

## تحليل إجهادات الانحناء لريش العنف البخارية بسبب القوى الأيروديناميكية

د. أيمن الخباز الملقب بالتاجر<sup>(1)</sup>

### الملخص

تتعرض ريش المحور الدوار في العنف البخارية أو الغازية لتأثير قوى أيروديناميكية عرضية مسببة لها الانحناء. هذه القوى يكون لها مركبات ثابتة وأخرى متغيرة تؤثر، بتغيرها السريع، مباشرة على متانة الريش الدوارة مسببة الاهتزازات والتعب وحتى كسر الريش. تعد إجهادات الانحناء الثابتة مؤشراً مهماً للمتانة، إذ إن القوى المتغيرة والإجهادات المتغيرة في الريش تتناسب مباشرة مع الإجهادات الاستاتيكية. لذلك من الضروري دراسة طرق تحديد إجهادات الانحناء للريش الناتجة عن القوى الأيروديناميكية الثابتة. جرى في هذا البحث تقييم لإجهادات الانحناء المؤثرة في المقطع العرضي لريشة عنفة طويلة نسبياً من خلال دراسة حالة، حيث تبين أن إجهاد الانحناء يكون أعظماً عند حافة الدخول للريشة، كما أظهر توزع الإجهاد على طول الريشة أن القيمة العظمى لإجهاد الانحناء لا تحدث في منطقة جذر الريشة وإنما على مسافة محددة من الجذر تتغير بحسب تغير الشكل الهندسي للريشة وبارامترات التشغيل.

الكلمات المفتاحية: ريشة عنفة، إجهاد الانحناء، قوى أيروديناميكية

<sup>(1)</sup> مدرس في قسم هندسة الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق

## **Analysis of Bending Stresses for Steam Turbine Blades due to Aerodynamic Forces**

**Dr. Ayman Alkhabbaz/Altajer<sup>(1)</sup>**

### **Abstract**

The rotor blades in a steam or gas turbine are exposed to the influence of transverse aerodynamic forces causing them to bend. These forces have static and variable components that affect, by their rapid change, directly on the strength of the rotor blades, causing vibration, fatigue and even breakage of the blades. The constant bending stresses are an important indicator of durability, as the variable forces and the variable stresses in the blades are directly proportional to the static stresses. Therefore, it is necessary to study methods for determining blade bending stresses due to static aerodynamic forces. In this research, an evaluation of bending stresses for cross section of relatively long turbine blade has been carried out through a case study. It has been shown that the maximum bending stress occurs at the entrance edge of the blade and the bending stress distribution along the blade shows that the maximum stress occurs at some distance from blade root depending on blade shape and working parameters.

**Keywords:** Turbine Blade, Bending Stress, Aerodynamic Forces

---

<sup>(1)</sup> General Mechanics Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University.

## 1- المقدمة:

تتعرض ريش الآلات العنقية لتأثير قوى الطرد المركزي أثناء الدوران وتتعرض كذلك لقوى أيروديناميكية ناتجة عن تدفق البخار أو الغاز أو الهواء. تسبب هذه القوى تمدد وانحناء والتواء لشفرات المحور الدوار مترافقة مع إجهادات في أي مقطع من بروفيل الريشة وعند نقاط التثبيت مع المحور الدوار. تصنف قوى الطرد المركزي مع القوى الثابتة أو طفيفة التغير، وبالتالي عليها يعتمد متانة الريش استاتيكيًا على المدى القصير والطويل. وبما أن قوى الطرد المركزي والقوى الأيروديناميكية هي سبب في تمدد وانحناء ريش الدوار، فإن الإجهادات تشكل خطورة في منطقة ساق الريشة وبالقرب من ثقب التثبيت ما يؤدي إلى تشوه لدن مرتبط بنشوء مناطق تركيز التعب.

تمتلك القوى الأيروديناميكية مركبتين إحداها ثابتة والأخرى متغيرة. تسبب الأولى إجهادات استاتيكية في الريش العاملة، وكما هو الحال في القوى الطاردة المركزية، يظهر تأثيرها على المتانة، والثانية تسبب الاهتزاز وتحدد موثوقية اهتزاز منظومة الريش ويمكن أن تسبب التعب وقد تؤدي حتى إلى كسر الريش.

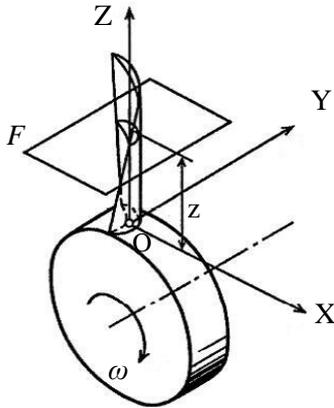
تتعرض الريش أيضاً للتأثيرات الحرارية عند ظروف العمل العابرة مثل الإقلاع والتحميل المفاجئ والتوقف وخاصة في العنفات الغازية وذلك بسبب التسخين غير المنتظم أو التبريد حيث تنشأ الإجهادات الحرارية، ومع تكرار ظروف العمل العابرة تحدد التأثيرات الحرارية المتانة الحرارية الدورية للريش العاملة.

سيجري في هذا البحث دراسة لتأثير القوى الأيروديناميكية الاستاتيكية المسببة لإجهادات الانحناء وتشوه الريش، والناتجة عن تدفق البخار في مرحلة عنفة بخارية.

