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

طاقة الرياح /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 السابع
أسس اختيار مواقع العنفات الريحية

محاضرات أ.د.كمال ناجي
شعبة طاقات متجددة

٧-١ الاختيار الأمثل لمواقع العنفات الريحية:

٧-١-١ مقدمة: أنجزت وزارة الكهرباء المخطط العام للطاقة المتجددة بالتعاون مع منظمة الأمم المتحدة للتطور الاجتماعي والاقتصادي UNDP-UNDESA عام ٢٠٠٢، كما أشرنا سابقا، والذي يشمل برنامجاً لإنشاء مزارع ريحية وعنفات ريحية مستقلة باستطاعة ٨٠٠ ميغاوات خلال عشرة سنوات. وبالرغم من توفر أطلس الرياح الذي أصدرته مديرية الأرصاد الجوية، والمعلومات المناخية التي يمكن الحصول عليها من شبكة الانترنيت حول حركة وسرعة الرياح في مختلف مناطق سورية، فإن إنشاء العنفات والمزارع الريحية في المناطق التي تتوفر فيها سرعات رياح مجدية، كما بينتها 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 ١٦ محطة مراقبة لسرعة واتجاه الرياح في عدد من المواقع المختارة في سورية، كما ذكرنا سابقاً. ويعتبر هذا العمل الضروري مسالة 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 ٢٠%. 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 ٥ %، مما يوفر وسيلة عملية سهلة وشاملة في أي موقع من مواقع القطر تسمح بإشادة العنفات الريحية المستقلة والبعيدة عن شبكات الكهرباء من جهة، والتخطيط لإشادة مزارع ريحية لعنفات مربوطة مع الشبكة الكهربائية دون الحاجة للانتظار سنة أو عدة سنوات، كما تسمح باختيار المواقع الأكثر ملاءمة لتركيب محطات مراقبة الرياح الحديثة.

٧-١-٢ أسس إنشاء العنفات الريحية(اختيار الموقع الملائم):

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 الموقع وبناءه-أمان الموقع.

وبالإضافة إلى هذه الأسس فإن إنشاء العنفة الريحية يتطلب الوضع في الحسبان عدة اعتبارات في المجالات التالية:

١- المعلومات المناخية

٢- تقنية نظام تبديل طاقة الرياح(العتاد الصلب) WECS hardware.

٣- اقتصاديات نظام تبديل طاقة الرياح.

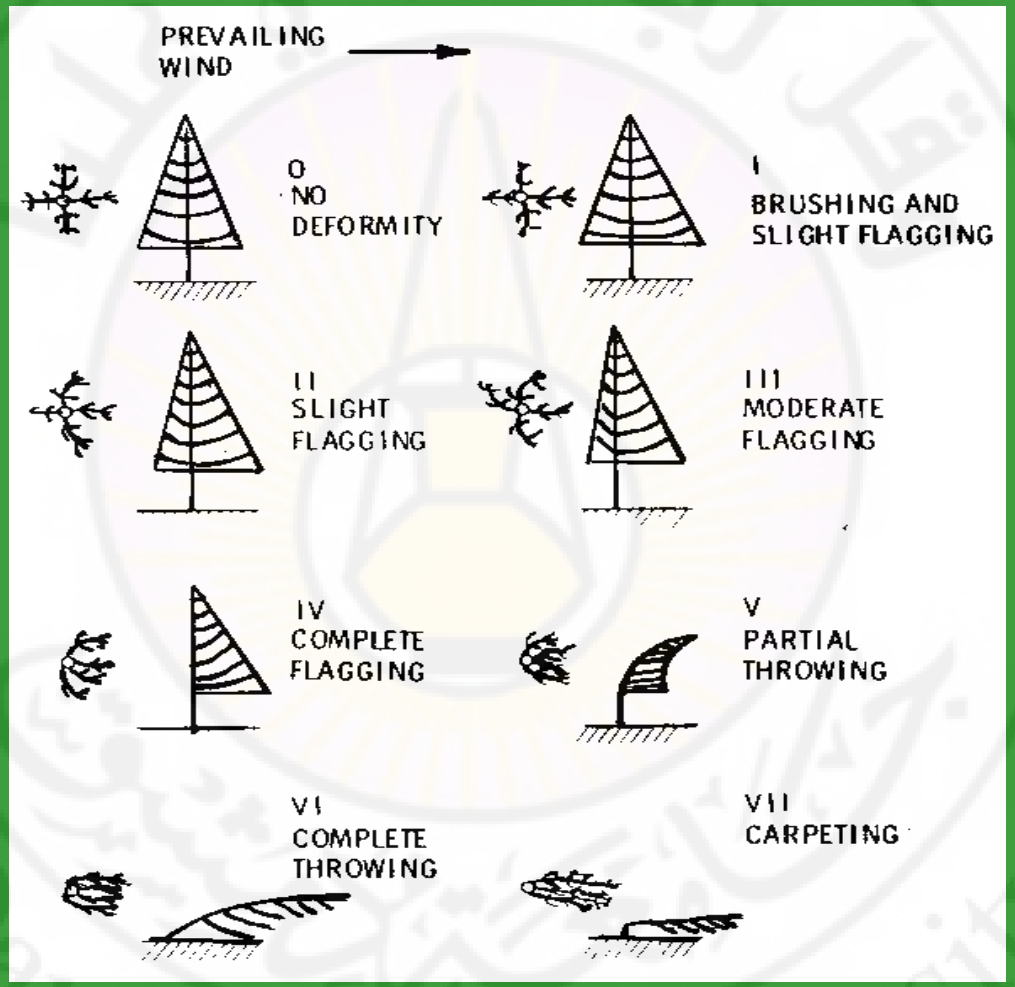
٤- المسائل الفنية والجمالية.

٧-٢ المؤشرات البيولوجية(النباتية) لقياس كمون(Potential) طاقة الرياح.

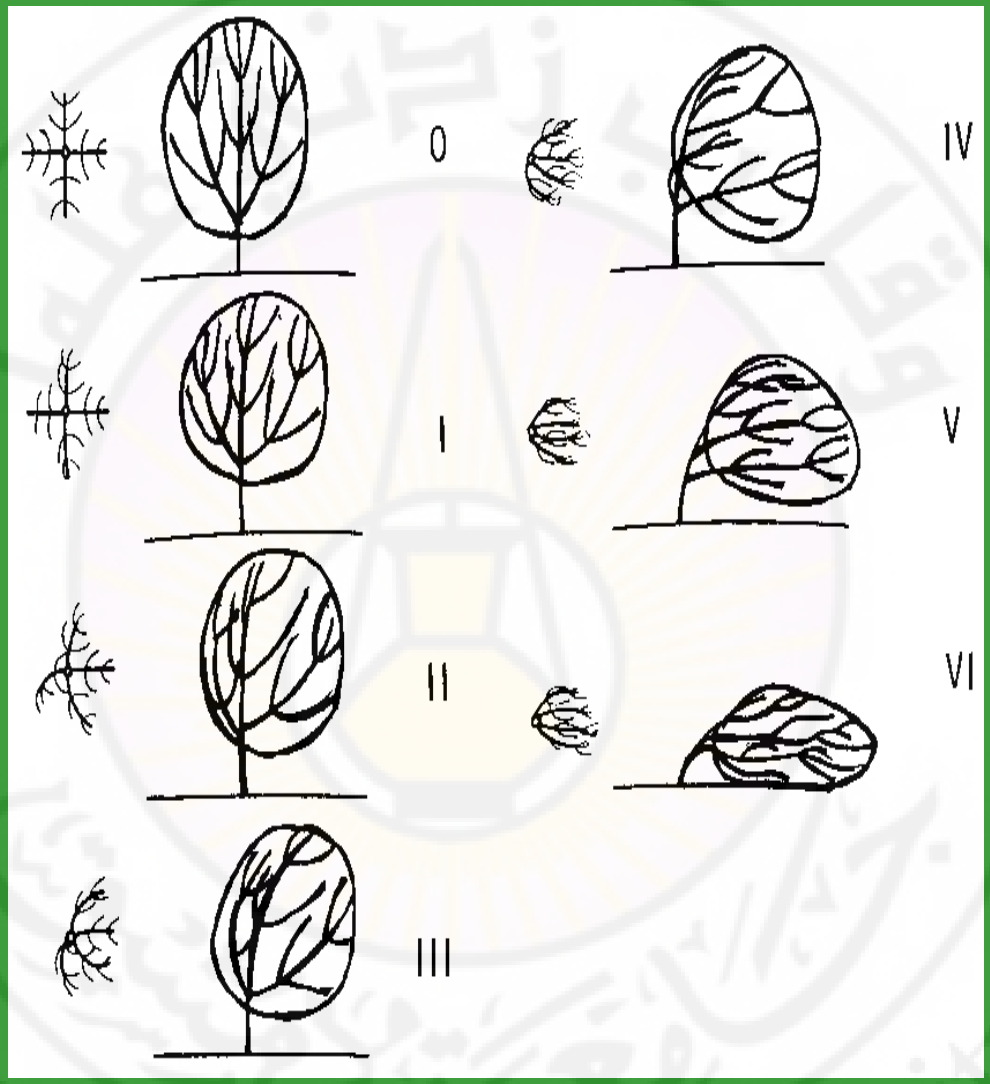
٧-٢-١ مقدمة:

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.

٧-٢-٢ طريقة اعتماد الأشجار كمؤشر لسرعة الرياح الوسطية:



الشكل ٧-١: تصنيفات انحناء الأشجار نتيجة لأثر الرياح.



الشكل ٧-٢ : تصنيفات الأشجار عريضة الأوراق للعالم Barsch

استناداً للشكل ٧-٣ فإن معدل التشوه أو الانحناء هو: $D = A/B + C/45^0$

حيث:

A - المسافة بين الجذع ويمين الشجرة

B - المسافة بين الجذع ويسار الشجرة علماً أن اتجاه الريح المعتمد يكون من الأيسر إلى الأيمن.

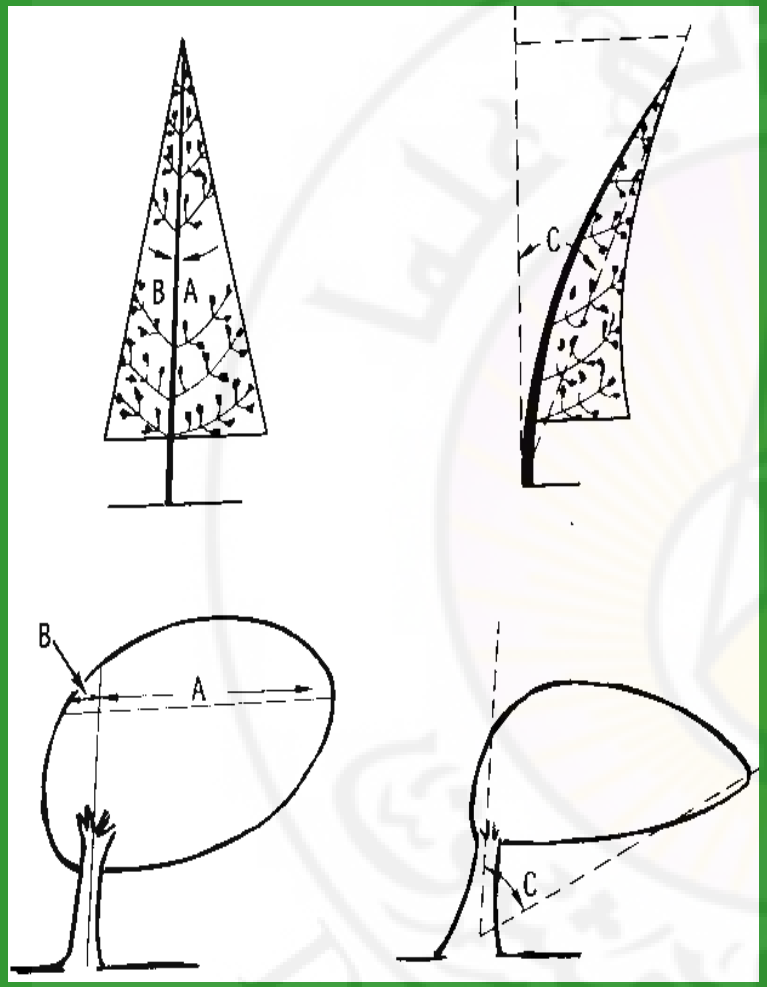
C - زاوية انحناء جذع الشجرة بالنسبة للعمود المنشأ من أسفل الجزع على التربة.

حيث: $1 \geq A/B \geq 5$

بينما القيمة الصغرى لـ D هي ١.

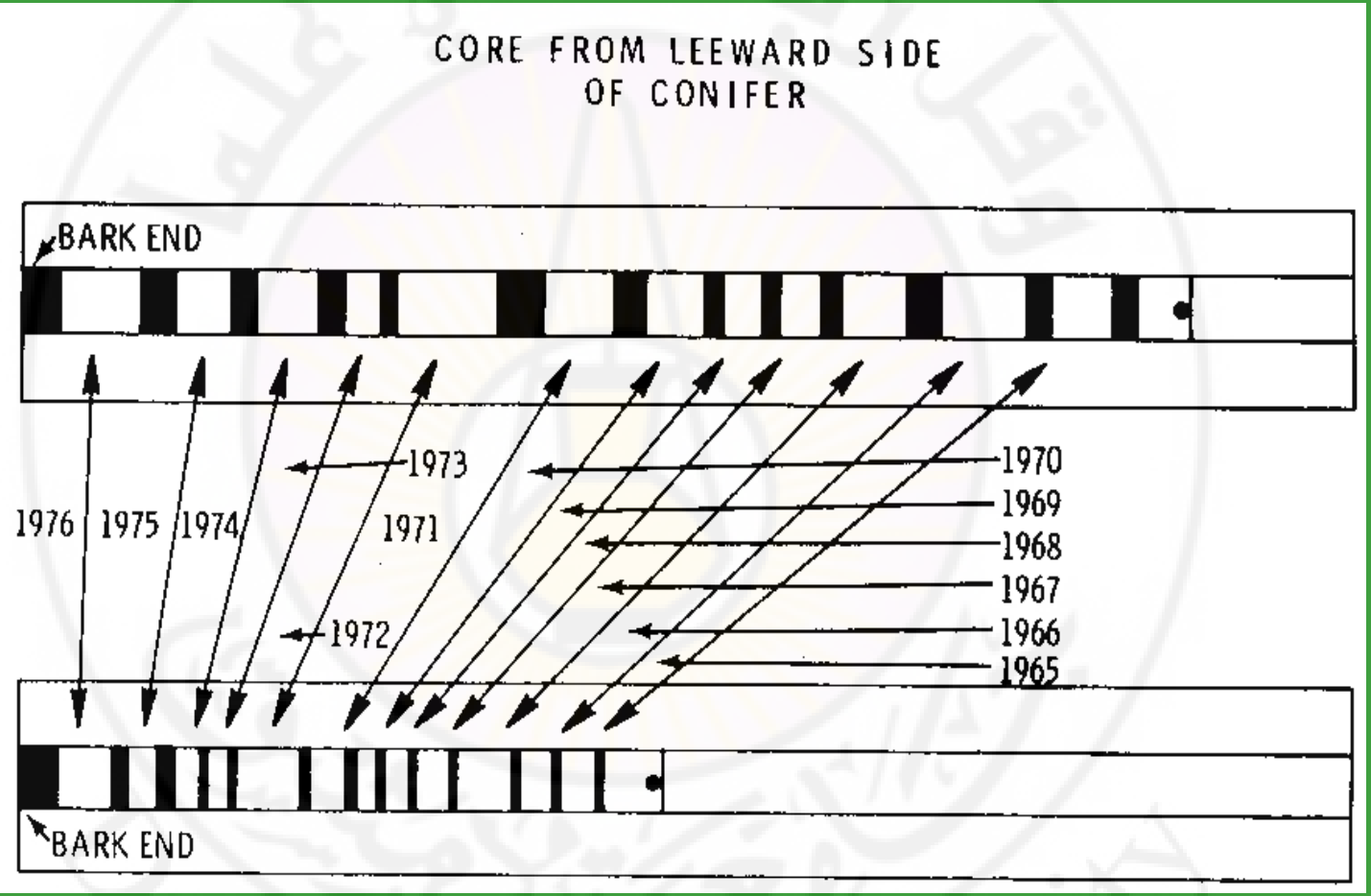
والقيمة العظمى للزاوية C هي ٩٠° وبالتالي فإن القيمة العظمى للمعدل D هي ٧.

تؤخذ هذه المؤشرات بالتصوير من موقع الزاوية اليمينية على اتجاه حركة العلم. وعلى هذا الأساس يتم حساب سرعة الرياح.



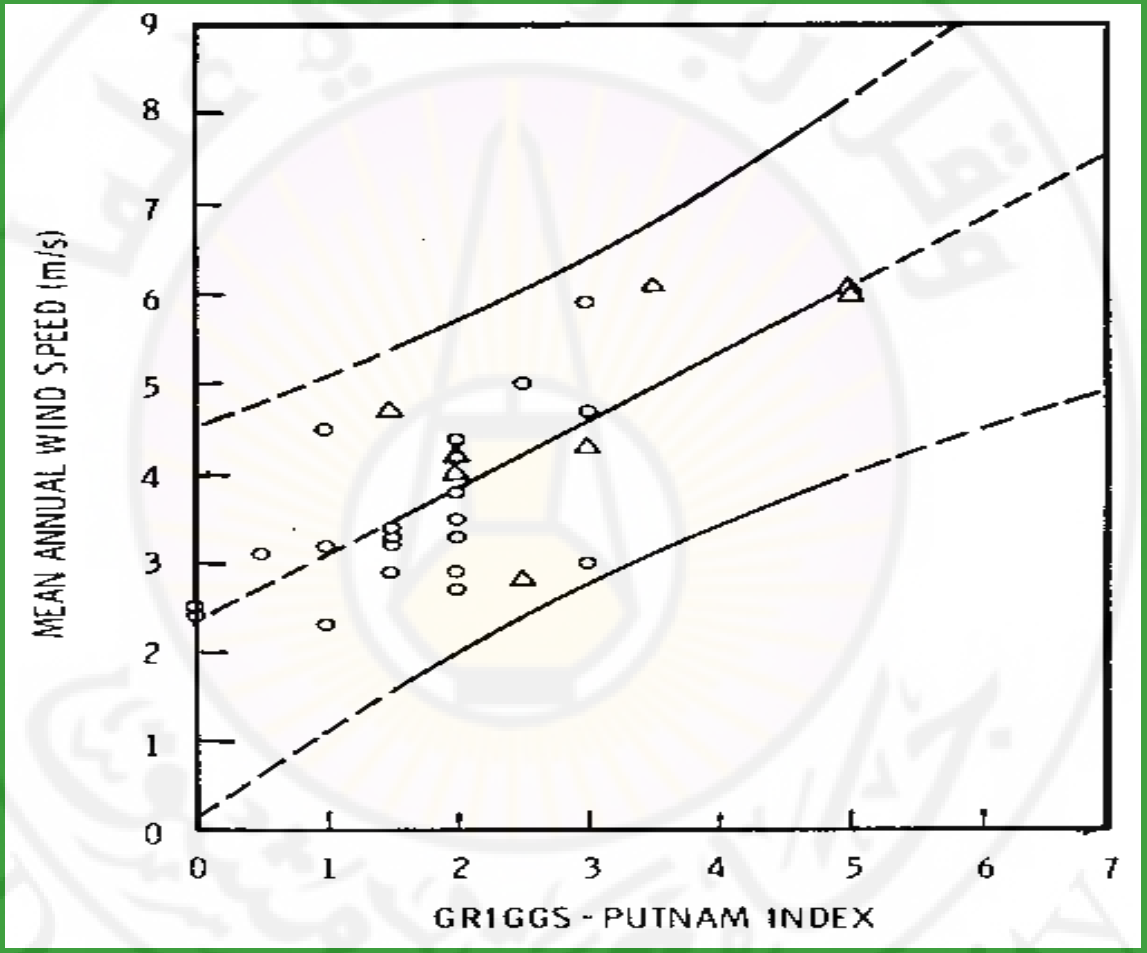
الشكل٧-٣: حساب سرعة الرياح استنادا إلى انحناء الأشجار

٧-٢-٣ معدل ضغط الرياح(Wind Pressure Average) :



الشكل ٧-٤: قياس ضغط الرياح على أساس التشوه

٧-٢- ٤ العلاقة بين السرعة الوسطية للرياح وانحراف شكل الشجرة:



الشكل ٧-٥ : قياسات وسطي سرعة الرياح

الجدول ٧-١

G (Griggs-Putnam Index), B (Barsch Index), D (Deformation Ratio), and C (Compression Ratio) With Mean Annual Wind Speed (Wade and Hewson 1980)

Genus (Popular Name)	Index	N	Least Squares Parameters β_0	β_1	R	RMS Error (m/s)	Percent of Cases For $\varepsilon > 1$ m/s	95 Percent Confidence Limits (± m/s) Index Value (I) 0	1	2	3	4	5	6	7
Abies (Fir)	G	10	6.0	0.7	0.90	0.7	10	2.0	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.9	2.0
	D	5	5.8	0.9	0.96	0.5	40	2.8	2.6	2.5	2.4	2.5	2.6	2.8	3.1
Juniperus (Juniper)	G	12	4.4	0.6	0.79	0.8	25	2.1	2.0	1.9	1.9	2.0	2.1	2.2	2.5
	D	12	4.6	0.6	0.71	1.0	42	2.5	2.3	2.2	2.2	2.3	2.4	2.6	2.9
Picea (Spruce)	G	10	3.0	1.2	0.91	0.9	60	2.8	2.6	2.5	2.4	2.5	2.6	2.8	3.0
	D	10	3.7	0.9	0.80	1.3	40	3.9	3.7	3.5	3.5	3.5	3.6	3.8	4.0
Pinus (Pine)	G	39	3.3	0.7	0.70	0.7	18	1.9	1.8	1.7	1.8	1.8	2.0	2.1	2.3
	D	39	3.5	0.7	0.74	0.7	23	1.7	1.6	1.6	1.6	1.7	1.8	1.9	2.1
	C	15	-1.2	4.7	0.62	1.0	47	---	---	---	---	---	---	---	---
Pseudotsuga (Douglas-Fir)	G	19	3.3	0.8	0.82	0.7	11	1.7	1.6	1.5	1.5	1.5	1.6	1.8	1.9
	D	19	3.7	0.6	0.76	1.1	21	1.9	1.8	1.7	1.7	1.7	1.8	1.9	2.1
	C	13	-0.1	3.7	0.62	1.1	46	---	---	---	---	---	---	---	---
Casuarina (Australian-Pine)	G	4	-1.3	1.7	0.98	0.3	50	5.7	4.8	4.1	3.3	2.7	2.4	2.4	2.8
	D	4	-4.9	2.3	1.00	0.2	0	3.8	3.2	2.1	2.0	1.6	1.2	1.2	1.5
Acer (Maple)	B	17	3.4	0.9	0.49	0.4	0	1.5	1.0	1.4	2.2	3.1	4.1	5.1	6.1
	D	17	4.0	0.3	0.31	0.5	6	1.3	1.1	1.1	1.3	1.6	2.0	2.4	2.8
Legumes (Mesquite-Locust)	B	12	3.7	0.7	0.70	0.4	8	1.2	1.0	1.0	1.3	1.7	2.1	2.5	3.0
	D	12	3.8	0.4	0.65	0.4	17	1.2	1.1	1.0	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8
Quercus (Oak)	B	29	3.0	1.1	0.81	0.9	24	1.8	1.7	1.7	1.8	1.9	2.1	2.3	2.5
	D	28	3.2	0.7	0.75	1.1	29	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.1	2.2	2.4
Ulmus (Elm)	B	20	3.3	1.1	0.72	0.6	15	1.5	1.4	1.4	1.6	2.0	2.4	2.9	3.4
	D	20	3.3	0.8	0.60	0.7	20	1.8	1.6	1.5	1.7	1.9	2.3	2.7	3.2

N = Number of data points

V_p = Predicted annual mean wind speed

V_o = Observed annual mean wind speed

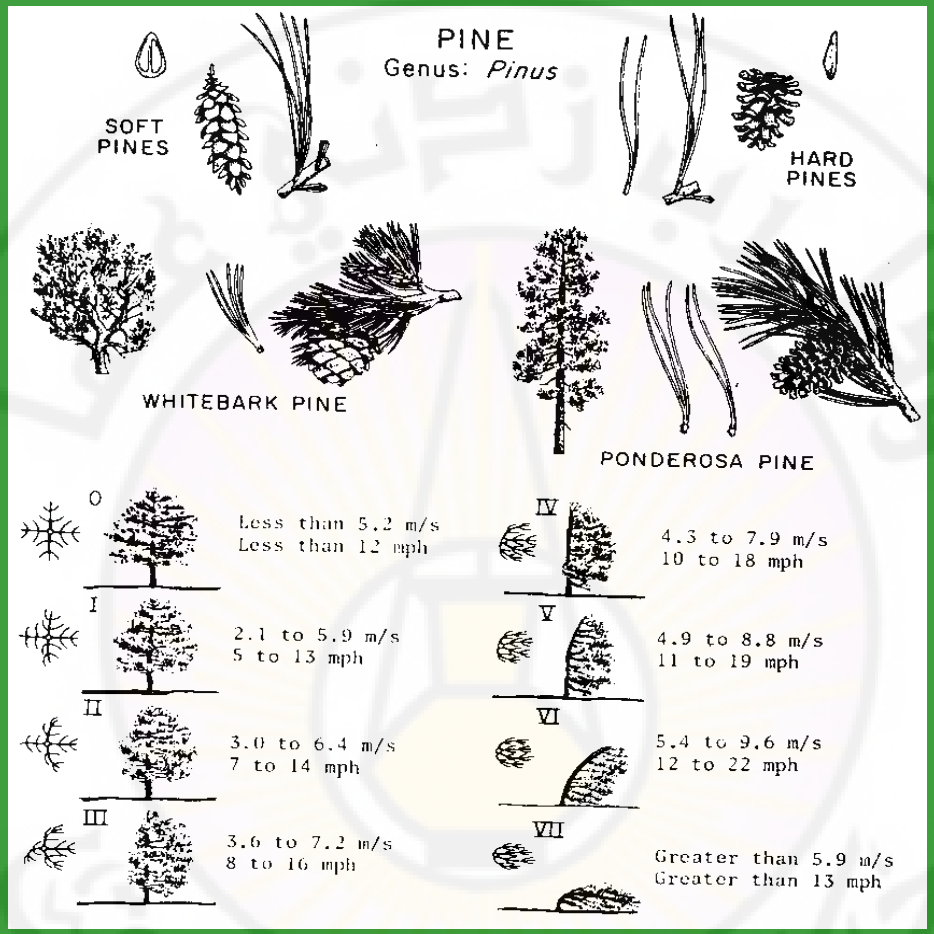
β_0 and β_1 = Regression coefficients

$V_p = \beta_1 I + \beta_0$ where I = index value

$\varepsilon = V_p - V_o$

R = Correlation coefficient

$RMS = [\frac{1}{N} \Sigma \varepsilon^2]^{\frac{1}{2}}$

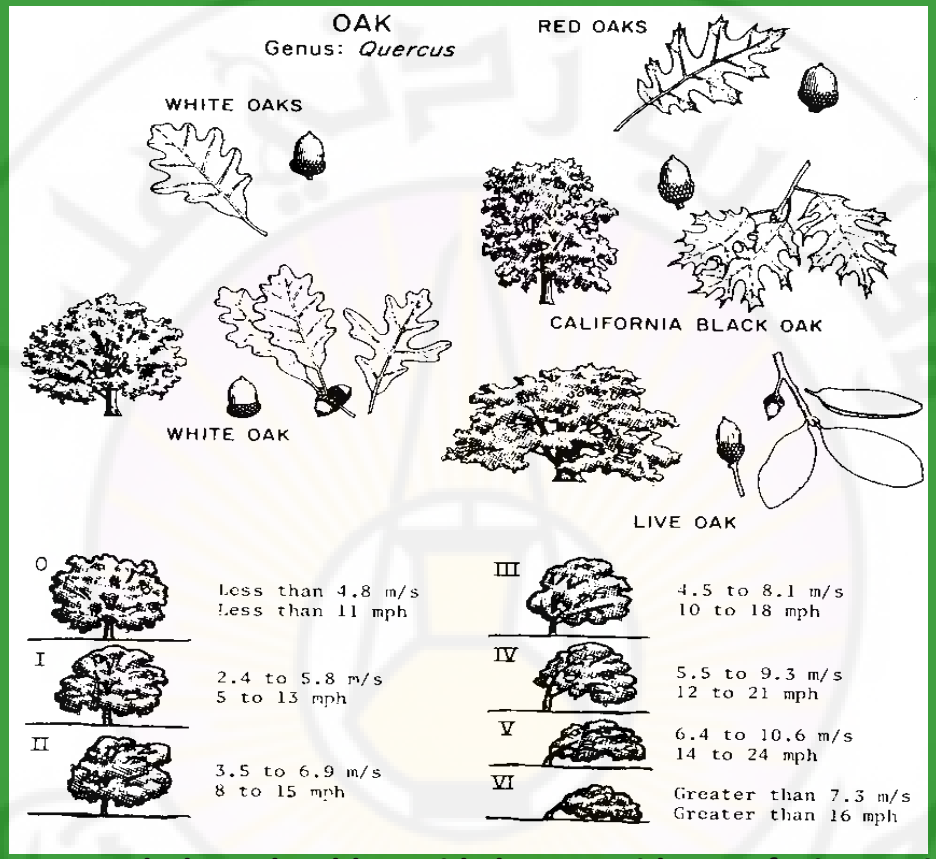


Note: soft pine needles are usually in bundles of 5 and occasionally 1 to 4. Their cones have a stalk. Hard pine needles usually are in bundles of 2 to 3, occasionally 5 to 8. Their cones are often armed with prickles. Pines growing at high elevations or along the coast are likely to be also affected 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:

$\bar{V}$ **= 07G + 3.3 or** $\bar{V}$ **= .7D + 3.5 (rms error = ± 0.7 m/s) (rms error = ± 0.7 m/s)**

الشكل 7-٦: قياسات شجر الصنوبر والسرو



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 windly loccations. These include Bur Oal, Swamp Oak, Shumard Oak, and Laurel Oal.

The relationships between mean annual wind speed ($\overline{V}$) the indices of wind deformation are

$\overline{V}$ = 1.1B+3.0 or $\overline{V}$ = .7D +3.2 (rms error= ±0.9 m/s) (rms error = ± 1.1 m/s)

الشكل 7-٧: يبين مثالاً عن قياسات شجر السنديان

7-٣ مؤشرات اتجاه الرياح.

7- 4 مؤشرات الرياح الشديدة وآثار الصقيع.



الشكل 7-٨: استراتيجية اختيار الموقع للعنفات ذات الاستطاعة الكبيرة

7-٥ الخلاصة: يمكن الاعتماد على شكل وانحراف الأشجار لتحديد المواقع المرغوبة أو المثالية لتركيب نظم تبديل طاقة.

٦-٧ المؤشرات الجغراتشكيلية Indicators Geomorphologic لاختيار الموقع

7-٦-١ أثر الرياح على تشكيل سطح الأرض.

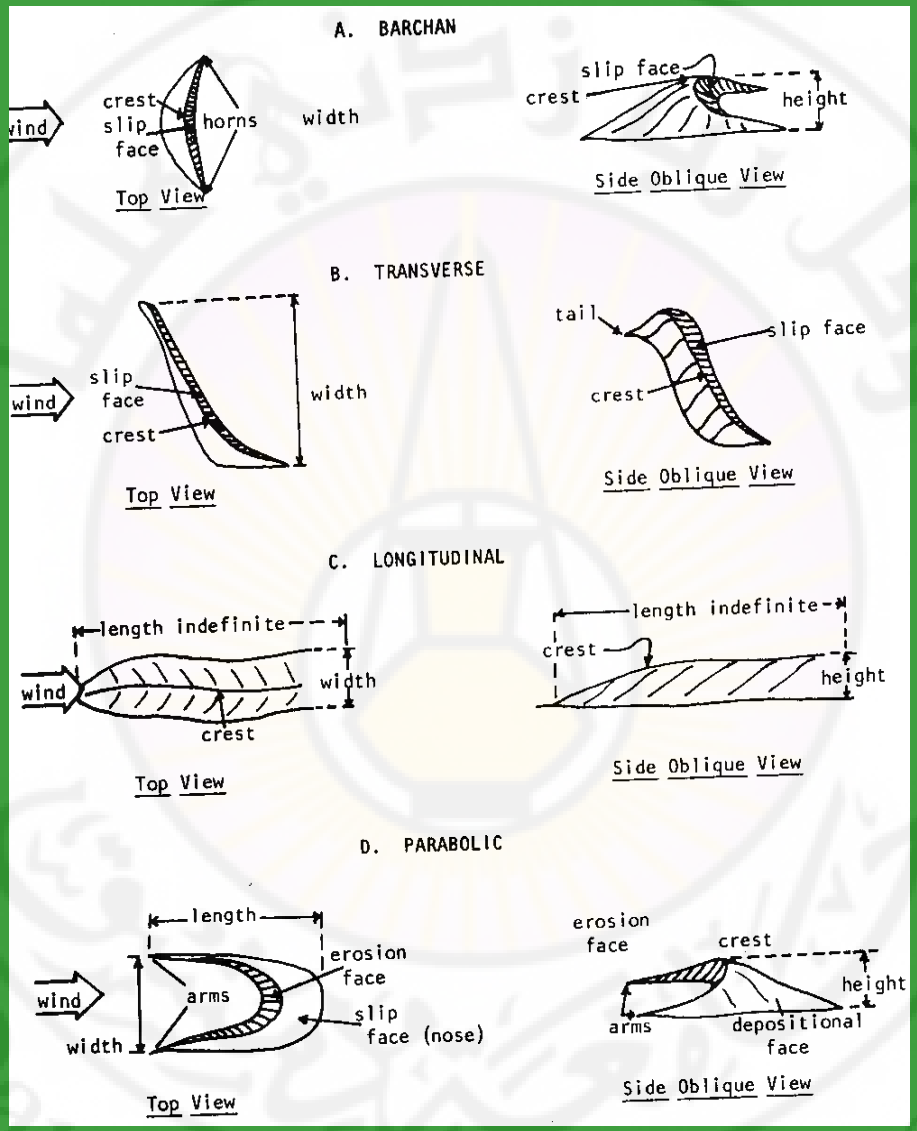
7-٦-٢ التشكيل الريحي للأرض EOLIAN LANDFORM:

بشكل عام يكون التشكل الريحي للأرض إما على شكل تلال أو مرتفعات رملية أو مناطق منخفضة حيث تهب فيها الرياح وتتداخل مع طبيعة التربة والتداخلات 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.
- تلال أو كثبان رملية. وأيضاً مرتفعات ومنخفضات رملية ممتدة على مساحات واسعة.

7-٦-٣ تقدير سرعة الرياح:Wind Speed Assessment.

يمكن تقدير سرعة الرياح الوسطية في الموقع من دراستنا لحجم الحبيبات المترسبة فيه وتوزعها في المنطقة بشكل عام وارتحال التلال فيها. ومن الضروري الاستناد أيضا إلى المعلومات المناخية المتوفرة عن الرياح في ذلك الموقع أو تلك المنطقة.



الشكل 7-٩: أشكال التلال الرملية والمرتفعات والمنخفضات في الصحراء

7-٦-٤ العلاقة بين التوزع الحجمي للحبيبات والسرعة الوسطى:

عندما تتساوى سرعة الرياح مع أثر العتبة تتحقق العلاقة التالية:

$$U(z) = U/k_* \ln z/z_0 \qquad (2-7)$$

z - سرعة الرياح عند الارتفاع Uحيث:

U_*- سرعة الاحتكاك

k - ٠,٣٥ ثابت Von Karman

Z - الارتفاع عن مستوى الأرض

z_0 - خشونة السطح

سرعة الاحتكاك U_* تمثل مقياس سرعة الاضطرابات المتعلقة بعزم تدفق الاضطراب

(turbulent momentum flux)

$$U_* = \sqrt{\tau/\rho} \qquad (3-7)$$

حيث: ρ– كثافة الهواء

وتصبح عتبة الاحتكاك مساوية إلى U_{*T}

واستناداً إلى النتائج التي توصل إليها العالم Nikuradse عام ١٩٣٣ فإن الخشونة z_0 تقدر بالعلاقة: $z_0 = d/30$ (4-7)

حيث: d - قطر حبة الرمل.

٣٠/١- ثابت التناسب.

وحسب نظرية Bagnold فإن عتبة سرعة الاحتكاك U_{*T} تتعلق بكثافة وقطر حبات الرمل أي:

$$U_{*T} = A \sqrt{\frac{\sigma - \rho}{\rho} g d} \qquad (5\text{-}7)$$

حيث:

A - ثابت التناسب والذي يساوي ٠,٠٨ من أجل سرعة العتبة ويساوي ٠,١ من أجل تدفق سرعة العتبة.

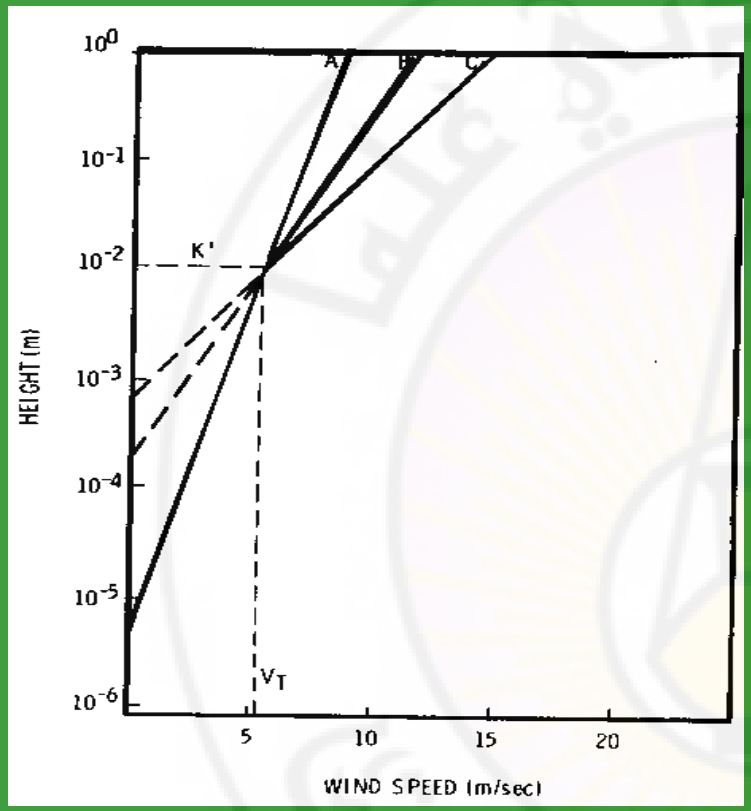
σ - كثافة الرمل.

g - تسارع جاذبية الأرض.

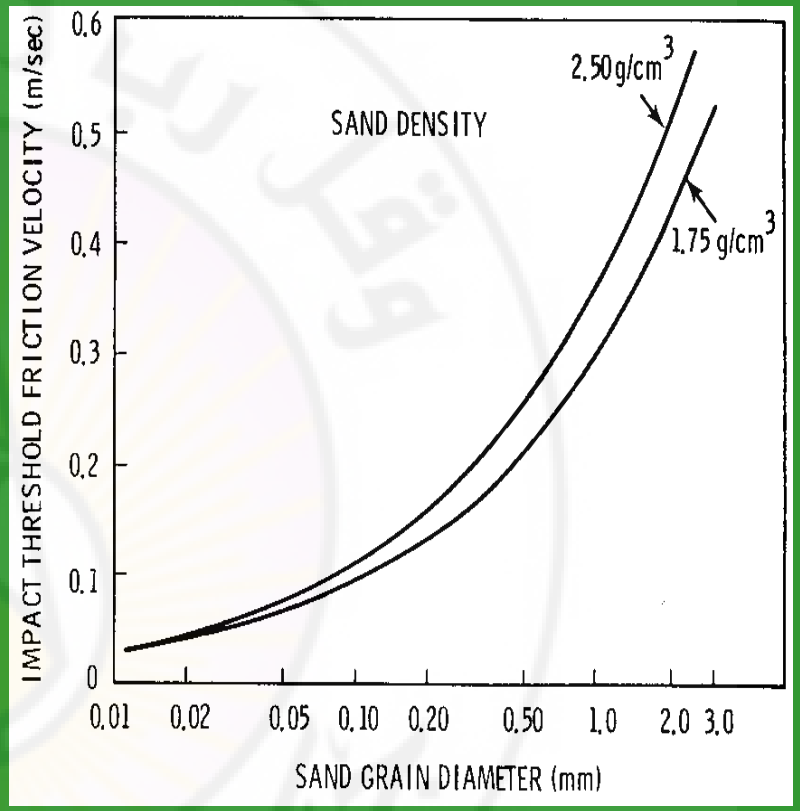
جوانب الريح تتركز عند النقطة ذات الإحداثيات (V_T،K^1) التي يسميها Bagnold ببساطة عتبة السرعة.

ويمكن استخدام العلاقات ٧-٢، ٧-٤، ٧-٥ والمكافئ التقديري K^1 لتحديد V_T

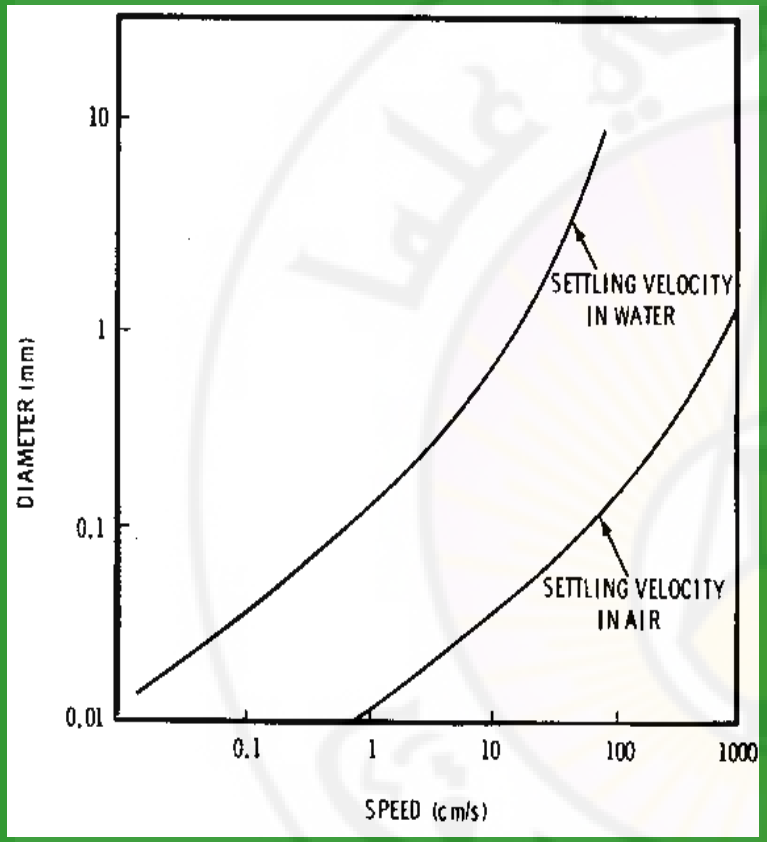
$$V_T = \frac{A}{K} \sqrt{\frac{\sigma - \rho}{\rho} g d} \quad \text{Ln} \frac{30K^1}{d} \qquad (6\text{-}٧)$$



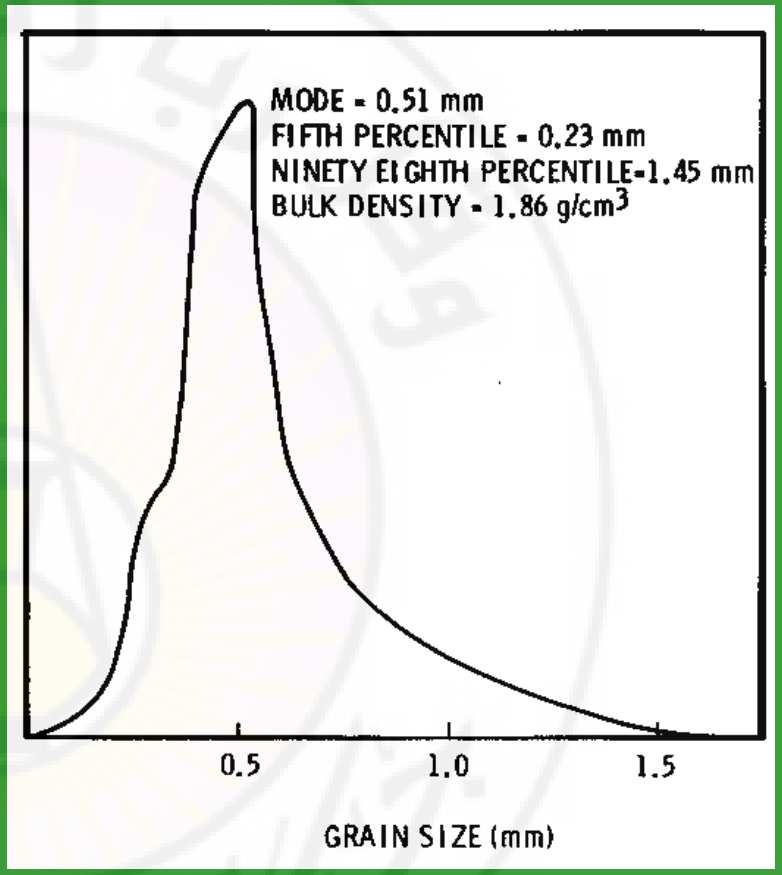
الشكل ٧-١١: علاقة سرعة الرياح بمستوى القفز لحبيبات التربة في المرتفعات



الشكل 7-١٠: مجموعة المنحنيات المستندة إلى العلاقة 7-٤



الشكل ٧-١٣: مقارنة بين سرعات التوضع لكرات الكوارتز في الماء والهواء



الشكل ٧-١٢: توزع أحجام الحبيبات في مرتفعات Ferris في ولاية Wyoming في الولايات المتحدة الأمريكية

الجدول ٧-٢ : يبين سرعة الرياح على أساس التوزيع الحجمي للرمال

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	Frequent Enough To Sustain Active Dunes / Suspension of Smallest Grains	Occasional Extreme Winds / Suspension of Modal Size Grains
u_{*T}	0.22	0.38		0.38
z_o	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
$V_T = V_T(z=0.01, u_{*T}, z_o)$				5.8
Effective u_*				2.0
Effective z_o				3.6×10^{-3}
U_{10}	7.7	13.3	12.8	45.0
Uncertainty	?	?	?	?
Frequency of Occurrence	?	?	?	?

٧-٦-٥ العلاقة بين سرعة الرياح وارتحال المرتفعات:

نبين فيما يلي نظرية Bagnold حول ارتحال المرتفعات وسرعة الرياح:

معدل انتقال كتلة الرمال المتدفقة مع الرياح هو:

$$q = a u_*^3 \qquad (7\text{-}٧)$$

و ذلك من اجل $U_{*T} \le U_*$

$$a = c \frac{\rho}{g} \sqrt{\frac{d}{D}} \qquad (8\text{-}7)$$

حيث:

U_{*T}- أثر سرعة عتبة الاحتاك

U_* - عتبة الاحتكاك

C =1.5 من أجل الرمال موحدة الشكل

C =1.8من أجل الرمال المتوضعة على المرتفعات

C =2.8 من اجل الرمال ذات الأحجام مختلفة الأشكال

d- نصف قطر الحبيبات المتعلق بحجمها.

D= $2.5^* 10^{-4}$ متر

ρ- كثافة الهواء

g – التسارع الأرضي

وهناك نظريات بديلة على سبيل المثال نظرية العالم Lettau عام ١٩٧٨ و Kawamra ١٩٥١ التي تقترح:

$$q = c_1 \frac{p}{g} (U_* - U_{*T}) U_* + U_{*T})^2 \qquad (9\text{-}7)$$

استناداً إلى تجربة النفق الريحي مع رمال ذات حبيبات موحدة الحجم أو المقاييس والتي تساوي $4.4 * 10^{-4}m$ حيث U_{*T} وجدت تجريبياً بحدود 0.30 m/sec فإن العالم Belly قدر عام (١٩٦٢) $C_1=3.1$

أما العالم Lettau فأقترح عام ١٩٧٨ علاقة أخرى هي:

$$q = C_2 \frac{p}{g} \left(\frac{d}{D}\right)^n U_*^2 (U_* - U_{*T}) \qquad (10\text{-}7)$$

والتي يبين تطابقها مع نظرية العالم Belly إذا كانت :

$$C_2 \frac{p}{g} \left(\frac{d}{D}\right)^n = 6.5$$

وبهذه المناسبة يمكن استخدام وصف Bagnold حسب العلاقة (٧-٨) وذلك باعتبار قيمة U_* صغرى.

