المتغيرات تؤثر عادة في شكل هذا النمو وتحديداً في انحراف الأشجار عن النمو العمودي الطبيعي لها. وتعتبر حركة الرياح العابرة في هذا الموقع وعلى مدار العام أحد أهم العناصر التي تؤثر في الشكل التشريحي لهذه الأشجار ويمكن الاستفادة من هذه المتغيرات لتحديد طبيعة الرياح العابرة بشكل متواتر على هذا الموقع.

بالاعتماد على هذا الأثر لحركة الرياح يمكن تحديد المقاييس الفراغية المعتمدة لقياس شدة الرياح وسرعتها الوسطية في الموقع وهي مقاييس ثلاثة:

1- صغيرة وتتعلق بشجرة واحدة أو عدد من الأشجار في الموقع.

2- متوسطة وتتعلق بعدد كبير من الأشجار وفي عدة مواقع.

3- كبيرة وتقاس بواسطة الاستشعار عن بعد وعلى مستوى القطر.

قام العالمان Hewson و Wode عام 1980 بإيجاد طريقة حسابية اعتمدت على الأساس الكمي لحركة الرياح في موقع محدد يحتوي شجرة أو عدد من الأشجار من خلال جيل زمني لنموها، لا يقل عادة عن عشرة سنوات.

7-2-2 طريقة اعتماد الأشجار كمؤشر لسرعة الرياح الوسطية:

لاحظ العالم Putnam عام 1984 أن انحناء الأشجار يمكن أن يكون تابعاً لسرعة الرياح الوسطية. واعتمد على نظرية Hewson التي تأخذ ثلاثة دلائل لهذا المؤشر وهي:

- تقييم الموقع.
 - تطوير الموقع.
 - التعامل مع الموقع.
 - تقدير كمون العواصف ومخاطرها.
- 2- تقنية نظام تبديل طاقة الرياح (العتاد الصلب) WECS hardware.
- اختيار نظام تبديل طاقة الرياح.
 - تشغيل نظام تبديل طاقة الرياح.
 - الأداء المؤكد للنظام.
- 3- اقتصاديات نظام تبديل طاقة الرياح.
- تقديرات الكلفة.
 - القيمة غير المؤكدة Value uncertainly.
- 4- المسائل الفنية والجمالية.
- تعتبر مساحة الأرض المطلوبة من المهام الواجب وضعها في الحسبان ومقارنة ذلك مع نظم توليد الكهرباء التقليدية، أما المعلومات المناخية فتعتبر أساساً لتحديد ثلاث مسائل هامة. تأتي في مقدمتها الاختيار الصحيح للموقع الذي تهب فيه رياح مناسبة ومستدامة ما أمكن، والمسألة الثانية فهي تحديد مصدر الرياح وتوزيعها في الموقع على مدار العام، أما المسألة الثالثة والمتعلقة بالموقع فهي ضرورة استيضاح طبوغرافية الموقع المختار وفهم طبيعته.
- ومن خلال تعرفنا على الموقع المختار وطبيعته نستطيع تحديد الطاقة المتاحة استناداً إلى القياسات التي يجب الاعتماد عليها لإشادة العنفات الريحية في الموقع المختار.
- أما بالنسبة لإنشاء العنفة الريحية ففسد دلت التجارب العالمية أن العنفات ذات الاستطاعات الكبيرة هي الأفضل من ناحية الحصول على أكبر مردود ممكن وأقل كلفة لإنتاج الكيلووات الساعي حيث يكون ارتفاع مستوى الدوار عند الصرة (Hub) أعلى

جهة، والتخطيط لإشادة مزارع ريفية لعنفات مربوطة مع الشبكة الكهربائية دون الحاجة للانتظار سنة أو عدة سنوات، كما تسمح باختيار المواقع الأكثر ملائمة لتكريب محطات مراقبة الرياح الحديثة.

7-1-2 أسس إنشاء العنفات الريحية (اختيار الموقع الملائم):

تعتبر المعلومات المناخية المهمة المبدئية لاختيار الموقع الذي يمتلك أكبر طاقة متاحة لإنشاء نظام تبديل طاقة الرياح (WECS)، مع ضرورة دراسة خصائص الرياح كمصدر لهذه الطاقة وخصائص الآلة أو التقنية التي تقوم بتحويلها إلى طاقة كهربائية. وبالتالي تقدير اقتصاديات طاقة الرياح عند تخطيط إنشاء عنفة أو مجموعة عنفات ريحية من خلال نظام تبديل طاقة الرياح Wind Energy Conversion System (WECS). وهنا لابد من إتباع نفس الأسس التي تخطط على أساسها عملية إنشاء محطة كهربائية تقليدية.

بالنسبة لاختيار الموقع تعتمد الأسس التالية:

- التنبؤ بالحمولة.
- موثوقية (Reliability) نظام التوليد.
- كلفة نظام التوليد.
- جريان القدرة.
- موثوقية نظام التحويل.
- استخدام الأرض وإمكانات الحصول عليها.
- هندسة للموقع وبناءه.
- أمان الموقع.

وبالإضافة إلى هذه الأسس فإن إنشاء العنفة الريحية يتطلب الوضع في الحسبان عدة اعتبارات في المجالات التالية:

1- المعلومات المناخية والتي ينتج عنها:

- اختيار الموقع.

الفصل السابع

أسس اختيار مواقع العنفات الريحية

1-7 الاختيار الأمثل لمواقع العنفات الريحية:

1-1-7 مقدمة: أنجزت وزارة الكهرباء المخطط العام للطاقة المتجددة بالتعاون مع منظمة الأمم المتحدة للتطور الاجتماعي والاقتصادي UNDP-UNDESA عام 2002، كما أشرنا سابقاً، والذي يشمل برنامجاً لإنشاء مزارع ريحية وعنفات ريحية مستقلة باستطاعة 800 ميغاوات خلال عشرة سنوات.

وبالرغم من توفر أطلس الرياح الذي أصدرته مديرية الأرصاد الجوية، والمعلومات المناخية التي يمكن الحصول عليها من شبكة الانترنت حول حركة وسرعة الرياح في مختلف مناطق سورية، فإن إنشاء العنفات والمزارع الريحية في المناطق التي تتوفر فيها سرعات رياح مجدية، كما بينها خارطة الرياح السورية، يتطلب اختيار الموقع الملائم لتأمين استثمار ناجح ومثالي لهذه العنفات والمزارع، التي يقصد بها مجموعة عنفات مقامة في الموقع ومتصلة مع محطة تحويل كهربائية.

قام المركز الوطني لبحوث الطاقة بتركيب 16 محطة مراقبة لسرعة واتجاه الرياح في عدد من المواقع المختارة في سورية، كما ذكرنا سابقاً. ويعتبر هذا العمل الضروري مسألة معقدة نسبياً وتتطلب موافقة الجهات المالكة لهذه المواقع والمتابعة المستمرة لأخذ وتحليل المعطيات والتي تتطلب على الأقل سنة.

تهدف الدراسة الحالية إلى اعتماد مؤشرات بيولوجية (نباتية) وجغرافية استناداً إلى أبحاث أمريكية وأوروبية، سبقت إنشاء محطات المراقبة الحديثة وقدمت أساساً للاختيار الأمثل للمواقع، وحسبت سرعة الرياح الوسطية بنسبة خطأ لا تتجاوز 20%. ولدى مقارنة هذه الحسابات مع معطيات محطات المراقبة يمكن لهذه المؤشرات أن توفر مصدراً هاماً للمعلومات المناخية حول حركة واتجاه الرياح في تلك المواقع، وأن تخفض نسبة الخطأ إلى 5 %، مما يوفر وسيلة عملية سهلة وشاملة في أي موقع من مواقع القطر تسمح بإشادة العنفات الريحية المستقلة والبعيدة عن شبكات الكهرباء من



المراجع العلمية:

- [1] أطلس الرياح، مديرية الأرصاد الجوية، دمشق 1994.
- [2] م.معن كعدان تقانات الطاقة المتجددة ودورها في الحفاظ على البيئة - حلقة حوار حول التقانات النظيفة في مجال السلامة والبيئة بانباس 2003.
- [3] م.معن كعدان محطات الرصد الريحية - ورشة عمل ترشيد استهلاك واستخدام الطاقة المتجددة. حمص-سورية 2005.
- [4] د.كمال ناجي د.علي حمزة أداء العنفة الريحية الأولى الموصولة للشبكة العامة في سورية، مجلة جامعة دمشق، دمشق 1998.
- [5] د.كمال ناجي - د. صالح الأيوبي - د.مازن غندور دراسة الجدوى الفنية الاقتصادية و الدراسة التصميمية لاستخدام العنفات الريحية في سورية و لبنان . برنامج التعاون البحثي السوري اللبناني (الإعلان الثالث - 2004 - 2005)
- [6] د.كمال ناجي آفاق استثمار طاقة الرياح في سورية. ورشة العمل حول ترشيد استهلاك الطاقة و استخدام الطاقة المتجددة حمص- سورية 2006.
- [7] وثائق المركز الوطني لبحوث الطاقة ... وزارة الكهرباء سورية 2008.
- [8] Renewable Energy World-VOL.5 NO 3 2002.
- [9] Master plan of Renewable Energy in Syria
Ministry of Electricity -UNDP-UNDESA Damascus 2002.
- [10] J.F Mawell J.G Mc Gowan and A.L Regers
Wind Energy Explained Theory, Design and Application
University of Massachusetts Amherst John Wiley & Sons. Ltd
2002.
- [11] Gary L. Jonhson
Wind Energy Systems Manhattan K.S. 2006.
- [12] Siegfried Heier
Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems (Kassel University , Germany) . WILEY 2006.
- [13] Bunlung Neammanee Global Wind Overview Mongkut's
Institute of Technology Bangkok- Thailand 2006.
- [14] Martin O.J. Hansen
Aerodynamics of Wind Turbines EARTHSCAN London
Sterling VA2008.
- [15] www.german-renewable-energy.com
- [16] www.windtest-nrw.de

الجدول 6-12: نتائج تحليل البيانات لسرعة الرياح [7].

Month	Rec	Mean (m/s)	Min (m/s)	Max (m/s)	Std Dev. (m/s)	Weib k (m/s)	Weib c (m/s)
Jan	3.814	7.02	0.02	25.2	3.92	1.85	7.9
Feb	4.027	7.14	0.00	17.2	3.39	2.16	8.0
Mar	4.459	6.94	0.00	23.3	4.15	1.72	7.8
Apr	4.313	8.18	0.30	20.3	3.80	2.28	9.2
May	4.458	8.92	0.30	22.9	4.04	2.36	10.1
Jun	4.314	8.94	0.00	18.1	3.22	3.09	10.0
Jul	4.458	9.02	0.10	17.0	3.12	3.23	10.1
Aug	4.240	9.89	0.50	18.1	3.04	3.68	11.0
Sep	4.317	7.05	0.00	16.9	3.37	2.17	7.9
Oct	4.459	6.41	0.00	15.9	2.99	2.25	7.2
Nov	4.315	6.92	0.00	19.7	3.12	2.31	7.8
Dec	4.458	7.15	0.00	18.0	3.15	2.39	8.0
All	51.632	7.81	0.00	25.2	3.63	2.26	8.8

الجدول 6-11: نتائج الحسابات وعدد التسجيلات لكثافة طاقة الرياح والانحراف المعياري [7].

Month	Rec	Mean	Min	Max	Std.	Dev.
1	Jan	3.814	419	0.000	9.432	716
2	Feb	4.027	359	0.000	3.026	405
3	Mar	4.459	437	0.000	7.328	797
4	Apr	4.313	527	0.016	4.884	641
5	May	4.458	660	0.016	6.765	819
6	Jun	4.314	551	0.000	3.399	477
7	Jul	4.458	547	0.001	2.702	468
8	Aug	4.240	685	0.070	3.265	536
9	Sep	4.317	331	0.000	2.660	390
10	Oct	4.459	248	0.000	2.235	297
11	Nov	4.315	309	0.000	4.525	372
12	Dec	4.458	352	0.000	3.534	452
13	All data	51.632	453	0.000	9.432	572

م2. ويتم حساب الانحراف الكلي بين السرعات الآتية والسرعة الوسطية في الموقع وفقا للعلاقة التالية:

For each wind speed column in the date set Wind grapher calculates the standard deviation of the wind speed data using the following equation:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{v}_i - \bar{v})^2}{n-1}}$$

$\bar{v}_i$ is the wind speed in time step

(17-6)

$\bar{v}$ is the average wind energy speed

n is the number of time steps

والجدول 12-6 يعطي نتائج تحليل البيانات لسرعة الرياح الشهرية الوسطية والقيم الصغرى والعظمى والانحراف المعياري وكذلك معاملات توزيع ويبيل، وأيضا للعام كاملا.

الجدول 6-10: نموذج للبيانات التي تم تسجيلها من محطة رصد سندية 1 [7].

S10 max	Dire	Temp	Albar	Date	Time	S40avg	S40A	S40max	S10avg	S10sd
19/04/2004	11:50	11.30	1.300	13.30	10.20	1.400	12.80	252.4	18.90	938.5
19/04/2004	12:00	11.10	1.200	13.80	10.20	1.300	12.70	251.1	19.10	938.5
19/04/2004	12:10	10.20	1.180	12.40	9.20	1.300	11.90	258.5	18.60	939.0
19/04/2004	12:20	9.60	1.000	11.80	8.50	1.300	10.90	264.3	18.30	939.0
19/04/2004	12:30	10.70	1.200	13.60	9.50	1.40	12.80	251.4	18.30	939.0
19/04/2004	12:40	12.10	1.200	14.50	10.80	1.300	13.90	255.5	18.30	938.5
19/04/2004	12:50	12.70	1.300	15.10	11.50	1.600	15.20	254.6	18.20	939.0
19/04/2004	13:00	13.40	1.000	15.10	11.90	1.400	14.30	255.6	18.60	939.0
19/04/2004	13:10	13.40	1.280	16.90	11.60	1.400	14.70	251.9	17.90	939.0
19/04/2004	13:20	14.10	1.100	16.00	12.40	1.560	15.30	257.8	17.50	939.0
19/04/2004	13:30	13.90	1.300	16.00	12.10	1.500	14.70	250.9	17.40	939.0
19/04/2004	13:40	13.60	1.400	16.80	12.10	1.500	15.10	255.5	17.50	939.0

ويظهر في البيانات القيم الصغرى والعظمى والمتوسطة لمرعة الرياح لمنسوبين 10 و 40 متر والانحراف المعياري للقيم والمحسوب لكل 10 دقائق والذي من خلاله يتم حساب تكرار بعض القيم وتباعدها. وقد تم تسجيل تغير اتجاه الرياح منسوباً للشمال المغناطيسي ومقدراً بالدرجات. وفي الحقلين الأخيرين إلى اليمين تم تسجيل درجات الحرارة والضغط الجوي والتي تساعد في تحديد كثافة الهواء وبالتالي كثافة الطاقة التي يحملها مقدرة بالوات/م². كما تم تسجيل توقيت وتاريخ التسجيل لكل عشر دقائق.

الجدول 6-11 يبين نتائج الحسابات ويعطي عدد التسجيلات في كل شهر والقيم المتوسطة والصغرى والعظمى لكثافة طاقة الرياح والانحراف المعياري مقدراً بالوات/

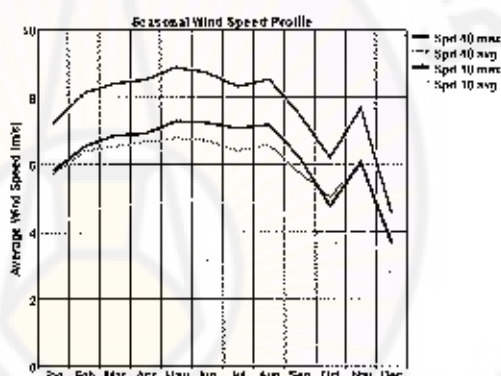
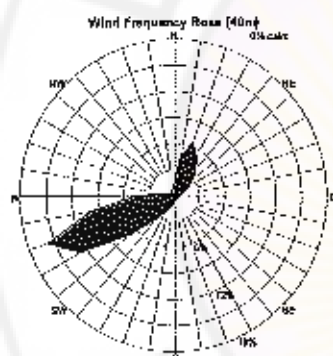
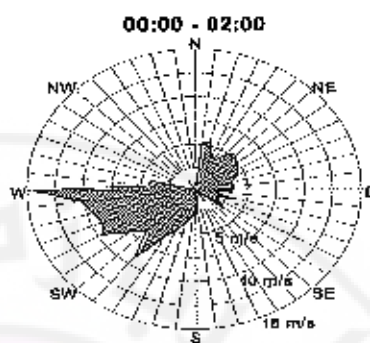
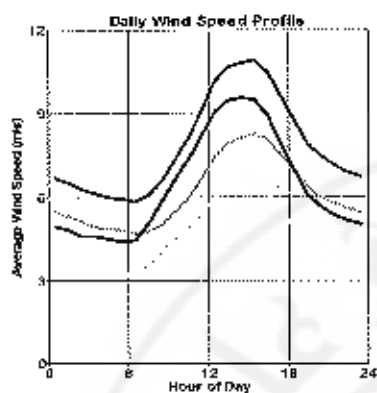
الجدول 6-9: نتائج قياسات سرعة الرياح عند ارتفاع 10 متر و 40 متر [2].

Variable	QunaitDatProperty2	
	Spe40avg	Spe10avg
Height above ground (m)	40	10
Mean wind speed (m/s)	6.11	4.46
Median wind speed (m/s)	5.70	4.01
Min wind speed (m/s)	0.15	0.15
Max wind speed (m/s)	23.87	18.82
Mean power density (W/m ²)	264	106
Mean energy content (kWh/m ² /yr)	2,314	927
Energy pattern factor	2.130	2.198
Weibull k	1.770	1.765
Weibull c (m/s)	6.87	5.02
1-hr autocorrelation coefficient	0.888	0.871
Diurnal pattern strength	0.257	0.332
Hour of peak wind speed	16	15
Mean turbulence intensity	0.141	0.194
Standard deviation (m/s)	3.56	2.63
Coefficient of variation (%)	58.2	59.1
Frequency of calms (%)	0.00	0.00
Actual observations	48,498	48,498
Missing observations	0	0
Data completeness (%)	100	100

6-14 نتائج رصد محطة السندية في محافظة حمص:

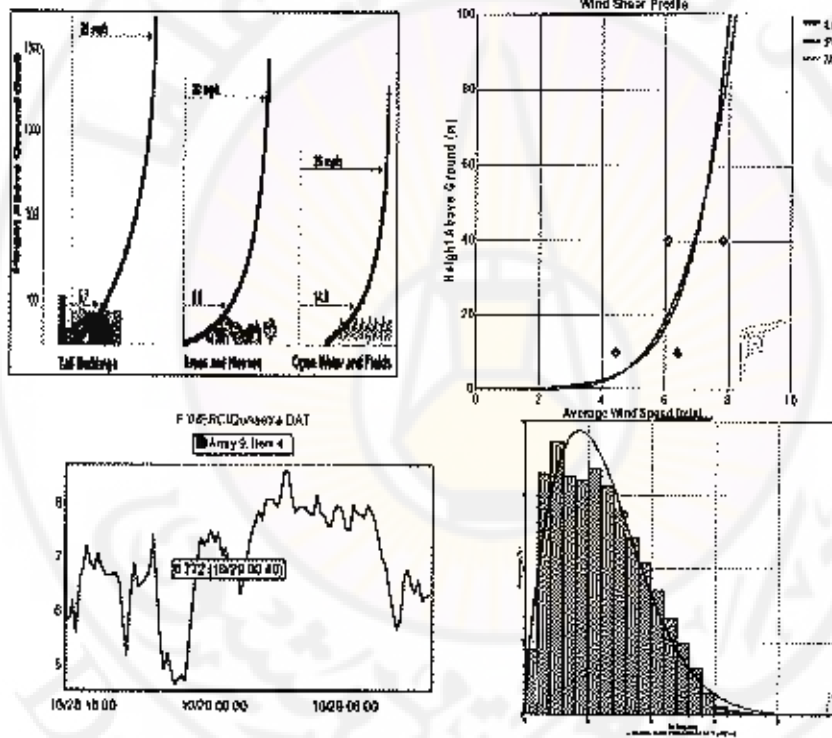
لقد تم تركيب 16 محطة رصد من أصل 20 حتى تاريخ 25/10/2005، ومنذ ذلك التاريخ يقوم فريق العمل في المركز الوطني لبحوث الطاقة بجني البيانات المخزنة من كل محطة وتنظيمها ضمن الحاسوب من أجل تحليلها ودراساتها والحصول على المنحنيات البيانية لجميع المعاملات والتي من خلالها يمكن تقييم المواقع وتحديد الأكثر ملائمة للاستثمار وإنشاء المزارع الريحية فيها.

يبين الجدول 6-10 نموذجاً للبيانات التي تم تسجيلها من محطة رصد سندية 1، في محافظة حمص والتي تمتد من تاريخ 2004/04/19 وحتى 2005/04/19، ونعرض نتائج التحليل الرقمية والبيانية.



الشكل 6-20: نتائج تحليل بيانات محطة رصد الرياح في نبع الفوار [2].

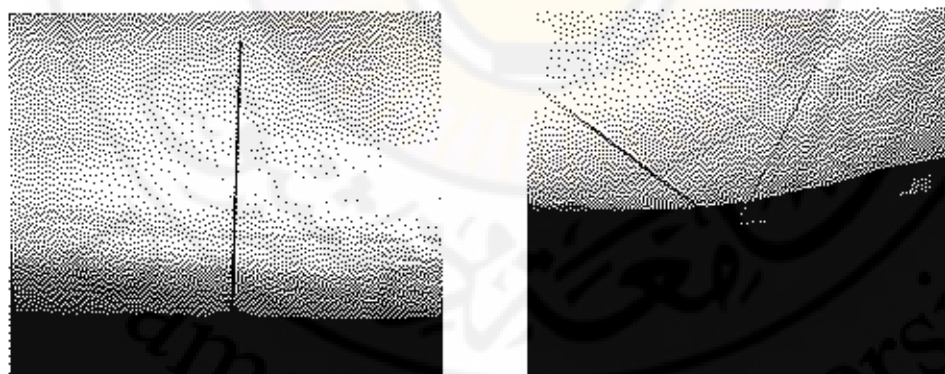
يبين الشكل 6-20 نتائج تحليل بيانات محطة رصد الرياح في نبع الفوار في محافظة القنيطرة من تاريخ 2004/10/26 وحتى 2005/9/27 وهي تبين ودة الرياح ومنحنيات تغير سرعة الرياح الوسطية والعظمى لمنسوبي 40 و 10 متر، وكذلك منحنيات تغير سرعة الرياح تبعاً للارتفاع عن سطح الأرض ومنحنيات سرعة الرياح الوسطية والعظمى على مدار الفترة المرصودة والتي تقارب السنة. ويبين الجدول 6-9 نتائج قياسات سرعة الرياح عند ارتفاع 10 متر و 40 متر.



الجدول 6-8: نموذج قياسات سرعة الرياح كل عشر دقائق في محطة المراقبة [7].

Date	Time	S40avg	Dir40	Dir40SD	S40max	S40SD	S10avg	S10max	S10SD	T °C	P mbar
25/10/2004	15:10	1.49	89.5	45.2	2.53	0.536	1.62	3.39	0.707	30.01	912.1
26/10/2004	15:20	1.18	115.4	53.4	2.89	0.437	1.59	3.63	0.583	29.84	912.1
26/10/2004	15:30	2.91	46.7	37.2	5.89	1.834	2.85	5.35	1.475	28.73	911.7
26/10/2004	15:40	6.08	22.9	6.9	7.55	0.584	5.17	6.85	0.605	27.79	910.9
26/10/2004	15:50	6.13	23.3	6.1	7.49	0.536	5.19	6.87	0.647	27.67	910.8
26/10/2004	16:00	6.05	26.4	4.8	6.87	0.381	5.33	6.31	0.464	27.62	910.8
26/10/2004	16:10	6.60	18.6	4.1	7.77	0.518	5.54	7.05	0.660	27.45	910.8
26/10/2004	16:20	6.02	23.4	8.4	7.13	0.489	4.95	6.47	0.681	27.41	910.8
26/10/2004	16:30	5.67	26.2	5.2	6.59	0.446	4.49	6.27	0.757	27.38	910.8
26/10/2004	16:40	5.64	28.3	3.2	6.31	0.317	4.17	5.23	0.454	27.09	910.9
26/10/2004	16:50	5.38	23.7	3.0	6.13	0.380	3.87	5.21	0.422	26.95	911.0
26/10/2004	17:00	5.07	20.6	2.6	5.81	0.264	3.43	4.07	0.276	26.70	911.1
26/10/2004	17:10	4.23	8.0	5.1	5.05	0.371	2.65	3.21	0.194	26.51	911.2
26/10/2004	17:20	3.53	0.4	10.5	4.21	0.287	2.67	2.95	0.126	26.26	911.3
26/10/2004	17:30	3.79	0.1	12.6	4.43	0.281	2.69	3.63	0.290	26.00	911.4
26/10/2004	17:40	4.23	351.7	4.4	4.79	0.361	3.84	4.35	0.182	25.64	911.4
26/10/2004	17:50	5.16	352.4	3.4	5.49	0.169	3.83	4.43	0.381	25.27	911.5
26/10/2004	18:00	5.48	356.7	4.3	6.11	0.234	3.39	4.13	0.439	25.38	911.5

ويبين الشكل 6-19 طريقة تركيب محطات المراقبة التي نفذت في سورية.



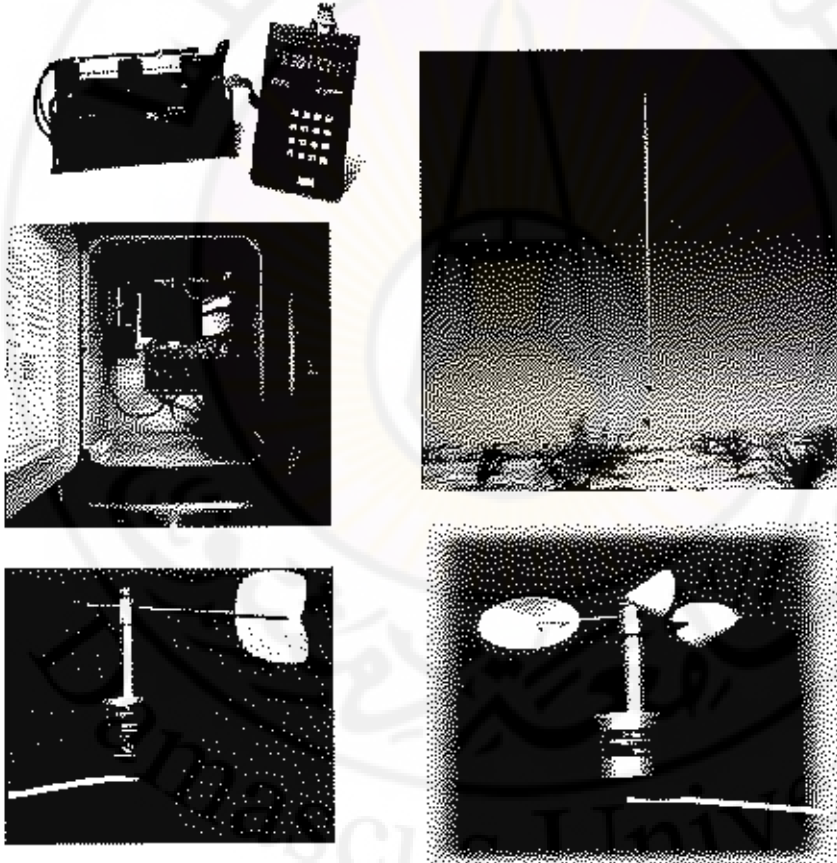
الشكل 6-19: طريقة تركيب محطات مراقبة التي نفذت في سورية [2].

يتم تزويد البرج بمصباح ضوئي يوميض بشكل نبضي خلال الليل من أجل المواقع التي يمكن أن تمر منها طائرات على ارتفاع منخفض أو التي تكون قريبة من المطارات. ويتم تغذية تجهيزات المحطة بواسطة خلية كهروضوئية باستطاعة 20 وات مع مدخنة ومنظم شحن لحماية المدخنة والتجهيزات كما يتم تزويد مجمع المعلومات Data Logger بإمكانية سحب ملفات البيانات المسجلة مباشرة بوصل حاسوب نقال إليه أو عن طريق الاتصال الهاتفي عبر الشبكة الثابتة أو الخلوية حيث يمكن تزويد كل موقع بكرت SIM في حال توفر التغطية ويتم الاتصال بالمحطة على رقمها المحدد ومن خلال الحاسوب الثابت في مركز التحكم. ويتم تحليل البيانات باستخدام برنامج خاص بمجمع المعلومات المستخدم.

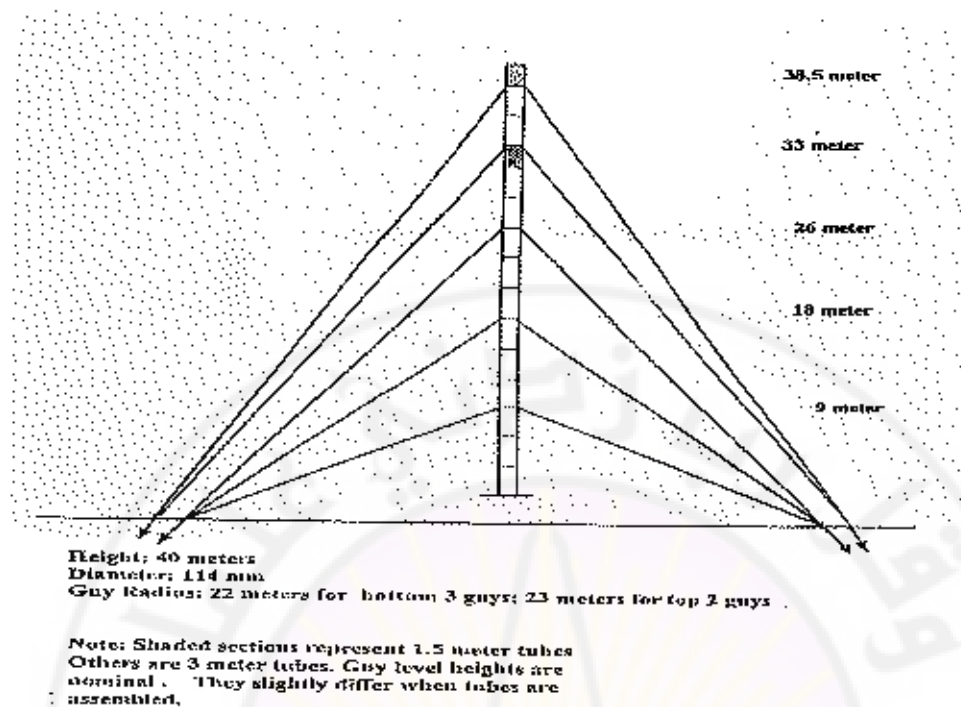
يتم سحب البيانات على شكل جداول في كل حقل وتسجيل رقم المحطة والتاريخ والساعة. وتسجل هذه البيانات كل عشر دقائق كما هو متبع عالمياً لرصد المعطيات الريحية. ويبين الجدول 6-8 نموذجاً لهذه القياسات.

6-13 وصف لمحطة رصد أو مراقبة الرياح:

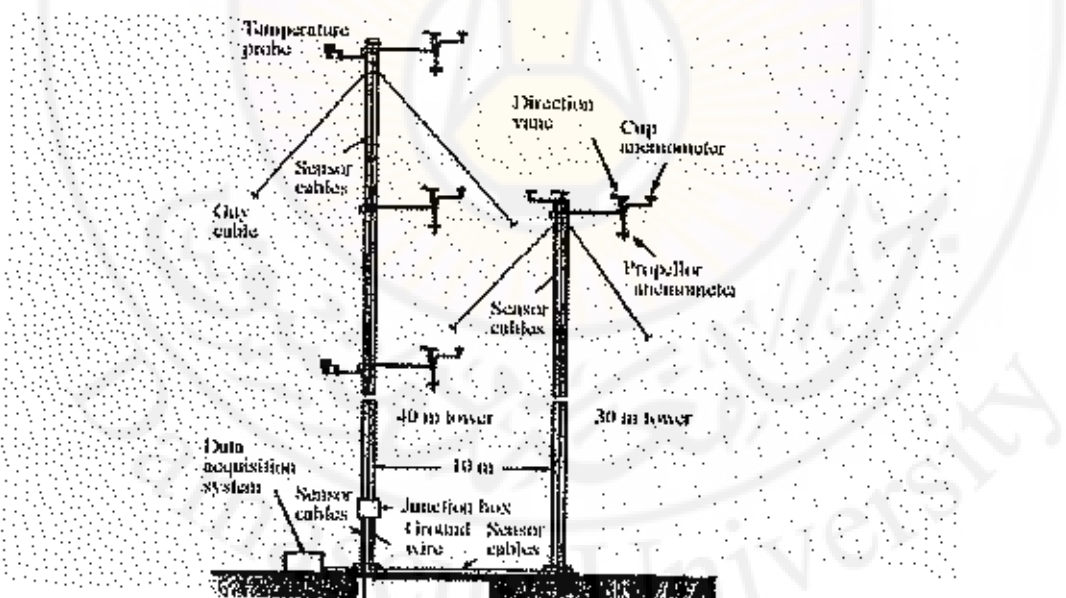
تتألف المحطة من برج بارتفاع 40 متر يركب عليه حساس سرعة رياح وحساس اتجاه الرياح على ارتفاع 40 متر ويركب حساس سرعة رياح ثاني على ارتفاع 10 متر والذي يمكن من تحديد معامل التغير في السرعة مع الارتفاع لكل موقع وتبعاً لطبيعة خشونة الموقع والتضاريس المحيطة، كما تم تركيب مقياس حرارة ومقياس ضغط جوي والتي يتطلبها برنامج دراسة محطات التوليد الريحية من أجل تحديد القدرة الكهربائية التي يتوقع توليدها والمواقع المثلى للعنفات وحساب عددها والاستطاعة الإجمالية للمزرعة. يبين الشكل 6-18 تجهيزات محطة مراقبة سرعة واتجاه الرياح.



الشكل 6-18: تجهيزات محطة مراقبة سرعة واتجاه الرياح [5].

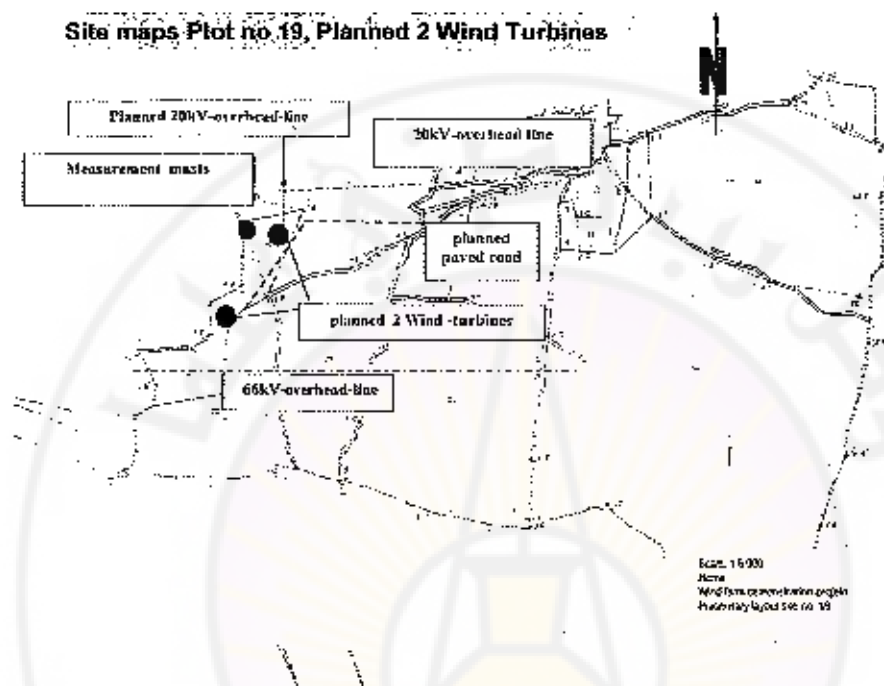


الشكل 6-16: مواصفات برج محطة مراقبة سرعة الرياح [12].



الشكل 6-17: أبراج مراقبة سرعة واتجاه الرياح [12].

Site maps Plot no.19, Planned 2 Wind Turbines



الشكل 6-15: مخطط البنية التحتية لمشروع إنشاء عفتين ريحيتين في موقع السنديانة في محافظة حمص [5].

يبين الشكل 6-16 مواصفات برج محطة مراقبة الرياح. ويبين الشكل 6-17 مخططاً كاملاً لأبراج مراقبة سرعة واتجاه الرياح التي تمكنا من حساب سرعة الرياح على أي ارتفاع آخر، وحساب وإنشاء منحنيات توزيع رايلي و ويبول، وحساب وإنشاء ورده الرياح (Wind Rose) في الموقع.

الجدول 6-7 : نتائج قياسات وسطي سرعة الرياح في محطة المراقبة الثانية -
سندبانة 2 من نيسان إلى تشرين ثاني 2004 [5].

DAY	APRIL	MAY	JUNE	JULY	AUGUST	SEP.	OCT.	NOV	DEC	Jan-05
1		8.18	12.48	8.89	12.11	9.07	6.23	6.34	3.78	5.55
2		6.49	10.08	6.60	13.30	9.73	8.32	5.70	2.75	4.83
3		6.48	8.12	7.85	13.80	8.21	8.08	4.77	6.28	3.44
4		10.31	6.82	10.52	11.72	8.80	4.72	3.54	8.59	2.71
5		7.40	5.22	8.90	10.39	10.97	4.30	6.98	3.72	3.10
6		5.24	8.05	5.17	10.95	8.24	8.00	7.80	5.43	2.86
7		9.38	5.22	8.56	10.12	6.07	5.77	6.28	5.70	2.44
8		8.81	10.05	8.84	11.49	4.33	5.86	5.68	7.36	6.91
9		7.24	11.17	11.77	11.98	10.29	6.01	4.14	4.58	6.90
10		11.50	8.91	11.79	12.18	12.58	3.48	5.19	3.01	8.35
11		14.15	6.02	8.85	12.77	7.80	6.73	6.54	5.39	3.95
12		11.44	7.18	8.84	8.73	7.59	7.02	8.48	6.84	3.81
13		8.45	8.69	9.81	6.81	6.87	4.48	5.92	3.28	4.88
14		8.42	8.83	6.20	7.18	8.02	4.37	5.56	3.52	7.48
15		18.25	10.52	8.18	8.54	5.18	5.88	6.85	5.03	7.20
16		11.44	8.80	7.83	9.10	8.12	4.43	5.88	5.05	8.38
17		9.89	9.93	8.11	10.45	8.68	4.80	8.42	3.88	8.40
18		8.20	7.77	8.95	12.79	4.83	5.44	3.42	10.29	3.88
19		6.75	7.14	8.70	11.85	8.06	5.55	2.70	9.68	3.30
20		8.84	11.73	8.49	8.43	5.37	5.70	2.75	8.39	4.25
21		5.83	11.82	8.69	7.94	6.15	7.93	4.44	6.15	9.99
22		7.54	11.70	12.43	7.74	8.04	3.88	8.68	5.15	5.07
23		8.08	10.62	10.79	7.77	4.94	5.13	6.29	4.04	7.88
24		7.57	10.82	8.10	7.71	8.52	7.46	3.07	5.68	12.48
25		8.78	9.76	8.34	8.13	7.29	8.12	4.09	5.33	2.62
26		8.14	10.05	8.83	8.10	6.68	9.75	8.54	4.26	
27	9.11	9.77	8.51	9.84	7.01	4.44	9.40	5.49	3.45	
28	5.48	11.71	9.01	10.42	8.81	4.78	7.83	2.77	5.07	
29	8.99	10.53	7.44	9.98	9.35	4.33	8.70	6.80	8.35	
30	8.37	6.95	6.04	9.27	9.41	5.22	7.60	6.49	8.01	
31		9.99		11.10	8.81		7.33		7.20	
AVERAGE	7.21	8.76	8.67	8.92	9.73	6.82	8.18	5.44	5.63	5.63

أما الشكل 6-15 فيبين مخطط البنية التحتية لمشروع تركيب عنفتين ريحتين في موقع
السندبانة، ويسعى المركز الوطني لبحوث الطاقة في سورية الى انشاء مزرعة ريحية
في هذا الموقع باستطاعة 5 ميغا وات.

الجدول 6-6: نتائج قياسات وسطي سرعة الرياح في محطة المراقبة الأولى

- سندية 1- من نيسان إلى تشرين ثاني 2004 [5].

DAY	APRIL	MAY	JUNE	JULY	AUGUST	SEP	OCT	NOV
1		6.37	12.63	7.02	11.88	9.01	7.10	8.56
2		6.91	9.97	6.70	13.25	9.60	8.75	7.00
3		6.66	8.18	8.08	14.00	8.25	8.52	5.43
4		10.43	6.96	10.60	11.85	8.76	5.18	4.19
5		7.76	5.43	6.94	10.25	11.19	4.38	10.63
6		4.196	6.23	5.30	11.01	8.33	8.02	10.42
7		9.47	5.48	6.33	10.00	5.08	5.96	8.52
8		9.00	10.67	8.83	11.80	4.44	5.97	7.84
9		7.51	11.27	11.53	12.01	10.59	3.68	5.29
10		11.91	8.85	11.78	11.72	13.16	7.09	7.87
11		14.70	6.32	8.82	13.03	7.65	7.16	9.11
12		11.95	7.25	8.89	9.82	7.80	4.40	8.26
13		8.72	7.01	9.79	6.81	7.48	4.51	8.00
14		8.82	8.95	6.91	7.16	6.47	5.69	8.80
15		17.02	10.81	8.61	8.76	5.64	4.33	8.22
16		11.81	8.39	8.14	9.18	8.32	5.79	8.05
17		9.84	9.96	8.25	10.93	8.58	5.72	8.49
18		6.75	7.73	9.13	12.88	5.34	5.28	4.32
19	10.44	6.22	7.39	8.91	11.53	5.25	5.96	2.97
20	8.33	6.86	11.85	8.62	8.51	5.40	8.24	3.23
21	6.44	5.51	11.78	9.82	7.92	5.22	3.56	5.57
22	7.27	7.47	11.88	12.49	7.86	6.41	5.34	10.79
23	8.44	8.39	10.65	11.02	7.87	4.88	7.74	7.2
24	7.00	7.55	11.09	8.13	7.87	5.79	9.33	4.08
25	4.63	6.86	9.91	8.42	8.02	7.37	11.21	5.68
26	9.40	8.16	10.22	8.95	8.34	6.78	9.40	5.12
27	8.91	10.00	8.84	9.91	7.34	4.67	8.76	
28	5.58	12.00	9.03	10.55	6.74	4.74	8.40	
29	7.09	10.51	7.72	10.11	9.19	4.34	7.61	
30	8.48	6.00	5.88	9.91	9.43	4.89	5.53	
31	0	10.46	0.00	11.01	8.87	0.00	6.73	
AVER-AGE	7.53	8.95	8.82	9.02	9.83	6.98	6.51	6.04

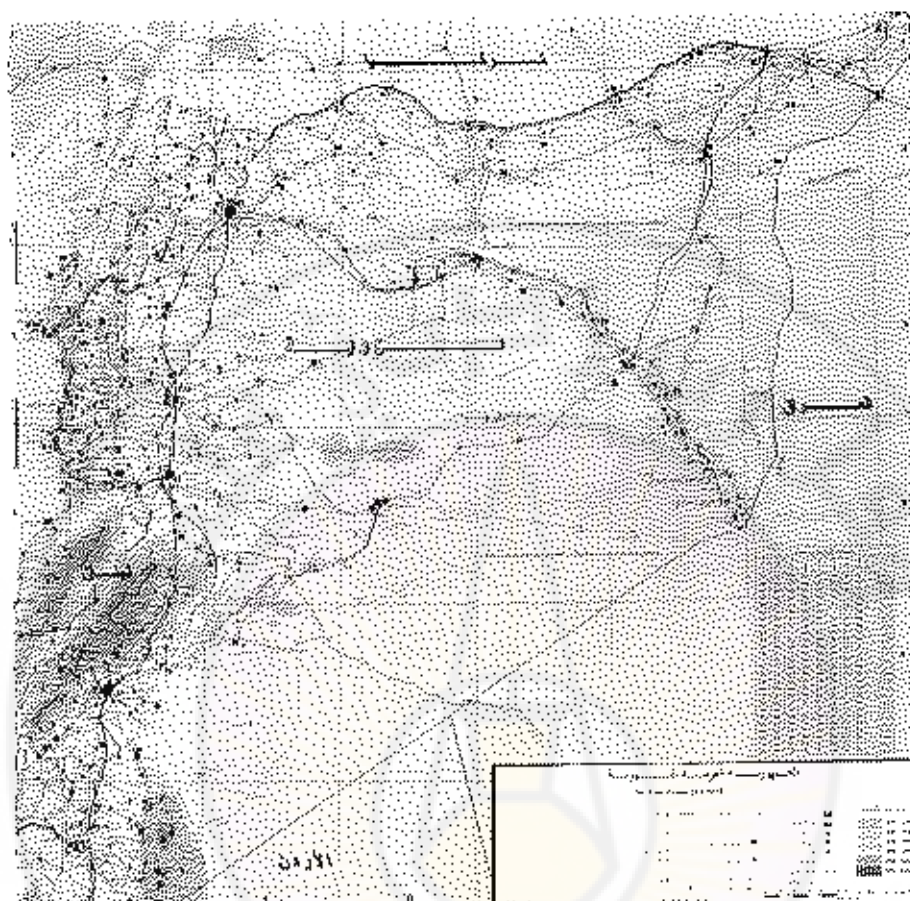
الجدول 4-6: مواصفات أماكن تركيب محطات مراقبة سرعة الرياح في سورية [5].

Site	Location		Alt.	Site	Location		Alt.
	N	E			N	E	
Salchaif S/S	32° 29,704	36° 41,204	1200	Qulalish			
Sakched - Mashkikh	32° 25,650	36° 43,226	1200	Al Hijana	33° 8,687	36° 31,818	650
Suweida Mohlaln	32° 40,711	36° 44,103	1800	Alkaddieh	33° 8,686	36° 31,201	650
Nasharaf	32° 42,557	36° 47,416	1500	Qatlina Lake	34° 40,113	36° 35,146	500
Qunallra	33° 10,584	35° 52,065		Bershin-Misyaf	34° 53,256	35° 20,599	920
Naba al Fawwar	33° 13,957	35° 56,907	930	Ras Basit	35° 50,908	35° 49,979	30
Gaba	33° 10,432	35° 55,870	1020	Skefleh Pass	35° 36,492	36° 13,040	1350
Nawa				Bab al Hawa			
Ghabaghli	33° 42,3	36° 16,801	750	Murad An Noman	35° 41,421	36° 45,303	580
Palmyra SS	34° 34,002	36° 16,515	430	Jandara			

الجدول 5-6: مواصفات أماكن تركيب محطات مراقبة سرعة الرياح في سورية [5].

Site	Location		Alt.	Site	Location		Alt.
	N	E			N	E	
Palmyra east	34° 34,082	36° 16,893	410	Mabateh Jubb al Jarra			
Palmyra west	34° 33,687	36° 13,890	420	Adhann	36° 21,94	37° 47,18	
Tiyas	34° 32,344	37° 42,757	450	Rusafa	35° 38,35	36° 26,15	980
Imqius				Thawra	35° 51,00	36° 33,15	330
Cheroubin	33° 43,815	35° 21,382	1900	Halebiya	35° 42,43	36° 37,80	300
Ramlees				Tayem	35° 13,85	40° 02,05	314
Phosphate mine				As Sukhba	34° 53,27	39° 18,11	300

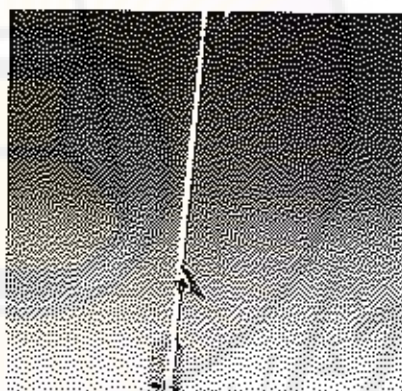
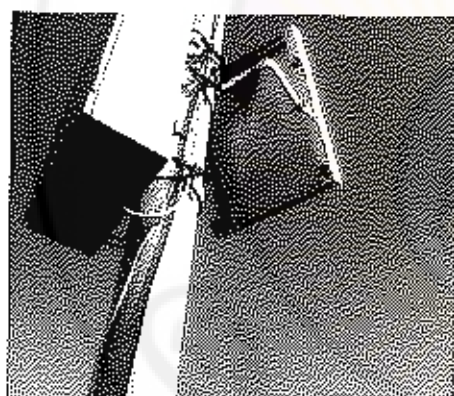
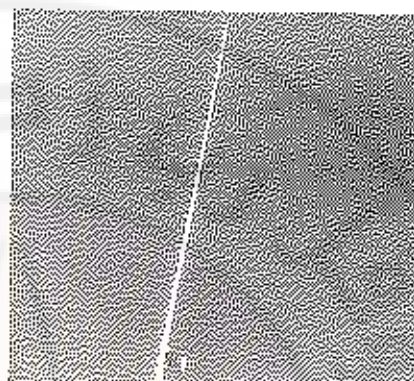
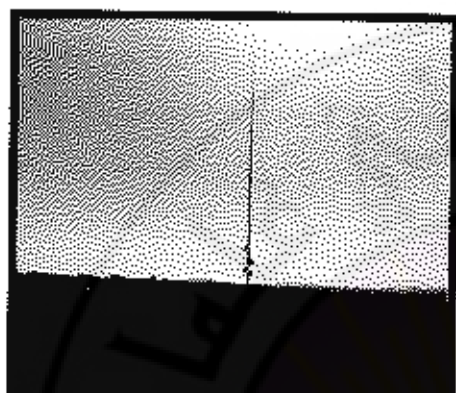
وبين الجدولان 6-6، 7-6 نتائج قياسات سرعة الرياح لمحطتي المراقبة المركبتين في السديانة خلال عام 2004.



الشكل 6-14: خارطة المواقع المقترحة لأبراج مراقبة سرعة الرياح في سورية [5].

والجدولان 4-6 ، 5-6 يبينان أسماء وخصائص المواقع المختارة لتزويد محطات المراقبة، (16 محطة مراقبة) بحيث يصل عددها إلى 20 في المرحلة الأولى.

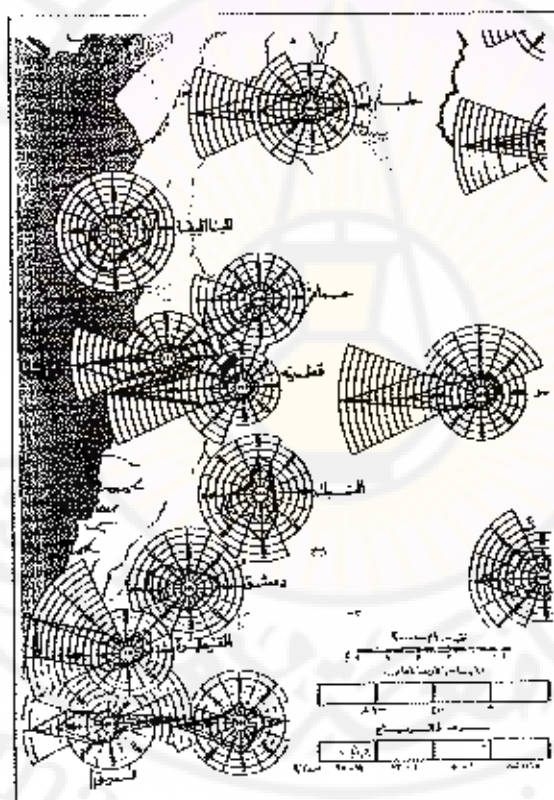
تم البدء بتركيب محطات حديثة لمراقبة وقياس سرعة الرياح على ارتفاع 40 م (من قبل المركز الوطني لبحوث الطاقة في سورية) في أربعة مواقع وهي: سنديانة 1، سنديانة 2، غباغب والقنيطرة الشكل 6-13.



الشكل 6-13: محطات حديثة لمراقبة سرعة واتجاه الرياح في عدد من المواقع [5].
والشكل 6-14 يبين خارطة المواقع المقترحة لأبراج مراقبة سرعة الرياح في سورية.

قدرت سرعة الرياح الوسطية بين 3.5 و 5 على ارتفاع 10 م و 10- 11.5 م/ ثانية على ارتفاع 50 م مع معامل خشونة حتى 5 درجات (معطيات سرعة الرياح التي تسم الحصول عليها على مدى 20 عاماً على الأقل). التقديرات السابقة اعتمدت على معطيات محطات مراقبة قديمة ركبت على ارتفاع 10 م في مواقع مختارة، للأغراض الزراعية وحركة الطائرات قرب المطارات.

وتظهر هذه الخارطة ما يسمى ودة الرياح wind rose لكل من المناطق المختارة والتي تبين نسبة هبوب الرياح حسب اتجاهها على مدار العام، وسيتم دراسة ودة الرياح في الفصل الثامن.



الشكل 6-12: وردات الرياح السنوية في بعض المواقع المختارة في سورية [5].

6-12 المواقع المختارة لتركيب محطات مراقبة سرعة واتجاه الرياح:

Friction Coefficient of Various Terrain

Terrain Type	Friction Coefficient α
Lake, ocean and smooth hard ground	0.10
Foot high grass on level ground	0.15
Tall crops, hedges, and shrubs	0.20
Wooded country with many trees	0.25
Small town with some trees and shrubs	0.30
City area with tall buildings	0.40

وتجدر الإشارة أن سرعة الرياح تزداد حتى ارتفاع 500 متر، كما ذكرنا، ثم تعود للانخفاض مع زيادة الارتفاع عن السطح. ويمكن أن تصل السرعة على ارتفاع 500 متر إلى قيمة أعلى بأربعة إلى خمسة أضعاف قيمتها على سطح الموقع.

إذن من حيث المبدأ واستناداً إلى المنحنيات المبينة في الشكل 6-11 فإن التطور التقني لتصميم أبراج العنفات الريحية على ارتفاعات عالية في المستقبل لن يتجاوز 500 متراً عن سطح الموقع.

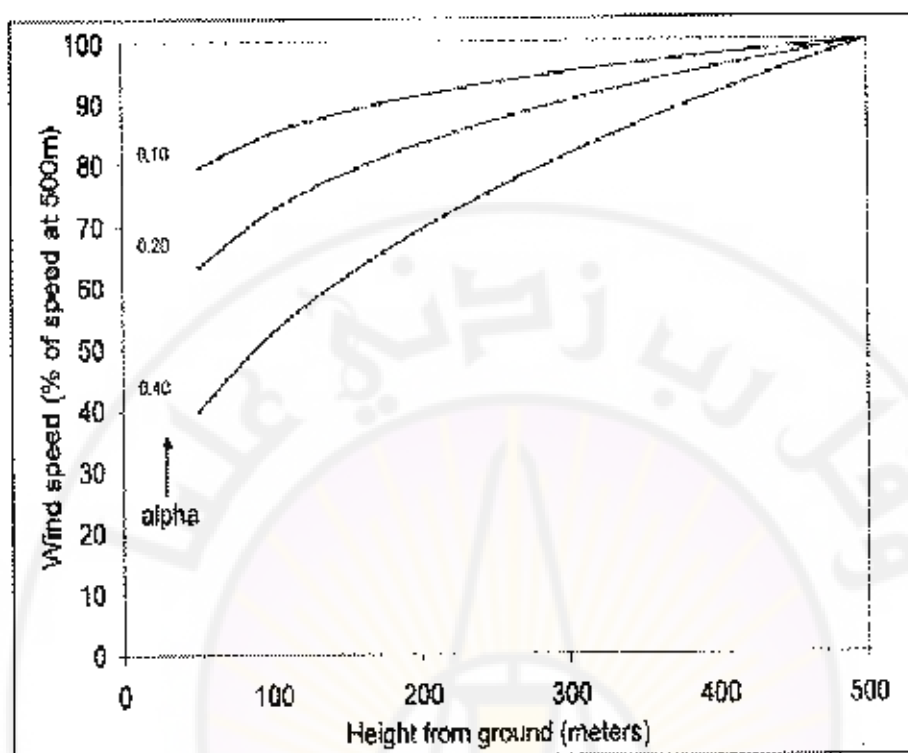
بالإضافة إلى معامل الاحتكاك فإن العوائق الطبيعية والاصطناعية في الموقع يمكن أن تؤثر على نسبة زيادة السرعة مع الارتفاع، حيث يحصل ما يسمى ظاهرة التدرج

وسيتم دراسة هذه الظاهرة في الفصل الثامن. Wind Shear، الريحي

6-11 معطيات وبيانات قياس سرعة واتجاه الرياح في سورية

تقع سورية بين خطي العرض 32.3° و 37° شمال خط الاستواء وبين خطي الطول 36° و 42.5° شرق خط جرينيتش. مساحة سورية 185517/كم².

استناداً إلى خارطة الرياح في سورية حسبت سرعات الريح في مواقع متنوعة جغرافياً قرب الساحل والغابات ومحيط المدن وعلى التلال والمرتفعات ووردت الرياح كما هو مبين في الشكل 6-12. ولكن هذه الحسابات تقريبية ويمكن اعتبارها كمؤشر لحركة الرياح في تلك المواقع أو المناطق.



الشكل 6-11 نسبة تغير السرعة مع الارتفاع في الموقع حسب معامل الاحتكاك

Wind speeds variation with height over different terrain.

Smooth terrain has lower friction, developing a thin layer above [14].

يبين الجدول 6-3 نسبة تغير السرعة فوق سطح الموقع على ارتفاعات مختلفة من أجل درجات مختلفة للخشونة (معامل الاحتكاك).

الجدول 6-3: قيم معامل الاحتكاك من أجل مختلف أنواع سطح الموقع [13].

$$V_{mc} = \sqrt[3]{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^3}$$

(14-6)

والطريقة الأفضل لحساب استطاعة الرياح من خلال تجميع معطيات المعدل السنوي لكثافة الاستطاعة حسب العلاقة التالية:

$$P_{mc} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot V_i^3$$

(15-6)

حيث:

n - عدد القياسات خلال فترات زمنية محددة ووسطياً.

