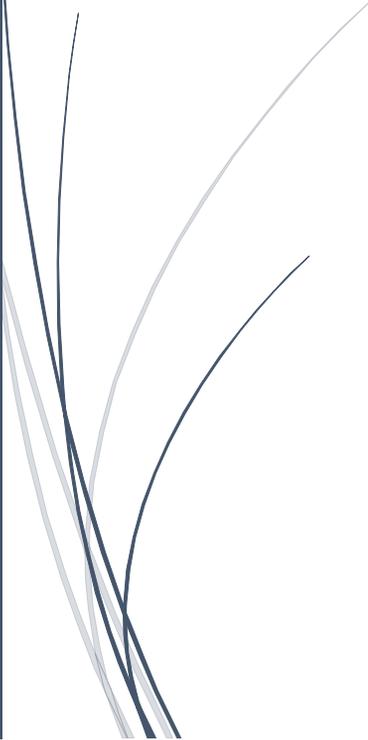


## العنفات ومحولات الطاقة الريحية





## 1-11 ملحة تاريخية:

استخدمت العجلات الهوائية في الشرق منذ الألف الثاني قبل الميلاد أما في أوروبا فلاقى استخدام العجلات الريحية انتشاراً بين القرنين الثاني عشر والسادس عشر لا سيما لأغراض طحن القمح وسميت بالطواحين الهوائية الشكل (11-1).



شكل (11-1) طاحونة هواء قديمة استخدمت لطحن القمح في أوروبا حتى القرن الثامن عشر

في القرن التاسع عشر أدى تطوير العجلات الريحية إلى ظهور العجلات عديدة الشفرات شكل (11-2) وقد استخدمت، هذه العجلات بشكل رئيسي وبسبب توفر عزم حركي كافٍ لتحريك مضخات ماء مكبسية لرفع الماء.

تعمل هذه العجلات عند عدد دورات صغير وسميت تبعاً لذلك بالعجلات بطيئة الدوران. وقد وصل عددها في منتصف القرن التاسع عشر إلى الملايين في الولايات المتحدة فقط. في نهاية القرن التاسع عشر بنيت مئات الآلاف من طواحين الهواء وفي تلك الفترة ومع الثورة الصناعية بدأت الآلات التي تعمل بمحركات الاحتراق الداخلي والتي تستعمل الوقود الأحفوري تحد من انتشار العجلات الهوائية كونها أرخص وأسهل استعمالاً.



شكل (11-2) عجلات متعددة الشفرات استخدمت في القرن التاسع عشر وبداية القرن

العشرين في تشغيل مضخات رفع الماء

لكن التطور التكنولوجي الهائل خلال القرن العشرين وما رافقه من شراهة في استهلاك مصادر الطاقة الأحفورية خلق مشاكل كبيرة أهمها:

التلوث البيئي والانحباس الحراري واحتمال نضوب مصادر الطاقة التقليدية (الأحفورية) أو على أقل احتمال نشوء أزمة لهذه المصادر.

كل ذلك كان حافزاً على إعادة العمل على تطوير التقانات لاستثمار الطاقات المتجددة لا سيما طاقة الرياح التي يعلق عليها اليوم آمالاً في المساهمة في حل أزمة الطاقة بشكل عام.

في العنفات الريحية المستخدمة لتوليد الكهرباء يكون عدد الدورات كبيراً نسبياً كبيراً وذلك بغرض التخفيض من حجم جهاز نقل الحركة والمولد الكهربائي وبالتالي تخفيض الكلفة.

وهذا أدى إلى ظهور ما يسمى بالعنفات السريعة ذات العدد القليل من الأجنحة ذات التصميم الأيروديناميكي المثالي والتي تفيد بأعراض التحكم بقابليتها للدوران حول محورها الطولي.

يبين الشكل (3-11) نموذج بعنفة سريعة، وتتراوح استطاعة العنفات السريعة بين بضعة كيلو وات ويضع ميغا واط ويعتبر المستوى التقني للعنفات الصغيرة والمتوسطة على درجة عالية من التطور.

يمكن أن تكون العنفات السريعة وحيدة الجناح أو ثنائية الجناح أو ثلاثية الجناح وهي الأكثر شيوعاً



شكل (3-11) عنفة ريحية حديثة بجناح واحد



شكل (4-11) عنفة ريجية حديثة بجناحين



شكل (5-11) عنفة ريجية حديثة بثلاث أجنحة باستطاعة  $600[kw]$

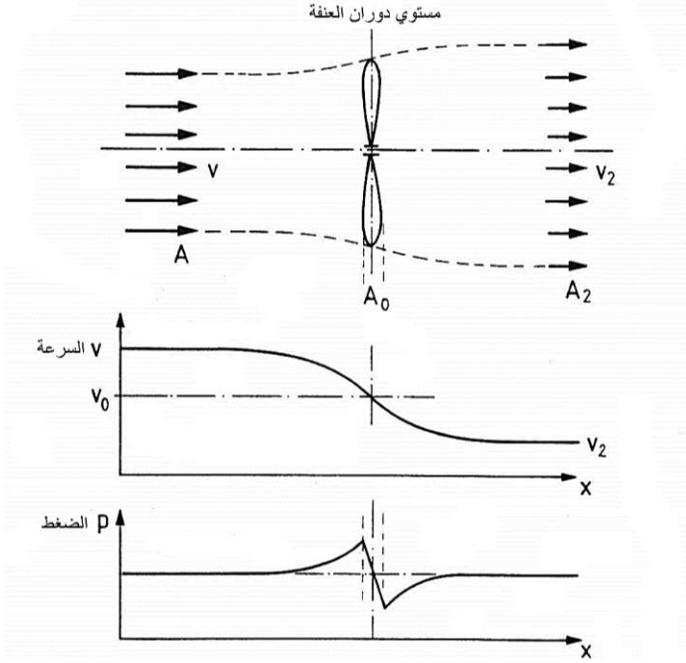


شكل (6-11) عنفة داربوس ذات المحور الشاقولي استطاعة [30kw] وقطر دوران [13m] الأشكال (4-11) و (5-11) هي عنفات ريجية حديثة وحيدة وثلاثية الاجنحة. أما الشكل (6-11) فيمثل نموذجاً خاصاً ذا محور شاقولي وهو نوع قليل الانتشار.

2-11 أسس في ميكانيك الجريان:

1-2-11 معامل الاستطاعة المثالي الأعظمي يمثل النسبة العظمى للطاقة التي يمكن لعجلة هوائية انتزاعها من الريح:

يمثل الشكل (7-11) مخطط لجريان الريح عبر عجلة هوائية



شكل (11 - 7) مبدأ الجريان ضمن عنفة ريجية

انطلاقاً من قانون استمرار التدفق فإن التدفق  $\dot{m}$  في المقاطع  $A, A_0, A_2$  يجب أن يكون هو نفسه.