إن مقدار شعاع المعدل الوسطي لانتقال الرمال $< \vec{q} >$ يمكن الحصول عليه بصورة تقريبية من خلال مراقبة طويلة الأمد قد تمتد سنوات لارتحال مجموعة مرتفعات في المنطقة باستخدام العلاقة التالية:

$$< \vec{q} > = \frac{x \sigma H}{t} \qquad (11\text{-}٧)$$

حيث:

X - مسافة ارتحال المرتفع

σ - كثافة مجموعة الرمال

H – ارتفاع التلة

t – الفترة الزمنية بين المراقبات االمتتالية.

إذا كانت الرياح تهب باستمرار وفي نفس الاتجاه والسرعة وبالتالي تصبح هذه المرتفعات غير مستقرة فإن العلاقة٧-٧ تستخدم لتحديد سرعة الرياح من مراقبتنا لانتقال الرمال فيها.

يمكن للعلاقة ٧-٨ أيضا أن تستخدم لاستنتاج العلاقة بين $<\vec{q}>$ والسرعة الوسطية الاسمية لعدة سنوات $\overline{\mathbf{v}}$.

وقد تم بناء على ذلك تقييم التكامل التالي:

$$<\vec{q}> = \int_{u_{*T}}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{1} \vec{q}\,(U_*,\theta,A)\, P(U_*,\theta,A)\, dA.\, d\theta.d\, U_* \qquad (12\text{-}٧)$$

حيث: (U_*, θ, A) $\vec{q}$ معدل شعاع انتقال الرمال كتابع لسرعة الرياح (U_*) واتجاه الريح (θ) ونشاط المرتفع الرملي (A).

حيث A كتابع تقع قيمته في المجال من ٠ إلى ١. ويشير إلى درجة نشاط المرتفع حسب تأثره بالمزروعات والرطوبة المتواجدة فيه.

$U_*\ p(\theta, A)$ تابع الكثافة النظامية المشتركة الاحتمالي.

يبدأ التكامل فوق سرعة الرياح عند U_{*T} لأنه عندما تكون سرعة الرياح اصغر من U_{*T}ولا تتحرك الرمال.

من أجل توزيع معطى سابقاً لسرعة الرياح فإن أثر اتجاه الريح والفترات لسرعة الرياح فإن أثر اتجاه الريح والفترات الزمنية للنشاط المتقلص للمرتفعات تقلل قيمة التكامل حسب العلاقة 7-١٢ وهذا يعني إذا قدرنا < >حسب العلاقة:

$$< \vec{q} > = q(U_*)\, d\, U_* \qquad (13\text{-}٧)$$

حيث يحل مقياس معدل انتقال الرمال محل شعاع انتقال الرمال باستخدام العلاقة ٧-٨ وبالتالي تصبح قيمة $< \vec{q} >$ التي يمكن الحصول عليها من العلاقة ٧-١٢.

وهذا الأمر هام خاصة إذا كان لدينا معروفاً لائحة توزع رايلي Rayleigh أو Weibull لسر عات الرياح. عند ذلك فإن القيمة المقاسة $< \vec{q} >$ يجب أن تشير إلى السرعة الوسطية الصغرى في هذه المنطقة.

إذا اعتمد توزع احتكال السرعة على توزع رايلي فإن التكامل حسب العلاقة ٧-١٣ يمكن حله تحليلياً.

وبالتالي من السهل عرضه بيانياً باستخدام العلاقة التالية:

$$< \vec{q} > = a\, U_{*T}\, f(\beta) \qquad (14\text{-}٧)$$

حيث:

$$\beta = \frac{\overline{U}*}{U_{*T}}$$

$\overline{U}*$ ـ وسطى سرعة الاحتكال طويل الأمد.

$f(\beta)$ـ تابع يظهر المعدل الوسطي لانتقال الرمال كما هو مبين في الشكل ٧-١٤ والذي تم استنتاجه تحليلياً.

للحصول على القيمة التقديرية لوسطي سرعة الريح الأصغري. علينا أن نأخذ القيمة التقديرية لـ $<\vec{q}>$ التي نحصل عليها من معدل ارتحال المرتفع ثم نقدر تحليلياً قيم a و U_{*T} ونحل العلاقة (٧-١٣) من أجل $f(\beta)$ ونستنتج قيمة من الشكل ٧-١٤ نضرب بـ U_{*T}

للحصول على قيمة $\overline{U}*$.وبإعطاء قيم $\overline{U}*$ و K^1 انظر الشكل ٧-١١ يمكن تقدير وسطي سرعة الرياح عند ارتفاع ما قرب السطح من خلال العلاقة التالية :

$$\overline{V}(z) = V_T \frac{\overline{U}*}{K} + Ln \frac{Z}{K^1} \qquad (15\text{-}٧)$$

من أجل قيم صغيرة لـ β فإن أي خطأ في تقدير $<\vec{q}>$ يؤدي إلى خطأ أكبر في تقدير $\overline{V}$.والشكل ٧-١٤ يبين كيفية استنتاج قيمة β.

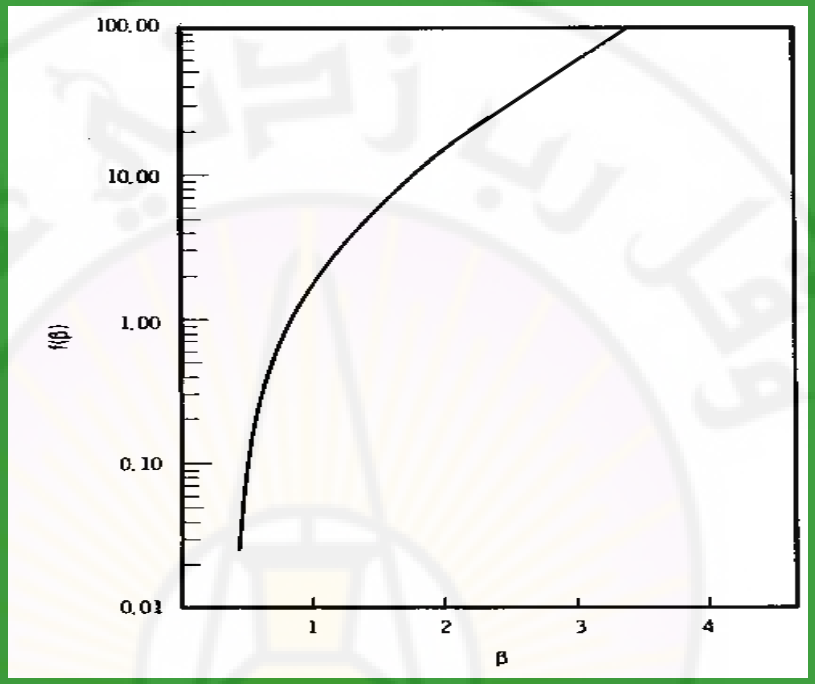
أخيراً قام العالمان Marrs وGaylord عام ١٩٧٩ بحساب العلاقة بين توزيع رايلي المقدر لوسطي سرعة الرياح في حقل مرتفعات Ferris في الولايات المتحدة الأمريكية وشبكة مراقبة معدل انتقال الرمال فيه حيث قدرت قيمة الشعاع $<\vec{q}>$ بـ:

$$<\vec{q}> = 8.9 \times 10^{-3}\ k.g\ m^{-1}.sec^{-1}$$

والقيم التقديرية لوسطي سرعة الرياح الصغرى 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.

β



الشكل ٧-١٤ : استنتاج قيمة β

٧-٦-٦ العلاقة بين سرعة الرياح ونشاطات تشكيل أخرى.

٧-٦-٧ المؤشرات التشكيلية لاتجاه الريح

٧-٧ خوارزميات سرعة الرياح في المواقع اعتمادا على المؤشرات النباتية

















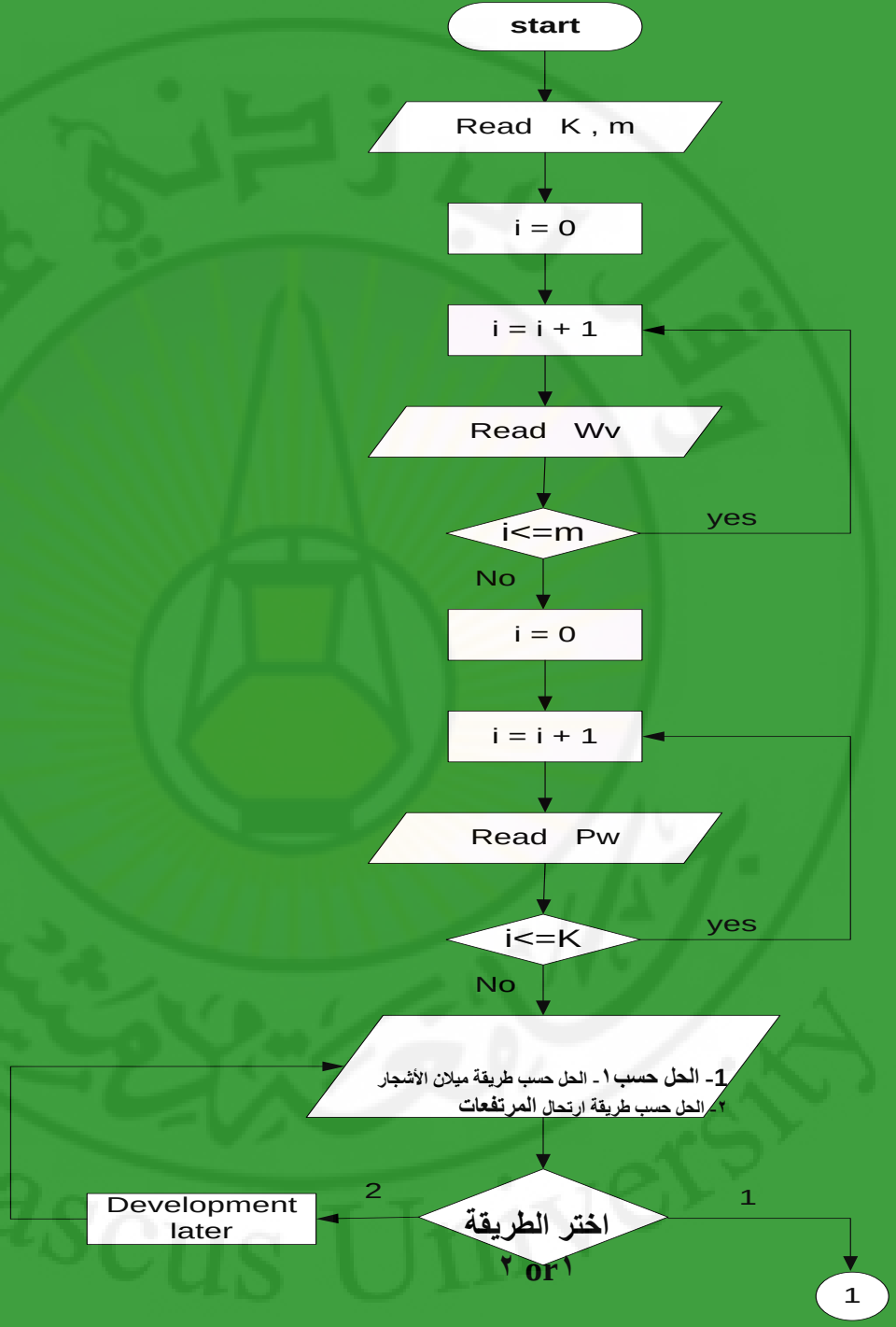


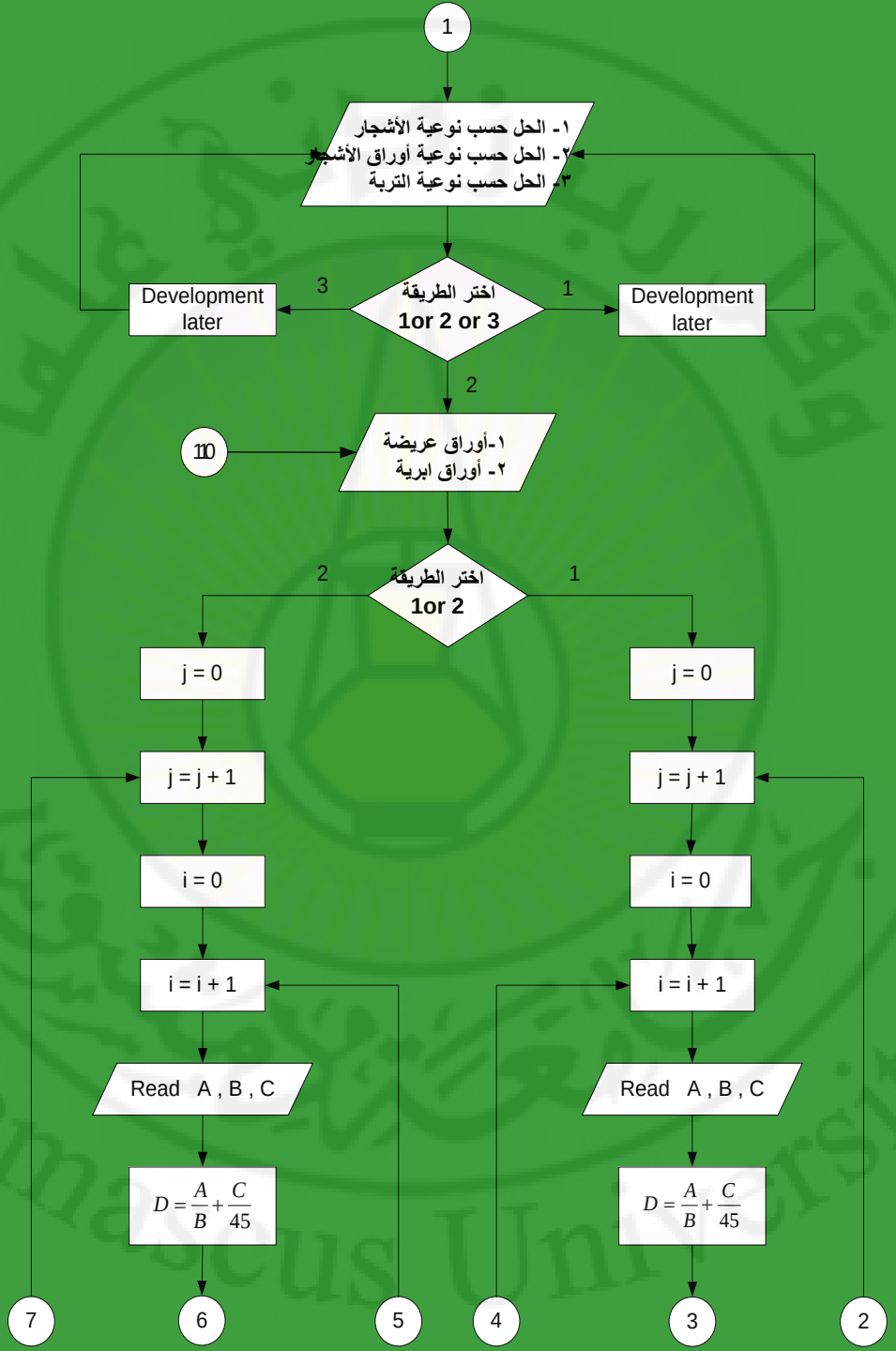


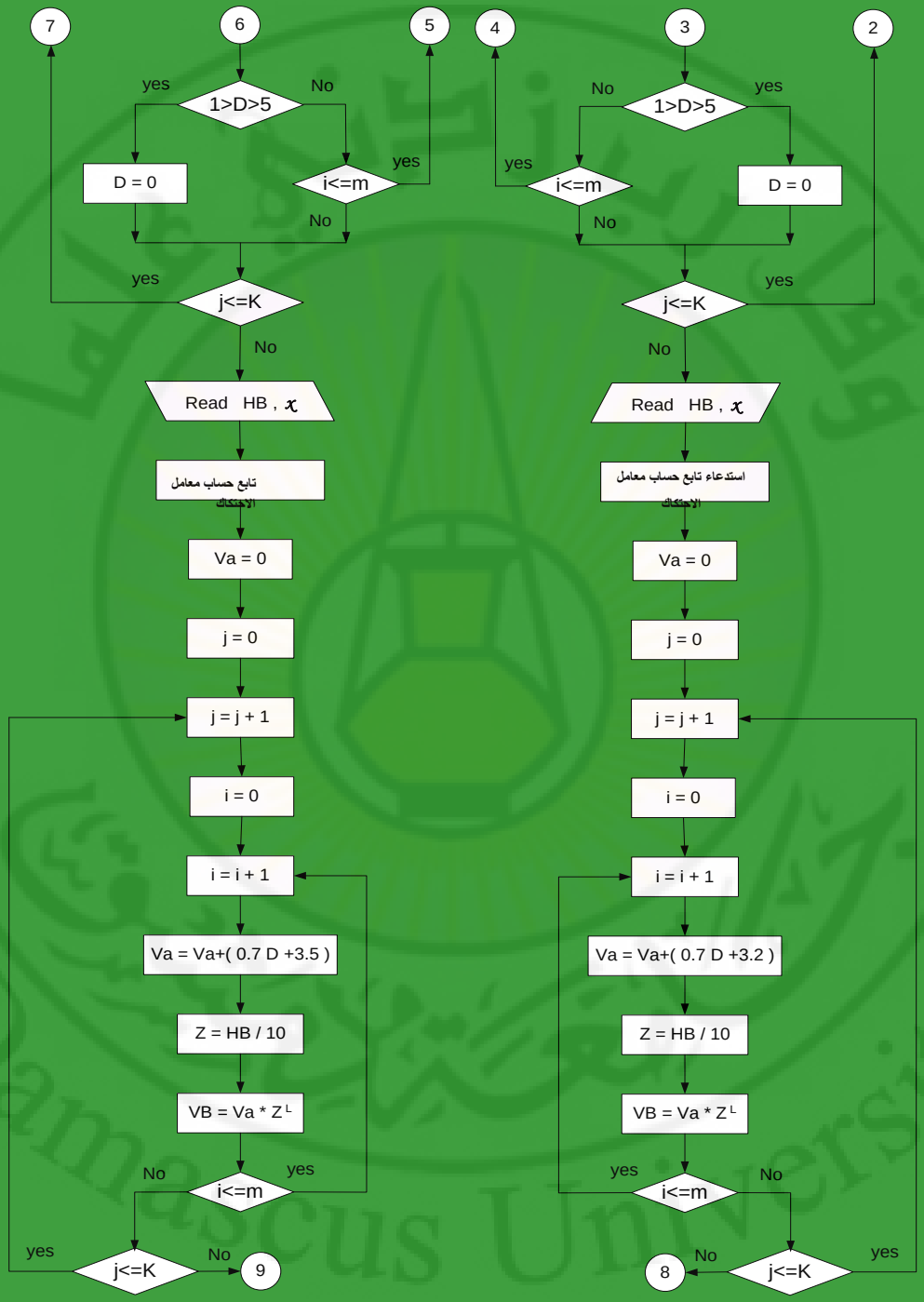




الشكل ٧-١٥ : صور بعض الأشجار التي تم إدخال معطياتها للبرنامج للحصول على سرعات الرياح التقريبية في مواقع جنوب مدينة حمص


start
Read K , m
i = 0
i = i + 1
Read Wv
i<=m
yes
No
i = 0
i = i + 1
Read Pw
i<=K
yes
No
1- الحل حسب ١ - الحل حسب طريقة ميلان الأشجار
٢- الحل حسب طريقة ارتحال المرتفعات
اختر الطريقة
١ or ٢
2
Development later
1
1


1
١- الحل حسب نوعية الأشجار
٢- الحل حسب نوعية أوراق الأشجار
٣- الحل حسب نوعية التربة
اختر الطريقة
1or 2 or 3
3
Development later
1
Development later
2
10
١-أوراق عريضة
٢- أوراق ابرية
اختر الطريقة
1or 2
2
1
j = 0
j = j + 1
i = 0
i = i + 1
Read A , B , C
$D = \frac{A}{B} + \frac{C}{45}$
j = 0
j = j + 1
i = 0
i = i + 1
Read A , B , C
$D = \frac{A}{B} + \frac{C}{45}$
7
6
5
4
3
2


7
6
5
4
3
2
yes
1>D>5
No
D = 0
i<=m
yes
No
yes
j<=K
No
Read HB , x
تابع حساب معامل الاحتكاك
Va = 0
j = 0
j = j + 1
i = 0
i = i + 1
Va = Va+(0.7 D +3.5)
Z = HB / 10
VB = Va * Z^L
No
yes
i<=m
yes
No
j<=K
No
9
No
yes
1>D>5
yes
i<=m
D = 0
No
yes
j<=K
No
Read HB , x
استدعاء تابع حساب معامل الاحتكاك
Va = 0
j = 0
j = j + 1
i = 0
i = i + 1
Va = Va+(0.7 D +3.2)
Z = HB / 10
VB = Va * Z^L
yes
i<=m
No
8
No
yes
j<=K

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

الفصل الثامن
مكونات العنفات الريحية
Wind Turbines Components

محاضرات أ.د.كمال ناجي
شعبة طاقات متجددة

٨-١ التصاميم الحديثة Modern Designs

٨-١-١ العنفات الريحية ذات المحور العمودي Vertical-axis wind turbines (VAWTs)

هذه العنفات نادرة جداً والوحيدة منها حاليا في الإنتاج التجاري هي عنفات داريوس و عنفات سافونيوس وعنفات على شكل Hانظر الشكل ٨-١.

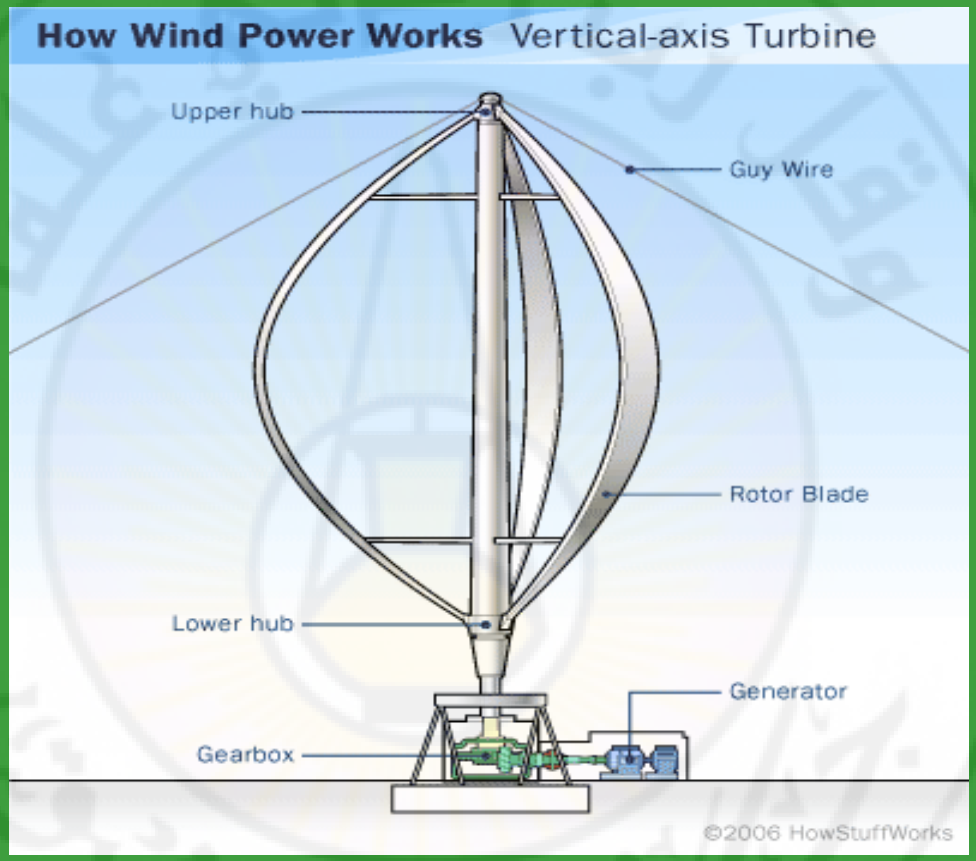


الشكل ٨-١ : عنفات داريوس و عنفات سافونيوس وعنفات H

هذه العنفات ذات محور عمودي دائماً على الأرض وهي تصطف باتجاه الريح دوما بعكس نظرائها ذوات 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 منخفضا 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 واتي 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.

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 ٨-٢.

هذه العنفات تستعمل على نطاق ضيق الآن أما الآن فإن غالبية ما ينتج بشكل تجاري هو العنفات الريحية ذات المحور الأفقي.



الشكل ٨-٢ : مكونات عنفة داريوس ذات المحور العمودي

٨-١-٢ العنفات الريحية ذات المحور الأفقي horizontal-axis wind turbines (HAWTs)

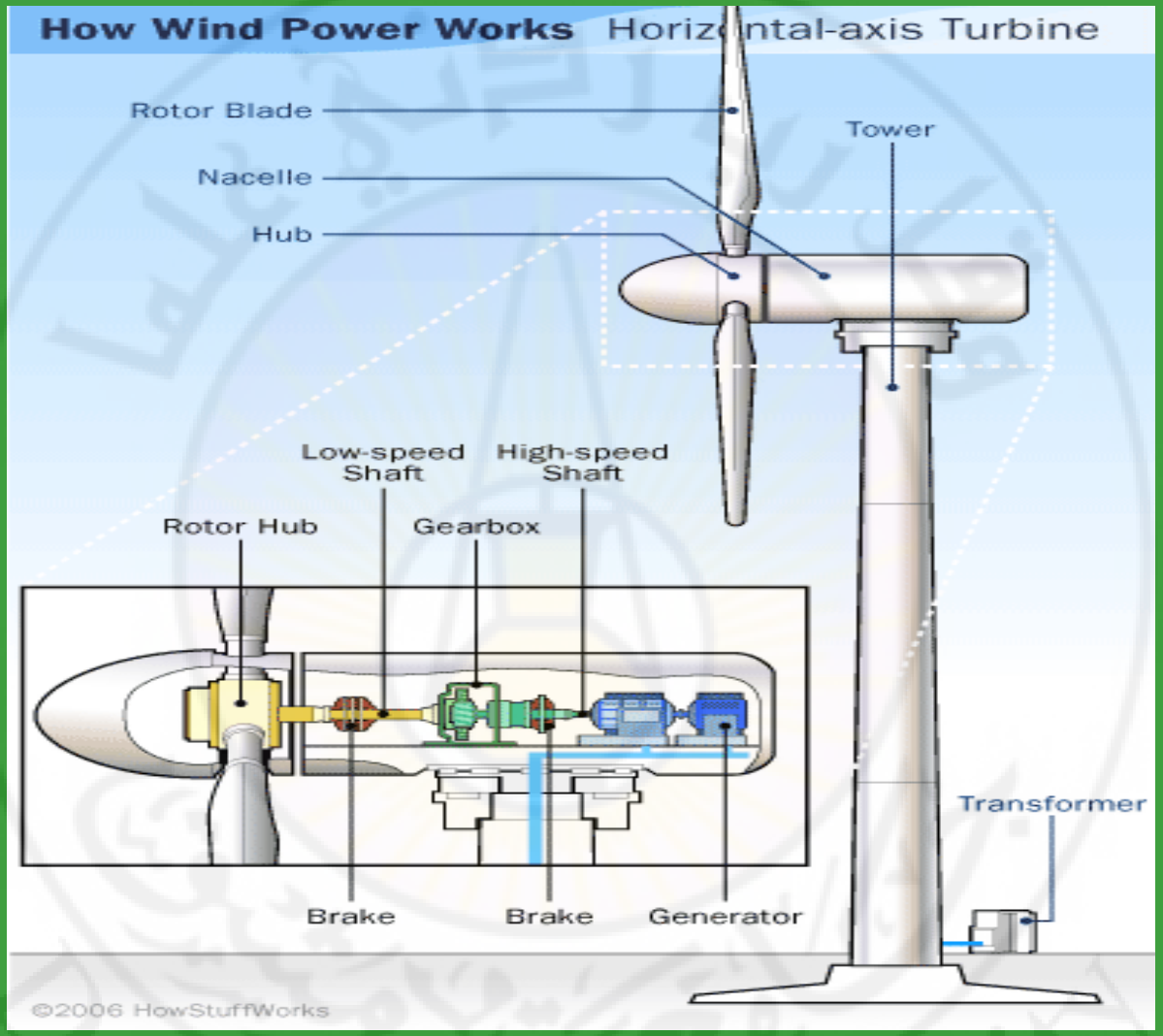
يبين الشكل ٨-٣ التطور التقني الذي طرأ على العنفات الريحية ذات المحور الأفقي منذ عام ١٩٨٠ وحتى عام ٢٠٠٥ من جهة زيادة الاستطاعة وارتفاع البرج الحامل للقمرة والدوار وبالتالي زيادة القدرة الكهربائية المنتجة سنويا. ومازالت هذه التقنيات في تطور مستمر،حيث وصل ارتفاع البرج في العنفات الحديثة إلى أكثر من ١٦٠ مترا وزادت استطاعة العنفة الواحدة عن٨ ميغا وات، مما أدى إلى انقراض العنفات ذات المحور العمودي. فمسألة تركيب القمرة والدوار في أعلى البرج تتولاها الروافع الضخمة التي تطورت تقنيتها أيضا مع الزمن وأحيانا 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 السلالم الركبة داخل البرج. وفي العنفات الكبيرة تركب مصاعد كهربائية خاصة داخل البرج أيضا.

وكما نلاحظ من الشكل ٨-٣ فإن كمية القدرة الكهربائية التي يمكن أن تنتجها أكبر العنفات المبينة فيه وهي باستطاعة ٥ ميغا وات قد تصل إلى ١٧ مليون كيلووات ساعي سنوياً وذلك إذا عملت في ظروف ريحية مثالية. وسيتم العودة إلى هذا الموضوع في الفصل العاشر عند دراسة المسألة الاقتصادية.

وكما هو واضح من التسمية فإن محور هذه العنفات يكون أفقيا بشكل مواز للأرض، حيث يظهر الشكل ٨-٤ مخططا لمكوناتها. هذه العنفات تحتاج لتعديل وضعيتها دوما باتجاه الرياح باستعمال آلية تعديل الانحراف من خلال نظام تعديل الانحراف أوقيادة التوجيه بالدوران(Yaw Drive) والذي يشمل المحركات الكهربائية وعدده اثنان عادة التي تحرك بدورها كامل القمرة إلى اليمين أو إلى اليسار عند التغيرات الصغيرة لاتجاه حركة الريح. ويقوم نظام القيادة بمهمة توجيه القمرة او تدويرها، بحيث يبقى الدوار في مواجهة الريح دائما لاستجرار أكبر استطاعة ريحية ممكنة. في هذه العنفة تركب القمرة أعلى البرج(Tower) لذا فإن هذه العنفات تحتل مكانا صغيرا نسبيا على الأرض.



الشكل ٨-٣: التطور التقني في العنفات ذات المحور الأفقي منذ عام ١٩٨٠ إلى عام ٢٠٠٥ وأبعادها وكمية القدرة الكهربائية المنتجة سنويا بالكيلو وات ساعي



الشكل ٨ ـ ٤ : مكونات العنفة ذات المحور الأفقي

٨-٢ مكونات العنفات الريحية ذات المحور الأفقي:

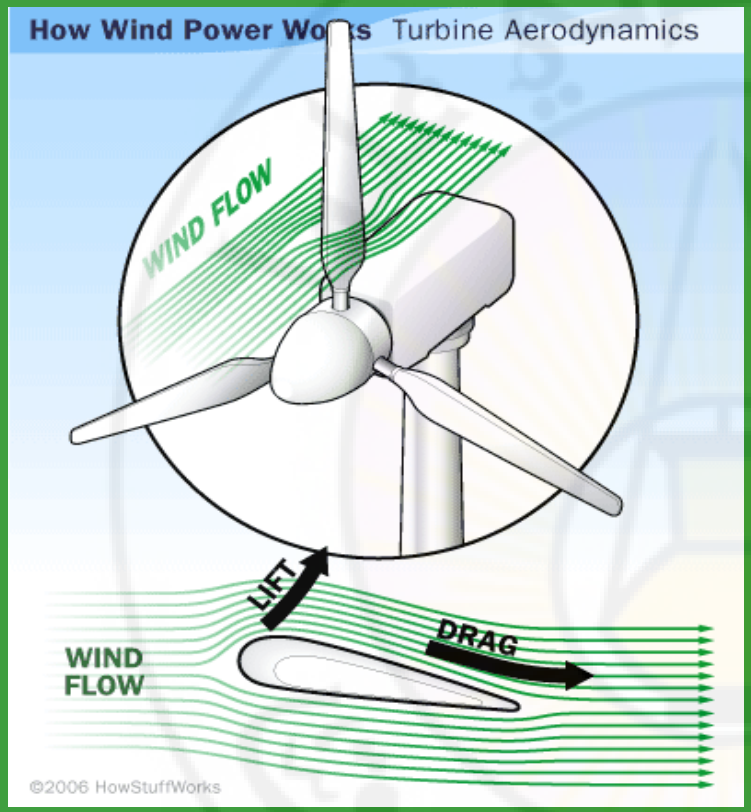
استنادا إلى الشكل ٨-٤ فان مكونات العنفة الريحية ذات المحور الأفقي تتألف من:

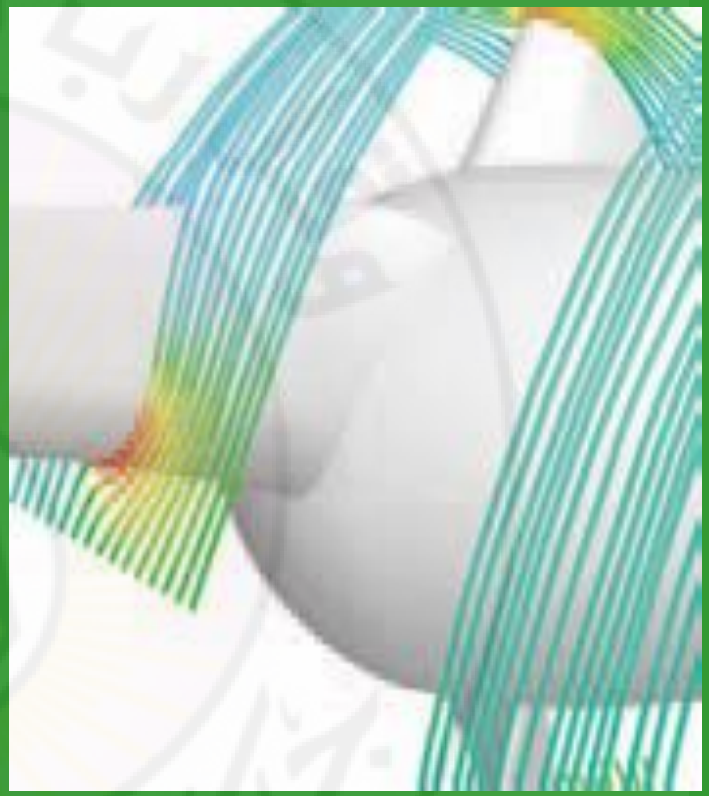
الصرة (Hub) – الدوار- Rotor - المحور الرئيسي - القمرة Nacelle – علبة السرعة – المولد الكهربائي Generator - وحدة التحكم الالكترونية - متحكم التوجيه – الكوابح – البرج - الكابلات الكهربائية - المحولة الكهربائية Transformer.

٨-٣ القوى المؤثرة على الشفرات (Blades):

إن القوتين الديناميكيتين 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 موازٍ لاتجاه الرياح كما هو مبين في الشكل ٨-٥.

إن شفرات العنفة تشبه بشكل كبير أجنحة الطائرة، حيث يتم تصميم سطحها بشكل انسيابي. وأحد وجوه الشفرة يتم تصميمه بشكل منحني قليلا أما الوجه الأخر فيكون مستوي نسبياً.

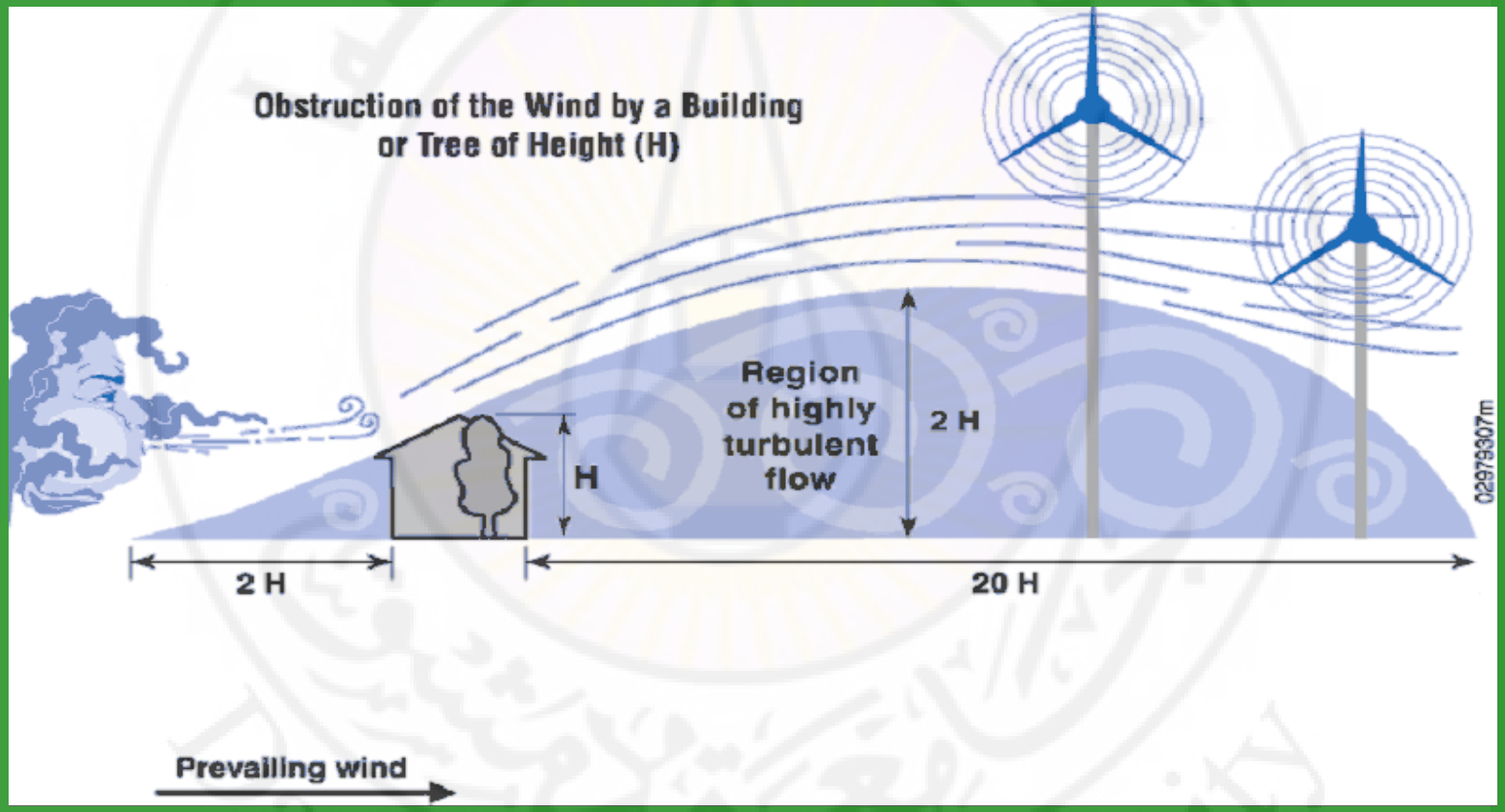




الشكل ٨ـ٥ : قوة الرفع وقوة الإعاقة اللتان تؤثران في حركة شفرات العنفة الريحية ذات المحور الأفقي

٨-٤ ظاهرة التدرج الريحي Wind Shear

خشونة الأرض والأجسام أو العوائق الطبيعية والاصطناعية المتواجدة على سطح الأرض تؤثر أيضا على تدفق الرياح كما هو مبين في الشكل ٨-٦ وتنشأ ما يسمى ظاهرة التدرج الريحي (Wind Shear).

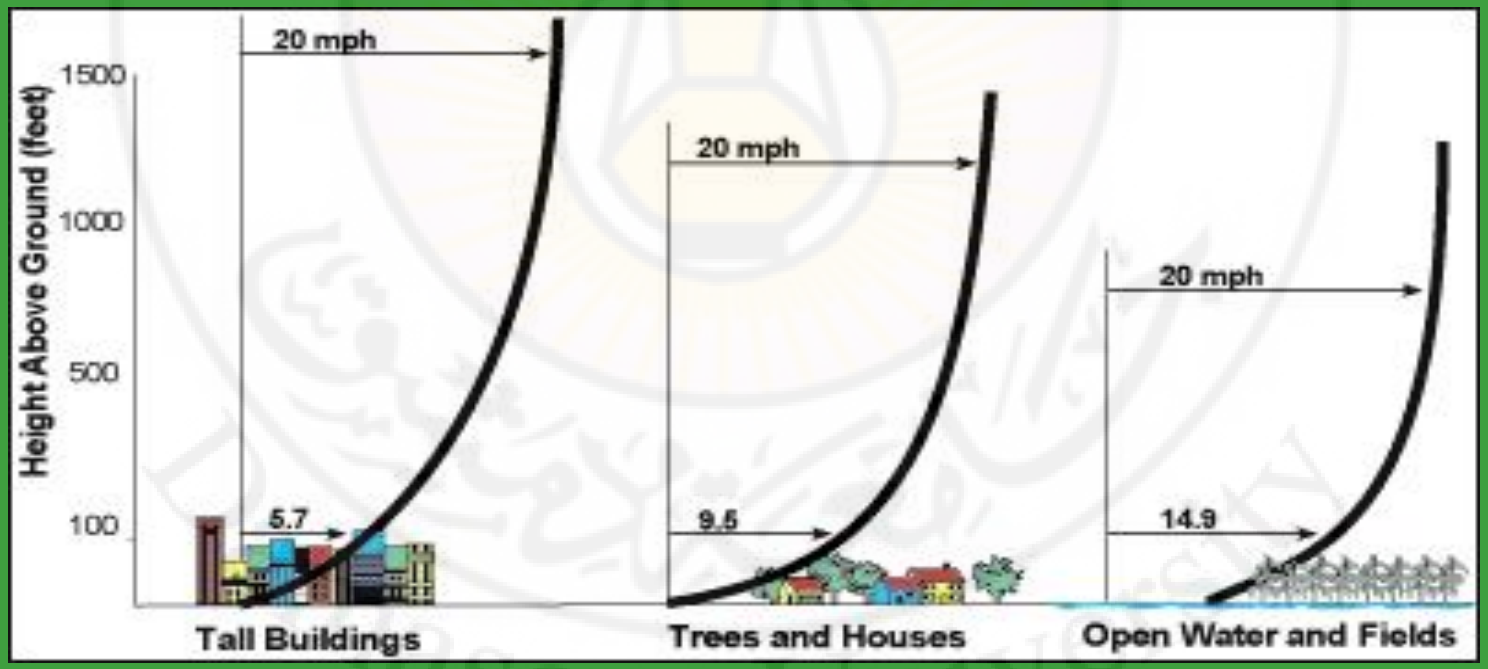


الشكل ٨-٦: أثر خشونة الأرض والأجسام المختلفة على تدفق الرياح في الموقع أو ما يسمى ظاهرة التدرج الريحي

وتفسر هذه الظاهرة على النحو التالي:

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 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 ٨-٧ والفقرة التالية توضح هذه الظاهرة أيضاً .

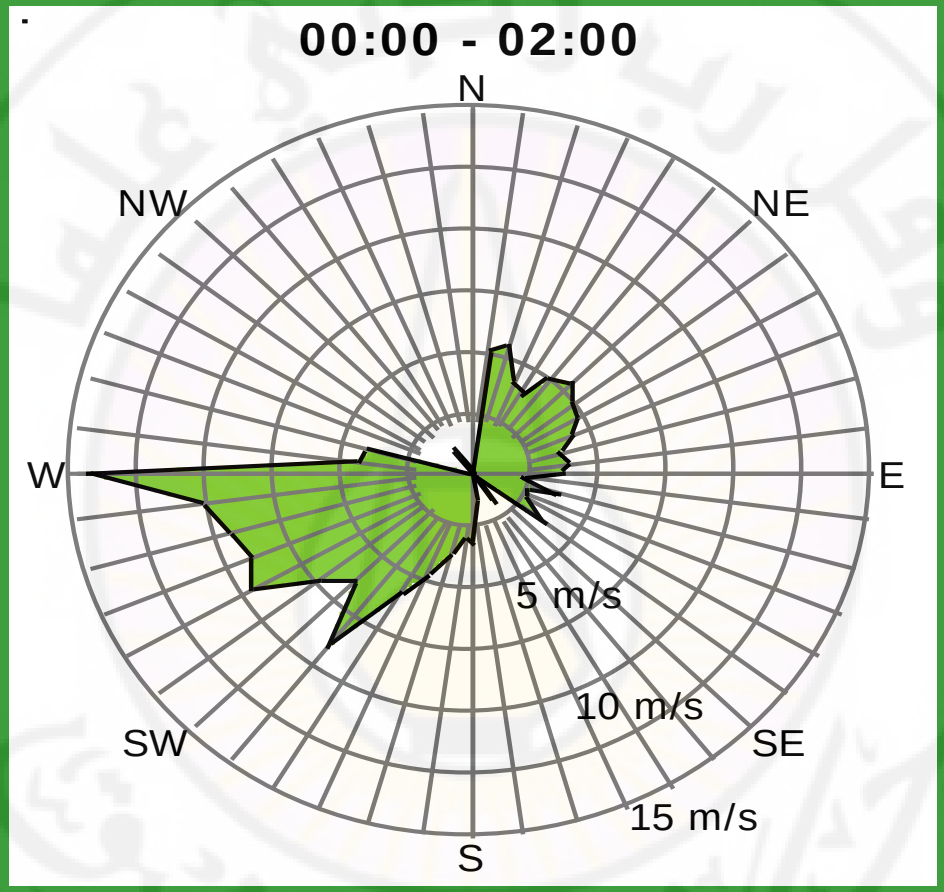


الشكل ٨-٧: أثر العوائق الطبيعية والاصطناعية على ظاهرة التدرج الريحي

٨-٥ وردة 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 تركب في أعلى البرج في محطات رصد الرياح حساسات مراقبة اتجاه الرياح . واستناداً لهذه معطيات هذه الحساسات يتم رسم ما يسمى وردة 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 ٨-٨ مثالاً على وردة الرياح في موقع ما.

ومن الجدير بالذكر أن أكبر نسبة لسرعات الرياح السائدة في سورية تأتي من الغرب وجنوب –غرب. ذلك بسبب الموقع الجغرافي لسورية على الضفة الشرقية للبحر الأبيض المتوسط. لذا يجب وضع هذه المسألة في الحسبان عند تصميم المزارع الريحية في المواقع المختلفة من القطر.



الشكل ٨ـ٨:مثال على وردة الرياح في موقع محدد يبين نسب سرعات الرياح السائدة في هذا الموقع على مدار العام حسب اتجاهها.

٨-٦ العوامل المؤثرة على اختيار ارتفاع الأبراج

يتم رفع العنفات الريحية ذات المحور الأفقي إلى ارتفاعات عالية و ذلك لسببين، الأول هو ظاهرة زيادة سرعة الريح في الموقع مع زيادة الارتفاع ، و الثاني هو ظاهرة اضطراب الريح 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:

$$P = 1/2 * \rho * A * V^3 \qquad (1\text{-}8)$$

حيث أن: P- الاستطاعة الكهربائية الناتجة من الاستطاعة الميكانيكية المقدمة من الرياح وتقدر بالوات (Watt) أو الكيلو وات أو الميغا وات.