ρ_i - كثافة الهواء kg/m^3 .

V_i - سرعة الرياح m/s لكل من الفترات الزمنية المقاسة.

10-6 نسبة تغير السرعة مع الارتفاع:

بالعودة إلى العلاقة (6-1) والتي يمكن وضعها بشكل أشمل استناداً للعلاقة التالية:

$$\left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha \quad V_2 = V_1 \quad (16-6)$$

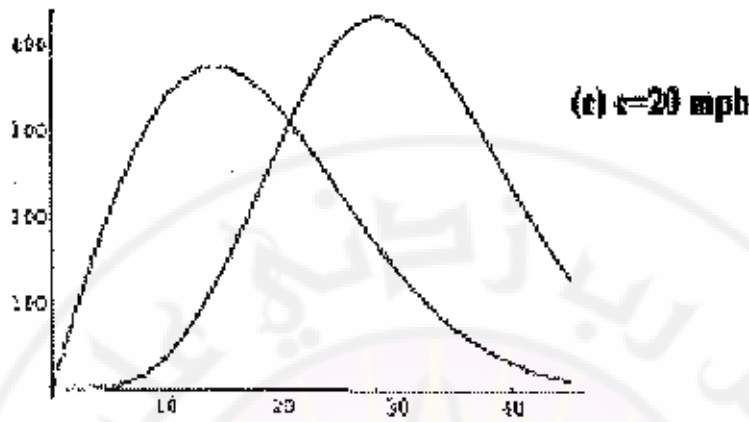
حيث:

V_1 - سرعة الرياح المقاسة على ارتفاع h_1 .

V_2 - سرعة الرياح المقطرة على ارتفاع h_2 .

α - معامل الاحتكاك أو خشونة سطح الأرض.

يكون معامل الاحتكاك أقل ما يمكن عند السطح الناعم ويزداد مع ازدياد خشونة التربة، حيث تبلغ السرعة أقصى قيمة لها في الموقع (100%) على ارتفاع حوالي 500 متر عن سطح الموقع مهما كانت درجة خشونته. ويبين الشكل 6-11 نسبة تغير السرعة مع الارتفاع في الموقع حسب معامل الاحتكاك .



الشكل 10-6: منحنيات توزيع رايلي للسرعة والقدرة المنتجة من أجل قيمة $k=2$

وقيم C تساوي 20,15,10 ميل /ساعة

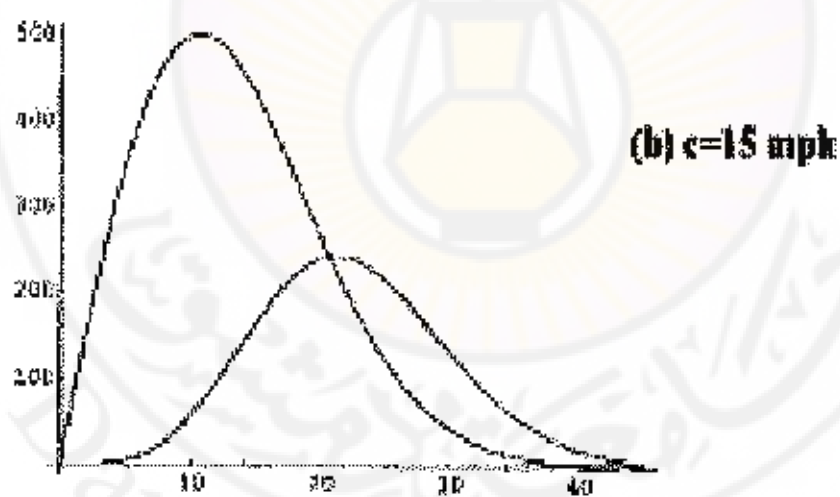
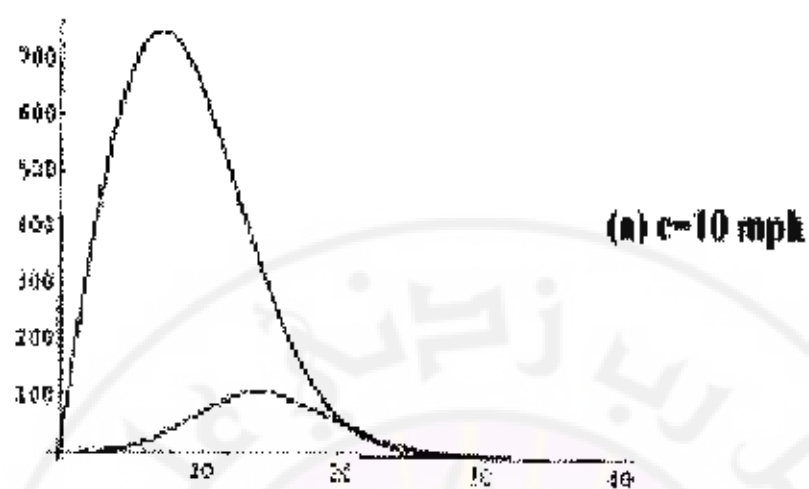
Rayleigh distributions of hours and energy per year with $k = 2$ and $c = 10, 15, \text{ and } 20 \text{ mph}$ [14].

9-6 مقاييس المعطيات الرقمية Digital Data Loggers:

كما هو معروف يتم عادة الحصول على السرعة الاسمية لهبوب الرياح لفترة من الزمن من خلال تجميع قيم السرعات وتقسمها على ساعات هذه الفترة الزمنية. ويتم الحصول على القراءات اللازمة من خلال تجهيزات القياس لعدة عشرات من السنين والتي يمكن الحصول عليها أيضاً من المعطيات المناخية. وتؤخذ عادة هذه المعطيات من خلال القياسات الساعية والشهرية والسنوية ويمكن استخدام العلاقة التالية لحساب معدل (وسطي) السرعة والتي يرمز لها V_{avg} .

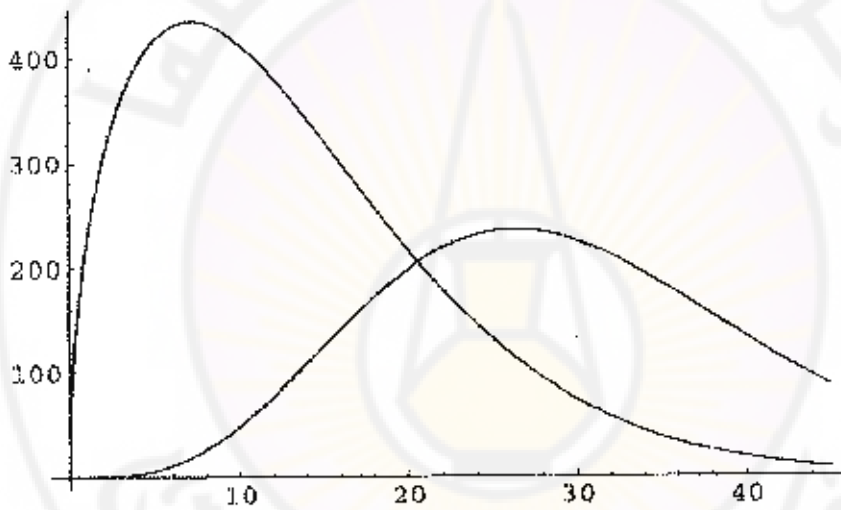
$$V_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (13-6)$$

أما سرعة الجذر التكعيبي المكافئة للقياسات الرقمية فتساوي:



Rayleigh distributions of hours and energy per year versus wind speed with $c=10$ and $k=2$ [14].

يبين الشكل 6-9 منحنيات توزيع راييلي للسرعة والقدرة المنتجة من أجل قيمة معامل الشكل $K=1.5$ ومعامل قياس السرعة $C=15$ ميل/ساعة، و سرعة المود تكون مساوية لـ 10.6 ميل /ساعة والسرعة الاسمية تساوي 13.3 ميل /ساعة والجذر التكعيبي للسرعة r_{mc} يساوي 16.5 ميل /ساعة.



الشكل 6-9: منحنيات توزيع راييلي للسرعة والقدرة المنتجة من أجل قيمة معامل الشكل $K=1.5$ ومعامل قياس السرعة $C=15$ ميل/ساعة

Rayleigh distributions of hours and energy per year versus wind speed with $c = 15$ and $k = 1.5$ [14].

يبين الشكل 6-10 مقارنة بين منحنيات توزيع السرعة والقدرة المنتجة من أجل قيمة $k=2$ (أي منحنى راييلي) وقيم C تساوي 10, 15, 20 ميل /ساعة (كما ذكرنا فكل ميل /ساعة يعادل 0.44 متر/ثانية).

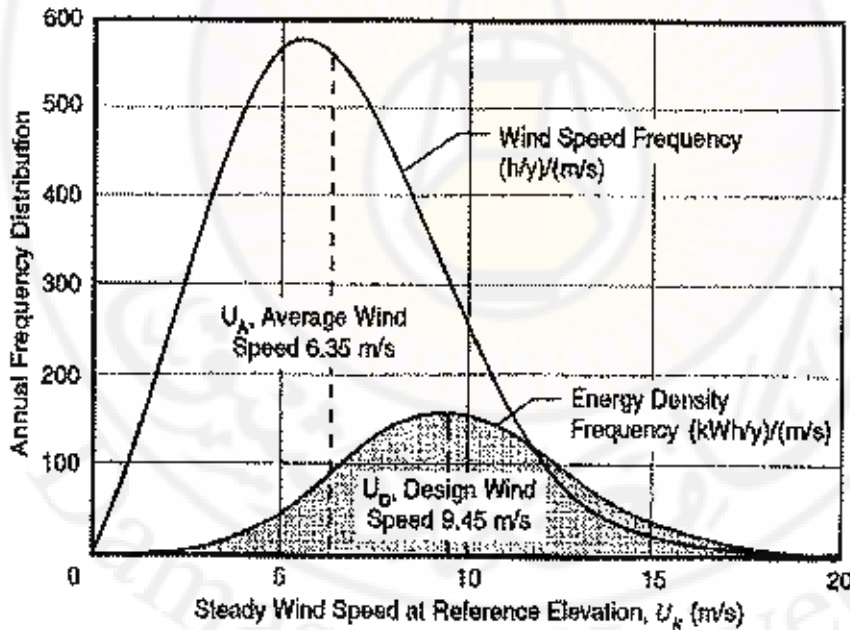
يمكن الحصول على قيمة القدرة الناتجة عن الرياح من المساهمة السنوية لهبوب الرياح وتغيراتها أي V و $V+\Delta V$

$$\epsilon = \frac{\text{kWh contribution in the year by the wind between } v \text{ and } (v + \Delta v)}{\Delta v}$$

(12-6)

في الشكل 6-8 يبدو توزيع القدرة المنتجة مشابها لتوزيع رايلي للسرعة، فعلى مسيل المثال عندما يملك منحنى السرعة قيمة سرعة المود 5.5 متر/ثانية والسرعة الاسمية تساوي 6.35 متر/ثانية فإن أعظم قيمة للقدرة تنتج عندما تكون سرعة الرياح مساوية إلى 9.45 متر/ثانية.

ويتم تصميم العنفات الريحية بحيث تستطيع إنتاج القدرة الكهربائية في أكبر مجال لتغيرات السرعة بما في ذلك فترات هبوب الرياح العالية.



الشكل 6-8: منحنيات رايلي لتوزيع القدرة المنتجة والساعات خلال العام مقابل السرعة من أجل قيم محددة لمحددي الشكل وقياس السرعة

يمكن إيجاد ما يسمى سرعة المود من قمة منحنى تابع التوزيع وهي عبارة عن قيمة السرعة التي تهب معظم الوقت في الموقع بخلاف قيمة السرعة الاسمية والتي نحصل عليها من تكامل المجال الكلي للمحني $h-v$ ، عندما تتغير السرعة من 0 إلى 50، وبعد تقسيم قيم هذا المجال على عدد الساعات في العام أي 8760 ساعة، وعندها يحسب المعدل السنوي للسرعة حسب العلاقة (6-6).

يبين الجدول 2-6 أثر قيم معامل الشكل k ومعامل قياس السرعة C من أجل ثلاث قيم للسرعة 20, 15, 10 ميل /ساعة على سرعة المود والسرعة الاسمية والجذر التكعيبي للسرعة وبالتالي على ما يسمى كثافة الطاقة Energy Density والتي تقاس بالوات ساعة أو الكيلووات ساعة / m^2 ، كذلك كثافة الاستطاعة بالوات أو الكيلو وات / m^2 .

الجدول 2-6: أثر قيم معامل الشكل ومعامل السرعة على كثافة الطاقة [14].

c	k	Mode Speed	Mean Speed	RMC Speed	Pmode W/m^2	Pmean W/m^2	Prmc W/m^2	Ermc KWh/yr
10	1.5	4.81	9.03	12.60	68	451	1225	5366
	2.0	7.07	8.86	11.00	216	426	814	3565
	2.5	8.15	8.87	10.33	331	428	675	2957
	3.0	8.74	8.93	10.00	409	436	613	2685
15	1.5	7.21	13.54	18.90	230	1521	4134	18107
	2.0	10.61	13.29	16.49	731	1439	2748	12036
	2.5	12.23	13.31	15.49	1120	1444	2278	9978
	3.0	13.10	13.39	15.00	1377	1472	2067	9053
20	1.5	9.61	18.05	25.19	544	3604	9790	42880
	2.0	14.14	17.72	22.00	1731	3410	6514	28531
	2.5	16.30	17.75	20.66	2652	3423	5399	23648
	3.0	17.47	17.86	20.00	3266	3489	4900	21462

8-6 توزيع القدرة الناتجة عن الرياح : Energy Distribution

إذن فإن الجذر التكعيبي للسرعة الاسمية r_{mc} مفيد في التقدير السريع للاستطاعة المتاحة من الرياح في الموقع. وباستخدام V_{rmc} نحصل على معدل الاستطاعة، مقاسا بالوات على المتر المربع، حسب العلاقة التالية:

$$P_{rmc} = \frac{1}{4} \rho \cdot V_{rmc}^3 \text{ watts/m}^2 \quad (11-6)$$

وبضرب قيمة P_{rmc} بعدد الساعات الكلي في السنة تعطينا هذه العلاقة القدرة المتاحة التي يمكن إنتاجها في الموقع.

6-6 كثافة الاستطاعة وكثافة الطاقة Power and Energy Density

يبين الجدول 1-6 نتائج مقارنة لثلاثة مواقع يمتلك كل منها مزرعة ريحية بنفس المواصفات ونفس السرعة الاسمية ولكنها تختلف عن بعضها في ما يسمى كثافة

الاستطاعة الخاصة Specific Power Density

الجدول 1-6: نتائج مقارنة مزارع ريحية [14].

Site	Annual mean wind speed Meters/second	Annual average specific power Watts/m ²
Culebra, Puerto Rico	6.3	220
Tiana beach, New York	6.3	285
San Geronio, California	6.3	365

إن أهمية الجذر التكعيبي للسرعة الاسمية r_{mc} في كل من هذه المواقع الثلاث تتعلق بقيمة معامل الشكل k حيث تكون كثافة الاستطاعة الخاصة في موقع سان جورجينو في كاليفورنيا على سبيل المثال أعلى بمعدل 66% منها في موقع كوليبيرا في بورتو ريكو. بالرغم من حصول نفس قيم السرعة الاسمية المبنوية في هذه المواقع.

7-6 عملية المقارنة بين سرعة قمة المنحني ويسمى المود $mode$ والسرعة الاسمية والجذر التكعيبي للسرعة:

من أجل قيم C ، k للمجال المتواجد في معظم المواقع يمكن تقريب التكامل أعلاه إلى ما يسمى تابع جاما (Gamma Function).

$$V_{mean} = c \sqrt{1 + \frac{1}{k}} \quad (7-6)$$

من أجل توزيع رايلي مع قيمة المحدد $k=2$ يصبح تابع جاما مقارباً للعلاقة التالية:

$$V_{mean} = 0.90 \cdot c \quad (8-6)$$

وهي علاقة بسيطة بين محدد القياس C والسرعة الاسمية والتي يمكن استخدامها بحدود مبررة .

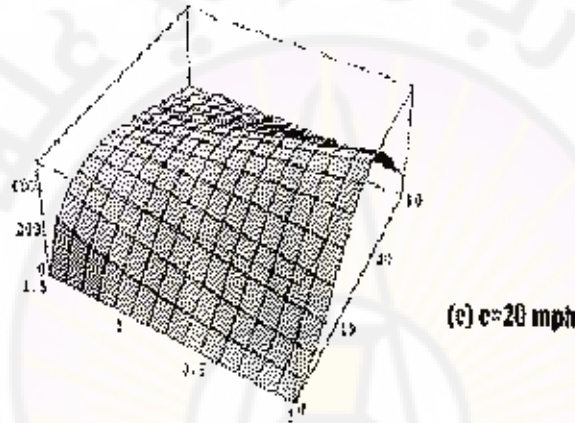
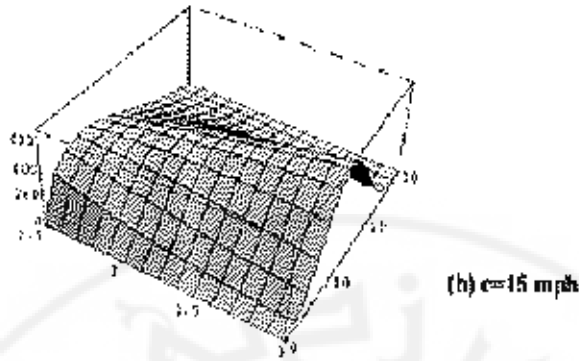
على سبيل المثال غالبية المواقع تقدم فيها السرعة على أساس السرعة الاسمية للرياح. وبالتالي يكون المحدد C في توزيع رايلي مساوياً إلى $C = V_{mean}/0.9$ ، أما محدد الشكل فهو بالطبع يساوي $k=2$ في توزيع رايلي. وعندها يعبر توزيع رايلي عن السرعة الاسمية وفقاً للعلاقة التالية:

$$h(v) = \frac{2v}{c^2} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} = \frac{2v}{(V_{mean})^2} e^{-\left(\frac{v}{V_{mean}}\right)^2} \quad (9-6)$$

5-6 الجذر التكعيبي للسرعة الاسمية (r m c) Root Mean Speed cubic

كما أسلفنا فإن الاستطاعة تتناسب مع مكعب السرعة والقدرة الناتجة خلال عام هي تكامل $(h \cdot v^3 \cdot dv)$. وبالتالي فإن الجذر التكعيبي للسرعة الاسمية (r m c) يكون مشابهاً لقيم ما يسمى الجذر التربيعي للسرعة الاسمية (r m s) root mean speed square ويحسب في الدارات الكهربائية للتيار المتناوب حسب العلاقة التالية:

$$V_{rmc} = \sqrt[3]{\frac{1}{8760} \int_0^{\infty} h \cdot v^3 \cdot dv} \quad (10-6)$$



الشكل 6-7: ثلاثي الأبعاد للمحنيات V , h , k من أجل تغير السرعة في المجال من 10-20 ميل/ساعة. و k من 1.5 إلى 3.0.

Three-dimensional h - v - k plots with c ranging from 10 to 20 mph and k ranging from 1.5 to 3.0 [14].

4-6 السرعة الاسمية للرياح (Mean Wind Speed):

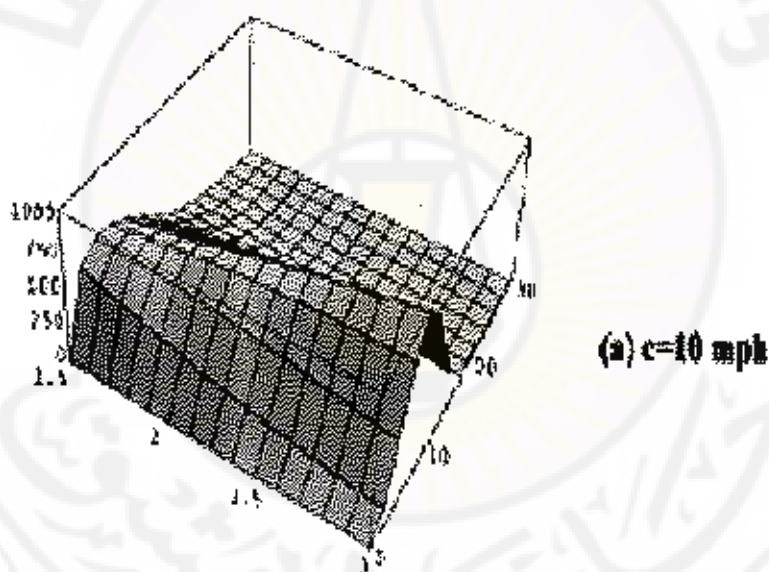
تحدد السرعة الاسمية للرياح من خلال منحنى V , h وتكامل تغيرات السرعة من الصفر إلى لا نهاية وبعد تقسيمها على مجموع الساعات خلال عام كامل أي 8760 ساعة. إذن فإن السرعة الاسمية في العام عبارة عن معدل السرعة حسب ما يلي:

$$V_{mean} = \frac{1}{8760} \int_0^{\infty} h \cdot v \cdot dv \quad (6-6)$$

Weibull distributions of hours/year with three different shape parameters $k = 1.5, 2$, and 3 [14].

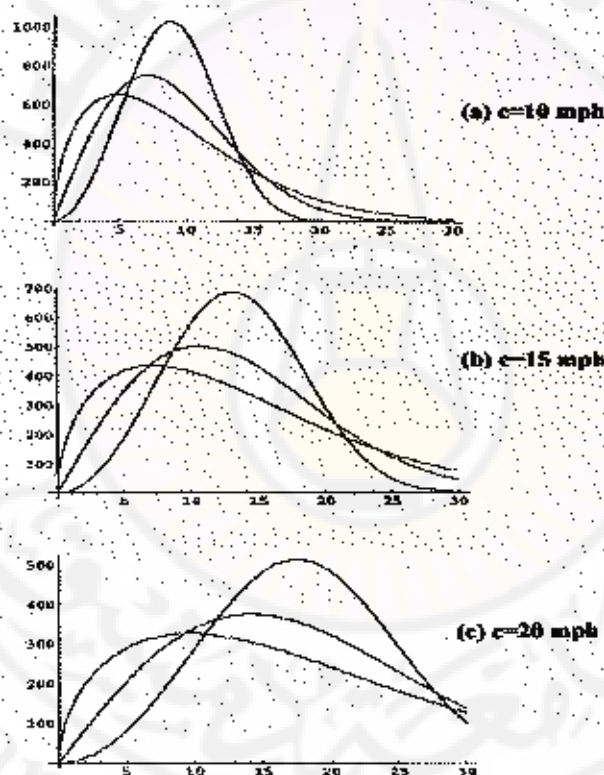
إن عدد الساعات في السنة لكل من السرعات V و $V+\Delta V$ يبينها الشكل 2-7 بشكل ثلاثي الأبعاد للمحنيات k, V, h من أجل تغير السرعة في المجال من 10-20 ميل/ساعة. و k من 1.5 إلى 3.0

تبين المنحنيات في الشكل 6-7 أثر المحدد k في إزاحة المنحنيات من شكل الجرس على الجهة الأمامية من أجل $k=3$ إلى ما يسمى منحني رايلي. وتظهر الأجزاء المسطحة عندما تنقص قيمة محدّد الشكل k من 3 إلى 1.5. ونلاحظ أيضاً زيادة قيم المحدد C حيث يبين منحني التوزيع زيادة قيم السرعة.

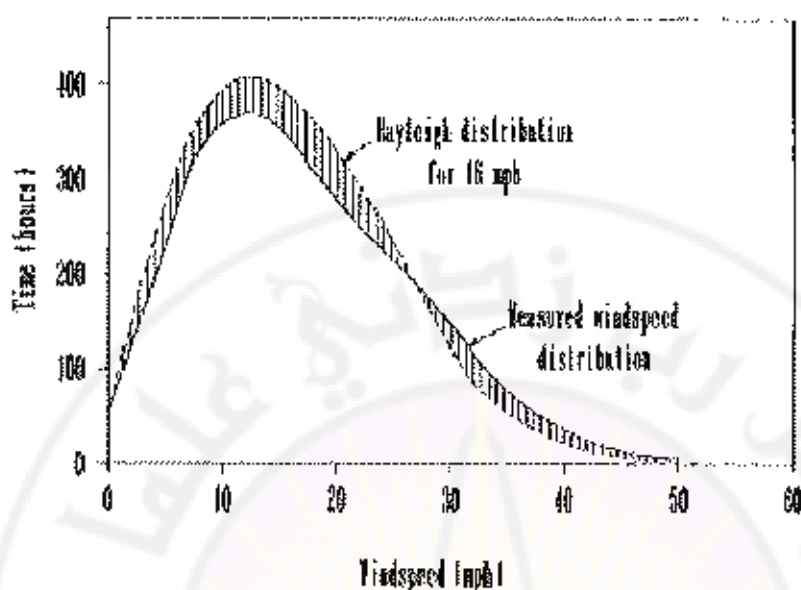


بما أن معظم المواقع تمتلك محدد قياس السرعة C في مجال من 10 إلى 20 ميل / ساعة (حوالي 5 إلى 10 متر / ثانية) ومحدد الشكل K الذي يتراوح بين 1.5 إلى 2.5 فإن دراستنا ستتخصص على هذين المجالين للمحدد C و k .

يبين الشكل 6-6 منحنيات توزيع ويبول لعدد الساعات في السنة التي تعبر فيها الرياح على العنفات ذات المحور العمودي والعنفات ذات المحور الأفقي في الموقع من أجل عدة قيم للمحدد، $C=10$ ، $C=15$ ، $C=20$ ميل / ساعة ومحدد معامل الشكل ذو القيم، $k=1.5$ ، $k=2$ ، $k=3$.



الشكل 6-6: منحنيات توزيع ويبول لعدد الساعات في السنة التي تعبر فيها الرياح على العنفات ذات المحور العمودي والعنفات ذات المحور الأفقي في الموقع من أجل عدة قيم للمحدد K ، C



الشكل 5-6: مثال على منحنى توزيع رايلي لعدد الساعات في السنة بالمقارنة مع

منحنى توزيع تم قياسه في منطقة محددة في انكلترا

Rayleigh distribution of hours/year compared with measured wind-speed distribution at St. Ann's Head, England [14].

استناداً إلى ما ذكر أعلاه يمكننا تلخيص توزيع ويبول استناداً إلى معامل الشكل K على النحو التالي.

K=1 يعبر عن توزيع متمد (exponential distribution):

$$h = \lambda \cdot e^{-\lambda V}$$

حيث:

$$\lambda = 1/c$$

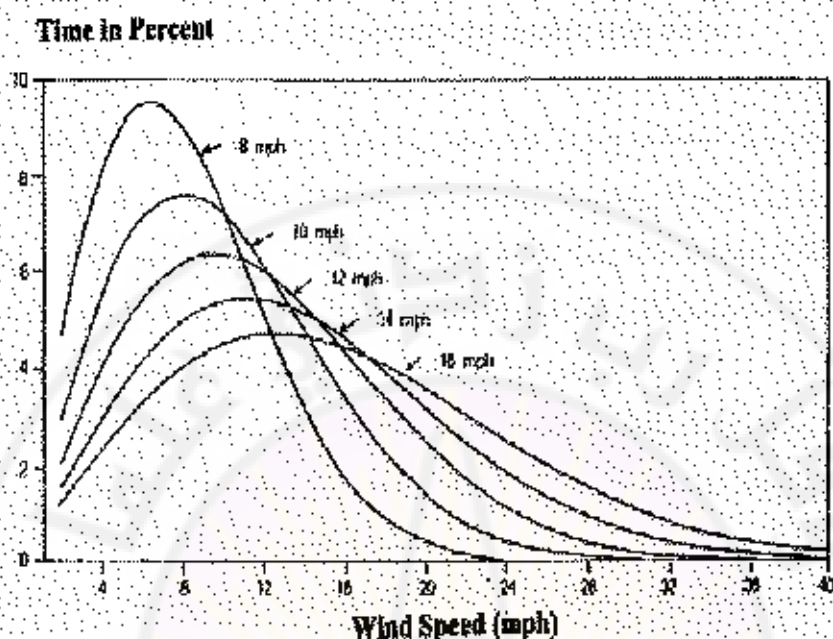
حيث:

K=2 يعبر عن توزيع رايلي

$$h = 2\lambda^2 \cdot V \cdot e^{-(\lambda V)^2}$$

حيث:

K=3 يعبر عن منحنى التوزيع المقارب لشكل الجرس.



الشكل 4-6: منحنيات احتمالية توزيع رايلي من أجل $k=2$ لعدة قيم لمحدد القياس C Weibull probability distribution with shape parameter $k = 2$ and the scale parameters ranging from 8 to 16 miles per hour (mph) [14].

يمكن مقارنة معطيات القياس بسهولة استناداً إلى توزيع رايلي كما يبين الشكل 5-6.

إن توزيع رايلي يعتمد على محدد واحد فقط وهو محدد القياس C Scale C (parameter).

Weibull probability distribution function with scale parameter $c=10$ and shape parameters $k=1, 2$ and 3 [14]

أما المنحني الأيمن من أجل $k=3$ والذي يبدو على شكل الجرس وتكون فيه الرياح عالية السرعة ذات عدد متساوي مع الأيام التي تهب فيها الرياح منخفضة السرعة. أما المنحني الأوسط ذو معامل الشكل $k=2$ يعبر عن المنحني النموذجي للرياح التي تهب في غالبية المواقع، حيث يكون عدد الأيام التي تهب خلالها السرعات المنخفضة أكثر من الأيام ذات سرعة الرياح الاسمية (Mean Speed) بينما تكون الأيام ذات الرياح العالية أقل. ويعبر الشكل 2-3 عما يسمى احتمالية توزيع ويبول.

في حالة قياسات الرياح يستخدم عادةً المنحني ذو معامل الشكل $k=2$ وهو ما سنستخدمه. يبين الشكل 4-6 منحني التوزيع من أجل $k=2$ لعدة قيم لمحدد القياس C والذي يتراوح بين 8-16 ميل/ساعة (حيث يساوي واحد ميل/ساعة 0.446 متر/ثانية). ومن أجل قيم أعلى من القيم المذكورة ينزاح المنحني إلى اليمين حيث تكون الرياح أعلى. في غالبية المواقع يكون منحني توزيع ويبول مستنداً إلى معامل الشكل $k=2$ ويعرف باسم منحني توزيع رايلي (Rayleigh distribution).

$$h = \frac{\text{fraction of time wind speed is between } v \text{ and } (v + \Delta v)}{\Delta v} \quad (3-6)$$

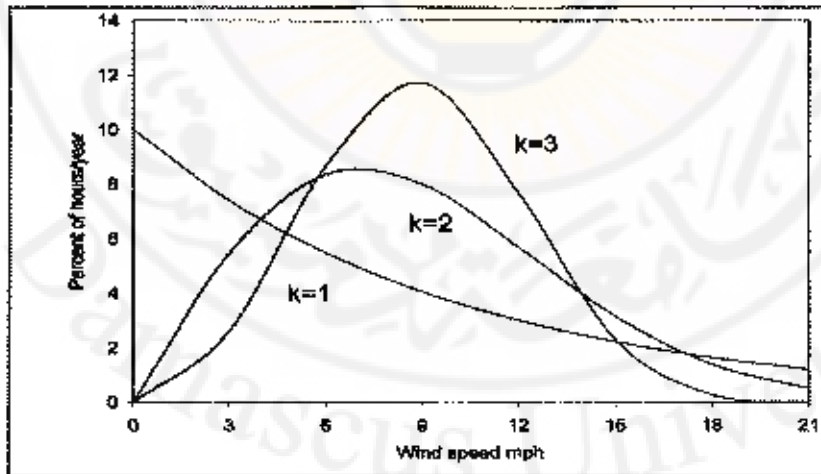
حيث كما ذكرنا أعلاه تتغير v في المجال من صفر إلى لا نهاية.

$$\int_0^{\infty} h \cdot dv = 1 \quad (4-6)$$

إذا اخترنا الفترة الزمنية عام واحد وقسمناه إلى ساعات فنحصل على:

$$h = \frac{\text{number of hours the wind is between } v \text{ and } (v + \Delta v)}{\Delta v} \quad (5-6)$$

الوحدة h تعبر عن عدد الساعات في السنة من أجل مقياس سرعة متر/ ثانية ويتكامل العلاقة 4-6 تصبح h مساوية 8760 ساعة (وهي عدد ساعات العام). ويبين الشكل 3-6 رسماً بيانياً للزمن مقابل السرعة من أجل ثلاثة قيم مختلفة لمحدد الشكل k ، حيث يكون المنحني مزاحاً إلى اليسار من أجل $k=1$ والذي تكون فيه غالبية الأيام ذات رياح ساكنة $V=0$.



الشكل 3-6: منحنيات الزمن مقابل السرعة من أجل ثلاثة قيم مختلفة لمحدد الشكل k

2-6 سرعة الرياح نسبة للارتفاع **wind speed based on height** : إذا عرفنا معامل الاحتكاك (α) على سطح موقع تتوفر فيه الرياح نستطيع بسرعة حساب سرعة الرياح على الارتفاع المطلوب h_B (عادة يكون الأعلى) من خلال المعلومات المتوفرة عن قياسه على ارتفاع آخر h_A (عادة يكون الأخفض) والمعادلة التالية تحدد ذلك:

$$V_B = V_A \times \left(\frac{h_B}{h_A} \right)^\alpha \quad (1-6)$$

حيث: V_A - سرعة الرياح على الارتفاع الأخفض h_A .

V_B - سرعة الرياح على الارتفاع الأعلى h_B .

إن معامل احتكاك السطح α يملك قيمة ما بين 0.10 (في السطح والتربة المنبسطة) و 0.40 (في التربة الخشنة). وسنشرح ذلك بالتفصيل في الفقرة التالية.

3-6 طريقة توزيع ويبول لاحتمالية تغيرات الرياح في الموقع

: Weibull probability Distribution

تتعلق هذه الطريقة بالتابع الذي يرمز له h والذي يعتمد على محددين أو معاملين (two parameters) محدد الشكل ويرمز له k ومحدد قياس السرعة ويرمز له c . تعطى احتمالية تغيرات سرعة الرياح V خلال أي فترة من الزمن حسب العلاقة التالية:

$$h(v) = \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{v}{c} \right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} \quad (2-6)$$

وذلك من أجل رمز لانهاية $0 < V < \infty$

ويتم الحصول على جدول التوزيع الاحتمالي من خلال المخطط البياني للزمن والسرعة من أجل فترة زمنية محدودة وفق العلاقة التالية:

10-2 أثر محطات الرياح المركبة في الماء بعيداً عن الشاطئ Off Shore Wind Turbines

تم شرح كيفية إنشاء عتفات ريفية في الماء بعيداً عن الشاطئ في الفصل السابق والتي يمكن أن تؤثر على الحياة البحرية على النحو التالي:

_ التثديت البحرية : قد تسبب اضطرابات بسبب انبعاث الصوت ويمكن أن تحدث أيضاً حقولاً مغناطيسية وكهربائية على سطح الماء مما يؤدي بدوره إلى اضطرابات في سلوك التثديت.

_ الأسماك: قد يحصل تأثير للعتفات على نظام تغذية الأسماك , حيث أنها ستتأثر على طبيعة القاع البحري من خلال الأساسات الموجودة في القاع.

_ بعض أشكال الحياة في القاع البحري: يمكن أن تتأثر بشكل ملحوظ من أعمال البناء.

10-3 السلامة المهنية:

يعتبر سجل السلامة المهنية لتقنية طاقة الرياح جيداً عموماً. وقد حصلت على أية حال بعض الحوادث المميتة والخطرة.

ترى إحدى منشورات الجمعية الأوروبية لطاقة الرياح بعنوان "طاقة الرياح في أوروبا" أن حوادث كهذه تميل لتنتج عن الإدارة الضعيفة أو عدم تنفيذ تشريعات السلامة، أكثر منها أخطاء تقنية ... مع أنه في معظم الحالات، تنتج الحوادث بسبب التخطيط ضعيف النوعية خلال التصميم والتركيب، كذلك خلال التشغيل والصيانة أحياناً.

تم تجهيز العتفات الريفية الحديثة بأنظمة مراقبة قصد منها إعطاء إنذار مبكر للفشل المحتمل لغالبية مكونات العتفة الريفية. ومع أنها تستخدم لأغراض تشغيلية لتقليل تكاليف الصيانة فإنه يمكن لمثل أنظمة المراقبة هذه أن تستخدم لمراقبة تجهيزاتها للحد من مخاطر السلامة المحتملة.

في عام 1987، عندما تم البدء بمشروع الاتحاد الأوروبي لوضع مسودة لمعايير السلامة المهنية لطاقة الرياح. وفي هذه الأثناء تم تطوير عدد من معايير التصميم والتركيب للعتفات الريفية من قبل دول فردية ضمن الاتحاد وقامت لجنة الكهرباء الدولية (IEC) بتطوير معيار دولي أو مواصفة خاصة عن السلامة المهنية لعمل العتفات الريفية.

وفي الحالات التي يكون فيها النشاط الإعلامي غير كافٍ، يمكن توقع معارضة لهذه المشاريع الجديدة. حيث تعتبر التقنية الشديدة الخמוש في البداية مدعاة للقلق والشك. وتؤكد منشورات الجمعية الأوربية لطاقة الرياح المشار إليها سابقاً أن توفر المعلومات الدقيقة ونشر الوعي والطريقة التي يتم بواسطتها الإعلان عن المشروع في موقع ما ودعوة الناس للمشاركة في عملية اتخاذ القرار حول المشروع تعزز قبول مثل هذه التقنية الجديدة.

كما تظهر دراسة نفذتها جامعة أمستردام أن القبول العام قبل الإدراك الفعلي للمشاريع هو أكبر بكثير في الحالات التي تكون فيها العامة على معرفة بالمخططات بشكل مسبق كما يتضح أن القبول العام يزداد بشكل كبير بعد تركيب العنفات الريحية في الموقع.

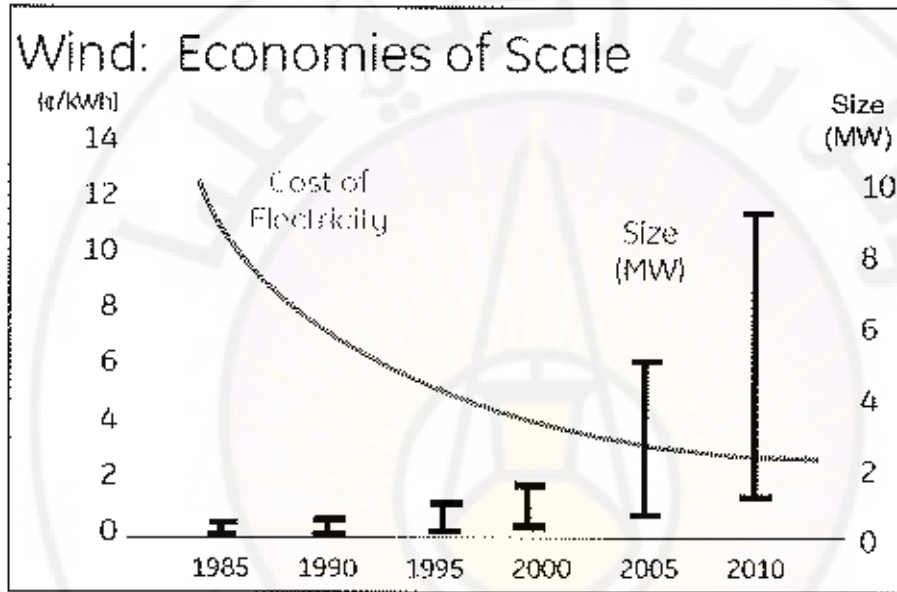
10-4 المسألة الاقتصادية

10-4-1 لماذا سعر الكهرباء المولدة من الرياح في حالة انخفاض ؟

على الرغم أن الأسعار تتباين من بلد لآخر إلا أن تقانة طاقة الرياح في كل مكان تميل لأن تصبح رخيصة، حيث أن الأسعار تنخفض لعدة أسباب. فالعنفات الريحية أصبحت أقل كلفة وذلك لتحسن وتطور صناعة مكوناتها. وبالتالي أضحت التكاليف أكثر اقتصادية. وإن معدل الأرباح من إنتاج تصاميم حديثة يكون أفضل وذلك مع زيادة توليد القدرة الكهربائية. وفي السنوات الأخيرة تم التوجه نحو إنتاج العنفات الكبيرة مما أدى إلى تخفيض تكلفة البنى التحتية لها مقارنة مع إنشاء عدد من العنفات الصغيرة أو المتوسطة لتوليد نفس الكمية من القدرة الكهربائية.

ومن المتوقع أن يصبح استغلال طاقة الرياح أكثر منافسة من حيث الكلفة بالمقارنة مع كلفة استغلال الطاقات الأخرى سواء التقليدية أو المتجددة، وذلك باستثناء الطاقة المائية. والشكل 10-3 يعرض كيف أن كلفة القدرة الكهربائية المولدة من طاقة الرياح في انخفاض مع مرور السنوات المتعاقبة، وذلك بسبب زيادة حجم العنفات الريحية وتحسين تقانها.

وتجدر الإشارة إلى أن الكلفة والأسعار المبينة في الشكل 10-3 وما يليه من أشكال وجداول يمكن أن تتغير حسب قوانين العرض والطلب واقتصاد السوق وبالتالي لا يمكن اعتبارها أسعاراً ثابتة. ولكن هذه الكلفة والأسعار المذكورة يمكنها أن تقدم مؤشراً على تطورها ومقارنتها مع الأسعار الحقيقية لإنتاج القدرة الكهربائية من المصادر التقليدية على سبيل المثال .



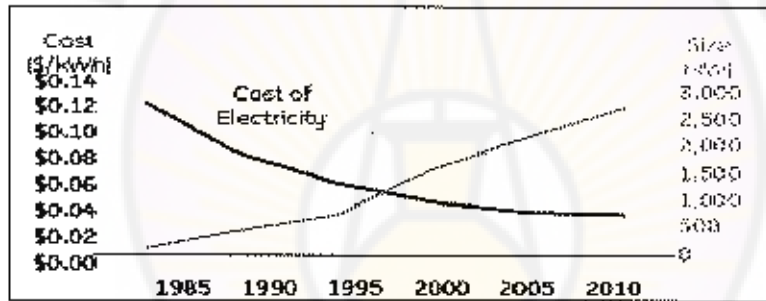
الشكل 10-3: منحنى كلفة القدرة الكهربائية المنتجة من الرياح وانخفاضها مع السنوات المتعاقبة [3].

10-4-2 تفحص القصور في عمل مكونات العنفة الريحية وحلها:

في العنفات الريحية الحديثة تقوم أجهزة القياس والحساسات بجمع المعلومات عن حالة عمل مكونات العنفات الريحية. ثم يقوم نظام التحكم الإلكتروني بمقارنة القراءات بشكل مستمر مع القيم المرجعية ويعمل على تلافي القصور فيها لكي يضمن بأنها تعمل بشكل جيد مما انعكس اقتصادياً على الكلفة التشغيلية.

10-4-3 المستقبل المشرق لطاقة الرياح:

إن اقتصاديات طاقة الرياح جيدة من الأساس، وأن التوقع المستقبلي للأسعار (ثمن الكهرباء المولدة من الرياح) هو الاستمرار في الانخفاض، والتأثير الإيجابي الأقوى هو التوقعات بأن أسعار العنقات سوف تنخفض أيضاً مع تحسن وتطوير تقنياتها وزيادة كميات إنتاجها الصناعي. أضيف إلى ذلك استمرار البحث والتطوير في هذا المجال، إن سوق طاقة الرياح العالمية يتوسع بشكل سريع ويفتح المجال لتأمين فرص عمل كبيرة. إضافة إلى إمكانية ظهور صناعات جديدة في هذا المجال وحركة تصدير واستيراد البضائع وتوطين التكنولوجيا (النفاثة) وخدمات وبرمجيات طاقة الرياح. يبين الشكل 10-4 منحنيات أكثر دقة لانخفاض كلفة الكهرباء المنتجة من الرياح مع زيادة استطاعة العنقات الريحية بين عامي 1985 و 2010 .



الشكل 10-4 منحنيات أكثر دقة لانخفاض كلفة الكهرباء المنتجة من الرياح مع زيادة استطاعة العنقات الريحية بين عامي 1985 و 2010 [5].

10-4-4 ضعف الشبكات الكهربائية:

إحدى المشاكل الاقتصادية التي ظهرت نتجت في نقل القدرة الكهربائية من أماكن توليدها البعيدة أحياناً إلى المستثمر ووصلها بنقاط وصل وفصل موثوقة وقوية مع خطوط الشبكة الكهربائية الموجودة .

ومن المشاكل الرئيسية التي ظهرت:

أ_ الحالة المستقرة أو استقرار الشبكة Grid Stability: إن جريان القدرة في الشبكة الكهربائية قد يؤثر على استقرارها ويظهر هذا التأثير بوضوح في الشبكات الضعيفة،

حيث تعتبر الشبكة السورية بالمعايير العالمية شبكة ضعيفة ، ويقصد بذلك معايير تغير التوتر والتردد عن القيم النظامية.

2_ التوتر: قد يتأثر المستهلك بارتفاع التوتر المفاجئ أو الانخفاض المفاجئ عند وصل مجموعة العنفات إلى الشبكة أو التبديل بينها أو فصلها.

3_ ظاهرة الارتعاش Flicker: تنتج هذه الظاهرة عن التقلب بقيم التوتر وتسبب للمستهلك بعض الإزعاج. ويظهر التقلب خاصة في المصادر الضوئية المتوهجة. وتنتج هذه الظاهرة في العنفات ذات السرعات المتغيرة بشكل أكبر منها في العنفات ذات السرعة الثابتة وتؤثر بشكل خاص في الشبكات الضعيفة. ولا بد من لحظ تجهيزات خاصة للحد من هذه الظاهرة.

4_ التوافقيات Harmonics: في بعض الشبكات قد تظهر بعض التوافقيات وبشكل رئيسي الخامسة والسابعة وخصوصاً عند ذروة الحمل مساءً ويلاحظ ذلك أحياناً عند تشغيل جهاز التلفاز على سبيل المثال .

5_ اضطراب التوتر Voltage Turbulence: تنتج هذه الظاهرة في الشبكات الريفية الضعيفة نتيجة لعدم انتظام توزيع الأحمال على الأطوار الثلاثة المرتبطة مع الشبكة. إن هذه الظواهر التي ذكرناها سابقاً تؤثر على نوعية الطاقة المقدمة من العنفات الراحية.

وللحصول على الجودة المطلوبة يجب اعتماد تجهيزات خاصة للحد من هذه الظواهر، حيث سيتم دراستها بالتفصيل في مؤلف آخر.

10-5 الدراسة الاقتصادية للعنفات الراحية:

10-5-1 تكاليف العنفات:

10-5-1-1 مقدمة:

إن تطبيقات طاقة الرياح تنمو بشكل واسع في أوروبا والعالم ، فخلال العقدتين الأخيرين تطورت الاستطاعة المركبة من 25 G W في 1992 إلى 59 GW في عام 2005 و 74 GW في عام 2007. وفي بعض المواقع التي تتصف بسرعة رياح

جيدة كانت أسعار القدرة الكهربائية المنتجة منافسة لأسعار القدرة الكهربائية المنتجة من المصادر التقليدية.

تستخدم طاقة الرياح في عدة تطبيقات كما ذكرنا سابقاً منها العنفات المرتبطة مع الشبكة و العنفات المستقلة . وفي الفقرة التالية سوف ندرس العنفات المرتبطة مع الشبكة النسي تشكل الجزء الأكبر من الاستطاعات المركبة.

10-5-1-2 تكاليف التأسيس:

المحددات الرئيسية التي تحكم تكاليف طاقة الرياح:

- التكاليف التأسيسية.
- تكاليف الصيانة و التشغيل.
- قيمة القدرة المنتجة ومعدل سرعة الرياح.
- عمر العنفة.
- معدل الفائدة .

إن المحدد الأكثر أهمية هو قيمة القدرة الكهربائية المنتجة والتي تعتمد بشكل كبير على سرعة الرياح و اختيار الموقع ومواصفات العنفة.

وبشكل عام فإن الاتجاهات الرئيسية لتطور العنفات المربوطة مع الشبكة هي:

- ازدياد استطاعة العنفات المركبة بشكل كبير .
- انخفاض تكاليف الإنشاء.

ولقد تزايدت استطاعة العنفات المركبة في السنوات الأخيرة حتى وصلت في عام 2009 إلى 6 MW .

بالنسبة لقيم الاستطاعة المركبة للعنفة الواحدة ففي عام 2002 كانت 50% تتراوح بين 750-1500KW و 30% للاستطاعة الأكبر من 1.5MW . وفي السنوات الأخيرة

بدأت عمليات استبدال الاستطاعات المركبة هذه باستطاعات كبيرة في كل من ألمانيا و الدنمرك ووصلت استطاعة العنفات التي تتركب حالياً إلى 5MW. أما بالنسبة لمردود العنفات فقد ازداد خلال 15 سنة الأخيرة بمقدار 2-3% سنوياً و ذلك بسبب التطور

التقني في التجهيزات المستخدمة و ازدياد ارتفاع العنفة و تطور برمجيات اختيار الموقع.

ولكن عمليا لا يمكن ان يتجاوز المردود الكلي قيمة 50% كما ذكرنا عند دراستنا لتقديرات الرياح.

الجدول 10-2 يوضح التكاليف التأسيسية للعنفات استناداً للنتائج التي تم الحصول عليها من العنفات المركبة في كل من اسبانيا - انكلترا - ألمانيا - الدنمارك. و هذه التكاليف تمثل 74-82% من التكاليف الإجمالية لإنشاء هذه العنفات.

الجدول 10-2 يوضح التكاليف التأسيسية للعنفات [4].

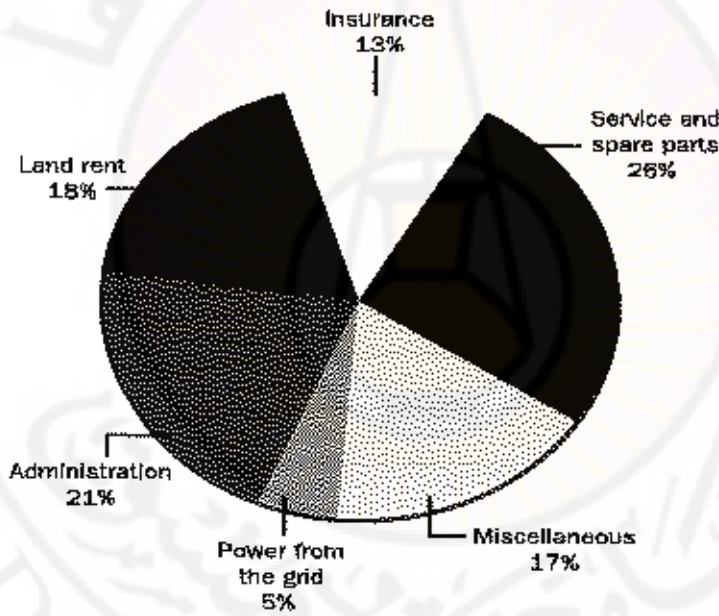
	Share of Total Cost %	Typical Share of Other Costs %
Turbine (ex works)	74-82	-
Foundation	1-6	20-25
Electric installation	1-9	10-15
Grid-connection	2-9	35-45
Consultancy	1-3	5-10
Land	1-3	5-10
Financial costs	1-5	5-10
Road construction	1-5	5-10

10-1-3 تكاليف الصيانة و التشغيل :

تشكل تكاليف الصيانة و التشغيل جزءاً كبيراً من تكاليف إنتاج الطاقة الريحية و تتراوح نمبة التكاليف ما بين 20-25 % من الكلفة الكلية للكيلو واط الساعي. وهي تكون فسي السنوات الأولى بحدود 10-15 %، و ترتفع في نهاية عمر العنفة إلى 20-35 % بسبب اهتلاكها.

و تتعلق تكاليف الصيانة و التشغيل ب :

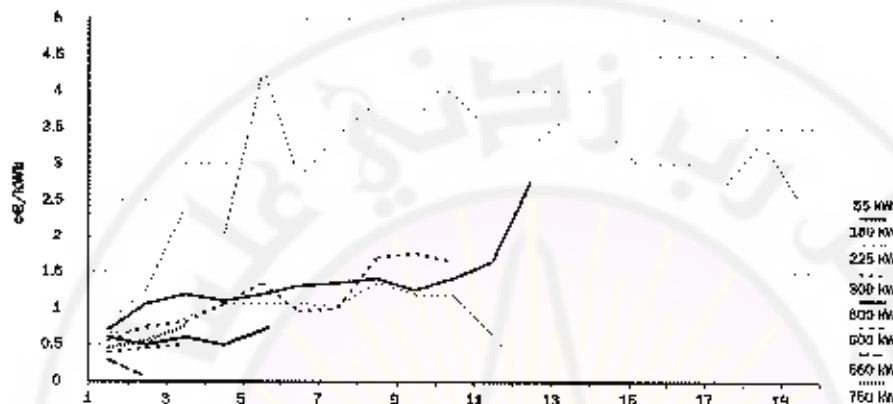
- التأمين.
 - الصيانة الدورية.
 - قطع التبديل .
 - الإصلاح.
 - الإدارة.
 - استئجار الأرض.
 - الاستطاعة وخاصة الردية المستهلكة من الشبكة .
- والشكل 10-5 يوضح تقسيم نسب تكاليف الصيانة والتشغيل التي تم تقديرها بشكل مبدئي في إحدى الدراسات الأوروبية.



الشكل 10-5: يوضح تقسيم نسب تكاليف الصيانة و التشغيل التي قدرت في إحدى الدراسات الأوروبية [10].

أما الشكل 10-6 فيوضح تكاليف الصيانة و التشغيل للكيلو وات الساعي و هي تتراوح من 3-4 CE / KWh للاستطاعات 55KW و 150KW بينما تنخفض إلى 1.3-1

CE/KW للعنفة باستطاعة 225 KW وهي تنخفض إلى أقل من 1CE/KWh في العنفات ذات الاستطاعات فوق 600KW ولا يتوقع أن ترتفع كثيراً مع تقدم العنفة بالعمر.



الشكل 10-6: منحني تكاليف الصيانة و التشغيل للكيلو وات الساعي [9].

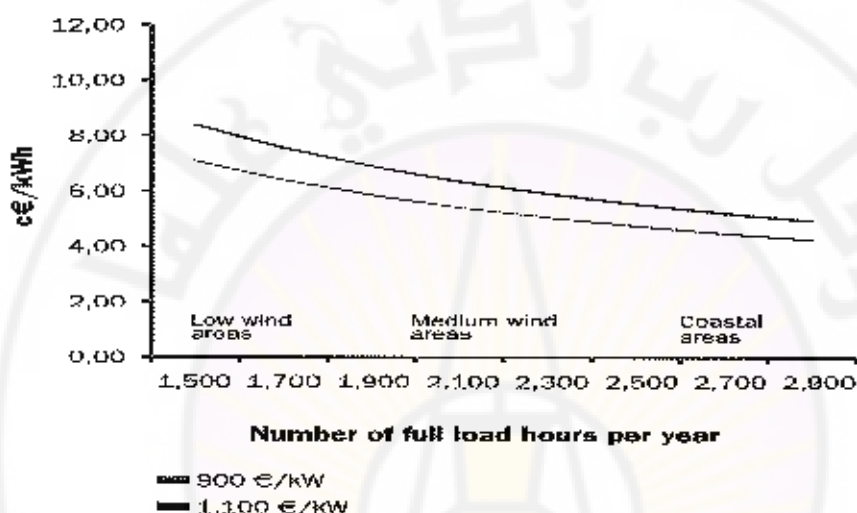
10-5-1-4 تكاليف القدرة الكهربائية المولدة من العنفات الريحية :

إن أفضل مؤشر لتكاليف طاقة الرياح هو سعر الكيلو وات الساعي وهو يحسب من تقسيم مجموع الكلفة الإنشائية و معدل الفائدة السنوي و مجموع تكاليف الصيانة خلال عمر العنفة على القدرة الكهربائية المنتجة سنوياً، وهو يعتمد بشكل كبير على نوع العنفة وتقديرات الرياح.

سوف نقوم بحساب الكيلو وات الساعي مع الأخذ بعين الاعتبار الافتراضات التالية:

- العنفات المركبة ذات استطاعة تتراوح بين 850-1500 KW مركبة حديثاً
- التكاليف الإنشائية تتراوح بين 900-1200 €/KW كاستطاعة مركبة.
- معدل تكاليف الصيانة على طول عمر العنفة هو 1.2 CE/KWh.
- عمر العنفة 20 سنة .
- نسبة الفائدة السنوية 7.5 %.

تم إجراء الحسابات بشكل بسيط في إحدى الدراسات الأوروبية دون الأخذ بعين الاعتبار - الضرائب و خطر الكوارث، والشكل 10-7 يبين نتائج الحسابات و يظهر فيه أن تكاليف الكيلو وات الساعي تتراوح بين 6-8 €/KWh عند معدل سرعة رياح منخفضة و تنخفض إلى 4-5 €/KWh عند سرعة رياح 10-12m/s على ارتفاع الصرة Hub.



الشكل 10-7: منحنى نتائج الحسابات لكلفة إنتاج الكيلووات الساعي [2].

10-5-1-5 تطور الأسعار الحالي و المستقبلي:

خلال 15 سنة الأخيرة انخفضت أسعار العنقات الريحية بمقدار 50% وهي مستمرة بالانخفاض و ذلك لعدة أسباب: تحسن المردود- ازدياد استطاعة العنقات - الدراسات الجيدة لمواقع تركيب العنقات وبالتالي تطوير تصميمها الملائم لطبيعة هذه المواقع.