في مستوي العنفة يمكن حساب التدفق بالعلاقة التالية:

$$(1 - 11) \quad \dot{m} = \rho_a \vartheta_0 A_0 \quad [\text{kg/s}]$$

$\rho_a$  : كثافة الهواء  $[\text{kg/m}^3]$

$\vartheta_0$  : سرعة الرياح في مستوي العنفة  $[\text{m/s}]$

$A_0$  : مساحة الدائرة المسوحة بالأجنحة  $[\text{m}^2]$

السرعة في مستوي العنفة  $\vartheta_0$  تكون مساوية للقيمة الوسطية بين  $\vartheta$  و  $\vartheta_2$  أو:

$$(2 - 11) \quad \vartheta_0 = \frac{\vartheta + \vartheta_2}{2} \quad [\text{m/s}]$$

حيث  $\vartheta$  و  $\vartheta_2$  سرعة الرياح قبل وبعد العنفة  $[\text{m/s}]$

الاستطاعة النظرية للعنفة هي الفرق في الاستطاعة لتيار الهواء الداخل والخارج من العنفة

$$\langle 3 - 11 \rangle \quad p = p_1 - p_2 \quad [w]$$

انطلاقاً من (10-16) يكون:

$$\langle 4 - 11 \rangle \quad p = 0.5\rho_a A\vartheta^3 - 0.5\rho_a A_2\vartheta_2^3 \quad [w]$$

أو:

$$\langle 5 - 11 \rangle \quad p = \frac{A\rho_a\vartheta}{2}\vartheta^2 - \frac{A_2\rho_a\vartheta_2}{2}\vartheta_2^2 \quad [w]$$

ينتج:

$$\langle 6 - 11 \rangle \quad p = \frac{\dot{m}}{2}(\vartheta^2 - \vartheta_2^2) \quad [w]$$

بتعويض قيمة  $\dot{m}$  من العلاقة (1-11) والعلاقة (2-11) ينتج:

$$P = \frac{\rho_a \left( \frac{\vartheta + \vartheta_2}{2} \right) \cdot A_0}{2} \cdot (\vartheta^2 - \vartheta_2^2) \quad [w]$$

أو:

$$\begin{aligned} \langle 7 - 11 \rangle \quad p &= \frac{\rho_a A_0 \vartheta}{4} \left( 1 + \frac{\vartheta_2}{\vartheta} \right) \vartheta^2 \left[ 1 - \left( \frac{\vartheta_2}{\vartheta} \right)^2 \right] \quad [w] \\ &= \frac{\rho_a A_0 \vartheta^3}{2} \cdot 0.5 \left( 1 + \frac{\vartheta_2}{\vartheta} \right) \left[ 1 - \left( \frac{\vartheta_2}{\vartheta} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

الاستطاعة العظمى للرياح عبر مقطع مساو لمقطع العنفة:

$$\langle 8 - 11 \rangle \quad p_{\max} = 0.5\rho_a A_0 \vartheta^3 \quad [w]$$

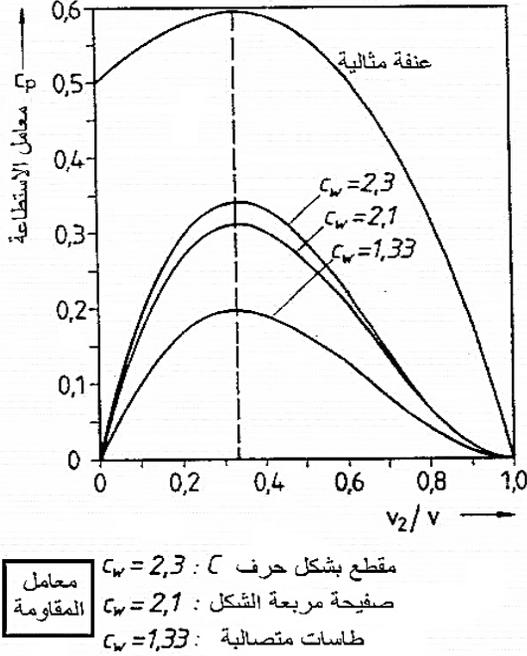
أما معامل الاستطاعة العظمى للعنفة والاستطاعة العظمى للرياح عبر مقطع العنفة فهو:

$$\langle 9 - 11 \rangle \quad C_p = \frac{P}{P_{\max}}$$

وبالتعويض ينتج أن:

$$(10 - 11) \quad C_p = 0.5 \left(1 + \frac{\theta_2}{\theta}\right) \left[1 - \left(\frac{\theta_2}{\theta}\right)^2\right]$$

العلاقة بين  $C_p$  والنسبة  $\frac{\theta_2}{\theta}$  مبينة أيضا تخطيطيا في الشكل (8-11)



شكل (8-11) مقارنة لمعاملات الاستطاعة لعنفة مثالية حسب (BETZ) مع عدة أشكال عنفات

مقاومة يلاحظ أن القيمة العظمى لمعامل الاستطاعة  $C_p$  أو  $C_{p_{max}}$  تكون عند  $\frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{1}{3}$

وتكون قيمة  $C_{p_{max}} = 0.593$ .

ولكن:

$$(11 - 11) \quad \theta_0 = \frac{\theta + \theta_2}{2} = \frac{\theta + \frac{\theta}{3}}{2} = \frac{2}{3}\theta$$

وبالتالي فإن عنفة مثالية تستطيع تحويل 59.3% من طاقة الرياح إلى طاقة مفيدة ويجب تصميم العنفة بحيث تكون سرعة الرياح بعد العنفة مساوية 1/3 من سرعة الرياح قبل العنفة أو

$$\vartheta = \frac{\vartheta}{3}$$

لكن القيمة الفعلية للاستطاعة المفيدة الناتجة من العنفة هي دائماً أصغر من معامل الاستطاعة المثال الاعظمي ولا علاقة لنوع العنفة بقيمة هذا المعامل، بهذه الطريقة استطاع العالم (Betz) عام 1926 استنتاج قيمة الاستطاعة النظرية العظمي.

في أبحاث أكثر حداثة وجد (Holscher) عام 1991 قيمة جديدة لمعامل الاستطاعة العظمي  $C_{pmax} = 0.5$ ، لاحقاً في هذا الكتاب سيتم التعامل مع قيمة هذا المعامل حسب  $C_{pmax} = 0.593$  (Betz).

