

تحليل الإجهادات في ريش المرحلة الأخيرة من التوربين البخاري في محطة بيجي الحرارية

الإء محمد عبدالله
جامعة الموصل/ كلية الهندسة / قسم الهندسة الميكانيكية

د. صباح محمد جميل
استاذ / جامعة الموصل / كلية الهندسة / قسم الهندسة الميكانيكية

الخلاصة

تعاني ريش التوربين البخاري وخاصة الطويلة تأريخ من الفشل لا يمكن تحديد سببها بدقة لكثرة المتغيرات المؤثرة في هذه الظاهرة. يهدف البحث الحالي إلى دراسة تحليل الإجهادات على ريش المرحلة الأخيرة من التوربين البخاري في محطة بيجي الحرارية حيث تركز تكسر وفشل الريش في المراحل الأخيرة للتوربينات البخارية العاملة في محطة كهرباء بيجي ، ولم تسجل أي حالات تكسر في بقية المراحل. أن المصمم دائماً "يهدف إلى تقليل الإجهادات الناتجة عن القوة الطاردة المركزية. استخدم في هذا البحث تقنية برنامج الأنسس (ANSYS) في الحصول على قيمة الإجهادات على الريشة في حالة عدم وجود أعمدة الربط ، وجود أعمدة الربط . بينت الدراسة باستخدام تقنيات برنامج (ANSYS) في تحليل الإجهادات ارتفاع قيم الإجهادات للحافة الخلفية والأمامية لجذر الريشة وتطابقت هذه النتائج مع النتائج التي أجراها بعض الباحثون على الريش المكسورة في هذه المرحلة في محطة بيجي الحرارية حيث لاحظ الباحثون بالفحص المجهرى للريش المكسورة نمو بعض الشقوق من منطقة جذر الريشة التي بدأت من الحافات نفسها، كما بينت الدراسة تركيز الإجهادات في النصف العلوي للريشة وحول أعمدة الربط.

الكلمات المفتاحية : التوربين البخاري، الإجهاد، التصميم

Stress Analysis of Steam Turbine Blades at The last Stage in Beji Thermal power Station

Dr. Sabah M.J. Ali

Prof./Univ. of Mosul/College of Eng./Mechanical Dep.

Alaa M. Abdullah

Univ. of Mosul/College of Eng. /Mechanical Dep.

ABSTRACT

The low pressure steam Turbine blades are suffering especially the longest parts a bad history of failure. The breakage reasons are unknown due to its complexity. The aim of this work concentrated for the analysis of stresses at the last stage blades in Baji thermal power station. No records have been recorded of breakage incident at any other stages. The aim of the designer is to find way of reducing stresses due to centrifugal force.(ANSYS 12.1) is used for obtaining various stresses in case. The blades without lacing rod, the blades with lacing rod. It was concluded throughout using (ANSYS) Techniques, analysis increasing stresses at the leading and trailing edge of blade root and a stress concentration at the upper mid of the blade. This indicates why a failure at the lacing rod and aerofoil occurred in this station.

قبل: 1-3-2012

أستلم: 18-7-2012

قائمة الرموز

| الرمز | المعنى | الوحدة |
|-----------|--|---------|
| m | كتلة الريشة | kg |
| Lb | طول الريشة | m |
| A | مساحة مقطع الريشة | m^2 |
| ω | السرعة الزاوية | rad/sec |
| F_{cf} | القوة الطاردة المركزية | N |
| R_r | نصف قطر عمود الدوران | m |
| A_r | مساحة مقطع الريشة عند الجذر | m^2 |
| A_t | مساحة مقطع الريشة العلوي | m^2 |
| Z | أي مسافة بين الجذر والطرف العلوي للريشة | m |
| Az | مساحة مقطع الريشة عند أي نقطة على طول الريشة | m^2 |
| V_b | سرعة دوران الريشة | m/s |
| r_{ave} | معدل المسافة من مركز عمود الدوران الى الحافة الأمامية للريشة | m |
| vs_1 | السرعة المطلقة للبخار المغادر الخانق | m/s |
| vs_2 | السرعة المطلقة للبخار المغادر للريشة | m/s |
| vr_1 | السرعة النسبية للبخار الداخل للريشة | m/s |
| vr_2 | السرعة النسبية للبخار المغادر للريشة | m/s |
| K_v | معامل سرعة الريشة | - |
| m^0 | معدل تدفق البخار | Ton/hr. |
| Vw | محصلة سرعة الطاقة | m/s |
| vw_1 | المركبة الاولى لمحصلة سرعة الطاقة | m/s |
| vw_2 | المركبة الثانية لمحصلة سرعة الطاقة | m/s |
| F_{st} | القوة الناتجة عن البخار | N |
| F_{ax} | القوة المحورية | N |
| A_s | المساحة السطحية التي يضرب بها البخار | m^2 |
| p | الضغط الناتج عن البخار | N/m^2 |
| m'' | كتلة العمود الرابط | m |

المقدمة :

يعد التوربين البخاري آلة حرارية ويتم من خلال هذه الآلة تحويل طاقة البخار إلى طاقة حركية باستخدام المنافث (Nozzle) ومن ثم تحويل الطاقة الحركية إلى قوة تنجز "شغل ميكانيكي" باستخدام الريش. تصنف التوربينات البخارية على نوعين أساسيين هما: 1. التوربين الدفعي (Impulse turbine) 2. توربين رد الفعل (Reaction turbine).

التوربين الدفعي مميز باحتياجه إلى منافث وهبوط الضغط يتم في المنافث، لذلك يكون الضغط ثابتاً داخل التوربين ويدخل البخار التوربين بسرعة عالية. أما توربين رد الفعل فيتكون من صفوف من الريش مثبتة على الجزء الدوار، وتكون مفصولة بصفوف من الريش الثابتة داخل الغطاء، ويمكن ملاحظة إن صفة توربين رد الفعل هي هبوط الضغط باستمرار خلال التوربين [1][2].

2- التوربين في محطة بيجي

ويتكون التوربين من مقطعين [3] :-

1. مقطع الضغط العالي (High pressure section) ويتكون من :-
 أ- مرحلة الضغط العالي (High pressure stage) ويتكون من تسع مراحل من الريش.
 ب- مرحلة الضغط المتوسط (Intermediate pressure stage) ويتكون من ثماني مراحل من الريش.
2. مقطع الضغط الواطي (low pressure section) ويتكون من اثنا عشر مرحلة من الريش .

جميل: تحليل الإجهادات في ريش المرحلة الأخيرة من التوربين البخاري في محطة بيجي الحرارية

يقوم مرمل المحطة بتوليد البخار وتجهيزه إلى التوربين بمعدل (670Ton/hr) ليعطي قدرة (220 MW) عند ضغط (140bar) والمولد الكهربائي يدور بسرعة دورانية مقدارها (3000 rev/min). يدخل البخار المحمص القادم من المرمل بدرجة حرارة (Temp. = 540°C) وضغط (P=140 bar) بينما يدخل البخار إلى مرحلة الضغط الواطئ من التوربين والمتكونة من (12stages) بضغط (8.3bar) ودرجة حرارة (300°C). يدخل البخار مرحلة الضغط الواطئ بمعدل (446Ton/hr.) بسبب وجود مناطق استنزاف للبخار، ثم ينقسم البخار على قسمين و كما موضح في الشكل (1) ويدخل كل قسم بمعدل (223Ton/hr.) ويمر بنفس المعدل على المراحل الستة من توربين الضغط الواطئ ثم تنقسم كمية البخار في المرحلة الأخيرة على عدد الريش الموجودة في المرحلة الأخيرة والبالغ عددها (137) كما موضح في الشكل (2).

