

### 11-3-6 معامل العزم وعدد السرعة:

يعطى العزم على المحور الدوران بالعلاقة:

$$(11-38) \quad M_d = \frac{P}{W} \quad [N.M]$$

$P$ : الاستطاعة الناتجة عن المروحة  $[W]$

$W$ : السرعة الزاوية  $[1/S]$

معامل العزم  $C_M$  يعطى بالعلاقة:

$$(11-39) \quad C_M = \frac{M_d}{\frac{1}{2} \rho_a \vartheta^2 A_0 R_E}$$

$\varphi$ : أما الرياح أمام العنفة  $[m/s]$

$A_0 = \pi R_E^2$ : مساحة فتحة المروحة  $[m^2]$

$R_E$ : نصف قطر المروحة  $[m]$

لكن:

$$(11-40) \quad W = \frac{U_E}{R_E} \quad \left[ \frac{1}{S} \right]$$

$$(11-41) \quad \lambda_s = \frac{U_E}{\vartheta}$$

أما  $C_P$ :

$$(11-42) \quad C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho_a \vartheta^3 A_0}$$

بتقسيم العلاقة (11-39) على العلاقة (11-42) طرفا على طرف ينتج:

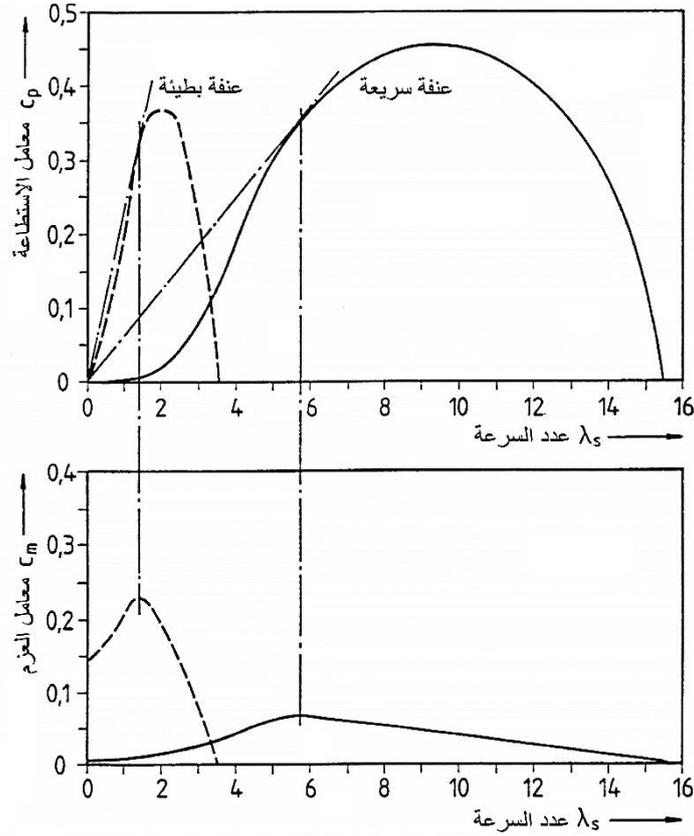
$$\frac{C_M}{C_P} = \frac{\frac{P}{W}}{\frac{P}{\frac{1}{2} \rho_a \vartheta^3 A_0}} = \frac{1}{\omega \frac{R_E}{\vartheta}} = \frac{1}{\frac{U_E}{\vartheta}}$$

أو:

$$\frac{C_M}{C_P} = \frac{1}{\lambda_S}$$

ومنه:

$$(43 - 11) \quad C_M = \frac{C_P}{\lambda_S}$$



شكل (11-22) معامل الاستطاعة ومعامل العزم لعنفة بطيئة وأخرى سريعة

بين الشكل (11-22) مقارنة لمعامل الاستطاعة ومعامل العزم لعنفة بطيئة وأخرى سريعة وتغيرها حسب عدد السرعة  $\lambda_s$ .

نحصل على القيمة العظمى لمعامل العزم من المماس على منحنى معامل الاستطاعة المار في بداية جملة الإحداثيات. وتحدد نقطة التماس قيمة عدد السرعة المقابل لمعامل العزم الاعظمي. يلاحظ أن العزم الاعظمي والاستطاعة العظمى لا يقعان عند نفي قيمة لعدد السرعة  $\lambda_s$ .

المميز في الشكل هو الفرق الكبير في عزم الإقلاع عند  $\lambda_s = 0$  إذ يكون العنفات البطيئة عزم إقلاع كبير وهذا يعني أن العنفات تستطيع الدوران (الإقلاع) حتى عند سرعات هواء صغيرة جدا بعكس العنفات السريعة التي تحتاج إلى سرعة كافية للهواء لتحصل على عزم اقلع كاف للدوران.

### 11-3-7 تشكيل عرض الجناح:

عند تزويد العنفة الريحية بالأجنحة تفيد النسبة  $B$  كمقياس. وتمثل  $B$  النسبة بين ما تشغله الأجنحة من محيط الدائرة التي ترسمها المروحة إلى محيط الدائرة نفسها.

أو:

$$(11 - 44) \quad B = \frac{Z_f \cdot b_p}{2\pi R}$$

$Z_f$  : عدد الأجنحة

$b_p$  : عرض الجناح [m]

$R$  : نصف القطر [m]

يمكن إيجاد النسبة  $B$  من توازن القوى باتجاه الرياح وفق ما يلي:

يحسب عنصر قوة الدفع المحورية على عنصر العجلة  $dR$  من العلاقة:

$$(11 - 45) \quad dF_s = C_a \frac{\rho_a}{2} U \sqrt{U^2 + \vartheta_0^2} dA \quad [N]$$

وهي نفس العلاقة (11 - 35) حيث  $\vartheta_0$  : سرعة الرياح في مستو الدوران [m/s]

قوة الدفع هذه توقف اندفاع التيار الهوائي (تخفف من السرعة). ومن علاقة دفع القوة فإن قوة الدفع  $F_s$  يمكن صياغتها على الشكل:

$$(11 - 46) \quad F_s = m \cdot (\vartheta - \vartheta_2) \quad [N]$$

$\vartheta$  : سرعة الرياح قبل العجلة [m/s]

$2\vartheta$  : سرعة الرياح بعد العجلة [m/s]

عندما تعمل العنفة في الحالة المثالية لمعامل الاستطاعة يكون:

$$(11 - 47) \quad \vartheta_2 = \frac{\vartheta}{3} \quad [m/s]$$

وبتعويض (11-47) في (11-46) يكون:

$$(11 - 48) \quad F_s = m \cdot \vartheta \frac{2}{3} \quad [N]$$

من أجل عنصر مساحة على شكل حلقة نصف قطرها  $R$  وعرضها  $dR$  يكون:

$$(11 - 49) \quad d\dot{m} = 2\pi d_R \rho_a \vartheta_0 \quad [g/s]$$

ويكون:

$$(50 - 11) \quad dF_s = 2\pi R dR \rho_a \vartheta_0 \vartheta \frac{2}{3}$$

ولكن:

$$\vartheta_0 = \frac{\vartheta + \vartheta_2}{2} = \frac{\vartheta + \frac{\vartheta}{3}}{2}$$

أو:

$$(51 - 11) \quad \vartheta_0 = \frac{2}{3} \vartheta \quad \left[ \frac{m}{s} \right]$$

بتعويض (51-11) في (50-11) ينتج:

$$(52 - 11) \quad dF_s = 2\pi R \rho_a \frac{4}{9} \vartheta^2 dR \quad [N]$$

من العلاقتين (52 - 11) و (45 - 11) ينتج:

$$C_a \frac{\rho}{2} U \sqrt{U^2 + \vartheta_0^2} dA = dF_s = 2\pi R \rho_a \frac{4}{9} \vartheta^2 dR$$

وبما أن  $dA = b_p Z_f dR$  بالتعويض ينتج:

$$(52 - 11) \quad C_a b_p Z_f U \sqrt{U^2 + \vartheta_0^2} = dF_s = \frac{4}{9} \pi R \vartheta^2 \quad [N]$$

