جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم هندسة الطاقة الكهربائية
شعبة الطاقات المتجددة

طاقات متجددة /١/

محاضرات

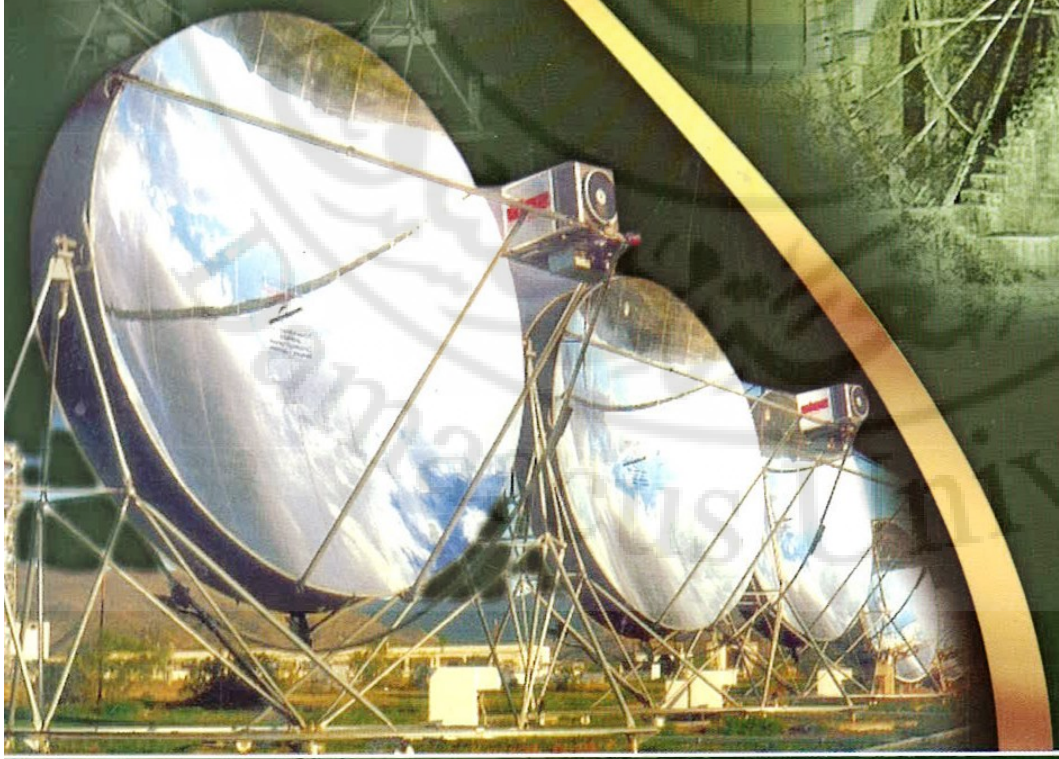
الأستاذ الدكتور: كمال ناجي

لطلاب السنة الرابعة - طاقات

منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

مدخل إلى الطاقات المتجددة

INTRODUCTION TO RENEWABLE ENERGIES



الدكتور
علي حمزة
أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

الدكتور
كمال ناجي
أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

الدكتور
سميح الجابي
أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

جامعة دمشق

١٤٣١ - ١٤٣٢هـ
٢٠١٠ - ٢٠١١م

جامعة دمشق
كلية هـ.م.ك
قسم هندسة الطاقة الكهربائية

الفصل الخامس

مفهوم طاقة الرياح

Wind Energy Understanding

محاضرات أ.د.كمال ناجي
شعبة الطاقات المتجددة

٥-١ مقدمة Preface:

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 ٥-١ يبين صورة لاثنتين من الطواحين الهوائية التي استخدمت منذ عام ١٨٩٧ في الدنمرك لطحن الحبوب على سبيل المثال.

وفي بداية السبعينات من القرن الماضي بدأت مجموعات علمية في مناطق متعددة من العالم بالتفكير في استغلال طاقة الرياح لتوليد الكهرباء، ممّا 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 ١٩٨٠ وأطلس رياح الدنمرك الذي وضعته مختبرات ريزو (RISO) الوطنية عام ١٩٨٠. فضلا عن كثير من الدراسات الأخرى التي عنيت بتحديد مواقع الاستفادة من طاقة الرياح مثل الأطلس المنشور عن كندا سنة ١٩٨٤ وعن هولندا سنة ١٩٨٦ وأطلس الرياح الأوربي عام ١٩٨٩ وعن مصر (أطلس رياح خليج السويس) عام١٩٩٦ وأطلس الرياح في سورية عام ١٩٩٤.

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 إلـــى الفشل. و كان السبب الرئيسي لذلك في كثير من الحالات هو سوء اختيار موقع العنفة، وعدم وجود تقديرات دقيقة لطاقة الرياح المتاحة أو ما يسمى كمون الرياح(wind potential) في المواقع المختارة.

الشكل ٥-١ : طواحين هوائية قديمة مركبة في الدنمرك

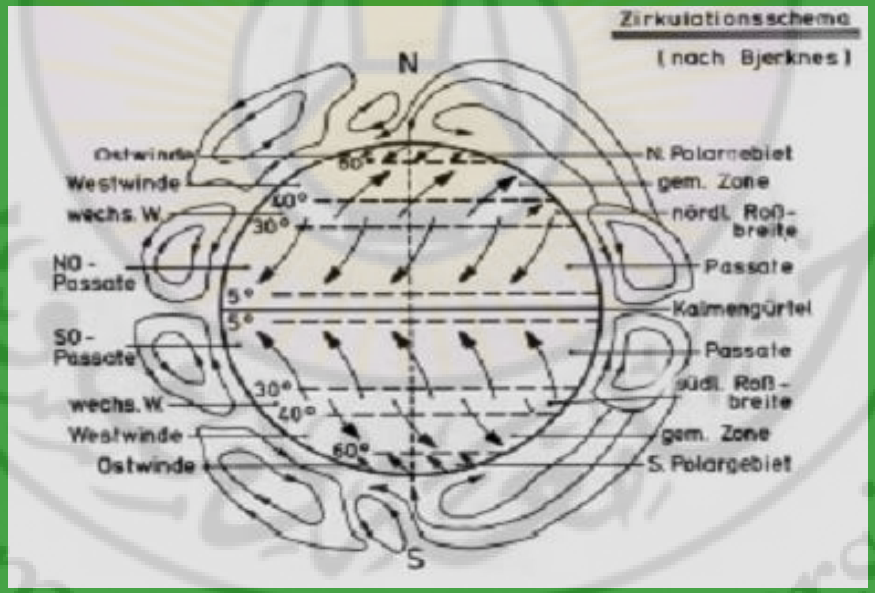
Damascus University

٥-٢ تشكل الرياح Wind Formation:

إن الرياح شكل من أشكال الطاقة الشمسية (حيث تقدر بحوالي ٢% 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 فإنّه يصعد إلى طبقات الجو العليا ويحل محله الهواء البارد مما يسبب تشكل الرياح. ويظهر ذلك جليا أثناء حركة الرياح في الليل والنهار بالقرب من الشواطئ كما هو مبين في الشكل ٥-٢.

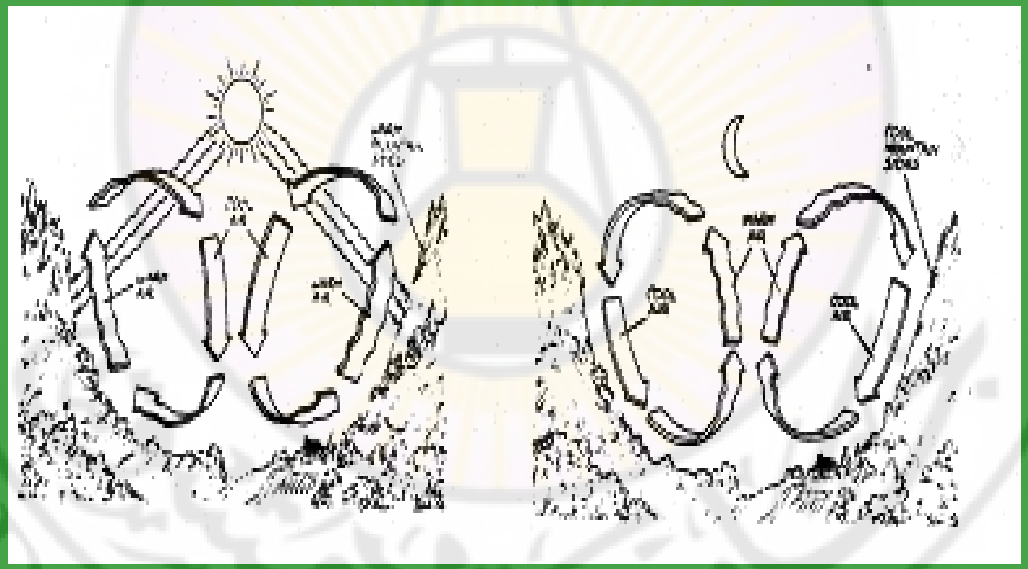
الشكل ٥-٢: حركة الرياح أثناء النهار والليل بجوار البحار والمحيطات

وبشكل أكثر تفصيلا 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 ٥-٣ اتجاه حركة الهواء على سطح الأرض مع الوضع بالحسبان دوران الأرض حول نفسها.

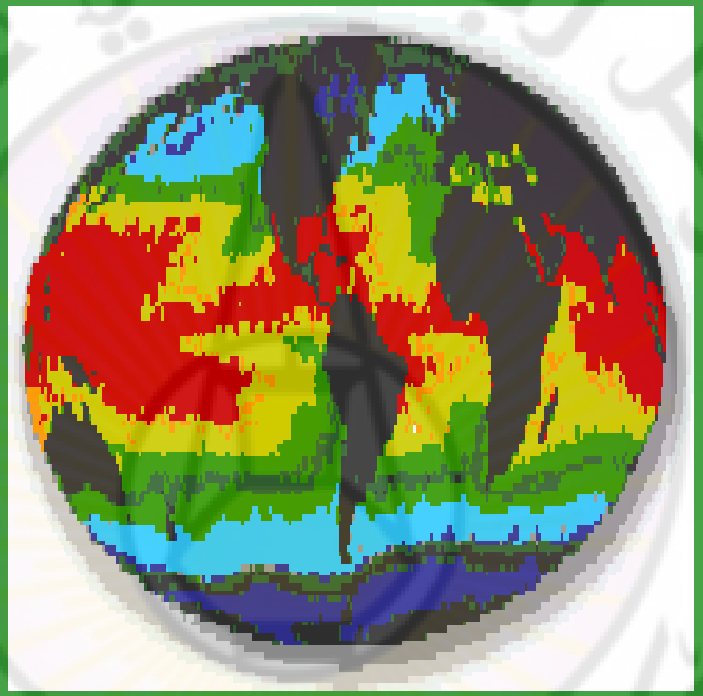


الشكل ٥-٣: اتجاه حركة الرياح على سطح الأرض

والشكل ٥-٤ يبين حركة الرياح أثناء النهار والليل بجوار المناطق الجبليــة والشكل ٥-٥ يبين صورة بالأشعة تحت الحمراء للأرض مأخوذة عن طريق القمر الصناعي NOAA-7 في شهر تموز ١٩٨٤ 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 اتجــاه القطبين).



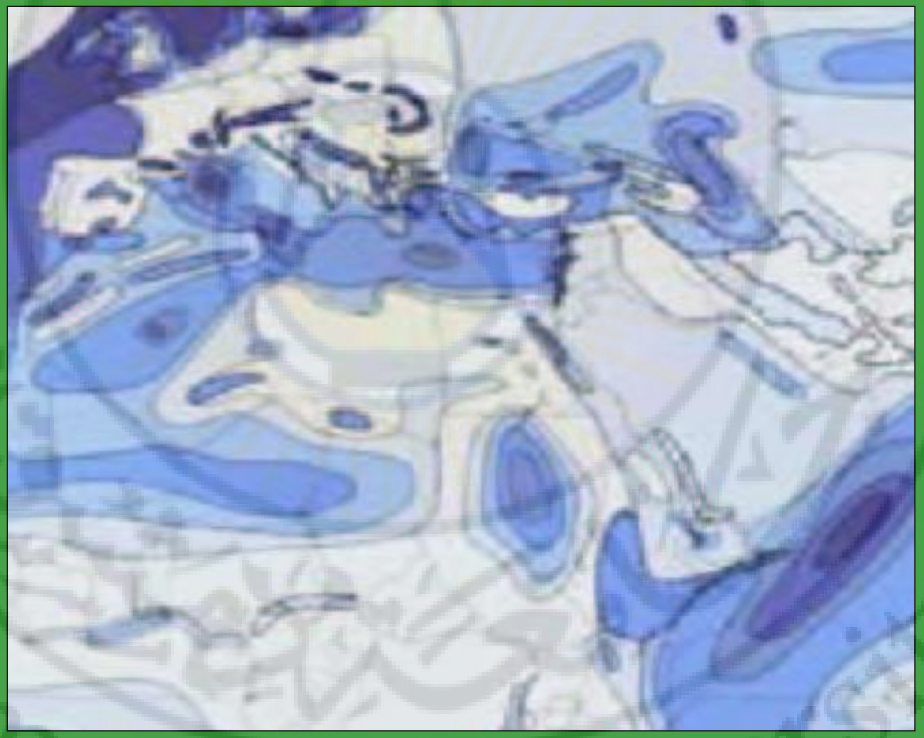
الشكل ٥-٤: حركة الرياح أثناء النهار والليل بجوار المناطق الجبلية



الشكل ٥-٥: صورة بالأشعة تحت الحمراء لفروق درجات الحرارة على الأرض

٥-٣ 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 ٥-٦ 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.



الشكل ٥-٦: خارطة الرياح العالمية لأوروبا والشرق الأوسط

٥-٤ التجربة العالمية Global Experience:

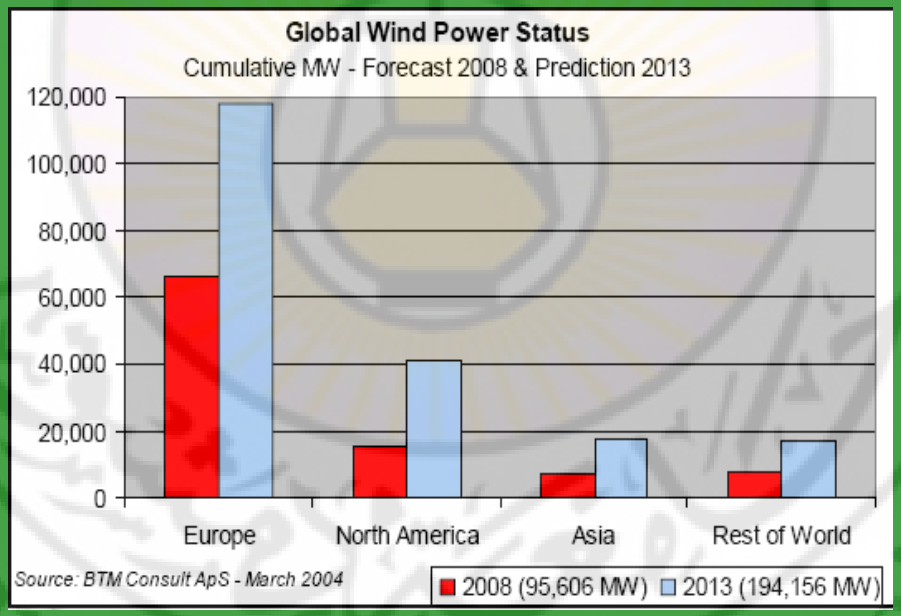
بعد عدد من المشاريع الرائدة التي نفذت في عدد من دول أوربا والولايات المتحدة الأمريكية خلال الثمانينات من القرن الماضي بدأت المشاريع الاستثمارية لتوليد الكهرباء على نطاق واسع عن طريق إنشاء العنفات والمزارع الريحية وذلك منذ بداية التسعينات، حيث أدت نتائج البحث والتطوير إلى قفزة نوعية في تطبيقاتها وازدادت استطاعة العنفة الريحية من ٣٠٠ ك.وات عام ١٩٩٠ إلى ١٥٠٠ ك.وات عام ٢٠٠٢ وذلك للعنفة الواحدة وازداد ارتفاع الأبراج ٣٠ متراً إلى أكثر من ١٠٠ متراً ومازال البحث والتطوير مستمراً حيث أصبحت الإمكانية مؤمنة حالياً لتركيب عنفات باستطاعة ٥٠٠٠ ك.وات(٥ ميغا وات) وخاصة على سواحل بحر الشمال والمحيط الأطلسي.

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 ٢٠٠٨ إلى أكثر من ٦٠٠٠ ميغاوات، بينما تحتل ألمانيا المرتبة الأولى حيث وصل مجموع الاستطاعة المركبة فيها عام ٢٠٠٨ إلى حوالي٢٥٠٠٠ ميغاوات. أما اسبانيا فقد خطت خطوات واسعة في هذا المجال وتحديداً بعد عام ١٩٩٧ حيث وصلت عام ٢٠٠٨ إلى ١٠٠٠٠ميغاوات وتحتل حاليا المرتبة الثانية. وتأتي الولايات المتحدة في المرتبة الثالثة حيث بلغ مجموع الاستطاعة المركبة عام ٢٠٠٨ وعلى الأخص في ولاية كاليفورنيا إلى ٧٠٠٠ ميغاوات.

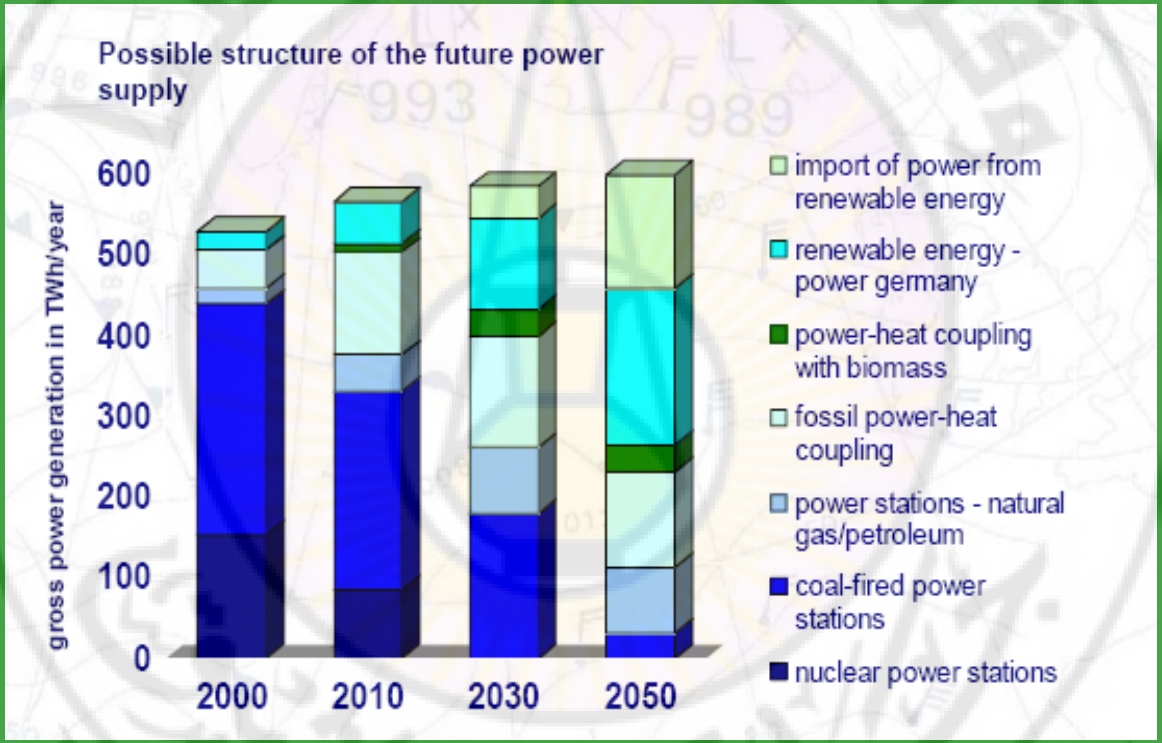
وفي هولندا إضافة إلى المزارع الريحية يمكن رؤية عدد كبير من العنفات الريحية الكبيرة المركبة بصورة افرادية ومربوطة مع شبكة التغذية الكهربائية في مناطق عديدة وأحياناً على جوانب الطرق الدولية فيها (الأتوستترادات) حيث وصلت الاستطاعة المركبة هناك إلى أكثر من ١٠٠٠ ميغاوات.

