

الملخص:

المسندات من أهم عناصر نقل القدرة بين الأعمدة ويؤثر على سن المسنن أثناء عمله لإجهادات انحناء وإجهادات هصر نتيجة القوى المطبقة عليه، الشكل الهندسي للسن له دور أساسي في مقاومة السن للأحمال الديناميكية التي يتعرض لها أثناء عمله، لذلك تهدف هذه الدراسة إلى تحسين هندسة السن من خلال تعديل جانبية سن المسنن لزيادة مقاومته للإجهادات وتحقيق سلاسة أكبر بالحركة وذلك من خلال نمذجة جانبية سن مسنن قياسي وجانبيات معدلة مقترحة في برنامج Solidworks 2013 وإجراء محاكاة لها عبر برنامج ANSYS 18.1 Workbench وإيجاد إجهاد الانحناء وإجهاد الهصر وتجاوب التردد لكل نموذج من النماذج ثم تحليل ومقارنة النتائج بين النماذج المختلفة للوصول لشكل جانبية السن الأفضل بين النماذج المدروسة، فقد بينت هذه الدراسة أن نتيجة التعديل على جانبية السن أدى إلى تحسن في أداء السن مقارنة مع نموذج جانبية السن القياسي من حيث تحمله للإجهادات وانخفاض الاهتزازات ووزن المسنن وبالتالي تحقيق أداء أفضل للمسنن.

المقدمة:

تعد المسننات من العناصر الأكثر شيوعاً في الآلات، حيث تستخدم لنقل الحركة الدورانية وعزم الدوران من جزء لآخر، أو لتغيير نسبة نقل الحركة أو تغيير اتجاهها، كما تستخدم لتحويل الحركة الدورانية إلى حركة مستقيمة، وهي واسعة الانتشار خاصة بالمجالات التي تتطلب مستويات قدرة ودقة عالية.

ونظراً للسرعات والأحمال المطبقة على هذه العناصر ومجالات استخدامها التي لا حصر لها والتأثير الكبير لهذه العناصر على أداء الآلات كان لابد من الدراسات المستمرة لتحسين أدائها. معظم الجهود لتقليل الاهتزازات والضوضاء الناتجة عن حركة المسننات اتجهت نحو تحسين دقة التصنيع، لكن التجارب أكدت أن تحسين دقة التصنيع لا تقلل من مستوى الاهتزازات والضوضاء بشكل كبير.

لذلك بدأ الباحثون بالنظر في هندسة المسنن والاهتمام بالمسننات غير القياسية وإجراء التعديلات عليها للحصول على نتائج أفضل.

وقد اهتمت بعض الدراسات بتعديل تصميم شكل جانبية أسنان المسنن وذلك باستخدام جوانب غير متناظرة للسن بين الجهة المحملة والجهة غير المحملة وذلك بهدف الحصول على مسنن أكثر قدرة على تحمل الأحمال الديناميكية بأقل حجم مع عمر تشغيلي أطول وباهتزازات أقل، فأصبحت أكثر استقراراً وأقل تكلفة.

الهدف من هذا البحث يكمن في تحسين شكل تصميم جانبية سن المسنن باستخدام جانبيات معدلة، فقد تمت الدراسة التحليلية عن طريق برامج هندسية للمقارنة بين أداء المسنن قبل وبعد التعديل، بهذه الأطروحة تم نمذجة ومحاكاة تأثير شكل جانبية السن لكل من حالة جانبية أسنان متناظرة وغير متناظرة للوصول لشكل أمثل للجانبية بين الأشكال المدروسة والتي تحقق أفضل أداء للمسنن، بهدف رفع قدرة المسنن على تحمل الأحمال الديناميكية وتخفيض وزن المسنن والاهتزازات الناتجة والحصول على سلاسة أكبر أثناء الحركة.

الفصل الأول:

القسم النظري

1.1.1. أسس تصنيف جمل نقل الحركة بالمسّنات:

2.1.1. على أساس توضع محاورها:

- 1- جملة تروس محاورها متوازية (Parallel Axes Gears) : الاسطوانية العدلة / الاسطوانية المائلة الأسنان / الجريد المسننة والبنيون / الداخلية
- 2- جملة تروس محاورها متقاطعة (Intersecting Axes Gears) : المخروطية
- 3- جملة تروس محاورها غير متوازية وغير متقاطعة (متخالفة/متقابلة) (Nonparallel, Nonintersecting Axes) : اللولبية / الدودية / (إضافة للهيبيئيديّة) [1].

3.1.1. على أساس السرعة المحيطية للمسّنات:

- 1- سرعة منخفضة أقل من (3 m/s)
- 2- سرعة متوسطة سرعتها (3-15 m/s)
- 3- سرعة عالية أكثر من (15 m/s) [1]

4.1.1. على أساس نوع تعشيق مجموعة المسّنات:

- 1- تعشيق خارجي 2- تعشيق داخلي 3- بنيون وجريدة مسننة [1].

5.1.1. على أساس توضع الاسنان على الترس:

- 1- مستقيم 2 - مائل 3 - منحنى [1].

6.1.1. على أساس الشكل:

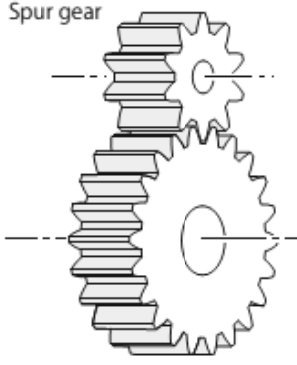
- 1- الاسطوانية
- 2- المخروطية
- 3- المنحنية
- 3- الدودية
- 5- مستقيمة (الجريدة المسننة والبنيون)
- 6- الداخلية
- 7- الوجهية أو التاجية [1].

2.1. أصناف مجموعات نقل الحركة بالمسّنات على أساس الشكل:

1.2.1. جملة النقل بالمسّنات الاسطوانية:

1.1.2.1. جمل النقل بالمسّنات الاسطوانية ذات الأسنان المستقيمة (العدلة) (Spur Gears):

تكون أسنان المسّنات موازية لمحور دوران الأسطوانة كما في الشكل (1-1)، وتقوم هذه المسّنات بنقل القدرة والحركة الدورانية بين أعمدة الدوران المتوازية، يدعى المسن الكبير من زوج المسّنات بالمسن المُقاد والصغير بالمسن القائد أو البنيون.



الشكل (1-1) المسّنات

الاسطوانية العدلة [1].

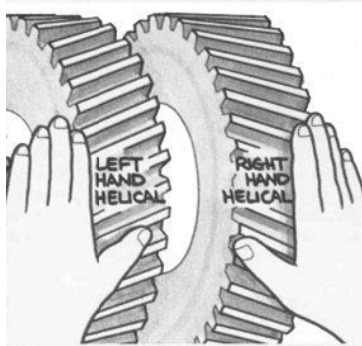
خواصها:

- ✓ تعد أبسط أنواع التروس وأكثرها شيوعاً.
 - ✓ سهولة التصنيع وجودة عالية.
 - ✓ لا ينتج عنها قوى دفع محورية.
 - ✓ لا يوجد في مجموعة النقل حد لعدد أسنان المسّنات المعشقة.
- تطبيقاتها : عناصر جمل نقل الحركة [1].

2.1.2.1. جمل النقل بالمسّنات الاسطوانية مائلة الأسنان (Helical Gears):

الأسنان لويت مائلة بالنسبة لمحور الدوران، حيث يتعشق مسن مائل الأسنان من جهة اليمين مع آخر مائل الأسنان بنفس الزاوية لكن بجهة اليسار ليكونان مجموعة نقل حركة واحدة، ويوضح الشكل (2-1) مسن مائل الأسنان نحو اليمين وآخر مائل الأسنان نحو اليسار.

خواصها :



الشكل (2-1) مسّنات مائلة

الأسنان [1].

- ✓ أكثر متانة وقادرة على نقل أحمال أكبر مقارنة بالعدلة.
- ✓ أكثر فعالية في تخفيض الضجيج والاهتزاز عندما تقارن بالمسّنات العدلة لأن تلامس الأسنان يكون بشكل تدريجي أكثر خلال عملية التعشيق وبالتالي تكون أكثر ملائمة لنقل الحركة عند السرعات العالية.

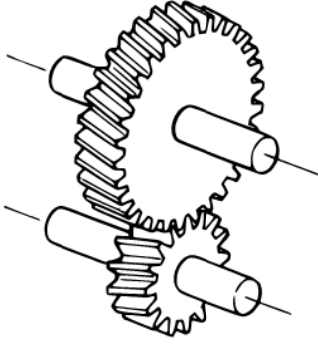
✓ تنتج قوى دفع محوري في اتجاه محور الدوران.

تطبيقاتها : عناصر جمل نقل الحركة، السيارات، علب السرعة [1].

أنواع جمل النقل مائلة الأسنان :

أ- المسننات مائلة الأسنان المفردة Single Helical Gear:

ينشأ فيها دفع محوري ، موضحة بالشكل (3-1) [1].



ب- المسننات ذات الأسنان شكل حرف V:

تميز فيها التخلص من الدفع المحوري الذي تسببه المسننات مائلة

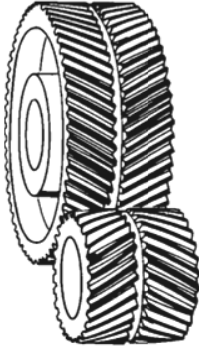
الأسنان المفردة ونقل استطاعة أكبر [2].

وهي نوعان :

الشكل (3-1) أسنان مفردة [1].

❖ المسننات مائلة الأسنان المزدوجة Double Helical Gears:

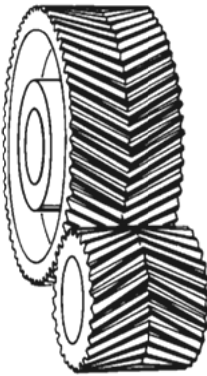
يتم التخلص من الدفع المحوري باستخدام زوجين من المسننات مائلة الأسنان بزوايا ميلان متعاكسين بهذه الطريقة يقوم الدفع الجانبي لأحد المسننين بإلغاء الدفع الجانبي للمسنن الآخر تصنع هذه التروس المتعاكسة مع مسافة أو مجرى بين الأسنان المتعاكسة، الشكل (4-1) [2].



الشكل (4-1) أسنان مزدوجة [2].

❖ المسننات ذات الأسنان المتعرجة Herringbone Gears:

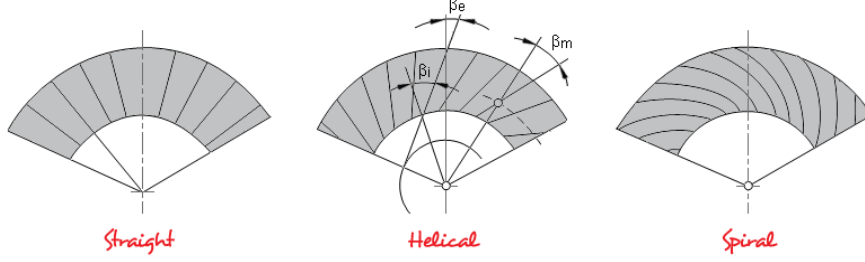
الأسنان في هذه المسننات تشبه عظم العمود الفقري للسמكة مثل الرنجة حيث الأضلاع تمتد من الجوانب المتقابلة على شكل خطوط مائلة متوازية، الأسنان المتعاكسة متصلة مع بعضها في وسط السطح الجانبي لاسطوانة المسنن هذا التنسيق يجعل هذه التروس أكثر إحكاما من المسننات المزدوجة، الشكل (5-1) [2].



الشكل (5-1) أسنان متعرجة [2].

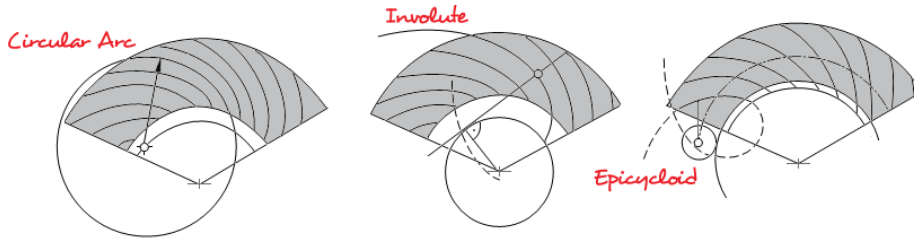
2.2.1. جمل النقل بالمسنتات المخروطية Bevel Gears:

تتقل المسنتات المخروطية الحركة بين عمودي دوران محاورهما متقاطعة، أسطح الخطوة (المسافات بين الأسنان) تشكل مخاريط، الأسنان مضبوطة القطع على طول مخروط الخطوة [1].
الأسنان تكون عدلة أو مائلة أو منحنية ، كما هو موضح بالشكل (6-1).



الشكل (6-1) أسنان عدلة ومائلة ومنحنية [1].

ويختلف منحنى توزيع الأسنان فقد يكون دائري أو انقليوتي أو فوق دويري، كما هو مبين بالشكل (7-1).

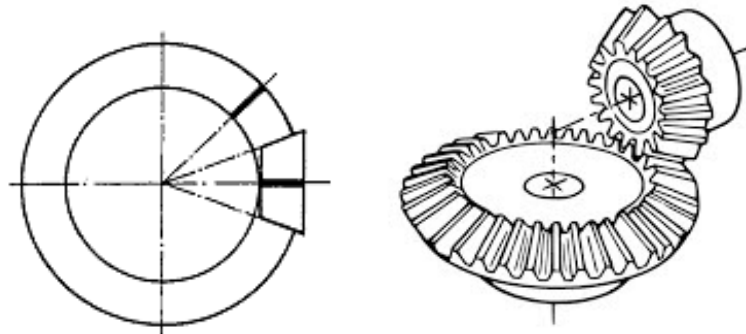


الشكل (7-1) توزيع أسنان دائري وانقليوتي وفوق دائري [1].

وتصنف جمل النقل بالمسنتات المخروطية إلى:

1.2.2.1. المسنتات المخروطية مستقيمة الأسنان Straight Bevel Gear:

عبارة عن مسنتات مخروطية أسنانها مستقيمة بحيث لو مددناها نحو داخل المسنن تلتقي بنقطة تقاطع محاور أعمدة الدوران، كما بالشكل (8-1) [1].



الشكل (8-1) مسنتات مخروطية مستقيمة الأسنان [3].

خواصها:

✓ سهولة التصنيع نسبياً.

✓ توفر تخفيض في نسب النقل تصل إلى 1:5 تقريباً.

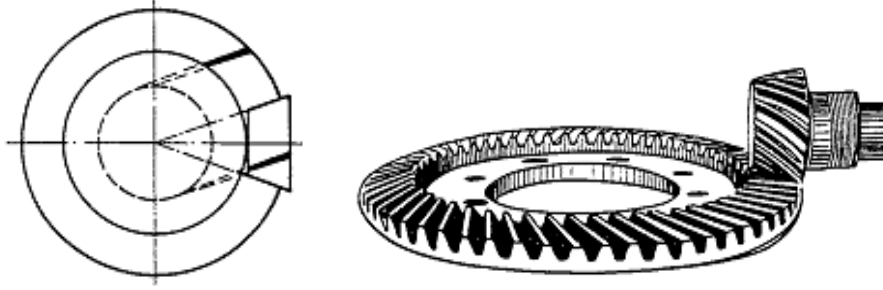
تطبيقاتها : مناسبة بالأخص لوحدة المسننات التفاضلية .

2.2.2.1. المسننات المخروطية مائلة الأسنان Helical Bevel Gear:

تكون الأسنان مستقيمة لكن لا تلتقي محاورها في محور المخروط، شكل (9-1) [1].

خواصها:

✓ أكثر توافق وأقل ضجيج .

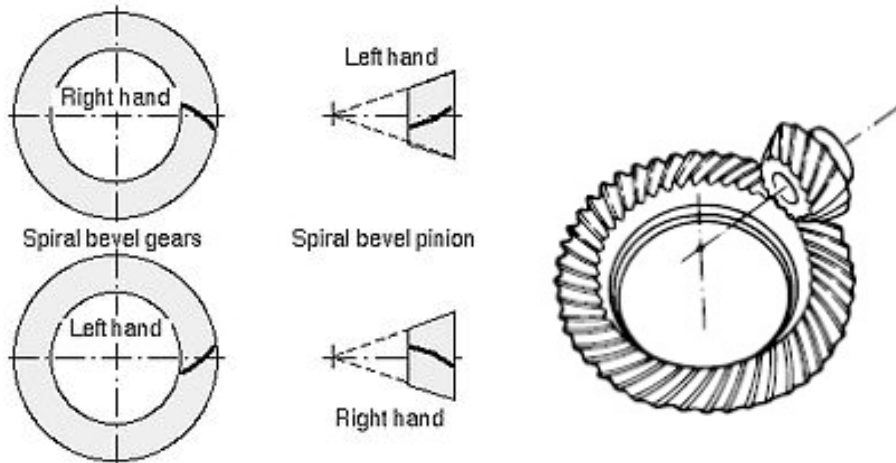


الشكل (9-1) مسننات مخروطية مائلة الأسنان [3].

3.2.2.1. المسننات المخروطية منحنية الأسنان Spiral Bevel Gear:

الأسنان منحنية لتحقيق تعشيق تدريجي وأسطح اتصال أكبر من المسنن المخروطي مستقيم الأسنان

المكافئ، شكل (10-1) [1].



الشكل (10-1) مسننات مخروطية منحنية الأسنان [3].

خواصها :

✓ لديها نسبة اتصال ومثانة وديمومة أكبر من مكافئاتها من المخروطية مستقيمة الأسنان.

- ✓ تسمح بتخفيض أكبر لنسبة النقل.
- ✓ كفاءة أعلى في النقل بضجيج منخفض.
- ✓ تتضمن بعض الصعوبات التقنية بالتصنيع.
- ✓ الأسنان المنحنية تسبب قوى دفع في الاتجاه المحوري.

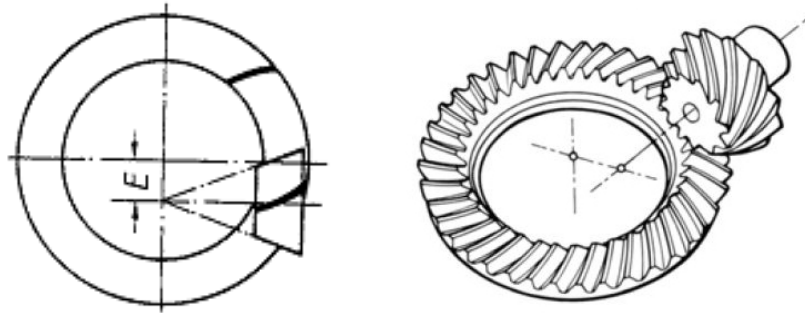
تطبيقاتها:

السيارات، الجرارات، المركبات، مجموعة مسننات تخفيض السرعة المستخدمة بالسفن، ومناسبة بالأخص لمحركات السرعات العالية و الأحمال الثقيلة [1].

4.2.2.1. المسننات المخروطية الهيبونيدية Hypoid Bevel Gear أو المسننات المخروطية

المتخالفة Skew Bevel Gear:

بهذه الجملة انزياح طفيف لمحور المخروط عن التقاطع مع محور المخروط الآخر، نشأ هذا النوع كتطوير لصناعة السيارات حيث سمح بخفض الهيكل، ومع ذلك فهو الأصعب للتصميم والتصنيع موضح بالشكل (11-1) [1].

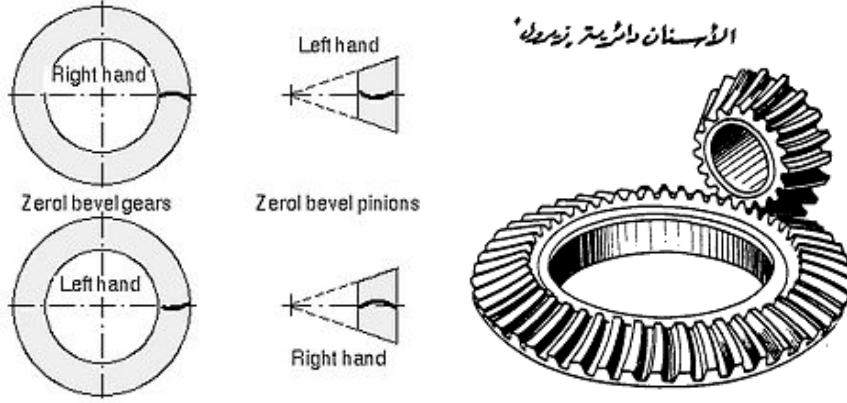


الشكل (11-1) المسننات المخروطية المتخالفة [3].

5.2.2.1. المسننات المخروطية زيرول Zerol Bevel Gear:

عندما تكون زاوية الميلان لأسنان المسننات المنحنية Spiral Bevel Gear تساوي صفر تدعى زيرول، شكل (12-1).

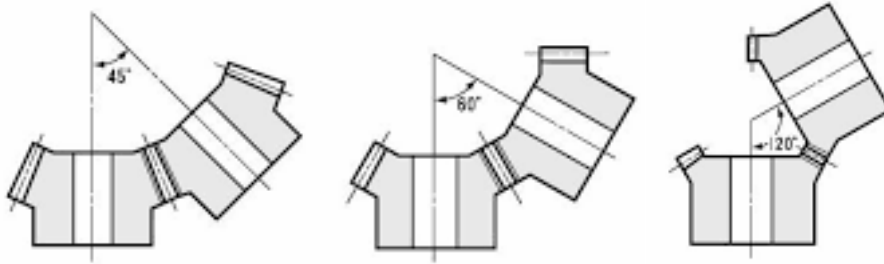
خواصها : لها خصائص كلا المسننات المخروطية المستقيمة والمنحنية [1].



الشكل (12-1) مسننات مخروطية زيروول [3].

6.2.2.1. المسننات المخروطية الزاوية angular bevel gears:

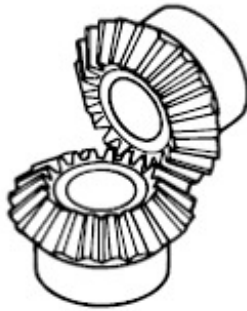
تتقل المسننات المخروطية الزاوية الحركة بين عمودي دوران محاورهما متقاطعة بزاوية ما ونسبة النقل 1:1 تستخدم لتغيير اتجاه دوران العمود بدون تغيير السرعة، موضحة بالشكل (13-1) [1].



الشكل (13-1) مسننات مخروطية زاوية [1].

7.2.2.1. جملة نقل مسننة متعامدة المحاور Miter Gears:

هي حالة خاصة من المخروطية الزاوية حيث أعمدة الدوران متقاطعة بزاوية 90° ونسبة النقل 1:1، تستخدم لتغيير اتجاه دوران العمود بدون تغيير السرعة، موضحة بالشكل (14-1) [1].



الشكل (14-1) جملة نقل مخروطية متعامدة المحاور [1].

3.2.1. جمل النقل بالمسّنات المتخالفة /Skew Gear أو skew gears

الحلزونية المتقاطعة :Crossed Helical Gears

مسّنين حلزونيّين ينقلان القدرة بين عمودي دوران غير متوازيين وغير متقاطعين (متخالفين)، لهما نفس اتجاه الميل للأسنان بزاوية 45° ولأن تماس الأسنان نقطي فقدرتها على حمل الأحمال منخفضة، موضحة بالشكل (1-15).

خواصها :



✓ يمكن استخدامها كمخفض سرعة أو رافع سرعة .

✓ بسبب الاتصال الانزلاقي للأسنان يكون سطح التلامس أكبر (احتكاك أكبر).

✓ غير مناسبة للنقل في الاستطاعات العالية لأن تماس الأسنان

نقطي [1].

الشكل (1-15) جملة نقل

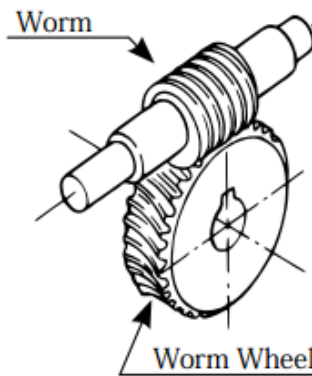
بالمسّنات المتخالفة [1].

4.2.1. جملة النقل الدودية (Worm and Worm Wheel) Worm Gearing

الدودة Worm عبارة عن ساق أو عمود دوران فيه على الأقل سن كامل واحد (سن لولب) حول سطح الخطوة وهي تقود مسنن دودي، العجلة الدودية Worm Wheel، كما هو موضح بالشكل (1-16).

المسنن الدودي والدودة يستخدمان لنقل الحركة بين عمودين متخالفين الزاوية بينهما 90° .

خواصها:



✓ تؤمن تخفيض كبير في نسبة النقل.

✓ تعشيق جيد هادئ وسلس.

تطبيقاتها :علب السرعة، أجهزة التقسيم، سلاسل الكتل، [1].

الشكل (1-16) جملة نقل دودية

[1].

5.2.1. الجريدة المسننة والبنيون :Rack and pinion Gears

الجريدة المسننة عبارة عن شريط مستمر من الأسنان تقع على وجه واحد، شكل (17-1).