### 11-2-2 معامل الاستطاعة لعجلة مقاومة:

إذا وضعت قطعة من صفيحة عموديا على اتجاه الرياح فستؤثر على هذه القطعة قوة تسمى قوة المقاومة وعندما لا تتحرك القطعة أي تثبت في مكانها تكون قوة المقاومة.

$$\langle 11 - 12 \rangle \quad F_W = C_W \frac{\rho_a}{2} \cdot \vartheta^2 \cdot A \quad [N]$$

$F_W$  : قوة المقاومة [N]

$\rho_a$  : كثافة الهواء [kg/m<sup>3</sup>]

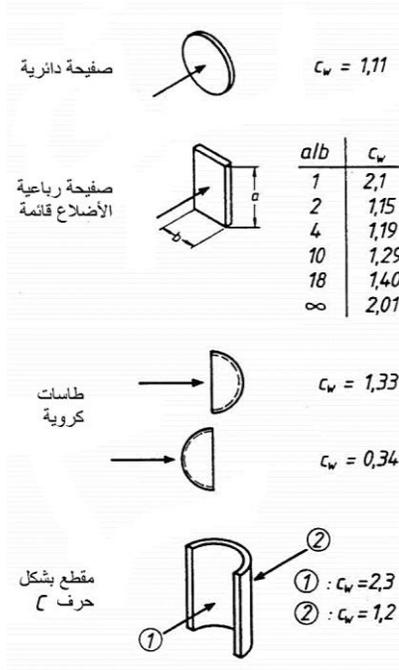
$\vartheta$  : سرعة التدفق [m/s]

$A$  : مساحة الصفيحة الموجهة عموديا على التيار [m<sup>2</sup>]

$C_W$  : معامل المقاومة

في حالة أجسام ذات أشكال هندسية مختلفة تتعلق قيمة  $C_W$  (معامل المقاومة) بالشكل الهندسي للجسم بين الشكل (11-9) معامل المقاومة لأجسام ذات أشكال هندسية مختلفة بنهايات حادة

في هذه الأشكال لا يتأثر معامل المقاومة بعد رينولدز.



شكل (9-11) معامل المقاومة لأجسام ذات أشكال هندسية مختلفة

أما من أجل ورقة دولاب دوار كما في الشكل (10-11) فإن قوة المقاومة للوضع المبين يمكن لإيجادها وفق العلاقة:

$$\langle 13 - 11 \rangle \quad F_W = C_W \frac{\rho_a}{2} \cdot (\vartheta - u)^2 \cdot A \quad [N]$$

$F_W$  : قوة المقاومة [N]

$C_W$  : معامل المقاومة للجناح

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

$u$  : السرعة المحيطة للعجلة [m/s]

حيث إن الجناح والسرعة المحيطة تكونان باتجاه حركة الرياح فإن المقاومة تتعلق بفرق سرعتين.

الاستطاعة المطبقة على العجلة هي:

$$\langle 14 - 11 \rangle \quad P = F_W \cdot U \quad [W]$$

من العلاقة (11 - 13) و (11 - 14) ينتج:

$$\langle 15 - 11 \rangle \quad P = C_W \frac{\rho_a}{2} \cdot (\vartheta - u)^2 \cdot UA \quad (W)$$

الاستطاعة العظمى للرياح المطبقة على مساحة الجناح A هي:

$$\langle 16 - 11 \rangle \quad P_{MAX} = \frac{\rho_a}{2} \cdot (\vartheta)^3 \cdot A \quad (W)$$

ويكون معامل الاستطاعة  $C_P \cdot W$  هو نسبة بين استطاعة العجلة P واستطاعة الريح العظمى الممكنة  $P_{MAX}$  أو:

$$\langle 17 - 11 \rangle \quad C_{PW} = \frac{C_W \frac{\rho_a}{2} \cdot (\vartheta - u)^2 \cdot UA}{\frac{\rho_a}{2} \cdot (\vartheta)^3 \cdot A}$$

وينتج:

$$\langle 18 - 11 \rangle \quad C_{PW} = C_W \left(1 - \frac{U}{\vartheta}\right)^2 \cdot \frac{U}{\vartheta}$$

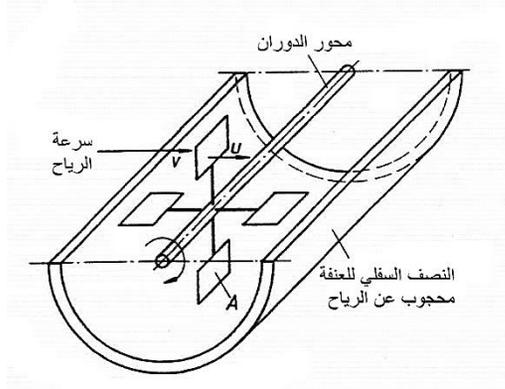
القيمة العظمى لمعامل الاستطاعة لعجلة مقاومة يستنتج من العلاقة (11-18) حسب  $\frac{U}{\vartheta}$  نحصل على القيمة العظمى عند  $\frac{U}{\vartheta} = \frac{1}{3}$  ويكون.

$$\langle 19 - 11 \rangle \quad C_{P.WMAX} = C_W \cdot \frac{4}{27}$$

حيث نعتبر إن سرعة الرياح بعد العجلة مساوية للسرعة المحيطية U

عندها تصبح العلاقة (11-18) على الشكل التالي:

$$\langle 20 - 11 \rangle \quad C_{PW} = C_W \left(1 - \frac{\vartheta 2}{\vartheta}\right)^2 \cdot \frac{\vartheta 2}{\vartheta}$$



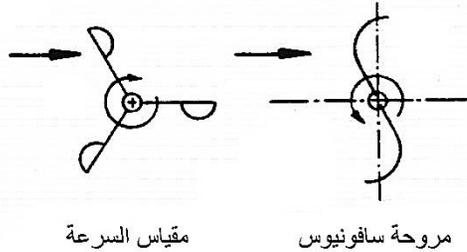
شكل (10-11) مبدأ عمل عجلة المقاومة

يبين الشكل (10-11) كما ذكرنا مقارنة لمعامل المقاومة لأشكال أجسام مختلفة.

يبين الشكل (8-11) أن أعلى قيمة لمعامل الاستطاعة  $C_p$  عند أعلى قيمة لمعامل المقاومة  $C_W = 2.3$  تبلغ 34%.

تعتبر عجلة المقاومة وبسبب القيم المنخفضة لمعامل الاستطاعة قليلة المردود وغير مناسبة من حيث طريقة تشكيل الأجنحة.

يبين الشكل (11-11) نموذجين شهيرين لعجلة المقاومة هما:



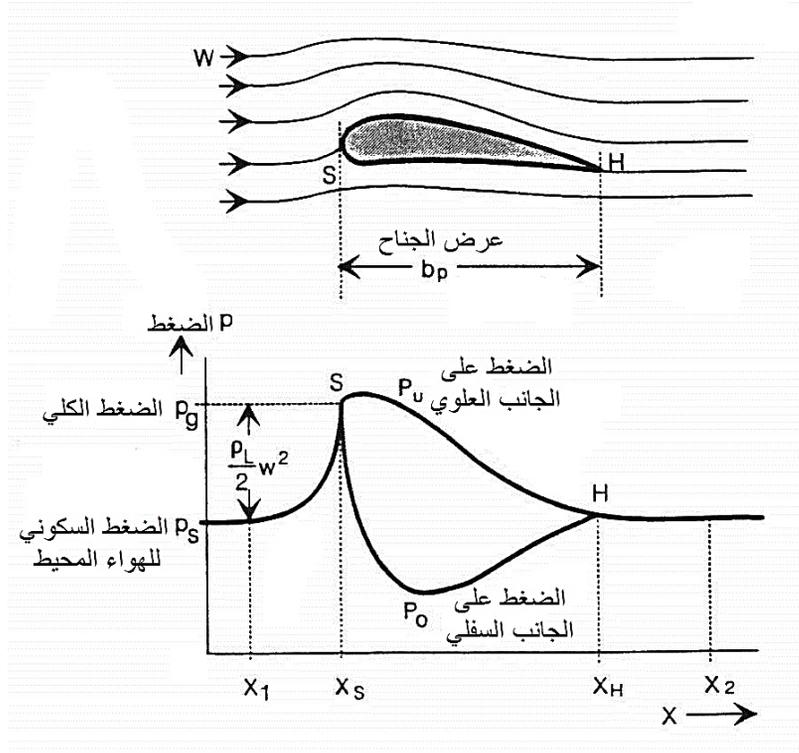
شكل (11-11) نموذجين معروفين لعجلة المقاومة (منظر علوي)

مقياس السرعة ومروحة سافونيووس.