وبالإصلاح نحصل على النسبة B الواردة في العلاقة (44 - 11)

$$\frac{Z_f b_p}{2\pi R} = \frac{8}{9C_a} \frac{\vartheta^2}{U \sqrt{U^2 + \vartheta_0^2}} = \frac{8}{9C_a} \frac{\vartheta^2}{U \sqrt{U^2 + \vartheta^2 \frac{9}{4}}}$$

بالإصلاح:

$$(54 - 11) \quad \frac{Z_f b_p}{2\pi R} = \frac{8}{9C_a} \frac{1}{\frac{U^2}{\vartheta^2} \sqrt{1 + \frac{9}{4} \frac{\vartheta^2}{U^2}}}$$

من الحركة الدورانية للعنفة:

$$\omega = \frac{U_E}{R_E} = \frac{U}{R}$$

أو:

$$\langle 55 - 11 \rangle \quad U_E = U \frac{R_E}{R}$$

يكون:

$$\langle 56 - 11 \rangle \quad \lambda_s = \frac{U_E}{U} = \frac{U R_E}{9 R}$$

نعوض (56-11) في (54-11) ونصلح فينتج:

$$\langle 56 - 11 \rangle \quad \frac{b_p}{R_E} = \frac{16\pi}{9C_a Z_f} \frac{1}{\lambda_s \sqrt{\lambda_s^2 \left(\frac{R}{R_E}\right)^2 + \frac{4}{9}}}$$

العلاقة (57-11) تصف العلاقة بين شكل الجناح وعدد الأجنحة وبقية البارامترات الأيروديناميكية وستتم مناقشة هذه العلاقة:

**تأثير عدد السرعة:**

تبين العلاقة (57-11) أن عرض مقطع الجناح يتناقص مع زيادة عدد السرعة عند ثبات بقية البارامترات.

يتراوح عدد السرعة للعنفات السريعة بين 5.5 و15، والقيم الصغيرة للعنفات ثلاثية الأجنحة، أما القيم الوسطى فللعنفات ثنائية الأجنحة والقيم الكبيرة للعنفات وحيدة الجناح (انظر الشكل 11-20) إذن فإن تأثير عدد السرعة يجب دراسته مع عدد الأجنحة أو انه عند مناقشة تأثير عدد السرعة يجب الأخذ بالاعتبار عدد الأجنحة وكلما ازداد عدد السرعة كلما نقص عرض الأجنحة أي أصبحت الأجنحة أضيق.

**تأثير عدد الأجنحة:**

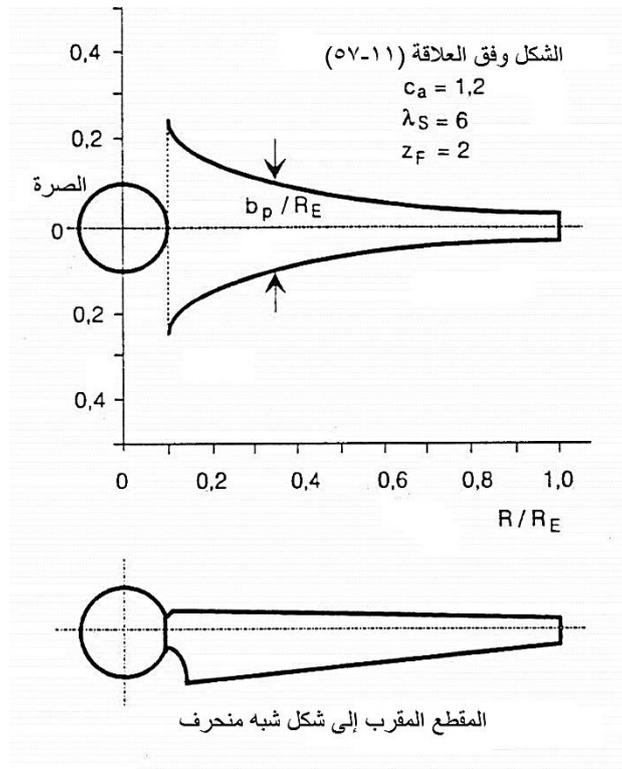
يلاحظ أن عرض الجناح يتناسب عكساً مع عدد الأجنحة. في العنفات القديمة والبطيئة يتراوح عدد الأجنحة بين 16 و32 بينما في العنفات السريعة الحديثة العدد بين 1 و3 والأكثر شيوعاً 2. مع ثبات بقية البارامترات يتناسب عرض الجناح عكساً مع عدد الأجنحة.

### تأثير نصف قطر العجلة:

عند ثبات كل البارامترات ماعدا نصف القطر يظهر أن عرض الجناح يتناسب عكساً مع نصف القطر وهذا يقود إلى أجنحة عريضة جداً قرب الصرة إلى درجة عدم إمكانية تحقيقها عملياً. لذلك فإن الشكل المثالي يتم تقريبه إلى شكل شبه المنحرف حسب الشكل (11-23).

عند الصرة، يشكل الجناح للحصول على معبر إلى مقطع دائري غالباً لوصله بالصرة.

عند تصميم الأجنحة يؤخذ بالاعتبار أيضاً وإلى جانب المواصفات الأيروديناميكية المتانة والمواد المستخدمة وإمكانية الإنتاج وكذلك كلفة الإنتاج.

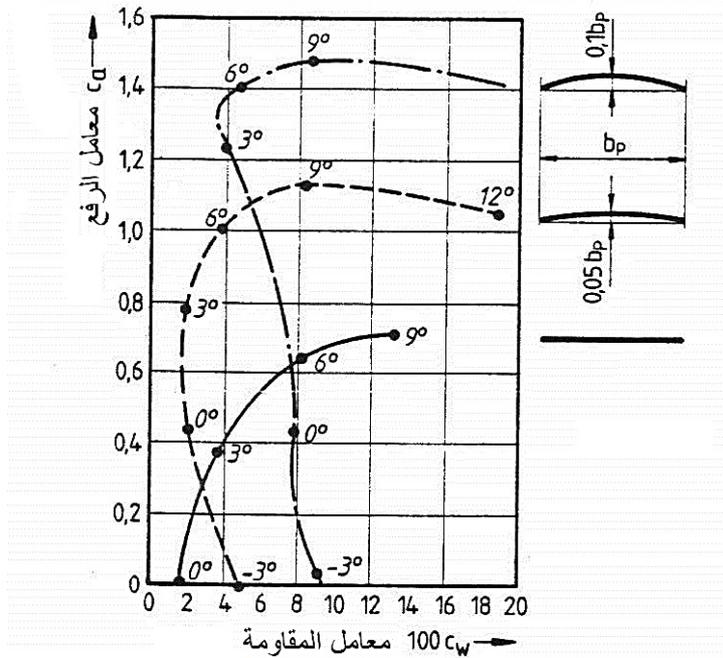


شكل (11-23) المقطع المقرب إلى شكل شبه منحرف في الأسفل بينما الشكل الأمتل في الأعلى والمقرب في الأسفل لمقطع طولي في جناح عنفة سريعة.

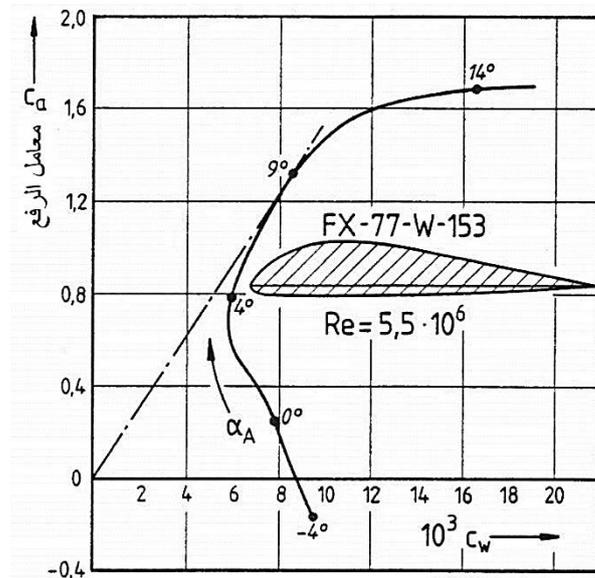
### 11-3-8 اختيار المقطع العرضي للجناح:

من الخطوات الأكثر أهمية في عملية تصميم العنفات الريحية هي تطوير واختيار مقطع الجناح المناسب. لتسهيل عملية المصمم تم تطوير سلاسل مدروسة من أشكال مختلفة للقاطع. وغالبا تم الانطلاق من تطبيقات الجناح الحامل في الطائرات والعنفات مع الأخذ بالاعتبار خصوصيات العنفات الريحية.