خواصها:

تغيير الحركة الدورانية إلى حركة مستقيمة أو بالعكس.

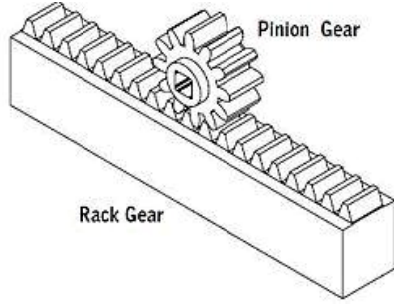
التطبيقات:

آلات الطباعة ، الروبوتات ...

تقسم الجريدة المسننة إلى:

جريدة مسننة عدلة الأسنان straight tooth racks.

جريدة مسننة مائلة الأسنان helical tooth racks [1].



الشكل (17-1) جريدة مسننة وبنيون

[1].

6.2.1. المسننات الداخلية :Internal gears

عبارة عن مسنن حلقي أسنانه على السطح الداخلي لحافته ودائما يتشابك مع مسنن خارجي،

شكل (18-1).

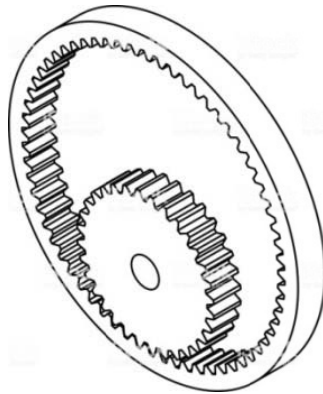
خواصها :

✓ عندما يتعشق مسنن داخلي مع خارجي جهة الدوران تبقى نفسها.

✓ عادة المسننات الداخلية تقاد بواسطة مسننات خارجية صغيرة.

تطبيقاتها:

محركات المسننات الكوكبية لنسب نقل بتخفيض عالي.. [1] .



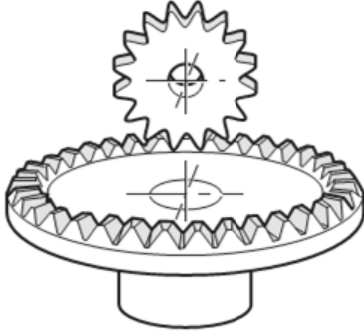
الشكل (18-1) مسننات داخلية [1].

7.3.1. المسنن الوجهي أو التاجي Face gears or crown gears:

تعد التروس التاجية شكلاً خاصاً من التروس المخروطية التي تكون أسنانها على شكل نتوء قائمة الزاوية، شكل (1-19).

تطبيقاتها:

في الساعات الميكانيكية [1].



الشكل (1-19) مسنن وجهي [1].

3.1. أنواع منحنيات جانبيات أسنان المسنن:

شكل المقطع العرضي لأسنان التروس يظهر جانبيه الأسنان، وتؤثر هذه الجانبيه على مجموعة من الخصائص المؤثرة في أداء المسننات، بما في ذلك نسبة السرعات والاحتكاك.

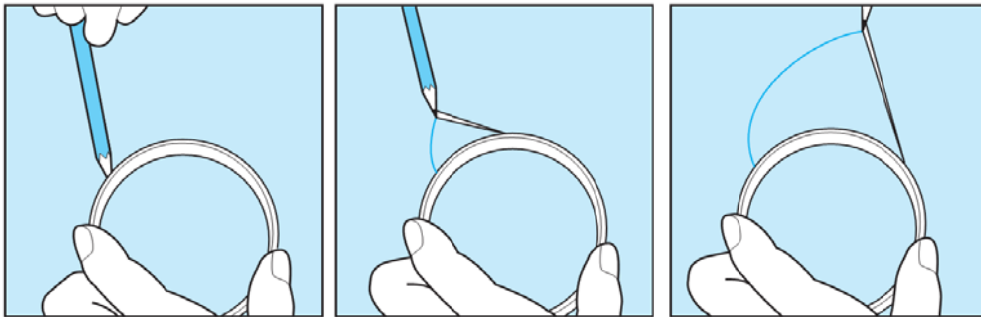
على الرغم من وجود عدد كبير من أشكال جانبيات الأسنان المتاحة لتصميم المسننات، إلا أن هناك أربعة أنواع رئيسية مستخدمة هي:

1.3.1. جانبيه السن الإنفليوتي Involute tooth profile:

الإنفليوت هو منحنى حلزوني يمكن الحصول عليه من نهاية خيط مشدود يتم فكّه من دائرة ثابتة

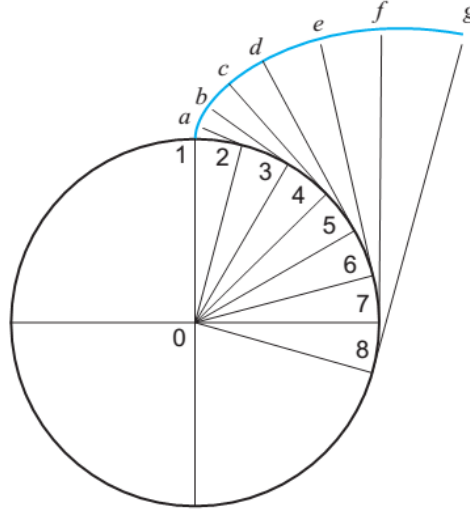
تدعى دائرة الأساس كما بالشكل (1-20)، فتكون النتيجة هي المنحنى الإنفليوتي $A - b - c$

$d - e$... الموضح بالشكل (1-21) [1].



الشكل (1-20) الخط الذي ترسمه نهاية خيط مشدود منذ فكه من السطح الخارجي للأسطوانة ليشكل المنحنى

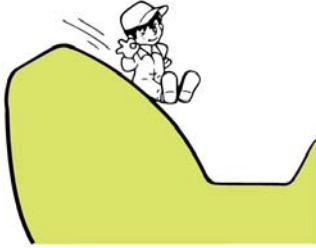
الإنفليوتي [1].



الشكل (21-1) منحنى إنفليوتي [1].

مميزاته :

- تصنيعه بدقه سهل من خلال تصنيع أداة القطع الخاصة به.
- يتمتع بميزة القدرة على التعشيق بشكل صحيح حتى عندما تكون المسافة المركزية غير دقيقة قليلاً.



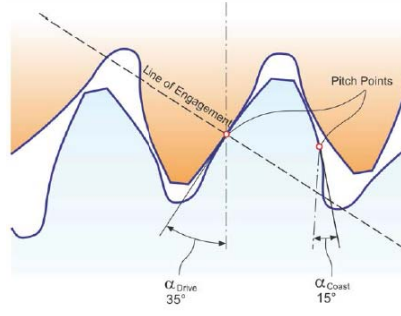
- تتحرك نقطة الاتصال بسلاسة ناقلة الحركة.
- قوة أسنان المسنن بسبب سماكة الجذر.
- أكثر الأشكال استخداماً لمميزاته [1].

الشكل (22-1) سن انفليوتي [1].

1.1.3.1. الأسنان الانفليوتية ذات الجانبيات غير المتناظرة

(Involute Gear Tooth with Asymmetric Profiles):

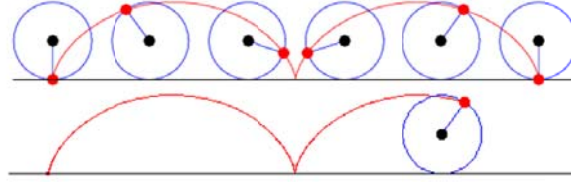
مع ازدياد الطلب على نقل عزوم وقوى أعلى ، بدأ مصممو التروس بالبحث في هندسة الأسنان غير القياسية، من هنا برزت فكرة الأسنان غير المتناظرة، الشكل (23-1).
في التطبيقات التي يتم فيها نقل الحركة باتجاه واحد تسمح هندسة الأسنان غير المتماثلة بزيادة سعة التحميل مع إمكانية تقليل وزن وأبعاد التروس، وذلك باختيار زوايا ضغط مختلفة لجانبي السن.



الشكل (1-23) أسنان غير متناظرة الجوانب [4].

2.3.1. جانبية السن الدويري (السيكلويدي) Cycloidal tooth profile:

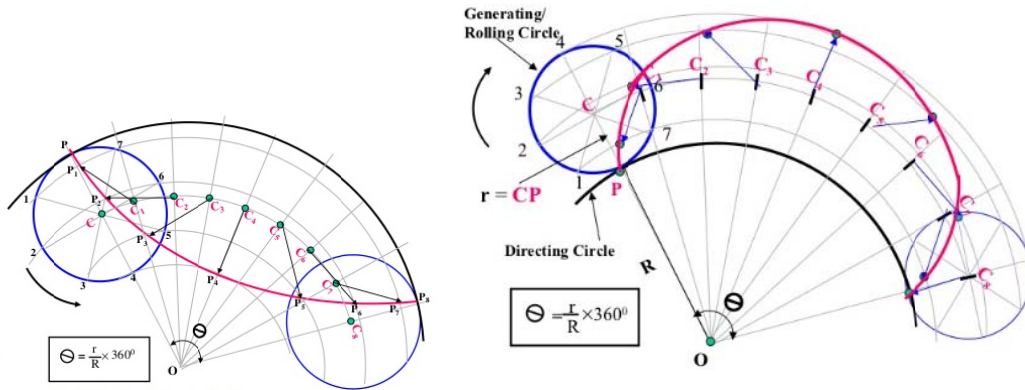
المنحني الدويري (Cycloid) بالشكل العام هو المنحني المتولد من حركة نقطة على محيط دائرة متحركة على خط مستقيم، بدءاً من مسها الخط المستقيم أول مرة إلى أن تعاود مسه من جديد، الموضح بالشكل (1-24) [5].



الشكل (1-24) المنحني الدويري [5].

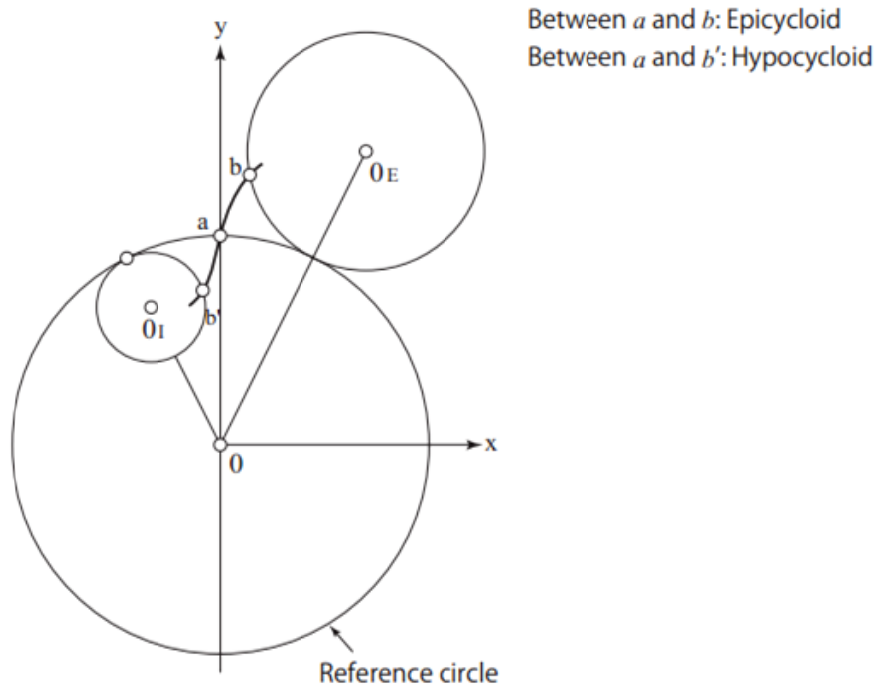
المنحني السيكلويدي الفوقي Epicycloids ينتج عن تتبع نقطة من محيط دائرة متحركة تتدحرج دون انزلاق على السطح الخارجي لدائرة ثابتة، أما المنحني السيكلويدي التحتي Hypocycloid فينتج عن تتبع نقطة من محيط دائرة صغيرة تتدحرج دون انزلاق على السطح الداخلي لدائرة ثابتة أكبر، كما هو واضح بالشكل (1-25) [5].

الشكل الجانبي السيكلويدي للسن (Cycloidal tooth profile): هو المنحني المركب من منحنين دويري فوقي (سيكلويد فوقي) Epicycloid و دويري تحتي (هيپوسيكلويد) Hypocycloid.



الشكل (1-25) أ- منحي دويري فوقي Epicycloids ب- منحي دويري تحتي Hypocycloid

الشكل (26-1) يبين الجزء (a-b) هو منحنى دويري فوقى Epicycloids والجزء (a-b') هو منحنى دويري تحتى Hypocycloid فيكون (b-b') هو المنحنى السيكلويدي لجانبية سن المسنن [1]. Cycloidal tooth profile.



الشكل (26-1) جانبية سن سيكلويدي [1].

خواصها :

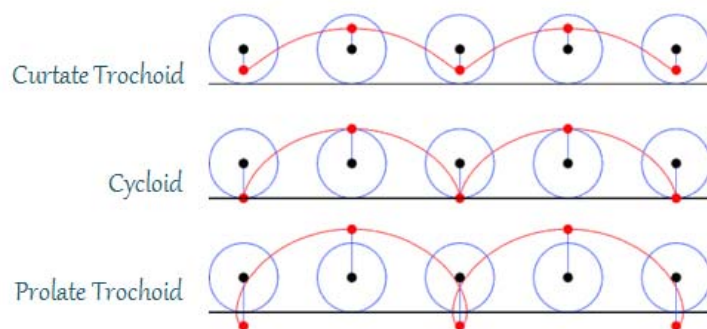
- تتطلب المحافظة على مسافة مركزية دقيقة بخلاف المسنن الإنفليوتي الذي يسمح بتغيرات محدودة بالمسافة المركزية قليلة.
- زاوية الضغط متغيرة تكون أعظمية في بداية التعشيق وتتناقص حتى الصفر عند نقطة التماس ثم تعود وتكبر حتى القيمة الأعظمية عند نهاية التعشيق مما يسبب تشغيل أقل سلاسة للتروس مقارنة بالمسننات الإنفليوتية حيث زاوية الضغط تبقى ثابتة.
- صعوبة التصنيع حيث المنحنى السيكلويدي للسن يتكون من منحنين بخلاف الإنفليوتي الذي يتكون من منحنى واحد، تستخدم المسننات السيكلويدية غالباً في الساعات.
- تتميز بأنها أقوى من المسننات الإنفليوتية ذات نفس الموديول نظراً لأن السطح الجانبي السفلي للمسنن (الجناح) أكبر في السن السيكلويدي منه في الإنفليوتي.

- الاهتراء بالمسنن السيكلويدي أقل من ءاهترا المسنن الإنفليوتي لأن التلامس يحدث بين الأسطح المحدبة والمقعرة بينما بالمسننات الانفليوتية يكون الاتصال بين الأسطح المحدبة ، لكن هذا الفرق بالاهتراء لا يكاد يذكر.
 - المسننات السيكلويدية لا يحدث فيها تداخل أبدا.
- على الرغم من وجود مزايا للمسننات السيكلويدية إلا أن المسننات الانفليوتية تفوقها ببساطتها ومرونتها [4].

3.3.1. جانبية السن العجلي (التروكويد) Trochoidal tooth profile:

المنحني العجلي (Trochoid) بالشكل العام هو منحنى تولده نقطة واقعة على مستقيم مار بمركز دائرة تتدحرج دون انزلاق على خط مستقيم، شكل (1-27) ويصنف التروكويد (Trochoid) عادة إلى :

- عجلي متقاصر / دويري متقاصر (Curtate Trochoid / Curtate Cycloid) : يرسم من نقطة داخل الدائرة .
- دويري / سيكلويد (Cycloid) : يرسم من نقطة على محيط الدائرة .
- عجلي متطاول / دويري متطاول (Prolate Trochoid / Prolate Cycloid) : يرسم من نقطة خارج الدائرة [5].

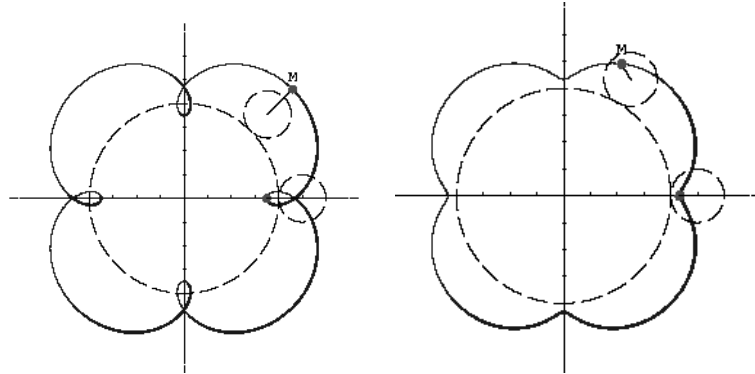


الشكل (1-27) المنحني العجلي (تروكويد) [5].

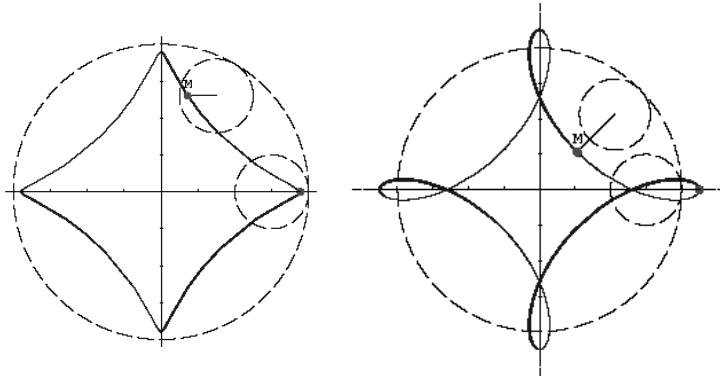
المنحني عجلي فوقى أو تروكويد فوقى (Epitrochoid) هو منحنى تولده نقطة واقعة على مستقيم مار بمركز دائرة تتدحرج دون انزلاق على المحيط الخارجى لدائرة أخرى ثابتة، ويعتبر المنحني السيكلويدي فوقى (Epicycloid) حالة خاصة منه عندما تقع نقطة الرسم على محيط الدائرة المتدحرجة، كما الشكل (1-28) [5].

والمنحني عجلي تحتي أو تروكويد تحتي (Hypotrochoid) هو منحني تولده نقطة واقعة على مستقيم مار بمركز دائرة تتدحرج دون انزلاق على المحيط الداخلي لدائرة أخرى ثابتة ، ويعتبر المنحني السيكلويدي التحتي (Hypocycloid) حالة خاصة منه عندما تقع نقطة الرسم على محيط الدائرة المتدحرجة، كما الشكل (1-29) [5].

جانبية السن العجلي (التروكويدي) (Trochoidal tooth profile): هو المنحني المركب من منحنيات عجلية فوقية (Epitrochoid) أو عجلية تحتية (Hypotrochoid) [7].

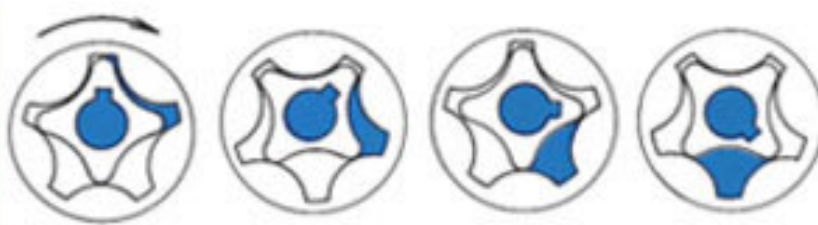


الشكل (1-28) منحنيات عجلية فوقية Epitrochoid [7].



الشكل (1-29) منحنيات عجلية تحتية Hypotrochoid [7].

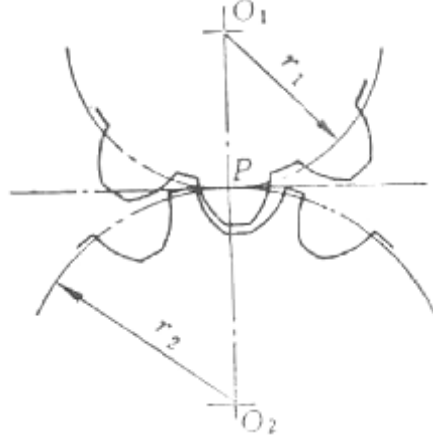
تستخدم بشكل رئيسي في المضخات، موضح بالشكل (1-30) .



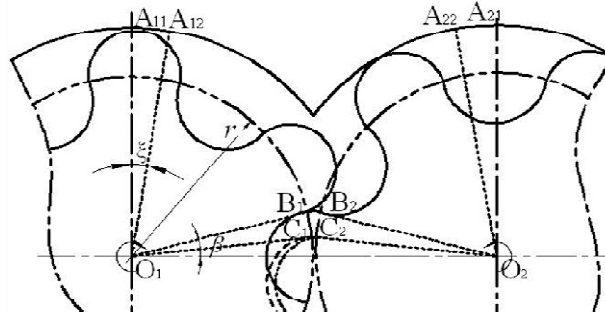
الشكل (1-30) مضخة ذات مسنن عجلي (تروكويدي)

4.3.1. جانبية السن الدائري Circular arc tooth profile:

بالنسبة لشكل جانبيات السن الدائرية تتكون من أقواس دائرية ويتم تصنيفها إلى قوس مفرد موضح بالشكل (31-1) وقوس مركب موضح بالشكل (32-1)، ولديها ميزة بطء التآكل لكن لا يتم استخدام جانبية السن الدائري ذات القوس الفردي أو المركب بشكل عام نظراً لصعوبة الإنتاج مقارنة بشكل السن الإنفليوتي Involute [4].



الشكل (31-1) جانبية السن الدائري ذات القوس الفردي [8].



الشكل (32-1) جانبية السن الدائري ذات القوس المركب [8].

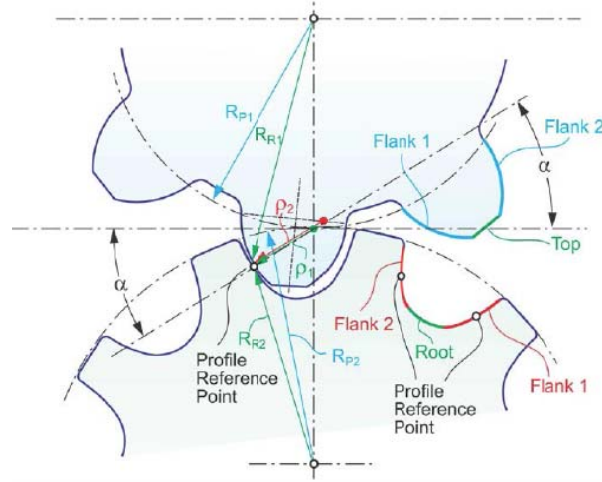
1.4.3.1. جملة مسننات وايلدهيبر - نوفيكوف (Wildhaber-Novikov):

عموماً هي جملة المسننات حلزونية الأسنان ذات جانبية أسنان دائرية، موضحة بالشكل (35-1) [4].



الشكل (33-1) تعشيق نوفيكوف [3].

ظهرت عندما قام السويسري Ernest Wildhaber عام 1926 في الولايات المتحدة الأمريكية باختراع مسننات اسطوانية حلزونية الأسنان مقطوعة الأسنان بأداة قطع شكل جانبيها قوس من دائرة. بعد ثلاثين عاما قام Mikhail Novikov بروسيا باختراع نظام مشابه حيث شكل جانبيه الأسنان قوس من دائرة في المقطع العرضي لها، وبسبب التشابه بين التحسينين المستقلين سميت هذه الجملة مسننات وايلدهيبر-نوفيكوف (Wildhaber-Novikov) كما هو موضح بالشكل (34-1) [4].

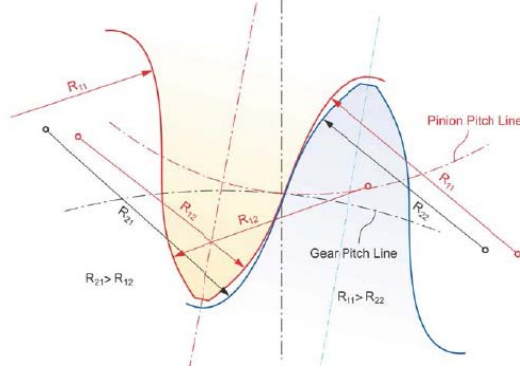


الشكل (34-1) جانبية أسنان والدهيبر - نوفيكوف [4].

إن الشكل الأساسي لأسنان مسننات Wildhaber-Novikov عبارة عن أنصاف دوائر لكن هذا الشكل يتطلب زاوية ضغط محددة تنخفض مادون 5° وبسبب ذلك القيد تتكون جانبيات أسنان Wildhaber-Novikov من أقواس أقل من أنصاف دوائر .

