مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (38) العدد (6) 2016
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (38) No. (6) 2016

تحليل أسباب فشل القارنات المسننية لمراوح اعادة تدوير غازات الاحتراق في محطة بانياس الحرارية

الدكتور خضر خفيف[1]
الدكتور أحمد سلامة[2]
محمد معن اسماعيل[3]

(تاريخ الإيداع 20 / 4 / 2016. قُبِل للنشر في 29/ 11 / 2016)

□ ملخّص □

تعتبرُ القارنة المسننة واحدة من القارنات الصناعية ذات التصميم الأصعب بسبب تعقيد توزيع الأحمال بين الأسنان نتيجة انحراف الأعمدة . تهدفُهذه المقالة الى دراسة أهمية تتويج الأسنان في تحليل أسباب فشل القارنات المسننة لمراوح اعادة تدوير غازات الاحتراق في محطة بانياس الحرارية. تمَّ تحليل اجهادات التماس بين الأسنان المتعشقة في القارنة المسننة، وذلك لأجل حالتيتماس أحدهما مع تتويج والأخرى بدون تتويج عند درجة عدم تسامت محددة . لأجل التحليل ، أُستُخدِمَ الفولاذ متوسط الكربون كمعدن للقارنة المسننةأُستُخدِمت طريقة العناصر المنتهية في عملية النمذجة والتحليل بمساعدة البرنامجANSYS 14.5،ومن ثم تمتمقارنة النتائج مع قيم معادلة هرتز النظرية . إنَّ التوافق الذي أظهرتهالنتائج بين حسابات ANSYS وهرتز يشير الى دقة النموذج المدروس، ولقدتم التوصل الى أنَّ استخدام الأسنان المستقيمة يؤدي الى تركز كبير للإجهاد على أطرافها عند نقل عزوم الدوران بين الأعمدة غير المتسامتة مقارنةً بالتوزع المتجانس لضغط التماس على سطوح الأسنان المتوجة.

الكلمات المفتاحية : اجهاد التماس ، التتويج ، القارنة المسننة .

[1]مدرس– قسم هندسة التصميم والانتاج – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية .
[2]استاذ مساعد – قسم هندسة التصميم والانتاج – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية .
[3]طالب دراسات عليا(ماجستير)–قسم هندسة التصميم والانتاج– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية سورية .

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (38) العدد (6) 2016
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (38) No. (6) 2016

Causes Analysis of Gear Couplings Failure of Gas Recirculation Fans in Banias Power Station

Dr. Khedir Khafif [1]
Dr. Ahmad Salamah[2]
Mhamad Maen Ismaeel[3]

(Received 20 / 4 / 2016. Accepted 29 / 11 / 2016)

□ ABSTRACT □

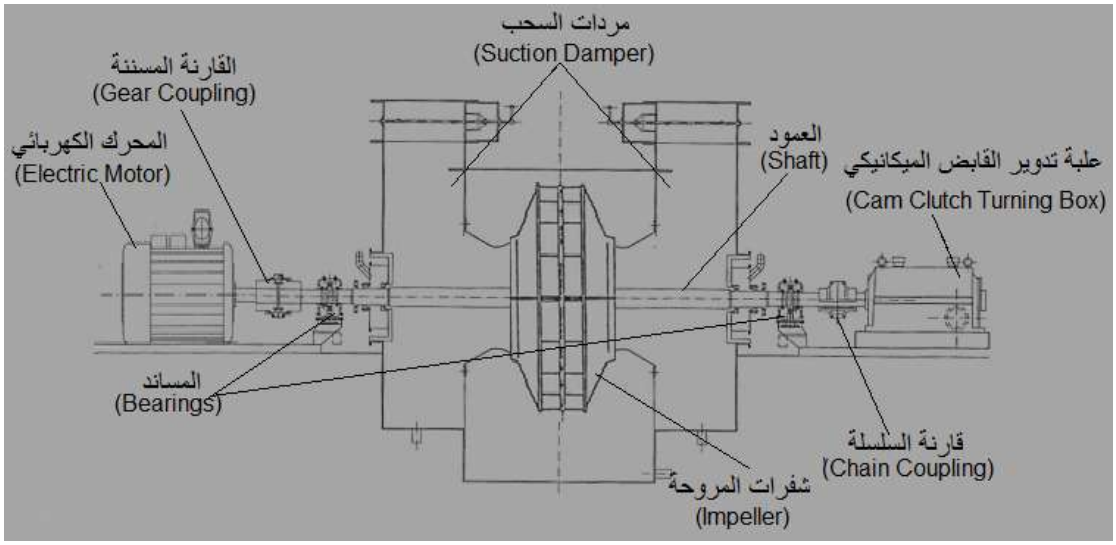
A gear coupling is one of the most difficult couplings to design used in industry , because of the complication for loads distribution between the teeth under misalignment shafts conditions . This paper aims to study the importance of crown to analysis the failure causes of gearcouplings of gas recirculation fans in Banias power station. It presents the stress analysis of mating teeth of gear coupling to find maximum contactstress in its teeth for two situations : crown and straight tooth contact for specialmisalignmentangle. For the analysis,Medium Carbon Steel are used as the material of gear coupling . FEA is done in finite element software ANSYS 14.5. The results obtained from Finite Element Analysis (FEA) are compared with theoretical Hertzian equation values. Both results agree very well. This indicates that the FEM model is accurate . Results show that With straight hub teeth, there is a high concentration of load under misaligned conditions. While Crowned flanks provide optimal load distribution .

Keywords : Contact Stress, Crown, Gear Coupling .

[1] **Assistant Professor , Department of Design and Production Engineering , Faculty of Mechanical and Electrical Engineering , Tishreen University , Lattakia , Syria**
[2] **Associate Professor , Department of Design and Production Engineering , Faculty of Mechanical and Electrical Engineering , Tishreen University , Lattakia , Syria .**
[3] **Postgraduate Student , Department of Design and Production Engineering , Faculty of Mechanical and Electrical Engineering , Tishreen University , Lattakia , Syria .**

مقدمة :

يُعتبر نظام مراوح اعادة تدوير غازات الاحتراق إحدى الطرق المستخدمة في مجموعات توليد الكهرباء البخارية للحصول على درجة حرارة بخار ثابتة [1] .ويوضح الشكل (1) أجزاء هذا النظام للمجموعتين البخاريتين الثالثة والرابعة في محطة بانياس الحرارية:



الشكل (1) أجزاء نظام مراوح اعادة تدوير غازات الاحتراق في محطة بانياس الحرارية للمجموعتين 4+3

تعرَّف قارنة العمود الميكانيكية (Coupling)بأنها ذلك الجزء الميكانيكي الذي يُستخدم لنقل عزم الفتل بين عمودين .وتُصَّنف الى قارنات جاسئة(Rigid Coupling)وقارنات مرنة(Flexible couplings) ، حيثتُستخدمالجاسئة لأجل الاتصال الجاسئ بين الأعمدة المتسامتة(Alignment)، أما المرنة فتُستخدم عند وجود قيم عدمتسامت بين الأعمدة المتصلة (Misalignment)[2] . تُصَّنف القارنات المرنة الى ثلاث أنواع وظيفية رئيسية :قارنات العنصر الميكانيكي(Mechanicalelement)، وقارنات العنصر المطاطي (Elastomericelement)، وقارنات العنصر المعدني (Metallicelement)[3].

