

نمذجة ومحاكاة مشكلة انحلال براغي تجميع جزأي مرجل يخضع لإجهادات حرارية متغيرة

د. م. فراس القطان⁽¹⁾

الملخص

عالجنا في هذا البحث مشكلة انحلال البراغي المُجمعة لجزأي مرجل يجمعان مع بعضهما بربط شفطي جزأي المرجل بواسطة براغي ذات أقطار كبيرة، ويؤمن جوان من مادة الغورتكس عملية الإحكام بين جزأي المرجل، تتطلب دراسة هذه المنظومة الميكانيكية نمذجة معقدة باستخدام البرمجيات التي تعمل بمبدأ العناصر المنتهية، وتحتاج إلى دراسة تحليلية وافية لفهم أسباب انحلال براغي الربط . اقترحنا من خلال المثال المدروس، مساراً يعتمد على الجمع بين النمذجة بالعناصر المنتهية ومقاربة تحليلية تسمح بالتحقق من سلوك قطع الربط، ويتقديم حلول تقنية مناسبة.

الكلمات المفتاحية: العناصر المنتهية، النمذجة، المحاكاة، التجميع بواسطة البراغي، انحلال البراغي.

(1) قسم هندسة السيارات والآليات الثقيلة. كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية جامعة دمشق.

Modelling and Simulating the Problem of Bolts Unfastening in Bolt-Jointed Two-Part Autoclave Subjected to Variable Thermal Stresses.

Dr. Alkatan Feras, Ph. D.⁽¹⁾

ABSTRACT

In this Research we treat the bolts unfastening problem in bolt- jointed two-flange autoclave, by bolts with big diameters. The gasket of Gore-Tex guarantees the sealing-off process. This mechanical system requires a complex modelling by using the finite element method software, and needs a sufficient analytical study to understand the causes of connecting screws loosening.

Combining finite elements modelling with the analytical approach will allow to verify the behaviour of jointed parts and gives suitable technical solutions.

Keywords: finite element method, Modelling, simulation, bolted assembly, bolts unfastening.

⁽¹⁾ Department of Automotives Engineering and Heavy Machinery. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering .Damascus University.

1- المقدمة:

مع وجود نماذج رياضية كثيرة لحساب عناصر التراكيب الميكانيكية المجمع بواسطة البراغي في الوسط الصناعي [6،12]، إلا أنّ هذه النماذج غير كافية لإعطاء نتائج دقيقة في بعض الحالات الحساسة، ولا سيما عندما يتعرض التركيب الميكانيكي المجمع لإجهادات حرارية [4،6،1]. مكننا تطور الأدوات والبرمجيات الرقمية منذ بداية التسعينيات من التعامل مع المشكلات التكنولوجية المعقدة، كمشكلة التطبيق الدقيق والمنتقن للإجهاد المسبق في البراغي التي تعدّ إحدى المشكلات الرئيسة التي نواجهها، لأنّ وسائل الربط الحالية لا تسمح بمعرفة القيمة الدقيقة للحمل المسبق المطبق [1،3]. فضلاً عن ذلك، يعتمد سلوك التراكيب الميكانيكية المجمع مسبقاً للإجهاد على عدد كبير من البارامترات، بما في ذلك صلابة المكونات المختلفة للتركيب الميكانيكي المجمع التي تسهم في زيادة تعقيد وضع البراغي تحت التحميل المسبق [6،4،1]. ترتبط مشكلة انحلال البراغي عند تطبيق قوى ديناميكية متغيرة، موضوع هذه الدراسة، ارتباطاً وثيقاً مع الإجهاد المسبق المطبق في البرغي. في الواقع، تكمن دراسة ظاهرة انحلال البراغي في فهم العملية المؤدية إلى فقد قيمة التحميل المسبق، وقد بينت مجموعة من الباحثين ضرورة التمييز بين مفهومين متعلقين بفقد قيمة التحميل المسبق [2،5،9]:

أ - فقدان التماس بين القطع المجمع ورأس البرغي، أو الصامولة وهو ظاهرة سكونية بحتة تنتج عن مجموعة من الأسباب كهصر القطع المجمع، أو تشوه العناصر المجمع أو الجوانات، واختلاف تمدد العناصر المختلفة المكونة للتركيب الميكانيكي أو تقلصها تحت الحمل الحراري.

ب - انحلال البراغي عند وجود إزاحات نسبية قطرية بين القطع المجمع والصامولة، وبين الصامولة والبرغي ذات سعة كافية لجعل النظام عكوساً، ممّا يؤدي إلى دوران البرغي نسبة إلى الصامولة باتجاه الفك مؤدياً إلى انخفاض قيمة الإجهاد المسبق.

2- المشكلة المعالجة:

تتعلق هذه الدراسة بسلوك براغي الربط المثبتة لشفتي (فلنشتي) تجميع جزأي مرجل (القاع والجسم) قطره الداخلي 2500mm، إذ يجمع هذان الجزءان إلى بعضهما، كما هو مبين في الشكل (1)، بربط شفتي جزأي المرجل إلى بعضهما بواسطة 88 برغياً وصامولة وبقطر 36mm، ويحصران بينهما جواناً لإحكام الضغط ضمن المرجل الشكل (2). ويطبق على براغي الربط مزدوجة شد قيمتها 400N.m.

مع أن تطبيق الإجهاد المسبق يؤمن الإحكام بين القطع المجمع لكن خلال دورات عمل المرجل تبدأ البراغي بالانحلال ولا يستطيع جوان الإحكام منع هروب البخار.

يعمل المرجل في الشروط الآتية:

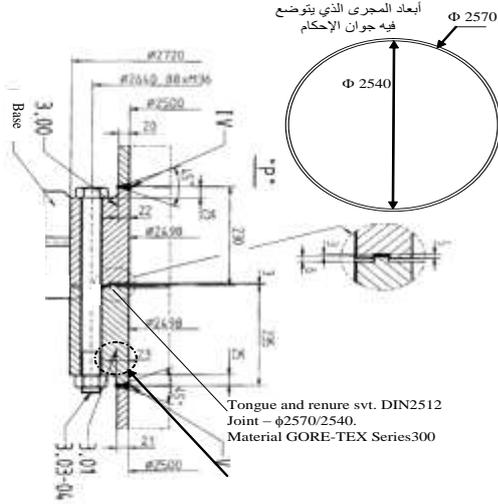
7 دورات عمل في اليوم، 5 أيام في الأسبوع، 230 يوماً في السنة أي 1610 دورة في السنة، وفي 5 سنوات 8×10^3 دورة، تبقى هذه القيمة بعيدة جداً عن مجال إجهاد التعب الذي يقع في حدود $10^4 \times 10^6$ دورة [12،5،2]. تتألف دورة العمل من الخطوات الآتية:

- إغلاق البوابة

- رفع الضغط حتى 0.4MPa (151°C) خلال 56 دقيقة.

- الحفاظ على قيمة الضغط عند درجة الحرارة نفسها مدة 70 دقيقة.

- إيقاف ثم تفريغ المرجل خلال 12 دقيقة.



الشكل (2) مقطع في مستوي البرغي يبين جوان الإحكام

4- أدوات البحث

استخدمنا في بحثنا أسلوباً يعتمد على الجمع بين البيانات التجريبية والدراسة التحليلية، والنمذجة ثلاثية الأبعاد باستخدام برنامج Ideas [7]، وهو برنامج يعمل بمبدأ العناصر المنتهية، وقد اعتمد في مجموعة من الشركات الكبرى في مجالي الطيران والسيارات، وكذلك في الدراسات الهندسية الميكانيكية، لوثوقية نتائجه في مجال الحساب التصميمي.

5- منهجية البحث المتبعة:

اقترحنا انجاز هذا البحث على مرحلتين:

- 1- تحليل دقيق لشروط وضع المجموعة في الخدمة، وكذلك لظروف التشغيل في أثناء دورات عمل المرجل.
- 2- إجراء نمذجة ثلاثية الأبعاد للتركيب المجمع، باستخدام برنامج يعمل بمبدأ العناصر المنتهية [11، 7، 13] ودراسة سلوكه عند شروط التحميل والحرارة الحرجين.