تُظهر جذور الأسنان صلابة عالية جداً، غالباً ما يتم الحكم عليها بشكل زائف على أنها ميزة ومساهمة في كثافة قدرة عالية، ولكن الأكثر مثالية هو أن تكون ذات صلابة عالية في جذر الأسنان السفلي ومرونة من منتصف جذر السن إلى الحافة العلوية، حيث تساهم المرونة في تخفيض الصدمة على السن عند بداية التشغيل وتحسين نقل الحمل بين أزواج المسننات المتتالية، وبسبب ذلك ذكر

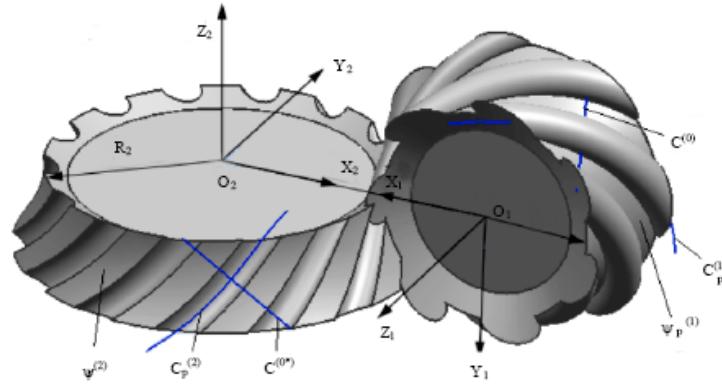
وايلدهبير ، وكذلك نوفيكوف ، في دراستهم إمكانية توسيع أفكارهم لتشمل شكل جانب سن دائري مزدوج يتألف من قوس دائري محدب في منطقة طرف السن (الجزء الجانبي العلوي للسن) وقوس دائري مقعر في منطقة جذر السن (الجزء الجانبي السفلي للسن) بشكل حرف S، الشكل (1-35) [4].



الشكل (1-35) النسخة المعدلة لمسننات وايلدهبير - نوفيكوف [4].

خصائص جملة مسننات وايلدهبير - نوفيكوف (Wildhaber-Novikov):

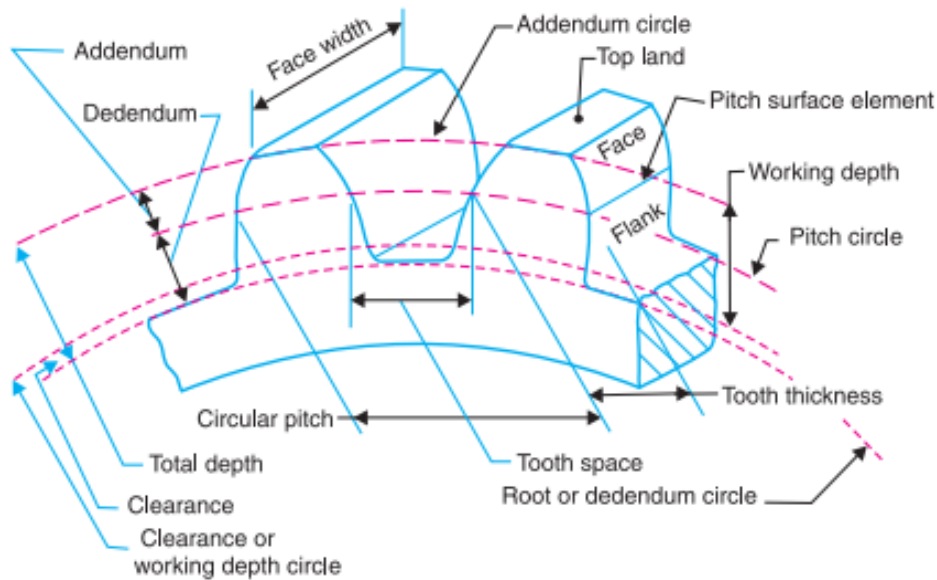
- تبدي قدرة على حمل أحمال متزايدة وذات قوة اتصال عالية لكنها ذات تأثير كبير بالمسافة المركزية بالإضافة لكونها صعبة التصنيع مقارنة بالانفليوثية، وتتطلب أدوات غير قياسية.
 - التغييرات في المسافة المركزية والميل المحوري بسبب التسامحات والانحرافات ستؤدي إلى حدوث أخطاء كبيرة في الحركة واهتزازات أثناء النقل، مما سيزيد من تكلفة الأعمدة والمحامل من أجل تقليل التسامحات والانحرافات.
 - بالنسبة للنسخة المعدلة من مسننات Wildhaber-Novikov "شكل S" - تمامًا مثل الشكل السيكلويدي Cycloidal تضيف قدرة التمرکز الذاتي لكن تبقى أصعب بالتصنيع [4].
- بسبب قوة الاتصال العالية والبنية المحكمة لجمل النقل بالمسننات الدائرية (Circular arc gears) أو المعرفة باسم وايلدهبير - نوفيكوف (Wildhaber-Novikov) قامت العديد من الجهود لمحاولة تحسينها وتوسيع استخدامها، منها اقترح Kuo عام (2001) نوعًا من التروس المخروطية ذات المظهر الجانبي للأسنان الدائرية واستخلص الشروط المثلى لسطح السن كما اقترح Chen et al عام (2001) جملة مسننات دائرية المقطع متعامدة ميلان أسنانها من النوع الزائدي، الشكل (1-36) [9].



الشكل (36-1) جملة مسننات دائرية المقطع مخروطية ميلان أسنانها من نوع القطع الزائدي [9].

4.1. هندسة المسننات الإنفليوتية العدلة:

1.4.1. مصطلحات مستخدمة في جمل النقل بالمسننات:



الشكل (37-1) مسميات مستخدمة بالمسننات [10].

* دائرة الخطوة **Pitch circle** أو الدائرة المرجعية **Reference circle**: هي دائرة نظرية عند

حركة دوران مثالية للمسننات تعطي نفس الحركة للمسنن الفعلي حيث تعتمد حسابات المسنن

عليها ، وتكون دوائر الخطوة في المسننات المتعشقة متماسة ، نصف قطرها r_w أو r_p

* دائرة الجذر **Dedendum circle or Root circle**: هي الدائرة المرسومة عبر أسفل

للأسنان، نصف قطرها r_f .

* دائرة الساق **Addendum circle or Tip circle**: هي الدائرة المرسومة عبر قمة الأسنان،

نصف قطرها r_a .

* **دائرة الخلوص Clearance circle** أو **دائرة العمق العامل Working depth circle**:

هي الدائرة الماسة لدائرة ساق المسنن المعشق ، نصف قطرها r_w .

* **الساق "h_a" Addendum**: هو البعد بين دائرة الخطوة ودائرة الساق.

* **الجزر "h_f" Dedendum**: هو البعد بين دائرة الخطوة ودائرة الجزر.

* **ارتفاع السن أو العمق الكلي "h" Total depth**: هو البعد بين دائرتي الساق والجزر للمسنن

* **العمق العامل "h_w" Working depth** : هو البعد بين دائرة الساق و دائرة الخلوص للمسنن

* **الخلوص "c" Clearance**: هو المسافة بين قمة السن وبين أسفل السن المعشق معه.

* **سمك السن "t" أو "s" Tooth thickness**: هو عرض السن المقاس عبر دائرة الخطوة.

* **عرض السن (عرض الوجه) "b" Face width**: هو عرض السن المقاس موازي لمحور المسنن.

* **الفراغ بين سنين متجاورين "e" Tooth space**: هو عرض الفراغ بين سنين متجاورين مقاساً على طول دائرة الخطوة.

* **سطح القمة Top land**: هو السطح العلوي للسن.

* **سطح الخطوة أو السطح المرجعي reference surface or pitch surface**: هو السطح التخليفي المتدرج الذي تستبدل به التروس على دائرة الخطوة.

* **الوجه Face**: هو السطح الجانبي للسن الممتد بين سطح القمة و سطح الخطوة.

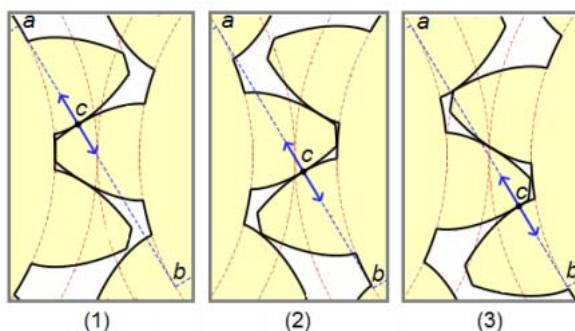
* **المتن أو الجناح Flank**: هو السطح الجانبي للسن الممتد بين سطح الخطوة و سطح الجزر.

* **خط العمل / العمود المشترك / خط الضغط / خط الاتصال**

:(line of contact) (Line of Action) (Common normal) (Pressure line)

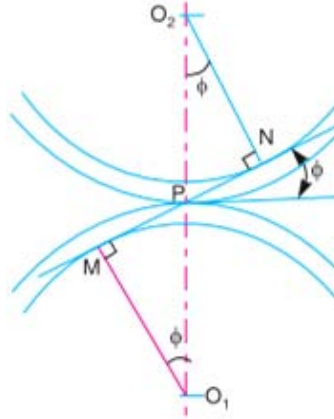
هو الخط العمودي على المنحني الجانبي لزوج الأسنان المعشقة عند نقطة التماس،

الشكل (38-1).



الشكل (38-1) نقطة تماس لمسننين C تتحرك على خط العمل المشترك [10].

* نقطة الخطوة (Pitch point): هي النقطة المشتركة للتماس بين دوائر الخطوة، الشكل (1-39) [10].



الشكل (1-39) P نقطة الخطوة [10].

2.4.1. أبعاد أساسية تبين أحجام مختلفة لشكل السن:

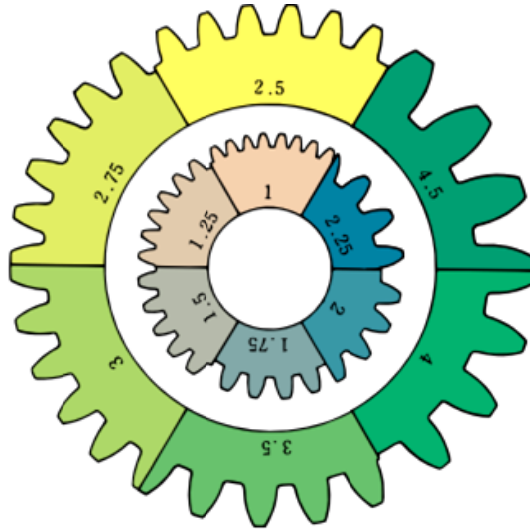
1.2.5.1 الموديول (m) : Module

هو الحيز الذي يشغله السن الواحد من أسنان المسنن فيما لو تخيلنا أن أسنان المسنن صفت على قطر دائرة الخطوة، ومن ثم يحسب الموديول بدلالة العلاقة الآتية:

$$m = \frac{d}{z}$$

m: الموديول (mm per tooth)، d: قطر دائرة الخطوة (mm)، z: عدد أسنان المسنن (tooth).

في الدول التي تستخدم النظام المتري يستخدم الموديول للتعبير عن حجم السن فكلما زاد رقم الموديول يكون حجم السن أكبر، مثال: m1, m3..، موضح بالشكل (1-40) [1].



الشكل (1-40) الموديول Module [1].

ويتم اختيار الموديول عادة من جداول قياسية دولية، الجدول (1-1) يبين موديولات قياسية مأخوذ من المعيار JIS B 1701-2: 1999 حيث ينصح باستخدام الحقل I وعدم استخدام الموديول 6.5 ما أمكن [1].

جدول (1-1) قيم معيارية دولية للموديول بالوحدة mm

I	II	I	II
0.1	0.15	3	3.5
0.2	0.25	4	4.5
0.3	0.35	5	5.5
0.4	0.45	6	(6.5)
0.5	0.55	8	7
0.6	0.7	10	9
0.8	0.75	12	11
1	0.9	16	14
1.25	1.125	20	18
1.5	1.375	25	22
2	1.75	32	28
2.5	2.25	40	36
	2.75	50	45

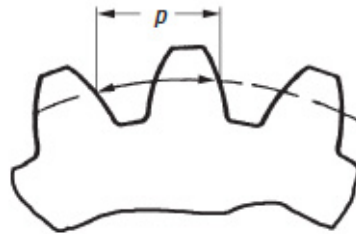
2.2.4.1. الخطوة الدائرية (الخطوة) (CP/P_c) :

هي المسافة المقاسة على محيط دائرة الخطوة من نقطة تقع على سن إلى نقطة مماثلة لها على السن المجاور، الشكل (1-41) وتحسب بتقسيم محيط دائرة الخطوة على عدد الأسنان من العلاقة:

$$P_c = \frac{\pi \cdot d}{z} = \pi \cdot m$$

P_c : الخطوة الدائرية (mm per tooth) ، d : قطر دائرة الخطوة (mm).

z : عدد أسنان المسنن (tooth) ، m : الموديول (mm per tooth).



الشكل (1-41) الخطوة الدائرية [1].

كلما زاد رقم الخطوة الدائرية يكون حجم السن أكبر مثال: CP5, CP10.. [1].

3.2.4.1. الخطوة القطرية (DP/P_d): Diametral pitch

تدل على عدد الأسنان لكل بوصة من قطر دائرة الخطوة وتحسب من العلاقة :

$$P_d = \frac{z}{d} = \frac{1}{m} = \frac{\pi}{P_c}$$

P_c : الخطوة الدائرية (inch).

P_d : الخطوة القطرية (teeth per inch).

d : قطر دائرة الخطوة (inch).

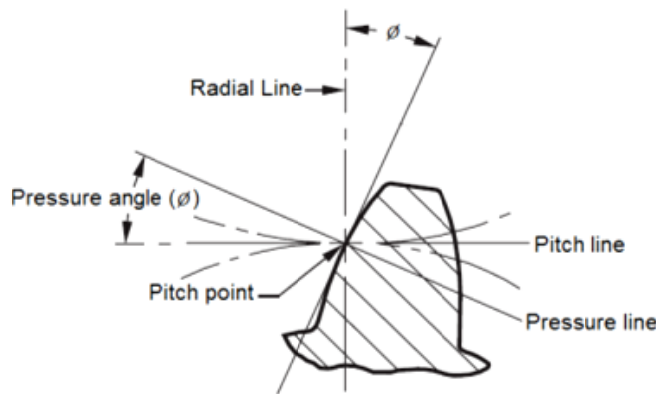
z : عدد أسنان المسنن (tooth).

m : الموديول (inch).

في الدول التي تستخدم نظام البوصة تستخدم الخطوة القطرية بشكل واسع للتعبير عن حجم السن فكلما نقص رقمها يزداد حجم السن ، مثال : DP24, DP8.. [1].

3.4.1. زاوية الضغط Pressure angle

يعبر عنها بالرمز ϕ أو α_w وهي الزاوية بين الناطم المشترك على سطحي سنين متماسين عند دائرتي خطوتهما (خط العمل) وبين المماس المشترك لدائرة خطوة كل منهما عند نقطة التماس هذه (خط الخطوة)، أو الزاوية بين المماس للمنحني الإنفليوتي عند دائرة الخطوة والخط القطري عند تلك النقطة، كما في الشكل (1-42).



الشكل (1-42) زاوية الضغط [1].

القيم العيارية لزاويا الضغط (14.5° , 20° , 25°) أكثرها شيوعاً 20° [1].

4.4.1. النسب المعيارية لأبعاد نظم المسننات:

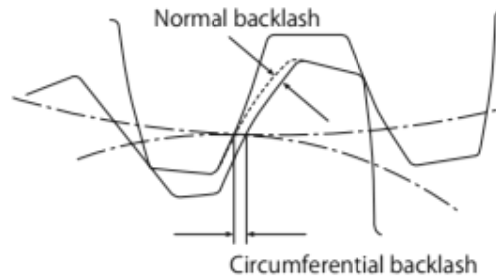
يبين الجدول (2-1) النسب القياسية عند موديول (m) معين [1].

جدول (2-1) النسب القياسية لأنظمة المسننات ذات عدد الأسنان أكبر من 17 [10].

S. No.	Particulars	14½° composite or full depth involute system	20° full depth involute system	20° stub involute system
1.	Addendum	1 m	1 m	0.8 m
2.	Dedendum	1.25 m	1.25 m	1 m
3.	Working depth	2 m	2 m	1.60 m
4.	Minimum total depth	2.25 m	2.25 m	1.80 m
5.	Tooth thickness	1.5708 m	1.5708 m	1.5708 m
6.	Minimum clearance	0.25 m	0.25 m	0.2 m
7.	Fillet radius at root	0.4 m	0.4 m	0.4 m

5.4.1. الخلوص الارتجاعي أو اللعب (B) backlash or Play in the gears:

عادةً ما يتم ترقيق أسنان التروس لتوفير كمية معينة من الخلوص الارتجاعي (B) backlash لمنع اصطكاك السن في أسوأ ظروف تسامحات التصنيع والتوسع بسبب زيادة درجة الحرارة. للتطبيقات العامة تتوفر جداول توصي بحدود الخلوص الارتجاعي بالاعتماد على الخطوة القطرية في معايير AGMA وغيرها، موضح بالشكل (1-43) [1].



الشكل (1-43) اللعب [1].

الخلوص الارتجاعي (B) عامل في تحديد السمك النهائي للعتاد الأسنان ففي التروس المعيارية ، يتم تحديد سماكة سن الترس الواحد (t) بدلالة الخطوة الدائرية (p) من العلاقة:

$$t = \frac{p}{2} - \frac{B}{2}$$

يتم تدوير الزوايا الموجودة في أسفل أو جذر السن بدلاً من أن تكون حادة، وذلك اعتماداً على طريقة التصنيع فيمكن أن يكون التدوير نصف قطر دائري أو منحنى من نوع توكويد trochoid ، ويدعى

نصف قطر زاوية الجذر root corner radius أو استدارة زاوية الجذر (الركن الزاوي للجذر) root corner fillet [1].

6.4.1. طريقة التصميم المباشر للمسنن Direct Gear Design:

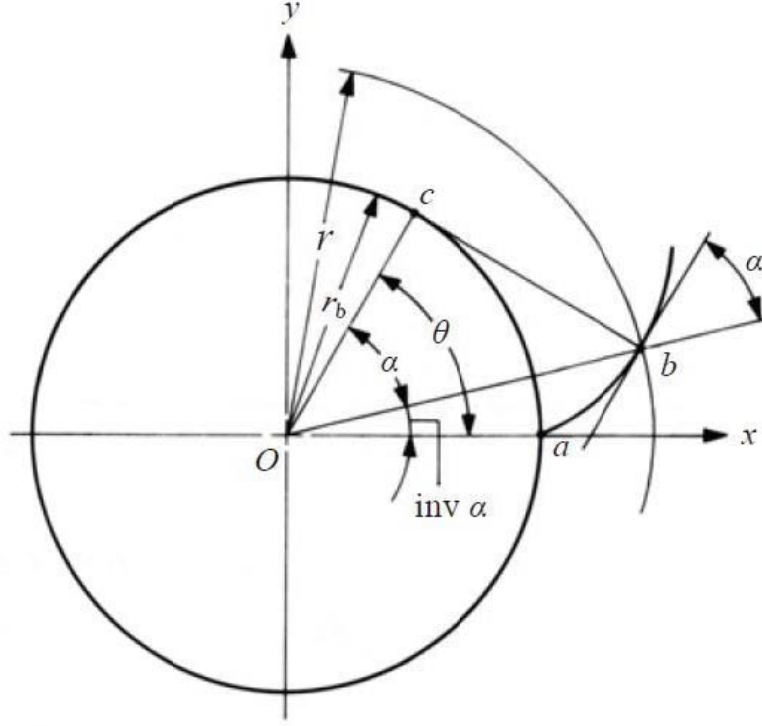
الأمطروحات الأساسية في نظرية التصميم المباشر للترس تم الحصول عليها من خلال استبعاد أداة القطع الجريئة المسننة عند تحديد هندسة التروس وإدخال بارامترات مستقلة جديدة مرتبطة مباشرة بالشكل الجانبي للأسنان الانفليوتية، يسمح تطبيق هذه الطريقة لتروس خاصة بتحقيق متطلبات الأداء الأساسية مثل سعة تحميل عظمى مع مستوى مقبول من إجهاد الهصر وتحقيق كفاءة أعلى للتروس. في الآونة الأخيرة لوحظ اهتمام أكبر في أجهزة نقل الحركة بالتروس ذات الأسنان الانفليوتية غير المتناظرة الجوانب.

يمكن استخدام هذه التروس في أجهزة نقل الحركة لتوربينات الرياح ومضخات التروس وغيرها من الوحدات التي يتم نقل الحمل فيها فقط في اتجاه واحد للحركة.

7.4.1. هندسة المنحني الانفليوتي Involute Curve Geometry:

المنحني الإنفليوتي هو منحني حلزوني يمكن تتبعه من نهاية خيط مشدود تم فكّه من دائرة ثابتة هي دائرة الأساس (Base circle) نصف قطرها r_b .

نصف قطر المنحني الإنفليوتي في نقطة منه (radius of curvature) هو المماس لدائرة الأساس المار من النقطة على المنحني كما هو موضح في الشكل (1-44) حيث cb هو نصف قطر الانحناء في النقطة b [1].



الشكل (44-1) منحنى انفليوتي [1].

من الشكل (44-1) وباعتبار :

r : نصف قطر الدائرة المارة من النقطة b.

r_w : نصف قطر دائرة الخطوة.

r_b : نصف قطر دائرة الأساس.

α : (Involute profile angle) زاوية الشكل الجانبي للانفليوت عند أي نقطة منه.

α_w : زاوية الضغط أو زاوية الشكل الجانبي للانفليوت عند دائرة الخطوة.

تكون خطوة دائرة الأساس (Base Pitch) من العلاقة :

حيث زاوية الضغط α_w (Pressure angle) :

$$\cos \alpha_w = \frac{r_b}{r_w}$$

زاوية دوران الانفليوت (Involute rolling angle) : رمزها (θ)

زاوية دوران الانفليوت عند نقطة منه هي الزاوية التي دارها نصف قطر قاعدة الأساس عند تشكيل

المنحنى الانفليوتي من بدايته لتلك النقطة ولتكن b كما هو مبين بالشكل (49-1)، وتحسب كالتالي:

$$\widehat{ca} = cb = \theta . r_b$$

$$cb = r . \sin \alpha$$

فتكون زاوية الدوران الانفليوت عند النقطة b:

زاوية الانفليوت (Involute Angle) (Involute function) : رمزها (inv α)

زاوية الانفليوت عند نقطة منه هي الزاوية بين قطر دائرة الأساس المار من بداية الإنفليوت والقطر المار من تلك النقطة ولتكن النقطة b كما يبينه الشكل (47-1) و تقاس بالراديان، وتحسب من العلاقة:

$$\tan \alpha = \frac{\sqrt{r^2 - r_b^2}}{r_b} = \frac{\sqrt{r^2 \left(1 - \frac{r_b^2}{r^2}\right)}}{r_b} = \frac{\sqrt{r^2 (1 - \cos^2 \alpha)}}{r_b} = \frac{\sqrt{r^2 \cdot \sin^2 \alpha}}{r_b} =$$

$$\frac{r \cdot \sin \alpha}{r_b} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \theta$$

$$\tan \alpha = \theta = \alpha + \text{inv } \alpha$$

$$\text{inv } \alpha = \tan \alpha - \alpha$$

إذا اعتبرنا مركز دائرة الأساس O هو مبدأ الإحداثيات يمكن التعبير عن المنحني الإنفليوتي من

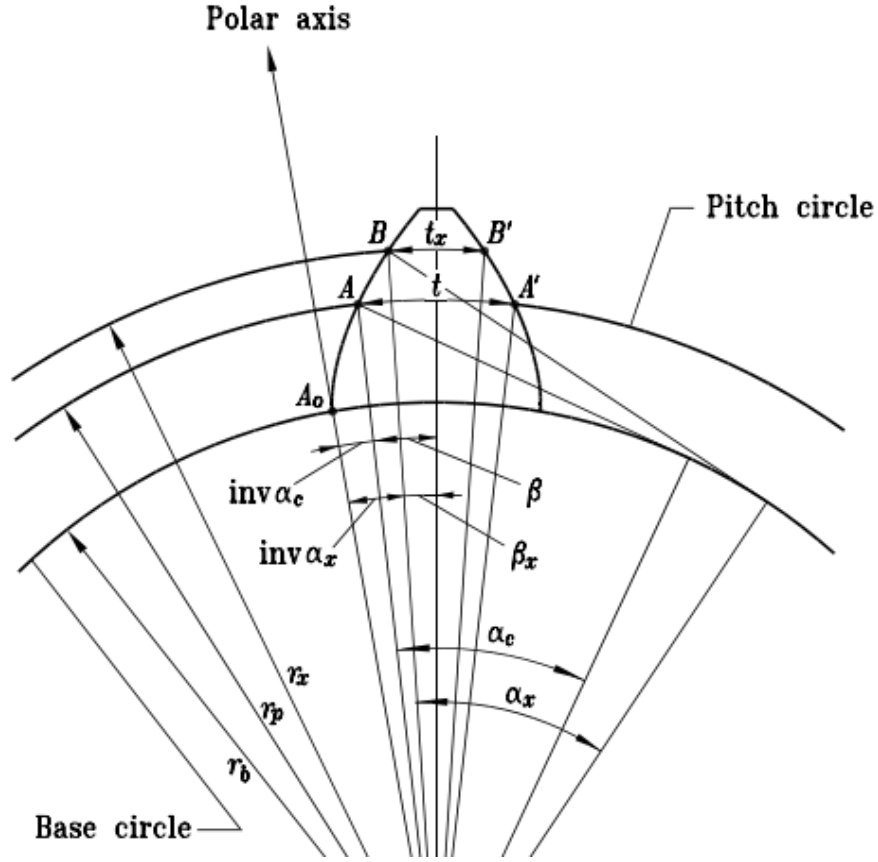
خلال قيمة x, y كما يلي:

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{r_b}{r}$$

$$x = r \cos (\text{inv } \alpha)$$

$$y = r \sin (\text{inv } \alpha)$$

1.7.4.1. بارامترات السن الإنفليوتي المتناظر:



الشكل (45-1) بارامترات السن الإنفليوتي المتناظر [11].