10-5-1-6 تكاليف توليد الكيلو وات ساعي في المحطات الكهربائية باستخدام الوقود

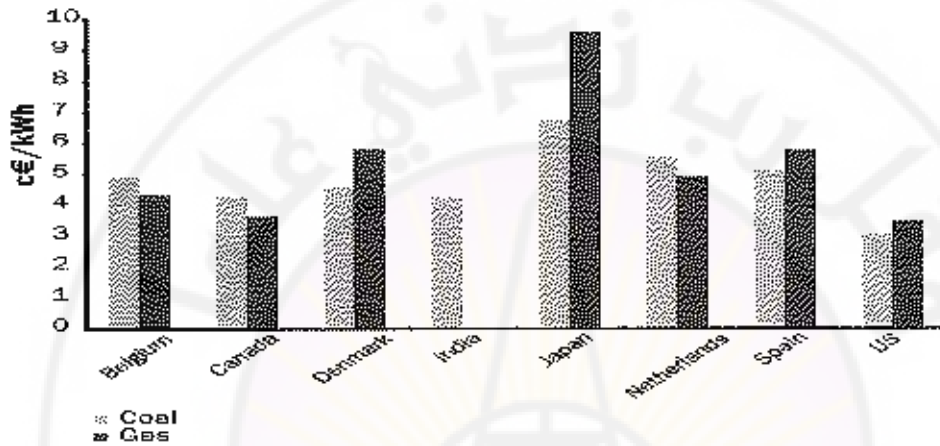
التقليدي:

تنقسم تكاليف توليد القدرة الكهربائية في المحطات التقليدية إلى:

- تكاليف الوقود.
- تكاليف صيانة و تشغيل.
- تكاليف إنشائية.

و تتراوح التكاليف الإنشائية بين % 40-60 بينما تكون في العنقات الربحية حوالي %75 و الشكل 8-10 يوضح التكاليف للكيلو وات ساعي في عدة دول و الناتج عن الغاز أو الفحم مع وجود الافتراضات التالية:

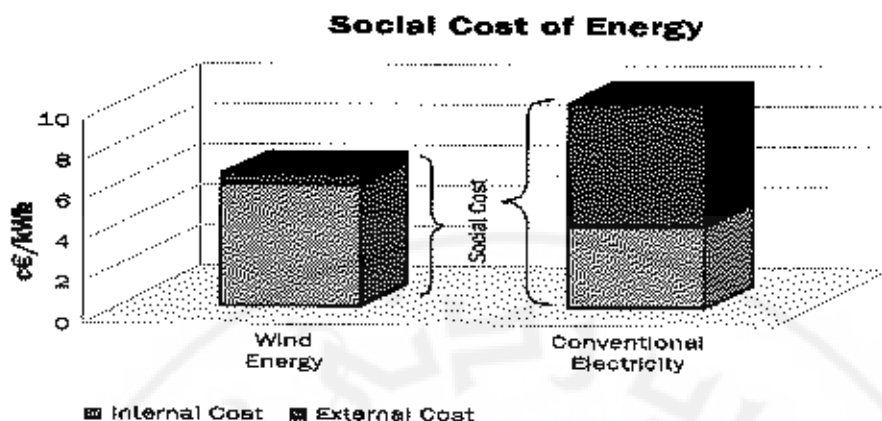
- المحطة موجودة في الخدمة منذ عام 2001 .
- نسبة الفائدة السنوية %5 طيلة عمر المحطة البالغ 40 سنة .



الشكل 8-10 : يوضح التكاليف للكيلو وات ساعي في عدة دول للمحطات التقليدية باستخدام وقود الغاز أو الفحم الحجري [7].

10-5-1-7 التكاليف الخارجية " غير الظاهرة " لإنتاج الطاقة:

إن المقارنة العادلة بين أسعار إنتاج الطاقة يجب أن تتضمن التكاليف غير الظاهرة لإنتاج الطاقة من تلوث و نفايات صلبة و استهلاك مواد أولية و غير ذلك، وهناك دراسات عديدة حالياً لحساب التكاليف الخارجية لإنتاج الطاقة، و الشكل 9-10 يوضح تكاليف إنتاج الطاقة من المصادر التقليدية و من مصادر الرياح.



الشكل 10-9: يوضح تكاليف إنتاج الطاقة من المصادر التقليدية و من مصادر الرياح [8].

10-6 التجربة الألمانية في مجال الطاقة المتجددة وطاقة الرياح بشكل خاص:

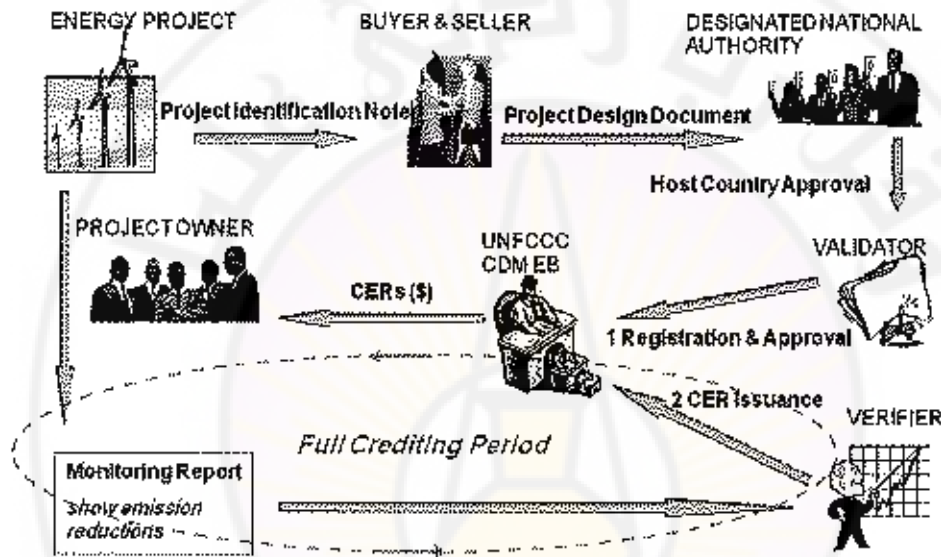
تحقق مصادر الطاقة المتجددة معدلات نمو تكاد تكون أكبر من كل القطاعات الأخرى في ألمانيا. وحسب الاتحاد الألماني للطاقة المتجددة فإنه من المتوقع أن يؤمن هذا القطاع 300000 فرصة عمل جديدة حتى العام 2020. كما يتوقع يوهانيس لاكمان، رئيس الاتحاد أن يصل حجم الاستثمارات إلى 200 مليار يورو. أرقام تعود جزئياً أيضاً إلى “قانون أفضلية الطاقة المتجددة” والمعروف اختصاراً بقانون الطاقة المتجددة (EEG) فالقانون يضمن حداً أدنى من المكافأة الحكومية للطاقة المستمدة من قوة الرياح والماء والطاقة الشمسية وطاقة جوف الأرض والكتلة الحيوية. مما سيؤدي إلى حماية المناخ بالقانون. إن هدف قانون الطاقة المتجددة هو رفع مساهمة مصادر الطاقة المتجددة في مجمل استهلاك الكهرباء في ألمانيا في العام 2010 بنسبة 12,5 % على الأقل، وأن تصل هذه النسبة إلى 20% مع العام 2020. وقد دخل القانون بشكله الأولي في عام 2000 حيز التطبيق ثم ما لبث أن تم استبداله بالشكل المطور لقانون الطاقة المتجددة في آب 2004 وهو يؤكد على ضمان حد أدنى لسعر الكهرباء المستخرجة من الكتلة الحيوية بمقدار 9.5 سنت لكل كيلو واط ساعي، وذلك لمدة 20 عاماً. أما أعلى

الأسعار وهي 59.5 سنت للكيلو واط الساعي فهو من نصيب الكهرباء المستمدة من الطاقة الشمسية. وحسب وزارة البيئة الألمانية الاتحادية بلغت تكاليف قانون دعم الطاقة المتجددة في عام 2005 حوالي 2.4 مليار يورو "استثمار في المكان الصحيح". وحسب دراسة مشتركة أعدها كل من المركز الألماني للنقل الجوي وأبحاث الفضاء ومعهد فراونهوفر لأبحاث الأنظمة والأبنك وفر إنتاج الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة خلال ذات الفترة 2005 خسائر وأضرار بقيمة 2.8 مليار يورو. وقد اعتمد الخبراء في إعداد دراستهم المقارنة بين تكاليف إنتاج الطاقة الكهربائية من مصادر الطاقة المتجددة وتكاليف إنتاجها من مصادر الطاقة الأحفورية المستخرجة من باطن الأرض بما فيها الأضرار التي يمكن أن يسببها نفث الغازات العادمة من محطات الطاقة ولكن "الموازنة البيئية" لقانون الطاقة المتجددة هي المؤثرة بالفعل: ففي عام 2003 وفر دعم مصادر الطاقة المتجددة من خلال القانون ما يعادل 23 مليون طن من غاز ثاني أكسيد الكربون وتضاعفت الكمية في عام 2005 لتصل إلى 57 مليون طن. والهدف النهائي هو توفير 110 مليون طن في عام 2020. فاعتباراً من هذه النقطة يصبح قانون دعم مصادر الطاقة المتجددة اقتصادياً فعلاً حيث أنه من خلال التوسع في مجال الطاقة المتجددة يمكن لألمانيا تخفيض مستورداتها من الطاقة بأكثر من 20 مليار يورو سنوياً.

10-7 عائدات آلية التنمية النظيفة (Clean Development Mechanism(CDM)
استناداً إلى بروتوكول كيوتو لعام 1997 تقرر منح الدول الموقعة عليه حوافز مادية فيما لو استخدمت أو استثمرت مصادر طاقة نظيفة أدت إلى تخفيض كمية انبعاث ما يسمى غازات الدفيئة التي تؤثر على ما يسمى ثقب الأوزون. ومن هذه الحوافز دفع مبلغ يعادل تقريباً 1 سنت يورو لقاء إنتاج كل 1 كيلو وات ساعي من القدرة الكهربائية سنوياً من مصدر طاقة نظيف لا يؤدي إلى انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون والغازات الأخرى المرافقة. وتعتبر الشمس والرياح والماء طبعاً من المصادر النظيفة للطاقة التي يمكن استغلالها لإنتاج القدرة الكهربائية.

وتم وضع معايير خاصة لهذه الحوافز استناداً إلى ما يسمى آلية التنمية النظيفة CDM.

يبين الشكل 10-10 مخططاً صندوقياً لكيفية توثيق واعتماد عائدات آلية التنمية النظيفة CDM لمشروع توليد القدرة الكهربائية من مزرعة ريحية على سبيل المثال.



الشكل 10-10 كيفية توثيق واعتماد عائدات آلية التنمية النظيفة CDM لمشروع توليد القدرة الكهربائية من مزرعة ريحية [12].

وفي الفترة بين 9-18 كانون الأول 2009 انعقد في كوبنهاغن بالذمرك المؤتمر العالمي للتغير المناخي والذي سمي COP-15 بحضور مندوبين عن مائة واثنين وتسعين دولة، حيث أقر في نهاية جلساته اتفاقية (للأسف غير ملزمة) للحد من التلوث البيئي وتخفيض الانبعاث الحراري والعمل على تشجيع استثمار مصادر الطاقة المتجددة ووضع قيود وعقوبات على الدول التي تتجاوز المعدلات المسموح بها لانبعاث غاز

ثاني أكسيد الكربون والغازات الضارة المرافقة فيها والعمل على الحد من زيادة درجة حرارة الأرض بما لا يزيد عن درجتين مئويتين بحلول عام 2050 بالمقارنة مع درجة حرارة الأرض عند بداية الثورة الصناعية منتصف القرن الثامن عشر . ومن المفترض أن تحل هذه الاتفاقية محل بروتوكول كيوتو الذي سينتهي العمل به عام 2012، مع السعي لتطوير هذه الاتفاقية ووضع الضوابط الملزمة قبل انتهاء مفعول بروتوكول كيوتو .

10-8 الهيئة الدولية للطاقة المتجددة:

تجدر الإشارة أنه تم إقرار الهيئة الدولية للطاقة المتجددة International Renewable Energy Association IREA في مطلع العام 2009 وبمشاركة عدد كبير من دول العالم بما فيها سورية، وذلك على غرار الهيئة الدولية للطاقة الذرية.

10-9 المركز الإقليمي للطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة:

بدعم من الاتحاد الأوروبي وبرعاية ألمانية ودنمركية تم في جمهورية مصر العربية وتحت إشراف في حزيران 2008 إنشاء المركز الإقليمي للطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة Regional Center for Renewable Energy and Energy Efficiency RCREEF وذلك بمشاركة عشرة دول عربية ومنها سورية.

ويهدف المركز إلى تحقيق المهام التالية:

- صياغة ونشر السياسات الرامية إلى تشجيع الطاقات المتجددة وكفاءة الطاقة.
- تنمية التكنولوجيات الجديدة في مجال الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة.
- دعم مشاركة القطاع الخاص مع القطاع العام في مجال الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة.

وقد وضعت ميزانية أولية لهذا المركز قدرت بخمسة عشر مليون يورو.

10-10 مراجع الفصل العاشر

- [1] د.معن دلوود ، د.محمد فداء حلاق
المؤثرات البيئية لاستعمال محطات توليد الكهرباء من منابع الطاقة المتجددة
مجلة المهندس العربي دمشق 1999.
- [2] د. كمال ناجي؛ مشاريع تخرج في كلية الهندسة الكهربائية و الميكانيكية (-2009
2005).
- [3] د. كمال ناجي محاضرات في طاقة الرياح (1) جامعة دمشق كلية ه.م.ك.
2009
- [4] م. اسماعيل الوالو - دراسة مقارنة للمولدات التحريضية والثرمانية المستخدمة في
العنفات الريحية - رسالة ماجستير بإشراف د.كمال ناجي جامعة دمشق 2008
- [5] م.اسماعيل الوالو - الجدوى الاقتصادية لاستخدام طاقة الرياح- دبلوم دراسات عليا
بإشراف د.كمال ناجي جامعة دمشق، دمشق 2003.
- [6] California Energy Commission - Comparative Cost of California
Central Station Electricity Generation Technologies -2003.
- [7] Erin Jacobson
Minimizing the Cost of Wind Energy for Vashon Island – a Low
Wind Speed Site -University of Washington-2005.
- [8] Christopher A. Walford
Wind Turbine Reliability: Understanding and Minimizing Wind
Turbine Operation and Maintenance Costs -Global Energy
Concepts, LLC-2006.
- [9] Dr Michael Conlon
Development of Wind Energy Resources, Turbine Control,
Configuration of Wind Generators and Integration into Supply
Networks- School of Control Systems and Electrical Engineering
DIT, Kevin Street, Dublin -2006.
- [10] EWEA-Wind Energy- The Facts-Report- 2006.
- [11] GWEC-WIND FORCE 12 A blueprint to achieve 12% of the
world's electricity from wind power by 2020-Report –2006.

[12]Johan Mylander

Vattenfall Carbon Fund-CDM Workshop Jander- Syria 2009

[13] www.windpower.org



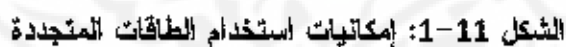


الفصل الحادي عشر

Biomass Energy الطاقة الحيوية

تنطلق تيارات الطاقة المستخدمة على وجه الأرض بشكل أساسي من مصادر مختلفة للطاقة الأولية، وهي: الطاقة الشمسية و طاقة الرياح و طاقة الكتلة الحيوية والطاقة المائية وطاقة المد و الجزر وطاقة الأمواج وطاقة حرارة الأرض الجوفية (شكل 1-1).

عرف الإنسان منذ القدم الكتلة الحيوية واستعملها كمصدر للطاقة، وتستعمل هذه الكتلة حتى وقتنا الحاضر في كثير من الدول وبشكل خاص الدول النامية لتلبية حاجات المواطنين من الطاقة، و تتركز أهم استعمالات مواد الكتلة الحيوية في الحرق المباشر لهذه المواد للحصول على الطاقة الحرارية اللازمة للطبخ والتسخين بل قد تتعدى ذلك حيث تستخدم في الزراعة وفي الصناعة الصغيرة. وقد جرت دراسات عديدة في بلدان مختلفة من العالم، بعد ارتفاع أسعار النفط ، لتقييم مصادر الكتلة الحيوية القائمة والمحتملة ولوضع وتصميم الطرق الفنية الناجحة لاستخدام هذه المصادر بالصورة الأمثل وبالمردود الأعلى ، وبذلك نجد أن كثيراً من البلدان التي تمتلك مصادر كبيرة من الكتلة الحيوية قد أدخلت هذه المصادر في خططها الحالية والمستقبلية وباشرت باستثمار الطاقة التي تنتج عن تحويلات هذه الطاقة الحيوية إلى طاقات أولية أخرى بديلة مثل الغازات والمشتقات النفطية والكحولية ذات الطاقة الحرارية العالية. ويمكن أن تتألف المواد الأولية للكتلة الحيوية من المخلفات الزراعية وروث البهائم والأشجار والنباتات القائمة والنباتات والأعشاب والطحالب المائية والفضلات لصلبة والفضلات الصناعية العضوية ومياه المجاري والنفايات الحيوية السائلة. وتبذل في السنوات الأخيرة جهود كبيرة في كثير من الدول الصناعية المتقدمة لتطوير الخطوط التقنية والصناعية المستعملة في عمليات تحويل الطاقة من الكتلة الحيوية، وذلك للحصول على الغاز الطبيعي من مختلف مصادر الكتلة الحيوية.



502

27% من الكمية الكلية ، وفيها المواد المعدنية والزجاج وتبدو جلية أهمية استعادة هذه المواد وإرجاعها إلى دورة التصنيع.

من المؤكد أن المخزون النفطي يقل يوماً بعد آخر، ولا بد من البحث عن مصادر أخرى للطاقة التي لا يمكن الحديث عن أي تنمية دون استعمالها، وتستدعي المسألة ترشيد الطاقة .

يستعمل الإنسان أشكالاً من الطاقة هي: الطاقة التقليدية والطاقة المتجددة، والفرق الأساسي بينهما هو أن الطاقة غير التقليدية تعمل على زيادة حرارة الكرة الأرضية بينما تعمل الطاقة المتجددة فقط على إعادة توزيع الحرارة في الطبيعة الأمر الذي يؤكد أن الطاقة التقليدية هي طاقة ملوثة للبيئة، بينما تكون المصادر المتجددة منتجة للطاقة النظيفة أو الصديقة للبيئة.

تنتج الطاقة التقليدية الملوثة عن حرق الوقود كالفحم والنفط والغاز الطبيعي ومن الطاقة النووية بينما تتمثل الطاقة النظيفة بالطاقة الشمسية والطاقة المائية وطاقة الرياح وطاقة الكتلة الحيوية وطاقة حرارة باطن الأرض (الحرارة الجوفية) .

لما كانت مخلفات الأحياء ومنتجاتها ثروة حقيقية من وجهة نظر الطاقة فإنه يمكن الاستفادة منها في إنتاج الطاقة المتجددة بطرائق عديدة وزيادة نسبتها في استعمالات الطاقة حتى تبلغ نسباً عالية في المستقبل، ومؤخراً زاد الاهتمام بالوقود الحيوي لخفض مخاطر التلوث البيئي والرغبة في ترسيخ (أمن الطاقة) بتأمين مصادر متجددة محلية.

11 - 1 تعريف الطاقة الحيوية

يفهم تحت مصطلح الكتلة الحيوية كل المواد ذات المنشأ العضوي ، أي المواد الحاوية على الكربون في تركيبها الكيميائي، وبذلك تشمل الكتلة الحيوية:

- الكتلة الحيوية في الطبيعة (النباتات والحيوانات)
- المخلفات الناجمة عنها (كالمخلفات الحيوانية مثلاً)

- الكتلة النباتية الميتة غير المخمرة (كالقش أو كالتبن مثلاً).

وتشمل الكتلة الحيوية أيضاً، بشكل عام، جميع المواد التي تنتج من خلال التحولات التقنية أو الاستعمال الفيزيائي (مثل الحمأة السوداء، الورق و السيللوز، ونفايات المسالخ، والكتلة العضوية من النفايات المنزلية، والزيت النباتية، والكحول). ويمكن أن تقسم الكتلة الحيوية إلى منتجات أولية وثانوية:

- المنتجات الأولية:

وهي التي تنشأ من استغلال التمثيل الضوئي للطاقة الشمسية، وإليها ينتمي بشكل أساسي كامل الكتلة الحيوية النباتية مثل المنتجات الزراعية والحرجية الناجمة عن النباتات المزروعة من أجل الطاقة (كالأشجار سريعة النمو، وأعشاب الطاقة) أو البقايا النباتية، والمنتجات الثانوية الناتجة عن الزراعة و الإحراج وكذلك مخلفات التصنيع الأخرى (كالتبن والقش و أخشاب الغابات وأخشاب الصناعة)

- المنتجات الثانوية:

وتأخذ طاقتها فقط بشكل غير مباشر من الشمس، وتتشكل من خلال تحطيم أو تغيير بنية المواد العضوية بواسطة أحياء أعلى (كالحيوانات)، وإليها ينتمي مثلاً مجموع الكتلة الحيوانية، ومخلفاتها (كالبول والروث)، والحمأة الناتجة من محطات التنقية.

يتم استغلال الطاقة المختزنة في الكتلة الحيوية في العالم حالياً، بإحدى الطرق التالية:

1 - الحرق المباشر لمواد الكتلة الحيوية :

تستخدم الأخشاب والمخلفات النباتية في أعمال التدفئة والأعمال المنزلية في الكثير من المناطق الريفية في مختلف دول العالم.

2 - الغاز العضوي:

حيث يتم حرق الغاز العضوي الذي ينتج عن تفكيك وهضم المواد العضوية في وسط معزول عن الهواء، وبعد خلطها بالماء، وذلك ضمن بيئة ذات تصميم خاص تسمى الهاضم.

3 - محطات معالجة القمامة الصلبة:

حيث تتم معالجة القمامة الصلبة والنفايات الحيوية السائلة في المدن الكبرى ويتم فيها استرجاع المواد غير العضوية وإعادتها إلى دورة الصناعة ، مثل المواد الحديدية والمعدنية والزجاج ، وتفكيك المواد العضوية بعد خلطها مع المخلفات السائلة الحيوية في وسط معزول عن الهواء وتوليد الغاز الطبيعي - غاز الميثان مع أول أكسيد الفحم ، و يتم حرق هذا الغاز بهدف التدفئة أو توليد الكهرباء .

4 - المطامر الأرضية :

حيث يتم طمر النفايات في هذه المطارح - المكبات - وذلك بعد مرورها في عملية استرجاع للمواد الصلبة وإعادة استعمالها . ويتم إضافة كميات من الماء أو وحل المجاري إليها لترطيبها وتركها لتتخمر وتتحول إلى سماد.

5 - المرممات :

وفيها يتم حرق النفايات وتحويلها إلى رماد . ويستفاد من الطاقة الحرارية الناتجة عن حرق النفايات في توليد الطاقة الكهربائية أو في التدفئة، لكن الآثار البيئية لهذه الطريقة غير مقبولة وتكاليف أجهزة التحكم ومراقبة الدقائق الملوثة التي تنتج عن الاحتراق مرتفعة جداً.

وسوف نبين في هذا الكتاب في فصل لاحق اثنتين من الطرق المستخدمة لاستثمار الطاقة

الحيوية الأكثر انتشاراً وتطبيقاً في العالم وهي:

- تحويل الطاقة الحيوية في الهاضم.
- تحويل الطاقة الحيوية في معامل معالجة القمامة.

11 - 2 الحرق المباشر لمواد الكتلة الحيوية

تحتل عملية الحرق المباشرة للمواد العضوية الصلبة (كالخشب والقش) حتى اليوم الأهمية الكبرى بين عمليات وطرق تحويل الطاقة. تستخدم محطات الحرق لإنتاج الحرارة لاستعمالها كطاقة ثانوية (مثل البخار الذي يمكن أن يستعمل لاحقاً في توليد

التيار الكهربائي)، أو كطاقة نهائية (كالحرارة العالية)، أو كطاقة نافعة أو مفيدة (كحرارة الإشعاع المنبعثة من مدفأة أو سخان). وهنا يفهم من عملية الحرق تأكسد المادة المحترقة للحصول على الحرارة بشكل مباشر، أي تفاعل المادة العضوية مع الأكسجين ، وبذلك تنشأ غازات العادم والرماد الذي يحتوي بدوره على مواد معدنية غير قابلة للاحتراق وكذلك أكاسيد صلبة من جزيئات الوقود المعدنية. ويبين الجدول 1-11 معدل محتوى الطاقة لأنواع مختلفة من الوقود البيولوجي.

الجدول 1-11 معدل محتوى الطاقة

الوقود	محتوى الطاقة	
	جيجا جول لكل طن	جيجا جول لكل متر مكعب
الخشب (20% رطوبة)	15	10
الورق (صحف محلية)	17	9
المخلفات الحيوانية (روث)	16	4
القش	14	1.4
قصب السكر	14	10
مخلفات المجاري	9	1.5

النفط	42	34
الفحم	28	50
الغاز الطبيعي	55	0.04

11 - 2 - 1 استخدام الخشب كوقود

حتى يكون الوقود الحيوي منافساً للوقود التقليدي، فإنه يجب أن يكون مقارباً لسعره، بالإضافة إلى ضرورة وفرته وسهولة نقله. وإن المصادر التقليدية كالنفط والغاز لها قيمة كثافة طاقة عالية، ويمكن تخزينها بتكلفة قليلة، وهي متوفرة عند الحاجة إليها. وتعتبر هذه المصادر، بالإضافة إلى الطاقة الكهربائية، من أنواع الطاقة التي تتميز بسهولة نقلها من مكان إلى آخر.

تتوفر مصادر الكتلة الحيوية بأشكال مختلفة مثل الخشب، والمخلفات الحيوانية، ونشارة الخشب، والقش والورق، والمخلفات المنزلية، ومخلفات المجاري. ومعظم هذه المصادر تتحلل بسرعة، وقسم منها له قابلية خزن جيدة. ولكون معظم هذه المصادر ذات كثافة طاقة قليلة فإن نقلها من مكان إلى آخر بعيد نسبياً يكون مكلفاً.

إن استخدام الخشب لإنتاج الطاقة ليس أمراً جديداً. فقد استخدم منذ آلاف السنين في التدفئة وطهي الطعام والإنارة، وقد قل استخدامه بعد أن شاع استخدام الفحم في القرن التاسع عشر، وقل استخدام الفحم بعد استخدام النفط في بداية القرن العشرين.

ويتكون الخشب من نوعين من المركبات هما السليلوز Cellulose واللجنين Lignin. والليلوز هو مادة كربوهيدراتية تتكون من جزيئات كبيرة تتكرر فيها وحدات السكر، وقد تصل هذه الوحدات في جزيء السليلوز إلى 3000 وحدة أو أكثر. أما اللجنين

فيشكل نحو 25% من وزن الخشب ، وهو يكون نسيجاً ضاماً يتخلل ألياف السليلوز ويربطها معاً .

لقد استخدم الخشب في كثير من الأغراض الأخرى، منها إنتاج الفحم النباتي المستعمل في اختزال الخامات عند تحضير بعض الفلزات، كما استخدم الرماد الناتج عن حرق الخشب في تحضير بعض المحاليل القلوية وفي تحضير كربونات البوتاسيوم أيضاً .

وتوجد طرق عديدة لإنتاج الطاقة من الخشب منها الطريقة الحرارية ، وهي تتمثل في حرق الخشب بطريقة مباشرة واستخدام الحرارة الناتجة لمختلف الأغراض أو تتضمن تسخين الخشب وتقطيره بمعزل عن الهواء واستخدام ما ينتج من غازات وأبخرة كمصدر للحرارة.

تبلغ القيمة الحرارية للخشب نحو 19800 كيلوجول لكل كيلوغرام من الخشب الجاف الخالي من الرطوبة وهي قيمة عالية، وهي نقل إلى حد ما عن القيمة الحرارية للفحم التي تبلغ 28000 كيلوجول لكل كيلوغرام من الفحم . ونظراً إلى احتواء الخشب عادة على قدر متغير من الرطوبة فإن القيمة الحرارية لأنواع الخشب العادية تقل أو تزيد عن ذلك بنسب مختلفة تتوقف على كمية الرطوبة الموجودة فيها . وهناك طريقة كيميائية أخرى لاستخدام الخشب في إنتاج الطاقة، تتمثل في تعريض رقائق الخشب أو نشارته إلى بعض المواد الكيميائية تحت ضغط مرتفع وفي درجة حرارة عالية، وتعطي هذه الطريقة زيوتاً تقبل الاشتعال ويمكن استعمالها وقوداً سائلاً. وقد أقيم مصنع تجريبي لهذا الغرض في الولايات المتحدة استخدمت فيه هذه الطريقة لتحويل الخشب إلى زيت قابل للاشتعال، وتبين من هذه التجارب أن كل 405 كيلوغرام من رقائق الخشب تعطي برميلاً واحداً من الزيت ، وهي نسبة لا بأس فيها.

ويمكن أيضاً تحويل الخشب إلى غاز وذلك لأنه يحتوي على قدر صغير من الرماد لا يزيد على 2% من وزنه، كما أنه يحتوي على قدر ضئيل من الكبريت لا يزيد على 0.1% وبذلك لن تحتوي الغازات الناتجة منه إلا على قدر ضئيل جداً من مركبات الكبريت الضارة. كذلك فإن الخشب غير متغير التركيب أي إنه يتكون دائماً من نسب

ثابتة من كل من الكربون والهيدروجين والأكسجين وبذلك يكون تركيب الغازات الناتجة منه ثابت أيضاً لحد كبير.

ويبين الجدول 11-2 نسبة الكربون والهيدروجين والأكسجين في بعض أنواع الوقود:

الجدول 11-2 : نسبة CO₂ المنبعثة في بعض أنواع الوقود

الوقود	نسب الذرات			النسبة المئوية بالوزن			كمية CO ₂ المنبعثة لكل جيجا جول
	C	H	O	C	H	O	
الفحم	0.1	1	1	9%	6%	85%	120 كغ
النفط	0	2	1	0	15%	85%	75 كغ
الميثان	0	4	1	0	25%	75%	50 كغ
الخشب	0.7	1.5	1	45%	6%	49%	77 كغ

11 - 2 - 2 الحرق المباشر للخشب: Direct Combustion

إن تبخير كمية من الماء موضوعة في قدر هي عملية بسيطة، لكنها، لسوء الحظ عملية غير ذات كفاءة إطلاقاً. ويبين الجدول رقم (11-2) أن محتوى الطاقة في كل متر مكعب من الخشب المجفف بواسطة الهواء يساوي 10 جيجا جول (GJ) أو ما يعادل عشرة ملايين كيلو جول. ورفع درجة حرارة لتر من الماء بمقدار درجة مئوية واحدة يتطلب طاقة مقدارها 4.2 KJ . إن تبخير لتر واحد من الماء يتطلب من الطاقة ما يعادل 400 KJ أي ما يعادل 40 سنتيمتراً مكعباً من الخشب أو قطعة صغيرة منه. ولكننا في التطبيق العملي نحتاج إلى كمية خشب أكثر بخمسين مرة من الكمية

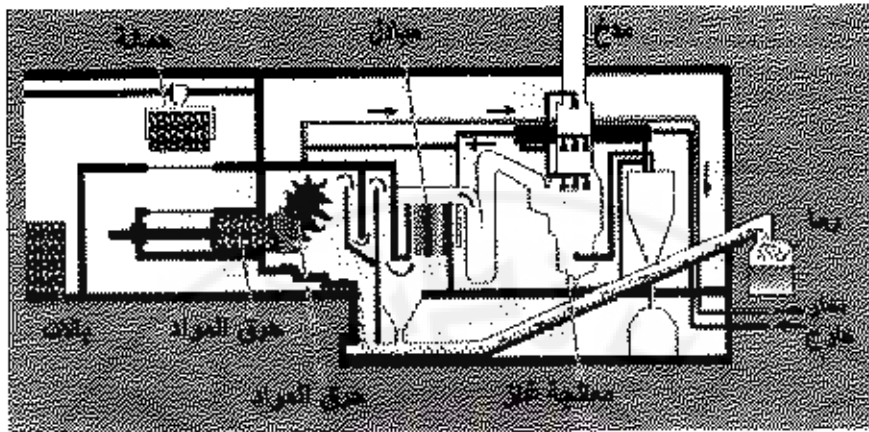
المذكورة أعلاه لتبخير هذه الكمية من الماء، وذلك لأن كفاءة التحويل لا تزيد على 2% بسبب الضياع في الطاقة. ولتصميم فرن خاص كُفء يستهلك القليل من الوقود فإن ذلك يتطلب فهماً لعمليات احتراق الوقود الصلب.

إن عملية الاحتراق تتكون من مرحلتين، وذلك لأن أي وقود صلب يحتوي على مركبين قابليين للاحتراق. وعند ارتفاع درجة الحرارة تتطاير المادة وتتحرق على شكل خليط من بخار القطران والزيوت. واحتراق هذا الخليط يكون لهياً يمكن رؤيته حول الخشب أو الفحم. أما الجزء الصلب المتبقي فإنه يتكون من خشب محروق يتركب من كربون ويحترق لينتج ثاني أكسيد الكربون وبعض البقايا كالكش (الرماد).

ومن خصائص الوقود الحيوي أن ثلاثة أرباع طاقته أو أكثر تكون على شكل مادة متطايرة (يختلف الفحم عن هذا، إذ أن طاقة المادة المتطايرة فيه أقل من نصف الكمية). ولهذا فإنه من المهم عند تصميم أي فرن التأكد من أن هذه الغازات المتطايرة تحترق، ولا تخرج من المدخنة دون احتراق. وللحصول على احتراق كامل يجب أن يصل الهواء إلى الخشب، ويتم ذلك بتقسيمه إلى أجزاء صغيرة، ويجب أيضاً السيطرة على الهواء عند استخدام كمية قليلة من الأوكسجين، إذ أن الاحتراق عندما يكون كاملاً يولد أول أكسيد الكربون، الذي هو غاز سام. أما عند استخدام كمية كبيرة من الهواء فسيتكون هناك خسائر وضياع في الطاقة لأن قسماً من الحرارة سيتبدد مع الغازات الخارجة. تختلف الأنظمة الحديثة لمحارق الوقود الحيوي باختلاف الوقود الحيوي نفسه. وتتراوح المحارق من أفران صغيرة مصممة لترشيد الاستهلاك في دول العالم الثالث، إلى مراحل بخارية كبيرة ذات سعة حرارية تقدر بالميغا وات. ويوضح الشكل 1-11 مكرر نظام حرق للخشب كبير السعة.

11 - 2 - 3 نواتج الاحتراق الكامل لعناصر الوقود الرئيسية:

1 - غاز ثاني أكسيد الكربون: إن حرق عنصر الكربون الموجود في الكتلة الحيوية يؤدي لتشكيل غاز ثاني أكسيد الكربون، وبالتالي فهذا الغاز يتناسب طردياً مع كمية



الشكل 11-1 مكرر : نظام حرق مباشر للخشب كبير السعة [19],[20]

الكتلة الحية المستخدمة أو مع نسبة الكربون الموجودة فيها، وبذلك فهو يتعلق مباشرة بالطاقة النافعة المراد توليدها و بمردود محطة الحرق. يعتبر غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج عن احتراق الكتلة الحيوية شرطاً لاستمرار بناء الكتلة الحيوية، وليس كمؤثر سلبي على المناخ، لأن كمية غاز ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن حرق الكتلة الحيوية هي نفس الكمية التي سحبت من الجو بعمليات التركيب الضوئي لنمو النباتات. لا يعتبر الحصول على الطاقة من الكتلة الحيوية أمراً غير مؤثر على البيئة، لأن تحضير ونقل الكتلة الحيوية وتشغيل محطات الحرق مرتبط باستخدام طاقة الوقود الأحفوري، حيث يسهم غاز ثاني أكسيد الكربون الناتج عن احتراقها في زيادة تأثير الغازات الدفيئة.

2 - بخار الماء:

ينشأ بخار الماء عن احتراق الهيدروجين الموجود في الكتلة الحيوية. إضافة لذلك يتبخر الماء الموجود في المواد العضوية سواء بشكل حر أو مرتبط. لا يوجد خطر من انبعاث بخار الماء، لأنه عنصر غير ضار، بل ينتمي إلى الدورة الطبيعية للماء. إلا أنه في بعض الأحيان قد لا يكون مرغوباً في انبعاث بخار الماء بكميات كبيرة لأنه يؤثر محلياً على المناخ ويظهر سحابة الغازات المنبعثة. يفقد بخار الماء بالدرجة

الأولى إلى ضياع كبير في الطاقة على شكل حرارة تبخير و تسخين للماء. يمكن أن تؤدي زيادة نسبة الماء في الكتلة الحيوية إلى ضياع في الطاقة بالإضافة إلى تبريد اللهب و بالتالي إلى حدوث احتراق غير كامل.

لذلك عند استخدام كتلة حيوية ذات محتوى عال من الماء يلزم استخدام محطات حرق ذات تكثيف غازي يتم فيها طرد البخار مع الغازات الأخرى غير المرغوب فيها.

1 - 2 - 4 الميزات الحرارية للخشب ونفاياته:

عندما نقيم مميزات مادة قابلة للاحتراق فيما يتعلق باستخدامها كوقود، فإن مؤشر الطاقة الحرارية المساهمة في التدفئة هو أحد أهم المميزات.

تحدد قيمة مؤشر طاقة التدفئة كمية الطاقة الحرارية المكتسبة من قبل واحدة الكتلة من المادة. في حالة الخشب ونفاياته، تعتمد قيمة مؤشر طاقة التدفئة على نوع الخشب وعلى محتوى الرطوبة. إن الحد الأعلى لقيمة مؤشر التدفئة لخشب جاف 100 % هي 18-20 ميغا جول / كيلو غرام. تبلغ نسبة الرطوبة في الخشب عند قطعه ونقله تقريباً 50 %. وقد ترتفع إلى 60 % أو تنخفض 30 % نسبة إلى شروط التخزين وشروط النقل.

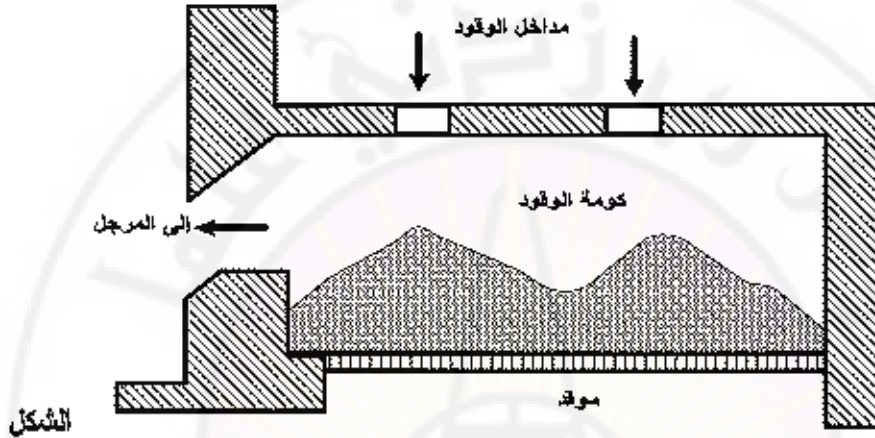
11 - 2 - 5 تصنيف أنظمة حرق الخشب:

تصنف الأجهزة المستخدمة لحرق الخشب في مختلف دول العالم حالياً كما يلي:

- 1 - أنظمة حرق ذات مشابك مستوية ثابتة (أفران هولندية، تغذية من الأسفل)
- 2 - أنظمة حرق ذات مشابك مخروطية
- 3 - أنظمة حرق ذات مشابك مستوية ميكانيكية
- 4 - أنظمة حرق ذات مشابك مهتزة
- 5 - أنظمة حرق ذات مشابك مائلة وميكانيكية (مشابك Kablitz).

11-2-5 أنظمة حرق ذات مشابك مستوية ثابتة:

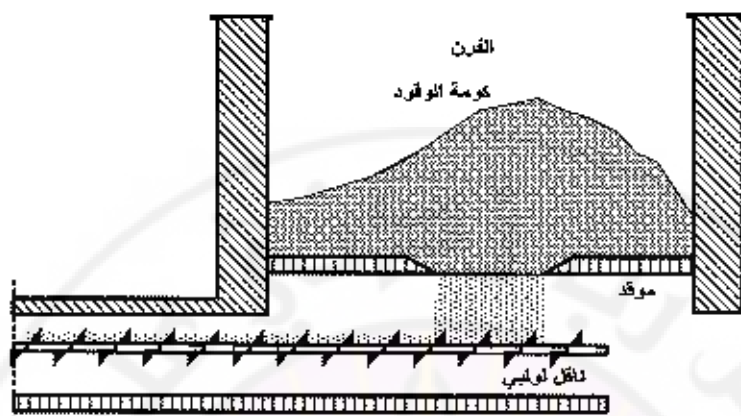
إن أقدم نظام مستخدم لحرق الخشب في الصناعة يتألف من فرن مركب على أرضيته مشبك معدني توضع عليه كمية الخشب المعدة للحرق على شكل رزمة. قد توضع الرزمة في المشبك ويتم حرقها عادة بشكل مستقيم.



11-2: نظام الحرق المباشر للخشب المزود بمشابك مستوية ثابتة [20]

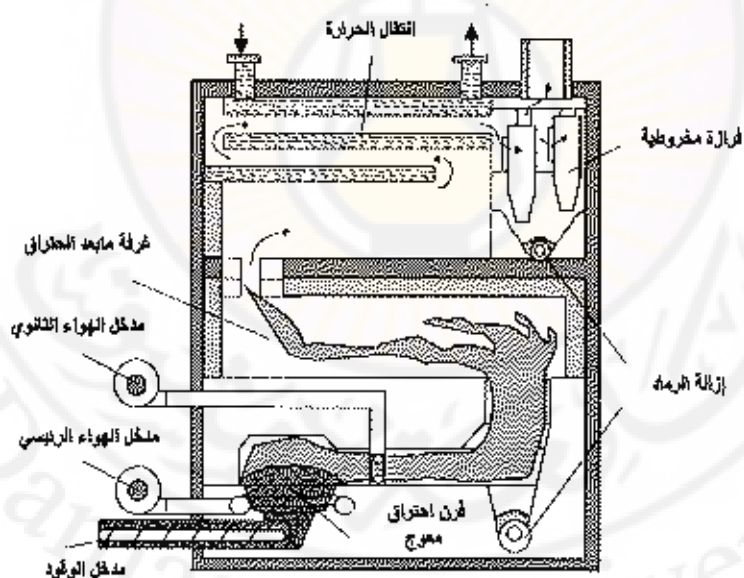
ويتميز هذا النظام بأن له قدرة احتراق أعلى. ويعمل الفرن (الذي يسمى الفرن الهولندي) في أغلب الأحيان فقط كمولد غاز، والاحتراق الكامل يتم في المرجل الذي يرتبط فيه الفرن. ويبين الشكل رقم (11-2) مبدأ عمل هذا النظام. يتم استبدال المشبك في التطبيقات الحديثة من الفرن الهولندي بأرضية صلبة. إن الفرن الهولندي موثوق و بسيط ورخيص. لكن عوائق استخدام هذا النظام هو تكاليف الصيانة المرتفعة والقدرة المنخفضة لتحمل التغيرات والرماد والكربون الناتج عن عملية الحرق. يتطلب الفرن الهولندي حالة عمل مستمرة لبقاء نسبة الاحتراق عالية (تغذية مستمرة بالوقود).

يبين الشكل رقم (11-3) نظام حرق بتغذية سفلية للخشب. يغذى الوقود إلى الفرن من مكان محدد تحت المشبك. ويكون حجم الوقود الأقصى تقريباً 10*10*65 ملليمتر.



الشكل 11-3: نظام حرق بتغذية سفلية للخشب [20]

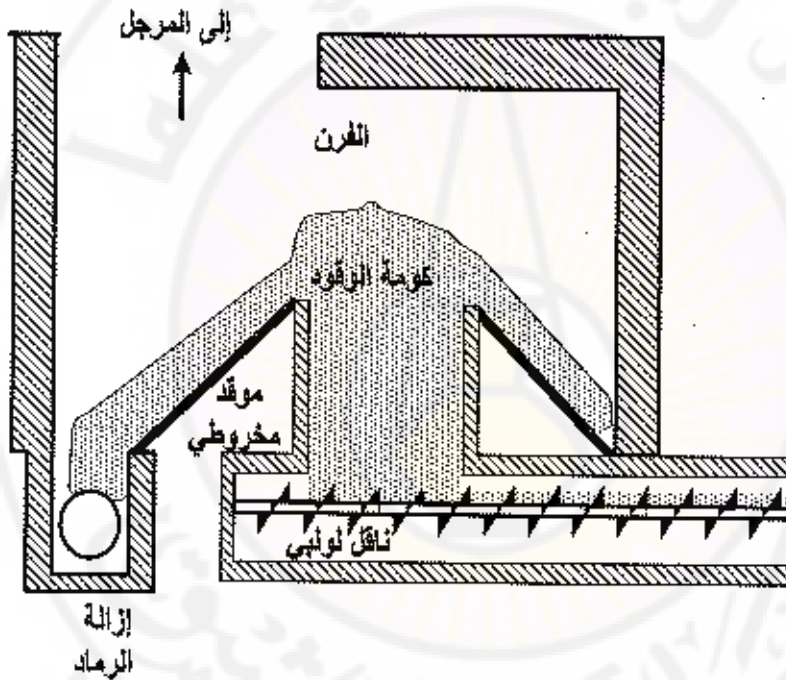
بينما يبين الشكل رقم (11-4) مخطط توضيحي نظام حرق للخشب ذي تغذية آلية من الأسفل.



الشكل 11-4: نظام حرق للخشب ذي تغذية آلي من الأسفل [20]

11-2-5-2 أنظمة الحرق ذات المشابك المخروطية الثابتة:

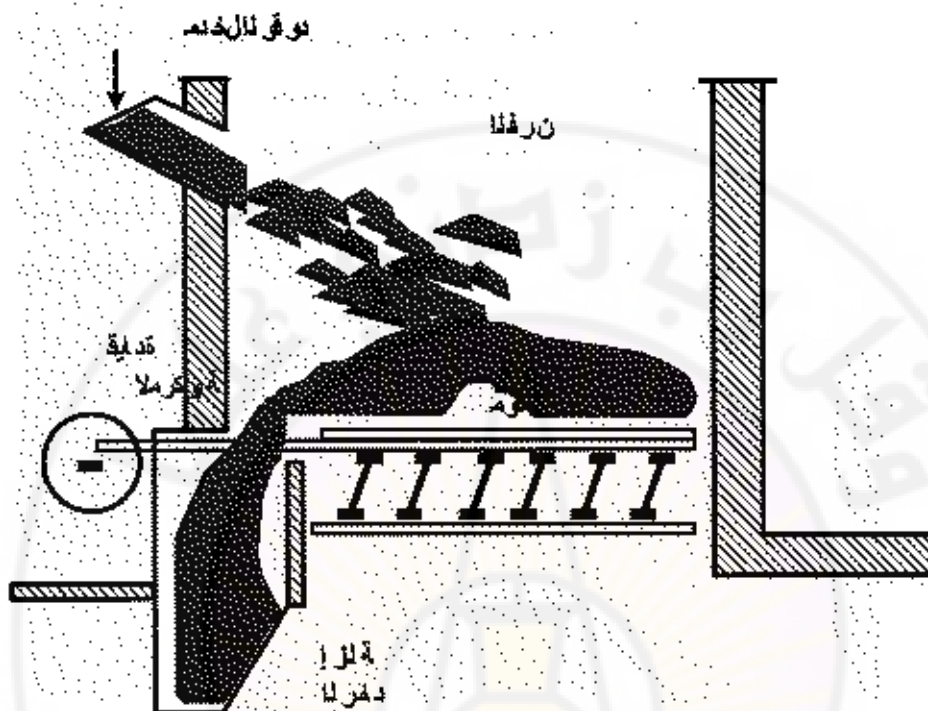
يندرج الكثير من أنظمة الحرق تحت هذا الصنف. الكثير من المشابك (المطاحن) الصغيرة تعود إلى هذا الصنف. يركب المشبك أو جزء منه عادة في غرفة الاحتراق. إن الأنظمة من هذا النوع تشبه تلك ذات المشابك المستوية ماعدا شكل المشبك. تناسب المشابك المخروطية الوقود ذي الرطوبة العالية أكثر من المشابك المستوية. يحرق الوقود عادة في أفران ذات تغذية سفلية كما هو مبين في الشكل رقم (11-5).



الشكل 11-5: نظام حرق للخشب ذو مشبك مخروطي [20]

11-2-5-3 أنظمة الحرق ذات المشابك الميكانيكية:

تستخدم أنظمة الحرق هذه في الأفران صغيرة أو متوسطة الحجم. ويكون المشبك ثابتاً ويتألف من قضبان مرتبطة مع بعضها ميكانيكياً لتتمكن من الدوران 90 درجة للتخلص من الرماد، كما هو مبين في الشكل رقم (11-6).

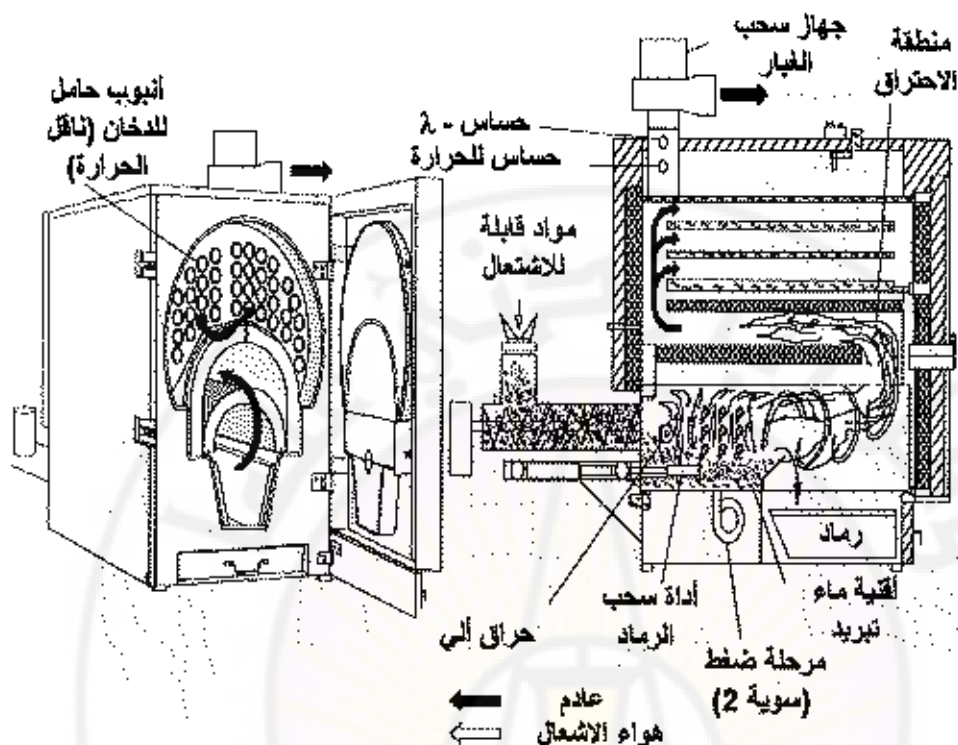


الشكل 11-6: نظام حرق للخشب ذو مشبك ميكانيكي [20]

11 - 2 - 5 - 4 أنظمة الحرق ذات المشابك المهتزة:

تستعمل الأنظمة في الولايات المتحدة الأمريكية لحرق نفايات الخشب حيث تماثل هذه الأنظمة أن لها قدرة احتراق عالية جداً. ينزل الوقود على مشبك الطحن بينما هو خاضع لاهتزازات المنقطة تنشأ من محرك.

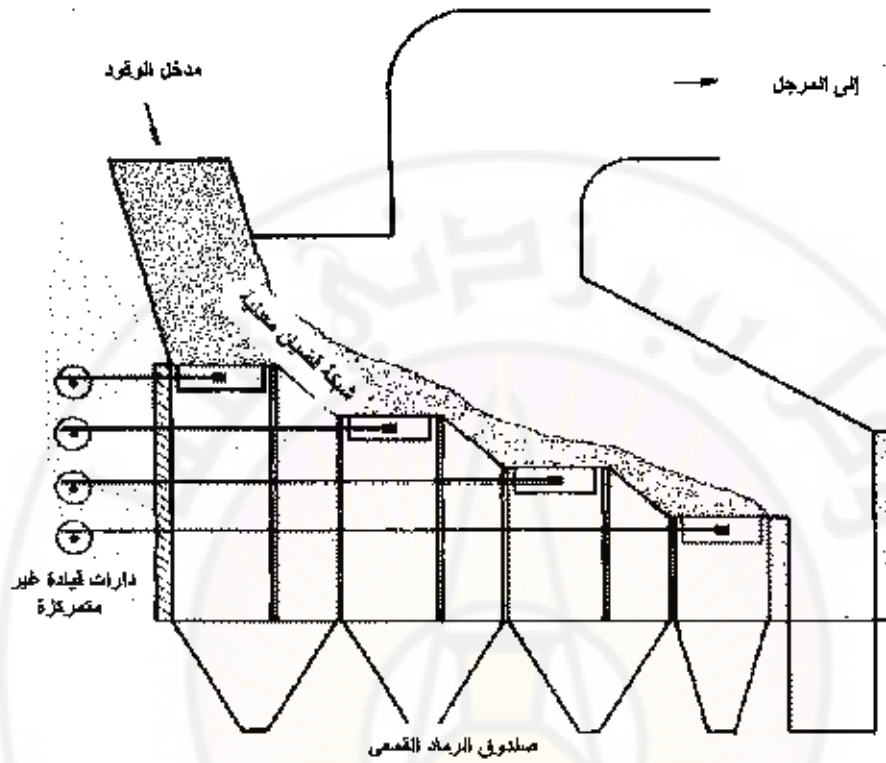
تقوم هذه الاهتزازات الوقود باتجاه جبهة المشبك. بجف الوقود ويحترق أثناء حركته إلى أسفل المشبك ويفرغ الرماد إلى سير نقال في مقدمة النظام. ويبين الشكل رقم (11-7) نظام حرق للخشب يتم التزويد فيه من الأسفل مع سخان ماء ويتم سحب الرماد بشكل يدوي:



الشكل 11-7: نظام حرق للخشب يتم التزويد فيه من الأسفل مع سخان ماء [20]

11 - 2 - 5 - 5 أنظمة الحرق ذات مشابك مائتة وميكانيكية:

تبنى المشابك عادة بحيث تميل بعض الشيء. ويبين الشكل رقم (11-8) مثل هذا المشبك والتي يدعى مشبك (Kablitz). ويقسم هذا المشبك إلى أجزاء منفصلة، كل منها مجهز بنظام دفع خاص. إن الفائدة الكبيرة لهذا المشبك هو كونه ملائماً للاستخدام في حرق الوقود "الصعب"، مثل اللحاء. ولكن من ناحية أخرى ثمنه مرتفع.



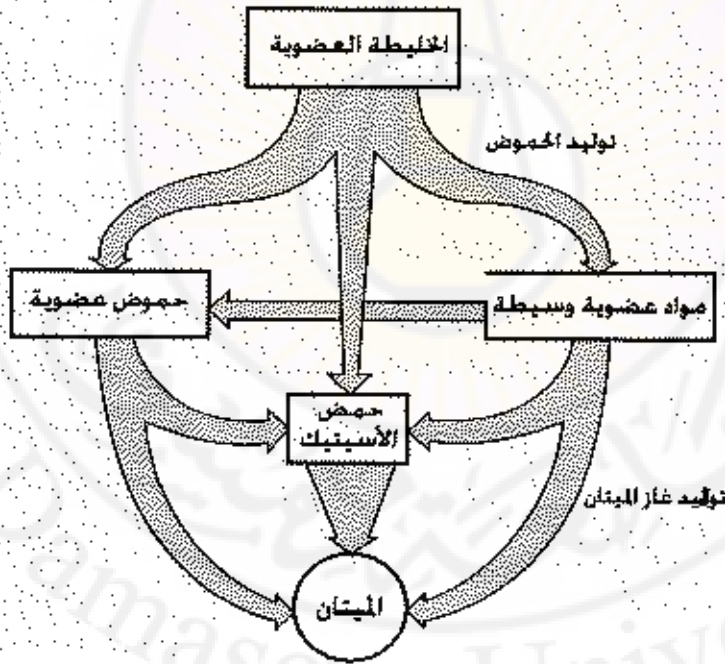
الشكل 11-8: نظام حرق للخشب ذو مشبك مائل وميكانيكي. [20]

11 - 3 إنتاج الغاز العضوي: Biogas [11],[18]

يمكن أن نعتبر التحويل البيولوجي للكتلة الحيوية على أنه تحليل أنزيمي مولد للطاقة بواسطة كائنات حية مجهرية من أنواع البكتيريا، ويتم هذا التحليل في أوساط خالية من لهواء أي بعيدة عن الأوكسجين. أن أهم طرق التحويل البيولوجي للكتلة الحيوية هي التالية:

- إنتاج غاز الميثان وثاني أكسيد الفحم عن طريق عملية التخمير اللاهوائي للكتلة الحيوية الموجودة في القمامة الصلبة والنفايات السائلة.

- إنتاج الإيثانول عن طريق عملية التخمير اللاهوائي للمواد السكرية التي يمكن الحصول عليها من المواد النشوية ومواد السليلوز الخشبي.
 - إنتاج الإيثانول عن طريق عملية تحليل مائي أنزيمي لتفكيك بلمرة السليلوز الخشبي وتحويله إلى سكريات بسيطة.
- وتجدر الإشارة إلى أن أكثر هذه الطرق انتشاراً في دول العالم والتي أصبحت تقنيات سهلة وشائعة الاستعمال ويمكن استثمارها تجارياً هي طريقة التخمير اللاهوائي للكتلة العضوية، لإنتاج غاز الميثان مع ثاني أكسيد الكربون (الغاز الطبيعي).
- وتسمى عملية التحويل البيولوجي هذه بعملية الهضم اللاهوائي ويمكن أن تعتبر هذه العملية من وجهة نظر ميكروحيوية على أنها تتم على مرحلتين منفصلتين. وتتجزأ هاتين المرحلتين بواسطة كائنات حية ميكروية كما هو مبين في الشكل (9 - 11).



الشكل 9- 11: مراحل عملية الهضم اللاهوائي لإنتاج الميثان [6],[11].

وتتم في المرحلة الأولى لهذا التحويل عملية ترطيب الكتلة العضوية ثم تخميرها وتحويلها إلى أحماض بسيطة وذلك تحت تأثير بكتريا لاهوائية تسمى - مولدات الأحماض.

أما في المرحلة الثانية فإن هذه الأحماض العضوية تتحول إلى منتجات غازية تضم غاز الميثان وغاز ثاني أكسيد الفحم وذلك تحت تأثير فئة أخرى من البكتريا اللاهوائية والتي يطلق عليها أسم - مولدات الميثان.