- تبريد الجسم الخارجي للمرجل برشه بماء درجة حرارته 9°C مدة 30 دقيقة.

- فتح البوابة.

أخذت مجموعة من القياسات لمعرفة تغير درجة الحرارة على السطح الخارجي لشفتي تجميع المرجل، وعلى نهاية برغي الربط من جهة الصامولة (الشكل 1). يؤمن الإحكام من خلال جوان من مادة الغور تكس 300 وهو عبارة عن نسيج يتألف من طبقات من بولي تترافلورو إيثيلين polytetrafluoroethylene (PTFE)، بعرض 15mm وسماكة 3mm، يتوضع هذا الجوان في أخدود دائري على محيط حافة الربط بقطر 2570/ 2540 (الشكل 2).

3- هدف البحث:

الهدف من هذه الدراسة هو تحليل سلوك الوصلة الميكانيكية المجمعة في أثناء العمل، للكشف عن أسباب تسرب البخار التي يشكل انحلال البراغي الرئيس لها، ومن ثم اقتراح الحل التقني المناسب. قمنا في هذا البحث بالإفادة من تحليل شروط عمل المجموعة، وكذلك من ظروف التشغيل لاستخدامها في برنامج العناصر المنتهية [7]، مما يؤدي الى مقارنة أكثر واقعية وتحليل أدق لسلوك التركيب الميكانيكي المجمع.



الشكل (1) توضع حساسات قياس درجة الحرارة

من خلال قوى الشد المسبق في البرغي، نحسب إجهادات الشد الناشئة في مقطع البرغي، علماً أن المقطع المقاوم للبرغي المدروس ($A_s=817mm^2$)

$$56MPa < \sigma_t < 83MPa$$

تعدُّ هذه الإجهادات المحورية في البرغي ضعيفة جداً بالنسبة الى البراغي المستعملة ذات المواصفات الآتية: (حد المتانة $\sigma_{ut}=700MPa$ ، حد الانسياب $(\sigma_{yt}=498MPa$)

2-1-5 حساب ضغط التماس المطبق على

الجوان عند الربط.

ترتبط الفلنشتان إلى بعضهما بواسطة 88 برغياً موزعة بانتظام على المحيط، لذلك نفترض أن توزع الضغط على الجوان منتظم: نحسب مساحة سطح الجوان الخارجي:

$$S_{joint} = \frac{\pi}{4} (2570^2 - 2540^2) = 120400mm^2$$

عند تطبيق قوى شد محورية متوسطة يكون الضغط المتوسط على الجوان:

$$P_m = \frac{88 \times 56737}{120400} = 41.47MPa$$

من الضغط الوسطي وبإدخال معامل أمان الشد نحسب الضغط الأصغري والأعظمي على الجوان كما سبق:

$$33MPa < P_m < 50MPa$$

يبدو هذا الضغط ضعيفاً إذا أخذنا بالحسبان قيم الإجهادات الستاتيكية المسموح بها لمادة الغورتكس.

$$P_{s \text{ Max}} = 25000psi$$

$$P_{s \text{ Max}} = 25 \times 10^3 \times 6.895 \times 10^{-3} = 172.4MPa$$

النتائج:

عند تطبيق الإجهاد المسبق على البراغي نحصل على ضغط تماس أعظمي على الجوان مقداره $50MPa$ ، وهي قيمة صغيرة جداً بالنسبة الى قيمة الإجهادات المسموح بها $172.4MPa$ لمادة الجوان، لذلك يجب رفع قيمة الإجهاد المسبق المطبق على البراغي.

1-5 تحليل شروط وضع المجموعة في الخدمة

وشروط التشغيل:

1-1-5 حساب إجهاد الشد المسبق في

البراغي

من الضروري حساب قوى الحمل المسبق الصغرى في البرغي عند التجميع، خاصة في ضوء عدم كفاية دقة وسائل الربط الحالية. تطبق العلاقة التي تربط بين المزدوجة التي تدير رأس البرغي بواسطة مفتاح الربط C وقوى الشد المحورية Q في اللولب حسب المقاييسات ISO [10] المعتمدة في معظم البحوث المتعلقة بالبراغي [6,4]:

$$C = Q \cdot (0.161 \cdot p + 0.583 \cdot \mu_t \cdot d_2 + \mu_h \cdot r_m)$$

$$p = \text{خطوة السن } 4mm$$

$$d_2 = \text{قطر البرغي بين قعري سنين } 33.402mm$$

$$Q = \text{قوة الشد المسبق}$$

$$\mu_t = \text{معامل الاحتكاك بين الأسنان نأخذ } (0.15)$$

$$\mu_h = \text{معامل الاحتكاك تحت رأس البرغي } (0.15)$$

$$r_m = \text{نصف قطر المسند تحت رأس البرغي}$$

$$(r_m = 23.25mm)$$

$$C = (0.64 + 2.92 + 3.49)Q$$

$$C = 7.05Q$$

$$C_m = 400N.m \text{ إذا من أجل مزدوجة شد متوسط}$$

$$Q_m = \frac{400 \cdot 10^3}{7.05} = 56737N$$

بإدخال معامل أمان الشد $a_s=1.5$ الذي يأخذ بالحسبان الضياعات الناتجة عن مفتاح الشد (مفتاح ديناموميتر)، وتلك الناتجة عن معامل الاحتكاك [6] يكون: $Q_{max}=1.5Q_{min}$ ، نحسب قيم قوى الشد الصغرى والعظمى المطبقة على البرغي:

$$Q_m = \frac{Q_{min} + Q_{max}}{2} = \frac{Q_{min} + 1.5Q_{min}}{2} = 1.25Q_{min}$$

$$Q_{min}=45390 < Q_m < 68085 = Q_{max}$$

$$S_{joint-T2} = S_{joint-T1}(1 + 2\alpha_G \Delta T) = 134708mm^2$$

فيكون مقدار التمدد القطري في الجوان عند الدرجة T_2 :

$$d_{joint-ext-T2} - d_{joint-int-T2} = 31.73mm$$

- حدّد مقدار التمدد السطحي لشفتي الربط عند درجة حرارة التشغيل:

$$S_{steel-T2} = S_{steel-T1}(1 + 2\alpha_{St} \Delta T) = 124252mm^2$$

فيكون مقدار التمدد القطري في المجرى عند الدرجة T_2 :

$$d_{steel-ext-T2} - d_{steel-int-T2} = 30.48mm$$

- حدّد مقدار التغير الحاصل في عرض المجرى الذي يتوضع فيه الجوان، وبناءً عليه يكون الخلوص المناسب بين المجرى والجوان عند درجة الحرارة التشغيل T_2 لتجنب حدوث تلف في الجوان نتيجة الضغط الكبير عليه:

$$\frac{31.73 - 30.48}{2} = 0.63mm$$

• نسلج أيضاً أن قوى الضغط داخل المرجل تصيف إجهادات صغيرة إلى الإجهاد المسبق في مقطع البرغي، وقد تتضخم هذه الإجهادات إذا كان تمدد الشفة أكبر من تمدد البرغي عند رفع درجات الحرارة.

5-1-3 تحليل قياسات درجات الحرارة:

- قيست درجة الحرارة الداخلية بواسطة حساس متوضع على بعد 100mm من شفة الربط، وتتغير خلال دورة العمل من $30^\circ C$ إلى $150^\circ C$ ، تقاس درجة الحرارة الخارجية في 6 نقاط مختلفة كما هو مبين في الشكلين (1و3).

- بينت مقاييس الحرارة في النقاط (5،4،3،6) أن الفارق في درجات الحرارة الخارجية في هذه النقاط صغير بحدود $10^\circ C$ ، وهي تتبع تغير درجات الحرارة الداخلية، والقيمة الوسطية لها تتغير من $45^\circ C$ إلى $140^\circ C$ ، والفارق بين هذه القيم وبين قيم الحرارة الداخلية على التوالي

يجب أن نتحقق من شرط الضغط الأعظمي هذا عند درجة حرارة عظمى، وكذلك عند وجود فرق في درجة الحرارة بين القطع المربوطة والبرغي.

ضغط التماس الأصغري المطبق عند الإجهاد الأصغري $P_m = 33MPa$ أكبر من الضغط الأعظمي للسائل (ضغط التزويد $1.1MPa$ و ضغط التشغيل $0.4MPa$) وهو ما يضمن الإحكام وعدم التسرب في البداية.