من الشكل (45-1) نجد أن سماكة السن عند دائرة الخطوة:

$$t_p = \frac{p_c}{2}$$

وسمك السن عند أي نقطة من الانفليوت:

$$t_x = r_x \left[\frac{t_p}{r_p} + 2(\text{inv } \alpha_c - \text{inv } \alpha_x) \right]$$

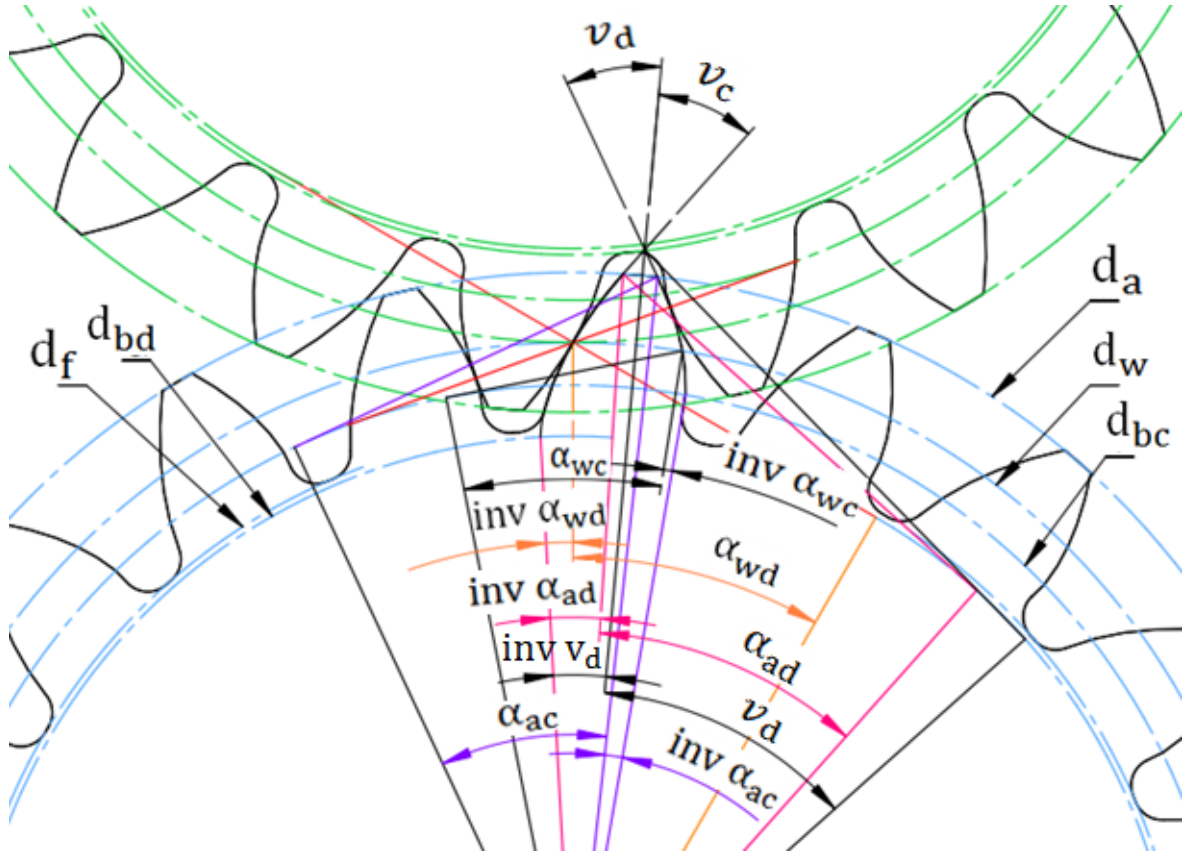
r_x : نصف قطر الدائرة المارة من أي نقطة على الانفليوت.

r_p : نصف قطر دائرة الخطوة.

$\text{inv } \alpha_c$: زاوية الانفليوت عند دائرة الخطوة.

$\text{inv } \alpha_x$: زاوية الانفليوت عند أي نقطة منه [11].

2.7.4.1. بارامترات السن الإنفليوتي غير المتناظر:



الشكل (46-1) بارامترات السن الإنفليوتي غير المتناظر.

من الشكل (46-1) على اعتبار:

Z : عدد الاسنان.

d, c : رموز للدلالة على جانب السن القائد drive و الجانب غير العامل coast

d_{bd}, d_{bc} : أقطار دائرتي الأساس للمنحنيين الإنفليوتيين.

d_w : قطر دائرة الخطوة.

d_a : قطر دائرة الساق.

d_f : قطر دائرة الجذر.

v_d, v_c : زاويتا جانبية السن عند نقطة التقاء المنحنيين الإنفليوتيين لجانبي السن.

α_{wd}, α_{wc} : زاويتا الضغط على الجانبين أو زاويتا الشكل الجانبي عند نقطة التقاطع مع دائرة

الخطوة على الجانبين.

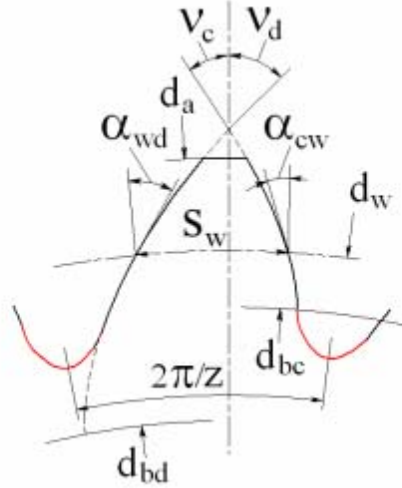
α_{ad}, α_{ac} : زاويتا الشكل الجانبي عند نقطة التقاطع مع دائرة الساق على الجانبين.

$\text{inv } \alpha_{ad}, \text{inv } \alpha_{ac}$: زاويتا الانفليوت عند نقطة التقاطع مع دائرة الساق على الجانبين.

$\text{inv } \alpha_{wd}, \text{inv } \alpha_{wc}$: زاويتا الانفليوت عند دائرة الخطوة على الجانبين.

$\text{inv}(v_d), \text{inv}(v_c)$: زاويتا الانفليوت عند نقطة التقاء المنحنيين.

S_w : سمك السن عند دائرة الخطوة [11].



الشكل (1-47) شكل السن الانفليوتي غير المتناظر [12].

تعطى زوايا الضغط بدلالة الأقطار من العلاقة:

$$\alpha_{wd} = \arccos\left(\frac{d_{bd}}{d_w}\right)$$

$$\alpha_{wc} = \arccos\left(\frac{d_{bc}}{d_w}\right)$$

فيكون معامل عدم التناظر للسن:

$$K = \frac{d_{bc}}{d_{bd}} = \frac{\cos(v_c)}{\cos(v_d)} = \frac{\cos(\alpha_{wc})}{\cos(\alpha_{wd})} \geq 1$$

سماعة السن عند دائرة الخطوة:

$$s_w = \frac{d_w}{2} [\text{inv}(v_d) + \text{inv}(v_c) - \text{inv}(\alpha_{wd}) - \text{inv}(\alpha_{wc})]$$

[12].

5.1. تعشيق المسننات الانفليوتية Meshing of Involute Gear:

عند تصميم جمل النقل بالمسننات حتى يتم التعشيق الصحيح يجب أن تكون زاوية الضغط والخطوة وبالنتيجة الموديول متساوية بين المسننات المتشابكة.

1.5.1. المسافة المركزية "c" Centre Distance:

هي المسافة بين مركزي المسننين المتعشقين، وحتى يتم التعشيق الصحيح يجب أن يتم التماس بين المسننين عند دائرتي الخطوة وبالتالي تكون المسافة المركزية :

حيث r_1, r_2 أنصاف أقطار دائرتي الخطوة للمسننين [10].

2.5.1. نسبة النقل أو نسبة السرعة الزاوية "R" Angular velocity ratio or transmission ratio:

هي نسبة السرعة الزاوية للمسنن القائد إلى السرعة الزاوية للمسنن المقاد وتحقق العلاقة :

$$R = \frac{\omega_{driver}}{\omega_{driven}} = \frac{n_{driver}}{n_{driven}} = \frac{N_{driven}}{N_{driver}} = \frac{d_{driven}}{d_{driver}}$$

حيث:

ω_{driver} : السرعة الزاوية للمسنن القائد. ω_{driven} : السرعة الزاوية للمسنن المقود.

n_{driver} : عدد دورات المسنن القائد. n_{driven} : عدد دورات المسنن المقود.

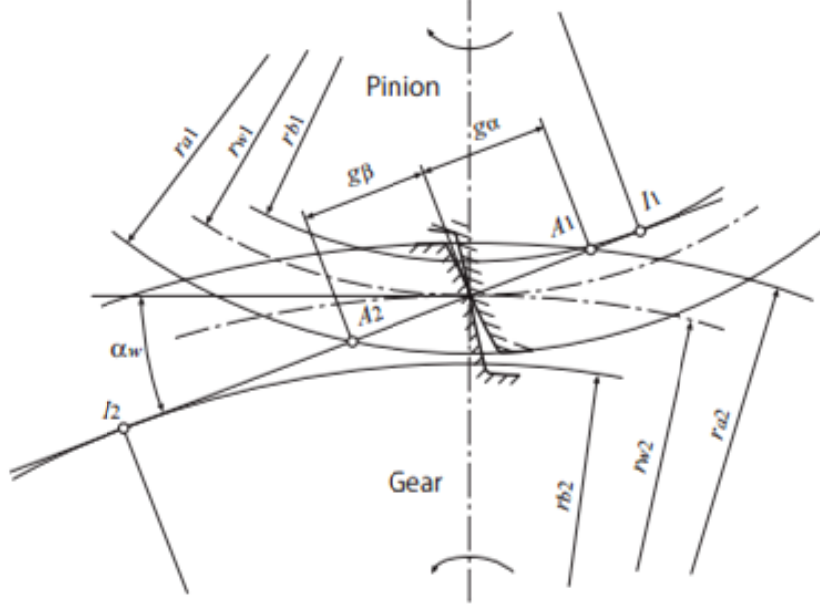
N_{driver} : عدد أسنان المسنن القائد. N_{driven} : عدد أسنان المسنن المقود.

d_{driver} : قطر دائرة الخطوة للمسنن القائد. d_{driven} : قطر دائرة الخطوة للمسنن المقود.

عند تصميم جملة نقل مسننة حتى يبقى الاتصال بين المسننين يجب أن تكون مركبات السرعات على طول خط العمل المشترك متساوية ولتحقق ذلك يجب أن تكون نسبة السرعات الزاوية ثابتة وبالتالي :
العمود المشترك في نقطة الاتصال بين المسننين يجب أن يمر دائما من نقطة الخطوة p ، وهذا الشرط الأساسي الذي يجب تحقيقه عند تصميم الشكل الجانبي لأسنان المسننات والمعروف بقانون النقل [10].

3.5.1. عدد أزواج الأسنان المتعشقة أو نسبة الاتصال Contact Ratio :

التعشيق خلال عمل المسننات يؤثر على الاهتزاز والضوضاء والمتانة والدوران وغيرها، ويجب أن تكون نسبة التعشيق أكبر من الواحد لتحقيق الاتصال الجيد بين المسننات، وكلما زادت نسبة التعشيق نحصل على جملة نقل أفضل.



الشكل (48-1) خط الاتصال [1].

في الشكل (48-1) لدينا $I_1 I_2$ هي خط التعشيق (Contact line) $A_1 A_2$ هي طول مسار التعشيق (Length of path of contact) و α_w هي زاوية الضغط فتكون نسبة الاتصال:

$$\epsilon_\alpha = \frac{A_1 A_2}{p_b}$$

ϵ_α : نسبة الاتصال (Contact Ratio).

$A_1 A_2$: طول مسار الاتصال (Length of path of contact).

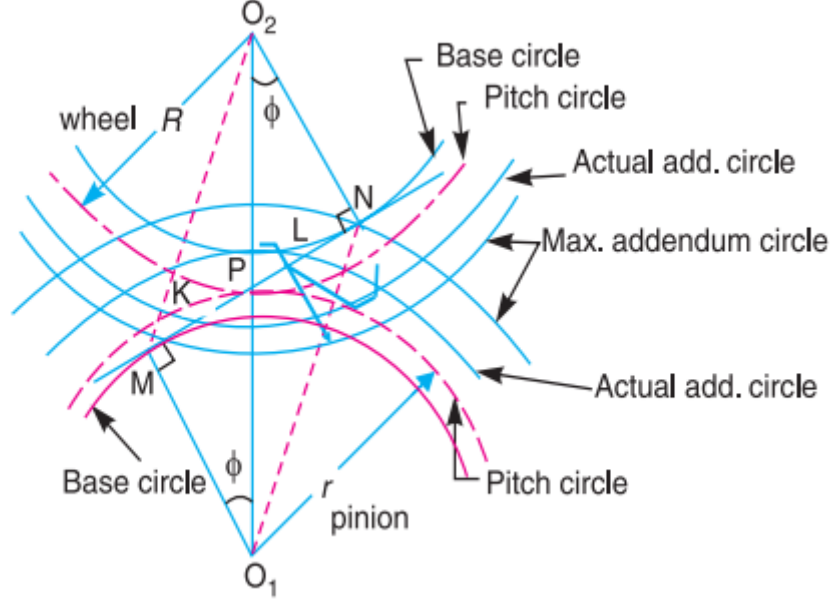
p_b : الخطوة الأساسية (Base Pitch).

$$A_1 A_2 = \sqrt{r_{a1}^2 - r_{b1}^2} + \sqrt{r_{a2}^2 - r_{b2}^2} - (r_{w1} + r_{w2}) \sin \alpha_w$$

[1].

4.5.1. التداخل في المسننات الانفليوتية : Interference in Involute Gears

الشكل (1-49) يظهر بنيون مركزه O_1 ، متشابك مع عجلة مسننة مع مركز O_2 ، MN هو المماس المشترك للدوائر الأساسية و KL هو مسار الاتصال بين الأسنان المتعشقة.



الشكل (1-49) التداخل بالمسننات الإنفليوتية [10].

إذا تم زيادة نصف قطر دائرة الساق للبنيون ازداد إلى O_1N ، فإن نقطة التعشيق L ستنتقل من L إلى N ، وعندما يتم زيادة نصف القطر لدائرة الساق لتصبح أبعد من ذلك، ستصبح نقطة التلامس L في الداخل وليس على المنحني الانفليوتي، يقوم طرف سن البنيون سوف يقطع الجزء الأدنى من سن العجلة عند الجذر ويزيل جزء من المنحني الجانبي الانفليوتي لأسنان العجلة. يُعرف هذا التأثير باسم التداخل.

باختصار إن الظاهرة التي تحدث عندما يقوم طرف سن بقطع الجزء السفلي من جذر السن آخر معشق معه تعرف باسم التداخل.

وبالمثل إذا زاد نصف قطر دائرة الساق للعجلة عن O_2M ، فإن طرف السن العجلة سوف يتسبب في تداخل مع سن البنيون، تسمى النقاط M و N نقاط التداخل.

من الواضح أنه يمكن تجنب التداخل إذا لم يمتد مسار التعشيق أبعد من نقاط التدخل، القيمة الحدية لنصف قطر دائرة الساق من الجناح هي O_1N وللعجلة هو O_2M .

من المناقشة أعلاه يمكن منع التداخل فقط إذا كانت دوائر الساق لترسين متعشقين تقطع المماس المشترك لدوائر القاعدة بين نقاط التماس.

الطول الأعظمي المسموح به لمسار الاتصال:

$$MN = MP + PN = r \sin \phi + R \sin \phi = (r + R) \sin \phi$$

أصغر عدد أسنان مسموح به لكل من البنيون والعجلة المسننة لمنع حدوث التداخل:

على اعتبار:

$$G = \frac{T}{t} \text{ : نسبة النقل} \quad t \text{ : عدد أسنان البنيون.}$$

$$h_{a1} \text{ : ارتفاع الساق للبنيون.} \quad T \text{ : عدد أسنان العجلة المسننة.}$$

$$h_{a2} \text{ : ارتفاع الساق للعجلة المسننة.} \quad \phi \text{ : زاوية الضغط.}$$

$$m \text{ : الموديول.}$$

$$t = \frac{2 h_{a1}}{m \cdot \sqrt{1+G (G+2) \sin^2 \phi} - 1}$$

$$T = \frac{2 h_{a2}}{m \cdot \sqrt{1+\frac{1}{G} \left(\frac{1}{G}+2\right) \sin^2 \phi} - 1}$$

[10].

الفصل الثاني:

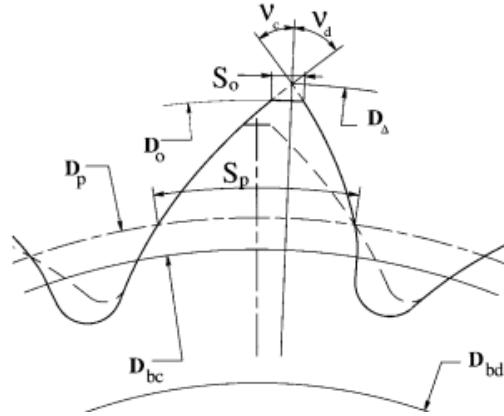
الدراسات السابقة

1.2. الدراسة المرجعية (1):

(1) A Kapelevich, (2000) “Geometry and design of involute spur gears with asymmetric teeth “, *Elsevier* , Volume 35, Issue 1, Pages 117-130

A Kapelevich (1) عام 2000 قدم مقال عرض فيه طريقة لدراسة وتصميم التروس ذات الأسنان غير المتناظرة التي تمكن من زيادة قدرة التحميل وتقليل الوزن والحجم ومستوى الاهتزاز مقارنة بالتروس المتناظرة الجوانب وعرض الصيغ والمعادلات اللازمة لتحديد بارامترات المسنن. الدراسات السابقة اعتبرت زاوية الضغط المنخفضة لجانب السن العامل وزاوية الضغط الكبيرة للجانب غير العامل يمكن هذا من تخفيض إجهاد الانحناء ويبقى إجهاد الهصر بنفس المستوى مقارنة بالمسننات المتناظرة الجوانب، وهذا التصميم يكون مصحوب برفع صلابة التشبيك وزيادة الضوضاء والاهتزاز.

في هذه الدراسة تم اعتبار زاوية الضغط الأكبر هي لجانب السن العامل، شكل (2-1).



الشكل (2-1) الجانب الأيسر للسن غير المتناظر هو العامل (1).

واستخلص النتائج التالية من هذا البحث:

1. تسمح هندسة الأسنان غير المتماثلة بزيادة في قدرة التحميل مع تقليل الوزن والأبعاد لبعض أنواع التروس، يصبح ذلك ممكناً عن طريق زيادة زاوية الضغط ونسبة الاتصال لجوانب القيادة.
2. يتم تحسين الخصائص العامة للتروس غير المتماثل قبل حساب معاملات الجريدة المسننة المولدة.
4. لقد أظهر اختبار التروس غير المتناظرة بزاوية الضغط الأكبر للجانب العامل انخفاضاً كبيراً في مستوى الاهتزاز، يمكن تفسير ذلك من خلال نسبة انزلاق منخفضة وسمك فيلم التزييت منخفض وتشبيك منخفض الصلابة من خلال الاختيار المناسب لزاوية ضغط جانب الراحة.

2.2. الدراسة المرجعية (2):

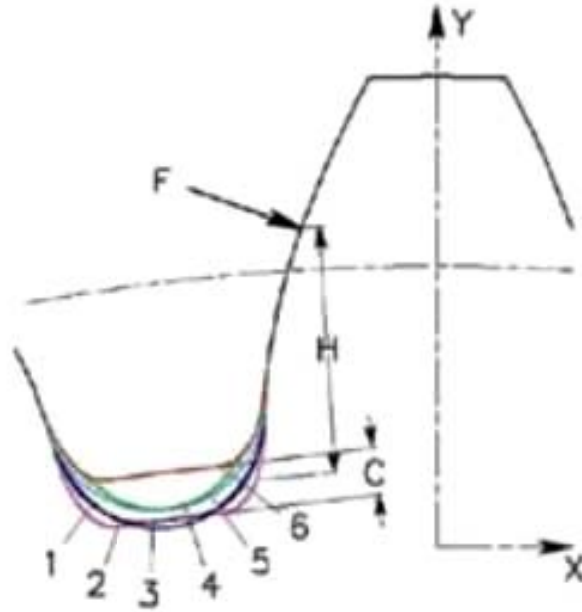
(2) A Kapelevich, Y Shekhtman , (2009) “ Tooth fillet profile optimization for gears with symmetric and asymmetric teeth “, *Gear technology* ,USA, September/October 2009 , p 73

A Kapelevich, Y Shekhtman (2) عام 2009 قدم دراسة لتحسين التشكيل الجانبي لفيليه الجذر (الركن الزاوي أو المتكأ للجذر) بالنسبة إلى التروس ذات الأسنان المتماثلة وغير متماثلة الجوانب استناداً إلى FEA وطريقة بحث عشوائية.

بأخذ نسبة تروس 1:1، والبعد المركزي الثابت = 60 مم، وعرض وجه كلا الترسين = 10 مم، وعزم دوران المسنن القائد $T = 50$ نيوتن.متر، يختلف عدد الأسنان من 12 إلى 75 ويتنوع الموديول وفقاً لذلك من 5 مم إلى 0.8 مم للحفاظ على المسافة المركزية الثابتة وزاوية ضغط 20° .

تحسين شكل فيليه الجذر يتيح تحقيق خفض كبير في إجهاد الانحناء بالمقارنة مع التروس المصممة بشكل تقليدي، وقد بينت النتائج:

- أن النموذج الأفضل بين النماذج غير المتناظرة يوفر نسبة تخفيض كبيرة في إجهاد الانحناء تصل إلى (10-20%) بالمقارنة مع جانبيات الأسنان التقليدية.
 - وأن تخفيض إجهاد الانحناء بواسطة تحسين ميلان الجانبيه يؤدي إلى فوائد أخرى لأداء التروس مثل تخفيض إجهاد هصر المسننات وزيادة الكفاءة.
- يبين الشكل (2-2) أشكال استدارات جذر السن التي تمت دراستها.



Key

- F Applied load
- H Radial distance between load application and max. stress points
- C Actual radial clearance
- 1 Fillet profile (black) generated by the standard (for coarse diametral pitch) rack with the tip radius $0.3/P$
- 2 Fillet profile (pink) generated by the standard (for fine diametral pitch) rack with the tip radius equal zero
- 3 Fillet profile (dark blue) generated by the full tip radius rack
- 4 Circular fillet profile (light blue)
- 5 Optimized fillet profile (green)
- 6 Trajectory of the mating gear tooth tip in tight mesh (red)

الشكل (2-2) مسنن معياري بانحناءات زاوية (2).

3.2. الدراسة المرجعية (3):

(3) S Poluru , V Pandey , (2017) “Improving The Bending Strength of Spur Gear Tooth Through Profile Modification Using CAD “ *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, India ,ISSN (P): 2249-6890; ISSN (E): 2249-8001 Vol. 7, Issue 4, p 39-48 .

قام Poluru , V Pandey (3) عام 2017 في دراسة تحسين أداء المسنن العدل النظامي عبر تعديل جانبية الأسنان من خلال البرامج الهندسية وذلك بتعديل الجانبية مع إبقائها بحالة تناظر من خلال النظر بثلاث بارامترات وهي نصف قطر الجذر للسن ونصف قطر الشكل الجانبي للسن، لمسنن مواصفاته وفق الجدول (1-2) التالي:

جدول (1-2) بارامترات المسنن المعتمد بالدراسة المرجعية (3).

