

## محاكاة سلوك قطعة ميكانيكية ممسوكة بين لوحين مجمعين بالبراعي باستخدام البرمجيات المتقدمة

د . م . فراس القطان\*

### الملخص

نطرح في هذا البحث مثالا تطبيقياً نعالج من خلاله مشكلة تحمل البراعي المُجمعة لقطعة ميكانيكية ممسوكة عن طريق الحصر بين لوحين يربطان إلى بعضهما بواسطة البراعي، ويؤمن الاحتكاك بينهما وبين القطعة الملقوطة عملية التجميع، يتطلب تصميم القطع الميكانيكية المجمعة وحسابها بتقنية اللقط هذه، نمذجة معقدة باستخدام البرمجيات التي تعمل بمبدأ العناصر المنتهية، وتحتاج إلى وقت كبير لإنجاز الحساب [7،8،12،14].  
نقترح من خلال المثال المدروس، طريقة مبتكرة تعتمد على الجمع بين النمذجة بالعناصر المنتهية، وعلى مقارنة تحليلية تسمح من جهة بالتحقق من سلوك قطع الربط، ومن جهة ثانية بتقديم حلول تقنية مناسبة.

الكلمات المفتاحية: العناصر المنتهية، النمذجة، المحاكاة، التجميع بواسطة البراعي، طرائق الربط، طريقة التجميع باللقط.

## **Simulation the behavior of a mechanical piece clamping between two discs assembled by bolts using the advanced software**

**Dr. Feras Alkatan \***

### **ABSTRACT**

In this article we present an application example where we treat the problem of broken bolts, jointed a mechanical pieces maintained between tow discs in a clamping technique, the friction between them and the clamped piece preserves the assembly process. The dimensioning of part assembly by clamping method requires a heavy modelling with finite elements and prohibitive computing time [7;8;12;14].

This article proposes, based on a studied example, a method using the coupling of modelling with finite elements and an analytical approach that makes it possible to check the behaviour of the assembly on the one hand and to bring adapted technological solutions on the other hand.

**Keywords:** Finite element method, Modelling, simulation, Bolted assembly, Tightening techniques, Clamping assembly.

---

\* Department of automotives engineering and heavy machinery - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Damascus University.

## 1- المقدمة:

عرفت منظومة البرغي والصامولة منذ القدم، وكانت تستخدم ميكانيزم لنقل الحركة وتحويلها وتخفيض القوى، ويعود استخدامها كوسيلة للتجميع، القابل لل فك والتركيب، إلى العصور الوسطى.

إن التجميع بواسطة البراغي هو (من دون شك) وسيلة الربط الميكانيكية الأكثر استخداماً. وإذا أخذنا بالحسبان عددها وأهميتها في البناء الميكانيكي فإنها تمثل بشكل مؤكد رهاناً اقتصادياً مهماً.

تستخدم في الصناعة خمس طرائق أساسية للربط الميكانيكي مراقبة من قبل صانعي البراغي:

1. الربط بمزدوجة (بواسطة مفتاح ديناميكي).
2. الربط حتى حدود المرونة (مراقبة آلية للعزم والزاوية).
3. الربط باستخدام مشد هيدروليكي.
4. الربط بالتحمية (يستخدم للأقطار الكبيرة).
5. الربط بزواوية.

يضاف إلى هذه الطرائق الأساسية طرائق تجميع غير شائعة، وتستخدم على نطاق ضيق، كالتجميع بأسلوب اللقط، ويتم عن طريق حصر القطعة المراد مسكها بين قطعتين أخريين تربطان إلى بعضهما بواسطة البراغي، ويؤمن الاحتكاك بينهما وبين القطعة الملقوطة عملية التجميع، ولم تظهر الدراسة المرجعية عن التجميع بأسلوب اللقط وجود بحوث مرجعية في هذا المجال، إن الطرق المتاحة لدراسة موضوع كهذا يمكن أن تعتمد إما طريقة النمذجة باستخدام برمجيات العناصر المنتهية للحساب التصميمي [1،5،6،15]، أو استخدام الطرائق التحليلية التي تعتمد على صيغ الإجهادات والتشوهات [13]، أو على مقاومة المواد.

## 2- المشكلة المعالجة:

طرح مركز الابتكارات ونقل التكنولوجيا الفرنسي الذي يعمل في المجال الصناعات الميكانيكية مشكلة تكسر براغي الربط المجمع لجهاز كتلته 5.3kg ذي شكل قرصي بحافة مخروطية ممسوك بين قرصين بتقنية اللقط، إذ يشد هذان القرصان إلى بعضهما بواسطة 12 برغي برؤوس مخروطية، وبقطر 3mm يؤمن التماس عن طريق سطحي اللقط المخروطيين، ويثبت القرص السفلي الحامل للتركيب المجمع.

الجهاز الممسوك يهتز بتسارع مقداره 40 ضعف تسارع الجاذبية الأرضية وفق الاتجاهين المحوري (الموازي لمحور التركيب) والعرضي. البراغي والجهاز الممسوك وكذلك الألواح المجمع مصنوعة من معدن التيتانيوم (الشكل 1).

وطلبت هذه الشركة تبيان سبب تكسر براغي الربط، ومعالجة المشكلة، واقتراح طريقة لمنع تكسر هذه البراغي.

## 3- هدف البحث:

إن لدراسة التجميع بأسلوب اللقط أهمية كبيرة، لأنه لم يحظ بدراسة خاصة تبين سلوك عناصر التثبيت تحت الحمل الخارجي، وتغيرات الإجهادات في البراغي عند تطبيق الحمل الخارجي. تقدم هذه الدراسة حلاً تقنيّة مناسبة لحل مشكلة تحمل براغي الربط المطروحة، وكذلك دراسة لمدى ملاءمة هذه الطريقة في التجميع لحالات الحساب على التعب، إذ شرحت مراحل النمذجة، وكيفية الجمع بين النمذجة بالاعتماد على برمجيات العناصر المنتهية، وبين مقارنة تحليلية [11]: تسمح بتقدير السلوك الإجمالي للوصلة تحت الحمل العرضي، وهو أمر يصعب إنجازه بطرائق النمذجة إلى حد كبير بسبب الحاجة لحواسيب ذات

- رسم التركيبة الميكانيكية المراد دراستها من خلال الوحدة (Master Modeler).

- تقسيم التركيبة إلى عناصر صغيرة تدعى عناصر منتهية، وإعطاء كل جزء منها الخواص الميكانيكية المحددة في الوحدة (Meshing).

- وضع الشروط الحدية، وتطبيق الأحمال الخارجية في الوحدة (Boundary Conditions).

- بناء النموذج الحسابي وإجراء الحساب ( Model Solution).

- إظهار النتائج المختلفة على شكل صور من خلال الوحدة (Post Processing).

ويكون دور المستثمر للبرنامج بعد إدخال المعطيات وإجراء الحساب، تحليل النتائج التي تعطى على شكل صور حالة لونية وجداول، من خلال نقلها إلى أحد برامج تحليل البيانات مثل برنامج Excel إذ يقوم المستثمر بمعالجتها، ورسم المخططات البيانية الناتجة عنها، ودراستها ووضع الاستنتاجات الخاصة بكل حالة.