مواصفات جوان الغورتكس:

فايبر PTFE متوضع في اتجاهات متعددة

معامل يونج $E = 350-750MPa$ ،

معامل بواسون $\nu = 0.4$ ،

الحرارة التي يتحملها الجوان (من $-268^\circ C$ إلى $315^\circ C$)

ضغط الإحكام حتى $6.8MPa$.

تعود المشكلة الأساسية عند وضع هذا الجوان في الخدمة إلى الفرق الكبير بين معاملي التمدد لجوان الغورتكس:

$$a_G = 45.7 \times 10^{-6} / ^\circ C$$

ومعامل التمدد لمعدن أخدود الفولاذ الذي يتوضع فيه

$$a_S = 12.3 \times 10^{-6} / ^\circ C$$

ملاحظات:

• إذا وضع الجوان في المجرى الذي يتوضع فيه بخلوص صغير (وهو أمر غير موضح في المخطط التصميمي)، فإنّ الفرق بين معاملات التمدد يمكن أن يؤدي إلى ضغط كبير جداً في الجوان (احتمال عطب الجوان موضعياً)، أو إلى قوى كبيرة على البرغي، وهو ما يمكن أن يبرر الإجهادات المسبقة الصغيرة المطبقة في البداية.

- حدّد مقدار التمدد السطحي للجوان عند درجة حرارة التشغيل ($T_1=20^\circ C$, $T_2=150^\circ C$):

المسبق المطبق على البراغي) ممّا قد يكون السبب في بدء انحلال البراغي.

بالنسبة الى درجات الحرارة المقيسة في النقاط (6،5،4،3)

درجات الحرارة المنخفضة:

$$T_3 = 56^\circ\text{C}, T_4 = 50^\circ\text{C}, T_5 = 50^\circ\text{C}, T_6 = 54^\circ\text{C}$$

درجات الحرارة المرتفعة:

$$(T_3=144, T_4=137, T_5=141, T_6=136)^\circ\text{C}$$

درجات الحرارة المتوسطة في طور عملية التسخين:

$$T_3 = 98^\circ\text{C}, T_4 = 90^\circ\text{C}, T_5 = 90^\circ\text{C}, T_6 = 98^\circ\text{C}$$

الفرق في درجات الحرارة المقيسة صغير (لا يتجاوز 10°C)

4-1-5 استنتاجات:

1- الفرق الكبير في معامل التمدد الحراري بين جوان

الغورتكس ($a_T = 45.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) بالمقارنة بالفولاذ

$$(a_A = 12.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C})$$

2- الإجهاد المسبق المطبق على البراغي صغير ويؤدي

إلى نشوء ضغط تماس أصغري على الجوان قيمته

33MPa لتأمين الإحكام للسائل عند 0.4MPa، في

حين الضغط المسموح به للجوان هو 172MPa.

3- الفرق الكبير في درجات الحرارة بين الجزء العلوي

والسفلي للمرجل الذي قد يصل إلى 90°C (في أثناء

عملية رفع درجة الحرارة) يؤدي إلى تغيرات مهمة في

الشكل، ونتيجة الإجهادات الحرارية المتغيرة. قد يأخذ

الأخدود شكلاً بيضوياً، ممّا ينتج إزاحات جانبية كبيرة.

4- الفرق الصغير في درجات الحرارة الآتية الذي لا

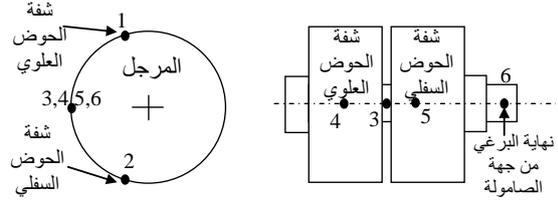
يتجاوز 10°C بين نقطتين متناظرتين على محيط

شفتي الربط. وبالتالي ظاهرة فرق التمدد كعامل لفقدان

الشد في البراغي ليست مرجحة.

بين 30°C و 150°C ناتج عن التبادل الحراري مع الوسط الخارجي.

- درجات الحرارة المقيسة في النقطتين 1 (الحوض العلوي) و 2 (الحوض السفلي):



الشكل (3) توضع نقاط قياس درجات الحرارة الخارجية

درجات الحرارة العظمى:

$$T_{2\max} = 138^\circ\text{C} \quad T_{1\max} = 147^\circ\text{C}$$

درجات الحرارة الصغرى: حسب دورات العمل بفارق

زمني مقداره 20 دقيقة:

$$90^\circ\text{C} = T_{1\min} \text{ تصبح بعد 20 دقيقة } T_{1\min} = 110^\circ\text{C}$$

$$23^\circ\text{C} = T_{2\min} \text{ تصبح بعد 20 دقيقة } T_{2\min} = 42^\circ\text{C}$$

نلاحظ خلال دورة العمل أن الفرق في درجة الحرارة

العظمى بين النقطتين 1 و 2 ثابت $\Delta T_{12} \sim 70^\circ\text{C}$

حسب الدورة المعتبرة $\Delta T_{1(\min/\max)} \sim 40^\circ\text{C} \text{ à } 60^\circ\text{C}$

حسب الدورة المعتبرة $\Delta T_{2(\min/\max)} \sim 96^\circ\text{C} \text{ à } 116^\circ\text{C}$

لوحظ فرق كبير في درجات الحرارة بين النقطة العليا

والنقطة السفلى خاصة عند درجات الحرارة المنخفضة ممّا

قد يؤدي إلى إجهادات حرارية متغيرة في جسم المرجل،

يمكن تعليل هذه الظاهرة بوجود عملية تسريع تبريد المرجل

برشه بالماء، وكذلك للماء المتبقي في قعر المرجل.

وهذا قد يؤدي إلى تغيرات في الشكل غير متناظرة،

تختلف قيمها بين قعر المرجل وجسمه، وتؤدي إلى إزاحات

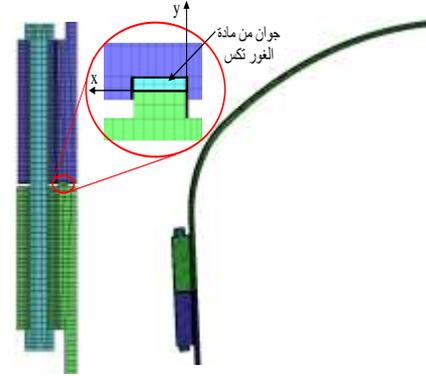
في مستوي حافة الربط (خاصة بسبب صغر قيمة الإجهاد

2-5 نمذجة الوصلة الميكانيكية لبرغي واحد

كما بيّنا فإنّ المسألة معقدة جداً، وكى نستطيع التحقق منها، فقد أجرينا مجموعة من التجارب العددية (المحاكاة) من أجل حالات التشغيل الحرجة. في كل تجربة محاكاة نقرأ القوى ضمن البرغي، الضغط المتوسط على الجوان، الإزاحات القطرية للأجزاء المختلفة، ويتم هذا من أجل قيمتين أصغرية وأعظمية لقوى الشد المحورية (Q_{mini} و Q_{maxi})

1-2-5 نموذج العناصر المنتهية:

إن بناء نموذج كامل للتركيب الميكانيكية المبيّنة في الشكل (1) صعب جداً، بسبب عدد البراغي الكبير وعدد سطوح التماس، لذلك نقوم بنمذجة قطاع من التركيب الميكانيكي يحتوي برغياً واحداً، ونعتمد في نمذجة البرغي والخلوص بين البرغي وثقب المرور على المقاييسات الفرنسية، والمقاييسات الأوروبية [10،8] المُعتمّدة في نمذجة البراغي والقووظات.