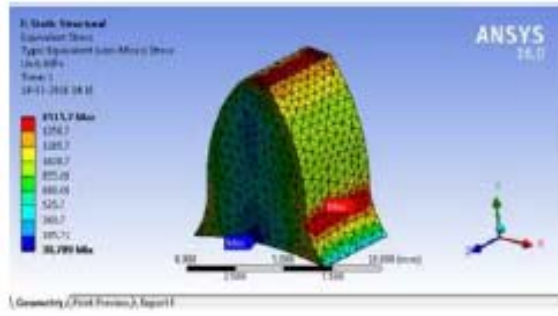
material	structural steel
modulus of elasticity	2, 00,000 MPa
Poisson's ratio	0.3
m	4 mm
Z	14
$R_p = mZ/2$	28 mm
$R_b = 0.94R_p$	26.33 mm
$R_a = R_p + m$	32 mm
$R_d = R_p - 1.25m$	23 mm
α	20 degrees
$R_f = 0.39m$	1.56 mm
$p = \pi D_p / Z$	12.56 mm
b	5 mm

يدور المسنن 1000 RPM لنقل قدرة 20KW.

بينت النتائج ما يلي :

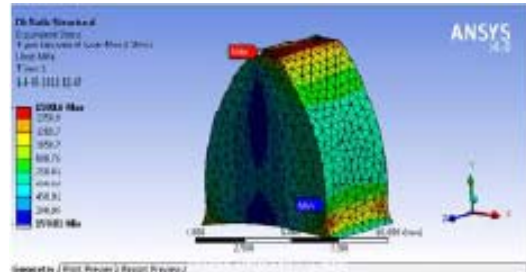
- الحالة 1: لمسنن موديوله 4 مم تم تعديل نصف قطر الجذر بزيادة 0.5 مم بدءاً من نصف القطر 1,56 مم إلى 4,06 مم، مع الحفاظ على نصف القطر للشكل الجانبي 9.5 مم ثابت كما بالشكل (3-2).

لوحظ أنه عند الزيادة في نصف قطر الجذر، فإن إجهاد الانحناء يتناقص.



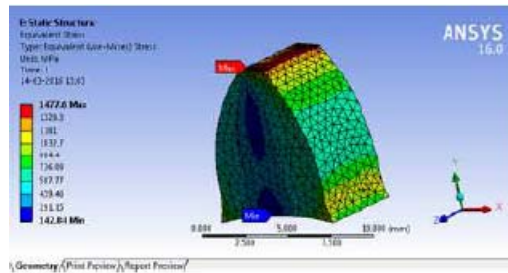
الشكل (3-2) السن عند زيادة نصف قطر الجذر (3).

- الحالة 2: لمسنن موديوله 4 مم تم تعديل نصف قطر الشكل الجانبي من 9,5 مم وصولاً إلى 10 مم بإضافة 0.1 مم ، مع الحفاظ على نصف قطر الجذر 1,56 مم ثابت، شكل (2-4).
لوحظ أن هناك زيادة في ثخانة السن، والذي يتم تعديل جزء الجذر بسببه، مما أدى إلى تخفيض أكثر في إجهاد الانحناء مقارنة بالحالة 1.



الشكل (4-2) السن عند زيادة سماكته (3).

- الحالة 3: لمسنن موديوله 4 مم تم تعديل نصف قطر الجذر بزيادة 0.5 مم بدءاً من نصف القطر 1,56 مم إلى 4,06 مم، ونصف قطر الشكل الجانبي من 9,5 مم وصولاً إلى 10 مم بإضافة 0.1 مم، الشكل (2-5).
لوحظ أن هناك تخفيض أكثر في إجهاد الانحناء مقارنة بالحالة 1 و 2 .



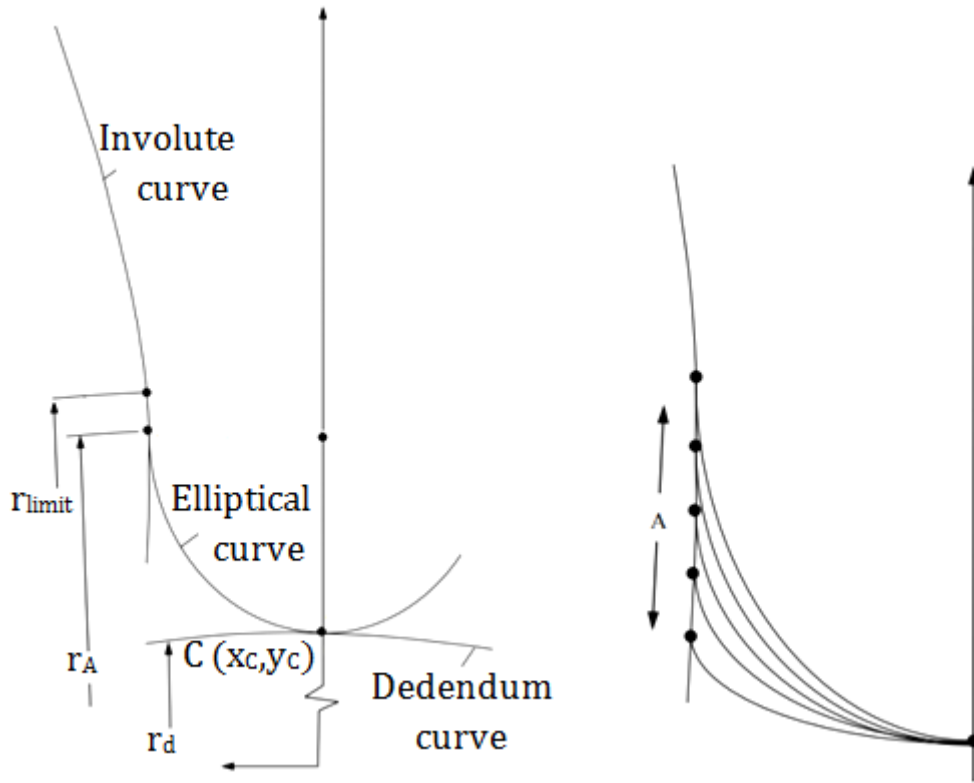
الشكل (5-2) السن عند زيادة سماكته ونصف قطر الشكل الجانبي (3).

4.2. الدراسة المرجعية (4):

(4) T G Yilmaz, F Karpat, (2018) “Influence of Root Geometry on Bending Stress for Involute Spur Gears “ Proceedings of the 4th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'18) ,Madrid, Spain , Paper No. ICMIE 124.

الأسنان الانفليوتية العدلة القياسية للمقارنة بين بعضها البعض في ضوء إجهاد الانحناء، موضحة بالشكل (6-2) وبينت النتائج ما يلي:

- يمكن استخدام منحنى قطع ناقص ذي قيمة نصف القطر الأعلى العليا لتقليل إجهاد الانحناء.
- بالنسبة إلى $z = 28$ ، يكون للمنحنى الدائري إجهاد انحناء أعلى بنسبة 5% تقريباً من المنحنى التروكويدي الكامل لهذا السبب ليس بديلاً جيداً لخفض إجهاد الانحناء.



الشكل (6-2) توليد منحنى قطع ناقص من نقط بداية مختلفة (4)

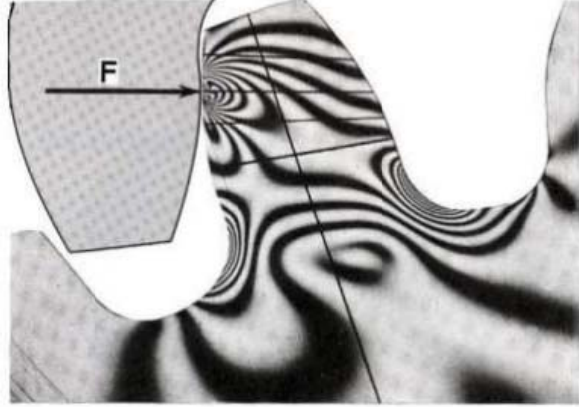
الفصل الثالث:

القسم العملي

1.3. تحليل القوى المؤثرة على السن الإنفليوتي العدل:

تؤثر على السن قوة عامودية على المنحني الإنفليوتي موزعة على عرض السن عند خط التماس المشترك كما في الشكل (1-3)، حيث يتركز أعلى اجهاد على السن في منطقتين هما:

- عند نقطة التماس حيث تؤثر القوة F .
- في منطقة استدارة جذر السن بالقرب من قاعدة السن.

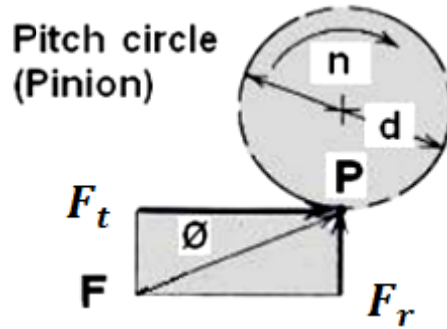


الشكل (1-3) نموذج للقوة المؤثرة على أسنان المسننات [13].

يوضح الشكل (2-3) أنه يمكن تحليل القوة المؤثرة لمركبتين:

F_t : القوة المماسية التي تنقل القدرة.

F_r : القوة المحورية والتي ليس لها تأثير على سن المسنن.



الشكل (2-3) تحليل القوة المؤثرة على السن بالمسنن العدل [13].

وباعتبار :

d : قطر دائرة الخطوة [m]

F_t : القوة المماسية التي تنقل القدرة [N]

M : العزم المنقول [N.m]

N : عدد الدورات بالدقيقة [rpm]

P : الاستطاعة المنقولة [w]

r : نصف قطر دائرة الخطوة [m]

V : السرعة الخطية [m/s]

w : السرعة الزاوية [rad/s]

يمكن حساب القوة المماسية من العلاقة:

$$F_t = \frac{M}{r}$$

وتكون السرعة الخطية:

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot N}{60}$$

السرعة الزاوية:

$$w = \frac{V}{r} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60}$$

والاستطاعة المنقولة:

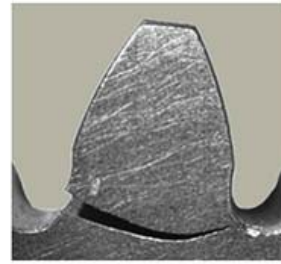
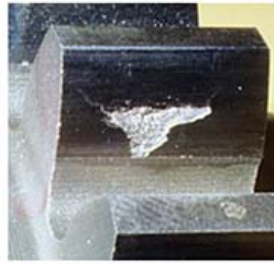
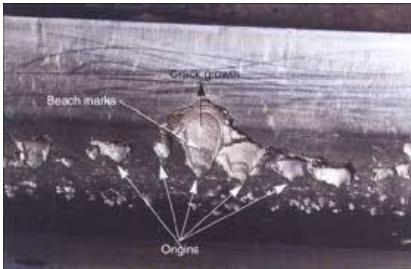
$$P = M \cdot w$$

[13].

2.3. تحليل الاجهادات المؤثرة على السن الإنفليوتي العدل:

يتعرض السن لنوعي تحطم أساسيين نتيجة الاجهادات التالية:

- إجهاد انحناء مفرط يسبب تحطم أو كسر السن كما في الشكل (3-3) .
- إجهاد هصر مفرط يسبب تآكل أو تنقر سطحي للسن كما في الشكل (3-3) [14].



(ب)

(أ)

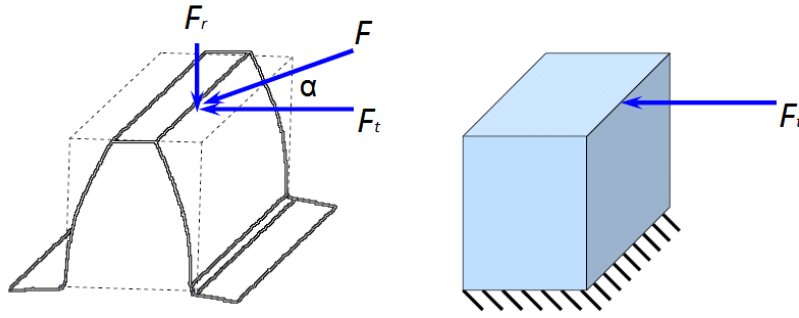
الشكل (3-3) تحطم الأسنان أ- كسر ب- اهتراء/تنقر سطحي [14].

1.2.3. إجهاد الانحناء للسن بالمسنن العدل حسب معادلة لويس

:Tooth bending stress – Lewis equation

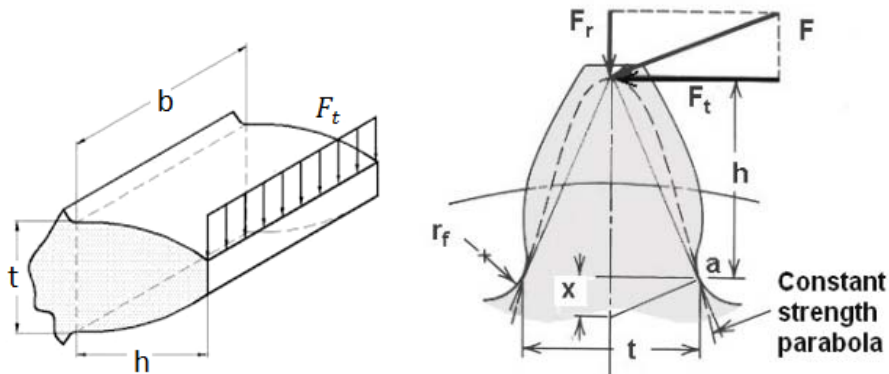
الطريقة التقليدية لتقدير إجهاد الانحناء على أسنان المسنن هي معادلة لويس الذي استخدم الفرضيات التالية :

1. اعتبر سن المسنن جائز كابول (cantilever beam) كما هو موضح بالشكل (3-4).
2. الحمل الكلي المنقول موزع بانتظام على عرض الوجه الكامل للسن ويمكن تمثيله بقوة واحدة مركزة مطبقة على الطرف العلوي لسن واحد بشروط السكون.
3. المكون القطري للقوة المؤثرة يمكن إهماله.
4. القوى الناتجة عن الاحتكاك الانزلاقي للأسنان مهمة.
5. تركز الاجهادات عند استدارة جذر السن (الركن الزاوي للجذر) مهمل.



الشكل (3-4) سن المسنن كجائز كابول [15].

يوضح الشكل (3-5) أن المقطع الحرج للاجهاد عند جذر السن حيث القطع المكافئ مماس مع جانبية السن .



الشكل (3-5) المقطع الحرج لإجهاد الانحناء للسن عند a [13].

وباعتبار :

k_f : عامل حساب أمور أخرى تقلل حد التعب	b, F : سماكة السن
M : العزم المنقول	c : أبعد نقطة عن المحور المركزي للمقطع
	المدرّوس
m : الموديول	C_p : عامل المرونة
n_d : العامل التصميمي	d_p : قطر دائرة الخطوة للمسنن القائد
r_1 : نصف قطر انحناء جانبية السن للبنيون	d_G : قطر دائرة الخطوة للمسنن المقود
r_2 : نصف قطر انحناء جانبية السن للعجلة	E_p, E_G : عامل يونغ للمسنن القائد والمقود
S_e : حد الاحتمال التعبى المعدل	F_t, W_t : القوة المماسية التي تنقل القدرة
S'_e : حد الاحتمال التعبى	h : ارتفاع السن
t : سماكة الجذر	I : عزم العطالة للمقطع المدرّوس
v_p, v_G : نسبة بواسون للمسنن القائد والمقود	K_v : التأثير الديناميكي
W : عزم المقاومة	k_a : عامل الإنهاء السطحي
γ : عامل شكل لويس	k_b : عامل الحجم
σ_b : إجهاد الانحناء	k_c : عامل الحمل
σ_{all} : إجهاد الانحناء المسموح به	k_d : عامل درجة الحرارة
ϕ : زاوية الضغط	k_e : عامل الوثوقية
	يعطى إجهاد الانحناء بالمعادلة :

$$\sigma_b = \frac{M}{W} = \frac{F_t \cdot h}{I/c}$$

حيث:

$$c = \frac{t}{2}$$

$$I = \frac{b \cdot t^3}{12}$$

$$\sigma_b = \frac{6 \cdot F_t \cdot h}{b \cdot t^2}$$

بإدخال معامل شكل السن y وفق تعريف لويس تصبح معادلة متانة الانحناء للسن :

$$\sigma_b = \frac{F_t}{b.m.y}$$

عرض المسنن العدل b يتم اختياره ضمن المتراجحة:

$$8 m < b < 12.5 m$$

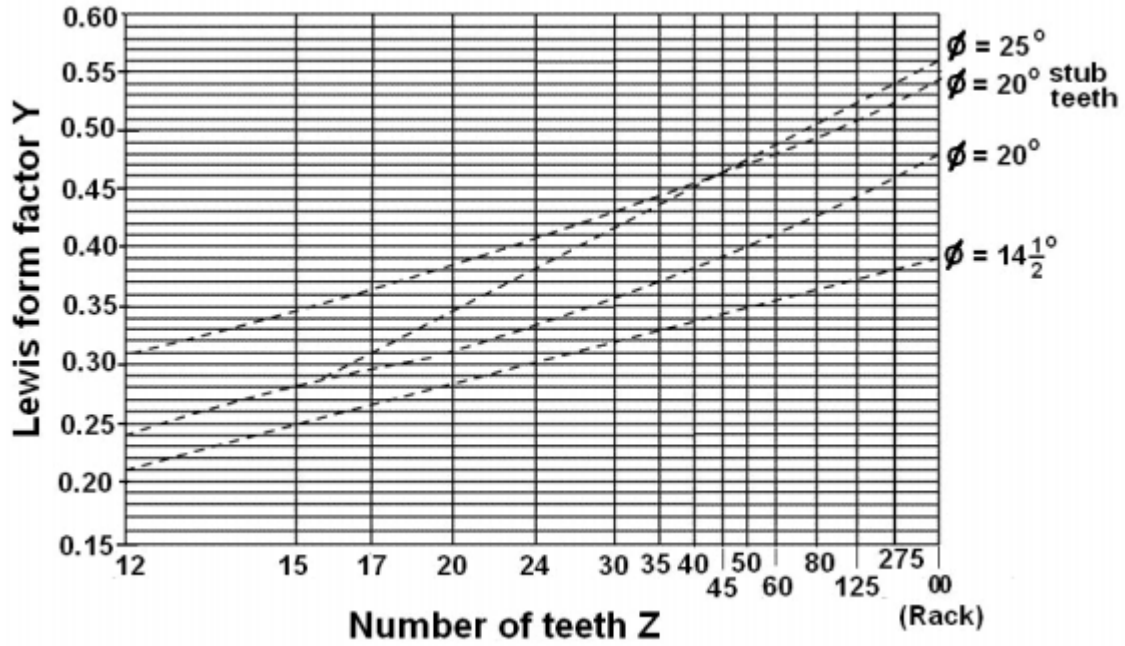
يعطى معامل شكل لويس من الجدول (1-3) أو من المخطط البياني شكل (3-6).

جدول (1-3) قيمة معامل شكل لويس [13].

Number of teeth	$\phi = 20^\circ$ $a = 0.8m^*$ $b = m$	$\phi = 20^\circ$ $a = m$ $b = 1.25m$	$\phi = 25^\circ$ $a = m$ $b = 1.25m$	$\phi = 25^\circ$ $a = m$ $b = 1.35m^+$
12	0.335 12	0.229 60	0.276 77	0.254 73
13	0.348 27	0.243 17	0.292 81	0.271 77
14	0.359 85	0.255 30	0.307 17	0.287 11
15	0.370 13	0.266 22	0.320 09	0.301 00
16	0.379 31	0.276 10	0.331 78	0.133 63
17	0.387 57	0.285 08	0.342 40	0.325 17
18	0.395 02	0.293 27	0.352 10	0.335 74
19	0.401 79	0.300 78	0.360 99	0.345 46
20	0.407 97	0.307 69	0.369 16	0.354 44
21	0.413 63	0.314 06	0.376 71	0.362 76
22	0.418 83	0.319 97	0.383 70	0.370 48
24	0.428 06	0.330 56	0.396 24	0.384 39
26	0.436 01	0.339 79	0.407 17	0.396 57
28	0.442 94	0.347 90	0.416 78	0.407 33
30	0.449 02	0.355 10	0.425 30	0.416 91
34	0.459 20	0.367 31	0.439 76	0.433 23
38	0.467 40	0.377 27	0.451 56	0.446 63
45	0.478 46	0.390 93	0.467 74	0.465 11
50	0.484 58	0.398 60	0.476 81	0.475 55
60	0.493 91	0.410 47	0.490 86	0.491 77
75	0.503 45	0.422 83	0.505 46	0.508 77
100	0.513 21	0.435 74	0.520 71	0.526 65
150	0.523 21	0.449 30	0.536 68	0.545 56
300	0.533 48	0.463 64	0.553 51	0.565 70
Rack	0.544 06	0.478 97	0.571 39	0.587 39

* Stub teeth

+ Large fillet



الشكل (3-6) المخطط البياني لمعامل شكل لويس [13].

التأثير الديناميكي : Dynamic Effects

إن حمل الأسنان عند التشغيل ليس حملاً ساكناً بل حملاً ديناميكياً يتأثر بسرعة خط الخطوة فعند تحريك زوج التروس بسرعة معتدلة أو عالية ينشأ زيادة في الإجهادات بسبب تأثيرات التشابك الأولي لذلك تم تعديل معادلة لويس بإضافة عامل السرعة الذي يحسب بمعادلة بارث، فتصبح معادلة حساب إجهاد الانحناء بالشكل التالي:

$$\sigma_b = \frac{K_v \cdot F_t}{b \cdot m \cdot y}$$

حيث معادلة بارث لمعامل السرعة K_v (Barth's equation) عندما تعطى سرعة خط الخطوة V

بوحدة [m/s] (نظام SI) :

$$K_v = \frac{3.05 + V}{3.05} \quad \text{الشكل الجانبي تشكّل من حديد زهر مصبوب}$$

$$K_v = \frac{6.1 + V}{6.1} \quad \text{الشكل الجانبي تشكّل بالقطع أو التفريز}$$

$$K_v = \frac{3.56 + \sqrt{V}}{3.56} \quad \text{الشكل الجانبي تشكّل بآلة الهوب أو بالتشكيل}$$

$$K_v = \sqrt{\frac{5.56 + \sqrt{V}}{5.56}} \quad \text{الشكل الجانبي تشكّل بالقشط}$$

يجب أن يتحقق:

$$\sigma_{all} \geq \sigma_b$$

ويكون إجهاد الانحناء المسموح به:

$$\sigma_{all} = \frac{S_e}{n_d}$$

وحد الاحتمال التعبى المعدل:

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S'_e$$

[13].

2.2.3. متانة السطح:

يشتمل تآكل أسطح أسنان التروس على التآكل بسبب تكرار ضغوط التلامس العالية أو فشل التزييت أو التآكل بسبب وجود مواد غريبة.

إجهاد الهصر حسب هيرتز هو:

$$\sigma_C = -C_P \sqrt{\frac{K_v \cdot W_t}{F \cdot \cos \phi} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)}$$

حيث:

$$r_1 = \frac{d_p \sin \phi}{2}, r_2 = \frac{d_G \sin \phi}{2}$$

عامل المرونة :

$$C_P = \sqrt{\frac{1}{\pi \left(\frac{1-v_p^2}{E_P} + \frac{1-v_G^2}{E_G} \right)}}$$

[16].

3.2.3. معادلات الإجهادات حسب جمعية مصنعي التروس الأمريكية

:AGMA Stress Equations

بطريقة AGMA هناك معادلات إجهاد أساسية لمتانة الانحناء وأخرى لمقاومة التآكل ، باعتماد نظام

الوحدات المترية (SI) نعرف الرموز التالية:

F, b	سماكة السن [mm].
C_e	عامل تصحيح محاذاة التشابك.
Z_R, C_f	عامل حالة السطح .
Z_W, C_H	عامل نسبة الصلابة لمقاومة التقر.
C_{ma}	عامل محاذاة التشابك.
C_{mc}	عامل تصحيح الحمل.
C_{mf}	عامل توزيع حمل الوجه.
Z_E, C_p	عامل المرونة حسب AGMA .
C_{pf}	عامل التناسب للبنيون.
C_{pm}	معدل التناسب للبنيون.
d_p, d_{w1}	قطر الخطوة للبنيون .
E_p, E_G	عامل يونغ للبنيون والترس.
H_{BG}, H_{BP}	قساوة برينل لكل من البنيون والترس.
Z_I, I	العامل الهندسي لمقاومة التقر .
Y_J, J	العامل الهندسي لمتانة الانحناء (والذي يتضمن عامل تركيز إجهاد فيليه الجذر k_f).
K_B	عامل سماكة الإطار.
K_m, K_H	عامل توزيع الحمولة.
K_o	عامل الحمل الزائد.
K_s	عامل الحجم.
Y_θ, K_T	عامل الحرارة.
K_v	العامل الديناميكي.

Y_Z, K_R	عامل الوثوقية.
m_G	نسبة السرعة.
m_N	نسبة مشاركة الحمل = 1 للمسننات العدلة.
m_t	الموديول [mm].
P_d	الخطوة القطرية .
σ_{HP}, S_C	متانة الهصر [MPa] psi .
σ_{FP}, S_t	متانة الانحناء [MPa] psi .
S_F	عامل الأمان - انحناء .
S_H	عامل الأمان - تنقّر .
v_p, v_G	نسبة بواسون للمسنن للبنيون والترس.
W^t	الحمل المنقول [N] lb .
Y	عامل شكل لويس
Y_N	عامل دورة حياة الاجهاد - انحناء
Z_N	عامل دورة حياة الاجهاد - تنقّر
σ_{all}	اجهاد الانحناء الحدي المسموح به [MPa] psi .
$\sigma_{c,all}$	اجهاد الهصر الحدي المسموح به [MPa] psi .
ϕ_t	زاوية الضغط.