في الحسابات التصميمية، يتم اعتبار بروفيل الريش العاملة الطويلة نسبياً على أنه جائز شريطي متغير المقطع مع زاوية قتل أولية. أما حزمة الريش الموحدة بإطار عند المحيط الخارجي لها فهي تشكل حزمة من القضبان الغير محددة استاتيكيًا وتدرس عادة بالطرق العددية المبنية على فكرة العناصر المنتهية بالاستعانة بقوانين مقاومة المواد.

## 2- المحاور الإحداثية لريشة العنفة:

يبين الشكل (1). ريشة عنفة معزولة مثبتة بالقرص الدوار، حيث تم وضع مبدأ الاحداثيات O في منتصف مقطع جذر الريشة؛ المحور Z موجه قطرياً وبمر من محور دوران القرص؛ المحور X باتجاه السرعة المحيطة والمحور Y يطابق منحى متجه السرعة الزاوية، وبهذا الشكل تشكل المحاور الثلاثة جملة احداثيات قائمة مباشرة [4].



الشكل (1) الريشة مع محاور الاحداثيات القائمة

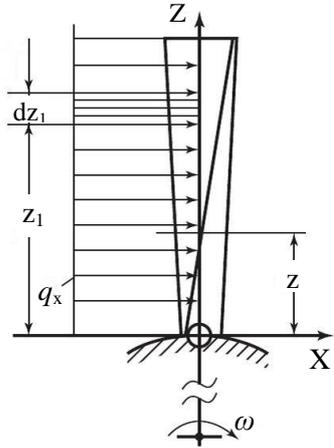
من جهة أخرى، يبين الشكل (2). مقطع عرضي لريشة مساحته F عمودي على المحور Z، مبدأ المحورين الاحداثيين X و Y متوضع في المركز الهندسي O للمقطع العرضي.  $\eta$  و  $\gamma$  يمثلان المحاور الرئيسية للمقطع العرضي ومبدهما O أيضاً؛  $\beta_y$  تمثل زاوية التثبيت، المحور الرئيس

الموازي لمحور العنفة كما هو مبين في الشكلين (4) و(5). يتم تحديد هاتين المركبتين من نتيجة الحساب الحراري لمرحلة من العنفة والتي يمكن صياغتها على الشكل [3]:

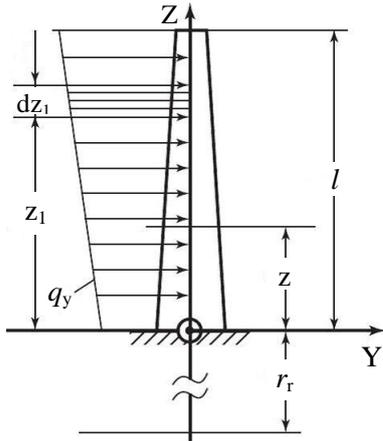
$$q_x = \rho_2 w_{2a} (w_{1u} - w_{2u}) t_2 \quad (1)$$

$$q_y = \rho_2 w_{2a} (w_{1a} - w_{2a}) t_2 + (p_1 - p_2) t_2 \quad (2)$$

حيث: الكثافة الحجمية لوسيط التشغيل خلف الريش الدوارة،

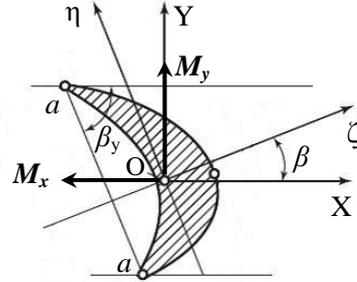


الشكل (4) المركبة المحيطة للحمولة  $q_x$



الشكل (5) المركبة المحورية للحمولة  $q_y$

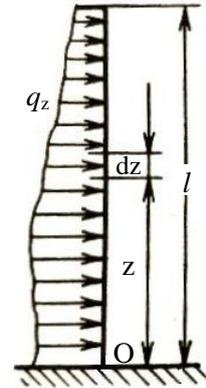
$\eta$  يوازي تقريباً وتر البروفيل a-a، لذلك فإن الزاوية  $\beta = 90 - \beta_y$ ، حيث  $\beta$  تمثل الزاوية بين المحورين X و  $\zeta$ .



الشكل (2) المحاور الرئيسة للمقطع العرضي

### 3- القوى المؤثرة على الريشة والنموذج الرياضي:

تعدّ القوى المطبقة على الريش المتحركة والناجمة عن تدفق وسيط التشغيل على أنها أحمال موزعة  $q_z$  وتتغير على طول الريشة التي تعد للتبسيط جائزاً شريطياً مثبتاً في O طولها 1 [2]، كما هو مبين في الشكل (3).