قام العالم Betz مبكرا باختبار بعض المقاطع وابتداء من عام 1993 تم في الولايات المتحدة تطوير منهجية واسعة لدراسة وتطوير أشكال مختلفة للمقاطع لاسيما من قبل الناسا (وكالة الفضاء الأمريكية). وتوجد وفق ناسا الآن جداول واسعة للمواصفات الهندسية والايروديناميكية للمقاطع بالإضافة إلى ما هو موجود أو موضوع من قبل مؤسسات بحثية أخرى.



شكل (11-24) مقاطع مستوية أو مقوسة لعنفات بطيئة حسب Betz عام 1926



شكل (11-25) مقاطع أجنحة لعنفات سريعة حسب Wartman 1979

يبين الشكل (11-24) مخططا لـ Betz للمواصفات الأيروديناميكية لبعض العنفات البطيئة تم وضعه عام 1926. يتم اختيار الموقع المناسب بطريقة سهلة وأكثر المقاطع استخداما وفق Betz هي لصفحة مستوية أو مخرجة

كجزء من دائرة. ويمكن بواسطة مقاطع كهذه الوصول إلى أعداد انزلاق  $E_G < 40$  ( $E_G = C_a/C_r$ ) عند اختيار مقاطع لعنفات سريعة يجب البحث عن أعداد  $E_G$  أكبر من ذلك بكثير. وقد تم التوصل لأعداد انزلاق تصل إلى 150 أو 160 لمقاطع خاصة بالعنفات السريعة (انظر الشكل 11-25).

### 11-3-9 عدد الدوران المثالي:

يقصد بعدد الدوران المثالي ذلك العدد الذي تستطيع العنفة عنده إنتاج محصول سنوي أعظمي من طاقة الريح. يمكن صياغة المحصول الكهربائي السنوي لعنفة ريجية بالعلاقة:

$$\langle 58 - 11 \rangle \quad E_{a.el}(n) = t_a \sum_{\vartheta=\vartheta_1}^{\vartheta=\vartheta_n} P(\vartheta, n) h(\vartheta) \quad \left[ \frac{j}{a} \right]$$

$\vartheta$  : سرعة الريح [m/s]

$\vartheta_L$  : السرعة الدنيا اللازمة لتشغيل العنفة [m/s]

$t_a$  : فترة السنة [s/a]

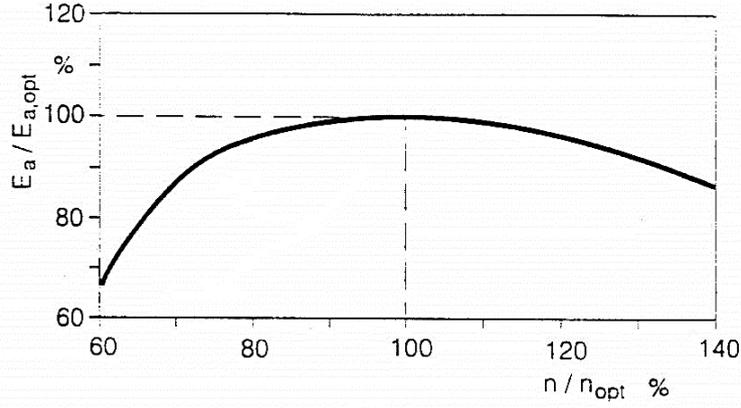
$h(\vartheta)$  : تكرار السرعة

$P(\vartheta, n)$  : الاستطاعة الكهربائية عند سرعة الريح وعدد دورات  $n$ . يؤخذ من مخططات المنحنيات المميزة للعنفة المعنية كما في الشكل (11-27).

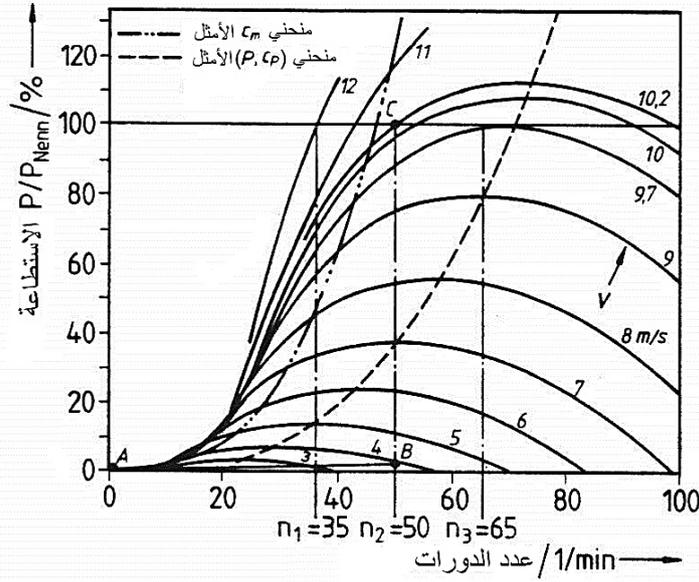
يؤخذ تكرار السرعة من مخططات توضع لكل منطقة على انفراد وتنتج عن قياسات مسجلة لفترة طويلة (سنين عديدة)

الشكل (11-26) يبين مخططاً بالأرقام لعنفة ريجية سريعة يظهر العلاقة بين المحصول السنوي وعدد الدورات. إذ انخفض عدد الدورات بمقدار 30% عن العدد الأمثل، انخفض المحصول السنوي بمقدار 15% عن المحصول الأمثل وإذا زاد عدد الدورات عن العدد الأمثل بمقدار 30% انخفض المحصول السنوي بمقدار 10% عن المحصول السنوي الأمثل.

الشكل (11-27) يبين حقل (الاستطاعة - عدد الدورات) لعجلة سريعة من أجل سرع مختلفة للريح.



شكل (11-26) العلاقة بين المحصول السنوي وعدد الدورات



شكل (11-27) حقل (p-n) المميز لعنفه رجيحة سريعة

في الشكلين السابقين:

$Ea.opt$  : المحصول السنوي الأمثل [J/a]

$p_{nenn}$  : الاستطاعة الاسمية

خط الوصل بين قمم حزمة المنحنيات يمثل منحنى الاستطاعة الأمثل بينما يمثل الخط المنقط إلى اليسار منحنى العزم الأمثل

من الشكل (11-27) يمكننا تسجيل القراءات التالية من اجل عدد دورات  $n_2=50$  ،  $n_1=35$   $n_3=65$  .

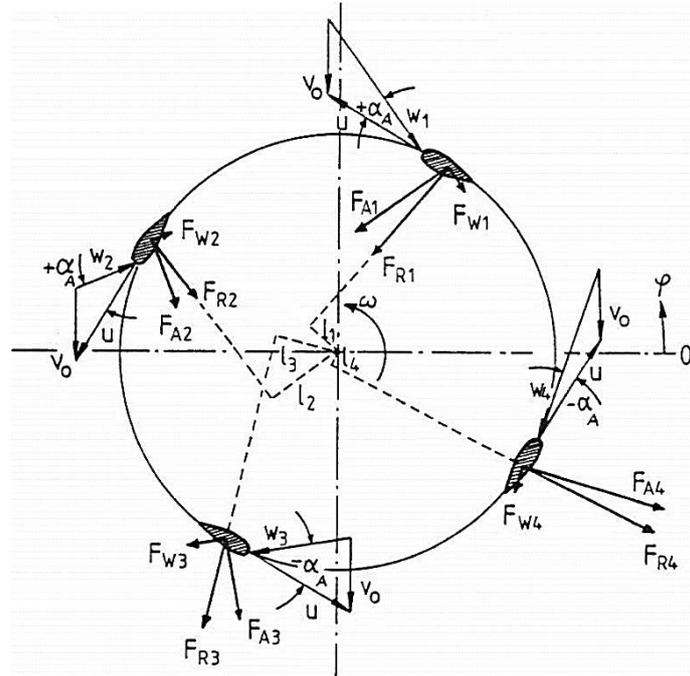
من أجل  $n_1=35$  تكون سرعة الرياح  $5[m/s]$  من أجل  $p_{opt}$  ومن أجل  $p_{nenn}$  تكون  $12[m/s]$  السرعة الدنيا اللازمة لإقلاع العنفة  $\vartheta = 3[m/s]$  والمحصول السنوي أقل من الأمثل.