#### 5- منهجية البحث المتبعة:

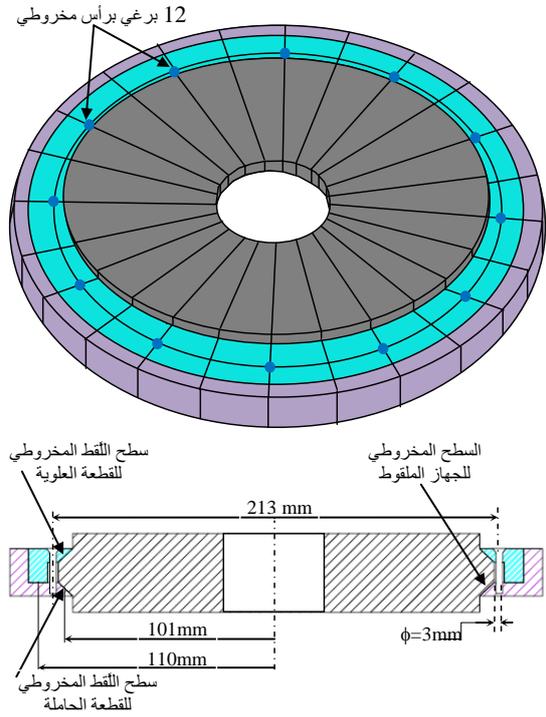
ينتج تكسر البراغي عن عدة أسباب، منها: التحميل الزائد، نوعية معدن البرغي، وكذلك انحلالها أو عدم شدها إلى الحدود المطلوبة، أي عدم تطبيق الإجهاد المسبق المناسب، وهي المسألة التي عالجناها وحاولنا إيجاد حلول مناسبة لها في هذا البحث، وقد اتبعنا في الدراسة المنهجية الآتية:

#### أولاً عن طريق النمذجة والمحاكاة:

- البحث عن الإجهاد المسبق الأصغري الذي يؤمن تماسك التركيبة المجمعّة عند تطبيق قوى محورية خارجية.

إمكانات كبيرة وسعة تخزين عالية (حاسوب مركزي)، وتساعد في اختصار وقت الحساب، ووضع نموذج قادر على إعطاء نتائج سريعة.

أفدنا في هذا البحث من دراسة سلوك التركيب تحت الحمل الديناميكي المحوري المستخرج من برنامج العناصر المنتهية في المقاربة التحليلية لأخذ الحمل العرضي بالحسبان.



الشكل (1) منظور ومقطع أمامي للتركيبة المجمعّة

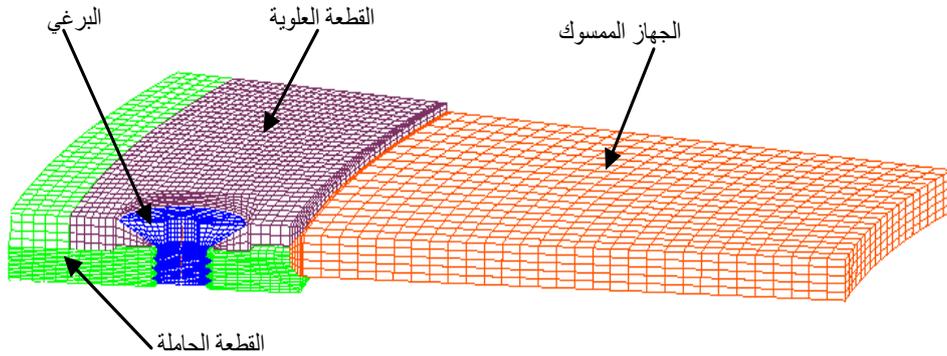
#### 4- أدوات البحث

استخدمنا في بحثنا طريقة النمذجة ثلاثية الأبعاد باستخدام برنامج Ideas [7]، وهو برنامج يعمل بمبدأ العناصر المنتهية، واعتمد في مجموعة من الشركات الكبرى، مثل ايرباص وبوينغ، لوثوقية نتائجه في مجال الحساب التصميمي. تُتبع لإجراء النمذجة والمحاكاة بالاعتماد على هذا البرنامج المراحل الآتية:

إن بناء نموذج كامل للتركيب الميكانيكية المقترحة في الشكل (1) صعب جداً بسبب عدد البراغي الكبير، وعدد سطوح التماس، لتبسيط عملية النمذجة وبالإفادة من خواص التناظر للتركيب المدروسة نقوم بتجزئة التركيب إلى 24 قطاعاً زاوياً بحيث نحصل في القطاع الواحد على نصف برغي.

نحاكي إذاً التركيب الميكانيكية ببناء نموذج رقمي هو عبارة عن قطاع زاوي زاويته  $15^\circ = \frac{360^\circ}{24}$  معتمدين على المقاييس الفرنسية، والمقاييس الأوروبية [10،9] المُعتمَدة في نمذجة البراغي والقووظات.

يبين الشكل (2) القطاع المدروس والشبكة المعتمدة (mesh).



الشكل (2) النموذج الرقمي في برنامج العناصر المنتهية (قطاع زاوي زاويته  $15^\circ$ )

2- شروط تناظر على وجهي القطاع، وعلى الطرف الأيمن للجهاز الملقوط (الشكل 3) [7].  
3- الإجهاد المسبق الذي لم نتمكن من تطبيقه بواسطة تقنية تغيير درجة حرارة جزء من ساق البرغي بسبب قصره، فقد تم الحصول عليه بتطبيق إزاحة بين رأس البرغي المخروطي والقطعة العلوية باستخدام

- إيجاد الإجهاد المسبق الأعظمي الذي يمكن تطبيقه على البرغي دون الوصول إلى حالة اللدونة،  
- تحليل الإجهادات في مقطع البرغي عند تطبيق القوة الخارجية مع الإجهاد المسبق وتعرّف حالة التحميل الأكثر خطورة (حالة الشد، حالة الضغط)،  
- مناقشة نتائج المحاكاة،

ثانياً دراسة تحليلية تتضمن: البحث عن الإجهاد المسبق الأصغري تحت الحمل المحوري، والمقارنة بنتائج المحاكاة، والبحث عن شروط التماسك تحت الحمل العرضي.

ثالثاً: اقتراح حلول تقنية مناسبة.

1-5 النمذجة ثلاثية الأبعاد باستخدام العناصر المنتهية:

1-1-5 بناء النموذج:

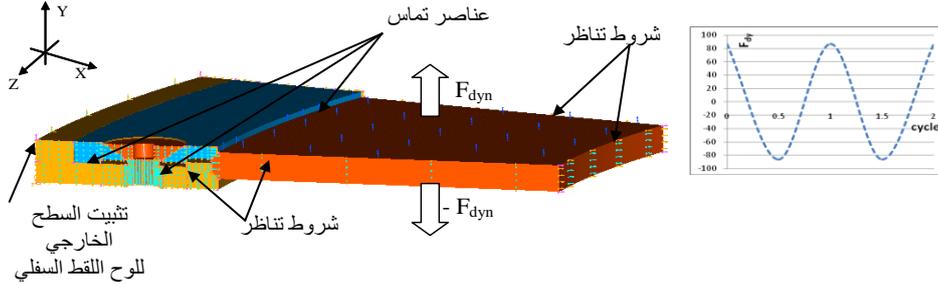
#### 2-1-5 الشروط الحدية المعتمدة:

نطبق على النموذج الشروط الحدية المعطاة في المسألة المطروحة (مساند التثبيت، وعناصر التماس، والقوى الخارجية المطبقة)، وكذلك شروط التناظر التي تفرضها طبيعة النموذج المقترح:

1- تثبيت السطح الخارجي للقطعة السفلية الحاملة

عناصر تماس خاصة تباعد بين السطوح المتلامسة [7،1].  
الحاملة (القاعدة) والقطعة العلوية، وأيضاً بين سطوح اللقطة المخروطية (شكل 3).

4- تمت نمذجة أسنان البرغي وأسنان قلووظ القطعة الحاملة، وأدخلت عناصر تماس مع معامل احتكاك بين الأسنان المتداخلة، وكذلك بين القطعة  
5- القوى الديناميكية أدخلت كضغط منتظم على الوجهين العلوي ثم السفلي للقطعة الصلبة التي تحاكي الجهاز الممسوك (الشكل 3).