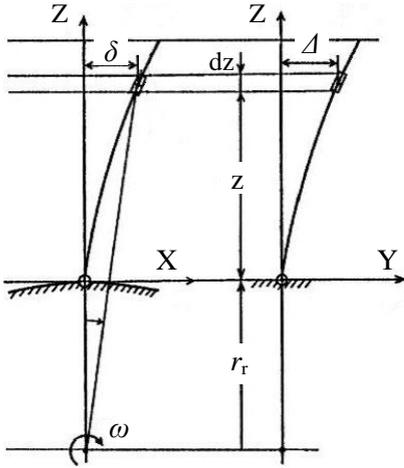
الشكل (3) ريشة عنفة كجائز بسيط

لكن يجب ملاحظة أن الحمل الأيروديناميكية  $q_z$  لها مركبتان: الأولى محيطة  $q_x$  وفق المحور X المماس للقرص الحامل للريشة والثانية محورية  $q_y$  وفق المحور Y

$\delta$  و  $\Delta$  إزاحتنا محور الريشة من وضعية التوازن في الاتجاهين X و Y على التوالي كما هو مبين في الشكل (7).

$F^c$  القوة النابذة.

$F(z)$  مساحة مقطع الريشة عند الاحداثي z.



الشكل (7) محور الريشة بوضعية التشوه

ويلاحظ من هاتين المعادلتين أن عزوم الانحناء في مقطع ما z لا تتعلق بالقوى الأيروديناميكية  $q_z$  فحسب، وإنما لها علاقة أيضاً بالقوى النابذة  $F^c$  وكذلك انحناء الريشة الذي يتعين بالإزاحتين  $\delta$  و  $\Delta$ .

من المعادلتين (4) و (5) نحصل على عزوم الانحناء:

$$M_y(z) = \int_z^l q_x(z_1)(z_1 - z) dz_1 \quad (6)$$

$$M_x(z) = \int_z^l q_y(z_1)(z_1 - z) dz_1 \quad (7)$$

حيث:

$M_y(z)$  عزم الانحناء المؤثر على الريشة عند مقطع ما z بتأثير الحمولة الموزعة  $q_x$  بالنسبة للمحور Y،  $M_x(z)$  عزم الانحناء المؤثر على الريشة عند مقطع ما z بتأثير الحمولة الموزعة  $q_y$  بالنسبة للمحور X.

$p_1$  و  $p_2$  الضغط الاستاتيكي عند مدخل ومخرج الريشة المتحركة،

$t_2$  مقدار الخطوة بين الريش المثبتة على القرص الدوار، وتحسب من العلاقة:

$$t_2 = \frac{\pi d_{av}}{z_b} \quad (3)$$

حيث:  $d_{av}$  القطر الوسطي للريشة

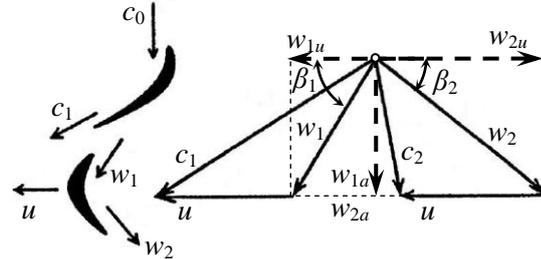
$z_b$  عدد الريش المركبة على الدوالب الدوار.

ويبين الشكل (6) مثلثات السرعة لمرحلة العنفة [7]

حيث:

$w_{1u}$  و  $w_{1a}$  المركبتان المحورية والمحيطية لسرعة الجريان عند مدخل الريشة المتحركة،

$w_{2u}$  و  $w_{2a}$  المركبتان المحورية والمحيطية لسرعة الجريان عند مخرج الريشة المتحركة،



الشكل (6) مثلثات السرعة لمرحلة عنفة

أما عزوم الانحناء عند أي مقطع للريشة في الاتجاهين Y و X فهي تكتب على الشكل التالي [4]:

$$\frac{d^2 M_y}{dz^2} = q_x + \frac{d}{dz} (F^c \frac{d\delta}{dz}) + \rho F(z) \omega^2 \delta \quad (4)$$

$$\frac{d^2 M_x}{dz^2} = q_y + \frac{d}{dz} (F^c \frac{d\Delta}{dz}) \quad (5)$$

حيث:

حيث  $N_{St}$  استطاعة المرحلة عند حافة الريشة. وإذا أخذنا بعين الاعتبار الضياعات الإضافية الناتجة عن التسرب والرطوبة عندها بدلاً من  $N_{St}$  يجب استخدام  $N_i$  لاحتساب هذه الضياعات عندها سيكون:

$$M'_{yRoot} = \frac{N_i l}{2u_{av} z_b} \quad (14)$$

لحساب إجهادات الانحناء عند أي مقطع عرضي  $z$  لابد بداية من إيجاد عزوم الانحناء بالنسبة للمحاور المركزية الأساسية  $\zeta$  و  $\eta$  حسب الشكل (2). العزوم  $M_\eta$  و  $M_\zeta$  نحصل عليها بإسقاط مركبات العزوم  $M_y$  و  $M_x$  على المحاور المركزية الرئيسية  $\eta$  و  $\zeta$

$$\left. \begin{aligned} M_\eta &= M_y \cos \beta + M_x \sin \beta \\ M_\zeta &= M_y \sin \beta - M_x \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

حيث  $\beta$  تمثل الزاوية بين المحور  $X$  والمحور الرئيس  $\zeta$  ويمكن بدقة كافية قبول أن المحور المركزي  $\eta$  موازياً للخط  $a-a$  أي أنه تقريباً موازي لمنحى وتر البروفيل. الاتجاهات الموجبة لمتجهات العزم  $M_x$  و  $M_y$  حسب الشكل (2) توافق القاعدة التالية: عزم الانحناء في مقطع الريشة (مع الاتجاه الخارجي للمحور  $Z$ ) يعتبر موجبا عندما يشترط بأن القوة موجبة مؤثرة على الجزء المقطوع من الريشة.