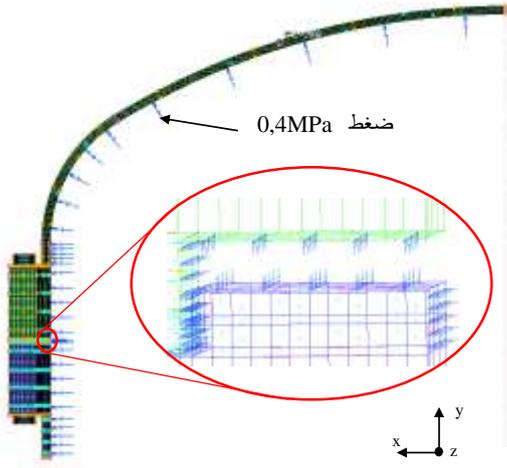
الشكل (4) النموذج الرقمي مع الشبكة في برنامج العناصر المنتهية

بيّن الشكل (4) النموذج المدروس والشبكة المعتمدة (mesh). هذا النموذج الذي يشمل قاع المرجل سيسمح بأخذ تأثيره بالحسبان والذي قد يكون له تأثير لا يمكن إهماله في تغيرات الشكل الناتجة عن تغير درجات الحرارة.

2-2-5 الشروط الحدية المعتمدة:

نطبق على النموذج الشروط الحدية الآتية:

- 1- منع الحركة على المحور z في مستوي التناظر.
- 2- منع حركة قاعدة القطعة السفلية في اتجاه المحور y (مسند مستو) (الشكل 5).



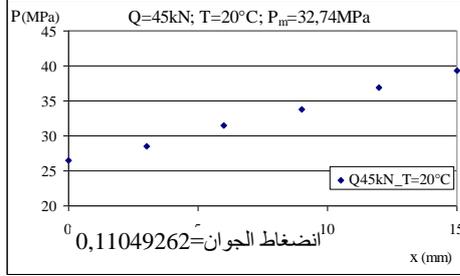
الشكل (5) الشروط الحدية والحمل

- 3- الإجهاد المسبق في البرغي تم الحصول عليه بتطبيق إزاحة بين رأس البرغي والقطعة العلوية باستخدام عناصر تماس خاصة تباعد بين السطوح المتلامسة ونأخذ معامل الاحتكاك $f=0.2$ (الشكل 6)، أيضاً أدخلت عناصر تماس دون احتكاك الى سطوح الجوان [7،1].
- 4- القوى الخارجية أدخلت كضغط منتظم قيمته $0.4MPa$ على الوجه الداخلي لقاع المرجل، وبين شفتي الربط (الشكل 5). 5- كما نطبق على عقد أجزاء النموذج درجة حرارة حسب حالة الحساب.

3-5 نتائج المحاكاة:

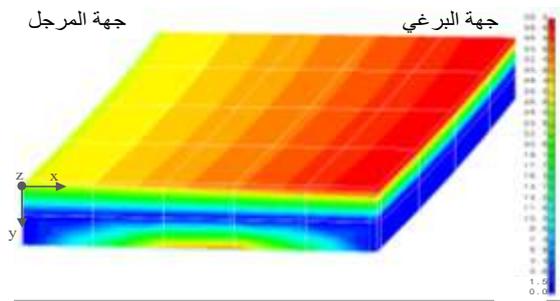
سنهتم بشكل خاص بضغط التماس المتوسط على جوان الإحكام، وكذلك بإجهاد الشد المتوسط في البرغي، وبالإزاحات المحورية والقطرية لحاقتي الربط (التي قد تؤدي الى انحلال البرغي).

الصغرى ذاتها التي تم الحصول عليها في الدراسة التحليلية، أما القيمة الصغرى 26MPa فهي كافية (أكبر من ضغط التزويد)، وانضغاط الجوان يساوي 0.11mm.

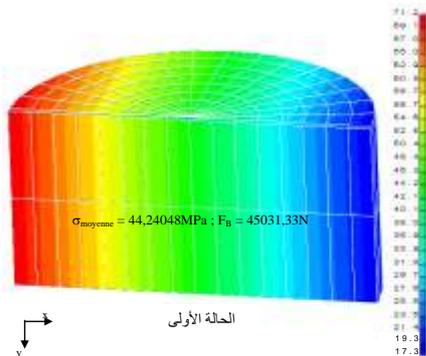


الشكل (7) ضغط التماس على الجوان كتابع للإحداثية x عند إجهاد مسبق أصغرى في البرغي

يبين الشكل (8) صورة حالة لتوزيع ضغط التماس على سطح جوان الإحكام، من الواضح أنّ ضغط التماس في الجوان ينخفض باتجاه جسم المرجل كلما ابتعدنا عن برغي الربط.



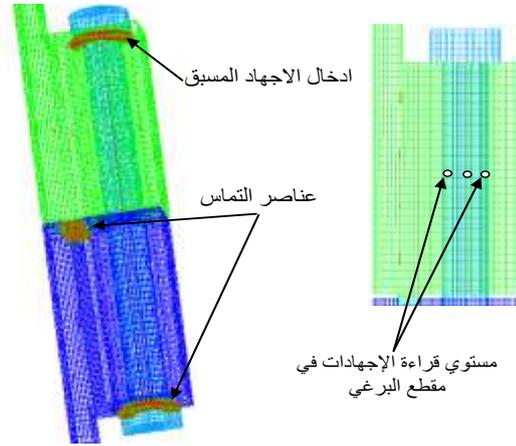
الشكل (8) توزيع ضغط التماس على الجوان عند إجهاد مسبق أصغرى



الشكل (9) الإجهاد باتجاه المحور y في البرغي مسبق الإجهاد.

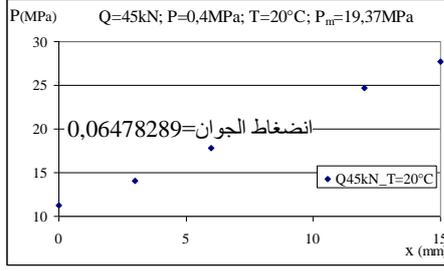
1-3-5 محاكاة سلوك التركيب عند تطبيق قوى شد محورية $Q = 45kN$ تعطي الإجهاد الأصغرى.

كخطوة أولى تطبق إزاحة لا على التعيين بين رأس البرغي والشفة العلوية، باستخدام عناصر تماس خاصة تباعد بين السطوح المتلامسة (element gap)، ويجري تشغيل البرنامج لإجراء الحساب، للحصول على إجهاد مسبق متوسط، يقارن بالإجهاد المطلوب، ثم تحسب الإزاحة الواجب تطبيقها للحصول على الإجهاد المسبق الأصغرى في وسط الشفة العلوية (الشكل 6) الموافق لقوة شد مقدارها 45kN في البرغي.

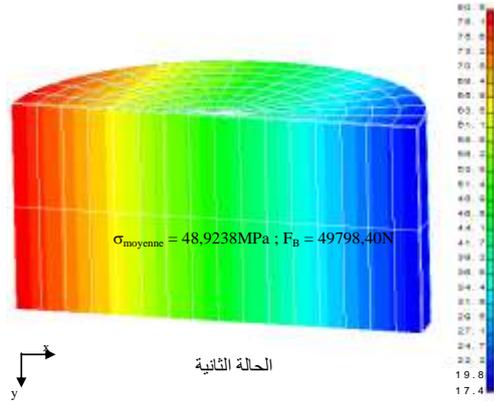


الشكل (6) تحديد عناصر التماس وتوضع عقد قراءة الإجهادات في البرغي

الحالة الأولى: تتضمن المرحلة الأولى من دورة العمل تطبيق الإجهاد المسبق الأصغرى في البرغي عند درجة حرارة المحيط، لذا طبقت على عقد التركيب كلّها درجة حرارة مساوية لدرجة الحرارة المحيطة ($T=20^\circ C$)، يبين المخطط البياني (الشكل 7) النتائج التي تم الحصول عليها لتغير ضغط التماس على جوان الإحكام بالنسبة الى الإحداثية x التي تمثل عرض الجوان، وقراءة انضغاط الجوان: ونلاحظ أنّ تغيّر ضغط التماس على الجوان خطي، وأن قيمته الكبرى من جهة برغي الربط، وأنّ القيمة الوسطية بحدود 33MPa وهي قيمة ضغط التماس



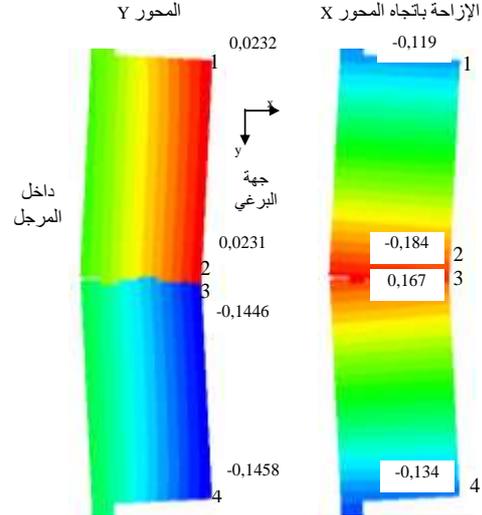
الشكل (11) ضغط التماس على الجوان كتابع للإحداثية x عند إجهاد مسبق أصغري في البرغي وضغط 0.4MPa.