وصف الريش: تتألف ريشة التوربين البخاري بصورة عامة من جزأين هما: الجنيح (Aerofoil) والجزر (Root) ويتم توصيل عدد محدد من الريش محيطياً عن طريق أعمدة الربط (lacing rod). إما شكل الريشة في المرحلة الأخيرة من التوربين البخاري في محطة بيجي الحرارية فيكون ملتويًا (Twist) ومستندقاً " بعض الشيء مع طول الريشة للمحافظة على مستوى إجهادات ثابت كما في الشكل (3). المقاطع العرضية للريش تكون ذات أشكال انسيابية (Airfoil) متغيرة السمك على طول القوس (camber) كما إن السمك يكون متغيراً " على طول الريشة، حيث يتناقص من الجذر باتجاه النهاية الحرة. طول القوس السفلي في منطقة الجذر (107.95 mm) وعرض الريشة العلوي (طول القوس العلوي) (55.41 mm) تبلغ زاوية الالتواء للريشة في هذه المرحلة (43 degree) عرض الريشة قبل الالتواء (72.2 mm) سمك الريشة قبل الالتواء (10.8mm) .

وفي المراحل الأخيرة من الريش يستعاض عن طوق التقوية (Shroud) بأعمدة ربط :

1. عمود ربط داخلي صلد يبلغ قطره (7.4mm) ويقع على بعد (360 mm) من قاعدة الريشة (الجذر).
2. عمود ربط خارجي مجوف قطره الخارجي (10mm) والقطر الداخلي (2.5mm) ويقع على بعد (100mm) من حافة الريشة. أما المسافة بين الرباطين فهي (200 mm). تتكون المرحلة الأخيرة من توربين الضغط الواطئ في المحطة من (137) ريشة مقسمة على (17) رزمة، تحتوي (16) رزمة منها على (8) ريش في حين أن رزمة واحدة فقط تحتوي على (9) ريش كما في الشكل (4) .



الشكل (2): يوضح الرزمة الواحدة تتكون من ثمان ريش.



الشكل (1): يوضح الرزمة الواحدة تتكون من ثمان ريش.



الشكل (4): يوضح الرزمة الواحدة تتكون من ثمان ريش.



الشكل (3): يوضح ريشة المرحلة الأخيرة من التوربين البخاري في محطة بيجي الحرارية.

البحوث السابقة:

وقد حدد الباحثان (Mayer&Besigk) 1980 [4] ثلاثة عوامل تحدد قيمة الاجهادات هي حسابات التصميم، عمليات التصنيع، الخدمة والصيانة حيث عزي الباحثان حدوث التكسر الى العلاقة بين حجم الريش وعدد سنوات الاشتغال كما لوحظ أن زيادة حجم الوحدة يؤدي إلى حدوث التكسر وهذا ناتج عن كبر حجم الريشة .

وقام الباحث (الجبوري، عمر خليل) 2001 [5] دراسة العوامل التي أدت إلى كسر ريش المراحل الأخيرة لتوربينات الضغط الواطئ في محطة بيجي الحرارية حيث تم دراسة تأثير الاشتغال في منطقة البخار الواطئ على ريش المراحل الأخيرة وحساب كمية المعدن المزال نتيجة اصطدام القطرات بسطح الريشة ودراسة العلاقة بين معدل التعرية وطول الريشة ودراسة تأثير الأوساط التآكلية على تكسر الريش كما تم دراسة تأثير الظروف التشغيلية على تكسر الريش. استنتج الباحث إن معظم حوادث التكسر حدثت في المرحلة الأخيرة وهي منطقة تكون القطرات الأولية والواقعة في المرحلتين (الأخيرة وما قبل الأخيرة) لتوربين محطة كهرباء بيجي الحرارية. بالنسبة لموقع التكسر على الريشة فقد تركزت حوادث الفشل في المنطقة العليا بنسبة (70%) لكونها أكثر المناطق تعرضاً للتعرية والاهتزازات الرنينية، أما جذر الريشة فقد كانت نسبة التكسرفيه (30%) وتمركز الاجهادات وارتفاع قيمتها في الحافتين المتقدمة (Leading edge) والخلفية (Trailing edge) لجذر الريشة. استخدم الباحثون (A Thakker, H. B.) 2001 [6] طريقة العناصر المحددة في تحليل الاجهادات للتوربين الدفعي مستخدماً نوعين من أنواع الريش لهما نفس الأبعاد الخارجية مع اختلاف أن أحدهما تحتوي على ثقب (hole) والأخرى لا تحتوي على ثقب. والهدف من البحث حساب القوة الطاردة المركزية والقوة المتعلقة بالديناميكا الهوائية وتحليل الاجهادات على الريشتين والمقارنة بينهما باستخدام قيمتين للسرعة (194 and 36.65 rad/sec). واستنتج الباحثون أن الاجهادات الناتجة في كلا الريشتين لا تزيد عن الاجهادات المسموح بها واجهاد التشغيل الآمن، أن تصنيع الريشة ذات الثقب (hole) تتميز بسرعة تصنيعها وذلك لقصر وقت التصنيع وكفاءتها ولكلفتها المنخفضة اختير هذا النوع من الريش من بين الريش المختلفة. قامت شركة (RWE npower) 2007 [7] في بريطانيا وهي إحدى الشركات الميكانيكية والهندسية لصناعة وإنتاج الطاقة في بريطانيا بدراسة وحساب القوى والاجهادات المؤثرة على ريش المرحلة الأخيرة، مرحلة الضغط الواطئ في التوربين البخاري الذي تبلغ سرعته (3000r.p.m) في منطقة الجذر في إحدى محطات الطاقة في بريطانيا. كما قامت هذه الشركة بحساب القوى الطاردة المركزية المؤثرة على الريشة في منطقة الجذر نظرياً وحسابياً. أوضحت النتائج أن الاجهادات والقوى لا تزيد عن إجهادات التصميم الآمن (design stress) ومعامل الأمان factor of safety) في حالة ظروف التشغيل الاعتيادية وبدون توقفات. كما أعطى الباحثون مدة زمنية مقدارها أربع سنوات للفحص الدوري للريش ولاسيما في هذه المرحلة وذلك للكشف المبكر عن بداية الشقوق وعن تكسر الريش.

قام الباحث (Arkan K. Husain Al-Taie) 2008 [8] بدراسة إحدى الطرق لتقليل القوة الطاردة المركزية وذلك بتقليل كتلة الريشة وذلك بصناعة ريشة ذات مقطع متغير بدلاً من الريش المستقيمة. أن البحث يستعرض طريقة لتقليل مساحة مقطع الريشة وكذلك تم استعراض تحليل لهذه الريشة. وقام الباحث بدراسة القوة الطاردة المركزية مستخدماً ثلاثة مقاطع مختلفة من الريش:

1. مساحة مقطع الريشة ثابت على طول الريشة (constant cross-sectional area).
2. مساحة مقطع الريشة متغير على طول الريشة (variable cross-sectional area).
3. مساحة مقطع الريشة متغير على طول الريشة وأن مساحة مقطع الريشة أقل مما في الحالة B.