وتوجد في الطبيعة مجموعات متنوعة من البكتريا مولدة الميثان. كل منها يستطيع أن يخمر فئة محدودة من المواد العضوية المكونة للكتلة الحيوية. وكل مجموعة من هذه البكتريا لها صفاتها الخاصة وتستطيع أن تتوالد وتتزايد بشكل سريع أو بطيء حسب بنيتها الميكروحيوية. كما وأنها تستطيع أن تنفذ عملية التخمير بسرعات مختلفة حسب أنواعها.

تعتبر عملية الهضم الحيوي عملية صديقة للبيئة، بسيطة التطبيق، واقتصادية، إذ لا حرق فيها، ولا انطلاق غازات سامة، ولا رشاحة، ولا رائحة، ولا حاجة لمساحات لدفن النفايات. وتمتاز هذه العملية بأنها تخفّض 50 % من حجم المخلفات، وتخفّض 25 % من وزن المخلفات، وتمتاز أن النتروجين المتوفر في السماد الحيوي الناتج هو أكثر ملائمة للنبات مما هو في السماد الناتج عن المخلفات المجففة بوجود الهواء، ولهذا يسمى الهاضم الحيوي أيضاً مصنع التخصيب الحيوي. ويمكن تحديد مدخلات ومخرجات الهاضم الحيوي كما يلي:

1 - مدخلات الهاضم:

- مخلفات حيوانية.
- مخلفات نباتية.
- مخلفات منزلية عضوية.
- مخلفات صناعية عضوية - مخلفات الصناعات الزراعية.
- مصانع الأغذية.

2 - مخرجات الهاضم الحيوي

- السماد الحيوي: هو سماد عضوي عالي الجودة خالٍ من العوامل الممرضة، دون روائح لا يجذب الحشرات.

- الغاز الحيوي: يمكن استخدامه كطاقة حرارية بديلة في تسخين المياه والتدفئة وتوليد الطاقة الكهربائية.

إن أهم محاسن استثمار الهاضم السماد الحيوي الناتج فهي:

- يوفر الهاضم تسميداً مجانياً للأراضي، يجنب الغاز الناتج حرق أطنان من الحطب في الأرياف، مما يوفر فرصة حقيقية في الحفاظ على الغطاء النباتي، كما يوفر كميات كبيرة من الوقود التقليدي لإنتاج الطاقة المستخرجة نفسها من الغاز الناتج.

- يكون السماد الناتج غنياً بالمغذيات العضوية للتربة الزراعية.

- يكون السماد الناتج من الهاضم أقل حجماً من المخلفات الطازجة.

- يقضي الهاضم اللاهوائي على كافة الجراثيم مسببات الأمراض.

- يهضم بذور الحشائش الضارة المتواجدة في مخلفات طرية.

- يمتلك السماد الناتج تركيبة متجانسة متوازنة مثالية من عناصر ومغذيات هامة مما يسهل امتصاصه من النبات.

- يكون السماد الناتج نظيفاً تماماً.

- ينتج الهاضم طاقة حيوية - الغاز - ذات تقنية بسيطة، ومتوفرة، ومبسرة حتى في الأماكن البعيدة عن مصادر الطاقة التقليدية، وهي لا تحتاج لاستثمارات عالية وتمويل مالي كبير، لا تطلق ملوثات بيئية وإنما يمكن أن تكون وسيلة للتحكم بالملوثات البيئية.

- يعطي الغاز الحيوي طاقة حرارية عالية، نظيفة، رخيصة.

- الطاقة الناتجة غير ناضبة، وكافية لمتطلبات المنزل، المزرعة والتجمعات الإنسانية، ويمكن توليد طاقة كهربائية كافية لاستهلاك المزرعة والتجمعات السكانية البعيدة..

11 - 3 - 1 توليد الغاز العضوي بواسطة هاضم المواد الحيوية:

تعرف طاقة الغاز العضوي على أنها الطاقة الناتجة من حرق الغاز العضوي الذي ينتج من

تفكيك وهضم المواد العضوية بعد خلطها بالماء، حيث يتم خلط المادة العضوية (قش، مخلفات حيوانية، مخلفات بشرية، مخلفات مصانع غذائية...) مع الماء حتى الحصول على نسبة تقريبية للمواد الجافة في الخلطة من (10 - 20 %) ثم توضع هذه الخلطة في وسط معزول عن الهواء بحيث يكون مغلقاً بإحكام في بعض الأحيان، أو في وسط له تصميم خاص يسمح بإدخال وإخراج خلطة يومية مع إبقاء حوض الهضم معزولاً عن الهواء، ويسمى الخزان الذي يحقق هذه الشروط بالهاضم. تتفكك هذه المواد العضوية، تحت شروط العزل عن الهواء وعند درجة الحرارة الملائمة

(25 - 50 م) والخلط مع الماء، منتجة خليطاً غازياً هو الغاز العضوي، لأن مصدره عضوي وعناصره هي عناصر المواد العضوية. ويتألف هذا الخليط من الميثان (CH₄) الذي يؤلف الجزء الأكبر منه، وتتراوح نسبته في الخليط بين (55 - 85 %)، ثم غاز ثاني أكسيد الكربون (CO₂) وتتراوح نسبته بين (13 - 43 %)، وغاز كبريت الهيدروجين (H₂S) وتتراوح نسبته بين (0.1 - 2 %)، وهو غاز سام وذو رائحة كريهة جداً، وهناك غازات أخرى مهمة كالنشادر.

11 - 3 - 2 أنواع الهاضم المستخدمة في دول العالم:

من ضمن الكثير من أشكال وأنواع الهاضم الحيوي، هناك نوعان فقط انتشر استخدامهما في العالم لنجاحهما في الاختبارات التي أجريت عليها وهي:

أ - الهاضم ذو قبة الغاز الطافية (المتحركة)، ويسمى الطراز الهندي.

ب - الهاضم ذو قبة الغاز الثابتة، ويسمى الطراز الصيني.

يمكن الفرق الرئيسي بين الطرازين في أن الأول يخزن الغاز تحت قبة متحركة وتحت ضغط ثابت نسبياً لتغيير حجم القبة (خزان الغاز) ولهذا يعتبر آمن الاستعمال. أما الثاني فيخزن الغاز تحت قبة ثابتة ذات حجم ثابت مما يؤدي إلى زيادة الضغط بشكل متزايد وتخزين كمية أكبر من الغاز. نحتاج في الطراز الصيني إلى حذر أكبر مقارنة الطراز الهندي من حيث الخطورة ولكن الطراز الصيني يعتبر أقل تكلفة.

11 - 3 - 3 مراحل الهضم اللاهوائي

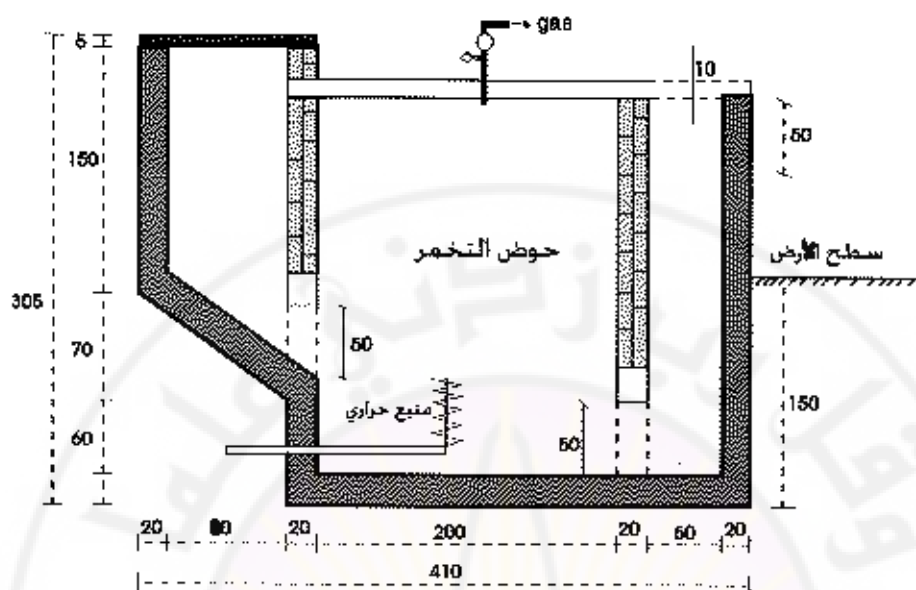
تتألف الأنسجة العضوية من ألياف معقدة التركيب وهي عبارة عن عدة أجزاء متماثلة ومتصلة مع بعضها - بوليمير - ويتم هضمها لا هوائياً حتى الحصول على الغاز عبر ثلاث مراحل.

تتحول الألياف في المرحلة الأولى بالتحليل الأنزيمي إلى جزيئات قابلة للذوبان، وتكون هذه الجزيئات هي المواد الأساسية للمرحلة الثانية حيث تتحول خلال هذه المرحلة إلى أحماض عضوية أهمها حمض الخل، وتكون هذه الأحماض أساساً للمرحلة الثالثة التي تعمل خلالها البكتيريا الميثانية محولة هذه الأحماض إلى غازات كثيرة أهمها الميثان وثاني أكسيد الكربون وكبريت الهيدروجين. ويبين الشكل رقم (10 - 11) مخططاً للهضم من النوع الصيني الذي تم تنفيذه في المبقرة الشامية بدمشق والمعروف باسم تجربة نقابة المهندسين السوريين،

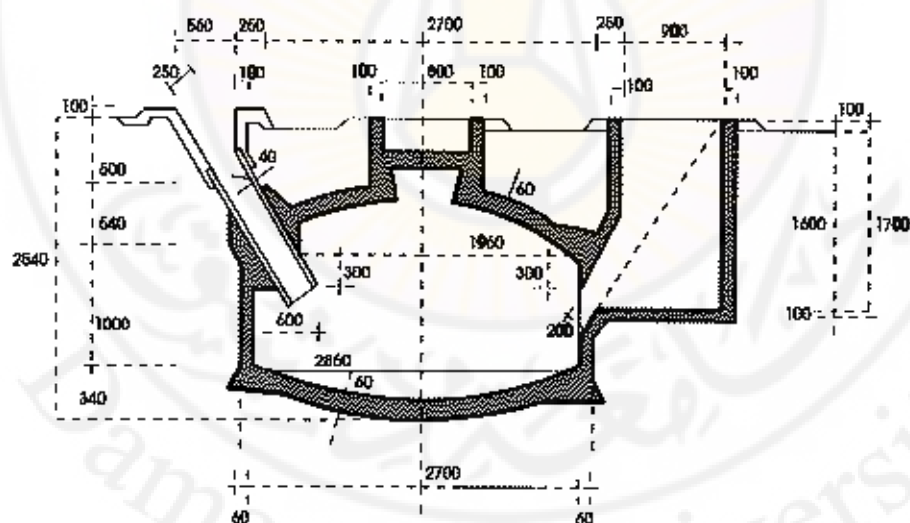
ويبين الشكل رقم (11 - 11) مخططاً للهضم من النوع الهندي. وسنستعرض هذه المراحل بالتفصيل.

أ - مرحلة تفكيك السيللوز :

إن المواد الأساسية لهذه المرحلة هي المواد العضوية المختلفة سواء كانت نباتية أو حيوانية أو بشرية أو صناعية، وتتألف هذه المواد أساساً من الكربوهيدرات مع بعض اللبيد والبروتين والمواد غير العضوية. إن الكربوهيدريت الرئيسي هو السيللوز،



الشكل رقم (10-11) مخطط الهاضم من النوع الصيني [6],[14]



الشكل رقم (11-11) مخطط الهاضم من النوع الهندي [12]

والسيللوز النصفي، والخشبي، وتوجد هذه المواد في المخلفات الحيوانية والبقايا الزراعية، ويفسر وجودها في المخلفات الحيوانية بأنها لا تهضم غالباً ولذا تحتاج هذه المواد لكثير من البكتيريا، فتحتاج لبكتيريا قادرة على تحليل السيللوز وأخرى قادرة على تحليل الليبيد والدهون والبروتين أنزيمياً.

إن الفعالية السيللوزية هي العامل الأهم لتحويل المواد الخام المعقدة إلى مواد عضوية بسيطة وقابلة للذوبان. ويشكل السيللوز النسبة الكبرى من المادة الجافة الكلية في البقايا الزراعية. كذلك يولف السيللوز الجزء الأكبر من المخلفات الحيوانية والبشرية، فبأخذ عينة من النفايات الحيوية تم الحصول على النتائج التالية:

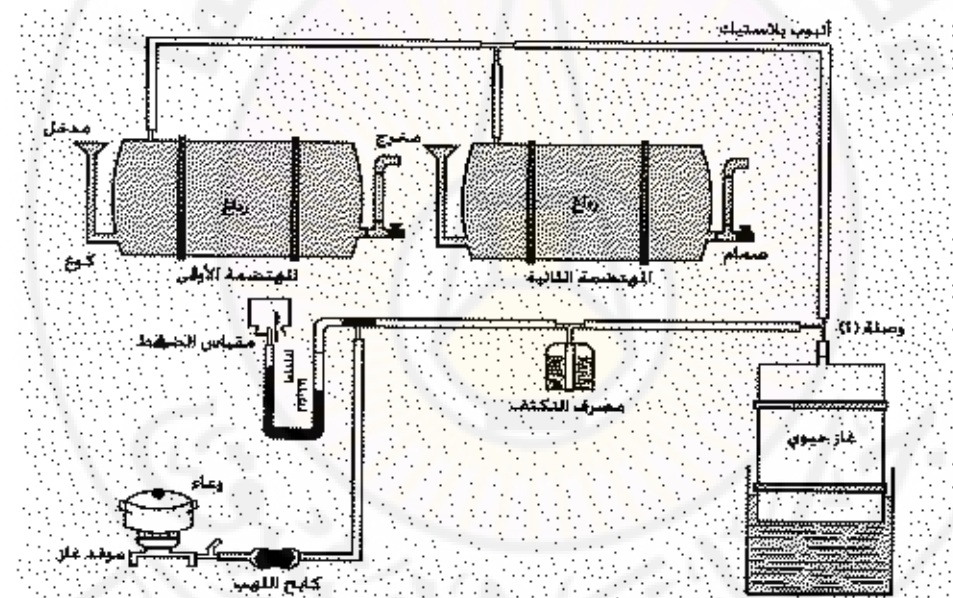
السيللوز النصفي:	6 %	البروتين:	19 %
الرماد:	34 %	السيللوز:	34.5 %
المركبات اللبيدية:	14 %		

يتألف السيللوز من وحدات متماثلة ومتحدة مع بعضها من سكر الجلوكوز، وتشكل هذه الوحدات سلسلة طويلة جداً ولها فروع معقدة. تقوم البكتيريا بتقصير السلسلة وتبسيط فروعها إلى جزيئات سكر مزدوجة وبعد ذلك إلى جزيئات سكر أحادية الجزيء قابلة للاثلال بالماء ولذا تسمى هذه البكتيريا المفككة أو المكسرة. وتتحول إلى جزيئات السكر بعد ذلك إلى أحماض عضوية.

تقسم البكتيريا المفككة إلى قسمين حسب درجة الحرارة التي يحدث عندها الهضم، فهناك بكتيريا ميز وفيليه تعمل في وسط مثالي عندما تكون درجة الحرارة (30 C - 40) كما في معدة الحيوانات. أما البكتيريا الأخرى التي تسمى الموفيليه - فتعمل بشكل مثالي عند درجة حرارة (50-60 C) وتكون درجة الحموضة المناسبة لكلا نوعي البكتيريا من (6-7 PH) .

ب - مرحلة إنتاج الأحماض:

تعتبر المواد البسيطة الناتجة عن التحلل المائي الذي يحدث خلال المرحلة الأولى بالتفاعل البكتيري هي المواد الأساسية للمرحلة الثانية، ففي هذه المرحلة تتولد الأحماض كنواتج أخير لعمليات بناء ودثور البروتوبلازما في البكتريا التي تتغذى بالكربوهيدرات حيث يكون حمض الخل وحمض اللبن هما الناتجان الرئيسيان. ويعتبر حمض الخل المادة الأساسية لتشكيل الميثان. وتبين الدراسات أن نسبة (10%) تقريباً من الميثان الناتج أصله حمض الخل، وهناك أنواع كثيرة من البكتريا تعمل في هذه المرحلة ويعتمد ذلك على نوعية المواد الموجودة وعلى الظروف المحيطة. يبين الشكل رقم (11-12) مخطط نظام هاضم هندي كامل.



الشكل 11-12: مخطط لنظام هاضم حيوي كامل [4]

ج - مرحلة إنتاج الميثان:

إن البكتريا الميثانية قليلة جداً في المواد المستخدمة، ونعتبر المواد الأساسية لهذه المرحلة: حمض الخل أو الميثانول أو ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين ومواد أخرى

مثل حمض النمل (الفورميك). وهذه المواد غير مهمة لأن وجودها في التفاعل لا هوائي نادراً جداً. تعتمد البكتريا الميثانية على بكتريا المرحلتين الأولى والثانية للترود بمغذيات بأشكال مفيدة. وعلى سبيل المثال: مركبات النتروجين العضوية يجب أن تفكك إلى النشادر لكي تضمن استخداماً فعالاً للنتروجين بالبكتريا الميثانية.

تعتبر البكتريا المولدة للميثان حساسة جداً للظروف البيئية لأنها ملزمة بحياة لا هوائية ويمكن تثبيط نموها بكميات قليلة من الأوكسجين، لذلك فمن الضروري المحافظة على ظروف بيئية مناسبة للمحافظة على استمرار النمو وتنشيطه. وهناك مواد أخرى قادرة على تثبيط البكتريا الميثانية كالمواد عالية الأكسدة مثل النترات. كذلك فإن تغيرات درجة الحموضة PH تؤثر كثيراً على هذه البكتريا، وتكون الدرجة المثالية للحموضة بين (7.2-7)، ويكون إنتاج الغاز جيداً بين (6.6 - 7.2). وعند انخفاض درجة الحموضة عن (6.6) تتأثر تلك البكتريا بشكل كبير. أما عند ما تكون درجة الحموضة ($PH = 6.2$) فإن الوسط الحمضي يصبح ساماً. ومع ذلك يلاحظ أنه يستمر إنتاج الحمض عند هذه الدرجة وتبقى البكتريا الحمضية تنتج حمضاً حتى ($PH = 4.5 - 5$). وفي ظروف الهضم المتوازنة تحافظ التفاعلات الكيميائية على درجة حموضة مثالية وثابتة بشكل أوتوماتيكي.

وهناك مواد سامة أخرى مثل بعض الأملاح المعدنية المنحلة من معادن كالنحاس والتوتياء والنيكل، وكذلك بعض المواد القلوية، عندما تتجاوز في تركيزها حدوداً معينة، مثل الصوديوم والبوتاسيوم والكالسيوم والمغنيزيوم. وتظهر كافة المواد السابقة آثاراً سمية فور نقص الغاز الناتج.

أما كيفية تشكل الغاز الحيوي فهي على عدة أنماط، حيث يمكن أن تنتج أحجام متساوية من ثاني أكسيد الكربون والميثان عن تحويل الكربوهيدرات، ولا ينطلق كل ثاني أكسيد الكربون بل ينحل قسم منه في الماء. ويتفاعل ثاني أكسيد الكربون كذلك مع شاردات الهيدروكسيل ليشكل البيكربونات، التي يتأثر تركيزها بالقلوية، ودرجة

الحرارة، ووجود مواد أخرى في السائل. ويزداد الظروف المساعدة على تشكل البيكربونات، تزداد نسبة غاز الميثان من الغاز العضوي الناتج. تنتج شاردات الهيدروكسيل أساساً خلال تحليل البروتين القابل للتفكك بالإنزيمات خلال المرحلة الأولى والثانية، ولذا فإن كمية البروتين في المادة تتحكم بشكل كامل في كمية أكسيد الكربون الذي يتواجد على شكل بيكربونات. وتقل كمية أكسيد الكربون التي تتحد مع السائل المتدفق مشكلة بيكربونات كلما ازدادت درجة الحرارة وكذلك كلما نقصت درجة الحموضة PH.

11 - 3 - 4 الهاضم الحيوي كمصدر جديد للطاقة ومصنع للسماد الطبيعي:

تعتبر تكنولوجيا الغاز الحيوي تكنولوجيا حديثة العهد، ذات توجه محافظ على البيئة، تعتمد على تحلل المواد العضوية إلى مكوناتها الأولية الأساسية بواسطة بكتيريا تحت ظروف حرارية ثابتة مناسبة وبغياب الأوكسجين. ينتج عن هذه العملية خليط قابل للاحتراق مكون من غازات الميثان وثاني أكسيد الكربون (يدعى الغاز الحيوي). وينتج أيضاً سماد طبيعي معالج على شكل سائل.

ينتج الغاز الحيوي عادة عندما تتحلل المواد العضوية في ظروف لا هوائية. وعملية التحلل اللاهوائي تحدث بشكل طبيعي في أعماق البحيرات والتجمعات المائية وأعماق التربة، وأيضاً في مواقع من صنع الإنسان مثل الهاضم الحيوي ومكببات النفايات الصلبة. يتكون الغاز الحيوي من غاز الميثان بنسبة 60% وثاني أكسيد الكربون بنسبة 40% و كمية بسيطة من النيتروجين والهيدروجين وكبريت الهيدروجين. يخرج غاز الميثان وغاز ثاني أكسيد الكربون بصورة حرة إلى الغلاف الجوي جراء عمليات التحلل اللاهوائي مسبباً زيادة تأثير ظاهرة الاحتباس الحراري.

إن أهم الفوائد التي تنتج استخدام الهاضم الحيوي هي التالية:

- إنتاج أعلاف للثروة الحيوانية
- إنتاج سماد عضوي لتسميد التربة

- إنتاج غاز حيوي لاستثماره كوقود

للتأكد من التزود المستمر بالغاز الحيوي يجب أن يغذى الهاضم يوميا وبشكل مستمر بالمواد العضوية على شكل سائل ينتج من خلط المواد العضوية بالماء قبل إدخالها إلى جسم الهاضم من حوض الإدخال. يفضل أن يكون حوض الإدخال متصلا مباشرة بحظيرة الأبقار أو الغنم أو الدواجن أو مكان تجمع المخلفات العضوية.

11 - 3 - 5 المميزات الفنية للهاضم الحيوي:

بين الجدول رقم (11-3) أهم المميزات الفنية التي تتعلق بالهاضم الحيوي وبأدائه.

الجدول 11-3 أهم المميزات الفنية التي تتعلق بالهاضم الحيوي وبأدائه [11],[20]

درجات الحرارة المناسبة للهضم	20-35 درجة مئوية
فترة بقاء المواد العضوية في الهاضم	20 - 100 يوم حسب نوع المادة العضوية
احتواء الغاز الحيوي من الطاقة	1 diesel fuel = 0.6 kwh / m ³ gas
إنتاج الغاز الحيوي	0.5 م ³ غاز / 3 م ³ من حجم الهاضم في اليوم
إنتاج بقرة واحدة	9-15 كغ روث/اليوم = 0.4 م ³ غاز/اليوم
احتياج الطبخ من الغاز الحيوي	0.1 - 0.3 م ³ / شخص في اليوم
احتياج مصباح واحد	0.1 - 0.15 م ³ / ساعة
احتياج المولد الكهربائي من الغاز	0.6 kwh / m ³ gas

11 - 3 - 6 مقارنة بين تخمر المواد العضوية الهوائية و تخمرها اللاهوائية:

بين الجدول 11-4 مقارنة عملية تخمر الكتلة الحيوية بوجود الهواء أي الأوكسجين مع عملية تخمر الكتلة الحيوية بدون وجود الهواء. مثال عملي بسيط:
يبلغ محتوى الطاقة في المتر المكعب الواحد من الغاز الحيوي 6.5 كيلو وات ساعي وهذا ما يعادل 0,6 لتر من الوقود. ويصل إنتاج البقرة الواحدة من الروث حوالي 12

كيلو غرام في اليوم. ولقد تبين أن 100 بقرة تعطي في السنة الواحدة 62050 متر مكعب من الغاز الحيوي أي ما يعادل 620.5 متر مكعب من الغاز لكل بقرة في السنة ومعدل 1,7 متر مكعب في اليوم. ويبلغ محتوى الطاقة الإجمالي الناتج عن 100 بقرة سنوياً 403325 كيلو وات ساعي من الكهرباء وهذا ما يعادل 40000 لتر من الوقود الحراري سنوياً. أي أنه يمكن القول أن ناتج البقرة الواحدة من الطاقة يصل إلى حوالي 10 كيلو وات في اليوم. هذا يعني أن مزرعة مؤلفة من سبع بقرات قادرة بإمداد منشأة صغيرة وذلك لإنتاج 10 متر مكعب من الغاز الحيوي يومياً أي ما يعادل 65 كيلو وات ساعي يومياً والتي تكفي وتزيد عن احتياجات أي منزل مجهز بشكل جيد بكافة اللوازم الكهربائية، حيث إن استهلاك المنزل (الألماني مثلاً) سنوياً من الكهرباء

الجدول 11- 4: مقارنة عملية تخمر الكتلة الحيوية بوجود الهواء أي الأوكسجين

مع عملية تخمر الكتلة الحيوية بدون وجود الهواء. [11],[20]

تخمير هوائي	تخمير لا هوائي	
- ضرورة وجود أكسجين. - التفاعل بسيط ومباشر من خلال أكسدة المادة العضوية إلى CO₂ AND H₂O	- ضرورة عدم وجود أكسجين. - التفاعل معقد ويمر بمراحل متتالية ومتداخلة ويحول المادة العضوية إلى مواد بسيطة ثم إلى غاز حيوي.	ظروف التخمر:
- غازات معظمها ثاني أكسيد الكربون وماء.	- الغاز الحيوي (الميثان وثاني أكسيد الكربون).	نم الناتج التخمر:
- سماد عضوي منخفض الجودة. - تنطلق مباشرة في صورة حرارة أوكسدة.	- سماد عضوي عالي الجودة. - تختزن في صورة محتوى حراري بالغاز الحيوي.	الطاقة المولدة:
- لا يحتاج إلى أجهزة خاصة	- يتطلب استخدام أجهزة خاصة	الأجهزة:

لضمان العزل التام عن الهواء ومعزولة حرارياً مع استخدام و - سائل تقليب.	بل يكفي بتكويم المخلفات ونقلها بين حين وآخر، وفي العمليات الكبيرة قد يتطلب الأمر أجهزة نفث هواء.	المستخدمة:
--	--	------------

يعادل وسطياً حوالي 3500 كيلو وات ساعي. ولقد بينت إحدى الدراسات أنه يمكن إنتاج حوالي 500 متر مكعب من الغاز الحيوي وذلك بمعالجة 1000 كيلو غرام من الفضلات العضوية الناتجة عن المخرجات اليومية لمدرسة مؤلفة من 12000 دجاجة . تصل تكلفة توليد الكيلو وات الساعي الواحد أثناء توليد الحرارة حوالي 0.05 يورو . كما وتبلغ تكاليف توليد التيار الكهربائي حوالي 0,1 يورو لكل كيلو وات ساعي .

11 - 3 - 7 ميزات وفوائد تكنولوجيا الغاز الحيوي:

أولاً: الفوائد الفورية:

- توفير في الطاقة عن طريق تخفيض استهلاك بعض أنواع الوقود مثل الكاز، الغاز، الكهرباء، الخشب أو الفحم.

... توفير السماد للزراعة وإمكانية بيع السماد.

ثانياً: الفوائد النوعية :

- تحسين الوضع الصحي، لأن جميع الجراثيم تقتل خلال عملية الهضم.

... توفير إضاءة أفضل في مناطق لا تصل إليها الكهرباء مثل المزارع البعيدة عن مصدر الكهرباء.

- الاستقلالية في الحصول على الطاقة.

- تحسين الوضع الصحي العام في مجال تربية المواشي.

- تحسين بنية التربة بعد استعمال السماد الطبيعي الناتج في الهاضم.

ثالثاً: الفوائد الإقليمية:

... تطوير نظام غير مركزي لإنتاج الطاقة يشغل ويراقب من قبل المستفيدين.

- زيادة عدد الأشجار والتقليل من تجريد الأرض من الأشجار.

- تحسن في الإنتاج الزراعي.
- خلق فرص عمل ودخل جديد للمزارعين.
- تطوير في البنية التحتية.
- انتشار المعرفة بعلوم البيئة بين أوساط المزارعين.

1.1 - 3 - 8 العوامل المؤثرة على الهاضم الحيوي البسيط:

إن أهم العوامل المؤثرة على عمل الهاضم الحيوي هي الظروف المناخية ونوعية المواد العضوية المغذية للهاضم.

أ- الظروف المناخية:

تؤثر درجة حرارة الوسط المحيط على عمل الهاضم وعلى سرعة تحليل المواد العضوية الموجودة في الهاضم حيث تستطيع البكتيريا المحللة أن تنشط عند درجات أكبر من 15 درجة مئوية.

ب- نوعية المواد العضوية المغذية للهاضم:

- مخلفات حيوانية مثل الروث والنفايات السائلة وبقايا العلف.
- مخلفات نباتية مثل القش والحشائش وبقايا الحديقة.
- مخلفات المطبخ مثل بقايا الطعام.

ت- درجة الحموضة: PH

تحتاج الكائنات الحية الدقيقة في التخمر اللاهوائي إلى وسط متعادل لنتمكن من الأداء بكفاءة على الرغم من أن بكتريا التحلل تحول المواد العضوية إلى أحماض يمكن أن تعيش في ظروف حامضة لها PH يعادل 5.5 إلا أن بكتريا الميثان تعمل بكفاءة في حدود PH يعادل 6.8-8.5 وأثناء عملية التخمر يحدث توازن بين بكتريا تكوين الأحماض وبكتريا إنتاج الميثان ويبقى PH قريبا من (7) لذلك عند بدء التشغيل يفضل استخدام بادئ أو استخدام تركيزات منخفضة من المادة العضوية للإسراع بالوصول إلى مرحلة التوازن.

ج- نسبة الكربون إلى النيتروجين:

تحتاج بكتريا الأحماض ويكتريا الميثان إلى الكربون والنيتروجين لنموها وتستهلكها بنسبة 25-30 % كربون إلى نيتروجين وهو ما يطلق نسبة الكربون إلى النيتروجين المثلى في التخمر اللاهوائي تعادل 25-30%. يحتوي روث الماشية والأغنام على هذه النسبة تقريبا ولكنها تتغير باستمرار وبشدة طبقا للمادة العضوية المستخدمة، ويلزم المحافظة على النسب المطلوبة بخلاف المخلفات بالنسب الملائمة. ويبين الجدول رقم (11-5) النسبة بين الكربون و النيتروجين لعدد من المخلفات العضوية وكمية الغاز الحيوي الذي يمكن إنتاجه ونسبة غاز الميثان في الغاز الحيوي.

ح- تركيز المادة الصلبة في محلول التغذية:

يتراوح تركيز المادة الصلبة في محلول التغذية الممتعل في عمليات الهضم الحيوي المستمر بين (8 - 10 %) حيث تحافظ هذه النسبة على تتابع مناسب وتمنع تكون الأحماض بمعدلات أكبر من استهلاكها مما يحافظ على التوازن في عملية التخمر، ولكن في بعض عمليات التخمر المستمرة قد يتم رفع نسبة المادة الصلبة من (12-14 %) لتقليل المتطلبات الحرارية وتحسين الاقتصاديات، كما أن عملية التخمر الجاف للمخلفات الصلبة مثل القش والحطب والقمامة تتم في تراكيز مرتفعة قد تصل إلى (25-30 %) ونظرا لتكون الأحماض فإنه يضاف مواد مساعدة مثل كربونات الكالسيوم للمساعدة على التوازن.

خ- معدلات التغذية بالمواد العضوية (درجة التحميل):

تعرف بأنها كمية التغذية اليومية بالمواد العضوية مقسومة على حجم المخمر، وتمثل معدلات التغذية بالمادة العضوية أهمية كبيرة حيث زيادتها يرتفع إنتاج الغاز ولكن إلى حد معين لأن زيادتها أكثر من اللازم تؤدي إلى تراكم الأحماض العضوية لعدم تمكن بكتيريا الميثان من تحويلها إلى غاز مما قد يسبب توقف إنتاج الغاز. وتختلف معدلات التغذية بالمادة العضوية حسب تركيب المادة العضوية ونوع الهاضم المستخدم وظروف التشغيل .

الجدول رقم (5 - 11) النسبة بين الكربون و النتروجين لعدد من المخلفات

العضوية [20]

مواد التغذية:	نسبة الكربون إلى النتروجين	إنتاج (كغم/هكتار)	المزارع	نسبة الميثان (%)
روث الماشية	15	280 - 260	60-50	
روث الخنزير	13	561	—	
روث البقر	20	300 - 200	—	
روث الدواجن	16	360	—	
مخلفات نباتية	—	370	—	
مخلفات الكتان	—	430	—	
بقايا القمح	80	615	—	
مخلفات الأرز	80	640	—	
مخلفات المخاربي	15	600 - 300	58	
مصانع إنتاج	—			
الكحول	—			
المواد الغذائية	—			
الكربوهيدرات	—	750	49	
الدهون	—	1440	72	
النيتروجين	—	980	50	

خ- معدلات التغذية بالمواد العضوية (درجة التحميل): تعرف بأنها كمية التغذية اليومية بالمواد العضوية مقسومة على حجم المخمر، وتمثل معدلات التغذية بالمادة

العضوية أهمية كبيرة حيث بزيادتها يرتفع إنتاج الغاز ولكن إلى حد معين لأن زيادتها أكثر من اللازم تؤدي إلى تراكم الأحماض العضوية لعدم تمكن بكتيريا الميثان من تحويلها إلى غاز مما قد بسبب توقف إنتاج الغاز. وتختلف معدلات التغذية بالمادة العضوية حسب تركيب المادة العضوية ونوع الهاضم المستخدم وظروف التشغيل .

د- زمن بقاء الحلول في المخمر: هو متوسط عدد الأيام التي يقضيها المحلول داخل المخمر. وزمن البقاء الملائم تحكمها عوامل كثيرة منها (ظروف التشغيل مثل درجة الحرارة وطبيعة المادة العضوية المستخدمة وسهولة تخمرها ونوع المخمر المستخدم) وعادة يكون زمن البقاء حوالي 40 يوما بالنسبة لتخمير روث الماشية في الظروف العادية بدون تسخين. وتحدد سرعة تكاثر البكتيريا الحد الأدنى لزمن البقاء حيث أن انخفاض الزمن عن الفترة اللازمة لتكاثر البكتيريا يساعد على خروج البكتيريا وتناقصها في المخمر مما يسبب توقف أو انخفاض الغاز، أما الحد الأقصى لزمن البقاء فتحده عوامل اقتصادية، حيث أن زيادة زمن البقاء يؤدي إلى زيادة حجم المخمر وبالتالي زيادة التكاليف. يحتاج إنتاج الغاز الحيوي من المخمر لأول مرة إلى 17/ يوماً ثم يستمر الإنتاج بشكل تلقائي ضمن الشروط المحددة، عند التقيد بحجم الشحنة اليومية والتي يجب أن لا تتجاوز 1/60 من حجم المخمر الأصلي وأي خلل بالكمية سيؤدي إلى صدور روائح تجذب الحشرات الأمر الذي يؤدي إلى التوقف عن التغذية لفترة سبعة أيام ثم العودة حسب المعدل المطلوب.

ذ- المواد السامة في التغذية: تعتبر المضادة الحيوية والمبيدات والمنظفات الصناعية والمعادن الثقيلة مثل الكروم النيكل والنحاس والزنك مواد سامة للكائنات الحية الدقيقة التي تقوم بإنتاج الغاز الحيوي، كما أن ارتفاع تركيز الأمونيا والذي ينجم عن انخفاض نسبة الكربون إلى النتروجين قد يسبب تسمم للبكتيريا، ويبين الجدول رقم (11- 5) نسبة المواد السامة المؤثرة في عملية التخمير والحد الأقصى المسموح فيه.

الجدول رقم (11- 5) نسبة المواد السامة المؤثرة في عملية التخمير والحد

الاقصى المسموح

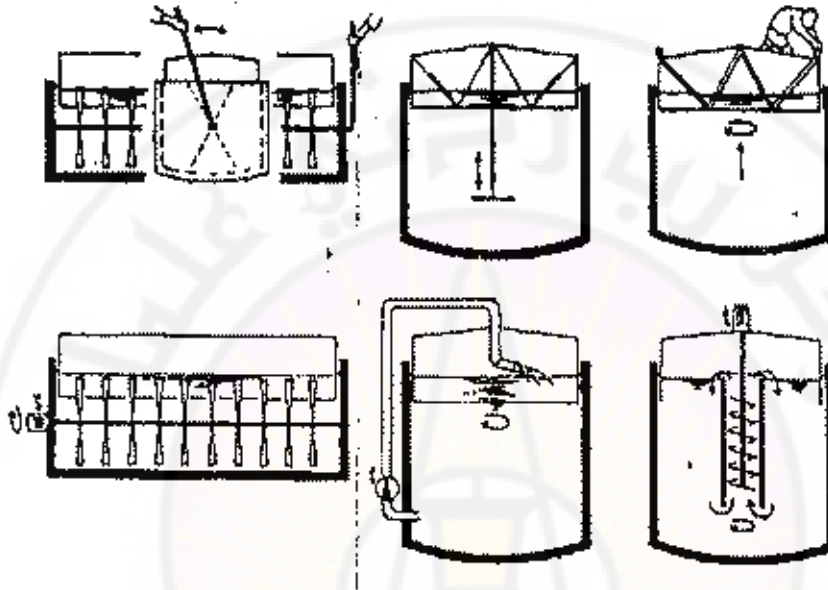
المادة السامة	الحد الأعلى المسموح	المادة السامة	الحد الأعلى المسموح
كاديوم	30 ملغ / لتر	صوديوم	5500 ملغ / لتر
النحاس	100 ملغ / لتر	بوتاسيوم	4500 ملغ / لتر
الكربون	200 ملغ / لتر	ماغنيزيوم	1500 ملغ / لتر
النيكل	500 ملغ / لتر	الكالسيوم	4500 ملغ / لتر
الميثانيد	0.4 ملغ / لتر	الكبريتات	5000 ملغ / لتر
الفينول	25 ملغ / لتر	المنظفات الصناعية	40 ملغ / لتر

ر- استخدام البادئات : يفضل عند بداية تشغيل المخمر إضافة نسبة من مخلوط تخمير نشط ذلك للإسراع في عملية التخمير حيث يحتوي هذا المنشط على نسب متوازنة من بكتيريا الميثان و بكتيريا الحمض التي يمكنها أن تعمل مباشرة بعد إضافتها ، وقد لا يحتاج الأمر إلى استعمال المنشط حيث يمكن للمخمر العمل بدونه في حالة استخدام روث الماشية. ولكن ذلك يتطلب الانتظار بضعة أيام لحين تكوّن ونمو عدد كاف من بكتيريا التحلل و بكتيريا الميثان.

ز- التقليب داخل الهاضم: وهو من العوامل الضرورية لرفع كفاءة عملية التخمير وزيادة إنتاجية الغاز وعن طريق التقليب تتجانس مكونات المخمر وتزداد فرص التلامس بين المخلفات والبكتيريا ويزداد نشاط بكتيريا الميثان مما يؤدي إلى ارتفاع معدلات إنتاج الغاز كما إن التقليب يمنع تشكل طبقة الخبث فوق سطح مخلوط التخمير وتيسرها مما يعوق صعود الغاز للأعلى.

وتجدر الإشارة إلى أن عملية التغذية اليومية بالمواد الطازجة تعتبر إحدى طرق التقليب ولذا كان من المفضل تعدد مرات التغذية اليومية لزيادة فرص التقليب. وعادة

يستخدم التقلب اليدوي أو الميكانيكي أو التقلب بإعادة دورات المحلول أو الغاز ويوضح الشكل رقم (11-13) طرق التقلب.



الشكل 11-13: طرق التقلب الممكنة [20]

11 - 3 - 9 استعمال السماد الطبيعي الناتج عن الهاضم في الزراعة:

تستهلك عملية الهضم اللاهوائي الكربون والهيدروجين والأوكسجين من المخلفات العضوية وتبقى العناصر الغذائية المهمة للنبات مثل النيتروجين والفوسفور والبوتاسيوم والتي تدخل في تركيب السماد الذي ينتج في الهاضم.

- يساوي حجم المخلف المهضوم الخارج كسماد حجم المزيغ الطازج المغذي للهاضم حيث يشكل الغاز الناتج 5-10% من الحجم الكلي فقط.

- تقلل عملية الهضم من نسبة الكربون إلى النيتروجين والذي يزيد من الأثر الإيجابي للسماد الناتج.

- يتميز المخلف المهضوم الناتج عن الهاضم والذي يستخدم سماداً عضوياً بأنه عديم الرائحة ولا يجذب الذباب والحشرات.
- يقضي الهضم اللاهوائي على الجراثيم مسببات الأمراض والديدان الضارة، ويميت بذور الحشائش والنباتات المتواجدة في المخلف الطازج.
- المخلف المهضوم (المماد الطبيعي) له تركيبة متجانسة ومتوازنة مما يسهل امتصاصه من قبل النباتات.

11 - 3 - 10 توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الحيوية:

يمكن توليد التيار الكهربائي عن طريق حوامل الطاقة الحيوية بالشكل الصلب، مثلاً عن طريق حرق الأخشاب. يوجد في ألمانيا حوالي 80 محطة حرق باستطاعة إجمالية قدرها 1.7 تيرا وات ساعي في السنة. هذا وأن التحويل الغازي لمواد الاحتراق الصلبة (مثل الخشب) لا تزال في طور البحث والدراسة.

كما ويمكن توليد التيار الكهربائي عن طريق حوامل الطاقة الحيوية بالشكل السائل، حيث يتم الحصول على التيار الكهربائي عن طريق عصر ومعالجة النباتات الزيتية وفق خطوات تقنية مدروسة وهذا ما يعرف بإنتاج مواد الاحتراق الحيوية. يوجد في ألمانيا 130 محطة من هذا النوع باستطاعة إجمالية تتراوح بين 9 إلى 11 ميغا وات كهربائي. إن تكاليف توليد التيار الكهربائي بهذا الأسلوب ما زالت مرتفعة جداً ولذلك فإن حوامل الطاقة هذه يمكن استخدامها كمواد احتراق للمواصلات بالدرجة الأولى.

وبذلك يمكن توليد التيار الكهربائي عن طريق حوامل الطاقة الحيوية بالشكل الغازي، حيث تعتبر طريقة تحويل الكتلة العضوية إلى حوامل طاقة بالشكل الغازي التقنية الأساسية للاستثمار المستقبلي للطاقة الحيوية. يتم الحصول على التيار الكهربائي عن طريق تخمير بقايا المواد العضوية (أطعمة، روث، مياه الصرف الصحي، مياه المعالجة الصناعية).

11 - 3 - 11 الوضع الراهن للطاقة الحيوية في سورية

تقدر مصادر الطاقة المتجددة كطاقة الرياح والكتلة الحيوية في سورية تقدر بنحو 24,1 مليون طن متر نظامي في السنة وهذه الكمية جيدة لخطط للتنمية. تتوفر في سورية المخلفات الزراعية والمخلفات العضوية في المدن والقرى، الأمر الذي يفيد في استعمالها في توليد الطاقة الكهربائية وهي طريقة مناسبة للاستفادة من المخلفات والتخلص منها بطريقة اقتصادية وبيئية.

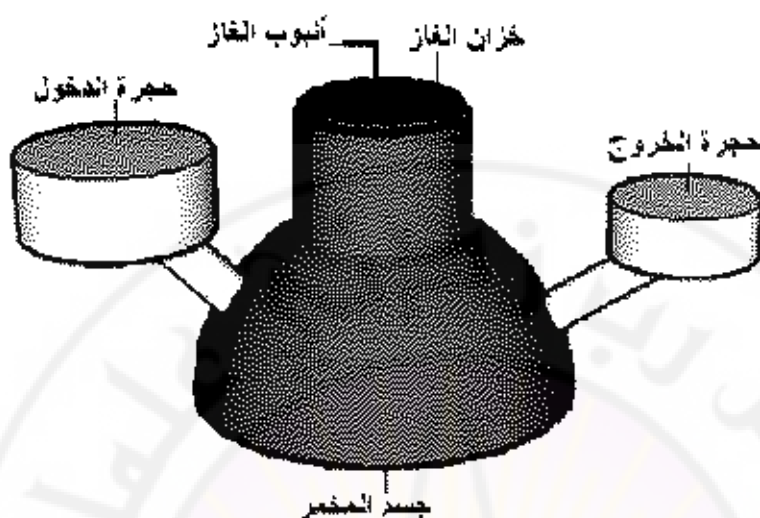
تقدر الكتلة الحيوية الناتجة عن العمليات الإحيائية والتركيب الضوئي نحو 7,116 بليون طن مادة جافة، تبين هيئة البحوث الزراعية في سورية أن الكميات المتوفرة من مقومات الطاقة الحيوية (في عام 2008)، كما في الجدول رقم (6 - 11). يستعمل نفل الزيتون حالياً في محطات الحرق لإنتاج الطاقة الحرارية الذي يعد ثروة، ولكنه يصدر عشوائياً دون الاستفادة من طاقته الحرارية في سورية. يشكل الغطاء النباتي من الشجر المثمر ومن أشجار الأحراج 20 % من إجمالي المساحة المتاحة والصالحة للتشجير. تستعمل مخلفات الثروة الحيوانية بشكل مبادرة فربية لإنتاج السماد العضوي الطبيعي لكن القسم الأكبر منها يذهب إلى مكبات ومطامر النفايات.

الجدول 11-6: الكميات المتوفرة من مقومات الطاقة الحيوية (في عام 2008)

المادة الحيوية	الكمية المتوفرة سنوياً
نفل الزيتون	350 ألف طن
الغطاء النباتي من أشجار الأحراج	230 ألف هكتار
الغطاء النباتي من الأشجار المثمرة	50 ألف هكتار
الثروة الحيوانية	50 مليون رأس
الإنتاج الفائض من القمح	2 مليون طن

يمكن استعمال طاقة الكتلة الحيوية في توليد غاز الميثان واستعماله في المنازل الريفية حيث سيوفر نحو 1 مليون طن مكافئ نفط على الأقل بدءاً من 2010، وهذه الكمية قابلة للزيادة مع الزمن استناداً إلى التجربة العالمية والمحلية. يمكن زراعة الأصناف المقاومة للملوحة في للاستعمال المزدوج الغذائي والوقود الحيوي، كالخروع، وهي أفضل من زراعة أشجار السرو والصنوبريات وهي تنمو كذلك على مياه الصرف الصحي وربما زرع النخيل الزيتي أيضاً .

أنشأ المركز الوطني لبحوث الطاقة 19 هاضماً منزلياً بحجم 14 م³ لكل هاضم حيث يعالج الهاضم مخلفات البقر عبر تقنية إنتاج الغاز الحيوي التي تحول المخلفات إلى عناصر مفيدة تمد المزارع بالغاز الحيوي الذي تتعد استخداماته في مواقد الطهي وأغراض التدفئة والإنارة والسماد العالي الجودة الذي يرفع من إنتاجية الأراضي الزراعية إضافة إلى الفائدة الكبيرة في المحافظة على بيئة نظيفة من خلال حل أمثل لمشكلة تراكم المخلفات الحيوانية التي تسبب انتشار الحشرات والأمراض في الريف . ما زالت هذه الهواضم في طور التجريب وتحتاج لفترة زمنية للوصول إلى النتائج المرجوة التي ستعكس إيجاباً على مستوى معيشة الفلاحين من خلال تأمين دخل إضافي يعزز استقرارهم في الريف وتحد من هجرتهم إلى المدن بعد أن يتحسن مردود مقتنياتهم من ارض زراعية وماشية. ويبين الشكل رقم (11- 14) نموذج الهاضم المنفذ. يتألف الهاضم من عدة أجزاء رئيسية هي حوض الدخول أو التغذية والمخمر وحوض الخروج وخزان الغاز الموصول بشبكة أنابيب لجره إلى أماكن الاستخدام إضافة إلى جهاز الطاقة الشمسية المتصل بالشبكة المنزلية وبحوض التغذية لتأمين الماء اللازم لعملية خلط المخلفات بالماء بنسب مدروسة لتصبح خليطاً متجانساً تحضيراً لإدخاله إلى الهاضم حيث يبقى فيه ما بين 20 إلى 45 يوماً تبعاً لدرجات الحرارة وضمن شروط خاصة يتم تأمينها لنجاح عملية التخمير اللاهوائي وتستمر بعدها التغذية اليومية بمعدل يصل إلى 0.22 م³ يخرج عنها يومياً 0.22 م³ سماد مسائل وكمية غاز تصل إلى حوالي 3 م³ يومياً .



الشكل 11- 14: نموذج الهاضم الحيوي المنفذ من قبل المركز الوطني لبحوث الطاقة

ويبين الشكل رقم (11- 15) الهاضم المنفذ فعلياً.



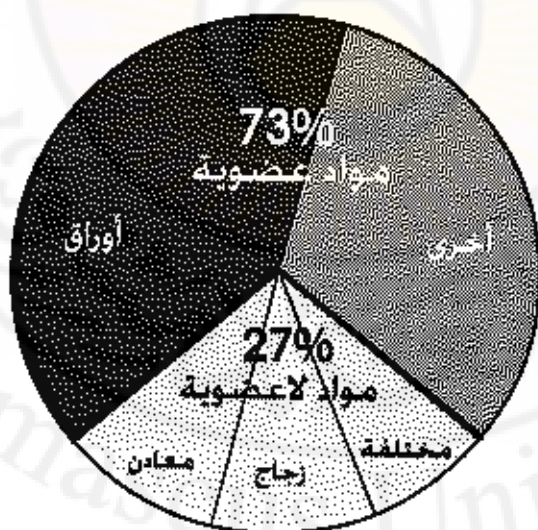
الشكل 11- 15: الهاضم المنفذ فعلياً

ينتج عن التخمير مخلفات عضوية سائلة تعتبر سماداً عالي الجودة ذا مواصفات ممتازة ويتميز بأنه عديم الرائحة ولا يجذب إليه الحشرات والذباب والبعوض ويخلو من

الميكروبات والطفيليات المرضية ما يجعل تداوله أكثر أمناً من الناحية الصحية كما يحتوي السماد على الهرمونات النباتية الطبيعية ومنظمات النمو وتشير التجارب الحقلية أن للأثر المتبقي لهذا السماد بعد جني المحصول الأول دوراً في زيادة إنتاجية المحصول التالي في الدورة الزراعية وأن استخدام هذا السماد الأجود والأرخص هو أفضل من استخدام الأسمدة الكيماوية ذات الأثر السلبي على الأرض والبيئة .

11 - 4 - الطاقة الحيوية الناتجة في معاملة القمامة: [19], [3], [2], [1]

ويمكن أن نعتبر أن أكبر مصدر للكتلة الحيوية في التجمعات السكانية هو القمامة الصلبة حيث تشكل المواد العضوية فيها حوالي 73% من الكتلة الكلية . ولا يخفى على أحد مقدار قيمة الطاقة الكامنة في هذه المواد. كما وتشكل المواد غير العضوية 27% من الكمية الكلية ، وفيها المواد المعدنية والزجاج. وتبدو جلية أهمية استعادة هذه وإرجاعها إلى دورة التصنيع. ويبين الشكل رقم (1.1 - 16) نسبة مختلف المواد في القمامة المنزلية الصلبة.



الشكل 11 - 16: نسبة مختلف المواد في القمامة المنزلية الصلبة [3]

يتم جمع كميات ضخمة من النفايات الصناعية والتجارية في كل مدينة. وإن حوالي ثلثي هذه النفايات قابل للاحتراق، كما أن قسماً كبيراً منها غير ملائم للجمع مع النفايات المنزلية لاختلاف نوعية المواد. فنفايات عمليات تصنيع الأغذية ، مثلاً، يجب أن تعالج قبل طرحها كنفايات لتقليل تأثير المواد البيولوجية والكيميائية، ويتم بعد ذلك وضعها في هاضم لإنتاج طاقة حرارية. ومخلفات المستشفيات يجب حرقها لتجنب التلوث. كما أن كميات كبيرة من الإطارات المستعملة التي ترمى في النفايات يمكن حرقها وتحويلها إلى حرارة أيضاً. تعتبر مسألة القمامة من المشكلات التي تهدد وجود الإنسان وتلقى اهتماماً شديداً لدى معظم حكومات دول العالم الغنية منها و النامية. ويمثل التلوث بالفضلات الصلبة البلدية أو ما يعرف بالقمامة المنزلية ، صداعاً بيئياً موجعاً وعبئاً كبيراً يقع على كاهل المسؤولين في هذه الدول بسبب الزيادة الهائلة والتنوع الكبير في الاستهلاك التي تصاحبها زيادة مطردة في حجم الفضلات التي ينبغي التخلص منها يومياً .

تعرف الفضلات (النفايات) بشكل عام على أنها مخلفات الأنشطة الإنسانية المنزلية و الزراعية و الاستخراجية و التحويلية و الإنتاجية أي كل المواد الصلبة و شبه الصلبة و الغازية المتروكة أو المتخلى عنها كما هي في مكان ما (أي يرغب صاحبها بالتخلص منها) كما تعرف ببساطة في الدول المتقدمة بيئياً على إنها موارد ليمت في مكانها الصحيح و تركها يمسئ إلى الصحة والسلامة العامة

وتقسم الفضلات أيضاً من حيث الخصائص إلى ثلاث مجموعات:

1 - النفايات الخطرة : هي بخلاف النفايات الإشعاعية تعامل معاملة خاصة في طريقة حفظها أو نقلها أو التخلص منها وتشكل في طبيعتها أو كميتها أو تركيزها تهديداً محتملاً على صحة الإنسان و الكائنات الحية بسبب عدم قابليتها للتحلل (ثباتها)، قد تكون مميّنة و تدخل نفايات المستشفيات و المراكز الصحية ضمن هذا التصنيف.

2 - نفايات غير خطيرة: هي تلك التي تتولد نتيجة للأنشطة المختلفة للإنسان وتشمل القمامة المنزلية و الفضلات الناتجة عن الأنشطة التجارية و الصناعية ، وإذا تركت دون معالجة فإنها تؤثر على صحة الإنسان و البيئة المحيطة.

3 - النفايات الخاملة: هي نفايات لا تسبب بعد وضعها في موقع رمي النفايات أي تغيير فيزيائي أو كيميائي كبير في التركيب.

لنسلط الضوء على الفضلات الصلبة المنزلية أو ما يعرف بالقمامة و هي بالتحريف الفضلات الصلبة الناتجة عن الأحياء السكنية و الشوارع و الساحات العامة و الحدائق و المطاعم و الفنادق و المتاجر و المسالخ و الأبنية الحكومية و المؤسسات الأهلية .
تنتج القمامة بشكل مستمر و بكميات متزايدة مع ازدياد عدد السكان حيث أن كمية القمامة تقارب 0.8 كغ لكل شخص في اليوم في الدول النامية بينما تصل إلى 1.95 كغ لكل شخص في اليوم في الولايات المتحدة الأمريكية أما في فرنسا فالكمية الوسطية 1.1 كغ لكل شخص في اليوم أي أن كمية القمامة التي يخلفها الفرد تتعلق بدخل المواطنين و المستوى المعيشي لهم.
فمثلاً

- تقدر كمية القمامة الناتجة عن مدينة دمشق بحوالي 1000 طن يومياً يستقبل معمل المعالجة حوالي 500 طن حيث يتحول 40 % إلى حمأة (Compost) وما يبقى يطمر كما و يستخرج حوالي 2 % حديد يعاد استخدامه في معمل حديد حمص أما الباقي من القمامة فيوضع في مقالب مكشوفة.

- تقدر كمية القمامة الناتجة عن مدينة اللاذقية 230 - 270 طن يومياً تخضع لعمليات التخمر الهوائي من أجل إنتاج السماد.

- تقدر كمية القمامة الناتجة عن مدينة حمص 700 طن يومياً (توضع في مقالب مكشوفة).

- تقدر كمية القمامة الناتجة عن مدينة حمص وسطياً 190 طن يومياً تلخضض إلى 150 طن شتاءً لتصل إلى 300 طن صيفاً.

- تفقد كمية القمامة الناتجة عن مدينة سلمية وسطياً 60 - 70 طن يومياً ، هناك معمل قيد الإنشاء.

تأتي خطورة القمامة على الصحة العامة و على عناصر البيئة من خلال التركيب غير المتجانس لهذه الفضلات حيث أن طبيعتها و كميتها تختلف من دولة لأخرى و كذلك تختلف داخل الدولة الواحدة من منطقة إلى منطقة و من شارع إلى شارع ومن منزل إلى منزل و ذلك باختلاف المناخ و المواسم و العادات الاجتماعية والأحوال الاقتصادية ولكنها تشمل بشكل عام.

أ- مخلفات عضوية:

وهي المواد القابلة للتخمر و التحلل الناتجة من إنتاج و تجهيز و استهلاك الطعام وهي تختلف باختلاف أشهر السنة و ذلك تبعاً لوجود أنواع الخضار و الفواكه وكذلك تختلف باختلاف عادات و تقاليد التجمعات السكانية و الموقع الجغرافي.

ب- مخلفات غير عضوية:

وهي المواد القابلة و غير القابلة للاحتراق مثل (الورق و الكرتون و قطع القماش القديمة و الأخشاب و هياكل الآليات القديمة و أكياس النايلون و العبوات و ألعاب الفارغة البلاستيكية و المعدنية و الزجاجية).

تتميز نفايات القرى باحتوائها على نسبة أعلى من المواد العضوية مقارنة مع نفايات المدن كما أن نفايات الأحياء التجارية في المدينة تتميز باحتوائها على كميات عالية من الورق و الكرتون بعكس المناطق الصناعية التي تتكون نفاياتها من نسبة عالية من الخردة و المعادن كما و تزداد نسبة الخضار و الفواكه في القمامة خلال فصل الصيف الذي يعتبر الموسم الطبيعي للعديد منها.