وفي الصين تم تركيب عنفات ريحية باستطاعة ١٠٠٠ميغاوات وفي الهند ٢١٠٠ ميغاوات وفي بريطانيا ٧٠٠ ميغاوات. وحسب قرار اللجنة الأوروبية لطاقة الرياح فمن المقرر أن تصل الاستطاعة المركبة في أوروبا عام ٢٠١٣ إلى ١٢٠٠٠٠ ميغاوات. يبين الشكل ٥-٧ مجموع الاستطاعة المركبة من العنفات الكهروريحية في أوروبا عام ٢٠٠٨ والمزمع تركيبها عام ٢٠١٣ بالمقارنة مع مناطق أخرى من العالم، حيث تم تقدير هذه الاستطاعات عام ٢٠٠٤. والجدير بالذكر أن هذه التقديرات تم تجاوزها بالنسبة لعام ٢٠٠٨. وقد تم إقرار خطة جديدة لها حتى عام ٢٠٢٠.



الشكل ٥-٧ مجموع الاستطاعة المركبة من العنفات الكهروريحية في أوروبا عام ٢٠٠٨ والمزمع تركيبها عام ٢٠١٣ بالمقارنة مع مناطق أخرى من العالم.

ويبين الشكل ٥-٨ خطة ألمانيا على سبيل المثال لإنتاج القدرة الكهربائية من المصادر التقليدية والمتجددة عام ٢٠٥٠. بما في ذلك المصادر الأحفورية والنووية.



الشكل ٥-٨ خطة ألمانيا لإنتاج القدرة الكهربائية من المصادر التقليدية والمتجددة للطاقة حتى عام ٢٠٥٠.

وقد تطورت تقنيات العنفات الريحية بعد عدد من المشاريع الرائدة والتطبيقات المختلفة، بحيث ازدادت استطاعة العنفة الريحية من ٣٠٠ ك.وات في بداية التسعينات إلى ٥٠٠٠ كيلووات أو٥ ميغاوات للعنفة الواحدة، كما ذكرنا سابقا، عام ٢٠٠٨. ومن المتوقع أن تصل إلى ١٠ 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 واسبانيا، 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 ٢٠% حتى عام ٢٠٢٠.

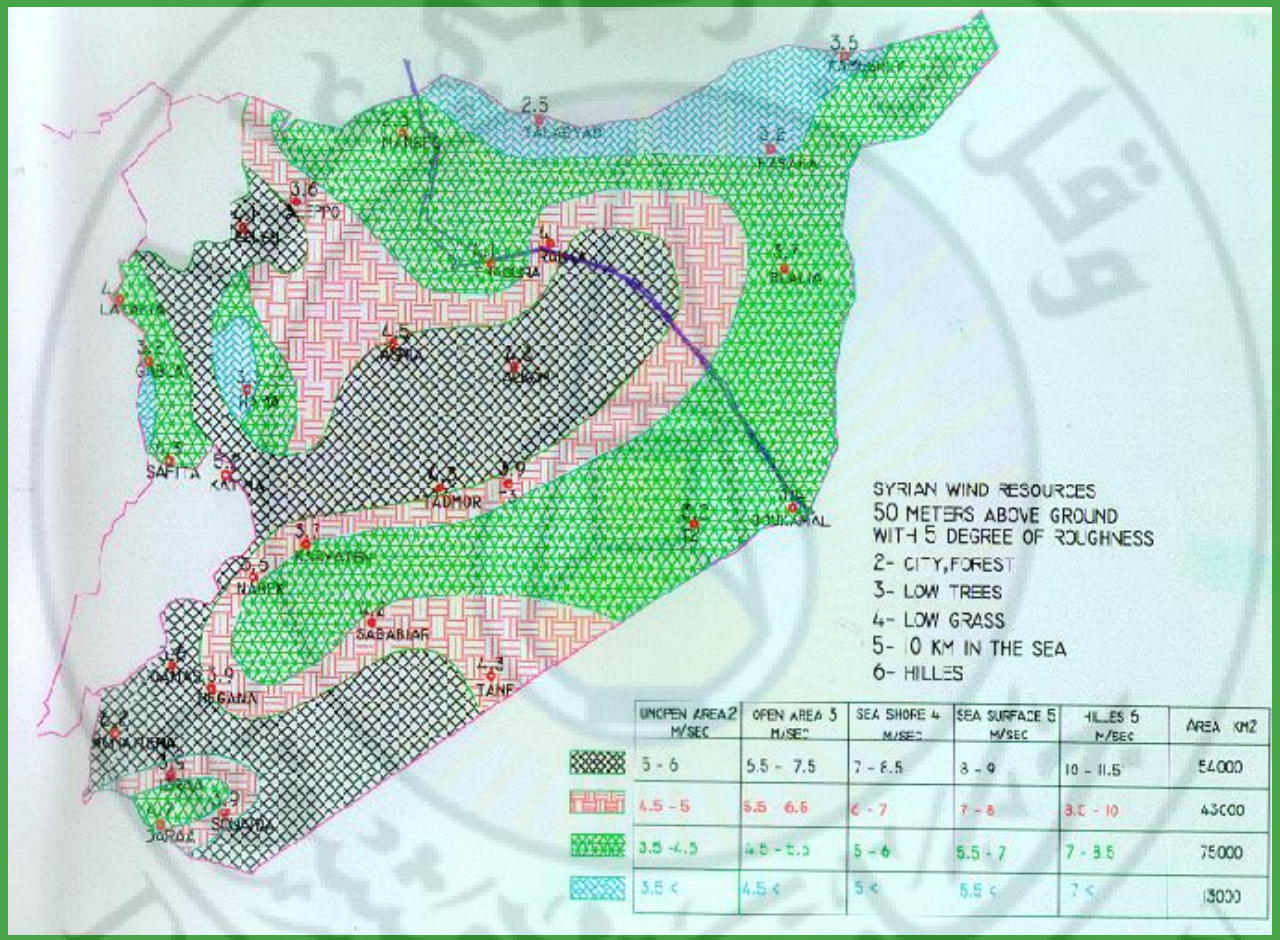
٥-٥ مصادر الرياح في سورية Wind Resources in Syria:

٥-٥-١ 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 انه يتطلب معلومات عن درجات الحرارة والضغط الجوي واتجاه الريح السائدة على مدار السنة ، والتي يجب أن تسجل على ارتفاعين، أحدهما ١٠ متر والآخر يجب أن لا يقل عن ٤٠ متر عن سطح الأرض ويمكن أن يصل إلى أكثر من مائة متر والذي يقارب مركز دوران العنفات الريحية متوسطة وكبيرة الاستطاعة من ٨٠٠ إلى ٣٠٠٠ 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.

٥-٥-٢ أطلس الرياح Wind Atlas:

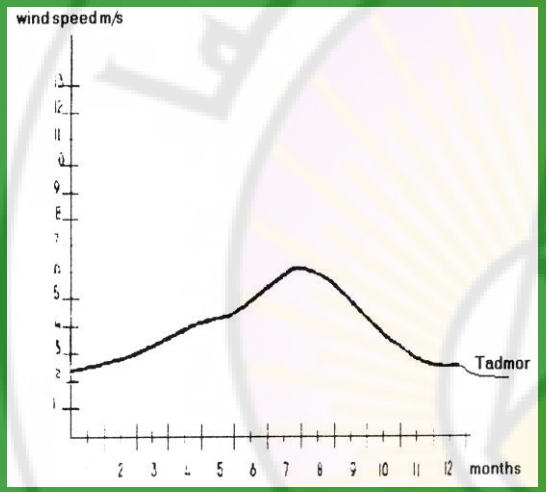
و وفقاً لهذا الأطلس تم إعداد خارطة الرياح في القطر العربي السوري كما يبين الشكل٥-١٠ حيث تم تقسيم القطر إلى /٤/ مناطق ريحية ، تبلغ مساحة المنطقة الأولى و التي تتوفر فيها سرعة رياح مجدية و تتراوح من / ٥ / إلى ١١.٥ م / ثا على ارتفاع افتراضي يعادل ٥٠ مترا حوالي ٥٤ ألف كم^2. وتبلغ مساحة منطقة الأمل الثانية حوالي ٤٣٠٠٠ كم^2 ومساحة المنطقة الثالثة حوالي ٧٥٠٠٠ كم^2 ومساحة المنطقة الرابعة حوالي ٣٠٠٠ كم^2. حيث يمكن اعتبار هذه المساحات كمناطق مرشحة للدراسات التفصيلية اللازمة لاستخدم طاقة الرياح في مجال توليد الكهرباء.

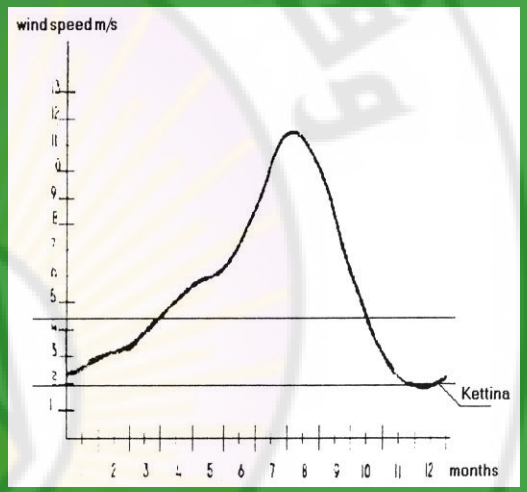


الشكل ٥-١٠ : خارطة الرياح في سورية

٥-٥-٣ توزع المناطق الريحية Distribution of the windy areas:

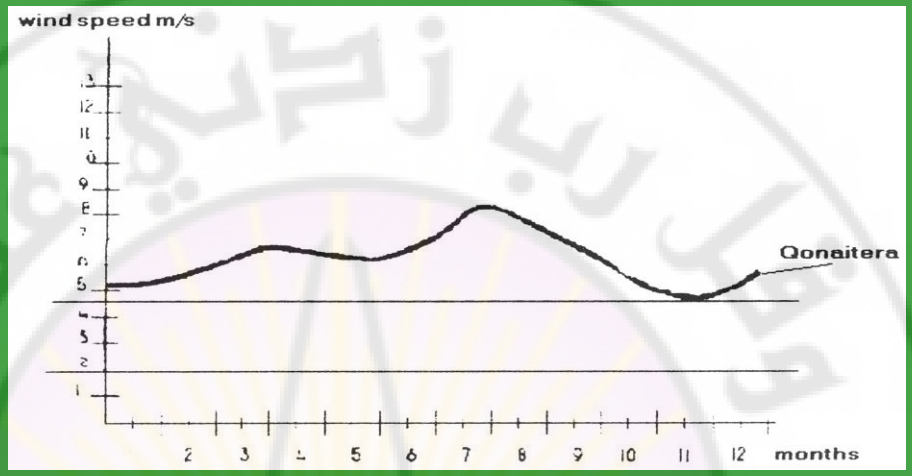
- منطقة الجبال الساحلية.
- المنطقة الوسطى .





الشكل ٥-١١ : منحنيات معدل سرعة الرياح خلال أشهر السنة في المنطقة الوسطى (تدمر)

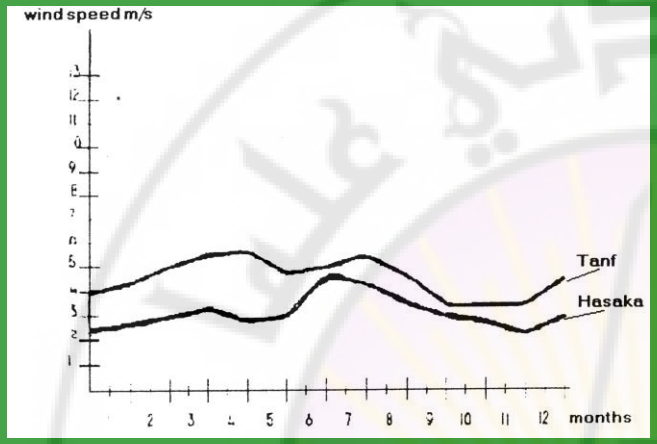
- المنطقة المحيطة بالطريق الدولية (حمص- دمشق).
- المنطقة الجنوبية الغربية .

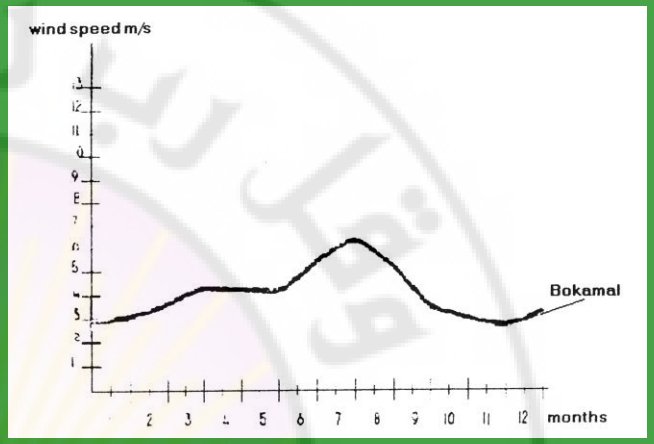


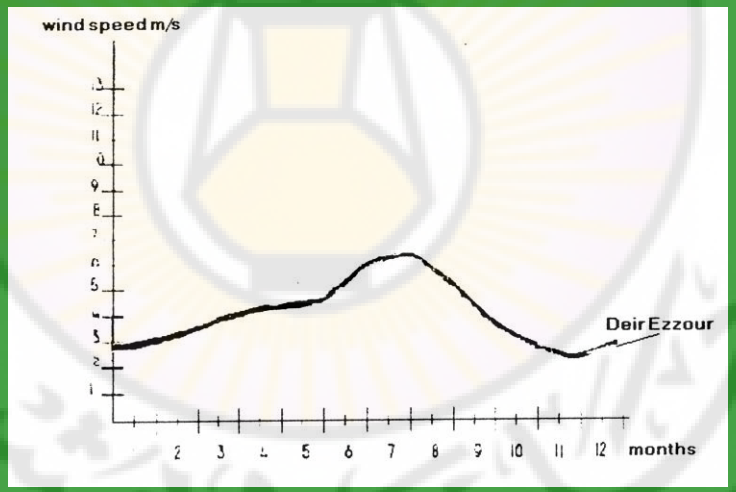
الشكل٥-١٢ : منحني معدل سرعة الرياح على مدار العام في المنطقة الجنوبية الغربية

- المنطقة الجنوبية الشرقية.

ونلاحظ في الشكل ٥-١٣من منحيات معدل السرعة خلال أشهر العام لمناطق مثل الحسكة _ دير الزور _ التنف _ البوكمال _ ارتفاع معدل السرعة خلال موسم السقاية صيفاً مما يلاءم استخدام العنفات لضخ المياه على سبيل المثال كما في الأشكال التالية:







الشكل ٥-١٣: منحيات معدل السرعة خلال أشهر العام لمناطق مثل الحسكة _ دير الزور _ التنف _ البوكمال

٥-٦ الأسباب الموجبة إلى استثمار طاقة الرياح:

٥-٦-١- مصادر الطاقة في سورية Energy Resources in Syria

الإنتاج	المادة	نفط خام ألف برميل			غاز طبيعي / ألف م٣		
	العام	ثقيل	خفيف	الإجمالي	مرافق	حر	الإجمالي
الفعلي	٢٠٠٠	٥٨٠١٦	١٣١١٠٢	١٨٩١١٨	٥٠٣٠٧٢٠	١٩٧٠٦٣٢	٧٠٠١٣٥٢
	٢٠٠١	٥٧٤٣٩٤	١٢٦٧٢١	١٨٤١٦٠	٥٠٣٤٧٦١	١٨٨٨٠٣٥	٦٩٢٢٧٩٦
	٢٠٠٢	٦٠٣٢٩	١٢١٩٢٧	١٨٢٢٥٦	٤٩١٧٢٥٩	١٥٠٠٠٣١	٦٤١٧٢٩٠
	٢٠٠٣	٦١٦٣٤	١١٣٣٨١	١٧٥٠١٥	٤٥٩٨٧٠١	١٩٦٩٠٢٩	٦٥٦٧٧٣٠
	٢٠٠٤	٦١٩٤٣	٩٩٨٤١	١٦١٧٨٤	٤٠٥١٦٨١	١٨٨٣٠١٥	٥٩٣٤٦٩٦
المتوقع	٢٠٠٥	٦٣٤٤١	٨٩٢٠٨	١٥٢٦٤٩	٣٦٤٥٢٤٢	١٨٢١٦٩٠	٥٤٦٦٩٣٢
	٢٠٠٦	٦٧٤٩٧	٧١٨٠٢	١٣٩٢٩٩	-	-	-
	٢٠٠٧	٧٤٩٠٣	٦٢٥١٤	١٣٧٤١٧	-	-	-
	٢٠٠٨	٧٧٢٠٦	٥١١٤٤	١٢٨٣٥٠	-	-	-
	٢٠٠٩	٧٨٤٥٥	٤٠٦٩٨	١١٩١٥٣	-	-	-
	٢٠١٠	٧٩٣٩٧	٣٢٢٦٩	١١١٦٦٦	-	-	-

الجدول ٥-١ تطور إنتاج النفط الخام والغاز الطبيعي الفعلي والمتوقع خلال الفترة ٢٠٠٠ - ٢٠١٠.

السنوات	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
الوقود الثقيل	1812	1878	1897	1796	1926	1511	1249	1304
الغاز الطبيعي	349	425	495	704	952	1768	2088	2297
المازوت	161	174	253	241	114	14	12	16
المجموع	2322	2478	2645	2741	2991	3294	3349	3617

السنوات	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
الوقود الثقيل	1506	2284	2644	2814	2282	2399	2972
الغاز الطبيعي	2429	2312	2479	2680	3315	3355	3037
المازوت	8	11	11	6	8	3	11
المجموع	3943	4607	5134	5501	5605	5757	6019

الجدول ٥ـ٢ :يبين تطور الطلب على الوقود خلال الفترة ١٩٩٠ـ٢٠٠٤ الوحدة ألف ط م ن.

٥-٦-٢ 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 /٤٠٠٠/ 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.

٥-٦-٣ 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 ٥٠٠٠- ٦٠٠٠ ك. وات للعنفة الواحدة، مع ظهور مشاريع رائدة باستخدام المواد ذات الناقلية العالية وباستطاعات يمكن أن تصل إلى ١٠٠٠٠ كيلووات للعنغة الواحدة.
- إمكانية جذب كبيرة لإنشاء مزارع ريحية 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 المساوئ:

- عدم توفر الرياح بشكل دائم على مدار العام حوالي ٤٠٠٠ ساعة.
- تغيرات الرياح باستمرار وبالتالي تغيرات القدرة المنتجة.
- صعوبات فنية تواجه مسائل وصل وفصل العنفات مع الشبكة العامة.
- مسائل الضجيج.
- الكلفة العالية نسبيا 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 نقع في التضليل بالاستناد إلى هذه المساوئ والذي يمكن أن يتعمده البعض بحجة عدم جدوى التوجه إلى استثمار هذا المصدر من مصادر الطاقة لتوليد القدرة الكهربائية يتوجب علينا توضيح ما يلي:

١ـ نظراً لإمكانية نضوب مصادر الطاقة الأحفورية ومنها النفط على وجه الخصوص مع الزمن فإن مصادر الطاقة المتجددة وبالأخص الشمس والرياح وبالرغم من عدم توفرهما على مدار الساعة وتغير قيمها باستمرار أصبحت الآن الشغل الشاغل لاستغلالها في كل أنحاء العالم.

ولا يمكن بحال من الأحوال تجاهلها أو انتظار الوقت الذي ستفرض تقانتها 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 ٢٤٠ غرام مكافئ نفط. وعلى سبيل المثال فإن عنفة ريحية واحدة باستطاعة ٥ ميغا وات ، كما سنبين في الفصل الثامن، تستطيع إنتاج حوالي ١٧ مليون كيلو وات ساعي سنوياً، مما يوفر حرق حوالي ٤٠٨٠ طن مكافئ نفط.

٢- صحيح أن سرعات الرياح متغيرة، وكذلك شدة الإشعاع الشمسي، وبالتالي يصعب مقارنة إنتاج الكهرباء منها بالمقارنة مع المصادر التقليدية إلا أن إستراتيجية 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 مصادر الطاقة المتجددة فقط كرديف للمصادر التقليدية.

٣- تخطط بلدان الاتحاد الأوروبي وعدد من بلدان العالم ومنها مصر والمغرب للوصول إلى نسبة إسهام مصادر الطاقة المتجددة في توليد القدرة الكهربائية تعادل ٢٠% من مجموع إنتاج القدرة الكهربائية عام ٢٠٢٠.