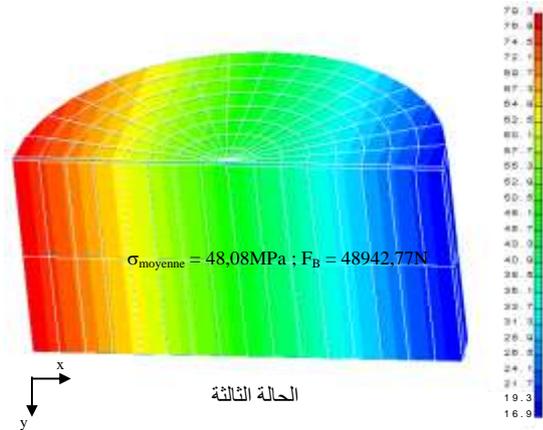
الشكل (12) الإجهاد باتجاه المحور y في البرغي مسبق الإجهاد

تم التأكد أنّ المخطط البياني في هذه الحالة (الشكل 11) له هيئة المخطط البياني نفسه في الحالة السابقة، وكذلك تأخذ صور الحالة (الشكلين 12، 13) الهيئة ذاتها. إن إضافة حمل الضغط يزيد بشكل طفيف الإجهادات في مقطع جسم البرغي (أقل من 10%) كما هو مبين في الشكل (12)، ويقلل بشكل ملحوظ انضغاط الجوان، وبنقص الانضغاط تقريباً تساوي النصف (0.064mm)، وينقص الضغط الأصغري على سطح الجوان بشكل ملحوظ من 26MPa إلى 11MPa (المخطط البياني في الشكل 11).

ويبين الشكل (9) صورة حالة لتوزيع الإجهادات في مقطع جسم البرغي، إذ نجد قيمة قوى الشد المسبق الأصغري المطبقة.

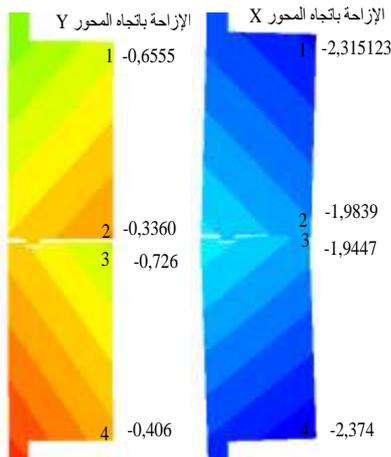


الشكل (10) الإزاحات في فلنشتي الربط حسب المحورين x,y يبين الشكل (10) صورة حالة للإزاحات وفق المحور الشاقولي Y، ولإزاحات وفق المحور الأفقي X، في أربع نقاط، علوية وسفلية، من ثقب مرور البرغي في شفتي الربط، ويبين أنّ انضغاط الجوان من الجهة الخارجية (جهة البرغي) أكبر من الجهة الداخلية (جهة المرجل). الحالة الثانية: تطبق في هذه الحالة قوى الشد المسبق 45kN التي تعطي الإجهاد المسبق الأصغري مضافاً إليه ضغطاً قيمته 0.4MPa لمحاكاة الحمل داخل المرجل (الشكل 5) عند درجة حرارة مساوية لدرجة الحرارة المحيطة (T=20°C)، فنحصل على المخطط البياني لضغط التماس على عرض جوان الإحكام (الشكل 11)، وانضغاط الجوان، وكذلك على الإجهادات المحورية في البرغي (الشكل 12)، والإزاحات في فلنشتي الربط (الشكل 13).

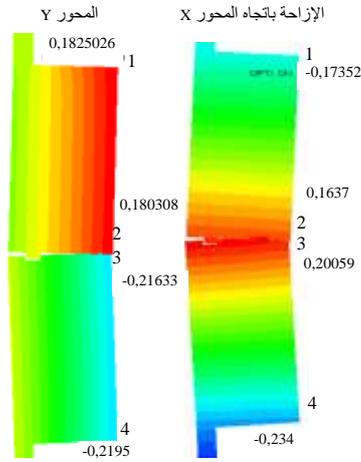


الشكل (15) الإجهاد باتجاه المحور y في البرغي مسبق الإجهاد

يأخذ المخطط البياني (الشكل 14) نفس هيئة المخطط البياني نفسه في الحالة السابقة، وكذلك تأخذ صورة الحالة (الشكل 15) الهيئة ذاتها. نلاحظ أن رفع درجة الحرارة لعناصر التركيبة الميكانيكية جميعها إلى درجة حرارة مستقرة 150°C لا تحمل تغيرات ملحوظة على النتائج، إذ نجد القيم الناتجة عن المحاكاة نفسها في الحالة الثانية. باستثناء الإزاحات في شفتي تثبيت المرجل (الشكل 16) التي تزداد بسبب التمدد الناتج عن رفع درجة الحرارة إلى 150°C .

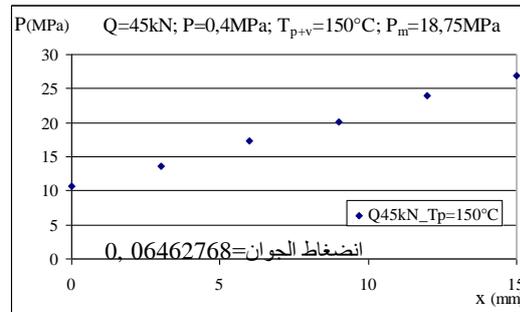


الشكل (16) الإزاحات في فلنشتي الربط حسب المحورين x,y (الحالة 3)

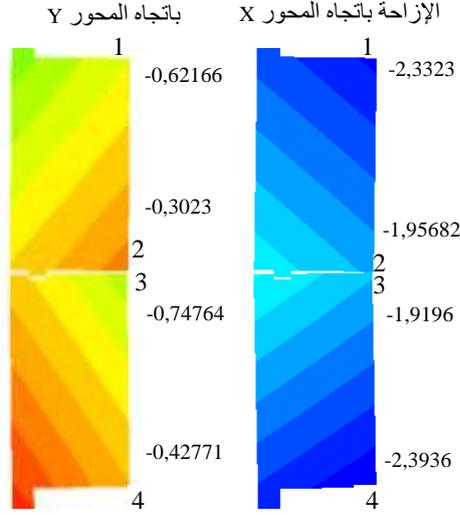


الشكل (13) الإزاحات في فلنشتي الربط حسب المحورين x,y في الحالة الثانية.

الحالة الثالثة: نطبق في هذه الحالة قوى الشد المسبق 45kN التي تعطي الإجهاد المسبق الأصغري مضافاً إليه ضغطاً قيمته 0.4MPa لمحاكاة الحمل داخل المرجل، ونطبق أيضاً على جميع عقد شبكة التركيب (mesh) جميعها درجة حرارة $T=150^{\circ}\text{C}$ ، نسجل قراءات ضغط التماس في الجوان وانضغاط الجوان، والإجهادات المحورية في البرغي، والإزاحات في فلنشتي الربط.