بواسطة أجنحة مدروسة أيروديناميكياً يمكن الوصول إلى قيم أعلى بشكل ملحوظ لمعامل الاستطاعة.

### 11-2-3 الجريان حول الجناح الحامل:

للحصول على اعلى معامل استطاعة ممكن لا بد من الوصول إلى التصميم الأمثل للأجنحة وقد تم التفكير مباشرة بالأجنحة الحاملة للطائرات وكذلك بريش العنفات الغازية. يبين الشكل (11-12) التدفق حول مقطع جناح حامل مع منحنى الضغط على امتداد شكل المقطع.



شكل (11-12) توزيع على جناح حامل ذو تشكيل إيروديناميكي مناسب

بسبب الشكل المنحني للمقطع يحصل تسارع على الجهة العليا للمقطع أي تصبح السرعة أكبر من السرعة في بداية المقطع بينما يحدث عكس ذلك على الجهة السفلية.

وحيث تزداد السرعة (حسب برنولي) يقل الضغط الستاتيكي في الأعلى ويزداد في الأسفل لأن السرعة تصبح أقل وبالتأثير المشترك للضغط المنخفض في الجهة العليا والمرتفع في الجهة السفلى تنشأ قوة تسمى الرفع.

يمكن حساب قوة الرفع للجناح الحامل من التكامل التالي:

$$\langle 21 - 11 \rangle \quad F_A = \int_a^b (P_V - P_O) \cdot L \cdot dx \quad [N]$$

$$\langle 22 - 11 \rangle \quad F_A = \int_{x_s}^{x_h} (P_V - P_O) \cdot L \cdot dx \quad [N]$$

$F_A$  : قوة الرفع [N]

$P_V$  : الضغط إلى الجاني السفلي للجناح [N/M<sup>2</sup>]

$P_O$  : الضغط إلى الجاني العلوي للجناح [N/M<sup>2</sup>]

$L$  : طول الجناح [M]

$Bp$  : عرض الجناح [M]

### 11 - 3 ميكانيك الرياح (Aerodynamic) للعنفة الريحية:

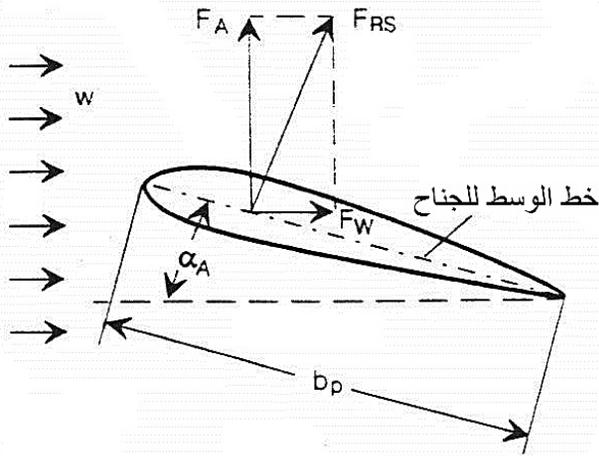
#### 11 - 3 - 11 معامل قوة الرفع ومعامل المقاومة:

يؤثر على الجناح عند وصفه في مجرى هوائي شكل (11-12) قوتان: قوة الرفع  $F_A$  التي تكون

عمودية على اتجاه الريح وقوة المقاومة  $F_{RS}$  التي تكون موازية لاتجاه الريح الشكل (11-13).

تسمى الزاوية  $\alpha_A$  الواقعة بين الخط الوسيط للمقطع (الخط الواصل بين بداية ونهاية المقطع)

واتجاه الريح بزاوية العمل.



شكل (11-13) القوة المؤثرة على الجناح الحامل  $F_A$  ، قوة الرفع  $F_R$  ، قوة المقاومة  $F_{RS}$

القوة المحصلة  $\alpha_A$  ، زاوية العمل  $\phi_P$  ، عرض الجناح

تنشأ قوة المقاومة  $F_R$  من الاحتكاك على سطح الجناح ويمكن صياغتها بالعلاقة التالية:

$$(11 - 23) \quad F_R = C_r \frac{\rho_a}{2} \cdot (\vartheta)^2 \cdot A \quad [N]$$

$C_r$  : معامل المقاومة

$\rho_a$  : كثافة الهواء  $[kg \cdot m^{-3}]$

$\vartheta$  : سرعة الرياح  $[m \cdot s^{-1}]$

$A$  : مساحة كافة الأجنحة  $[m^2]$

عندما يكون المقطع الطولي للجناح مستطيل الشكل تكون مساحته:

$$(11 - 24) \quad A = l_p \cdot L \cdot Z_F \quad [m^2]$$

$l_p$  : عرض الجناح  $[m]$

$L$  : طول الجناح  $[m]$

$Z_F$  : عدد الأجنحة ويمكن صياغة قوة الرفع  $F_A$  بنفس الطريقة:

$$(11 - 25) \quad F_A = C_A \cdot \frac{\rho_a}{2} (\vartheta)^2 \cdot A \quad [N]$$

$F_A$  : قوة الرفع [N]

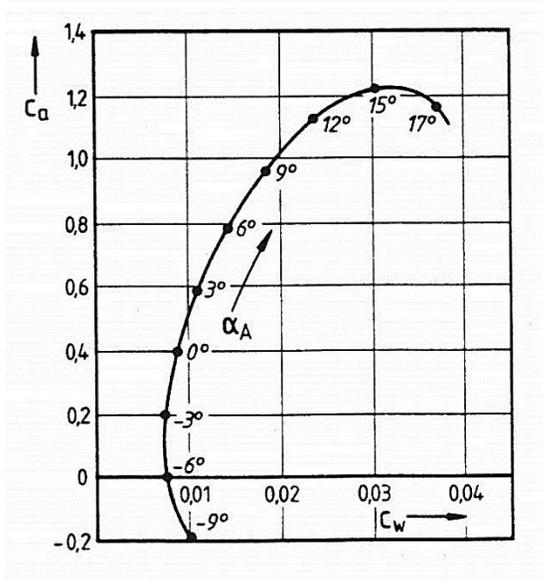
Ca : معامل المقاومة

A : مساحة الأجنحة [m<sup>2</sup>]

العلاقتان (11 - 23) و (11 - 25) تعتبران صالحتان للاستخدام في حال تم وبطريقة مناسبة إيجاد قيم وسيطة للمتغيرات  $\vartheta$  و Cr و Ca على طول الجناح وإلا يجب إجراء التكامل للعلاقتين على طول الجناح.