٤- لقد قامت بلدان العالم التي بدأت باستغلال طاقة الرياح بوضع تشريعها اللازم للأسس والمعايير الفنية والاقتصادية وسياسات الاستثمار والتمويل و التسعير 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 الأمر يعتبر بنظرنا من أهم أسباب تأخرنا في استغلال طاقة الرياح وغيرها من مصادر الطاقة التقليدية في سورية حتى تاريخه.

جامعة دمشق
كلية هـ.م.ك
قسم هندسة الطاقة الكهربائية

الفصل السادس

تقديرات الرياح Wind Assessments

محاضرات أ.د.كمال ناجي
شعبة الطاقات المتجددة

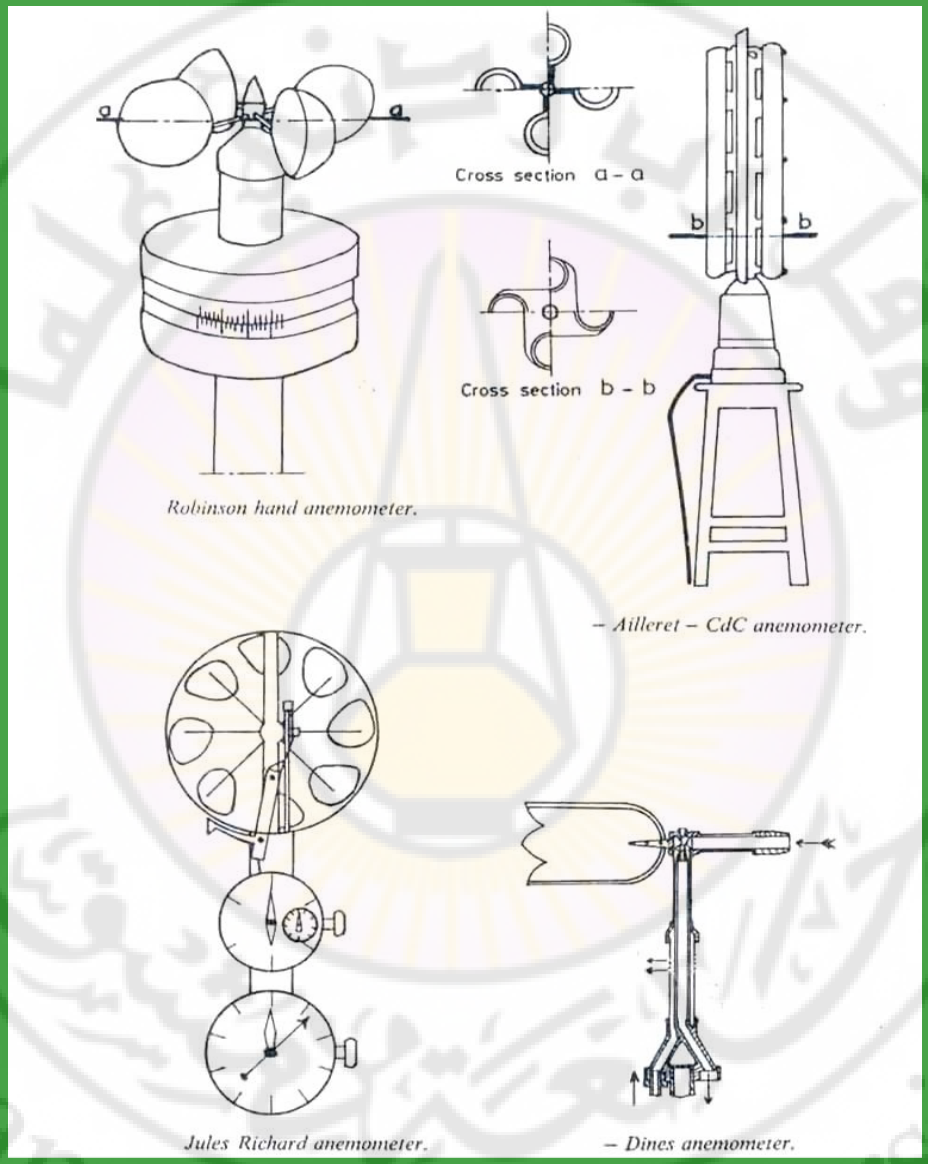
٦-١ قياس سرعة الرياح Wind Measurement

إن الاختيار المناسب للموقع يتطلب معرفة دقيقة بالشروط الريحية السائدة كعامل هام وأساسي. وتجدر الإشارة أن الطاقة الكهربائية المنتجة من الرياح تتعلق بشكل رئيسي بمكعب سرعة الرياح كما سنبين لاحقا. 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 ومسار وقوة 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.

٦-١-١ 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 انيمومترالضغط والانيمومتر المروحي (propeller Anemometer)والليزري (Laser) والموجات فوق الصوتية (ultra sonic) وانيمومتر السلك الساخن (Hot-wire Anemometer). وتستخدم ريشة الرياح (Wind Vane) لتحديد الاتجاه، ويتم القياس خلال دورة كاملة (٣٦٠ درجة)، والغرض من قياس الاتجاه هو معرفة الاتجاه السائد للرياح وكذلك توزع السرعات المقاسة على الاتجاهات المختلفة ويؤخذ هذا في الاعتبار عند تحليل البيانات وتخطيط مزارع الرياح. والشكل ٦-١ يبين نماذج من أجهزة قياس سرعة الرياح.



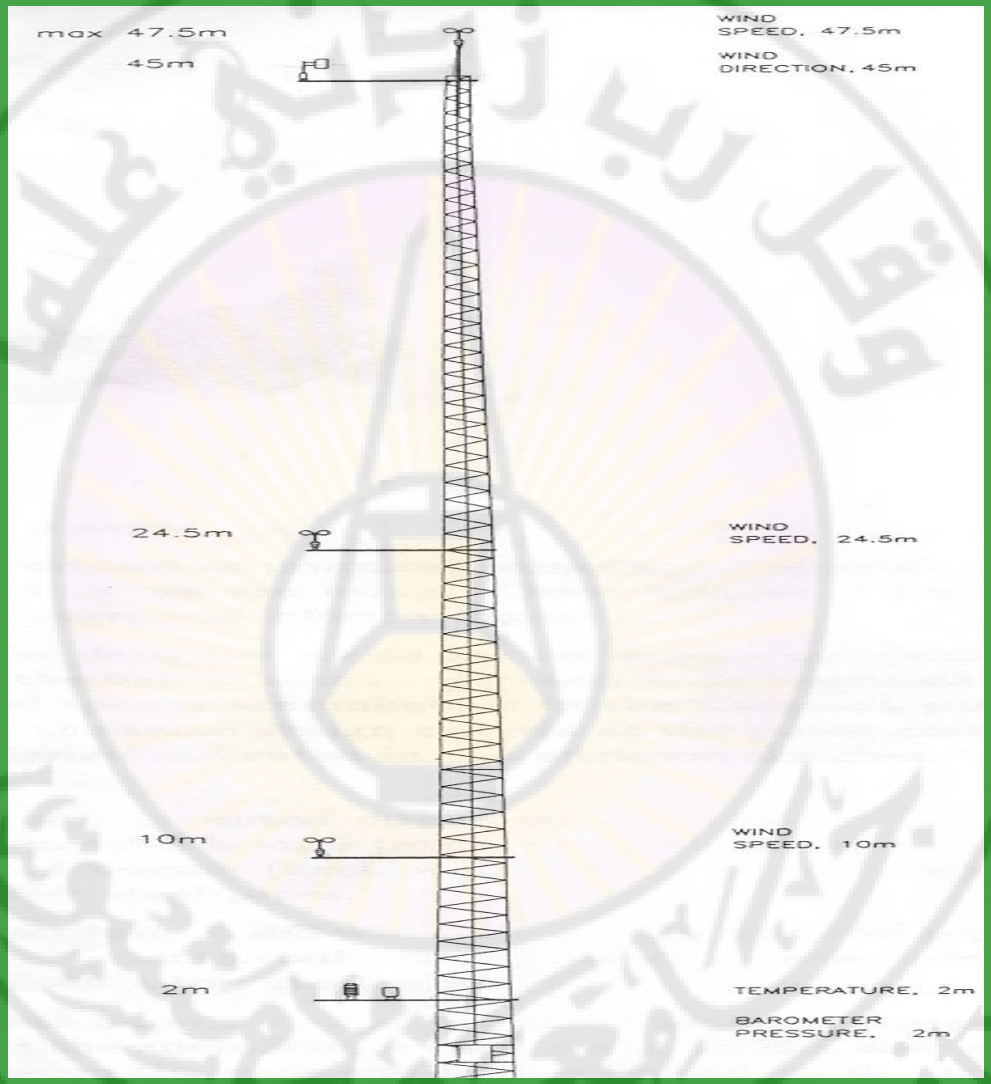
الشكل ٦-١ : نماذج من أجهزة قياس سرعة الرياح

وكمثال على ذلك يتم قياس سرعة الرياح في الشكل ٦-٢ على ارتفاعات مختلفة (١٠، ٢٥، ٤٧,٥ متر، واتجاه الرياح على ارتفاع ٤٥ متر، بالإضافة إلى قياس الضغط الجوي ودرجة الحرارة، ويتم تسجيل البيانات كل عشر دقائق، وتخزن في ملفّ 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.
- 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 عقدين من الزمن وصولاً لنتائج مؤكدة. إلا أن الحصول على بيانات عام واحد يعطي مؤشرا كافيا من حيث المبدأ.



الشكل ٦-٢ برج قياس سرعات الرياح على ارتفاعات مختلفة مع تحديد اتجاه الرياح على مدار العام.

أما الحساسات أوالمجسات والأجهزة المستخدمة في قياس الرياح في العنفة الريحية فهي:

- جهاز قياس سرعة الرياح (Anemometer)
- حساس أو مجس اتجاه الرياح (Wind Vane Sensor)
- مجسات (حساسات) قياس سرعة الدوران (RPM Sensors):
- مجسات قياس درجات حرارة أجزاء العنفة (Temperature Sensors)
- مجسات قياس ضغط الأنظمة الهيدروليكية (Hydraulic pressure Sensors)
- مجسات قياس اهتزاز العنفة (Vibration Sensors) والتفاف الكابلات (Cable twist Sensor)

٦-٢ 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:

$$V_B = V_A \times \left(\frac{h_B}{h_A}\right)^{\alpha} \qquad (1\text{-}6)$$

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.

٣-6 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:

(٢-6)

$$h(v)=\left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}}$$

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:

$$h=\frac{fraction\ of\ time\ wind\ speed\ is\ between\ v\ and\ (v+\Delta v)}{\Delta v}$$

(٣-6)

حيث كما ذكرنا أعلاه تتغير υ في المجال من صفر إلى لانهاية.

(4-6)

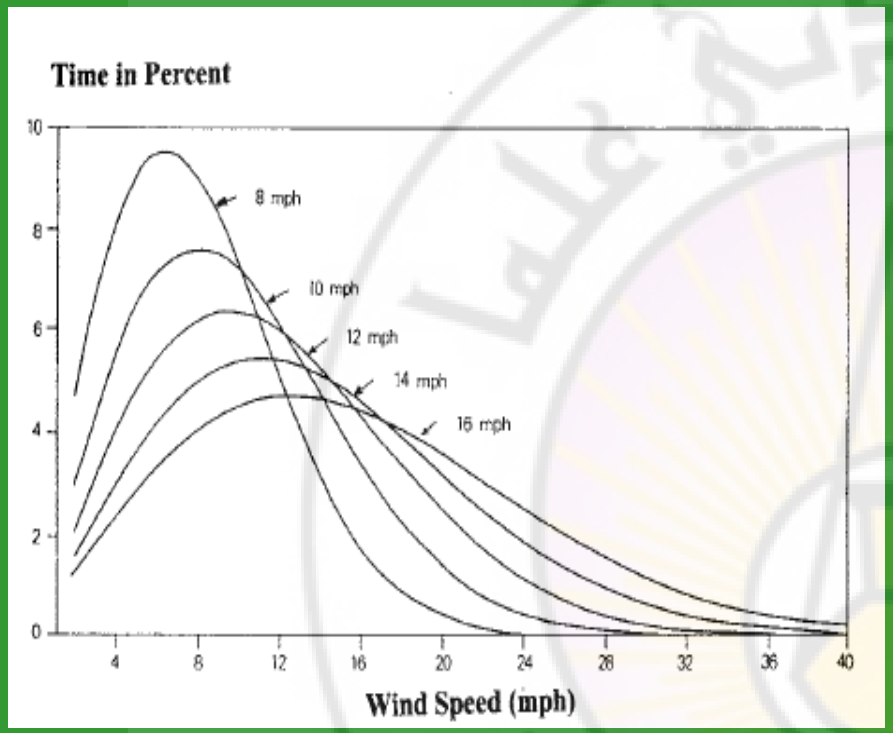
$$\int_0^{\infty} h \cdot dv = 1$$

إذا اخترنا الفترة الزمنية عام واحد وقسمناه إلى ساعات فنحصل على:

$$h = \frac{number\ of\ hours\ the\ wind\ is\ between\ v\ and\ (v+\Delta v)}{\Delta v}$$

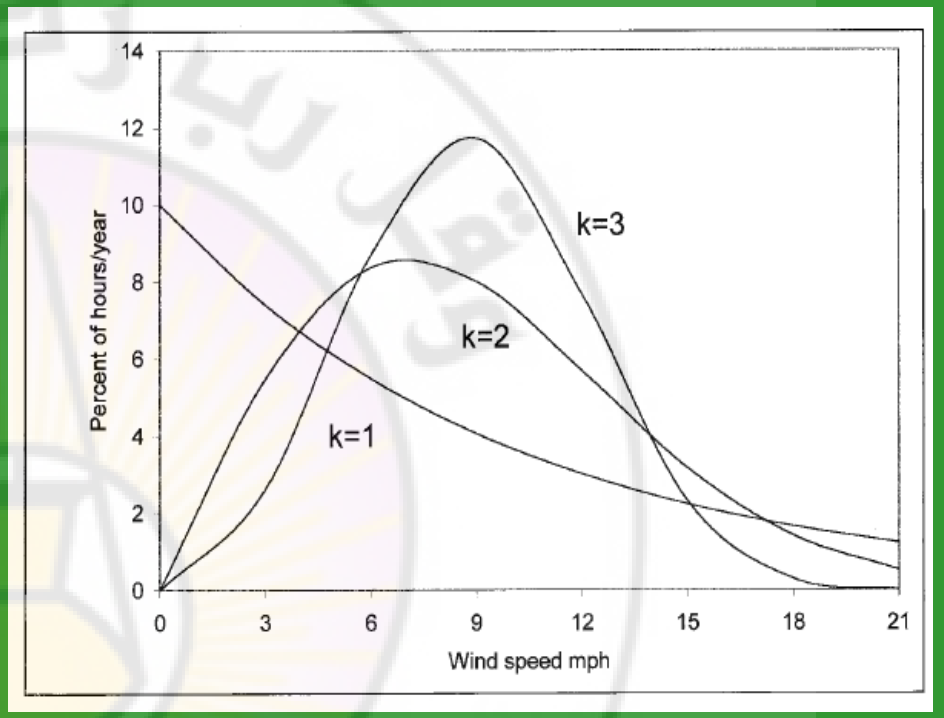
الوحدة h تعبر عن عدد الساعات في السنة من أجل مقياس سرعة متر/ ثانية وبتكامل العلاقة 6-4 تصبح h مساوية ٨٧٦٠ ساعة (وهي عدد ساعات العام). ويبين الشكل 6-٣ رسماً بيانياً للزمن مقابل السرعة من أجل ثلاثة قيم مختلفة لمحدد الشكل k، حيث يكون المنحني مزاحاً إلى اليسار من أجل k=1 والذي تكون فيه غالبية الأيام ذات رياح ساكنة V=0. 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 ٢-٣ عما يسمى احتمالية توزيع ويبول.

في حالة قياسات الرياح يستخدم عادةً المنحني ذو معامل الشكل k=2 وهو ما سنعتمده. يبين الشكل ٦-٤ منحني التوزيع من أجل k=2 لعدة قيم لمحدد القياس C والذي يتراوح بين ٨- ١٦ ميل/ ساعة (حيث يساوي واحد ميل/ساعة ٠.٤٤٦ متر/ثانية). ومن اجل 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) .



الشكل ٦-٤: 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).

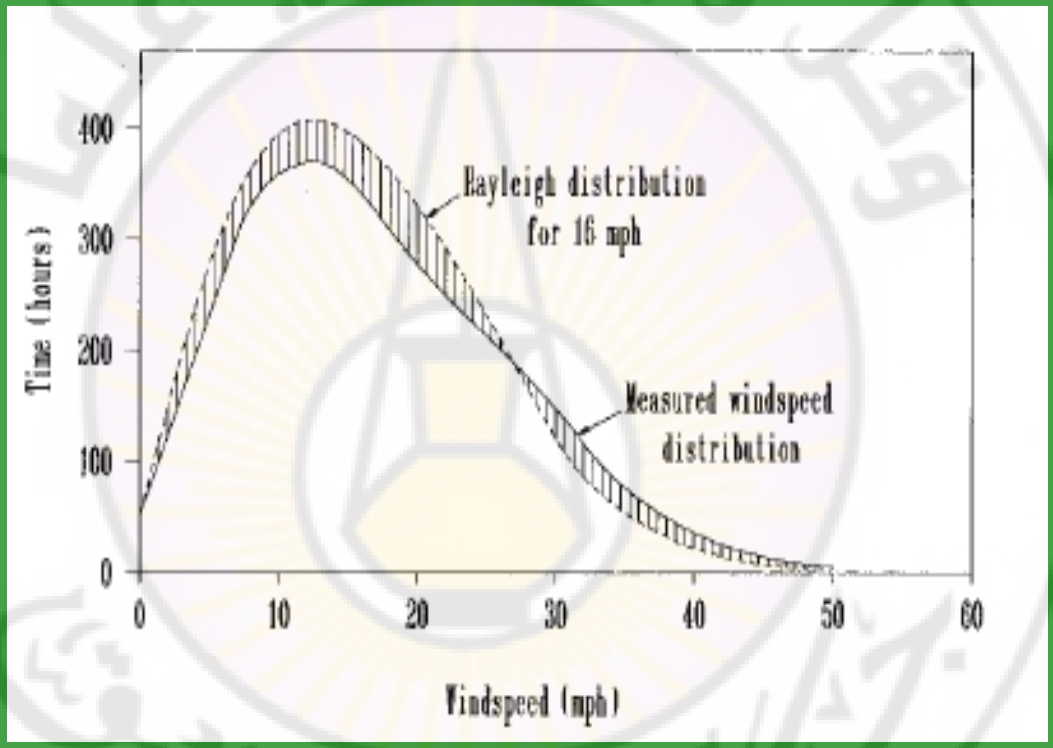


الشكل ٦-٣: منحنيات الزمن مقابل السرعة من أجل ثلاثة قيم مختلفة لمحدد الشكل k

Weibull probability distribution function with scale parameter c=10 and shape parameters k =1, 2 and 3.

يمكن مقارنة معطيات القياس بسهولة استناداً إلى توزيع رايلي كما يبين الشكل٦-٥.

إذن توزيع رايلي يعتمد على محدد واحد فقط وهو محدد القياس Scale parameter (C C) .



الشكل ٦-٥: مثال على منحني توزيع رايلي لعدد الساعات في السنة بالمقارنة مع منحني 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.

استناداً إلى ما ذكر أعلاه يمكننا تلخيص توزيع ويبول استناداً إلى معامل الشكل K على النحو التالي.