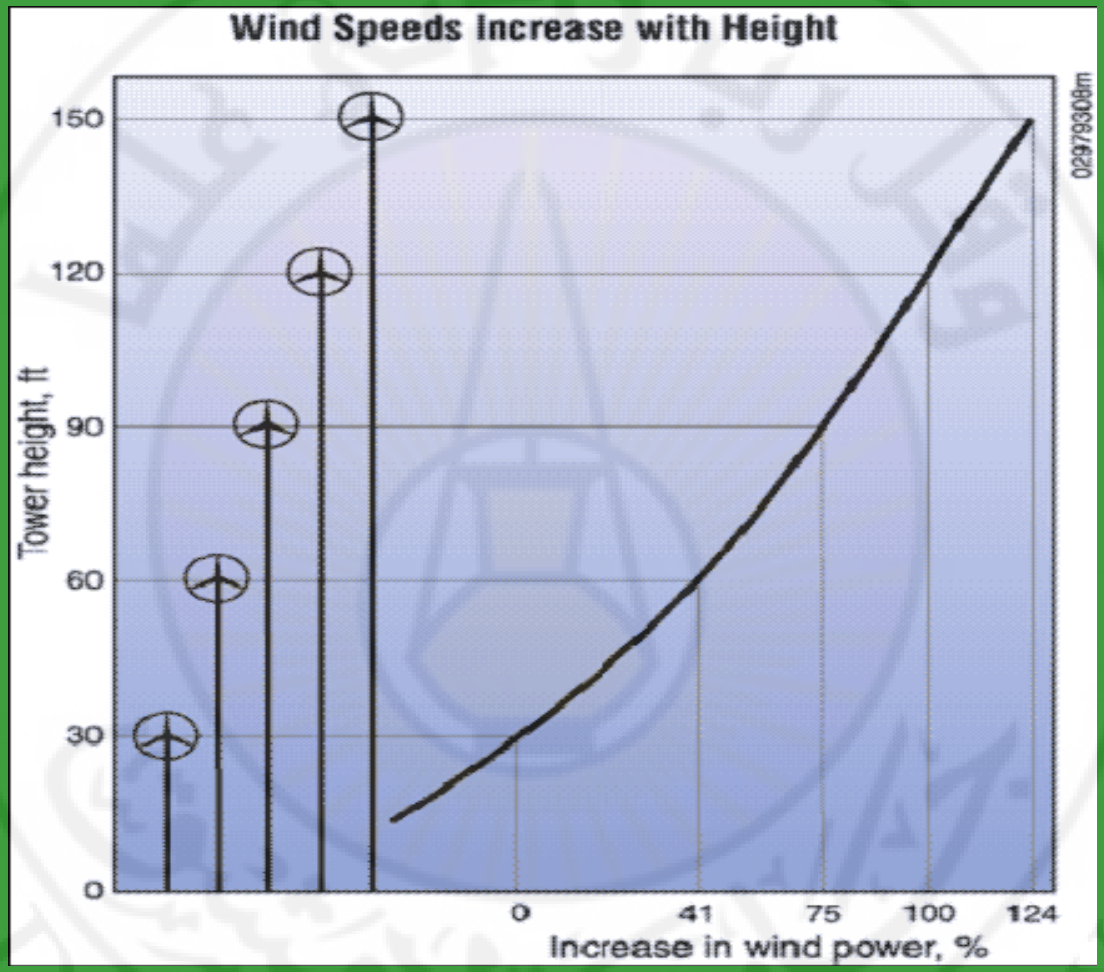
ρ- الكتلة الحجمية للهواء أو كثافة الهواء تقدر بـ (Kg/m^3).

A- مساحة سطح الدوار المجابه للرياح و يقدر بـ (m^2).

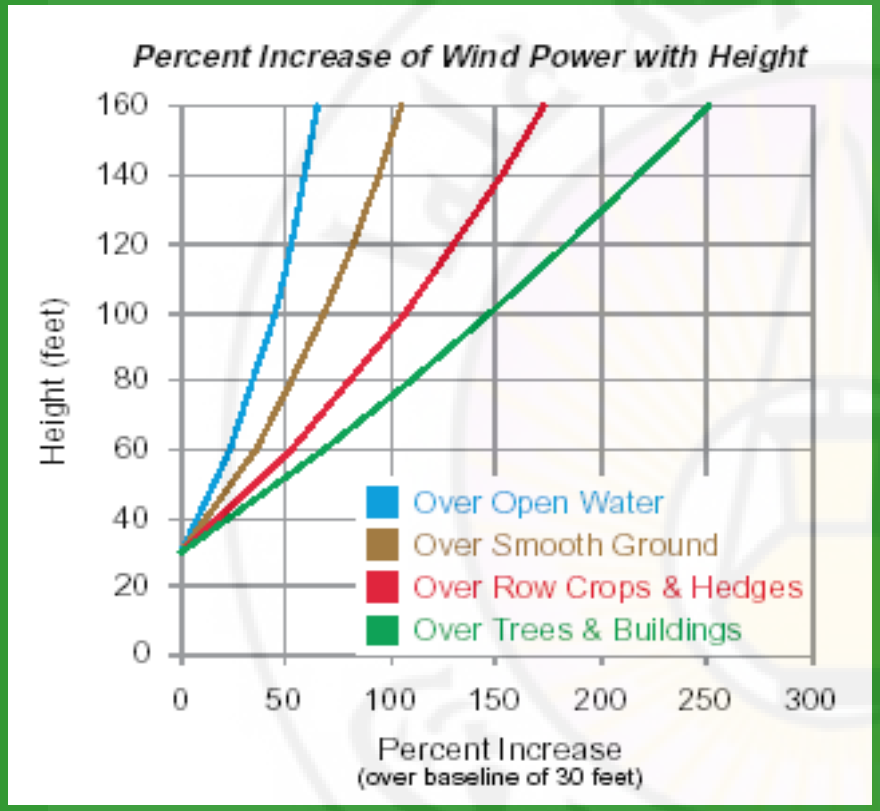
V- سرعة الرياح و تقدر بـ (m/sec).

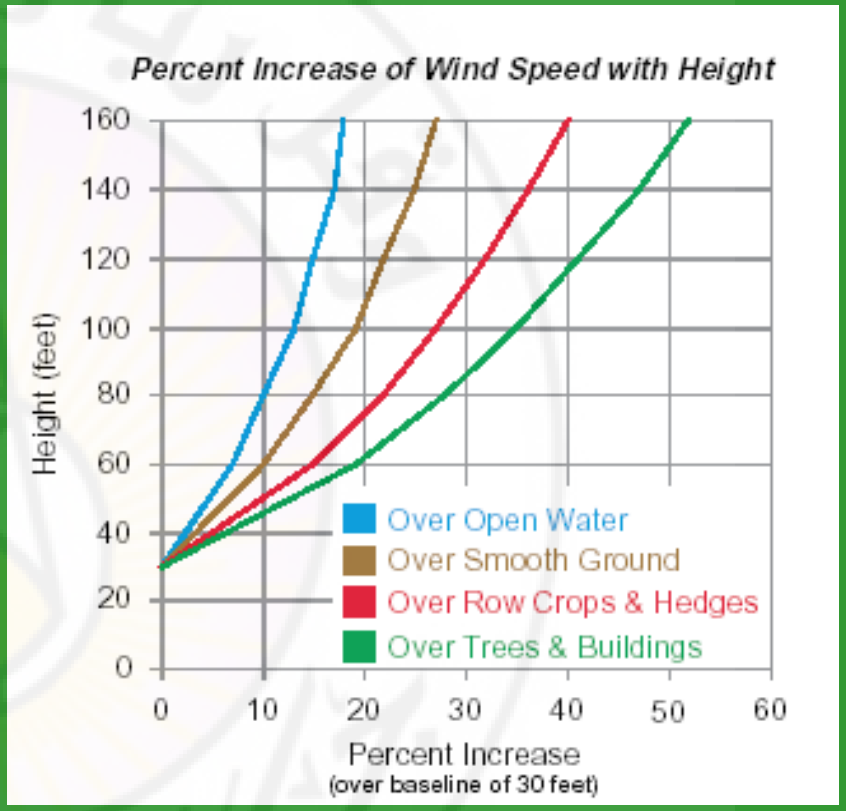
من هذه العلاقة نلاحظ أن أكثر العوامل المؤثرة على الاستطاعة هي السرعة ، حيث إن السرعة V مرفوعة في العلاقة للأس ٣، أي أنه أي زيادة بسيطة في السرعة يقابلها زيادة كبيرة في الاستطاعة.

و الشكل 8-9 يوضح زيادة الاستطاعة مع زيادة ارتفاع البرج. كما يوضح الشكل ٨-10 زيادة السرعة و الاستطاعة مع زيادة الارتفاع في مناطق مختلفة، وذلك حسب طبيعة الأرض في الموقع.



الشكل 8-9: أثر زيادة ارتفاع أبراج العنفات الريحية على زيادة استطاعتها





الشكل 8-10: اثر زيادة الارتفاع على زيادة السرعة(الشكل العلوي) وعلى زيادة الاستطاعة في الموقع،حسب طبيعة الأرض

8-٧ الأسس التصميمية للدوار Designing Principles of Rotor:

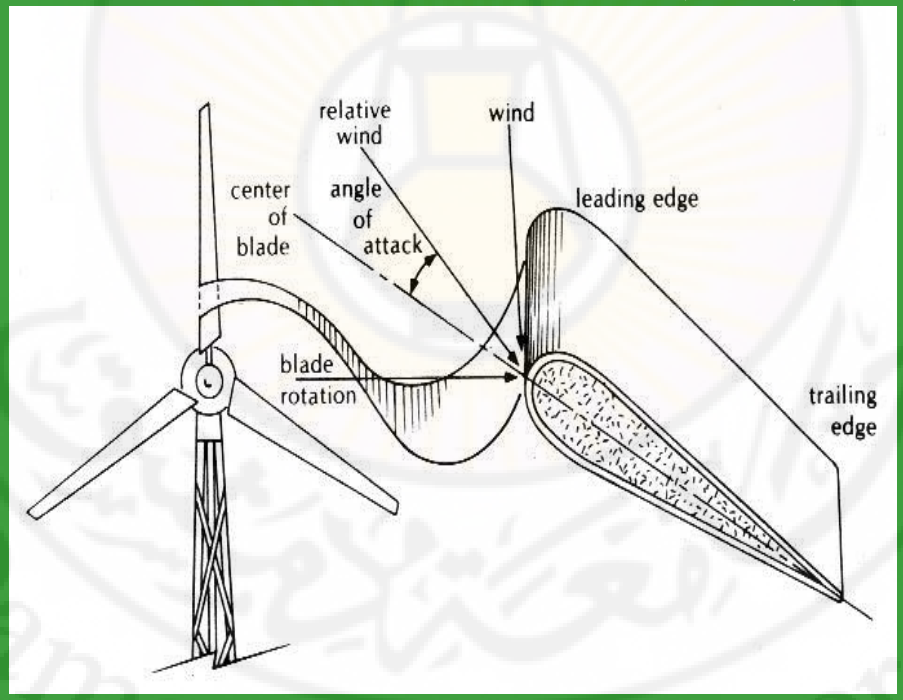
الدوار: هو الجزء الأهم في العنفة الريحية ذات المحور الأفقي. فالتصميم غير الجيد للدوار يقلل من مقدار الطاقة التي تنتجها العنفة الريحية. فالدوار يجب أن يقوم بتدوير المولد بالسرعة الكافية لتوليد أكبر قدر ممكن من القدرة الكهربائية لكن ضمن حدود السرعة التي لا تؤدي إلى حدوث أي أضرار على النظام تسببها السرعات 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.

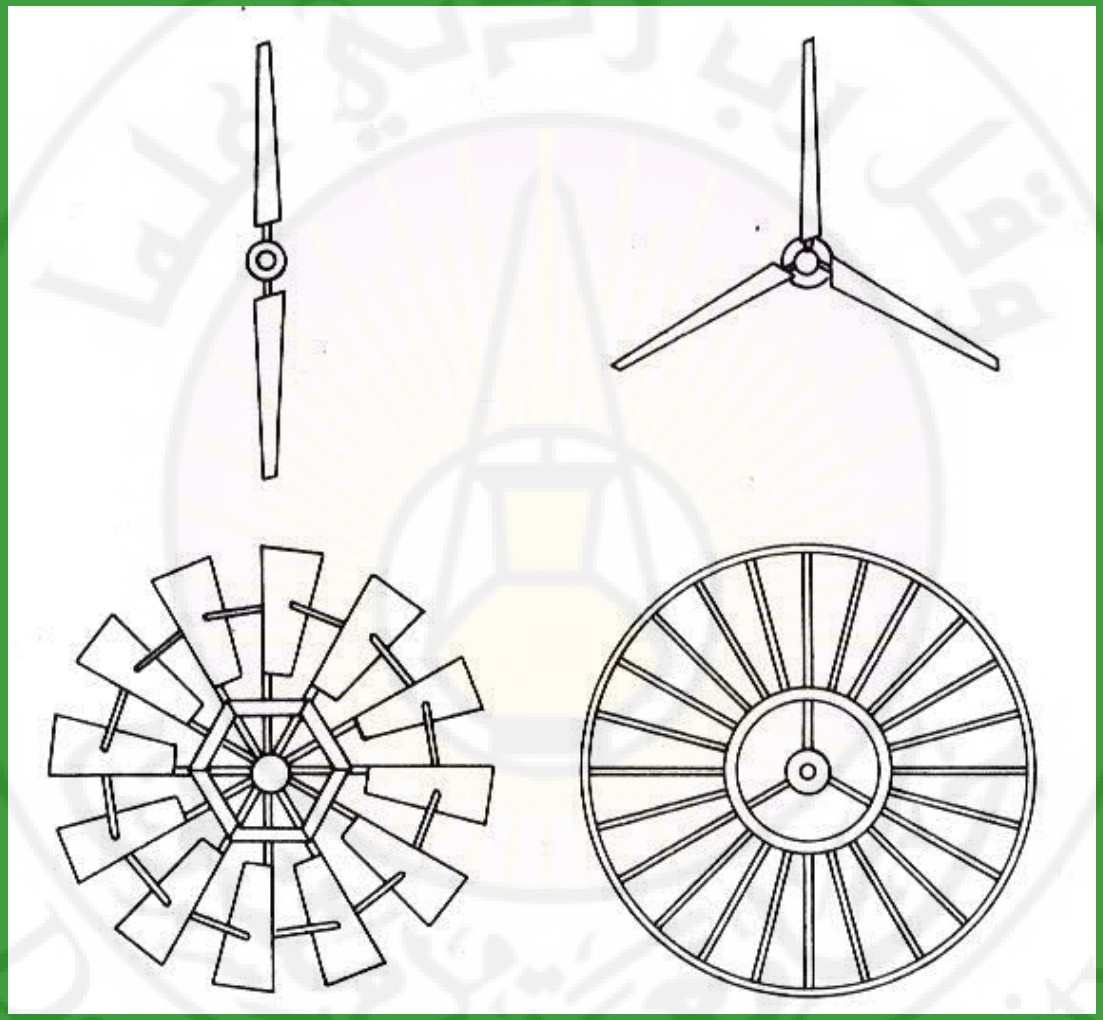
وكما هو الحال في جناح الطائرة، فإن الحافة الأمامية لشفرة الدوار تكون سميكة و مدورة، لكن تتناقص باتجاه الخلف لتصبح رقيقة جدا عند حافة الشفرة. و الجانب الأمامي للشفرة المواجه للريح يكون مستقيماً أو منحنياً قليلا أما الجانب الخلفي غير المواجه للريح فيكون منحنياً. و تثبت كل شفرة بحيث يكون لها وضع زاوي معين بالنسبة للريح أي على شكل زاوية وتسمى زاوية الهجوم. و كلما كانت زاوية الهجوم أصغر كلما ازدادت سرعة دوران الدوار. والشكل 8-١١ يوضح مقطعاً في جناح الشفرة.

عدد الشفرات في الدوار: إن نسبة السرعة المحيطية التي سنتعرض له بالتفصيل لاحقاً تتعلق أيضا بعدد شفرات الدوار. و يحدد ذلك النسبة بين مساحة سطح الدوار التي تواجه الريح بالنسبة للسطح الذي يتم عبره التدفق. فكلما ازداد عدد الشفرات في الدوار نقصت نسبة السرعة المحيطية. لذا فالدوارات ذات العدد الكبير من الشفرات تكون سرعة دورانها أقل من الدوارت التي لها نفس القطر و لكن عدد أقل من الشفرات و ويوضح ذلك الشكل 8-١٢.

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 ذات الثلاث شفرات والتي تقل سرعتها عن ذات الشفرة الواحدة وذات الشفرتين تعتبر الأكثر توازنا، ويمكن اعتبارها الأمثل من نواحي التصميم والمردود والقوى الميكانيكية المتناظرة على شفراتها الثلاث، كما تبين ذلك منحنيات كفاءة التحويل (المرود) في الشكل8-١٩ الوارد في الفقرة. لذلك أضحت العنفات ذات الثلاث شفرات الأكثر انتشارا في العالم.



الشكل 8-١١: مقطع في جناح الشفرة



الشكل ٨ـ١٢ : الدوارات ذات الشفرتين وثلاث شفرات ومتعددة الشفرات

٨-٨ 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 ويزداد 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:

٨-٨-١ 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 اجل تثبيت البرج. و الشكل ٨-١٣ يبين هذا النوع من الأبراج.

٨-٨-٢ الأبراج الشبكية Lattice Towers:

يستخدم هذا النوع في العنفات ذات الاستطاعات المتوسطة و الكبيرة أحيانا. 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 ٨-١٤ يبين هذا النوع من الأبراج.



الشكل ٨-١٣: الأبراج الأنبوبية المثبتة بأمراس شد Guy Towers



الشكل ٨-١٤: الأبراج الشبكية Lattice Towers

٨-٨-٣ 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 ٢٠% من كلفة المنشأة(العنفة) التأسيسية.

الشكل ٨-١٥ يبين صورة لهذه الأبراج، حيث يتم تصنيعها في مصانع التعدين على شكل مخروطي، بقطر قاعدة أكبر، وإذا زاد ارتفاعه (أي طوله) عن الحدود المسموح 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.



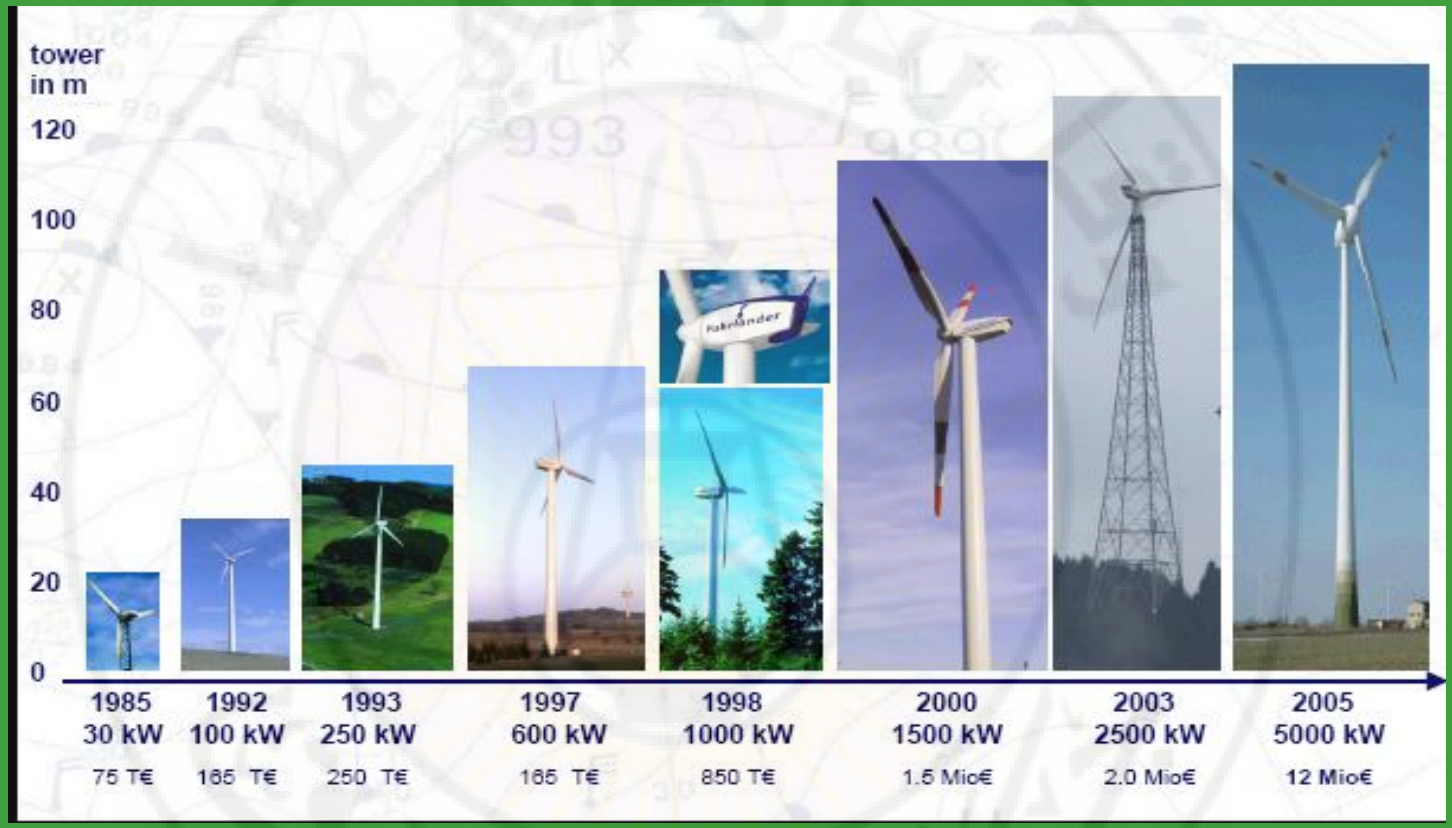
الشكل ٨-١٥: الأبراج الأنبوبية الفولاذية Tubular Steel Towers

٨-٩ معايير تصميم البرج Criterions 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 الريح 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.
- أن تتوافر 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 ٨-١٦ أنواع الأبراج الشبكية والأنبوبية و العنفات المركبة عليها ومختلف استطاعاتها التي تطورت وازدادت في السنوات الأخيرة بشكل ملحوظ، مع فكرة عن أسعار العنفات التقديرية تبعا لتطور استطاعاتها. وكما ذكرنا سابقا فقد وصل ارتفاع الأبراج الاسطوانية في التصميمات الحديثة إلى ما يزيد عن ١٦٠ مترا وبلغت استطاعة بعض العنفات التي جرى تصميمها مؤخرا ٨ ميغا وات. ون المتوقع زيادة الاستطاعة للعنفة الواحدة خلال السنوات القادمة إلى ١٠ ميغا وات مع تطور استخدام المواد ذات الناقلية العالية (Super Conductivity) في المولدات الكهربائية.

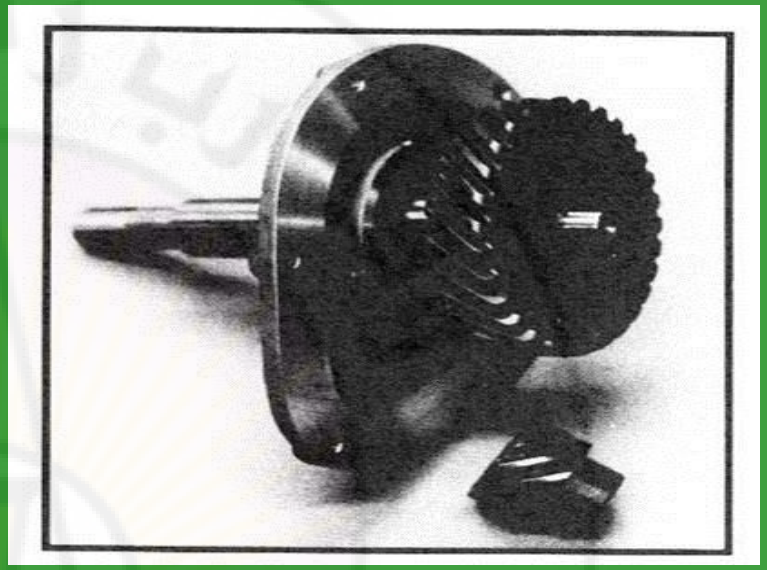


الشكل ٨-١٦ :أنواع الأبراج الشبكية والأنبوبية وتطور ارتفاعاتها وأسعار العنفات التقديرية

٨ـ١٠ الأسس التصميمية لعلبة السرعة Designing principles of Gearing Box

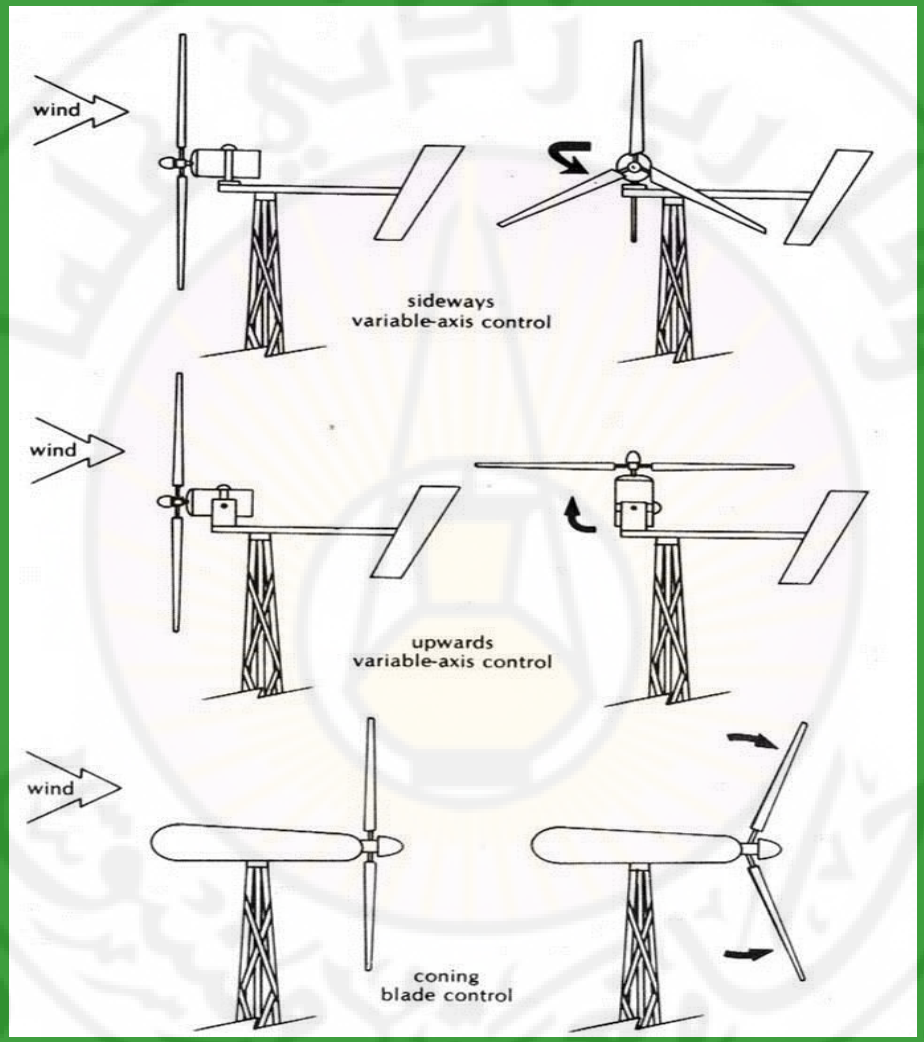
إن الاستطاعة الناتجة من المولد تقريبا متناسبة مع سرعة دوران المولد. و معظم المولدات تصمم لتعمل عند سرعة دوران ثابتة إما تكون ١٨٠٠ أو 3600 rpm (هذا بالنسبة للمولدات التي تعطي تيار متناوب بتواتر 60Hz). هذه السرعات القياسية التي تصنع على أساسها المولدات الكهربائية، و عند استخدام هذه المولدات في أنظمة طاقة الرياح فإن المشكلة تظهر. فإن معظم الدورات في أنظمة طاقة الرياح تدور من ٢٠٠ و حتى 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 ٥، أي يجب أن تزيد سرعة الدوران على محور الخرج خمسة أضعاف سرعة الدوران على محور الدخل لعلبة 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 ستكون200W بدلاً من 1Kw. إن نسب نقل الحركة لعلب السرعة المستخدمة في أنظمة طاقة الرياح تتراوح بين ٢/١ و حتى ١٠٠/١.

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، مثلا 180 rpm، و تكون المولدات في هذه الحالة أكبر حجما و وزنا بالمقارنة مع استخدام وصل الحركة عن طريق علبة السرعة.



الشكل ٨-١٧: علبة السرعة.

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 مع الرياح كما في الشكل ٨-١٨ الذي يبين أيضاً عدة تصميمات للعنفات الريحية التي تم اختبارها قبل أن يتم اعتماد العنفة ذات المحور الأفقي والدوار الأمامي بشكل عام.



الشكل ٨-١٨ عدة تصميمات للعنفات الريحية التي تم اختبارها قبل أن يتم اعتماد العنفة ذات المحور الأفقي والدوار الأمامي بشكل عام

الجدول ٨-١ : علاقة استطاعة خرج العنفة الريحية بقطر الدوار

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	

٨-١١ 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 ١٦/٢٧ حوالي ٠.٥٩٣ ويعرف بحد بيتز (Betz limit)

٨-١١-١ العوامل التي تؤثر في (Cp):

أولاً : السرعة النسبية لطرف الشفرة Tip- speed ratio (λ)

وهي النسبة بين السرعة الخطية لطرف الشفرة إلى سرعة دخول الرياح u_1

$$\lambda = \omega * r / u_1 \qquad (3\text{-}8)$$

حيث:

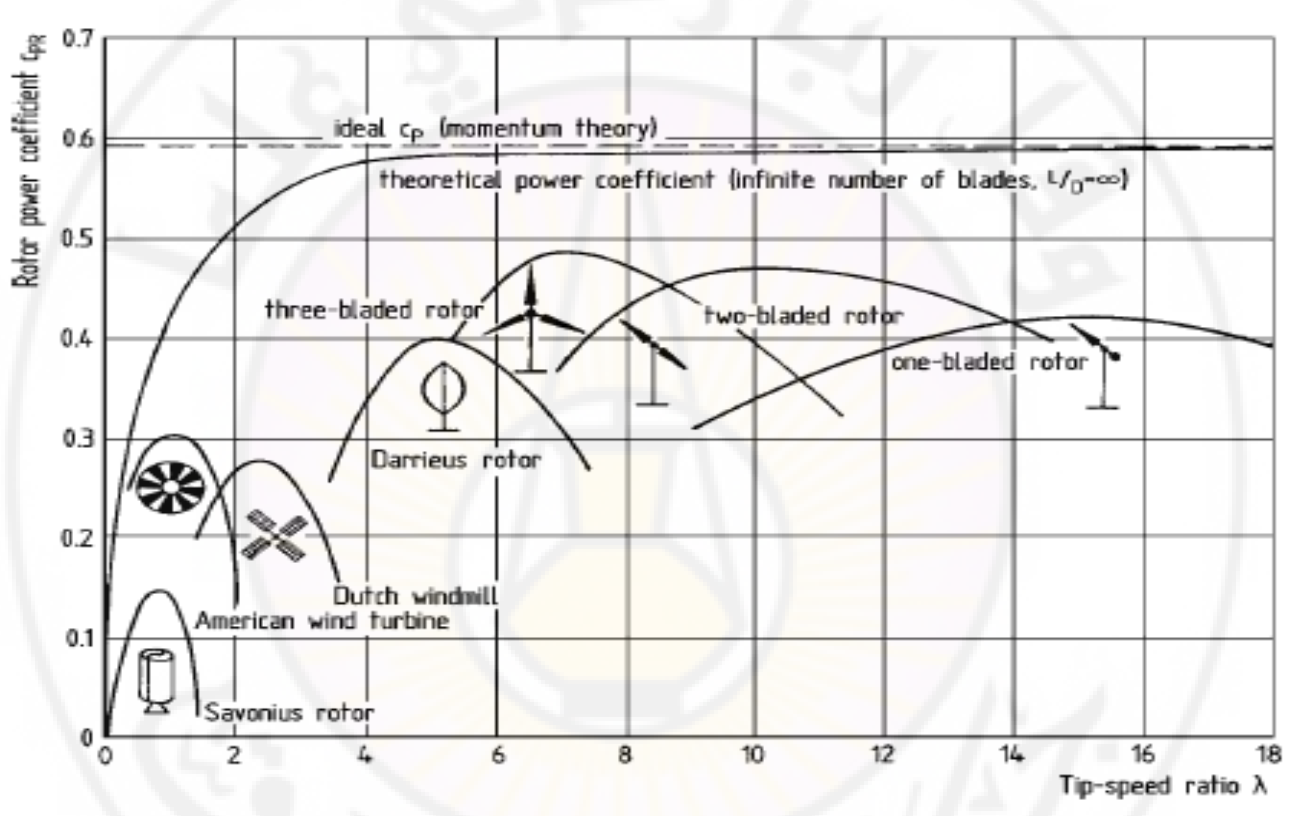
ω - هي السرعة النسبية لطرف الشفرة

λ - السرعة الزاوية لطرف الشفرة

r - هو نصف قطر الدوران

ويوضح الشكل 8-١٩ تغير مقدار Cp مع تغير السرعة النسبية لطرف الشفرة لأنواع مختلفة من العنفات الريحية.

ويمكننا العمل عند أقصى قيمة لكفاءة التحويل (المردود) (Cp) وذلك بالمحافظة على تغير سرعة طرف الشفرة مع تغير سرعة دخول الريح إما عن طريق تغيير الحمل أو تغيير زاوية الخطوة للشفرة، ولكن ذلك يصعب تطبيقه عمليا لما يحتاج إليه من تعقيد في التصميم وارتفاع التكاليف.



الشكل 8-١٩ : منحنيات تغير كفاءة التحويل Cp مع تغير السرعة النسبية.

ثانياً: كفاءة تصميم الشفرة

تعتمد قيمة معامل كفاءة التحويل للمروحة (Cp) على تصميم الشفرة. ويتضح ذلك من الشكل 8-٢٠ حيث يبين نماذج لتصميمات مختلفة للعضو الدوار وكيف تتغير قيمة (Cp) تبعا لذلك.

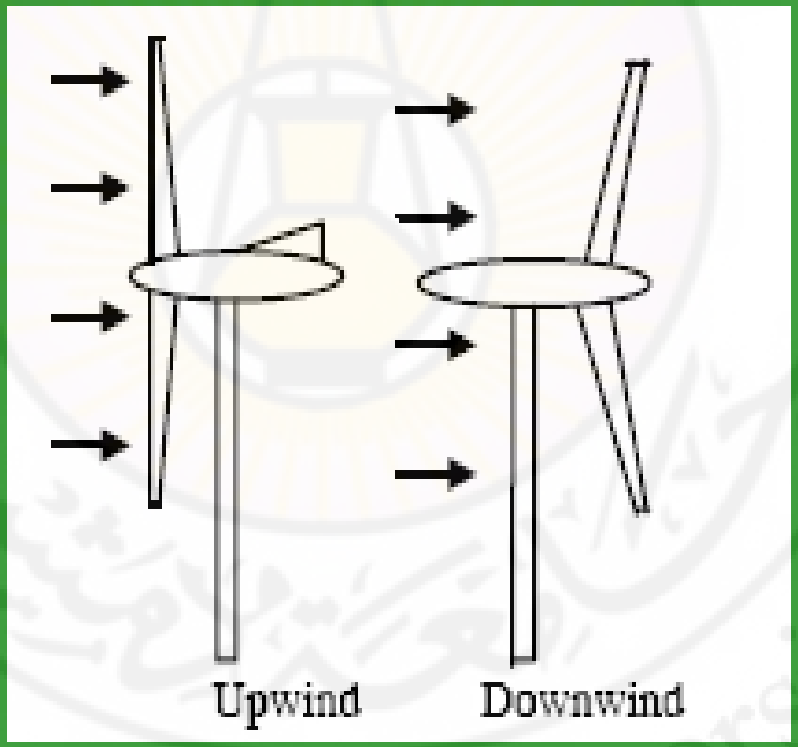
وكما يبين الشكل ٨-٢٠ فإن عدد الشفرات في العنغات ذات المحور الأفقي يؤثر على زيادة سرعة الدوار ومعامل كفاءة التحويل وبالتالي مردود العنفة. فأكبر نسبة للسرعة الطرفية تكون لدى العنفة بشفرة واحدة مع ثقل معاكس، بينما أفضل مردود يكون لدى العنفة بثلاث شفرات . ونلاحظ في هذا الشكل أن قيمة المردود في إحدى أنواع 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 ٨-١٩ يبين أن المردود الفعلي لدى جميع أنواع التصميمات في العنفات الريحية لا يتجاوز في حال من الأحوال ٠.٥. بينما قيمة المردود النظري أو ما يسمى معامل كفاءة تحويل طاقة الرياح تقترب من ٠.٦ كما هو مبين في هذا الشكل. وتساوي تحديداَ٠.٥٩٣ كما أشرنا سابقاَ.

٨ـ١٢ المواصفات العامة للعنفة الريحية ذات المحور الأفقي:

أولاً: نوع العنفة

ـ تصمم العنفات الريحية بحيث تكون عادة أمامية الدوار وتسمى العنفات رافعة الرياحUpwind. وتصمم أحيانا خلفية الدوار وتسمى العنفات خافضة الرياحDownwind، إلا أن هذه الأخيرة لم تنتشر بسبب حدوث اضطراب في حركة الدوار نتيجة لما يسمى ظاهرة ظل البرج Tower Shadow. والشكل ٨ـ٢٠ يبين مخططاً لهذين النوعين من العنفات.



الشكل ٨ـ٢٠ : عنفة ذات دوار أمامي وعنفة ذات دوار خلفي

ثانياً: التحكم بالانحراف

يتم التحكم غالبا بزاوية ميلان الشفرة وهي ذات تحكم فعال بالانحراف Pitch Control وذلك عندما تزداد سرعة الرياح عن القيمة التي تبدأ العنفة 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 ايقاف العنفة والتي تساوي عادة ٢٥ مترا على الثانية.

ثالثاً: عدد الشفرات

يصمم دوار العنفة الريحية كما ذكرنا سابقاً بثلاث شفرات وأحيانا بشفرتين ونادرا بشفرة واحدة مع ثقل معاكس. وبالإضافة إلى ما شرحنا سابقاً فإن الدوار ذو الثلاث شفرات أكثر توازناً.

رابعاً: قطر الدوار

قطر الدوار يجب أن يتناسب مع استطاعة العنفة. وعلى سبيل المثال يساوي 90m-100m من أجل عنفة ذات استطاعة المولد الاسمية 3MW. وتجدر الإشارة إلى أن حسابا ت قطر الدوار أكثر تعقيداً وتتعلق بمستوى سرعات الرياح في الموقع.

٨-١٣ أجزاء العنفة ذات المحور الأفقي:

٨-١٣-١ القمرة The Nacelle:

يبين الشكل ٨-٢١ مقطعاً عرضياً للقمرة، والتي تركب أعلى البرج.

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 جزئيين رئيسيين :

١-الجزء الأمامي الحديدي : والذي يشكل قاعدة تحمل المولد والتروس(علبة السرعة) ومحور دوران المولد والمحور الرئيسي (Main Shaft) .

٢-الجزء الخلفي الذي يكون متصلا مع آلية التوجيه (Yaw Drive).



الشكل ٨-٢١: مقطع عرضي للقمرة

٨-١٣-٢ العناصر الموجودة داخل القمرة:

١- المحور الرئيسي Main Shaft

٢- علبة التروس Geer Box

٣- المولد الكهربائي

٤- نظام التحكم بالتوجيه Yaw Drive

٥- نظام الكبح

٦- نظام التبريد والتهوية

٨-١٣-٤ المحولة Transformer

٨-١٣-٥ الدوار ويتألف من:

١- الصرة Hub.

٢- منظم الميل أو انحراف الشفرة Pitch Control.

٣- النظام الهيدروليكي.

٤- الشفرات.

٨-١٣-٦ التنظيم والتحكم:

١- توصيف السرعة المتغيرة .

٢- المتحكم المتعدد المهام

المتحكم MPيقوم 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 القمرة حسب اتجاه الرياح
- التحكم بالميل الأمثل للشفرة
- التحكم بالاستطاعة 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

٨-١٣-٧ الحساسات والحمايات:

يتم الحصول على بيانات التحكم بالعنفة وإنتاج الطاقة بواسطة حساسات مختلفة:

- حساسات الظروف الجوية : اتجاه وسرعة الرياح ودرجة الحرارة.
- 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 - .

- حساسات الرياح.
- كواشف الدخان.
- كواشف الصواعق.
- الـGPS(مؤقتات الزمن الحقيقي).
- الحماية من القوس الكهربائي.
- الحماية من الصواعق.
- الحماية الضوئية.
- درجة الحرارة.

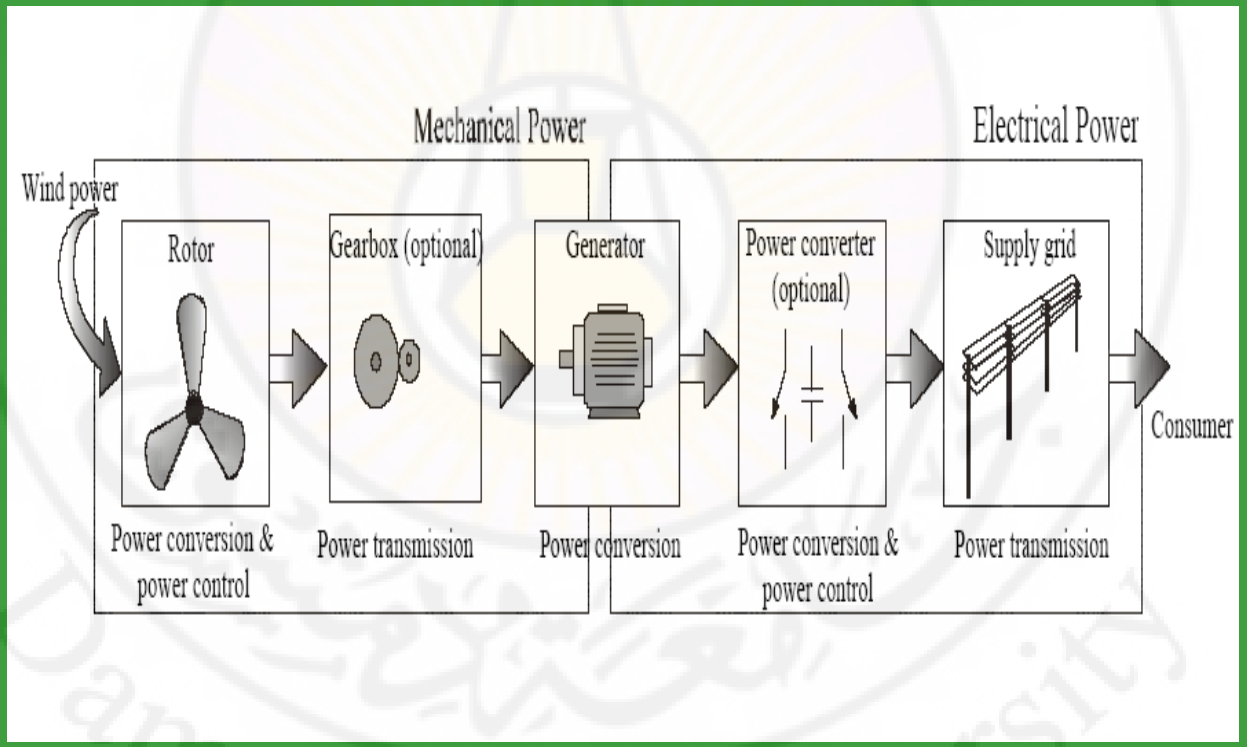
جامعة دمشق
كلية هـ.م.ك
قسم هندسة الطاقة الكهربائية

الفصل التاسع
نظم التبديل في العنفات الريحية
Conversion Systems in Wind Turbines

محاضرات أ.د.كمال ناجي
شعبة طاقات متجددة

٩-١ 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 وعلبة السرعة. حيث يتم تحويل هذه الطاقة حسب نظام التبديل المختار، ثم تنقل إلى الشبكة الكهربائية العامة والمستهلك النهائي كما في الشكل٩-١.



الشكل ٩ -١: آلية تحويل الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة كهربائية

٩-٢ أنظمة التبديل الكهربائية Electrical Conversion Systems

٩-٢-١ عوامل أساسية Basic Factors :

العوامل الأساسية التي تشرح التقانة الكهربائية والمتعلقة بتبديل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية هي:

١- نوع الخرج:

أ- تيار مستمر DC

ب- تيار متناوب وتردد متغير AC & variable Frequency

ج- تيار متناوب وتردد ثابت Frequency AC & constant

٢- السرعة الدورانية للعنفة الريحية:

أ- سرعة ثابتة constant speed

ب- سرعة ثابتة تقريباً nearly constant speed

ج- سرعة متغيرة variable speed

٣- 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 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 المقومrectifier للحصول على تيار مستمر (DC)مباشرة.ثم يتم استخدام عاكس inverter للحصول على تيار متناوب (AC) بتوتر وبتردد ثابتين، وذلك من خلال نظم تبديل الكترونية التي سيتم شرحها لاحقاً.

التوليد الكبير للقدرة الكهربائية من طاقة الرياح يجب أن يكون بتوتر(جهد) وتردد 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:

١ـ آليات ميكانيكية للحصول على سرعة ثابتة لتشغيل مولدات تزامنية للتيار المتناوب عن طريق:

أـ مسننات ذات نسب تحويل متنوعة.

بـأنظمة مسننات لولبية.

جـ نظام التحويل الهيدروليكي.

٢ـ تقنيات كهربائية للحصول على تردد ثابت:

تنظيم التوتر والتردد في المولد.

حلقة AC –DC-AC:

٣ـ وسائل توليد خاصة عن طريق:

أـ مولدات تيار متناوب ذات مجمع commutation Generators (AC).

بـ مبدلات تردد دوارة.

جـ معدل سعة الموجة ومبدلات تردد.

دـ مجال التعديل وتقنيات إزالة التعديل.

(١) مفاتيح تشغيل عالية تردد.

(٢) مفاتيح تشغيل منخفضة التردد.

إلا أن جميع وسائل التوليد المذكورة في هذه الفقرة انقرضت بفضل تطور الكترونيات القدرة الكهربائية Power Electronics. ويستخدم حالياً إما نظم التوليد الكهربائي المباشر أو نظم التوليد غير المباشر عن طريق المبدلات الالكترونية أي حلقة AC –DC-AC والتي سيتم شرحها لاحقاً.

٩-٣ مخطط أو منحني الاستطاعة:

إن العمل عند سرعات رياح متغيرة يتطلب نظام قيادة الكترونية 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 التوافقيات 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 ٩-٢ يبين منحني 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 Vr(Vn) و سرعة الرياح المسموح بها وتسمى سرعة الخروج Vc-o خطياً ومساوياً للاستطاعة الاسمية للمولد Pr ويرمز لها عادة Pnوذلك باستخدام نظام التحكم بميل الشفرات Pitch Controlالتي سيتم شرحها بالتفصيل لاحقاً.