الشكل (14) ضغط التماس على الجوان كتابع للإحداثية x حالة 3

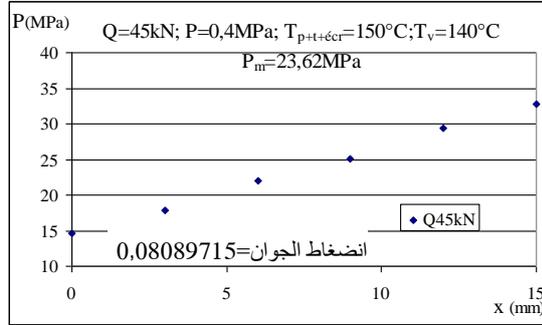


الشكل (19) الإزاحات في فلنشتي الربط حسب المحورين x,y يأخذ المخطط البياني (الشكل 17) هيئة المخطط البياني نفسه في الحالة السابقة وكذلك تأخذ صورتها الحالة (الشكل 18 والشكل 19) الهيئة ذاتها. وهي نتائج قريبة جداً من نتائج المحاكاة في الحالة السابقة (حيث درجة حرارة أجزاء التركيب جميعها $T=150^{\circ}\text{C}$).

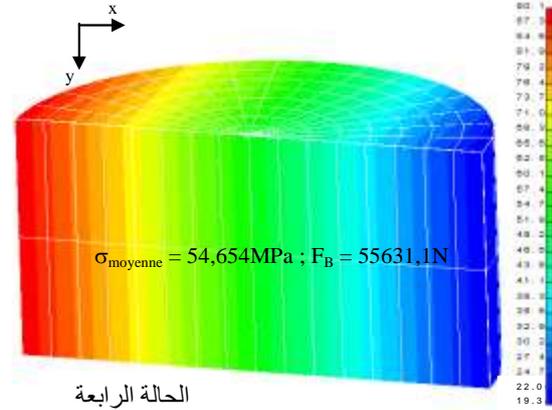
كما نلاحظ أن تطبيق حرارة أقل في جسم البرغي ترفع الإجهاد المسبق إلى 54.6MPa ، أي بزيادة أكثر من 20% نسبة إلى الحالة الأولى (الشكل 9)، ولكنها تنقص انضغاط الجوان إلى $0,08\text{mm}$ أي أقل بنحو 25% نسبة إلى الحالة الأولى.

الحالة الخامسة: نطبق في هذه الحالة الإجهاد المسبق الأصغري في البرغي، وحمل ضغط داخل المرجل $0,4\text{MPa}$ ، وعلى عقد شفتي الربط ورأس البرغي والصامولة درجة حرارة مقدارها $(T=50^{\circ}\text{C})$ ، ودرجة حرارة على عقد جسم البرغي مقدارها $(T=60^{\circ}\text{C})$ وفق القياسات التجريبية، نسجل القراءات ونأخذ صور الحالة، كما في الحالات السابقة:

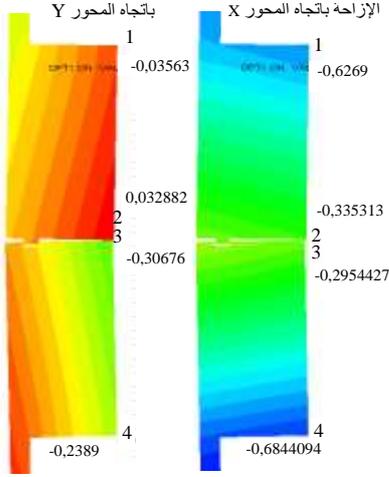
الحالة الرابعة: نطبق في هذه الحالة الإجهاد المسبق الأصغري مضافاً إليه ضغط قيمته $0,4\text{MPa}$ لمحاكاة الحمل داخل المرجل، ونطبق أيضاً على عقد شفتي الربط ورأس البرغي، وكذلك الصامولة جميعها درجة حرارة $(T_{\text{part}}=150^{\circ}\text{C})$ ، كما نطبق على جسم البرغي درجة حرارة $(T_{\text{bolt}}=140^{\circ}\text{C})$ وفق القياسات التجريبية (الحساس 3 الشكل 3)، ونسجل قراءات ضغط التماس في الجوان وانضغاط الجوان، والإجهادات المحورية في البرغي، والإزاحات في فلنشتي الربط.



الشكل (17) ضغط التماس على الجوان كتابع للإحداثية x في الحالة الرابعة.



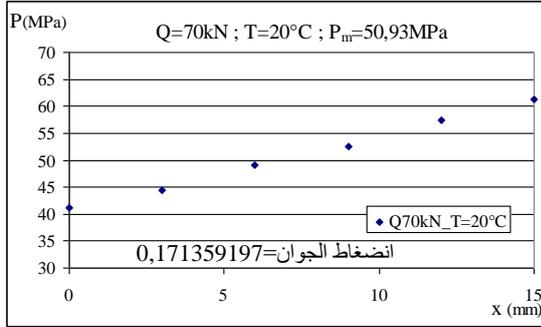
الشكل (18) الإجهاد باتجاه المحور y في البرغي مسبق الإجهاد



الشكل (22) الإزاحات في فلنشتي الربط حسب المحورين x, y في الحالة الخامسة.

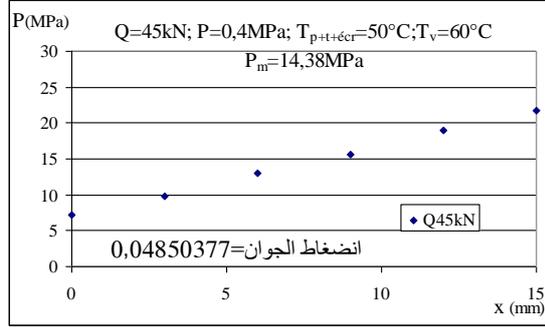
2-3-5 محاكاة سلوك التركيب الميكانيكي عند تطبيق قوى شد مقدارها $Q=70\text{kN}$ في البرغي تعطي الإجهاد المسبق الأعظمي.

الحالة السادسة: نطبق في هذه الحالة إجهاداً مسبقاً أعظماً متوسطاً في البرغي، دون حمل ضغط، عند درجة حرارة المحيط الخارجي ($T=20^\circ\text{C}$)، فنحصل على النتائج المبينة في الأشكال (23، 24، 25):

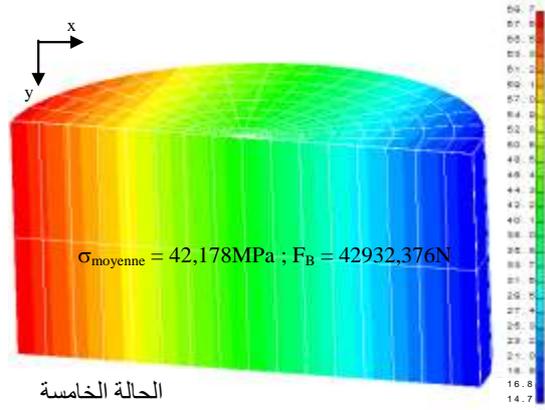


الشكل (23) ضغط التماس على الجوان كتابع للإحداثية x في الحالة السادسة.

نقارن هذه الحالة بحالة تطبيق قوى الشد $Q=45\text{kN}$ التي تعطي الإجهاد الأصغري في البرغي. في حالة قوى الشد العظمى $Q_{\text{maxi}}=70\text{kN}$ نجد منطقياً أن الإجهادات في



الشكل (20) ضغط التماس على الجوان كتابع للإحداثية x في الحالة الخامسة.

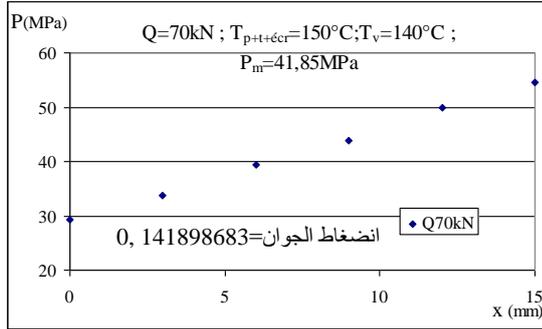


الحالة الخامسة

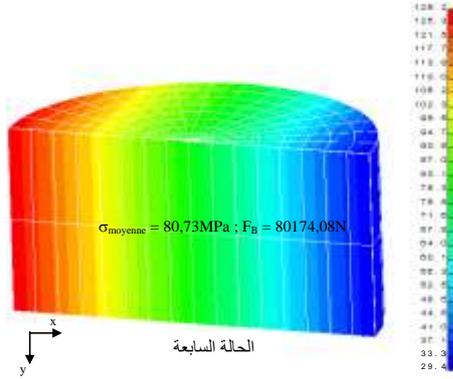
الشكل (21) الإجهاد باتجاه المحور y في البرغي.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها في نهاية دورة العمل انخفاضاً طفيفاً في الإجهاد المسبق في البرغي بحدود (5%) (الشكل 21)، وكذلك تظهر انخفاضاً كبيراً في انضغاط الجوان أكثر من 55%، وذلك بمقارنة قيمة انضغاط الجوان في هذه الحالة 0.048mm بالقيمة الأولية 0.11mm (الشكل 21 والشكل 22) وانخفاضاً كبيراً في ضغط التماس يصل إلى أكثر من 70%، وذلك بمقارنة الحد الأدنى لضغط التماس وهو 7MPa (الشكل 21) بالقيمة الأولية لضغط التماس 26MPa (الشكل 7)، وهي نتيجة مهمة جداً.