K=1 يعبر عن توزيع متمدد (exponential distribution):

حيث: $h = \lambda \cdot e^{-\lambda V}$

حيث: $\lambda = 1/c$

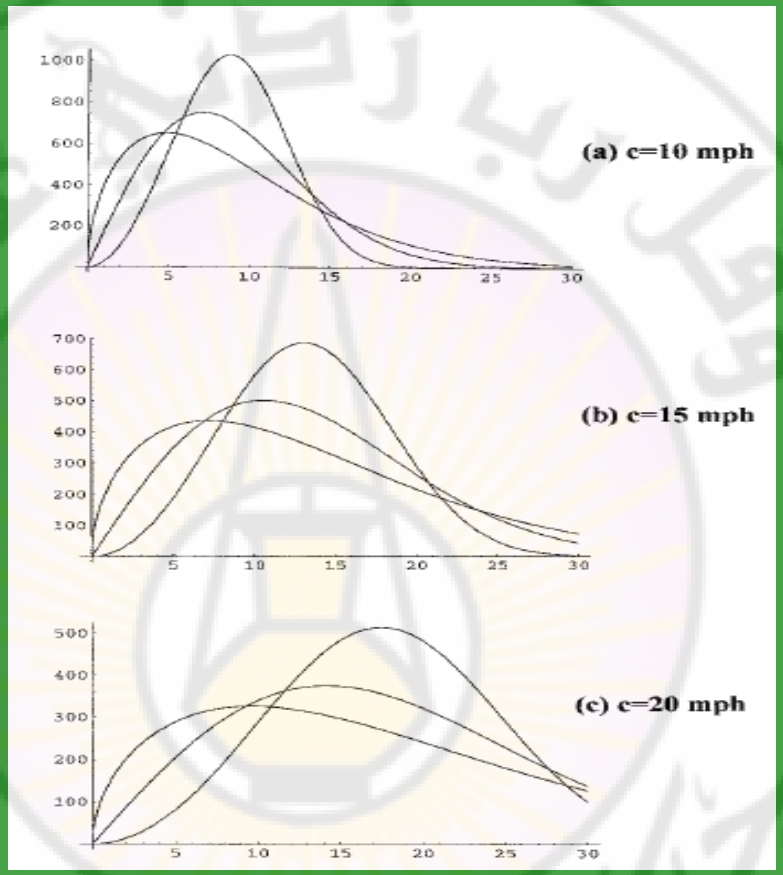
K=2 يعبر عن توزيع رايلي

حيث: $h = 2\lambda^2 \cdot V \cdot e^{-(\lambda V)^2}$

K=3 يعبر عن منحني التوزيع المقارب لشكل الجرس.

بما أن معظم المواقع تمتلك محدد قياس السرعة C في مجال من ١٠ إلى ٢٠ ميل / ساعة (حوالي ٥ إلى ١٠ متر/ ثانية) ومحدد الشكل K الذي يتراوح بين ١.٥ إلى ٢.٥ فإن دراستنا ستنحصر على هذين المجالين للمحددين C و k .

يبين الشكل ٦-٦ 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=20، C=15، C=10 ميل /ساعة ومحدد معامل الشكل ذو القيم، k=3، k=2 ، k=1.5.

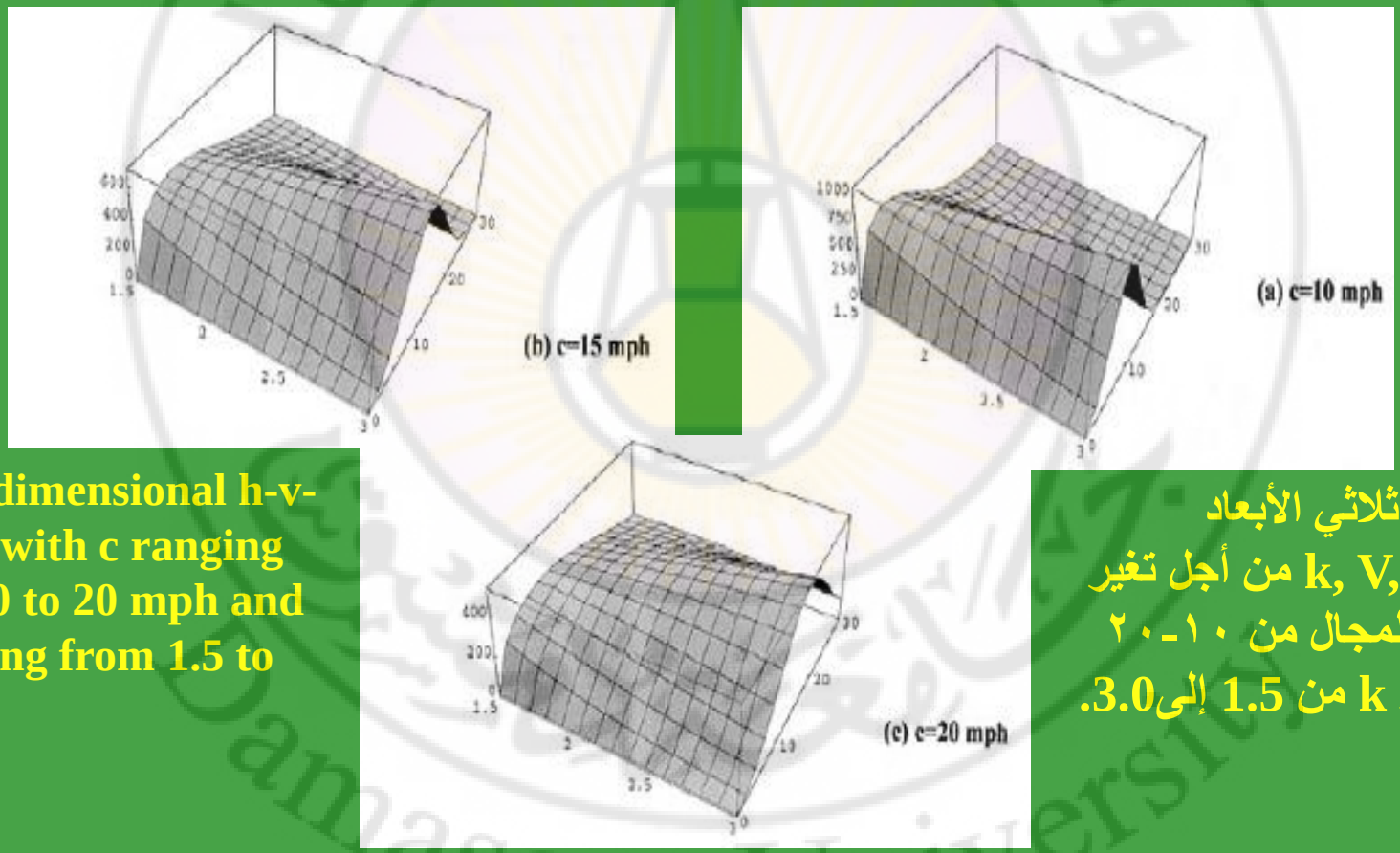


الشكل ٦-٦ : منحنيات توزيع ويبول لعدد الساعات في السنة التي تعبر فيها الرياح على العنفات ذات المحور العمودي والعنفات ذات المحور الأفقي في الموقع من أجل عدة قيم للمحددين K C,

Weibull distributions of hours/year with three different shape parameters k = 1.5, 2, and 3.

إن عدد الساعات في السنة لكل من السرعات V و V+ΔV يبينها الشكل٢-٧ بشكل ثلاثي الأبعاد للمحنيات k, V, h من أجل تغير السرعة في المجال من ١٠-٢٠ ميل/ساعة. و k من ١.٥ إلى ٣.٠

تبين المنحنيات في الشكل ٦-٧ 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 محدد الشكل k من ٣ إلى ١.٥. ونلاحظ أيضاً زيادة قيم المحدد c حيث يبن منحني التوزيع زيادة قيم السرعة.



Three-dimensional h-v-k plots with c ranging from 10 to 20 mph and k ranging from 1.5 to 3.0.

الشكل ٦-٧: ثلاثي الأبعاد للمحنيات k, V, h من أجل تغير السرعة في المجال من ١٠-٢٠ ميل/ساعة. و k من 1.5 إلى3.0.

٤-٦ السرعة الاسمية للرياح(Mean Wind Speed):

تحدد السرعة الاسمية للرياح من خلال منحني V, h وتكامل تغيرات السرعة من الصفر إلى لا نهاية وبعد تقسيمها على مجموع الساعات خلال عام كامل أي ٨٧٦٠ ساعة. إذن فإن السرعة الاسمية في العام عبارة عن معدل السرعة حسب ما يلي:

$$V_{mean} = \frac{1}{8760}\int_{0}^{\infty} h \cdot v \cdot dv \qquad (6\text{-}6)$$

من أجل قيم k, C للمجال المتواجد في معظم المواقع يمكن تقريب التكامل أعلاه إلى ما يسمى تابع جاما (Gamma Function).

$$V_{mean} = c\left(1+\frac{1}{k}\right) \qquad (7\text{-}6)$$

من أجل توزيع رايلي مع قيمة المحدد k=2 يصبح تابع جاما مقارباً للعلاقة التالية:

$$V_{mean} = 0.90 \, .C \qquad (8\text{-}6)$$

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:

$$h(v) = \frac{2v}{c^2} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} = \frac{2v}{\left(V_{mean}\right)^2} e^{-\left(\frac{v}{V_{mean}}\right)^2} \qquad (9\text{-}6)$$

٦-٥ الجذر التكعيبي للسرعة الاسمية Root Mean Speed cubic (r m c)

كما أسلفنا فإن الاستطاعة تتناسب مع مكعب السرعة والقدرة الناتجة خلال عام هي تكامل ($h.v^3.dv$). 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:

$$V_{rmc} = \sqrt[3]{\frac{1}{8760}\int_0^{\infty} h \cdot v^3 \cdot dv} \qquad (10\text{-}6)$$

إذن فإن الجذر التكعيبي للسرعة الاسمية rmc 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:

$$P_{rmc} = \frac{1}{4}\rho \cdot V_{rmc}^{\ 3} \ \text{watts/m}^2 \qquad (11\text{-}6)$$

وبضرب قيمة P_{rmc} بعدد الساعات الكلي في السنة تعطينا هذه العلاقة القدرة المتاحة التي يمكن إنتاجها في الموقع.

٦-٦ كثافة الاستطاعة وكثافة الطاقة Power and Energy Density

يبين الجدول 6-١ 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 6-١ : نتائج مقارنة مزارع ريحية

Site	Annual mean wind speed Meters/second	Annual average specific power Watts/m²
Culebra, Puerto Rico	6.3	220
Tiana beach, New York	6.3	285
San Gorgonio, California	6.3	365

٦-٧ عملية المقارنة بين سرعة قمة المنحني ويسمى المود mode والسرعة الاسمية والجذر التكعيبي للسرعة:

يمكن إيجاد ما يسمى سرعة المود من قمة منحني 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 ٠ إلى ∞، وبعد تقسيم قيم هذا المجال على عدد الساعات في العام أي ٨٧٦٠ ساعة. وعندها يحسب المعدل السنوي للسرعة حسب العلاقة(6-6).

يبين الجدول6-٢ اثر 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 /م٢ ، كذلك كثافة الاستطاعة بالوات أو الكيلو وات/ م٢.

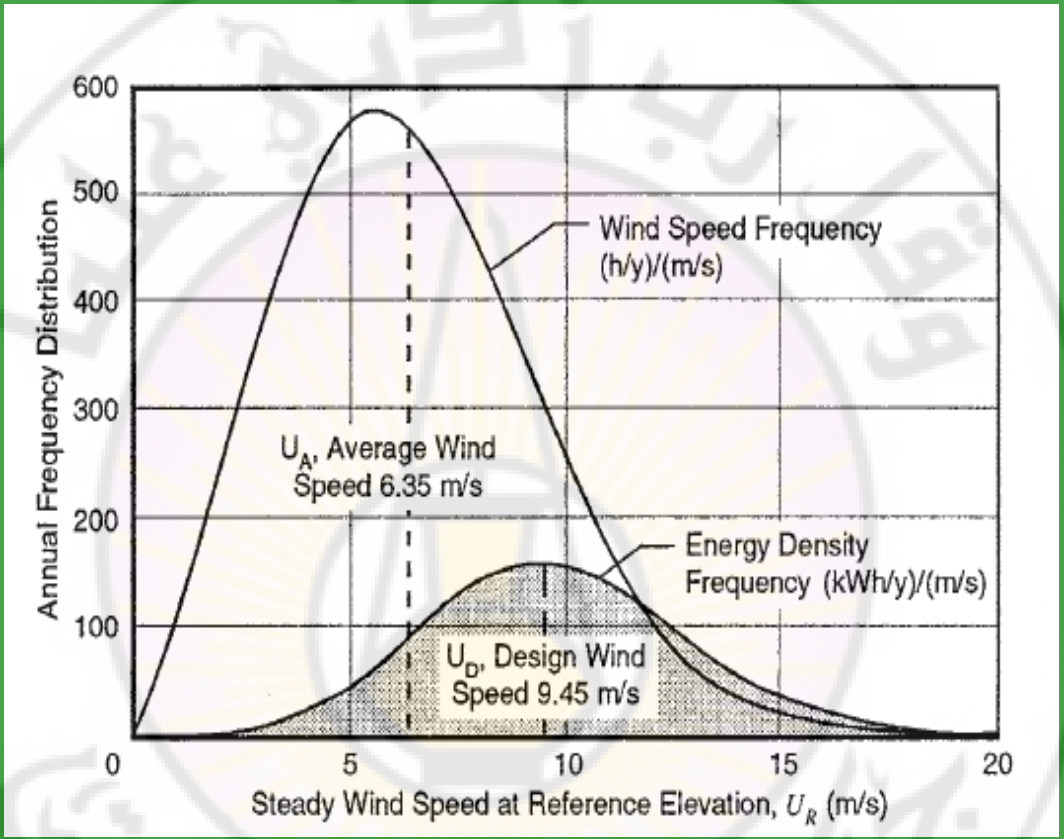
الجدول 6-٢ :أثر قيم معامل الشكل ومعامل السرعة على كثافة الطاقة

c	k	Mode Speed	Mean Speed	RMC Speed	Pmode W/m²	Pmean W/m²	Prmc W/m²	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

٦-٨ توزيع القدرة الناتجة عن الرياح Energy Distribution :

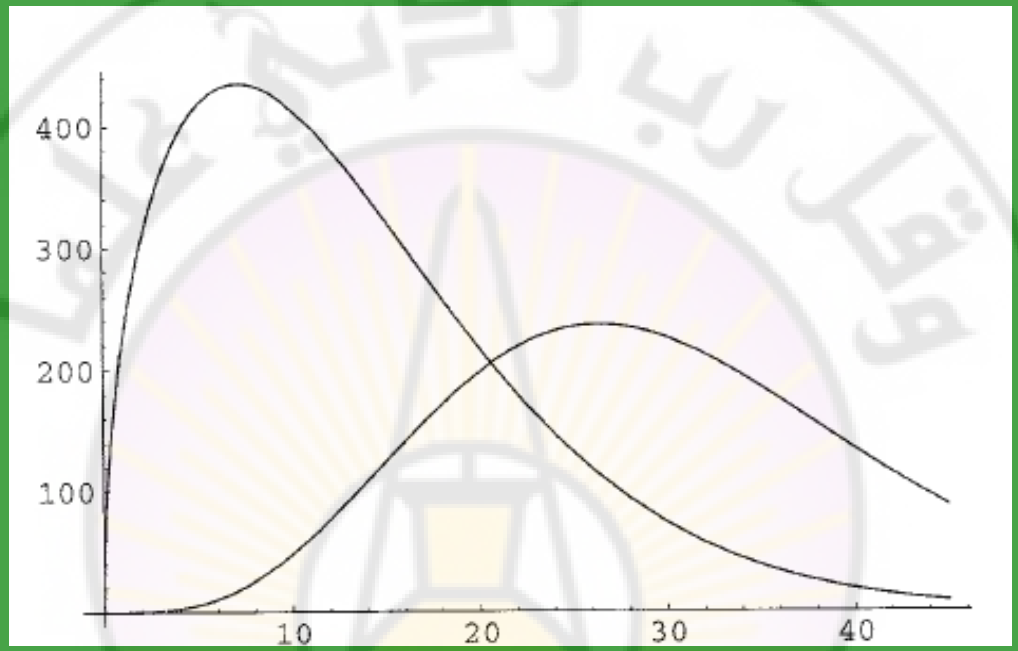
يمكن الحصول على قيمة القدرة الناتجة عن الرياح من المساهمة السنوية لهبوب الرياح وتغيراتها أي V

$$e = \frac{kWh\ contribution\ in\ the\ year\ by\ the\ wind\ between\ v\ and\ (v+\Delta v)}{\Delta v} \qquad (12\text{-}6)$$



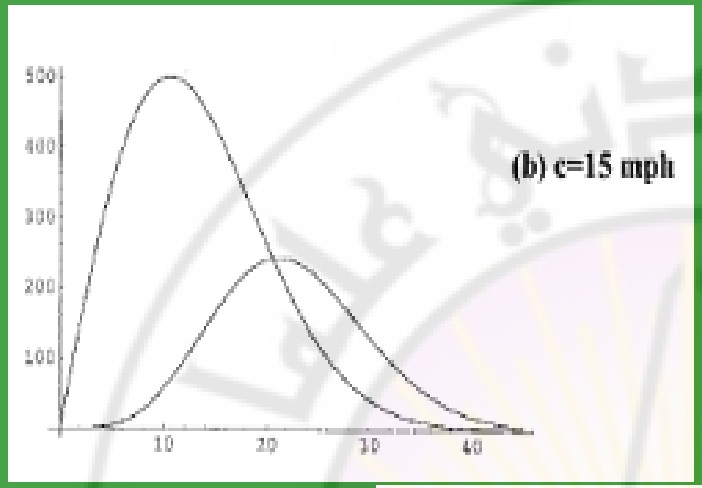
الشكل ٦-٨: منحنيات رايلي لتوزيع القدرة المنتجة والساعات خلال العام مقابل السرعة من أجل قيم محددة لمحددي الشكل وقياس السرعة

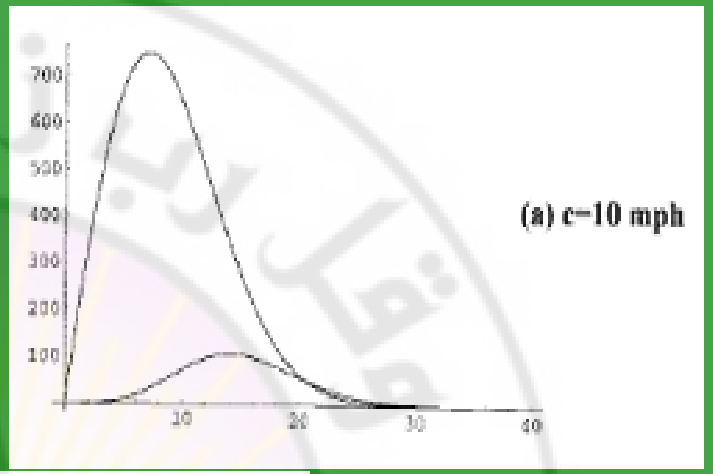
Rayleigh distributions of hours and energy per year versus wind speed with c=10 and k = 2

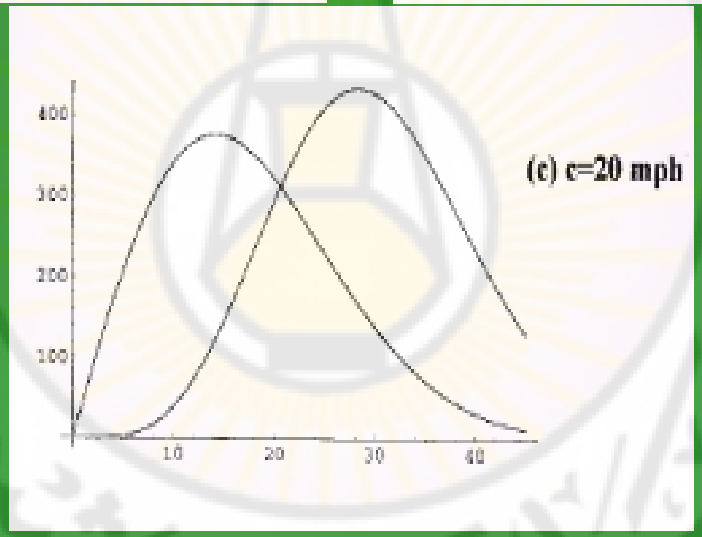


الشكل ٦-٩: منحنيات توزيع رايلي للسرعة والقدرة المنتجة من أجل قيمة معامل الشكل K=1.5 ومعامل قياس السرعة C=15 ميل/ساعة

Rayleigh distributions of hours and energy per year versus wind speed with c = 15 and k = 1. 5







الشكل ٦-١٠ : منحنيات توزيع رايلي للسرعة والقدرة المنتجة من اجل 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, and 20 mph

٦-٩ مقاييس المعطيات الرقمية Digital Data Loggers:

ويمكن استخدام العلاقة التالية لحساب معدل(وسطي) السرعة والتي يرمز لها V_{avg}:

$$V_{avg} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} V_i \qquad (٦-١٣)$$

أما سرعة الجذر التكعيبي المكافئة للقياسات الرقمية فتساوي:

$$V_{rmc} = \sqrt[3]{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} V_i^3} \qquad (٦-١٤)$$

والطريقة الأفضل لحساب استطاعة الرياح من خلال تجميع معطيات المعدل السنوي لكثافة الاستطاعة حسب العلاقة التالية:

$$P_{rmc} = \frac{1}{2n}\sum_{i=1}^{n} \rho_i \cdot V_i^3 \qquad (٦-١٥)$$

حيث:

n – عدد القياسات خلال فترات زمنية محددة وسطياً.