الشكل (3) الشروط الحدية المطبقة على النموذج

$$F_{sector} = \frac{2079,72}{24} = 86.65N$$

من أجل حمل ديناميكي أعظمي  $F_{max} = 86.65N$  مطبق على القطاع الزاوي بحث عن الإجهاد المسبق الأصغري، الواجب تطبيقه على البرغي للحصول على التماسك بين القطع المجمعة، والموافق لضغط تماس قريب من الصفر على سطوح اللقطة المخروطية، وقد أنجزت مجموعة من تجارب المحاكاة العددية الأولية باستخدام برنامج Ideas للتحقق من ضغط التماس على سطحي مخروط القطعة التي تمثل الجهاز الممسوك، حيث طبقت قيم متعددة للإجهاد المسبق في البرغي، وأخذت قراءة ضغط التماس المتبقي في العقدة الموضحة في الشكل (4) التي نراقب من خلالها بدء فقد التماسك بين القطع المربوطة عند تطبيق قوى الشد الديناميكية.

يبين الشكل (4) صورة الحالة لضغط التماس على السطحين المخروطيين للجهاز الممسوك الناتج عن تطبيق إجهاد مسبق مقداره 120MPa على البرغي مضافاً إليه حمل الشد الخارجي.

2-5 دراسة التركيبية الميكانيكية تحت القوى الديناميكية المحورية:

تتضمن الدراسة الأجزاء الآتية:

#### 1-2-5 البحث عن الإجهاد المسبق الأصغري

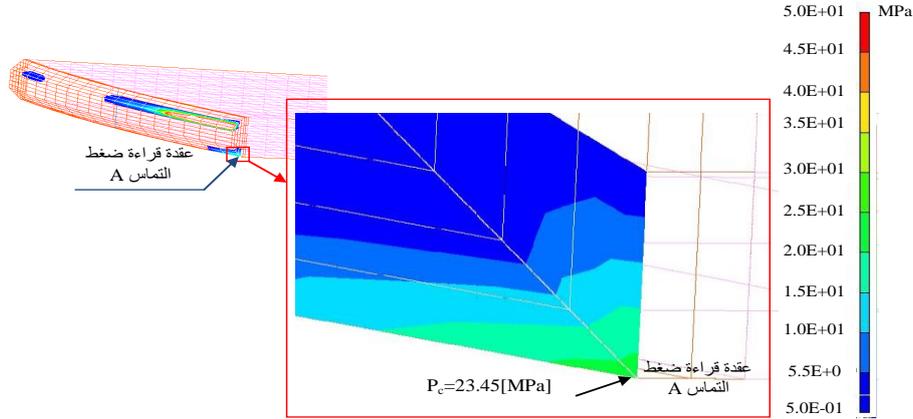
يجب أن يحقق الإجهاد المسبق الأصغري التماسك بين أجزاء التركيبية المجمعة عند تطبيق الحمل الخارجي، ويراقب ضغط التماس على سطوح التماس المخروطية، إذ تشير قيمة ضغط التماس لوجود تماسك بين القطع المجمعة، ويبدأ فقد التماسك عندما يصبح ضغط التماس مساوياً للصفر. حسبت القوة الديناميكية الخارجية الكلية الواجب تطبيقها على الجهاز الممسوك من خلال كتلته والتسارع المطبق عليه، كما يأتي:

$$F_{total} = 40 \times g \times 5.3 = 40 \times 9.81 \times 5.3 = 2079,72N$$

ومن ثم تكون القوة الديناميكية الخارجية التي يتحملها برغي واحد هي:

$$F_{total-i} = \frac{2079,72}{12} = 173.31N$$

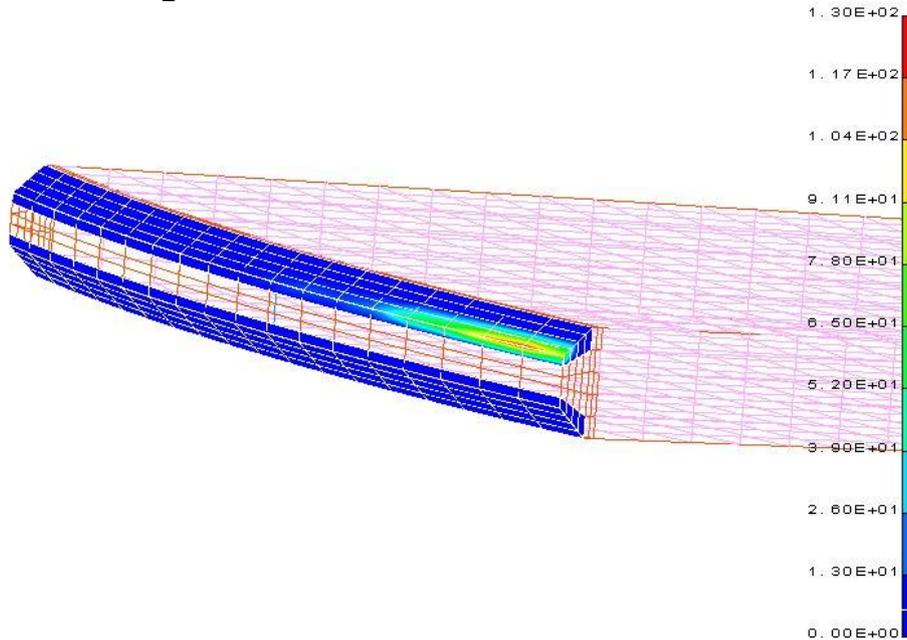
والقوة الديناميكية المطبقة على القطاع المدروس:



الشكل (4) ضغط التماس على السطحين المخروطيين للجهاز الممسوك في حالة إجهاد مسبق في البرغي مقداره 120MPa مع حمل شد خارجي

نلاحظ في الشكل (5) أن قيمة ضغط التماس على السطح المخروطي السفلي للقطعة الممسوكة يساوي الصفر، أي أن محصلة القوى المطبقة على التركيبة الميكانيكية (الإجهاد المسبق وحمل الشد الخارجي) لا تحقق التماسك بين القطع المربوطة

كما يوضح الشكل (5) صورة الحالة لضغط التماس على السطحين المخروطيين للجهاز الممسوك الناتج عن تطبيق إجهاد مسبق على البرغي مقداره 100MPa مع حمل شد خارجي.



الشكل (5) ضغط التماس في حالة إجهاد مسبق في البرغي مقداره 100MPa مع حمل شد خارجي

أجريت عدة تجارب محاكاة، وأخذت قراءة ضغط التماس في العقدة الموضحة في الشكل (4) على السطح السفلي لمخروط طرف الجهاز الممسوك من أجل إجهادات مسبقة متعددة مطبقة على البرغي، النتائج التي حصلنا عليها مبينة في الجدول (1)

### نتيجة:

إذا طبقنا على البرغي إجهاداً مسبقاً أصغرياً مقداره  $\sigma_{y\min} = 120 \text{ MPa}$  فإننا نضمن تماسك المجموعة على مستوى السطوح المخروطية التي تمسك الكتلة.