ضمن الشروط المذكورة أعلاه، يتم إيجاد إجهادات الانحناء في أي نقطة من مقطع الريشة وفقاً لقوانين مقاومة المواد التي تحدد إجهاد الانحناء لجائز شريطي مائل [1] حسب العلاقة:

$$\sigma_b = -\frac{M_\eta}{I_\eta} \zeta + \frac{M_\zeta}{I_\zeta} \eta \quad (16)$$

حيث:  $\eta$  و  $\zeta$  إحداثيات النقطة المدروسة من المقطع العرضي للريشة التي سيجري لها حساب إجهادات الانحناء حسب الشكل (7).

تعني العلاقة (6) أن تكامل الحملوة الجزئية  $q_x(z_1)dz_1$  يجري على النطاق  $(z_1 - z)$  حيث  $z_1$  متغير التكامل الذي يجب أن يحسب من  $z$  إلى 1، وكذلك الأمر بالنسبة للعلاقة (7)

المركبة المحيطية للحملوة الموزعة  $q_x(z)$  لجميع مراحل العنفة الحقيقية تكون عادة قريبة من القيمة الثابتة على طول الريشة، بينما المركبة المحورية  $q_y(z)$  للريش الطويلة تتغير بشدة وتزداد من الجذر إلى الطرف الخارجي بشكل أساسي بسبب تأثير الحد الثاني من المعادلة (2) حيث أن  $(p_1-p_2)$  وكذلك  $t_2$  تزداد من الجذر إلى الطرف الخارجي.

من أجل المراحل مع ريش بطول متوسط يسمح لـ  $q_x$  وكذلك  $q_y$  بأن تكون ثابتة بالقيمة ومحسوبة بموجب البارامترات عند نصف قطر وسطي. عندها وحسب المعادلات (6) و (7) يمكن إيجاد عزوم الانحناء عند مقطع الجذر  $z = 0$  على الشكل:

$$M_{yRoot}(z) = \int_0^l q_x(z_1) dz_1 = q_x l^2 / 2 = R_u l / 2 \quad (8)$$

$$M_{xRoot} = q_y l^2 / 2 = R_a l / 2 \quad (9)$$

حيث  $R_u$  و  $R_a$  القوى المحصلة للحمولات المحيطية والمحورية على الترتيب المؤثرة على الريشة المتحركة:

$$R_u = q_x l ; R_a = q_y l \quad (10)$$

القوة المحصلة المحيطية يمكن تحديدها من علاقة الاستطاعة النظرية لمرحلة من العنفة:

$$N_{St} = R_u u_{av} z_b \quad (11)$$

$$u_{av} = \omega r_{av} \quad (12)$$

حيث:  $u_{av}$  السرعة المحيطية عند نصف قطر وسطي،  $z_b$  عدد الريش على الدوالب الدوار.

وباعتبار العلاقتين (8) و (11) نجد:

$$M_{yRoot} = \frac{N_{St} l}{2u_{av} z_b} \quad (13)$$

$$\sigma_{b2} = \frac{M_{\eta}}{W_{\min 2}} + \frac{M_{\zeta}}{W_{\max 2}} \quad (19)$$

$$\sigma_{b3} = \frac{M_{\eta}}{W_{\min 3}} - \frac{M_{\zeta}}{W_{\max 3}} \quad (20)$$

حيث:

$$W_{\min 2} = -\frac{I_{\min}}{\zeta_2}, \quad W_{\max 2} = \frac{I_{\max}}{\eta_2} \quad (21)$$

$$W_{\min 3} = \frac{I_{\min}}{\zeta_3}, \quad W_{\max 3} = -\frac{I_{\max}}{\eta_3} \quad (22)$$

في المراجع، تتسبب عادة قيم  $I$  و  $W$  و  $F$  إلى بعد نموذجي محدد ومميز في بروفيل الريشة وفي الغالب يكون طول وتر جذر الريشة  $b_M$  المرموز له بـ  $a-a$  على الشكل (2).

فإذا كان مقياس البروفيل  $m = b_R/b_M$  حيث  $b_M$  و  $b_R$  هما قياسي الوتر الفعلي والنموذجي للبروفيل على التوالي، فإن المميزات الهندسية للبروفيل النموذجي مع تعديل القيم بما يلائم الفعلية يعاد حسابها وفق العلاقات:

$$I_R = m^4 I_M, W_R = m^3 W_M, F_R = m^2 F_M \quad (23)$$

الرموز الدليلية  $R$  و  $M$  تشير إلى البروفيل الفعلي والنموذجي لعزم العطالة وعزم المقاومة ومساحة المقطع. يتم إجراء الحسابات العددية للإجهادات الاستاتيكية الناتجة عن الانحناء الايروديناميكي لمقارنتها مع الاجهادات المسموح بها على الانحناء والتي تعد في علم بناء العنفات واحدة من المعايير التي تعتمد عند دراسة اهتزازات الريش الدوارة. ومن المفترض أن تحقق اجهادات الانحناء المحسوبة الشرط التالي:

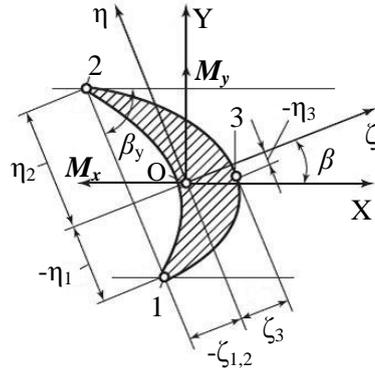
$$|\sigma_b| \leq \sigma_{bPer} \quad (24)$$

حيث:  $\sigma_b$  إجهاد الانحناء الايروديناميكي في النقاط الخطرة 1 أو 2 أو 3 المحسوبة وفق المعادلات (17) - (22).