تُعتبر قارنة العنصر الميكانيكي المسننة (Gear Coupling)من أهم القارنات المرنة وأكثرها استخداماً فيالصناعة.يمكن أن تُصَّنف هذه القارنات بعدة طرق ومن أهم هذه الطرق وأكثرها شهرةً تلك التي تعتمد على الوظيفة والتطبيق ، وتشملُ هذه الطريقة ثلاثة أنواع مختلفة:

القارنات القياسية (Standard) – ذات السرعات المتوسطة (1000 – 2500 rpm)وعزوم الفتل المتوسطة–، قارنات الأعمدة المخددة(Spindle)– ذات السرعات المنخفضة الى حدود (1000)rpmوعزوم الفتل المرتفعة، وقارنات الأداء العالي (High Performance)–ذات السرعات العالية (2500 – 10000 rpm)وعزوم الفتل المتوسطة . وعلى الرغم من أن كل القارنات المسننة تَستخدم نفس المكونات الأساسية إلا أن التصميمات والمواد تختلف بشكل كبير[3,2] .

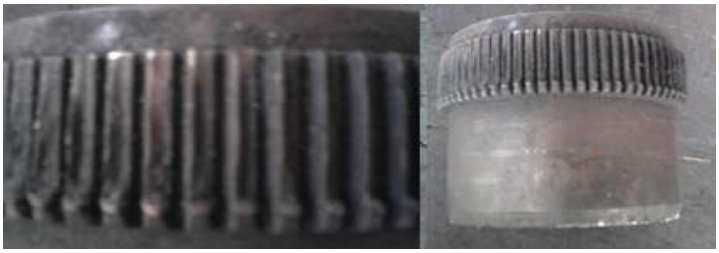
وبما أنَّ القارنة المستخدمة في النظام المدروس هي قارنة قياسية سيكون موضوع دراستنا حول هذا النوع .هذه القارنة تتألف من جسمين (TwoHubs) ذات أسنان خارجية تتعشق مع الأسنان الداخلية للجلبة (Sleeve) كما هو

واضحفي الشكل (2) ، حيث يمكن أن تُعتبر القارنة المسننة مسنن عدل (SpurGears)انفلوتي مع أسنان داخلية ونسبة أسنان تساوي واحد ($u = 1$) [4].

الشكل (2) القارنة المسننة

يؤثر في قدرة القارنة المسننة على ملائمة عدم التسامت الموجود بين الأعمدة المتصلةبارمترات هما :الخلوص(Backlash) وتتويج الأسنان[5](Flank Crown).

ظَهرت مشاكل هذه القارنة مع بداية التصنيع المحلي لها حيث تبيَّن بالمعاينة حدوث تناقص تدريجي لثخانةالأسنان بالاهتراء ، وبيَّن الفحص وجود جزيئات معدن متكسرةضمن مادة التزييت خلال المراحل المبكرة من عملها ، ومع التشغيلالمستمر لها تحت هذه الظروف فقدت الأسنان ثخانتها تدريجياً مما أدى الى فشلها كما هو موضح في الشكل (3) .



الشكل (3) اهتراء الأسنان في القارنة المدروسة

إنَّ النَّقصَ في الامكانيات من حيث الأدوات والخبرة الكافية أدَّت الى عدم أخذ التتويج ونوع المعدن بعين الاعتبار عند التصنيع المحلي للقارنات المسننة .

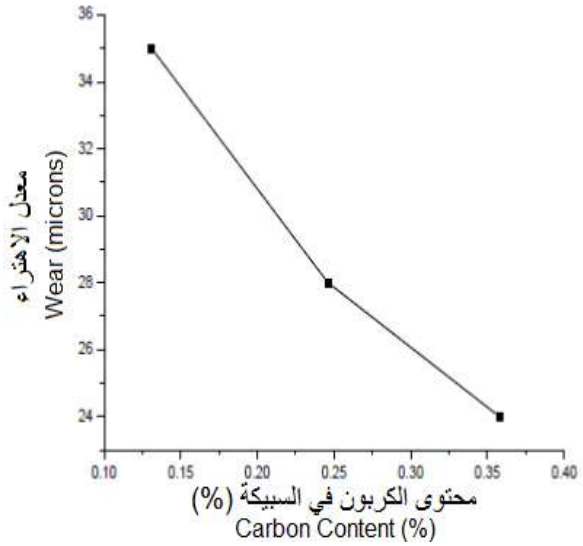
بشكل عام يتم اختيار نوع معدن التصنيع ومعالجاته الحرارية للقارنات المسننة تبعاً لنوع التطبيق الذي يُحدد انطلاقاً من بارمترات النظام (سرعة الدوران ، الاستطاعة ، درجة عدم التسامت الموجودة بين الأعمدة المتصلة). حيث ومن أجل القارنات المسننة القياسية يكون الفولاذ متوسط الكربون غير المعالج حرارياً هو المعدن المناسب لصناعتها[2].ولتحديد رقم الفولاذللقارنة المدروسة سيتم الاستعانة بالدفاتر الفنية الخاصة بصيانة القارناتالمسننة الموجودة في المحطة الحرارية وذلك نظراً لعدم توفر عينات للقارنات الأصلية اليابانية الصنع يمكن اجراء التحليل الطيفي لها وتحديد التركيب الكيميائي لمعدنها، حيث تشيرُ هذه الدفاتر الى أنَّ الفولاذ متوسط الكربون ذو الرقم **(S55C)** هو المستخدم لصناعة القارنة الأصل . ومن خلال كتيِّبات التركيب الكيميائي للمعادن الخاصة بالفولاذ الكربوني يتم تحديد العناصر المكونة لهذا المعدن والموضحة في الجدول (1):

الجدول (1) التركيب الكيميائي للفولاذ الكربونيS55C

العنصر	الكربون	الكبريت	السليسيوم	المنغنيز	الفوسفور	الحديد
النسبة المئوية %	0,55	0,035	0,2	0,75	0,03	98,44

إنَّ للفولاذ الكربوني(CarbonSteel) ثلاثة أنواع تختلف فيما بينها تبعاً لمحتوى الكربون في السبيكة ، هي : الفولاذ منخفض الكربون(Low Carbon Steel LCS) والذي تصل نسبة الكربون فيه الى حدود (0,25%C) والفولاذمتوسط الكربون(Medium Carbon Steel MCS)والذي تتراوح نسبة الكربون فيه بين (0,25 ÷ 0,7%C) والفولاذ عالي الكربون(High Carbon Steel HCS) ذو نسب الكربون بين(0,7 ÷ 1,05%C)[6] .

حيث يُعتبر الكربون العنصر الأكثر أهميةً وتأثيراً على خصائص الفولاذ المختلفة ، وبشكل خاص الخصائص الاهترائية له حيث يزداد معدل الاهتراء مع تناقص محتوى الكربون في الفولاذ كما هو موضح في الشكل (4) [7] .



الشكل (4) العلاقة بين الاهتراء و محتوى الكربون في الفولاذ

ولمعرفة التركيب الكيميائي لمعدن القارنة المحلية الصنع تم إجراء التحليل الطيفي لها . حيث أُسْتُخْدِمَ لهذا الغرض جهاز اختبار التحليل الطيفي للمعادن من نوع (FOUNDRY–MASTER) ألماني الصنع والموجود في جامعة تشرين الموضح بالشكل (5) .