11 - 4 - 1 التأثير البيئي للقمامة [8]

تقوم الإستراتيجية الأساسية للتخلص من القمامة منذ أقدم العصور و حتى الآن في كثير من الدول وخاصة الدول النامية على طرحتها على الأرض خارج حدود

البلدة أو المدينة في حفر أو منخفضات موجودة طبيعياً على شكل أكوام مكشوفة مشكلة ما يسمى بالمطامر أو المكبات المكشوفة و لكن هذه الطريقة في التخلص لم يعد من يناصرها للأسباب التالية

- 1 - المنظر القبيح لهذه الأكوام الذي يؤدي إلى تشويه منظر الأرض الطبيعية .
- 2 - تعفن المواد العضوية التي تحويها القمامة يؤدي إلى انتشار الغازات السام (غاز الميثان) و الروائح الكريهة والأمراض والأوبئة عن طريق الذباب والبعوض و الحيوانات الشاردة إلى البيئة المحيطة و خاصة إذا احتوت القمامة نفايات الممنشقيات

- 3 - نمو مستعمرات من الجراثيم و جيوش من الحشرات الضارة .
- 4 - يؤدي الاحتراق الذاتي للقمامة إلى تشكل و انتشار غازات ضارة .
- 5 - تطاير بعض مواد القمامة (أكياس البلاستيك) إلى المناطق المحيطة و تشوه منظر الأرض بالإضافة إلى أنها تحجز الضوء و الأوكسجين عنها مما يفقدونها إنتاجيتها الزراعية.

- 6 - تلوث المياه الجوفية و بالتالي المجاري المائية بسبب مياه الأمطار الساقطة فوق سطح التربة التي تغطي المكب و تصل إلى ما تحته من نفايات مغمورة مستخلصة منها بعض المواد الخطرة كالمعادن الثقيلة و المواد العضوية وغيرها بحيث تتحول إلى محاليل ملحية سامة تدعى (الرشاحة) لها تأثيرها البيئي الملوث على التربة والمياه المحيطة بالمكب

11 - 4 - 2 طرق معالجة القمامة [8],[3],[2],[1]

لمسألة الفضلات الصلبة البلدية (القمامة) في الدول المتقدمة بينياً إدارة خاصة تهتم بها مثل مسألة المياه و الصرف الصحي تسمى إدارة النفايات . حيث يتضمن نظام إدارتها الاهتمام بهذه المشكلة ابتداءً من عملية جمعها إلى طرق معالجتها بهدف الاستفادة قدر الإمكان من مكوناتها و خاصة في ظل

التحديات المستقبلية والحالية للموارد الأولية ، بحيث يتحول التفكير من كيفية التخلص من القمامة إلى إيجاد الحلول وطرق معالجة الكميات الهائلة المنتجة يوميا و اعتبارها ثروة اقتصادية يجب الاستفادة منها. يعتبر جمع القمامة من الأحياء السكنية من المتطلبات الصحية الأساسية و هو أول خطوة في إدارة الفضلات الصلبة و تمثل عملية نقلها حلقة الوصل بين الجمع و المعالجة، يجب أن يكون نظام جمع و نقل القمامة سريع لأن لتراكمها أضرار صحية و اجتماعية و اقتصادية ويجب أن لا تتجاوز فترة بقاء القمامة ثلاثة أيام في الفصل البارد ويوماً واحداً في الفصول الدافئة. يدخل موضوع جمع ونقل الفضلات الصلبة (البلدية) في معظم بلداننا في قائمة الخدمات المختلفة التي تقوم بها مجالس المدن و البلديات. وضعت العديد من الدول استراتيجيات لإدارة النفايات مع الأخذ بعين الاعتبار المهام الأساسية التالية من أجل تخفيض وطأة مشكلات المعالجة وهي:

1 - منع تولد و إنتاج النفايات

يقصد بهذا البرنامج التقليل من مواد المخلفات أثناء عملية التصنيع و كذلك استعمال منتجات تامة الصنع، ويتطلب هذا الإجراء اعتماد طرق تصنيع جديدة تقوم على أساس التقنيات النظيفة أي تلك التي تقلل من إنتاج النفايات عند المصدر والحصول على مواد يمكن استعمالها لفترة أطول ولعدة مرات.

2 - برامج استرجاع للموارد الطبيعية و إعادة تدويرها :

أي استخدام بعض مواد القمامة ذات القيمة الاقتصادية (الورق و الكرتون و الزجاج و المعادن و البلاستيك) كمواد خام في إنتاج سلع جديدة ليس بالضرورة أن تكون مماثلة لتلك التي نتجت عنها النفايات فعلى سبيل المثال يمكن استخدام الفضة المستخلصة من صناعة التصوير في إنتاج طلاء المعادن كما يمكن استعمال العطب البلاستيكية في تصنيع الأنابيب أو المواسير، ولكن هذا البرنامج يتطلب وعي بيئي عالي المستوى لدى مواطني البلديات من أجل عملية الفرز كما

يتطلب تسويق المواد المسترجعة وبيعها إلى مؤسسة أو شركة تستعمل هذه المواد وتحولها إلى منتجات مفيدة.

أما طرق المعالجة الأكثر انتشاراً فهي :

- طريقة المطامر والمكبّات.
- الطرق الحرارية .
- الطرق البيوحرارية .

11 - 4 - 2 - 1 طريقة المطامر: [15], [9]

تتنوع المطامر والمكبّات من المكب المفتوح إلى المكب الآمن والمكب الصحي ، ويجب أن تتوفر في المطامر والمكبّات الشروط التالية:

- تحديد مساحة من الأرض خارج حدود المدينة أو البلدة و ذلك نتيجة لتضافر جهود عديدة من المختصين في الجيولوجيا و الهيدرولوجيا و البيئية .
- توفير الطرق الجيدة إلى المطمر و الطرق داخله أيضاً .
- تأمين وجود سور يحيط بالمطمر يمنع دخول الحيوانات الشاردة .
- تبطين قاعدة المطمر بطبقة عضائية أو بوليميرية عالية الكثافة لمنع تسرب المواد الراشحة إلى خزانات المياه الجوفية .

- من الضروري توفر مخبر وتجهيزات لمراقبة تحلل الفضلات عن طريق تحليل الرشاحة و مراقبة و استخراج الغاز المتسولد (الغاز الحيوي الذي يحتوي على نسبة عالية من غاز الميثان) بهدف الاستفادة منه في توليد الكهرباء .

تغطي الفضلات في المطامر الآمنة بغطاء خارجي ينسجم وشكل الأرض المجاورة ، أما في المطامر الصحية فتلقى الفضلات على شكل طبقات متتالية ثم ترص كل طبقة و تغطي بطبقة من التراب و ترص أيضاً و ذلك لتقليل من مساحة الأراضي اللازمة لاستيعاب الفضلات، و بعد (3 - 4) أشهر تصبح الفضلات

خامسة ويتم تكتيم الطبقة الخارجية بهدف إعادة استخدامها (يزرع فيها نباتات ذات جذور تنمو بشكل عرضاني).

11 - 4 - 2 - 2 الطرق الحرارية:

هي طرق كيميائية تهدف إلى التخلص نهائياً من الفضلات و تحويلها بسرعة إلى نواتج غازية أو سائلة أو صلبة و تتضمن : عمليات الاحتراق و التفكيك الحراري و عمليات التغويز .

- الاحتراق: هي عمليات تحويل الفضلات بالحرق الكامل إلى نواتج نهائية يستفاد منها في الحصول على الطاقة (كهرباء ، بخار ماء ، مياه ساخنة) .

كانت تتم عمليات الاحتراق في السابق في حراقات تقليدية حيث تنفث غازاتها الخطرة و الضارة إلى الهواء (أكسيد الآزوت و أكسيد الكبريت و أكسيد الكربون و غاز فلور الهيدروجين و غاز كلور الهيدروجين و غباراً و معادناً ثقيلة و فحمأ هيدروجينياً و ديوكسين و فيوران و كلوروينزين و كلوروفينول و مواداً عطرية حلقية بوليميرية) و تلقي برمادها على الأرض مسببة الكثير من الأضرار البيئية مما أدى إلى تراجع في استخدامها و لكن مؤخراً تم تطوير أجهزة القياس و التحكم بشكل كبير مما أدى إلى ضبط الإصدارات الغازية لوحداث الاحتراق و جعلها ضمن الحدود البيئية المسموح بها كما أدى التطور التكنولوجي في وحدات الاحتراق إلى عودة هذه الطريقة للاستخدام بطاقة أكبر و بشكل أوسع .

- التفكيك الحراري: وهي طريقة حديثة عبارة عن عملية لا هوائية تهدف إلى تحويل القمامة الغنية بالكربون إلى (غازات و بواقي صلبة مثل الفحم و إلى نواتج قابلة للتكاثف) و ذلك عند تسخينها في مجال حراري (550 - 600) درجة مئوية في فرن دوار بحيث تستخدم النواتج على شكل وقود و مواد تدفئة و مواد أولية للصناعات الكيميائية

- التغويز: هي عبارة عن تفاعل الأجزاء الكربونية من القمامة في درجات

الحرارة العالية (1000 - 1300) درجة مئوية و تحويلها إلى مواد احتراق غازية وذلك بوجود مواد مساعدة للتغويةز ، مع ملاحظة إن حجم الملوثات المطروحة إلى الجو هو الأخفض مقارنة مع عمليتي الاحتراق و التفكيك الحراري.

- الطرق البيوجحرارية : عبارة عن انحلال المواد العضوية التي تحتويها القمامة نتيجة نشاط الكائنات الحية المجهرية في ظروف هوائية أو لا هوائية بحيث تتحول إلى مادة عضوية - معدنية تحتوي نترات و كبريتات و بوتاسيوم و وفسفور تدعى الدبال صالحه لتحسين التربة كسماد .
-في الظروف اللاهوائية للتحويل يجب أن يحقق الكربون والأزوت النسبة

$$C / N = 20$$

بحيث يتم الحصول على مادة الدبال وعلى مزيج غازي يحتوي نسبة مرتفعة من الميثان يستفاد منه في توليد الطاقة .

-أما بالنسبة إلى طرق التحويل إلى سماد في ظروف هوائية فيجب أن تتحقق النسبة $C / N = 35$ لنحصل في النهاية على الدبال و ثاني أكسيد الكربون و بخار الماء عند درجات حرارة مرتفعة لذلك هنا يتشكل السماد بشكل سريع و لا يترافق بانتشار الروائح الكريهة كما هو الحال في الظروف اللاهوائية .
يوجد في هذه الطريقة ثلاث أنماط لإنتاج السماد :

-الأكوام الطبيعية .

-الأكوام الثابتة المهواة ميكانيكياً .

-التحول ضمن أوعية مغلقة .

أما صناعياً تتم الطرق البيوجحرارية بالمعالجة المشتركة للقمامة مع الحمأة الناتجة عن معالجة مياه الصرف الصحي و ذلك إما لزيادة الرطوبة أو لإشباعها بالعناصر الناقصة (الأزوت) أو لتحقيق الغرضين معاً .
و أخيراً إن الطرق المطبقة في كل بلد تختلف عنها في بلد آخر و ذلك

باختلاف تركيب القمامة كما إنه لا يمكن الاعتماد على طريقة واحدة من الطرق بل من المفيد التوصل إلى نظام ناجح و متكامل يعتمد على ربط مجموعة من الطرق المعتمدة و يفي بالأغراض الصحية و البيئية و الاقتصادية للبلد.

11 - 4 - 3 مراحل عملية التحويل البيولوجي للكتلة الحيوية: [7],[2],[1]

إن طريقة الهضم اللاهوائي لتحويل الكتلة الحيوية إلى الغاز الطبيعي تعتمد اعتماداً كلياً على النفايات السائلة البشرية والموجودة في مياه المجاري وعلى القمامة الصلبة التي يطرحها المجتمع البشري بشكل أساسي. وتسمى هذه العملية أيضاً بعملية الميثنة الحيوية.

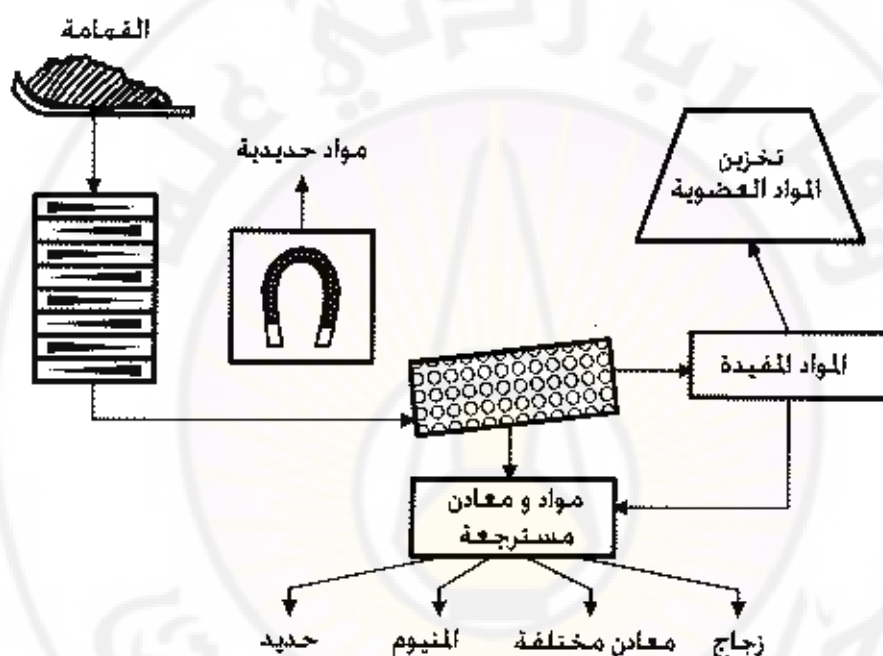
ويمكن أن تلخص خطوات عملية التحويل البيولوجي بطريقة الهضم اللاهوائي كما هو مبين في الشكل رقم (11 - 17) بالمرحلة التالية:

- 1 - عملية تحضير الكتلة العضوية
- 2 - عملية الهضم اللاهوائي
- 3 - عملية تنظيف الغاز الطبيعي الناتج
- 4 - عملية التخلص من الفضلات الناتجة

11 - 4 - 3 - 1 مرحلة تحضير الكتلة العضوية:

وتتلخص مرحلة تحضير الكتلة الحيوية بأنه تتم فيها خطوات فصل الفضلات العضوية عن الفضلات غير العضوية ثم طحن الفضلات العضوية للحصول على جزيئات ذات أحجام صغيرة. فتطحن النفايات في هذه المرحلة طحناً أولياً بحيث نحصل على جزيئات حجمها لا يتجاوز (10سم³) ثم تمرر المواد المطحونة في محطة خاصة يوجد فيها حقل مغناطيسي وذلك للتخلص من المواد الحديدية من بين الفضلات وبعدها تمرر المواد في محطة غربلة دوارة تساهم في التخلص من الزجاج والألمنيوم والمعادن الأخرى والأحجار من داخل الكتلة العضوية ثم يعاد طحن مواد هذه الكتلة حتى نحصل على جزيئات لا يتجاوز (3سم³) ويجرى بعدها فرز للمواد الخفيفة عن

المواد الثقيلة بواسطة نيار هواء ينفخ عليها فتبقى في محطة الفرز الهوائي هذه المواد الثقيلة من الأحجار والزجاج والألمنيوم والمعادن الأخرى، إن وجدت. أما المواد العضوية الخفيفة الوزن بالمقارنة مع هذه، فإنها تدخل إلى محطة طحن ناعمة وتخرج على شكل جزيئات ناعمة لا يتجاوز حجمها نصف سم³.



الشكل 11 - 18: خطوات عملية تحضير الكتلة الحيوية [7],[1]

وفي نهاية هذه المرحلة يتم الحصول على مادة شبيهة بالعجينة. ويجري مزج هذه العجينة مع النفايات العضوية السائلة وتنتقل إلى مرحلة الهضم اللاهوائي وفي مرحلة المزج هذه تختلط المواد العضوية الصلبة من القمامة مع السوائل من النفايات. وهذه تحتوي على المواد والبكتيريا اللازمة لإتمام عملية الهضم اللاهوائي. وتجدر الإشارة إلى أن هناك كمية كبيرة من المواد والمعادن تنتج عن المرحلة الأولى يمكن إعادتها لدورتها في الصناعة.

11 - 4 - 3 - 2 مرحلة الهضم اللاهوائي:

أما مرحلة الهضم اللاهوائي فإنها تتم كما ذكرنا على خطوتين ولتعب الدور الرئيسي فيها الكائنات الحية المجهرية التي تولد الأحماض العضوية ثم تحول الأحماض العضوية هذه إلى الغاز الطبيعي.

11 - 4 - 3 - 3 مرحلة تنظيف الغاز الطبيعي الناتج:

أما المرحلة التالية من عملية التحويل فهي مرحلة تنظيف الغاز الطبيعي الناتج، حيث أن هذا الغاز، بالإضافة إلى غاز الميثان وثنائي أكسيد الكربون، فإنه يحتوي على نسبة كبيرة من الرطوبة - بخار الماء - وعلى كميات مختلفة من الهيدروجين والآزوت وبعض الغازات الكبريتية العضوية واللاعضوية، وتتبع في هذه العملية طرق كيميائية مختلفة لتخليص الغاز المستعمل كوقود من هذه الشوائب الغازية المعلقة فيه.

11 - 4 - 3 - 4 مرحلة التخلص من الفضلات الناتجة:

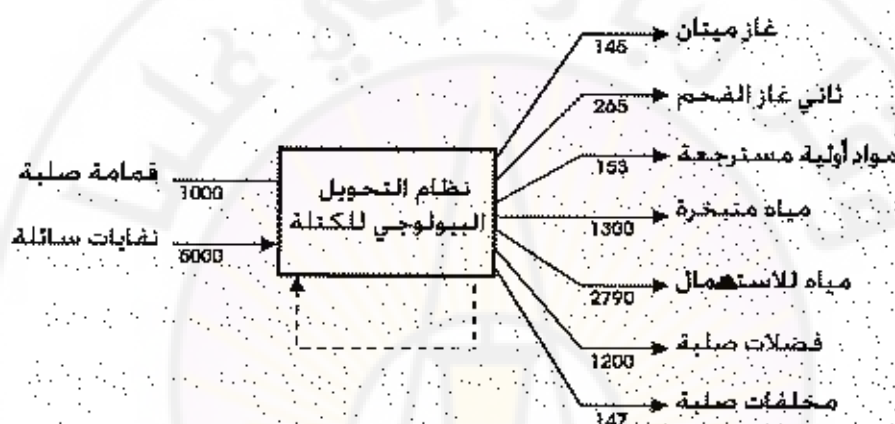
والمرحلة الأخيرة من عملية التحويل هي مرحلة التخلص من الفضلات الناتجة. وهنا تجدر الإشارة إلى أن هذه الفضلات يمكن أن تستعمل للحصول على سماد عضوي طبيعي أو لتحسين واستصلاح الأراضي المالحة أو للحصول على أعلاف حيوانية رطبة. كما ويمكن الحصول على كمية كبيرة من المياه من هذه الفضلات بعد معالجتها، تصلح للري أو تصلح للاستعمال في عملية الهضم اللاهوائي للكتلة الحية.

11 - 4 - 4 مخطط توازن الطاقة في عملية تحويل الكتلة الحيوية في المدن:

لكي نستطيع أن نكون فكرة كاملة عن مدى جدوى عملية التحويل البيولوجي للكتلة الحيوية في مدينة ما فإننا ندرج المخطط المبين في الشكل رقم (11 - 19) الذي يبين توازن الكتلة الحيوية المستعملة وكمية الطاقة الناتجة عن تحويلها بواسطة عملية الهضم اللاهوائي.

فإذا افترضنا أن كمية القمامة الصلبة التي ستعالج في المدينة تساوي (1000) طن فإن هذه الكمية سوف تخلط مع كمية تساوي (5000) طن من النفايات البشرية

السائلة. وبعد المعالجة في عملية الهضم اللاهوائي سينتج لدينا (145) طن من غاز الميثان وذلك بعد أن نغطي كافة الاحتياجات الحرارية اللازمة لكافة مراحل العملية باستعمال هذا الغاز، و (265) طن من ثاني أكسيد الفحم و (153) طن من المواد الأولية التي يمكن إعادة الاستفادة منها واسترجاعها لدورة التصنيع وذلك بالإضافة إلى كمية من الماء تساوي (2790) طن يمكن تنقيتها

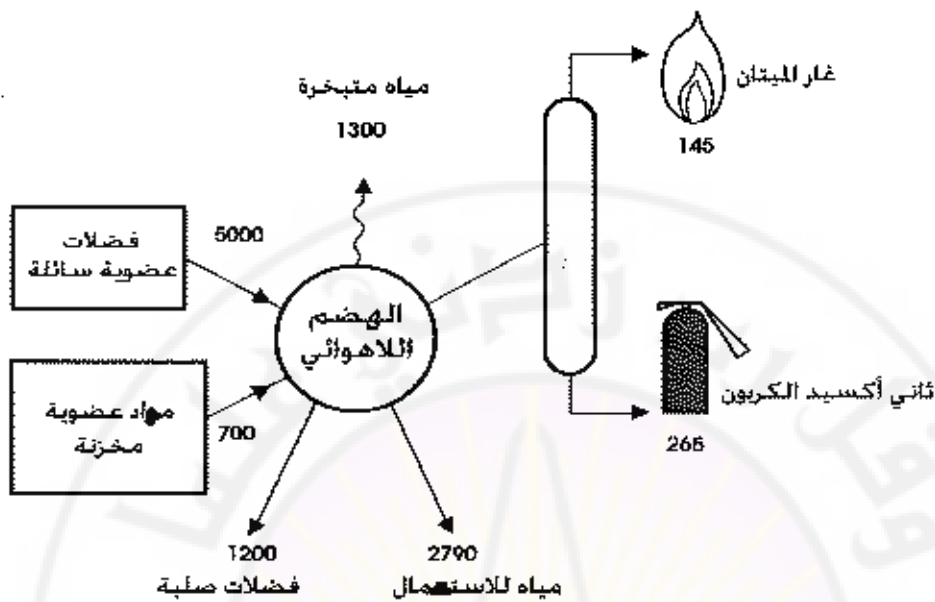


الشكل 11 - 19: مخطط توازن الطاقة في عملية التحويل البيولوجي [7],[1]

واستعمالها من جديد وكمية 1200 طن من البقايا والفضلات وكمية 147 طن من الأحجار والصخور والأتربة غير صالحة للاستعمال.

أما الشكل رقم (11 - 20) فإنه بين الكميات من المواد المختلفة التي تدخل في عملية التحويل البيولوجي المعتبر للكتلة الحيوية.

ما زال البحث العملي في مجالات الطاقات الجديدة في خطواته الأولى، لكن هناك مجالات متعددة من مسائل الطاقات الجديدة قد تم طرقها بنجاح من قبل دول أخرى من دول العالم المتقدم ودول العالم النامية. هذه الدول قد وضعت لنفسها خططاً عامة لاستثمار مصادر الطاقة هذه ولتطوير صناعاتها وكانت سباقة في هذا المجال.



الشكل 11 - 20: الكميات من المواد المختلفة التي تدخل في عملية التحويل

البيولوجي المعتبر للكتلة الحيوية [1], [7]

إن حسابات الجدوى الاقتصادية التي أعدها مراكز البحث العلمي في هذه الدول والتي أعدها فرق الأمم المتحدة في مجال الطاقات الناتجة عن الكتلة الحيوية، قد أثبتت نجاح هذه الاستثمارات في مجال طاقة الكتلة الحيوية، الأمر الذي يحتم علينا أن نفكر جدياً في طرق هذا المجال من الطاقات البديلة وخاصة أن هناك كميات متوفرة ودائمة من الكتلة الحيوية تضيق يوماً هدرأ في كل مكان من الوطن العربي.

11 - 5 مطامر ومكبات القمامة [10], [15]

تعتبر صعوبة التخلص من النفايات الصلبة مشكلة تعاني منها مختلف البلدان على حد سواء. غير أن العديد من الدول قطعت شوطاً كبيراً في التوصل إلى طرق صديقة للبيئة في مجال التخلص منها. وتعتمد هذه الطرق على فرزها قبل نقلها إلى المعامل أو إلى مكبات وحاولات نظامية مغطاة قبل معالجتها. وبالمقابل فإن الدول النامية ما

تزال ترميها دون فرز في مكبات مكشوفة في الغالب. كما إن التخلص منها يتم في معظم الأحيان عن طريق الحرق ليس بعيدا عن التجمعات السكانية.

تتميز النفايات في سوريا مقارنة بمثيلتها في دول الاتحاد الأوروبي بارتفاع نسبة المواد العضوية فيها، إذ تصل هذه النسبة إلى 78 بالمائة. وفي حالة كهذه تنص القوانين الأوربية الخاصة بالنفايات وجوب معالجتها وتحويلها إلى أسمدة بغية إعادة الاستفادة منها في الزراعة والبناء بدلا من حرقها. ولا يسمح هذا القانون بالحرق إلا في حالة عدم إمكانية تدويرها أو تصنيعها. وينبغي أن يتم الحرق كذلك على أساس الاستفادة من الحرارة الناتجة عنه لإغراض صناعية، لاسيما في تشغيل محطات الطاقة.

إن أهم ما يجب أن تتميز فيه المكبات والمطامر هو إيجاد نظام لفرز ونقل وتجميع المخلفات حسب نوعها وفي أماكن بعيدة عن الأبنية السكنية. مثل هذا النظام لا يمكن توفيره دون توفر وعي بيئي لدى الناس بمختلف فئاتهم.

أما بناء المطامر فيجب أن يتم باستخدام مواد كيميائية قد تكون من الإسفلت أو البيتون أو التربة الغضارية بغية عدم السماح بتسرب المواد السامة وتلويث المياه الجوفية. وبالنسبة للمواد التي ينبغي طمرها لا بد من فرزها بحيث لا يسمح بطمر نفايات خطيرة مع غيرها من النفايات الصناعية الأخرى. وهنا تلعب الرقابة الصارمة وكفاءة العاملين ووعيتهم الدور الرئيسي.

يقارن بعض الخبراء الماضي والحاضر ليلاحظوا إن نظم التخلص من النفايات كان أفضل من نظم اليوم فيما يخص التجربة السورية. فقديمًا كانت النفايات العضوية تُجمع وتتخذ للبياتين وكان يطلق على الأشخاص الذين يقومون بهذا العمل "السوادية". أما روث الحيوانات فكانت تجفف في قوالب تُسمى "الجلّة" التي كانت تستخدم في التدفئة وكوقود في "التنور"، وهو فرن صغير لإنتاج الخبز وخاصة في القرى. أما المواد الخشبية والقابلة للاحتراق فكانت مصدرا لإنتاج الرمل المحروق/ كمادة للبناء. وكان البقالون والعطارون يصنعون أكياس محلاتهم من نفايات الورق. ومن الأقمشة البالية كان يتم تصنيع السجاد.

11 - 5 - 1 أنواع مطامر ومكببات القمامة

استخدمت منذ القدم وحتى الآن مطامر ومكببات القمامة للتخلص من نفايات المدن وذلك للسهولة ولقلة التكلفة. ويتم جمع القمامة في أماكن قريبة من المدن يتم اختيارها في مناطق منخفضة من الأرض وتترك النفايات لتتخمر لفترة من الزمن ثم يتم طمرها بطبقة من التراب. ويبين الشكل رقم (11 - 21) صوراً لمثل هذه المكبات.



الشكل 11 - 21: مكبات القمامة

ويمكن تصنيف المكبات والمطامر كما يلي: المكبات والمطامر المكشوفة و المكبات والمطامر المراقبة و المكبات والمطامر الهندسية والمكببات والمطامر الصحية

11 - 5 - 1 المكبات والمطامر المكشوفة

يعتبر التخلص النهائي من النفايات الصلبة في المكبات المكشوفة الطريقة الأكثر انتشاراً من طرق التخلص من النفايات في كل دول العالم. إنها بسبب الاعتقاد الخاطئ

أنها الطريقة الأسهل والأرخص للتخلص ممن النفايات الصلبة تهدد البيئة والصحة العامة.

لا تجرى غالباً أي أعمال تحضيرية أو حتى هدمية للأرض و ليس هناك تجارب تحكم على تشغيل الموقع أو الطريقة التي تودع فيها النفايات. وتعتبر النيران، والحشرات المؤذية، والانتشار الأفقي غير المحدد لمسطح المكب وانهيار المنحدرات أموراً مألوفة في مثل هذه المكبات والمطامر. وبين الشكل رقم (11 - 22) صورة لرمي النفايات في المطامر والمكبات المكشوفة.



الشكل 11 - 22 : رمي النفايات في المكبات المكشوفة

- إن أهم المشاكل التي تعترض تشغيل وعمل المكبات المكشوفة هي:
- النفايات المعدية التي تنتج عن المستشفيات والتي تختلط مع بقية نفايات المدن.
- النباتات حول الشاحنات والأكليات والذين يفرزون مختلف المواد البلاستيكية والمعدنية من القمامة.
- وجود النفايات الخطرة مرمية مع النفايات البلدية.

- إمكانية ظهور حرائق ونيران غير منحكم فيها.

11 - 5 - 1 - 2 المكبات والمطامر المراقبة

أن أفضل مواقع المطامر والمكبات المصممة والمنفذة وفقاً للمواصفات القياسية ستحوي الكثير من المشاكل الصحية والبيئية، إذا تم تشغيلها بطريقة سيئة ولم تتم مراقبتها. على العكس فإن المواقع التي تتم إدارتها وتشغيلها بشكل جيد يمكن أن تعوض الضعف في توضع الموقع وفي التصميم.

إن أهم الميزات الأساسية للمكب المراقب هي:

- تخفيض مساحة العمل في الموقع إلى مساحة أصغر وحجم قابل للإدارة.
- عمل منحدرات وتغطية النفايات المكشوفة بالتربة في الأجزاء غير الضرورية من الموقع
- منع ظهور حرائق جديدة قبل أن تبدأ
- اتخاذ إجراءات بسيطة لمحاصرة المياه السطحية
- تأسيس بعض قواعد العمل في الموقع لتحسين الأوضاع الصحية لعمال الموقع.

11 - 5 - 1 - 3 المكبات والمطامر الهندسية

تتميز المطامر والمكبات الهندسية خلال التقنيات الهندسية للتحكم بوحدة أو أكثر من العمليات التالية:

- نظام الصرف السطحي للمياه.
- فرش ورص النفايات في طبقات أصغر وبشكل منسق.
- جمع وإزالة الرشاحة بعيداً عن النفايات في بحيرات صغيرة أو منشآت مشابهة.
- الطرد الملبي لغازات المطامر والمكبات الخارجة من النفايات.
- الاحتياطات والتحسينات في عزل النفايات عن التربة المحيطة.

- إمكانية تحضير أجزاء جديدة في المطامر والمكببات لغرض التوسع وزيادة سعة التخزين قبل استلام النفايات.

11 - 5 - 1 - 4 المكبات والمطامر الصحية

تتمتع المطامر والمكببات الصحية بالعديد من الميزات الإضافية مقارنة مع تلك الموجودة في المطامر الهندسية على سبيل المثال:

- مخططات مبدئية لتركييب تجهيزات التحكم بالغاز وأنظمة الاستفادة منها
 - المراقبة البيئية الشاملة ومتطلبات الحماية البيئية
 - مجال واسع من التجهيزات الميكانيكية الخاصة
 - معالجة الرشاحة كميزة إضافية لنظام جمع الرشاحة
 - لا يسمح للنيران المفتوحة في أراضي المطامر والمكببات المراقبة.
- وتنظم عملية تخزين المخلفات ومعالجتها في المطامر والمكببات وفقاً للمراحل التالية:
- 1 - استقبال النفايات: يتم استقبال النفايات في المطامر والمكببات بشكل منظم ويحدد لكل سيارة محمية بالنفايات المكان الذي ستفرغ فيه حمولتها وذلك بعد يتم وزنها.
- ويبين الشكل رقم (11 - 23) محطة مغذاة بالطاقة الشمسية لاستقبال ووزن سيارات القمامة.

2 - توضع النفايات:

- توضع النفايات حسب خطة التخلص من النفايات المرخصة وفي الأماكن المحددة مسبقاً لكل مكب.
- يتم إرشاد لسائق عبر موظف مدخل الموقع إلى منطقة وضع النفايات الحالية
- يتم بعد كل عملية رمي للنفايات إعادة تعبئة ورص القمامة.
- تتم صيانة وإصلاح طريق الوصول وطرق الموقع بشكل مستمر.



الشكل 11 - 23: محطة مغذاة بالطاقة الشمسية لاستقبال ووزن سيارات القمامة

3 - المعالجة الأولية للنفايات:

يجب أن توضع النفايات في طبقات وترص كجزء من إجراءات المعالجة الأولية للقمامة، وتودع النفايات في منطقة عمل صغيرة وتغطى بمواد ترابية كافية لجعلها منيعة على وصول الأوبئة أو أن تتفخ في الهواء بواسطة الرياح.

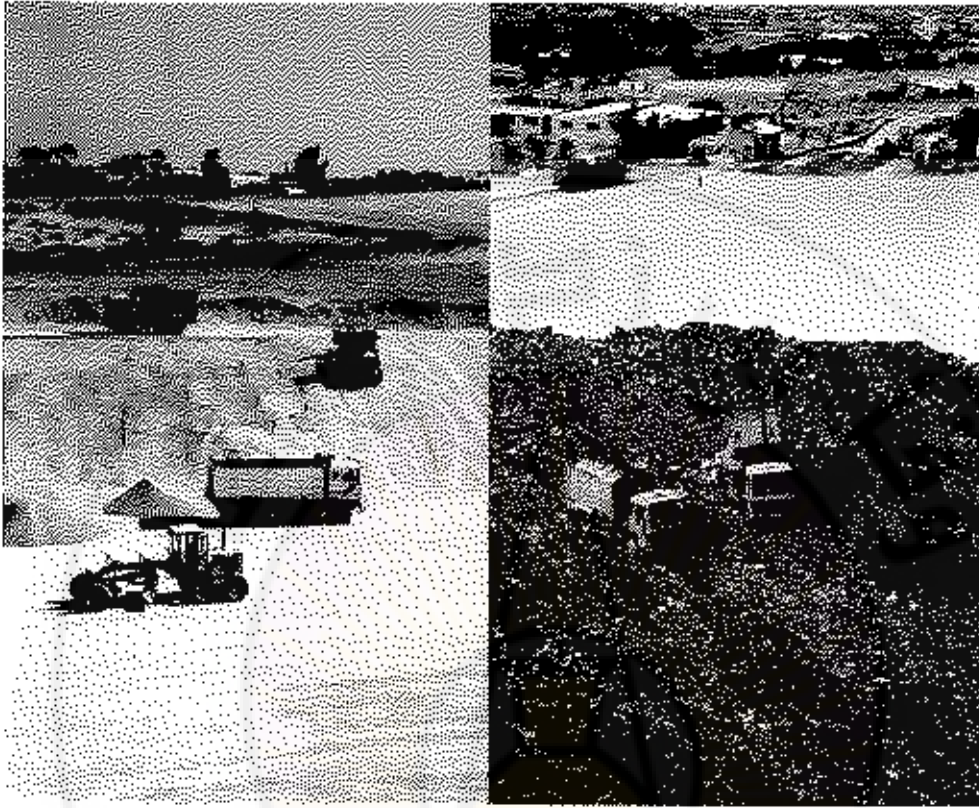
ينصح بالمعالجة الأولية للنفايات البلدية من أجل الأسباب التالية:

- تقليل حجم النفايات عن طريق رصها الأمر الذي يعطي نتائج أفضل.

- تكون جودة الرشاحة أفضل وأقل ضرراً

- يقل إنتاج الغاز الحيوي.

يبن الشكل رقم (11 - 24) طريقة توضع القمامة. توضح الصورة إلى اليسار توضع طبقة التصريف، وتوضح الصورة إلى اليمين توضع الطبقة الأولى للنفايات المعالجة أولاً فوق طبقة التصريف لحمايتها.

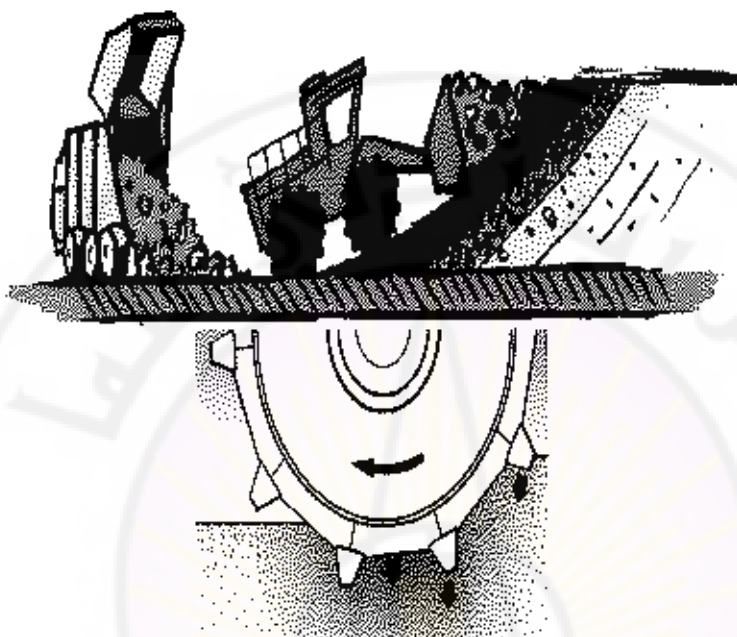


الشكل 11 - 24: طريقة توضع القمامة

ويوضح الشكل 11-25 تنضيد منحدر علوي من النفايات، النفايات غير المحملة تنتشر في طبقات رقيقة بسماكة حوالي 30 سم وترص. تضاف هذه "الرفائق" لطبقة النفايات حتى ارتفاع 2 متر.

وبين الشكل الأيسر درجة الرص بعد مرور المدحلة ذات الدواليب المعدنية من مرة إلى أربعة مرات فوق طبقات القمامة، ويوضح الشكل الأيمن وظيفة مثل هذه الدواليب المعدنية. يمكن التوصل إلى الرص الزائد عبر التحكم بحركة أليات الجمع في الموقع. ترمى النفايات غير المعالجة وغير المفروزة فوق شبه جرف في جبهة العمل. يكون ارتفاع طبقة النفايات حوالي 3 أمتار، يستعمل الرص الفعال لتجنب الفجوات الكبيرة

ضمن المكب، فإنه من المهم أن المواد الأكبر مثل الأثاث القديم، وعلب التغليف، والحاويات تسحق من قبل تجهيزات المطامر قبل فرشها إلى طبقات ورسها.

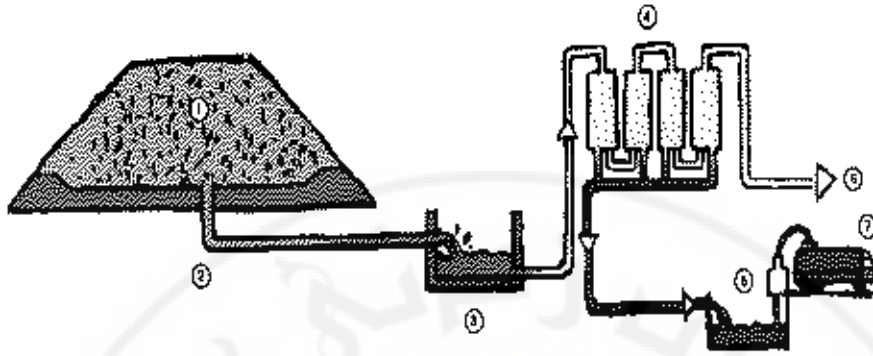


الشكل 11 - 25: تنضيد منحدر علوي من النفايات

4 - التحكم بالانبعاث:

ينتج كل مكب أو مطمر الرشاحة التي هي تركيب وحيد لتركيز المكونات العضوية في النفايات والتي تتغير مع الوقت. وتعتبر معالجة الرشاحة واحدة من أكبر المشاكل لإدارة المكبات والمطامر.

يوضح الشكل رقم (11 - 26) المخطط الرمزي لطريقة جمع الرشاحة ومعالجة الرشاحة. والرشاحة هي سائل عالي التلوث ويجب أن يعالج أو يصرف بالتوافق مع الاشتراطات الموضوعية في التشريعات الوطنية. إن مرفق معالجة الرشاحة في موقع المطمر يجب أن يركب ويشغل على شكل محطة معالجة مياه الصرف.



الشكل 11 - 26: مخطط معالجة الرشاحة

- | | |
|---------------------------|----------------------------------|
| 1 - صفوف المكب | 5 - الماء المعالج إلى نظام الصرف |
| 2 - طرد الرشاحة | 6 - بركة تخزين الحمأة |
| 3 - بركة تخزين الرشاحة | 7 - نقل الحمأة |
| 5 - محطة معالجة الرشاحة . | |

عندما يكون المكان والمصادر متوفرة فإنه يجب إنشاء بحيرة تخزين الرشاحة، ويجب أن تكون قدرة التخزين للبحيرة كافية لاستيعاب كل الرشاحة المتراكمة لوقت طويل كاف لتخفيض تأثير تلويثها إلى الحد المسموح. إن فترة الزمن اللازمة للاحتفاظ بالرشاحة في البحيرة دون أن يجرى لها أي معالجة لا يعرف بشكل محدد وكمؤشر أساسي فإن المدة التي يمكن الاحتفاظ بالرشاحة هي من 7 إلى 14 يوم و يجب أن يتضمن تصميم البحيرة حجم تخزين احتياطي بنسبة 25%. ويجب أن تحتوي البحيرة عمقاً أدنى من 1 متر من الرشاحة لزيادة قوة التبخر. يجب أن يكون للبحيرة تصريف وجريان خارجي إلى دورة مياه مناسبة.

من وجهة نظر أخرى يمكن معالجة الرشاحة عن طريق إعادة تدوير الرشاحة المجموعة مرة أخرى إلى جسم المطمر، حيث تشجع هذه الفكرة التفكك أكثر لبعض المركبات العضوية من نفايات المطمر، ويمكن أن تستخدم الإجراءات التالية لإعادة تدوير الرشاحة:

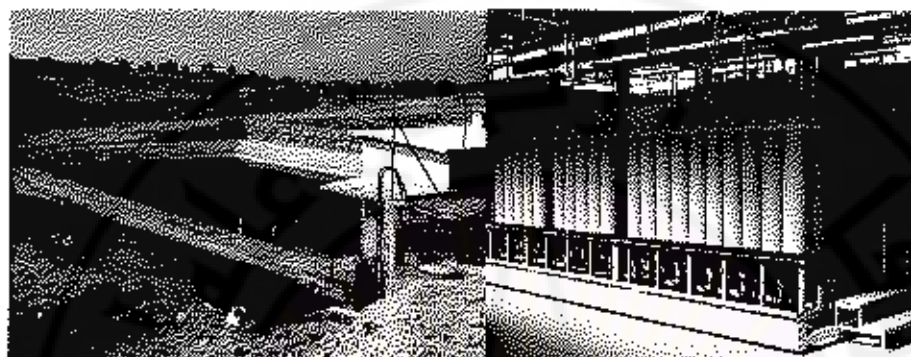
- إعادة توزيع الرشاحة على السطح بواسطة صهاريج
 - التوزيع على السطح بواسطة الرش على كامل المساحة
 - التوزيع على السطح بواسطة الأنابيب المنقبة
 - الفترة الداخلية أو الحقن من الأسفل.
- ويبين الشكل رقم (11 - 27) إحدى طرق معالجة الرشاحة.



الشكل 11 - 27: معالجة الرشاحة عبر إعادة التدوير

ويمكن معالجة الرشاحة بالتهوية لتخفيض الأوكسجين العضوي المنحل والنشادر. إن تحول كل من الكربون العضوي والنشادر إلى مواد يمكن أن تتحرر في البيئة بدون أذى تعتمد كثيراً على توفر الأوكسجين. الأوكسجين يمكن أن يدخل إلى العملية إما بواسطة الضخ بواسطة المضخة إلى قاعدة المفاعل، كما في خزان السمك أو عبر رفع السوائل في الهواء. هناك العديد من الطرق حيث يمكن تحقيق هذا. هناك على أي حال مفاهيم جديدة أخرى لاستخدام هذه التكنولوجيا مثل إزالة نسب الحمأة. تكون بحيرات معالجة الرشاحة الهوائية محدودة في الحجم عبر المكان المتوفر لتوضع المحطة.

وتكون فترة الاحتباس لغرض التهوية بين ال5 و 30 يوماً. إن تدفق الرشاحة بحوالي 200 متر مكعب كل يوم سوف يتطلب بحيرة ذات حجم 1000 - 6000 متر مكعب، ويبين الشكل رقم (11 - 28) بعض طرق معالجة الرشاحة.



معالجة الرشاحة بالتهوية

معالجة الرشاحة بالفترة العالقة

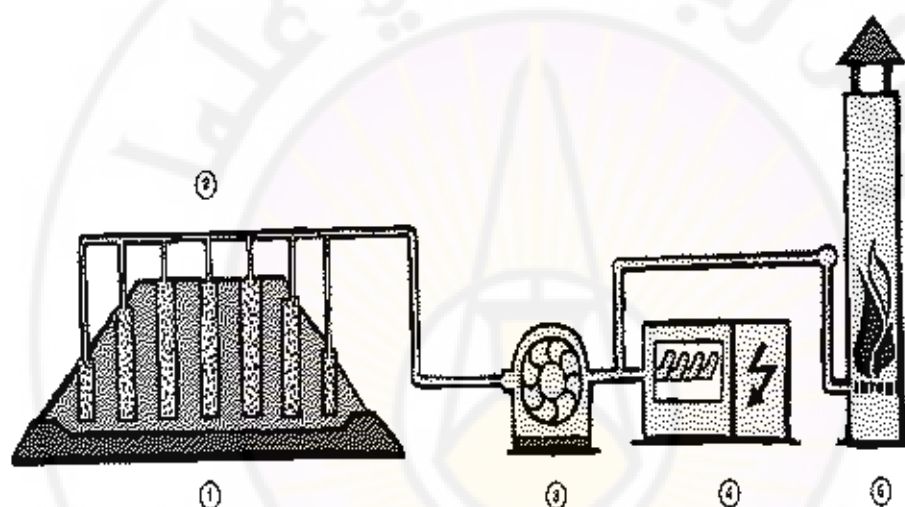
الشكل 11 - 28: بعض طرق معالجة الرشاحة

5 - توليد الغاز الحيوي:

هناك ميزة هامة تنتج من تشغيل المطمر الهندسي بشكل اقتصادي هي أن أكثر النفايات، سوف تتفكك لا هوائياً، في غياب الهواء (الأوكسجين) الأمر الذي يقود إلى إنتاج الغاز الحيوي في المطمر (خليط من غاز الميثان وثاني أكسيد الكربون وبقايا من الغازات الأخرى). هذا الغاز يجب أن يراقب و أن يتم التحكم فيه للتخفيف من خطورة التراكم وتشكيل التراكيب القابلة للاشتعال في الموقع أو من هجرة غاز المطمر خارج الموقع.

تركيب مضخة تفريغ (شفاطات) أو أكثر لاستخراج غاز المطمر، هذه المضخات تخلق ضغطاً منخفضاً في المطمر باتجاه آبار الاستخلاص لسحب غاز المطمر، تحفر آبار استخراج الغاز عادة في الأجزاء المكتملة من المطمر ويوصل كل بئر عبر نظام

أنابيب مع مضخة التفريغ، ويسحب الغاز المجموع من خلال الأنابيب إلى سطح المطمر باتجاه مداخل الاشتعال حيث يشتعل ويحرق، ويمكن الاستفادة من الحرارة الناتجة في تدفئة المباني، أو أن يستعمل هذا الغاز كوقود صناعي، من أجل توليد البخار أو إنتاج الكهرباء. ويبين الشكل رقم (11 - 29) طريقة التحكم بانبعاث الغاز الحيوي.



الشكل 11 - 29: التحكم بانبعاث الغاز الحيوي

- | | |
|-----------------------------|-----------------|
| 1 - صفوف الطمر والقاعدة | 4 - مولد كهرباء |
| 2 - نظام تفريغ الغاز الحيوي | 5 - الشعلة |
| 3 - مضخة التفريغ | |

11 - 5 - 2 اختيار مواقع مكبات ومطامر النفايات

إن عملية توضع موقع ردم النفايات معقدة للغاية. وتأتي ضمن إطار عملية إدارة النفايات التي باتت تعطي مجالاً للمؤسسات المسؤولة لتحقيق المتطلبات البيئية

والصحية في كثير من الدول. تتألف عملية توضع موقع ردم النفايات من ثلاث خطوات؛ الخطوة الأولى : تشمل اختيار المواقع اعتماداً على معايير محلية؛ الخطوة الثانية : دراسة المواقع المختارة لتحديد الأفضل؛ الخطوة الثالثة : وضع التفصيلات التصميمية للموقع المفضل.

يجب أن يلائم موقع أرض الطمر العديد من معايير التصميم الجيوتكنيكي والسكاني وأن يكون مقبولاً من قبل السكان. يتم في البداية نشر قائمة بالمواقع المحتملة توافق المعايير المطلوبة، وترسم لهذا الغرض دائرة إيضاح يسمى نصف قطرها بنصف قطر دائرة البحث (المسافة الأعظمية اللازمة لسحب أو جمع المخلفات من مكان تولدها). ترسم الدائرة على خريطة توضح طرق المنطقة مع المحافظة على مكان تولد المخلفات في مركزها، وفي حال عدم توضع المواقع المحتملة داخل مساحة التفتيش يمدد نصف قطر دائرة البحث. وإذا وجد أكثر من مكان لتوليد المخلفات (عدة مدن داخل الدولة)، يستعمل عندئذ توضع وسطي مقبول كمركز لمكان تولد المخلفات. يمكن أن يمتلك موقع الطمر الصحي من قبل شخص أو شركة أو جهة عامة (مثلاً، مجلس البلدية). وبما أن موقع أرض الطمر مرهون بموافقة السكان، فإن السكان الذين سوف يتأثرون بخصوص اختيار الموقع يجب أن يعلموا بشكل مبكر قدر الإمكان (شاهين، 1996 1995-USA-EPA).

إن عملية اختيار موقع الطمر معقدة وتتضمن ثلاث مسائل رئيسية:

- 1 - جمع المعلومات،
- 2 - معيار (مُترط) التوضع
- 3- تخمين رد فعل السكان.

11 - 5 - 2 - 1 جمع المعلومات

هناك عدة خرائط ومعطيات أخرى يجب دراستها لجمع البيانات ضمن نصف قطر دائرة البحث. والمعلومات المطلوبة هي التالية:

1 - الخرائط الطبوغرافية

توضح الخريطة الطبوغرافية المسافات المرتفعة والمنخفضة، نموذج تصريف الماء السطحي الطبيعي، الجداول والأراضي الرطبة. وتساعد الخريطة الطبوغرافية في إيجاد مواقع غير متوقعة فوق مواقع تصريف المياه السطحية الطبيعية أو ضمن الأراضي الرطبة.

2 - خرائط التربة

توضح هذه الخرائط في الأصل لأغراض زراعية، إذ تبين أنواع التربة قرب السطح. وعلى الرغم من أن هذه الخرائط ستكون مفيدة جزئياً من أجل نموذج أرض المكب ذي التقنية الطبيعية إلا أنها تملك نفعاً ضئيلاً من أجل نموذج أرض المكب المحجوزة.

3 - خطط استخدام الأرض

تفيد هذه المخططات في تحديد مساحات بحاجز ثابتة. فربما تكون هناك قيود على استخدام الأراضي الزراعية أو الأراضي الحراجية لأغراض الطمر. وتستخدم هذه المخططات لتعيين المواقع المحتملة والتي تكون بعيدة وبشكل كاف عن المناطق المأهولة.

4 - خرائط النقل

توضح هذه الخرائط الطرق وخطوط السكك الحديدية وأماكن المطارات وتستخدم لتقدير احتياجات النقل خلال تطور الموقع المستثمر. فإذا كان الطفل (الصلصال) مطلوباً فإنه يجلب من مصادر بعيدة من أجل بناء حدود الموقع وعندئذ تستخدم الخرائط المذكورة في تحديد مسافة الإحضار.

5 - خطط استخدام الماء

يجب وضع مخططات توضح ما يلي:

- الآبار الخاصة والعامة مع توضيح استطاعة كل منها،
- خط التزويد الأعظمي والأصغري بمياه الشرب،
- توضح المآخذ المائية على أجسام المسطحات المائية،

- الآبار المكشوفة. ويجب المحافظة على مسافة أمان (365m أو أكثر) عن كل مصدر لمياه الشرب. ويمكن أن تكون هناك مسافة دنيا مصرح بها من قبل الوكالة المنظمة.

6 - خرائط مسح الفيضان

تستخدم هذه الخرائط لتحديد المساحات التي يمكن أن يغمرها الفيضان خلال 100 عام. وبالنسبة لأراضي مكب المخلفات فيجب حساب الفيضان خلال 500 عام، كما يجب تجنب إقامة موقع المكب الصحي ضمن المناطق التي يوجد فيها أنهار رئيسة خاضعة للفيضانات.

7 - الخرائط الجيولوجية

يمكن أخذ فكرة عامة عن نوع التربة من خلال الخريطة الجيولوجية في المناطق الجبلية، أما في المناطق غير المتجمدة فيمكن استخدامها للتحقق من سيطرة المساحات الرملية أو الغضارية.

8 - الصور الجوية

يمكن بالتصوير الجوي تحديد المعالم السطحية مثل البحيرات الصغيرة وقيعان المجاري المتقطعة، والتي يمكن أن تكون غير معروفة في خرائط البحث الأولي.

9 - نوع المخلفات والنفايات

أول عمل يجب القيام به هو معرفة فيما إذا كانت المخلفات خطرة أم لا. حيث يختلف نظام التدبير لهذين النوعين من المخلفات. فإذا كانت المخلفات غير خطرة يجب على المصمم أن يحدد إذا كانت بلدية أو صناعية.

10 - حجم المخلفات

يمكن تقدير حجم المخلفات الخطرة (Hazardous Waste) وغير الخطرة (Non hazardous Waste) بسهولة من خلال دراسة سجلات التصريف السابقة.

11 - حجم أرض المطامر والمكبات

يقدر حجم أرض المكب من خلال إضافة حجم التغطية اليومية الوسطية (Intermediate daily cover) إن وجدت، وحجم التغطية النهائية (Final cover) إلى حجم المخلفات.

12 - الاعتمادات المالية

إن كلفة إنشاء حقل المكب الصحي مرتفعة وتتضمن اعتمادات مالية من أجل البحث الأولي، تحضير التقرير، بناء أرض المكب وتكاليف التصميم، يجب وضع قيمة تقديرية مناسبة لكل مرحلة من مراحل العمل كما يجب تقدير الإنفاق المالي اللازم خلال المراحل المختلفة.

11 - 5 - 2 - 2 معيار التوضع :

لا يمكن توضع أراضي المطمر ضمن مساحات محددة بما يلي: (صبح، شاهين، 1997):

بحيرات، 2- برك، 3- أراضي رطبة، 4- أنهار، 5- سهول فيضية، 6- طرق عامة، 7- مساحات سكنية، 8- آبار التزويد بالمياه، 9- مطارات. بالإضافة لذلك، لا يسمح بتوضع موقع المطمر الصحي في الأماكن التي تؤدي إلى إفساد الآبار الجوفية أو مصادر المياه السطحية. وعند غياب اللوائح التي تحدد مسافات الأمان Safe Distances لتوضع أراضي المطمر.

11 - 5 - 2 - 3 التقدير الأولي لرد فعل السكان:

يجب إعلام السكان باحتمال اعتبار موقع الطمر الصحي متوضعا ضمن مساحاتهم حالما تنشر قائمة بمواقع البحث. حيث يتقبل السكان توضع أرض الطمر فيما إذا أعلموا من قبل المالك عوضا عن الحصول على الأخبار من مصادر أخرى ويقبل شكهم وارتياهم بعد التعرف على أخطار ومزايا أرض الطمر الصحي. وفي كثير من الحالات، يتعاون القاطنون حول موقع الطمر مع مستثمر حقل الطمر إذا استمع الأخير إلى اهتماماتهم وتخوفاتهم آخذين ذلك الاعتبار عند تصميم ومراقبة الموقع. يجب

التتويه إلى أن الضجيج، الغبار، الرائحة، زيادة حركة عربات التنظيف تخفض قيمة المساحات المجاورة لموقع الطمر الصحي.

11 - 5 - 2 - 4 الاختيار النهائي للموقع :

بعد دراسة المعلومات المشروحة سابقاً، تحدد المساحات التي يمكن أن تحوي موقع الطمر، والتي تكون مقبولة تقنياً وترضي معيار التوضع وتراعي متطلبات السكان. وبعد ذلك تنشر قائمة باثنين أو أكثر من المواقع المحتملة. بالإضافة إلى ذلك يجب نشر تقرير يحتوي على المعلومات الجيو تكنولوجية، التصميم التصوري، مناقشة معيار التوضع لكل موقع من المواقع إذ تناقش هذه التقارير مع السلطة التنظيمية والبلدية. بالاعتماد على مناقشة التقارير يتم اختيار موقع مطمر معين بشكل نهائي (شاهين، 1996).

11 - 6 المحاصيل الزراعية المولدة للطاقة [20]

وهي محاصيل تزرع خصيصاً لإنتاج الطاقة، وقد توجّه الاهتمام إليها في السنوات الأخيرة . إن تقليل انبعاث ثاني أكسيد الكربون في الجو هو أحد الدواعي الرئيسية إلى استخدام مصادر الكتلة الحيوية ومصادر الطاقة المتجددة الأخرى بدلاً من الوقود التقليدي، إلا أن لهذا الاستخدام في بعض الدول أسباب أخرى منها زيادة الإنتاج الزراعي وتقليل الاعتماد على النفط المستورد. وتعتمد المحاصيل المفضل زراعتها على توفر الظروف المحلية المؤهلة للإنتاج، وأهم هذه المحاصيل هي الخشب للحرق وإنتاج الفحم ، والنباتات الزراعية لإنتاج الإيثانول ، والمحاصيل ذات النواة الغنية بالزيت. ويبين الجدول رقم (7 - 11) كمية الإنتاج السنوي لبعض المحاصيل الزراعية المستخدمة لتوليد الطاقة الحيوية.