### الجدول (2) توزيع الإجهاد على قطر البرغي

حالة التحميل	إجهاد مسبق	إجهاد مسبق + قوى شد	إجهاد مسبق + قوى ضغط
X [mm]	$\sigma$ [MPa]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]
1.24	522.25	621.61	557.73
1.21	386.64	460.26	413.01
1.18	298.58	355.64	318.96
1.11	207.16	247.06	221.16
1.05	161.52	192.97	172.26
0.98	138.02	165.19	147.12
0.92	114.86	137.93	122.44
0.73	99.14	119.82	105.89
0.55	87.38	105.77	93.26
0.37	80.96	97.82	86.29
0.18	77.39	93.79	82.55
0.00	75.77	92.56	81.06
-0.18	74.84	92.43	80.40
-0.37	75.50	94.89	81.69
-0.55	78.83	101.14	86.07
-0.73	84.27	111.05	93.03
-0.92	91.68	122.73	101.67
-0.98	110.29	145.38	121.51
-1.05	131.28	170.12	143.78
-1.11	172.06	220.19	187.92
-1.18	250.17	319.54	273.45
-1.21	323.47	413.91	353.89
-1.24	434.76	557.78	475.98

تم أخذ قراءة الإجهادات (حسب معيار فون ميزيس) في العقد الموزعة على قطر البرغي في مستوي التناظر (الشكل 8) من برنامج العناصر المنتهية، في ثلاثة حالات: حالة تطبيق الإجهاد المسبق الأصغري فقط، وفي حالة تطبيق الإجهاد المسبق الأصغري مع حمل شد خارجي، والإجهاد المسبق الأصغري مع حمل ضغط خارجي الجدول (2).

وتم رسم المنحني البياني الذي يعطي توزيع إجهاد فون ميزيس كتابع لإحداثيات العقد على القطر في حالات التحميل الثلاثة بواسطة برنامج Excel (الشكل 7).

### الجدول (1) ضغط التماس عند إجهادات مسبقة متعددة

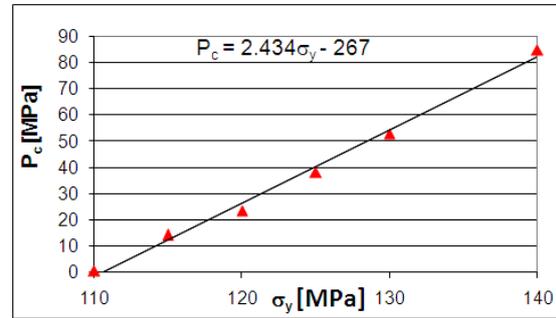
الإجهاد المسبق $\sigma$ [MPa]	ضغط التماس $P_c$ [MPa]
110	0.57
115	14.18
120	23.45
125	38.17
130	53.1
140	82.33

من خلال برنامج بواسطة برنامج Excel رسم المنحني الذي يعطي ضغط التماس المتبقي كتابع للإجهاد المسبق (شكل 6).

نلاحظ أن النقاط التجريبية في الشكل (6) تقع تقريباً على استقامة واحدة، يمكن إذاً التعبير عن المنحني البياني بالمعادلة الخطية الآتية:

$$P_c = 2.434\sigma_y - 267$$

من هذه المعادلة يمكن استخراج قيمة الإجهاد المسبق الأصغري  $\sigma_{y\min}$  الموافق لضغط تماس يساوي الصفر  $P_c=0$ .



الشكل (6) ضغط التماس كتابع للإجهاد المحوري المتوسط

$$\sigma_{y-\min} = \frac{P_c + 267}{2.434} = \frac{267}{2.434} = 109.7 \text{ MPa}$$

بإضافة 10% (كمعامل أمان للحصول على تماسك دائم [6]) يكون الإجهاد المسبق الأصغري المطلوب تطبيقه على البرغي  $\sigma_{y-\min} = 120 \text{ MPa}$ .

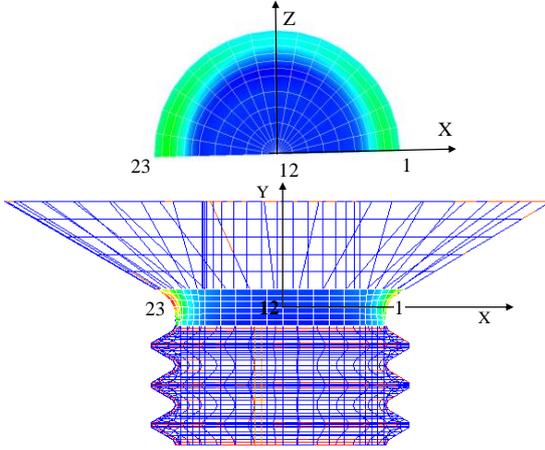
تم حساب القوى الناتجة عن الإجهاد المسبق الأصغري في مقطع البرغي وهي:

$$Q_{\min} = S \times \sigma_{y\min} = 4.84 \times 120 = 580.8 \text{ N}$$

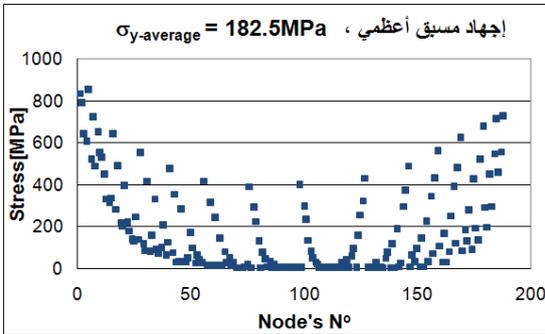
حيث S: المقطع المقاوم للبرغي.

البرغي في حالة تطبيق الإجهاد المسبق الأعظمي في مقطع البرغي فقط، وأخذت قراءات الإجهادات في العقد المتوضعة في مقطع البرغي، وتم رسم المخطط البياني الذي يعطي توزع الإجهادات في مقطع البرغي بواسطة برنامج Excel الشكل (9)، وتم حساب الإجهاد المحوري المتوسط لمجموع العقد في المقطع

$$\sigma_{Y-average} = 182.5MPa$$



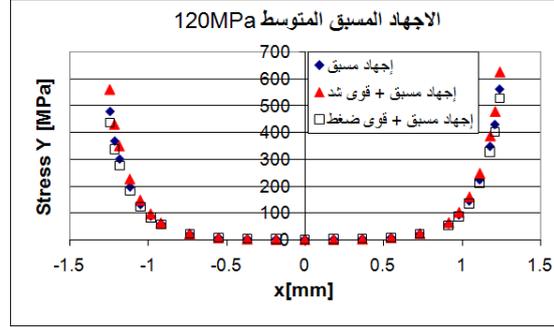
الشكل (8) توزع الإجهادات في مقطع البرغي



الشكل (9) توزع إجهاد فون ميزيس في مقطع البرغي في حالة إجهاد مسبق أعظمي فقط

بعد ذلك تم إضافة حمل الشد الخارجي إلى الإجهاد المسبق الأعظمي، وبنفس الطريقة تم رسم المخطط البياني الذي يعطي توزع الإجهادات في مقطع البرغي الشكل (10)، وتم كذلك حساب الإجهاد المحوري المتوسط لمجموع العقد في المقطع:

$$\sigma_{y-average} = 196MPa$$



الشكل (7) توزع إجهاد فون ميزيس على قطر البرغي في حالة إجهاد مسبق أصغري، وإجهاد مسبق أصغري مع حمل شد، وإجهاد مسبق أصغري مع حمل ضغط خارجي.

### نتيجة:

نلاحظ من المخطط البياني (الشكل 7) أن الإجهادات تزداد في مقطع البرغي عند تطبيق الحمل الخارجي، وتكون الزيادة في الإجهادات في حالة حمل الشد الخارجي أكبر من حالة حمل الضغط الخارجي، في الجزء التالي من البحث سنهتم فقط بحالة تطبيق إجهاد مسبق مع حمل شد خارجي.

### 2-2-5 سلوك التركيبة تحت حمل ديناميكي

وإجهاد مسبق أعظمي: تحليل الإجهادات في مقطع البرغي:

يتحدد الإجهاد المسبق الأعظمي من خلال الإجهاد المسبق الأصغري الذي حدد سابقاً بإدخال معامل أمان الشد  $\alpha_s = 1.5$  الذي يأخذ بعين الاعتبار الضياعات الناتجة عن مفتاح الشد (مفتاح ديناموميتر) وتلك الناتجة عن معامل الاحتكاك [5,6]، وبحيث لا يتجاوز حد المرونة لمعدن البرغي.

$$Q_{max} = Q_{min} \times \alpha_s = 870N$$

الأعظمي الذي يمكن تطبيقه على البرغي يساوي  $\sigma_{y-max} = 180MPa$ .