الشكل(5)جهاز التحليل الطيفي

ويوضح الجدول (2) نتائج التحليل الطيفي موضحا التركيب الكيميائي لمعدن القارنة المحلية :

الجدول (2) التركيب الكيميائي لمعدن القارنة المحلية

العنصر	الكربون	الكبريت	السليسيوم	المنغنيز	الفوسفور	الحديد
النسبة المئوية %	0,208	0,0326	0,316	0,521	0,0374	98,3

تُبين نتائج التحليل الطيفي أنَّ المعدن المستخدم في التصنيع المحلي هو الفولاذ منخفض الكربون ذو نسبة الكربون ($C = 0.208\%$). وبالمقارنة مع المعدن الأصل الذي يبين الجدول (1) تركيبه الكيميائي نجد أن المعدن المستخدمذو نسبة كربون أقل من المطلوب ويمكن أن يكون هذا أحد أسباب الفشل لهذا العنصر تحت ظروف التشغيل المفروضة .

يُعرَّف التتويج (Flank Crown)بأنه : صنع الانحناء لجانبية السن على طول عرض الوجه ، وينفذُ في القارنات المسننة على أسنان الجسم فقط باعتبارها الجزء الناقل للاستطاعة [8]. يُعتبر التتويج أحد أهم الحلول التي قُدِّمت للتقليل من مشاكل الاهتراء وتركز الاجهادات في القارنات المسننة ، وإنَّ أهميته وتأثيره في اهتراء أسنان القارنة المسننة لا تتوقف عند علاقته بالتوزيعالمتجانس للحمل وبمنع التحميل على نهاية السن وتركز الاجهادات الذي يحصل للأسنان المستقيمة غير المتوجة ؛وإنما يتعداه الى التقليل من قيم الخلوص اللازمة لملائمة عدم التسامت الموجود بين الأعمدة المتصلة [8,5]،وتحويل قسم من الاحتكاك الانزلاقي الى احتكاك تدحرجي وبالتالي نعومة في الحركة ونقل القوىوتأمين شروط تزييت أفضل وتجنب حمولات الصدم والاهتزازات، كما ويساهم في زيادة عدد الأسنان الداخلة في التماس والناقلة لعزم الفتل [5].

تُمثِّل سطوح التماس عنصر الدراسة الأهم للعديد من الباحثين ، حيث تُعتبر اجهادات التماسالسبب المباشر لكثير من حالات الفشل في المكونات الهيكلية[9]. وهذا ينطبق بشكل خاص على المسننات ، والتي يكون فيها اجهاد التماس (Contact Stress)هو البارامتر الرئيسي في تصميم المسنن[10].

قام الباحث وي [11]بحساب اجهادات التماس في المسننات الانفلوتية باستخدام نماذج ثنائية البعد للتحليلوفق طريقة العناصر المنتهية(2-D FEM Two Dimensional Finite Element Method) ، وحساب اجهاداتالانحناء في جذور الأسنان باستخدام نموذج ثلاثي الأبعاد(3-D FEM). أُستُنتِجت نتائج تحليلات(FEM)عن طريقبرنامج (ANSYS) ، ثم تم مقارنتها مع القيم النظرية . كانت النتائج متقاربة جداًهذا يدلُ على دقة نموذج ال(FEM) .

درسَ جو[12] اجهاد تماس السن في المسننات العدلةباستخدام طريقة العناصر المنتهية . وللتأكد من وثوقية نتائج تحليل الاجهاد ، تم توليد نموذجين (2-D) و (3-D) وذلك عن طريق استخدام برنامجي ANSYS) (11و(SolidWorks 2007) . دُرِسَ تأثير وجود عدم تسامت بين الأعمدة بمقدار ($0,1^{0}$). دلَّت النتائج الى انَّ وجود عدم التسامت بين الأعمدة المتصلة يؤدي الى زيادة ملحوظة لإجهادات تماس السطح .

دَرسَ الباحثان غورومامي و شانموغام [8 طريقة جديدة من أجل نمذجة مسننات عدلة متوجة . حيث تمَّ إجراء المقارنة بين نوعين من تتويج المسننات : التتويج الدائري والتتويج الانفلوتيل أجل مقدار التتويج نفسه . بُنِيَّت نماذجتعشيق المسنناتاعتماداً على قانون التعشيق الذي يوضح الشرط الأساسي لعمل المسنناتبقاء نقطة الخطوة ثابتة على خط المراكز. وأُستُنتِجتالنتائج التحليلية باستخدام طريقة العناصر المنتهية (3-D FEM) من (ANSYS) . أوضحت النتائج تقارب في قيم اجهاد التماس لأجل نوعي التتويج ، وبيَّنت أهمية عملية التتويج لتفادي التحميل الطرفي للأسنان .

قامَ كارافير وآخرون [10]بإيجاد ضغط التماس الأعظمي في أسنان مسنن عدلعن طريق تحليل اجهاداتالتماسفيه،ثم تمقارنة نتائج طريقة العناصر المنتهية التحليليةالمحصول عليها باستخدام برنامج(ANSYS 14,5)مع

قيم معادلة هرتز (Hertz)النظرية . حيث وَجَدَ الباحثون بأن الاختلاف بين قيم اجهادات التماس الأعظمية التحليلية والنظريةيكون قليلا جداً .

أهمية البحث وأهدافه:

أدَّى الارتفاع في التكلفة للقطع التبديلية المستوردة الى التفكير الجاد بالتصنيع المحلي ، ولكن ونتيجة النقص في الامكانيات من حيث الأدوات والخبرة الكافية ، كانت النتائج سلبية في هذا الاتجاه . وينطبق هذا بشكل خاصعلى القارنة المسننة المدروسة في هذا البحث ،حيث وبعد البدء بالتصنيع المحلي لهذاالعنصر الميكانيكي انخفضعمره التشغيلي من عدة سنوات الى عدة أشهر مقارنةً مع القارنة الأصلية .

يهدفُ البحث الى توضيح تأثير عدم تتويج أسنان جسم القارنات المصنعة محلياً(التابعة لنظام اعادة تدوير الغازاتفي محطة بانياس) على فشلها ، وسيتم ذلك من خلال دراسة علاقتهبالتوزيع المتجانسللحمل وبمنع التحميل علىأطرافالسن وتركز الاجهادات الذي يحصل للأسنان المستقيمة غير المتوجة أثناء نقل عزوم الدوران بين الأعمدة المتصلة.

تأتي أهمية هذا البحث من أهمية الطريقة المتبعة في الدراسة من جهة ، حيث تعتبر طريقة العناصر المنتهية واحدة من أهم تقنيات الحلول العددية المتقدمة في الوقت الحاضر ، والمستخدمة لإيجاد الحلول لمختلف المشاكل الهندسية لما تعطيه من دقةووثوقية في الحلول المقدمة .ومن أهمية العنصر المدروس بوصفه جزء من نظام اعادةتدوير غازات الاحتراق من جهة أخرى ، والذي يعني فشله توقف النظام عن العمل وما يتبع ذلك من تأثير سلبي على النظام والمجموعة الحرارية ككل . وبالتالي فإن تحليل الفشل لهذا العنصر الميكانيكي يعني إلقاء الضوء على الطريقة التي يمكن اتباعها لرفع العمر التشغيلي له .