من أجل  $n_2=50$  تكون سرعة الرياح  $7[m/s]$  من أجل  $p_{opt}$  ومن أجل  $p_{nenn}$  تكون  $10.2 [m/s]$  والسرعة الدنيا للقلاع  $\vartheta = 4[m/s]$  والمحصول السنوي الاعظمي.

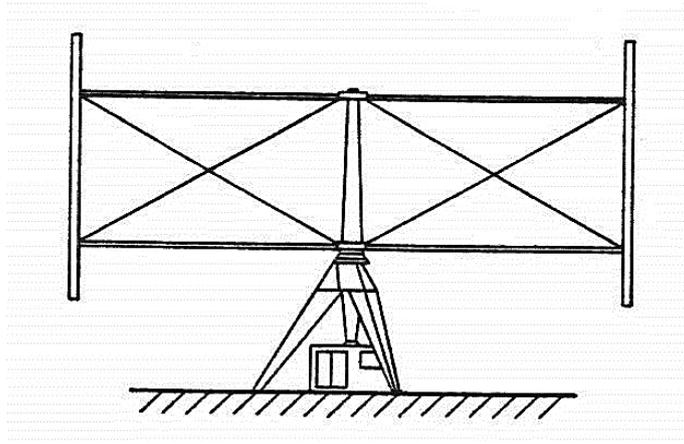
$9.7[m/s]$  تكون  $p_{nenn}$  ومن أجل  $p_{opt}$  من أجل  $9[m/s]$  تكون سرعة الرياح  $n_3 = 65$  من أجل والمحصول سنوي أقل من الأمثل. إذا اختلف عدد الدورات زيادة أو نقصان عن  $5[m/s]$  والسرعة اللازمة للتشغيل الذي يعطي محصول سنوي أعظمي فإن طاقة الرياح المتاحة عند السرعة المتوسطة ذات التكرار الأكبر لا تستمر  $n_2$  بشكل أمثل وبالتالي يكون المحصول السنوي ليس أعظميا من محاذير اختيار عدد الدورات أكثر ارتفاعا أيضا نشوء  $70 [m/s]$  إلى  $80$  الضجيج إذ من غير المرغوب زيادة السرعة المحيطية عن

### عنفة داريوس:

لعنفة داريوس محور شاقولي تدور حوله الأجنحة كما في الشكل (6-11) وهكذا تتغير زاوية العمل وشروط التدفق بشكل مستمر خلال الدوران بينما الشكل (28-11) مقطعا أفقيا في عنفة داريوس يكون للأجنحة نفس المقاطع ولكن المقاطع تتوضع بشكل متناظر حول محور الدوران وتكون قوى الرفع مرة موجهة نحو الداخل ومرة نحو الخارج سب موقع الجناح بالنسبة لاتجاه هبوب الرياح وهكذا يتقلب توزع الضغط على جانبي مقطع



شكل (11-28) مثلث السرعة وقوى الرياح على عجلة داريوس



شكل (11-29) عنفة ذات محور شاقولي وأجنحة مستقيمة

لأن السرعة النسبية تتغير حسب زاوية العمل التي تتغير بشكل مستمر وتكون  $\alpha_A$  موجبة في المجال  $0 \leq \varphi \leq 180$  وسالبة في المجال  $180 \leq \varphi \leq 360$ ، ويكون لقوة المقاومة دائماً نفس اتجاه السرعة النسبية  $W$  أما قوة الرفع  $F_A$  فتكون عمودية عليها.

تنشأ قوة رفع على المقطع المتناظر عندما تكون  $\alpha_A \neq 0$  في الوضعين:

$$\varphi = 180 \quad , \quad \varphi = 0$$

لا تكون هناك قوة رفع وفي كل الأوضاع الأخرى تكون القوة المحصلة  $F_R$  لقوى الرفع والمقاومة موجهة بحيث يكون لها عزم بذراع  $L$  حول المحور وتكون كافية العزوم بنفس الاتجاه وهكذا تدور العنفة وتنتج استطاعة.

في حال توقفت العنفة  $u = 0$  فإنها لن تستطيع عند ربح ضعيفة الانطلاق ذاتياً من جديد كما في العنفات السريعة ذات المحور الأفقي ولا بد من طاقة مساعدة للإقلاع أو يتم تزويد العنفة بعجلة مقاومة صغيرة وكافية للمساعدة في الإقلاع كعجلة ساويرس مثلاً تتركب على نفس المحور.

من مزايا عنفات داربوس:

- بساطة في البناء وعدم التأثير باتجاه الحركة الريح
- بسبب الوضع الشاقولي يمكن استخلاص الاستطاعة قرب سطح الأرض
- بساطة في بنية الأجنحة وكلفة إنتاج قليلة نسبياً

أما مساوئ هذه العنفات فهي:

- عدم القدرة على الإقلاع الذاتي
- معامل استطاعة أصغر من العنفات السريعة
- اهتزازات أقوى عن التغير المستمر والدوري الرفع

- التحكم بالاستطاعة لا يزال يشكل صعوبة

وبسبب هذه الصعوبات لم تلقَ عنفة داريوس حتى الآن انتشاراً واسعاً

## 11 - 4 الأحمال المطبقة على العنفات الريحية:

### 11 - 4 - 1 مدخل:

ربما يكون إيجاد حلول التغلب على مشاكل الحمولات المطبقة على العنفات الريحية هو الأصعب في عملية تصميم العنفة وليس الحسابات الأيروديناميكية حيث تتعرض مولدات الطاقة الريحية إلى حمولات ستاتيكية وديناميكية متعددة ومتغيرة وحتى متناوبة ودورية والأصعب يحدث عند البحث في الاهتزازات الممكنة حيث تمثل العنفات الريحية بنية مرنة سواء في الأجنحة أو البرج يجعلها معرضة بشدة لأخطار ناجمة عن الاهتزازات ويهدف تصميم العنفات من حيث المتانة إلى:

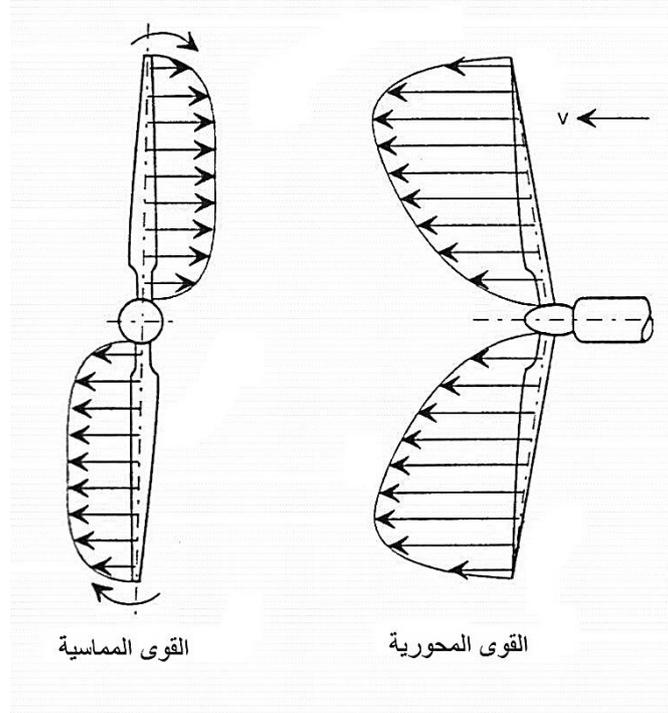
- تصميم منشآت للعمل لفترة طويلة تمتد إلى عشرين إلى ثلاثين سنة دون حدوث اهتلاكات أو أعطال ذات أهمية تتطلب التوقف لعمل العجلة لفترة طويلة نسبياً.
- استقرار وتحمل للحمولات الاستثنائية كالأعاصير مثلاً.
- تحديد ووضع حلول لمشاكل الاهتزازات وتحديد الترددات الذاتية لعناصر النظام لتلافي العمل بالقرب من حالات الطنين. العنصر الأكثر حساسية في المنشآت هو العنصر الدوار بأجزائه المختلفة الذي يجب أن يلقى اهتماماً خاصاً أثناء عملية التصميم.