ρ_i- كثافة الهواء kg/m^3 .

V_i- سرعة الرياح m/s لكل من الفترات الزمنية المقاسة.

٦-١٠ نسبة تغير السرعة مع الارتفاع:

بالعودة إلى العلاقة (٦-١) والتي يمكن وضعها بشكل أشمل استناداً للعلاقة التالية:

$$V_2 = V_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\alpha}$$

(٦-١٦)

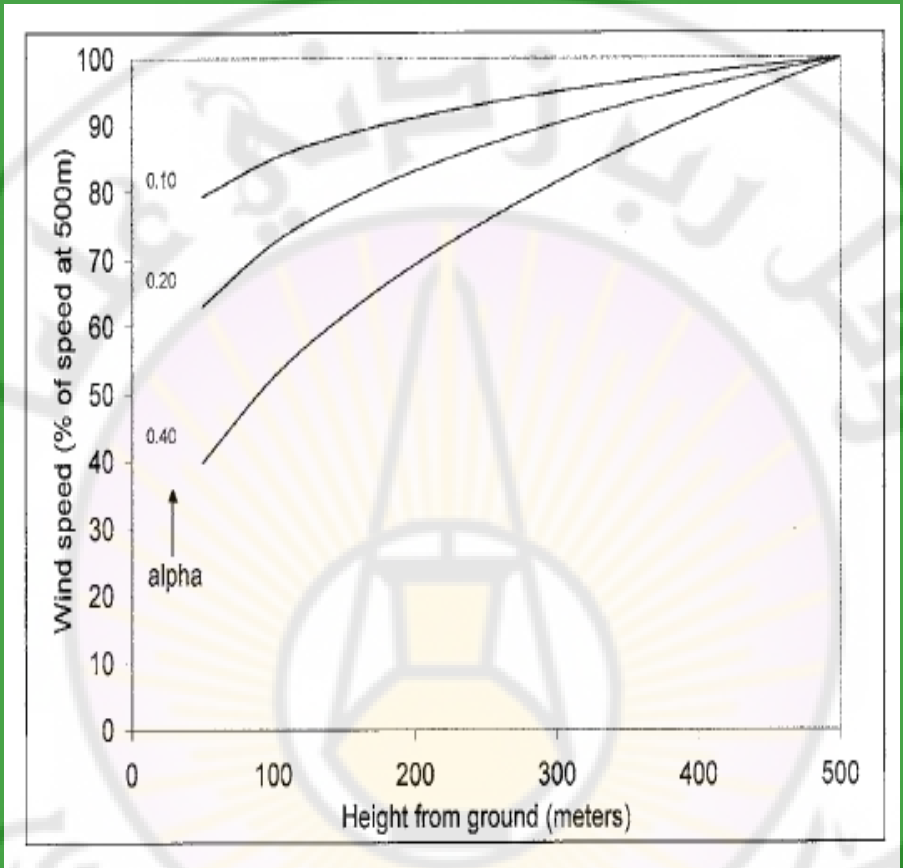
حيث:

V_1 – سرعة الرياح المقاسة على ارتفاع h_1.

V_2 – سرعة الرياح المقدرة 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 (١٠٠%) على ارتفاع حوالي ٥٠٠ متر عن سطح الموقع مهما كانت درجة خشونته. ويبين الشكل ٦-١١ نسبة تغير السرعة مع الارتفاع في الموقع حسب معامل الاحتكاك .



الشكل ٦-١١ 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

Damascus University

الجدول ٦-٣: قيم معامل الاحتكاك من أجل مختلف أنواع سطح الموقع [١٣].

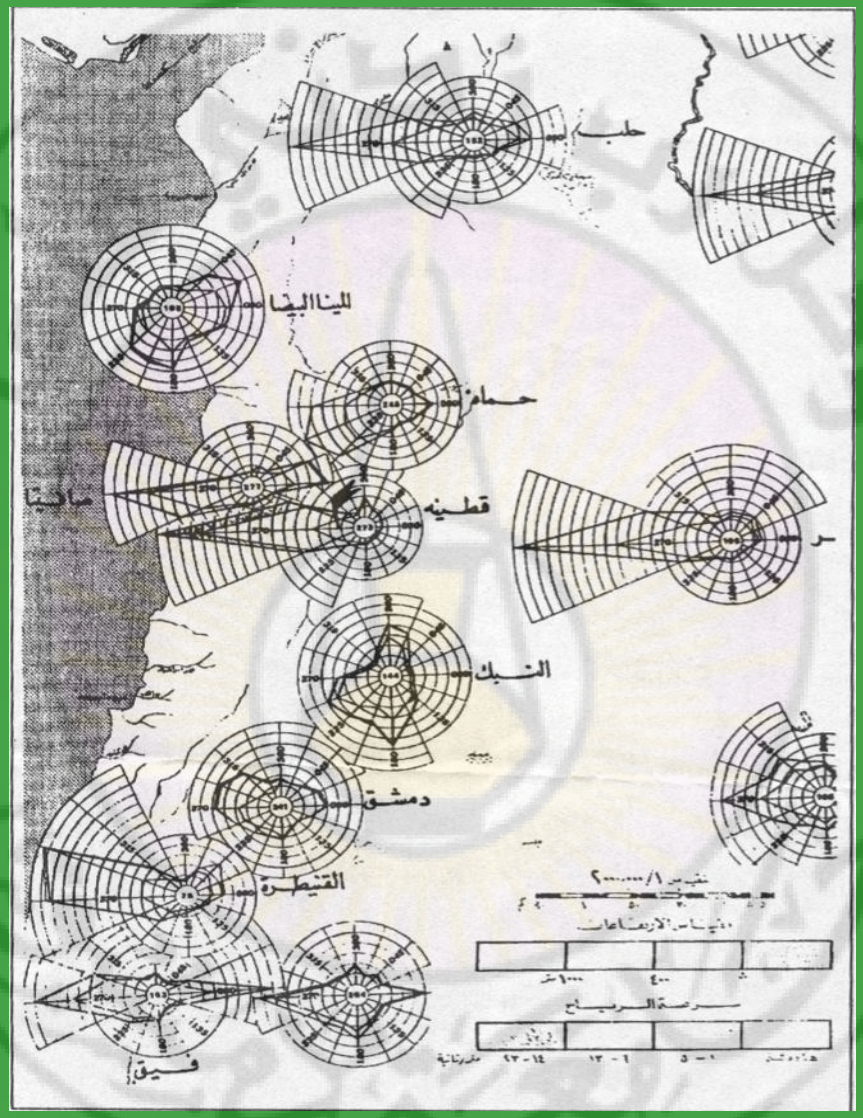
Friction Coefficient of Various Terrain

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

٦- ١١ معطيات وبيانات قياس سرعة واتجاه الرياح في سورية:

تقع سورية بين خطي العرض ٣٢,٣ ° و ٣٧° شمال خط الاستواء وبين خطي الطول ٣٦° و٤٢,٥° شرق خط جرينيتش. مساحة سورية /١٨٥٥١٧/كم٢.

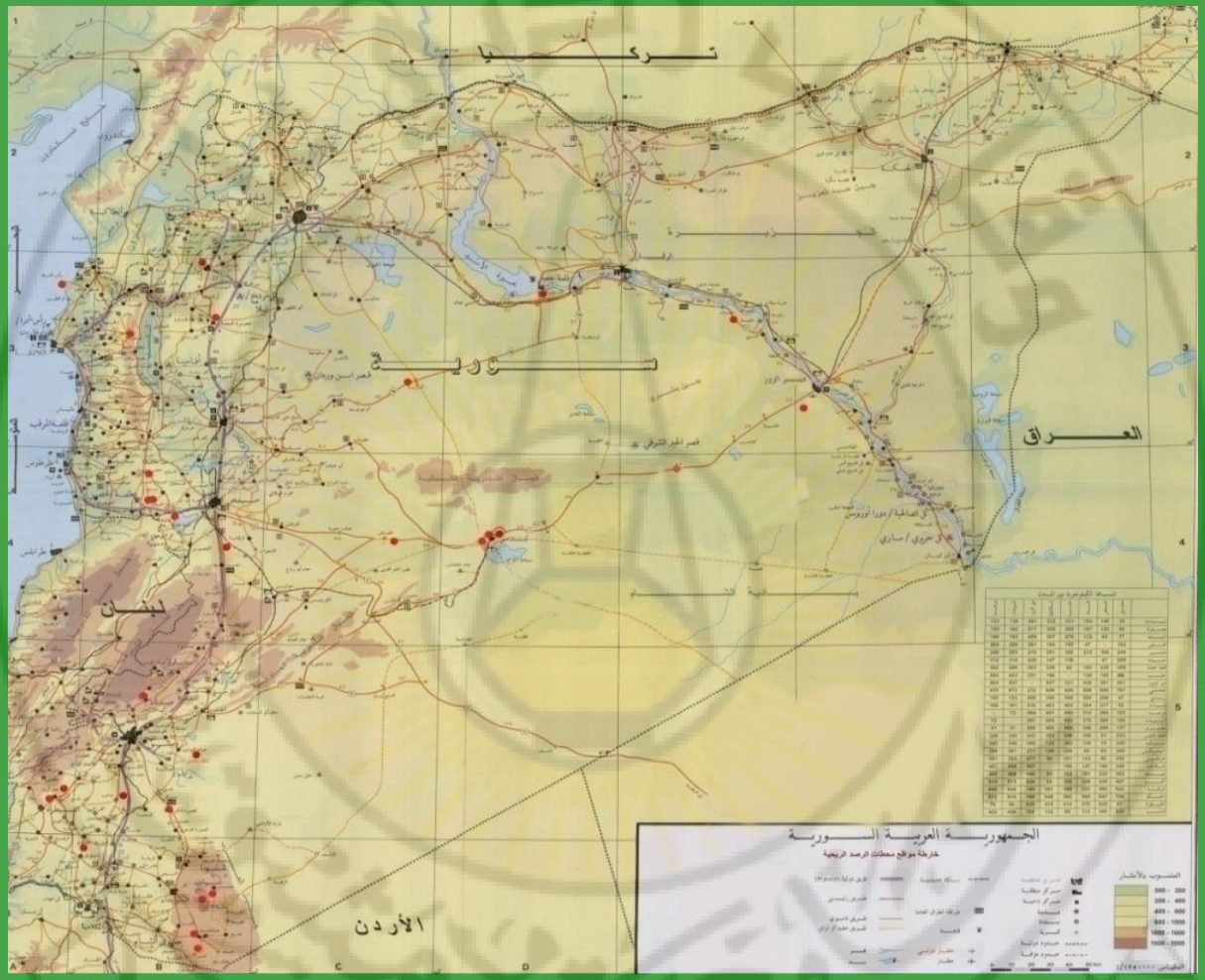
استنادا إلى خارطة الرياح في سورية حسبت سرعات الرياح في مواقع متنوعة جغرافياً قرب الساحل والغابات ومحيط المدن وعلى التلال والمرتفعات وورادات الرياح كما هو مبين في الشكل ٦-١٢. ولكن هذه الحسابات تقريبية ويمكن اعتبارها كمؤشر لحركة الرياح في تلك المواقع أو المناطق.



الشكل ٦-١٢: وردات الرياح السنوية في بعض المواقع المختارة في سورية[٥].

٦-١٢ المواقع المختارة لتركيب محطات مراقبة سرعة واتجاه الرياح:

الشكل ٦-١٣ : محطات حديثة لمراقبة سرعة واتجاه الرياح في عدد من المواقع[٥].



الشكل ٦-١٤: خارطة المواقع المقترحة لأبراج مراقبة سرعة الرياح في سورية[٥].

الجدول ٦-٤: مواصفات أماكن تركيب محطات مراقبة سرعة الرياح في سورية[٥].

Site	Location		Alt	Site	Location		Alt.
	N	E			N	E	
Salchad S/S	32° 29,704	36° 41,204	1200	Qutaifah			
Salchad - Mashkuch	32°25.658	36° 43,226	1200	Al Hidjana	33° 8,587	36° 31,618	650
Suweida Mointain	32° 40.711	36° 44,103	1800	Alkaldieh	33° 8,666	36° 31,201	650
Nasharaf	32°42,657	36°47,416	1500	Quattina Lake	34° 40.113	36° 35.746	500
Qunaitra	33° 10.564	35°52.065		Barshin-Misyaf	34° 53.256	36° 20.199	920
Nabe al Fawwer	33° 13.957	35°56,907	930	Ras Basit	35° 50.908	35° 48,979	30
Gaba	33° 10.432	35° 55.810	1020	Slunfleh Pass	35° 36.492	36°13.040	1360
Nawa				Bab al Hawa			
Ghabaghib	33° 12,3	36°15,801	750	Murrat An Numan	35° 41.427	36°45.303	560
Palmyra SS	34° 34,602	38^16,515	430	Jandar			

الجدول٦-٥: مواصفات أماكن تركيب محطات مراقبة سرعة الرياح في سورية [٥].

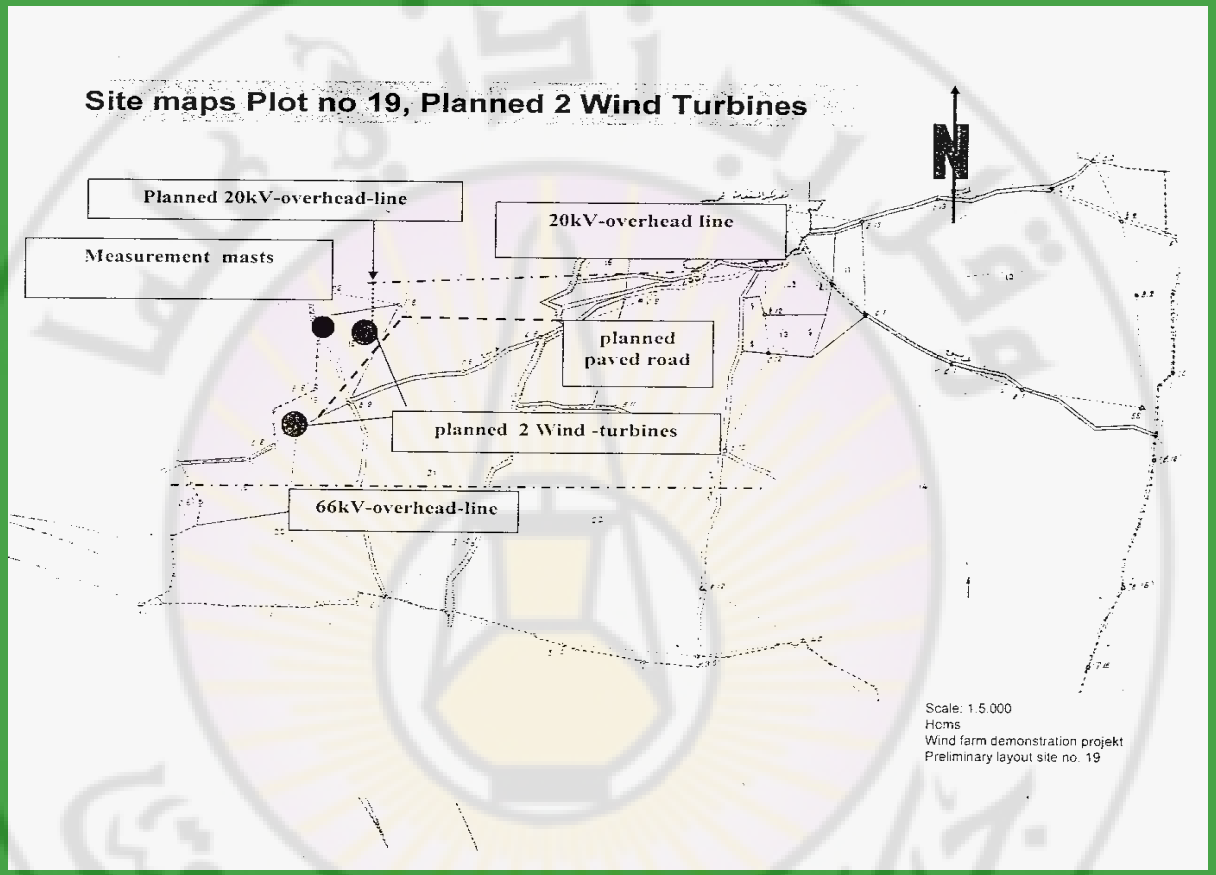
Site	Location		Alt.	Site	Location		Alt.
	N	E			N	E	
Palmyra east	34° 34,582	38° 18,993	410	Msherfeh - Jubb al Jarra			
Palmyra west	34° 33,697	38° 13,998	430	Atheria	35° 21. 91	37° 47.19	
Tiyas	34° 32,344	37° 42,757	450	Rusafa	35° 36. 56	38° 26.15	360
Fruqlus				Thawra	35° 51.00	38° 33.15	330
Cheroubin	33° 43,615	36° 21,962	1900	Halabiya	35° 42.43	39° 37,80	300
Rankous				Tayem	35° 13.85	40° 02,95	314
Phosphate mine				As Sukhna	34° 55.97	39° 19.41	300

الجدول ٦-٦: نتائج قياسات وسطي سرعة الرياح في محطة المراقبة الأولى - سنديانة ـ١
من نيسان إلى تشرين ثاني ٢٠٠٤

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

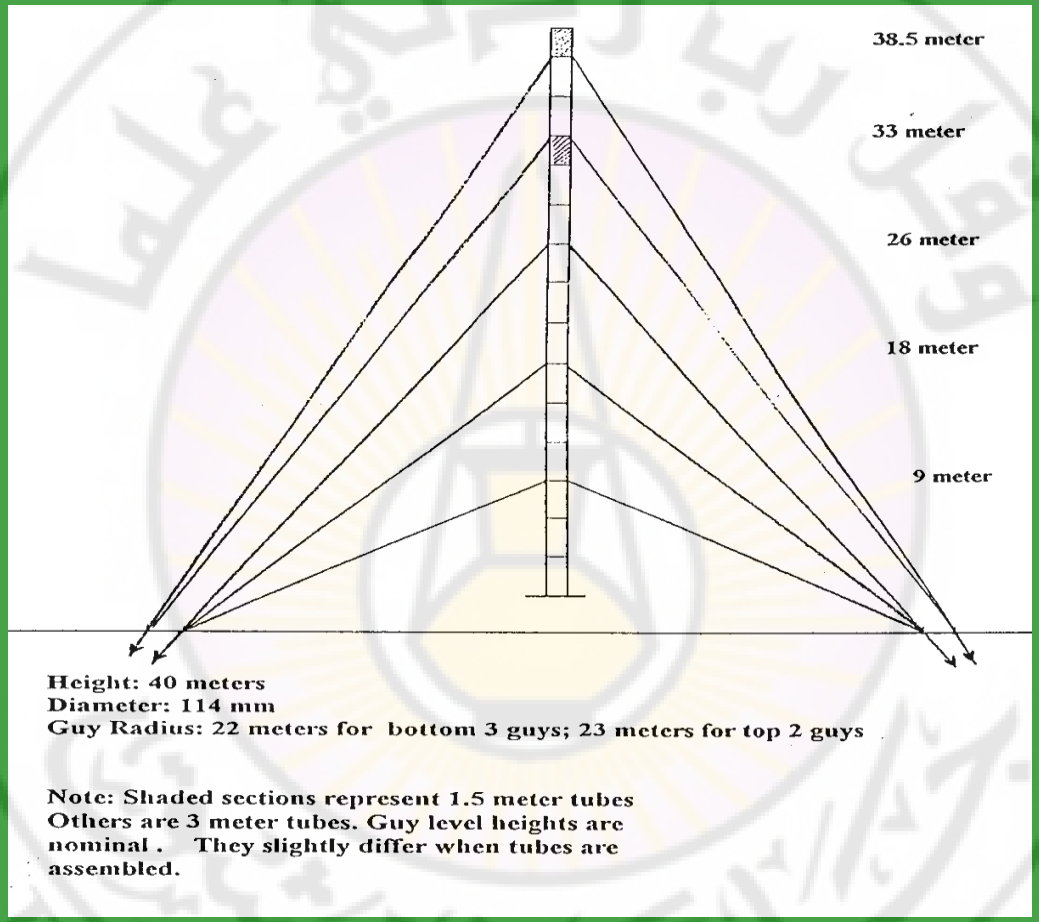
الجدول ٦-٧ : نتائج قياسات وسطي سرعة الرياح في محطة المراقبة الثانية – سنديانة ٢
من نيسان إلى تشرين ثاني ٢٠٠٤