طرائق البحث ومواده :

تمَّ في هذه المقالة التحليل وفق طريقة العناصر المنتهية بمساعدة برنامج (ANSYS)لإجهادات التماس بين سنين متعشقين في قارنة مسننة قياسية لأجل حالتين مدروستين : الأولى لسن جسم قارنة مستقيم غير متوج عند وجود عدم تسامت بين الأعمدة بمقدار درجة واحدة $\alpha = 1^0$، والثانية عند التتويج لهذا السن لنفس مقدار عدم التسامت.

1-الحسابات النظرية لإجهادات التماس باستخدام معادلة هرتز :

تُستخدم معادلة هرتز لحساب اجهادات التماس في المسننات والأعمدة المخددة . حيث يُعطى اجهاد التماس الأعظمي P_{max} عند تماس سن من جسم القارنة المسننة متوج بنصف قطر تتويج ρ وله ارتفاع h مع سن الجلبة المستقيم ،ولأجل نسبة بواسون $\varepsilon = 0,29$بالعلاقة]13 [:

$$P_{max} = \sigma_c = 0,417\sqrt{\frac{F_n.E}{h\ .\ \rho}}\,(\,Mpa\,)(1)$$

حيث F_n: الحمل المطبق على السن أثناء نقل عزم الدوران [N] .

E: معامل المرونة لمعدن القارنة المسننة [Mpa] .

h : الارتفاع الفعال لسن جسم القارنة المسننة [mm] .

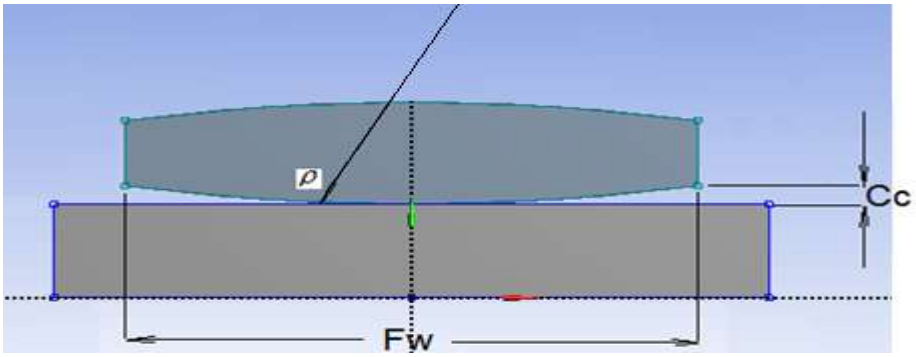
ρ : نصف قطر التتويج لسن جسم القارنة المسننة [mm] .

يُحسب نصف قطر التتويج الدائري للقارنات المسننة والموضح في الشكل (6) من المعادلة التالية [8]:

$$\rho = \frac{4C_c^2 + F_W^2}{8C_c}(mm)(2)$$

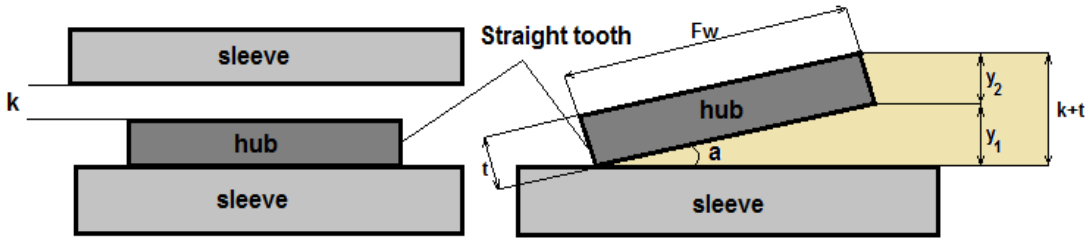
حيث F_W : عرض وجه السن [mm] .

C_c : سماكة التتويج [mm] .



الشكل (6) مقدار تتويج السن

في حالة عدم التتويج الوجهي لأسنان جسم القارنة فان ملائمة عدم التسامت الموجود بين الأعمدة المتصلة يتم بكامله عن طريق قيم الخلوص kكما هو موضح في الشكل (7) ، أما في حالة التتويج لأسنان جسم القارنة المسننة فإن الملائمة تتم عن طريق التتويج والخلوص كما موضح في الشكل (8A) .



الشكل (7) ملائمة عدم التسامت في القارنات المسننة المستقيمة

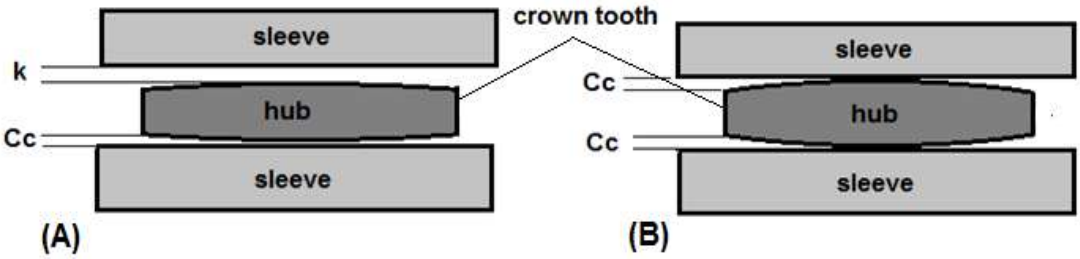
يتم حساب الخلوص في القارنات المستقيمة من خلال العلاقة التالية :

$$k = \{(y_1) + (y_2)\} - t = \{(F_w . \sin\alpha) + (t . \cos\alpha)\} - t \quad (3)$$

حيث k : قيمة الخلوص وتتراوح قيمتها بين [mm] mm (0,1 ÷ 1,5) .

α : زاوية عدم التسامت [deg] .

t : ثخانة السن [mm] .



الشكل (8) قيم الفوت والتتويج في القارنات المسننة المتوجة.(A) التتويج الجزئي ، (B) التتويج الكامل

ويوضح الجدول (3) الأبعاد التصميمية لجسم القارنة المسننة :

الجدول (3) الأبعاد التصميمية لجسم القارنة المسننة

البعد (Dimension)	الواحدة (Unit)	الرمز (Symbol)	القيمة (Value)
عدد الأسنان	سن	N	74
قطر دائرة الخطوة	mm	B	154
قطر الجذر (القاعدة)	mm	A	145
القطر الخارجي (القمة)	mm	C	163
ثخانة سن المحور عند دائرة القمة	mm	t	3,5
الارتفاع الفعال لوجه السن	mm	h	9
عرض الوجه	mm	F_W	24
زاوية التعشيق	deg	$\emptyset$	20^0

وبتعويض القيم من الجدول (3) في المعادلة (3) تكون قيمة الخلوص المطلوبة :

$$k = (24.sin\,1^0) + (3{,}5.cos\,1^0) - 3{,}5 = 0{,}418\ mm$$

تُقطع أغلب قيم الخلوص المطلوبة في القارنات المسننة من أسنان الجلبة ، لذلك يمكن أن نعتبر نظرياً أنكامل مقدار الخلوص في القارنات المسننة المستقيمة يتحول الى تتويج في القارنات المسننة المتوجة كما هووضح في الشكل (8B) ، وعندها نستطيع أن نكتب : $k = 2C_c = 0{,}418\ mm$ ومنه $C_c = 0{,}21\ mm$ وهي سماكة التتويج المطلوبة لتتويج القارنة المدروسة تتويجاً كاملاً . فيكون نصف قطر التتويج :

$$\rho = \frac{4C_c^2 + F_W^2}{8C_c} = \frac{4.(0{,}21)^2 + (24)^2}{8.0{,}21} = \mathbf{343}\ \ (\boldsymbol{mm})$$

يتم حساب الحمل الكلي المنقول من قبل القارنة المسننة من العلاقة :

$$F = \frac{T}{R\,.\,cos\,\emptyset}\,(N) \qquad (4)$$

حيث T : عزم الفتل الأعظمي المنقول من قبل القارنة لمسننة [$N.m$] .