واستنتج الباحث في التصميم الميكانيكي للريش أن الاجهادات الناتجة عن القوة الطاردة المركزية هي السائدة والمهيمنة مقارنة بإجهادات الانحناء. تكون القوة الطاردة المركزية أكبر ما يمكن عند الجذر ولهذا السبب مساحة مقطع عند الجذر أكبر ما يمكن مقارنة بقية المقاطع. أكد الباحث على استخدام الريش ذات المقاطع المتغيرة بدل من المستقيمة وذلك لتقليل القوة الناتجة عن القوة الطاردة المركزية. تزداد إجهادات الانحناء للريش ذات المقاطع المختلفة عوضاً عن الريش المستقيمة تكون الاجهادات أقل من السابقة. الاجهادات. وأنجز الباحث (C.A. poplano-salas وآخرون) 2011 [9] دراسة وتحليلاً عن أسباب فشل ريش التوربين البخاري. هذا التحليل نفذ وأنجز لتعيين حادثة وواقعة حدوث الشقوق في هذه الريش حيث اكتشف ولوحظ أنه حصلت ونشأت هذه الشقوق في المنطقة المقواة (reinforcing)، عند أعمدة الربط في الجزء العلوي من الريشة. هذا الفشل نتيجة النمو الدائم للشقوق عرضياً (transversally) على طول الجنيح. واستنتج الباحثون التحضير والتنظيف الفقير لسطح الريشة وأعمدة الربط المسبقة لعملية لحام النحاس (brazing) نتيجة لذلك يكون تشكيل الاوكسيد المفرط المتداخل. عدم وجود الفراغ الكافي (Inadequate gap) بين أعمدة الربط والريشة مما يسبب عدم النفاذ والاختراق لمعدن النحاس الاصفر مما يؤدي الى حرمان منطقة الترابط بين الريشة وعمود الربط. وقد وضحت الاجهادات والاهتزازات باستخدام العناصر المحددة أن إجهادات التشغيل ضمن الحدود المسموح بها. أعزى الباحثون أن السبب في هذا الفشل يكون مرتبطاً بعدم أتمام عملية اللحام بالنحاس الأصفر.

3- الأساس النظري

الاجهادات المؤثرة على ريش التوربين البخاري:

هناك نوعان من الاجهادات المؤثرة على ريش التوربين البخاري هي [2]:

1. الاجهادات المستقرة (steady stress) .
2. الاجهادات المتغيرة (alternating or vibratory stress) .

الاجهادات المستقرة المؤثرة على ريش التوربين البخاري الناتجة عن مجموعة من الأحمال بسبب القوة الطاردة المركزية (centrifugal force) والقوة الناتجة عن البخار (steam force) أما الاجهادات المتغيرة والمتردة ناتجة عن تغيير واضطراب جريان البخار ، وظاهرة الرنين . وتعد الاجهادات المستقرة الأكثر دقة في الحسابات من الاجهادات المتغيرة [2].

4- القوى المؤثرة على ريشة التوربين البخاري

1. القوة الطاردة المركزية الناتجة عن سرعة الدوران العالية .
2. القوة الناتجة عن البخار .

5- حساب القوة الطاردة المركزية المؤثرة على الريشة

الشكل (5) يوضح أبعاد ريشة المرحلة الأخيرة من التوربين البخاري في محطة بيجي الحرارية يمكن حساب القوة الطاردة المركزية من المعادلة العامة لحساب القوة الطاردة المركزية الآتية:

$$F_{cf} = mr\omega^2 \quad (1)$$

حيث تتناسب القوة الطاردة المركزية طرديا مع كتلة الريش وكثافة معدن الريشة وطول الريشة ومساحة مقطع الريشة و مربع السرعة الدورانية . تعتمد القوة الطاردة المركزية على عدة عوامل منها كتلة الريشة (m). كثافة معدن الريشة (ρ)، طول الريشة (Lb)، مساحة مقطع الريشة (A). إذا أخذنا شريحة متناهية في الصغر (infinitesimal element) (dz) على طول الريشة كما موضح في الشكل (6) فإن القوة الطاردة المركزية المؤثرة على هذه الشريحة هي

$$df_{cf} = dm. \omega^2 (R_r + z) \quad (2)$$

Where :

$$dm = \rho. A(z)dz \quad (3)$$

$$df_{cf} = \rho. \omega^2. A(z). (R_r + Z)dz \quad (4)$$

$$F_{cf}(x) = \int_x^{lb} \rho. \omega^2. A(z). (R_r + Z)dz \quad (5)$$

يمكن اعتبار الريشة (Cantilever with variable cross-section area) عتلة جاسئة متغيرة المقطع مثبتة من الجذروان مساحة مقطع الريشة تتغير وفق المعادلة الآتية [8]:

$$\left(\frac{A(z)}{A_r}\right)^{lb} = \left(\frac{A_t}{A_r}\right)^z \quad (6)$$

$$\frac{A(z)}{A_r} = \left(\frac{A_t}{A_r}\right)^{z/lb} \quad (7)$$

$$A(z) = A_r. \left(\frac{A_t}{A_r}\right)^{z/lb} \quad (8)$$

$$F_{cf} = \rho \cdot \omega^2 \int_x^{lb} \left[Ar \cdot \left(\frac{At}{Ar} \right)^{\frac{z}{lb}} \right] \cdot (R_r + Z) dz \quad (9)$$

$$F_{cf} = \rho \cdot \omega^2 Ar [R_r \int_x^{lb} Ar \cdot \left(\frac{At}{Ar} \right)^{\frac{z}{lb}} \cdot dz + \int_x^{lb} Ar \cdot z \left(\frac{At}{Ar} \right)^{\frac{z}{lb}} \cdot dz] \quad (10)$$

بعد حل وإيجاد التكامل الموجود في المعادلة رقم (10) نحصل على قيمة القوة الطاردة المركزية في أي نقطة على طول الريشة كما في المعادلة الآتية :

$$F_{cf}(x) = \rho \cdot \omega^2 \left[\frac{Ar \cdot \left(\frac{At}{Ar} \right)^{\frac{z}{lb}} \cdot R_r \cdot lb}{\ln \left(\frac{At}{Ar} \right)} + \frac{Ar \cdot \left(\frac{At}{Ar} \right)^{\frac{z}{lb}} \cdot z \cdot lb}{\ln \left(\frac{At}{Ar} \right)} - \frac{Ar \cdot \left(\frac{At}{Ar} \right)^{\frac{z}{lb}} \cdot lb^2}{\left[\ln \left(\frac{At}{Ar} \right) \right]^2} \right]_x^{lb} \quad (11)$$

6- نموذج من الحسابات :

من المعادلة (11) يمكن حساب القوة الطاردة المركزية على أي نقطة على طول الريشة وذلك بالتعويض بالقيم في هذه المعادلة . حيث تم عمليا قياس نصف قطر عمود الدوران في محطة بيجي الحرارية ويبلغ نصف قطر عمود الدوران ($R_r = 822 \text{ mm}$) وطول الريشة الكلي ($L_b = 660 \text{ mm}$) ومن أمكانية وتقنية برنامج (الأوتوكاد) تم حساب مساحة مقطع الريشة العلوي ($At = 150.95 \text{ mm}^2$) مساحة مقطع الريشة عند الجذر ($Ar = 1490.195 \text{ mm}^2$)

إذا عوضنا عن قيمة (x) وهي أي نقطة على طول الريشة وعن بقية القيم في معادلة رقم (11) نحصل على القوة الطاردة المركزية في أي نقطة على طول الريشة حيث أن أعلى قيمة للقوة الطاردة المركزية عند منطقة الجذر وتبلغ ($F_{cf} = 288749 \text{ N}$) وأقل قيمة لها في الحافة الأمامية عند منطقة tip ($F_{cf} = \text{zero N}$) .

