

النمذجة الحاسوبية لمخفضات علب السرعة المخصصة لمحاور الآليات الكبيرة وتحليلها بمساعدة العناصر المنتهية

منذر إسبر*

(تاريخ الإيداع 3 / 8 / 2015. قُبل للنشر في 4 / 4 / 2016)

□ ملخص □

إن استخدام المنهجيات والتقنيات الحديثة كنهج جديد لتقييم عملية التصميم الهندسية في الصناعة دفع إلى استخدامها في تقييم تصميم علب السرعة في الآليات الكبيرة .
إن علب السرعة المصممة خصيصاً للآليات الكبيرة العاملة في ظروف القيادة على الطرق الوعرة تحتاج إلى محور قنطري portal axle يتم تثبيته بين العجلة وعمود المحور بهدف إعطاءه ارتفاعاً إضافياً للآلية عن الأرض. في هذه الدراسة، سوف يتم تحليل المحور القنطري باستخدام طريقة العناصر المنتهية (FEM). وسينفذ ذلك على ثلاثة مجموعات مختلفة لنظام المسننات المعشقة التي يجري تحليلها وهي : المسننات المعشقة بدون مسنن وسيط، مع مسنن وسيط واحد، ومع مسننين وسيطين.
كما يتم محاكاة تحليل الإجهاد الساكن لـ FEM على ثلاث مجموعات مسننة معشقة مختلفة لدراسة إجهاد انحناء الأسنان وسلوك إجهاد الاحتكاك للمسننات المعشقة في مواقع زاوية مختلفة تتراوح من 0° إلى 18° درجة.

الكلمات المفتاحية : التحليل بالعناصر المنتهية ، علب السرعة، محور .

* ماجستير - علم المواد وهندستها ، قسم التصميم والإنتاج ، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية ، جامعة تشرين ، اللاذقية - سورية.

Computer modeling of reducers gearboxes for large axes vehicles and analysis with the help of finite element

Munzer Esper*

(Received 3 / 8 / 2015. Accepted 4 / 4 / 2016)

□ ABSTRACT □

The use of modern methodologies and techniques a new approach to evaluate the process of engineering design in the industry pay to use in evaluating the speed in large cans mechanisms design.

The gearbox that is designed for big vehicles for off-road driving conditions need portal axle which installed between the wheel and the axle shaft to give higher ground clearance to the vehicle.

The modeling and simulation of spur gear which contacted with portal axle is important to predict the actual motion behavior, but it's so complicated to study.

In this study, it'll analysis the portal axle by using finite element method (FEM), modal analysis will simulated on three different combinations of gear train system, the three gear trains being analyzed are: gear train without idler gear, one idler gear and two idler gears.

FEM static stress analysis will also simulated on three different gear train to study the gear teeth bending stress and contact stress behavior of the gear trains in different angular positions from $^{\circ}0$ to $^{\circ}18$ degree.

Keywords :analysis by finite elements, gearbox, axle.

*Master in materials science and engineering, Department of production and design, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, University of Tishreen, Lattakia, Syria.

مقدمة :

المحور القنطري هو وحدة علبة المسننات مع مسننين على الأقل (مسننات الإدخال والإخراج) مجتمعة لإعطاء إزاحة أكبر بين مسنن الدخل ومسنن الخرج. تثبت المحاور القنطرية عادة على الآليات الكبيرة للقيادة على الطرق الوعرة وإكساب فراغ إضافي بين الأرض والعربة لحماية المكونات السفلية من الضرر. إن نمذجة ومحاكاة علب السرعة في المركبات العاملة في التضاريس الوعرة تعتبر هامة للتنبؤ بسلوك الحركة الفعلي [1]. فعند تصميم مسننات المحور القنطري ، يعتبر النظر في الاستجابة الديناميكية للمسننات المعشقة أمر بالغ الأهمية. كما أن الاستجابة المشروطة هي استجابة ديناميكية من المحور القنطري على شكل تحريض دوري أو شبه دوري كما في تحليل الضوضاء ، والاستجابة الهيكلية رداً على الاهتزاز. يستطيع التحليل المشروط التنبؤ بطنين الهيكل المتأثر بالحركة ، حيث يصبح مستوى الإجهاد الهيكلي عالي جداً مما يؤدي إلى تعبه وانهاره أحياناً [2]. إن الترددات أو ترددات الرنين الطبيعية محسوبة على مجموعات مسننة مختلفة باستخدام برمجيات FEM للنمذجة والمحاكاة. يتم عندئذ حساب الترددات الثمانية الأولى الدقيقة لوحدة المحور القنطري. يمثل كل نموذج مسنن معشق مجموعة مسننات مختلفة للمحور القنطري لدراسة العلاقة بين أعداد المسننات الوسيطة وتردداتها الطبيعية.

يتم إجراء تحليل مشروط على المسننات المعشقة تحت شروط الاجهاد المسبق وحالة اللاإجهاد. إن تحليل إجهاد المسننات في تطبيق نقل الحركة هام جداً وغالباً ما يتطلب تحليل إجهاد انحناء أسنان المسنن وإجهاد الاحتكاك . غالباً تم تطبيق FEM في تحليل الاجهاد والانفعال (الالتواء) لهيكل معقد متضمناً المسننات أجرى كرامبيرغر وآخرون دراسات رقمية لفحص عمر تعب الانحناء للمسننات المهمازية رقيقة الأطراف لعلب تروس الشاحنات تمت دراسة محاكاة ونمذجة FEM على أنها تطبيق عام في تحليل إجهاد المسننات المعرضة لظروف التحميل المتحركة والساكنة .

قام **فاي وتسو** [3] بتطوير نموذج تعشيق مسننات ذات بعدين وثلاثة أبعاد باستخدام FEM لدراسة تأثير إجهاد انحناء أسنان المسنن وإجهاد الاحتكاك . أثبت المؤلف صلاحية محاكاة ونموذج مسنن FEM بواسطة مقارنة إجهاد FEM مع معادلة اجهاد انحناء لويس النظرية ومعادلة إجهاد الاحتكاك هيرترز . سلوك التروس في العملية مهم لفهم كيف يتم توزيع الاجهادات من مسنن معشق لآخر .

وكان **تشن و تساي** قد أجريا تحليل الإجهاد على مجموعة مسننات حلزونية من خلال دراسة تأثيرات مقادير تصميم المسننات ومواقع الاحتكاك (الاتصال) في توزيع إجهاد المسنن .

درس **حسن** إجهاد الاتصال للمسنن المهمازي لنموذج ذات بعدين مستنداً إلى موضع زاوية مختلف . ودرس عبد الله [4] الاجهاد الجذري للمسننات المستخدمة في نقل الطاقة من خلال تحليل FEM. وتم تحليل الاجهاد الجذري استناداً إلى تأثير تحسين التعشيق، وعدد تخفيض الاسنان ، وتخفيض سماكة الحواف.

أهمية البحث وأهدافه :

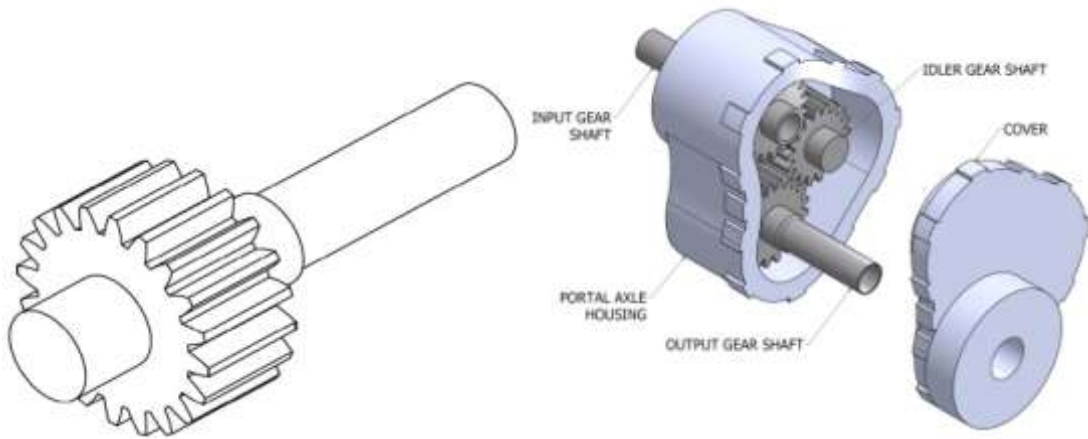
تتم أهمية البحث في تحليل علب السرعة العاملة مع المحور القنطري باستخدام طريقة العناصر المنتهية (FEM) ، ومعرفة السلوك الديناميكي للآلة بغية التنبؤ بتعب الهيكل وانهاره. وسينفذ ذلك على ثلاثة مجموعات مختلفة

لنظام المسننات المعشقة التي يجري تحليلها وهي : المسننات المعشقة بدون مسنن وسيط ، مع مسنن وسيط واحد، ومع مسننين وسيطين.