R : نصف قطر دائرة الخطوة [mm] .

$\emptyset$: زاوية التعشيق[deg] .

ويتم حساب عزم الفتل $T(N.m)$ من العلاقة :

$$T = \frac{W.9549}{m} = \frac{170\ .\ 9549}{985} = 1648{,}05\ N.m \qquad (5)$$

حيث W :الاستطاعة للنظام $[KW]$.

m : عدد دورات المروحة خلال دقيقة واحدة $[rpm]$.

ومنه الحمل الكلي يساوي :

$$F = \frac{1648\ .\ 10^3}{77\ .cos\ 20} = 22776{,}8\ (N)$$

دائماً ومن أجل درجة عدم تسامت محددة في القارنات المسننة يكون لدينا عدد محدد من الأسنان المتعشقة الناقلة لعزم الفتل .ويعطينا الجدول (4) النسب المئوية للأسنان الناقلة لعزم الفتل تبعا لدرجة عدم التسامت[3] :

الجدول (4) النسبة المئوية للأسنان الناقلة لعزم الفتل عند درجات عدم تسامت محددة

النسبة المئوية الأسنان C %	درجة عدم التسامت (deg)
100 % – 80 %	0^0
60 %	0.5^0
50 %	1^0
40 %	2^0
35 %	3^0

ومنه فإن عدد الأسنان الناقلة لعزم الفتل لأجل حالتنا المدروسة يكون :

$$n = N\ .\ C = \frac{74\ .\ 50}{100} = 37 \text{ سن}$$

حيث n : عدد الأسنان الداخلة في التعشيق والناقلة لعزم الفتل عند درجة عدم تسامت محددة .

N: عدد الأسنان الكلي .

C : النسبة المئوية للأسنان الناقلة لعزم الفتل عند درجات عدم تسامت محددة .

ويكون F_n الحمل المنقول عن طريق سن واحديساوي :

$$F_n = \frac{F}{n} = \frac{22776{,}8}{37} = 615{,}6\ (N)$$

فيكون اجهاد التماس لأجل نصف قطر تتويج $\rho = 343\ mm$ ، من المعادلة (1) :

$$P_{max} = \sigma_c = 0{,}417\sqrt{\frac{615{,}6\ .205000}{9\ .\ 343}} = \mathbf{84{,}27\ (Mpa)}$$

2- نمذجة وتحليل علاقة التتويج بضغط التماس في القارنة المسننة باستخدام طريقة العناصر المنتهية :

ترتكز طريقة العناصر المنتهية على الطريقة المصفوفية لميكانيك الأجسام الصلبة والبنى ويُعبَّر عن المعادلة الأساسية بالشكل التالي[14]:

$$\{F\} = [K].\{U\} \quad (6)$$

$[K]$: مصفوفة الجساءة التي تصف النظام المدروس .

$\{U\}$: متجه درجات الحرية (الإزاحات والدوران في العقد) .

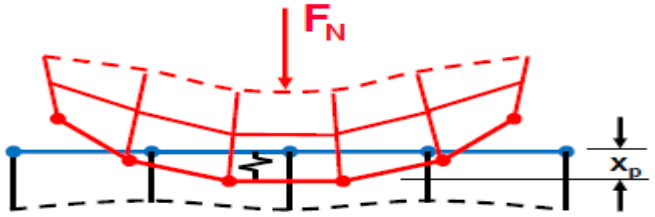
$\{F\}$: متجه القوى الداخلية للعناصر .

وتبعاً لسلوك البنى والأجسام تحت تأثير الأحمال المطبقة فإن التحليل يكون خطي أو غير خطي .

لا يمكن في التحليلات غير الخطيةالتنبؤ بالاستجابة مباشرةً عن طريق معادلات خطية . ويكون الحل باستخدام سلسلة تكرارية لتقريبات خطية مع تصحيحات [15]، ويستخدم (ANSYS) طريقة تكرارية تُعرف بطريقة نيوتن _ رابسون(Newton– Raphson) والتي تابعها يكون من الشكل :

$$\{F\} = [K_{(ui-1)}].\{U_i\} \quad (7)$$

يتم في (ANSYS)تعريف علاقة التماس بين جسمين من خلال جساءة التماس. ويتم توليد هذه العلاقة من خلال نابض مرن(elastic spring)كما هو موضح في الشكل (9) ، وتُسَّمىجساءة النابض بجساءة التماس .



الشكل (9) تعريف جساءة التماس في برنامج ANSYS

وتكون قوة التماس مُعرَّفة من خلال العلاقة :

$$F_{Normal} = K_{Normal} \cdot X_{Penetration} \quad (8)$$

حيث K_{Normal} : جساءة التماس .

$X_{Penetration}$: مقدار التداخل بين سطوح التماس .

تعتمد قيمة K_N على الجساءةالنسبية للأجسامالمتماسة ، ويتم تحديدها في برنامج(ANSYS) من خلال العلاقة:

$$K = \frac{f_s . Area^2 . kb}{Volume} \quad (9)$$

حيث $Area\ ,Volume$: مساحة وحجم التماس .

kb: معامل بولك لعنصر التماس .

f_s : عامل التحديد (penaltyfactor) ويمتلك قيمة قياسية $f_s = 0.1$.

2-1-النمذجة(Modeling) :

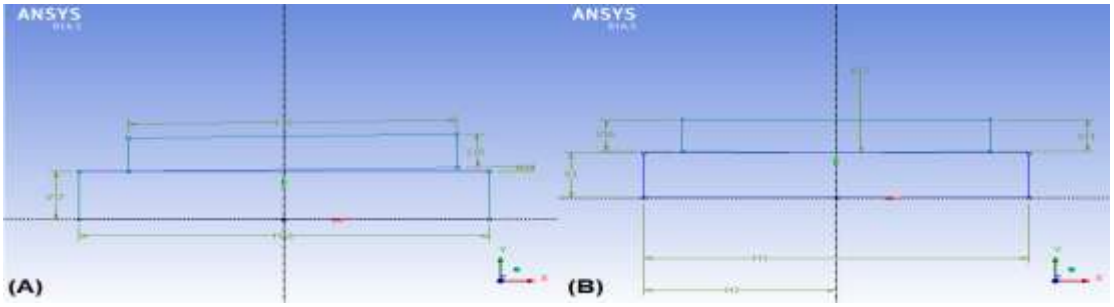
2-1-1- النموذج الميكانيكي (Mechanical Mode):

يُشَكِّل النموذج الميكانيكي تبسيطاً للحقيقة الفيزيائية ، وتكمن صعوبة النمذجة في اختيار مستوى التبسيط المناسب.ويتم هذا الاختيار اعتماداً على عاملين رئيسيين هما :