$I_{\eta}$  و  $I_{\zeta}$  عزم عطالة مقطع بروفيل الريشة بالنسبة للمحاور الرئيسية  $\eta$  و  $\zeta$ . وغالباً ما يرمز لها حسب المراجع مثل [5] بـ:

$$I_{\eta} = I_{\min}, \quad I_{\zeta} = I_{\max}$$

تحدد عادة اجهادات الانحناء في النقاط الثلاث الخطرة 1، 2، 3 حسب الشكل (8)



الشكل (8) لحساب إجهادات الانحناء للمقطع العرضي لريشة

في النقاط 1 و 2 يكون لدينا اجهادات شد (موجبة) نتيجة الانحناء الاستاتيكي، بينما في النقطة 3 : اجهادات ضغط (سالبة).

حسب المعادلة (16) لدينا للنقطة 1:

$$\sigma_{b1} = \frac{M_{\eta}}{W_{\min 1}} - \frac{M_{\zeta}}{W_{\max 1}} \quad (17)$$

حيث  $W$  عزم المقاومة للنقطة 1

$$W_{\min 1} = -\frac{I_{\min}}{\zeta_1}, \quad W_{\max 1} = -\frac{I_{\max}}{\eta_1} \quad (18)$$

تعطى عادة في المراجع [5] قيم عزوم المقاومة  $W_{\min 1}$  لبعض بروفيلات الريش النموذجية. وبشكل مشابه، نحصل للنقطتين 2 و 3 على العلاقات:

$$w_{1a} = 113.5 \text{ m/sec}$$

$$w_{2a} = 270.5 \text{ m/sec}$$

$$u_{av.} = \omega \cdot r_{avr} = 300.8 \text{ m/sec}$$

- عدد الريش العاملة على الدولاب:  $z_b = 94$   
البارامترات الهندسية لمقطع الريشة عند الجذر:

- الزاوية بين المحور X والمحور  $\zeta$  حسب الشكل (8):  
 $\beta = 2.3^\circ$

- عزوم العطالة:

$$I_{min} = I_\eta = 10.827 \text{ cm}^4$$

$$I_{max} = I_\zeta = 93.766 \text{ cm}^4$$

- إحداثيات النقاط الخطرة 1 و 2 و 3 حسب الشكل (8):

$$\zeta_1 = -2.29 \text{ cm}, \eta_1 = -5.728 \text{ cm}$$

$$\zeta_2 = -2.33 \text{ cm}, \eta_2 = 5.278 \text{ cm}$$

$$\zeta_3 = 1.60 \text{ cm}, \eta_3 = 0$$

أجريت الحسابات بموجب المعادلات النازمة أعلاه  
حيث يبين الجدول (1) نتائج الحسابات لكل قيمة محسوبة  
مع رقم المعادلة المستعملة في الحساب.

الجدول (1) نتائج حساب الحالة الأولى

الرمز	القيمة العددية	الوحدة	رقم المعادلة
$M_{yRoot}$	42	N.m	(14)
$q_y$	408	N/m	(2)
$t_2$	64	mm	(3)
$M_{xRoot}$	61.7	N.m	(9)
$M_{\eta Root}$	44.4	N.m	(15)
$M_{\zeta Root}$	-60	N.m	(15)
$W_{min1}$	4.728	cm <sup>3</sup>	(18)
$W_{max1}$	16.37	cm <sup>3</sup>	(18)
$W_{min2}$	4.646	cm <sup>3</sup>	(21)
$W_{max2}$	17.76	cm <sup>3</sup>	(21)
$W_{min3}$	6.767	cm <sup>3</sup>	(22)
$W_{min3}$	$\infty$	cm <sup>3</sup>	(22)
$\sigma_{b1}$	13.06	MPa	(17)
$\sigma_{b2}$	6.18	MPa	(19)
$\sigma_{b3}$	-6.56	MPa	(20)

$\sigma_{b Per}$  إجهاد الانحناء المسموح به.

إن السنوات العديدة من الخبرة في تشغيل واستثمار  
العنفات البخارية سمحت باعتماد القيم التالية لإجهادات  
الانحناء المسموح بها حسب [3]:

- لمرحل الفعل ذات التزويد الكامل بالبخر:

$$\sigma_{b Per.} \leq 30 \dots 35 \text{ MPa}$$

- لمرحل رد الفعل ذات التزويد الكامل بالبخر:

$$\sigma_{b Per.} \leq 70 \dots 100 \text{ MPa}$$

- للمراحل ذات التزويد الجزئي بالبخر (وكحالة خاصة  
المراحل التحكمية):

$$\sigma_{b Per.} \leq 10 \dots 15 \text{ MPa}$$

#### 4- دراسة حالة

تتضمن دراسة الحالة حلاً لمثالين عددين:

**الحالة الأولى:** حساب إجهادات الانحناء الاستاتيكية  
لريشة عنفة طويلة نسبياً من المرحلة الأخيرة لعنفة بخارية  
في النقاط الخطرة 1 و 2 و 3 (الشكل 8).