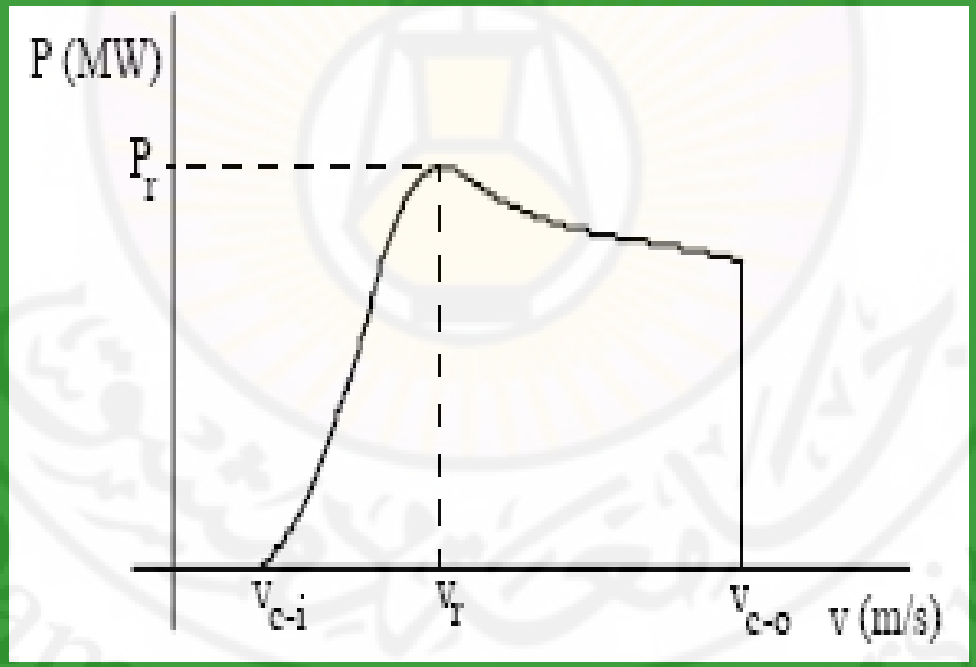
حيث:

Pr(Pn): الاستطاعة الاسمية وهي أكبر استطاعة يمكن أن تحصل عليها العنفة.

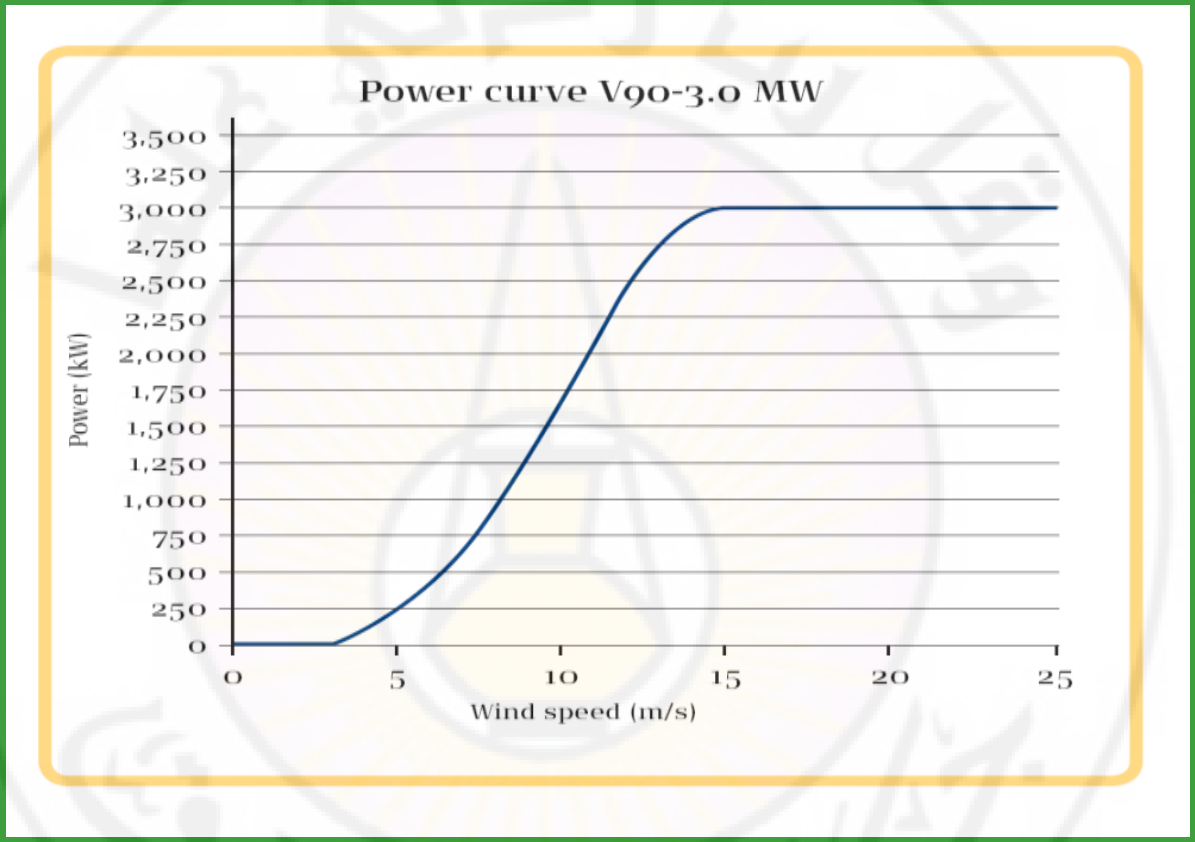
Vr(Vn): السرعة الاسمية التي صممت عليها العنفة الريحية للحصول على الاستطاعة الاسمية.

V c-i: أدنى سرعة يمكن للعنفة العمل عليها لتوليد الطاقة وتسمى سرعة بدء التشغيل(cut in speed) وتتراوح بين ٣-٤ متر على الثانية.

Vc-o : سرعة القطع العليا وهي أعلى سرعة مسموح للعنفة العمل عندها وتسمى سرعة الإيقاف (cut off speed) وتساوي عادة ٢٥ متر على الثانية.



الشكل ٩-٢ : منحني الاستطاعة للمولد الكهربائي في العنفة الريحية



الشكل ٩-٣ منحني الاستطاعة لعنفة محددة من طراز V90 باستطاعة ٣ ميغاوات والتي يستخدم فيها نظام التحكم بميل الشفرات

٩-٤ المولدات المستخدمة في العنفات الريحية

إن التطور التقني الكبير الذي 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 ١٥-٥% 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 وسنستعرض هنا المولدات الكهربائية الأكثر استخداماً في العنفات الريحية.

٩-٤-١ مولدات التيار المستمر :

٩-٤-١-١ الأجزاء الرئيسية لمولد التيار المستمر:

يعرف مولد التيار المستمر بأنه جهاز كهرطيسي أوكهرميكانيكي يقوم بتحويل القدرة الميكانيكية إلى قدرة كهر بائية بشكل تيار مستمر و يتألف من جزئيين رئيسيين:

أ- الجزء الثابت: وهو الجزء الحامل لكافة أجزاء الآلة و هو الجزء الذي يؤمن الوسط المغناطيسي اللازم لتحويل القدرة من ميكانيكية إلى كهر بائية .

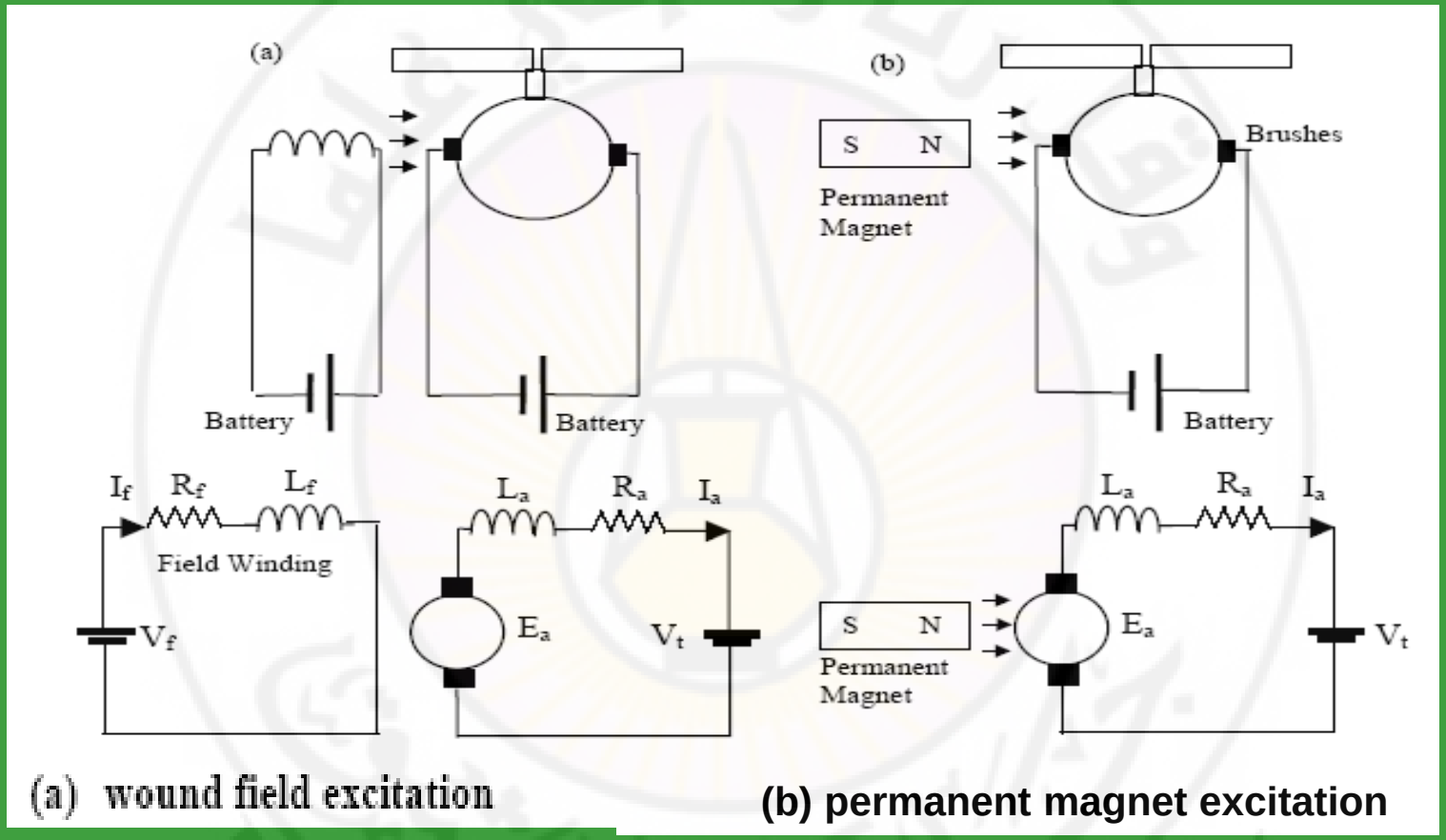
و يتكون الجزء الثابت من ملفات الأقطاب المسئولة عن توليد القوة المحركة الكهربائية ومن نوى الأقطاب و الإطار الخارجي و يعرف الجزء الثابت بالمحرض .

ب – الجزء الدائر: و هو الجزء الذي تتولد في نوا قله 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 نظرا" 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 ريحية 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 واهتراء 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.

٩-٤-١-٢ 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 السيالة المغناطيسية أما استخدام المغناطيس الدائم فلا يحتاج لهذا المنبع و بالتالي فإن مردود المولد الذي يعتمد على المغناطيس الدائم يكون أعلى.



الشكل ٩ـ٤ : المخططات الكهربائية لمولدات التيار المستمر ذات التهييج المستقل والتهييج بالمغناطيس الدائم التي استخدمت في العنفات الريحية على استطاعات صغيرة

كما يوجد طريقتان لتغذية ملف التهييج. إما أن يكون المنبع مستقلاً و يسمى المولد ذ و التهييج المستقل أو تتم التغذية من المتحرض و يسمى المولد ذو التهييج التسلسلي. وهذا مبين أيضاً في الشكل ٩ـ٤ .أما بقية الأنواع للمولدات المستمرة فهي ليست في مجال بحثنا .

و فيما يلي المعادلات التي تحكم مولد التيار المستمر في الحالة المستقرة :

$$\Phi = Kf \cdot If \qquad (1\text{-}9)$$

$$If = Vf / Rf \qquad (2\text{-}9)$$

$$Ea = Kc. \Phi.Wr \qquad (3\text{-}9)$$

$$Ea = Vt + Ia.Ra \qquad (4\text{-}9)$$

$$T = K r . \Phi. Ia \qquad (5\text{-}9)$$

$$Pout = Vt . Ia \qquad (6\text{-}9)$$

حيث :

If: تيار التهييج A

Vf : توتر التهييج V

Rf : مقاومة ملف التهييج Ω

Ea : القوة المحركة التحريضية المتولدة في المتحرض V

Wr : السرعة الزاوية للمتحرض rad/sec

Vt : التوتر على ملفات المتحرض V

Ia : تيار المتحرض A

Ra : مقاومة المتحرض Ω

T : العزم الكهربائي N.m

Pout : استطاعة الخرج KW

Kf , Kr , Kc: ثوابت المولد و تتعلق بالتصميم الهندسي و يمكن تحديدها بالقياس.

في المولدات الريحية يفضل أن يكون لدينا القدرة على التحكم بالعزم 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 ثايريستورية أو مقاومة متغيرة.

٩-٤-١-3 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 تتجاوز10KW. 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 رفد الشبكة العامة للكهرباء، و إنما بقيت مجالات استخدامها محصورة بالتغذية المستقلة للمنازل ومضخات المياه و غير ذلك.

٩-٤-٢ المولدات التزامنية Synchronous Generators:

9-٤-٢-١ بنية المولد التزامني Synchronous Generator Structure:

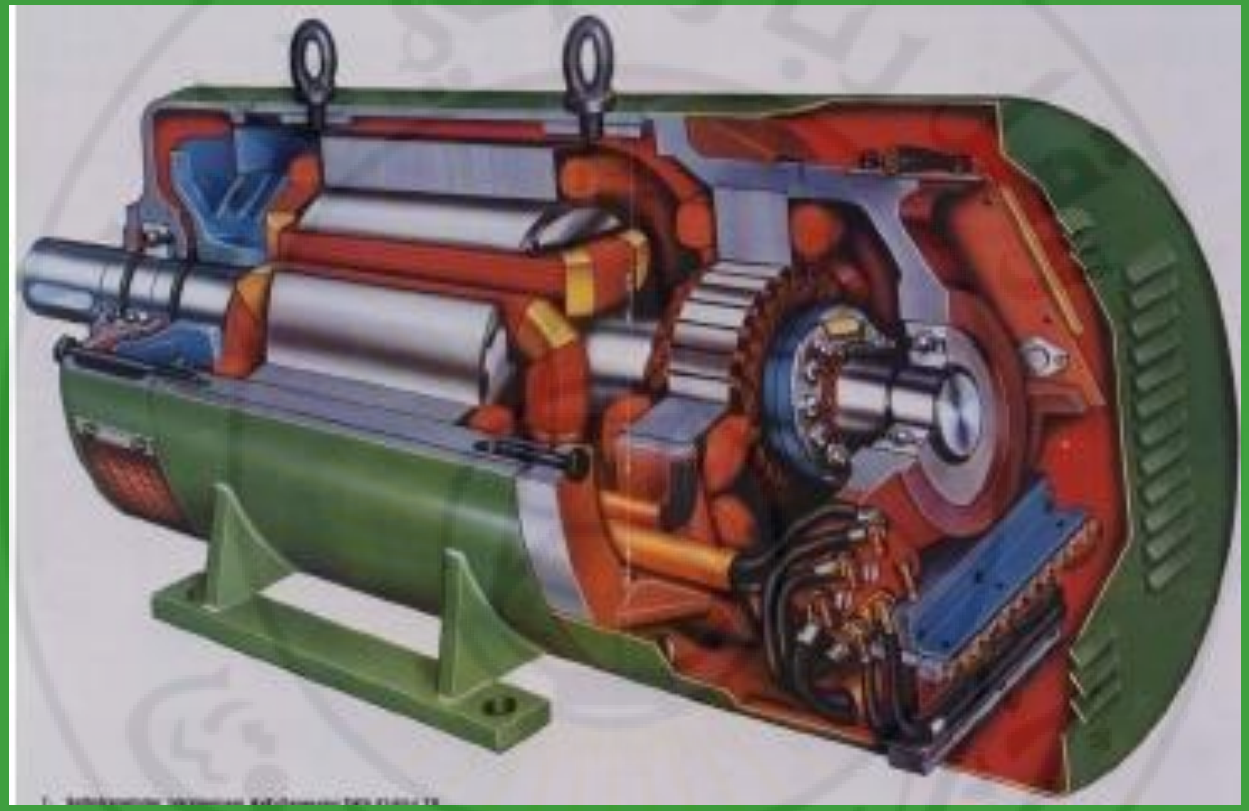
يتألف المولد من الثابت الذي يحمل مجموعة ملفات تشكل ثلاثة أطوار وهي التي تغذي الحمل، والدائر الذي يؤمن الحقل المغناطيسي. تتم تغذية الدائر من مغناطيس دائم أو من منبع تيار مستمر يمر في ملفاته.

هذه المولدات تعمل بسرعة ثابتة وتملك مميزات قاسية ولكن وجود علبة السرعة والعمل على سرعات متغيرة يظهر بعض عيوب المولدات التزامنية في التطبيقات الثابتة التردد. وتتعلق سرعة الدوران للدائر بتردد الثابت وعدد الأقطاب حسب العلاقة.

$$N\ (r.p.m) = 12 \times frequency / poles$$

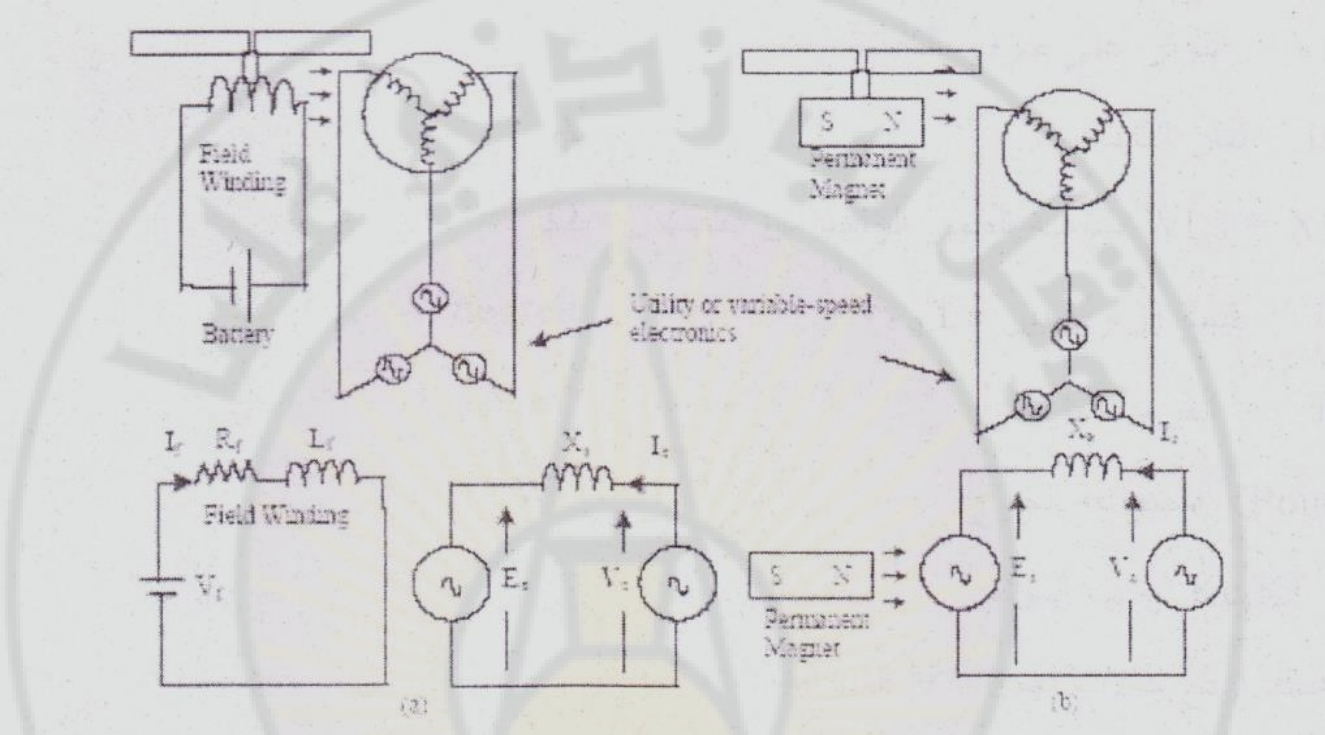
ومقارنة مع الآلة التحريضية يعتبر المولد التزامني أكثر كلفة. الشكل 5-5 يبين مقطعاً لمولد تزامني ذاتي التنظيم. بمتابعة الرموز الواردة في هذا الشكل من اليسار إلى اليمين، يبين المقطع للمولد التزامني المهيج exciter، الثابت، المحور الذي يحمل مراوح التبريد، الرولمانات، القاعدة وعلبة الوصل المشابهة للمولد التحريضي.

من المعروف أن المولدات التزامنية كبيرة الاستطاعة والتي تصل الى عدة ميغاوات في العنفات الريحية وقد تصل الى عدة مئات من الميغاوات في المحطات الكهربائية التقليدية. وهي عادة مولدات تزامنية ذات أقطاب أسطوانية . ومجاري الدائر تحمل المحرض المتناوب وملفات التخامد.



الشكل 9ـ٥ مقطع لمولد تزامني ذاتي التنظيم

Damascus University



الشكل 9-٦ : المخططات الكهربائية للمولد التزامني ذي التهييج من مغناطيس دائم (الشكل اليميني) ومن منبع تيار مستمر (الشكل اليساري)

والمعادلات التالية تحكم عمل المولد في حالة العمل المستقر مع الافتراض أن قيمة مقاومة ملفات الثابت بالنسبة لقيمة مفاعلة الثابت مهملة وسوف نفترض أن جميع القيم الكهربائية المتغيرة تتغير بشكل جيبي مع الزمن:

$$Es = Vs - J \cdot Is \cdot Xs \qquad (7\text{-}9)$$

$$Pout = (3EsVs / Xs) \sin \delta \qquad (8\text{-}9)$$

Es - القوة المحركة الكهربائية المتولدة في الطور [V]

Vs - التوتر على طرفي الثابت [V]

Is - تيار ثابت [A]

Xs = Ls ×W مفاعلة الطور الواحد من الثابت [Ω]

Pout - استطاعة الخرج [KW]

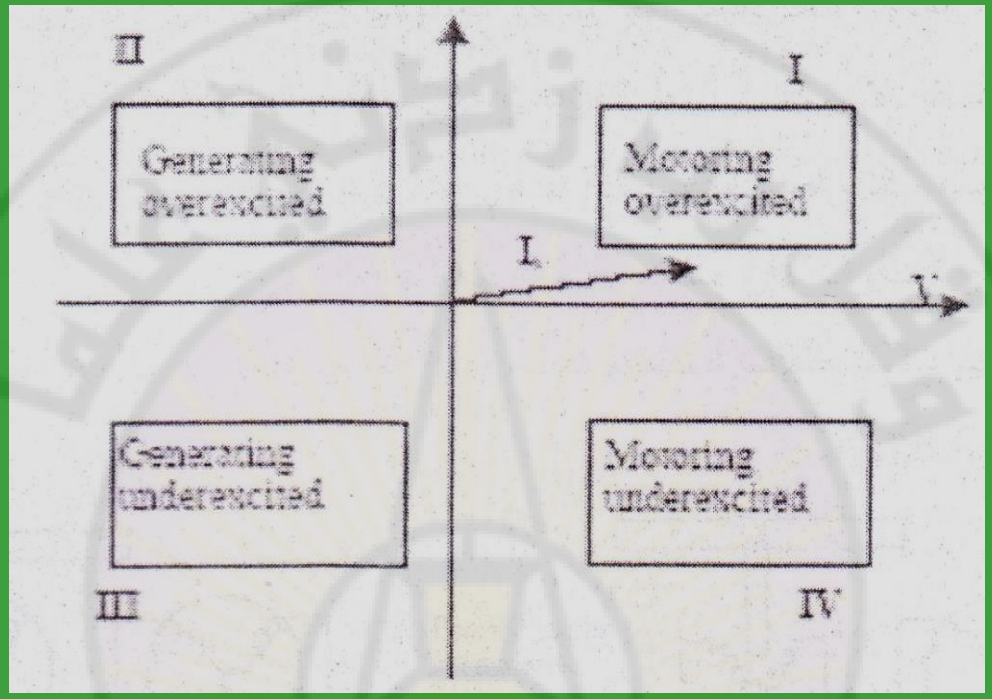
٩-٤-٢-٢ حالات عمل المولد التزامني Synchronous Generator Operation Moods :

هناك أربع حالات لعمل الآلة المتزامنة:

أ- كمحرك زائد التهييج: وتعتمد زيادة التهييج على زيادة شدة التحريض وفي هذه الحالة فان المحرك يقدم استطاعة ردية واستطاعة ميكانيكية ويستهلك استطاعة كهربائية فعلية أو فعالة.

ب- كمولد ناقص التهييج: إذا أنقصنا شدة التحريض في المحرك السابق وقدمنا لمحور الآلة استطاعة ميكانيكة لتقود الآلة بنفس جهة الدوران فإن الاستطاعة ستجري هنا بالاتجاه المعاكس وستتحول الآلة للعمل كمولد لكنه سيكون مستهلكاً للاستطاعة الردية.

هاتان الحالتان تعبران عن حالات خاصة من عمل الآلة التزامنية في الأجزاء الأرباع الأربعة الموضحة في الشكل ٩-٧ 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 ٩-٧: حالات عمل الآلة التزامنية

فالآلة التزامنية تتكون من جزأين ثابت ودائر يفصل بينهما ثغرة هوائية وعلى الأغلب يكون الدائر هو جزء التحريض(التهييج) والثابت هو المتحرض الذي نحصل من ملفاته على القوة المحركة الكهربائية ذات الطبيعة المتناوبة حيث تتغذى ملفات التهيج التي تتوضع على الجزء المتحرك بتيار مستمر ويتم تحريكها عن طريق ربط محور المولد التزامني مع مصدر حركة خارجي (محرك _ عنفة بخارية _ عنفة ريحية...)

فالسيالة الناتجة عن ملفات التهيج بعد دورانها بسرعة N تولد في الثابت قوة محركة كهربائية تعطى بالعلاقة:

$$eo = \frac{-w1 \cdot d\Phi \circ}{dt} \qquad (9\text{-}9)$$

حيث:

eO: القيمة اللحظية للقوة الكهربائية المتولدة في كل طور من أطوار المتحرض.

w1: عدد موصلات الطور في الثابت.

ϕeo: القيمة اللحظية لسيالة التهيج لكل قطب.

وتعطى القيمة الفعالة للقوة المحركة الكهربائية المتولدة في طور من المتحرض بالعلاقة:

$$E\circ = 4.44 \cdot w1 \cdot kw1 \cdot f1 \cdot \Phi e \circ max \qquad (10\text{-}9)$$

حيث:

Eo: القوة المحركة الكهربائية [Volts/phase]

Kw1: معامل لف المتحرض.

f: تردد الجزء الدائر.

Φeomax: مطال سيالة التهيج.

- عند إغلاق دارة المولد على حمل خارجي يمر فيه تيار Ia سببه القوة المحركة الكهربائية Eo.

- تعطى علاقة استطاعة الخرج للمولد الأسطواني بدلالة ثوابته Xd المفاعلة التواقتية 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 تسارع المنوبة (المولد) المربوطة إلى محور الحركة وبالتالي توليد عزم كهربائي واستطاعة كهربائية تستهلك في الحمل المربوط.

$$P = \frac{m \cdot u \cdot E_{\circ}}{xd} \cdot \sin\theta \qquad (11\text{-}9)$$

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 9-٨ منحنيات الاستطاعة الفعالة كدالة مع زاوية الحمل عند قيم متغيرة للقوة المحركة الكهربائية والتي نحصل عليها ($E_{\circ} = V.a.r$) عندما نغير تيار التهيج **Ie** والتيار المستجر من الحمل **Ia** بثبات التوتر:

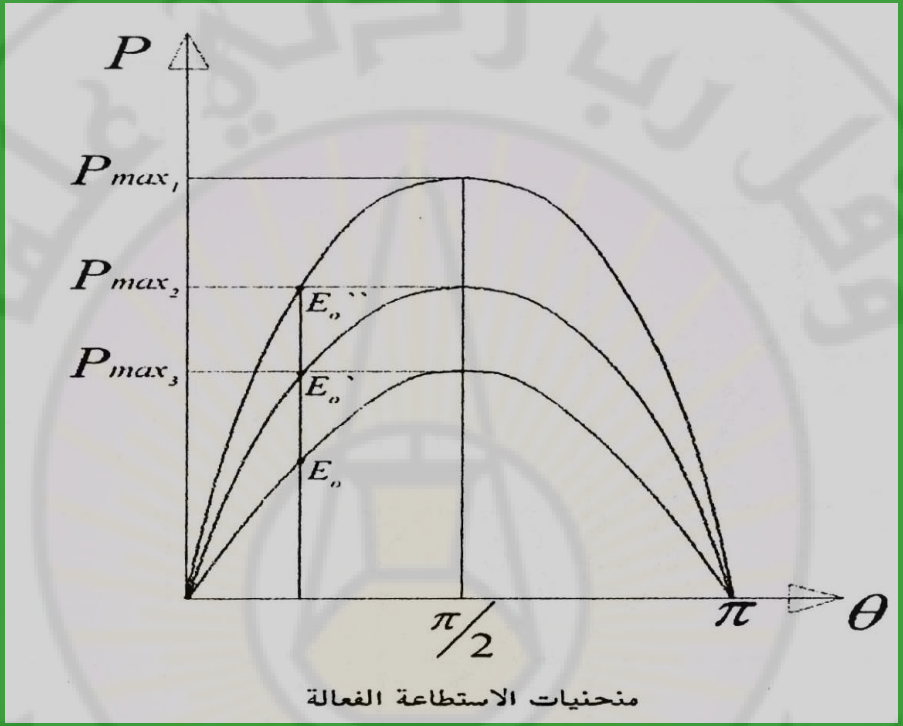
المطبق على الحمل ذي الممانعة المتغيرة:($U = Ia \cdot Z = const$)

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = [V \cdot a \cdot r] \qquad (12\text{-}9)$$

النتيجة:

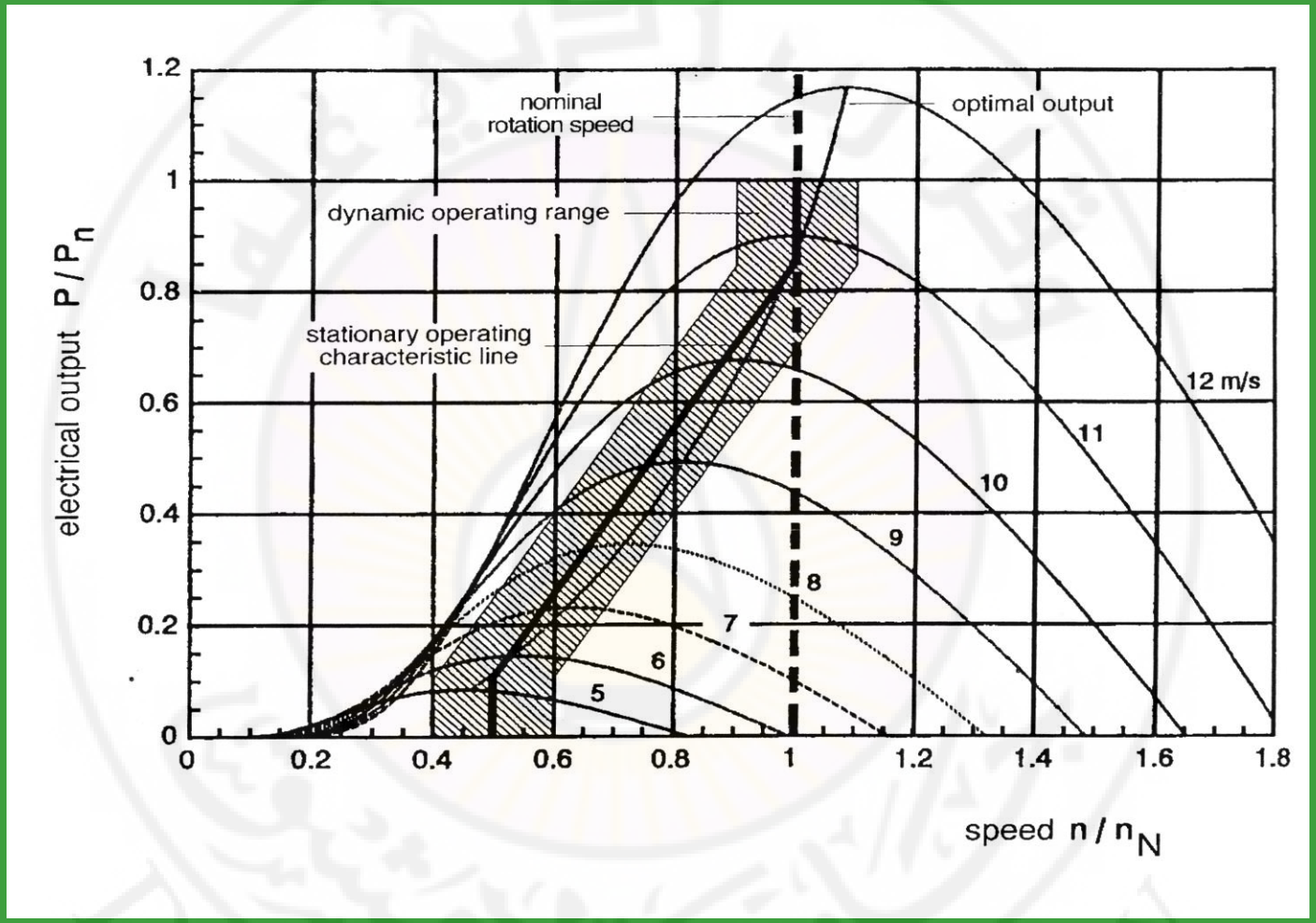
إن تسريع المولد يؤدي لكبر زاوية الحمل θ وبالتالي الحصول على استطاعة أكبر.

مع الانتباه إلى أن تسريعه يكون ضمن حدود، حيث تبقى θ محصورة بين (٠-٩٠) درجة لأنه إذا زادت θ عن ٩٠ درجة فإن المولد يخرج عن الاستقرار.



الشكل 9-٨: منحنيات الاستطاعة الفعالة للمولد التزامني.

ويبين الشكل 9- ٩ 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 9-٩: المميزات الخارجية لمولد تزامني يعمل على سرعة دوار متغيرة

9-٤-٢-٣ استخدام المولد التزامني في العنفات الريحية:

يمكن أن يعمل المولد التزامني بشكل مستقل عن الشبكة أو أن يوصل مع الشبكة لكنه بحاجة بصورة مستمرة إلى التهييج 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.

من مساوئ 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 المساوئ بوساطة عناصر القيادة الالكترونية.

9-٤-٣ 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.
- توافر المولد بجميع مجالات الاستطاعة في الأسواق.
- الخبرة الكبيرة والمكتسبة في التقنيات المستخدمة في تصميم وتصنيع المولد.

9 ـ ٤ـ٣ـ١ بنية المولد التحريضي Asynchronous Generator Structure :

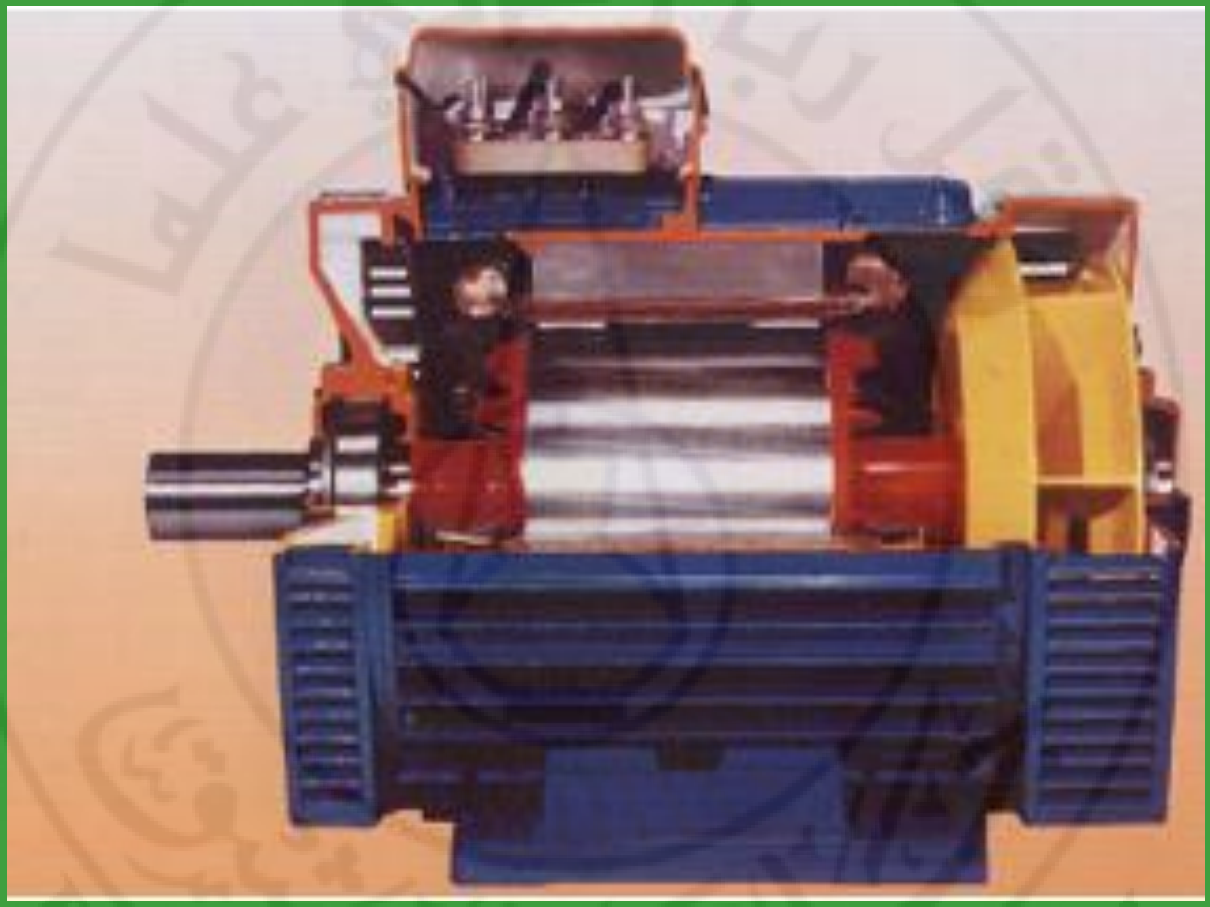
تصنع المولدات التحريضية من أجل العنفات الريحية عادة من وحدة مغلقة لمنع دخول الغبار وغيرها من المواد الضارة في الوسط المحيط.

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 والردية من الشبكة فتصبح محركاً تحريضياً. وإذا قامت هذه الآلة بتغذية الشبكة الكهربائية وتحديداً بالاستطاعة الفعالة (حيث تبقى مستهلكة للاستطاعة الردية، كما سنشرح ذلك لاحقاً) فتصبح مولداً تحريضياً.

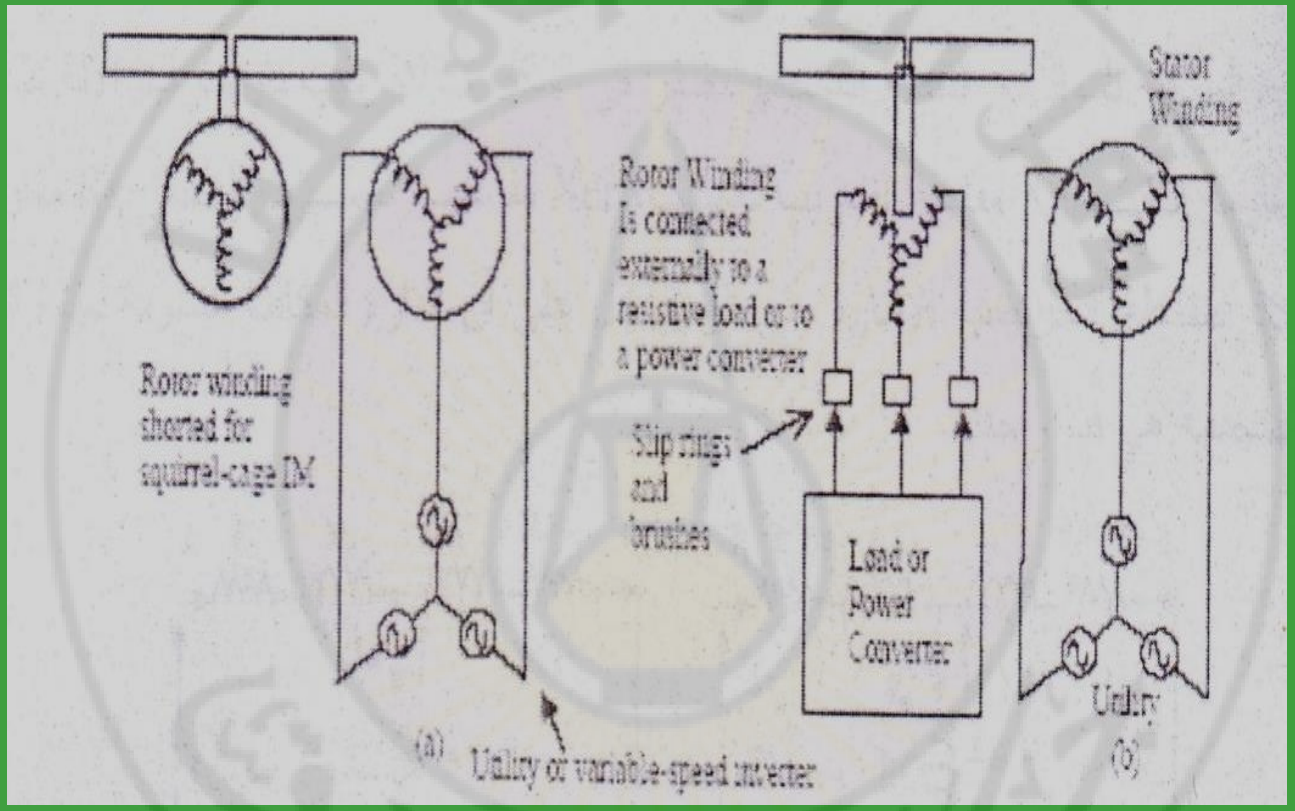
في المولدات التحريضية ذات الدائر الملفوف، والتي تحتوي حلقات الانزلاق، تتوضع ملفات التيار المتناوب في مجاري الدائر،حيث تقوم بنقل الاستطاعة الكهربائية المتولدة فيه نتيجة دوران الدائر بواسطة قوى خارجية، وفي حالتنا هذه بواسطة دوار العنفة الريحية، إلى ملف الثابت من خلال التحريض المتبادل عبر الثغرة الهوائية. وتستخدم حلقات الانزلاق لإجراء عمليات التغذية الإضافية أو استجرار 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 ٩ـ١٠ فتمتلك قضبان من الألمنيوم مذابة 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.و تزود 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 ٩ـ١٠ صورة لمقطع الآلة التحريضية ذات القفص السنجابي



الشكل ٩-١١: مخططات كهربائية للمولد التحريضي ذي الدائر المقصور أو القفص السنجابي (a) والمولد التحريضي ذي الدائر الملفوف(b)

٩-٤-٣-٢ 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 Im لإنتاج السيالة المغناطيسية. ومن ميزاته 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 اكبر قليلاً من السرعة المتواقتة أو التزامنية أو ما يسمى سرعة اللاحمل وبنفس اتجاه السيالة المغناطيسية مع ملاحظة انه عند ربطها تظهر نفس الظواهر التي تحدث عند ربط المحولات والمحركات التحريضية مع الشبكة الكهربائية.

٩-٤-٣-٣ مساوئ الاستخدام:

بما أن تيار المغنطة في المحرك أو الآلة التحريضية يساوي ٢٥-٤٠% من التيار الاسمي لذلك وعند توفر توتر ثابت في الشبكة تبلغ الاستطاعة الردية اللازمة للتهييج ٢٥-٤٠% من الاستطاعة الكلية المتولدة، بالإضافة إلى الاستطاعة الضائعة الأخرى في المولد، مما يجعل مردود المولد منخفض بالمقارنة مع المولدات المتواقتة.كذلك يتأخر التيار Im عن الجهد عملياً ٩٠ درجة وبالتالي يؤدي عمل المولد التحريضي على التوازي مع الشبكة الكهربائية لإنقاص قيمة معامل الاستطاعة cos θ لهذه الشبكة حتى ولو كانت الحمولة الخارجية عبارة عن حمل أومي بحت.

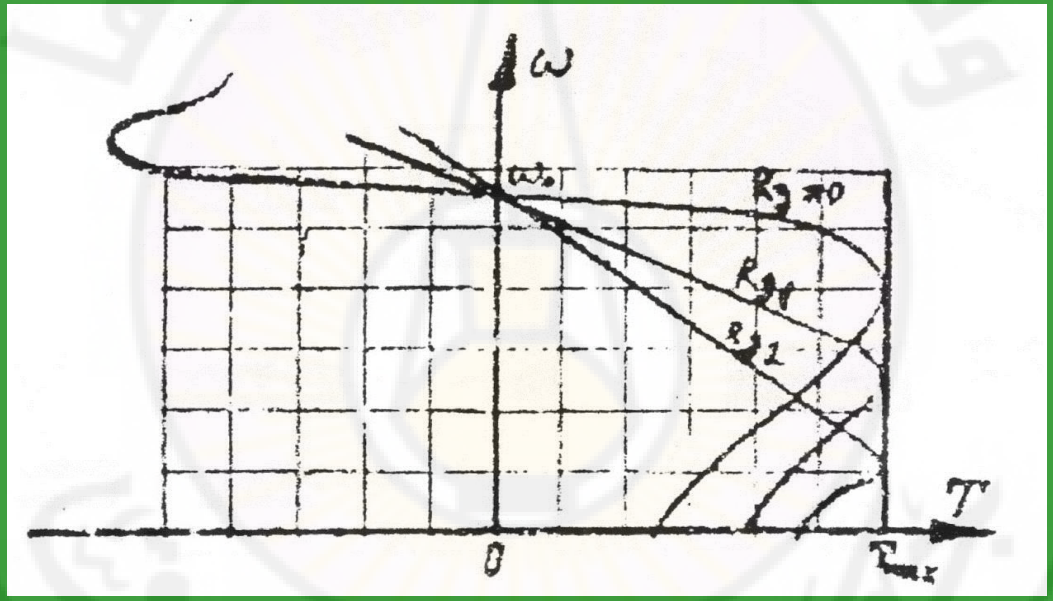
ونظراً لكون المولد التحريضي الأكثر انتشاراً في مجال الربط المباشر للعنفات الكهربائية مع الشبكة العامة ، فمن المفيد توضيح الأسس العلمية لعمل هذه المولدات في العنفات الريحية والتي تستند إلى حالة العمل المسماة الكبح الكهربائي بإعادة التوليد Regenerative Braking التي سيتم شرحها في الفقرة التالية.

٩-٤-٣-٤ حالة الكبح مع إعادة التوليد Regenerative Braking:

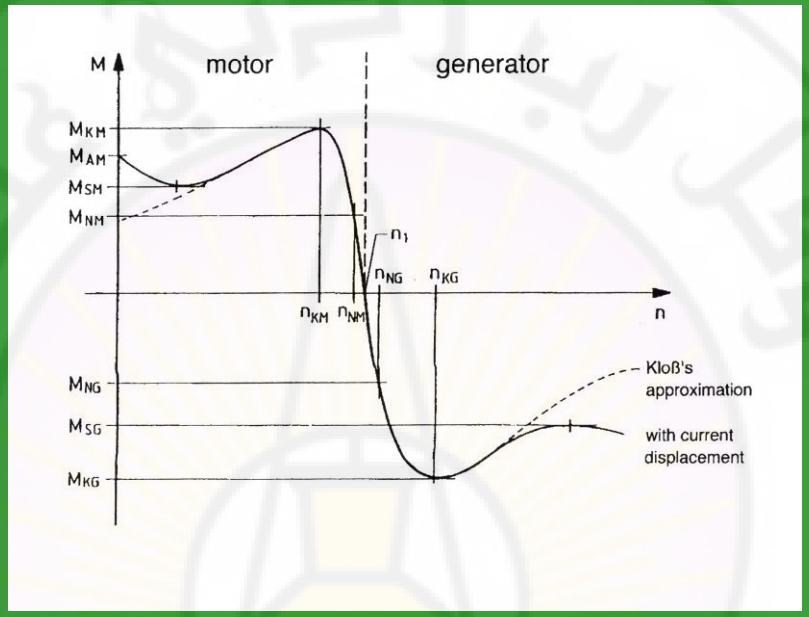
إن الكبح بإعادة التوليد في المحرك التحريضي يعبر عن حالة العمل للمولد التحريضي المربوط مع الشبكة الكهربائية، حيث يتم عندها فقط حقن القدرة الكهربائية المولدة في الجزء الثابت والمنقولة من الجزء الدوار في المولد التحريضي(الدائر) إلى الشبكة الكهربائية. وبشكل أكثر دقة يتم حقن الاستطاعة الفعالة المتولدة في ملف الثابت إلى الشبكة الكهربائية الموصول معها، مع الاستمرار في استهلاك الاستطاعة الردية من الشبكة الكهربائية، تماماً كما في حالة العمل كمحرك تحريضي. و يمكن 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) موصولا 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 المفاقيد الردية في ثابت المحرك واللازمة لإنتاج السيالة المغناطيسية وذلك استناداً إلى مبدأ عمل المولدات التحريضية.