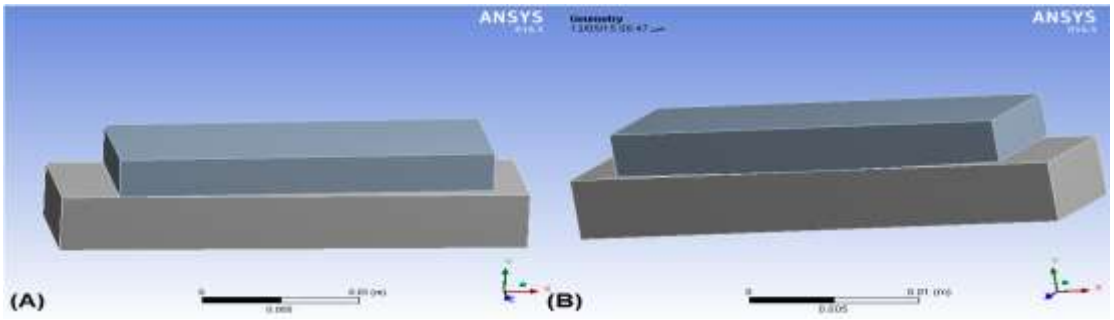
-الفهم الصحيح للمشكلة المدروسة . - معرفة ما المطلوب من هذا النموذج ؟ .

يَجمعُ النموذج الميكانيكي كل المعلومات الخاصة بالتوصيف الميكانيكي والهندسي للمسألة المدروسة ويشمل:

- **توصيف نوع التحليلType (Analysis):** أُخْتِيرَ لهذه الدراسة التحليل الستاتيكي(Static Structure) .
- **توصيف الشكل الهندسي للإنشاء (Geometry):** بالأبعاد الموضحة في الجدول (3) ، كما هو موضح في الشكل (10) والشكل (11) .



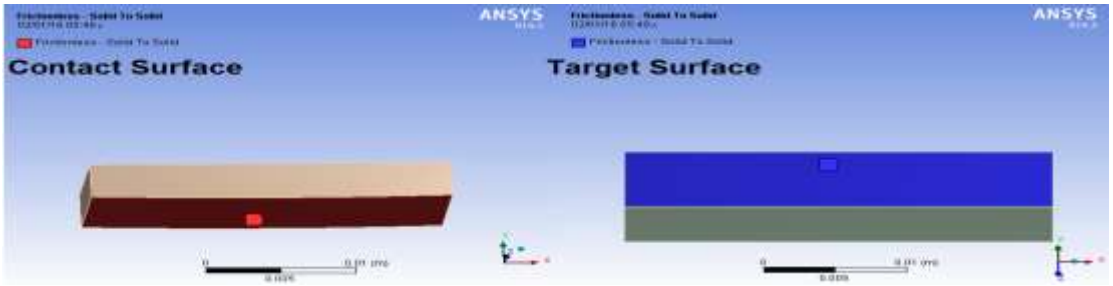
الشكل (10) التمثيل ثنائي البعد للتماس في ANSYSDesignModeler . **(A) سن مستقيمبدون تتويج ، (B)سنمتوج**



الشكل (11) التمثيل ثلاثي الأبعاد لحالة التماس الموصوفة . (A) بدون تتويج ، (B) مع تتويج

- **ضبط التماسAdjustingContact:** والذي يعني تحديد سطوح التماس واختيار نوع التماس .

حُدِّدَت أسطح التماس عن طريق تعريف سطح التماس (Contact Surface)والسطح الهدف (TargetSurface) كما هو موضح في الشكل (12) .



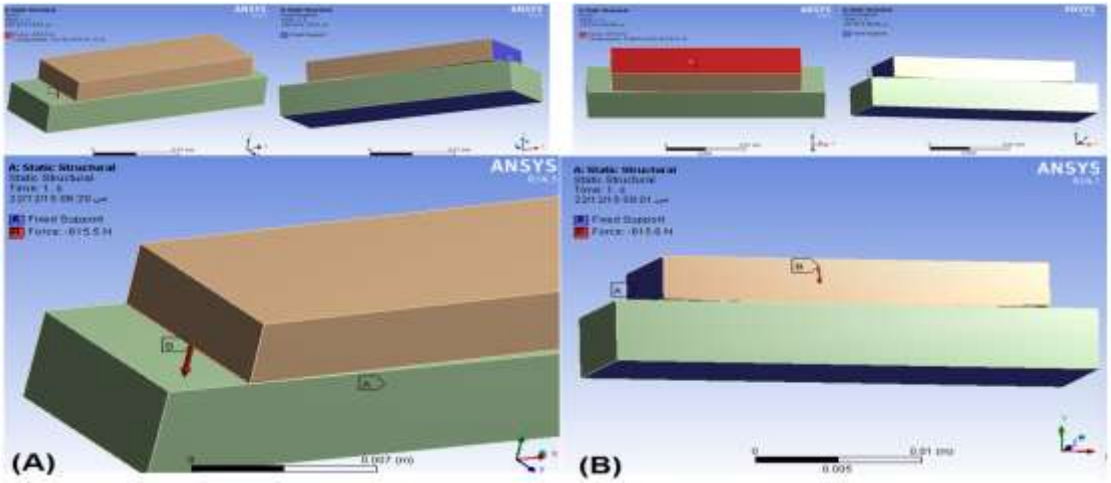
الشكل (12) تحديد سطح التماس والسطح الهدف

● **اختيار نوع التماس (Contact Type)** :يَعتَمِدُ اختيار نوع التماس على نوع المشكلة المطروحة .

تُعتبر منطقة التماس وطريقة محاكاتها من قبل النموذج النقطة الجوهرية عند الدراسة والنمذجة . وفي أغلبالأحيان يكون من الضروري استخدام النماذج التي تعطي السماحية للجسمين المتماسين بالانفصال أو بالحركة النسبية البسيطة ، لأنَّه عن طريق هذه النماذج يمكن حساب اجهادات التماس ونمذجة أكثر دقة وواقعية لمساحة التماس وللفراغات الموجودة بين سطحي التماس، وتَظهر هذه الامكانيات والخصائص عند استخدام أحد أنواع التماس غير الخطي التي يقدمها (ANSYSWorkbench) والتي هي : (Frictionless) و (Frictional) و (Rough) ، ولقد أُستُخدِمَ نموذج ال (Frictionless) في هذه الدراسة .

● **توصيف علاقة الانشاء المدروس بالوسط المحيط به (الشروط الحدية Boundary Conditions) :**

أُعْتُبِرَ سن جسم القارنة جائز كابولي مثبت بوثاقة على سطحه الجانبي ومتماس بسطحه السفلي مع سن الجلبة الذي تم تقييده بوثاقة منعت حركته في الاتجاهات الثلاث ووُضِعَتْ على السطح السفلي له. أما القوة المؤثرة على السن والمحسوبة في مرحلة سابقة $F = 615.6\ N$ ، فإنها طُبِّقَتْ على السطح العلوي لسن الجسملأجلالسن المتوج وعلى حافة السن لأجل السن المستقيم ، كما هو موضح في الشكل (13) .



الشكل (13) الشروط الحدية . (A) بدون تتويج ، (B) مع تتويج

● **توصيف مادة الانشاء (Material Prosperities)**:تُعَرَّف مادة الإنشاء كتابع للخواص الميكانيكية للمادة ، أُخْتِيْرَ الفولاذ متوسط الكربون **(S55C)** كمادة لنموذج التماس ، وهي مادة غير موجودة في مكتبة البرنامج لذلك تمَّ تعريفها عن طريق معامل يونغ ونسبة بواسون والموضحة قيمتهما في الجدول (5) .