DAY	APRIL	MAY	JUNE	JULY	AUGUST	SEP.	OCT.	NOV	DEC	Jan-05
1		6.16	12.48	6.89	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	4.63
3		6.48	8.12	7.85	13.80	8.21	8.08	4.77	6.26	3.44
4		10.31	6.92	10.52	11.72	8.80	4.72	3.54	6.59	2.71
5		7.40	5.22	6.90	10.39	10.97	4.30	6.98	3.72	3.10
6		5.24	6.05	5.17	10.95	8.24	8.00	7.60	5.43	2.56
7		9.38	5.22	6.56	10.12	5.07	5.77	6.28	5.70	2.44
8		8.81	10.05	8.64	11.49	4.33	5.66	5.68	7.36	6.91
9		7.24	11.17	11.77	11.98	10.29	6.01	4.14	4.56	6.90
10		11.50	8.91	11.79	12.16	12.58	3.48	5.19	3.01	6.35
11		14.15	6.02	8.85	12.77	7.60	6.73	6.54	5.36	3.95
12		11.44	7.18	8.64	9.73	7.59	7.02	6.49	6.84	3.61
13		8.45	6.69	9.61	6.81	6.87	4.48	5.92	3.25	4.68
14		8.42	8.63	6.20	7.18	6.02	4.37	5.56	3.52	7.48
15		16.25	10.62	8.16	8.54	5.18	5.68	5.65	5.03	7.20
16		11.44	8.60	7.83	9.10	8.12	4.43	5.88	5.05	6.35
17		9.69	9.93	8.11	10.45	8.66	4.80	6.42	3.68	6.40
18		6.20	7.77	8.95	12.79	4.93	5.44	3.42	10.29	3.66
19		5.75	7.14	8.70	11.65	5.06	5.55	2.70	9.66	3.30
20		6.84	11.73	8.49	8.43	5.37	5.70	2.75	8.30	4.25
21		5.63	11.62	9.69	7.94	5.15	7.93	4.44	6.15	9.99
22		7.54	11.70	12.43	7.74	6.04	3.68	8.68	5.15	5.07
23		8.08	10.62	10.79	7.77	4.94	5.13	6.29	4.04	7.68
24		7.57	10.92	8.10	7.71	5.52	7.46	3.07	5.56	12.48
25		6.78	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	5.49	11.71	9.01	10.42	6.81	4.78	7.83	2.77	5.07	
29	6.99	10.53	7.44	9.96	9.35	4.33	6.70	6.80	8.35	
30	8.37	5.95	6.04	9.27	9.41	5.22	7.50	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	6.18	5.44	5.63	5.63

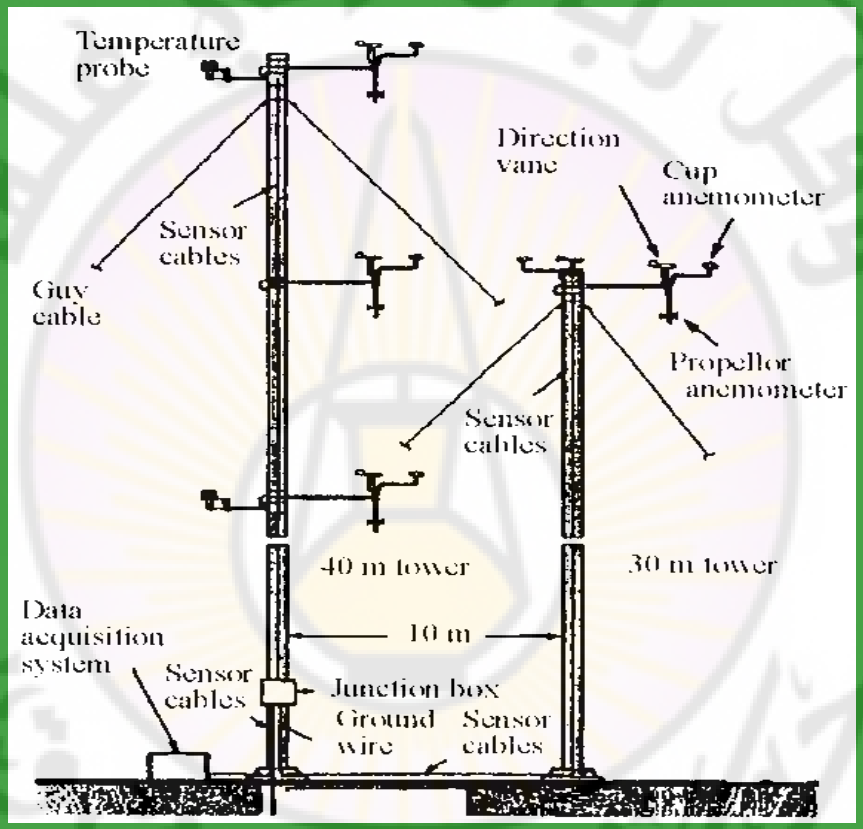


الشكل ٦-١٥ : مخطط البنية التحتية لمشروع إنشاء عنفتين ريحيتين في موقع السنديانة في محافظة حمص.

Damascus University

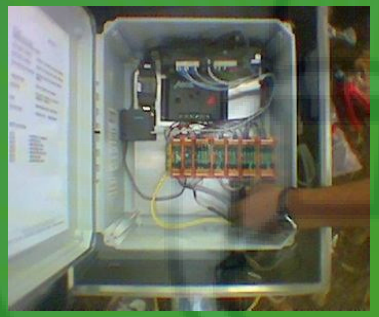


الشكل ٦-١٦: مواصفات برج محطة مراقبة سرعة الرياح.



الشكل ٦-١٧ : أبراج مراقبة سرعة واتجاه الرياح

٦-١٣ وصف لمحطة رصد أو مراقبة الرياح:

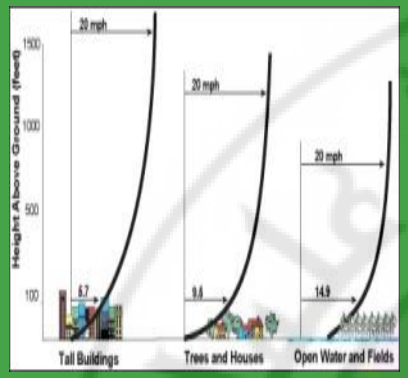


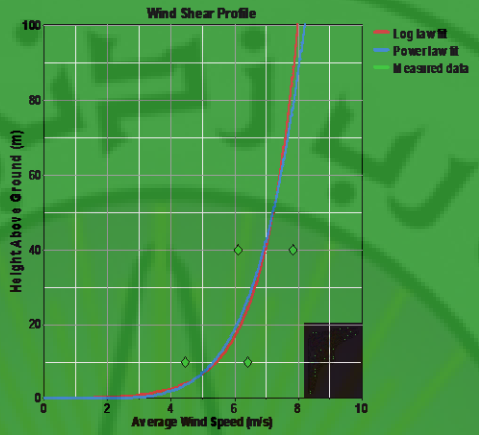
الشكل ٦-١٨: تجهيزات محطة مراقبة سرعة واتجاه الرياح.

الجدول ٦-٨: نموذج قياسات سرعة الرياح كل عشر دقائق في محطة المراقبة

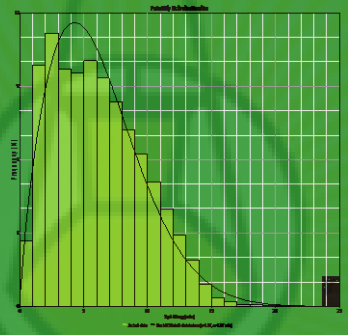
Date	Time	S40avg	Dir40	Dir40SD	S40max	S40SD	S10avg	S10max	S10SD	T °C	P mbar
26/10/2004	15:10	1.49	89.6	45.2	2.53	0.536	1.62	3.39	0.707	30.01	912.1
26/10/2004	15:20	1.18	115.4	53.4	2.89	0.437	1.59	3.63	0.583	29.84	912.1
26/10/2004	15:30	2.91	46.7	37.2	5.89	1.834	2.85	5.35	1.475	28.73	911.7
26/10/2004	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	27.30	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	26.85	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	10.6	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

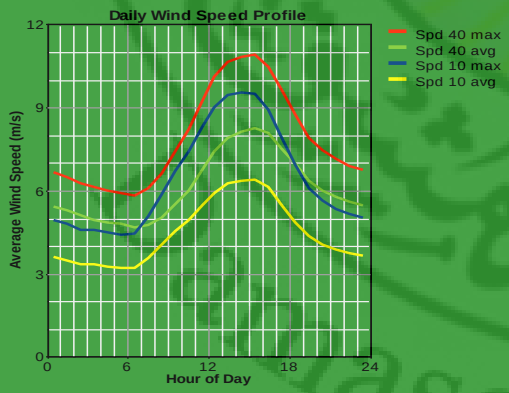
الشكل ٦-١٩: طريقة تركيب محطات مراقبة التي نفذت في سورية [

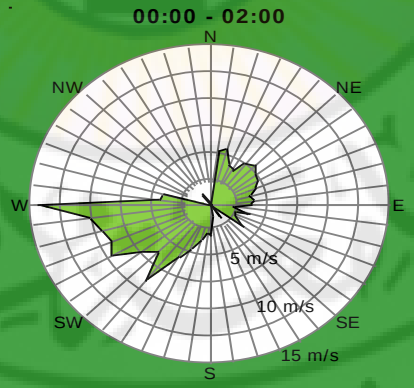




الشكل ٦-٢٠ : نتائج تحليل بيانات
محطة رصد الرياح في نبع الفوار







الجدول ٦-٩: نتائج قياسات سرعة الرياح عند ارتفاع ١٠ متر و ٤٠ متر

	QunaitDatProperty2	
Variable	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/m2)	264	106
Mean energy content (kWh/m2/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

٦-١٤ نتائج رصد محطة السنديانة في محافظة حمص:

الجدول ٦-١٠: نموذج للبيانات التي تم تسجيلها من محطة رصد سنديانة ١

S 10 max	Dire	Temp	Mbar	Date	Time	S40avg	S40sd	S40max	S10avg	S10sd
19/04/2004	13.50	11.30	1.300	13.30	10.20	1.400	12.90	252.4	18.90	938.5
19/04/2004	14:00	11.10	1.200	13.80	10.20	1.100	12.20	251.1	19.10	938.5
19/04/2004	14:10	10.20	1.100	12.40	9.20	1.300	11.90	258.5	18.60	939.0
19/04/2004	14:20	9.60	1.000	11.60	8.50	1.300	10.90	254.3	18.30	939.0
19/04/2004	14:30	10.70	1.200	13.50	9.50	1.40	12.80	251.4	18.30	939.0
19/04/2004	14:40	12.10	1.200	14.50	10.80	1.300	13.90	255.5	18.30	938.5
19/04/2004	14:50	12.70	1.300	15.10	11.50	1.600	15.20	254.6	18.20	939.0
19/04/2004	15:00	13.40	1.000	15.10	11.90	1.400	14.30	255.6	18.00	939.0
19/04/2004	15:10	13.40	1.200	16.90	11.60	1.400	14.70	251.0	17.90	939.0
19/04/2004	15:20	14.10	1.100	16.00	12.40	1.500	15.30	257.0	17.50	939.0
19/04/2004	15:30	13.90	1.300	16.00	12.10	1.500	14.70	250.9	17.40	939.0
19/04/2004	15:40	13.60	1.400	16.80	12.10	1.500	15.10	255.5	17.50	939.0

ويتم حساب الانحراف الكلي بين السرعات الآنية 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:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n}\left(\overline{v_t} - \overline{v}\right)^2}{n-1}} \qquad (17\text{-}6)$$

$\overline{v_t}$ **is the wind speed in time step**

$\overline{v}$ **is the average wind energy speed**

n is the number of time steps

الجدول ٦-١١: نتائج الحسابات وعدد التسجيلات لكثافة طاقة الرياح والانحراف المعياري.

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

محاضرات د. كمال ناجي

شعبة الطاقات المتجددة

العلاقة بين الاستطاعة والسرعة في العنفات الريحية:

القدرة الحركية للرياح E (Kinetic Energy):

$$E = ١/٢\ m\ .V^{٢} \qquad Joules$$

حيث m كتلة تدفق الهواء

الاستطاعة الناتجة عن حركة الرياح في الثانية P:

$$P = ١/٢\ .\ (m/s)\ .V^{٢}$$

حيث:

m/s – كتلة تدفق الرياح في الثانية (mass flow rate per second).

P – الاستطاعة الميكانيكية لحركة الهواء

كتلة تدفق الهواء $m = \rho\ .A\ .v \quad kg/s$

حيث:

ρ –كثافة الهواء $kg/m^{٣}$

A – المساحة الممسوحة من الشفرات $m^{٢}$ (متر مربع)

V – سرعة الهواء m/s

التدفق الحجمي للهواء = A .V

ومنه نستنتج الاستطاعة المقدمة إلى العنفة الريحية

$$P = ١/٢\ (\rho\ .\ A\ .V)\ .V^{٢}$$

$$P = ١/٢\ \rho\ .A.V^{٣} \qquad Watts$$

يبين الشكل ١ مكونات العنفة الريحية ذات المحور الأفقي.

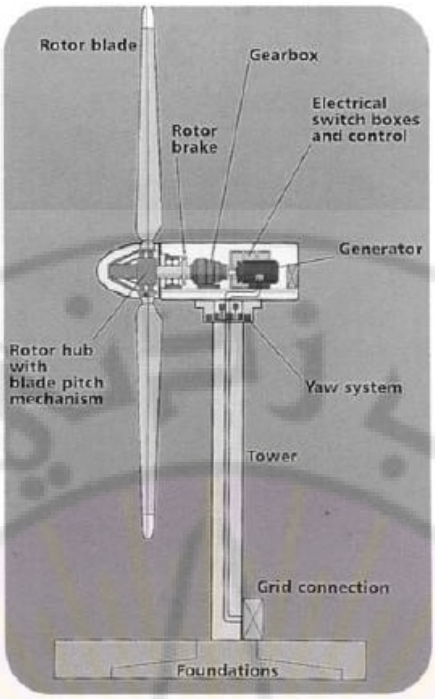


FIGURE ١
Horizontal axis wind turbine showing major components. (Courtesy: Energy Technology Support Unit, DTI, U.K.. With permission.)

بينما يبين الشكل ٢ منظر عام لعنفة داريوس.

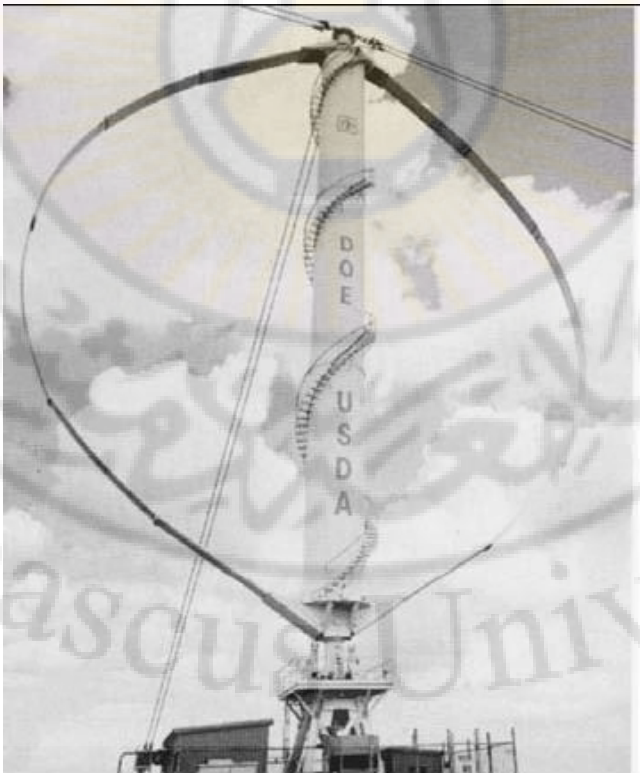


FIGURE ٢
Vertical axis ٣٤-meter diameter wind turbine built and tested by DOE/Sandia National Laboratory during ١٩٩٤ in Bushland, Texas.

وبمقارنة الاستطاعة المتاحة في موقعين في شروط الاستطاعة الريحية الخاصة بالموقع (specific wind power) والتي تقاس بالوات / متر مربع P_s للمساحة التي تدور ضمنها شفرات الدوار، مع الوضع بالحسبان كثافة الهواء:

$$P_s = ١/٢ . \rho . V^{٣} \qquad w/m^{٢}$$

وتساوي P_s الاستطاعة المقدمة إلى العنفة والتي تسمى أيضاً استطاعة الرفع للرياح (the power of upstream wind)

ولكنها لا تساوي الاستطاعة المستخلصة من العنفة حيث تصبح السرعة أخفض وتسمى استطاعة خفض الرياح (the power of downstream Wind)

الاستطاعة المستخلصة من الرياح Power Extracted from the Wind :

وهي تنتج عن الفرق بين upstream wind و downstream Wind حسب العلاقة التالية:

$$P_. = ١/٢ \ (m/s) . [V^{٢} - V_.^{٢}]$$

حيث:

$P_.$ – الاستطاعة الميكانيكية المستخلصة من الدوار أي الاستطاعة الناتجة على الخرج.

V – سرعة الرياح المقدمة على دخل الدوار أو استطاعة الرفع للرياح (upstream wind velocity)

$V_.$ – سرعة الرياح المنخفضة الناتجة على خرج العنفة (downstream wind velocity of the exit of the rotor blades)

مع إهمال العوامل الديناميكية لحركة الشفرات يمكننا كتابة علاقة معدل تدفق الكتلة الهوائية ذات الكثافة المحددة استنادا إلى وسطي السرعة:

$$V = \rho.A. \frac{v + v_0}{2}$$

وبالتالي فإن الاستطاعة الميكانيكية الناتجة والتي تقوم بتحريك المولد الكهربائي تساوي:

$$P_. = ١/٢ \ [\rho.A. \frac{v + v_0}{2}].(v^{٢} - v_.^{٢})$$

وبالتحويل الجبري تحصل على العلاقة التالية:

$$P_. = ١/٢ \ \rho .A. V^{٣} . \frac{\left(1+\frac{v_0}{v}\right)\left[1-\left(\frac{v_0}{v}\right)^2\right]}{2}$$

وتعتبر الاستطاعة المستخلصة من شفرات العنفة الاستطاعة الناتجة عن احتكاك الاستطاعة المقدمة إلى الدوار وتساوي:

$$P_. = ١/٢ \ \rho.A. V^{٣} .Cp$$

حيث :

$$Cp = \frac{\left(1+\frac{v_0}{v}\right)\left[1-\left(\frac{v_0}{v}\right)^2\right]}{2}$$

إذن Cp يعبر عن احتكاك استطاعة الرياح المقدمة أو استطاعة رفع الرياح (upstream wind power) ويسمى معامل الاستطاعة للدوار أو مردود العنفة.

ويتعلق المردود كما اسلفنا بالعلاقة بين v و v. وتساوي قيمته المثالية٠,٥٩ انظر الشكل ٣

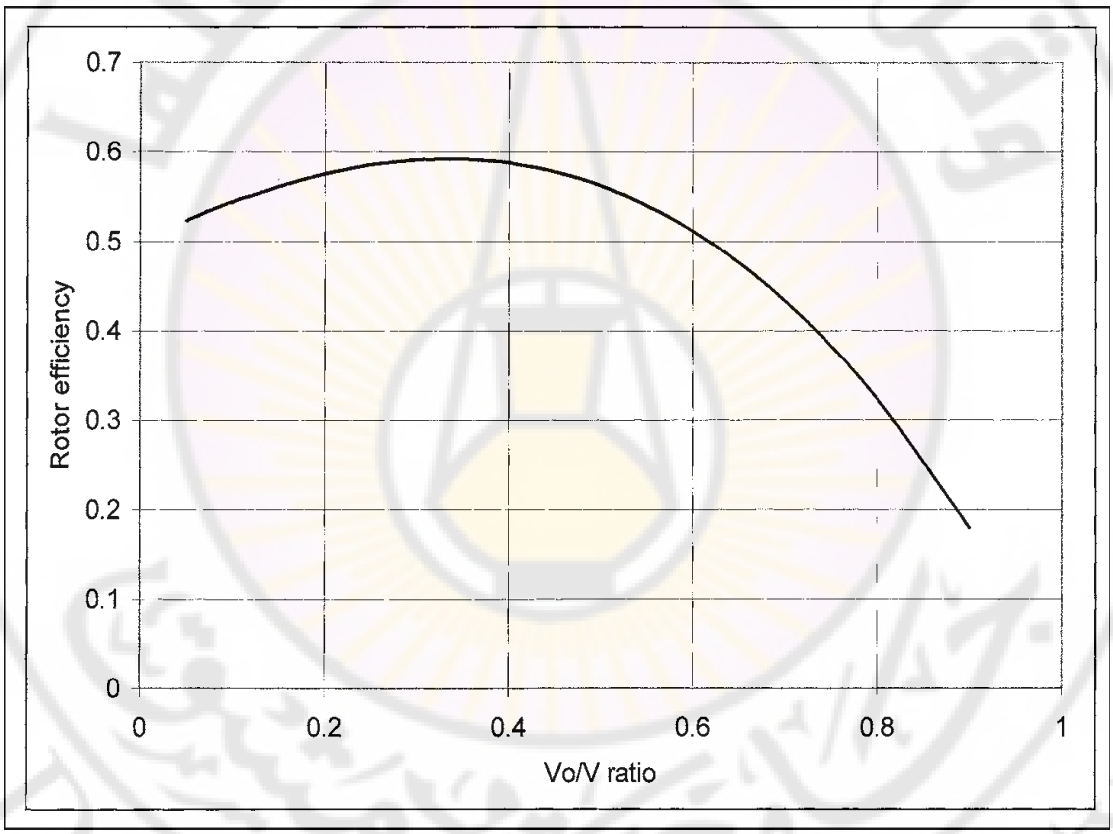


FIGURE ٣ Rotor efficiency versus Vo/V ratio has single maximum. Rotor efficiency is the fraction of available wind power extracted by the rotor and fed to the electrical generator.