1.3.2.3. إجهاد الانحناء للسن بالمسنن العدل حسب (AGMA) جمعية مصنعي التروس

الأمريكية :Tooth bending stress – AGMA procedure

$$\sigma = \begin{cases} W^t K_o K_v K_s \frac{P_d K_m K_B}{F J} & \text{US Units} \\ W^t K_o K_v K_s \frac{1}{b m_t} \frac{K_H K_B}{Y_J} & \text{(SI Units)} \end{cases}$$

1.3.2.3. إجهاد الهصر للسن بالمسنن العدل حسب (AGMA) جمعية مصنعي التروس

الأمريكية :Tooth contact stress – AGMA procedure

$$\sigma_c = \begin{cases} C_p \sqrt{W^t K_o K_v K_s \frac{K_m C_f}{d_p F I}} & US \text{ units} \\ Z_E \sqrt{W^t K_o K_v K_s \frac{K_H Z_R}{d_{w1} b Z_I}} & (SI \text{ units}) \end{cases}$$

4.2.3. معادلات المتانة حسب جمعية مصنعي التروس الأمريكية

:AGMA Strength Equations

عند تحليل أسنان التروس بعد العثور على قيم إجهاد الانحناء و إجهاد الهصر، يجب مقارنتها بقيم الإجهاد المسموح بها للتأكد من أن التصميم صحيح. يتم الحصول على متانة الانحناء والهصر من الرسوم البيانية أو الجداول للمواد المختلفة ثم يتم تعديلها بواسطة عوامل مختلفة للحصول على القيم المسموح بها لإجهادات الانحناء والهصر (القيم الحدية).

1.4.2.3. إجهاد الانحناء الحدي المسموح به للسن بالمسنن العدل حسب جمعية مصنعي

التروس الأمريكية (AGMA) – Allowable (limiting) bending stress :

$$\sigma_{all} = \begin{cases} \frac{S_t Y_N}{S_F K_T K_R} & Us \text{ units} \\ \frac{\sigma_{FP} Y_N}{S_F Y_\theta Y_Z} & (SI \text{ units}) \end{cases}$$

2.4.2.3. إجهاد الهصر الحدي المسموح به للسن بالمسنن العدل حسب جمعية مصنعي التروس

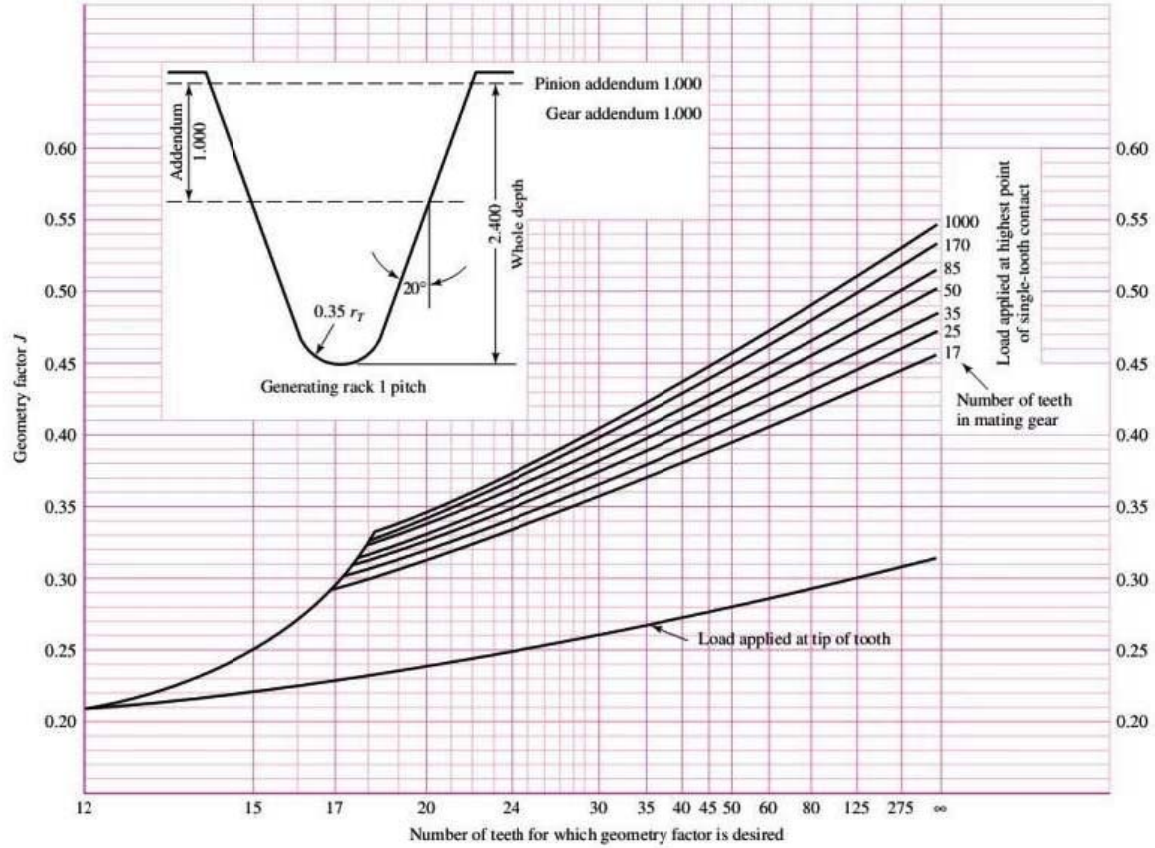
الأمريكية (AGMA) – Allowable (limiting) contacting stress :

$$\sigma_{c,all} = \begin{cases} \frac{S_c Z_N C_H}{S_H K_T K_R} & US \text{ units} \\ \frac{\sigma_{HP} Z_N Z_W}{S_H Y_\theta Y_Z} & (SI \text{ units}) \end{cases}$$

عوامل الشكل Y_J , J and Z_I , I : Geometry Factors

الغرض من العوامل الهندسية هو حساب شكل السن في معادلات الإجهاد.

العامل الهندسي لإجهاد الانحناء J , Y_J يعتمد هذا العامل على شكل السن والمسافة من جذر السن إلى أعلى نقطة ملاسة للسن الواحد ، قيمته من أجل المسننات العدلة بزاوية ضغط 20° من الشكل (7-3) التالي :



الشكل (7-3) العامل الهندسي لإجهاد الانحناء J [17].

Z_I , I يُطلق عليه معامل هندسة مقاومة التآكل ويمثل قيم نصف القطر اللحظي لانحناء الأسنان عند نقطة التلامس، ويمكن العثور على قيمته على النحو التالي :

$$I = \begin{cases} \frac{\cos \phi_t \sin \phi_t}{2m_N} \frac{m_G}{m_G + 1} & \text{External Gears} \\ \frac{\cos \phi_t \sin \phi_t}{2m_N} \frac{m_G}{m_G - 1} & \text{Internal Gears} \end{cases}$$

عامل المرونة Z_E, C_p : The Elastic Coefficient

يجمع العامل بين الثوابت المرنة للبينون والتروس ، ويحسب من العلاقة :

$$C_P = \sqrt{\frac{1}{\pi \left(\frac{1-\nu_P^2}{E_P} + \frac{1-\nu_G^2}{E_G} \right)}}$$

أو من الجدول (2-3) التالي :

جدول (2-3) معامل المرونة [17].

Gear Material and Modulus of Elasticity E_G , lbf/in ² (MPa)*							
Pinion Material	Pinion Modulus of Elasticity E_P , psi (MPa)*	Steel 30×10^6 (2×10^5)	Malleable Iron 25×10^6 (1.7×10^5)	Nodular Iron 24×10^6 (1.7×10^5)	Cast Iron 22×10^6 (1.5×10^5)	Aluminum Bronze 17.5×10^6 (1.2×10^5)	Tin Bronze 16×10^6 (1.1×10^5)
Steel	30×10^6 (2×10^5)	2300 (191)	2180 (181)	2160 (179)	2100 (174)	1950 (162)	1900 (158)
Malleable iron	25×10^6 (1.7×10^5)	2180 (181)	2090 (174)	2070 (172)	2020 (168)	1900 (158)	1850 (154)
Nodular iron	24×10^6 (1.7×10^5)	2160 (179)	2070 (172)	2050 (170)	2000 (166)	1880 (156)	1830 (152)
Cast iron	22×10^6 (1.5×10^5)	2100 (174)	2020 (168)	2000 (166)	1960 (163)	1850 (154)	1800 (149)
Aluminum bronze	17.5×10^6 (1.2×10^5)	1950 (162)	1900 (158)	1880 (156)	1850 (154)	1750 (145)	1700 (141)
Tin bronze	16×10^6 (1.1×10^5)	1900 (158)	1850 (154)	1830 (152)	1800 (149)	1700 (141)	1650 (137)

Poisson's ratio = 0.30.

*When more exact values for modulus of elasticity are obtained from roller contact tests, they may be used.

العامل الديناميكي K_v : Dynamic Factor

يتم استخدام هذا العامل لمراعاة عدم الدقة في تصنيع أسنان التروس وتعشيقها أثناء العمل ، والتي تسبب انحرافاً عن السرعة الزاوية المنتظمة التي يفترض أن يمتلكها زوج التروس ، تستخدم AGMA "أرقام مستوى دقة النقل" ، Q_v ، لتقدير التروس إلى فئات مختلفة وفقاً لدقة التصنيع (التفاوتات).

– Q_v من 3 إلى 7 هو لتروس الجودة التجارية.

– Q_v من 8 إلى 12 لتروس عالية الجودة.

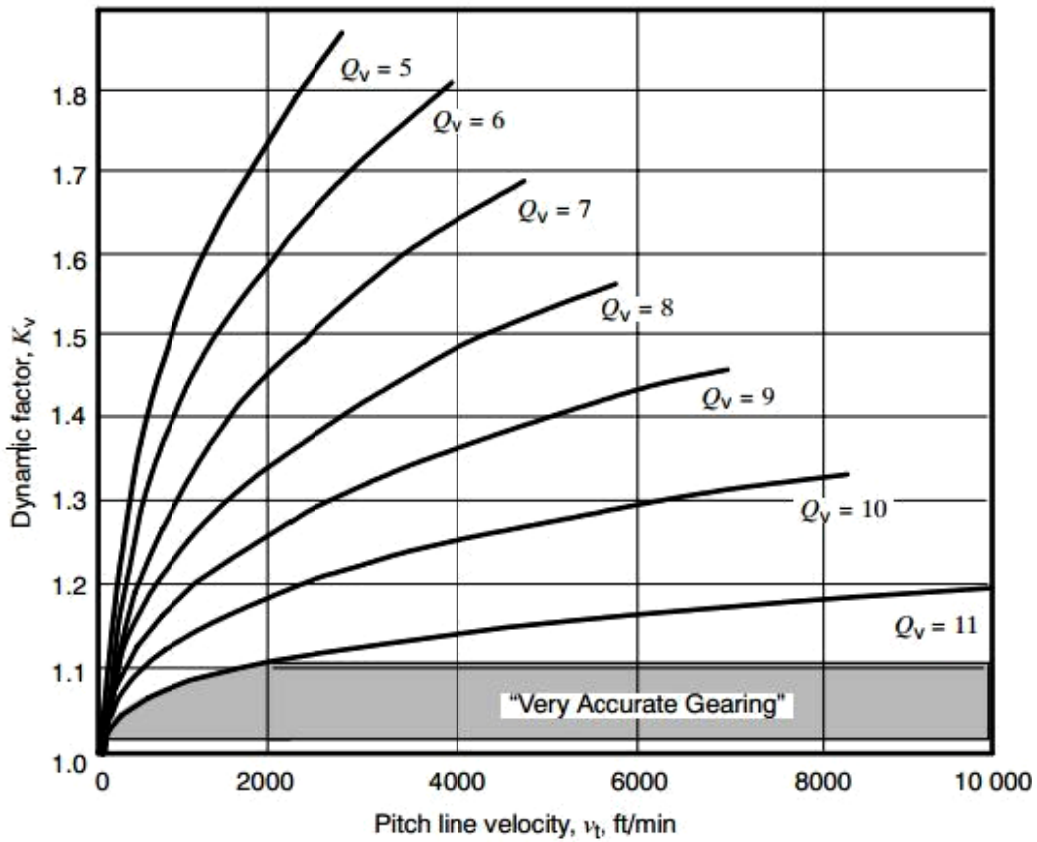
ويمكن حساب العامل الديناميكي من العلاقة :

$$K_v = \left(\frac{A + \sqrt{200V}}{A} \right)^B \quad V \text{ in m/s}$$

$$A = 50 + 56(1 - B)$$

$$B = 50 + 56(12 - Q_v)^{2/3}$$

أو من الشكل (8-3) التالي :



الشكل (8-3) العامل الديناميكي [17].

عامل الحمل الزائد K_o : Overload Factor

يستخدم هذا العامل لحساب الأحمال الخارجية التي تتجاوز الحمل العرضي الاسمي (مثل الاختلافات في عزم الدوران بسبب إطلاق الأسطوانات في محركات الاحتراق الداخلي). تستند قيم K_o على الخبرة الميدانية في تطبيق معين، جدول (3-3) .

جدول (3-3) معامل الحمل الزائد [17].

Table of Overload Factors, K_o			
Driven Machine			
Power source	Uniform	Moderate shock	Heavy shock
Uniform	1.00	1.25	1.75
Light shock	1.25	1.50	2.00
Medium shock	1.50	1.75	2.25

عامل الحجم K_S Size Factor:

يستخدم هذا العامل لحساب خصائص المواد غير الموحدة بسبب الحجم، لم يتم بعد تحديد عوامل الحجم القياسي لأسنان التروس ، وبالتالي ، تقترح AGMA استخدام K_S (إذا كان تأثير الحجم معروفاً ، $K_S > 1$) ، ومع ذلك ، يمكن حساب عامل الحجم لأسنان التروس من العلاقة:

$$K_S = 1.192 \left(\frac{F\sqrt{Y}}{P_d} \right)^{0.0535}$$

عامل حالة السطح Z_R, C_f Surface Condition Factor:

يعتمد هذا العامل على إنهاء السطح والاجهاد المتبقي يتم استخدامه فقط في معادلة إجهاد الهصر ولم يتم تحديد معامل حالة سطح الأسنان القياسية. وبالتالي نستخدم $C_f = 1$.

عامل توزع الحمل K_m, K_H Load-Distribution Factor:

يستخدم هذا العامل لحساب توزيع الحمل غير المنتظم على طول خط الاتصال. أحد أسباب التوزيع غير المنتظم للحمل هو اختلال محور التروس الناتج عن تشوه الأعمدة التي تحمل التروس، والأسباب الأخرى عدم الدقة في التصنيع والتجميع. يمكن إيجاد عامل توزيع الحمل من المخطط التالي :

$$K_m = C_{mf} = 1 + C_{mc} (C_{pf} C_{pm} + C_{ma} C_e)$$

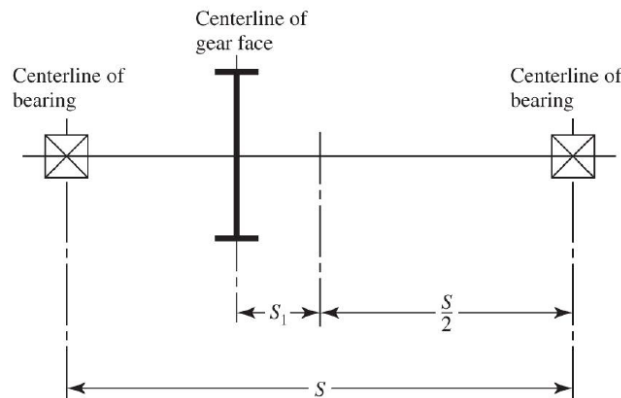
$$C_{mc} = \begin{cases} 1 & \text{أسنان مشطوفة (تاجية)} \\ 0.8 & \text{أسنان غير مشطوفة} \end{cases}$$

$$C_{mc} = \begin{cases} \frac{F}{10d} - 0.025 & F \leq 1 \text{ in} \\ \frac{F}{10d} - 0.0375 + 0.0125F & 1 < F \leq 17 \text{ in} \\ \frac{F}{10d} - 0.1109 + 0.0207F - 0.000228 F^2 & 17 < F \leq 40 \end{cases}$$

$$C_e = \begin{cases} 0.8 & \text{لجمل التروس الكوكبية} \\ 1 & \text{لباقى الشروط} \end{cases}$$

$$C_{pm} = \begin{cases} 1 & S_1/S < 0.175 \\ 1.1 & S_1/S \geq 0.175 \end{cases}$$

$$C_{ma} = A + BF + CF^2$$

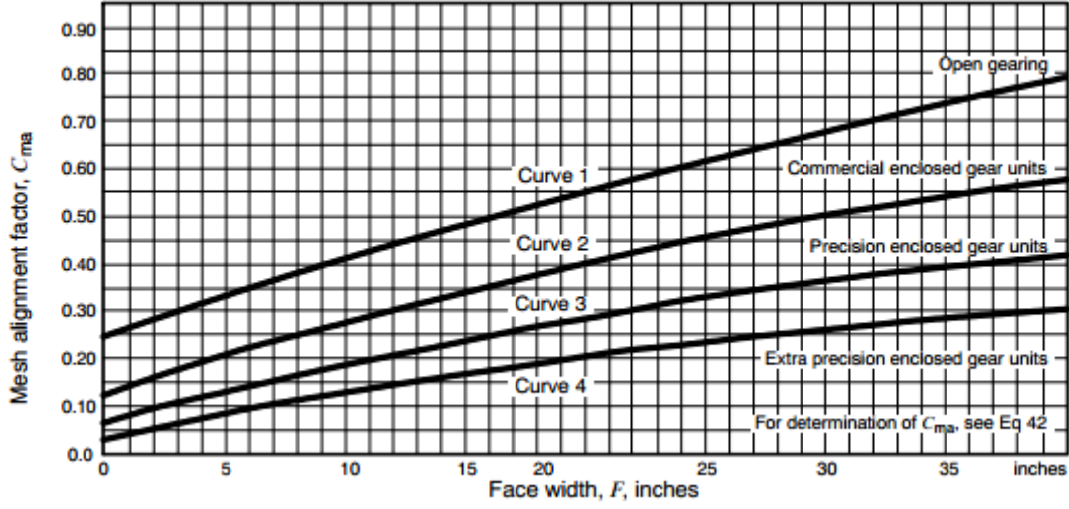


شكل (9-3) المسافة S_1 [17].

جدول (4-3) قيم $A - B - C$ [17].

Condition	A	B	C
Open gearing	0.247	0.0167	$-0.765(10^{-4})$
Commercial, enclosed units	0.127	0.0158	$-0.930(10^{-4})$
Precision, enclosed units	0.0675	0.0128	$-0.926(10^{-4})$
Extraprecision enclosed gear units	0.00360	0.0102	$-0.822(10^{-4})$

و يمكن إيجاد معامل محاذاة التشابك C_{ma} من الشكل (10-3) التالي :



الشكل (10-3) معامل محاذاة التشابك [17].

معامل نسبة الصلابة Z_W, C_H Hardness–Ratio Factor :

يحتوي الترس الصغير على عدد أسنان أقل من الترس الكبير، وبالتالي فإن أسنان الترس الصغير تتعرض لدورات أكثر لإجهاد هصر، للتعويض عن ذلك يتم استخدام معالجات حرارية مختلفة للترس الصغير والكبير لجعل الترس الصغير أكثر صلابة من الترس الكبير.

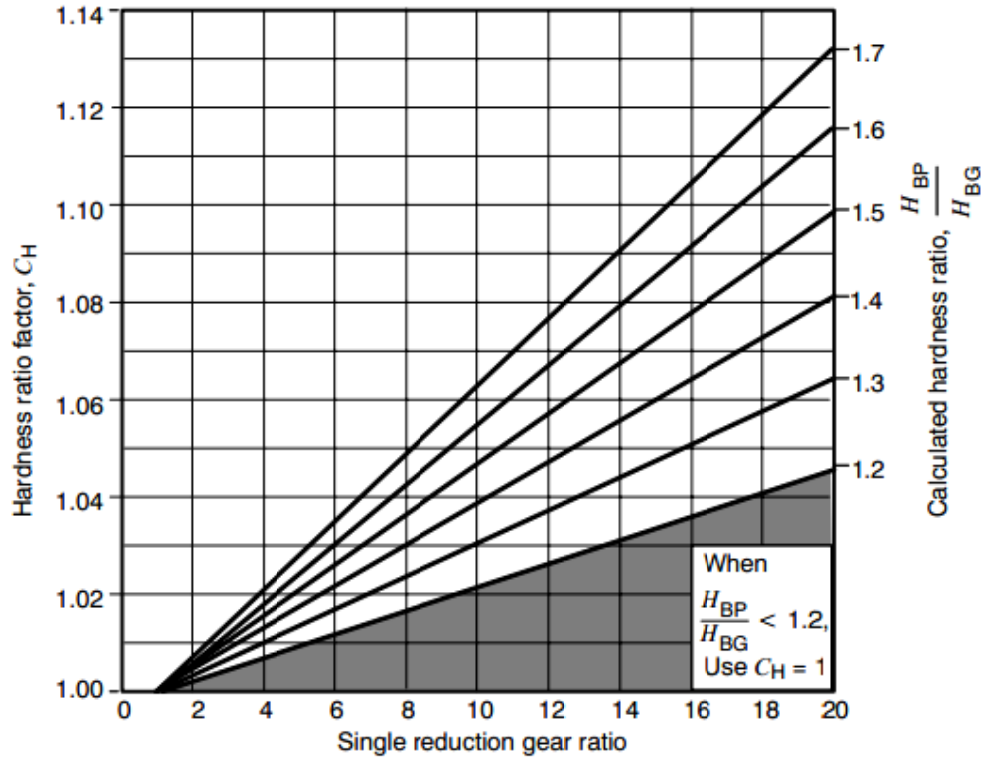
يستخدم عامل نسبة الصلابة لحساب الاختلاف في الصلابة ، ويستخدم فقط في الترس الكبير. بالنسبة لجملة بنيون-ترس المقساء سطحيا يمكن الحصول على C_H من الشكل (11-3) من أجل:

$$1.2 \leq \frac{H_{BP}}{H_{BG}} \leq 1.7$$

ونميز حالتين:

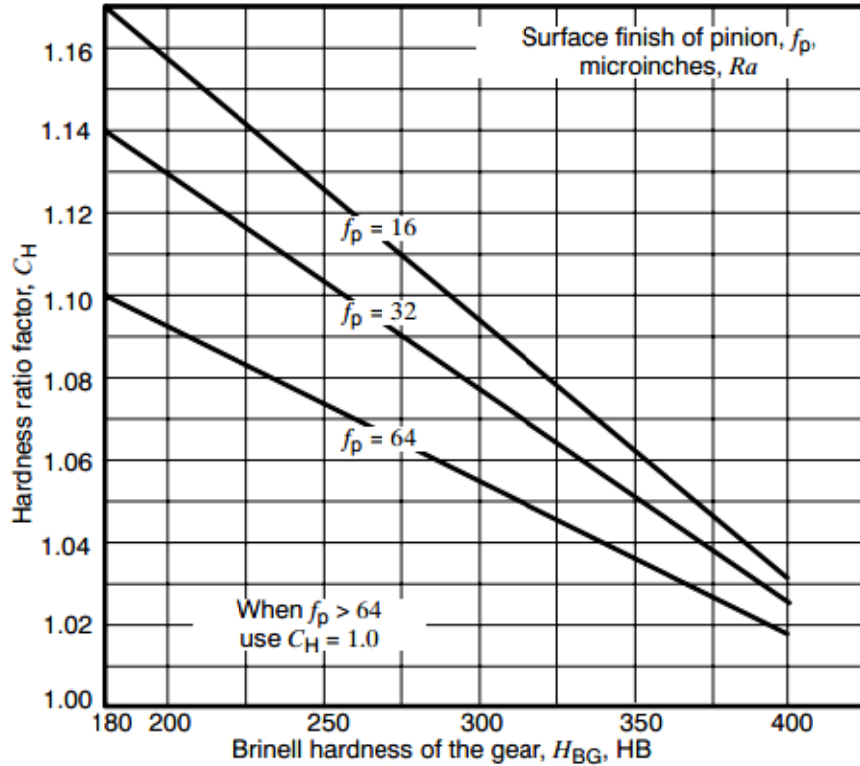
$$\frac{H_{BP}}{H_{BG}} < 1.2, C_H = 1$$

$$\frac{H_{BP}}{H_{BG}} > 1.7, C_H = 1 + 0.00698 (m_G - 1)$$



شكل (3-11) عامل نسبة الصلابة [17].

بالنسبة للبنىون المقتسى سطحياً (قسلوة ركوبل 48 أو أقسى) يعمل مع ترس بتقسية (180 إلى 400 برينيل) فتكون قيمة C_H يمكن ايجادها من الشكل (3-12) .