ينتج من جميع القوتين  $F_A$  و  $F_r$  قوة محصلة  $F_{RS}$  ، يتم إيجاد قيم Cr و Ca لجناح ما تجريبيا ويرسم مخطط العلاقة بينهما مع قيم مختلفة لزاوية العمل  $\alpha_A$  يسمى المخطط القطبي كما في الشكل (11-14)، نلاحظ أن الجناح بمكثدا مقطع تكون له قوة رفع موجبة حتى مع زاوية عمل

$$\alpha_A = -6^0 \text{ سالبة}$$



الشكل (11-14) مثال لمخطط قطبي بسيط لجناح حامل ( $R_e = 10^5$ )

والقيمة العظمى للرفع تكون عند زاوية حمل  $\alpha_A = 15,5$  وتبدأ قيمة الرفع تتناقص مع زيادة الزاوية حيث يبدأ التيار بالاصطدام بالسطح الخلفي للجناح.

النسبة  $Ca \setminus Cr$  يرمز لها بالرمز  $E_G$  ويسمى هدد الانزلاق.

استفيد من هذا العدد في توصيف الأجنحة لاسيما من ناحية الكفاءة الشكل (11-14) خاص لعدد رينولدز محدد  $Re = 10^5$  لكي يتم حساب جناح حامل يجب معرفة المنحنيات من الشكل (11-14) لأعداد رينولدز واقعة في مجال التصميم في العنفات البطيئة يكون عدد رينولدز عند القطر الخارجي للعنفة من الفئة  $10^5$  بينما في العنفات الحديثة السريعة تكون أعداد رينولدز من الفئة  $10^6$  إلى  $10^7$  تحسب اعداد رينولدز وفق العلاقة:

$$\langle 26 - 11 \rangle \quad Re = \frac{\omega \cdot b_p}{g'}$$

$\omega$  : سرعة الرياح النسبية وتقاس [m/s]

$b_p$  : عرض القطع [m]

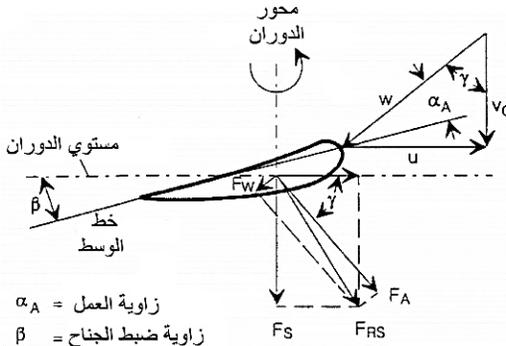
$g'$  : اللزوجة [ $m^2/S$ ]

### 11-3-2 سرعة الرياح والقوى المؤثرة على الأجنحة:

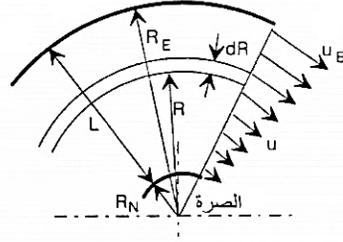
يبين الشكل (11-15) السرعة والقوى الريح التي تؤثر على مقطع جناح العنفة يدور الجناح في المستوى الدوران بسرعة محيطية  $u$  حول محور الدوران. أما الريح فتهب بسرعة  $\theta_0$  وبذلك تنتج سرعة الريح النسبية  $\omega$  تسمى الزاوية بين الخط الوسط للمقطع والسرعة النسبية  $\alpha_A$  بزاوية العمل أما الزاوية  $\beta$  بين خط الوسط ومستوى الدوران فتسمى زاوية ضبط (عيار) الجناح تنتج قوى الرفع  $F_A$  والمقاومة  $F_T$  من السرعة النسبية وتكون  $F_T$  موازية للسرعة النسبية و  $F_A$  عنودية عليها.

ينتج من هاتين القوتين القوة المحصلة  $F_{RS}$  وهذه القوة يمكن تحليلها إلى قوتين: مماسية  $F_t$

ومحورية  $F_s$



- $\alpha_A$  = زاوية العمل  
 $\beta$  = زاوية ضبط الجناح  
 $\gamma$  = الزاوية بين سرعة الريح و السرعة النسبية  
 $u$  = السرعة المحيطية  
 $v_0$  = سرعة الريح في مستوي الدوران  
 $w$  = سرعة الريح النسبية  
 $F_W$  = قوة المقاومة  
 $F_A$  = قوة الرفع  
 $F_{RS}$  = القوة المحصلة  
 $F_T$  = المركبة المماسية للقوة المحصلة  
 $F_S$  = المركبة المحورية للقوة المحصلة



- $R_E$  = نصف القطر الخارجي للعجلة  
 $R_N$  = نصف قطر الصرة  
 $L$  = طول الجناح  
 $u$  = السرعة المحيطية  
 $u_E$  = السرعة المحيطية عند نهاية الجناح

الشكل (11-15) السرعة وفي الريح التي تؤثر على مقطع جناح العنفة عند العمل

تنتج الحركة الدورانية وبالتالي الاستطاعة عن القوة  $F_T$ . يحسب عنصر الاستطاعة  $dp$  على جزء الجناح  $d_r$  من العلاقة:

$$\langle 27 - 11 \rangle \quad dp = u \, dF_T \quad [W]$$

$dF_T$  : عنصر القوة المماسية المؤثرة على عنصر الجناح  $d_r$  [N]

$u$  : السرعة المحيطية عند نصف القطر  $R$  [m/s]

عند نظام العمل الامثل تكون  $C_r$  أصغر بكثير من  $C_a$  وبالتالي تكون  $F_R$  أصغر بكثير من  $F_A$  أو  $F_A \approx F_{RS}$  وعندها تنتج القوة المماسية من القوة  $F_A$  ويكون:

$$\langle 28 - 11 \rangle \quad dF_T = dF_A \cos \gamma \quad [N]$$

وتصبح العلاقة الاستطاعة:

$$\langle 29 - 11 \rangle \quad dp = u \cos \gamma \, dF_A \quad [W]$$

أو:

$$\langle 30 - 11 \rangle \quad dp = u \cos \gamma C_a \frac{\rho_a}{2} \omega^2 dA \quad [W]$$

ومن الشكل (15-11) يمكن صياغة  $\cos \gamma$  كما يلي:

$$\langle 31 - 11 \rangle \quad \cos \gamma = \frac{\vartheta_0}{\omega} = \frac{\vartheta_0}{\sqrt{\vartheta_0^2 + u^2}}$$

أما المساحة  $dA$ :

$$\langle 32 - 11 \rangle \quad dA = b_p Z_F \cdot dR$$

وبالتالي بتعويض العلاقاتين (32-11) و(31-11) في العلاقة (30-11) وكذلك تعويض قيمة  $\omega^2 = u^2 + \vartheta_0^2$  في نفس العلاقة ينتج:

$$\langle 33 - 11 \rangle \quad dp = C_a \frac{\rho_a}{2} U \vartheta_0 \sqrt{\vartheta_0^2 + u^2} b_p \cdot Z_F \cdot dR \quad [W]$$

تتغير قيمة  $u$  غالباً  $b_p$  مع تغير القطر وبالتالي تنتج الاستطاعة الكلية للعنفة  $p$  من تكامل العلاقة (33\_11) في المجال  $R_N$  إلى  $R_E$  حيث  $R_N$  نصف قطر الصره  $R_E$  نصف قطر العنفة  $M$ .