مضافاً إليه ضغطاً قيمته 0.4MPa لمحاكاة الحمل داخل المرجل، ونطبق أيضاً على عقد شفتي الربط ورأس البرغي وكذلك الصامولة جميعها درجة حرارة $T_{part}=150^{\circ}C$ ، كما نطبق على جسم البرغي درجة حرارة ($T_{bolt}=140^{\circ}C$) وفق القياسات التجريبية، نسجل القراءات ونأخذ صور الحالة كما في الحالات السابقة:



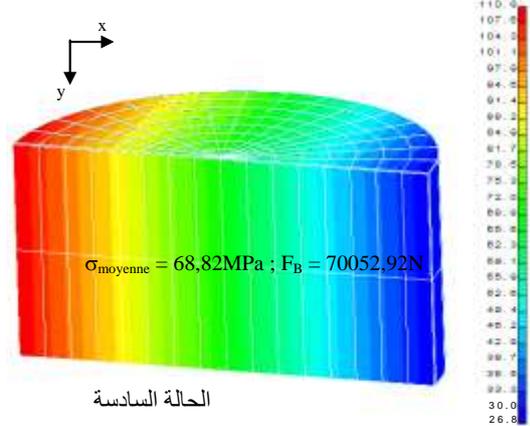
الشكل (26) ضغط التماس على الجوانب كتابع للإحداثية x في الحالة السابعة.



الشكل (27) الإجهاد باتجاه المحور y في البرغي مسبق الإجهاد

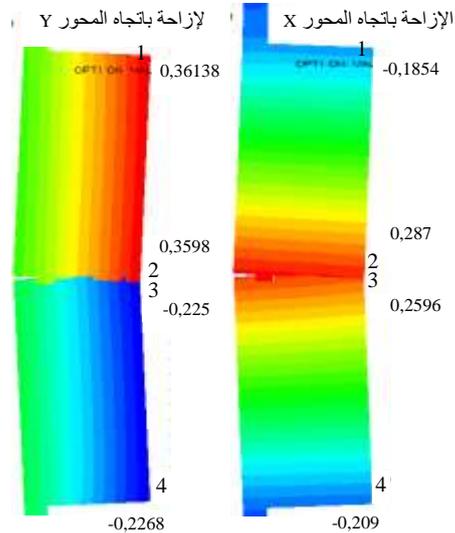
تظهر النتائج التي تم الحصول عليها زيادة في الإجهادات في البرغي بنحو 17% من 68.82MPa (الحالة السادسة الشكل 24) إلى 80.73MPa (الشكل 27)، وكذلك انخفاضاً في انضغاط الجوانب بنحو 21% من 0.17mm إلى 0.14mm (الشكل 23 والشكل 26).

البرغي تتناسب طردياً مع قوى التحميل المسبق المطبق (الشكل 24).



الشكل (24) الإجهاد باتجاه المحور y في البرغي.

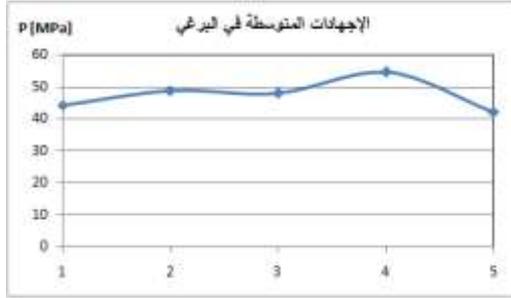
هناك تأثيرات مهمة في ضغط التماس في مستوي جوانب الإحكام، وفي انضغاط الجوانب (الشكل 23). ازداد ضغط التماس الأصغري إلى 41MPa، أي بنسبة 58% (الشكل 9 والشكل 23)، كما ازداد انضغاط جوانب الإحكام إلى 0.1713mm أي بنحو 55%.



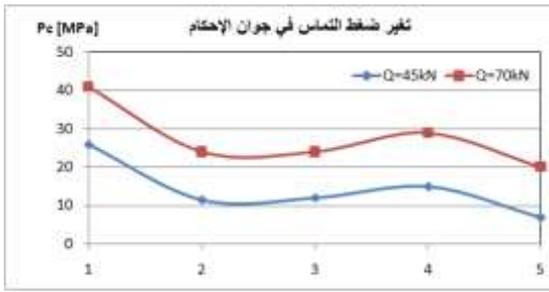
الشكل (25) الإزاحات في فلنشتي الربط حسب المحورين x,y في الحالة السادسة.

الحالة السابعة: نطبق في هذه الحالة قوى الشد المسبق 70kN التي تعطي الإجهاد المسبق الأعظمي

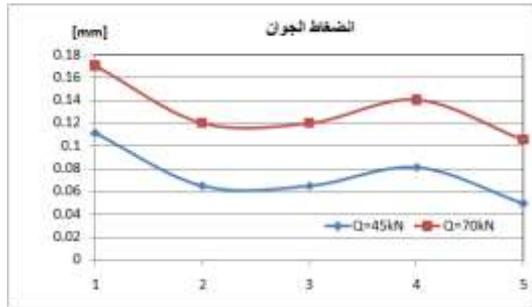
واضح في ضغط التماس الأصغري في الجوان الشكل (30)، لكنه كاف لضمان الإحكام كما يبين الشكل (31) انخفاض انضغاط الجوان إلى نحو 0.048mm، وهي قيمة ضعيفة مقارنة بالقيمة الأولية 0.11mm.



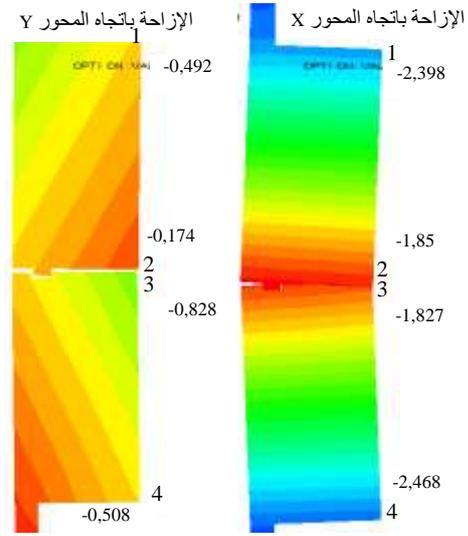
الشكل (29) تغير الإجهادات المتوسطة في مقطع البرغي خلال دورة العمل.



الشكل (30) تغير ضغط التماس في جوان الإحكام خلال دورة العمل.



الشكل (31) تغير انضغاط جوان الإحكام خلال دورة العمل.



الشكل (28) الإزاحات في فلنشتي الربط حسب المحورين x,y في الحالة السابعة.

6 - النتائج

من خلال تحليل نتائج المحاكاة نحصل على نقاط عدّة مهمة:

- تغير قيم البارامترات الحرجة أثناء دورة التشغيل. نجد أن متوسط الإجهاد في أثناء الدورة يتغير قليلاً (الشكل 29)، وتقع القيم بين 42MPa و 55MPa. ومع ذلك يجب النظر إلى هذه القيم بحذر نظراً إلى زيادة الإجهادات المحتملة بسبب تغير درجات الحرارة خلال دورة العمل.