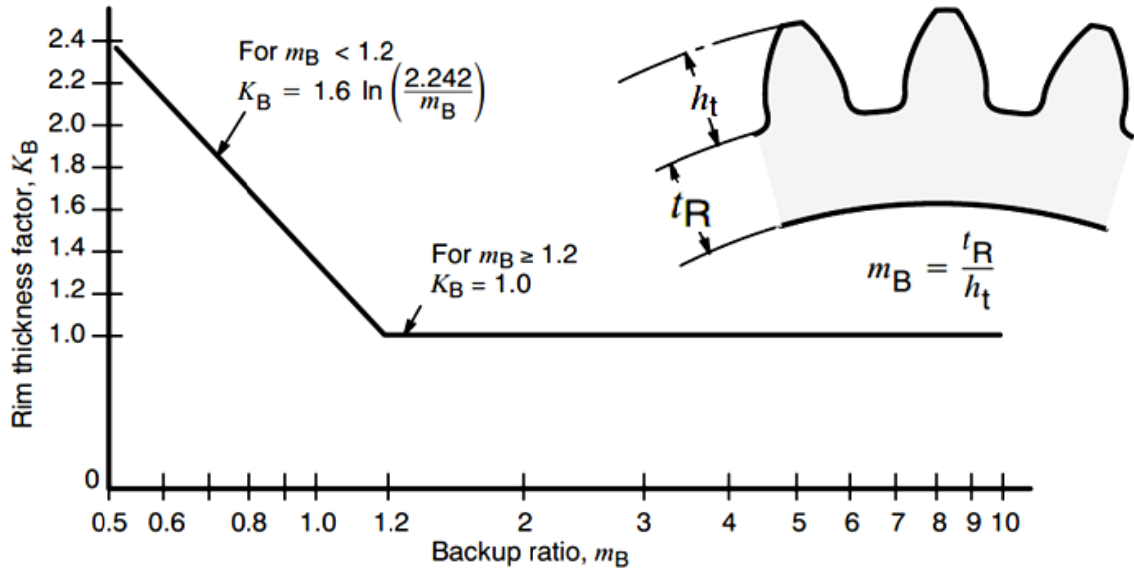


شكل (3-12) عامل نسبة الصلابة للبنىون المقتسى سطحياً [17].

معامل سماكة الإطار K_B Rim-Thickness Factor:

عندما لا تكون سماكة الإطار كافية ، فإنها لن توفر الدعم الكامل للأسنان مما يؤدي إلى زيادة الضغط ، يتم استخدام عامل سماكة الإطار لحساب الزيادة في إجهاد الانحناء في التروس ذات الإطارات الرقيقة .

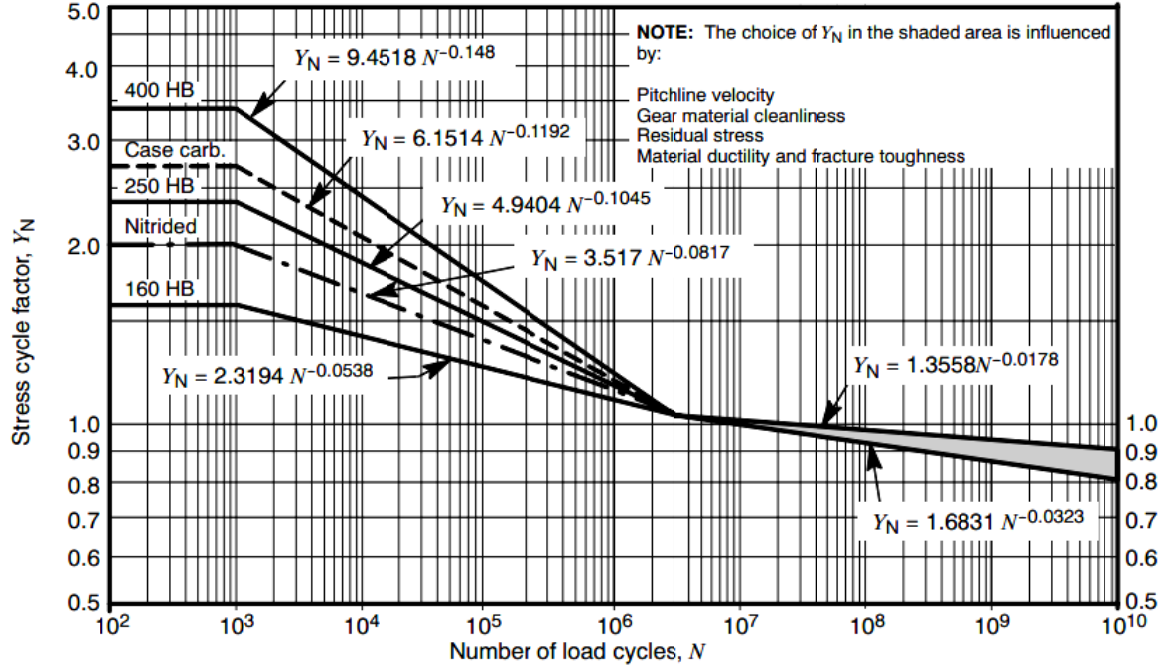
تعتمد قيمة K_B على نسبة سمك الحافة إلى نسبة ارتفاع السن، ويمكن العثور عليها من الشكل (3-13) .



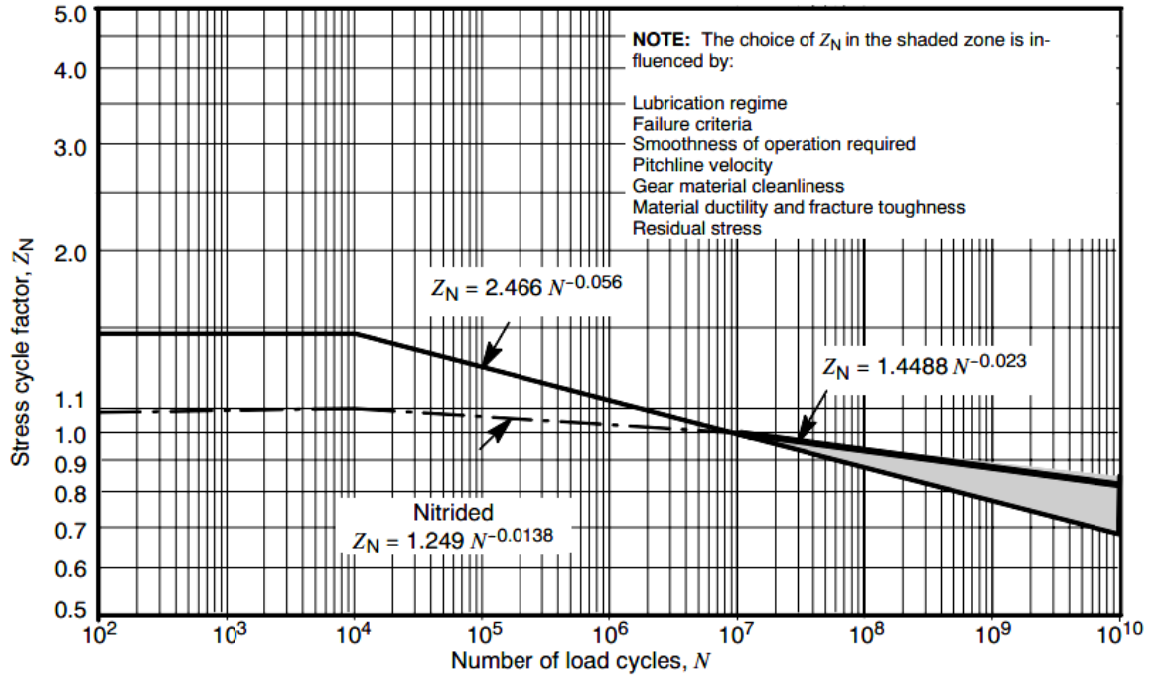
شكل (3-13) معامل سماكة الإطار [17].

عوامل دورة حياة الاجهاد Z_N و Y_N Stress Cycle Life Factors :

يمكن ايجادها من المخطط شكل (3-14) و شكل (3-15).



شكل (3-14) عامل دورة حياة الإجهاد Y_N [17].



شكل (3-15) عامل دورة حياة الإجهاد Z_N [17].

عوامل درجة الحرارة K_T و Y_θ :Temperature Factors

يستخدم هذا العامل لتعديل المتانة من أجل تأثير درجة حرارة التشغيل العالية.

بالنسبة لدرجة حرارة مواد التشحيم حتى 250 فهرنهايت (120 درجة مئوية) $K_T = 1$.

بالنسبة لدرجة حرارة مواد التشحيم أعلى من 250 فهرنهايت (120 درجة مئوية) $K_T > 1$ ، لكن لا توجد بيانات لمثل هذه الظروف يمكن استخدام المبادلات الحرارية للحفاظ على درجة حرارة أقل من 250 فهرنهايت.

عوامل الوثوقية K_R و Y_Z :Reliability Factors

تعتمد متانة St & Sc AGMA على الوثوقية 0.99، وتم العثور على بعض قيم الوثوقية جدول (5-3).

جدول (5-3) قيم الوثوقية [17].

Reliability	$K_R (Y_Z)$
0.9999	1.50
0.999	1.25
0.99	1.00
0.90	0.85
0.50	0.70

بالنسبة لقيم الوثوقية بخلاف تلك الواردة في الجدول، يمكن العثور على القيمة على النحو التالي:

$$K_R = \begin{cases} 0.658 - 0.0759 \ln(1 - R) & \text{for } 0.5 < R < 0.99 \\ 0.5 - 0.109 \ln(1 - R) & \text{for } 0.99 < R < 0.9999 \end{cases}$$

عوامل الأمان S_H و S_f :Safety Factors

تستخدم عوامل الأمان لحساب تأثيرات العناصر التي لا يمكن قياسها والتي تؤثر على الإجهاد عند تقييم جملة نقل حركة بواسطة المسننات.

وتم إيجاد معامل الأمان لإجهاد الانحناء كالتالي:

$$S_F = \frac{S_t Y_N / K_T K_R}{\sigma}$$

$$S_H = \frac{S_C Z_N C_H / K_T K_R}{\sigma_C}$$

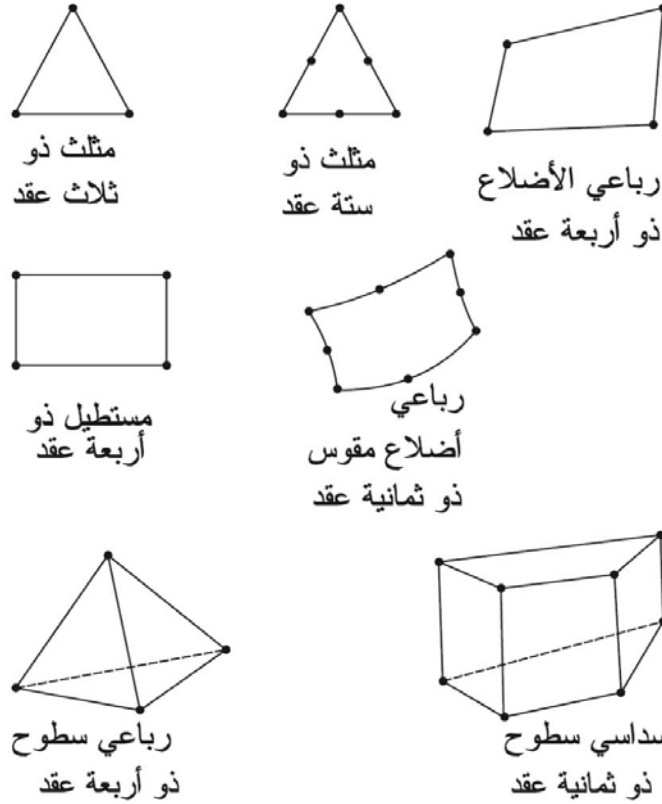
[17].

3.3. طريقة العناصر المنتهية Finite element method:

تعد طريقة العناصر المنتهية أسلوباً عددياً لحل جملة المعادلات التفاضلية العادية أو الجزئية، وتعتمد على فكرة تقسيم الوسط المدروس إلى عدد من الأجزاء أو العناصر. elements. ويمكن استنتاج سلوك الوسط المستمر الذي تحكمه جملة المعادلات التفاضلية الجزئية أو الكلية المدروسة من التجميع المباشر للحلول العددية للأجزاء أو (العناصر) المشكلة له [18].

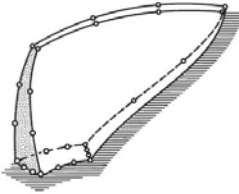
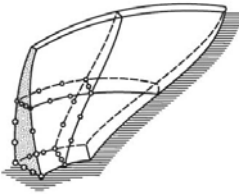
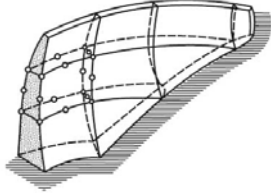
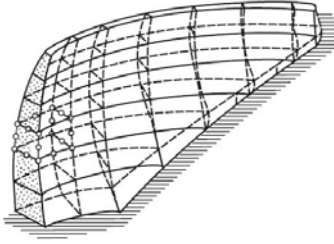
1.3.3. مبدأ العناصر المنتهية والخطوات الرئيسية:

تعتمد فكرة العناصر المنتهية (المحدودة) على تقسيم الوسط المستمر المدروس إلى أجزاء منتهية الأبعاد ليتمكن وصف سلوك هذه العناصر الصغيرة كل على حدة ومن ثم استنتاج سلوك الوسط المستمر، وذلك عن طريق التجميع المباشر لأجزائه. ويمكن أن تطبق الطريقة على أي وسط مستمر continuum، مثلاً: منشأ هيكلي، أو مستوي، أو حجمي، أو على وسط سائل، وأي مسألة فيزيائية قابلة للوصف عن طريق معادلات تفاضلية، وقد تم تطوير عناصر منتهية خاصة بالمسائل الخطية والمستوية والفراغية وفق ما هو مبين في الشكل [18].



شكل (3-16) بعض أشكال العناصر المنتهية المستوية والفراغية

2.3.3. أهم التطبيقات الحالية لطريقة العناصر المنتهية:



1. منشآت الهندسة المدنية: تستخدم طريقة العناصر المنتهية لتحليل الساكن والديناميكي (التحليل الديناميكي يأخذ في الحسبان التغير الزمني للحمولة ضمن فترة التحليل) للجسور والمنشآت الهيكلية ثلاثية الأبعاد والسدود والخزانات وغيرها، ويبين الشكل (3-17) مراحل تحليل سد مائي قوسي باستخدام عدد متزايد من العناصر المنتهية.

2. الصناعات الجوية: يتم تحليل هياكل منشآت الصناعات الجوية كالمطائرات والصواريخ والمكوك الفضائي وغيرها بهدف تحديد الإجهادات والتشوهات التي تتعرض لها في أثناء ظروف عملها المختلفة، ومن ثم تطوير تصميم المنشآت لتستطيع تحمل الإجهادات والتشوهات المحسوبة من خلال طريقة العناصر المنتهية.

3. هندسة الجيوتكنيك: تستخدم طريقة العناصر المنتهية في تحليل الأنفاق والمنشآت تحت الأرضية underground structures، وكذلك

في تحليل تفاعل المنشأ مع التربة المحيطة به في أثناء فترة التحميل وتحليل أساسات الآلات الثقيلة والمعقدة وغيرها.

4. ميكانيك السوائل والمنشآت المائية: يمكن باستخدام طريقة العناصر المنتهية تحليل جريان السوائل والمنشآت المعرضة إلى ضغوط مائية كبيرة كالغواصات وغيرها.

5. الهندسة النووية: يتم باستخدام طريقة العناصر المنتهية تحليل أبراج التبريد وبقية العناصر الإنشائية المستخدمة في محطات الطاقة النووية.

6. الهندسة الميكانيكية: تستخدم طريقة العناصر المنتهية لتحليل هياكل السيارات والآلات الرافعة وآلات الحفر وغيرها.

7. الهندسة الطبية: يمكن بوساطة طريقة العناصر المنتهية إجراء التحليل الإجهادي للأطراف والمفاصل الصناعية وغيرها تحت مختلف حالات العمل، ومن ثم تحديد الحالات الإجهادية التي تتعرض لها تلك الأعضاء بهدف تصميمها تصميماً آمناً يسمح بتحمل الحالة الإجهادية الاستثمارية المتوقعة لهذه الأطراف والمفاصل الصناعية [18].

4.3. التجارب والدراسات العملية:

1.4.3. خطة الدراسة العملية وتنفيذ التجارب:

في هذه الدراسة تم اختيار جانبية السن العدل ذات المنحني الانفليوتي بحالة تناظر الجوانب بزوايا ضغط 20° كونها الأكثر شيوعاً وبحالة عدم تناظر الجوانب بزوايا ضغط 20° و 30° لإجراء تعديلات على هذه الجانبية ودراسة أداء المسنن قبل وبعد التعديلات المقترحة لهذه الجانبية من خلال نمذجة تشييق مسننين عن طريق برنامج Solidworks 2013 وإجراء النمذجة والتحليل لهما باستخدام برنامج ANSYS 18.1 بطريقة العناصر منتهية لإيجاد إجهاد الانحناء وإجهاد الهصر وسعة اهتزاز استجابة التردد يتم بعد ذلك تحليل تلك النتائج .

2.4.3. بارامترات هندسة السن المختارة للنماذج المدروسة:

تم دراسة ثلاثة عشر نموذجاً منها نموذج قياسي متناظر الجوانب ونموذج قياسي غير متناظر الجوانب لمقارنة النتائج مع بقية النماذج المعدلة، وقد تم اعتماد لذلك مسنن بالبارامترات التالية بالجدول (3-6) لكل من جانب زاوية الضغط 20° وجانب زاوية الضغط 30° :

جدول (3-6) بارامترات المسنن المستخدم للدراسة

α	20°	30°
m	4	4
dw	80 mm	80 mm
z	20	20
$Db = \cos\alpha * dw$	75.18 mm	69.28 mm
$Da = dw + 2 * m$	88 mm	88 mm
$Df = dw - 2.5 * m$	70 mm	70 mm
b	mm12	mm12
$B = 0.06 * m$	0.24	0.24
$S = p/2 - B/2$	6.163185	6.163185

- نوع معدن المسنن: ستانلس ستيل، الموضح مواصفاته ضمن البرنامج بالشكل (3-18).
- عزم الدوران للمسنن: 1000 N.m.
- نعومة الشبكة: 0.2 mm عند مناطق أسطح التماس ونعومة Fine لباقي السن.

Properties of Outline Row 3: Stainless Steel					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7750	kg m ⁻³		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's Mo...			
8	Young's Modulus	1.93E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0.31			
10	Bulk Modulus	1.693E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7.3664E+10	Pa		
12	Tensile Yield Strength	2.07E+08	Pa		
13	Compressive Yield Strength	2.07E+08	Pa		
14	Tensile Ultimate Strength	5.86E+08	Pa		
15	Compressive Ultimate Strength	0	Pa		

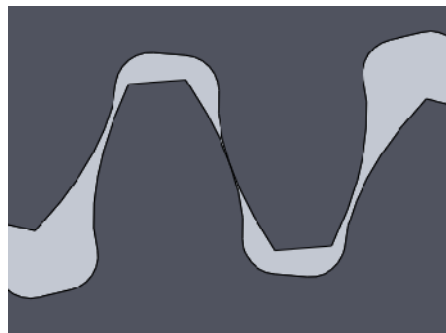
الشكل (18-3) خصائص معدن الستانلس ستيل المستخدم بالتجارب

3.4.3. التجارب ونتائجها:

باستخدام برنامج Solidworks 2013 تم نمذجة الحالات التالية :

1.3.4.3. النموذج الأول :

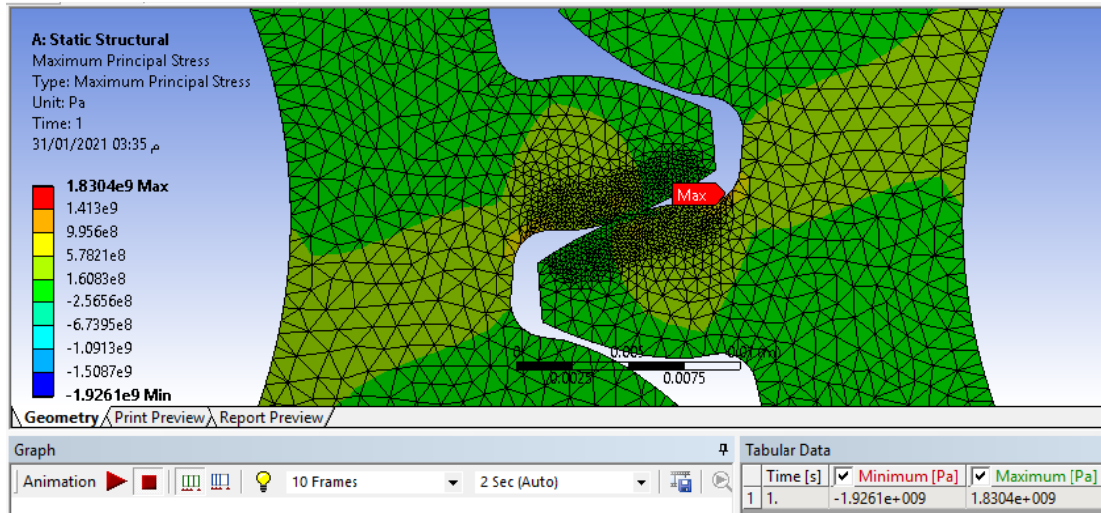
سن انفلويوتي عدل قياسي متناظر الجوانب بزاوية ضغط 20° ونصف قطر جذر قياسي دائري
 $R=0.4*m=1.6[mm]$ كما هو موضح بالشكل (19-3).



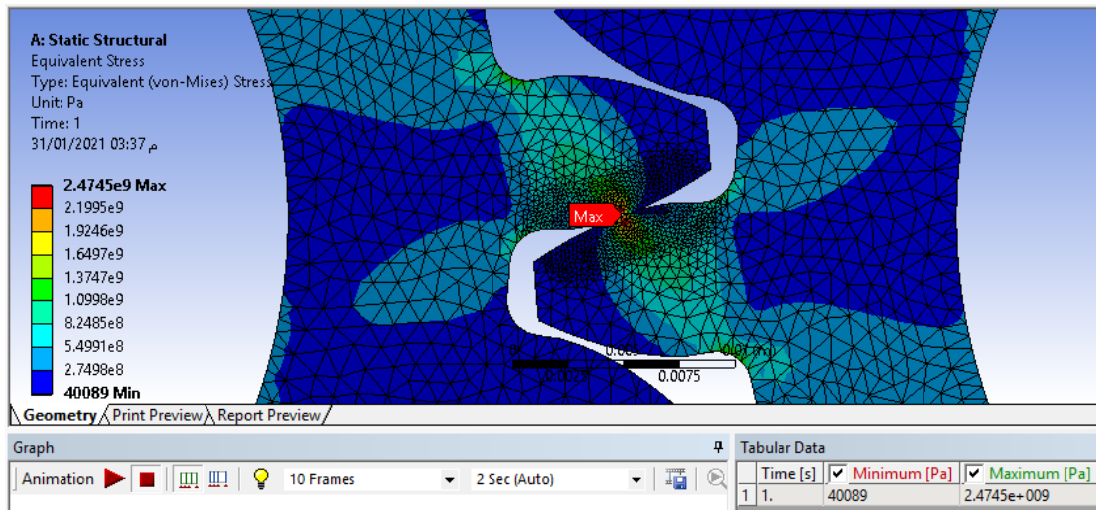
الشكل (19-3) النموذج الأول

التجربة 1:

باستخدام المخدم Static Structural واعتماد النموذج الأول وإجراء التحليل لشبكة العناصر المنتهية تم الحصول على أكبر إجهاد انحناء مؤثر موضح بالشكل (3-20)، وأكبر إجهاد هصر شكل (3-21).