إذن تساوي الاستطاعة المثالية المستخلصة من دوار العنفة الريحية:

$$P_{max} = ١/٢\ \rho .A. V^{٣}\ .٠,٥٩$$

وتختلف قيمة Cp حسب نوع العنفة وعدد شفراتها:

فعلى سبيل المثال عنفة ذات محور أفقي بشفرتين Cp تساوي ٠,٥ وبالنسبة لعنفة ضخ المياه ٠,٢-٠,٣ (American multi- blade) والتي نشاهدها في منطقة القلمون.

يبين الشكل ٤ مردود مختلف أنواع العنفات الريحية

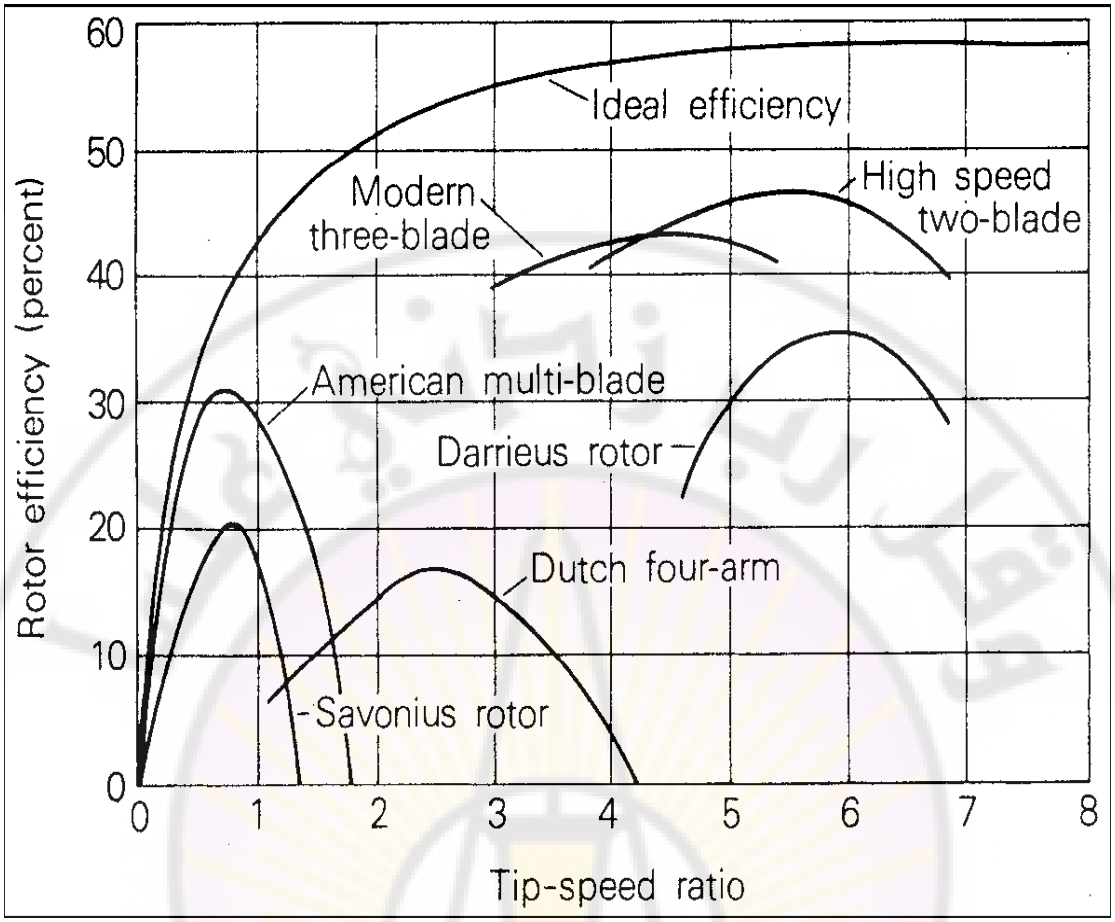


FIGURE ٤ Rotor efficiency versus tip speed ratio for rotors with different numbers of blades. Two-blade rotors have the highest efficiency. (Source: Eldridge, F.R., Wind Machines, Energy Research andDevelopment Administration, Washington, DC, Report AER-٧٥-١٢٩٣٧, p. ٥٥, ١٩٧٥.)

إذن مردود الدوار عبارة عن احتكاك الاستطاعة المتوفرة والمستخلصة من الدوار والتي تغذي المولد الكهربائي حيث تساوي الاستطاعة العظمى:

من المساحة الممسوحة $P_{max} = ١/٤ \cdot \rho \cdot V^{٣}$ $W/m^{٢}$

وتساوي المساحة الممسوحة للدوار في العنفة ذات المحور الأفقي: $\mathbf{A = \pi / ٤\ D^{٢}}$

بالنسبة لعنفة داريوس العمودية فإن تحديد المساحة الممسوحة يكون معقداً نوعاً ما. وباعتبار سطح شفرات هذه العنفة على شكل قطع مكافئ (Parabola) يمكن حساب المساحة الممسوحة فيها حسب العلاقة التالية:

$$A = ٢/٣\ W.H$$

حيث:

W - العرض الأعظمي عند مركزها

(maximum rotor width at the center of the blade)

H – ارتفاع الدوار (الشفرة)

(Height of the rotor (blade))

كثافة الهواء :

وتتعلق بضغط وحرارة الهواء $\rho = \frac{p}{R.T}$

P – ضغط الهواء

T – درجة الحرارة والتي تتعلق بالارتفاع.

R – ثابتة الغاز (الهواء) استناداً إلى قانون الغاز

وتساوي كثافة الهواء عند سطح البحر . ρ (واحد ضغط جوي)

One atmospheric pressure أو ١٤,٧ spi و ٦٠٥ F is ١,٢٢٥ kg/m^3

وعلى ارتفاعات حتى ٦٠٠٠ m أو ٢٠٠٠٠ قدم تحسب الكثافة حسب العلاقة التالية:

$$P = \rho . .e^{-\left[\frac{0.297Hm}{3048}\right]}$$

حيث Hm ارتفاع الموقع عن سطح البحر.

وتكتب العلاقة عادة بطريقة مبسطة وتساوي:

$$P = \rho . - ١,١٩٤ . ١٠^{-٤} \ Hm$$

مثلاً: الكثافة على ارتفاع ٢٠٠٠ متر تساوي ٠,٩٨٦ kg/m^3

وهي أقل من الكثافة عند سطح البحر ١,٢٢٥ kg/m^3 بحوالي ٢٠% أيضاً تختلف الحرارة باختلاف الارتفاع حسب العلاقة:

$$T = ١٥,٥ - \frac{19.83Hm}{3048} \ C^\circ$$

طريقة توزيع ويبول لاحتمالية تغيرات الرياح في الموقع:

Weibull probability Distribution

تتعلق هذه الطريقة بالتابع الذي يرمز له h والذي يعتمد على محددين (two parameters) محدد الشكل ويرمز له k ومحدد القياس ويرمز له c .

تعطى احتمالية تغيرات سرعة الرياح V خلال أي فترة من الزمن حسب العلاقة التالية:

$$h(v) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}}$$

(٤-١٩)

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:

$$h = \frac{fraction\ of\ time\ wind\ speed\ is\ between\ v\ and\ (v+\Delta v)}{\Delta v}$$

(٤-٢٠)

حيث كما ذكرنا أعلاه تتغير υ في المجال من صفر إلى لانهاية.

$$\int_0^{\infty} h \cdot dv = 1$$

(٤-٢١)

إذا اخترنا الفترة الزمنية عام واحد وقسمناه إلى ساعات فنحصل على:

$$h = \frac{number\ of\ hours\ the\ wind\ is\ between\ v\ and\ (v+\Delta v)}{\Delta v}$$

(٤-٢٢)

الوحدة h تعبر عن عدد الساعات في السنة من أجل مقياس سرعة متر/ ثانية وبتكامل العلاقة ٤-٢١ تصبح h مساوية ٨٧٦٠ ساعة (وهي عدد ساعات العام). ويبين الشكل (٤,٧) رسماً بيانياً للزمن مقابل السرعة من أجل ثلاثة قيم مختلفة لمحدد الشكل k ،حيث يكون المنحني

مزاحاً إلى اليسار من أجل k=١ والذي تكون فيه غالبية الأيام ذات رياح ساكنة V=٠ . أما المنحني الأيمن من أجل k=٣ والذي يبدو على شكل الجرس وتكون فيه الرياح عالية السرعة ذات عدد متساوي من الأيام التي تهب فيها الرياح منخفضة السرعة.

أما المنحني الأوسط ذو معامل الشكل k=٢ 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 بينما تكون الأيام ذات الرياح العالية أقل.

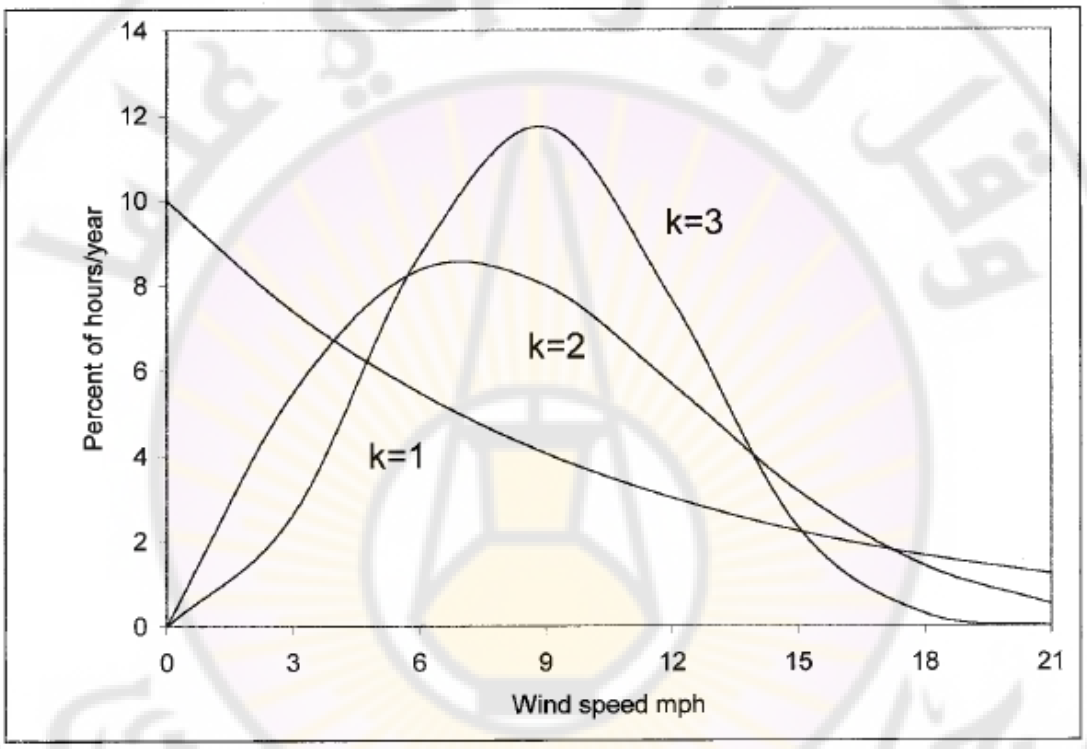


FIGURE ٤-٧

Weibull probability distribution function with scale parameter c=١٠ and shape parameters k = ١, ٢ and ٣.

في حالة الرياح يستخدم عادةً المنحني ذو معامل الشكل k=٢ وهو ما سنعتمده. يبين الشكل ٨-٤ منحني التوزيع من أجل k=٢ لعدة قيم لمحدد القياس C والذي يتراوح بين ٨- ١٦ ميل/ ساعة (حيث يساوي واحد ميل/ساعة ٠,٤٤٦ متر /ثانية). من 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=٢ ويعرف باسم منحني توزيع رايلي (Rayleigh distribution) .

يمكن مقارنة معطيات القياس بسهولة استناداً إلى توزيع رايلي كما يبين الشكل ٩-٤.

إذن توزيع رايلي يعتمد على محدد واحد فقط وهو محدد القياس C (Scale parameter C) .

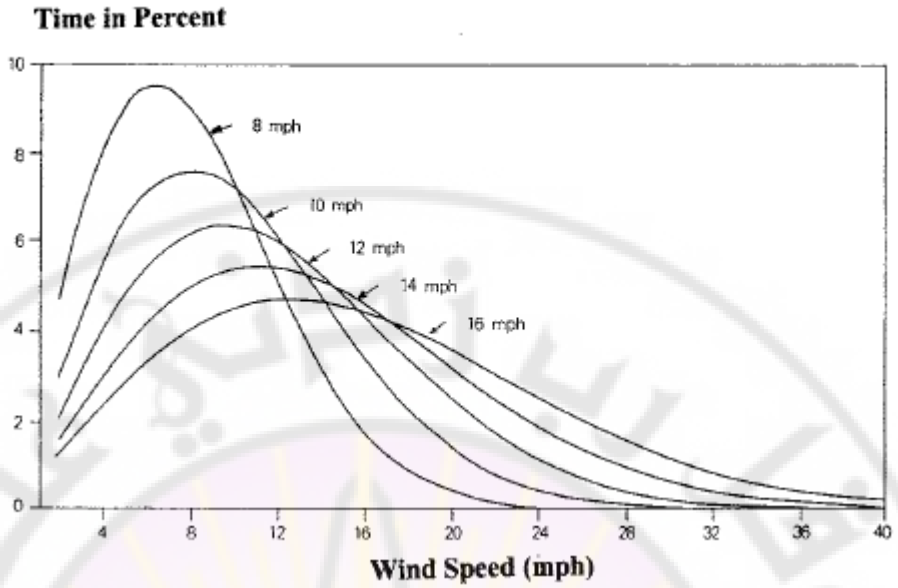


FIGURE ٤-٨

Weibull probability distribution with shape parameter k = ٢ and the scale parameters ranging from ٨ to ١٦ miles per hour (mph).

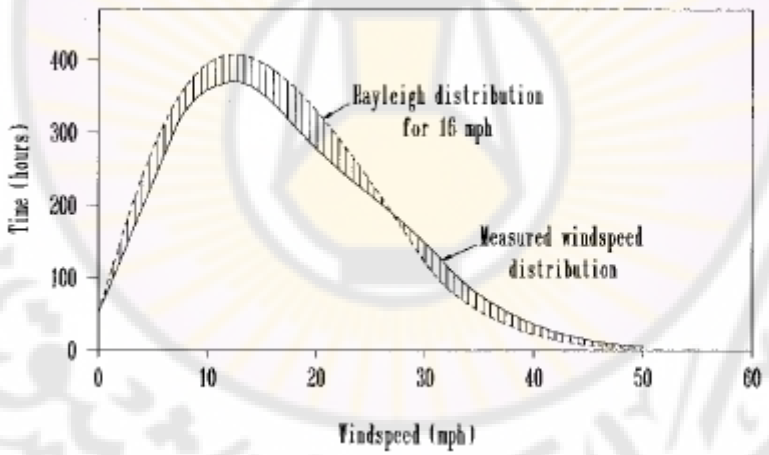


FIGURE ٤-٩

Rayleigh distribution of hours/year compared with measured wind-speed distribution at St. Ann's Head, England.

استناداً إلى ما ذكر أعلاه يمكننا تلخيص توزيع ويبول استناداً إلى معامل الشكل K على النحو التالي.

K=١ يعبر عن توزيع متمدد (exponential distribution)

حيث:

$$h = \lambda \cdot e^{-\lambda V}$$

حيث:

$$\lambda = 1/c$$

K=٢ يعبر عن توزيع رايلي

حيث:

$$h = 2\lambda^2 \cdot V \cdot e^{-(\lambda V)^2}$$

K=٣ يعبر عن منحني التوزيع المقارب لشكل الجرس

بما أن معظم المواقع تمتلك محدد قياس السرعة في مجال من ١٠ إلى ٢٠ ميل / ساعة (حوالي ٥ إلى ١٠ متر/ ثانية) ومعامل الشكل الذي يتراوح بين ١,٥ إلى ٢,٥ فإن دراستنا ستنحصر على هذين المجالين للمحددين C و k .

يبين الشكل ١٠-٤ عدد الساعات التي تعبر فيها الرياح على العنفات ذات المحور العمودي والعنفات ذات المحور الأفقي في الموقع من أجل عدة قيم للمحدد C=١٠, C=١٥ , C=٢٠ ميل /ساعة ومحدد معامل الشكل ذو القيم k=١,٥ , k=٢ , k=٣ .

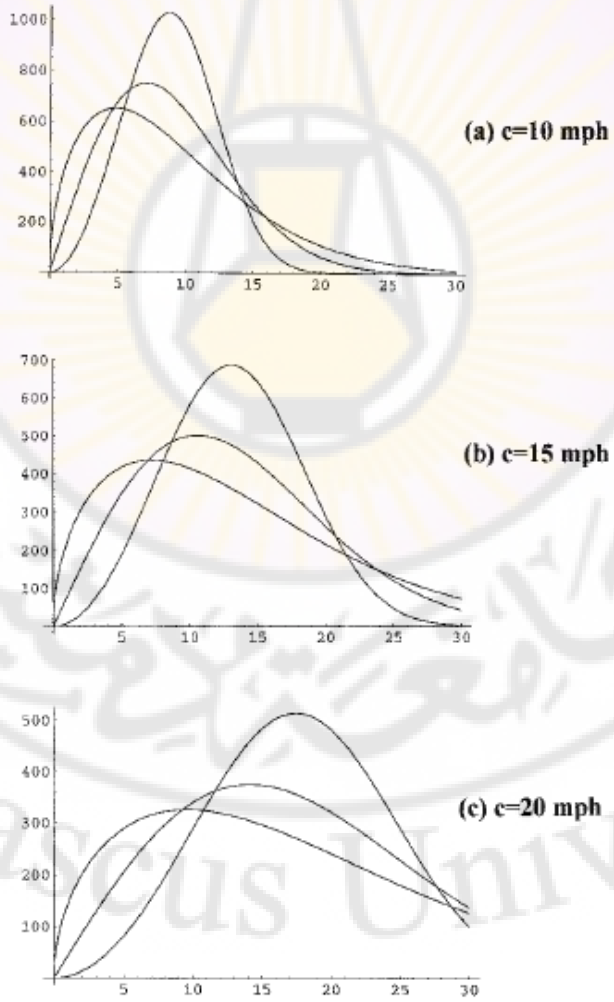


FIGURE ٤-١٠

Weibull distributions of hours/year with three different shape parameters k = ١,٥, ٢, and ٣.

إن عدد الساعات في السنة لكل من السرعات $V+\Delta V$ يبينها الشكل ١١-٤ بشكل ثلاثي الأبعاد للمنحنيات k, V, h من أجل تغير السرعة في المجال من ١٠-٢٠ ميل/ساعة. و k من ١إلى ٣.

تبين المنحنيات في الشكل ١١-٤ أثر المحدد k في إزاحة المنحنيات من شكل الجرس على الجهة الأمامية من أجل k=٢ إلى ما يسمى منحني رايلي. وتظهرالأجزاء المسطحة عندما تنقص قيمة محدد الشكل k من ٣ إلى ١,٥. ونلاحظ أيضاً زيادة قيم المحدد C حيث يبن منحني التوزيع زيادة قيم السرعة.