وكما هو مبين في الشكل ٩-١٢ 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 دارة 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 ٩-١٢ عند سرعة أكبر قليلاً من السرعة التزامنية ، أي أكبر ببضعة دورات في الدقيقة من سرعة اللاحمل، في الربع الثاني على امتداد المميزات الطبيعية من أجل Rg=0 (حيث لا توجد ضرورة في هذه الحالة لإضافة مقاومات خارجية).



الشكل ٩-١٢: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



الشكل ٩-١٣ مميزات الأداء للآلة التحريضية في حالتي العمل كمحرك ومولد في العنفات الريحية

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 ٩-١٢ و ٩-١٣:

$$T = \frac{2.T_{max}(1+aS_{cr})}{\frac{S}{S_{cr}}+\frac{S_{cr}}{S}+2aS_{cr}} \quad (N.M) \qquad (13-9)$$

حيث: $a=R_1/R'_2$

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:

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \qquad (14\text{-}9)$$

حيث:

ω_0 - السرعة التزامنية للحقل المغناطيسي المتولد في الثغرة الهوائية وأيضاً للجزء الدائر وتقاس بالراديان على الثانية Rad/sec

ω - السرعة الآنية للجزء الدائر Rad/sec

وتساوي السرعة التزامنية:

$$\omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60} = \frac{2\pi f_1}{P} \qquad (15\text{-}9)$$

حيث:

n_0 - سرعة اللاحمل وتقاس بالدورة في الدقيقة rpm.

f_1 - تردد شبكة التغذية

P- عدد أزواج الأقطاب في الآلة التحريضية.

أما السرعة الزاوية الآنية فتساوي:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ Rad/sec} \qquad (16\text{-}9)$$

n– السرعة الآنية للجزء الدائر rpm.

S_{cr}- فتعبر عن الانزلاق الحدي critical Slip

$$S_{cr} = \pm \frac{\acute{R_2}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + \acute{X_2})^2}} \qquad (17\text{-}9)$$

ويقابل الانزلاق الحدي في الآلة التحريضية العزم الأعظمي T_{max} الذي يساوي:

$$T_{max} = \frac{3V_{ph}^2}{2\omega_0\left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + \left(X_1 + \acute{X_2}\right)^2}\right]} \quad (NM) \qquad (18\text{-}9)$$

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 9-١٥) بينما إشارة(-) حالة عمل الآلة التحريضية كمولد تحريضي (في الربع الثاني من الشكل ٩-١٥) وذلك من أجل $\omega > \omega_0$ أو $S<0$.

٩-٤-٣-٥ المقارنة الفنية بين المولدين التحريضي والتزامني:

الجدول ٩-١ :مقارنة فنية بين المولدين التحريضي والتزامني

المولد التحريضي	المولدات التزامني
لا يحتاج إلى سرعة ثابتة مع آلته المحركة	يحتاج إلى سرعة ثابتة مع آلته المحركة
يربط مباشرة مع الشبكة ،وعند أي تردد، ودون الخوف من التأرجح	يربط على التوازي مع الشبكة ، ولكن يجب تحقيق شروط التزامن (من أجل عدم التأرجح)
الأجهزة المساعدة التي يحتاجها قليلة	يحتاج إلى أجهزة مساعدة
من مساوئه أنه يحتاج إلى تيار مغنطة% (٢٥-٤٠) من التيار الكلي وبالتالي يحتاج إلى استطاعة ردية لإنتاج هذا التيار 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

٩-٥ أنظمة تبديل الطاقة Energy Conversion Systems :

يمكن تصنيف العنفات الريحية حسب سرعة الدوران – ضمن نظامين رئيسين:

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 للعنفة الريحية يتم رفعها عن طريق علبة السرعة لنصل 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 الكتروني. و يكون ملف التهييج 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 العنفة 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 العنفة. مع الوضع في الحسبان ضرورة إيقاف العنفة 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.

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 دوار العنفة الريحية وبدون علبة سرعة.

جميع هذه الأنظمة موضحة في الشكل ٩-١٤. 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 ٣MW. 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 منحني الاستطاعة ومعامل الاستطاعة والمردود والتوافقيات الناتجة ولا يوجد بشكل واضح نظام مفضل لقيادة العنفات الريحية بشكل مطلق.

الشكل ٩-١٤ 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 وتقسم 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 وتقسم 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 المتواقت للتحكم الستاتيكي.
- مولد تحريضي مضاعف التغذية. (وسيتم شرح هذا النظام بالتفصيل نظراً لكونه الأكثر استخداماً في العنفات الريحية على المدى المنظور بين جميع الأنظمة المبينة في هذا الشكل).

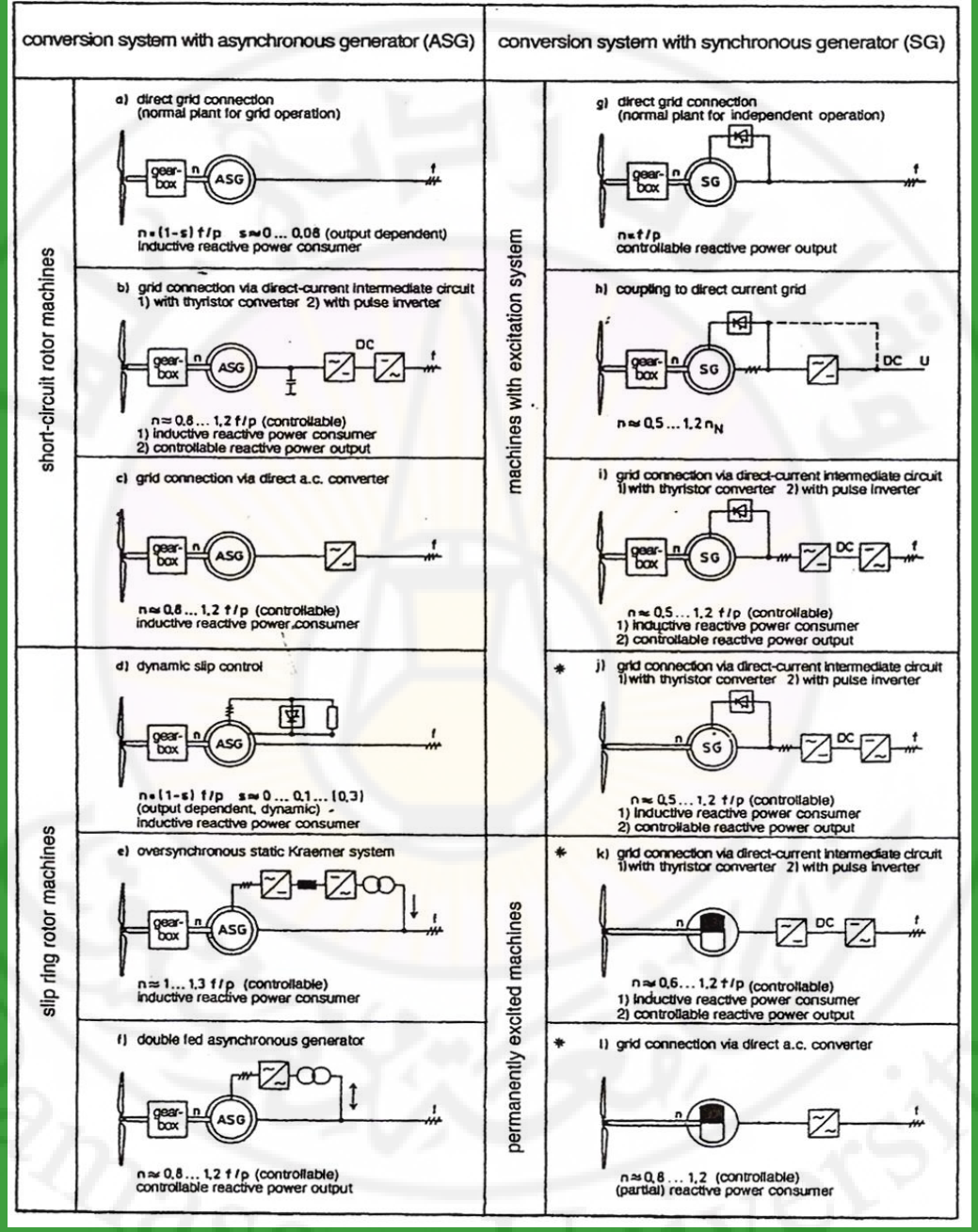
C-الأنظمة التي تستخدم مولدات تزامنية، وتسمى الآلات ذات نظم التهييج المستقل، وتقسم بدورها إلى:

- 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.
- مولد تزامني موصول إلى الشبكة الكهربائية من خلال نظام تبديل الكتروني AC/DC/AC.
- مولد تزامني موصول إلى الشبكة الكهربائية من خلال نظام تبديل الكتروني AC/DC/AC ولكن يعمل هذا المولد على سرعة منخفضة بدون علبة سرعة.

D-الأنظمة التي تستخدم مولدات تزامنية ذات التهييج بمغناطيس دائم وتقسم بدورها إلى:

- مولد تزامني ذو مغناطيس دائم موصول مع الشبكة عن طريق نظام تبديل الكترونيAC/DC/AC .
- مولد تزامني ذو مغناطيس دائم موصول مع الشبكة عن طريق نظام تبديل الكتروني AC/AC.

وسيتم استعراض مجالات التحكم لمختلف نظم التبديل المبينة في الشكل ٩-١٤ لاحقاً وتحديداً في الفقرة ٩-٩.



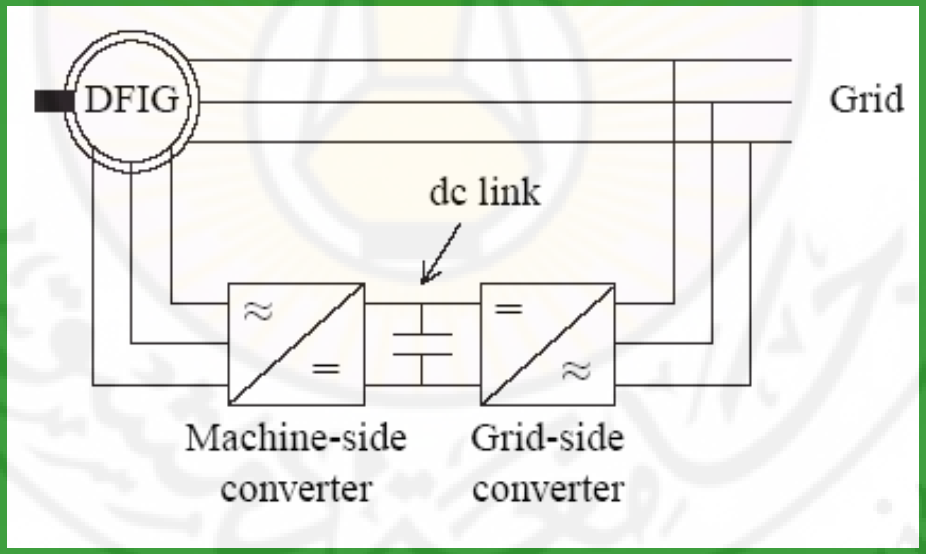
الشكل٩-١٤: أنظمة تبديل طاقة الرياح حسب نوع المولد الكهربائي المستخدم في العنفات الريحية

٩-٦ المولد التحريضي مضاعف التغذية:

٩-٦-١ عمل المولد التحريضي مضاعف التغذية في العنفات 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 انزلاق.

وبدلا 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 الكترونية تكون عادة متصلة مع نفس الشبكة الكهربائية التي تتصل بها ملفات الثابت وبشكل مباشر. الشبكة و عندئذ يغذى كما هو مبين في الشكل٩-١٥ .



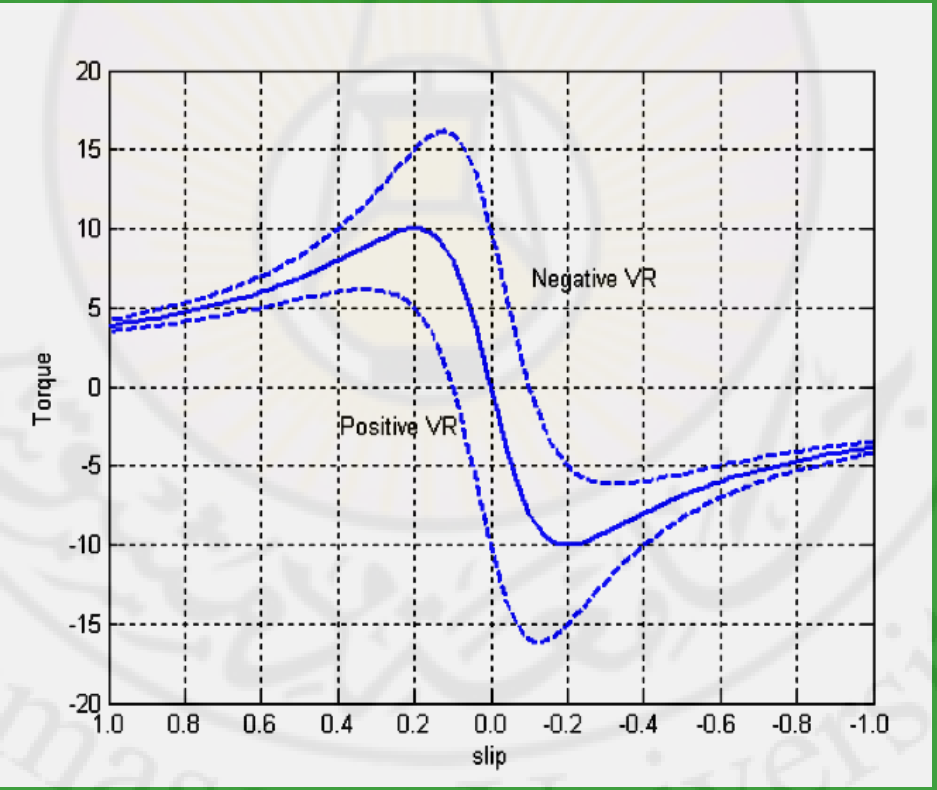
الشكل ٩- ١٥ :عمل المولد التحريضي مضاعف التغذية في العنفات الريحية

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 ٩-١٦.



الشكل ٩-١٦ : منحنيات تعديل مميزات العزم – الانزلاق عن طريق حقن توتر في ملف الدائر

و الاستطاعة الفعالة المتبادلة عبر الدائر تعطى بالعلاقة :

$$Pr = S*Pm \qquad (19\text{-}9)$$

وفي نظام يعمل بسرعة متغيرة ±30%من سرعة التزامن يمكن تحديد الاستطاعة التي تمر من خلال مبدل التردد و هي تتراوح بين ٣٠-٢٠ % من الاستطاعة الاسمية للآلة مما يقلل من كلفة نظام التوليد والمفاقيد الكهربائية في هذا المولد بالمقارنة مع المولد التحريضي التقليدي الذي يتصل ملف الثابت فيه عيرمبدلة الكترونية.

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.

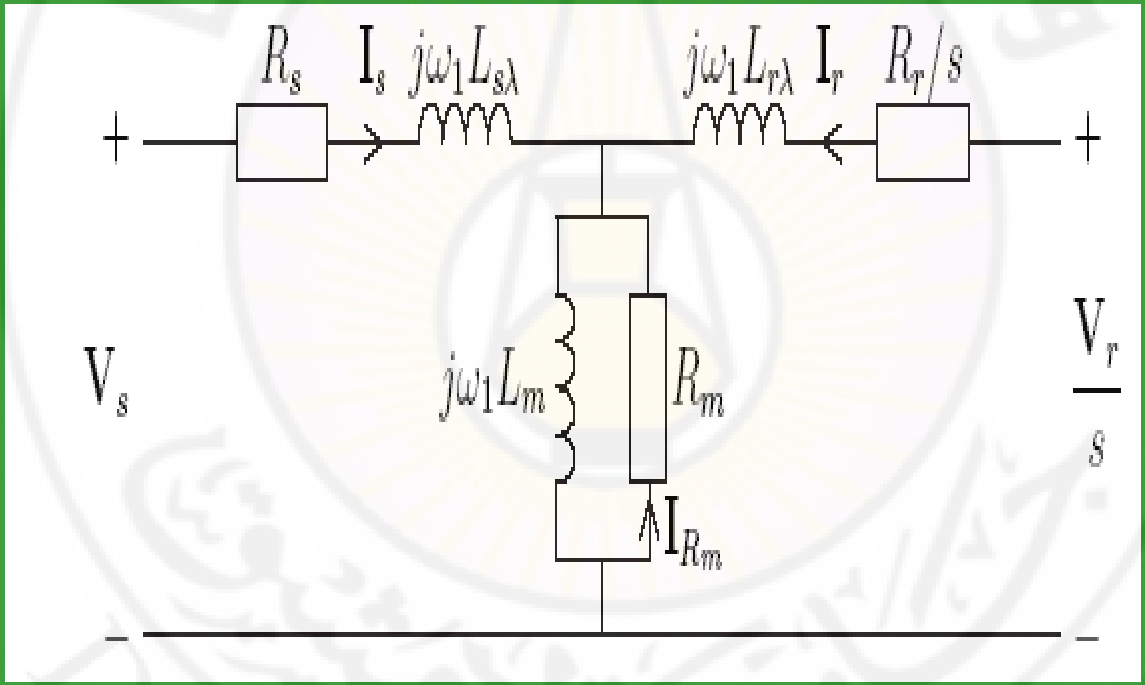
وفي هذه الحالة تؤمن المبدلة الالكترونية التغذية الإضافية بالتردد أو تحصل على التغذية من ملف الدائر المتصلة به عبر حلقات الانزلاق وبالتالي تقوم بقيادة العزم و السرعة للمولد بالإضافة إلى التحكم بمعامل الاستطاعة على أطراف الثابت بينما يؤمن المعرج الموصول مع الشبكة حقن قدرة كهربائية من ملف الثابت ذات توتر 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 استخدم المبدلات الترانزستورية IGBT في الآلات التحريضية مضاعفة التغذية تسمح باستجابة جيدة للنظام مع تغيرات الشبكة .

٩-٦-٢ الدارة المكافئة للمولد مضاعف التغذية:

الشكل ٩-١٧ 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 ٩-١٧: الدارة المكافئة للمولد مضاعف التغذية متضمنة الضياعات المغناطيسية

$$V_s = R_s I_s + j\omega_1 L_{s\lambda} I_s + j\omega_1 L_m (I_s + I_r + I_{R_m}) \quad (٩-٢٠)$$

$$\frac{V_r}{s} = \frac{R_r}{s} I_r + j\omega_1 L_{r\lambda} I_r + j\omega_1 L_m (I_s + I_r + I_{R_m}) \quad (٩-٢١)$$

$$0 = R_m I_{R_m} + j\omega_1 L_m (I_s + I_r + I_{R_m}) \quad (٩-٢٢)$$

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

ويمكن حساب الانزلاق من القانون :

$$S = \frac{W1 - Wr}{w1} = \frac{W2}{W1} \qquad (23\text{-}9)$$

حيث Wr : سرعة الدائر و W2 سرعة تردد الانزلاق.

$$\Psi_m = L_m(\mathrm{I}_s + \mathrm{I}_r + \mathrm{I}_{R_m}) \qquad (24\text{-}9)$$

$$\Psi_s = L_{s\lambda}\mathrm{I}_s + L_m(\mathrm{I}_s + \mathrm{I}_r + \mathrm{I}_{R_m}) = L_{s\lambda}\mathrm{I}_s + \Psi_m \qquad (25\text{-}9)$$

$$\Psi_r = L_{r\lambda}\mathrm{I}_r + L_m(\mathrm{I}_s + \mathrm{I}_r + \mathrm{I}_{R_m}) = L_{r\lambda}\mathrm{I}_r + \Psi_m \qquad (26\text{-}9)$$

وإذا ما تم تحديد التدفق المغناطيسي في الثغرة الهوائية بين الثابت و الدائر حسب المعادلات:

$$\mathrm{V}_s = R_s\mathrm{I}_s + j\omega_1\Psi_s \qquad (27\text{-}9)$$

$$\frac{\mathrm{V}_r}{s} = \frac{R_r}{s}\mathrm{I}_r + j\omega_1\Psi_r \qquad (28\text{-}9)$$

$$0 = R_m\mathrm{I}_{R_m} + j\omega_1\Psi_m. \qquad (29\text{-}9)$$

وضياعات الاستطاعة تعطى بالعلاقة التالية:

$$P_{\text{loss}} = 3\left(R_s|\mathbf{I}_s|^2 + R_r|\mathbf{I}_r|^2 + R_m|\mathbf{I}_{R_m}|^2\right) \qquad (30\text{-}9)$$

ويمكن التعبير عن العزم الكهروميكانيكي بالمعادلة :

$$T_e = 3n_p \text{Im}\left[\Psi_m \mathbf{I}_r^*\right] = 3n_p \text{Im}\left[\Psi_r \mathbf{I}_r^*\right] \qquad (31\text{-}9)$$

الجدول ٩-٢ يبين القيم المميزة النموذجية لبعض المولدات لهذه الآلة عند عدد أزواج أقطاب np

		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	$L_m \approx L_M$	2.0	3.5	4.0

٩-٦-٣ نظام قيادة المولد التحريضي مضاعف التغذية عند سرعة متغيرة للرياح:

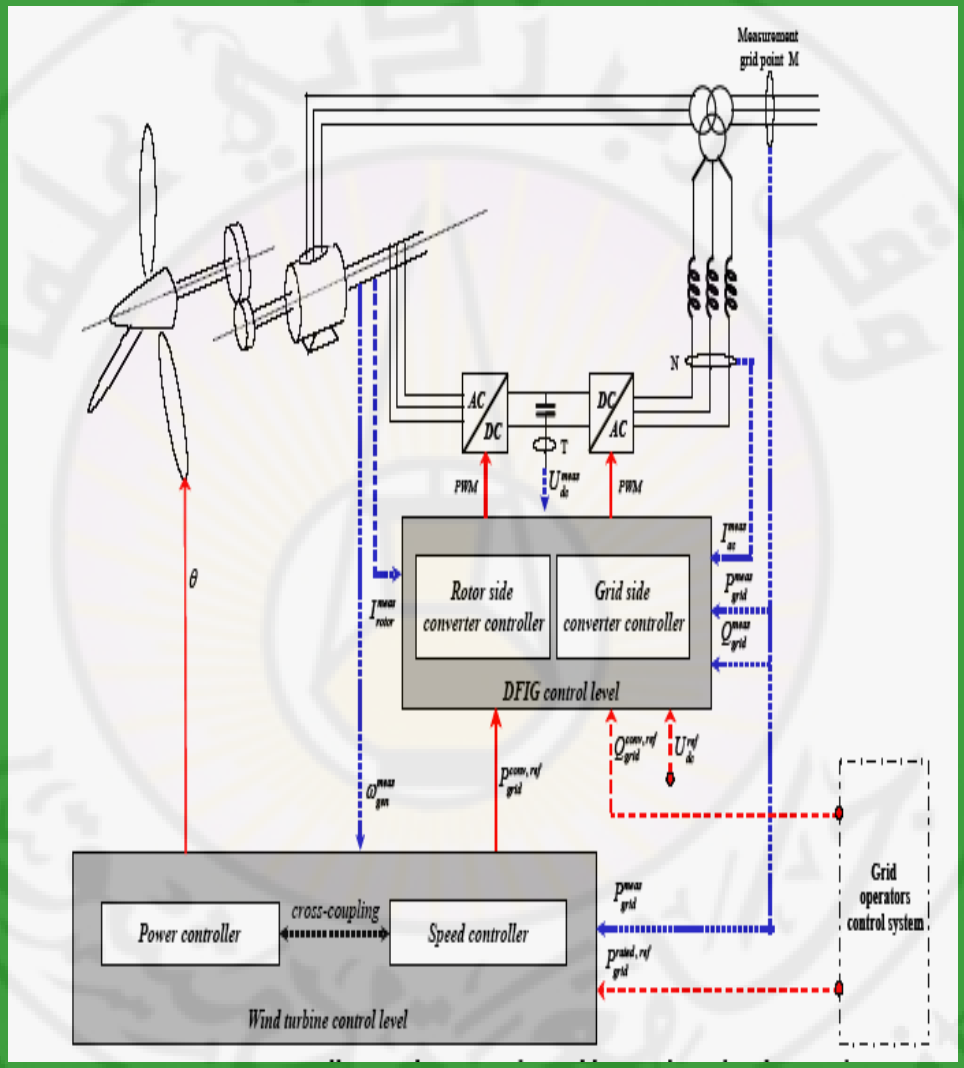
إن الهدف من نظام القيادة هو قيادة الاستطاعة الفعلية و الردية المتبادلة بين المولد و الشبكة بالإضافة لتحديد الاستطاعة العليا عند السرعات العالية و الحصول على الاستطاعة المثلى عند السرعات تحت السرعة الاسمية .

نظام القيادة يتألف من ثلاثة أنظمة فرعية - نظام ايروديناميكي – نظام قيادة ميكانيكي – نظام قيادة كهربائي.

ويختلف زمن الاستجابة لهذه الأنظمة فنظام القيادة الكهربائي مثلا" هو أسرع استجابة من النظام الميكانيكي مما يؤدي إلى الحاجة لأنظمة قيادة ثانوية.

و الشكل ٩-١٨ يظهر نظام القيادة لمولد مضاعف التغذية يعمل بسرعة رياح متغيرة المؤلف من نظاميين رئيسيين مرتبطين مع بعضهما بشكل وثيق .

وكما هو مبين في الشكل ٩-١٨ 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)



الشكل ٩-١٨ : نظام القيادة لمولد مضاعف التغذية يعمل بسرعة رياح متغيرة

٩-٦-٤ الإشارات المقاسة والإشارات المرجعية لنظام القيادة:

من الشكل ٩-١٩ 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:

الاستطاعة الفعلية P_{grid}^{meas} و الاستطاعة الردية Q_{grid}^{meas} المتبادلة مع الشبكة عند النقطة M.

- التوتر المستمر على خرج المبدل : (U_{dc}^{meas}) .
- تيار المبدلة من جهة الشبكة عند النقطة N (I_{ac}^{meas}) .
- تيار الدائر (I_{rotor}^{meas}).
- السرعة الزاوية للدائر (W_{gen}^{meas}).

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 الثايرستورية 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}^{meas}.

٩-٧ استعراض مختصر للمبدلات الالكترونية المستخدمة في العنفات الريحية:

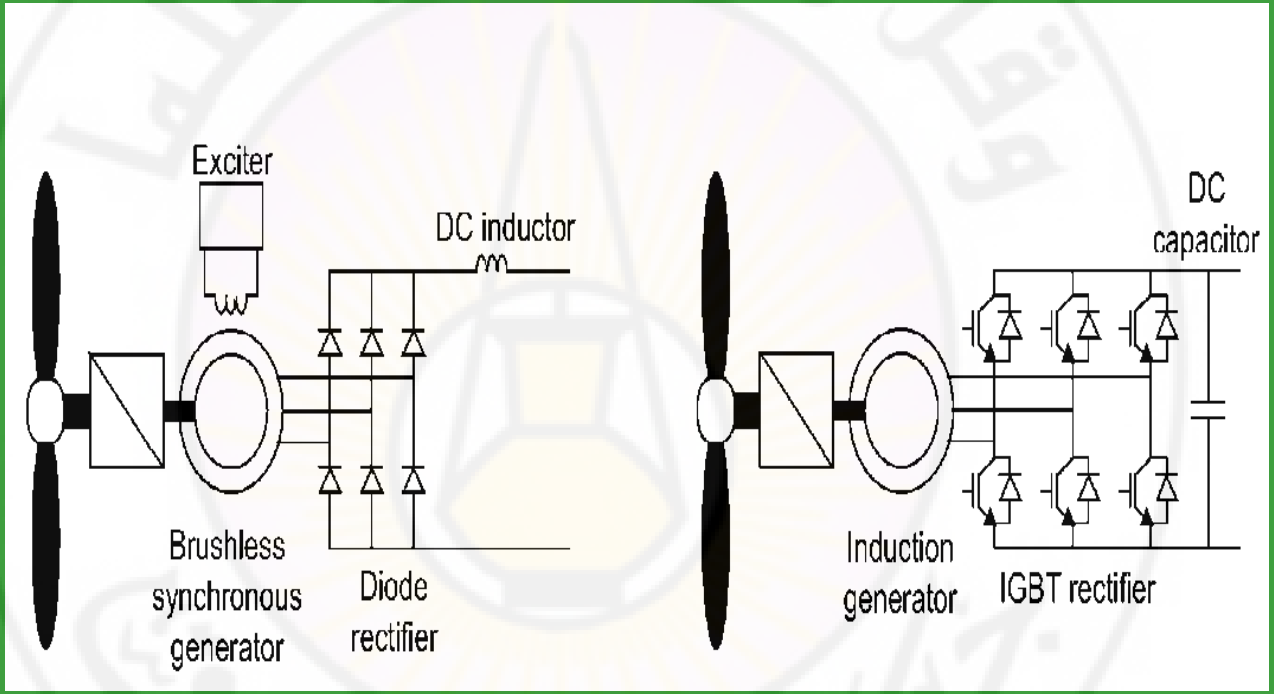
تتألف المبدلات الالكترونية في نظم التوليد الكهربائي للعنفات الريحية من مقومات و معرجات والتي سنستعرض عملها بشكل مختصر فيما يلي:

٩-٧-١ المقومات (Rectifiers) :

إن المقوم المؤلف من أنصاف النواقل أو ما يسمى الديودات 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 جيبية تيار المولد فيؤدي إلى ضياعات في المولد بحدود ٥% وبنفس النسبة تكون ضياعات التبديل للديودات لأنها تؤدي لهبوط التوتر بحوالي ٥-١٠ %. 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 التبديل 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 ٩-٢٠ يوضح المخطط الكهربائي لهذين النوعين من المقومات وهما الأكثر استخداماً لتقويم تيار المولد التزامني والمولد التحريضي في العنفات الريحية .



الشكل ٩ـ٢٠ المقومات الأكثر استخداماً لتقويم تيارالمولد التزامني والمولد التحريضي في العنفات الريحية

٩-٧-٢ 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 :

١- معرجات تيار(CSI) current inverter تعتمد على منبع تيار ثابت.

٢- معرجات توتر (VSI)voltage inverterتعتمد على منبع توتر ثابت.

٣- معرجات نبضية.

يمكن قيادة جسور التعريج بنظامين:

- تعديل عرض النبضة(PWM)pulse-width-modulation.
- الموجة المربعة (square-wave-VSI).

إن الفرق الأساسي بين معرجات التيار والتوتر يكمن فيما 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

أما 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 قسري. وهذان النوعان يحتاجان لنوعين مختلفين من المرشحات Filters.

٩-٧-٢-١ المعرج ذو التبديل الخطي:

الاسم الآخر لهذا المعرج هو المعرج الثايرستوري ويجب ربطه مع الشبكة حتى يعمل وهو موضح في الشكل ٩-٢١.

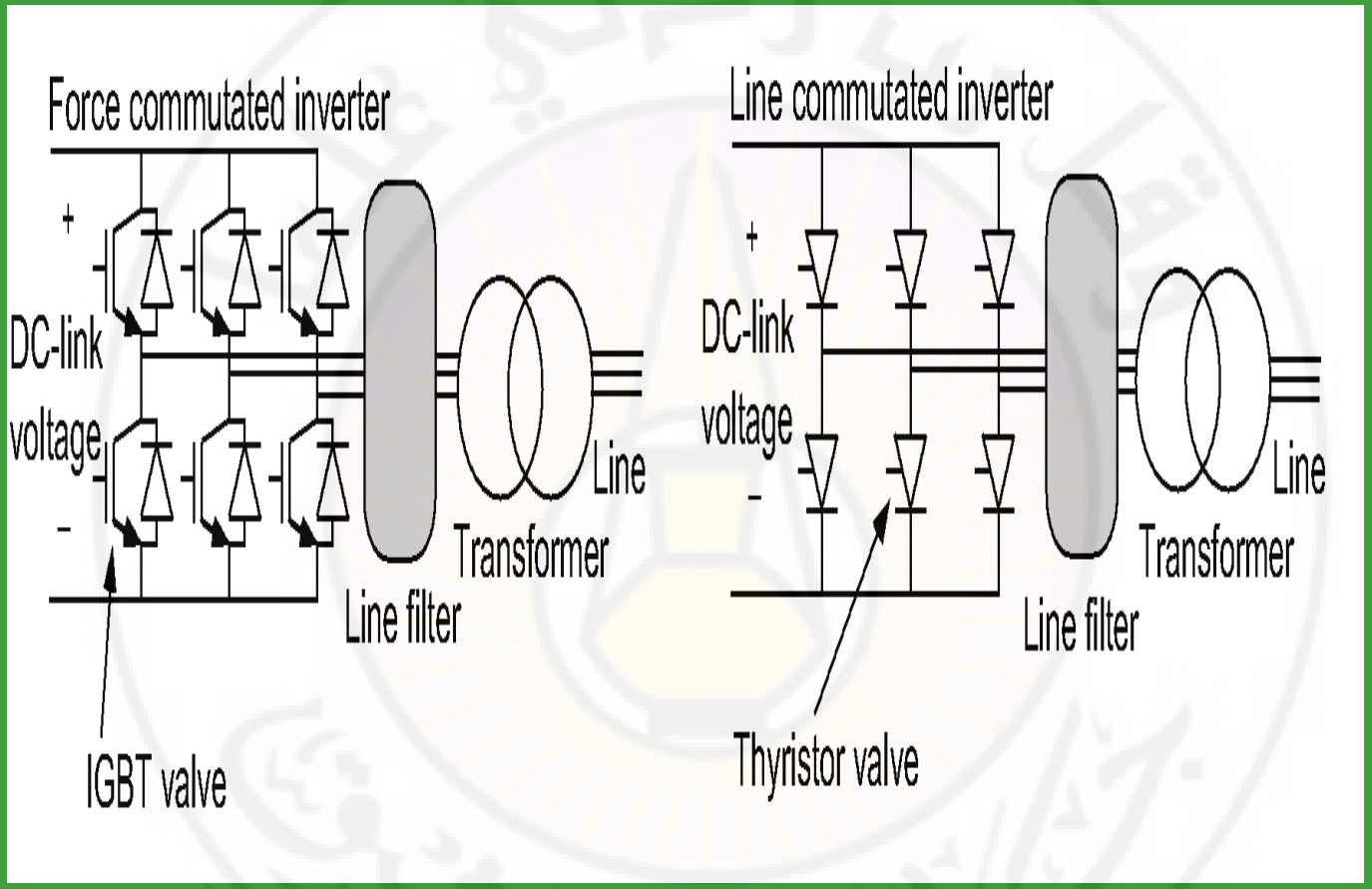
ويكون التيار في الشبكة متناسباً مع التيار في جهة التوتر المستمر لكن معامل الاستطاعة يكون مختلفاً ويكون مساوياً أو أقل من ٠.٩ من أجل المعرجات الثايرستورية.

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 للعنفات الريحية حتى ٥MW. ولحماية المعرج الثايرستوري في حال فصل الشبكة فإننا بحاجة لتركيب دارة فصل خاصة .

تحتاج دارة التحكم بالمعرج لزمن حتى ٣.٣ms و عرض نبضة ٢٠ HZ تقريباً .

إن 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 ٩-٢١ المعرج ذو التبديل الخطي والمعرج ذو التبديل القسري

٩-٧-٢-٢ 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 للتوتر 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 HZ K ٥-١٠ عند استخدام الترانستور IGBT أما في حال استخدام الثايرستور ذو بوابة قطع (GTO) فإن تردد القطع الأعظم يكون حوالي KHZ١ إن مزايا استخدام الثايرستور (GTO) هي أنه يتحمل استطاعة أكبر من الثايرستور IGBT و لكنه يحتاج إلى دارة تحكم أكثر تعقيداً أو بالتالي مردود المعرج يكون أقل .

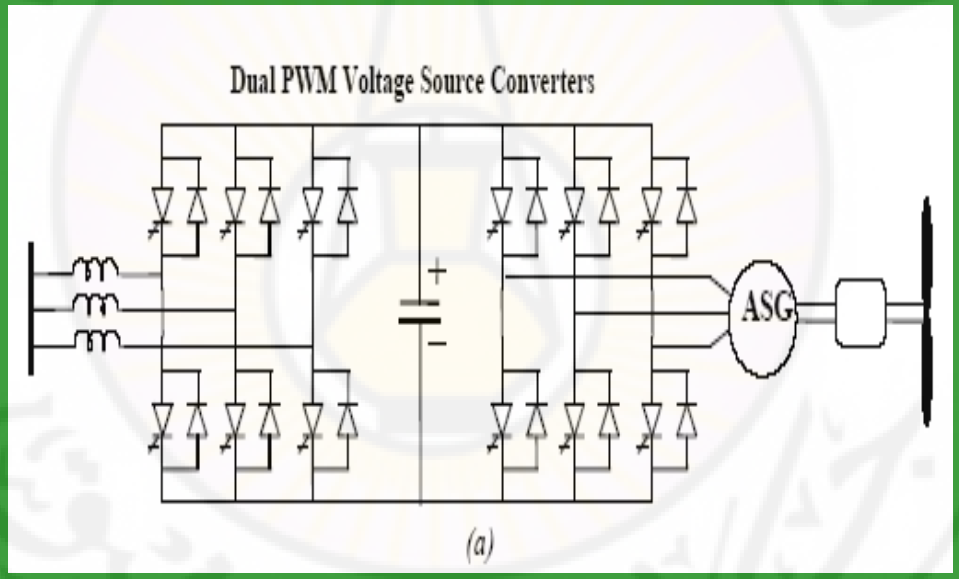
إن المصنعين يختارون العناصر IGBT عندما نستطيع تحمل الاستطاعة المطلوب تمريرها .

إن صناعة IGBT تتطور بشكل سريع و تنخفض أسعارها أيضاً و الشكل ٩-٢١ يوضح دارة المعرج

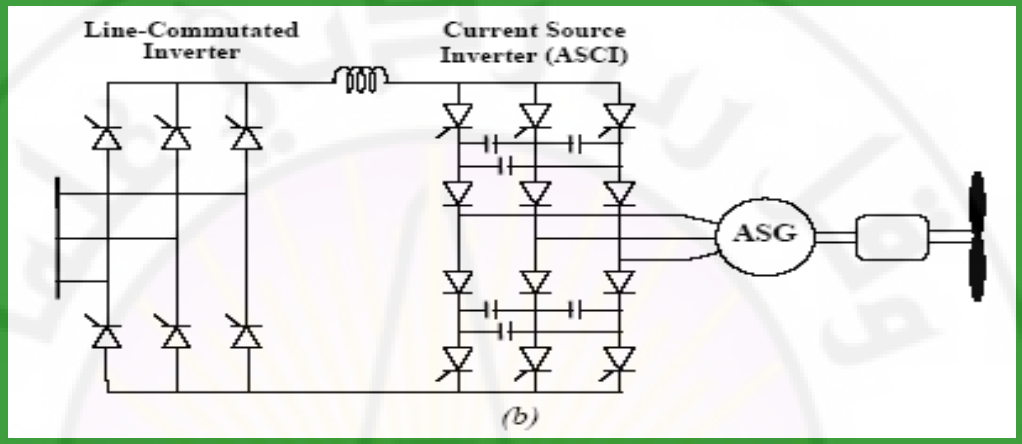
إن المعرجات ذات التبديل القسري تحتاج لملف بينها و بين الشبكة لكي تعمل و بالنسبة للتوافقيات ذات التردد المنخفض فيمكن إلغاءها باستخدام تقنية PWM أما التوافقيات ذات التردد المرتفع فيمكن إلغاءها باستخدام مرشح صغير بالنتيجة فإن المرشح المستخدم أصغر و أقل كلفة من المرشح المستخدم في المعرجات الثايرستورية .

٩-٨ نماذج لربط المولدات مع الشبكة:

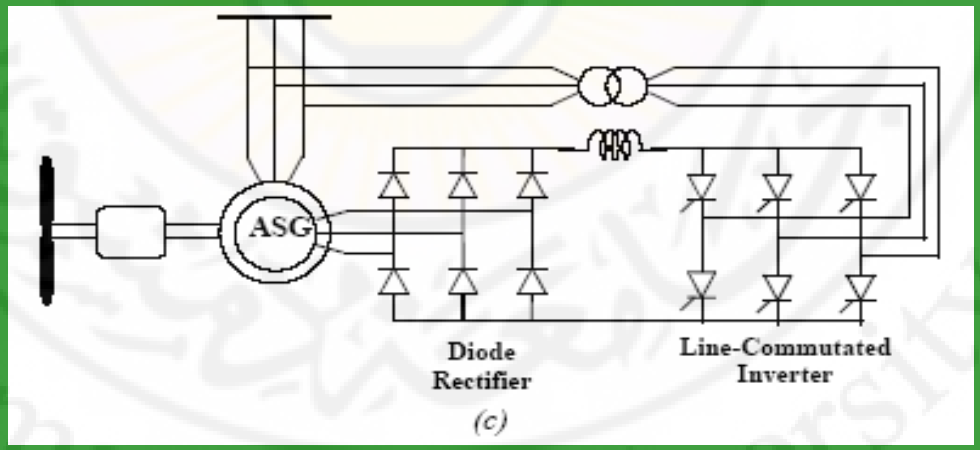
الشكل ٩-٢٢ يظهر طرق ربط المولدات التحريضية مع الشبكة حيث يظهر في الشكل ٩-٢٢ a مولد تحريضي ذو قفص سنجابي يربط مع الشبكة عن طريق جسر مضاعف يعتمد على معرج توتر متعاقب التبديل والعناصر الالكترونية التي تظهر في الشكل هي GTOs وأصبحت اليوم أيضاً عناصر IGBTs متاحة حتى 1 MW



الشكل ٩-٢٢ a :مولد تحريضي ذو قفص سنجابي يربط مع الشبكة عن طريق جسر مضاعف

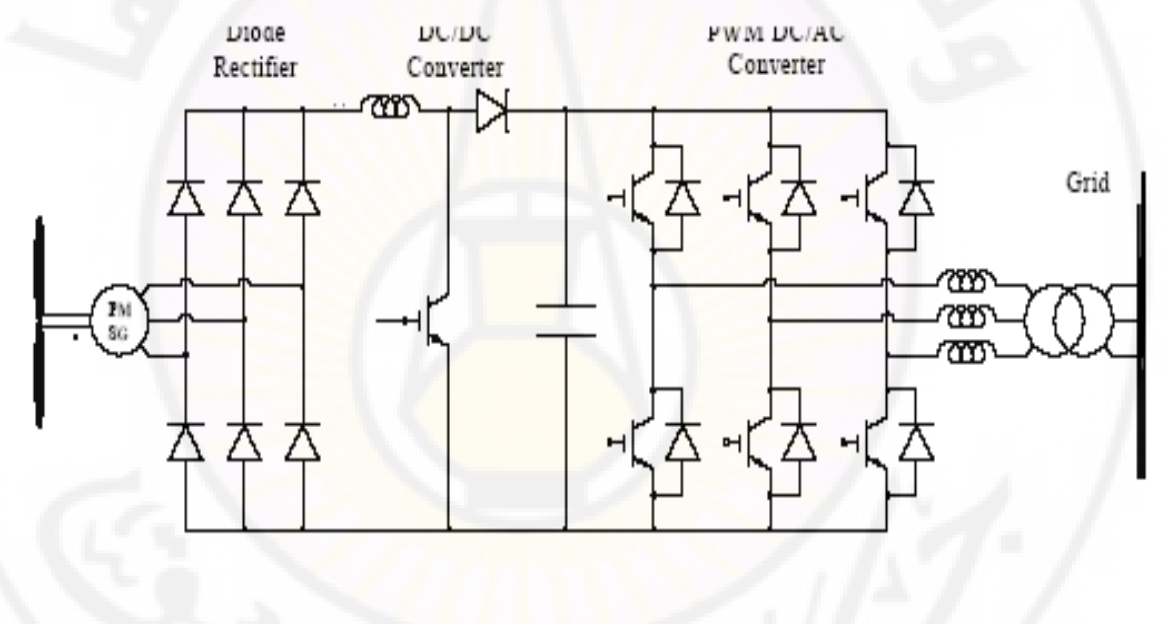


الشكل ٩-٢٢ b: مولد تحريضي ذو قفص سنجابي مع معرج تيار ذاتي التبديل من جهة المولد أما من جهة الشبكة فيستخدم معرج ثايرستوري ذو تبديل خطي

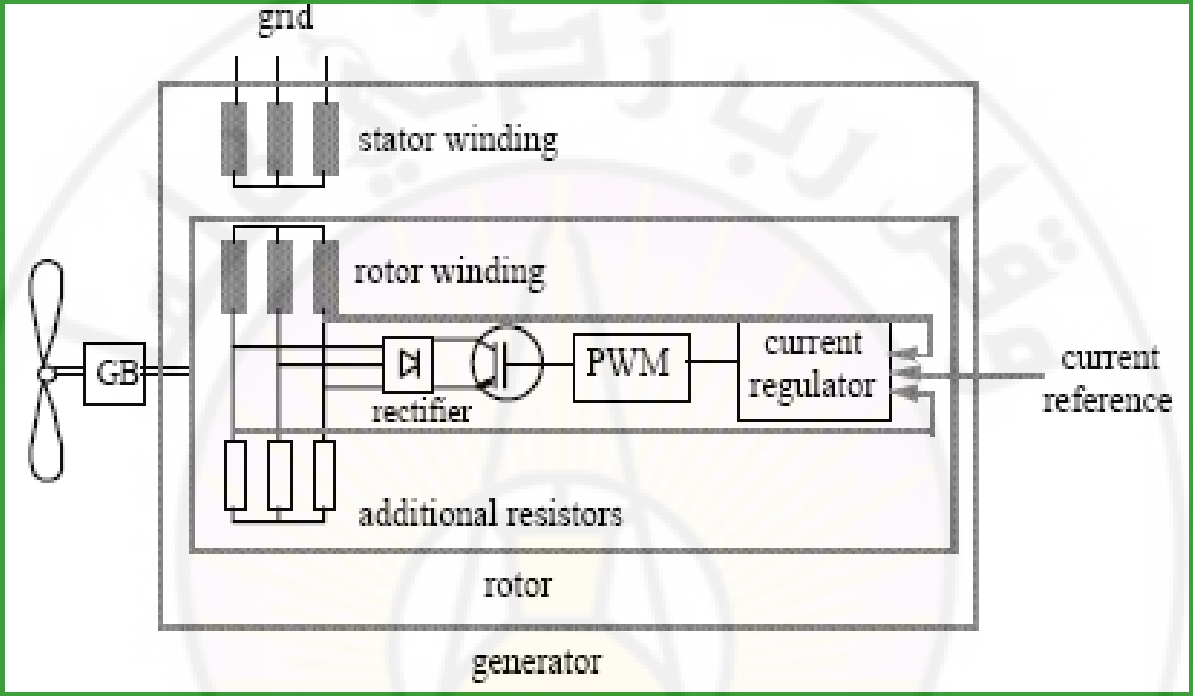


الشكل ٩-٢C 2: مولد تحريضي ذو دائر ملفوف و جسر تقويم من الديودات مربوط مع دائر المولد و معرج ثايرستوري ذو تبديل خطي من جهة الشبكة

المولد التزامني المستخدم في الدارة ٩-٢٣ من النوع الدائم المغناطيسية ويسمح بإلغاء علبة السرعة مع تصميم متعدد الأقطاب وخرج المولد يربط مع مقوم من الديودات أما من جهة الشبكة فيستخدم معرج توتر وعناصر IGBT.