الجدول (5) الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للفولاذ متوسط الكربون S55C

الخاصية Property	الواحدة Unit	الرمز Symbol	القيمة Value
متانة الشد الحدية	Mpa	σ_U	625
متانة الخضوع	Mpa	σ_y	530
معامل المرونة	Mpa	E	205000
نسبة بواسون	----	ε	0,29
الكثافة	kg/m^3	φ	7850

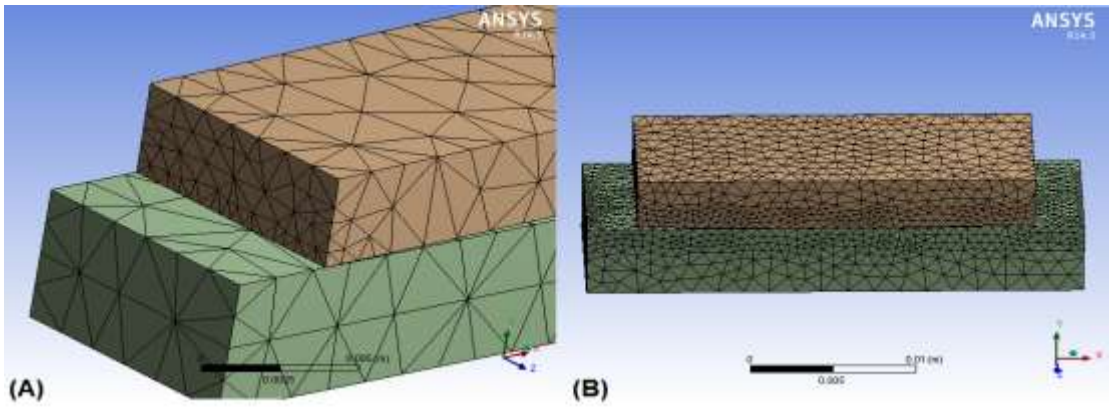
2-1-2- نموذج التشبيكMeshing:

عادةً التشبيك الجيد يقود الى دقة حل أكبر ، لكن هذا يحتاج الى وقت زائد ومتطلبات حاسوبية عالية ، كمثلاًأنَّ التماس تكون حساسة لبنية التشبيك للسطوح المتماسةلذلك يوصى بعدم الاهتمام بالتشبيك في كل النموذج وإنما فقطمنطقة التماس[11]،وبناءاًعليه تمَّ إنشاء نموذج التشبيك في هذه الدراسة والموضحفي الشكل (14) وفقاً لثلاث مراحل هي :

أولاً :اختيار طريقة التشبيك (نوع العناصر)**(Mesh Method)**:يتم اختيار نوع العناصر بحيث تسمح لنا بتحسين شروط التشبيك في مناطق التماس من خلال إجراء عمليات تحديد حجم العنصر والتنعيم اللاحقة . ومن أجل ذلك تمَّ اختيار عناصر رباعية الوجو(Tetrahedrons).

ثانياً: تحديد حجم العنصر في منطقة التماس من خلال الخاصية **(Contact Sizing)**:وحُدِّدَ لأجل هذه الدراسة حجم العنصر $(element\ size = 0.001mm)$.

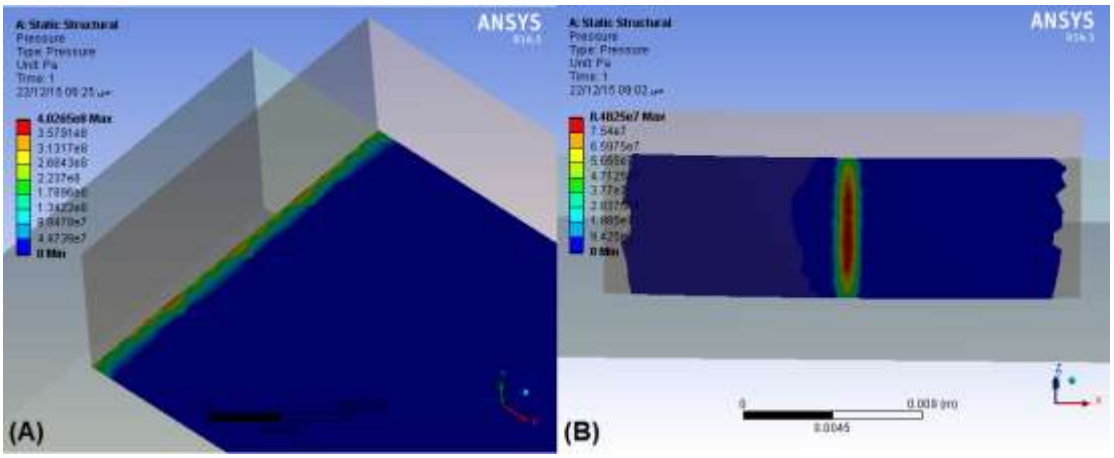
ثالثاً : تنعيم بنية التشبيك في منطقة التماس من خلال الخاصية **(Refinement)** : أُختيِرَت سطوح التماس لأجل السن المتوج وحافة التماس لأجل السن المستقيم ،وأُعتُمِدَ معدل التنعيم الأول (Refinement =1) .



الشكل (14) نموذج التشبيك لحالة التماس من ANSYA Workbench 14.5 . (A) بدون تتويج، (B) مع تتويج

النتائج والمناقشة :

يوضح الشكل (15) توزع الاجهادات في مناطق التماس لأجل أسنان القارنات المسننة المستقيمة والمتوجة :



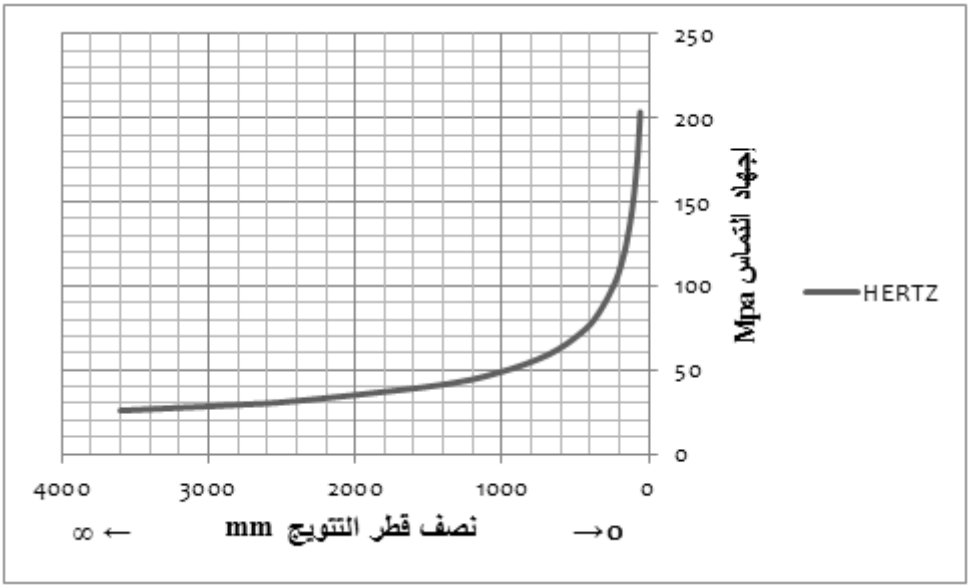
الشكل (15) توزع الاجهادات في مناطق التماس . (A) بدون تتويج ، (B) مع تتويج