الشكل (8) هو صورة حالة مستخرجة من برنامج العناصر المنتهية تبين توزع الإجهادات في مقطع

إذ:  $\sigma_1$  الإجهاد المتوسط الناتج في البرغي عند تطبيق الإجهاد المسبق الأعظمي فقط.

$\sigma_2$  الإجهاد المتوسط الناتج في البرغي عند تطبيق الحمل الخارجي مع الإجهاد المسبق الأعظمي.

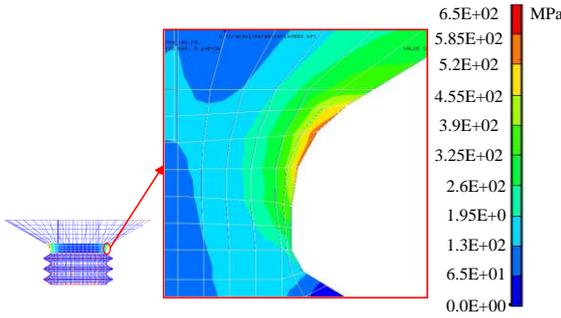
### 3-5 النتائج ومناقشتها

إن تحليل هذه النتائج على درجة كبيرة من الأهمية إذ

يبين أن:

. المقطع الأكثر تحملاً ليس مقطع السن الأول من

البرغي كما هو معلوم بالنسبة للتجميع بالبراغي [6,4,1]، بل هو مقطع الجزء الرابط بين جسم البرغي ورأسه (عق الاتصال) وهي نتيجة توثق ما هو معروف في حالة التجميع بواسطة البراغي ذات الرؤوس المخروطية باستخدام التقنيات الحديثة (الشكل 12).



الشكل (12) توزيع الإجهادات عند عقن الاتصال بين الجزء المقلوظ ورأس البرغي

- معامل تركيز الإجهادات المحسوب عند عقن

الاتصال كبير جداً ( $K_t = \frac{589}{120} = 4.9$ )، وهو ما يتفق

مع دليل تركيز الإجهادات [4].

- يكتسب التجميع بطريقة اللقط أهمية خاصة لأن

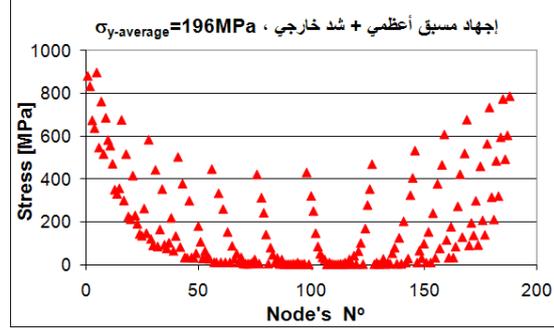
تطبيق الحمل الخارجي لا ينتج إلا تغيراً صغيراً جداً في

قيم الإجهادات في مقطع البرغي حوالي 6% (مناسب

جداً في حالات الحساب على التعب).

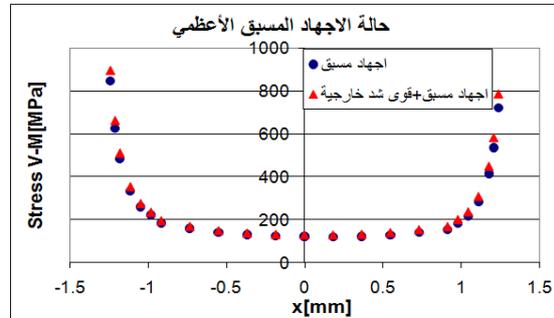
تم التقاط عدة صور حالة لبعض نتائج الحساب في

برنامج العناصر المنتهية، تبين صورة الحالة في



الشكل (10) توزيع إجهاد فون ميزيس في مقطع البرغي في حالة إجهاد مسبق أعظمي مع حمل شد خارجي.

كما تم تسجيل قراءة الإجهادات في العقد الواقعة على قطر البرغي في مستوي التناظر (12,X,Y) وفي المقطع (12,X,Z) (الشكل 8) لحالتي الحساب السابقتين، وتم رسم المخطط البياني في الشكل (11) الذي يعطي توزيع الإجهادات حسب معيار فون ميزيس على قطر مستوي التناظر في حالتي تطبيق الإجهاد المسبق الأعظمي فقط، والإجهاد المسبق الأعظمي مع حمل شد خارجي. بواسطة برنامج Excel.



الشكل (11) توزيع إجهاد فون ميزيس على قطر البرغي في حالتي إجهاد مسبق أعظمي وإجهاد مسبق أعظمي مع حمل شد خارجي.

نلاحظ عند دراسة هذه المخططات البيانية أن

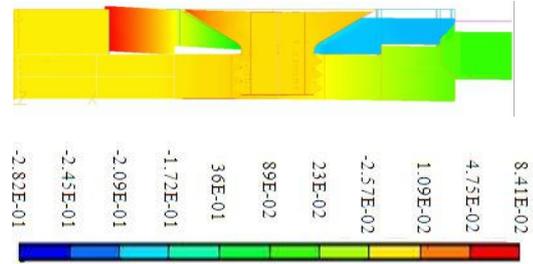
الزيادة في الإجهادات المتوسطة في مقطع البرغي

الناتجة عن تطبيق الحمل الخارجي صغيرة جداً،

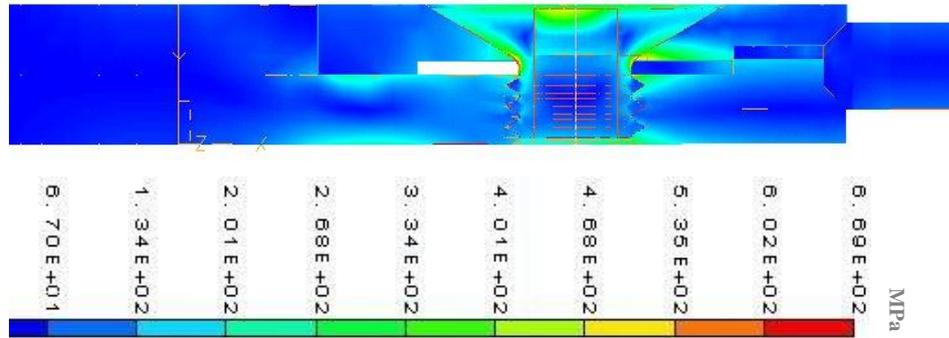
ويعطى الانحراف النسبي بالعلاقة:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_2} = \frac{196 - 182.5}{196} = 0.06 = 6\%$$

الشكل (13) الإزاحات الناتجة في التركيبة الميكانيكية المدروسة عند تطبيق إجهاد مسبق بدون حمل.