العنفة من طراز TM3 T-100-12,8 باستطاعة  
.100 MW

المعطيات العددية:

- طول الريشة:  $l = 0.55 \text{ m}$

- القطر الوسطي:  $d_{av.} = 1.915 \text{ m}$

- استطاعة المرحلة مع ضياعات التسرب والرطوبة:  $N_i$   
 $= 4.315 \text{ MW}$

- الضغط خلف الفوهات عند نصف قطر وسطي:  $p_1 =$   
 $13.93 \text{ kPa}$

- الضغط خلف المرحلة:  $p_2 = 5.64 \text{ kPa}$

- كثافة البخر:  $\rho_2 = 0.04515 \text{ kg/m}^3$

- مركبات السرعات المحيطية والمحورية عند نصف قطر  
وسطي حسب الشكل (6) محددة بالقيم التالية:

$$w_{1u} = 24 \text{ m/sec}$$

$$w_{2u} = -386 \text{ m/sec}$$

### مناقشة نتائج الحالة الأولى:

يلاحظ من نتائج الحساب العددي المبينة في الجدول (1) أن إجهاد الانحناء الأعظمي يحدث في النقطة 1 حسب الشكل (8)، أي عند حافة الدخول لبروفيل الريشة، إذ إن الاجهادات الموجبة تتجمع في هذه النقطة بنتيجة عزوم الانحناء  $M_{\zeta}$  و  $M_{\eta}$ ، كما أن هذا الإجهاد يحقق شرط المتانة حسب العلاقة (24) حيث إن:

$$\sigma_{b1} = 13.06 \text{ MPa} < \sigma_{bPer.} = 30...35 \text{ MPa}$$

أي إن الريشة محققة لشرط المتانة.

من جهة أخرى، في النقطة 2 يولد العزم  $M_{\eta}$  اجهادات شد موجبة بينما العزم  $M_{\zeta}$  يولد اجهادات ضغط سالبة. من الجدير بالذكر أن الحسابات لهذه الحالة أجريت من أجل استطاعة حقيقية للمرحلة  $N_i = 4315 \text{ kW}$  مع الأخذ بالاعتبار ضياعات التسرب والرطوبة، ولبيان تأثير هذه الضياعات على إجهادات الانحناء المحسوبة جرى إعادة الحساب على أساس الاستطاعة النظرية بدون ضياعات حيث من العلاقاتين (11) و (10) ينتج:

$$N_{St.} = R_u u_{av.} z_b = q_x l \omega r_{av.} z_b = 4983.7 \text{ kW}$$

والتي ينتج منها قيم جديدة لإجهادات الانحناء:

$$\sigma_{b1} = 14.06 \text{ MPa},$$

$$\sigma_{b2} = 7.57 \text{ MPa},$$

$$\sigma_{b3} = -7.52 \text{ MPa}$$

يلاحظ أن القيم الجديدة أعلى من نظيراتها مع احتساب الضياعات حيث الإجهاد الأعظمي النظري يزيد عن الفعلي بنسبة 8% ويبقى ضمن الحدود المسموح بها. لذلك في الحسابات الفعلية يفضل استخدام الاستطاعة النظرية للمرحلة زيادةً في الأمان.

■ **الحالة الثانية:** حساب إجهادات الانحناء الاستاتيكية لريشة عنفة طويلة من المرحلة الأخيرة من عنفة بخارية باستطاعة 300 MW كعلاقة مع طول الريشة عند أكثر النقاط خطورة: أي عند حافتي مدخل ومخرج

الريشة وعند ظهر الريشة أي عند النقاط 1 و 2 و 3 حسب الشكل (8).

المعطيات العددية:

- طول الريشة:  $l = 0.96 \text{ m}$

- القطر الوسطي:  $d_{av.} = 2.48 \text{ m}$

- الضغط خلف المرحلة:  $p_2 = 10 \text{ kPa}$

- كثافة البخار:  $\rho_2 = 0.669 \text{ kg/m}^3$

- عدد الريش العاملة على الدولاب:  $z_b = 84$

- الخطوة بين الريش عند الجذر  $t_{Root} = 56.8 \text{ mm}$

- قيم السرعات وزوايا التركيب والضغط لخمس مقاطع حسب الشكل (9)، وعلى أبعاد متساوية من طول الريشة مبينة في الجدولين (2) و (3)، حيث يشير رقم المقطع (1) إلى جذر الريشة بينما رقم المقطع (5) يشير إلى منطقة المحيط الخارجي.