7- حساب القوة الناتجة عن البخار:

من الشكلان (7)، (8) يمكن حساب القوة الناتجة عن البخار

$$V_b = \omega \times r_{ave} \quad (12)$$

$$r_{ave} = \frac{660 + 822}{2} = 0.741 \text{ mm}$$

$$V_b = 314 \times 0.741 = 233 \text{ m/s}$$

من المعلومات العملية التي حصلنا عليها من محطة بيجي الحرارية ومن الدراسات والبحوث التي أجراها الباحثون على سرع البخار على الريش الموجودة في هذه المرحلة في محطة بيجي الحرارية [5] سرعة دخول البخار إلى ريش المرحلة الأخيرة من التوربين البخاري في هذه المرحلة يتراوح ما بين (300-400 m/s) .

نفرض أن سرعة دخول البخار إلى المرحلة الأخيرة من توربين الضغط الواطئ في المحطة تبلغ (400 m/s) .

$$vs_1 = 400 \text{ m/s}$$

من مراجعة مخططات الشركة الإيطالية المصنعة للتوربين البخاري في بيجي أن زاوية المنفت (Nozzle):

$$\alpha_1 = 22^\circ$$

تطبيق قانون الجيب التمام على مثلث السرعة الموضح في الشكل (8)

$$vr_1^2 = vs_1^2 + vb^2 - 2vs_1 \cdot vb \cos \alpha_1 \quad (13)$$

$$vr_1^2 = 400^2 + 233^2 - 2 \times 400 \times 233 \times \cos (22)$$

$$vr_1 = 204 \text{ m/s}$$

من التماثل (Symmetrical) الموضح في الشكل (8)

$$\beta_1 = \beta_2$$

إذا اعتبرنا تأثير احتكاك البخار بالريشة مساويا الى الصفر

$$K_v = \frac{vr_2}{vr_1} \quad (14)$$

$$\therefore vr_1 = vr_2 \quad (\text{Blade velocity coefficient } K_v = 1)$$

أما إذا أخذنا الاحتكاك بالحسبان يكون :

$$K_v < 1$$

بتطبيق قانون الجيب (the sine rule in triangle) على مثلث السرعة الموضح في الشكل (8)

$$\frac{vr_1}{\sin \alpha_1} = \frac{vs_1}{\sin \beta_1} \quad \frac{204}{\sin 22} = \frac{400}{\sin \beta_1} \quad (15)$$

$$\sin \beta_1 = 0.7345 \quad \beta_1 = 47.265^\circ$$

كمية البخار الداخل الى توربين الضغط الواطئ يقل الى (460 ton/hr) نتيجة لوجود أماكن استنزاف كثيرة في طريق البخار ثم ينقسم البخار أثناء دخوله الى مرحلة الضغط الواطئ الى قسمين يمين ويسار كل قسم من البخار يمر على ست مراحل وفي المرحلة الأخيرة ينقسم البخار الى عدد الريش الموجودة في هذه المرحلة (137) ريشة .

كمية البخار الداخل الى كل ريشة

من العزم الدفعي (impulse momentum) يمكن حساب القوة الناتجة عن البخار على كل ريشة [10,11]. حيث تعتمد القوة الناتجة عن البخار على معدل تغير الزخم

$$\text{Force} = m^0 \times \text{change in velocity}$$

كمية البخار الداخل الى كل جهة من مرحلة الضغط الواطئ حيث ينقسم البخار الى قسمين يمين ويسار

$$m^0 = \frac{446}{2} = 223 \text{ Ton/hr.}$$

كمية البخار الداخل الى كل ريشة من ريش المرحلة الأخيرة من توربين الضغط الواطئ حيث ينقسم البخار الى (137) ريشة

$$m^0 = \frac{223 \times 1000}{3600 \times 137} = 0.452 \text{ kg/sec}$$

حساب محصلة سرعة الطاقة (Velocity of whirl) Vw

من مثلث السرعة (velocity diagram) الموضح في الشكل (8) يمكن حساب محصلة سرعة الطاقة والتي تكون باتجاه سرعة دوران الريشة:

$$Vw = vw_1 + vw_2 \quad (16)$$

$$Vw = vr_1 \cos \beta_1 + vr_2 \cos \beta_2 \quad (17)$$

أما القوة الناتجة عن البخار فيمكن حسابها من المعادلة الآتية :

$$F_{st} = m^0 (vw_1 + vw_2) \quad (18)$$

$$F_{st} = m^0 (vr_1 \cos \beta_1 + vr_2 \cos \beta_2) \quad (19)$$

$$F_{st} = 0.452(204) \cos 47.265 + 204 \cos 47.625$$

$$F_{st} = 0.452 \times (276.87) = 125 \text{ N}$$

والقوة المحورية (axial thrust) تحسب في المعادلة الآتية:

$$F_{ax} = m^0(vr_1 \sin \beta_1 - vr_2 \sin \beta_2)$$

تُهمل هذه القوة في حالة التوربين الدفعي لأنها قليلة ويمكن اعتبارها مساوية إلى الصفر .

حساب المساحة السطحية الناتجة عن ضغط البخار

أذا فرضنا أن المساحة التي يضرب بها البخار الريشة عبارة عن شبه منحرف ويمكن حساب مساحة شبه المنحرف من المعادلة الآتية :

مساحة شبه المنحرف = $0.5 \times (\text{طول القاعدة العليا} + \text{طول القاعدة السفلي}) \times \text{طول الريشة}$
 ويتم عمليا" قياس طول القوس السفلي وطول القوس العلوي للريشة الموجودة في المرحلة الأخيرة وكان طول القوس العلوي = 55.41 mm ، طول القوس السفلي = 107.95 mm ، طول الريشة = 660 mm
 المساحة التي يضرب بها البخار الريشة :