تبين العلاقة (33-11) أن الاستطاعة عند مقطع محدد يحددها معامل الرفع  $C_a$  ومن اجل نظام عمل معين تحددها السرعة  $u$  و  $\vartheta$  أي سرعة الدوران وسرعة الريح وتبين هذه العلاقة أيضاً أثر شكل المقطع على الاستطاعة الناتجة.

بطريقة مشابهة يمكن إيجاد قوة الدفع المحورية:

$$\langle 34 - 11 \rangle \quad dF_S = dF_A \cdot \sin \gamma \quad [N]$$

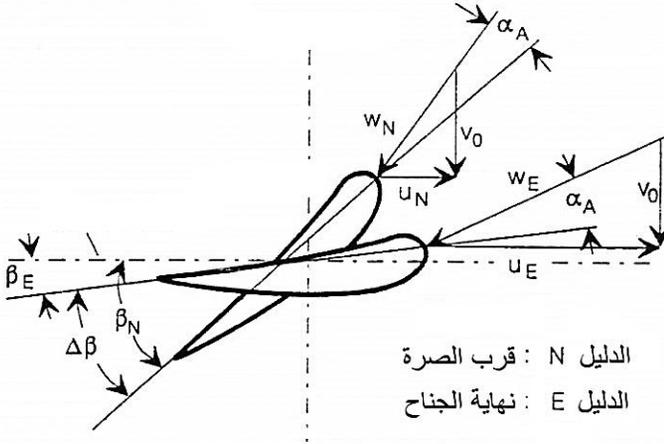
أو:

$$\langle 35 - 11 \rangle \quad dF_S = C_a \frac{\rho_a}{2} u \sqrt{\vartheta_0^2 + u^2} dA \quad [N]$$

أو:

$$F_S = \int_{R_N}^{R_F} C_a \cdot \frac{\rho_a}{2} u \cdot \sqrt{u^2 + \vartheta_0^2} \cdot b_p \cdot Z_F \cdot dR \quad [N]$$

هذه القوة يجب احتواؤها بواسطة مضجع (رومان) أفقي على محور الدوران.



$\alpha_A$  = زاوية العمل

$\beta$  = زاوية ضبط الجناح

$u$  = السرعة المحيطية

$v_0$  = سرعة الريح في مستوي الدوران

$w$  = السرعة النسبية

شكل (11-16) فتل الجناح بزاوية قدرها  $\Delta\beta$

### 11-3-3 فتل الجناح:

نظرا لزيادة السرعة المحيطية مع الابتعاد عن محور الدوران فإن السرعة النسبية تزداد قيمة ويتغير اتجاهها على امتداد الجناح وللحصول على قيم واتجاه أمثل للسرعة النسبية أي للحفاظ على زاوية عمل ثابتة  $\alpha_A = \text{Const}$  يجب فتل الجناح بمقدار  $\Delta\beta$  بشكل منتظم من بداية الجناح وحتى نهايته كما في الشكل (11-16).

يتم فتل الجناح عادة من اجل زاوية عمل ثابتة أي من أجل سرعة ربح معينة أو نقطة عمل معينة ويتم ذلك عامة من أجل السرعة التميمية لدوران العنفة عند سرعات أعلى أو أدنى تكون

الضباغات حتمية في الشكل (11-15) يتم قتل الجناح من بدايته وحتى نهايته باتجاه عقارب الساعة تمثل عملية الصحيحة صعوبة كبيرة لعملية الإنتاج.

### 11-3-4 الفواقد الأيروديناميكية على الجناح:

يبلغ معامل الأعظمي حسب  $C_{p_{max}} = 0.593$  Betz، هذه القيمة هي قيمة نظرية لأنه عمليا في الجريانات الحقيقية تنشأ فواقد تؤدي إلى انخفاض معامل الاستطاعة الاعظمي وهذه الفواقد هي:

- a- الفواقد الإعصارية خلف الجناح
- b- فواقد الاحتكاك مع سطح الجناح
- c- فواقد طرفية عند عدد معين من الأجنحة
- d- فواقد نتيجة في الاختلاف في زاوية العمل بسبب تغير سرعة الريح واختلافها عن السرعة التصميمية.

### a- الفواقد الإعصارية:

بسبب القوة المماسية ينشأ عزم دوران على المحور وتدور العنفة ويؤثر نفس العزم على التيار (الريح) بالاتجاه المعاكس. لذلك تصل حركة إعصارية باتجاه معاكس لدوران العنفة ويتحول جزء من الطاقة الرياح إلى طاقة إعصارية.

المخطط في الشكل (11-17) يبين تخطيطيا العلاقة بين الفواقد الأيروديناميكية وعدد السرعة  $\lambda_a$  الذي يمثل النسبة بين السرعة المحيطية على نهاية الجناح  $U_E$  وسرعة الرياح أو:

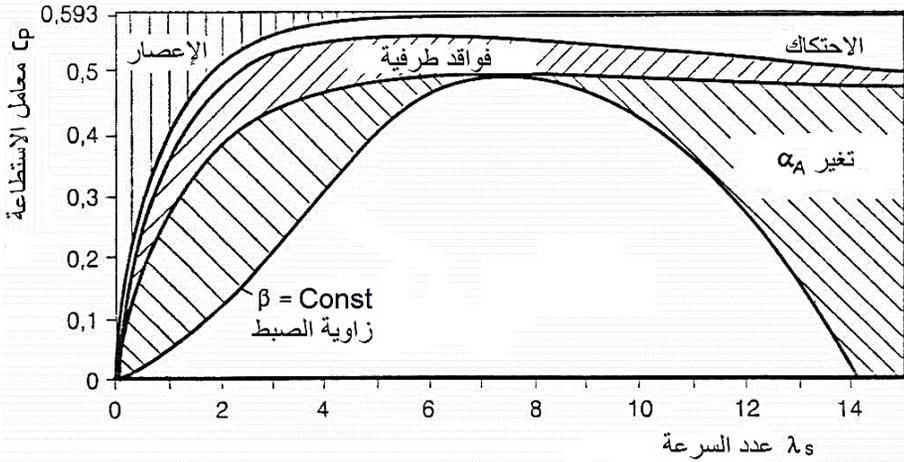
$$\lambda_s = \frac{U_E}{g} \quad \langle 11 - 37 \rangle$$

عندما  $\lambda_s = 0$  تكون العنفة متوقفة ولا ينتج أي استطاعة وعندها تتحول كامل طاقة الرياح إلى طاقة إعصارية. وتتناقص قيمة الفواقد الإعصارية بشكل حاد مع زيادة  $\lambda_s$  وعند  $\lambda_s \rightarrow \infty$  تصبح هذه الفواقد صفراً والعلاقات الرياضية التي تصف هذه العلاقة يكون نسبيا ولا يمكن حلها إلا بواسطة عمليات تكامل رقمية.