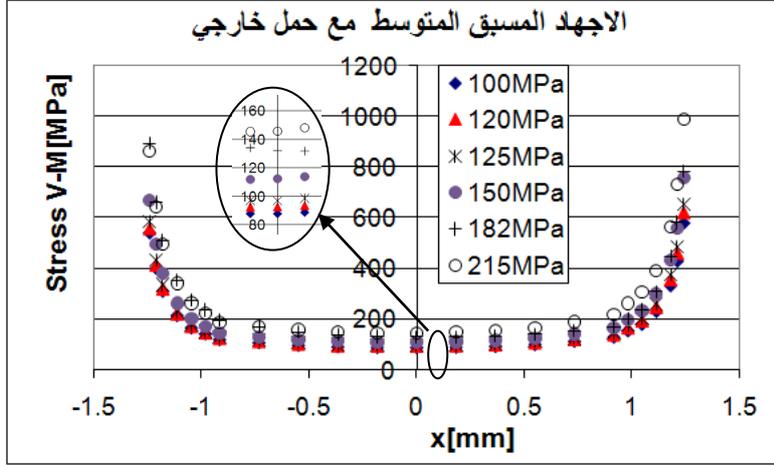
الشكل (13) الإزاحات الناتجة في التركيبة الميكانيكية المدروسة بالمليمتر عند تطبيق إجهاد مسبق بدون حمل



الشكل (14) إجهاد فون ميزيس في التركيبة مسبقة الإجهاد مع حمل أعظمي

تم أخذ قراءات الإجهادات حسب معيار فون ميزيس على قطر البرغي في مستوي التناظر في حالة تطبيق إجهادات مسبقة متعددة مع حمل الشد الخارجي، من برنامج العناصر المنتهية ونقلت إلى برنامج Excel حيث تم رسم المنحنيات البيانية التي تبين توزيع الإجهادات لكل حالة تحميل (إجهاد مسبق مع حمل الشد الخارجي) كما هو مبين في الشكل (15).

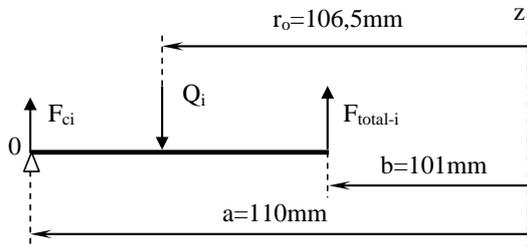
وتبين صورة الحالة في الشكل (14) توزيع الإجهادات في التركيبة عند تطبيق إجهاد مسبق وحمل أعظمي  $F_{max}$  ويظهر مقياس التدرج اللوني قيمة الإجهاد في كل عنصر من عناصر التركيبة المجمعة، من الواضح أن الإجهادات الأكثر خطورة تقع عند عنق اتصال البرغي مع الرأس المخروطي، بينما لا نلاحظ إجهادات كبيرة في باقي أجزاء التركيبة.



الشكل (15) توزع إجهاد فون ميزيس على قطر البرغي في حالة إجهادات مسبقة متعددة مع حمل شد خارجي.

العناصر المنتهية لا بد من نمذجة نصف المجموعة (أي قطاع زاوي مقداره 180 مؤلف من ستة براغي)، وبالنظر للعدد الكبير للسطوح المتماسة ووجود معامل الاحتكاك بينها فإن زمن النمذجة والحساب يصبح كبيراً جداً.

أظهر الجزء الأول من الدراسة أنه في حال التماسك يمكن اعتبار القوى الإضافية الناتجة في البرغي نتيجة تطبيق القوى الخارجية مهملاً. يمكننا إذاً أن نقترح نموذجاً بسيطاً نعتبر فيه أجزاء التركيبة الميكانيكية المدروسة عبارة عن مجموعة من الألواح المتماسة، سيمكننا عزل لوح اللقط العلوي من حساب قوى التماس الصغرى  $F_{ci}$  بين لوحي اللقط العلوي والسفلي في حالة الإجهاد المسبق الأصغري الذي يضمن تماسك الأجزاء المكونة للمجموعة (الشكل 16).



الشكل (16) توازن اللوح العلوي

المنحنيات المرسومة تأخذ الهيئة ذاتها لحالات الإجهادات المسبقة المختلفة، ويبين المخطط البياني أن الإجهادات العظمى المقروءة في البرغي عند تطبيق الإجهاد المسبق الأعظمي المحسوب في الفقرة 2.2.5 مع قوى الشد الخارجية لا يتجاوز 900MPa، وتكون الإجهادات الدنيا المقروءة للحالة نفسها حوالي 130MPa.

### 5-3-1 النتيجة:

- الإجهادات الأعظمية المقروءة قريبة جداً من 900MPa وهو حد المرونة للتيتانيوم TA64. تعتبر هذه الحالة مقبولة، لأنها تمثل قيمة حدية، خاصة أن التركيز الكبير للإجهادات قد يؤدي للوصول إلى حالة اللدونة في مناطق محدودة ومحلية [2]. - يعتبر احتمال بدء التشقق وبالتالي الانهيار ضعيف جداً بالمقارنة مع هامش الأمان.

- إن تحسين دقة الشد تمكننا من تصغير الإجهاد المسبق الأعظمي المطبق على البرغي، وبالتالي الحصول على إجهادات الأعظمية أقل من حد المرونة لمعدن التيتانيوم.

### 5-4 دراسة تحليلية: البحث عن شروط التماسك (عدم الانزلاق) تحت الحمل العرضي

لدراسة سلوك المجموعة المجمع تحت الحمل العرضي باستعمال طرق النمذجة المعتمدة على مبدأ

يمكن تحديد قيمة معامل الاحتكاك الأصغري بين اللوحين المتماسين والذي من أجله يكون احتمال الانزلاق معدوماً لأن القوى القاصة الإضافية تكون معدومة في البرغي عند الحمل المسبق الأصغري.

$$F_f = F_{ci} \times f \Rightarrow f = \frac{F_f}{F_{ci}}$$

$$f = \frac{86.65}{272.3} = 0.3$$

حيث: f معامل الاحتكاك

من جهة ثانية فإن تحليلاً تقنياً سريعاً يبين أن القطع المجمع المبينة في الشكل (1) تظهر سيئتين أساسيتين:

1- احتمال كبير بعدم التوافق بين توضع البراغي ذات الرأس المخروطي والمركزة التي يجب أن تتحقق بين السطحين المخروطيين

2- إذا كان رأس البرغي يضغط عند الإجهاد المسبق على جزء واحد من السطح المخروطي لرأسه فإن هذا سيترجم:

أ- في حالة الشد بإجهاد انحناء غير معروف متعلق بخطأ توضع البرغي وبالإجهاد المسبق المطبق والذي يمكن أن ينتج بدء الانهيار باعتبار أن الحمل كبير.

ب- تحت حمل ديناميكي متناوب قد يسبب انحلالاً محتملاً للبراغي [3] (يتوجب إذن استخدام نقطة لحام تحت رأس البرغي أو فرملة الأسنان بالمواد اللاصقة) إذا لم يكن من الضروري إغراق رأس البرغي في القطعة العلوية فإننا ننصح باستخدام براغي ذات رأس أسطواني مع خلوص علوي، مما يسمح للألواح العلوية والسفلية بأن تبقى دوماً في حالة مركزة.

من الواضح أنه يجب مراقبة عملية تطبيق الإجهاد المسبق على البرغي (شد البرغي) حتى نحافظ على التماسك بين القطع المجمعة، وهنا تواجهنا صعوبة في التنفيذ ناتجة عن صعوبة تطبيق الإجهاد المسبق بدقة، يمكننا حساب مزدوجة الشد التي يجب تطبيقها على رأس البرغي بواسطة مفتاح الربط للحصول على الإجهاد المسبق المطلوب كما يأتي:

نكتب معادلات التوازن معتبرين أن مجموع الأحمال المسبقة في البراغي  $\sum Q_i$  موزعة بشكل منتظم على دائرة توضع البراغي.

$$\sum M_o = 0 \Rightarrow 9F_{total-i} - 3.5Q_i = 0$$

نحدد قيمة الحمل المسبق الأصغري الواجب تطبيقه على برغي واحد لضمان التماسك بين الأجزاء المكونة للتركيبية هو:

$$Q_i = \frac{9F_{total-i}}{3.5} = \frac{9 \times 173.31}{3.5} = 445.6N$$

وتكون قيمة الإجهاد المسبق الأصغري المتوقع تطبيقه على البرغي للمحافظة على التماسك تحليلاً:

$$\sigma_{\min-Analy} = \frac{Q_i}{S} = \frac{445.6}{4.84} \approx 92MPa$$

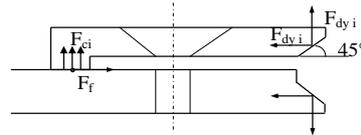
ويكون الانحراف النسبي بين النتيجة المحسوبة تحليلاً وتلك المستخلصة من برنامج العناصر المنتهية بحدود 15%، يعتبر هذا الفارق مقبولاً بسبب ارتفاع قيمة الإجهاد محلياً بالقرب من السطح الخارجي لمقطع البرغي، حيث يؤخذ معامل تركيز الاجهادات بالاعتبار أثناء الحساب بطريقة العناصر المنتهية (شكل 8)، بينما لا يمكن أخذ تركيز الاجهادات بعين الاعتبار في النموذج التحليلي. بسبب فرضيات التبسيط المتبعة فيه.