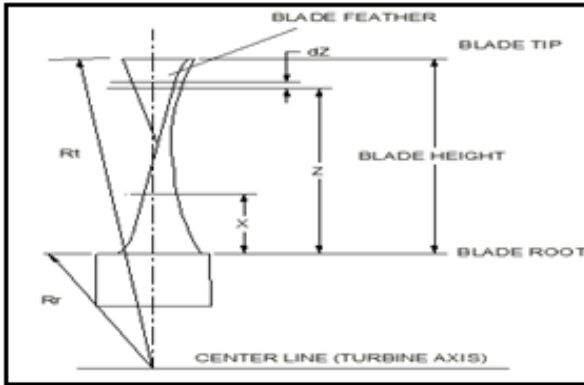
$$A_s = 53908.8 \text{ mm}^2$$

$$A_s = 53908.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

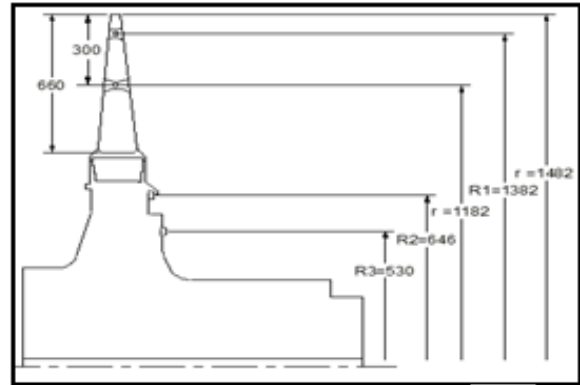
ويتم حساب الضغط الناتج عن قوة البخار نطبق المعادلة التالية :

$$p = \frac{F_{st}}{A_s}$$

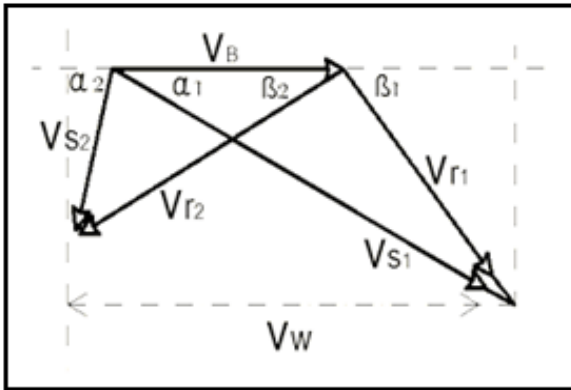
$$p = 2318.7 \text{ N/m}^2$$



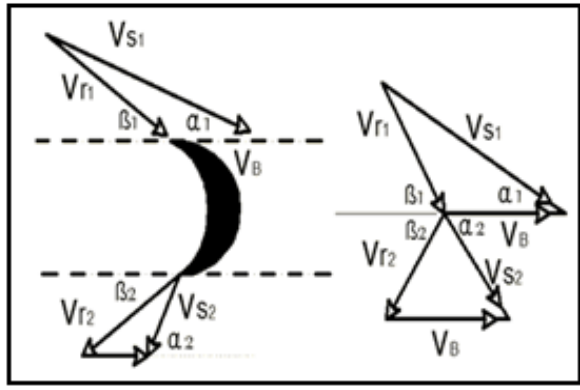
الشكل (6): يوضح كيفية حساب القوة الطاردة المركزية



الشكل (5): يوضح أبعاد الريشة.



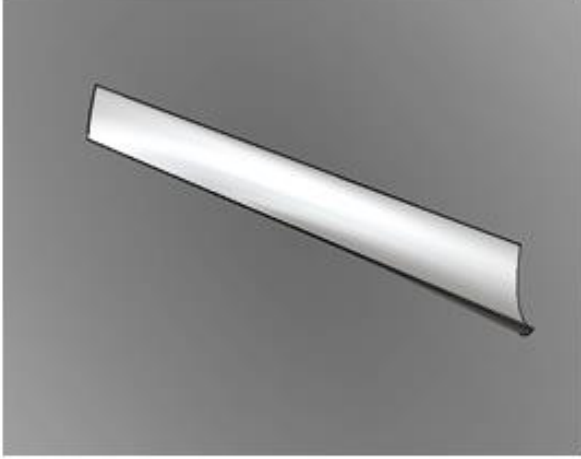
الشكل (8): يوضح زوايا وسرعة دخول وخروج البخار على الريشة .



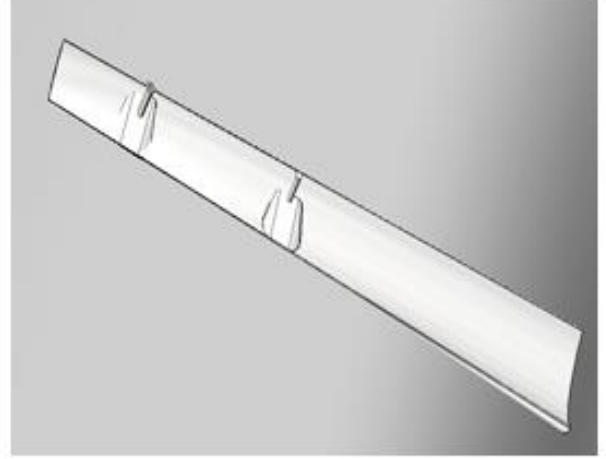
الشكل (7): يوضح زوايا وسرعة دخول وخروج البخار على الريشة .

تقنيات البرامج المستخدمة في رسم وأيجاد قيم الاجهادات على الريشة

نظراً للشكل الثلاثي الابعاد المعقد للريشة وتغير مساحة الريشة على طول الريشة وتغير السمك على طول الريشة ووجود زاوية الألتواء للريشة حيث تم أخذ قياسات لريشة حقيقية في المحطة وبعد ذلك تم رسم الريشة بواسطة تقنية برنامج الأوتوكاد[12][13][14] بوجود أعمدة الربط وعدم وجودها كما موضح في الشكلين (9)،(10) باستخدام هذا الأبعاد (Sat) يتم تصدير ونقل الريشة إلى برنامج الأنسس [15]،[16]،[17]. ومن ثم استدعاء الشكل المرسوم باستخدام برنامج الأوتوكاد باستخدام أبعاد (Import-sat) حيث يتحول الرسم بهذا الأبعاد من برنامج الأوتوكاد إلى برنامج الأنسس. والخطوات الآتية هي أهم الخطوات التي اتبعت عند تطبيق برنامج (ANSYS).



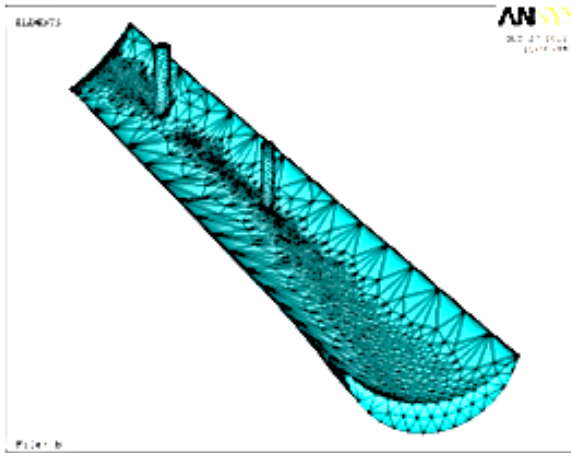
الشكل (10): رسم الريشة بدون أعمدة الربط بتقنية برنامج الأوتوكاد .