## 11-4-2 قوى الريح الكتلة (الوزن والعطالة) تؤثر على الأجنحة الدوارة قوى الريح والكتلة التالية:

- أ- قوى الهواء المستقرة.
- ب- قوى الوزن الذاتي للأجنحة.
- ت- القوى الطاردة المركزية.
- ث- قوى هواء الريح غير مستمرة.
- ج- قوى ناجمة عن توجيه العنفة أثناء العمل.

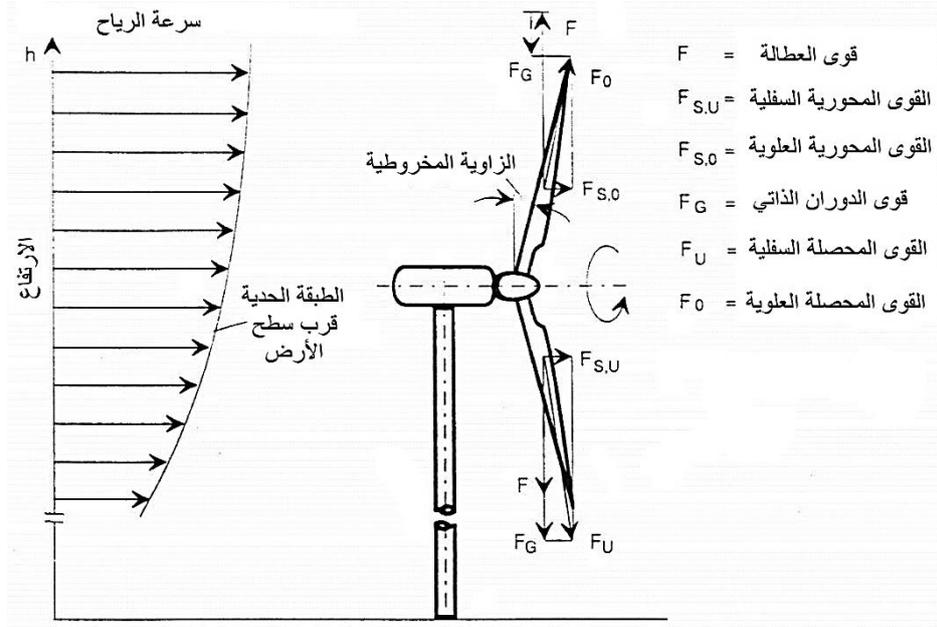
## 11 - 4 - 2 - 1: قوى الهواء المستقرة:

تمثل القوى المماسية الواقعة في مستو الدوران والقوى الدافعية المحورية العمودية على مستو الدوران باتجاه المحور شكل (11-30)

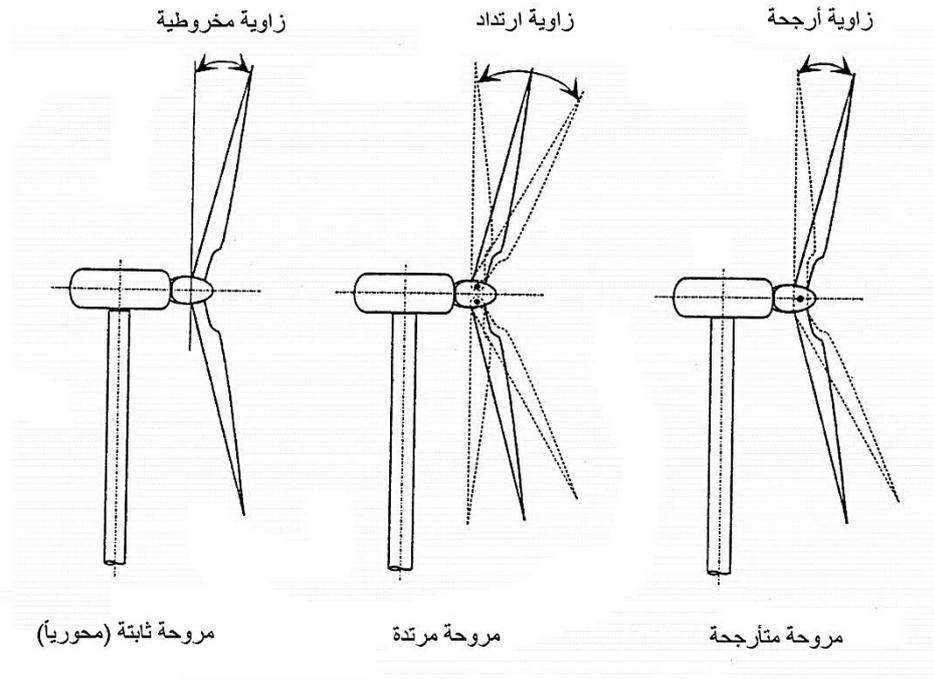


شكل (11-30) مخطط لتوزيع القوى المماسية والمحورية على الأجنحة

وتتطلب القوى المماسية استقرار على الانحناء الممكن بعكس اتجاه الحركة الدورانية أما القوى المحورية فلها متطلبات استقرار للانحناء باتجاه الرياح. ويجب الأخذ بعين الاعتبار أن العمل عند سرعات للرياح غير السرعة التصميمية، وهو ما يحدث غالباً، يتسبب في توزيع آخر للقوى على الجناح تزداد خطورتها عند السرعات الكبيرة.



شكل (11 - 31) القوى المؤثرة على الأجنحة والزاوية المخروطية



شكل (11 - 32) طرق مختلفة لتثبيت الأجنحة

#### 11 - 4 - 2 - 2: قوى الوزن الذاتي للأجنحة:

تؤثر قوى الوزن الذاتي للأجنحة أثناء العمل وتتحول من قوى شد إلى قوة ضغط عند الوضع الشاقولي ذات عزم انحناء في الأوضاع الأخرى لا سيما الوضع الأفقي. وتكون هذه القوى ذات تأثير ملحوظ وكبير في حالة العنفات ذات الأقطار الكبيرة وبالتالي الاستطاعة الكبيرة.

### 11 - 4 - 2 - 3: القوى الطاردة المركزية:

نظراً للسرعة المنخفضة نسبياً لدوران العنفات الريحية بالمقارنة مع الآلات العنفية الأخرى فإن قوى العطالة لا تمثل مشكلة ذات أهمية ملحوظة. كما قوى العطالة لها عزم انحناء على الجناح معاكس لاتجاه عزم الانحناء الناتج عن القوى المحورية (وذلك بسبب الزاوية المخروطية لاتصال الأجنحة بالصرّة) يقلل من تأثيره.

مع تغير سرعة الدوران وسرعة الريح تتغير القوة المحصلة المؤثرة على الجناح بالقيمة والاتجاه وليس بالضرورة أن تؤثر على المحور الطولي للجناح كما أنه في كثير من الحالات لا يكون هناك بالإضافة للزاوية المخروطية للأجنحة.

للحصول على موازنة أفضل للقوى المتغيرة بشكل مستمر على الجناح يتم اللجوء إلى طرق مختلفة لربط الأجنحة بالصرّة.

يبين الشكل (11-32) ثلاث طرق أكثر شيوعاً فيما للجوء إلى الزاوية المخروطية سابقاً أو استخدام وصلات قابلة للارتداء أو تكون المروحة قابلة للأرجحة عند نقطة الاتصال كما هو مبين في الشكل (11-32) وتؤدي هذه الإجراءات إلى خفض قيمة القوة المحصلة والحصول على موازنة جزئية للقوى المؤثرة على الأجنحة.