طرائق البحث ومواده :

1. نموذج عمود المسنن وعمود المسنن الوسيط

يظهر الشكل (1) نموذج لمجموعة من ثلاثة مسننات مع وحدة المحور القنطري. في هذا التحليل، تتم فقط دراسة نموذج عمود مسنن الدخل ، وعمود مسنن الخرج والمسنن الوسيط في تحليل FEM لتوفير زمن الحساب . وهذا يتجاهل تفاعل التثبيت وتركيب محامل المحور القنطري .



الشكل (2) نموذج لمحور مسنن الدخل والخرج

الشكل (1) مجموعة محاور المسننات لوحدة المحور القنطري

تتم نمذجة عمودي الدخل والخرج للمحور القنطري على غرار المسننات التي تتشارك بنفس المعايير التصميمية. كما تتم نمذجة عمود المسننات باستخدام برنامج التصميم بمساعدة الحاسوب Autodesk Inventor 2013 Student Edition كما في الشكل / 2 / . طول العمود 200 مم والقطر 30 مم. أما المسنن الوسيط ، الذي يتعشق بين مسنن الدخل ومسنن الخرج ، فتتم نمذجته بنفس قطر المحور وبطول أقصر وهو 100 مم. و يتموضع المسنن الوسيط بين مسنن الدخل ومسنن الخرج ليجانب المسافة العمودية ويسمح بالدوران باتجاه واحد فقط .

كل المسننات (عمود المسنن والمسنن الوسيط) يتم تصميمها بإتباع نفس معايير تصميم المسننات وخواص المواد المبينة في الجدول / 1 / .

الجدول (1) يوضح معايير محاور المسننات وخواص المعدن

شكل المسنن	الانحناء القياسي بكامل طول الأسنان
عدد الأسنان (N)	20T
قطر الخطوة (d)	80 mm
المودول (M)	4.00 mm

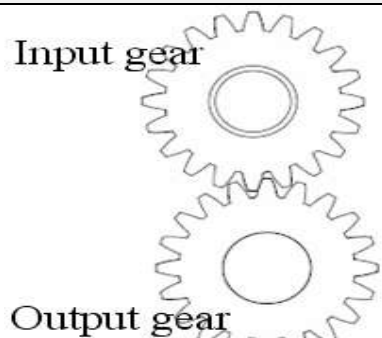
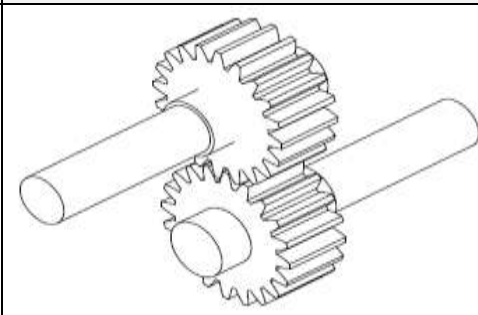
250 mm	خطوة قطرية (P_d)
20°	زاوية الضغط (ϕ)
1.0 M	طرف السن (mm)
1.25 M	جذر السن (mm)
40 mm	عرض الوجه (b_w)
1 mm	شريحة جذر السن (r_f)
حديد الإنشاءات	معدن بنية المادة
200 GPa	معامل اللدونة (E)
460 MPa	قوة الشد القصوى (UTS)
250 MPa	قوة حاصل الشد (Y_s)
0.3	Poisson's ratio (ν)

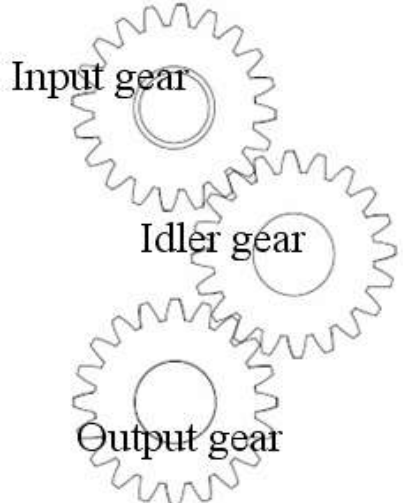
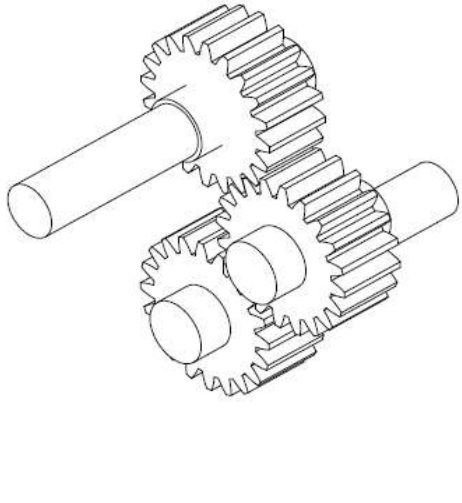
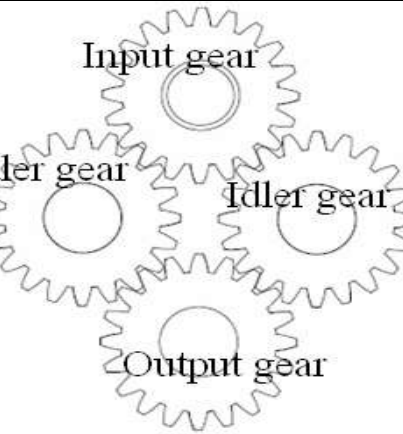
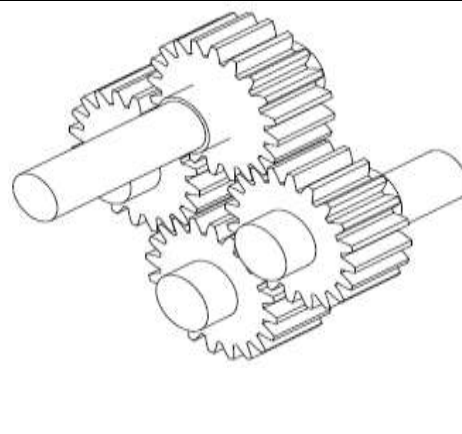
جدير بالذكر بأنه في هذا البحث ، لا يتم دراسة تأثير تقسية المسننات ومعالجتها حرارياً. ولذلك تؤخذ في الاعتبار فقط مواد المسنن أثناء التحليل ببيئة العناصر المنتهية .