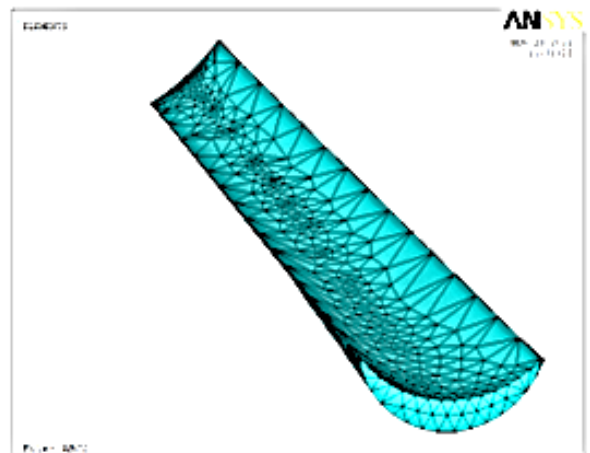
الشكل (9): رسم الريشة بوجود أعمدة الربط بتقنية برنامج الأوتوكاد .

(II) preprocessor : يتم اختيار نوع الشريحة المستخدمة (187 structural solid) في هذه الخطوة ، وكذلك خواص معادن المواد المستخدمة تم تثبيتها في الموقع الخاص باختيار المواد.

- 1- اضيفت الخواص الميكانيكية الخاصة بالمعدن المستخدم في بناء النموذج، مثل معامل المرونة ، الكثافة .
- 2- تم اختيار نوع الشريحة الخاصة بالريشة في حالة وجود وعدم وجود أعمدة الربط وهي (structural solid 187) .
- 3- قسم النموذج إلى الشريحة المختارة في اعلاه في حالة وجود عمود الربط وفي حالة عدم وجوده وكما مبين في الشكل (11)،(12).



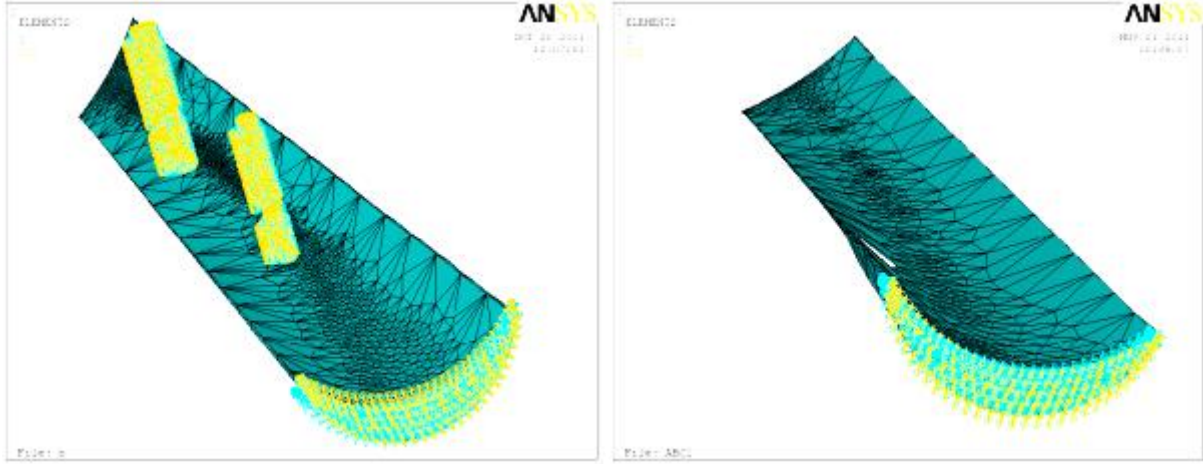
الشكل (12): النموذج المصمم للريشة (بوجود اعمدة الربط) بعد تقسيمه إلى الشرائح المختاره .



الشكل (11): النموذج المصمم للريشة (بدون اعمدة الربط) بعد تقسيمه إلى الشرائح المختاره .

(II) solution : لحل اي مسألة بواسطة طريقة تحليل العناصر المحددة. وفيما يأتي أهم الأعمال التي تمت في هذه الخطوة:

- 1- اجراء التقييد (constraint apply)، كما في الشكل (13)،(14).
- 2- اجراء عمليات تسليط الحمل (load apply) .
- 3- اجراء عمليات تنظيم عدد ال (sub steps)، وكذلك ال (load step).



الشكل (13): النموذج المصمم للريشة (بوجود اعمدة الربط) بعد تقسيمه الى الشرائح المختاره .

الشكل (14) : النموذج المصمم للريشة (بدون وجود اعمدة الربط) بعد تقسيمه الى الشرائح المختاره .

(III) post processor : وهي الخطوة الاخيرة لحل اي مسألة بواسطة طرائق تحليل العناصر المحددة بهذه الخطوة يمكن ان تظهر النتائج المطلوبة على الشاشة ولأي زمن مطلوب أو عند أية مرحلة. وبعد انتهاء جميع وقت التنفيذ فان جميع النتائج ولدى أي زمن يمكن أن يتم الحصول عليها. ان النتائج التي يتم الحصول عليها باستخدام البرنامج يمكن ان تبين الاجهادات في أي محور من المحاور أو محورين وكذلك تبين الاجهادات الاساسية (principal) بثلاثة ابعاد والرسومات والتوضيحات لتوزيع الاجهادات والانحناءات والتشوهات الناتجة على النموذج وحسب نظريات الانهيار المرن والفرضيات المتبعة في بناء نموذج الريشة وعملية ايجاد قيم الاجهادات على الريشة :

1. الريشة مقيدة الجذر في جميع الاتجاهات (X,Y,Z) وتم لحظيا" تدوير الريشة باتجاه المحور (X) وتحليل الاجهادات المستقرة عليها.
2. الريشة مقيدة الجذر ومقيدة اعمدة الربط في حالة وجودها في جميع الاتجاهات (X,Y,Z) وتم لحظيا" تدوير الريشة باتجاه المحور (X) .
3. أهمل الاجهادات المتغيرة والمترددة (Alternating stress) الناتجة عن اضطراب جريان البخار .
4. تمثيل القوة الناتجة عن البخار على أنه ضغط منتظم التوزيع على المساحة التي يضرب بها البخار على مساحة معينة من الريشة .