الشكل ٩-٢٣ نظام توليد كهربائي لعنفة ريحية باستخدام مولد تزامني ذو مغناطيس دائم وبدون علبة سرعة



الشكل ٩-٢٤: شكل ربط المولد التحريضي مباشرة مع الشبكة وربط الدائر إلى مجموعة مقاومات إضافية عن طريق دارة الكترونية لقيادة تيار الدائر

هذه الطريقة مفضلة لبعض المصنعين لبساطتها ولكنها لا تتيح تغيير السرعة أكثر من ١٠% وبالتالي لا يمكن الحصول على أكبر استطاعة ممكنة على الخرج.
ولقد حقق المولد التحريضي مضاعف التغذية انتشاراً واسعاً في الأسواق العالمية.

٩-٩ مقارنة مجال التحكم لأنظمة التبديل :

٩-٩-١ نظام التبديل الذي يعمل مع مولد تحريضي :

a – نظام تبديل بمولد تحريضي ذو قفص سنجابي مربوط بشكل مباشر مع الشبكة و مع الشفرات بواسطة علبة سرعة . هذا النظام مستهلك للاستطاعة الردية و مجال التحكم الكهربائي هو فقط في حدود التحكم بالانزلاق (0.08-÷ 0) =s .والسرعة 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÷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÷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 ÷ 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 بنظام تعديل عرض النبضة و يعمل على نقل الاستطاعة من و إلى الشبكة و يمكن من خلاله التحكم بالاستطاعة الردية.

مجال القيادة الكهربائية للسرعة: $n = (0.6 \div 1.4)60\ f/P$

٩-٩-٢ نظام التبديل الذي يعمل بمولد تزامني :

g– نظام تبديل بمولد تزامني بتهييج خارجي مع علبة 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 تزامني بتهييج خارجي مع علبة 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 ومجال القيادة الكهربائية للسرعة $n = (0.5 \div 1.2)f/p$.

i - نظام تبديل بمولد تزامني بتهييج خارجي مع علبة سرعة يتم ربط ملف الثابت مع الشبكة عبر مبدلة الكترونية. يستخدم نظام تعديل عرض النبضة للقيادة ويتم 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 تزامني بنفس مواصفات النظام في الفقرة i و لكن بدون علبة سرعة. وبالتالي يدور بسرعة الدوا. ويصمم دائر المولد التزامني بعدد كبير من الأقطاب.

k – نظام تبديل بمولد تزامني ذو مغناطيس دائم. وبدون علبة سرعة. ويتم ربط ملف الثابت عن طريق مبدلة اكلترونية و يقاد بنظام تعديل عرض النبضة ويستطيع هذا النظام التحكم بالاستطاعة الردية و العمل في مجال قيادة كهربائية للسرعة : $n = (0.6 \div 1.2)\ 60f/P$

l- 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 $n = (0.8 \div 1.2)\ 60f/P$

٩-٩-٣ نتائج مقارنة أنظمة التبديل :

من مقارنة أنظمة التبديل المستخدمة و المشروحة سابقا" 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: $n = (0.6 \div 1.4)\ 60f/P$

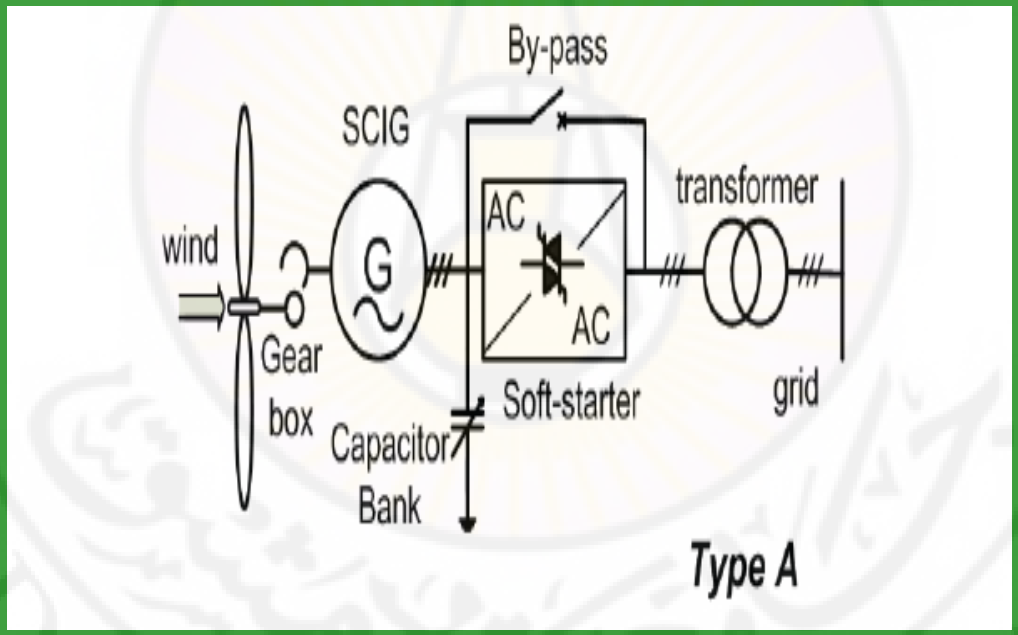
بالإضافة إلى إمكانية التحكم بالستطاعة الردية والتحكم بالاستطاعة الفعلية المتبادلة مع الشبكة الكهربائية.

٩-١٠ المردود في العنفات الريحية :

٩-١٠-١ تحديد الضياعات :

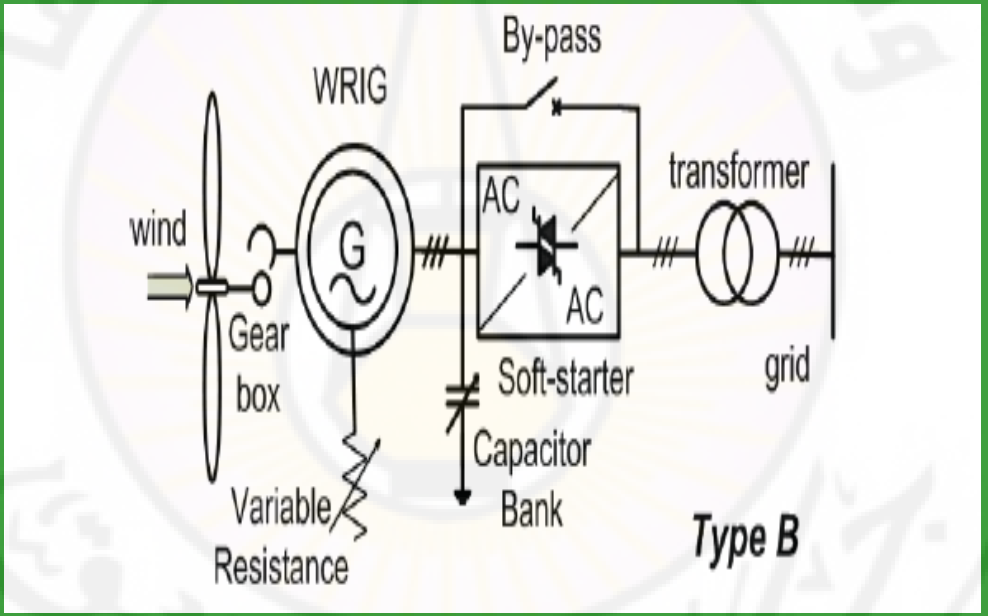
الدراسة ستتم على أربعة أنظمة تبديل مستخدمة في طاقة الرياح وهي :

١- نظام السرعة الثابتة بمولد تحريضي ذو قفص سنجابي مربوط مباشرة مع الشبكة Squirrel Cage Induction Generator (SCIG) كما في الشكل ٩-٢٥ (Type A).



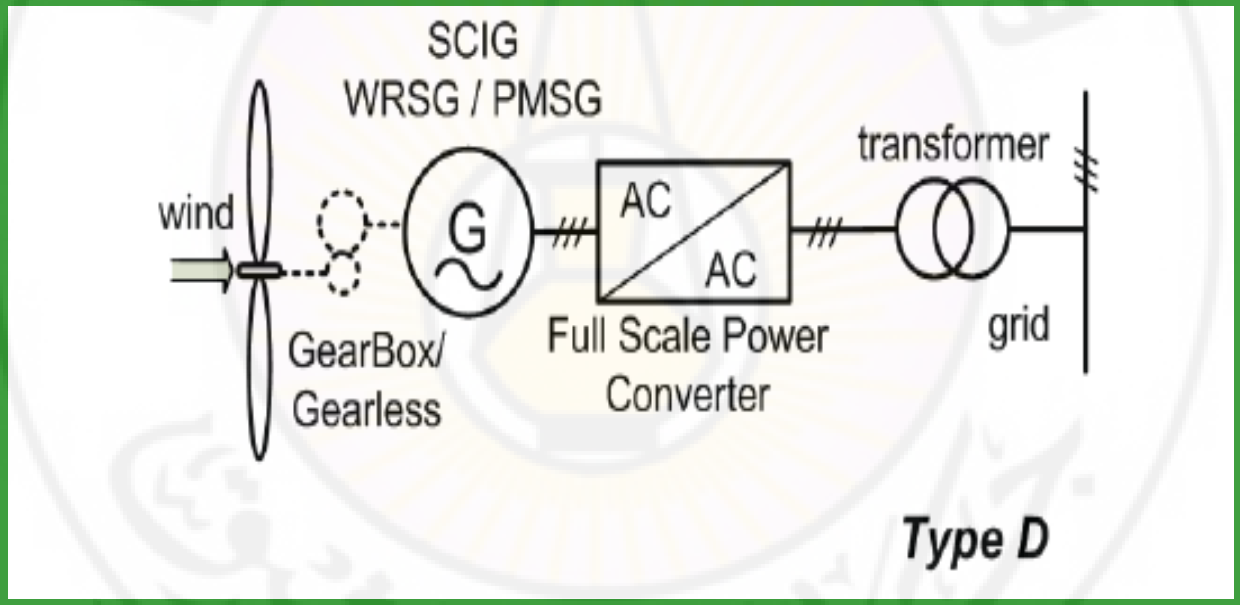
الشكل ٩-٢٥ : نظام السرعة الثابتة بمولد تحريضي ذو قفص سنجابي مربوط مباشرة مع الشبكة (SCIG)

2- نظام السرعة المتغيرة بشكل محدود باستخدام مقاومات متغيرة مربوطة مع دائر مولد تحريضي ذو دائر ملفوف Wound Rotor Induction Generator (WRIG) كما في الشكل ٩-٢٦ (Type B).



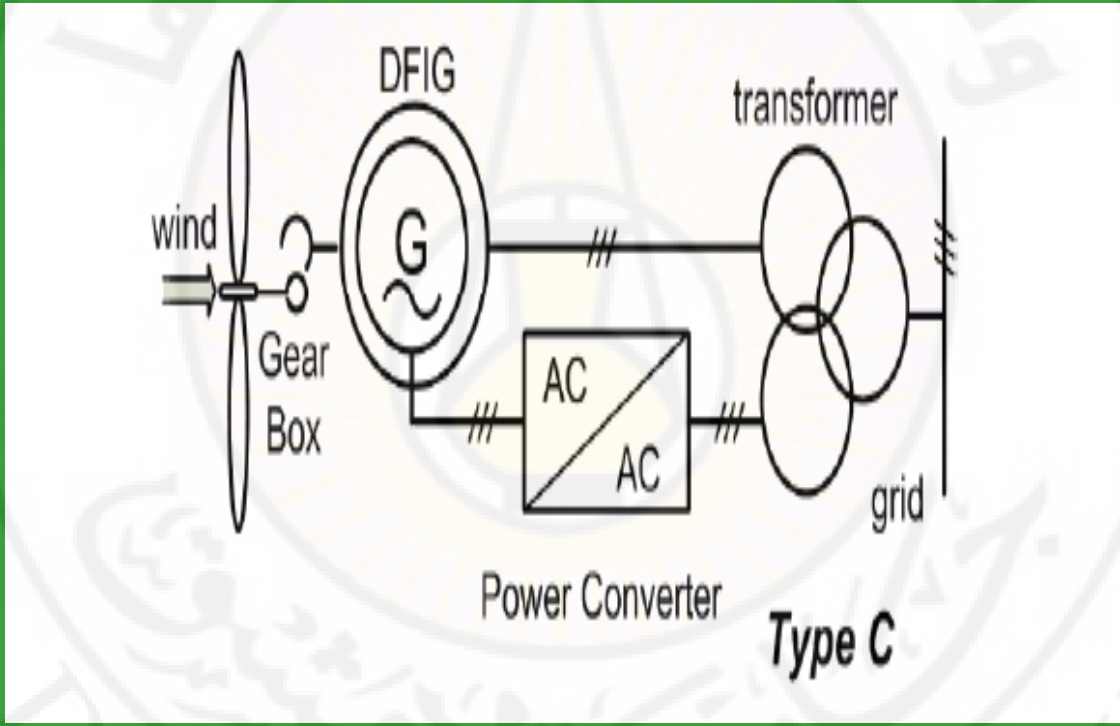
الشكل ٩-٢٦ : نظام السرعة المتغيرة بشكل محدود باستخدام مقاومات متغيرة مربوطة مع دائر مولد تحريضي ذو دائر ملفوف (WRIG)

٣- نظام متغير السرعة مع نظم قيادة إلكترونية WRSG –PMSG –SCIG. أي يمكن أن يكون المولد تحريضي أو تزامني ذو مغناطيس دائم Permanent Magnet Synchronous Generator أو تزامني مع ملف تهييج كما في الشكل ٩-٢٧ (Type D).



الشكل ٩-٢٧ : نظام متغير السرعة مع نظام قيادة إلكترونية كامل
WRSG –PMSG –SCIG

٤- نظام متغير السرعة مع مولد مضاعف التغذية Doubly Fed Induction) Generator (DFIG) كما في الشكل ٩-٢٨ (Type C).



الشكل ٩-٢٨: نظام متغير السرعة مع مولد مضاعف التغذية

٩-١٠-٢ الضياعات الإيروديناميكية :

تعطى الاستطاعة الميكانيكية بالعلاقة:

$$P_{mech} = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, B) W^3 \qquad (٩-٣٢)$$

ومن المعادلة نلاحظ أن

Cp - معامل الاستطاعة الذي يتعلق بمحددين:

(λ) وهو بدوره متعلق بالسرعة الخطية للشفرة. وبعبارة أخرى متعلق بقطر الدائر .

(B) فهو يتعلق بزاوية الانحراف للشفرات وهذا يعني أنه عند السرعات القليلة يكون المردود ضعيفاً في الأنظمة التي تعمل على سرعات ثابتة .

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 للعنفة الريحية مهم جداً في الحصول على أفضل مردود .

ويتم اعتماد السرعة الاسمية التي يجب اختيار المولد المناسب للعمل عليها وبالتالي النظام المناسب بعد دراسة الموقع بشكل جيد وتحديد المعدل السنوي لسرعة الرياح فيه.

٩-10-٣ الضياعات في علبة السرعة :

تعطى الضياعات في علبة السرعة بالعلاقة التالية :

$$P_{loss,GB} = \eta P_{lowspeed} + \xi P_{nom} \frac{\Omega_r}{\Omega_{r,nom}} \quad (33\text{-}9)$$

حيث ή : ثابت الضياع للمسننات .

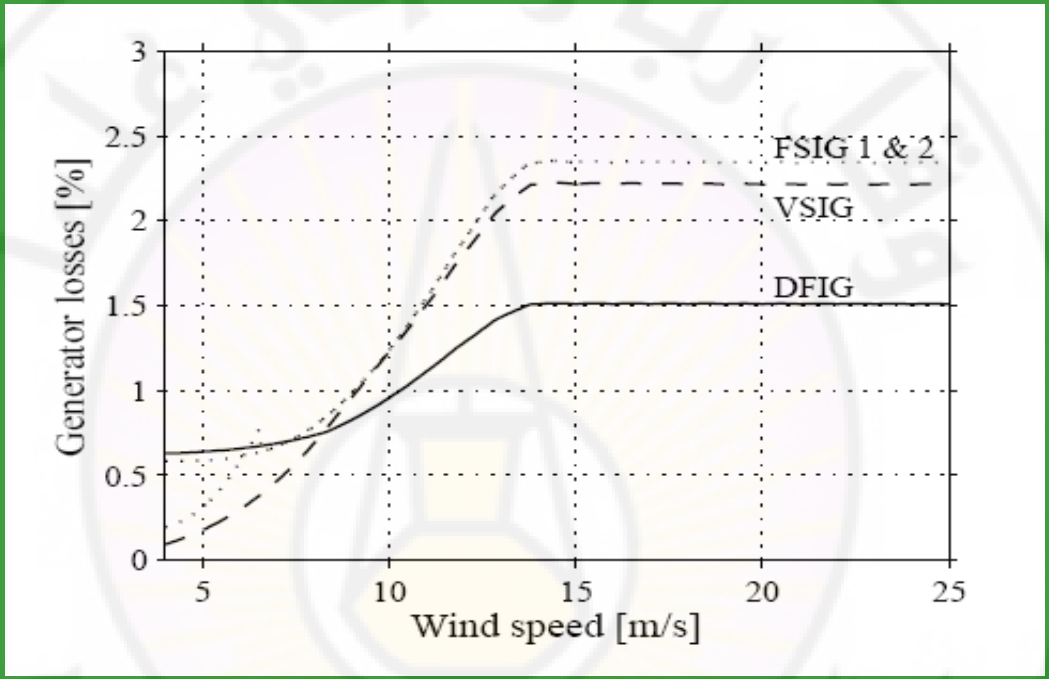
ξ: ثابت الضياع للاحتكاك .

ومن أجل استطاعة 2 MW على سبيل المثال تعطى قيم لهذه الثوابت : ή = 0.02 , ξ = 0.005 .

والضياعات متقاربة في الأنظمة التي تستخدم علبة سرعة، بينما تكون هذه الضياعات معدومة عندما يعمل النظام بدون علبة سرعة.

٩-١٠-٤ الضياعات في المولد :

بالاعتماد على المخططات الكهربائية المبينة في الأشكال ٩-٢٦ وحتى ٩-٢٨ وبإهمال هبوط التوتر على حلقات الانزلاق يبين الشكل ٩-٢٩ الضياعات في المولدات حسب تغيرات سرعة الرياح .



الشكل ٩-٢٩ : منحنيات الضياعات في المولدات الكهربائية حسب تغيرات سرعة الرياح

ونلاحظ من المنحنيات أن الضياعات في النظام DSIG أعلى من الضياعات للنظام DFIG عند السرعات العالية ويعود السبب لتغير نسب التبديل في علبة السرعة .

٩ـ١٠ـ٥ ضياعات نظام القيادة الإلكترونية :

لقيادة المولد التحريضي عند سرعة متغيرة يتم استخدام معرج ثلاثي الطور ويتم التوصيل عن طريق تايرستور أو ترانسوستور مع ديود كما في الشكل ٩ـ٣٠.

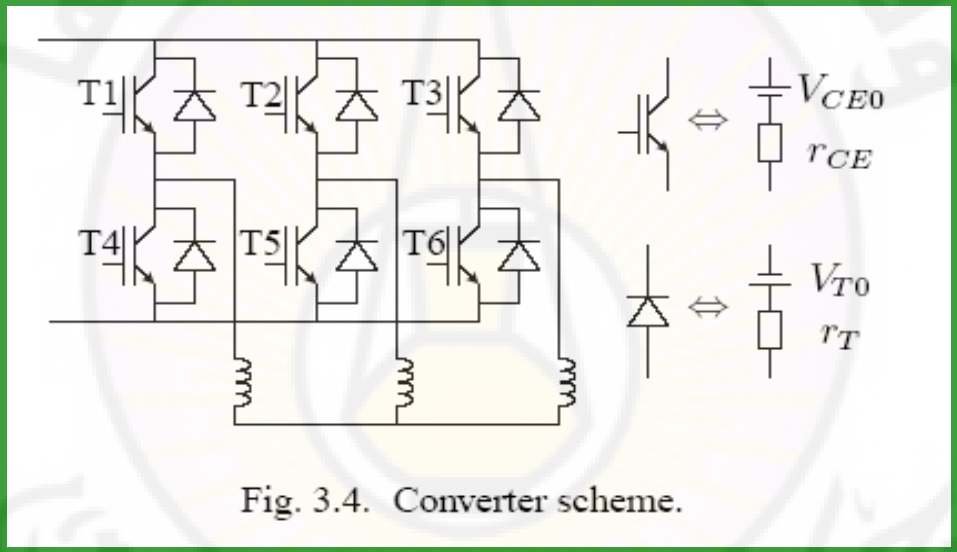


Fig. 3.4. Converter scheme.

الشكل ٩ـ٣٠: دارة نموذجية لمبدلة القيادة الإلكترونية لمحرك تحريضي

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 .

$$P_{c,T} = \frac{V_{CE0} I_{rms} \sqrt{2}}{\pi} + \frac{I_{rms} V_{CE0} m_i \cos(\phi)}{\sqrt{6}} + \frac{r_{CE} I_{rms}^2}{2} + \frac{r_{CE} I_{rms}^2 m_i}{\sqrt{3}\cos(\phi) 6\pi} - \frac{4 r_{CE} I_{rms}^2 m_i \cos(\phi)}{45\pi\sqrt{3}} \quad (34\text{-}9)$$

$$P_{c,D} = \frac{V_{T0} I_{rms} \sqrt{2}}{\pi} - \frac{I_{rms} V_{T0} m_i \cos(\phi)}{\sqrt{6}} + \frac{r_T I_{rms}^2}{2} - \frac{r_T I_{rms}^2 m_i}{\sqrt{3}\cos(\phi) 6\pi} + \frac{4 r_T I_{rms}^2 m_i \cos(\phi)}{45\pi\sqrt{3}} \quad (35\text{-}9)$$

حيث :

Irms - التيار المكافئ للشبكة أو المولد .

Mi - ثابت التمثيل .

Ø - فرق الطور بين التوتر والتيار .

وبالاعتماد على جداول المصنعين:

وبافتراض rIGBT = rce ≈ rt و VIGBT = Vceo ≈ Vto يمكن تقريب العلاقات ٩-35 و ٩-36 وكتابتها على النحو التالي :

$$P_c = P_{c,T} + P_{c,D} = V_{IGBT}\frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_{rms} + r_{IGBT} I_{rms}^2$$

(٩-٣٦)

ويمكن تمثيل ضياعات التبديل (الفصل والوصل) بشكل متناسب مع التيار حسب المعادلات التالية :

$$P_{s,T} = (E_{on} + E_{off})\frac{2\sqrt{2}}{\pi}\frac{I_{rms}}{I_{C,nom}} f_{sw} \approx V_{sw,T}\frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_{rms}$$

(37-9)

$$P_{s,D} = E_{rr}\frac{2\sqrt{2}}{\pi}\frac{I_{rms}}{I_{C,nom}} f_{sw} \approx V_{sw,D}\frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_{rms}$$

(38-9)

وباعتبار Ic , nom) Eon + Eoff) و Err / Io , nom نسب كافية وباعتبار القيم في الجدول (٦-٢) 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 وبتقريب مقبول إلى :

$$P_{\text{loss}} = 3(P_c + P_{s,T} + P_{s,D})$$
$$= 3\left((V_{IGBT} + V_{sw,T} + V_{sw,D})\frac{2\sqrt{2}}{\pi}I_{\text{rms}} + r_{IGBT}I_{\text{rms}}^2\right).$$

(39-9)

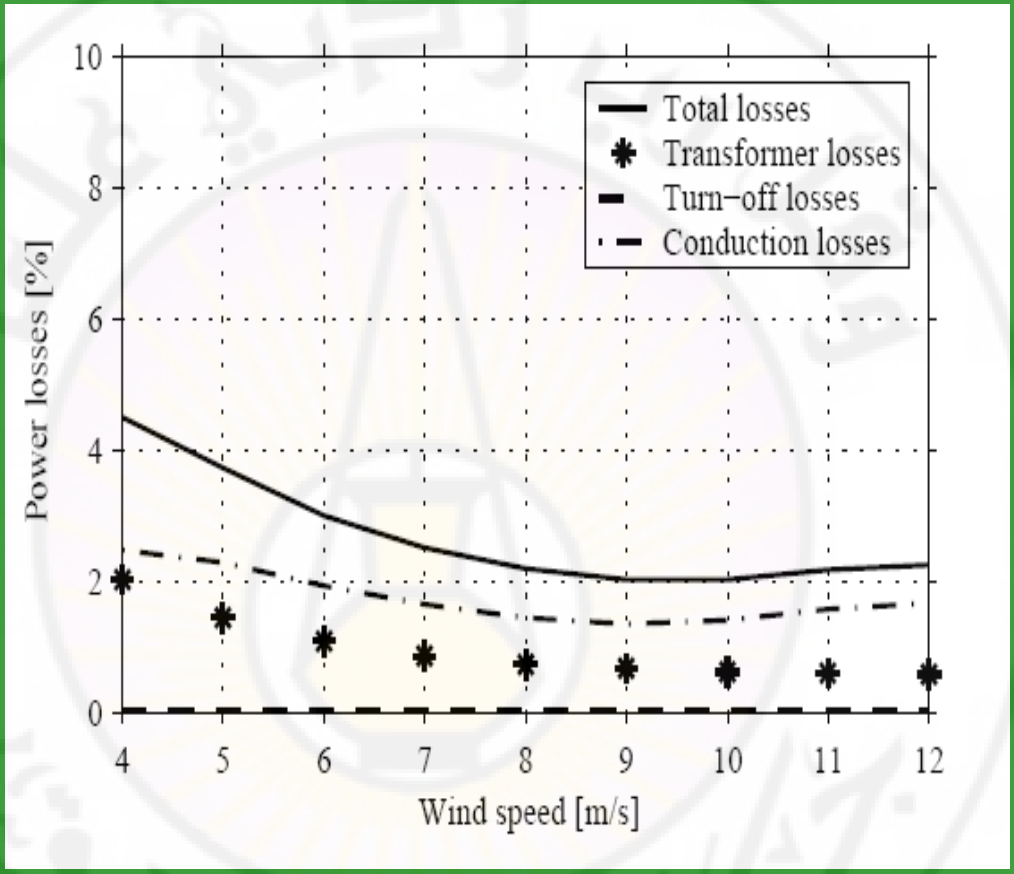
وعلى اعتبار أنه يوجد نظام تقويم من جهة (GSC) ونظام تعريج من جهة الشبكة MSC تكون فإن قيمة الضياعات الكلية لنظام القيادة الإلكترونية تكون :

$$P_{\text{loss,converter}} = P_{\text{loss,GSC}} + P_{\text{loss,MSC}}.$$

(40-٩)

الشكل ٩-٣١ يوضح قيمة الضياعات الكلية الكهربائية للمحولة ونظام القيادة الالكترونية وهي تتراوح من ٢-٤ % من الاستطاعة الاسمية وباستخدام المولد مضاعف التغذية Type C تنخفض هذه الضياعات إلى ٠.٨-١.٥ % لأن نظام القيادة الإلكترونية للنظام DFIG يعمل فقط على ٣٠% من الاستطاعة الكهربائية الاسمية.

الخط المتصل يمثل الضياعات الكلية والخط على شكل النجوم يمثل ضياعات المحولة والخط المتقطع يمثل ضياعات الفصل والخط المتقطع النقطي يمثل ضياعات التوصيل



الشكل ٩-٣١: منحنيات الضياعات الكلية الكهربائية للمحول ونظام القيادة الالكترونية

٩-١٠-٦ الضياعات الكلية:

إن قيمة الضياعات الكلية هي مجموع الضياعات الأربعة التي يتم حسابها في الفقرات السابقة (ضياعات ايروديناميكية، ضياعات علبة السرعة، ضياعات المولد ، ضياعات نظام القيادة الإلكترونية) .

ومن جمع الضياعات السابقة، والمقارنة بين الأنظمة المختلفة وبافتراض أن العنفات 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، وبنسبة تتراوح من ١-٢ % فقط.

٩-١٠-٧ مقارنة المردود للعنفات 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 ٩-٣.

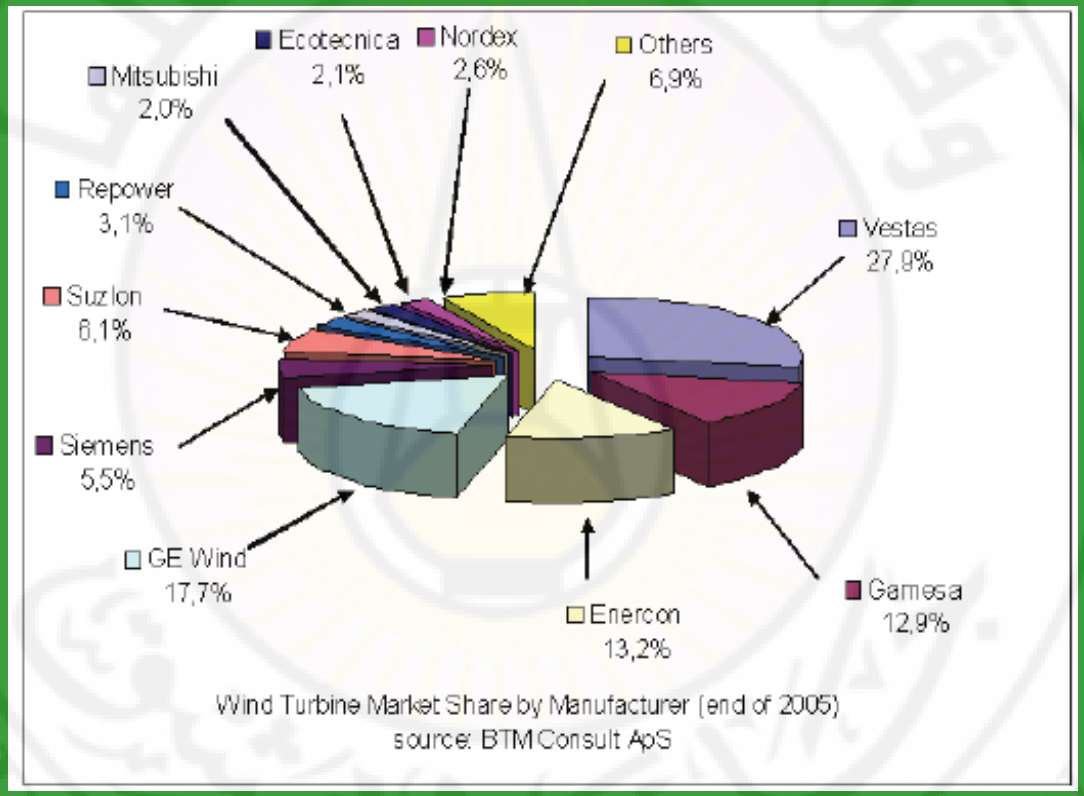
ونلاحظ من هذه المقارنة تقارب الميزات للنموذج C والنموذج D ، مع أفضلية من ناحية التكاليف الاستثمارية للنموذج C ، وأفضلية للنموذج D من حيث الصيانة.

الجدول ٩-٣: مقارنة المردود للعنفات الريحية

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	partly،Yes	partly،Yes	YES	YES
Reactive compensator (C)	Yes	Yes	NO	NO
Investment	+ +	+ +	+	0
Maintenance	+ +	+ +	0	+

٩-١٠-٨ تطور استخدام المولد مضاعف التغذية في الأسواق :

يمكن تحديد عشرة شركات عالمية تسيطر على سوق طاقة الرياح عالميا و هي موضحة بالشكل ٩-٣٢.



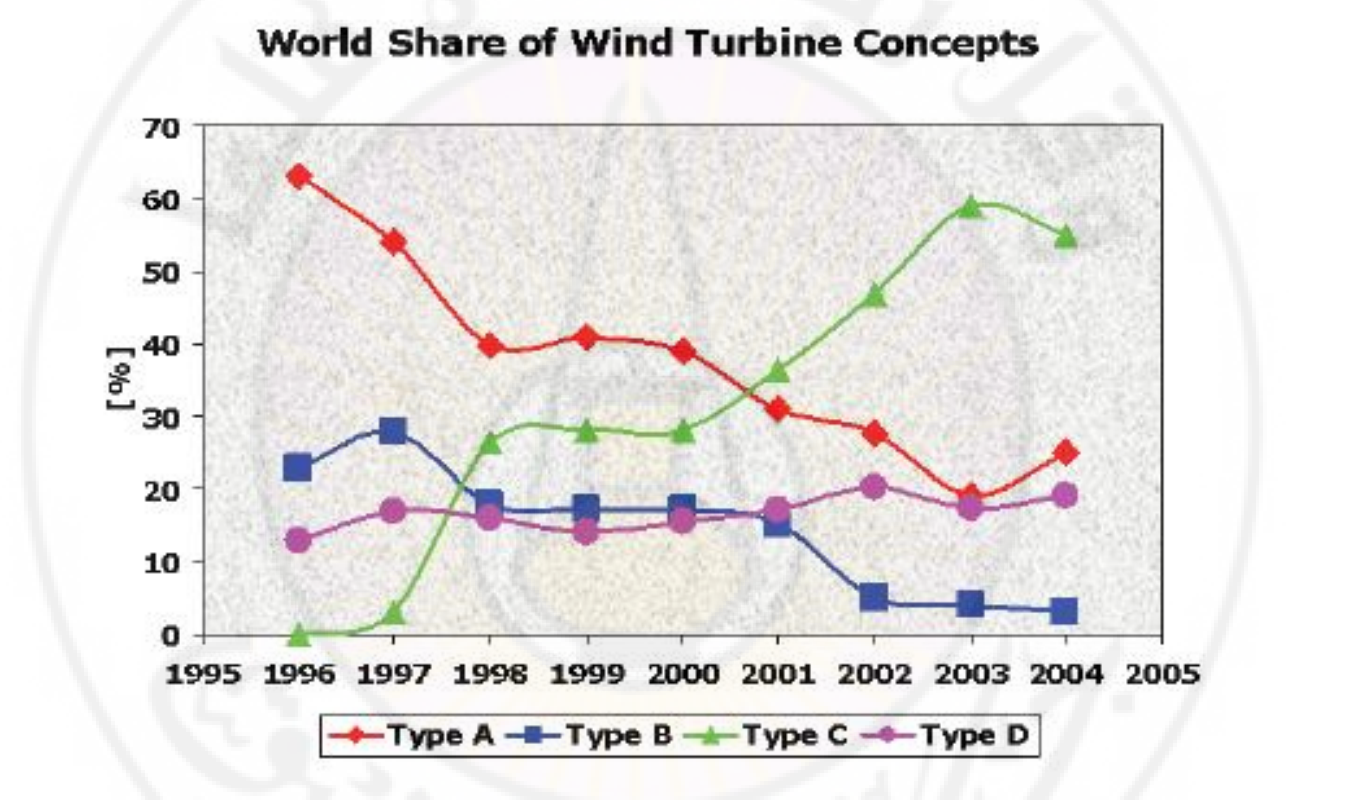
الشكل ٩-٣٢: تطور استخدام المولد مضاعف التغذية في الأسواق

الجدول ٩-٤: إحصائية تطور استخدام المولد مضاعف التغذية في الأسواق حتى نهاية عام ٢٠٠٥

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
Gamesa	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

وبدراسة خطط هذه الشركات و اتجاهاتها من حيث المولدات المستخدمة لديها و نظم القيادة من خلال الجدول ٩-٤ الذي يعتمد على دراسة تمت في نهاية عام 2006 نلاحظ :

- إن جميع الشركات الخمس الكبرى تستخدم حاليا" 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 وتحديداً 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 GEيستخدم مولد تزامني مع تصميم خاص لملف الدائر.
- بدراسة حصة المولد التحريضي مضاعف التغذية في السوق العالمية نلاحظ من خلال المنحني في الشكل٩-٣٣ 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 لتزداد إلى ما فوق 50% لعام 2004. مع انخفاض نسبة استخدم 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.



الشكل ٩-٣٣ : منحني دراسة حصة المولد التحريضي مضاعف التغذية في السوق العالمية

٩-١١ تأثير العنفات الريحية على الشبكة الكهربائية :

الجدول ٩-٥ يوضح مختلف تأثيرات العنفات الريحية على الشبكة الكهربائية وهي.

٩-١١-١ 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 الريحية أو التبديل بينها و تؤدي هذه الظاهرة إلى فصل بعض الأعمال الحساسة .

٩-١١-٢ ظهور التوافقيات (Harmonics) :

تظهر التوافقيات و بشكل رئيسي التوافقية الخامسة و التوافقية السابعة في بعض الشبكات الضعيفة و خصوصا" عند ذروة الحمل مساء" .وقد تؤدي هذه الظاهرة إلى فشل تشغيل بعض الدارات الإلكترونية

٩-١١-٣ اضطراب أو اختلال توازن التوتر (Unbalanced) :

تنتج هذه الظاهرة عن عدم انتظام الأعمال الكهربائية على الأطوار الثلاثة مما يؤدي إلى زيادة الحمل و ارتفاع صوت الضجيج للأجهزة التي تعمل على توتر ثلاثي الطور .

٩-١١-٤ 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.

٩-١١-٥ الانقطاع المفاجئ القصير لموجة التوتر:

وهو انقطاع قصير لموجة التوتر ينتج عن فصل نتيجة تماس مباشر أو خطأ في الحمايات . ويؤدي إلى انقطاع التوتر عن التجهيزات المربوطة مع الشبكة.

٩-١١-٦ 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.

$$P_1t = C_f (\Psi_k, V_a) S_n / S_k \qquad (41\text{-}9)$$

حيث: Ψ_k - زاوية فرق الصفحة لدارة القصر.

V_a - متوسط سرعة الرياح السنوية.

S_n - الاستطاعة الظاهرية للعنفة الحركية.

S_k - الاستطاعة الظاهرية لدارة القصر.

- معامل خطوة الاضطراب $K_f(\Psi_k)$ و المنبعث عن تشغيل المولد و يعطى بالعلاقة :

$$P_{st} = 18(N_{10})^{0.31} \cdot K_f(\Psi_k) \quad S_n / S_k \qquad (42-٩)$$

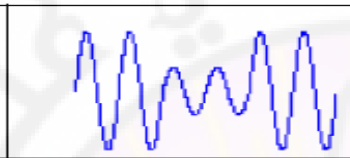
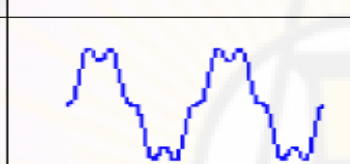
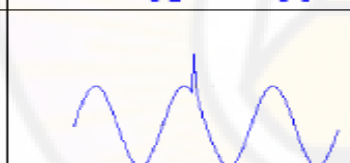
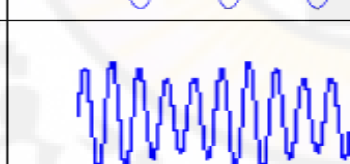
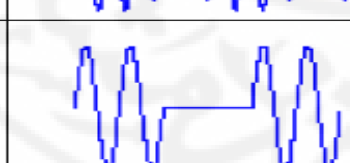
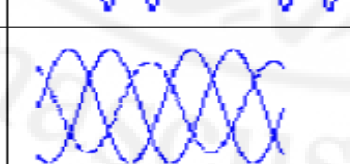
حيث: N_{10} - عدد مرات التشغيل خلال ١٠ دقائق.

$Ku(\Psi_k)$- معامل تغير التوتر وهو يعبر عن مقدار تغير قيمة موجة التوتر كنسبة مئوية و يعطى بالعلاقة :

$$D = 100Ku(\Psi_k) \quad S_n / S_k \qquad (43-٩)$$

وتعطي النورمات العالمية القيم الحدية المسموح بها لهذه المعاملات حيث يمكن مقارنتها مع القيم المحسوبة.

الجدول ٩-٥:مختلف تأثيرات العنفات الريحية على الشبكة الكهربائية

Disturbance		Origin	Consequences
Voltage sag undervoltage 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 Overvoltages 2.3		Earth fault on another phase Shut down of large loads Lightning strike on net-work structure Incorrect setting in sub-stations	Ageing of insolation Disconnection of equipment May harm equip-ment with inadequate design margins
Harmonic dis-tortion 5.2-5.3		Nonlinear loads Resonance-phenomena Transformer saturation Notches	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 Wind turbines Start up of large motors	Ageing 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 equip-ment

٩-١٢ 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:

١- 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.

٢- 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 وتقسم بدورها إلى قسمين:

- العنفات المركبة على الأرض.
- العنفات المركبة في عرض البحر خلف الشاطئ أو بعيداً عن الشاطئ.

9-١٢-١ العنفات الريحية المستقلة Stand Alone Wind Turbines :

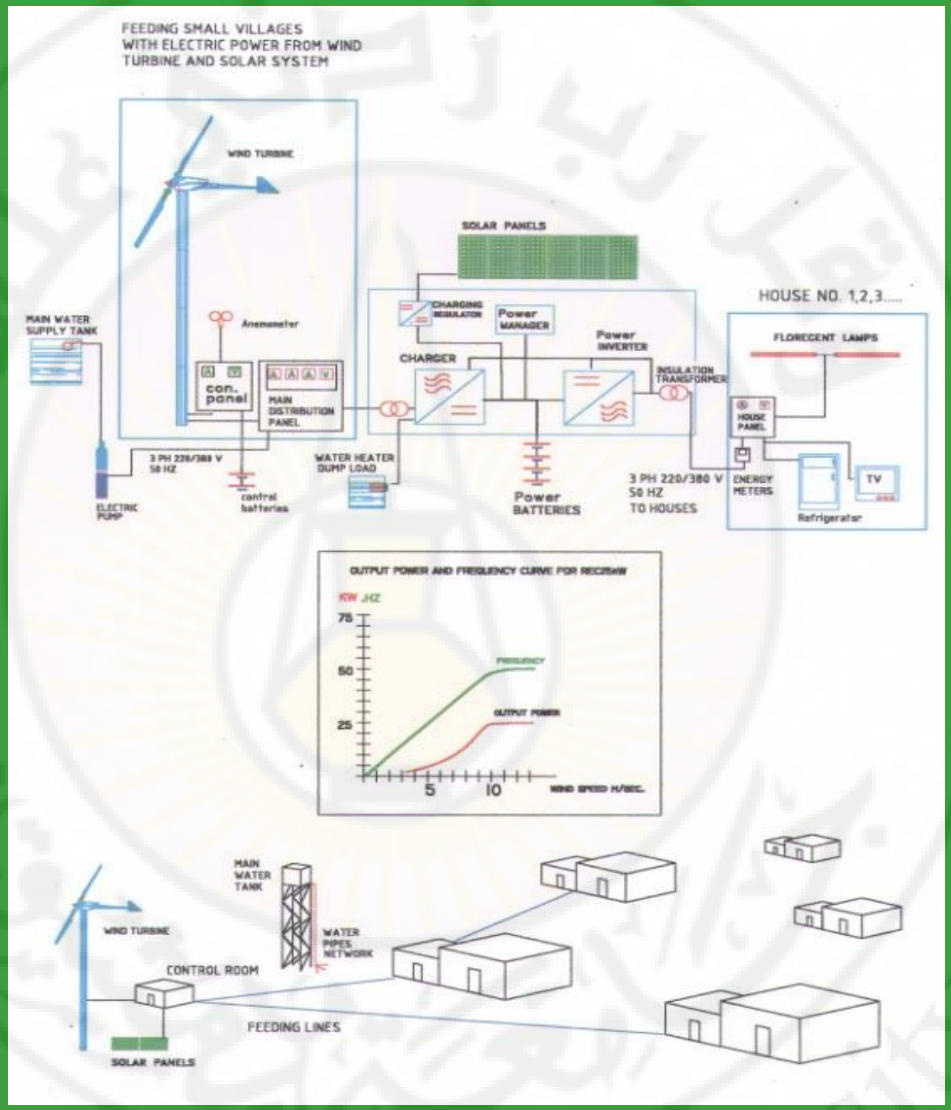
يبين الشكل9- 34مخططاً توضحياً لعنفة ريحية مستقلة تغذي بيتاً أو عدة بيوت(قرية مثلاً) في موقع ملائم لسرعة الرياح. وعادة يكون هذا الموقع بعيداً عن الشبكة الكهربائية العامة.

كما يمكن أن يكون منشأة صغيرة أو مضخة مياه جوفية تغذى من القدرة الكهربائية التي تنتجها العنفة الريحية المستقلة.

وعادة تركب 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.

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 ٢٠٠ 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.



الشكل ٩-٣٤: مخطط توضحي لعنفة ريحية مستقلة تغذي بيتاً أو عدة بيوت(قرية مثلاً) في موقع ملائم لسرعة الرياح

٩-١٢-٢ العنفات الريحية المربوطة مع الشبكة Connected with Grid Wind Turbines

٩-١٢-٢-١ 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 تركب 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 يحقن القدرة الكهربائية المنتجة إلى خطوط التوتر الكهربائي. وتتراوح استطاعة هذه العنفات عادة من مائة كيلوات وتصل إلى عدة ميغاوات. يبين الشكل ٩-٣٥ عنفة ريحية مربوطة مع الشبكة باستطاعة ٥ ميغاوات.

أما مجموع الاستطاعة المركبة التي يمكن أن تصل إليها المزارع الريحية فتصل إلى عدة مئات من الميغاوات. يبين الشكل ٩-٣٦ 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 لنظم تبديل مختلفة تم شرحها بالتفصيل في فقرة المولدات الكهربائية في الفصل السابق.



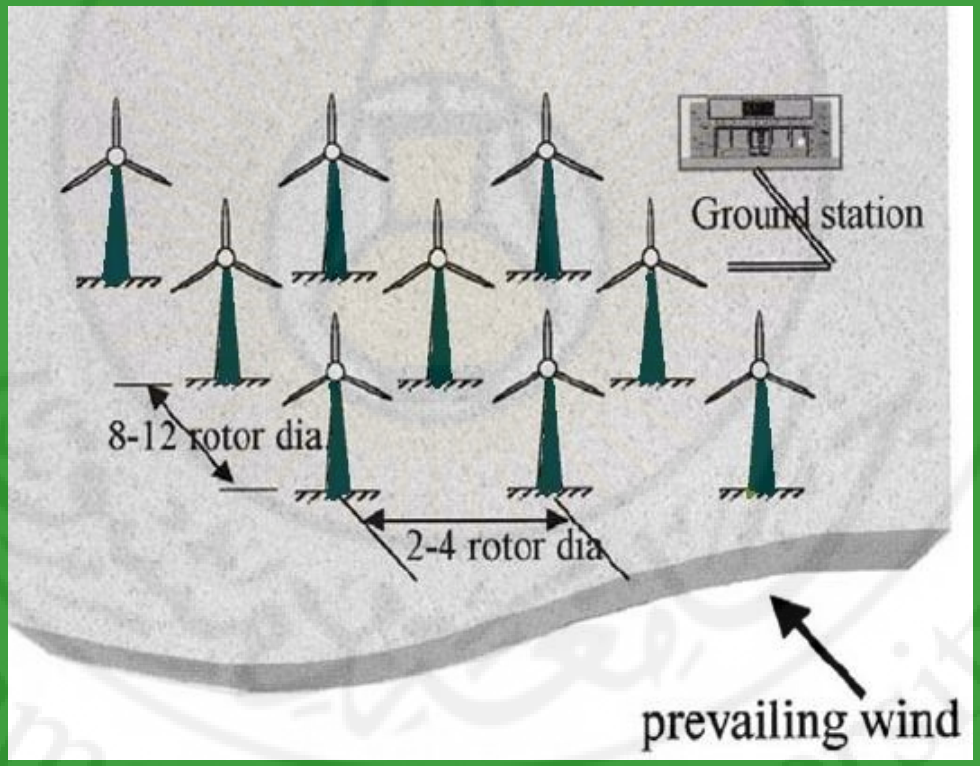
الشكل ٩-٣٥: عنفة ريحية كبيرة الاستطاعة مربوطة مع الشبكة الكهربائية



الشكل ٩-٣٦: مزرعة ريحية مركبة على أحد المواقع الأرضية(مرتفع)

يبين الشكل ٩-٣٧ مجموعة عنفات ريحية مركبة في الموقع وفقاً لقواعد تركيب المزارع الريحية.