وتحسب قوى التماس الأصغري  $F_{ci}$  بين لוחي اللقط العلوي والسفلي عند تطبيق الإجهاد المسبق الأصغري المحسوب عن طريق العناصر المنتهية كما يلي:

$$\sum F = 0 \Rightarrow F_{total-i} + F_{ci} - Q_i = 0$$

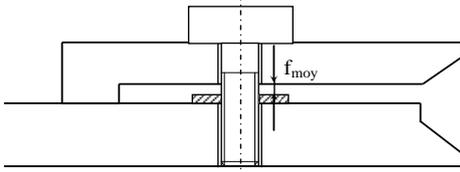
$$F_{ci} = Q_{\min} - F_{total-i} \Rightarrow F_{ci} = 445.6 - 173.3 = 272.3N$$

كما أنه يمكننا التحقق بسهولة من التماسك الإجمالي للتركيب (الشكل 17) تحت القوى العرضية الديناميكية حتى نضمن أن البراغي لا تتحمل أي قوى قص يمكن أن تنتج إجهادات انحناء كبيرة جداً.



الشكل (17) التماسك الإجمالي للتركيب

سهم إزاحة يعطي هذا الإجهاد، ومن ثم معرفة الخلوص الواجب تركه بين البرغي والمسند ثم الشد حتى الوصول إلى المسند شكل (18)، وهو حل مناسب لأنه يساعد على عدم انحلال البراغي.



### الشكل (18) مقترح من أجل ضبط الإجهاد المسبق

2- برأينا، إن الأكثر صعوبة هو الحصول على تماس جيد بين مخروط رأس البرغي والقطعة الحاملة للبراغي كلها، فالتماس السيئ (على جزء من المخروط) يحدث قوى انحناء وإجهادات إضافية غير قليلة، ولا يمكن تقديرها إلا بصعوبة بالغة، وهنا أيضاً تواجهنا مشكلة انحلال البراغي تحت الحمل العرضي (لذلك يجب لصق الأسنان المتداخلة كما هو منصوح به في الدراسة [3]).

3- نوصي باستخدام براغ ذات رؤوس اسطوانية وخلوصات مَرَكِزة كافية لتحسين التماس ثنائي المخروطية بين القطع الحاملة والكتلة الملقوطة.

الجدول (3) قيمة الإجهاد للعقد المتوضعة في مقطع البراغي (للتشكيلين 9، 10).

رقم العقدة	قيمة الإجهاد [MPa] في حالة اجهاد مسبق أعظمي (شكل 9)	قيمة الإجهاد [MPa] في حالة اجهاد مسبق أعظمي + حمل شد (شكل 10)
1	835.54	883.77
2	789.91	835.55
3	639.45	676.31
4	604.51	639.45
5	850.91	900.02
6	518.35	548.26
7	721.74	763.78
8	489.72	518.09

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

اذ:

$$p = 0,45 \text{ mm} \quad \text{خطوة السن}$$

$$d_2 = 2,675 \text{ mm} \quad \text{قطر البرغي بين قعري سنين}$$

Q : الإجهاد المسبق

$$\mu_t = 0,15 \quad \text{معامل الاحتكاك بين الأسنان نأخذ } (\mu_t = 0,15)$$

$$\mu_h = 0,15 \quad \text{معامل الاحتكاك تحت رأس البرغي } (\mu_h = 0,15)$$

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

$$(r_m = 2,25 \text{ mm})$$

نحسب مزدوجة الشد التي تعطي الإجهاد الأصغري الذي يحافظ على التماسك:

$$C_s = 580,8 \times [(1,161 \times 0,45) + (0,583 \times 0,15 \times 2,675) + (0,15 \times 2,25)] = 635,3 \text{ N.mm}$$

كما نحسب مزدوجة الشد في حالة الإجهاد الأعظمي:

$$C_s = 884,7 \times [(1,161 \times 0,45) + (0,583 \times 0,15 \times 2,675) + (0,15 \times 2,25)] = 967,7 \text{ N.mm}$$

### 6- الاستنتاجات والتوصيات:

تبدو طريقة التجميع بتقنية اللقط مهمة لأن:

- 1- الإجهادات المتبقية الإضافية الناتجة عن الحمل الخارجي صغيرة جداً (مناسب لحالات الحساب على التعب) [1].

2- يسمح بالتجميع دون خلوصات.

3- الإجهادات العظمى المراقبة على المثال المعالج ناتجة عن شكل البرغي ذي الرأس المخروطي (بسبب معامل تركيز الإجهادات الذي يعدّ كبيراً جداً عند عنق الاتصال بين جسم البرغي ورأسه).

4- عند الوصول إلى الحالة اللدنة، فإن ذلك يكون محلياً، وخطورة الانهيار تكون مستبعدة لأنّ الإجهادات المتوسطة تكون ضعيفة، وكذلك الإجهاد الترددي.

### التوصيات:

1- يجب التحكم بإجهاد الشد المسبق، وهو أمر معقد خاصة في حالة البراغي ذات القطر الصغير، لذلك نقترح تطبيق الإجهاد المسبق عن طريق حساب

57	11.18	11.81	9	650.64	688.13
58	11.06	11.70	10	551.89	584.17
59	311.02	334.43	11	527.11	557.49
60	11.22	11.84	12	446.22	472.48
61	242.09	260.92	13	332.09	351.48
62	10.87	11.54	14	313.31	331.74
63	141.56	153.37	15	337.57	357.24
64	10.63	11.32	16	639.57	677.68
65	81.07	88.39	17	283.97	301.06
66	24.31	26.17	18	488.19	517.58
67	47.46	52.06	19	213.74	226.63
68	10.34	11.07	20	200.93	213.18
69	31.73	34.86	21	393.26	417.22
70	4.93	5.28	22	217.62	230.72
71	4.88	5.23	23	180.57	191.89
72	4.95	5.29	24	136.12	144.88
73	4.79	5.15	25	127.47	135.78
74	10.07	10.82	26	247.63	263.22
75	23.31	25.10	27	138.88	147.80
76	391.04	422.71	28	551.00	585.29
77	4.65	5.02	29	113.68	121.32
78	289.85	313.97	30	85.45	91.45
79	224.17	243.44	31	417.58	444.00
80	129.37	141.26	32	80.01	85.71
81	4.50	4.87	33	154.93	165.15
82	73.17	80.38	34	333.08	354.56
83	42.81	47.21	35	87.26	93.37
84	9.83	10.60	36	71.43	76.68
85	29.42	32.32	37	96.23	103.06
86	4.34	4.72	38	205.65	219.54
87	22.99	24.73	39	60.65	65.34
88	2.34	2.62	40	125.82	134.83
89	2.33	2.61	41	472.79	504.35
90	2.34	2.63	42	76.92	82.87
91	2.31	2.59	43	355.06	379.34
92	4.20	4.59	44	32.05	34.26
93	2.27	2.55	45	31.03	33.19
94	9.66	10.43	46	279.64	299.29
95	2.23	2.50	47	32.40	34.63
96	2.19	2.45	48	29.49	31.58
97	4.12	4.51	49	49.03	53.13
98	396.89	431.67	50	168.04	180.59
99	2.17	2.42	51	99.55	107.52
100	295.65	322.17	52	27.67	29.68
101	230.16	251.39	53	59.53	64.69
102	134.94	148.01	54	38.70	42.25
103	77.90	85.73	55	25.84	27.77
104	46.66	51.28	56	417.53	448.13