2. نموذج لثلاثة مجموعات مسننة مختلفة

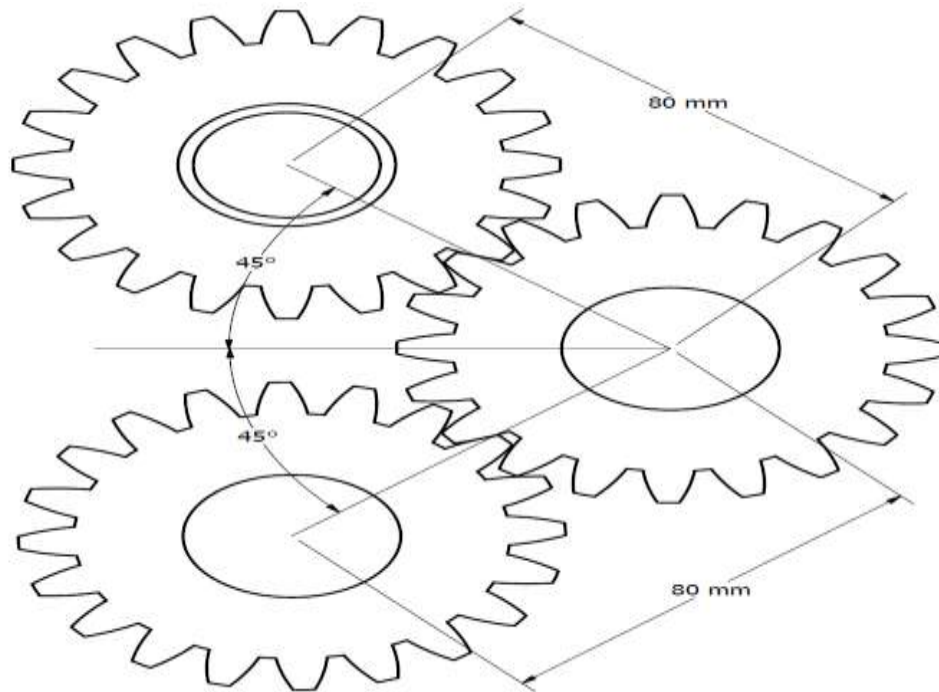
هناك ثلاثة تصاميم مختلفة تمت دراستها في هذا البحث ، وهناك ثلاثة مجموعات مسننة مختلفة تم تجميعها كما في الجدول (2) بحيث يمكن تنفيذ محاكاة FEM بشكل منفصل.

الجدول (2) يبين مجموعة مسننات مع تشكيل مختلف

مجموعة المسننات	شكل ثنائي الأبعاد	شكل متناظر (عرض الخواص الموحدة)
بدون مسنن وسيط		

مع مسنن وسيط واحد		
مع مسننين وسيطين		

- يتم تثبيت مجموعة المسننات بدون مسنن وسيط ، المؤلف من عمودي مسننات متطابقة مثبتة لتتعشق مع بعضها البعض ، و تضبط المحاور عند مسافة مركزية 80 مم وتراصف عمودي لكلا محوري المسننات .
- يتم تركيب مجموعة المسننات ذات المسنن الوسيط الواحد من عمودي مسننات ومسنن وسيط واحد. والمسنن الوسيط هو مسنن متوسط يربط بين عمودي المسننات. المسافة المركزية بين مسنن الدخل والمسنن الوسيط 80 مم ويتم رصف مسنن الدخل بمقدار 45° عن الأفق ليتعشق مع المسنن الوسيط.
- وعلى نحو مشابه ، تكون المسافة المركزية بين مسنن الخرج والمسنن الوسيط 80 مم ويتم محاذاة مسنن الخرج بمقدار 45° عن الأفق باتجاه الأسفل.

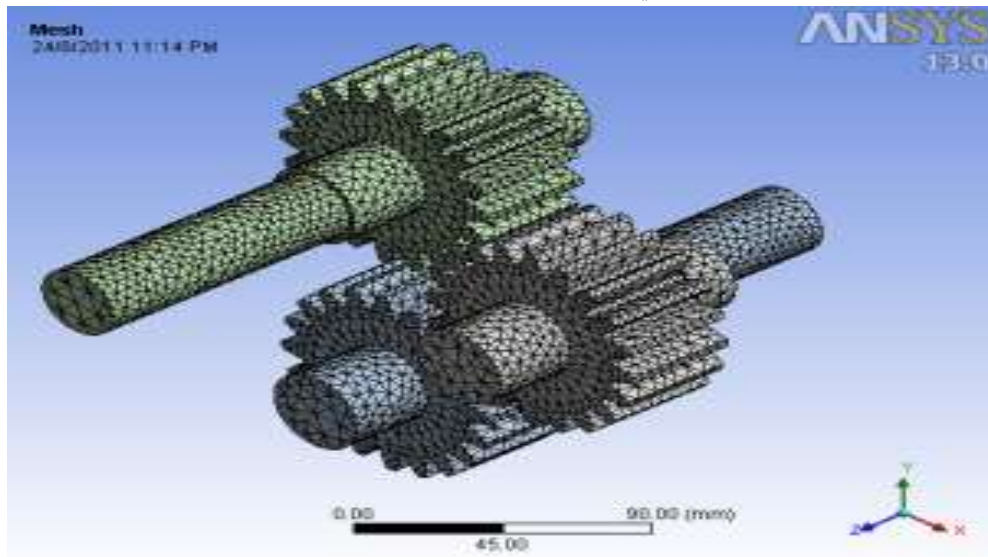


يوضح الشكل (3) الصورة الجانبية لتوضع مسننات المجموعة مع مسنن وسيط واحد .

- أما مجموعة المسننات مع وسيطين مسننين فترتب بنفس الوضعية بالمقارنة مع مجموعة المسننات بمسّن وسيط واحد ولكن مع مسنن وسيط إضافي مثبت على الجانب الآخر بين مسنني الدخّل والخرج. كل مكونات المسننات مثبتة لتدور بمعدل 1:1 من أجل تحليل FEM المين فيما يلي أدناه.

3. التحليل المشروط لثلاثة مجموعات مختلفة من المسننات

إن التحليل المشروط ، يعني دراسة شكل نمط الهيكل تحت إثارة التردد الطبيعي الأمر الذي يعتبر هاماً جداً في سياق التصميم. وتم تحليل النتائج المشروطة للمسننات بتراكيبها المختلفة (بدون مسنن وسيط ، مسنن وسيط واحد ومسننين وسيطين) بحالتي اللاإجهاد والإجهاد المسبق. وأيضاً، تمت دراسة حالتي اتصال زوج الأسنان المفردة واتصال زوج الأسنان المضاعفة بين المسننات في التحليل.



الشكل (4) يبين نموذج تجزيء المسننات مع مسنن وسط واحد للتحليل الشرطي

1.3 - أشكال النماذج Mode shapes

تم حساب نماذج المسننات في البيئة FEM بشكل مستقل عن أي تحريض، مما يعني أن الهيكل يعتمد فقط على توزيع الكتلة والصلابة. ومعروف بأن وسائط الطنين المنخفضة (الوسائط القليلة الأولى) مع الاستجابة العالية الشرطية (السعة العالية للتحريض) تكون متناظرة بالمقارنة مع وسائط الرنين العالية. أكد الباحثون أيضاً أن الوسائط الأعلى تكون أكثر حساسية للتغيرات الهيكلية. وبالتالي قد تكون التغيرات الهيكلية غير فعالة إذا كانت لا تتوافق مع تعديل كبير للكتل [2, 3].

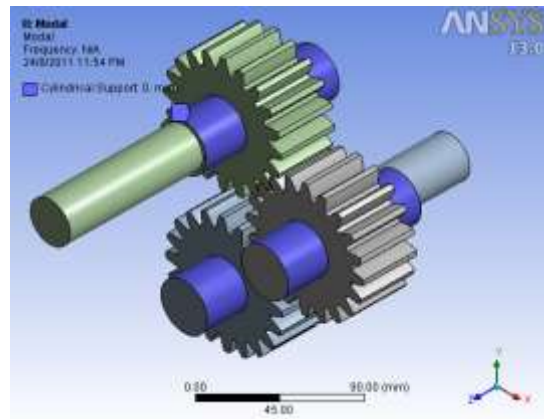
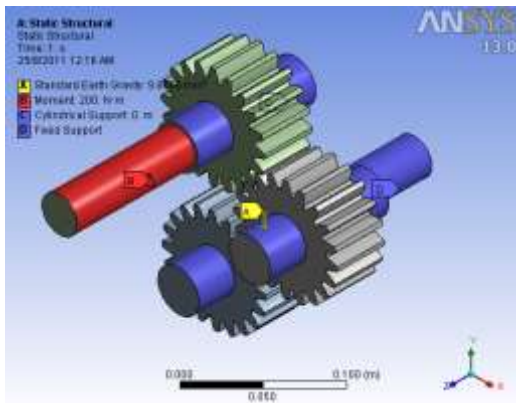
2.3 . إعدادات تجزيء المسننات Mesh settings of the gear train

في طاولة عمل ANSYS ، يتم استدعاء ملفات تصاميم المسننات الثلاثة. وفي التحليل الشرطي باستخدام FEM ، يتم تجزيء (meshing) كل نموذج مسننات مع عناصر رباعية نقية بحجم عناصر متوسطة 5mm. الشكل (4) يظهر نموذج تجزيء المسننات مع مسنن وسيط واحد. ويتألف النموذج من 18277 nodes عقدة و 9803 عنصراً.