ويتم توزع العنفات الريحية التي تكون عادة متساوية الاستطاعة فيما بينها، بحيث تكون المسافات بينها في الصف الواحد بمواجهة الريح محددة ومحسوبة والمسافات بين الصفوف أيضاً محددة ومحسوبة وتقاس المسافات بأضعاف قياس قطر الدوار (Diameter)، حيث يبين الشكل ٩-٣٧ على سبيل المثال البعد بين كل عنفتين في الصف الواحد من ٢ إلى ٤ قطر الدوار وبين الصفوف من ٨ إلى ١٢ قطر الدوار. وتخضع هذه المسافات لحسابات تفصيلية سيأتي شرحها في مؤلف خاص بالمزارع الريحية.



الشكل ٩-٣٧: توزع العنفات في المزرعة الريحية

٩-١٢-٢-٢ 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 وملائمة 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 البلاد. وتتراوح أعماق المياه التي يتم فيها تركيب العنفات أو المزارع الريحية بين ١٠ و ٤٠ 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 المسافات بين مواقعها والشاطئ بعيدة نسبياً. وكانت الدنمرك من أوائل الدول التي قامت بتركيب هذا النوع من العنفات والمزارع الريحية.

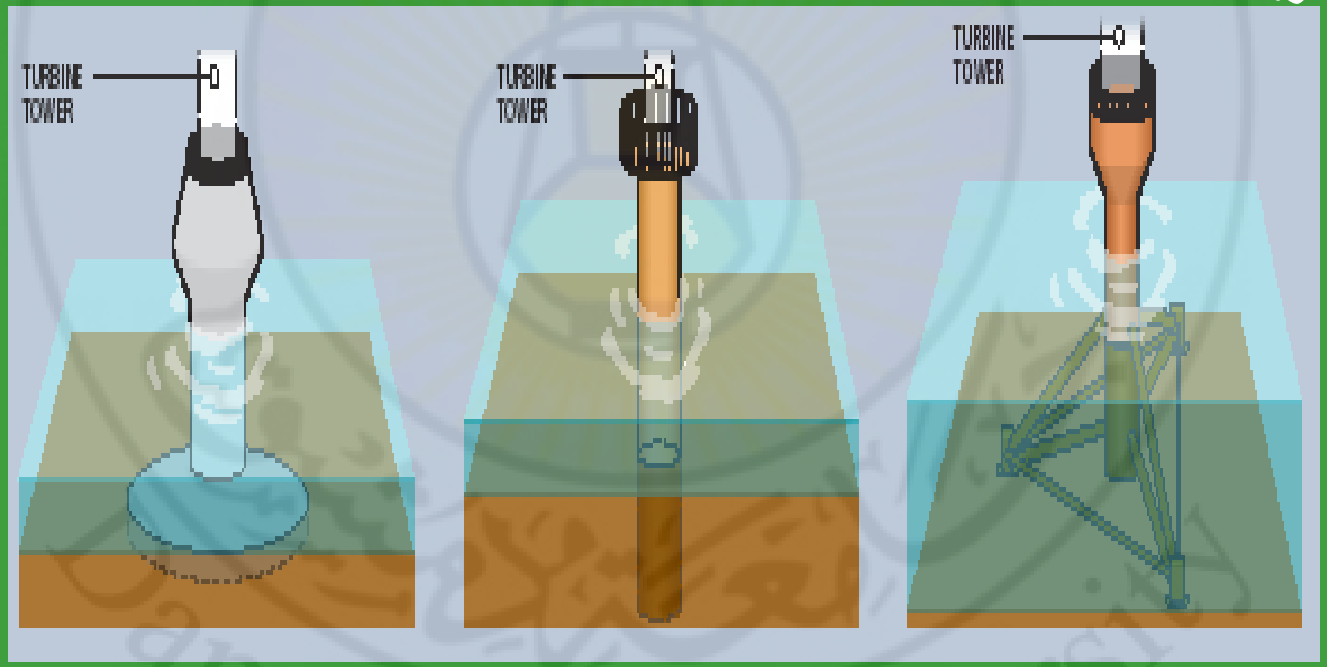
يبين الشكل ٩-٣٨ عددا من العنفات الريحية المركبة في عرض البحر بعيداً عن الشاطئ.



الشكل ٩-٣٨:عدد من العنفات الريحية المركبة في عرض البحر بعيداً عن الشاطئ

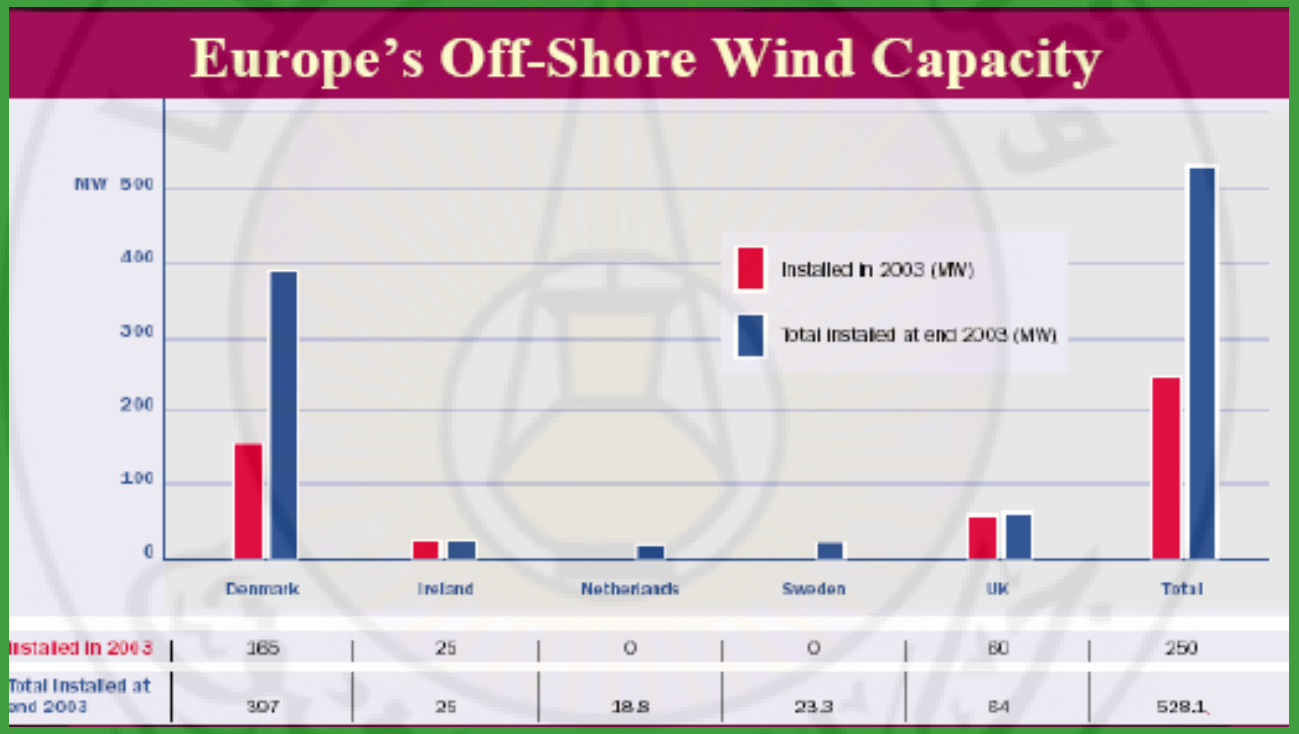
ويبين الشكل ٩-٣٩ أشكال القواعد التي تحمل هذه العنفات والتي تركب على الأرض تحت الماء (قعر البحر أو البحيرة). وتتبع طرق معقدة لتركيب هذه العنفات وتكون هذه العنفات مرتفعة الثمن بالمقارنة مع العنفات المركبة على اليابسة، لذلك تكون الاستطاعة المركبة للعنفة كبيرة نسبياً ولاتقل عن ٢ إلى ٣ ميغاوات لكل منها.

ونظراً لنعومة 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 ٩-٣٩: أشكال القواعد التي تحمل العنفات والتي تركب على الأرض تحت الماء

يبين الشكل ٩ـ٤٠ عدد العنفات المركبة بعيداً عن الشاطئ في بعض الدول الأوروبية عام ٢٠٠٣، بالمقارنة مع مجموع العنفات الإجمالية المركبة في ذلك العام على سبيل المثال.



الشكل ٩ـ٤٠ عدد العنفات المركبة بعيداً عن الشاطئ في في بعض الدول الأوروبية عام ٢٠٠٣، بالمقارنة مع مجموع العنفات الإجمالية المركبة في ذلك العام

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

الفصل العاشر
المسألة البيئية و الاقتصادية
Environmental and Economic Issue

محاضرات أ.د.كمال ناجي
شعبة الطاقات المتجددة

١٠-١ التأثيرات البيئية والاجتماعية الناجمة عن إنشاء العنفات و المزارع الريحية:

يؤدي إنشاء العنفات 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:

١٠-١-١ مرحلة إنشاء محطة الرياح:

١- 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 العنفات الريحية عن طريق النقل الثقيل تسبب إثارة الأتربة بمنطقة المشروع والمناطق المجاورة. هذا فضلاً عما تسببه أعمال الحفر والردم بموقع المشروع من تناثر الأتربة. لهذا يجب التحكم بقدر الإمكان في كميات الأتربة المتناثرة، وذلك أثناء تنفيذ أعمال الإنشاء التي تسبب تناثر الأتربة على مراحل متعاقبة.

٢- التأثير على البيئة الزراعية: تؤثر أعمال الإنشاء على البيئة الزراعية إن وجدت بموقع الإنشاء تأثيرًا سلبيّا، لذا يجب حماية المساحات المزروعة بأسوار لعدم تخطي وسائل النقل الثقيل لها.

٣- التأثير على المناطق السكنية المحيطة: في حالة وجود مناطق سكنية قريبة من موقع إنشاء المحطة، يجب إتباع إجراءات الأمان اللازمة لتفادي تعريض السكان لأية مخاطر قد تلحق بهم أثناء عمليات الإنشاء.

ومن أمثلة إجراءات الأمان ننصح بما يلي :

١-إجلاء السكان المقيمين على بعد أقل من ٥٠٠ م في المناطق القريبة من موقع الإنشاء.

٢ -إقامة سور حول منطقة الإنشاءات.

٣- تمهيد طرق تخصص للنقل الثقيل فقط، بحيث تكون بعيدة عن الطرق التي يسلكها السكان.

٤- الضجيج Noise: قد تسبب أعمال الإنشاء ضوضاءً أو ضجيجاً، ولكنها لا تتعدى الضوضاء الصادرة عن أي مشروع آخر في مرحلة إنشائه.

ومن التأثيرات الايجابية:

التوظيف: يترتب على إنشاء المشروع تعيين عمالة مؤقتة ودائمة للاشتراك في عمليات الإنشاء مما يؤثر إيجاباً في تغيير الحياة الاجتماعية بمنطقة المشروع والمناطق المجاورة.

١٠-١-٢ بعد إنشاء المشروع وأثناء فترة التشغيل:

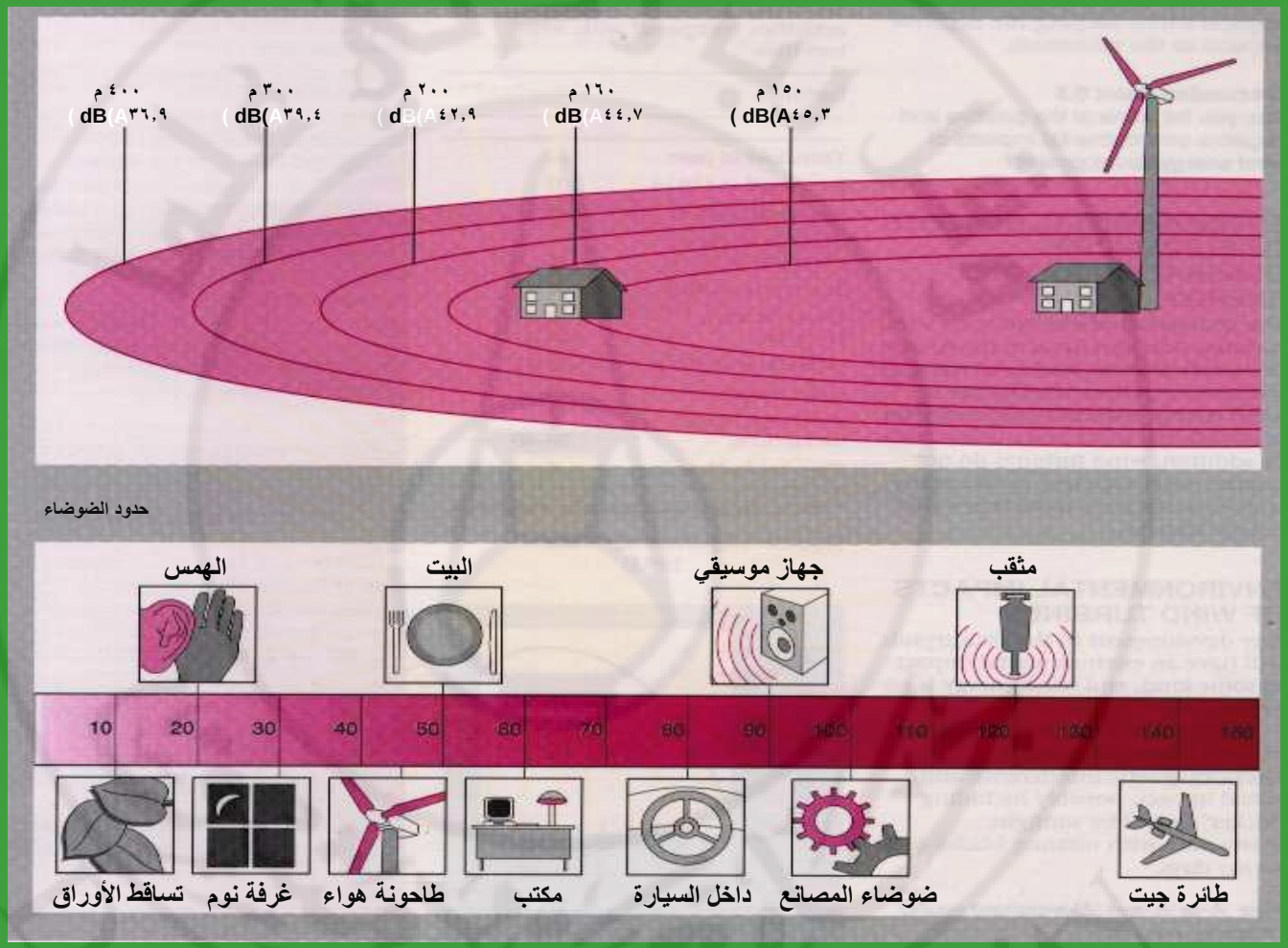
١-**الضجيج** : ينجم الضجيج بسبب الاحتكاكات الميكانيكية لأجزاء العنفة ، وكذا بسبب حركة شفرات الدوار واصطدامها بالهواء المحيط. (مع العلم أنه عند زيادة سرعات الرياح عن ١٠ م/ث فإن صوت الرياح نفسها يفوق الصوت الناجم عن حركة شفرات الدوار في العنفة الريحية).

لهذا السبب ينصح بأن يتم اختيار موقع محطة الرياح على بعد لا يقل عن ٥٠٠ م من المناطق السكنية المحيطة بمنطقة المشروع.

يبين الجدول ١٠-١ مستوى الضجيج لمختلف الفعاليات مقارنة بالعنفات الريحية.

الجدول ١٠-١: مستوى الضجيج لفعاليات مختلفة مقارنة بعَنفات الرياح مقاساً بالديسيبلdb

المصدر	مستوى الضجيج (db)
طائرة نفاثة (جيت) على علوّ 250 م	105
مثقاب كهربائي	95
شاحنة تسير بسرعة 48 كم/ سا	65
دائرة من دوائر العمل المزدحمة	60
سيارة تسير بسرعة 64 كم / سا	55
عَنفة ريحية على بعد 500 م من موقعها وفي موقع العنفة وتحديداً عند قاعدتها	45-25 ١١٠-٨٠
غرفة نوم هادئة	20



الشكل ١٠-١ مستويات الضجيج للعتفة الريحية ومقارنته بفعاليات أخرى

٢- 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 العنفات الريحية (ويقصد بذلك المزرعة الريحية في الموقع) بنفس الشكل والحجم.
- يجب أن تدور العتفات جميعها في نفس الاتجاه.
- يفضل أن يكون توزيع العنفات في صفوف متوازية، وأن يكون التوزيع متجانساً.
- العنفات ذات الأبراج الاسطوانية هي الأجمل والأكثر راحة للنظر وهي المعتمدة حالياً.
- يراعى أن يكون لون العنفات أبيضا أو رماديا فاتحا. وقد أشارت نتائج الاستقصاءات أن هذين اللونين هما أكثر الألوان تقبلاً للعين البشرية.

٣- **الوميض الصادر عن حركة الشفرات** : أثناء حركة شفرات الدوار يصدر منها وميض قد يؤذي العين البشرية أو يعوقها عن الرؤية المستمرة، وقد يؤثر على السائقين وسكان المناطق القريبة لذا يجب أن تبعد المحطة عن الطرق السريعة بمسافات كافية.

٤- **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.

٥- **المحميات** : يجب إنشاء محطات الرياح بعيداً عن مناطق المحميات حتى لا تؤثر على انقراض الأنواع النادرة من الحيوانات والكائنات الحية الأخرى.

٦- **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.

٧- 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 حضارية.

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 ١٠-٢ اصطدام الطيور مع شفرات العنفة في اليابسة .

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.



الشكل ١٠-٢: اصطدام الطيور مع شفرات العنفة في اليابسة، حيث كما يبدو ركبت في موقع قريب من مسار هجرتها

١٠-٢ أثر محطات الرياح المركبة في الماء بعيداً عن الشاطئ Off Shore Wind Turbines

تم شرح كيفية إنشاء عنفات ريحية في الماء بعيداً عن الشاطئ في الفصل السابق والتي يمكن أن تؤثر على الحياة البحرية على النحو التالي:

الثديات البحرية : قد تسبب اضطرابات بسبب انبعاث الصوت ويمكن أن تحدث أيضاً حقولاً مغناطيسية وكهربائية على سطح الماء مما يؤدي بدوره إلى اضطرابات في سلوك الثديات.

الأسماك: قد يحصل تأثير للعنفات على نظام تغذية الأسماك ، حيث أنها ستؤثر على طبيعة القاع البحري من خلال الأساسات الموجودة في القاع.

بعض أشكال الحياة في القاع البحري: يمكن أن تتأثر بشكل ملحوظ من أعمال البناء.

١٠-٣ السلامة المهنية:

يعتبر سجل السلامة المهنية لتقنية طاقة الرياح جيداً عموماً.وقد حصلت على أية حال بعض الحوادث المميتة والخطرة.

ترى إحدى منشورات الجمعية الأوربية لطاقة الرياح بعنوان "طاقة الرياح في أوربا" 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 العنفات الريحية الحديثة بأنظمة مراقبة قصد منها إعطاء إنذار مبكر للفشل المحتمل لغالبية مكونات العنفة الريحية. 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 ١٩٨٧، عندما تم البدء بمشروع الاتحاد الأوربي لوضع مسودة لمعايير السلامة المهنية لطاقة الرياح. وفي هذه الأثناء تم تطوير عدد من معايير التصميم والتركيب للعنفات الريحية من قبل دول فردية ضمن الاتحاد وقامت لجنة الكهرباء الدولية (IEC)بتطوير معيار دولي أو مواصفة خاصة عن السلامة المهنية لعمل العنفات الريحية.

وفي الحالات التي يكون فيها النشاط الإعلامي غير كافٍ، يمكن توقع معارضة لهذه المشاريع الجديدة. حيث تعتبر التقنية الشديدة الغموض 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 التقانة 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 بشكلٍ مسبق كما يتضح أن القبول العام يزداد بشكل كبير بعد تركيب العنفات الريحية في الموقع.

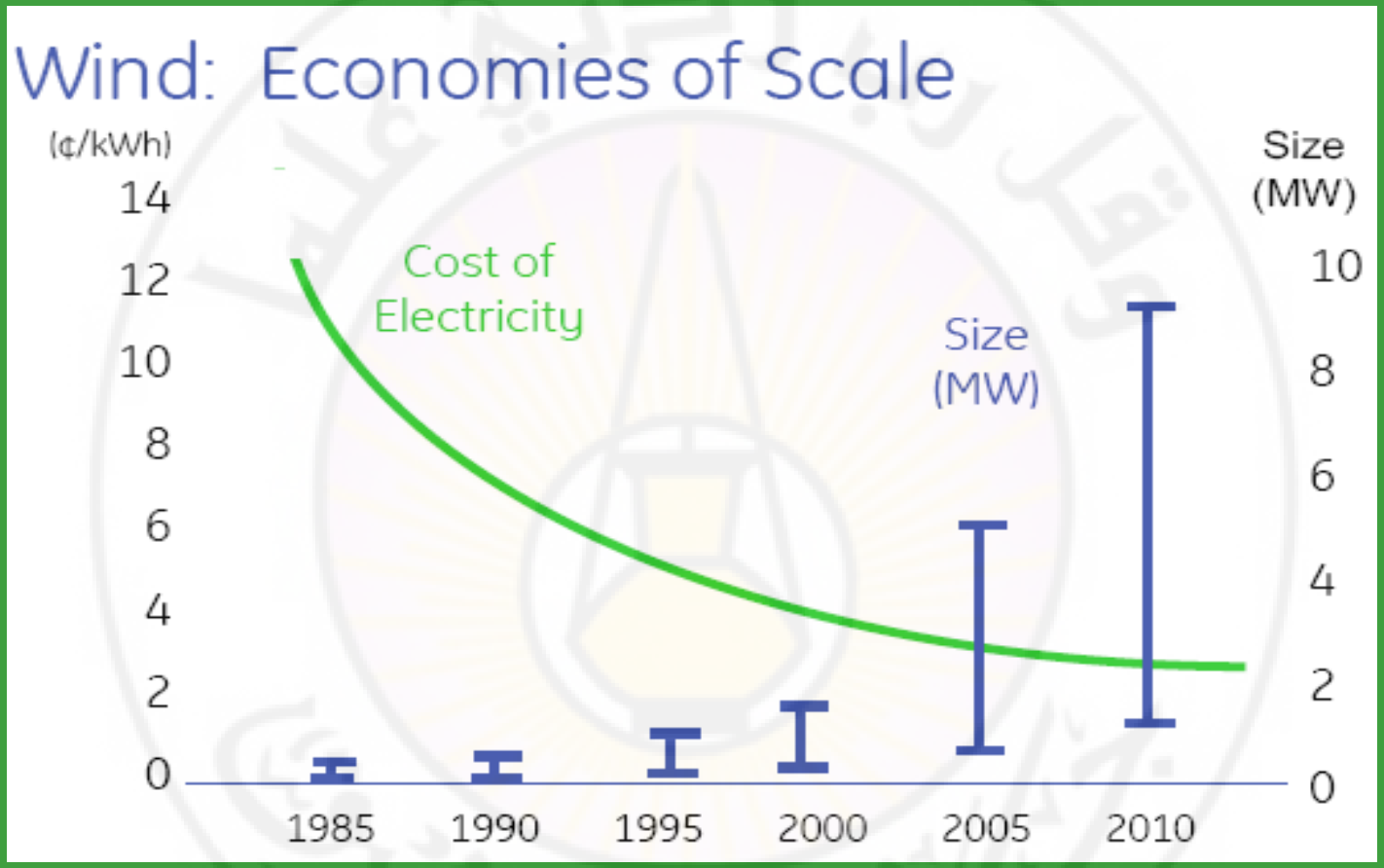
١٠-٤ المسألة الاقتصادية

١٠-٤-١ 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 ١٠-٣ يعرض كيف أن كلفة القدرة الكهربائية المولدة من طاقة الرياح في انخفاض مع مرور السنوات المتعاقبة، وذلك بسبب زيادة حجم العنفات الريحية وتحسين تقانتها.

وتجدر الإشارة إلى أن الكلفة والأسعار المبينة في الشكل ١٠-٣ وما يليه من أشكال وجداول بمكن 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 ١٠-٣: منحني كلفة القدرة الكهربائية المنتجة من الرياح وانخفاضها مع السنوات المتعاقبة

١٠-٤-٢ تفحص القصور في عمل مكونات العنفة الريحية وحلها:

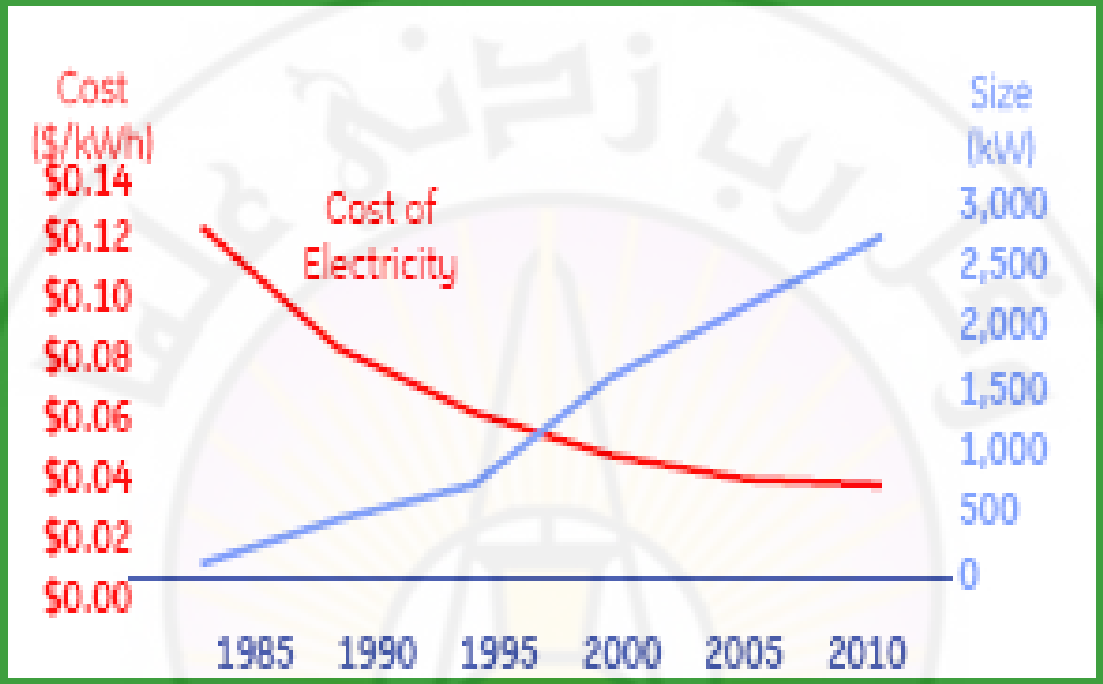
في العنفات الريحية الحديثة تقوم أجهزة القياس والحساسات بجمع المعلومات عن حالة عمل مكونات العنفات الريحية. ثم يقوم نظام التحكم الإلكتروني بمقارنة القراءات بشكل مستمر مع القيم المرجعية ويعمل على تلافي القصور فيها لكي يضمن بأنها تعمل بشكل جيد مما انعكس اقتصادياً على الكلفة التشغيلية.

١٠-٤-٣ 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 الايجابي الأقوى هو التوقعات بأن أسعار العنفات سوف تنخفض أيضاً مع تحسن وتطوير تقانتها وزيادة كميات إنتاجها الصناعي. أضف إلى ذلك استمرار البحث والتطوير في هذا المجال.

إن سوق طاقة الرياح العالمية يتوسع بشكل سريع ويفسح المجال لتأمين فرص عمل كبيرة. إضافة إلى إمكانية ظهور صناعات جديدة في هذا المجال وحركة تصدير واستيراد البضائع وتوطين الكنولوجيا(التقانة) وخدمات وبرمجيات طاقة الرياح.

يبين الشكل ١٠-٤ منحنيات أكثر دقة لانخفاض كلفة الكهرباء المنتجة من الرياح مع زيادة استطاعة العنفات الريحية بين عامي ١٩٨٥ و٢٠١٠ .



الشكل ١٠-٤ منحنيات أكثر دقة لانخفاض كلفة الكهرباء المنتجة من الرياح مع زيادة استطاعة العنفات الريحية بين عامي ١٩٨٥ و ٢٠١٠

١٠-٤-٤ ضعف الشبكات الكهربائية:

إحدى المشاكل الاقتصادية التي ظهرت تتجسد 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:

1 -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 المنابع 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 مساء 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 توزع الأحمال على الأطوار الثلاثة المرتبطة مع الشبكة.

إن هذه الظواهر التي ذكرناها سابقاً تؤثر على نوعية الطاقة المقدمة من العنفات الريحية.

وللحصول على الجودة المطلوبة يجب اعتماد تجهيزات خاصة للحد من هذه الظواهر،حيث سيتم دراستها بالتفصيل في مؤلف آخر.

١٠-٥ الدراسة الاقتصادية للعنفات الريحية:

١٠-٥-١ تكاليف العنفات:

١٠-٥-١-١ مقدمة:

إن تطبيقات طاقة الرياح تنمو بشكل واسع في أوربا و العالم ، فخلال العقدين الأخيرين تطورت الاستطاعة المركبة من 25 G W في 1992 إلى 59 GW في عام 2005 و 74 GWفي 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 سابقا منها العنفات المرتبطة مع الشبكة و العنفات المستقلة . وفي الفقرة التالية سوف ندرس العنفات المرتبطة مع الشبكة التي تشكل الجزء الأكبر من الاستطاعات المركبة.

١٠-٥-١-٢ 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 ٢٠٠٩ إلى 6 MW.

بالنسبة لقيم الاستطاعة المركبة للعنفة الواحدة ففي عام 2002 كانت 50% تتراوح بين 750- 1500KW و30% للاستطاعة الأكبر من 1.5MW. و في السنوات الأخيرة بدأت عمليات استبدال الاستطاعات المركبة هذه باستطاعات كبيرة في كل من ألمانيا و الدنمرك ووصلت استطاعة العنفات التي تركب حالياً إلى 5MW. أما بالنسبة لمردود العنفات فقد ازداد خلال 15 سنة الاخيرة بمقدار2-3% 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 ٥٠% كما ذكرنا عند دراستنا لتقديرات الرياح.

الجدول ١٠-2 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 ١٠-٢ يوضح التكاليف التأسيسية للعنفات

	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

١٠-٥-١-٣ تكاليف الصيانة و التشغيل :

تشكل تكاليف الصيانة و التشغيل جزءاً كبيراً من تكاليف إنتاج الطاقة الريحية و تتراوح نسبة التكاليف ما بين 20-25 % من الكلفة الكلية للكيلو واط الساعي. وهي تكون في السنوات الأولى بحدود 10- 15 %. و ترتفع في نهاية عمر العنفة إلى 20-35 % بسبب اهتلاكها.

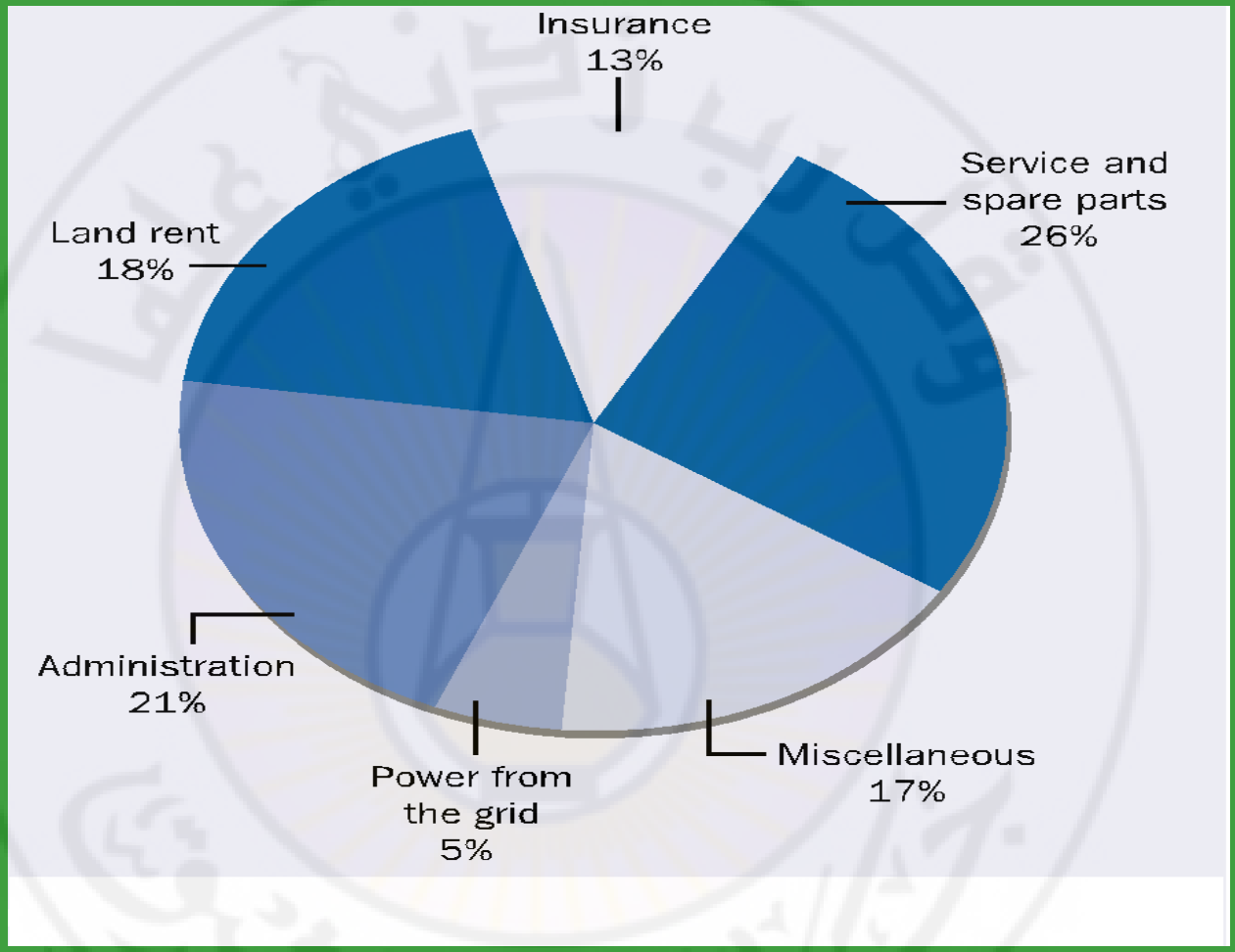
و تتعلق تكاليف الصيانة و التشغيل ب :

التأمين. الصيانة الدورية.

قطع التبديل . الإصلاح.

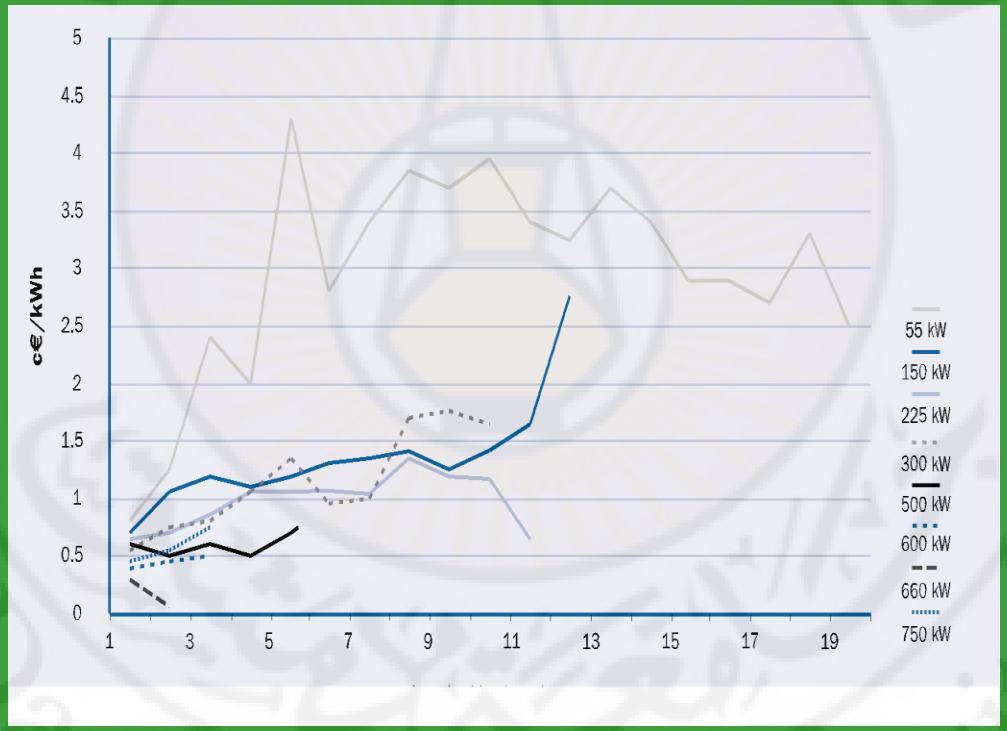
الإدارة. استئجار الأرض.

الاستطاعة وخاصة الردية المستهلكة من الشبكة .



الشكل ١٠-٥: يوضح تقسيم نسب تكاليف الصيانة و التشغيل التي قدرت في إحدى الدراسات الأوروبية

أما الشكل ٦-١٠ فيوضح تكاليف الصيانة و التشغيل للكيلو وات الساعي و هي تتراوح من 3-4 C€ / KWh للاستطاعات 55KW و 150KW بينما تنخفض إلى 1-1.3 C€/KW للعنفة باستطاعة 225 KW وهي تنخفض إلى أقل من 1C€/KWh في العنفات ذات الاستطاعات فوق 600KW ولا يتوقع أن ترتفع كثيراً مع تقدم العنفة بالعمر.



الشكل ٦-١٠ :منحني تكاليف الصيانة و التشغيل للكيلو وات الساعي

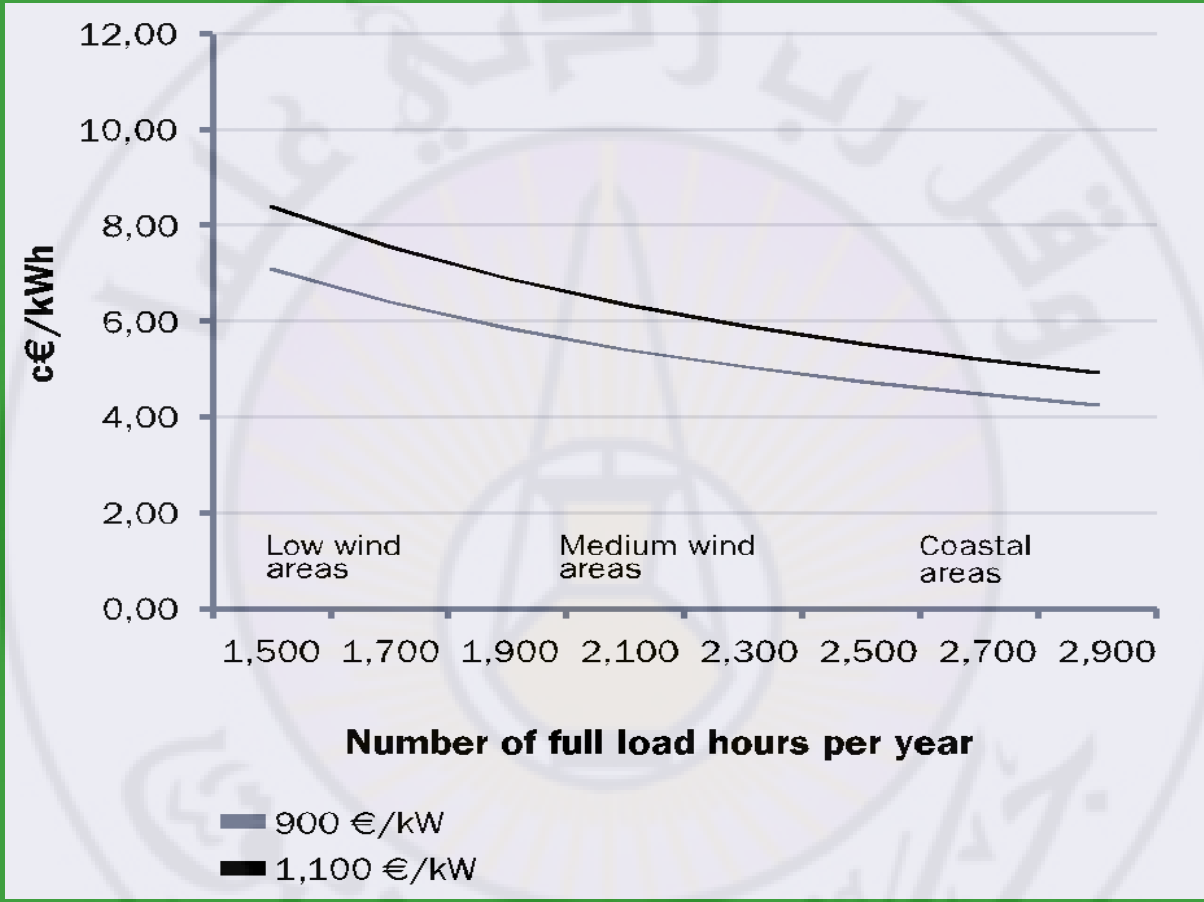
١٠-٥-١-٤ تكاليف القدرة الكهربائية المولدة من العنفات الريحية :

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 €/KWكاستطاعة مركبة.
- معدل تكاليف الصيانة على طول عمر العنفة هو 1.2 C€/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 ١٠-٧ يبين نتائج الحسابات و يظهر فيه أن تكاليف الكيلو وات الساعي تتراوح بين 6-8 C€/KWhعند معدل سرعة رياح منخفضة و تنخفض إلى 4-5 C€/KWh عند سرعة رياح 10-12m/s على ارتفاع الصرة Hub.



الشكل ١٠ ـ٧: منحني نتائج الحسابات لكلفة إنتاج الكيلووات الساعي

١٠-٥-١-٥ تطور الأسعار الحالي و المستقبلي:

خلال 15 سنة الأخيرة انخفضت أسعار العنفات الريحية بمقدار 50% وهي مستمرة بالانخفاض و ذلك لعدة أسباب: تحسن المردود- ازدياد استطاعة العنفات – الدراسات الجيدة لمواقع تركيب العنفات وبالتالي تطوير تصميمها الملائم لطبيعة هذه المواقع.

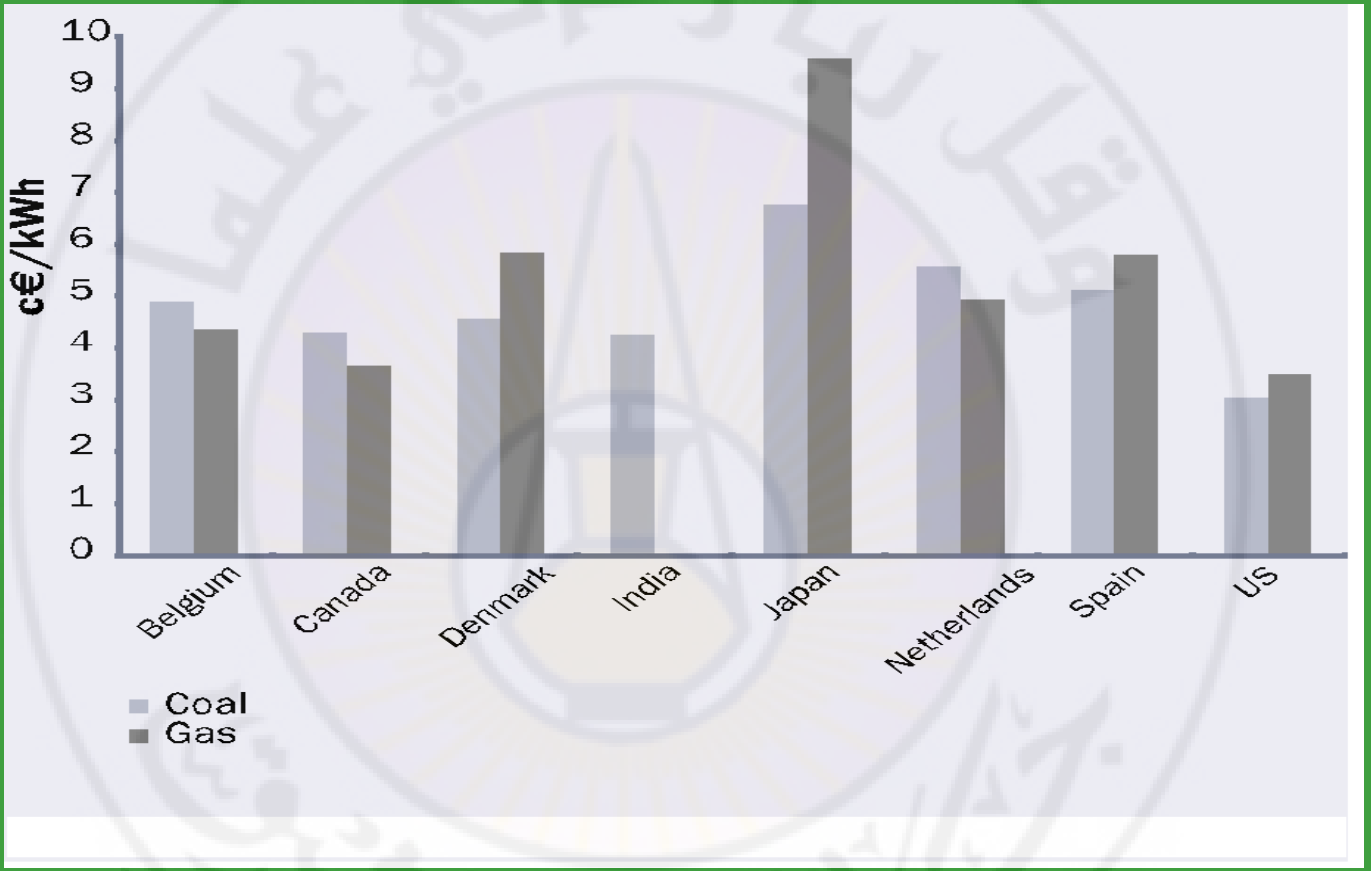
١٠-٥-١-٦ تكاليف توليد الكيلو وات ساعي في المحطات الكهربائية باستخدام الوقود التقليدي:

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 العنفات الريحية حوالي 75% و الشكل ١٠-٨ يوضح التكاليف للكيلو وات ساعي في عدة دول و الناتج عن الغاز أو الفحم مع وجود الافتراضات التالية:

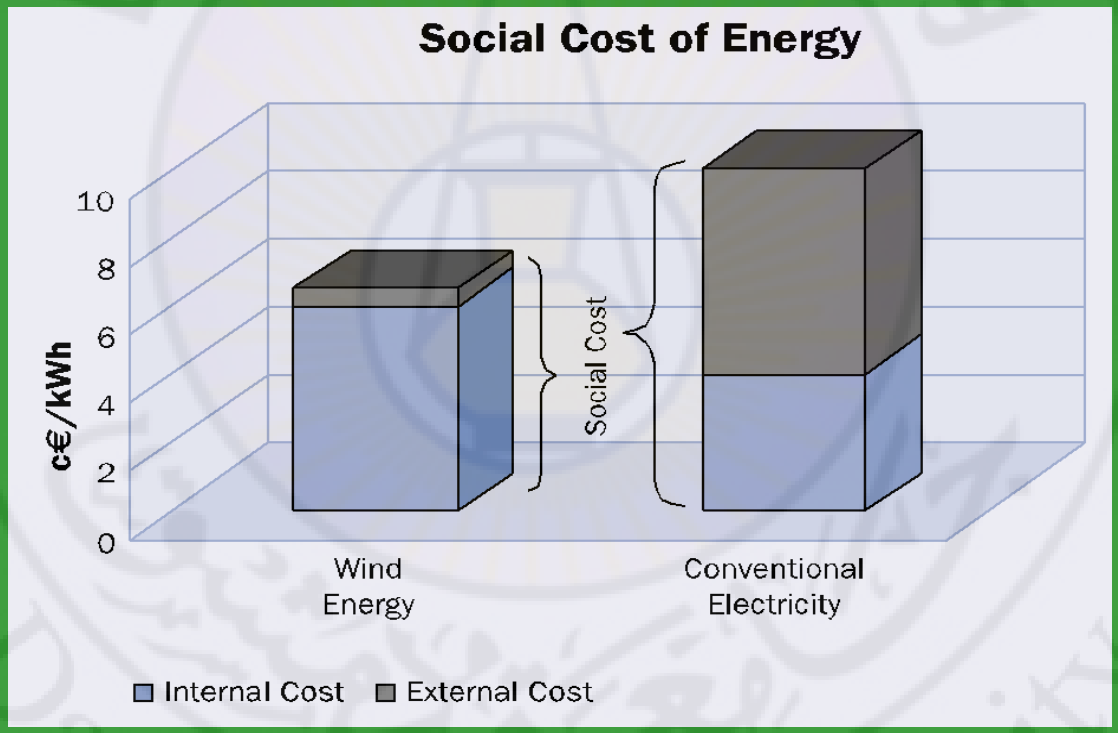
- المحطة موجودة في الخدمة منذ عام ٢٠٠١ .
- نسبة الفائدة السنوية 5% طيلة عمر المحطة البالغ 40 سنة .