نتائج برنامج الانسس :

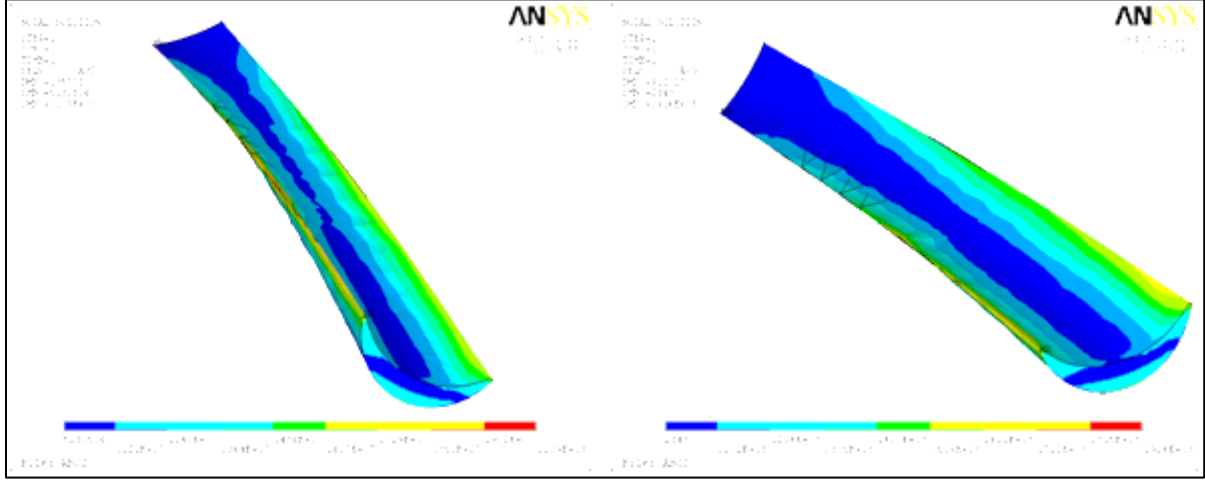
استخدم برنامج الانسس (V12.1 ANSYS Program) لتطبيق العوامل الفعلية الموجودة على الريش الموجود في المرحلة الأخيرة من التوربين البخاري في محطة بيجي الحرارية، بعد إدخال جميع البيانات المطلوبة من قبل البرنامج، تم تسليط القوة الناتجة عن البخار على أنها ضغط يضرب على مساحة معينة والقوة الطاردة المركزية على أنها قوة قصور ذاتي (Inertia force)، ويمكن تقديم النتائج المستحصلة من هذا العمل وتوضيح تغير توزيع الإجهادات على الريشة في الحالتين وجود اعمدة الربط وعدم وجودها والمقارنة بين الحالتين برسومات ومناقشتها بتناول المنحنيات والرسومات المعروضة على النحو الآتي:

- الشكل (15): يوضح الأجهاد المكافئ (أجهادات فون ميسس) الناتج عن القوة الطاردة المركزية في حالة عدم وجود أعمدة الربط حيث نلاحظ تركز الأجهادات وأرتفاع قيمتها (91.6 MN/m^2) عند الحافة المتقدمة الأمامية (Leading

جميل: تحليل الإجهادات في ريش التوربين البخاري في محطة بيجي الحرارية

edge) والخلفية (Trailing edge) لجذر الريشة وتقل الإجهادات كلما اتجهنا باتجاه الطرف العلوي للريشة وتكون أقل قيمة لها عند الحافة العليا للريشة والبالغ قيمتها (10.2 MN/m^2).

● الشكل (16): يوضح (إجهادات فون ميسس) الناتج عن قوة البخار حالة عدم وجود أعمدة الربط حيث نلاحظ تركز الإجهادات وأرتفاع قيمتها (10.9 MN/m^2) عند الحافة المتقدمة الأمامية والخلفية لجذر الريشة وتقل الإجهادات كلما اتجهنا باتجاه الطرف العلوي للريشة وتكون أقل قيمة لها عند الحافة العليا للريشة والبالغ قيمتها (1.2 MN/m^2). وتكون الإجهادات الناتجة عن قوة البخار قليلة مقارنة بالقوة الطاردة المركزية حيث تبلغ الإجهادات الناتجة عن القوة الطاردة المركزية عشرة أضعاف الإجهادات الناتجة عن البخار.



الشكل (16) : الاجهاد المكافئ الناتج عن قوة

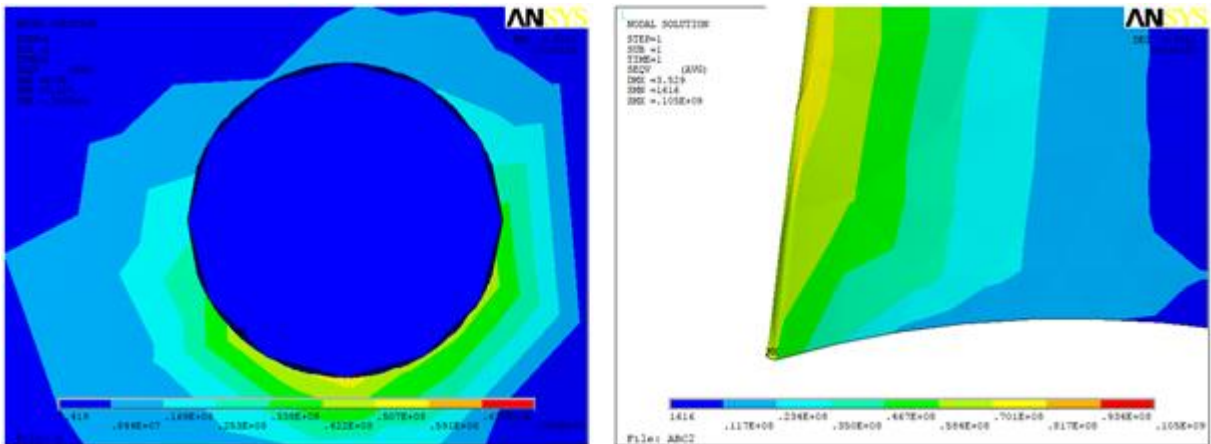
البخار في حالة عدم وجود أعمدة الربط .

الشكل (15) : الاجهاد المكافئ الناتج عن القوة

الطاردة المركزية في حالة عدم وجود أعمدة الربط .

● الشكل (17): يوضح الأجهاد المكافئ (إجهادات فون ميسس) الناتج الأجهاد المركب (combined stress) في حالة عدم وجود أعمدة الربط حيث نلاحظ تركز الأجهادات وأرتفاع قيمتها (105 MN/m^2) عند الحافة المتقدمة الأمامية (Leading edge) والخلفية لجذر الريشة وتقل الأجهادات كلما اتجهنا باتجاه الطرف العلوي للريشة وتكون أقل قيمة لها عند الحافة العليا للريشة والبالغة قيمتها (11.7 MN/m^2).

● الشكل (18): يوضح الأجهاد المكافئ (إجهادات فون ميسس) الناتج عن القوة الطاردة المركزية في حالة وجود أعمدة الربط حيث نلاحظ تركز الأجهادات وأرتفاع قيمتها (76 MN/m^2) حول العمود الرابط الصلدي منطقة الألتحام بالريشة وتقل الأجهادات كلما اتجهنا باتجاه الطرف العلوي للريشة .



الشكل (18) : الاجهاد الناتج عن القوة الطاردة

المركزية في حالة وجود أعمدة الربط .