### 11-4-2-4: قوى الريح غير المستقرة:

نشوء الأحمال الديناميكية على العنفة الريحية من القوى غير المستقرة لتيار الريح يعود للأسباب التالية:

أ- عند تركيب العنفة خلف البرج من جهة الريح وعند كل دورة يمر الجناح (وبقية الأجنحة) في منطقة حجب الريح من قبل البرج حيث تنشأ تيارات إعصارية، وعند تركيب العنفة أمام البرج تمر أيضا كافة الأجنحة أمام البرج في كل دورة حيث يتأثر جريان الريح بالاصطدام بالبرج وتتغير خطوط السرعة بشكل مفاجئ وفي كلتا الحالتين (التركيب الخلفي أو الأمامي) تنشأ قوى ديناميكية على الأجنحة.

ب- تنشأ أيضاً قوى الريح غير المستقرة بسبب بروفيل السرعة الشاقولي لا سيما في حالة الأقطار الكبيرة، حيث تكون السرعة في الأعلى كما في الشكل (11-31) وبالتالي تتعرض الأجنحة عند وجودها في الجانب العلوي إلى قوى ديناميكية أعلى من القوى التي تؤثر على الأجنحة في الجانب السفلي.

ج- تنشأ أحمال كبيرة جداً نتيجة العواصف الشديدة المفاجئة، إذ يسبب التغير القوي لفترات قصيرة في سرعة واتجاه الريح بمضاعفة الأحمال الديناميكية، بشكل يشبه الصدمات، عدة أضعاف وذلك لأن قوى الريح تتناسب مع مربع سرعته.

#### 11-4-2-5: قوى ناتجة عن توجيه العنفة أثناء العمل:

عند توجيه العنفة أثناء دوراتها، باتجاه الرياح تنشأ قوى دورانية تكون صغيرة في حال كان التوجيه يتم ببطء بواسطة آلية تحريك مع محرك أما عندما يكون التوجيه سريع وبواسطة الرياح نفسه فعندها يجب أخذ هذه القوى بالاعتبار عند تصميم العنفة.

#### 11-4-3: القوى الناتجة عن التشغيل والإيقاف:

##### 11-4-3-1: إقلاع العنفة:

في العنفات المزودة آلية لتدوير الأجنحة (بهدف التحكم بالاستطاعة مثلاً) وعندما تكون الأجنحة في وضع الإقلاع شكل (11-35) فإن الوزن الذاتي للأجنحة يحمل على مقاطع الأجنحة المتوضعة أفقياً حيث يكون عزم عطالة المقطع صغير إلى حد بعيد مما يتسبب في أحمال كبيرة على الأجنحة المتوضعة أفقياً تتسبب هذه الأحمال في انحناءات لا يمكن إهمالها.

##### 11-4-3-2: إيقاف العنفة:

عند إيقاف العنفة في الحالات الطارئة وعند سرعات عالية تنتج أحمال كبيرة. إذ يتم تدوير الأجنحة بحيث يصبح خط الوسط باتجاه الرياح وعندها تنتج زاوية عمل سالبة مما يؤدي إلى ارتداد القوى المؤثرة على الجناح، وفي حالة العنفات ذات الزاوية المخروطية شكل (11-31) تصبح عزوم قوى الدفع المحورية وعزوم القوى الطاردة المركزية باتجاه واحد، أي تجمع بدل أن توازن بعضها.

##### 11-4-3-3: حالة توقف العنفة:

أكبر قوى تتحملها العنفة وهي ساكنة تكون في حالة التوقف عند رياح إعصارية وهي أكثر الحالات شيوعاً لإيقاف العنفة.

#### 11-4-3-4: مطابقة دوران العنفة مع تردد الشبكة (Netsynchronisation):

عند الوصل المباشر (الصلب) للمولد والعنفة، بدوران بعدد دورات ثابت بشكل قسري. وعندما تتغير سرعة الرياح تنشأ قوى ديناميكية عالية ويمكن تجنب أو التخفيف من هذه القوى بالربط المرن للعنفة والمولد.

#### 11-4-4 الاهتزازات الديناميكية:

تمثل الأبراج والعنفات في أنظمة الرياح الحديثة جملة مرة قابلة للاهتزاز، عند دراسة ديناميك الاهتزازات للعنفة الريحية عند التصميم يجب مراعاة ألا تحدث حالات طنين ناتجة عن ربط عناصر النظام وخلال العمل ألا تحدث حالات تحريض في جال الترددات الذاتية لعناصر النظام أو مضاعفاتها. وتتركز مشاكل الاهتزازات الميكانيكية للأنظمة الريحية في المجالات التالية:

- اهتزازات الأجنحة.
- اهتزازات دورانية للمحور الدوار وما يربط به من عناصر دوارة أخرى.
- اهتزازات ناتجة عن توجيه العنفة أثناء العمل.
- اهتزازات الانحناء للبرج.
- اهتزازات جملة النظام.

يوضع للعنفة مخططات طنين كما في الشكل (11-33) يخصص المحور الأفقي لعدد دورات 1/min والمحور الشاقولي للترددات  $H_z$ . وتوضع الترددات الذاتية لعناصر النظام أو الجملة ومضاعفاتها (الخطوط شبه الأفقية) على المخطط حزمة الخطوط المستقيمة المارة عبر بداية جملة الإحداثيات تمثل عدد الدورات الكاملة للعنفة ومضاعفاتها.

عدد الدورات الإسمي للعنفة ممثل بخط شاقولي على المخطط.

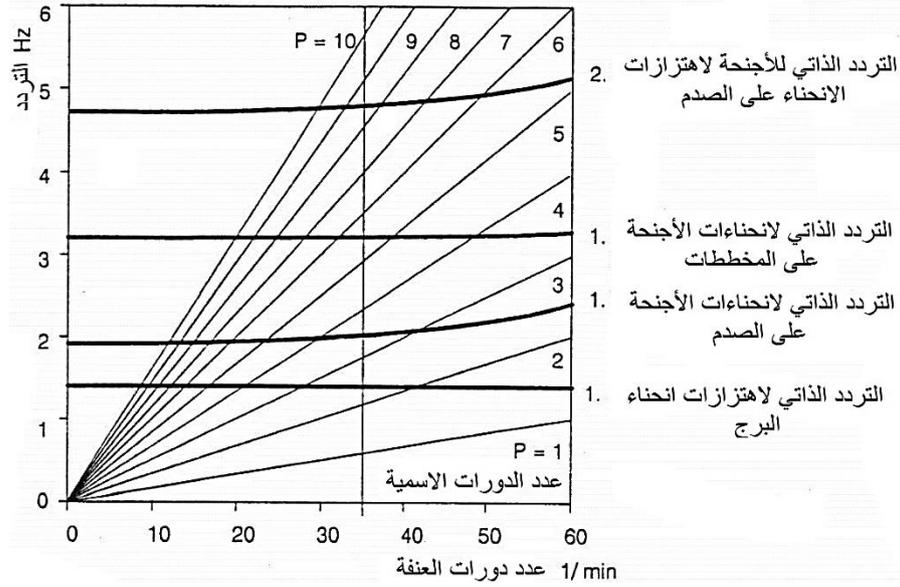
لتجنب حالات الطنين يجب ألا تقع نقاط تقاطع خط عدد الدورات الإسمي مع الترددات الذاتية على أحد خطوط عدد الدورات الكاملة للعنفة ومضاعفاتها ( $p = 1,2,3 \dots$ ) إذ يكون تردد التحريض:

$$f = \frac{n \cdot P}{60} \text{ [Hz]}$$

f : تردد التحريض [Hz]

n : عدد دورات العنفة [1/min]

$$1 \leq P$$



شكل (11-33) مخطط الطنين لعنفه ريجية (عدد الدورات الإسمي 35 دورة/دقيقة)

## 11-5 النظام الكهربائي:

تستخدم العنفات الريحية السريعة بشكل رئيسي لتوليد كهرباء تيار متناوب وتقسم طرق التشغيل حسب طريقة الوصل على الشبكة إلى ثلاثة طرق:

1. ربط مباشر.
2. ربط غير مباشر.
3. نظام الجزيرة المستقلة.