3.3 . إعدادات شروط نطاق المسننات

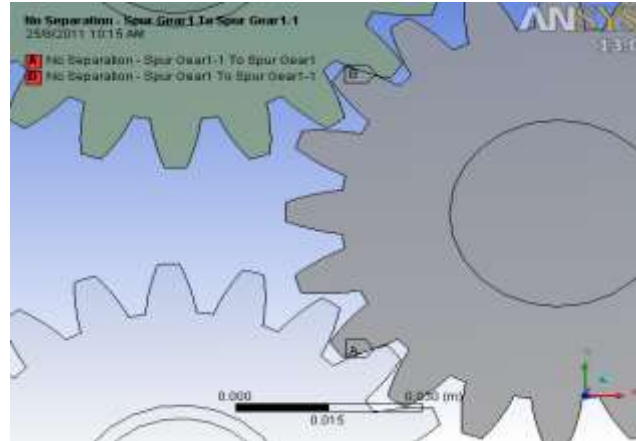
تم استخدام برنامج ANSYS Workbench لتطبيق معوقات الحركة وشروط الاحتكاك. وهناك شرطان مختلفان يتم تحليلهما في إجراء التحليل المشروط للمسننات. كما تم تحليل الترددات الطبيعية الستة الأولى ونماذج أشكالها على المسننات بدون حالة الإجهاد المسبق متضمنة الكوابح فقط وحالة الإجهاد المسبق متضمنة الكوابح والأحمال.

في حالة اللاإجهاد ، تم افتراض الدعم الاسطواني - محامل المسننات - التي تسمح بالحركة الدورانية على طول محور العمود ولكنها تكبح الحركة المحورية والحركة الشعاعية. يبين الشكل (5) المسننات مع مسنن وسيط واحد في حالة الإجهاد المسبق. حيث أنه حالة الإجهاد المسبق للمسننات يتم ضبط قواعد الدعم الاسطواني بنفس الطريقة كما في حالة اللاإجهاد. وتم تطبيق الحمل الناجم عن وزن المكونات (تأثير الجاذبية الأرضية) وكذلك تطبيق حمل عزم الدوران 200 Nm على مسنن محور الدخل.



الشكل (5) حالة الإجهاد الحر مجموعة مسننات مع مسنن وسيط الشكل (6) حالة الإجهاد المسبق

تم بشكل كامل كبح السطح الاسطواناني لمحور مسنن الخرج لخلق حالة الحمل الساكن. في حالة الإجهاد المسبق الشكل (6)، تم حساب الإجهاد الناجم عن العزم والجاذبية أولاً قبل تطبيق التحليل المشروط. في تحليل المسننات المشروط ، تم أيضاً تحليل احتكاك الأسنان الزوجية المفردة بين المسننات واحتكاك الأسنان الزوجية المضاعفة بين المسننات . يوضح الشكل (7) بالتفصيل كيفية وضع احتكاك الأسنان الزوجية المفردة بين مجموعتي التعشيق لمجموعة المسننات ذات مسنن وسيط واحد. وقبل احضار النموذج إلى ANSYS Workbench ، تمت محاذاة سطح الأسنان لمسننين مختلفين لاحتكاك السطحين باستخدام برنامج نمذجة 'Tangential constraint' in Autodesk Inventor 2013. ولضبط احتكاك الأسنان الزوجية المفردة بمساعدة FEM ، تم تحديد سطح الاحتكاك و سطح الهدف كما تم ضبط نمط الاحتكاك على وضعية 'No Separation' . في ANSYS Workbench ، إن احتكاك 'No Separation' هو احتكاك خطي يكون فيه الاحتكاك السطحي قاسياً ويسمح بانزلاق صغير جداً باتجاه التماس من سطح الاحتكاك . وبالمثل ، تدور المسننات بحيث يكون لكل مسنن احتكاك مع المسنن الآخر . لاحقاً ، يتم استحضار النموذج إلى ANSYS Workbench ويتم تحديد سطوح الاحتكاك.



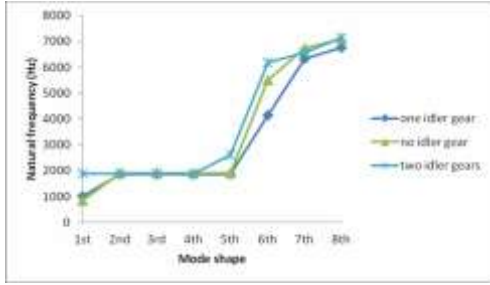
الشكل (7) عرض تفصيلي جانبي لتعشيق أحادي

النتائج والمناقشة

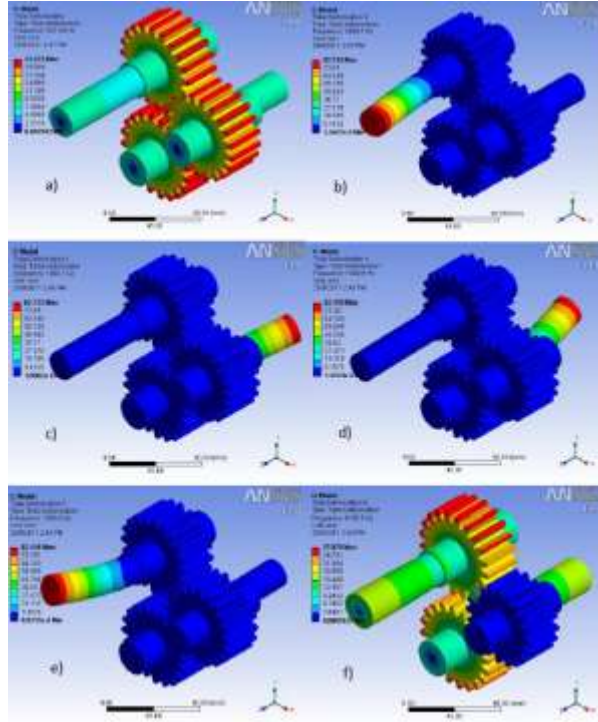
1. التحليل المشروط للمسننات في حالة اللا إجهاد

إن شكل النمط الأول وشكل النمط السادس للمسننات متناظرة مع اللي والتمدد الشعاعي حول أسنان المسنن. تحدث اهتزازات الانحناء عند محور مسنن الدحل من أجل شكل النموذج الثاني و الرابع ، في حين أن الشكل الثالث والخامس يظهر اهتزازات الانحناء والالتواء التي تحدث عند محور مسنن الخرج . الشكل (11) يظهر الترددات الطبيعية الثمانية الأولى من مجموعة المسننات المختلفة الثلاثة المعرضة لتماس الأسنان الزوجية المضاعفة. كما إن الأشكال النمطية من الأول إلى الخامس لمجموعة المسننات الثلاثة هي ذات ترددات طبيعية مشابهة ولكنها تتناظر مع الأشكال النمطية المختلفة. هذا يدل على أن هناك احتمالات بأن يحدث أكثر من شكل واحد للترددات الطبيعية نفسها.

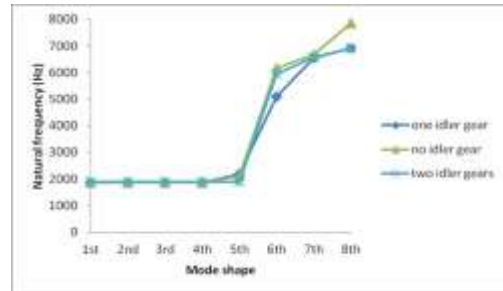
يخضع النموذج الأول إلى الخامس من الأشكال على تردد طبيعي قدره 1800 هرتز. تبين أيضاً أنه في الترددات الطبيعية كافة مجموعات المسننات ذات سلوك متشابه بالنسبة لعدد من الأنماط الدقيقة الأولى (أعلى سعة من التشوهات) للمسننات الثلاثة في حالة اللإجهاد المحصول من FEM. تبين أيضاً أن مسنن الدخول هو أكثر عرضة للعبط أمام التشوهات الاهتزازية من كافة أنواع المسننات الأخرى. ويلى ذلك مسنن الخرج والمسنن الوسيط. أما انحناء المحور ودوران المسنن والتمدد الشعاعي فهي تشوهات اهتزازية تحدث بشكل متكرر في كافة المسننات.