الجدول 11- 7: الإنتاج السنوي لمحاصيل زراعية مختلفة

المحصول	معدل الإنتاج طن/هكتار في العام	أفضل إنتاج طن/هكتار في العام
قصب السكر	35	90
الذرة	10	40
الحبوب	5	20
الرز	4	16
جنور قصب السكر	8	18
خشب في المناطق الاعتيادية	10	20
خشب في المناطق الاستوائية	20	35

11- 6 - 1 محاصيل الخشب

يبقى الخشب المصدر الرئيسي للطاقة في معظم بلدان آسيا وإفريقيا وبعض بلدان أمريكا الجنوبية . ويعتبر الخشب أو (الفحم النباتي) الوقود الرئيسي المستخدم في بيوت معظم هذه البلدان، ويستخدم بكميات كبيرة في الاستهلاك الصناعي أيضاً . ففي البرازيل مثلاً تستخدم مصانع الفولاذ أكثر من مليوني طن من الفحم النباتي سنوياً . تعتبر مصادر الخشب مهمة جداً، فعند وجود صناعة قطع الخشب في الغابات تتوفر كميات كبيرة من النفايات يمكن استغلالها لتصنيع الفحم النباتي أو للحرق المباشر، لكن استمرار هذه الصناعة قد يؤدي إلى انقراض الغابات مستقبلاً. والحل الأمثل لهذه المشكلة هو زراعة أشجار سريعة النمو . والطريقة القديمة المستخدمة منذ مئات السنين

والتي يتم فيها قطع جنوع الأشجار وتركها تنمو مرة أخرى ، هي أيضاً إحدى الطرق التي تقوم بتجربتها كثير من الدول النامية .

ومن الأشجار سريعة النمو أشجار الحور والصفصاف . فعند زراعتها بكثافة 5000 إلى 20000 شجرة بالهكتار يمكن الحصول على إنتاج مقداره 10 طن للهكتار في السنة ولمدة تقارب الثلاثين عاماً .

تولي العديد من الدول في العالم اهتماماً كبيراً لتطوير صناعة الغابات وذلك لاستغلالها لإنتاج الطاقة من الكتلة الحيوية . وقد أوضحت دراسة حديثة أن المساهمة السنوية للوقود الحيوي ستزداد ثلاث مرات خلال الفترة 2001 - 2010 وذلك كنتيجة لزيادة مساهمة الوقود الذي ينتج من الغابات بنسبة مقدارها 50%.

11 - 6 - 2 إنتاج الكحول الإيثيلي (الإيثانول) من قصب السكر:

يتم إنتاج الإيثانول حالياً من قصب السكر أو الذرة في مناطق عديدة من العالم . ففي البرازيل تم إنتاج أكثر من 100 بليون لتر منذ بداية البرنامج الوطني الذي طبق هناك منذ عام 1975 بالاعتماد على معامل السكر ، وقد تم بذلك توفير كميات ضخمة من الوقود المستورد . وهناك أكثر من أربعة ملايين سيارة تعمل في البرازيل بالإيثانول الصافي، وتسعة ملايين سيارة أخرى تعمل بوقود خليط يحتوي على نسبة 20% من الإيثانول. أما دولة زيمبابوي الإفريقية فلها برنامج ناجح في هذا المجال وذلك لإنتاج 40 مليون لتر في السنة من الإيثانول بالاعتماد على معامل تقوم بتصنيع السكر، يستخدم في توليد الطاقة الكهربائية بالإضافة إلى تدوير المخلفات المتبقية لاستخدامها كسماد لحقول قصب السكر . كما توجد معامل صغيرة لتصنيع الإيثانول في كينيا وملاوي .

جاء انخفاض صناعة السكر في بلدان البحر الكاريبي ومناطق أخرى من العالم نتيجة لاستخدام أنواع جديدة من قصب السكر ذات محتوى عالي من الكتلة الحيوية والتي تعتبر من أفضل النباتات المنتجة فالقصب الجديد (قصب الطاقة) يمكن أن ينتج من 60

إلى 70 طناً جافاً بالهكتار مقارنة مع قصب السكر العادي الذي ينتج من 30 إلى 40 طناً جافاً بالهكتار. ومعظم هذه الكميات ناتجة عن زيادة محتوى الألياف بالرغم من أن كمية السكر المنتج يمكن أن تكون أقل ، وتعوض الخسائر الناتجة عن هذا النقص بواسطة الطاقة الإضافية التي تنتج على شكل مخلفات مفيدة . ويمكن من وجهة نظر اقتصادية حرق البعض من قصب السكر مباشرة دون استخراج السكر منه .

11 - 6 - 3 إنتاج كحول الإيثانول من الذرة الصفراء والذرة الصينية البيضاء:

تطور إنتاج الإيثانول من الذرة لخلطه مع البنزين في الولايات المتحدة بشكل واسع . ففي عام 2006 تم إنتاج 11.6 بليون لتر بواسطة معامل تقطير الكحول الإيثيلي في 82 ولاية أمريكية، وتتزايد هذه الكمية باستمرار .

وتزرع الآن في البرازيل والولايات المتحدة أنواع مختلفة من الحبوب وأعشاب مشابهة لقصب السكر لتحويلها إلى كحول يستخدم كوقود .

11 - 6 - 4 زيت الوقود النباتي Bio diesel [21]

يمكن استخراج نواة عدة نباتات لسحقها وإنتاج كميات كبيرة من الزيت الحيوي، وهو من مركبات الهيدروكربون . ويحتوي زيت الثمار على كمية طاقة تقدر بحوالي (9-37 GJ/ton) وهي تقارب كمية الطاقة في وقود الديزل (42 GJ/ton)، وهي أعلى في هذه الحالة من الإيثانول الذي تساوي طاقته (30 GJ/ton). وهناك عدد من زيوت الوقود النباتية يمكن حرقها مباشرة في محركات الديزل إما منفردة أو بعد خلطها مع وقود الديزل، لكن الخليط الذي يحتوي على نسبة عالية من زيت الوقود النباتي يمكن أن يسد منافذ ضخ الوقود ويتجمع على أجزاء أخرى من المحرك. ويمكن تفادي هذه الظاهرة بخلط الزيت مع الإيثانول أو الميثانول وخلط 30% من زيت الوقود النباتي مع الديزل وهو الأسلوب المستخدم بشكل واسع. ويستخدم حالياً زيت جوز الهند في الشاحنات والحافلات في الفلبين. أما زيت النخيل فإنه يستخدم حالياً في البرازيل، وأما زيت عباد الشمس فإنه الأكثر استخداماً في إفريقيا الجنوبية.

11 - 6 - 5 الفحم النباتي أو فحم الخشب:

يتم تصنيع فحم الخشب عن طريق وتقطير الخشب في معزل من الهواء وذلك في معوجات من الحديد وينتج عن التسخين والتقطير خلافاً لفحم الخشب بعض المنتجات الهامة كحمض الخل والأسيتون والكحول الميثيلي. وفحم الخشب مادة سوداء مسامية تشتمل بسهولة وتتوهج لفترة معينة ولا ينتج عن احتراقه إلا حوالي 1 % من الرماد، وهو خالي من الكبريت، ولونه الأسود سببه وجود عنصر الكربون. أما كون الفحم النباتي أخف من الخشب فلأن الخشب يفقد كمية من الماء عند تحويله إلى فحم نباتي وتزداد نسبة المسامات فيه. والماء في الخشب هو المسؤول أيضاً عن الدخان الكثيف عند حرقه. أما كون الفحم الحجري أثقل من الفحم النباتي فيرجع إلى المكونات المعدنية التي توجد في الفحم الحجري ولا توجد في الفحم النباتي، ويبين الشكل رقم (11 - 30) بعض القطع من فحم الخشب



الشكل 11 - 30: فحم الخشب [20]

ولتحضير هذا الفحم يجمع الخشب في أكوام ويغطى بالتراب ويسخن عشرة أيام تقريباً. ويتم التسخين بحرق جزء قليل من الخشب المطمور بالتراب ويزود هذا الجزء المحترق بقية الخشب بالحرارة اللازمة لتسخينه وتحويله إلى فحم نباتي. ولتحويل الخشب إلى فحم نباتي يلزم التخلص من الأوكسجين والهيدروجين الموجودين في مركبات الخشب العضوية (المطيلوز)، ويتم ذلك بتفاعل كيميائي بحيث يتم نزع الأوكسجين والهيدروجين من السليلوز فيتحول إلى مركب عضوي جديد يحتوي على كمية أقل من الأوكسجين والهيدروجين، فتزداد نسبة الكربون فيه.

يستعمل الفحم النباتي في الحرق المباشر للحصول على الطاقة لتلبية بعض الأغراض المنزلية كالتدفئة أو الطهي. أما البلاد التي يوجد فيها فائض من خشب الغابات، فيمكن تحويله إلى فحم نباتي ثم استعماله في بعض المشاريع الكبيرة كتوليد الكهرباء. أن زمن احتراق كمية من الفحم النباتي أطول من زمن احتراق كمية مماثلة من الخشب، فالفحم النباتي والقيمة الحرارية للفحم النباتي أكبر من القيمة الحرارية للخشب، ولذلك فهو يستخدم في تحضير وتنقية بعض الفلزات التي تتطلب كربوناً نقياً نوعاً ما، فيستخدم مثلاً في تنقية النحاس، كما يستخدم في تنقية الكحول من بعض الزيوت، وفي أغراض طبية أخرى. والفحم النباتي القدره على امتصاص بعض الغازات، لذا فهو يستخدم في الأقنعة الواقية من الغازات السامة.

11 - 6 - 6 إنتاج الطاقة من ثفل الزيتون:

للزيتون أهمية خاصة بسبب كونه محصولاً دائماً وعند شجرته المقدرة على تحمل الظروف البيئية القاسية وتعطي إنتاجاً بحيث لا يجارها في ذلك أية شجرة أخرى. إن مناطق انتشار شجر الزيتون الأساسية هي بالدرجة الأولى مناطق حوض البحر المتوسط أو المشابهة لها بيئياً، تتجح زراعة الزيتون في جميع الأراضي تقريباً وحتى الأراضي الفقيرة. تحتل شجرة الزيتون مكانة هامة بين أشجار الفاكهة الأخرى حيث

يستخدم 15% من الإنتاج السنوي كتثمار مائدة و 85% من الإنتاج السنوي للحصول على الزيت، هذا وينتج عن عملية العصر مادة التفل ومحلول سائل يستفاد منه كسماد. يعطي كل (100) كغم من الزيتون (20) كغم من الزيت و (80) كغم تفل (عرجوم)، ونظرا للكميات الهائلة المتبقية من التفل يتوجب إيجاد طريقة ملائمة لاستغلال المخلفات الناتجة عن عصر الزيتون والبحث عن إمكانية تحويلها إلى منتجات مفيدة. وينتج عن هذه العملية مخلفاً هو البيرين، وهذا يستخدم في صناعة السماد العضوي (Composite) وتستخدم الدقة الناتجة عن الحرق الجزئي للبيرين في صناعة أقراص الفحم. وتجرى حالياً تجارب للحصول على الغاز الحيوي من تفل الزيتون بعد خلطه مع المخلفات الحيوانية بنسب مختلفة.



الشكل 11 - 31: شجرة الزيتون

11 - 6 - 7 الفوائد البيئية الناتجة عن استخدام مصادر الكتلة الحيوية

لقد حظي التأثير البيئي الناتج عن استخدام طاقة الكتلة الحيوية باهتمام كبير على الرغم من أن حرق النفايات له تأثيرات بيئية سيئة أيضاً، لكنّ الوقود الناتج من الكتلة الحيوية يبعث كمية من ثاني أكسيد الكربون تقل بنسبة 65% عن الكمية التي تنبعث عن الوقود التقليدي . كما أن النتائج المرجوة من توسيع إنتاج محاصيل الطاقة هي نتائج مبشرة.

إن إحدى وسائل تقليل ارتفاع درجة حرارة الجو هي تثبيت كمية ثاني أكسيد الكربون بواسطة زراعة الأشجار على مساحات واسعة، ويمثل امتصاص أشجار الغابات لثاني أكسيد الكربون وسيلة مناسبة لتقليل الضرر البيئي، ولكن استخدام وقود الكتلة الحيوية بدلاً من الوقود التقليدي هو الحل الأفضل. وتعتمد تكلفة الإجراءات المستخدمة لتقليل الكمية المنبعثة من غاز ثاني أكسيد الكربون على كفاءة التحويل إلى مصادر طاقة متجددة نظيفة وعلى نوع الوقود الحيوي الذي سيتمعمل في عمليات الحرق.

وتجنباً لحدوث الانفجار الذي يمكن أن ينتج عن انبعاث غاز الميثان وانتشاره من المطامر الصحية فإن استخراج هذا الغاز وحرقه يوفر منافع بيئية إضافية نتيجة لتحويل غاز الميثان إلى غاز أقل ضرراً منه وهو غاز ثاني أكسيد الكربون، وتجدر الإشارة إلى أن غاز الميثان له القدرة على حبس الحرارة أكثر من ثاني أكسيد الكربون بحوالي 25 مرة.

11 - 6 - 8 طاقة التركيب الضوئي

تعتمد جميع الكائنات الحية على الغذاء الذي يتم صنعه في أوراق النباتات بواسطة عملية التركيب الضوئي. ويستفيد النبات من حوالي 5% من الطاقة التي تصل إلى الأرض من الشمس في عملية التركيب الضوئي. وهذا الجزء من الطاقة، رغم أنه صغير نسبياً، فإنه يعمل على إنتاج ما بين 150 و 200 بليون طن سنوياً من المادة العضوية الجافة .

لقد تمكن العلماء في نهاية القرن التاسع عشر من الوصول إلى معادلة التركيب الضوئي وإثبات أن النبات الأخضر يحول الطاقة الشمسية إلى طاقة كيميائية تخزن في مركبات عضوية يصنعها النبات، وأن السكر أهم هذه المركبات . ومعادلة التركيب الضوئي لها الصيغة التالي:

لأنصف هذه المعادلة في الواقع التفاعلات الحقيقية للتركيب الضوئي، فالمسود السكرية (الغلوكوز) ($C_6H_{12}O_6$) لا تتشكل من مزيج ثاني أكسيد الكربون (CO_2) مع الماء بهذه البساطة. لذا فإن المعادلة تبين المواد المستهلكة في العملية والمواد الناتجة منها دون التعرض للخطوات والمراحل المتتابعة والدقيقة فيها .

وتقدر كمية الكربون الداخلة في هذه العملية سنوياً بحوالي 200 بليون طن. وتأتي هذه الكمية من الكربون من غاز ثاني أكسيد الكربون الذي لا تزيد نسبته عن 0.3% من مكونات الهواء الجوي .

ويمكن القول أنه لولا وجود عملية التركيب الضوئي لما وجدت حياة على سطح الأرض. ويرجع ذلك إلى أن جميع الكائنات الحية تعتمد في الحصول على طاقتها اللازمة على النباتات الخضراء ذاتية التغذية ، إذ أن هذه الكائنات مُنتجة للطاقة الكيميائية.

11-7 مراجع الفصل الحادي عشر

- 1 - هيئة الغاز في نيويورك، " التحويل البيولوجي - تصنيع الغاز من القمامة والفضلات السائلة في المدن"، 1976.
- 2 - معهد تكنولوجيا الغاز - شيكاغو، " تصنيع الغاز الطبيعي من القمامة الصلبة بواسطة التحويلات البيولوجية" 1977.
- 3 - الأكاديمية الوطنية للعلوم - واشنطن، " توليد غاز الميثان من المخلفات والفضلات البشرية والحيوانية والزراعية"، 1977.

- 4 - تقرير الفريق التقني المعني بطاقة الكتلة الإحيائية المقدم أمام مؤتمر الأمم المتحدة المعني بمصادر الطاقة الجديدة والمتجددة - نيروبي 1981.
- 6 - الدكتور المهندس سميح الجابي و المهندس حسن طه العقلة، "الهاضم الحيوي المنفذ في منشأة المبكرة الشامية بدمشق بالتعاون مع نقابة المهندسين السوريين"، 1991.
- 7 - الدكتور المهندس سميح الجابي و المهندس حسن طه العقلة، "الجدوى الاقتصادية لاستثمار طاقة الغاز الحيوي في ظروف القطر العربي الموري"، جامعة حلب، أسبوع العلم، 1992.
- 8 - الدكتور هيثم شاهين، "معالجة المخلفات الصلبة"، منشورات جامعة تشرين، اللاذقية، 1996.
- 9 - الدكتور حسام صبيوح والدكتور هيثم شاهين، "الهندسة البيئية"، منشورات جامعة تشرين، 1997.
- 10 - الدكتور إخلاص أحمد الدبيات، "دراسة التأثير البيئي للقمامة وطرق معالجتها"، كلية الهندسة الكيميائية والبتروولية، منشورات جامعة البعث، حمص، 2000.

- 11 - Karki, A. B. K. Dixit, B., " Biogas Field book ", Sahayogi Press, Kathmandu, Nepal. 1984.
- 12 - Karki, A. B., " Construction of Bio digesters at Farmers' Level ", FAO Office for Latin America and the Caribbean. Santiago. Chile. 1985.
- 13 - Singh, J., Myles, R., Dhussa, A., " Manual on Deenbandhu Biogas Plant ", Tata McGraw Hill Publishing Company Limited, India. 1987.
- 14 - Chengdu Biogas Research Institute , " The Biogas Technology in China ", Chengdu, China. 1989.
- 15 - Amalendue, B., " Design, Construction, and Monitoring of Sanitary Landfill", USA. Wiley-Inter residence Publication 1990.

- 16 - Beteta, T., " Experiences with Plastic Tube Biogas Digesters in Colombia. Universidad Nacional Agraria ", Managua, Nicaragua.1995.
- 17 - Cortsen, L., Lassen, M., Nielsen,H., " Small Scale Biogas Digesters in Turiani, Nronga and Amani" , Tanzania, University of Aarhus. Denmark. 1995
- 18 - Schmidt, D. , "The Engineering of Chemical Reactions". New York, Oxford University Press,1998.
- 19 - Finstein, M. S., Zadik, Y., Marshall, A. T. & Brody, D. , "The Arrow Bio Process for Mixed Municipal Solid Waste Information", Eds. E., K., Papadimitriou & E., I., Stentiford, Technology and Service Providers Forum, 2004.
- 20 - Perlack, B., Davis, S., Saulsbury, B., "Biomass Energy Data Book", US Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, 2006.
- 21 - Drapcho, C., Nghiêm, N., Walker, T., " Biofuels Engineering Process". McGraw-Hill . August 2008.

الفصل الثاني عشر

الطاقة المائية

12 - 1 مقدمة

الطاقة المائية هي الطاقة المستمدة من حركة المياه المستمرة والتي لا يمكن أن تنفذ. وهي من أهم مصادر الطاقة المتجددة، وبمعنى آخر هي الاستفادة من حركة المياه لأغراض توليد الطاقة. وقد تم استخدام الطاقة المائية قبل انتشار عملية تحويلها إلى الطاقة الكهربائية التجارية، في الري وطحن الحبوب، وصناعة النسيج، فضلاً عن تشغيل المناشير.

تحتوي المياه المتحركة على مخزون ضخم من الطاقة الطبيعية، سواء أكانت المياه جزءاً من نهر جارٍ أو أمواجاً في المحيط. فإذا فكرنا في القوة المدمرة لنهر يتجاوز ضفتيه ويتسبب فيضانات أو في الأمواج الضخمة التي تنكسر على شواطئ ضحلة، يمكننا عندئذ أن نتخيل كمية الطاقة الموجودة والكامنة في المياه.

يمكن تسخير هذه الطاقة وتحويلها إلى كهرباء علماً أن توليد الطاقة من المياه لا يؤدي إلى انبعاث غازات دفيئة. كذلك هي مصدر طاقة قابل للتجديد لأن المياه تتجدد باستمرار بفضل دورة الأرض الهيدرولوجية. كل ما يحتاجه نظام توليد الكهرباء من المياه هو مصدر دائم للمياه الجارية كالجدول أو النهر. وخلافاً للطاقة الشمسية أو طاقة الرياح، يمكن للمياه أن تولد الطاقة بشكل مستمر ومتواصل، بمعدل 24 ساعة في اليوم.

وقد تم استغلال طاقة المياه منذ قرون طويلة. ففي إمبراطورية روما، كانت الطاقة المائية تستخدم في مطاحن الدقيق وإنتاج الحبوب، كما في الصين وبقية بلدان الشرق الأقصى، وتستخدم حركة الماء الهيدروليكية لتحريك عجلة لضخ المياه في قنوات الري وهو ما يعرف الري باستخدام النواعير.

لقد كان "كراغ سايد هاوس" Crag side house أول بيت في العالم، تمت إنارته بالطاقة الكهربائية المولدة من محطة توليد كهرومائية في انكلترا عام 1887. وكانت

محطة التوليد الكهرومائية على نهر فوكس في الولايات المتحدة، تولى عام 1892 طاقة كهربائية كافية لإنارة وتشغيل معمل ورق.

كان استخدام الطاقة الميكانيكية المولدة مباشرة من الطاقة المائية يتطلب وجود الصناعات قرب شلال، وخاصة خلال النصف الأخير من القرن التاسع عشر، واليوم يعتبر توليد الطاقة الكهربائية من أهم استخدامات الطاقة المائية، مما يوفر الطاقة المنخفضة التكلفة حتى لو تم نقلها على الخطوط الكهربائية واستخدمت في الأماكن البعيدة من المجرى المائي.

إن أهم مكونات محطات التوليد الكهرومائية هي: المد، صالة الآلات التي تحوي المعدات الميكانيكية والكهربائية ثم مجاري وأنابيب المياه. يتم التحكم بالمياه القادمة من البحيرة أو النهر بواسطة سد، وتصرف المياه منه لتشغيل العنفات التي تدير المولدات المنتجة للكهرباء.

12- 2 طرق استخدام الطاقة المائية:

تستخدم الطاقة المائية في العالم حالياً في إحدى التطبيقات التالية:

أ - النواعير Waterwheels

التي استخدمت لمئات من السنين في المطاحن وتسيير الآلات وفي قنوات الري... الخ.

ب - الطاقة الكهرومائية Hydroelectric energy

وهي محطات التوليد الكهربائية المقامة على السدود والمنشآت المائية والتي تنتج الكهرباء.

ت - طاقة المد والجزر Tidal power

وهي استغلال طاقة المد والجزر في الاتجاه الأفقي لتوليد الكهرباء.

ث - طاقة تيار المد Tidal stream power

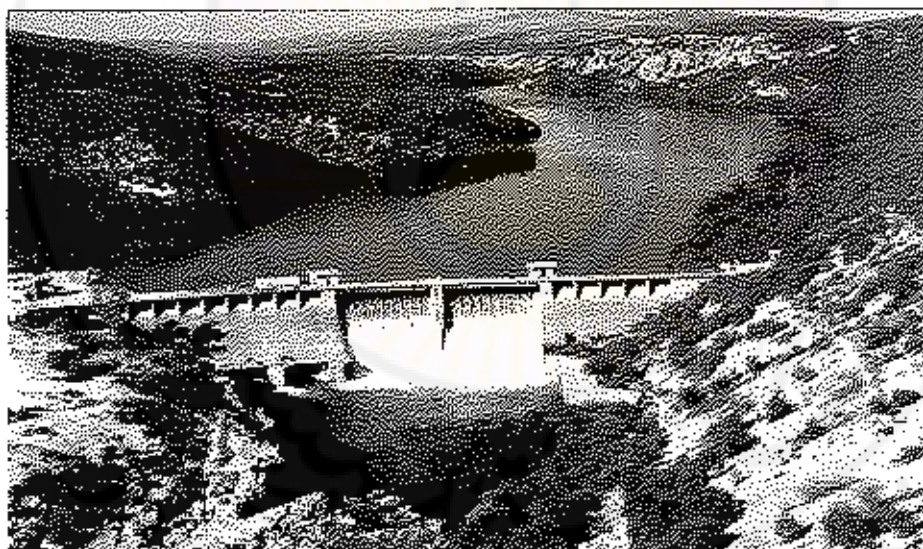
وهي استغلال طاقة المد والجزر في الاتجاه العمودي.

ج - طاقة الأمواج Wave power

التي تستخدم الطاقة على شكل موجات البحر والمحيطات لتوليد الطاقة الكهربائية. وبين الشكل رقم (12 - 1) بعض طرق استخدام الطاقة المائية.

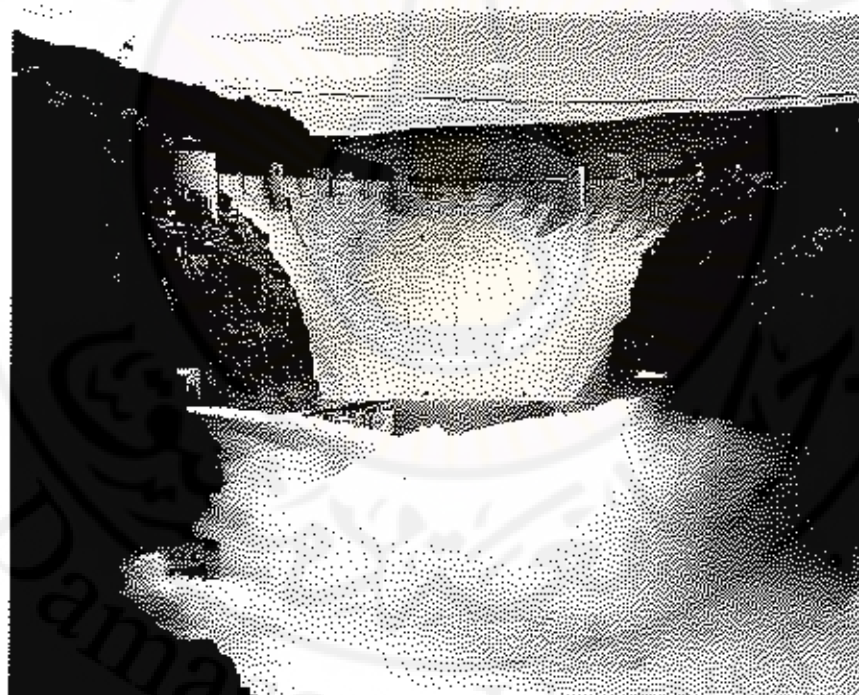
12 - 3 استخدام الطاقة المائية لتوليد الطاقة الكهربائية: [1],[2]

تقدر حصة محطات التوليد الكهرومائية بنسبة 25 بالمائة من إنتاج الطاقة الكهربائية الإجمالية في العالم وهي تؤمن للطاقة الكهربائية لأكثر من مليار نسمة من سكان الأرض. وتقدر استطاعة هذه المحطات بما يقارب 675000 ميغاوات وتعطي طاقة مكافئة تكافئ 3.6 مليار برميل نפט سنوياً. يوجد في الولايات المتحدة وحدها أكثر من 2000 محطة توليد طاقة كهرومائية تجعل هذه الطاقة المصدر الرئيسي بين مصادر الطاقات المتجددة. وبين الشكل 12 - 2 إحدى محطات التوليد الكهرومائية في الولايات المتحدة على سد هوفر في ولاية نيفادا، وبين الشكل 12 - 3 صالة المولدات في المحطة الكهرومائية ذاتها.





الشكل 12 - 1: بعض طرق استخدام الطاقة المائية [3]





الشكل 12 - 2: محطة التوليد الكهرومائية على سد هوفر في ولاية نيفادا [3]

وتكمن أهمية الطاقة المائية في أنها من مصادر الطاقة المتجددة، والأقل خطراً على البيئة مقارنة مع الطاقة الكهربائية المولدة في محطات التوليد الحرارية التي تعمل بالوقود العضوي (فحم، نפט...) أو الوقود النووي.



الشكل 12 - 3 صالة المولدات في المحطة الكهرومائية على سد هوفر [3]

وبشكل عام، تعتبر عملية توليد هذا النوع من الطاقة عالية المردود، إذ يصل مردودها إلى تسعين بالمائة وأكثر.

وتوجد أكبر محطة كهرومائية لتوليد الطاقة الكهربائية في الصين بجانب سد الصين العظيم، وهي باستطاعة تساوي حالياً 18000 ميغاوات.

تعتمد طريقة التوليد على تحويل طاقة المياه الكامنة إلى طاقة حركية، ثم إلى عمل ميكانيكي فطاقة كهربائية. ولكل عملية من عمليات التحويل تقنياتها الخاصة. وأكثر الطرق المستخدمة لتوليد الطاقة الكهرومائية شيوعاً هي التالية:

يصار إلى بناء سد على مجرى مائي، فتتكون بحيرة اصطناعية بسعة مائية كبيرة. وتعتمد الطاقة الكامنة في ذلك الخزان الكبير على كمية المياه التي يحتويها (وبالتالي كتلتها)، وعلى ثابتة تسارع الجاذبية الأرضية وقيمة الساقط المائي أو ارتفاع المياه عن محطة التوليد. وتحدد قيمة الطاقة التي يمكن أن تتولد بالعلاقة التالية:

$$\text{طاقة} = \text{كتلة} \times \text{جاذبية} \times \text{الساقط المائي}$$

لسوء الحظ، إن السدود الضخمة التي تتناسب مع محطات الطاقة الكهرومائية الكبيرة يمكن أن تغرق الأراضي الزراعية وتسمي للأنظمة البيئية. لذلك ينبغي أخذ حاجات المجتمعات والمزارع والأنظمة البيئية القائمة على مجرى النهر بعين الاعتبار عند إنشاء السدود.

لكن محطات توليد الكهرباء الصغيرة يمكن أن تنتج الكثير من الكهرباء من دون الحاجة إلى سدود كبيرة. وتصنف هذه المحطات إلى "محطات صغيرة" أو "محطات صغيرة جداً" بحسب كمية الكهرباء التي تنتجها، وتستفيد الأنظمة الكهرومائية الصغيرة من طاقة النهر من دون أن تحول كمية كبيرة من المياه عن مجراها الطبيعي.

إن المحطات الكهرومائية الصغيرة هي مصدر طاقة لا يلحق الأذى بالبيئة ويتمتع بإمكانية نمو كبيرة.

12 - 4 إنتاج الطاقة الكهربائية من محطات التوليد الكهرومائية في العالم:

يبين الجدول رقم 12 - 1 أهم دول العالم التي تنتج الطاقة الكهربائية من محطات التوليد الكهرومائية:

الجدول 12 - 1 [3],[5]

النسبة من الطاقة الكلية Percent of all electricity	الاستطاعة الكهربائية المركبة Installed Power (GW)	الإنتاج السنوي للطاقة الكهرومائية (TWh)	البلد
17.18	171.52	563.3	الصين
85.56	69,080	371.5	البرازيل
61.12	88.974	368.2	كندا
5.74	79.511	250.8	الولايات المتحدة
17.64	45.000	179.0	روسيا
98.25	27.528	135.3	النرويج
15.80	33.600	122.4	الهند
67.17	-	83.9	فرنزويلا
7.21	27.229	83.6	اليابان
44.34	16.209	66.2	السويد
11.23	25.335	63.6	باراغواي

أما الجدول 12 - 2 فيبين أهم مشروعات محطات توليد كهرومائية قيد النشاء في العالم:

الجدول 12 - 2 [3],[4],[5]

تاريخ الانتهاء	بداية الإنشاء	البلد	الاستطاعة المركبة الأعظمية	اسم السد
2011	December 14, 1994	الصين	22,500 MW	Three Gorges Dam

2015	December 26, 2005	الصين	12,600 MW	Xiluodu Dam
2024	April, 2009	الهند	11,000 MW	Siang Upper HE Project
2015	November 26, 2006	الصين	6,400 MW	Xiangjiaba Dam
December 2009	July 1, 2001	الصين	6,300 MW	Longtan Dam
2017	2006	الصين	5,850 MW	Nuozhadu Dam
2014	January 30, 2007	الصين	4,800 MW	Jinping 2 Hydropower Station
2010	April 18, 2006	الصين	4,200 MW	Laxiwa Dam
December 2012	January 1, 2002	الصين	4,200 MW	Xiaowan Dam
2014	November 11, 2005	الصين	3,600 MW	Jinping 1 Hydropower Station
2010	March 30, 2004	الصين	3,300 MW	Pubugou Dam
2011	November 8, 2003	الصين	3,000 MW	Goupitan Dam
2015	2008	الصين	3,000 MW	Guanyinyan Dam
2015	2009	الصين	3,000 MW	Lianghekou Dam
2012	1980	روسيا	3,000 MW	Boguchan Dam
		الأرجنتين	3,000 MW	Chapetón
2014	August 15, 2008	China	2,600 MW	Dagangshan
2010	December 2006	الصين	2,400 MW	Jinanjiao Dam

2012	November 11 2007	الصين	2,400 MW	Guandi Dam
	2008	الصين	2,400 MW	Liyuan Dam
2014	2004	فنزويلا	2,160 MW	Tocoma Dam Bolívar State
2015	2007	الصين	2,100 MW	Ludila Dam
2009	1978	روسيا	2,010 MW	Bureya Dam
	December, 2007	الصين	2,000 MW	Shuangjiangkou Dam
	July 27, 2006	الصين	2,000 MW	Ahai Dam
2009	2005	الهند	2,000 MW	Lower Subansiri Dam

يبين الشكل 12 - 4 محطة التوليد الكهرومائية على سد الصين العظيم باستطاعة مركبة تساوي 18000 ميغاوات.



الشكل 12 - 4 [3],[5]

ويبين الشكل 12 - 5 محطة التوليد الكهرومائية على السد العالي في مصر.



الشكل 12 - 5 [3]

ويبين الجدول رقم 12 - 3 إنتاج الطاقة الكهربائية في الدول العربية:

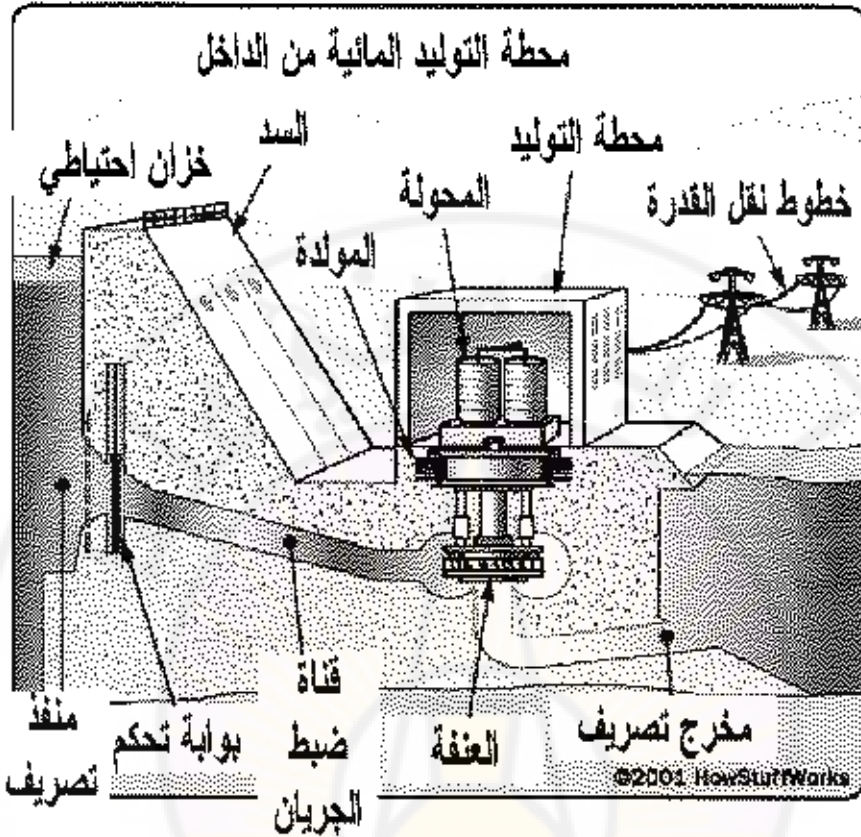
النسبة إلى إنتاج الكهرباء الإجمالي	البلد
13.5%	سوريا
11%	لبنان
13.7%	مصر
29.5%	السودان
9.7%	المغرب
24.2%	العراق
1.3%	تونس
0.8%	الجزائر
0.6%	الأردن
12%	مجموع الدول العربية

12 - 5 مكونات محطة التوليد المائية :

Components of Hydro-Electric Station

تتألف محطة التوليد الكهرومائية بصورة عامة من الأجزاء الرئيسية التالية:

- 1 - مسقط المياه (أنبوب الجر المائل) (Penstock)
وهو عبارة عن أنبوب كبير أو أكثر يكون في أسفل السد أو من أعلى الشلال ويصل إلى مدخل العنفة المائية وتسيل فيه المياه بسرعة كبيرة . يوجد في بوابة (VALVE) وفي نهايته بوابة أخرى للتحكم في كمية المياه التي تدور العنفة المائية .
تجدر الإشارة إلى أن السدود وبوابات التحكم وفنوات المياه الموصلة للأنابيب المائلة تختلف حسب كمية المياه وحسب أماكن تواجدها .
- 2 - العنفة: (Turbine)
تركب العنفة والمولد عادة في مكان واحد على محور رأسي مشترك، يركب المولد فوق العنفة. وعندما تفتح البوابة في أسفل الأنابيب المائلة تتدفق المياه بسرعة كبيرة في تجاوزيف مقعرة فتدور بسرعة وتدير معها الجزء الدوار في المولد حيث تتولد الطاقة الكهربائية على نهايات ملفات هذا المولد.
- 3 - أنابيب السحب: (Draught Tubes)
بعد أن تعمل المياه المتدفقة على تدوير العنفة فلا بد من سحبها للخارج بسرعة ويسر حتى لا تعوق الدوران . لذا توضع أنابيب بأشكال خاصة لسحبها للخارج بالسرعة اللازمة.
- 4 - المعدات والآلات المساعدة: (Auxiliaries)
تحتاج محطات التوليد المائية إلى العديد من الآلات المساعدة مثل المضخات والبوابات والمفاتيح ومعدات تنظيم سرعة الدوران وغيرها . وبين الشكل 12 - 4 مخططاً لمحطة توليد كهرومائية.



الشكل 12 - 4: مخطط لمحطة توليد كهرومائية [4],[5],[6]

عند فتح بوابة المنفذ المائي في السد، تتدفق المياه بتأثير الجاذبية، وتتحوّل طاقة التدفق الكامنة في المياه إلى طاقة حركية. وإذا أهملنا مقاومة الهواء خلال تدفق المياه من منفذها إلى معمل التوليد، يمكن القول إن الطاقة الكامنة تتحوّل بكاملها إلى طاقة حركية.

تقوم الطاقة الحركية للمياه (قوة الدفع) في معمل التوليد، بتوليد عمل ميكانيكي بسبب تدوير العنفات المائية التي تسبب تدوير المولدات الكهربائية في المحطة الكهرومائية.

يعتمد مردود هذه العملية على طريقة تدوير العنفات، و مقدار الطاقة المهدورة بالاحتكاك خلال التدوير.

يعتمد مردود هذه العملية على طريقة تدوير العنفات، و مقدار الطاقة المهدورة بالاحتكاك خلال التدوير.

تتقل طاقة الدوران إلى قلب المولد حيث يقوم بتوليد الطاقة الكهربائية بأثر التحريض الكهرومغناطيسي. وأخيراً تتقل الطاقة الكهربائية المولدة إلى شبكة التغذية بتوتر عال لتقليل الضياع الناجم عن مقاومة الأسلاك والنواقل للتيار الكهربائي.

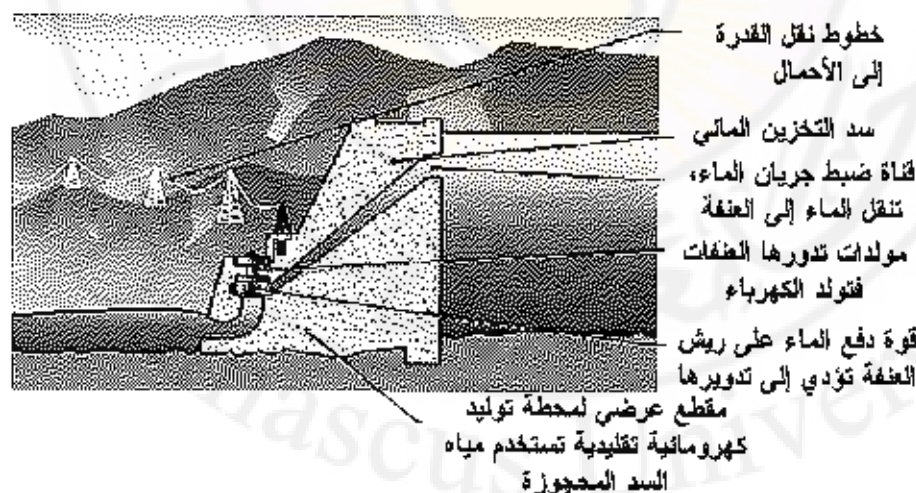
12 - 6 تصنيف محطات التوليد الكهرومائية

تصنف المحطات الكهرومائية من وجهة النظر الإنشائية في ثلاثة أنواع وكما يلي:

1 - المحطات الكهرومائية ذات سد وحوض تخزين:

Impoundment Hydropower Plant

ويتم فيها تخزين كمية كبيرة من المياه خلف سد يشاد على مجرى نهر ما، وتترك المياه لتسقط من حوض التخزين عبر أنبوب الجر على شفرات العنفات المائية فتديرها مولدة عزماً ميكانيكياً يدير الجزء الدوار من المولد الكهربائي الذي يولد طاقة كهربائية تحقن في شبكة التوتر العالي الكهربائية. وهذا النوع من محطات التوليد الكهرومائية مبين في الشكل 12 - 5.



الشكل 12 - 5: محطات التوليد الكهرومائية مع سد وحوض تخزين [4],[5],[6]

2 - المحطات الكهرومائية على مجرى المياه: Diversion Hydropower Plant

وهذه لا تتطلب سداً ولا حوض تخزين، بل تستفيد من فرق المنسوب بين نقطتين على مجرى النهر وتستفيد من كمية المياه التي تتدفق في النهر، ويبين الشكل 12 - 6 محطة توليد كهرومائية تعمل على مجرى النهر.

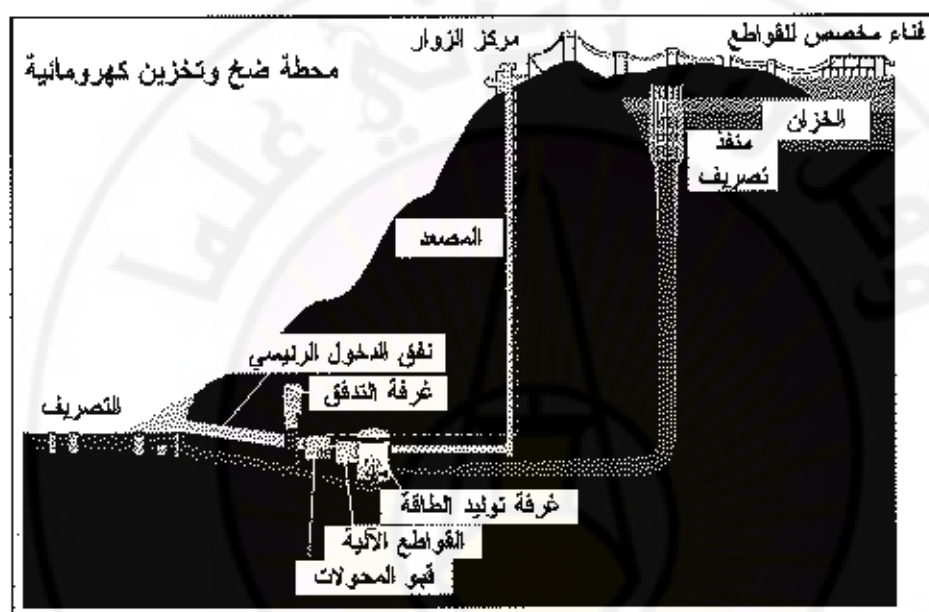


الشكل 12 - 6: محطة توليد على مجرى النهر حيث لا حاجة لوجود السد
[4],[5],[6]

3 - محطات الضخ والتخزين الكهرومائية: Pumped Storage Hydropower Plant

ويعمل هذا النوع من محطات التوليد الكهرومائية بين حوضين للتخزين ، أحدهما يكون في الأعلى و منه ينطلق أنبوب الجر المائي والآخر يكون في الأسفل تتجمع فيه المياه بعد أن تدبر العنفة وتخرج منها. وتعمل هذه المحطات الكهرومائية على توليد الطاقة الكهربائية عندما تمر المياه في العنفة ماقطة من حوض التخزين الأعلى نحو حوض التخزين الأسفل. وتعمل كمحطات ضخ مياه عندما تتم عملية رفع المياه من

حوض التخزين الأسفل إلى حوض التخزين الأعلى. وتعمل الآلات الكهربائية كمولدات الكهربائية في الحالة الأولى عند سقوط المياه على العنفات المائية. وتعمل كمحركات كهربائية في الحالة الثانية وتدير العنفات التي تتحول بدورها في هذه الحالة إلى مضخات مائية وتعيد تخزين المياه في الحوض العلوي. وبين الشكل 12 - 7 محطة ضخ وتخزين كهرومائية



الشكل 12 - 7: محطة ضخ وتخزين كهرومائية [4],[5],[6]

ويمكن أن تصنف محطات التوليد الكهرومائية من حيث استطاعتها الكهربائية المركبة إلى الأنواع التالية:

- 1 - محطات التوليد الكهرومائية الضخمة: Large Hydropower Plant وهي المحطات التي تبلغ الاستطاعة الكهربائية المركبة فيها 30 ميغاوات وأكثر.
- 2 - محطات التوليد الكهرومائية الصغيرة: Small Hydropower Plant وهي المحطات الكهرومائية التي تبلغ الاستطاعة الكهربائية المركبة فيها من 100 كيلووات وحتى 30 ميغاوات.
- 3 - محطات التوليد الكهرومائية الميكروية: Micro Hydropower Plant

وهي المحطات الكهرومائية لا تتجاوز الاستطاعة الكهربائية المركبة فيها من 100 كيلوات، وهي تصلح للتغذية منزل أو مزرعة أو قرية صغيرة بالطاقة الكهربائية.

12 - 7 محطات الضخ والتخزين الكهرومائية المدمجة:

Pumped Storage Hydropower Plant

وهي عبارة عن محطات توليد كهرومائية فيها عنفات يمكن أن تعكس وظيفتها لتعمل كمضخات مائية عند الحاجة، وهذه العنفات تكون عادةً من طراز فرانسيس. تستخدم هذه المحطات لتوليد الطاقة الكهربائية في ساعات الذروة الكهربائية عندما تكون هناك حاجة سريعة لتوليد الطاقة لتغطية أية زيادة مفاجئة في الاستهلاك. إذ أن محطات التوليد الكهرومائية لا تحتاج إلا لبضع دقائق لكي تبدأ بتوليد الطاقة وحققها في الشبكة الكهربائية، بينما تحتاج محطات التوليد الحرارية والنووية ساعة أو أكثر من التحضيرات لتصل إلى محدداتها النظامية لكي تبدأ بتوليد الطاقة الكهربائية. تحتاج هذه المحطات لكي تعمل إلى حوضي تخزين مائي يقعان في مستويين بينهما اختلاف كبير في المنسوب.

يمكن تلخيص مبدأ عمل هذه المحطات كما يلي: تعمل هذه المحطات لتوليد الطاقة الكهربائية في ساعات الذروة فتتساب المياه من حوض التخزين الأعلى عبر العنفات وتتجمع في حوض التخزين الأسفل. وتعمل هذه المحطات لضخ المياه من حوض التخزين الأسفل إلى حوض التخزين الأعلى في ساعات الفجوة الليلية من منحنى الأحمال الكهربائية اليومي، حيث ينعكس عمل العنفات لتعمل كمضخات مائية. يبين الشكل 12 - 11 مبدأ عمل هذه المحطات. عندما يتم ضخ المياه إلى الأعلى فإن كمية هائلة من الطاقة الكامنة سوف تخزن في كتلة الماء في الخزان العلوي وستكون جاهزة للاستثمار عند الحاجة. وبين الشكل رقم 12 - 12 حوض التخزين الأعلى في محط توليد Dinorwig في شمال ويلز في بريطانيا والتي أنشئت في الفترة 1976 - 1986، وتبلغ الاستطاعة المركبة فيها 1320 ميغوات ويبلغ فرق المنسوب بين حوضي التخزين 600 متراً.



الشكل 12 - 11 مبدأ عمل محطات الضخ والتخزين الكهرومائية المدمجة
[4],[5],[6],[7]

من أهم صفات هذا النوع من المحطات:

- لا تلوث البيئة.
- ليس لها آثار سلبية على الطبيعة المحيطة.
- يمكن إقلاعها خلال فترة قصيرة جداً مما يساعد النظام الكهربائي عند الحاجة إلى تغطية استطاعة الذروة.
- لا تمثل هذه المحطات مصدراً متجدداً للطاقة وإنما يمكن اعتبارها طريقة مجدية لتخزين الطلق المائية.
- تكلفة إنشائها كبيرة جداً.
- مردودها منخفض مقارنة مع محطات التوليد الكهرومائية التقليدية. فإذا أخذنا بعين الاعتبار تبخر المياه في حوضي التخزين والضباب بسبب الاحتكاك وتحويل الطاقة فإن حوالي 85% من الطاقة الكهربائية التي تصرف لضخ



الشكل 12 - 12 حوض التخزين الأعلى و ونفق المياه الذي يمثل أنبوب السحب
[4],[5],6[7]

- المياه يتم استرجاعها عند إعادة التوليد من العنفات، لذلك تعتبر هذه المحطات
أفضل وسيلة لتخزين الطاقة الكهربائية.

يبين الجدول 12 - 4 أهم محطات الضخ والتخزين التي تعمل في مختلف دول
العالم

الجدول 12 - 4 [5]

الاستطاعة الكهربائية MW المركبة	اسم محطة الضخ والتخزين	الدولة
7590	Pelado Hydroelectric Comple 1986	أرجنتين
80 160 312 1500 510	- Bendeela 1974 - Kangaroo Valley 1977 - Poatina & Tods Corner 1964 - Tumut Three 1973 - Wivenhoe Power Station 1980	استراليا
360 232 250 730 198 276 231 500	- Häusling 1988 - Lünerseewerk 1958 - Kühltai 1981 - Malta-Hauptstufe 1979 - Rodundwerk I 1952 - Rodundwerk II 1976 - Roßhag 1972 - Silz 1981	النمسا
1100 136	- Coo 1979 - Plate Taille 1981	بلجيكا
375 864	- PAVEC Belmeken 1977 - PAVEC Chaira 1998	بلغاريا

174	- Niagara Falls 1957	كندا
270	- Panjiakou, Hebei 1992	الصين
1200	- Guangzhou I, Guangdong 1994	
800	- Shisanling, Beijing 1997	
80	- Xikou, Zhejiang 1998	
1800	- Tianhuangping 2000	
1200	- Guangzhou II, Guangdong 2000	
100	- Shahe, Jiangsu 2002	
1200	- Tongbai, Zhejiang 2006	
300	- Baishan, Jilin 2006	
120	- Huilong, Henan 2005	
1000	- Tai'an, Shandong 2007	
600	- Langyashan, Anhui 2007	
1000	- Zhanghewan, Hebei 2008	
1000	- Yixing, Jiangsu 2008	
1000	- Yixing, Jiangsu 2008	
1200	- Xilongchi, Shanxi 2008	
2400	- Huizhou, Guangdong 2008	
4,6	- CHE Fužine 1957	كرواتيا
276	- RHE Velebit 1984	
480	- Dalešice 1974	تشيكيا
650	- Dlouhé Stráně 1996	
45	- Štěchovice 1947	

1070	- Grand Maison 1997	فرنسا
285	- La Coche 1976	
485	- Le Cheylas 1979	
920	- Montézic 1983	
800	- Revin 1976	
720	- Super Bissorte 1978	
220	- Erzhausen 1964	ألمانيا
120	- Geesthacht, Hamburg 1958	
1600	- Goldisthal 2002	
160	- Happurg 1958	
320	- Hohenwarte II 1966	
153	- Kocpchenwerk 1989	
160	- Langenprozelten 1976	
1050	- Markersbach 1981	
440	- Waldeck II 1973	
315	- Sfikia 1985	اليونان
384	- Thisavros 1997	
400	- Kadamparai, Coimbatore, Nadu	الهند
810	- Nagarjuna Sagar, Andhra Pradesh	
900	- Purulia Ayodhya, West Bengal	
900	- Srisailam, Andhra Pradesh	
1000	- Tehri Dam, Utrancha	
1140	- Siah Bisheh 1996	إيران

292	- Turlough Hill 1974	ايرلندا
1184	- Chiotas 1981	إيطاليا
1040	- Lago Delio 1971	
1020	- Piastra Edolo 1982	
1000	- Presenzano 1992	
1050	- Imaichi 1991	اليابان
2700	- Kannagawa 2005	
1600	- Kazunogawa 2001	
1200	- Matanoagawa 1999	
1280	- Okawachi 1995	
1932	- Okutataragi 1998	
1200	- Tamahara 1986	
30	- Okinawa 1999	
900	- Kruonis 1993	ليتوانيا
1100	- Vianden 1964	لوكسمبورغ
270	- Aurland III 1979	النرويج
700	- CBK, 1998	الفلبين
500	- Porąbka-Żar 1986	بولونيا
716	- Żarnowiec 1994	
150	- Żydowo 1996	
270	- Aguiçeira 1984	البرتغال
260	- Alqueva 1986	
72	- Alto Rabagão 1996	
144	- Torrão 1998	

19,2 1200 150	- Kuban 1968 - Zagorsk 1994 - Zelenchuk 2008	روسيا
614	- Bajina Basta 1982	صربيا
735 198 60	- Čierny Váh, 735 1984 - Liptovská Mara 1980 - Ružín 1966	سلوفاكيا
180	- Avče 1987	سلوفينيا
100 400 180 1332	- Drakkensberg 1983 - Palmiet - Stcenbras 1979 - Ingula	جنوب إفريقيا
400 600 600 700 1000 600	- Cheongpyeong 1980 - Samrangjin 1985 - Muju 1995 - Sancheong 2001 - Yangyang 2006 - Chongsong 2006	كوريا الجنوبية
339 422 210 628 451 360 52	- Aguayo (Cantabria) - Aldeadavila (Salamanca) - Moralets-Llauset (Lleida/Huesca) - La Mucla (Valencia) - Sallente-Estany Gento (Lleida) - Tajo de la Encantada (Málaga) - Tavascan-Montmara (Lleida)	اسبانيا

810	- Villarino (Salamanca)	
334	- Juktan	السويد
2099 1070 620 420 370 340 340	- Cleuson-Dixence VS, Lac des Dix - Guttannen BE / Grimsel 2 - Peccia, Cavergho, Verbano, - Hongrin VD, Lac de l'Hongrin - Mapragg SG, Stausee Mapragg - Linthal GL, Linth-Limmern - Altendorf SZ / Einsiedeln, Sihlsee	سويسرا
1000 1620	- Minghu 1985 - Mingtan 1994	تايوان
235 1494	- Kiev Hydro-Accumulating 1970 - Tashlyk 2006	أوكرانيا
440 1728 305 360	- Ben Cruachan, Scotland 1965 - Dinorwig, Wales 1984 - Foyers, Scotland 1975 - Ffestiniog, Wales 1963	بريطانيا
1566 780 1200 200 1495 424 324	- Castaic Dam 1978 - Edward C. Hyatt 1968 - Helms 1984 - John S. Eastwood 1988 - Pyramid Lake 1979 - San Luis Dam 1968 - Cabin Creek 1967	الولايات المتحدة كاليفورنيا

1212	- Mount Elbert	كولورادو
848 208	- Rocky Mountain Pumped Storage - Wallace Dam, Lake Oconee/Lake Sinclair	جورجيا
600 1080	- Bear Swamp 1972 - Northfield Mountain 1972	ماس
1872	- Ludington 1973	ميتشيجان
2000 400	- Mt. Hope - Yards Creek Generating Station	نيوجرسي
1200 240	- Blenheim-Gilboa 1973 - Lewiston Pump-Generating Plant (Niagara) 1961	نيويورك
260	- Salina Pumped Storage 1971	اوكلاهوما
1071 435	- Muddy Run - Seneca	بنسلفانيا
512 1065 610	- Fairfield Pumped Storage 1978 - Bad Creek 1991 - Lake Jocassee 1973	جنوب كارولينا
1530	- Raccoon Mountain 1978	تينيسي
2772	- Bath County	فيرجينيا
314	- Grand Coulee Dam 1981	واشنطن

12-8 السدود والمحطات الكهرومائية على مجرى نهر الفرات في سورية
يعتبر نهر الفرات هو المصدر والشريان الأساسي لمياه الشرب والري والطاقة
الكهربائية المائية الكامنة خلال عبوره الأراضي السورية لمسافة 595 كم تقريباً حيث
يتوفر فيه ضاغط مائي منذ دخول مجراه الحدود السورية التركية في منطقة جرابلس
وحتى خروجه من الأراضي السورية باتجاه العراق عند منطقة أبو كمال ويصل فارق
منسوبه إلى 160 متراً تمت الاستفادة الكاملة من 37 متراً منه حتى الآن في المنطقة
الممتدة بين جرابلس ومحطة سد البعث التنظيمي على مسافة 168 كم وذلك من خلال
ثلاث منشآت كهرومائية حيث أنجز سد الفرات في عام 1978 وسد البعث التنظيمي
في عام 1987 وسد تشرين عام 2004 وشكلت هذه المنشآت سلسلة متدرجة من
المحطات الكهرومائية ، وهناك دراسات أولية لدراسة إمكانية إنشاء محطات وسدود
جديدة.