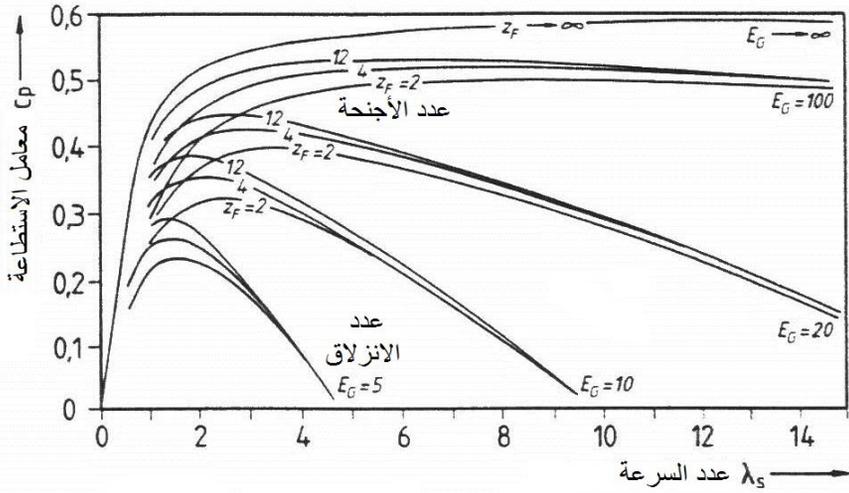
## b- فواقد الاحتكاك مع سطح الجناح:

- بسبب الاحتكاك تنشأ قوة المقاومة التي يعكسها معامل المقاومة  $C_R$  لتوصيف الجناح من حيث مقاومة يلزم بالإضافة إلى معامل المقاومة النسبة بين عامل الرفع ومعامل المقاومة  $E_G = \frac{C_a}{C_R}$  والذي يدعى عدد الانزلاق ويمكن إيجاد القيمة المثلى لهذا العدد بإناء المماس على المنحني القطبي الذي يمر عبر مبدأ الإحداثيات كما في الشكل (11-15).

- كلما كان عدد الانزلاق أكبر كانت فواقد الاحتكاك أقل ولمعرفة علاقة فواقد الاحتكاك بعدد السرعة يجب الانتباه إلى أن فواقد الاحتكاك تتناسب مع مربع السرعة وعند قيم عالية  $\lambda_s$  تصبح قيم فواقد الاحتكاك عالية جداً وتنخفض السرعة  $C_p$  كما في الشكل (11-17).



شكل (11-17) الفواقد الأيروديناميكية على الجناح



شكل (11-18) أثر عدد الانزلاق  $E_G$  وعدد الأجنحة  $Z_F$  على قيمة معامل الاستطاعة

من أجل قيم مختلفة لعدد السرعة  $\lambda_s$

### c- فواقد طرفية عند عدد من الأجنحة:

عند نهاية الأجنحة وبسبب فرق الضغط بين أسفل وأعلى الجناح تحصل حركة جانبية للهواء بين الجهتين لتساوي الضغط على الجانبين أو لتصبح فرق الضغط نسبيا اقل.

هذا التأثير الطرقي قد يمتد إلى عمق معين وصولا إلى الصره وكلما زاد عرض الجناح وقل طوله كلما ازداد هذا التأثير وهذا يتطلب أن تكون النسبة بين العرض والطول  $b_p/L$  أصغر ما يمكن.

بما أن قطر الصره أصغر بكثير من قطر المروحة فإن

$$L \approx R_E$$

$R_E$  : نصف قطر الدوران الخارجي [m]

من أجل قيم ثابتة  $\lambda_s$  و  $C_A$  نحصل وفق المعادلة (11-59) على التناسب التالي:

$$\frac{b_p}{L} \sim \frac{1}{Z_F}$$

أي أن النسبة بين عرض الجناح وطوله تتناسب عكساً مع عدد الأجنحة عند عدد لا نهائي من الأجنحة  $b_p/L = 0$  وهذا يؤدي لانعدام الفواقد الطرفية وكلما قل عدد الأجنحة ازدادت النسبة  $b_p/L$  وبالتالي ازدادت الفواقد الطرفية وقل معامل الاستطاعة  $C_p$ .

في الواقع انه عند إعداد سرعة كبيرة يكون تأثير عدد الأجنحة على معامل الاستطاعة قليلاً ويظهر ذلك في الشكل (11-18).

حسب المعادلة (11-19) تصغر النسبة  $b_p/L$  عند قيم كبيرة لعدد السرعة  $\lambda_G$  مما يؤدي إلى فواقد طرفية أقل.

من الشكل (11-18) يمكن الحصول على الاستنتاجات التالية:

1. عند إعداد انزلاق كبيرة وعدد قليل من الأجنحة  $Z_F$  نحصل على قيم أمثل لمعامل الاستطاعة  $C_p$ . عند أعداد سرعة عالية فقط وبالتالي فالأجنحة عالية الجودة ذات أعداد الانزلاق الكبيرة تناسب العنفات السريعة جداً.
2. الأجنحة البسيطة بأعداد انزلاق  $E_G$  صغيرة يكون عملها الأمثل عند قيم لعدد السرعة  $\lambda_G$  هكذا أجنحة تناسب العنفات البطيئة.
3. في الأجنحة البسيطة ذات أعداد الانزلاق الصغيرة يكون لعدد الأجنحة أثر كبير على معامل الاستطاعة ويمكن الحصول على معامل استطاعة اعلى بشكل ملحوظ مع عدد أكبر من الأجنحة أي أن العنفات البطيئة يجب أن تكون كثيرة الأجنحة.
4. عند أعداد انزلاق كبيرة وأعداد سرعة كبيرة أيضاً لا يتأثر معامل الاستطاعة  $C_p$  بعدد الأجنحة وبالتالي من المفيد أن يكون عدد الأجنحة المرتفعة الثمن للعنفات السريعة قليلاً.