الشكل (10) أول ثمانية ترددات طبيعية لثلاثة مسننات مختلفة بحالة الإجهاد الحر لتعشيق أسنان أحادي.



الشكل (11) أول ثمانية ترددات طبيعية لثلاثة وسائط واحد في حالة الإجهاد الحر ومعرضاً لتماس الأسنان الزوجية.



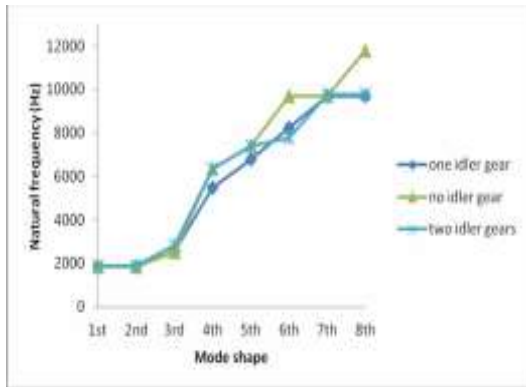
الشكل (9) أشكال النماذج الستة الأولى للمسننات مع مسنن مسننات مختلفة بحالة الإجهاد الحر لتعشيق أسنان مزدوج.

2 - التحليل المشروط للمسننات في حالة الإجهاد المسبق

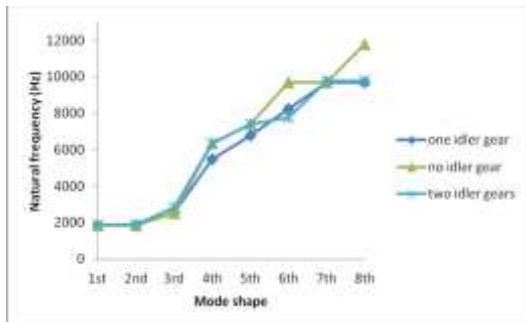
يبين الشكل (12) الأشكال الستة الأولى للمسننات مع مسنن وسيط واحد مع كل مسنن معشوق مع مسنن آخر في تماس الأسنان الزوجية المضاعفة. يشير الرسم (wireframe) إلى نموذج المسنن غير المشوه . من الأشكال الستة الأولى ، محور مسنن الدخول أكثر عرضة للتشوهات الكبيرة في التوسع الشعاعي وانحناء المحور ضعيف عند التواء المحور والمسنن.

الشكل (13) يبين مقارنة الترددات الثمانية الطبيعية الأكثر انخفاضاً للمسننات الثلاثة في حالة الإجهاد المعرضة لتماس الأسنان الزوجية المفردة. حيث يتم تحريض إشكال النموذج الأول إلى الثالث بواسطة الترددات الطبيعية المماثلة القريبة من 1800 هرتز .

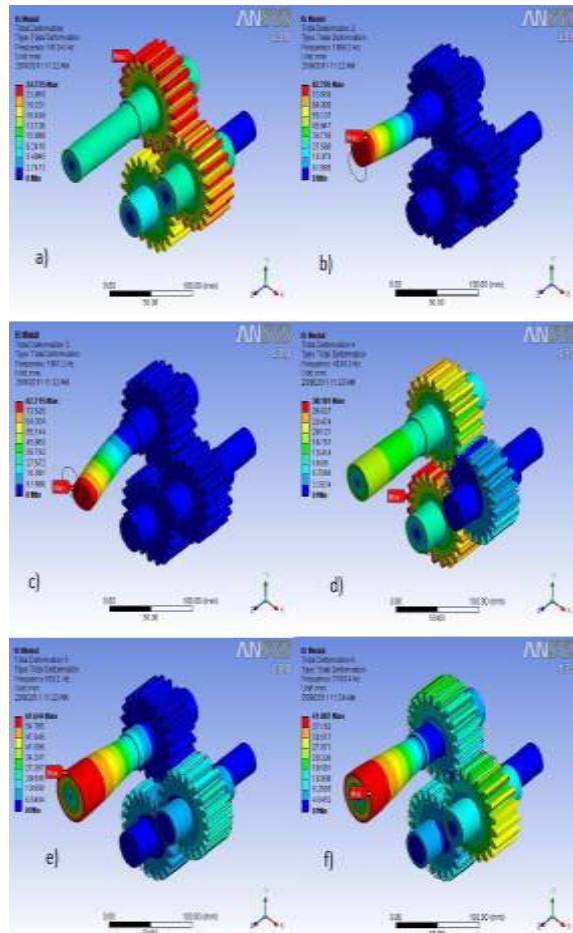
ومع ذلك، تزداد كل الترددات الطبيعية للمسننات جذرياً مع شكل النموذج التالي بدءاً من شكل النموذج الرابع . يتم تحريض الأشكال الأولى والثانية بواسطة الترددات الطبيعية المماثلة حول 1900 Hz. كما تزداد كل الترددات الطبيعية للمسننات جذرياً مع شكل النموذج التالي بدءاً من شكل النموذج الثالث.



الشكل (13) أول ثمانية ترددات طبيعية لثلاثة مسننات مختلفة بحالة ما قبل الإجهاد لتعشيق أسنان أحادي.



الشكل (14) أول ثمانية ترددات طبيعية لثلاثة مسننات مختلفة بحالة ما قبل الإجهاد لتعشيق مزدوج



الشكل (12) أشكال النماذج الستة الأولى للمسننات مع مسنن وسيط واحد في حالة الجهاد .

الشكل (14) يبين مقارنة بين الترددات الثمانية الطبيعية الأكثر انخفاضاً للمسننات الثلاثة في حالة اللاجهاد المعرضة لتماس الأسنان الزوجية المضاعفة . يتم تحريض الأشكال الأولى والثانية في التحليل الديناميكي أو تحليل الاهتزازات حيث لا تستطيع الترددات الطبيعية في تصميم المسننات أن تلبى نطاق التردد التشغيلي لوحدة المحور القنطري وإلا سيحدث رنين ذو سعة عالية جداً من التحريض. ولدراسة سلوك تردد الرنين للمسننات ، تتم مقارنة مجال الترددات التشغيلية لوحدة المحور القنطري بالمقارنة مع الترددات الطبيعية الثمانية الأولى المحسوبة بمساعدة FEM .

يتم الحصول على مجال سرعة التشغيل للمحور القنطري من صحائف المواصفات المقدمة من قبل الشركة المصنعة، والتي تكون بين 500 دورة في الدقيقة إلى 4000 دورة في الدقيقة. ولذلك فإن مجال ترددات التشغيل لوحدة المحور القنطري المحسوبة هي بين 8 هرتز إلى 66 هرتز. لذلك فإن مجال تردد التشغيل يعتبر صغير جداً بحيث أنه آمن للعمل طالما أن التردد الطبيعي الأخفض لتصميم أي مسننات ثلاثية تصل إلى 2000 هرتز.

يتبأ تحليل FEM بأن هذا الرنين لن يحدث على أي من تصاميم المسننات وأنها آمنة للعمل.