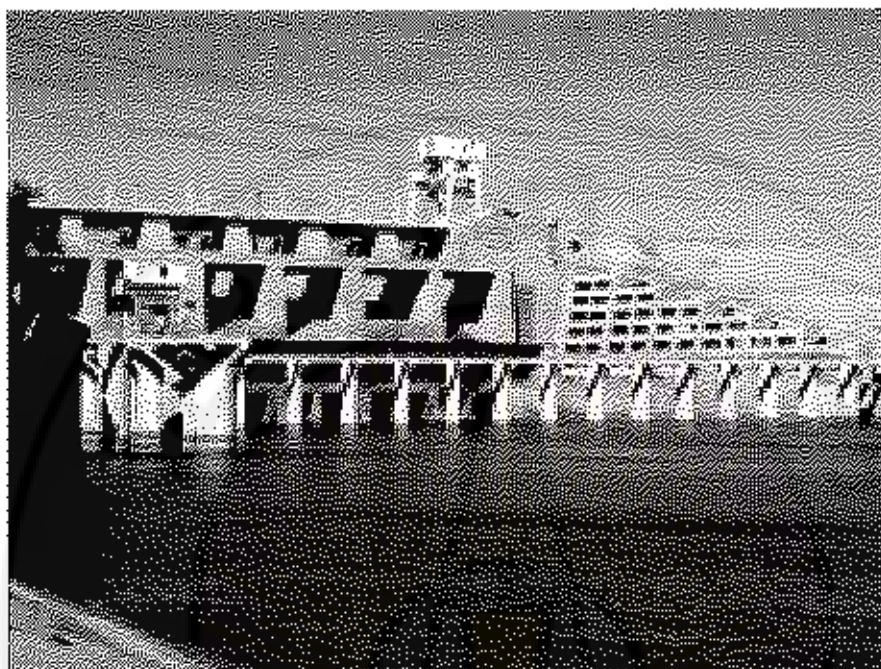
ويمكن تحديد المعطيات الفنية لهذه السدود والمحطات الكهرومائية كما يلي:

1 - سد الفرات:

أقيم في موقع الطبقة (مدينة الثورة حالياً)، ويتكون جسم السد من الرمل والحصى
وله نواة من الغضار، ويبلغ طوله 4500 م وعرضه عند القاعدة 512 م وعند القمة
19 م وارتفاعه 60 م، ويقع المفيض فوق المحطة الكهرومائية ومندمج معها، ويتألف
من ثمانية فتحات مزودة ببوابات حديدية أمامية وخلفية قوسية. وتبلغ طاقة تصريفه 19
ألف متر مكعب/ بالثانية ويوجد في القسم الأيسر للسد مأخذ للري بالراحة يغذي قناة
البليخ التي يبلغ طولها 18 كم لإيصال المياه إلى المشروع الرائد ويثر الهشم وكامل
حوض البليخ وطاقة تصريفها الأعظمي 140 م³ / ثا، ويتم التحكم بهذا المأخذ
بواسطة البوابات.

وتعتبر المحطة الكهرومائية في سد الفرات أكبر المحطات التي تولد الطاقة الكهربائية
في سورية، تتألف من ثماني مجموعات توليد مائية مزودة كل منها بعنفه مائية من

نوع كابلات استطاعة الواحدة منها 110 ميغا وات واستطاعة المحطة الإجمالية 880 ميغا وات، ويبلغ إنتاجها من الطاقة الكهربائية حوالي مليارين ونصف كيلو وات



الشكل 12 - 10 محطة توليد الثورة على سد الفرات في سورية

ساعي سنوياً. ويحجز سد الفرات خلفه بحيرة الأسد التي تعد من أنظف البحيرات الاصطناعية العذبة في العالم، ويبلغ طولها 80 كم، وعرضها 8 كم، ومحيطها 200 كم، و مساحتها 640 كم²، وحجم التخزين فيها 1.41 مليار متر مكعب على المنسوب 403 م. ويبلغ الضاغط المائي الأعظمي لتشغيل مجموعات التوليد 94 م. ويبين الشكل 12 - 10 صورة لمحطة التوليد الكهرومائية عند سد الثورة على نهر الفرات في سورية.

2 - محطة سد البعث الكهرومائية

يبعد سد البعث التنظيمي عن سد الفرات 26 كم باتجاه جريان النهر نحو الحدود مع العراق، ويقع بين مدينتي الثورة والرقعة. وتم تشغيل أول مجموعة في حزيران 1987 وأخر مجموعة في كانون الأول عام 1988.

يهدف إنشاء سد البعث إلى تنظيم جريان مياه النهر التي تمر عبر محطة سد الفرات الكهرومائية وتقليل تذبذب منسوب المياه في النهر بشكل يومي إلى (0.5) م في حالة التصريف العادية كحد أقصى، وتمكين محطة سد الفرات من العمل في نظام الذروة الكهربائية وتحسين عملها بما يحقق زيادة في استطاعتها المفيدة بمقدار (80) ميغا وات والاستفادة من المياه المخزنة في البحيرة لتوليد طاقة كهربائية تقدر وسطياً بحوالي 375 مليون كيلو وات ساعي سنوياً وتثبيت مرور مياه كافية لأغراض الري في المجرى السفلي لنهر الفرات الواقع خلف جسم سد البعث.

يبلغ طول سد البعث مع المحطة 3069 م ومنسوب الطريق، في أعلى السد، عن سطح البحر 260 م وعرضه عند القاعدة 60 م والارتفاع 10 م وعرضه عند القمة 10 م ويتألف المفيض من ثمانية فتحات مزودة ببوابات قوسية وتبلغ طاقته التصريفية مع المحطة 8500 م³ / ثا. تتألف المحطة الكهرومائية من ثلاث مجموعات توليد أفقية استطاعة الواحدة منها 25 ميغا وات، وتتشكل أمام السد بحيرة مساحة سطحها 27 كم² وحجم تخزينها 90 مليون م³، والضاغط المائي بين 7 و 9 أمتار وعرضها وسطياً 1500 م وطولها بحدود 26 كم. يقع المفيض في سد البعث إلى جانب المحطة الكهرومائية.

3 - محطة سد تشرين الكهرومائية :

يقع سد تشرين في الجزء الشمالي من الهضبة السورية في منطقة يوسف باشا على بعد 57 كم عن الحدود السورية التركية. ويهدف السد بشكل أساسي إلى رفد الشبكة العامة بطاقة كهربائية إضافية تقدر سنوياً بحوالي 6.1 مليار كيلو وات ساعي .

المحطة الكهرومائية للسد : تتألف المحطة من ست مجموعات توليد استطاعة الواحدة منها 105 ميغا وات وهي من نوع كابلات عمودية وهناك مفيض سفلي للمحطة مؤلف من 12 فتحة تبلغ طاقة تصريفه الأعظمية 8530 متر مكعب بالثانية وهناك سدة

منجرفة لحماية المحطة وجسم السد في حالات الفيضانات التي يزيد تصريفها عن 18 ألف م³ بالثانية .

جسم السد الترابي : يبلغ طول جسم السد الترابي بما فيه المحطة الكهرومائية وسدة الطوارئ 1500 م ويبلغ عرضه عند القاعدة 290 م ارتفاعه 40 م وعرضه 12.5 م من الأعلى عند المنسوب 329 م. أما الضاغط المائي الأعظمي فيبلغ 25.5 م ويبلغ طول البحيرة 73 كم ومتوسط عرضها 2 كم وتبلغ مساحة سطحها 166 كم² وحجم تخزينها 1.883 مليار م³ عند المنسوب 328.5 م فوق سطح البحر .

الأهداف الرئيسية التي حققتها السدود والمحطات الكهرومائية :

أ - توليد الطاقة:

يتم الاستفادة من المياه المخزنة في البحيرات الثلاث الأسد ، البعث ، تشرين في توليد الطاقة الكهرومائية الرخيصة الكلفة والنظيفة والصديقة للبيئة، ورشد الشبكة العامة وخاصة في ماعات الذروة المسائية بما يصل وسطياً إلى حوالي 1400 ميغا وات، كما أن مجموعات التوليد في المحطات الكهرومائية على سدود الفرات تلعب دوراً رئيسياً وهاماً في تنظيم واستقرار شبكات الطاقة في القطر، وتمتاز مجموعات المائية بسرعة الإقلاع والإيقاف وسرعة التحميل والمرونة العالية في تغيير حمولاتها وهي تساهم مساهمة كبيرة في تغطية الحمولات الكهربائية المفاجئة .

ب - طاقة صديقة للبيئة :

وتمتاز الطاقة المولدة من المحطات المائية بأنها طاقة صديقة للبيئة وأنها أقل كلفة في التشغيل والصيانة، ويتم الاستفادة من نفس كمية المياه أكثر من مرة في إنتاج الطاقة في المحطات المقامة على مدرجات الأنهار من خلال الاستفادة من كامل الضاغط المتوفر. وتساهم المحطات المائية في تخفيض الانبعاث الغازي إلى الجو مقارنة مع محطات الطاقة الحرارية الأخرى، حيث أن احتراق طن واحد من الوقود فيها يطلق ثلاثة أطنان من غاز ثاني أكسيد الكربون الملوثة للبيئة، ويحتاج احتراق كل واحد طن فيول في توليد الطاقة إلى 1500 ليتر سوربة لإزالة الأضرار البيئية التي تسببها .

إضافة إلى أن الوسيط المستخدم لتوليد الطاقة الكهربائية هو الماء وهو غير معرض لارتفاعات الأسعار العالمية، حيث أن كلفة إنتاج كل 1 كيلو وات من الطاقة الكهرومائية عالمياً في المحطات الحرارية تعادل 6 ليرات سورية باعتبار أن كل 1 كغ من مادة الفول تستخدم في توليد الطاقة في المحطات الحرارية والغازية تنتج 4 كيلو وات ساعي من الكهرباء .

ج- الطاقة الكهربائية المولدة المتاحة من السدود الثلاثة:

بلغت مساهمة إنتاج محطة سد الفرات من كمية الطاقة المولدة على مستوى القطر لوحدها خلال العام 1976 نحو 73% ، وفي عام 1978 حوالي 78 % ، وفي عام 1988 كانت النسبة 52 % ، أما مساهمة مجموع محطات الفرات خلال 1977 فقد بلغ حوالي 81 % (3517 مليون كيلو وات ساعي) وبلغ في عام 2004 نحو 13 % (4223 مليون كيلو وات ساعي) وفي العام 2006 بحدود 11% (3980 مليون كيلو وات ساعي) وبلغ في العام 2007 بحدود 10% (3519 مليون كيلو وات ساعي) .

ولا يعني هذا التناقض في نسبة المساهمة انخفاض توليد الطاقة في مجموعات توليد الطاقة الكهربائية في محطات الفرات بل يدل على التطور الحضاري والصناعي والتقدم الكبير الناجم عن تحس المستوى المعيشي في سورية في كافة المجالات ولاسيما زيادة استخدام الأدوات المنزلية الكهربائية وتحسن مستوى دخل الفرد والتوسع بالمصانع والمعامل وإنارة الريف وتوسع المدن إضافة إلى التوسع في مشاريع الري والاستصلاح في منطقة مسكنة غرب ومنطقة مسكنة شرق ومنشأة الأسد، وإرواء مدينة حلب من مياه البحيرة وري أراضي الاستصلاح في حوض البليخ والتي تستهلك كميات كبيرة من خزان المياه في بحيرة الأسد عبر مأخذ قناة البليخ دون الاستفادة منها في توليد الطاقة الكهربائية من محطة سد الفرات أو البعث. كما أن توليد الطاقة من المحطة مرتبط أولاً بحجم الوارد المائي لنهر الفرات في سورية، وبضرورات تصريف المياه بعد وقبل التوليد لغاية الري و الشرب بالدرجة الأولى ثم إعطاء العراق الشقيق حصته من مياه نهر الفرات. وتجدر الإشارة إلى أن كمية الطاقة الكهربائية

المنتجة من محطات الفرات الثلاث منذ بداية استثمار أول مجموعة توليد في محطة سد الفرات في شهر أيار 1974 ولغاية العام 2007 بلغت أكثر من 81 مليار كيلو واط ساعي وهي تعادل 20 مليون طن تقريباً من الفول لإنتاجها في المحطات الحرارية، وتساوي قيمتها المادية عالمياً ما يعادل 110 مرات من كلفة إنشاء وتنفيذ السدود ومحطات الفرات الثلاث من مواد البناء والمعدات والآليات والمرافق الخدمية وأجور العاملين، أي أن هذه المحطات رابحة اقتصادياً وبيئياً.

12 - 9 مراجع الفصل الثاني عشر

- 1 - الدكتور سميح الجابي، "دراسة الجدوى الفنية والاقتصادية لإنشاء محطة توليد مائية على شلال كديران في محافظة الرقة في سورية"، وزارة الري، 1992.
- 2 - الدكتور محمد علي عثمان، "المحطات الكهربائية"، منشورات جامعة دمشق، 1989.

3 - Hydroelectricity — Wikipedia, Comparison with other power generation.

www.en.wikipedia.org/wiki/Hydroelectricity

4 - HowStuffWorks "Hydropower Plant Parts"

www.howstuffworks.com/hydropower-plant1.htm

5 - "List_of_largest_hydroelectric_power" wikipedia

[en.wikipedia.org/...../List_of_largest_hydroelectric_power stations.](http://en.wikipedia.org/...../List_of_largest_hydroelectric_power_stations)

6 - Energy Matters: Types of Hydroelectric Power Plants

www.library.thinkquest.org/.../hydro/types.html

7 - Hydroelectric power plants.

www.munichre.com/publications/302-06084_en.pdf

8 - hydroelectric power plant.

www.green-trust.org/hydro.htm

9 - MINI HYDRO POWER PLANTS -"GREEN" POWER FOR USERS.

www.balwois.com/balwois/administration/full.../ffp-903.pdf



الفصل الثالث عشر

طاقة المد والجزر

13 - 1 مقدمة [4] [1]

طاقة المد والجزر أو الطاقة القمرية هي نوع من الطاقة الحركية التي تكون مخزونة في التيارات الناتجة عن المد والجزر الناتجة بطبيعة الحال عن جاذبية القمر و الشمس ودوران الأرض حول محورها وعليه تصنف هذه الطاقة على أنها طاقة متجددة.

يعتبر المد والجزر من الظواهر الطبيعية المعروفة عند سكان سواحل البحار. فهم يرون مياه البحر ترتفع في بعض ساعات اليوم وتتنخفض في البعض الآخر. وقد لا يعلمون أن هذا الارتفاع ناتج عن جاذبية القمر عندما يكون قريبا من هذه السواحل وأن ذلك الانخفاض يحدث عندما يكون القمر بعيدا عن هذه السواحل ، أي عندما يغيب القمر ، علما أن القمر يدور حول الأرض في مدار إهليجي أي بيضاوي الشكل دورة كل شهر هجري ، وأن الأرض تدور حول نفسها كل أربع وعشرين ساعة . فإذا ركزنا الانتباه على مكان معين ، وكان القمر ينيره في الليل ، فهذا معناه أنه قريب من ذلك المكان وأن جاذبيته قوية . لذا ترتفع مياه البحر . وبعد مضي اثني عشرة ساعة من ذلك الوقت، يكون القمر بالجزء المقابل قطريا، أي بعيدا عن المكان ذاته بعدا زائدا بطول قطر الكرة الأرضية فيصبح اتجاه جاذبية القمر معاكسة وبالتالي ينخفض مستوى مياه البحر.

وأكثر بلاد العالم شعورا بالمد والجزر هو الطرف الشمالي الغربي من فرنسا حيث يعمل مد وجزر المحيط الأطلسي على سواحل شبه جزيرة بريتانيا فترتفع المياه في تلك المنطقة إلى ثلاثين مترا وقد أنشئت هناك محطة لتوليد الطاقة الكهربائية بقدرة 400 ميغاوات . حيث تم تركيب عنفات خاصة في مجرى المد فتديرها المياه الصاعدة ثم تعود المياه الهابطة وتديرها مرة أخرى.

ومن الأماكن التي يكثر فيها المد والجزر السواحل الشمالية للخليج العربي في منطقة الكويت حيث يصل أعلى مد إلى ارتفاع 11 مترا ولكن هذه الظاهرة لا تستغل في هذه المناطق لتوليد الطاقة الكهربائية.

13 - 2 توليد الطاقة الكهربائية من طاقة المد والجزر

توجد طريقتان أساسيتان لتوليد الطاقة الكهربائية من طاقة المد والجزر وهي مستخدمة في عدد من البلدان يبلغ 26 بلدا أهمها فرنسا وكندا والأرجنتين والصين وكوريا الجنوبية وانكلترا.

1 - طريقة بناء السدود في طريق مياه المد والجزر.

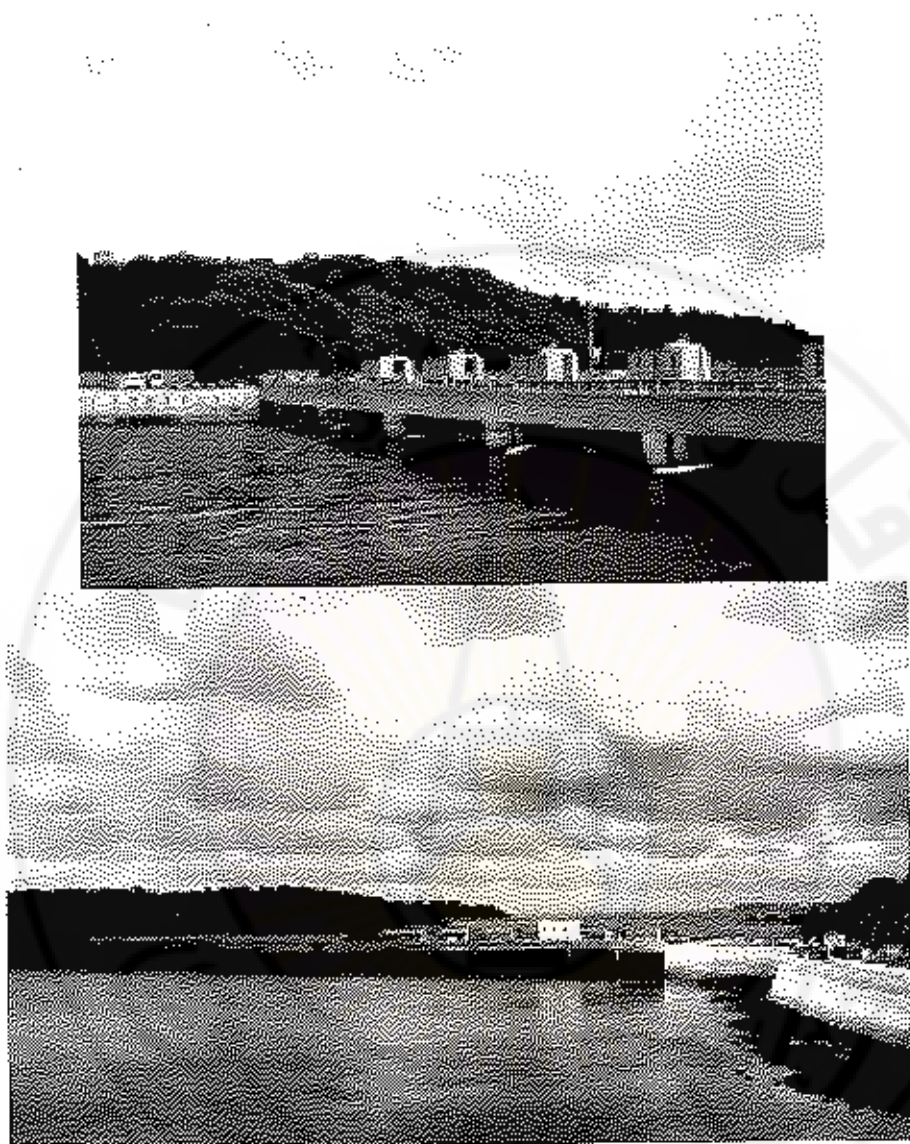
2 - طريقة بناء الأبراج في طريق مياه المد والجزر.

13 - 2 - 1 طريقة بناء السدود في طريق مياه المد والجزر

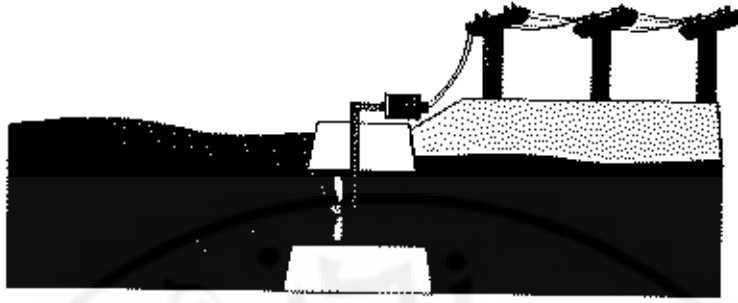
لقد تم استخدام طريقة بناء السدود لأول مرة كما هو منفذ في محطة رانس Rance بفرنسا والتي بُنيت عام 1966 وتبلغ استطاعة المولدات الكهربائية المركبة في المحطة 240 ميجاوات. بُني هذا السد للتحكم في التيارات الناتجة عن المد والجزر وتوجيه هذه التيارات بطريقة تمر في فتحات العنفات أو المراوح. ويبين الشكل 13 - 1 صورة للسد المنفذ أما الشكل 13 - 2 فيبين مبدأ عمل مثل هذه المحطات.

هذه العنفات تشبه العنفات التي تستخدم لتوليد الطاقة من الرياح ولكن في هذه الحالة تم تثبيت 24 مروحة على سد بطول إجمالي قدره 750 متر ويحجز 184 مليون متر مكعب من الماء. تتصل كل مروحة بعنفه مع مولد استطاعته تساوي 10 ميجاوات من الكهرباء. وقد بُني هذا السد عند مصب نهر الرانس. تُنصب هذه المراوح تحت سطح المياه في فتحات خاصة و بفعل التيارات المائية الناتجة عن المد والجزر تدور هذه العنفات وعبر ناقل الحركة تتم مضاعفة عزم الدوران و من ثم تتم الاستفادة من هذا العزم لتحريك المولد الذي يقوم بتوليد الطاقة الكهربائية.

وقد تستخدم هذه العنفات أيضاً، الطاقة الفائضة من المحطات الأخرى ساعة الطلب الخفيف على الكهرباء ، لإعادة ملئ الأحواض بالماء، وإعادة استخدام الماء لتوليد الكهرباء في أوقات الذروة، ولكن استخدام هذه التكنولوجيا تعتمد على وجود الأماكن المناسبة عند مصبات الأنهار مثلا أو في مضائق البحار، وهناك تقام السدود لاستخدامها.

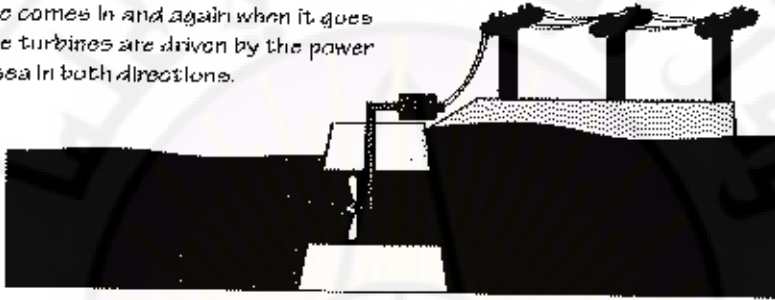


الشكل 13 - 1: صورة السد في محطة راتس في فرنسا [4],[1]



TIDE COMING IN

This tidal electricity generation works as the tide comes in and again when it goes out. The turbines are driven by the power of the sea in both directions.



TIDE GOING OUT

الشكل 13 - 2: مبدأ عمل محطات التوليد من السدود أمام مياه المد والجزر [2],[3]

و للاستفادة من تيارات المد و الجزر التي هي بطبيعة الحال معكوسة الاتجاه، لابد من تركيب المروحة على رأس متحرك ليتناسب مع اتجاه التيارات و بالتالي رفع نسبة الاستغلال ، و يميز هذه التكنولوجيا إذا ما قورنت بتكنولوجيا توليد الطاقة من الرياح أن كثافة المياه أعلى من كثافة الهواء ، بالتالي يكون توليد الطاقة من الجزر للمروحة الواحدة أعلى عنه بالمقارنة بتوليد الكهرباء بواسطة الرياح ، ويتم ذلك عند سرعة دوران منخفضة من خلال استخدام ناقل الحركة.

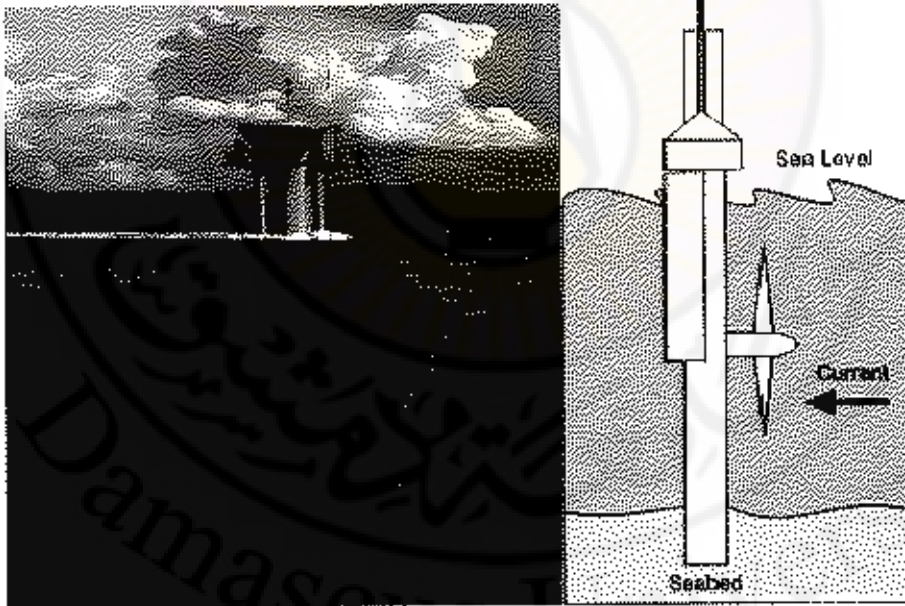
بالإضافة إلى المحطة الفرنسية التي تعمل بالمد والجزر ، تبعتها محطة بكندا عام 1984 عند منطقة نوفاسكوتيا باستطاعة كهربائية قدرها 20 ميغاوات . كما بنت الصين عام 1986 في ولاية كسينجيانج محطة بقوة 10 ميغاوات. وتبنى في سيهوا

بكوريا الجنوبية محطة تضم 10 مولدات كهربائية، يولد كل منها طاقة كهربائية قدرها 26 ميجاوات، أي باستطاعة كلية 260 ميجاوات، وستكون جاهزة عام 2012. وتوجد في إنكلترا قيد التنفيذ محطة عملاقة عند مصب نهر سيفرن Severn بين كاردف ومدينة بريستول تضم 216 عتفة وسوف تولد استطاعة تساوي 8500 ميجاوات ، وسوف تغطي 5 % من احتياجات إنكلترا من الطاقة الكهربائية.

13 - 2 - 2 طريقة بناء الأبراج في طريق مياه المد والجزر

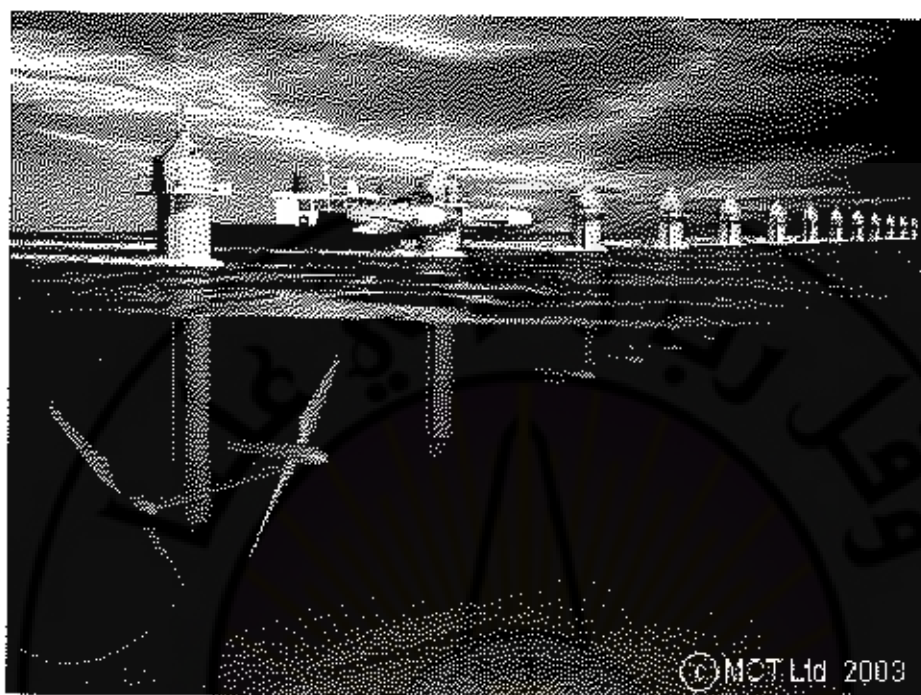
تعتمد هذه الطريقة على تثبيت مروحة أو مروحتان على برج متين بحيث تكون تلك المراوح تحت سطح الماء . و بنفس الطريقة المشروحة أعلاه تتحول طاقة حركة المروحة بواسطة المولد الكهربائي إلى طاقة كهربائية . ويوضح الشكل رقم 13 - 3 و الشكل 13 - 4 طريقة توليد الطاقة الكهربائية من طاقة المد والجزر باستخدام العنقات المركبة على أبراج مثبتة على قاع البحر .

Tidal Turbine



الشكل رقم 13 - 3: توليد الطاقة الكهربائية من طاقة المد والجزر باستخدام العنقات

المركبة على أبراج مثبتة على قاع البحر [2],[3],[4]



الشكل 13 - 4: العنفات المركبة على أبراج مثبتة على قاع البحر لتوليد الطاقة

الكهربائية من طاقة المد والجزر [4],[3]

تستغل هذه الطريقة التيارات المائية الناتجة عن حركة المياه عند المد والجزر وتكفي ثلاثة أمتار من ارتفاع مياه البحر مع المد لتوليد الطاقة الكهربائية بشكل اقتصادي. وقد تصل سرعة المياه في بعض الحالات في التيارات البحرية الناتجة عن المد والجزر من 2.5 متر في الثانية 10 متر في المحافظة على البيئة.

13 - 3 تصنيف العنفات المستخدمة لتوليد الطاقة من المد والجزر

تصنف العنفات المستخدمة لتوليد الطاقة الكهربائية من طاقة المد والجزر في نوعين وكما يلي:

1 - النوع الأول

عنفات وحيدة التأثير وهذه تولد الطاقة من تدفق الماء عبر العنفات في اتجاه واحد فقط و شأنها شأن العنفات البخارية حيث لا تستطيع العمل عندما يدور البخار باتجاه

معاكس . لا تستطيع العنفات في هذه الحالة العمل إلا عند مرور الماء في اتجاه واحد فقط ،عندما ينخفض مستوى الماء في البحر بشكل مناسب تفتح بوابات التحكم المتمركزة أمام و خلف العنفات حتى يجبر الماء على التدفق من خلال العنفة و تتسارع الشفرات لتوليد الكهرباء. تغلق بوابات التحكم عندما يصل مستوى الماء في المصب إلى مستوى الماء المنخفض في البحر في حالة الجزر، وفي حالة المد يعود مستوى الماء في البحر للارتفاع و تبدأ دورة ثانية و هكذا.

2 - النوع الثاني

عنفات ثنائية التأثير تعمل بنفس مبدأ العنفات وحيدة التأثير تقريباً تبدأ الدورة كنورة وحيدة التأثير مع أن مستوى الماء في المصب ينخفض و يرتفع مستوى الماء في البحر بالشروط للمدية تفتح بوابات التحكم أمام و خلف العنفات لذلك يندفع الماء خلال العنفات لتوليد الكهرباء، عندما يصبح مستوى الماء داخل المصب بنفس مستوى الماء في البحر تغلق بوابات التحكم. يبقى مستوى الماء في المصب مرتفع والماء في البحر سوف يصل لحالة المد المنخفض. عندما ينخفض مستوى مياه البحر بما فيه الكفاية يعاد فتح البوابات أمام و خلف العنفة و يتدفق الماء خارج المصب من خلال العنفات حيث تولد الكهرباء عند مرور الماء على الشفرات في الاتجاهين و هذا ابتكار جديد في تقنية الطاقة الحديثة حيث تصمم الشفرات للفعل و التسريع بنفس الاتجاه بغض النظر من اتجاه تدفق الماء عليها. من البديهي أن تولد العنفات ثنائية التأثير كمية من الطاقة أكبر بمرتين من الطاقة التي تولدها العنفات أحادية التأثير و لكن عملياً لا يمكن للعنفات ثنائية التأثير أن تولد هذه الكمية بسبب ضياع الوقت اللازم لإغلاق و لفتح بوابات التحكم ثنائية التأثير .

13 - 4 مزايا استخدام طاقة المد والجزر

- يجب أن يكون ارتفاع المياه في المد والجزر لا يقل عن 5 متر ولذلك يوجد في العالم ١٠٠ موقع يتوفر فيها هذا الشرط. كما أن استخدام هذه التقنية في المياه المالحة يعرض القطع المعدنية المستخدمة إلى الصدأ وبالتالي لا بد من العناية والصيانة الدائمة وهذا ما قد يرفع من التكلفة وبالتالي تدني الربح.

- أول محطة توليد طاقة كهربائية من طاقة المد والجزر وأكبرها بني عام 1961 في Saint-Malo في فرنسا وبدأ الإنتاج والعمل في عام 1966 . ويبلغ ارتفاع المد والجزر في هذه المنطقة بين 12 و16 متر . فقام الفرنسيين ببناء سد بطول 750 متر ونتجت عنه بحيرة بمساحة 24 كم مربع وبسعة 184 مليون متر مكعب، وفي هذا السد 24 فتحة هناك في كل منها عنفة باستطاعة 10 ميغاوات، وبالتالي تبلغ الاستطاعة الإجمالية 240 ميغاوات، وتولد طاقة تبلغ 600 مليون كيلو وات ساعي سنوياً. كما تجدر الإشارة إلى أن هذا السد يستخدم مبدأ تخزين الماء فيستفيد من الطاقة الكهربائية الفائضة عن محطات التوليد الأخرى خارج ساعات الذروة عن طريق ضخ المياه وإعادة استخدام هذه الطاقة المخزنة في الماء في أوقات الذروة.

- تصل قيمة مردود استغلال طاقة المد والجزر في محطات التوليد إلى 80 في المائة إذا تم طبعاً استخدام أحدث التكنولوجيا، وبالمقارنة مع مردود محطات التوليد الحرارية فهي قيمة مرتفعة جداً.

- هذه الطاقة تحظى بتصنيف "صديق للبيئة" فهي لا تصدر أي غازات أو مخلفات سامة كما أنها تأخذ بعين الاعتبار الثروة السمكية فالكثير من الأبحاث حاولت التقليل من المخاطر التي قد يتعرض لها السمك نتيجة مروره بالقرب من العنفات، و قد استطاع الفرنسيون بالفعل تخفيض نسبة الضرر على الأسماك المارة من 15 بالمائة إلى 5 بالمائة.

من الأخطار التي يتعرض لها السمك المار:

- انخفاض الضغط

- الاصطدام بالمراوح.

13 - 5 مراجع الفصل الثالث عشر

1 - Baker, A., C., " Tidal Power ", Peter Peregrinus Ltd., London, 1991.

2 - Ball, G. C., Wilson E. M., Miller., Gibson, R. A., " The Annapolis Tidal Pilot Project", Water Power Proceeding, Ed. Anon, Washington, 1980.

- 3 – Hammons, T. J., " Tidal Power Online", pp 419-433,
Proceeding of IEEE, 1993.
- 4 – Lecomber, R., "The Evaluation of Tidal Power Projects",
Eds Severn, R. T., Dorchester, 1979.





الفصل الرابع عشر

طاقة أمواج البحار والمحيطات Wave power

14 - 1 مقدمة

بدأت الكثير من الدول الساحلية الاستفادة من الطاقة الحركية الكامنة في الأمواج لتوليد الطاقة الكهربائية و بالتالي تخفيف الضغط عن محطات الطاقة الحرارية، والنتيجة تخفيف التلوث الصادر عن المحطات الحرارية التي تعمل بالفحم أو بالبترول.

تعرف طاقة الأمواج على أنها نقل الطاقة من أمواج المحيط السطحية، و تسخيرها في تطبيقات ميكانيكية مفيدة مثل توليد الكهرباء، وتحمية المياه أو ضخ المياه إلى الأحواض المائية.

وتعتبر طاقة الأمواج من أحد أنواع الطاقة المتجددة. و هي تختلف كلياً عن طاقة المد والجزر. و لا زالت تقنية طاقة الأمواج حالياً غير موظفة تجارياً مع العلم بوجود بوابر استعملها منذ عام 1890 على الأقل، و توجد أول مزرعة لتوليد الطاقة من الأمواج في العالم في البرتغال، و تحتوي على ثلاثة مولدات باستطاعة 750 كيلو واط للمولد الواحد.

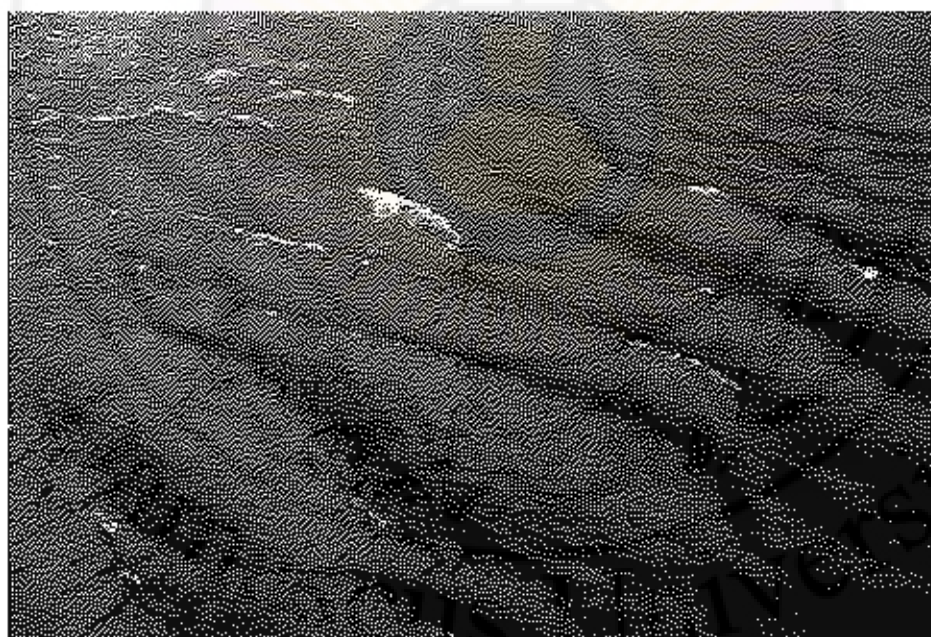
تقدر الهيئة الدولية للطاقة قدرة الأمواج على إنتاج طاقة تصل إلى اثنين تيراوات في العام، أي ضعف إنتاج العالم الحالي من الكهرباء، وما يعادل الطاقة التي تنتجها ألفي محطة نفط، غاز، فحم، وطاقة نووية. يمكن أن تزيد الطاقة الإجمالية القابلة للتجديد في محيطات العالم على ما يفوق حاجة العالم الحالية للطاقة بخمسة آلاف مرة، إذا ما تم تسخيرها. لكن لا تزال هذه التقنية في الواقع قيد التطوير، ومن المبكر أن نقدر متى ستساهم بشكل فعال في مخطط الطاقة العلمي الشامل.

14 - 2 كيف تتشكل الأمواج [8]،[7]

تعتبر طاقة الأمواج شكلاً آخر من أشكال الطاقة الشمسية. وقد يبدو هذا الأمر مستغرباً، ولكن الأمواج تتشكل بسبب الرياح، والرياح تنتج عن تأثير تسخين الشمس للأرض.

لا تسخن الشمس كما هو معروف، جميع مناطق الأرض بشكل واحد، إذ يعتمد التسخين على اختلاف تركيب الأرض من منطقة إلى أخرى، وعلى وضعية الأرض في مدارها حول الشمس، الأمر الذي يسبب زيادة تسخين منطقة عن منطقة أخرى. فعند تسخين الهواء من طاقة الشمس، يصبح أقل كثافة وبالتالي أخف وزناً، فيرتفع للأعلى. وترك هذا الأمر مجالاً للهواء أكثر كثافة وأكثر برودة ليأخذ مكان الهواء الساخن.

والرياح هي المسؤولة عن تشكل الأمواج الكبيرة والقوية، فعندما تهب الرياح فوق سطح مياه البحر أو المحيط فإن احتكاك الهواء مع قطرات الماء يولد اهتزاز المياه، وتتابع الرياح دفع هذه المياه المهتزة لتتشكل موجة، والتي تزداد حجماً وقوة مع ازدياد تأثير الرياح، تماماً كما يحدث في كرة التلج عند تدحرجها من أعلى المرتفعات. ويمثل هذا الأمر عملياً تحويلاً من طاقة الشمس إلى طاقة الرياح ومنها إلى طاقة الأمواج. ويبين الشكل رقم (14 - 1) بداية تشكل الأمواج.



الشكل 14 - 1: بداية تشكل الأمواج [8]

- تؤثر عدة عوامل على تحديد مدى قوة كل موجة، وأهم هذه العوامل هي التالية:
- سرعة الرياح: كلما كانت سرعة الرياح أكبر، أصبحت الأمواج أكبر.
 - فترة هبوب الرياح: كلما كانت هذه الفترة أطول، كانت الأمواج أكبر.
 - المسافة التي تقطعها الرياح: كلما كانت المسافة التي تؤثر فيها الرياح على الأمواج أطول، كانت الأمواج أكبر وأقوى.

14 - 3 توليد الطاقة الكهربائية من طاقة الأمواج [1],[2],[3]

تعود مسألة استثمار طاقة أمواج البحار والمحيطات مائتي سنة خلت وأكثر، لكنها لم تلق اهتماماً عملياً إلا بعد أزمة النفط في سنوات السبعينات، وسيزداد الاهتمام بهذه الطاقة كمصدر بديل للطاقات المتجددة كلما ازداد سعر النفط عالمياً.

وقد تم في السنوات العشر الماضية اعتماد عدد من الطرق لاستثمار طاقة الأمواج في توليد الطاقة الكهربائية. ويمكن تطبيق هذه الطرق في عرض البحار والمحيطات أو بمحاذاة السواحل أو على الشواطئ. حيث يتم تثبيت التجهيزات المسماة بمبدلات طاقة الأمواج إلى أرض الشاطئ أو إلى قاع البحر أو المحيط، Wave Energy

Converters (WEC) أو Terminator.

وبذلك يكون هناك ثلاثة أنواع من المبدلات:

1 - التجهيزات الساحلية المستخدمة لطاقة الأمواج Shoreline Devices

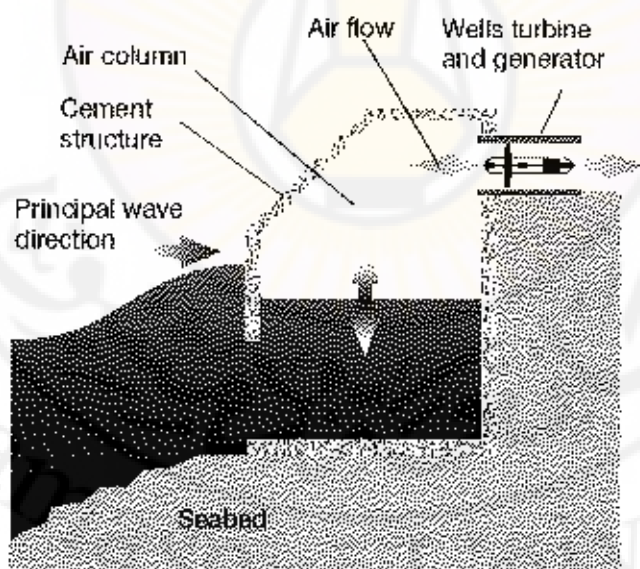
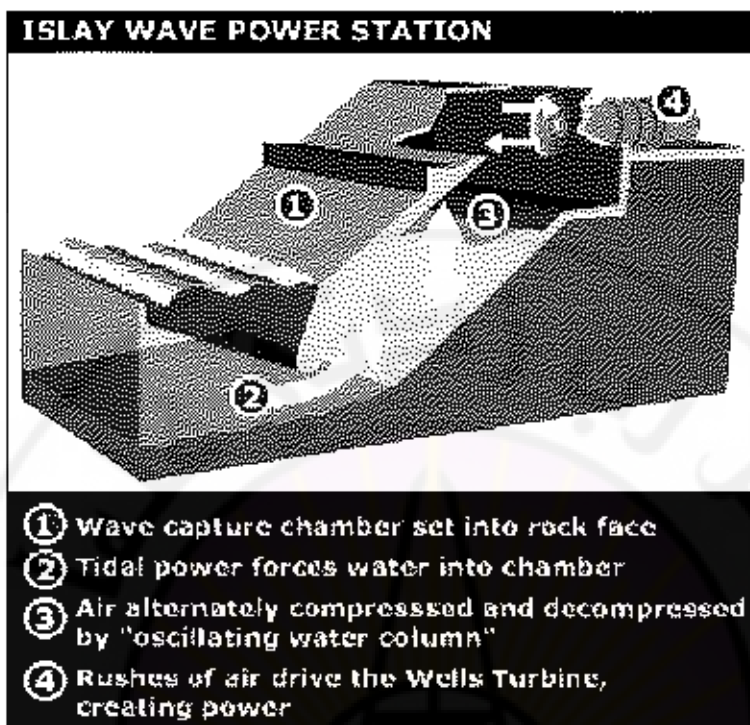
2 - التجهيزات اللازمة والقريبة من الساحل Near-shore Devices

3 - التجهيزات اللازمة والبعيدة عن الساحل Off-shore Devices

وأهم الطرق المستخدمة لتوليد الطاقة الكهربائية من طاقة الأمواج هي التالية:

14 - 4 - العمود المائي المهتز (OWC) Oscillating - Water Column

وهو نظام مؤلف من عدد من التجهيزات والمعدات كما هو مبين في الشكل 14 - 2 ، حيث يركب هذا النظام بشكل عمودي على اتجاه الأمواج وعلى الساحل.



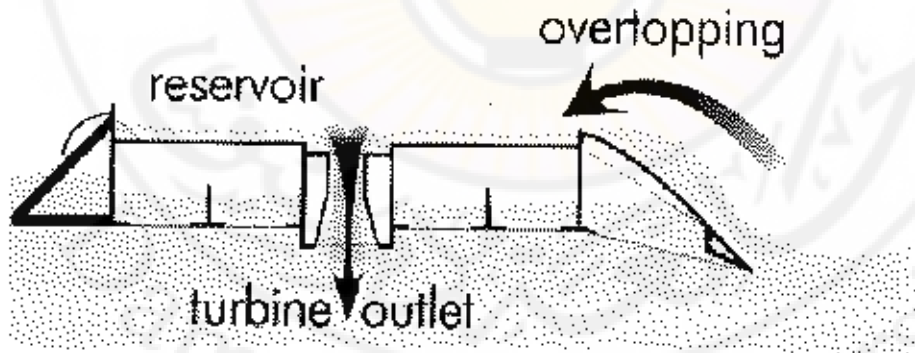
الشكل 14 - 2: نظام التوليد من أمواج البحر من طراز العمود المائي المهتز

[12],[4]

ويحتوي العمود المائي المهتز على عدد من العناصر الثابتة وعنصراً واحداً قابلاً للحركة مع حركة الأمواج. وتربط العناصر الثابتة مع قاع البحر أو المحيط أو مع أرض الشاطئ، ويجب أن تبقى هذه العناصر ثابتة بالنسبة للعنصر المتحرك من النظام أيضاً. ويعمل الجزء المتحرك هذا كما يعمل المكبس في السيارة، متحركاً للأعلى وللأسفل فيسبب في حركته هذه ضغط الهواء أو ضغط الزيت الذي يدور العنفة المربوطة في أعلى النظام. يمكن أن نلاحظ في هذا الشكل أن المآخذ الوحيد للمياه يقع في أسفل النظام حيث يمكن للأمواج أن تدخل وتخرج وأن هناك طريقاً وحيداً وضيقاً في الأعلى موصول مع العنفة يسمح بخروج الهواء من حجرة الأمواج. فعندما تدخل الأمواج بكامل قوتها إلى جسم النظام فإنها تضغط الهواء الموجود في الحجرة وتدفعه عبر الممر الضيق في الأعلى ليمر في العنفة فيدورها.

14 - 5 نظام المفيض:

وهو يتألف من حوض تخزين مؤقت على الشاطئ محاط بجدر استنادي وتوجد في أسفله فتحة مأخذ تتصاب فيها مياه الأمواج التي تتجمع في الحوض نتيجة لاجتياز الأمواج لجدار المفيض. تمر المياه عبر المآخذ لتدور عنفة مائية مركبة في طريقها، كما هو مبين في الشكل 14 - 3.

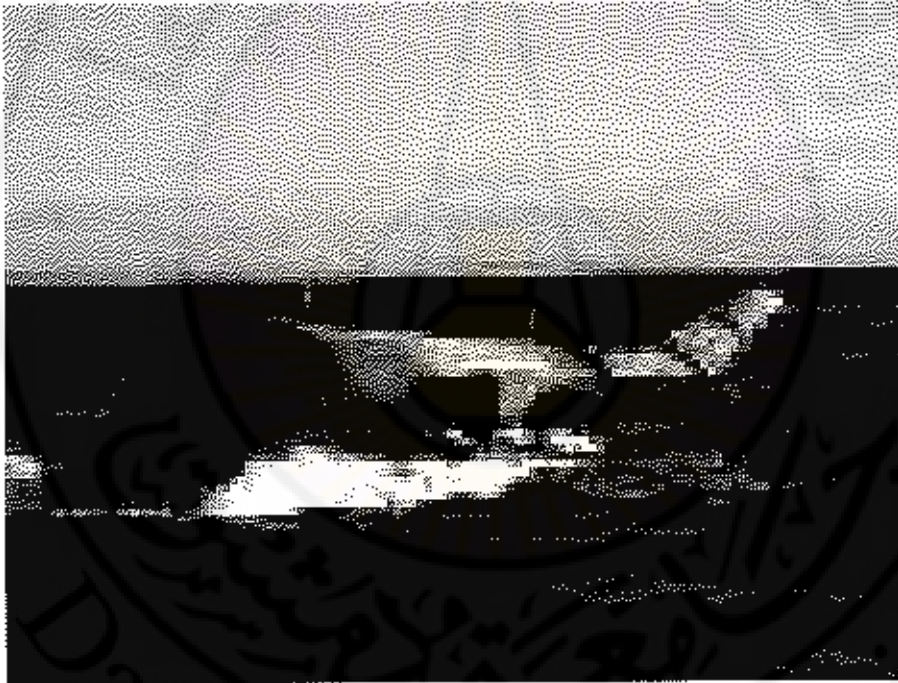


الشكل 14 - 3: نظام التوليد من أمواج البحر من طراز - نظام المفيض [4],[6]

يمكن أن نلاحظ في هذا الشكل مبدأ عمل مبدلة طاقة الأمواج حيث تجتاز جدار المفيض وتتجمع في حوض التخزين لتعود بعدها إلى البحر عن طريق المأخذ وعبر العنفة.

14 - 6 نظام التخامد:

يركب هذا النظام في عرض البحر أو المحيط بشكل مواز لاتجاه الأمواج في البحر أو في المحيط. ومن أشهر الأمثلة عن هذا النظام ما يعرف باسم بيلاميس Pelamis Wave Power، وهو عبارة عن مجموعة أسطوانات معدنية مجوفة مربوطة مع بعضها لتشكل ما يشبه الدودة أو الأفعى. كما هو مبين في الشكل 14-4.



الشكل 14-4: نظام التوليد من أمواج البحر من طراز - نظام التخامد [12],[11]

وتثبت هذه الأسطوانات إلى قاع البحر أو المحيط، وتركب ضمن هذه الأسطوانات المعدنية تجهيزات توليد الطاقة الكهربائية من طاقة الأمواج، والتي تتألف من مجموعة

عناصر هيدروليكية تحول ارتفاع وانحدار الاسطوانة مع حركة الأمواج العزم يدور العنفة المربوطة مع المولد الكهربائي فيعطي طاقة كهربائية.

14 - 7 نظام امتصاص طاقة الأمواج:

لا توجه هذه الأجهزة في اتجاه معين نسبة للأمواج ، بل تتركب عشوائياً في عرض البحر أو المحيط، لكنها تستطيع امتصاص طاقة الأمواج من أي اتجاه ترد فيه. وأحد أشهر نموذج من هذا النظام هو ما يعرف باسم صبي الماء Aquabouy كما هو مبين في الشكل 14 - 5.

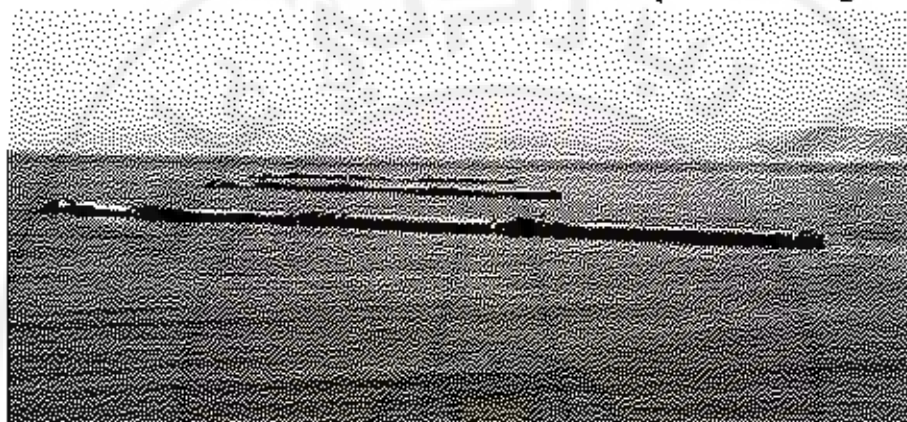


الشكل 14 - 5: نظام التوليد من أمواج البحر من طراز - نظام امتصاص طاقة

الأمواج [8],[10],[12]

وقد صمم هذا النظام وطور في جامعات فنلندا، وهذا النظام عبارة عن أنبوب اسطواني يركب بشكل عمودي في مياه البحر. تندفع الأمواج داخل الأنبوب من كل اتجاه فتتحرك مكباً للأعلى وللأسفل، مما يسبب ضغطاً للماء ضمن الأنبوب، ويدور هذا الماء المضغوط عنفة عندما يمر عبرها.

وتمكن الملاحظة من الشكل السابق أن هذا النظام يستخدم طاقة الأمواج لتحريك مكبس على شكل قرص ضمن الأنبوب ليضغط المياه. وتقوم مضخة خاصة بدفع المياه المضغوطة إلى الأعلى لتتطلق ضمن عنفة مائية فتدورها وهذه تدور مولداً كهربائياً مربوطاً بها فيولد الطاقة الكهربائية. وتركب هذه الأنظمة في مجموعات مع بعضها لتشكل ما هو معروف بمزارع طاقة الأمواج كما هو مبين في الشكل 14 - 6.



الشكل 14 - 6: مزرعة طاقة الأمواج [12] [11]

14 - 8 مراجع الفصل الرابع عشر

- 1 - Jahangir K., Gouri B., Kal A., Ali .O., " Evaluation of Electrical Technology Solutions in Marine Energy", Marine Energy Publications, 2009.
- 2 - Cornett, A., Zhang, J., " NEARSHORE WAVE ENERGY RESOURCES, WESTERN VANCOUVER ISLAND", Technical Report, Canadian Hydraulics Centre, National Research Council of Canada, Ottawa, 2008.
- 3 - Jones, Anthony T., and Adam Westwood. "Power from the oceans".The Futurist 39.1,GALE Expanded Academic ASAP,2005.
- 4 - <http://www.marineturbines.com/3/news/>
- 5 - Harnessing the power of the sea Energy NZ, Vol 1, No 1, Winter 2007.

- 6 – Kitzinger, U., Frankel EG., "Turbines with a twist". Macro-Engineering and the Earth, Chichester, Horwood Publishing, 2000.
- 7 - Holthuijsen, H., "Wave in oceanic and coastal waters". Cambridge University Press, 2007.
- 8 - Wave power – Wikipedia.
en.wikipedia.org/wiki/Wave_power
- 9 – Energy Resources: Wave power.
www.darvill.clara.net/altenerg/wave.htm
- 10 – Wave Power – Energy from ocean surface waves.
www.alternative-energy-news.info/.../wave-power/
- 11 – Pelamis Wave Power. The Pelamis wave energy.
www.pelamiswave.com/
- 12 – Joao, C."OceanWave Energy Current Status and Future Prepectives". Green Energy and Technology, 2005



الفصل الخامس عشر

طاقة الحرارة الجوفية للأرض

15 - 1 مقدمة

طاقة الحرارة الجوفية للأرض (Geothermal power) هي مصدر طاقة بديل نظيف ومتجدد، وهي طاقة حرارية مرتفعة ذات منشأ طبيعي مخزنة في الكتلة المنصهرة في باطن الأرض. حيث يقدر أن أكثر من 99% من كتلة الكرة الأرضية عبارة عن صخور تتجاوز حرارتها 1000 درجة مئوية. ويستفاد من هذه الطاقة الحرارية بشكل أساسي في توليد الكهرباء. وفي بعض الأحيان تستخدم للتدفئة عندما تكون الحرارة قريبة من سطح الأرض أو على صورة ينابيع حارة.

يمكن أن تكفي هذه الطاقة المتجددة، نظرياً، لتغطية حاجة العالم من الطاقة لمدة 100000 سنة قادمة إلا أن تحويلها إلى طاقة كهربائية هي عملية باهظة التكاليف، وذلك رغم أن الطاقة الأساسية (المادة الأولية) مجانية، وهي متوفرة بكثرة لكن صعب الحصول عليها. [1]

وتعتبر طاقة الحرارة الجوفية للأرض من مصادر الطاقة المتجددة التي استخدمت منذ فترة طويلة من خلال استغلال مياه الينابيع الحارة. حيث يرجع تاريخ استعمالها إلى أكثر من 3000 سنة عندما استخدم الهنود الحمر الينابيع الساخنة لطهي طعامهم. لا تتوفر الطاقة الحرارية بصورة مباشرة في الطبيعة إلا في مصادر الحرارة الجوفية، وهذا ما يجعلها صعبة الاستغلال. ويقدر احتياطي الطاقة الحرارية الأرضية في حزام عمقه 2000 متر تحت سطح الأرض ما يعادل ما ينتجه 250 مليار طن من الفحم من الطاقة^[3]. نظرياً يمكن أن يغطي هذا المقدار من الطاقة حاجة العالم من الطاقة لمدة 100000 سنة قادمة.

تقسم مصادر الحصول على طاقة الحرارة الجوفية للأرض إلى قسمين: المياه الحارة الجوفية والصخور الحارة Magma التي توجد في المناطق النشطة بركانياً أو في الأعماق البعيدة تحت سطح الأرض ويمكن الاستفادة من المياه الجوفية الحارة

والصخور الحارة في توليد الطاقة الكهربائية وتسخين المياه التي تستخدم في التدفئة، بالإضافة إلى استعمالها في الكثير من ميادين الصناعة و الزراعة الأخرى، ويبين الشكل 15 - 1 موقعاً لاستثمار طاقة الحرارة الجوفية للأرض.