### الربط المباشر:

تكون عدد دورات العنفة مساوية لعدد دورات المولد الذي يجب أن يدور بعدد محدد من الدورات حسب التردد المطلوب للتيار الكهربائي (أي حسب تردد الشبكة) يسمى ربط العنفة بالمولد في هذه الحالة ربطاً صلباً ويتسبب في نشوء أحمال ديناميكية كبيرة على العناصر المتحركة.

### الربط غير المباشر:

في حالة الربط غير المباشر يمكن العمل بعدد دوران متغير للعنفة والمولد، والتيار الكهربائي الناتج يحتاج أولاً إلى معالجة التردد لي مطابق تردد الشبكة (وهذا يحتاج إلى معدل تردد الشبكة والمولد) حيث ينتج المولد تياراً متغيراً من حيث التوتر والتردد يتم تحويله أولاً إلى تيار مستمر وبواسطة نظام تنويب مناسب يتم تحويله إلى التوتر والتردد المرغوبين. وبعد ذلك يتم الربط مع الشبكة أي (ربط غير مباشر).

من محاسن الربط غير المباشر أنه في مجال عدد دورات يتراوح بين 50% و120% من عدد الدوران الاسمي يعمل النظام بشكل أمثل أيروديناميكياً، وإن عدد الدورات المتغير يؤدي إلى التقليل من الأحمال الديناميكية.

**نظام الجزيرة المستقلة:** عندما تعمل مجموعة عنفات لتغذية منطقة أو مستهلك محلي بعيداً عن الشبكة العامة تنتفي الحاجة إلى دقة في الحصول على تردد معين كما في طريقة الربط على شبكة بمواصفات دقيقة.

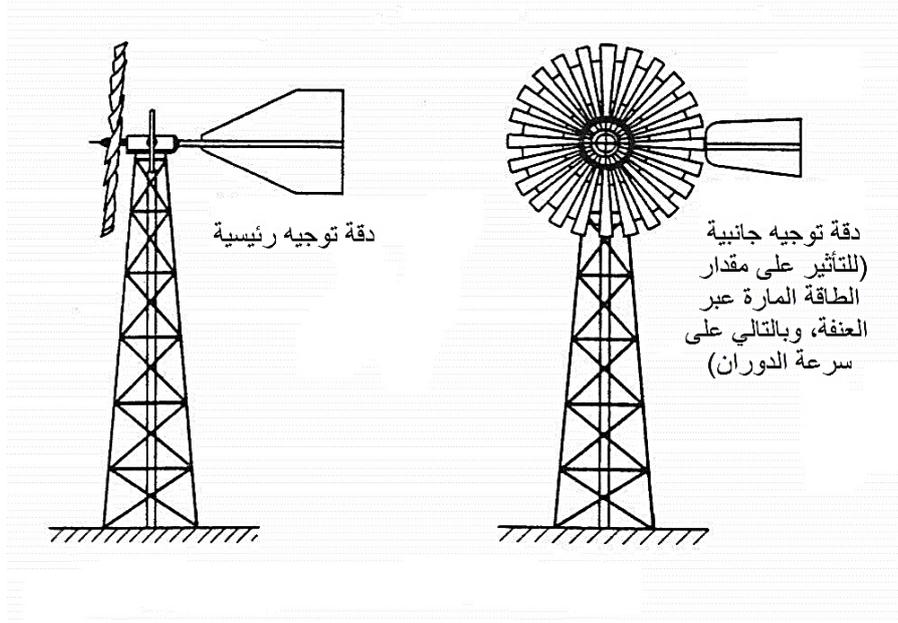
### **11-6 التحكم:**

بسبب تغير سرعة الريح باستمرار وبالتالي تغير الطاقة المتاحة من الرياح تحتاج العنفات الريحية إلى تحكم لحمايتها من الحمل الزائد ولضمان نوعية جيدة للكهرباء المنتجة وكذلك لضمان عمل العنفة بشكل أتوماتيكي تماماً. ويجب التمييز بين التحكم بعدد الدورات والتحكم بالاستطاعة في حالة الربط المباشر يكون عدد الدورات ثابت وبالتالي يكون من الممكن التحكم بالاستطاعة فقط.

أما التحكم بالاستطاعة وعدد الدورات فيكون ممكناً في حالة الربط غير المباشر أو نظام عمل الجزيرة.

### **11-6-1 التحكم في العنفات البطيئة:**

في العنفات البطيئة كثيرة الأجنحة تكون الأجنحة في الغالب مصنعة من وريقات من صفيحة معدنية مثبتة على الصرة دون قابلية للتحريك. وبالتالي لا يمكن التحكم بعدد الدورات عن طريق تحريك الأجنحة. يمكن التأثير على سرعة الدوران عن طريق فتل العنفة بشكل كامل عن اتجاه الريح الرئيسي بحيث تتلقى كمية أقل من طاقة الرياح ويمكن أن يتم ذلك بواسطة آلية هيدروليكية أو بالطريقة القديمة التقليدية أي بتزويد العنفة بدقة توجيه إضافية جانبية تقوم بفتل العنفة بما يتناسب مع شدة الريح كما في الشكل (11-34).



شكل (11-34) عنفات بطبنة بموجه جانبي

لتجهيزات قتل العنفة (الدفة أو النظام الهيدروليكي) مهمة أخرى وهي حماية العنفة في حالة العواصف الشديدة لأن مقدار القتل يتناسب مع شدة الرياح.

### 11-6-2 التحكم في العنفات السريعة:

يهدف التحكم في العنفات السريعة إما إلى زيادة قوى الرياح المؤثرة على الأجنحة أو إلى خفض هذه القوى، ولتحقيق ذلك هناك طريقتان أيروديناميكيتان يمكن اتباعهما:

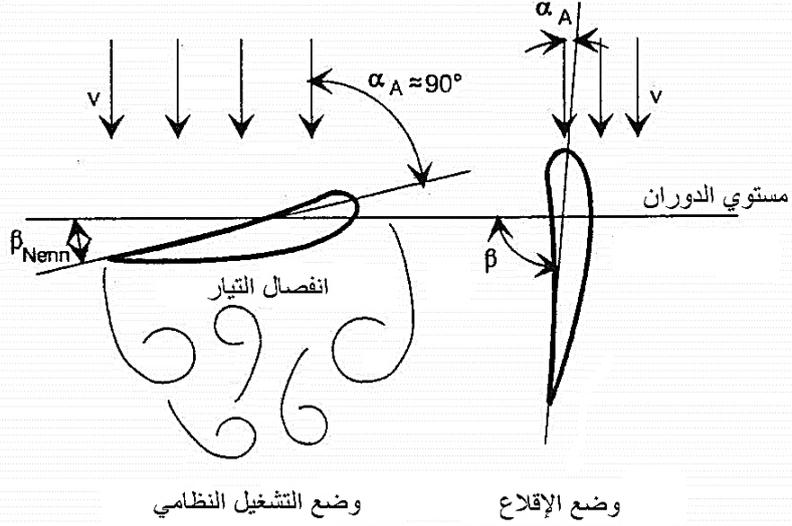
- التحكم عن طريق تغيير زاوية ضبط (عيار) الأجنحة.
- التحكم عن طريق فصل هادف للتيار عن مقطع الجناح مع بقاء زاوية الضبط (التغيير)  $\beta$  ثابتة.

تزود كافة العنفات الريحية الكبيرة وحتى الصغيرة حالياً بألية تجريك لتغيير وضع الأجنحة (تغيير الزاوية  $\beta$ ) تتوضع الآلية اللازمة لتدوير الاجنحة حول محورها الطولي في الصرة وتكون قادرة على تدوير الأجنحة بزاوية حتى  $90^\circ$  وهي آلية ذات كلفة عالية نسبياً. طريقة التحكم هذه تسمى أيضاً (pitching).