#### **-d** فواقد زاوية العمل:

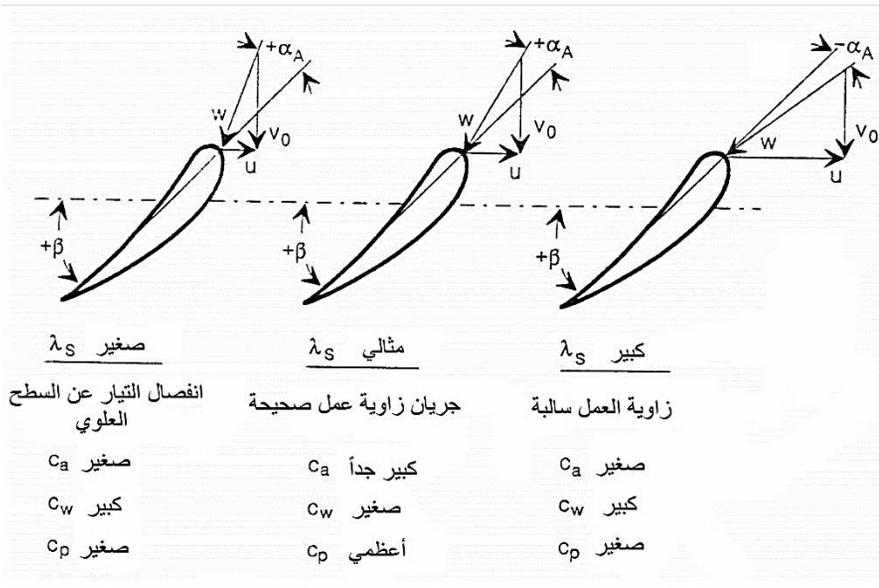
نحصل على القيمة الأمثل لعدد الانزلاق  $E_G = C_a/C_r$  كما لاحظنا في الشكل (11-14) عند قيمة معينة لزاوية العمل  $\alpha_a$  نحصل عليها من المماس المار من بداية جملة الإحداثيات كما ذكرنا وتكون هذه القيمة محددة لجناح معين عند سرعة معينة لرياح (السرعة التصميم) وسرعة

دوران ثابتة عند زيادة أو نقصان سرعة الرياح تزداد أو تنقص  $\alpha_a$  حسب الشكل (11-19) وبالتالي يتناقص  $C_a/C_r$  ومن ثم  $C_p$  لأن  $C_a/C_r$  و  $C_p$  تكون مثالية فقط لأعداد سرعة  $U_E/\vartheta$  واقعة في المجال التصميمي.

يبين الشكل (11-18) أنه عندما تزداد أو تنقص النسبة  $\lambda_S = U_E/\vartheta$  عن القيم التصميمية فإن فواقد زاوية العمل تزداد بشكل ملحوظ.

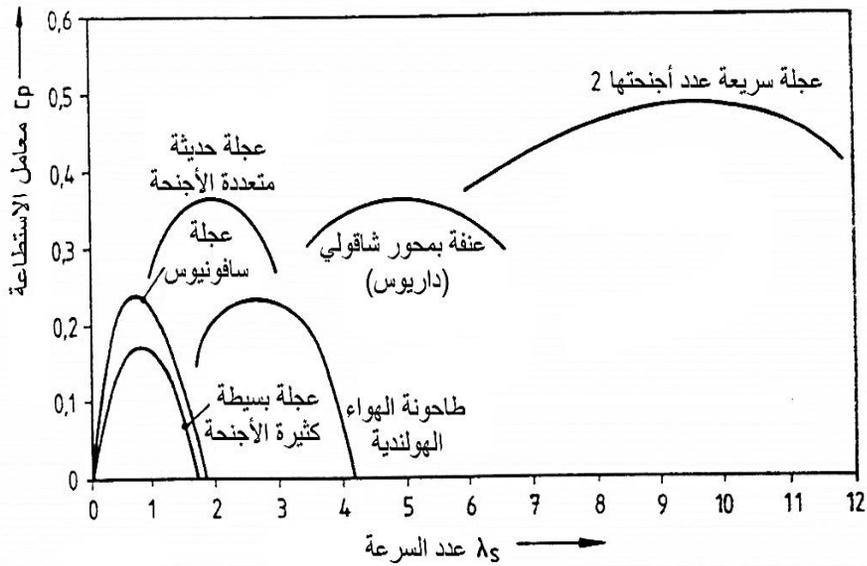
### 11-3-5 معامل الاستطاعة وعدد السرعة:

إن عدد السرعة  $\lambda_S = U_E/\vartheta$  هو عدد مميز لنوع محدد من الأجنحة:



شكل (11-19) أثر زاوية العمل على معامل الاستطاعة

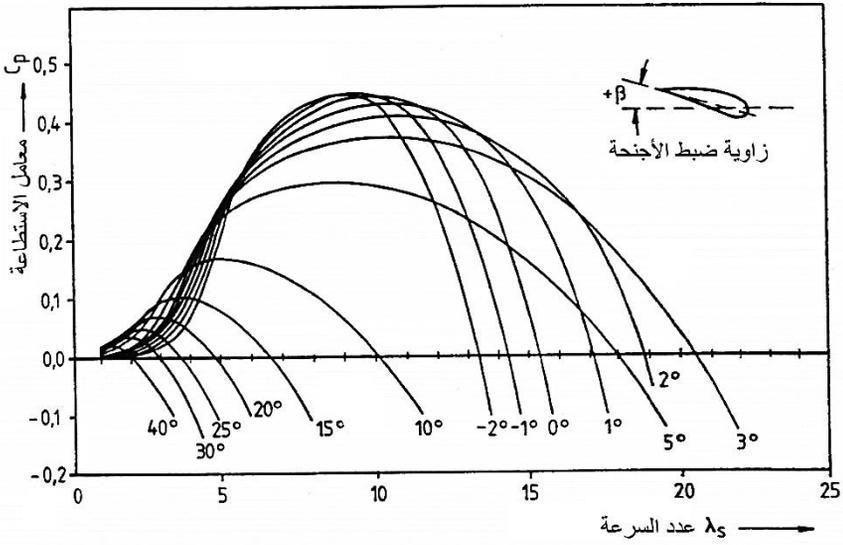
من الشكل (11-20) يمكن إجراء مقارنة لإعداد السرعة ومعاملات الاستطاعة لأنواع مختلفة من العنفات.



شكل (11-20) المجالات المميزة لأشكال مختلفة من العنفات

العنفات ذات الأعداد السرعة الصغيرة نسميها عنفات بطيئة وينتمي إلى هذا النوع عنفات المقاومة مثل عنفات سافونينوس والعنفات كثيرة الأجنحة ويكون عدد السرعة لهذه العنفات من أجل قيم أمثل لمعامل الاستطاعة  $3 < \lambda_s$  ، وعندما يكون معامل الاستطاعة الأمثل للعنفه واقعا عند قيم أكبر لعدد السرعة أو  $3 < \lambda_s$  تكون العنفه (عنفه سريعة).

الشكل (11-21) يبين العلاقة بين معامل الاستطاعة وعدد السرعة لعنفه حديثة وذلك من أجل قيم مختلفة لزاوية ضبط (عيار) الجناح  $\beta$



شكل (11-21) العلاقة بين معامل الاستطاعة وعدد الدوران من اجل قيم مختلفة لزاوية

ضبط (عيار) الأجنحة

نلاحظ أنه لكل زاوية عيار قيمة مثلى مختلفة لعدد السرعة القيمة العظمى لمعامل الاستطاعة هي

$$C_p = 0.44 \text{ وذلك عند زاوية ضبط } \beta = -2 \text{ وعدد سرعة } \lambda_s \approx 9.$$