الجدول (2) قيم السرعات والضغط للحالة الثانية

المقطع	$w_1$ m/s	$w_2$ m/s	$P_1$ kPa
1	308.0	463.0	16.5
2	204.0	470.0	20.0
3	103.2	528.0	27.3
4	208.7	611.0	35.0
5	349.0	674.5	39.3

الجدول (3) قيم زوايا مثلثات السرعة للحالة الثانية

المقطع	$\beta_1$ deg.	$B_2$ deg.	$B_y$ deg.
ع 1	27.5	29.8	81.2
2	38.4	31.0	59.0
3	94.5	28.8	31.4
4	157.4	23.7	19.5
5	169.6	19.2	12.8

يلاحظ من الجدولين (2) و(3) أن قيم السرعات والضغط متوفرة حسب نتائج الحساب الحراري لخمس مقاطع من الريشة فقط حسب [4]، ومن الجدولين (4) و(5) قيم عزوم عطالة المقطع والإحداثيات متوفرة لأحد عشر مقطع فقط كذلك حسب [4].

ولإيجاد التوزيع الدقيق لعزوم وإجهادات الانحناء على طول الريشة حسب المعادلات الناظمة الواردة في الفقرة (3) أعلاه نحتاج إلى عدد أكبر من النقاط وليكن عشرون مثلاً، وفي مثل هذه الحالة سيتم اللجوء إلى الطريقة الرياضية المعروفة بـ الاستيفاء التربيعي (Quadratic Interpolation)، حيث تمكننا هذه الطريقة من استقراء القيم المجهولة من مجموعة قيم معلومة بدقة، وذلك بموجب المعادلة التالية [6]:

$$F_2(x) = y_0 L_0(x) + y_1 L_1(x) + y_2 L_2(x) \quad (25)$$

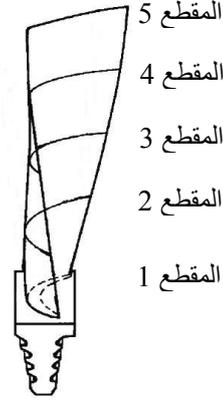
والتي يطلق عليها كثير حدود لاغرانج للاستيفاء الداخلي. حيث في هذه المعادلة:

$$L_0(x) = \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)}$$

$$L_1(x) = \frac{(x - x_0)(x - x_2)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)}$$

$$L_2(x) = \frac{(x - x_0)(x - x_1)}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)}$$

والتي يطلق عليها توابع لاغرانج للاستيفاء الداخلي. و على اعتبار أنه لكل ثلاث نقاط من أي جدول معلومة البيانات ولتكن:  $(x_0, y_0)$  و  $(x_1, y_1)$  و  $(x_2, y_2)$  عندها

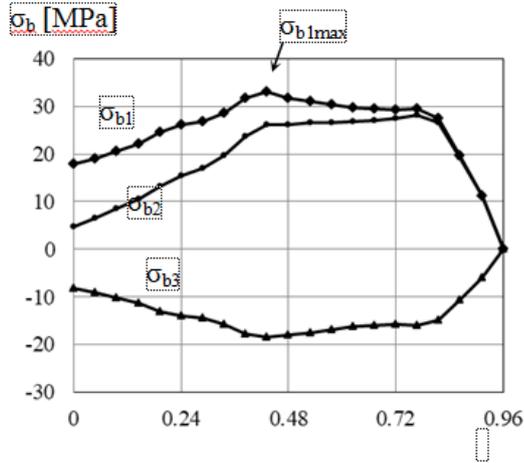


الشكل (9) تقسيم الريشة إلى مقاطع

- مميزات المقطع العرضي لبروفيل الريشة وإحداثيات النقاط 1 و 2 و 3 لأحد عشر مقطعاً على أبعاد متساوية من طول الريشة ابتداءً من الجذر وحتى المحيط الخارجي مبينة في الجدولين (4) و(5).

الجدول (4) عزوم عطالة المقطع للحالة الثانية

المقطع	$I_{\min}$ cm <sup>4</sup>	$I_{\max}$ cm <sup>4</sup>
1	146	1310
2	120	1090
3	83.2	852
4	60.7	685
5	36.8	532
6	24.1	419
7	14.7	336
8	7.7	289
9	3.2	239
10	1.23	174
11	0.568	105



الشكل (11) تغير إجهادات الانحناء بدلالة طول الريشة

- العزمان  $M_x$  و  $M_y$  بالنسبة للمحورين X و Y يتناقصان من قيمة عظمى عند جذر الريشة إلى الصفر عند المحيط الخارجي وكذلك الأمر بالنسبة للعزم  $M_z$ .

- العزم  $M_\eta$  يبلغ قيمته العظمى عند الطول 0.24 m وليس عند الجذر.

وحسب الشكل (11) الذي يبين تغيرات إجهادات الانحناء في النقاط الخطرة 1 و 2 و 3 بدلالة طول الريشة يلاحظ أن:

- قيم إجهاد الانحناء  $\sigma_{b1}$  في النقطة 1، أي عند حافة الدخول للريشة، لكافة مقاطع الريشة أعلى من قيمها في النقاط 2 و 3 وهذا ما كان واضحاً من خلال نتائج الحالة الأولى.