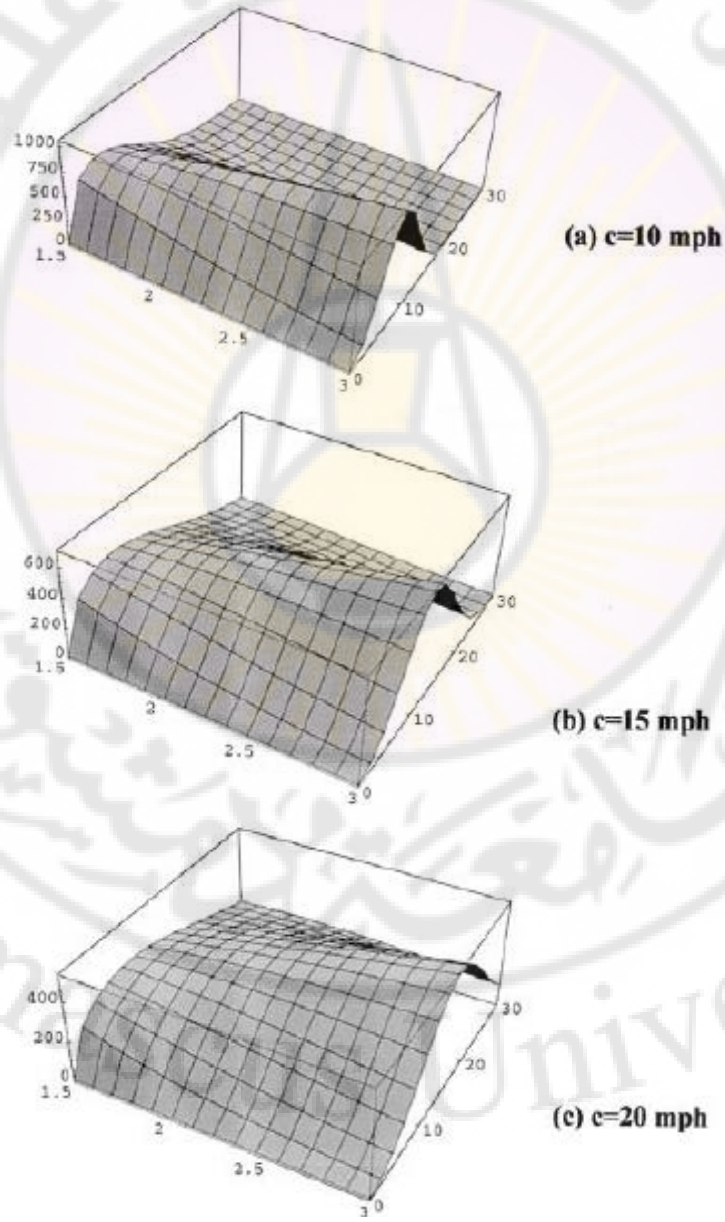


FIGURE ١١-٤
Three-dimensional h-v-k plots with c ranging from ١٠ to ٢٠ mph and k ranging from ١,٥ to ٣,٠.

السرعة الاسمية للرياح:

تحدد السرعة الاسمية من خلال منحني V,h وتكامل تغيرات السرعة من الصفر إلى لا نهاية وبعد تقسيمها على مجموع الساعات خلال عام كامل أي ٨٧٦٠ ساعة. إذن فإن السرعة الاسمية في العام عبارة عن معدل السرعة حسب مايلي:

$$V_{mean} = \frac{1}{8760}\int_0^{\infty} h \cdot v \cdot dv$$

٤-٢٤

من أجل قيم k,C للمجال المتواجد في معظم المواقع يمكن تقريب التكامل أعلاه إلى ما يسمى تابع جاما (Gamma Function) .

$$V_{mean} = c\sqrt{\left(1+\frac{1}{k}\right)}$$

٤-٢٥

من أجل توزيع رايلي مع قيمة المحدد k=٢ يصبح تابع جاما مقارباً للعلاقة التالية:

$$V_{mean} = 0.90 \cdot c$$

٤-٢٦

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 $C=V_{mean}/٠,٩$. أما محدد الشكل فهو بالطبع يساوي k=٢ في توزيع رايلي. وعندها يعبر توزيع رايلي عن السرعة الاسمية وفقاً للعلاقة التالية:

$$h(v) = \frac{2v}{c^2}e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} = \frac{2v}{\left(V_{mean}\right)^2}e^{-\left(\frac{v}{V_{mean}}\right)^2}$$

٤-٢٧

الجذر التكعيبي للسرعة الاسمية Root Mean Speed cubic (rmc):

كما أسلفنا فإن الاستطاعة تتناسب مع مكعب السرعة والقدرة الناتجة خلال عام هي تكامل $(h.v^3.dv)$. وبالتالي فإن الجذر التكعيبي للسرعة الاسمية (rmc)يكون مشابهاً لقيم ما يسمى الجذر التربيعي للسرعة الاسمية (rms) root mean speed square ويحسب في الدارات الكهربائية للتيار المتناوب حسب العلاقة التالية:

$$V_{rmc} = \sqrt[3]{\frac{1}{8760}\int_0^{\infty} h \cdot v^3 \cdot dv}$$

٤-٢٨

إذن فإن الجذر التكعيبي للسرعة الاسمية rmc مفيد في التقدير السريع للاستطاعة المتاحة من الرياح في الموقع. وباستخدام $\mathbf{V_{rmc}}$ في العلاقة ١٢-٤ نحصل على معدل الاستطاعة حسب العلاقة التالية:

$$P_{rmc} = \frac{1}{4}\rho \cdot V_{rmc}{}^{3} \text{ watts/m}^2 \qquad ٤-٢٩$$

وبضرب قيمة $\mathbf{P_{rmc}}$ بعدد الساعات الكلي في السنة تعطينا القدرة المتاحة التي يمكن إنتاجها في الموقع.

يبين الجدول ١-٤ 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

Site	Annual mean wind speed Meters/second	Annual average specific power Watts/m²
Culebra, Puerto Rico	6.3	220
Tiana beach, New York	6.3	285
San Gorgonio, California	6.3	365

إن أهمية الجذر التكعيبي للسرعة الاسميةrmc 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 ٦٦% منها في موقع كوليبرا في بورتو ريكو بالرغم من نفس قيم السرعة الاسمية السنوية في هذه المواقع.

عملية المقارنة بين سرعة المود mode (قمة المنحني) والسرعة الاسمية والجذر التكعيبي للسرعة:

يمكن إيجاد ما يسمى سرعة المود من قمة منحني 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 ٠ إلى ∞ وبعد تقسيم قيم هذا المجال على عدد الساعات في العام أي ٨٧٦٠ ساعة وعندها يحسب المعدل السنوي للسرعة حسب العلاقة ٤-٢٤.

يبين الجدول ٢-٤ اثر قيم معامل الشكل k ومعامل السرعة C من أجل ثلاث قيم للسرعة ١٠،١٥،٢٠ 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 /م٢ ، كذلك كثافة الاستطاعة Power Density بالوات أو الكيلو وات/ م٢.

c	k	Mode Speed	Mean Speed	RMC Speed	Pmode W/m²	Pmean W/m²	Prmc W/m²	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

الجدول ٢-٤

توزيع القدرة الناتجة عن الرياح Energy Distribution :

يمكن الحصول على قيمة القدرة الناتجة عن الرياح من المساهمة السنوية لهبوب الرياح وتغيراتها أي V و V+ΔV

$$e = \frac{kWh\ contribution\ in\ the\ year\ by\ the\ wind\ between\ v\ and\ (v+\Delta v)}{\Delta v}$$

٤-٣٠

في الشكل ٤-١٢ يبدو توزيع القدرة المنتجة مشابها لتوزيع رايلي للسرعة فعلى سبيل المثال عندما يملك منحني السرعة قيمة سرعة المود ٥,٥ متر/ثانية والسرعة الاسمية تساوي ٦,٣٥ متر/ثانية فإن أعظم قيمة للقدرة تنتج عندما تكون سرعة الريح مساوية إلى ٩,٤٥ متر/ثانية.

ويتم تصميم العنفات الريحية بحيث تستطيع إنتاج القدرة الكهربائية في أكبر مجال لتغيرات السرعة بما في ذلك فترات هبوب الرياح العالية.

يبين الشكل ٤-١٣ منحنيات توزيع رايلي للسرعة والقدرة المنتجة من أجل قيمة معامل الشكل K=١,٥ ومعامل قياس السرعة C=١٥ ميل/ساعة .و سرعة المود تكون مساوية لـ ١٠,٦ ميل /ساعة والسرعة الاسمية تساوي ١٣,٣ ميل /ساعة والجذر التكعيبي للسرعة rmc يساوي ١٦,٥ ميل /ساعة.

يبين الشكل ٤-١٤ مقارنة بين منحنيات توزيع السرعة والقدرة المنتجة من اجل قيمة k=٢ (أي منحني رايلي) وقيم C تساوي ١٠،١٥،٢٠ ميل /ساعة(كما ذكرنا فكل ميل /ساعة يعادل ٠,٤٤ متر/ثانية).

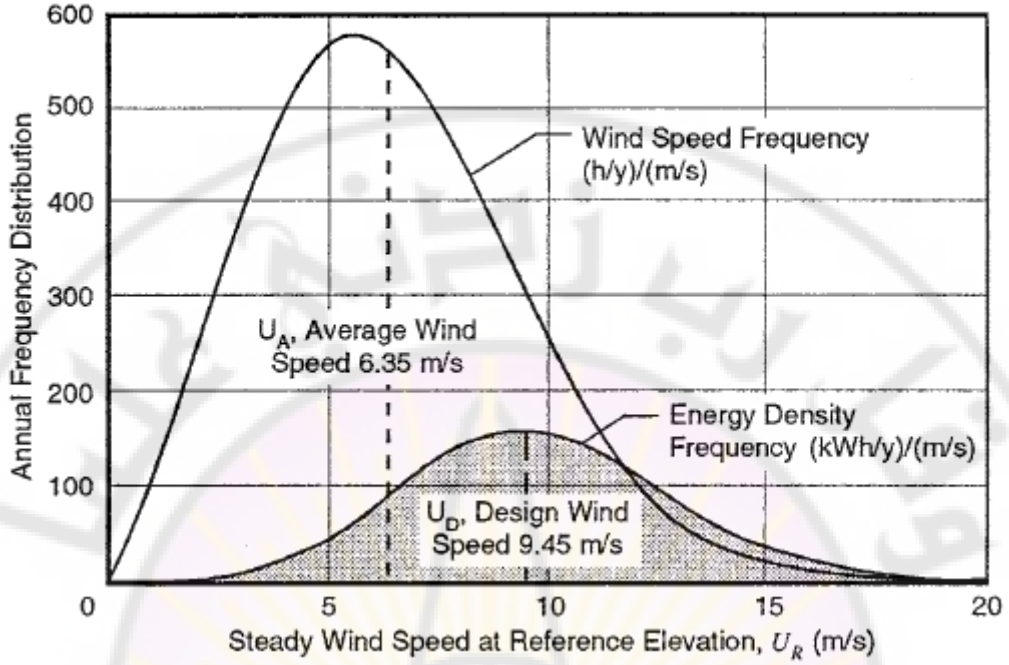


FIGURE ٤-١٢
Rayleigh distributions of hours and energy per year versus wind speed with c = ١٠ and k = ٢.

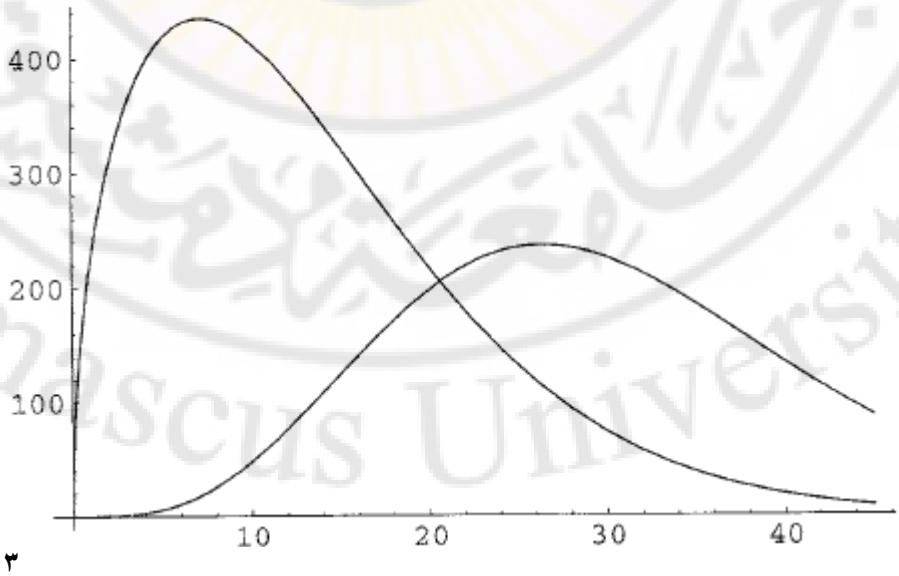


FIGURE ٤-١٣
Rayleigh distributions of hours and energy per year versus wind speed with c = ١٥ and k = ١. ٥

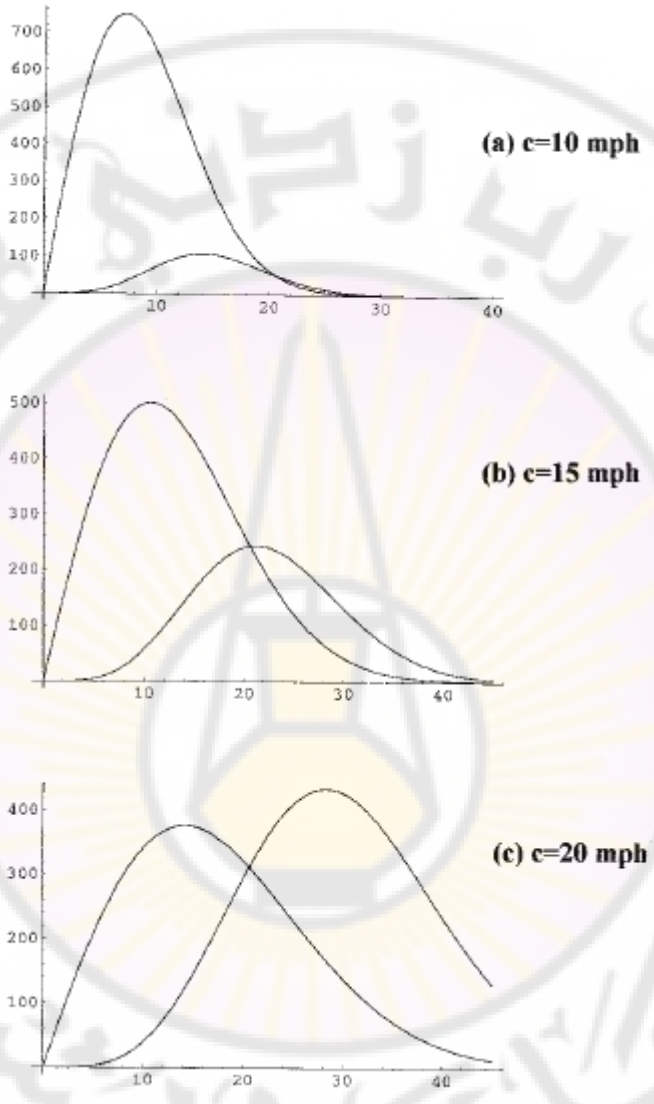


FIGURE ٤-١٤
Rayleigh distributions of hours and energy per year with k = ٢ and c = ١٠, ١٥, and ٢٠ mph.

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 وتقسيمها على ساعات هذه الفترة الزمنية. ويتم الحصول على القراءات اللازمة من خلال تجهيزات القياس لعدة عشرات من السنيين والتي يمكن الحصول عليها أيضاً من المعطيات المناخية. وتؤخذ عادة هذه المعطيات من خلال القياسات الساعية والشهرية والسنوية ويمكن استخدام العلاقة التالية لحساب معدل السرعة والتي يرمز لها Vavg

$$V_{avg} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} V_i$$

٤ -٣١

أما سرعة الجذر التكعيبي المكافئة للقياسات الرقمية فتساوي:

$$V_{rmc} = \sqrt[3]{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} V_i^3}$$

٤-٣٢

والطريقة الأفضل لحساب استطاعة الرياح من خلال تجميع معطيات المعدل السنوي لكثافة الاستطاعة حسب العلاقة التالية:

$$P_{rmc} = \frac{1}{2n}\sum_{i=1}^{n} \rho_i \cdot V_i^3$$

٤-٣٣

حيث:

n – عدد القياسات خلال فترات زمنية محددة وسطياً.

ρ_i – كثافة الهواء kg/m^3

V_i – سرعة الرياح m/s لكل من الفترات الزمنية المقاسة.

أثر الارتفاع على سرعة الرياح:

إن التدرج الريحي wind shear على سطح الموقع يسبب زيادة في سرعة الرياح مع الارتفاع استناداً للعلاقة التالية:

$$V_2 = V_1 \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{\alpha}$$

٤-٣٤

حيث:

V_1 – سرعة الرياح المقاسة على ارتفاع h_1

V_2 – سرعة الرياح المقدرة على ارتفاع h_2

α – معامل الاحتكاك أو خشونة سطح الأرض.

يكون معمل الاحتكاك أقل ما يمكن عند سطح الناعم ويزداد مع ازدياد خشونة التربة كما هو مبين في الشكل ١٥-٤.

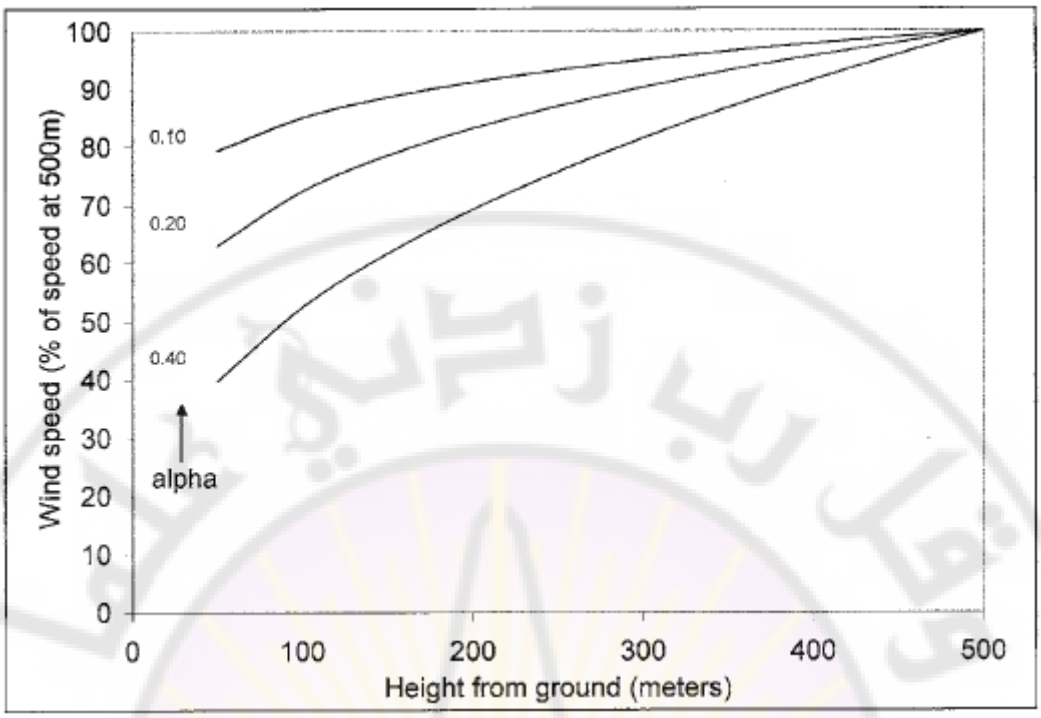


FIGURE ٤-١٥
Wind speeds variation with height over different terrain. Smooth terrain has lower friction,developing a thin layer above.

يبين الجدول ٣–٤ قيم معامل الاحتكاك من أجل مختلف أنواع سطح الموقع.

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

الجدول ٣–٤

وتجدر الإشارة أن سرعة الرياح تزداد حتى ارتفاع ٤٥٠ متر ثم تعود للانخفاض مع زيادة الارتفاع عن السطح. ويمكن أن تصل السرعة على ارتفاع ٤٥٠ متر إلى قيمة أعلى بأربع إلى خمسة أضعاف قيمتها على سطح الموقع.