يوضح الجدول (6) التفاوت بين قيم (Hertz)النظرية وقيم (ANSYS) التحليلية عند حساب اجهادات التماس الأعظمية لنموذج تماس سنين في قارنة مسننة متوجة بنصف قطر تتويج ($\rho = 343\ mm$):

الجدول (6) التفاوت بين الحسابات النظرية و حسابات ANSYS لأجل اجهادات التماس

نصف قطر التتويج (mm)	$\sigma_c(Hertz)$ (Mpa)	$\sigma_{CP\ MAX}(ANSYS)$ (Mpa)	التفاوت ($\%$)
$\rho = 343$	84,27	84,82	0,65

ويوضح الشكل (16) العلاقة بين نصف قطر التتويج وإجهاد التماس وفقا لحسابات معادلة هرتز النظرية :



الشكل (16) العلاقة بين نصف قطر التتويج وإجهاد التماس

وكما هو واضح من المخطط السابق فإن العلاقة بيننصف قطر التتويج وإجهاد التماس عكسية وبالتالي فإن زيادة نصف قطر التتويج تعني قيم إجهاد تماس أقل والعكس بالعكسوبذلك يكون السنالمستقيم الذي يمكن اعتباره سناً متوجاً بنصف قطر لانهائي (الخط المستقيم هو عبارة عن قوس لدائرة مركزها في اللانهاية)السن الأمثل عند العمل تحت شروط تسامتية للأعمدة بحيث يتحقق ($\rho \to \infty \ \Rightarrow \ \sigma_c \longrightarrow 0$) ، ولكن وجود قيم لا تسامت بين الأعمدة المتصلة تجعل من السن المستقيم السن الأضعف والأقل قدرة على نقل الأحمال بدون تضرر وذلك لأن النقل عندها سيتم من خلال أطراف السن وبالتالي قيم إجهاد أعظمية وبكلامٍ آخر ($\rho \to 0 \ \Rightarrow \ \sigma_c \longrightarrow \infty$) .

ويوضح الجدول (7) معدل تركز الإجهاد الذي يحدث على أطراف السن المستقيم عند استخدام هذا النوع من الأسنان في القارنة المدروسة لنقل عزوم الدوران بين الأعمدة غير المتسامتة عند درجة عدم تسامت^{0}1 ($\alpha = 1$):

الجدول (7) معدل تركز الاجهاد لحالة تماس سن مستقيم بدون تتويج عند درجة عدم تسامت $\alpha = 1^0$

اجهاد التماس من ANSYS	حالة تماس مع تتويج $\rho = 344{,}6\ mm$	حالة تماس سن مستقيم بدون تتويج	معدل تركز الاجهاد
$\sigma_{CP\ MAX}(ANSYS)$ (Mpa)	84,82	402,65	4.75

الاستنتاجات والتوصيات :

الاستنتاجات :

تمَّ حساب اجهاد التماس الأعظمي عن طريق معادلة هرتز ،وأجريت الدراسة التحليلية باستخدام طريقة العناصر المنتهية بمساعدة برنامج (ANSYS14.5) لأجل حالة تماس بين سنين في قارنة مسننة موصوفة . أظهرت النتائج تفاوتاً صغيراً بين النتائج النظرية والتحليلية وهذا يدل على دقة نموذج ال (FEM)،وأكدَّت أهمية التتويج لسن جسم القارنة المسننة للحصول على توزيع منتظم للإجهادات على سطوح التماس ، بدلاً من تركز الإجهادات الكبير الذي يحدث عند استخدام الأسنان المستقيمة تحت شروط عدم التسامت، والتي تعدُّ سبباً رئيسياً للفشل المبكر للقارنات المسننة .

التوصيات :

1. دراسة العلاقة بين التتويج وتركز الاجهادات في القارنات المسننة .
2. دراسة تأثير محتوى الكربون على الاهتراء للفولاذ الكربوني .
3. دراسة تأثير التتويج على تخفيض الاهتزازات في القارنات المسننة .
4. دراسة تأثير التتويج على عدد الأسنان الداخلة في تماس والناقلة لعزم الفتل .

المراجع :

1- WOODRUFF,E.B;LAMMERS,H.B;LAMMERS,T.F. *Steam Plant Operation*. 8nd. ed., U.S.A ,1968,795.

2- CALISTRAT,M.M.*Mechanical Shaft Couplings*. CRC Handbook of Lubrication U.S.A. Vol. 11,1983, 565-579.

3- MANCUSO,J.R.*Coupling and Joints : Design, Selection, and Application*. 2nd. ed., Marcel Dekker, New York U. S. A,1999, 594.

4- LAGUTIN,S;UTKIN,B;KLOCHKOV,A. *Gear Couplings and Spindles with Equal in Strength Teeth.*Machine Design, RUSSIA. Vol.4 ,No.3,2012, 167-170.

5- SZENTE,J;KELEMEN,L. *Mathematical Models for Tooth Surfaces of GearCoupling.* Design of Machines and Structures, HUNGARY .Vol. 2, No. 1,2012,73-82.

6- DASPATTANAYAK,T;MOHANTY,K. Effect of Heat Treatment on Wear Properties of Plain Carbon Steel. National Institute of Technology Rourkela, INDIA. 2013, 45 .

7- GUPTA,A.k;MISHRA,D.N. An Experimental Investigation of the Effect of Carbon Content on the Wear Behavior of Plain Carbon Steel. International Journal of Science and Research, INDIA. Vol.2, No.7, 2013, 222-224.

8- GURUMANI,R;SHAMMUGAM,S.*Modeling and Contact Analysis of Crowned Spur Gear Teeth*. Engineering Mechanics,INDIA.Vol. 18, No. 1,2011, 65-78

9- KANBER,B;DEMIRHAN,N.*Finite element analysis of frictional contact of elastic solids with thin and moderately thick coatings*. Turkish Journal of Engineering and Environment Sciences, TURKEY,2013, 162-177.

10- KARAVEER,V;MOGEEKAR,A;T.JOSEPH,P.R. *Modeling and Finite Element Analysis of Spur Gear*.International Journal of Current Engineering and Technology, INDIA.Vol. 3, No. 5,2013,2104-2107

11- .GUE,L. *Gear Tooth Contact Stress Analysis in Spur Gears By Finite Element Meshing Simulation*. University of Alberta , CANADA,2008, 54.

12- GUO,Y;KELLER,J;ERRICHELLO,R;HALSE,C. *Gearbox ReliabilityCollaborative Analytic Formulation for the Evaluation of Spline Couplings*. National Renewable Energy Laboratory, U. S. A ,2013, 40.

13- WEI,Z. *Stresses and Deformation in Involute Spur Gears by Finite Element Method*. Mechanical Engineering University of Saskatchewan ,CANADA,2004, 108

14- .IVANCO,V.*Nonlinear Finite Element Analysis* . Technical University of Kosice , SLOVAKIA ,2011 , 62 .

15- MCHUGH,P.*Non-linear Finite Element Analysis : Finite ElementSolution Schemes I&II*. National University of Ireland , Galway ,IRELAND,2011 , 42 .