الاختلافات الملحوظة بين الحالة 3 والحالة 4 إذ درجة حرارة جسم البرغي تنخفض من 150° إلى 140° تبين أنه من الضروري أن نكون حذرين في مستوى قيم الإجهادات التي نوصي بها للبرغي نظراً إلى تأثير تغير درجات الحرارة بين عناصر الربط المختلفة. نلاحظ انخفاض الإجهاد المسبق في نهاية دورة التشغيل، مما يؤدي إلى انخفاض كبير في انضغاط الجوان. مع أن الجوان يبقى في حالة انضغاط قيمته منخفضة جداً.

- تغير ضغط التماس الأصغري في الجوان وقيمة تشوهه خلال دورة العمل. في نهاية الدورة هناك انخفاض

يؤدي إلى وصول البرغي الى حد اللدونة. وبالنظر إلى نتائج المحاكاة، فإن زيادة بنسبة 50% في الإجهاد المسبق الذي يمكن أن يطبق على البراغي يجب أن تسمح بحل هذه المشكلة.

عند تطبيق مزدوجة عزم قيمتها 600N.m على البرغي، تكون قيمة القوى المحورية الناشئة في مقطع البرغي $Q_m = 85105N$

بإدخال معامل أمان الشد $1,5 = a_s$ لمفتاح الربط نحصل على القيمة القصوى والدنيا للقوى المحورية الناشئة في البرغي:

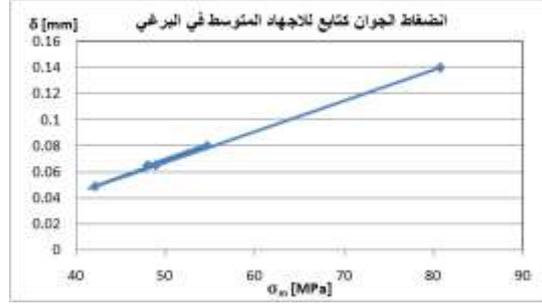
$$68085N < Q < 102127N$$

يجب التحقق من أن الحد الأقصى للضغط على الجوان عند الحد الأقصى للقوى المحورية الناشئة في مقطع البرغي $Q_{max} = 102127N$ لا يتجاوز القيمة المسموح بها. إن التناسب شبه الطردي بين الضغط في الجوان والإجهاد المسبق في البرغي يسمح بحساب ضغط التماس الأقصى في جوان الإحكام وقيمته 90MPa، وهذه القيمة أصغر كثيراً من الحد الأقصى المسموح به للضغط في الجوان 172MPa.

الحد الأدنى للقوى المحورية الناشئة في مقطع البرغي $Q_{min} = 68085N$ يسمح بالحفاظ على انضغاط أصغري قيمته 0.1mm خلال دورة العمل كافية لضمان الإحكام.

7- الخلاصة

مكثت هذه الدراسة من وضع مسار لحساب التراكيب المجمعّة بواسطة البراغي التي تتعرض لضغوط حرارية كبيرة. وقد سمحت باستخراج نقاط أساسية عدّة :
- أهمية زيادة قيمة التحميل المسبق وتطبيقه بدقة، وأخذ معامل أمان الشد بالحسبان في أثناء الحساب التصميمي.



الشكل (32) انضغاط جوان الإحكام كتابع للإجهاد المتوسط في البرغي.

- إن مقدار انضغاط الجوان كتابع للإجهاد المتوسط في مقطع البرغي خلال دورة العمل يؤكد أهمية الإجهاد المسبق (الشكل 32). ومن المهم أن نذكر أيضاً أن المحاكاة أجريت لقطاع من شفتي الربط يحتوي برغياً واحداً. يؤدي التباعد المحيطي بين كل برغيين على التوالي إلى اختلافات ضغط التماس في جوان الإحكام.

- الإجهاد المسبق المطبق على البراغي ضعيف جداً، يمكن زيادته لضمان إحكام المجموعة عند الإجهادات الحرارية المتغيرة.

- أكبر ضغط تماس ظهر في الجوان هو 61.5MPa عند تطبيق الإجهاد المسبق الأعظمي الموافق لقوة شد محورية تساوي 70kN، وهي قيمة صغيرة جداً إذا قورنت بقيمة ضغط التماس المسموح به لجوان الإحكام، والذي يساوي 172.4MPa.

- يرتبط انضغاط الجوان بالإجهاد المتوسط في مقطع البرغي، إن زيادة الإجهاد المسبق تؤدي إلى تحسين الإحكام.

علينا إذاً البحث عن حل توافقي بين الحد الأقصى للإجهاد المسبق الذي يجب أن يطبق في البرغي للحصول على ضغط تماس في الجوان لا يتجاوز القيمة المسموح بها 172.4MPa وبين الحد الأدنى للإجهاد الذي يسمح بإحكام جيد خلال دورة العمل. كما يجب التحقق من أن الحد الأقصى للإجهاد المسبق الذي يجب أن يطبق ولا

REFERENCES

- [1] Alkatan F, Stephan P, Daidié A, Guillot J: «Equivalent axial stiffness of various components in bolted joints subjected to axial loading » Finite Elements in Analysis and Design. Volume 43,n° 8, P 589 – 598 ,May (2007).
- [2]. Aziz H., « Étude du dévissage spontané des assemblage boulonnés ».Thèse de doctorat, INSA Toulouse, Mars (2003).
- [3] Benhaddou T., Stephan P., Daidie A., Alkatan F., Chirol C., Tuery J.B., « Effect of axial preload on durability of aerospace fastened joints » International Journal of Mechanical Sciences 137 214–223 (2018).
- [4] Bickford J.H., Nassar S., «Handbook of Bolts and Bolted Joints», Marcel Dekker. Inc., (1998)
- [5] Dominik J., Zmindak M., «Spontaneous Unfastening and Fatigue of Bolted Joints», Manuf. and Ind. Eng., 11(1), ISSN 1338-6549 (2012).
- [6] GUILLOT J.,« Assemblage par éléments filetés; modélisation et calculs», Techniques de l'ingénieur, Tome 1 B5563 1–11 (1997).
- [7] I-DEAS (Integrated Design and Engineering Analysis Software) « Technical Documentation Software ».
- [8] Norme européenne, norme française des éléments de fixation. Caractéristiques mécaniques des éléments de fixation. NF EN NF - EN ISO 3506; Janvier (2010)
- [9] Rafik V., Daidié A., Combes B., «Etude numérique du mouvement vis-écrou dans le dévissage spontané sous sollicitations transverses» 15e Colloque National AIP-Priméca, La Plagne (73) – 12 au 14 avril (2017).
- [10] Recueil de norme ISO., « Éléments de fixation - Extrémités des éléments à filetage extérieur métrique ISO », (2012).
- [11] Vanhille C., Lavie A., Campos-Pozuelo C. « Modélisation numérique en mécanique » ISBN 9782746218673, 320 pages, Hermès - Lavoisier, (2007).
- [12] VDI 2230 «Systematische Berechnung Hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zylindrische Einschraubverbindungen», VDI Richtlinien, ICS 21.060.10, VDI- Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Fachberuch

- يجب اختيار قيمة التحميل المسبق: للحصول على ضغط تماس كاف لضمان الإحكام والحفاظ على سلامة الجوانب مع بقاء الإجهاد في البرغي ضمن مجال مرونة معدن البرغي.
- أهمية الجمع بين البيانات التجريبية لتحديد قيم الأحمال، والمقارنة التحليلية لتحديد الإجهاد المسبق الذي يجب تطبيقه، ومقارنة رقمية تسمح بفهم تعقيد المشكلة المطروحة.
- ينصح بشد البراغي بشكل متقابل ومتسلسل بحيث تشد البراغي جميعها شدة خفيفة، ثم تشد بعزم أكبر، ثم بالعزم النهائي المطلوب.
- ينصح باستخدام لاصق فرملة بين أسنان البرغي والصامولة، أو باستخدام رنديلات خاصة (ذات شفة)، أو عمل ثقوب قطرية في نهاية البرغي من جهة الصامولة، وربط عدة براغي مع بعضها لتجنب بدء انحلال البراغي.

Konstruktion,Ausschuss,Schraubenverbindungen,
(2003).

[13] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z.,
« The Finite Element Method: Its Basis and
Fundamentals» 6 edition, Butterworth -
Heinemann, (2005).

Received	2018/04/05	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2018/07/02	قبول البحث للنشر