الجدول (3) يصف بشكل موجز لأشكال الثمانية

Mode shape	Gear train with no idler		Gear train with one idler		Gear train with two idlers	
	Single pair tooth contact	Double pair tooth contact	Single pair tooth contact	Double pair tooth contact	Single pair tooth contact	Double pair tooth contact
1st	Gear rotation (input gear)	Shaft bending (input gear)	Gear rotation (output gear)	Shaft bending (input gear)	Shaft bending (output gear)	Shaft bending (output gear)
2nd	Shaft bending (input gear)	Shaft bending (output gear)	Shaft bending (input gear)	Shaft bending (output gear)	Shaft bending (input gear)	Shaft bending (input gear)
3rd	Shaft bending (input gear)	Shaft bending (input gear)	Shaft bending (output gear)	Shaft bending (input gear)	Shaft bending (output gear)	Shaft bending (output gear)
4th	Shaft bending (input gear)	Shaft bending (input gear)	Shaft bending (output gear)	Shaft bending (input gear)	Shaft bending (input gear)	Shaft bending (output gear)
5th	Shaft bending (input gear)	Gear rotation (input gear)	Shaft bending (input gear)	Gear rotation (output gear)	Gear rotation (idler gear)	Shaft bending (input gear)
6th	Shaft radial expansion (input gear)	Shaft radial expansion (input gear)	Gear rotation (input gear)	Gear rotation (input gear)	Shaft radial expansion (output gear)	Shaft radial expansion (output gear)
7th	Shaft radial expansion (input gear)	Shaft radial expansion (input gear)	Shaft radial expansion (output gear)	Shaft radial expansion (output gear)	Shaft radial expansion (input gear)	Shaft radial expansion (input gear)
8th	Shaft radial expansion (input gear)	Radial expansion and rotation (input gear)	Shaft radial expansion (output gear)	Shaft radial expansion (input gear)	Shaft radial expansion (output gear)	Shaft radial expansion (output gear)

الجدول (4) السعة الأكبر للتشوه بين أشكال النماذج الاهتزازية الثمانية الأولى للمسننات في حالة اللإجهاد.

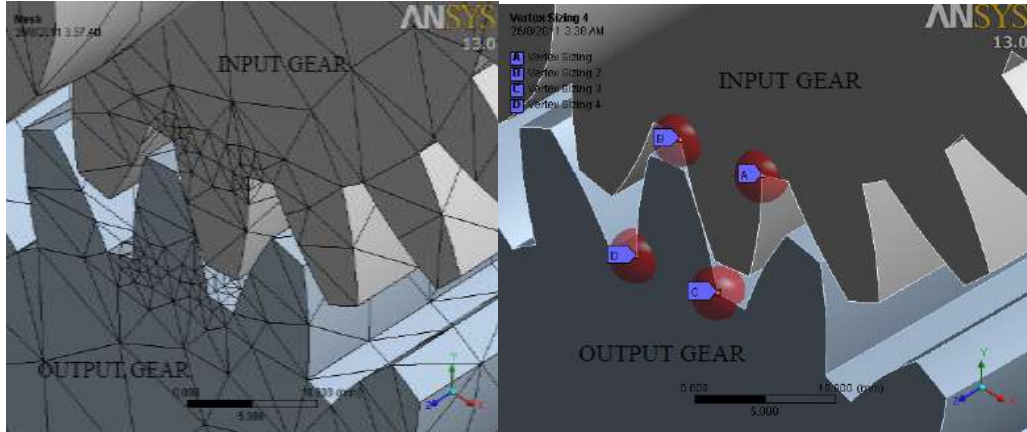
Mode shape	Gear train with no idler		Gear train with one idler		Gear train with two idlers	
	Single pair tooth contact	Double pair tooth contact	Single pair tooth contact	Double pair tooth contact	Single pair tooth contact	Double pair tooth contact
1 st	Gear rotation (input gear)	Shaft bending (input gear)	Gear rotation (input gear)	Shaft bending (input gear)	Gear rotation (input gear)	Shaft bending (input gear)
2 nd	Shaft bending (input gear)	Shaft bending (input gear)	Shaft bending (input gear)	Shaft bending (input gear)	Shaft bending (input gear)	Shaft bending (input gear)
3 rd	Shaft bending (input gear)	Gear rotation (input gear)	Shaft bending (input gear)	Gear rotation (input gear)	Shaft bending (input gear)	Gear rotation (input gear)
4 th	Shaft radial expansion (input gear)	Shaft radial expansion (input gear)	Gear rotation (output gear)	Shaft radial expansion (input gear)	Shaft radial expansion (input gear)	Shaft radial expansion (input gear)
5 th	Shaft radial expansion (input gear)	Shaft radial expansion (input gear)	Shaft radial expansion (input gear)	Shaft radial expansion (input gear)	Gear rotation (idler gear)	Gear rotation (idler gear)
6 th	Shaft slender (input gear)	Shaft slender (input gear)	Shaft radial expansion (input gear)	Gear rotation (idler gear)	Shaft radial expansion (input gear)	Shaft radial expansion (input gear)
7 th	Shaft slender (input gear)	Shaft slender (input gear)	Shaft slender (input gear)	Shaft slender (input gear)	Gear rotation (input gear)	Shaft slender (input gear)
8 th	Shaft axial compression (input gear)	Shaft axial compression (input gear)	Shaft slender (input gear)	Shaft slender (input gear)	Shaft slender (input gear)	Shaft slender (input gear)

يصف الجدول (4) باختصار الأشكال الدقيقة الثمانية الأولى (السعة الأكبر للتشوه) لمجموعات المسننات الثلاث في حالة الإجهاد المسبق. بالنسبة لمجموعات المسننات في حالة الإجهاد المسبق، يعتبر مسنن الدخل الأكثر عتياً تجاه التشوهات الاهتزازية مقارنة مع المسنن الوسيط ومسنن الخرج. إن انحناء المحور ودوران المسنن والتوسع الشعاعي هي التشوهات الاهتزازية التي تحدث بشكل متكرر في المسننات.

ومن تحليل أشكال النماذج يكون ترتيب أو تسلسل التشوهات الاهتزازية لأشكال الأنماط الثمانية الأولى للمسننات في حالة اللإجهاد فريداً من نوعه ولن تكون هي نفسها الموجودة في حالة الإجهاد المسبق. وهذا ينطبق أيضاً على مجموعة المسننات المعرضة لاحتكاك الأسنان الزوجية المفردة و احتكاك الأسنان الزوجية المضاعفة. لقد تمت محاكاة تحليل إجهاد FEM على مجموعات المسننات بتراكيب مختلفة (بدون مسنن وسيط، مع مسنن وسيط واحد، مع مسننين وسيطين) حيث يتم تحليل النماذج الثلاث لسلوك إجهاد انحناء المسننات وإجهاد الاحتكاك بشكل منفصل بالنسبة للتغير في مواضع المسننات من الزاوية 0° لـ 18° .

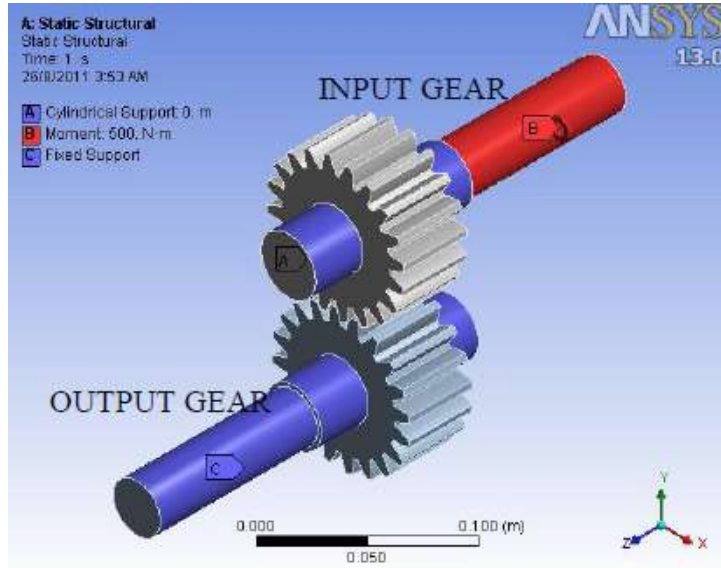
3. إجهاد انحناء أسنان المسنن باستخدام FEM

تمت نمذجة مجموعة المسننات ثلاثية الأبعاد بدون مسنن وسيط. وتمت محاكاة احتكاك أسنان زوجية مفردة بعناية باستخدام Autodesk Inventor program. كما تم اختيار عنصر رباعي الأوجه لبناء نموذج تجزيء FE لمجموعة المسننات بحجم عناصر خشنة تتراوح من 10 mm حتى 15 mm. وتم تركيز التجزيء على شريحة جذر المسنن لتحديد إجهاد الانحناء الدقيق. وتم إجراء تركيز للتجزيء بحجم عنصر 1mm بواسطة إعداد شعاع تأثيره 3 mm عند كل رأس سن من شريحة جذر أسنان المسنن كما هو مبين في الشكل (15) والشكل (16) حيث يبين نموذج التجزيء بعد إعداد التجزئة mashing المطلوبة.