في الكثير من العنفات الصغيرة وبعض العنفات المتوسطة تكون الأجنحة مثبتة في الصرة دون قابلية للتدوير حول محورها الطولي. عند زيادة سرعة الرياح عن السرعة التصميمية تتم عملية التحكم ذاتياً بانفصال التيار عن سطح مقطع الجناح بالتدرج (من الجهة العلوية للجناح) وهكذا تنخفض قوة الرفع على الجناح وتتوقف استطاعة العنفة عن الازدياد يسمى هكذا تحكم ب (التحكم عن طريق الخنق).

## تحكم الإقلاع:

بسبب عدد الاجنحة القليل للعنفات السريعة فإنها غالباً لا تمتلك عزم إقلاع كافٍ ولكي تتمكن من الإقلاع يجب أن تكون زاوية عيار الجناح  $\beta$  أكبر ما يمكن. يبين الشكل (11-35) وضع مقطع الجناح في حالتي العمل والإقلاع.



- $\alpha_A$  = زاوية العمل
- $\beta$  = زاوية عيار الأجنحة
- $v$  = سرعة الرياح
- Nenn = اسمي (تصميمي)

شكل (11-35) وضع مقطع الجناح في حالتي العمل والإقلاع للعنفات السريعة

عند بداية عملية الإقلاع تكون السرعة المحيطية صفراً. إذا كانت الأجنحة في وضع العمل فإن العنفة لا تستطيع الإقلاع والسبب هو كبر الزاوية  $\alpha_A$  (زاوية العمل) مما يؤدي إلى انفصال تيار الرياح عن الجهة الخلفية للجناح وبالتالي عدم وجود قوة رفع كافية. وتنشأ قوة رفع كافية فقط عن طريق زيادة زاوية ضبط الأجنحة  $\beta$  حتى يلتصق التيار بالجهة الخلفية للجناح من جديد.

عندما تبدأ العنفة بالدوران يجب العودة لخفض قيمة  $\beta$  بشكل مستمر حتى تعود إلى القيمة التصميمية (القيمة في حالة العمل النظامي للعنفة).

في الشكل (11-27) تتم عملية التحكم بالإقلاع وفق الخط  $A \leftarrow B$ . أي أن الاستطاعة المطبقة على محور العنفة هي فقط الاستطاعة اللازمة للتغلب على مقاومة الاحتكاك في المضاجع طيلة عملية الإقلاع.

لإيقاف العنفة يتم قتل الأجنحة لتصبح في وضع الإقلاع، حيث يتم زيادة الزاوية  $\beta$  ببطء وبشكل مستمر حتى تصبح قيمة معامل الاستطاعة صفراً أو  $C_a = 0$  ويسمى هذا الوضع بوضع الراية (يكون وضع الجناح مشابهاً لوضع الراية

في مهيب الريح). في العنفات ذات الأجنحة المثبتة على الصرة (غير قابلة للتدوير حول محورها الطولي) تكون عملية الإقلاع غالباً صعبة وربما غير ممكنة تلقائياً، ولذلك في حالة العنفات ذات الربط المباشر على الشبكة يكون من السهل الاعتماد على قوة محرك كهربائية مساعدة.

### التحكم بالحمل الجزئي:

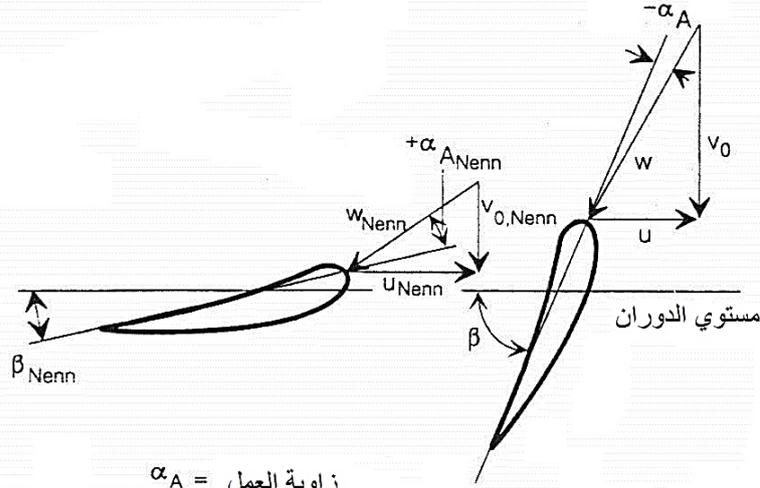
التحكم الجزئي بالاستطاعة (أو بالحمل) يتم عادة مع إبقاء  $\beta$  ثابتة تفادياً للتشغيل المستمر لآلية قتل الأجنحة وما ينجم عنه من تلف واهتلاك مبكر لهذه الآلية المكلفة

في حالة الربط المباشر والعمل بعدد دورات ثابت يتم التحكم الجزئي بالاستطاعة عن طريق تغيير (أو التحكم ب) مقدار الاستطاعة المغذاة للشبكة.

في مخطط الحقل المميز (استطاعة-عدد دوران) شكل (11-27) يتم ذلك وفق الخط  $B \leftarrow C$  من أجل سرعات للهواء تتراوح بين  $3.6 \div 10.2 [m/s]$  في حالة الربط غير المباشر أو نظام الجزيرة حيث يكون عدد الدورات متغير حسب سرعة الريح، لا بد من مراقبة سرعة الدوران في شتى حالات العمل. وتتم عملية التحكم بعدد الدورات وبالاستطاعة الجزئية في حالة الربط غير المباشر عن طريق تغييرات على الشبكة الكهربائية وليس عن طريق قتل الأجنحة.

### التحكم بالاستطاعة الكلية:

عندما تصبح سرعة الريح كبيرة ولتفادي ازدياد الاستطاعة عن الاستطاعة التصميمية يتم التحكم عن طريق زاوية الضبط (التعير)  $\beta$  حيث يتم هذه الزاوية بحيث تنخفض قوة الرفع وبالتالي  $C_a$  يبين الشكل (11-36) كيف يمكن التأثير على زاوية العمل  $\alpha_A$  عن طريق تغيير زاوية الضبط  $\beta$ .



$\alpha_A$  = زاوية العمل

$\beta$  = زاوية التغيير

$U$  = السرعة المحيطية

$v_0$  = سرعة الرياح في مستوي الدوران

$w$  = سرعة الدخول النسبية

Nenn = اسمي (تصميمي)

شكل (11-36) التحكم بالاستطاعة الكلية عن طريق تدوير (فتل) الأجنحة

في حال بقيت  $\beta$  دون تغيير يؤدي ذلك إلى زيادة  $\alpha_A$  وبالتالي تزداد القوة المحركة (قوة الرفع) ويتم تجاوز الاستطاعة التصميمية وتجنب ذلك يتم زيادة  $\beta$  وبذلك يتم خفض مقدار  $\alpha_A$  وبالتالي قوة الرفع، ويحافظ على قيمة أعلى للزاوية  $\beta$  حتى تعود الاستطاعة الناتجة من الريح لتساوي الاستطاعة التصميمية أو حتى تعود سرعة الريح إلى السرعة التصميمية.

عند سرعات عالية جداً تنشأ أعمال غير مسموحة على الأجنحة عندها يجب فتل الأجنحة إلى وضع الرابطة أي  $C_a = 0$  ،  $\beta > 90^\circ$  في العنفات ذات الأجنحة ذات الزاوية  $\beta$  الثابتة لا يكون التحكم بالاستطاعة دقيقاً كما في العنفات ذات الأجنحة المتحركة محورياً، وتتراوح الاستطاعة في مجال معين. السبب هو عدم انتظام انفصال التيار عن الجهة الخلفية للجناح، وعند سرعات عالية جداً للريح لا بد من إيقاف العنفة ميكانيكياً.

### توجيه العنفة باتجاه الريح:

للحصول على استثمار أمثل لطاقة الريح يجب توجيه العنفة بشكل دائم حسب اتجاه الريح وهذا يتطلب وجود آلية محركة لتوجيه العنفة تستمد التوجيه اللازم من جهاز لتحديد اتجاه الريح.