الشكل ١٠-٨ : يوضح التكاليف للكيلو وات ساعي في عدة دول للمحطات التقليدية باستخدام وقود الغاز أو الفحم الحجري

١٠-٥-١-٧التكاليف 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 حاليا" لحساب التكاليف الخارجية لإنتاج الطاقة، و الشكل١٠-٩ يوضح تكاليف إنتاج الطاقة من المصادر التقليدية و من مصادر الرياح.



الشكل ١٠-٩: يوضح تكاليف إنتاج الطاقة من المصادر التقليدية و من مصادر الرياح

١٠-٦ 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 ٣٠٠٠٠٠ فرصة عمل جديدة حتى العام ٢٠٢٠. كما يتوقع يوهانيس لاكمان، رئيس الاتحاد أن يصل حجم الاستثمارات إلى ٢٠٠ مليار يورو.أرقام تعود جزئياً أيضاً إلى ‘‘قانون أفضلية الطاقة المتجددة’’ والمعروف اختصاراً بقانون الطاقة المتجددة (EEG) فالقانون يضمن حدا 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 ٢٠١٠ بنسبة ١٢.٥ % على الأقل، وأن تصل هذه النسبة إلى ٢٠% مع العام ٢٠٢٠. وقد دخل القانون بشكله الأولي في عام ٢٠٠٠ حيز التطبيق ثم ما لبث أن تم استبداله بالشكل المطور لقانون الطاقة المتجددة في آب ٢٠٠٤ وهو يؤكد على ضمان حد أدنى لسعر الكهرباء المستخرجة من الكتلة الحيوية بمقدار ٩.٥ سنت لكل كيلو واط ساعي، وذلك لمدة ٢٠ عاماً.

أما أعلى الأسعار وهي ٥٩.٥ 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 ٢٠٠٥ حوالي ٢.٤ مليار يورو ‘‘استثمار في المكان الصحيح’’. وحسب دراسة مشتركة أعدها كل من المركز الألماني للنقل الجوي وأبحاث الفضاء ومعهد فراونهوفر لأبحاث الأنظمة والأبتك وفر إنتاج الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة خلال ذات الفترة ٢٠٠٥ خسائر وأضرار بقيمة ٢.٨ 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 ٢٠٠٣ وفر دعم مصادر الطاقة المتجددة من خلال القانون ما يعادل ٢٣ مليون طن من غاز ثاني أكسيد الكربون وتضاعفت الكمية في عام ٢٠٠٥ لتصل إلى ٥٧ مليون طن. والهدف النهائي هو توفير ١١٠ مليون طن في عام ٢٠٢٠. 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 ٢٠ مليار يورو سنوياً.

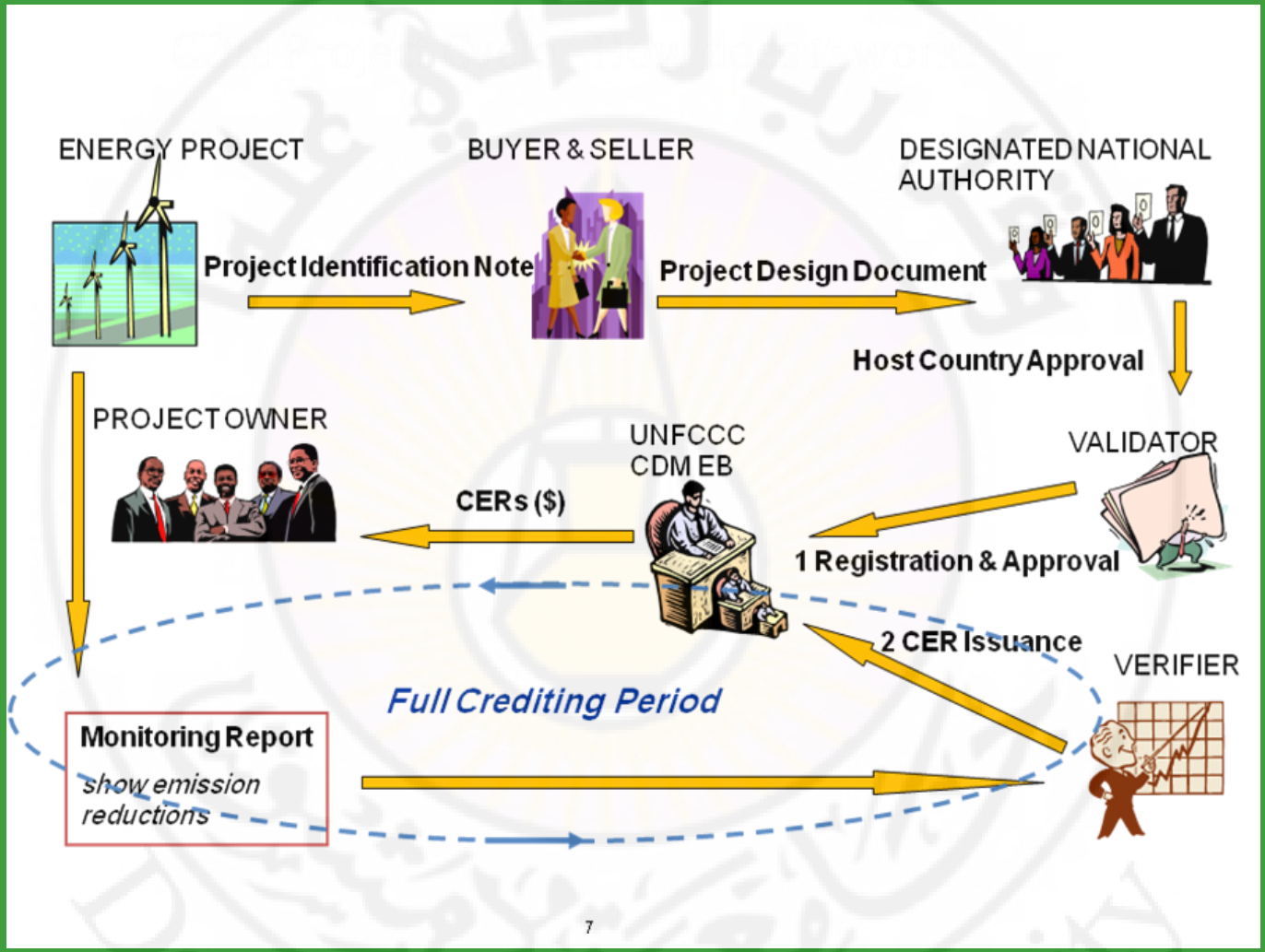
١٠-٧ عائدات آلية التنمية النظيفة Clean Development Mechanism(CDM)

استناداً إلى بروتوكول كيوتو لعام ١٩٩٧ 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 ١ سنت يورو لقاء إنتاج كل ١ 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 ١٠-١٠ مخططاً صندوقياً لكيفية توثيق واعتماد عائدات آلية التنمية النظيفة CDM لمشروع توليد القدرة الكهربائية من مزرعة ريحية على سبيل المثال.

وفي الفترة بين ٩-١٨ كانون الأول ٢٠٠٩ انعقد في كوبنهاغن بالدنمرك المؤتمر العالمي للتغير المناخي والذي سمي COP-15بحضور 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 ٢٠٥٠ 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 ٢٠١٢، مع السعي لتطوير هذه الإتفاقية ووضع الضوابط الملزمة قبل انتهاء مفعول بروتوكول كيوتو .



الشكل ١٠ـ١٠ كيفية توثيق واعتماد عائدات آلية التنمية النظيفة CDM لمشروع توليد القدرة الكهربائية من مزرعة ريحية

١٠-٨ الهيئة الدولية للطاقة المتجددة:

تجدر الإشارة أنه تم إقرار الهيئة الدولية للطاقة المتجددة

International Renewable Energy Association IREA في مطلع العام ٢٠٠٩ وبمشاركة عدد كبير من دول العالم بما فيها سورية، وذلك على غرار الهيئة الدولية للطاقة الذرية.

١٠-٩ المركز الإقليمي للطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة:

بدعم من الاتحاد الأوروبي وبرعاية ألمانية ودنمركية تم في جمهورية مصر العربية وتحديداً في حزيران ٢٠٠٨ إنشاء المركز الإقليمي للطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة

Regional Center for Renewable Energy and Energy Efficiency RCREEE وذلك بمشاركة عشرة دول عربية ومنها سورية.

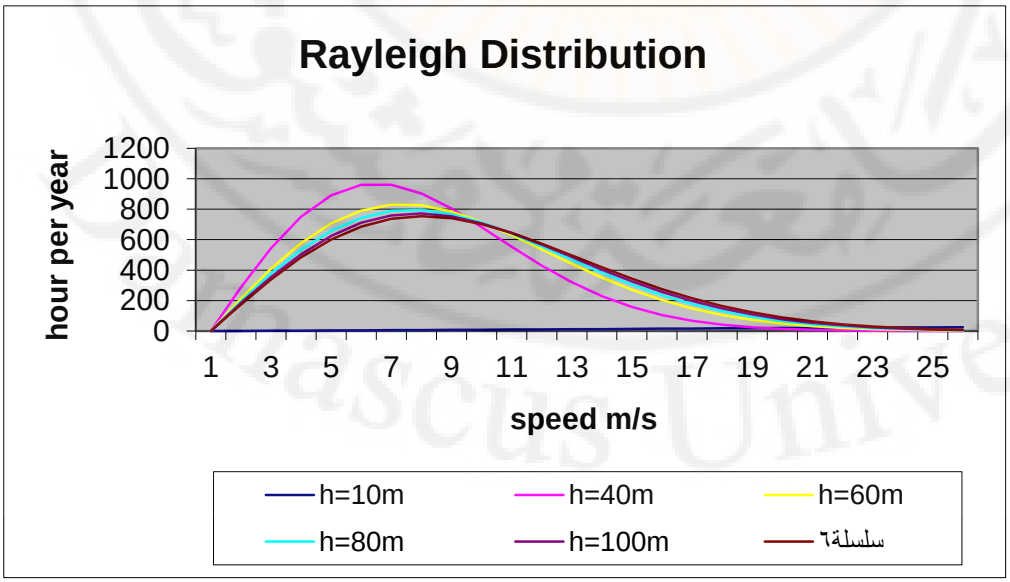
ويهدف المركز إلى تحقيق المهام التالية:

- 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.

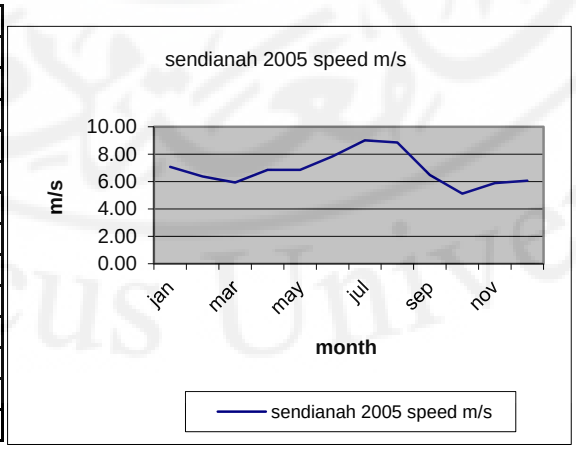
sendianah 2005

	10m	40m	60m	80m	100m	n
Mean Speed	6.880	7.997	8.357	8.622	8.833	0.10852516
Rayleigh Distribution	0.00%	16.24%	21.46%	25.32%	28.39%	
0	0	0	0	0	0	
1	286	213	195	183	175	
2	544	410	377	355	339	
3	751	578	534	505	483	
4	892	707	658	625	601	
5	960	792	744	711	686	
6	960	830	789	759	737	
7	903	825	795	772	754	
8	805	785	768	753	741	
9	683	717	714	708	703	
10	554	631	640	644	645	
11	430	536	556	567	574	
12	320	441	469	486	497	
13	229	351	383	404	419	
14	158	272	305	327	344	
15	104	204	236	258	275	
16	67	149	177	198	215	
17	41	105	130	149	164	
18	24	73	93	109	122	
19	14	49	65	78	89	
20	8	32	44	54	63	
21	4	20	29	37	44	
22	2	12	19	25	30	
23	1	7	12	16	20	
24	0	4	7	10	13	
25	0	3	4	6	8	



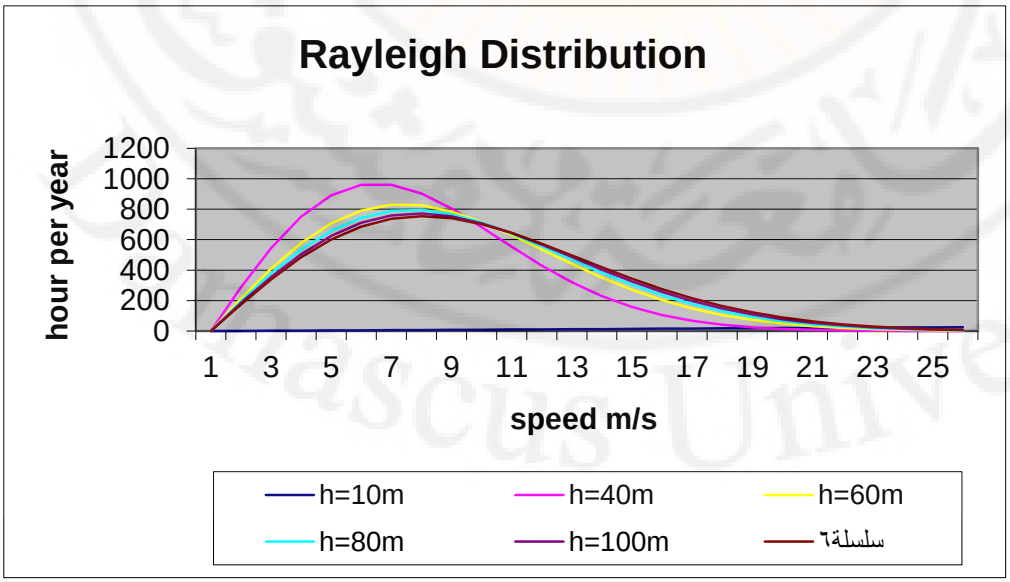
	3.6MW/80m (4-13m/s)	1.5MW/60m (4-12m/s)	5M/105m (4-13m/s)
wind speed	3600 Kw d=104m	1500 KW d=66m	5000 KW d=123m
m/s	kwh/year	kwh/year	kwh/year
4	62297	34748	83119
5	138304	76673	185357
6	255340	140500	344081
7	412377	224911	559285
8	600454	324164	820439
9	803779	428942	1107543
10	1002403	528068	1394294
11	1175757	610605	1652525
12	1306187	667810	1856884
13	1381708	546250	1988726
14	1118904	434300	1632152
15	882626	335897	1306123
16	678664	252886	1019841
17	508935	185431	777393
18	372386	132487	578766
19	265957	92270	420999
20	185461	62658	299306
21	126310	41500	208028
22	84036	26815	141384
23	54629	16906	93981
24	34705	10402	61111
25	21549	6247	38878
tot Gwh/year	11.473	5.180	16.570
tot kwh/year	11,472,768	5,180,468	16,570,214
area/turbin km2	0.541	0.218	0.756
Gwh/year/km2	21.214	23.785	21.905

sendianah 2005	
month	speed m/s
jan	7.08
feb	6.37
mar	5.94
apr	6.86
may	6.86
jun	7.84
jul	9.01
aut	8.85
sep	6.48
oct	5.12
nov	5.89
des	6.07



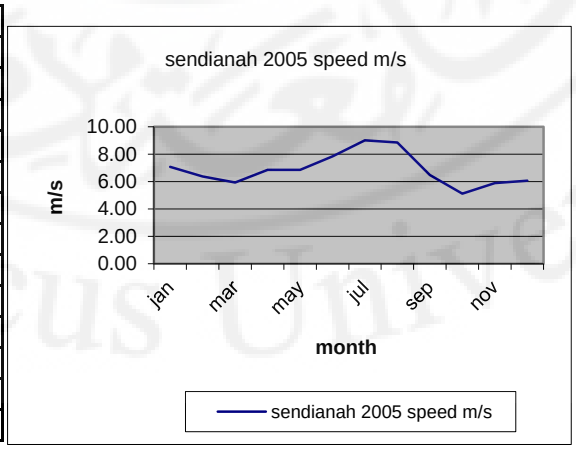
sendianah 2005

	10m	40m	60m	80m	100m	n
Mean Speed	6.880	7.997	8.357	8.622	8.833	0.10852516
Rayleigh Distribution	0.00%	16.24%	21.46%	25.32%	28.39%	
0	0	0	0	0	0	
1	286	213	195	183	175	
2	544	410	377	355	339	
3	751	578	534	505	483	
4	892	707	658	625	601	
5	960	792	744	711	686	
6	960	830	789	759	737	
7	903	825	795	772	754	
8	805	785	768	753	741	
9	683	717	714	708	703	
10	554	631	640	644	645	
11	430	536	556	567	574	
12	320	441	469	486	497	
13	229	351	383	404	419	
14	158	272	305	327	344	
15	104	204	236	258	275	
16	67	149	177	198	215	
17	41	105	130	149	164	
18	24	73	93	109	122	
19	14	49	65	78	89	
20	8	32	44	54	63	
21	4	20	29	37	44	
22	2	12	19	25	30	
23	1	7	12	16	20	
24	0	4	7	10	13	
25	0	3	4	6	8	



	3.6MW/80m (4-13m/s)	1.5MW/60m (4-12m/s)	5M/105m (4-13m/s)
wind speed	3600 Kw d=104m	1500 KW d=66m	5000 KW d=123m
m/s	kwh/year	kwh/year	kwh/year
4	62297	34748	83119
5	138304	76673	185357
6	255340	140500	344081
7	412377	224911	559285
8	600454	324164	820439
9	803779	428942	1107543
10	1002403	528068	1394294
11	1175757	610605	1652525
12	1306187	667810	1856884
13	1381708	546250	1988726
14	1118904	434300	1632152
15	882626	335897	1306123
16	678664	252886	1019841
17	508935	185431	777393
18	372386	132487	578766
19	265957	92270	420999
20	185461	62658	299306
21	126310	41500	208028
22	84036	26815	141384
23	54629	16906	93981
24	34705	10402	61111
25	21549	6247	38878
tot Gwh/year	11.473	5.180	16.570
tot kwh/year	11,472,768	5,180,468	16,570,214
area/turbin km2	0.541	0.218	0.756
Gwh/year/km2	21.214	23.785	21.905

sendianah 2005	
month	speed m/s
jan	7.08
feb	6.37
mar	5.94
apr	6.86
may	6.86
jun	7.84
jul	9.01
aut	8.85
sep	6.48
oct	5.12
nov	5.89
des	6.07



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.

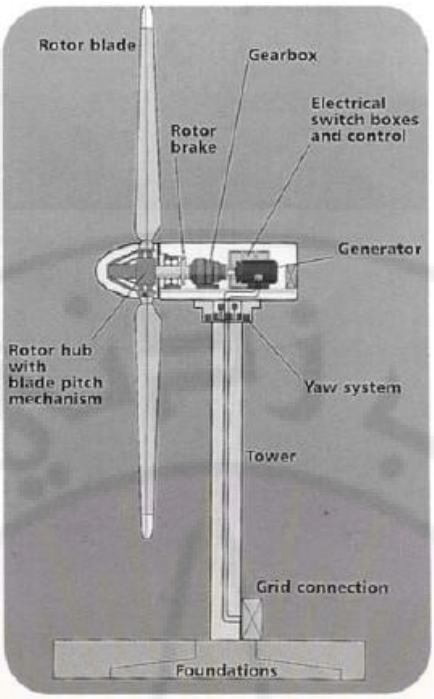


FIGURE ١
Horizontal axis wind turbine showing major components. (Courtesy: Energy Technology Support Unit, DTI, U.K.. With permission.)

بينما يبين الشكل ٢ منظر عام لعنفة داريوس.

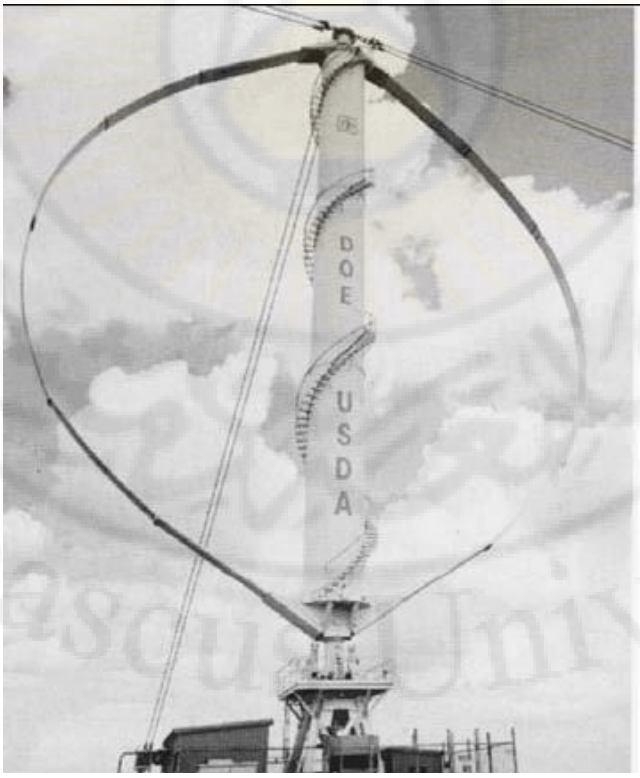


FIGURE ٢
Vertical axis ٣٤-meter diameter wind turbine built and tested by DOE/Sandia National Laboratory during ١٩٩٤ in Bushland, Texas.

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 شقرات 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

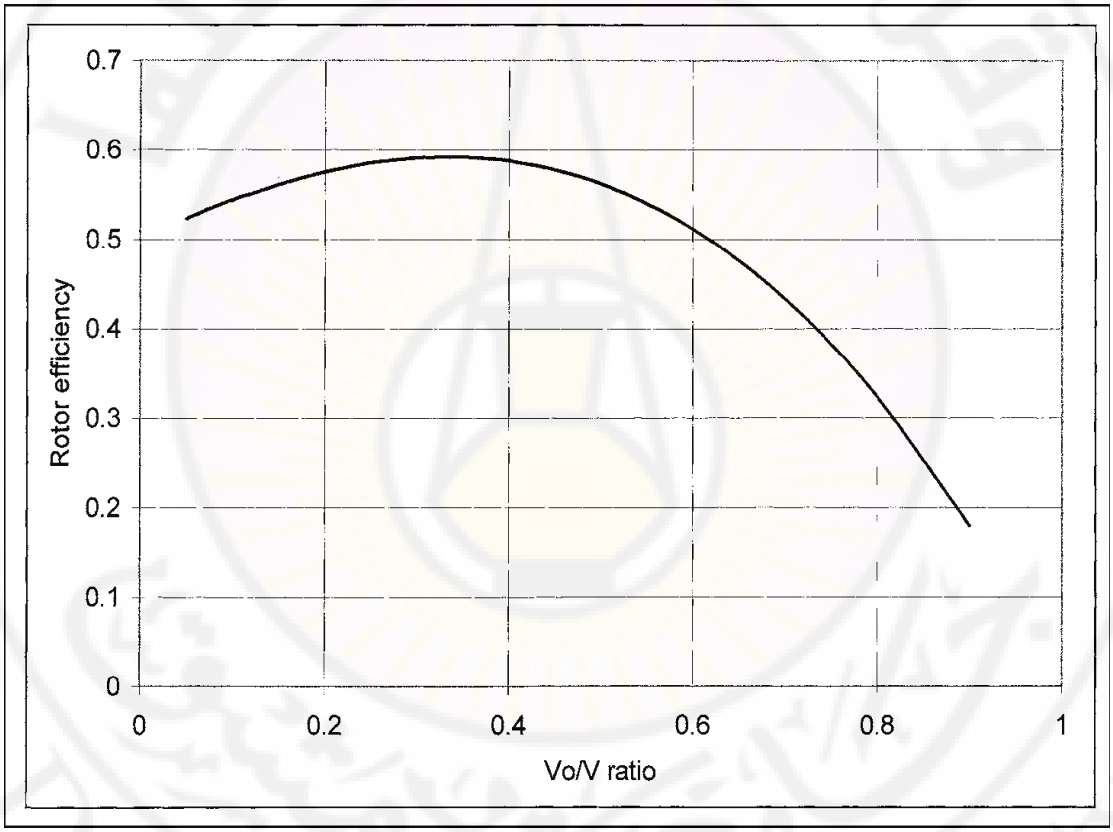


FIGURE ٣ Rotor efficiency versus Vo/V ratio has single maximum. Rotor efficiency is the fraction of available wind power extracted by the rotor and fed to the electrical generator.

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

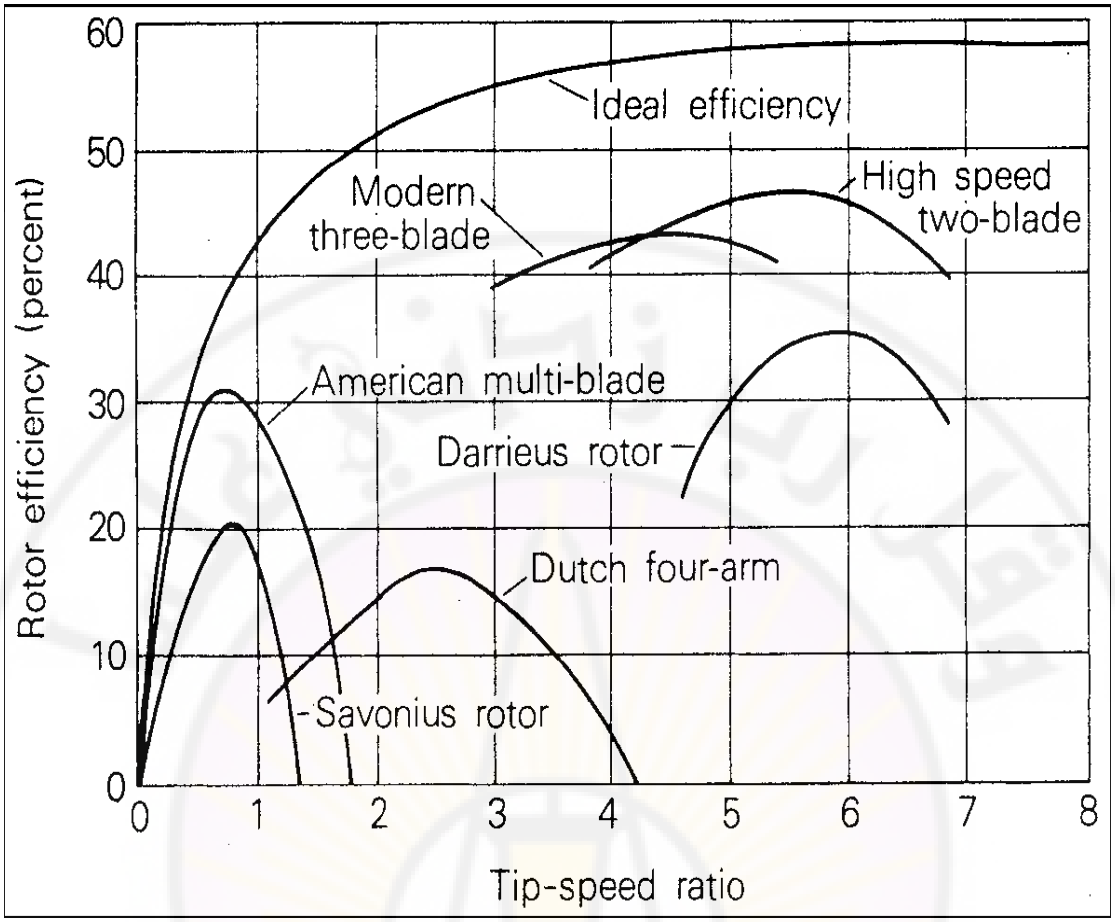


FIGURE ٤ Rotor efficiency versus tip speed ratio for rotors with different numbers of blades. Two-blade rotors have the highest efficiency. (Source: Eldridge, F.R., Wind Machines, Energy Research andDevelopment Administration, Washington, DC, Report AER-٧٥-١٢٩٣٧, p. ٥٥, ١٩٧٥.)

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 و ١,٢٢٥ kg/m^3 is

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.

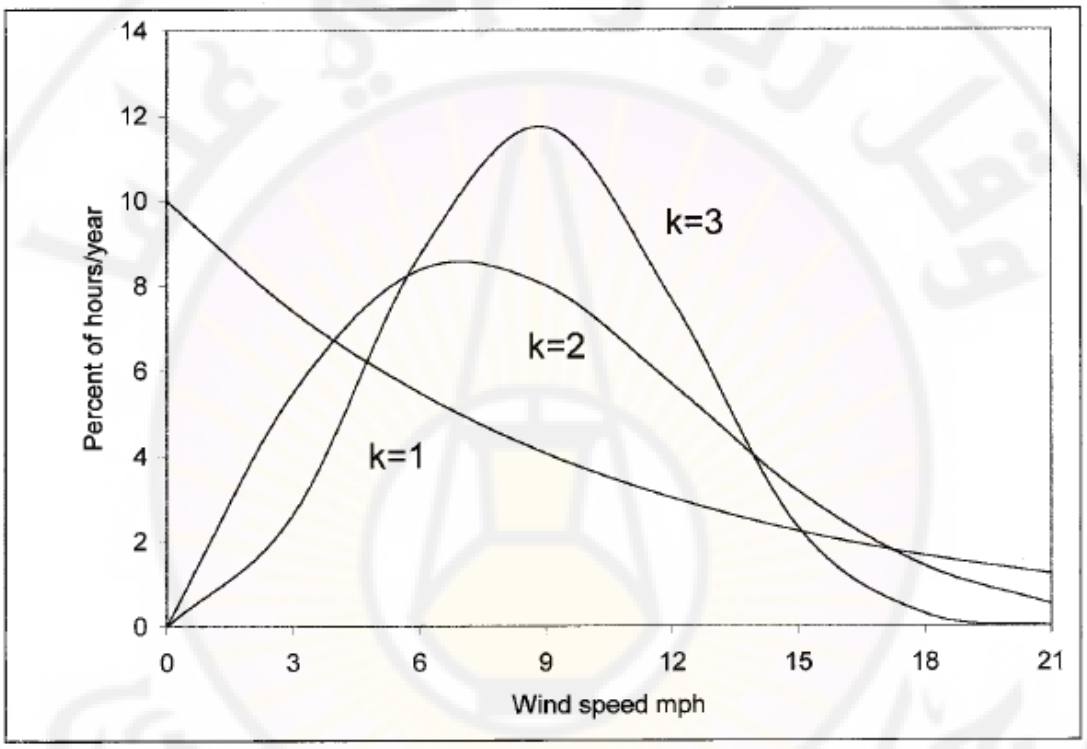


FIGURE ٤-٧

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) .

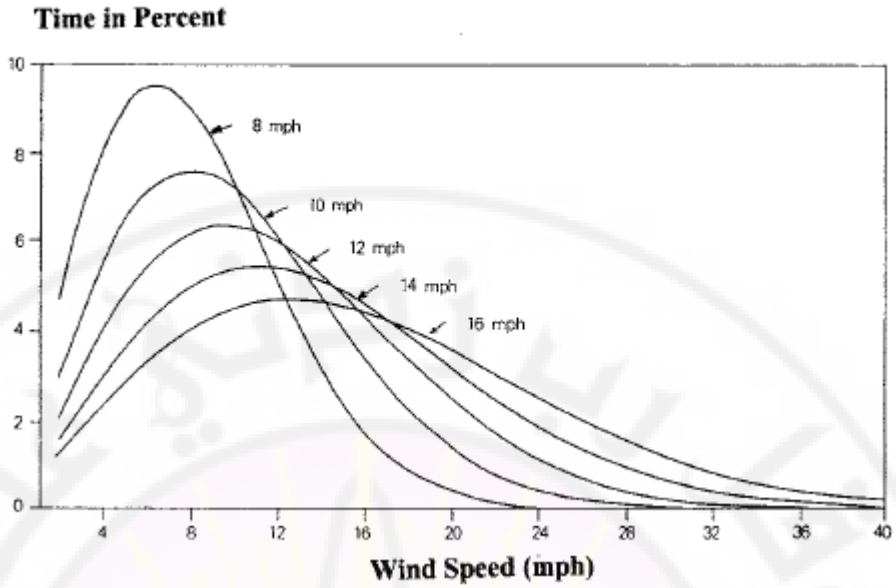


FIGURE ٤-٨

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

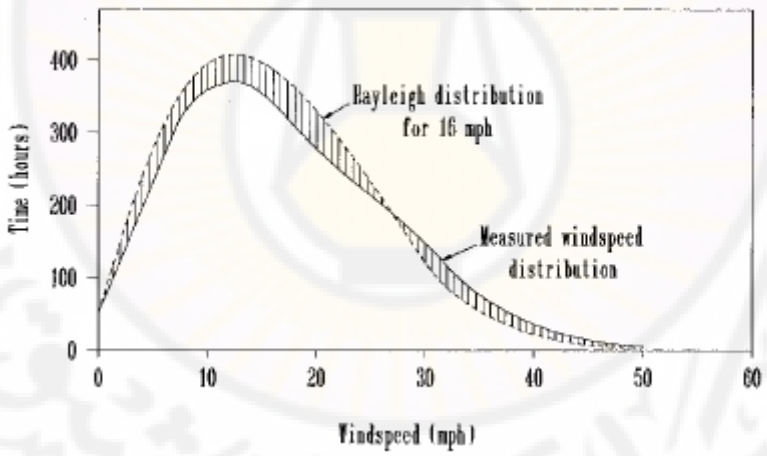


FIGURE ٤-٩

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 .

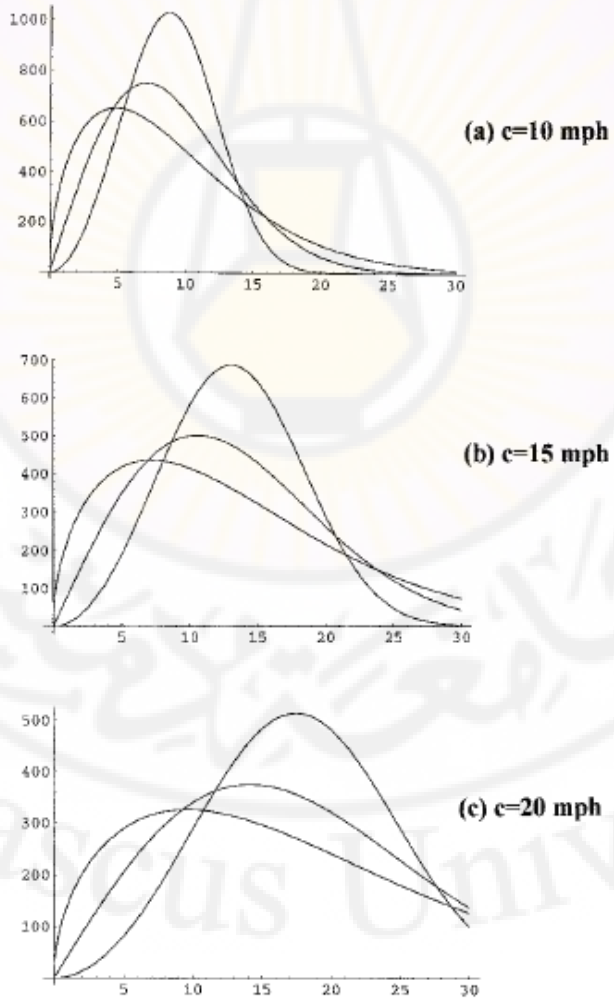


FIGURE ٤-١٠

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.

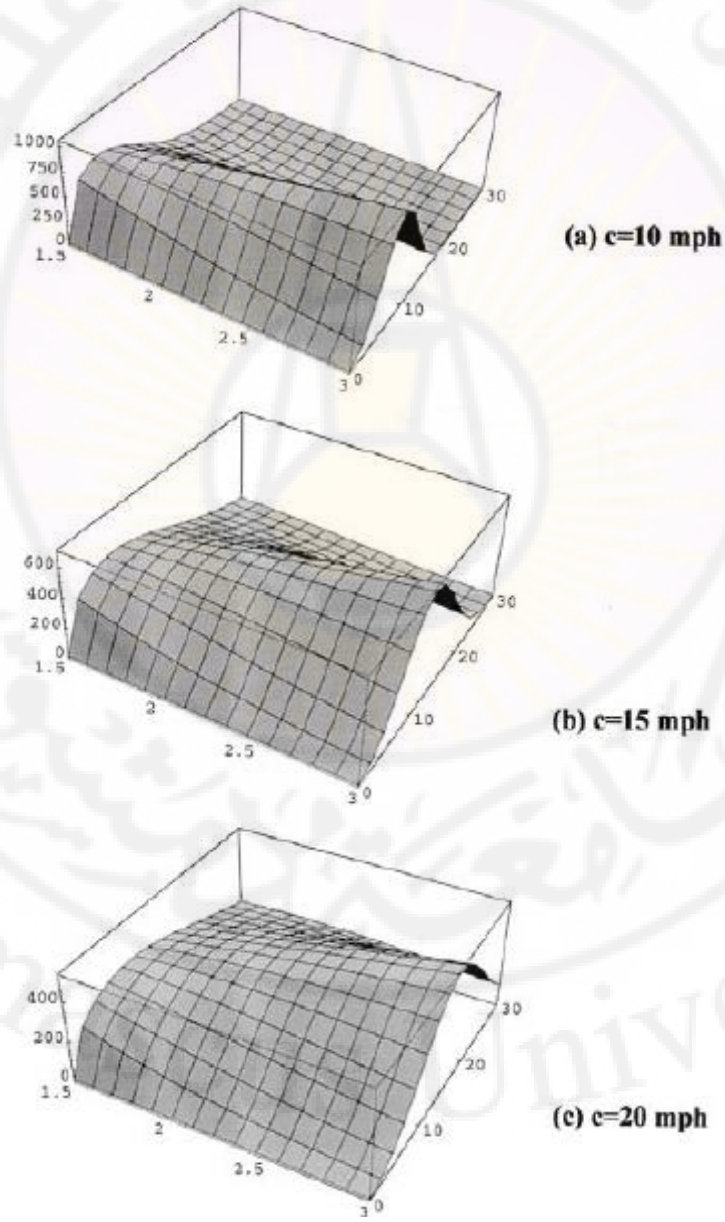


FIGURE ٤-١١

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).

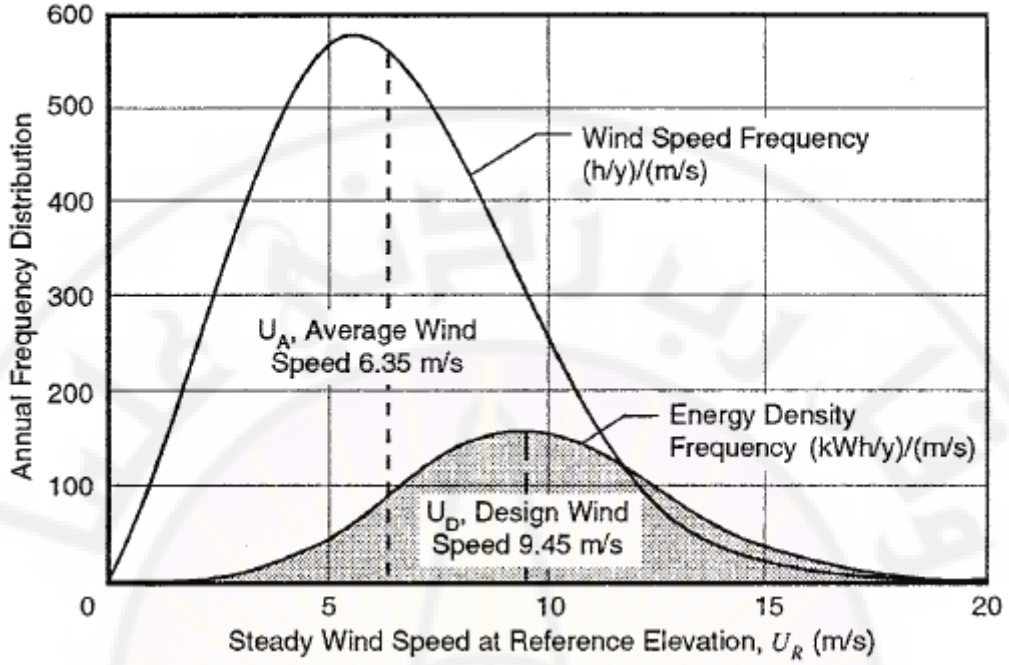


FIGURE ٤-١٢
Rayleigh distributions of hours and energy per year versus wind speed with c = ١٠ and k = ٢.

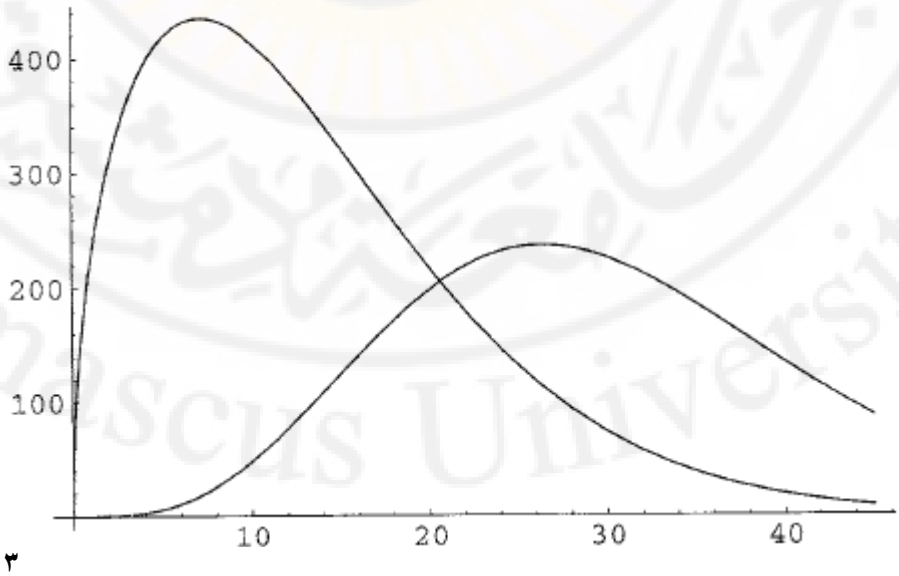


FIGURE ٤-١٣
Rayleigh distributions of hours and energy per year versus wind speed with c = ١٥ and k = ١. ٥

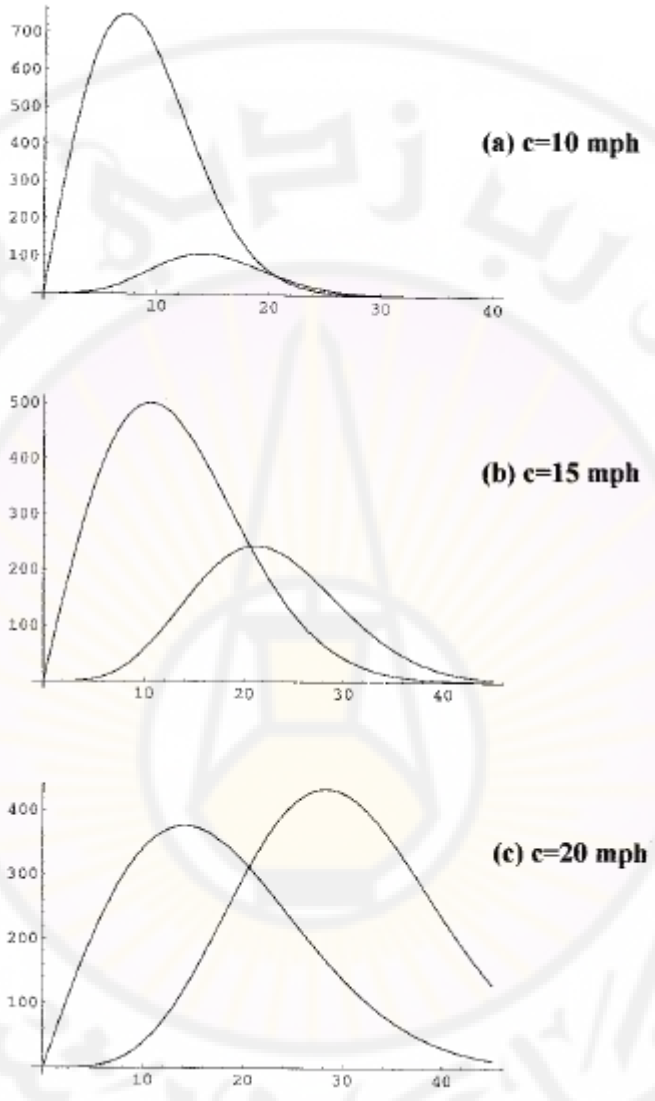


FIGURE ٤-١٤
Rayleigh distributions of hours and energy per year with k = ٢ and c = ١٠, ١٥, and ٢٠ mph.

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.

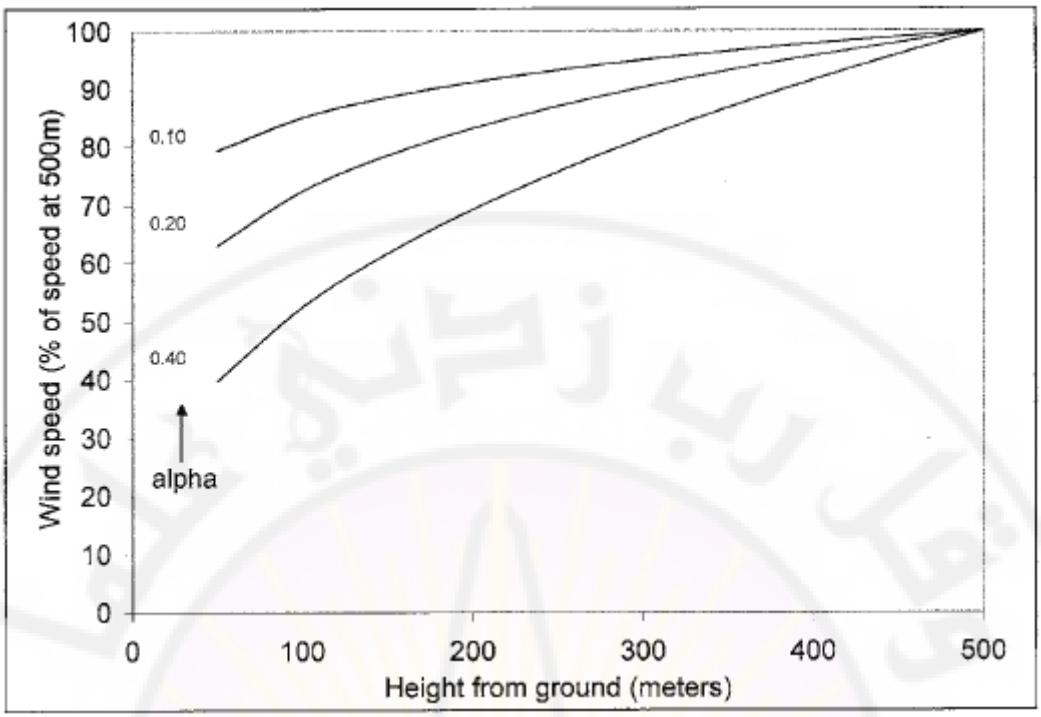


FIGURE ٤-١٥
Wind speeds variation with height over different terrain. Smooth terrain has lower friction,developing a thin layer above.

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.