الشكل (15) توضيح التعشيق باستخدام شعاع 3مم. الشكل (16) مخطط شبكي لمجموعة مسننات بنمذجة العناصر المنتهية FE.

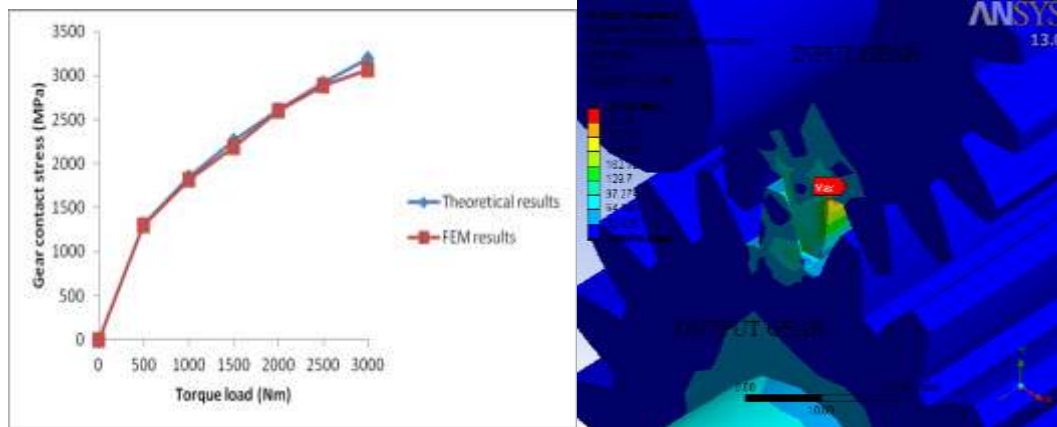
كان مسننا التعشيق متطابقين وكان احتكاك الأسنان الزوجية المفردة تلامس بعضها الآخر بشكل تماسي في نقطة واحدة. في إجهاد الانحناء ، تم ضبط سطح الاحتكاك بين المسننات ليكون احتكاكاً قاسياً باختيار نمط احتكاك 'No Separation' ، والمعروف أيضاً بالاحتكاك الخطي ، وتم تجاهل الاتصال الاحتكاكي في هذا التحليل لتخفيض زمن الحساب. المجال الرئيسي لهذا التحليل هو الحصول على إجهاد انحناء أكبر من إجهاد الاحتكاك. تمت معاملة الدعم الاسطواني كدعم مثالي . يسمح فقط بالحركة الدورانية ويطبق على المسننات كما في الشكل (17).



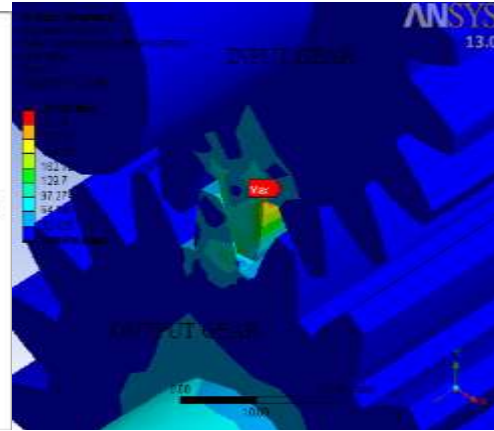
الشكل (17) معايرة الحالة المتاخمة لمجموعة الأسنان لتحليل إجهاد الانحناء ل FE.

تم تطبيق عزم 500 Nm (كما هو موضح بالفقرة 3-3 من شروط تحميل المسننات) ووفق الحمولة الاسمية للمسننات والواقعة بين 8-66 هرتز يطبق هذا العزم ثم يقوم البرنامج بتحليل القيم الأكبر والأصغر للحصول على المنحني البياني الشكل (18) ، حيث تم تطبيقه على عمود مسنن الدخل وتم كبح عمود مسنن الخرج بشكل كامل لخلق قوة رد فعل بين أسنان المسنن. يبين الشكل (18) إجهاد الانحناء الأعظمي وقدره 291.82 MPa يحدث على جانب واحد من شريحة الجذر لمسنن الدخل.

تنتبأ حالات محاكاة FE بأن شريحة الجذر أكثر ميلاً لإجهاد الانضغاط من إجهاد الشد.



الشكل (18) يبين إجهاد المسننات عند تطبيق عزوم مختلفة.



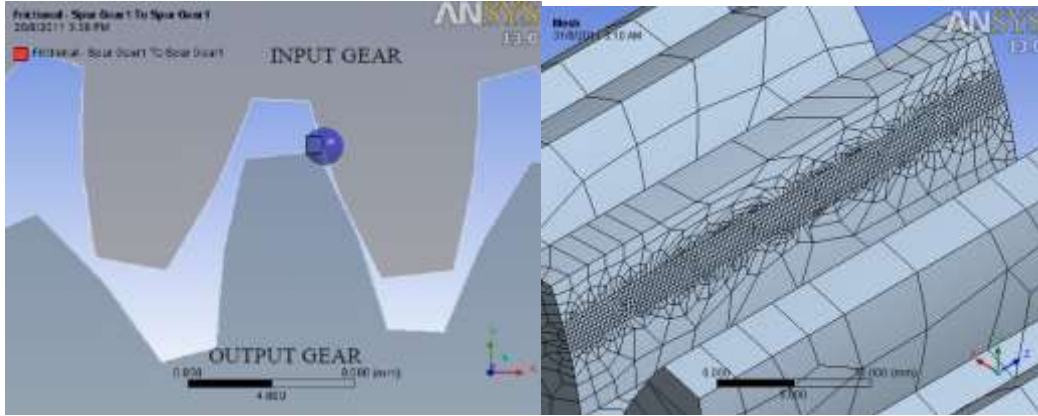
الشكل (19) نتائج محاكاة FE لإجهاد الانحناء على جذر السن.

تتسجم نتائج FEM مع النتائج النظرية لكلتا الحالتين. كما أن فرق النسبة المئوية بين النتائج النظرية ونتائج إجهاد FEM هي بمعدل 6% ، والتي ما زالت مقبولة . لذلك، هذا يثبت صحة نتائج إجهاد FE المحسوبة وأيضاً نموذج FE للمسننات .

4 . إجهاد اتصال أسنان المسنن باستخدام FEM

يتم جلب مجموعة الأسنان المعشقة FE ثلاثية الأبعاد بدون مسنن وسيط إلى ANSYS القسم الذي يصف اتصال (تماس) أسطوانيين متطابقين متناظرين . [5, 6].