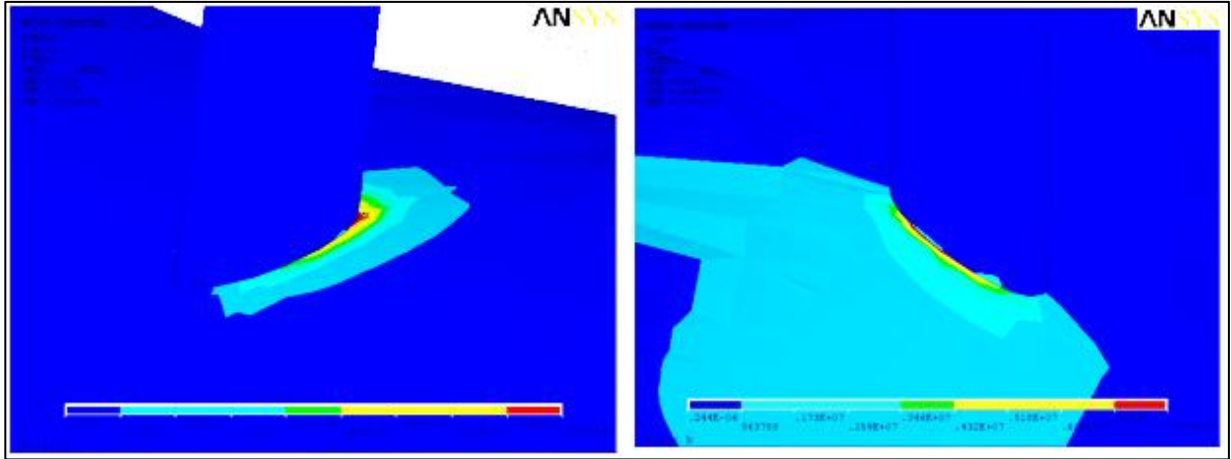
الشكل (17) : تركز الاجهاد المكافئ الناتج عن الأجهاد

المركب عند الحافة المتقدمة الأمامية والخلفية لجذر الريشة

● الشكل (19): يوضح الأجهاد المكافئ (أجهادات فون ميسس) الناتج عن قوة البخار في حالة وجود أعمدة الربط حيث نلاحظ تمركز الأجهادات وأرتفاع قيمتها ($7.7MN/m^2$) حول العمود الرابط الرابط الصلب في منطقة أللتحام الريشة بالعمود الرابط وتقل الأجهادات كلما أتجهنا باتجاه الطرف العلوي للريشة وتكون أقل قيمة لها عند الحافة العليا للريشة .

وتكون الأجهادات الناتجة عن قوة البخار قليلة مقارنة بالقوة الطاردة المركزية حيث تبلغ الأجهادات الناتجة عن القوة الطاردة المركزية عشرة أضعاف الأجهادات الناتجة عن البخار.

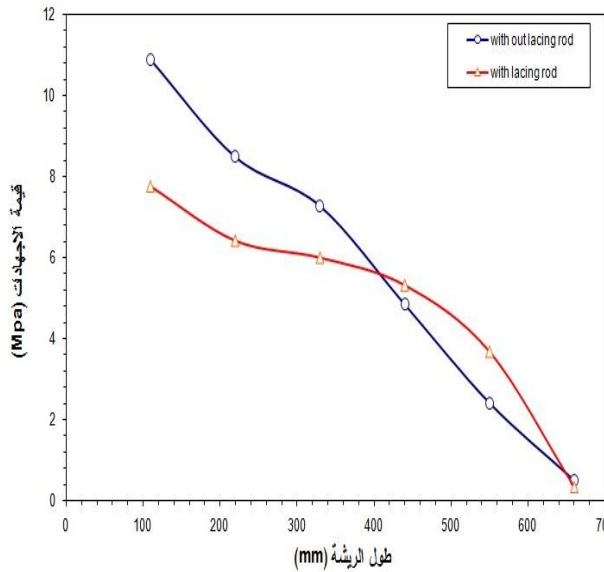
● الشكل (20): يوضح الأجهاد المكافئ (أجهادات فون ميسس) الناتج القوة الطاردة المركزية (combined stress) في حالة وجود أعمدة الربط حيث نلاحظ تمركز الأجهادات وأرتفاع قيمتها ($82.1MN/m^2$) حول العمود الرابط الصلب في منطقة اللتحام الريشة بالعمود الرابط وتقل الأجهادات كلما أتجهنا باتجاه الطرف العلوي للريشة .



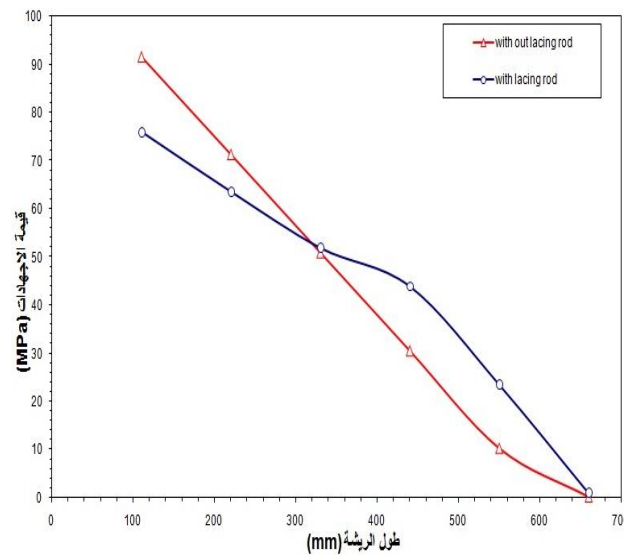
الشكل (20) : الاجهاد المكافئ الناتج عن قوة البخار في حالة وجود أعمدة الربط .

الشكل (19) : الاجهاد المكافئ الناتج عن الأجهاد المركب بوجود أعمدة الربط .

● توضح الاشكال (21)، (22)، (23) تغير قيم الأجهادات المكافئة الناتجة عن الاجهاد المركب والقوة الطاردة المركزية وقوة البخار في حالة وجود عمود الربط وعدم وجودها حيث نلاحظ في جميع الحالات قلة الأجهادات الناتجة على الريشة في حالة وجود أعمدة الربط .



الشكل (22): تغير قيم الاجهاد المكافئ الناتج عن قوة البخار في حالة وجود أعمدة الربط وعدم وجودها .



الشكل (21): تغير قيم الأجهاد المكافئ الناتج عن القوة الطاردة المركزية في حالة وجود أعمدة الربط وعدم وجودها .

8. Arkan.K.HusainAl-Taie "**Stress Evaluation of low-pressure steam TurbineBlade and Design of Reduce stress Blade**" , Eng.Tech.Vol.26 No.2, Iraq (2008) .
- 9 .C.A. Poblano-Salas,J.D.OBarceinas-Sanchez, and J.C. Sanchez-Jimenez, "**Failure analysis of an AISI 410 Stainless Steel airfoil in a steam turbine**" Engineering Failure Analysis,vol18 68-74 Mexico(2011) .
10. T.D.EASTOP, A.MC.CONKEY "**Applied Thermodynamics for Engineering Technologist**", (1982) .
11. Gordon J. Van Wylen "**Fundamentals of classical Thermodynamic**" fourth Edition, U.S.A. (1994) .
12. **AUTOCAD (2010)** ، للكاتب جورج أمورا .
13. James A. Leach "**AUTOCAD 2007 INSTRUCTOR**" A student Guide to complete coverage of Auto CAD commands and features, McGraw-Hill Graphics series, England, (2007) .
14. **Help of Auto CAD (2010)** .
15. Erdogan Madenci, IbrahimGuyen "**The Finite Element Method and Application in Engineering using Ansys**" U.S.A(2006).
16. N.Nakasone, T.A.Stolarski and S.Yoshimoto ,"**Engineering Analysis with Ansys software**" Tokyo, Japan (2006).
17. **Help of ANSYS program V 12.1.**