- القيمة العظمى لكل من الإجهادات  $\sigma_{b1max}$  و  $\sigma_{b2max}$  و  $\sigma_{b3max}$  لا تحدث عند منطقة الجذر كما يبدو للوهلة الأولى وإنما على ارتفاع ما من الريشة، أي أن الريشة ليس بالضرورة أن تتعرض للكسر في منطقة تثبيتها بالدولاب، ويعود ذلك إلى سببين:

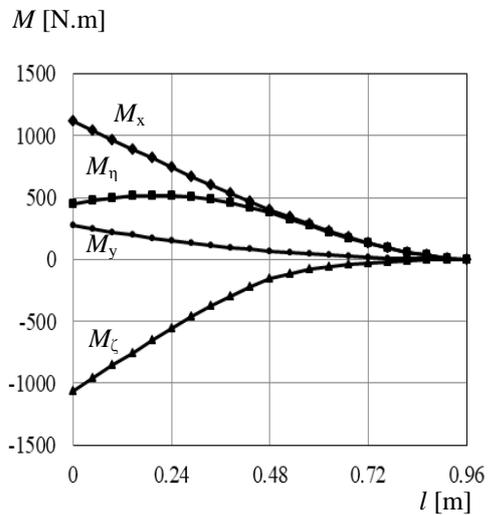
يمكن أن نمرر من هذه النقاط الثلاث كثير حدود من الدرجة الثانية حسب المعادلة (25) وذلك بإدخال  $x$  بين قيمتين معلومتين والحصول على  $F_2(x) = y$ . بناءً على ذلك أجريت الحسابات لعزوم الانحناء وإجهادات الانحناء من أجل 20 مقطع على طول الريشة وارتفاع كل مقطع جزئي هو:

$$(l = 0.96)/20 = 0.048 \text{ m}$$

وبسبب حجم الحسابات الكبير تم برمجة المعادلات الناظمة الواردة أعلاه باستخدام برنامج Excel وبعد الحصول على النتائج تم رسم المنحنيات المبينة على الأشكال (10) و (11).

#### مناقشة نتائج الحالة الثانية:

حسب الشكل (10) الذي يبين تغيرات عزوم الانحناء بدلالة طول الريشة نلاحظ أن:



الشكل (10) تغير عزوم الانحناء بدلالة طول الريشة

## References

## 5- المراجع

- 1- فيودوسيف ف.، ترجمة خالد رشدي بركات، مقاومة المواد، مطبعة رياض - عربين، 1981 - 1982
- 2- A.Kostyuk, V.Frolov, Steam and Gas Turbines,, Mir Publishers, Moscow, 1988 (in English).
- 3- A.Kostyuk, V.Frolov, A.Bulkin, A.Trukhny., Steam and Gas Turbines for Power Plants, Moscow, 2016 (in Russian).
- 4- A.Kostyuk, Dynamics and Strength of Turbo-machines, Moscow, 2007 (in Russian).
- 5- A. Levin, K. Bornshasky, E. Konson, Strength and Vibration of Blades and Discs of Steam Turbines, Mechanical engineering, 1981 (in Russian)
- 6- K.Vandebogert, Method of Quadratic Interpolation, 2017 PDF, Internet Download.
- 7- A.Sheglav, Steam Turbines, Energoatomizdat, 1993.
- 8- K. Vijendra, T.Viswanath, Investigation on Last Stage High Pressure Steam Turbine Blade for Producing Electricity Journal of Applied Mechanical Engineering, 2016.

Received	2021/3/24	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2021/4/28	قبول البحث للنشر

الأول: هو أن المقطع العرضي للريشة متغير هندسياً من الجذر وحتى المحيط الخارجي،

الثاني: هو أن الريشة تملك زاوية فنل تتغير بحدّة من الجذر وحتى المحيط الخارجي.

- القيمة العظمى  $\sigma_{b1max} = 33 \text{ MPa}$  كانت على ارتفاع

$z = 432 \text{ mm}$  مقاساً من الجذر وهو لا يتجاوز القيمة

العظمى المسموح بها  $\sigma_{bPer.} = 35 \text{ MPa}$ .

- المعادلات الناظمة المستخدمة في هذا البحث لحساب

إجهادات الانحناء تصلح أيضاً لكل من ريش العنفة

الغازية وضغط الهواء المحوري بعد إجراء التعديلات

اللازمة من حيث بروفييل الريشة وبارامترات التشغيل.

مسرد المصطلحات:

الرموز اللاتينية:

[m]	$d_{av}$ - القطر الوسطي،
[m <sup>2</sup> ]	$F$ - مساحة المقطع،
[N]	$F^c$ - القوة النابذة،
[cm <sup>4</sup> ]	$I$ - عزم عطالة المقطع،
[m]	$l$ - طول الريشة،
[N.m]	$M$ - عزم الانحناء،
[Watt]	$N_{st.}$ - استطاعة المرحلة،
[Pa]	$P$ - الضغط،
[N/m]	$q$ - حمولة موزعة،
[N]	$R$ - القوة المحصلة،
[m]	$r$ - نصف القطر،
[m]	$t$ - خطوة الريش،
[m/s]	$u$ - السرعة المحيطية،
[m/s]	$w$ - سرعة الجريان،
[cm <sup>3</sup> ]	$W$ - عزم مقاومة المقطع،
[m]	$r$ - نصف القطر،
	$X, Y, Z$ - محاور إحداثية
[m]	$z$ - إحداثي وفق المحور $Z$ ،
	$z_b$ - عدد الريش

الرموز الإغريقية

[deg]	$\beta$ - زاوية،
[m]	$\Delta, \delta$ - إزاحة خطية،
[MPa]	$\sigma_b$ - إجهاد الانحناء
[m]	$\zeta, \eta$ - إحداثيات،
[kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ - كثافة البخار،
	[kg/m <sup>3</sup> ]