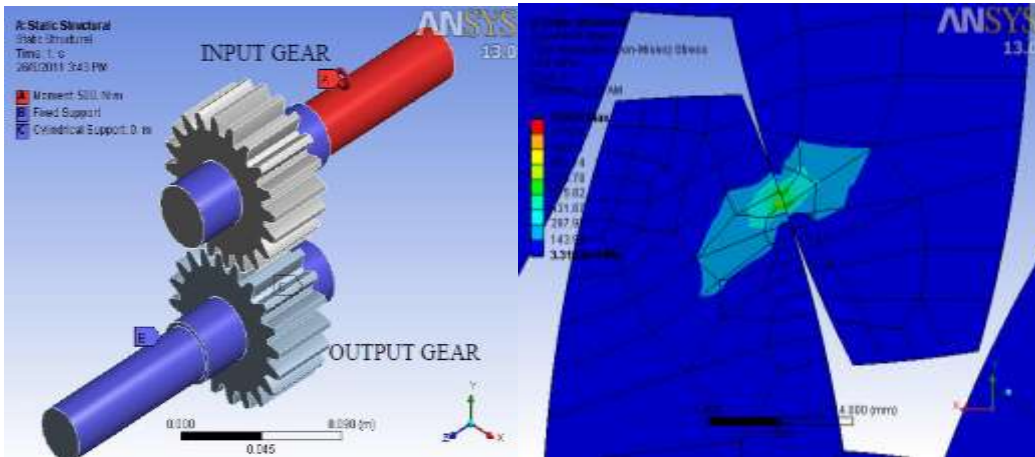
تمت عملية محاذاة اتصال أسنان مزدوجة فردية بين المسننات بعناية باستخدام Autodesk Inventor program . بالنسبة لتحليل إجهاد الاتصال بين أسنان مسننين متفاعلين تم تعيين اتصال لا خطي أو المعروف بالاتصال الاحتكاكي . وتم ضبط معامل احتكاك سطح أسنان المسنن إلى القيمة 0.2 . في حالة احتكاك ANSYS ، تم اختيار برنامج Augmented Lagrange كوسيلة حل لمسألة لا خطية الاحتكاك . وباعتبار الحمل يطبق على مسنن الدخول فقد تم تعريف سطح اتصال مسنن الدخول بـ (Contact) و سطح الاتصال لمسنن الخرج عرف بـ (Target هدف) الاحتكاك . ويبين الشكل (20) صورة جانبية لإعدادات اتصال أسنان المسننات المعشقة مع مسنن وسيط . وللتأكيد على دقة الاتصال (التلامس) فيزيائياً وتجنب الأخطاء ، تم ضبط المعالجة البينية إلى (Adjust to Touch - اضبط التلامس) وتم ضبط منطقة pinball على ('Auto Detection Value') .



الشكل (20) معايرة التشبيك لمسننات متصلة منظور جانبي. الشكل (21) شبكة دقيقة لمسنن الخرج

وفي حالة إعدادات FEM للمسننات بدون مسنن وسيط يتم وصف نم وذج FE في هذا للحصول على نتائج إجهاد اتصال أكثر دقة بمساعدة FEM ، تم تحديد حجم عنصر تجزئة السطح بـ 0.3 mm في منطقة احتكاك سطح الأسنان لكل من مسنني الدخل والخرج كما هو مبين في الشكل (21). إن مساحة الاحتكاك على سطح أسنان المسنن التي تمثل التجزئة الأنعم هي تقريباً 2 mm بـ 40 mm . والعدد الناتج للعقد هو 126463 عقدة ، وعدد العناصر المشكلة من أجل نموذج مسننات التشبيك هي 41409. وقد تم تخيئه مسنن الدخل لإظهار عناصر التشبيك الأنعم على سطح احتكاك أسنان المسنن.

من أجل تحليل الانحناء بمساعدة FEM تم ضبط الحمل والكوابح على قيمة مشابهة كما في الشكل (22) . يمثل الدعم الأسطواني ، والذي يسمح فقط بالدوران الحر ، المحامل التقديرية لدعم المسنن. أما العزم المطبق وقدره 500 Nm على محوري مسنني الدخل والخرج فيكون في حالة كبح كامل.

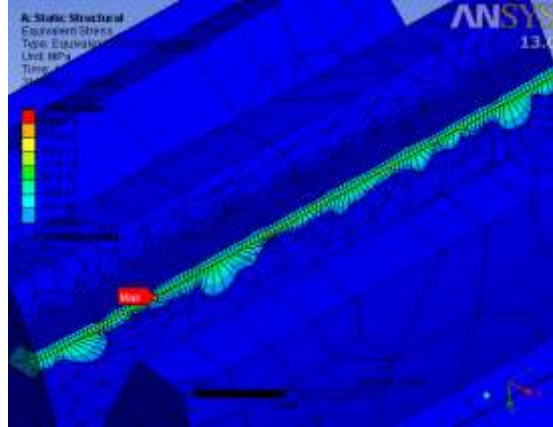


الشكل (23) توزيع الإجهاد بمساعدة FEM.

الشكل (22) معايرة الحالة المتاخمة لمجموعة الأسنان مع مسنن وسيط واحد.

يبين الشكل (23) توزيع الإجهاد على مسنني الاحتكاك في الصورة الجانبية عندما تخضع لعزم دوران 500 Nm. ينشأ إجهاد أعظمي على سطح أسنان مسنن الدخل وقدره 1295.6 MPa. ومن الصورة الداخلية فإن توزيع

إجهاد الاحتكاك بين المسننين ليس دقيقاً لأن عقد الاحتكاك ليست مرتبة في نموذج مشابه. فالعقد المبنية من عناصر كلا أسنان المسننين يجب أن تتطابق لتشكل حلاً أكثر دقة لإجهاد الاحتكاك.



الشكل (24) عرض تفصيلي لتوزيع الإجهاد مع شبكة العناصر لمسنن دخل

في الشكل (24) يمكن رؤية توزيع إجهاد الاحتكاك بشكل أكثر تفصيلاً على سطح أسنان المسنن بعد إخفاء مسنن الدخل. ومن المتوقع توجب توسيع نطاق الاحتكاك على طول سطح أسنان المسنن وذلك لتجنب تركيز الإجهاد العالي.

يبين التحليل بأن نتائج إجهاد الاحتكاك تتغير تصاعدياً عندما يتزايد عزم الدوران. أما فرق النسبة المئوية بين النتائج النظرية ونتائج إجهاد FEM هي بمعدل 4%. الذي يؤكد نتائج إجهاد الاحتكاك FE المحسوبة ونموذج FE لمسننات التعشيق.

الاستنتاجات والتوصيات

ونلخصها بالنقاط التالية :

- دراسة التحليل المشروط لنماذج مسننات التعشيق المختلفة الثلاثة باستخدام محاكاة FEM تحت حاليّ الإجهاد واللاإجهاد.
- دراسة إجهاد انحناء أسنان المسنن العظمى وإجهاد الاحتكاك باستخدام FEM لمسننات التعشيق المختلفة الثلاثة للموضع الزاوي المتغير متضمنة احتكاك زوج الأسنان المفردة والمضاعفة.
- وفي تحليل FEM المشروط لنماذج مسننات التعشيق تحت حاليّ الإجهاد واللاإجهاد تم:
- تحريض أشكال النماذج الثلاثة الأولى عند ترددات منخفضة عادية قدرها 2000 Hz . وتبين أن كافة مسننات التعشيق لها سلوك تردد طنين متشابه عندما توضع مقابل أشكال النماذج الثمانية الأولى . ويتزايد تردد طنين مسننات التعشيق بشكل كبير عندما تتعرض لحالة الإجهاد المسبق .
- الانحناء الاهتزازي للمحور ودوران المسنن وشعاع المحور حدثت غالباً في مسنن الدخل بشكل أكبر منه في مسنن الخرج بغض النظر عن نموذج مسننات التعشيق.

• كان هناك فرق كبير بين الترددات الطبيعية لمجموعات مسننات التعشيق مقارنة مع تردد التشغيل لوحدية المحور القنطري والذي هو الحالة الطبيعية. لذلك لن يحدث الطنين عند تشغيل وحدة المحور القنطري بأعلى سرعتها. ولكن يجب أداء التحليل المشروط كتحذير أمان في تصميم المحور القنطري.

المراجع

- [1] T.BRUNS ;E.SCHAFER, *modeling and identification of an all-terrain vehicle*, International Journal of vehicle systems modeling and testing,(2007) 276-295.
- [2] A.BERLIOZ ; P.TROMPETTE, *Solid mechanics using the finite element method*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons,Inc,(2010) 29-35.
- [3] S.DRACA, *Finite element model of a double-stage helical gear reduction*, Master's thesis, University of Windsor,(2006) 311-328.
- [4] A. ABDULLAH, *Powertrain engine timing gear contact analysis– Noise analysis using FEM*, Master's thesis, Brunel University (2005) 11-204.
- [5] D.W.DUDLEY, *Handbook of practical gear design*, CRC press LLC, (2002) 139-151.
- [6] B.J.HAMROCK; S.R. SCHMID ; B. JACOBSON, *Fundamentals of machine elements*. 2nd .Edition, McGraw Hill, New York, (2005)207-223.