153	9.70	10.34	105	32.29	35.19
154	221.62	241.38	106	23.41	25.11
155	30.77	32.34	107	2.17	2.42
156	346.57	378.43	108	9.55	10.32
157	72.68	76.56	109	4.10	4.49
158	427.94	467.45	110	2.20	2.45
159	558.32	609.92	111	1.26	1.48
160	108.73	115.91	112	2.25	2.50
161	31.68	33.24	113	4.13	4.52
162	164.84	177.50	114	2.31	2.57
163	31.98	33.55	115	9.51	10.26
164	81.11	85.12	116	2.37	2.62
165	252.08	273.28	117	24.46	26.12
166	389.08	423.43	118	4.19	4.58
167	121.55	129.07	119	39.72	42.80
168	478.19	521.02	120	2.40	2.66
169	622.34	678.62	121	57.84	63.02
170	86.43	90.52	122	93.16	102.06
171	182.81	196.14	123	2.42	2.68
172	129.60	137.34	124	154.75	169.62
173	276.82	299.22	125	255.71	279.78
174	88.20	92.32	126	324.28	354.32
175	424.37	460.90	127	431.47	470.87
176	194.19	207.97	128	2.43	2.69
177	132.17	139.97	129	9.52	10.25
178	520.15	565.85	130	2.43	2.69
179	675.94	736.23	131	4.26	4.65
180	292.86	316.18	132	25.97	27.59
181	197.59	211.47	133	4.32	4.70
182	448.09	486.28	134	9.57	10.27
183	297.40	320.86	135	4.36	4.74
184	548.63	596.41	136	50.31	53.69
185	712.65	775.68	137	74.23	80.16
186	455.16	493.66	138	4.38	4.75
187	557.64	605.86	139	116.22	126.57
188	725.09	788.72	140	4.38	4.75
			141	185.86	203.15
			142	9.62	10.29
			143	27.70	29.29
			144	297.49	325.39
			145	371.73	406.43
			146	489.33	534.74
			147	9.66	10.31
			148	61.99	65.67
			149	29.38	30.95
			150	92.43	99.11
			151	9.69	10.33
			152	142.19	153.97

الجدول (5) توزيع الإجهاد على قطر البرغي في حالة إجهاد متعددة + حمل شد خارجي (شكل 15).

X[mm]	$\sigma_{100}$ [MPa]	$\sigma_{120}$ [MPa]	$\sigma_{125}$ [MPa]	$\sigma_{150}$ [MPa]	$\sigma_{182}$ [MPa]	$\sigma_{215}$ [MPa]
1.24	580.05	621.61	653.30	759.32	784.19	987.56
1.21	429.63	460.26	483.82	562.28	582.37	731.29
1.18	331.91	355.64	373.91	434.47	449.73	565.00
1.11	230.23	247.06	259.74	301.75	309.55	392.30
1.05	179.50	192.97	202.67	235.50	238.31	306.05
0.98	153.66	165.19	173.21	201.37	202.93	261.59
0.92	128.59	137.93	144.35	167.88	170.93	217.96
0.73	112.43	119.82	125.33	145.65	155.55	188.91
0.55	99.67	105.77	110.66	128.54	142.66	166.69
0.37	92.29	97.82	102.41	118.95	134.48	154.32
0.18	88.66	93.79	98.25	114.03	131.53	147.88
0.00	87.69	92.56	96.97	112.41	131.96	145.61
-0.18	87.78	92.43	96.80	112.07	134.09	144.95
-0.37	90.39	94.89	99.29	114.74	139.95	148.05
-0.55	96.63	101.14	105.73	121.92	151.24	156.85
-0.73	106.89	111.05	115.95	133.25	171.41	170.72
-0.92	119.34	122.73	128.07	146.71	197.67	187.39
-0.98	141.83	145.38	151.94	174.08	237.02	222.71
-1.05	165.94	170.12	178.08	204.23	277.08	261.87
-1.11	214.17	220.19	230.79	265.03	354.98	340.51
-1.18	310.11	319.54	335.02	384.95	511.20	494.82
-1.21	401.56	413.91	433.88	498.53	661.70	640.68
-1.24	541.39	557.78	584.53	671.44	893.65	862.51

الجدول (4) توزيع الإجهاد على قطر البرغي في حالة إجهاد مسبق فقط وإجهاد مسبق + حمل شد خارجي (شكل 11).

حالة التحميل	إجهاد مسبق	إجهاد مسبق + قوى شد
X [mm]	$\sigma$ [MPa]	$\sigma$ [MPa]
1.24	720.90	784.19
1.21	535.89	582.37
1.18	414.11	449.73
1.11	284.80	309.55
1.05	218.21	238.31
0.98	184.64	202.93
0.92	154.66	170.93
0.73	141.53	155.55
0.55	131.00	142.66
0.37	124.37	134.48
0.18	122.39	131.53
0.00	123.37	131.96
-0.18	125.65	134.09
-0.37	131.32	139.95
-0.55	141.87	151.24
-0.73	160.95	171.41
-0.92	186.03	197.67
-0.98	223.29	237.02
-1.05	261.20	277.08
-1.11	334.99	354.98
-1.18	482.85	511.20
-1.21	625.20	661.70
-1.24	844.39	893.65

## REFERENCES

- [1]Alkatan F, «Modélisation des raideurs des assemblages: Par éléments filetés précontraints» ISBN 3838172043 /978-3838172040, 308 pages. Presses Académiques Francophones, (2012).
- [2]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).
- [3]Aziz H., « Étude du dévissage spontané des assemblage boulonnés ». Thèse de doctorat, INSA Toulouse, Mars (2003).
- [4] Faurie J.-P., «Guide du dessinateur: les concentrations de contraintes». ISBN10: 2854004946, Cetim, (2000).
- [5]GUILLOT J., «Assemblage par éléments filetés calcul», Techniques de l'ingénieur, (1987).
- [6]GUILLOT J., «Assemblage par éléments filetés; modélisation et calculs», Techniques de l'ingénieur, (1997).
- [7]I-DEAS (Integrated Design and Engineering Analysis Software) «Technical Documentation Software ».
- [8]Lemaitre J., Chaboche J-L., Benallal A., Desmorat R., «Mécanique des matériaux solides» ISBN 9782100516230, 580 pages, (3e édition), Dunod, (2008).
- [9]Norme européenne, norme française des éléments de fixation. Caractéristiques mécaniques des éléments de fixation. NF EN NF - EN ISO 3506; Janvier (2010)
- [10]Recueil de norme ISO., «Éléments de fixation - Extrémités des éléments à filetage extérieur métrique ISO», (2012).
- [11]Shenoy S., Fatemi A. «Connecting Rod Optimization for Weight and Cost Reduction» SAE International, (2005)
- [12] Vanhille C., Lavie A., Campos-Pozuelo C. «Modélisation numérique en mécanique» ISBN 9782746218673, 320 pages, Hermès - Lavoisier, (2007).
- [13]Young W.C, Budynas R. G. «Roark's Formulas for stress and strain» 8th Edition Hardcover, (2012).
- [14]Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. «The finite element method» (1 and 2 volume). Butterworth- Heinemann, (2000).
- [15]Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z., «The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals» 6 edition, Butterworth - Heinemann, (2005).

Received	2016/03/30	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2016/12/15	قبول البحث للنشر