و كما ذكرنا مسبقاً في كثير من الأحيان تستخدم طاقة الحرارة الجوفية للأرض في تدفئة المنازل عندما تكون الحرارة قريبة من سطح الأرض أو على صورة ينابيع حارة أو عندما تكون درجة حرارتها منخفضة (حوالي 65 مئوية)، حيث تكون تكلفة استخراجها واستعمالها معقولة. ففي أيسلندا تنتشر هذه الينابيع الحارة، ويتم توظيفها لأغراض التدفئة والتسخين، [9]



الشكل 15 - 1: موقع لاستثمار طاقة الحرارة الجوفية للأرض في أيسلنده. [2]

يعتبر مصدر الطاقة هذا محط أنظار الكثير من الدول المتقدمة، ويرتّب عليها خطط وآمال مستقبلية كبيرة، وذلك للكثير من إيجابيات هذه الطاقة الفتية، و من أهم إيجابيات هذه الطاقة :

- كونها طاقة متجددة، فهي من مصادر الطاقة التي لا تنفذ على الأقل للأجيال القادمة.

- كونها طاقة نظيفة غير مضرّة بالبيئة، ولا تسبب أي تلوث سواء في استخراجها أو في تحويلها أو استعمالها.

- توفرها بكميات كبيرة جداً وفي مساحات شاسعة ولأغلب بلدان العالم.

- قلة تكاليف السنوية لإنتاج الطاقة لكن تكاليف التأسيس للمحطة يمكن أن تكون باهظة.

- المردود العالي للطاقة المستخرجة.

رغم كل مميزات طاقة الحرارة الجوفية للأرض، والتي جعلتها في طليعة مصادر الطاقة البديلة المستقبلية، إلا أن هناك بعض العوامل التي تجعلها صعبة الانتشار، على الأقل في وقتنا الحالي. ومن أهم هذه الأسباب ارتفاع تكلفة إقامة محطات توليد الكهرباء باستخدام طاقة الحرارة الجوفية للأرض. ويرجع السبب في ذلك إلى صعوبة حفر آبار بأعماق كبيرة وسط درجات حرارة جوفية مرتفعة جداً.

15- 2 مصادر طاقة الحرارة الجوفية للأرض

تستثمر حالياً في مختلف دول العالم ثلاثة أنواع من مصادر طاقة الحرارة الجوفية للأرض وهي:

- تسخين المياه من الحرارة الجوفية

- الصخور الجوفية الحرارة والجافة

- الصخور الجوفية البركانية

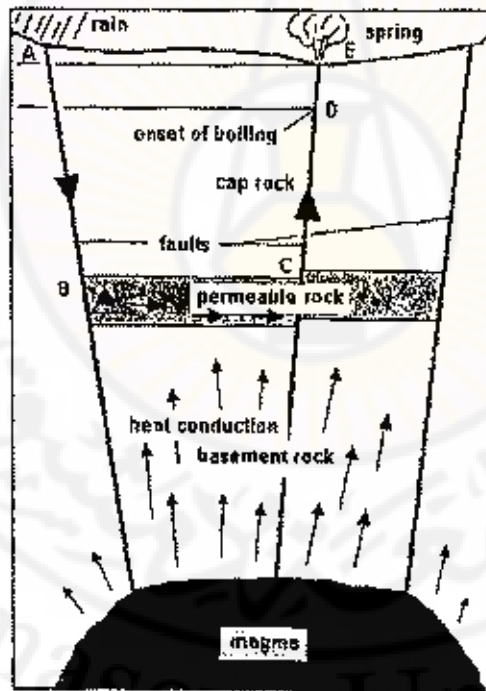
يحتاج استثمار مصادر طاقة الحرارة الجوفية للأرض بشكل اقتصادي الى تحقق الشروط الأساسية التالية:

- وجود مصدر كبير للحرارة الجوفية
- وجود حوض تخزين مائي كثيم في جوف الأرض
- وجود مصدر متجدد للتغذية بالمياه
- وجود طبقة كثيمة من الصخور تمنع تسرب المياه
- وجود دورة كاملة لتجديد الطاقة

15-2-1 مصدر تسخين المياه من الحرارة الجوفية

Hydro Geothermal Resource

يبين الشكل 15 - 2 مخططاً مبدئياً لدورة تسخين المياه بالحرارة الجوفية للأرض، حيث يلاحظ أنه يمكن الاعتماد على الأمطار كمصدر لتغذية النظام بالمياه الباردة.

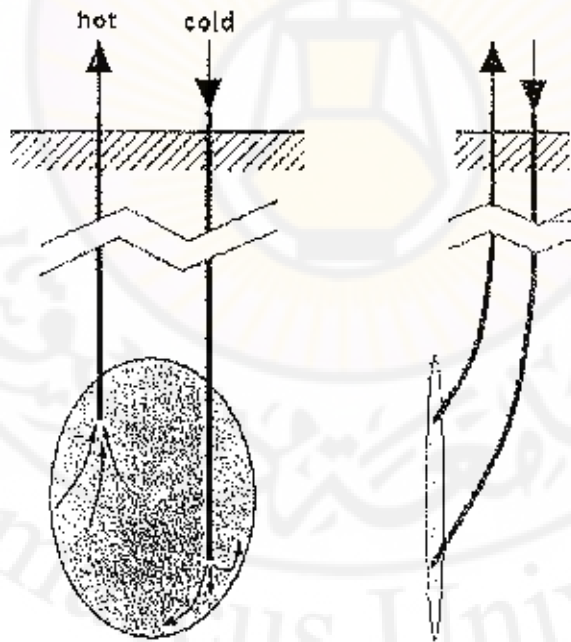


الشكل 15 - 2 مخطط لنظام تسخين المياه بالحرارة الجوفية للأرض [2]

تتسرب المياه عبر الثقوب والانكسارات المختلفة الموجودة في طبقات الأرض المختلفة لتصل إلى طبقة الصخور الكتيمية فيتم تخزينها و تسخينها من حرارة هذه الصخور الجوفية.

15 - 2 - 3 الصخور الجوفية الحارة والجافة Hot Dry Rock HDR

هناك العديد من المواقع الجغرافية في مختلف دول العالم، التي تم استكشافها لغرض استثمار طاقة الحرارة الجوفية للأرض، يتوفر فيها مصدر الحرارة الجوفية العالية جداً ولكن ينقصها المصدر المائي الكئيم للتخذية بالمياه. يمكن استثمار هذه المواقع بشكل اقتصادي عن طريق تصميم نظام يقوم بحقن المياه الباردة إلى مصدر الحرارة العالية على عمق ملائم، تحت ضغط كبير جداً، إلى الطبقة الجوفية الواقعة ثم يعاد ضخ المياه إلى الأعلى بعد أن تكون قد سخنت من تلامسها مع الصخور الجوفية الحارة. ويبين الشكل 15 - 3 مخططاً أولياً لطريقة التسخين من الصخور الحارة الجوفية.



الشكل 15 - 3 [2]

إن أهم مشكلة تعترض استثمار هذا النوع من مصادر طاقة الحرارة الجوفية للأرض هو عدم التحكم في حفر آبار المياه الباردة والمياه الساخنة وتغيير اتجاهها تحت الأرض للوصول إلى موقع كنتم ملامس للصخور الجوفية الحارة.

15 - 2 - 3 طاقة الصخور الجوفية البركانية Magma energy [2],[4],[5]

يعتمد هذا المصدر لطاقة الحرارة الجوفية للأرض مباشرة على الطاقة الحرارية للصخور البركانية السائلة التي تكون متوضعة في بعض المناطق قريباً من سطح الأرض. وتعتمد طريقة استثمار هذا المصدر من الطاقة الجوفية على حفر بئر تصل إلى الصخور البركانية وتركيب أنابيب ومضخة للمياه الباردة إلى جوف الأرض عن طريق هذه البئر، وضخ المياه تحت ضغط كبير جداً. ويقوم الماء البارد المضغوط، عند ارتباطه بالصخور البركانية السائلة، بتحويلها إلى كتلة زجاجية قابلة لأن تنكسر وت سحق تحت تأثير الضغط الحراري المطبق عليها. وإذا أمكن استرجاع المياه المحقونة إلى الأعلى، بعد مرورها على الكتل البركانية المكسرة والمسحوقة فإن هذه المياه ستصل إلى سطح الأرض وهي ساخنة بشكل كبير ويمكن استخدامها في محطة لتوليد الطاقة الكهربائية، علماً أن درجة حرارة الصخور البركانية السائلة تصل إلى 1000 درجة مئوية.

15-3 استكشاف المواقع الواعدة لمصادر طاقة الحرارة الجوفية للأرض

يمكن التأكيد أن جميع مشاريع استثمار طاقة الحرارة الجوفية للأرض قد نفذت في مواقع كانت الظواهر الحرارية المرافقة مثبتة وموجودة ومؤكدة.

وقد اعتمدت تقنية استكشاف المواقع الواعدة لطاقة الحرارة الجوفية للأرض على برامج ناجعة ومنظمة، وتم حفر الآبار الجوفية الاستكشافية في مواقع تقع قرب الأماكن التي تحدث فيها الظواهر الحرارية المرافقة من اندفاع الخان من جوف الأرض أو نفجر ينابيع المياه الحارة.

لقد أصبحت الوسائل العلمية الحديثة متاحة للاستعمال في استكشافات مواقع طاقة الحرارة الجوفية للأرض مما يسمح بتحديد أفضل لمميزات مصدر الطاقة وذلك قبل

البداية بمرحلة حفر آبار الاستثمار العميقة والمكلفة.

ويتناول برنامج الاستكشاف المراحل التالية:

- تحديد المناطق الواعدة التي تحتوي طبقات جيولوجية مبطنة بالصخور الجوفية الحارة.

- تحديد حجم مصدر طاقة الحرارة الجوفية للأرض المتاحة ودرجة الحرارة في هذا المصدر ودرجة كثافة التركيب الجيولوجي للمصدر.

- تحديد ما إذا كان مصدر طاقة الحرارة الجوفية للأرض سيعطي بخاراً أم سيعطي مياهاً حارة أم الاثنين معاً.

- تحديد البنية الكيميائية للموقع الجيولوجي المعتبر.

- حساب الطاقة الكهربائية المتوقعة التي يمكن أن يعطيها استثمار مصدر طاقة الحرارة الجوفية للأرض المعتبر لمدة 20 عاماً من الاستثمار.

15 - 4 حفر الآبار المستخدمة لاستثمار طاقة الحرارة الجوفية للأرض

يتأكد نجاح عملية استكشاف مواقع لاستثمار طاقة الحرارة الجوفية للأرض عندما يتم

حفر بئر استثمارية يؤدي إلى استغلال اقتصادي لهذا المصدر.

تتطلب عملية حفر آبار الاستثمار إجراء العمليات التقنية التالية:

- تحضير الموقع ومعدات الحفر

- إجراء عمليات الحفر

- اتخاذ إجراءات الأمان

15 - 4 - 1 تحضير الموقع ومعدات الحفر

يتم في أول مرحلة من التحضير حفر 3 آبار في أكثر المناطق الواعدة من الموقع

المستكشف، ويتم الحفر بحيث تشكل هذه الآبار رؤوس مثلاً. تستخدم هذه الآبار عند

حفرها لتأمين وجمع المعطيات الجيولوجية والحرارية المناسبة للمنطقة المقترحة

للاستثمار ويتطلب هذا الأمر استخراج عينات من منتجات الحفر على طول المقطع

العمودي للبئر ويساعد هذا على رسم المخطط العمودي لطبقات الأرض. تساعد هذه

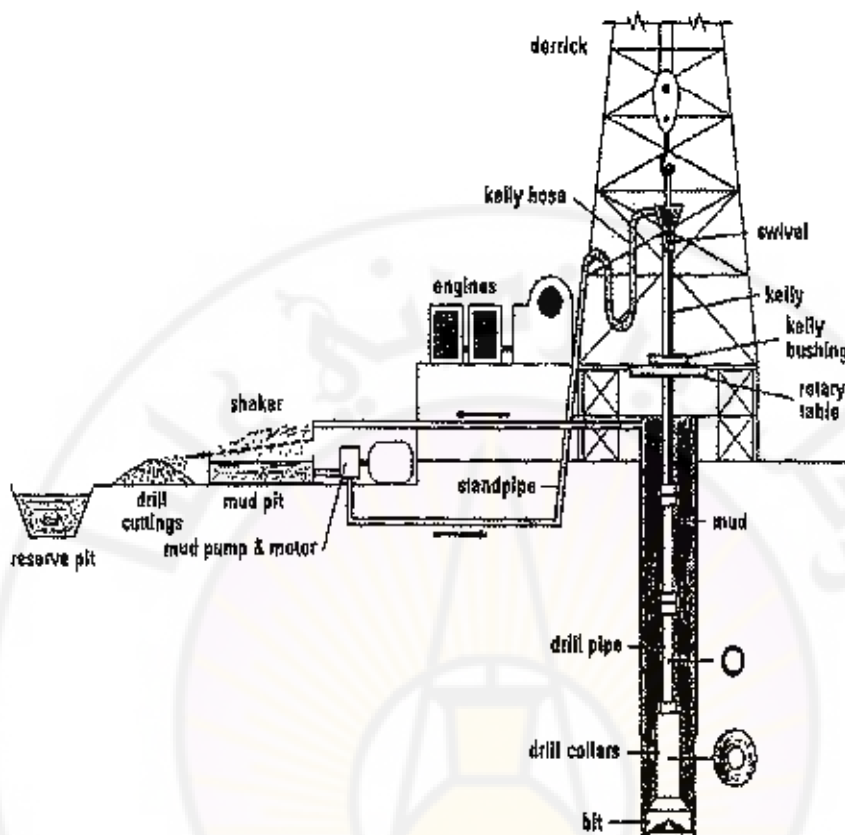
المعطيات على اتخاذ القرار الملائم للمرحلة التالية وهي مرحلة حفر وتطوير الآبار الاستثمارية.

كثيراً ما تكون مواقع استثمار طاقة الحرارة الجوفية للأرض بعيدة عن المناطق المأهولة مما يدعو إلى التحكم فيها ومراقبتها وقيادتها عن بعد. وهي بذلك تتطلب أيضاً اتخاذ إجراءات خاصة ومعقدة لتحضير موقع العمل من حيث نقل المعلومات والمعطيات الفنية ومعالجتها واتخاذ القرارات التنفيذية المناسبة. تتضمن عملية تحضير موقع العمل شق الطرقات الملائمة لحركة الآليات الثقيلة وتحمل المعدات الضخمة التي سيتم نقلها إلى الموقع. وعادة ما تكون عملية فتح الممرات وإنشاء الطرق الخاصة هذه شاقة وصعبة بسبب الطبيعة البركانية التي تغلب في كثير من الحالات على مواقع العمل.

كما تتضمن مرحلة تحضير الموقع أيضاً نقل منصات ومعدات الحفر إلى المكان المطلوب وتخزين رموس وقصبات الحفر بشكل منظم بالقرب من المنصات. يتم حفر أول بئر في الموقع والذي يسمى "البئر الاستكشافي الأول" بشكل عمودي ولعمق يتراوح ما بين 2000 و 2500 م وذلك ليسمح بجمع أكبر كمية من المعلومات عن الموقع وطبقاته وتكوينه الجيولوجي.

15 - 4 - 2 إجراءات عمليات الحفر

تستخدم غالباً لتنفيذ الآبار الاستثمارية طريقة الحفر بالمعدات الدوارة . تكون قصبات الحفر مرتبطة في جزئها العلوي مع أنابيب حفر خاصة ذات مقطع مربع تسمى أنابيب كيلي "Kelly pipes" وتدور أنابيب كيلي هذه بواسطة منصة دوارة موجودة عند رأس البئر وتدور معها أيضاً قصبات الحفر التي نلاحظ في طرفها السفلي بأساور خاصة لربط رموس الحفر، كما هو مبين في الشكل 15 - 4.



الشكل 15 - منصة حفر آبار لاستثمار طاقة الحرارة الجوفية للأرض [6],[2]

يتم تدوير المنصة الدوارة ومعها أنابيب كيلي وقصبات الحفر عن طريق محرك غالباً ما يكون محرك ديزل باستطاعة كبيرة ملائمة. تستعمل في عملية الحفر رموس حفر خاصة تحتوي على ثلاث مسننات مخروطية ينتج عنها ضغط مركزي كبير على الصخور في طبقة الحفر مما يؤدي إلى تحطيم الصخور وتناثرها كما هو مبين في الشكل 15 - 5 .



الشكل 15 - 5 صورة لأحد رؤوس الحفر ثلاثية الممننا [6],[2]

تتم إزاحة القطع المتناثرة الناتجة عن أسنان الحفر لكي تستمر عملية الحفر، ويستخدم لهذا الأمر سائل خاص للحفر يسمى طفلة الحفر ' Drilling mud " يحقق الوظائف التالية:

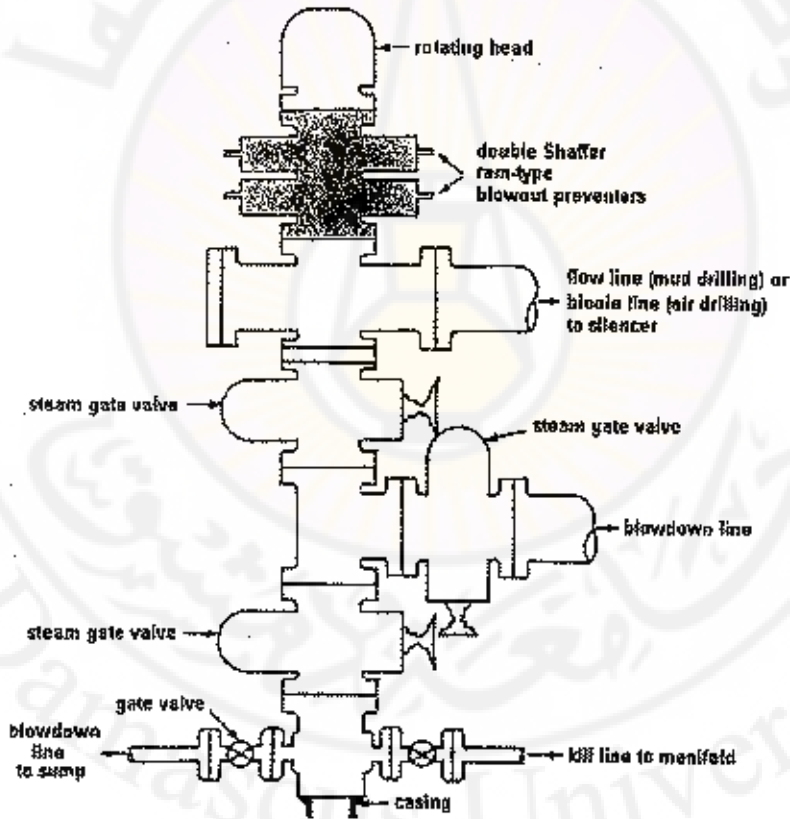
- إزاحة قطع الصخر المكسرة والمتناثرة.
- تبريد رأس الحفر وأنباب الحفر.
- تزييت أنابيب الحفر لتسهيل دورانها.
- منع انهيار جدران البئر أثناء الحفر.

يتم ضخ طفلة الحفر بواسطة مضخة خاصة تسمى مضخة الطفلة أو مضخة الأوحال من أعلى البئر وحتى رأس الحفر عبر أنابيب كيلى وقصبات الحفر. وتناسب عبر فتحات خاصة مشكّلة في رأس الحفر ويضغط كبير مناسب إلى سطح الصخور التي تقع تحت تأثير عمل رأس الحفر. وعند عودة الطفلة إلى الأعلى تسحب معها قطع الصخور المكسورة والمتناثرة. ويتم عند المنصة العلوية تصفية سائل الطفلة وتخليصه من القطع المتناثرة فيه، وإذا كان ساخناً فإنه يتم تبريده في حوض خاص وذلك قبل ضخه من جديد إلى الأسفل حتى رأس الحفر.

Safety precautions

15 - 4 - 3 اتخاذ إجراءات الأمان

يوجد دائماً خطر من حدوث انفجارات عند حفر أي بئر لاستثمار طاقة الحرارة الجوفية للأرض أو أي بئر للنفط. ويحدث هذا الأمر عندما يصل الحفر إلى طبقة كثيفة ذات ضغط عالٍ جداً. وقد وقعت حوادث انفجار من هذا النوع في عدد كبير من مواقع الحفر، لذلك تم اتخاذ إجراءات مشددة للأمان أثناء عمليات الحفر. تعتمد غالبية إجراءات الأمان هذه على استعمال تجهيزات خاصة تسمى "Blowout preventers" مواقع الانفجار، ويبين الشكل 15 - 6 مخططاً نوعياً لمانع انفجار يستخدم في أحد مواقع الاستثمار في كاليفورنيا بالولايات المتحدة الأمريكية.



الشكل 15 - 6 مخطط نوعي لمانع انفجار [2],[6]

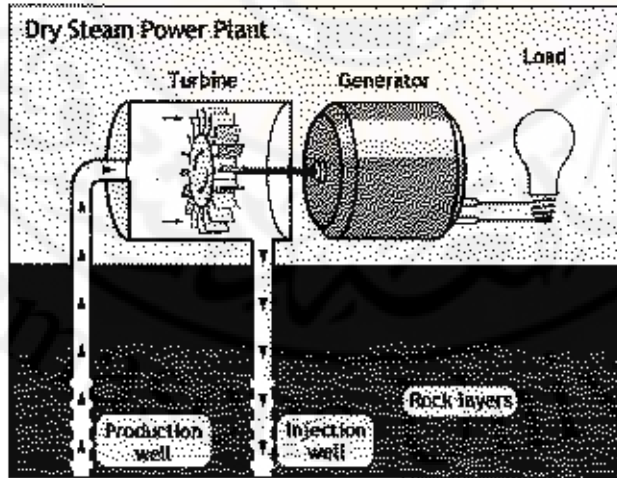
يعتمد مبدأ عمل هذا الجهاز المانع للانفجار على مجموعة من الصمامات التي تتركب على الأنابيب الخارجية للبئر "Casing pipes" بحيث تقوم هذه الصمامات بالإغلاق بشكل محكم حول أنابيب الحفر عندما يصدر أي أثر للتصدع أو الاهتزازات الغريبة في البئر .

15 - 5 توليد الكهرباء باستخدام طاقة الحرارة الجوفية للأرض

تعتبر الطريقة الأولى والأهم للاستفادة من طاقة الحرارة الجوفية للأرض هي بتحويلها إلى طاقة كهربائية، ويتم ذلك في محطات توليد الكهرباء باستخدام طاقة الحرارة الجوفية للأرض. هناك ثلاث أنواع من محطات توليد الكهرباء باستخدام طاقة الحرارة الجوفية للأرض، وهي كالتالي:

1 - محطات البخار الجاف: Dry steam

هذه الطريقة هي أقدم الطرق وأكثرها انتشاراً، وهي نفس الطريقة التي استخدمت في إيطاليا سنة 1904م. تستخدم هذه المحطات الماء الموجود بشكل طبيعي في الطبقات الأرضية العميقة والموجود تحت تأثير ضغط وحرارة عاليين، فيتم استخراجها بواسطة حفر آبار عميقة فيخرج على شكل بخار ماء بسبب حرارته العالية وبسبب فرق الضغط، وبين الشكل 15 - 2 مبدأ عمل مثل هذه المحطات.

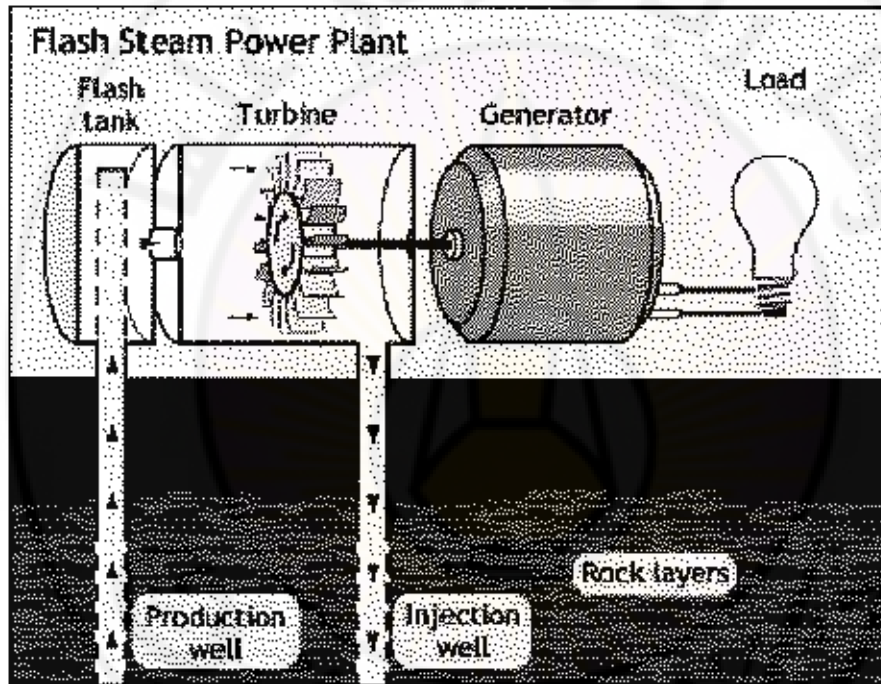


الشكل 15 - 2: مبدأ عمل محطات البخار الجاف [7], [3]

يسير هذا البخار في أنابيب ثم يمرر في عتقات تدور المولدات الكهربائية التي تنتج الطاقة الكهربائية. يضخ الماء المكثف إلى الأرض عبر بئر آخر يسمى بئر الحقن.

2 - محطات التبخير: Flash steam plants

تستخدم هذه المحطات المياه الموجودة تحت ضغط عالي تحت الأرض حيث يتم تركيزها في حوض فيه ثقب صغير يؤدي إلى حوض آخر ذي ضغط معتدل، فعند حركة السائل من الحوض الأول إلى



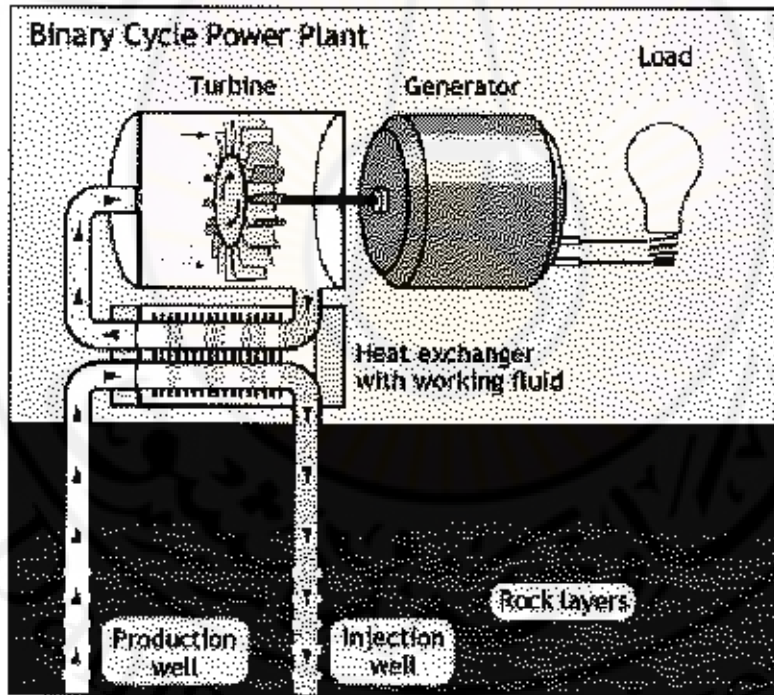
الشكل 15 - 3: مبدأ عمل محطات التبخير [3], [7]

الثاني عبر الثقب يتبخر بسبب السرعة و فرق الضغط العالي، وبين الشكل 15 - 3 مبدأ عمل مثل هذه المحطات.

يحرك البخار العنفة التي تتركب في طريقه فتتحرك بدورها المولدات الكهربائية التي تنتج الكهرباء. يضخ الماء المكثف المتبقي إلى الأرض عبر بئر الحقن.

3 - محطات الدارة المزدوجة: Binary cycle plants

تستخدم هذه المحطات المياه الموجودة تحت الأرض ذات درجة حرارة مرتفعة (من حوالي 140 درجة مئوية إلى 400 درجة مئوية) يتم ضخها إلى الأعلى في أنبوب يدخل إلى مبادل حراري يحتوي على سائل له درجة حرارة الغليان أقل من درجة حرارة غليان الماء (أقل من 100 درجة مئوية بكثير) حيث يتم تسخين هذا السائل حتى درجة غليانه فيتحول إلى بخار يمر في العنفة ويدورها ومعها المولد الكهربائي ، ثم يكتف البخار ويعود مجددا إلى المبادل الحراري، ويتحرك بهذه الطريقة في دوران مستمر. يضخ الماء المستخرج مجددا إلى الأرض عبر بئر الحقن. وبين الشكل 15 - 4 مبدأ عمل مثل هذه المحطات.



الشكل 15 - 4: مبدأ عمل محطات الدارة المزدوجة [7], [3]

15 - 6 استخدام المضخة الحرارية لاستثمار طاقة الحرارة الجوفية للأرض

يعتبر استخدام المضخات الحرارية واحداً من الطرر التقليدية لاستثمار طاقة حرارة الأرض الجوفية لتأمين التدفئة والتكييف للأبنية والمنازل. وتعتمد هذه الطريقة على استثمار درجة الحرارة تحت سطح الأرض والتي تصل إلى 15 درجة مئوية عند عمق لا يتجاوز 5 أمتار تحت سطح الأرض. يتم ضخ الهواء أو أحد سوائل التبريد في أنابيب مطمورة تحت الأرض وتمرر بعدها إلى شبكة التدفئة و التبريد في الأبنية والمنازل. يقوم السائل خلال فصل الصيف بنقل الحرارة من شبكة التكييف في الأبنية إلى الأرض أما في فصل الشتاء فإنه ينقل الحرارة من تحت الأرض إلى شبكة التدفئة في الأبنية.

يعرف نظام مضخة حرارة باطن الأرض أنه نظام تكييف أو نظام تدفئة مركزية من باطن الأرض أو إلى باطن الأرض، ويستعمل الأرض كمصدر للحرارة في الشتاء، أو كمصب للحرارة في الصيف. يتضمن هذا النظام مضخة تساعد على تسريع عملية التبادل الحراري بين الأبنية وباطن الأرض. تستطيع المضخة الحرارية أن تحقق التبادل الحراري من المنطقة ذات الحرارة المنخفضة إلى المنطقة ذات الحرارة المرتفعة بشكل معاكس لاتجاه التبادل الحراري الطبيعي. أو يمكنها تعزيز التبادل الحراري الطبيعي ودعمه من منطقة حارة إلى منطقة باردة.

تعتمد أبسط طريقة لاستخدام طاقة حرارة الأرض في التدفئة والتكييف على تمرير الهواء الخارجي المحيط ضمن أنبوب تحت الأرض وربطه إلى نظام تهوية البناء. أما في الطرق الأكثر تعقيداً فيتم استخدام المضخات والضواغط لتحسين كفاءة نقل الحرارة كما هو مبين في الشكل 15 - 5 .

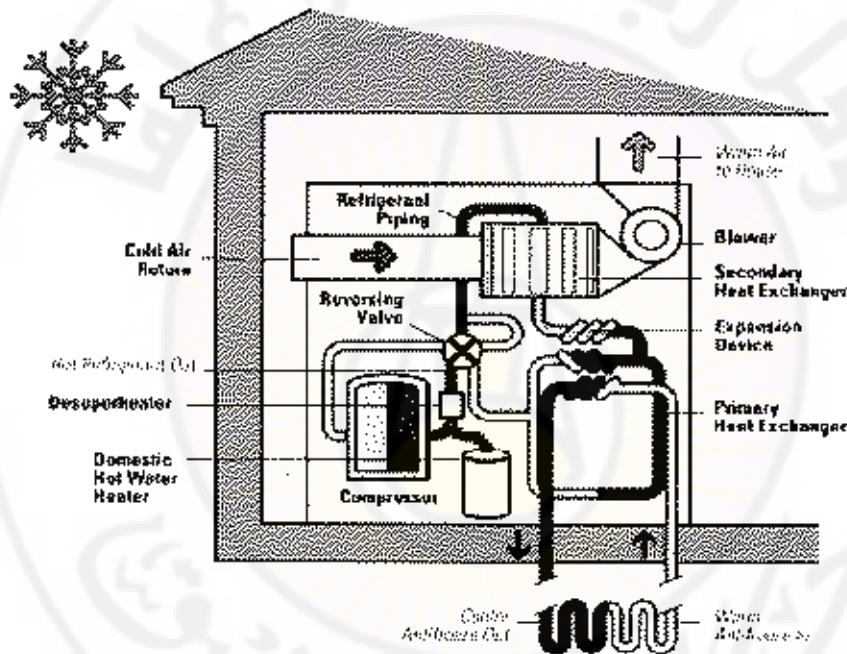
15 - 7 أنواع مضخة حرارة الأرض الجوفية

يتألف نظام مضخة حرارة باطن الأرض من جزأين، يتكون الجزء الأول من الأنابيب ومتمماتها، وهذا يركب دائماً خارج الأبنية وتحت سطح الأرض. ويتألف الجزء الثاني

المضخة الحرارية وعتماماتها، ويركب هذا الجزء دائماً ضمن الأبنية، بعكس أنظمة التدفئة والتكييف التقليدية حيث يركب الضاغط دائماً في الهواء خارج البناء.

توجد هناك أربعة أنواع من أنظمة مضخة حرارة الأرض الجوفية تستخدم في العالم:

- الدارة الأرضية المغلقة الأفقية
- الدارة الأرضية المغلقة العمودية
- الدارة الأرضية المغلقة ذات البحرة
- الدارة المفتوحة



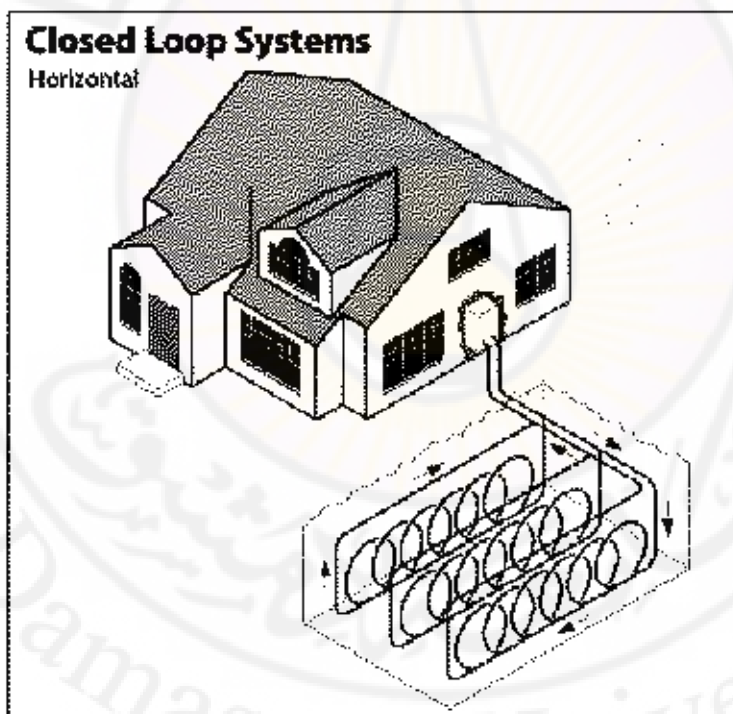
الشكل 15 - 5: استخدام طاقة حرارة الأرض في التدفئة والتكييف [10],[11],[12]

يعتمد تحديد أي نوع منها هو الأفضل على ظروف الطقس وعلى خواص أرض الموقع وعلى توفر الأرض اللازمة لتركيب النظام وعلى الكلفة الاقتصادية

15 - 7 - 1 الدارة الأرضية المغلقة الأفقية Horizontal Closed Loop

يعتبر هذا النوع من شبكات أنظمة مضخة حرارة جوف الأرض الأكثر ملائمة للمناطق السكنية ذات المنازل المنفردة والمستقلة، وخاصة في مناطق البناء الحديثة

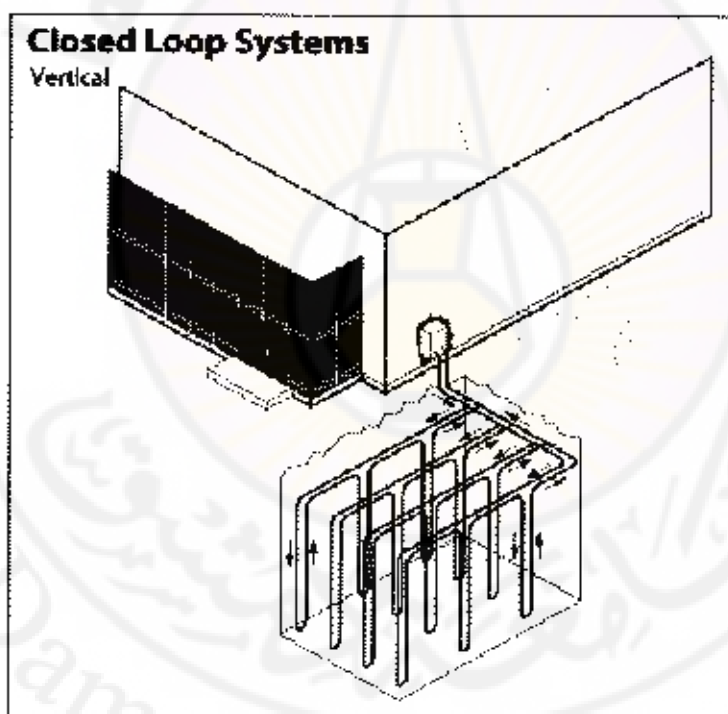
حيث توجد مساحات كافية من الأراضي لتمديد هذه الشبكات. ويبين الشكل رقم (15 - 6) مبدأ عمل هذا النوع من الشبكات. يعتبر هذا النوع من أنظمة مضخة حرارة جوف الأرض الأكثر ملائمة للمناطق السكنية ذات المنازل المنفردة والمستقلة، وخاصة في مناطق البناء الحديثة حيث توجد مساحات كافية من الأراضي لتمديد هذه الشبكات. تمدد الأنابيب في هذا النوع خنادق يبلغ عمقها 1.2 متر حيث يستخدم أنبوبان يمدد الأول على عمق 1.2 متر ويمدد الآخر على عمق 1.8 متر، أو يستخدم أنبوبان يمددان إلى جوار بعضهما في خندق واحد يبلغ عرضه حوالي 0.6 متر. كما ويمكن تمديد عدد أكبر من الأنابيب في خندق واحد طولته أقصر، مما يؤدي إلى تخفيض تكلفة إنشاء مثل هذا النظام.



الشكل 15 - 6: مبدأ عمل الدارة الأرضية المغلقة الأفقية [10],[11],[12]

15 - 7 - 2 الدارة الأرضية المغلقة العمودية Vertical Closed Loop

يستخدم هذا النوع من أنظمة مضخة حرارة جوف الأرض في الأبنية التجارية والمدارس لأنه لا يتطلب مساحة كبيرة من الأرض لتنفيذ الخنادق وتمديد الأنابيب. ويبين الشكل 15 - 7 مبدأ عمل هذا النوع من الشبكات. كما يستخدم نظام الدارة المغلقة العمودية هذا في المناطق التي تكون التربة صلبة ولا يمكن تنفيذ الخنادق بسهولة. تمدد الأنابيب في هذا النوع في حفر تبعد 6 أمتار عن بعضها، ويبلغ عمقها من 30 إلى 120 متراً. يمدد في هذه الحفر أنبوبان يربطان مع بعضهما في أسفل الحفر ليشكلا معاً دائرة مغلقة، وتربط أنابيب هذه الدارات المغلقة مع بعضها بواسطة أنابيب أفقية ممددة في الخنادق ومربوطة مع أجهزة المضخة الحرارية في الأبنية.



الشكل 15 - 7: مبدأ عمل الدارة الأرضية المغلقة العمودية [10],[11],[12]

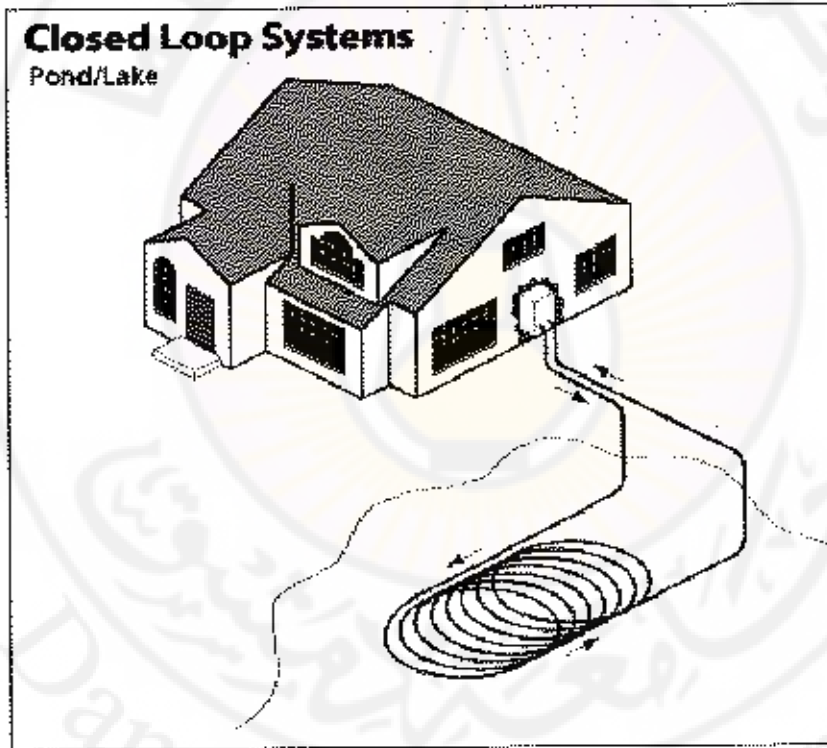
يستخدم هذا النوع من أنظمة مضخة حرارة جوف الأرض في المواقع التي تتوفر فيها الأحواض المائية والبحيرات الصغيرة. يمدد أنبوب التغذية تحت الأرض من البناء إلى

الحوض المائي، ويلف على شكل عدة دوائر توضع في الحوض المائي وعلى عمق لا يقل عن مترين لمنع التجمد في الشتاء. كما هو مبين في الشكل رقم (5 - 7).

15 - 7 - 3 الدارة الأرضية المغلقة ذات الحوض العالي

Pond/Lake Closed Loop

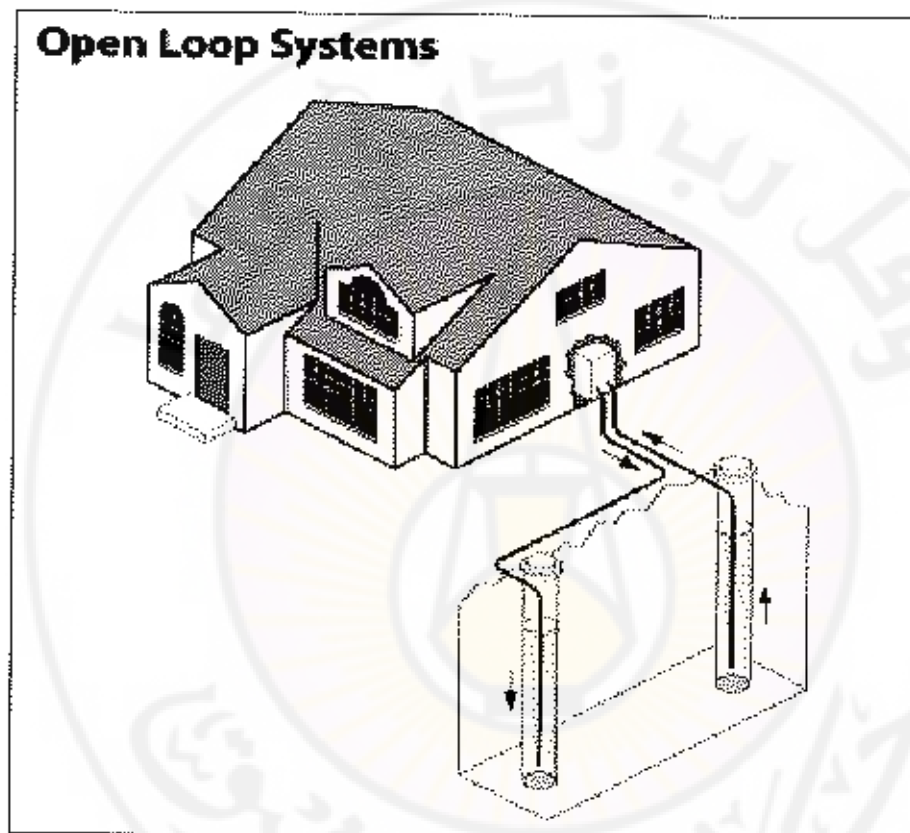
يستخدم هذا النوع من أنظمة مضخة حرارة جوف الأرض في المواقع التي تتوفر فيها الأحواض المائية والبحيرات الصغيرة. يمدد أنبوب التغذية تحت الأرض من البناء إلى الحوض المائي، ويلف على شكل عدة دوائر توضع في الحوض المائي وعلى عمق لا يقل عن مترين لمنع التجمد في الشتاء. كما هو مبين في الشكل 15 - 8.



الشكل 15 - 8 مبدأ عمل الدارة الأرضية المغلقة ذات البحيرة [10],[11],[12]

15 - 7 - 4 الدارة المفتوحة Open loop

تستخدم في هذا النوع من أنظمة مضخة حرارة جوف الأرض مياه الآبار أو مياه الأحواض المائية كمبادل حراري، حيث تمر هذه المياه بشكل مباشر في أنابيب النظام، ثم تعود إلى الأرض عن طريق البئر. تستعمل هذه الطريقة عند توفر المياه النظيفة في الآبار أو في الأحواض المائية، كما هو مبين في الشكل 15 - 9.



الشكل 15 - 9: مبدأ عمل الدارة المفتوحة [10],[11],[12]

15 ~ 5 مراجع الفصل الخامس عشر

- 1 - Dickson, M., Fanelli, M., " Geothermal Energy ". John Wiley and sons, New York, 1995.
- 2 - Deppipo, R., " Geothermal Power Plants". Elsevier, New York, 2005.

- 3 – Kestin, J., "Production of Electricity from Geothermal Energy". DOE, Washington, 1980.
- 4 – Kruger, P., Otto, C., "Geothermal Energy: Resources, Production, and Simulation", Stanford University Press, Stanford, CA, 1979.
- 5 – Chu, T., Dunn, J., Finger, J., "The Magma Energy Program". Geothermal Resources Council Bulletin, V. 19, No. 2. 1990.
- 6 – Edwards, L., Chilinger, G., Rieke, C., "Handbook of Geothermal Energy". Gulf Publishing Company, Houston, TX, 1982.
- 7 – Moya, R., "Operation and maintenance of Geothermal Power Plants", World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 2005.
- 8 – Bertani, R., "Geothermal Energy: An Overview on Resources and Potential", International Geothermal Days, Slovakia. 2009.
- 9 – Lund, J., Boyd, W., Derek, H. "World-Wide Direct Uses of Geothermal Energy 2005", Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 2005.
- 10 – Zogg, M., "History of Heat Pumps Swiss Contributions and International Milestones", 9th International IEA Heat Pump Conference, Zürich, Switzerland. 2008.
- 11 – Bloomquist, R., "Geothermal Heat Pumps, Four Plus Decades of Experience", Geo-Heat Centre Quarterly Bulletin Oregon Institute of Technology, 1999.
- 12 – Gannon, R., "Ground-Water Heat Pumps - Home Heating and Cooling from Your Own Well", Popular Science (Bonnier Corporation), 1978.



ثبت المصطلحات	
Absorber	السطح الماص
Absorptance (α)	الامتصاصية
Air mass ratio (m)	نسبة كتلة الهواء
Altitude angle of the sun (β)	زاوية الارتفاع الشمس
Ampere (A)	أمبير
Anemometer	مقياس السرعة
Aqua- buoy device	جهاز صبي المياه
Asynchronous Generator (AG)	المولد التحيضي
Atom shell	غلاف النواة
Autumnal equinox	يوم الاعتدال الخريفي
Axis	محور
Azimuth angle	زاوية الأزموت
Barometer	مقياس الضغط الجوي
Beam-direct radiation	الإشعاع الشمسي المباشر
Binary Cycle plants	محطات الدارة المزدوجة
Bio digester	الهاضم الحيوي
Bio digesting	الهضم الحيوي

Bio energy	الطاقة الحيوية
Bio fuel	الوقود الحيوي
Bio gas	الغاز العضوي
Biomass	الكتلة الحيوية
Blade	شفرة
Cables	كابلات
Capacitor	مكثف
Cellulose	السيلولوز
Central receiver systems (CRS)	نظم البرج المركزي
Circuit	دائرة
Clearness index (K_T)	مؤشر الصفاء
Clock time	التوقيت المدني (التوقيت المحلي)
Coefficient of heat transfer	معامل انتقال الحرارة
Collector housing (box)	صندوق اللاقط
Compost	الحمئة
Concentrating solar power (CSP)	محطة كهروحرارية شمسية
Concentrating solar thermal plant (CST) (recommended term)	محطة كهروحرارية شمسية

Concentration ratio	نسبة (معدل) التركيز
Control	تحكم
Convection losses	ضیاعات الحمل
Convertor	مبدلة
Cross wind Distance	المسافة بين العنقات
Cup Anemometer	مقياس السرعة ذو المغرفة
Current	التيار الكهربائي
Daylight savings time	التوقيت الصيفي
DC Generator	مولد التيار المستمر
Desertec	تقنية الصحراء
Diffuse radiation	الإشعاع الشمسي المنتثر
Direct combustion	الحرق المباشر
Direct-flow evacuated tube collectors	لواقط اسطوانات مفرغة ذات جريان مباشر
Distribution	توزيع
Diversion hydro power plants	محطات التوليد المائية على مجرى المياه
Doubly Fed Asynchronous Generator (DFAG) or	المولد التحريضي مضاعف التغذية

Doubly Fed Asynchronous Generator (DFIG)	
Down wind Distance	المسافة بين صفوف العنقافات
Down Wind Turbine	عنفة ريحية خلفية
Draught tubes	أنابيب السحب المعدات المساعدة
Drive	قيادة
Dry steam plants	محطات البخار الجاف
Dump	المكبات
Earth's orbit	مدار الأرض حول الشمس
Efficiency	المردود
Electrical Energy	القدرة الكهربائية
Electrical generators	المولدات الكهربائية
Electrical Station	محطة كهربائية
Emittance (ϵ)	الانبعاثية
Energy density	كثافة الطاقة
Equation of time (E)	معادلة الزمن
Equivalent Circuit	دائرة مكافئة
Evacuated flat-plate collectors	اللوافظ المسطحة المفرغة

Evacuated tube collectors	اللوافظ الأسطوانية المفرغة
Extraterrestrial irradiance	شدة الإشعاع الشمسي على سطح الغلاف الجوي
Fermentation	التخمير
Flash steam plants	محطات التبخير
Flat-plate collectors	اللوافظ المسطحة
Flicker	رفة
Frequency (Hz)	التردد - هرتز
Friction	احتكاك
Fusion reactor	مفاعل اندماجي
Gasification	التغويز
Gear Box	علبة السرعة
Generator	المولد الكهربائي
Geothermal heat	الحرارة الجوفية
Geothermal power	طاقة الحرارة الجوفية
German Aerospace Center DLR	المركز الألماني لشؤون الطيران ومجال الفضاء

Giga Watt (GW)	جيجاوات
Giga Watt Hour (GWh)	جيجاوات ساعي
Global warming	الإحترار الكوني (الإحتباس الحراري)
Ground reflectivity	انعكاسية الأرض
Hazardous waste	المخلفات الخطرة
Heat capacity (c)	السعة الحرارية
Heat exchanger	المبادل الحراري
Heat flow ($\dot{Q}$)	التدفق الحراري
Heat pipe evacuated tube collectors	لواقط اسطوانات مفرغة ذات أنابيب حرارية
Heat pump	المضخة الحرارية
Heat transition (transfer) coefficient	معامل انتقال الحرارة
Height	ارتفاع
High Voltage Direct Current (HVDC)	النقل بالتيار المستمر عالي التوتر
Horizontal	أفقي
Horizontal closed loop	الدائرة الأرضية الأفقية المغلقة

Hot Wire	السلك الساخن
Hour angle (H)	الزاوية الساعية
Hub	صرة
Hydraulic	هيدروليكي
Hydro electrical energy	الطاقة الكهرومائية
Hydro power	الطاقة المائية
Hydro power plants	محطات التوليد الكهرومائية
Hydro turbine	العنفة المائية
Impoundment hydro power plants	محطات التوليد المائية ذات مد وحوض تخزين
Injection well	بئر الحقن
Installed Power	الاستطاعة المركبة
Integral storage collectors (ISC)	الوافظ المتكاملة مع التخزين
Inverter	معرج
Irradiance (Insolation) [W/m^2]	الإشعاعية (استطاعة الإشعاع الشمسي) الساقطة على متر مربع) أو شدة الإشعاع الساقط

Irradiation [Wh/ m ²]	الطاقة الشمسية الساقطة
kilo Watt (kW)	كيلو وات
kilo watt hour (kWh)	كيلو وات ساعي
Land fill	المطامر
Large hydro power plants	محطات التوليد الكهرومائية الضخمة
Lignin	فحم اللجنين
Line-focusing systems (LFS) or Parabolic trough Systems (PTS)	نظم ذات مراكز خطية المحرق أو نظم مراكز القطع الأسطواناني
Magma	الصخور البركانية الحارة
Measurements	قياسات
Mega Watt (MW)	ميغاوات
Mega Watt Hour (MWh)	ميغاوات ساعي
Micro hydro power plants	محطات التوليد الكهرومائية الميكروية
Nacelle	قمرة
Near - shore devices	التجهيزات القريبة من الساحل
Non Hazardous waste	المخلفات غير الخطرة
Nuclei	نوى (جمع نواة)

Nucleus	نواة
Off – shore devices	التجهيزات ضمن مياه البحر
Off Shore	في البحر (بحري)
On Land	على اليابسة
Open loop	للدائرة الأرضية المفتوحة
Optical efficiency	المردود البصري
Organic fertilizer	السماذ العضوي
Oscillating – water column	العمود المائي المهتز
Outflow tubes	أنابيب الدفع
Output Power	الاستطاعة الناتجة على المزج
Parabolic dish systems (PDS)	نظم ذات مركبات القطع المكافئ الدائري
Peak sun hours (PSH)	ساعات الشمس القصوى
Permanent Magnet	مغناطيس دائم
Pond / lake closed loop	الدائرة الأرضية المغلقة مع حوض مائي
Power Factor	عامل الاستطاعة
Probability	احتمالية

Production well	بئر الانتاج
Propeller Anemometer Laser	مقياس السرعة المروحي الليزري
Pumped storage hydro power plants	محطات التوليد المائية ذات التخزين والضخ
Pumps	المضخات
Radiance (I_e)	الإشعاعية الحرارية
Radiant power	استطاعة إشعاعية
Radiation losses	ضباغات الإشعاع
Rayleigh Distribution	توزيع رايلي
Rectifier	مقوم
Recycling of materials	إعادة تدوير المواد
Reflected radiation	الإشعاع الشمسي المنعكس
Reliability	الوثوقية
Renewable energy	الطاقة المتجددة
Renewable Energy (RE)	الطاقة المتجددة
Resistance	مقاومة
Resources	مصادر

Revolution per Minute (RPM)	دورة في الدقيقة
Rotor	دوار
Rotor Wound	ملف الدائر
Roughness	خشونة
Selective materials	مواد انتقائية
Sensor	مجس (حساس مستشعر)
Shaft	محور رئيسي
Shoreline devices	التجهيزات الساحلية
Small hydro power plants	محطات التوليد الكهرومائية الصغيرة
Snow ball effect	أثر كرة الثلج
Solar collectors	الواقل الشمسية
Solar constant	الثابت الشمسي
Solar declination angle (δ)	زاوية الانحراف الشمسي
Solar spectrum	الطيف الشمسي
Solar time	التوقيت الشمسي
Solar water heating (SWH)	التسخين الشمسي للمياه
Solid waste	القمامة الصلبة

Stator Wound	ملف الثابت
Summer solstice	يوم الانقلاب الصيفي
Sun path diagram	مخطط مسار الشمس
Sunrise	زمن شروق الشمس
Sunset	زمن غروب الشمس
Synchronous Generator (SG)	المولد التزامني
Systems with forced circulation	نظم التدوير القسري
Temperature	درجة حرارة
Thermal discomposing	التفكيك الحراري
Thermal power plants	محطات التوليد الحرارية
Thermal value	القيمة الحرارية
Thermosyphon system	النظام الترموسيفون (نظام الدوران الطبيعي)
Tidal power	طاقة المد والجزر
Tidal stream power	طاقة تيار المد
Tidal turbine	عنفة المد والجزر
Time zones	مناطق زمنية

Ton of oil equivalent (toe), corresponds to 41.85 billion joules of energy, i.e. 11626 kwh	طن نفط مكافئ (طنم)
Tower	برج
Transformer	محوّلة
Transmittance (ϵ)	نفاذية
Tropic of Cancer	مدار السرطان
Tropic of Capricorn	مدار الجدي
Turbulence	اضطراب
Ultra Sonic	فوق الصوتي
Upwind Turbine	عنفة ريشية أمامية
Vacuum	الخلاء
Vernal equinox	يوم الاعتدال الربيعي
Vertical	عمودي
Vertical closed loop	الدائرة الأرضية العمودية المغلقة
Volt (V)	فولت
Voltage	التوتر (الجهد) الكهربائي
Wake	إيقاظ

Waste treatment	معالجة القمامة
Water gate	البوابة المائية
Water mass	كتلة الماء
Water wheels	النواعير
Wave energy convertors	مبدلات طاقة الأمواج
Wave power	طاقة الأمواج
Weibull Distribution	توزيع ويبول
Wind	رياح
Wind Assessments	تقديرات الرياح
Wind Direction	اتجاه الرياح
Wind Energy Conversion Systems (WECS)	نظم تبديل طاقة الرياح
Wind Farm	مزرعة ريحية
Wind Rose	وردة الرياح
Wind Speed	سرعة الرياح
Wind Turbine	عنفة ريحية
Wind Vane	الذيل الريحي
Winter solstice	يوم الانقلاب الشتوي