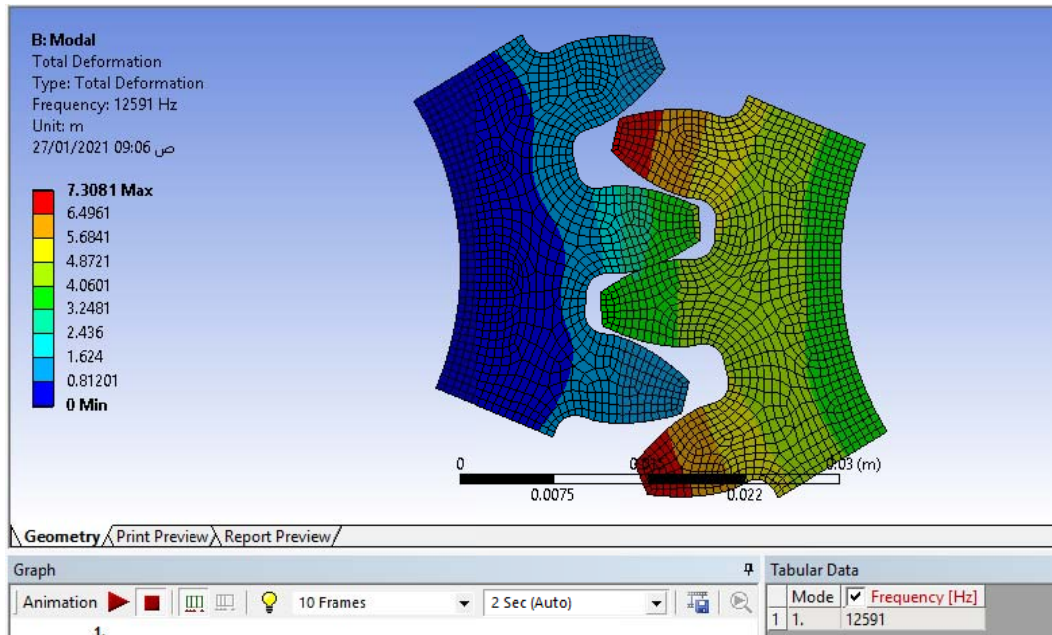
الشكل (3-20) إجهاد الانحناء المؤثر بالنموذج الأول



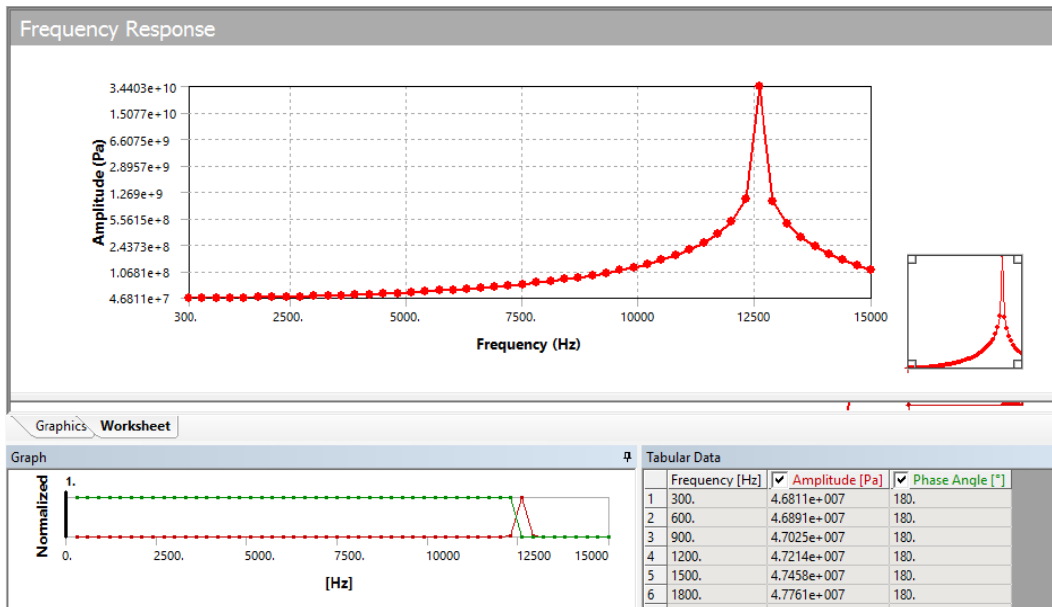
الشكل (3-21) إجهاد الهصر المؤثر بالنموذج الأول

التجربة 2:

باستخدام الخادمين modal و Harmonic Response واعتماد النموذج الأول وإجراء التحليل بالعناصر المنتهية تم الحصول على التردد الطبيعي الموضح بالشكل (3-22) واستجابة التردد شكل (3-23).



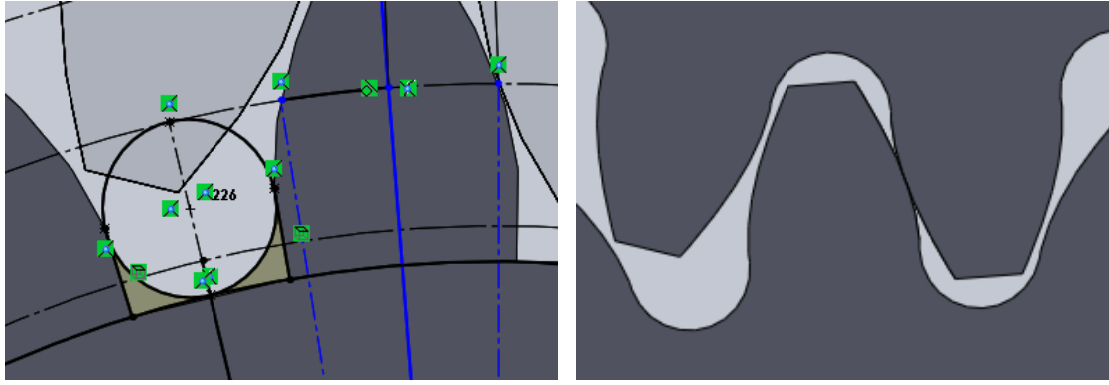
الشكل (3-22) الترددات الطبيعية للنموذج الأول



الشكل (3-23) استجابة التردد للنموذج الأول

2.3.4.3. النموذج الثاني:

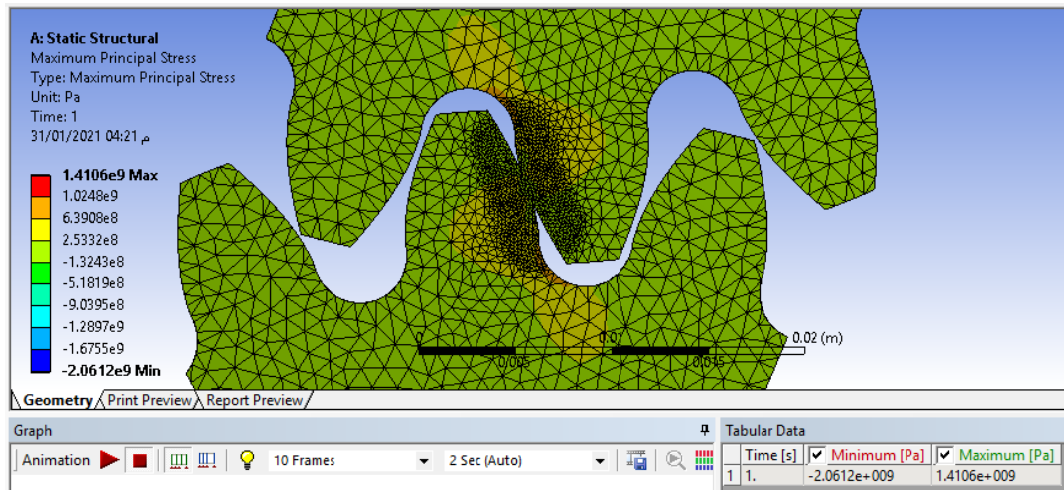
سن انفلوتي عدل متناظر الجوانب بزاوية ضغط 20° وجذر معدل ليصبح منحنى قطع ناقص يمس جانبية سنين متجاورين عند بداية المنحنى الانفلوتي علماً أن هذا الشكل هو التصميم الأمثل للجذر في الدراسة المرجعية الرابعة، كما هو موضح بالشكل (3-24).



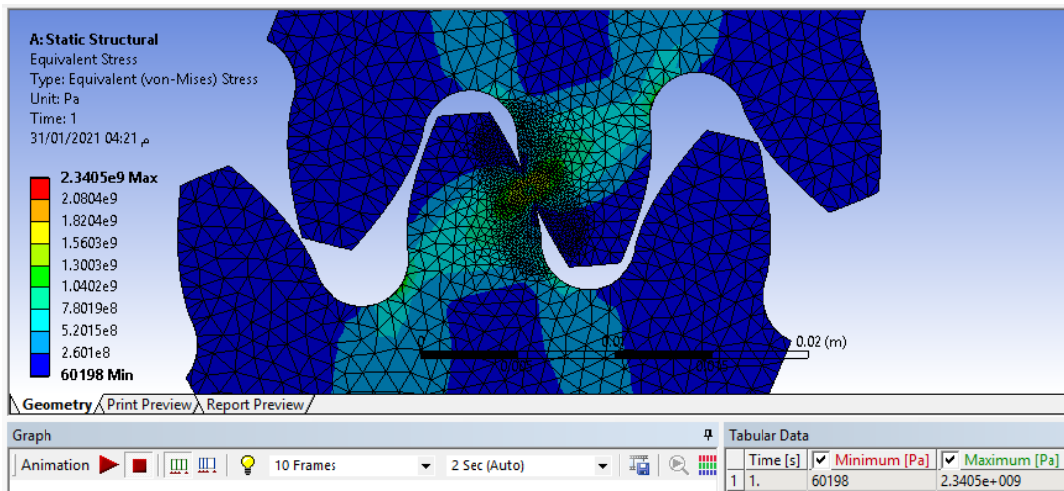
الشكل (24-3) النموذج الثاني

التجربة 3:

باستخدام المخدم Static Structural واعتماد النموذج الثاني وإجراء التحليل لشبكة العناصر المنتهية تم الحصول على أكبر إجهاد انحناء مؤثر موضح بالشكل (25-3)، وأكبر إجهاد هصر شكل (26-3).



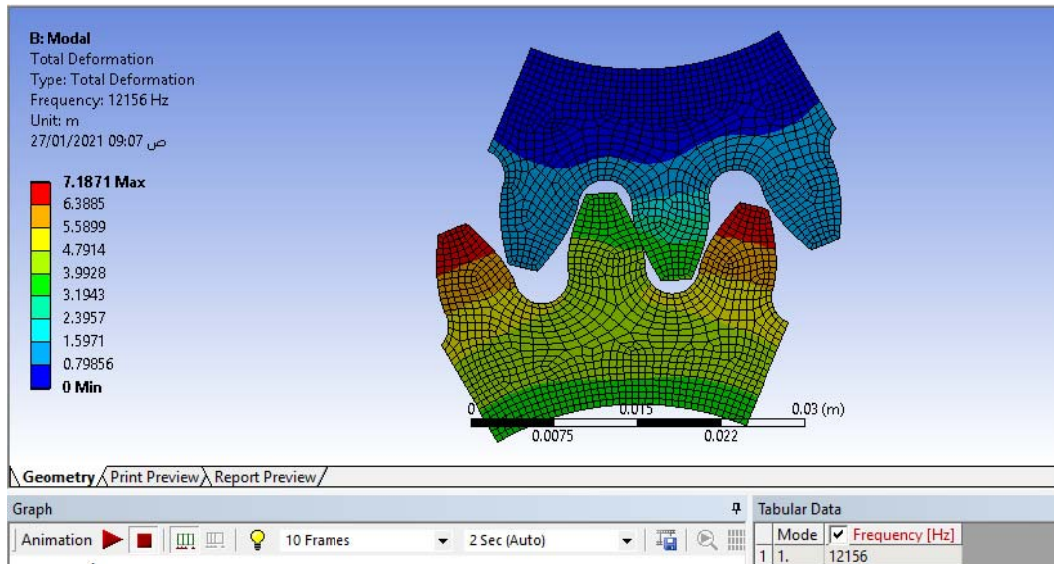
الشكل (25-3) إجهاد الانحناء المؤثر بالنموذج الثاني



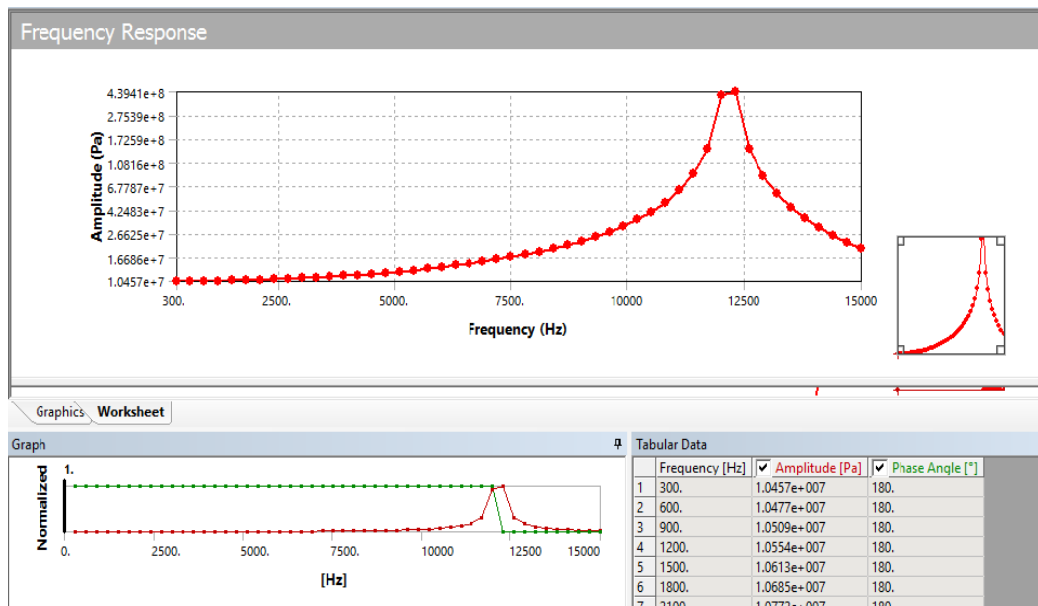
الشكل (26-3) إجهاد الهصر المؤثر بالنموذج الثاني

التجربة 4 :

باستخدام المخدمين modal و Harmonic Response واعتماد النموذج الثاني وإجراء التحليل بالعناصر المنتهية تم الحصول على التردد الطبيعي الموضح بالشكل (3-27) واستجابة التردد شكل (3-28) .



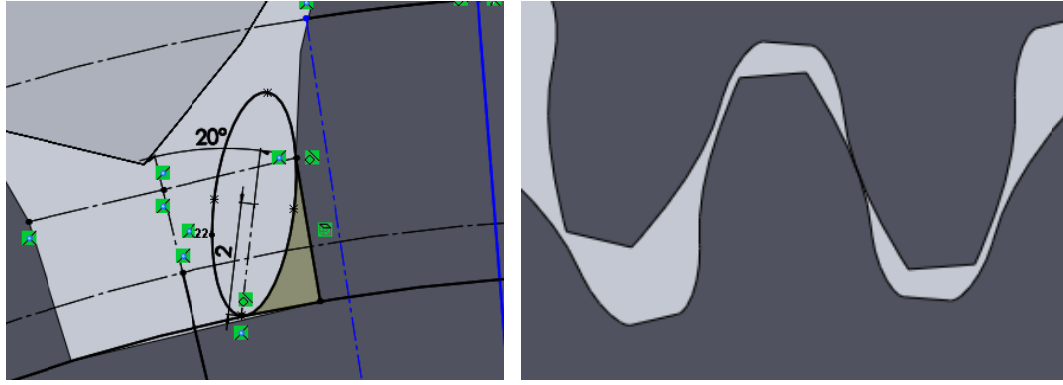
الشكل (3-27) الترددات الطبيعية للنموذج الثاني



الشكل (3-28) استجابة التردد للنموذج الثاني

3.3.4.3. النموذج الثالث:

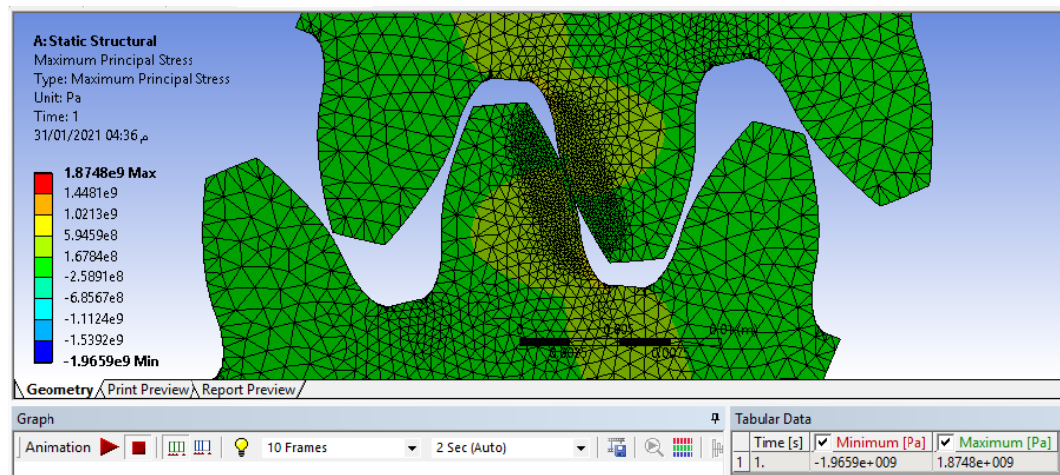
سن انقليوتي عدل متناظر الجوانب بزواوية ضغط 20° وجذر معدل ليصبح منحنى قطع ناقص محوره الكبير 4mm مائل بزواوية 20° مماس للمنحنى الانقليوتي عند بدايته ومماس لدائرة الجذر، كما هو موضح بالشكل (3-29).



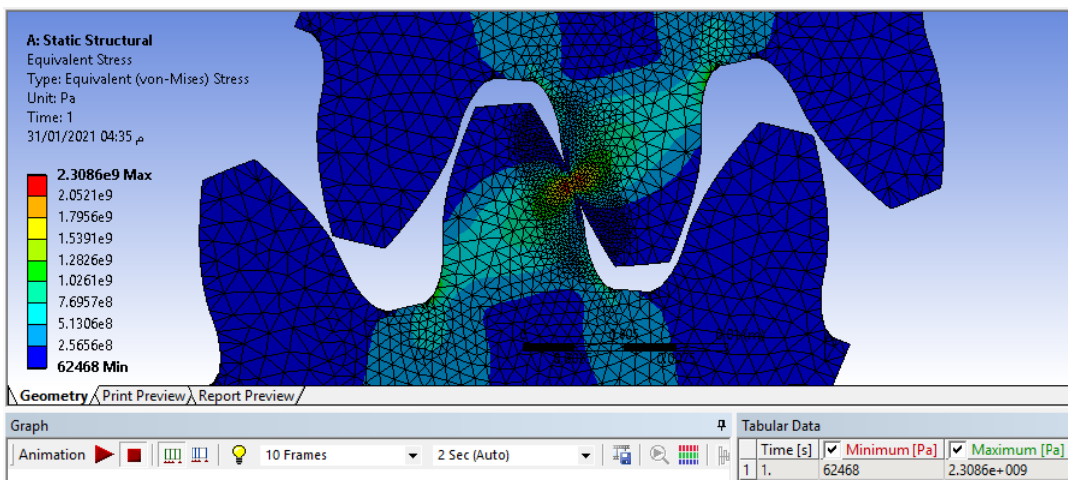
الشكل (3-29) النموذج الثالث

التجربة 5:

باستخدام المخدم Static Structural واعتماد النموذج الثالث وإجراء التحليل لشبكة العناصر المنتهية تم الحصول على أكبر إجهاد انحناء مؤثر موضح بالشكل (3-30)، وأكبر إجهاد هصر شكل (3-31).



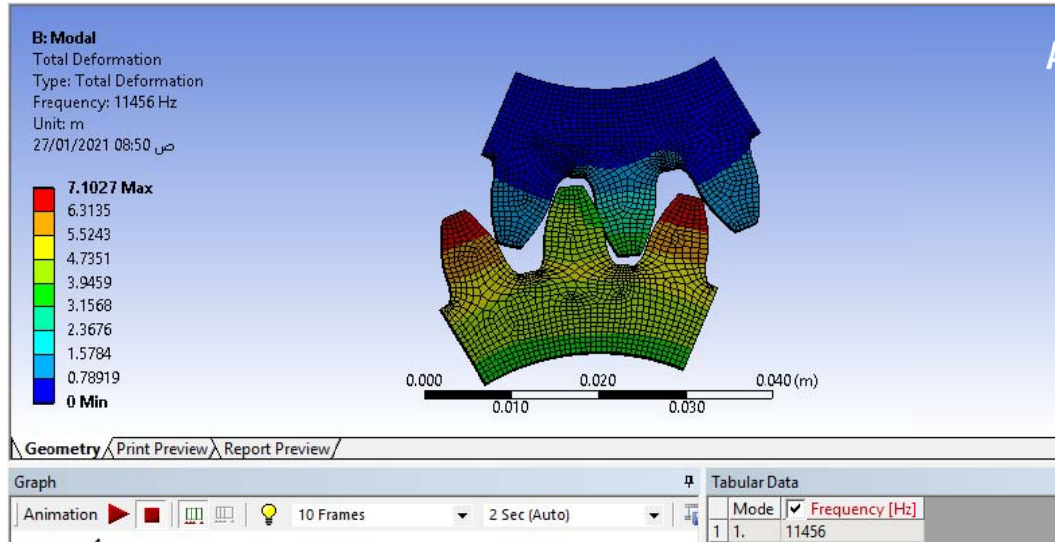
الشكل (3-30) إجهاد الانحناء المؤثر بالنموذج الثالث



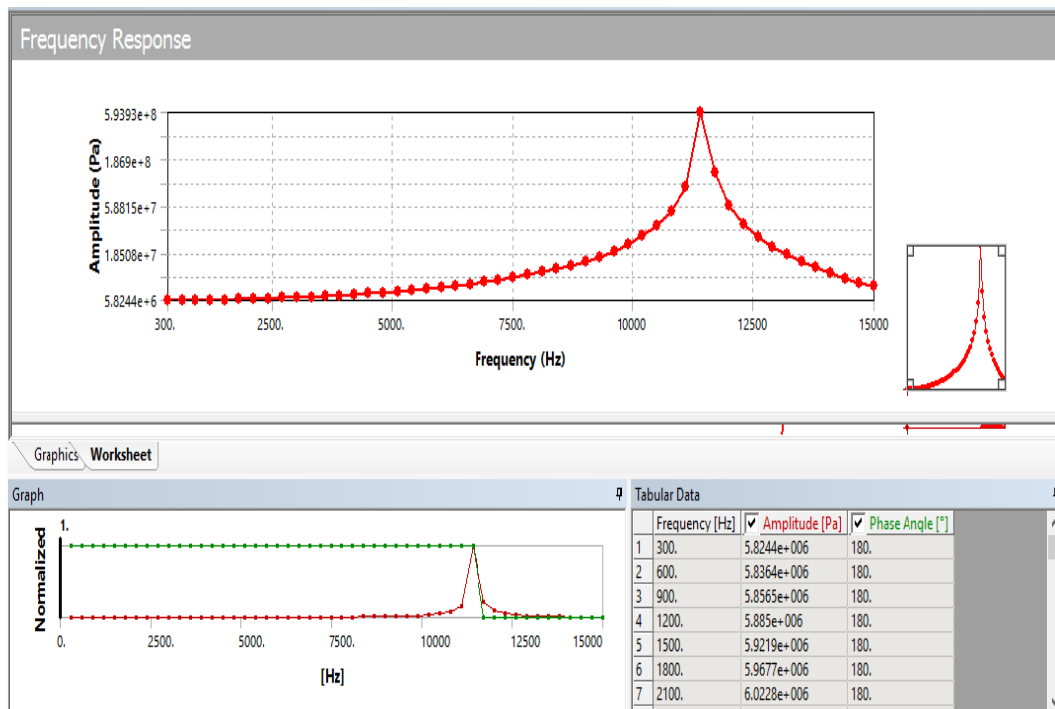
الشكل (3-31) إجهاد الهصر المؤثر بالنموذج الثالث

التجربة 6 :

باستخدام المخدمين modal و Harmonic Response واعتماد النموذج الثالث وإجراء التحليل بالعناصر المنتهية تم الحصول على التردد الطبيعي الموضح بالشكل (32-3) واستجابة التردد شكل (33-3).



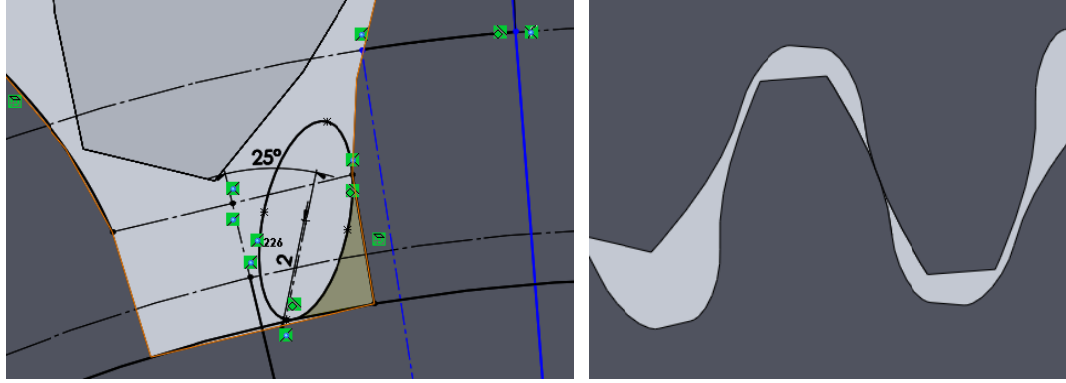
الشكل (32-3) الترددات الطبيعية للنموذج الثالث



الشكل (33-3) استجابة التردد للنموذج الثالث

4.3.4.3. النموذج الرابع:

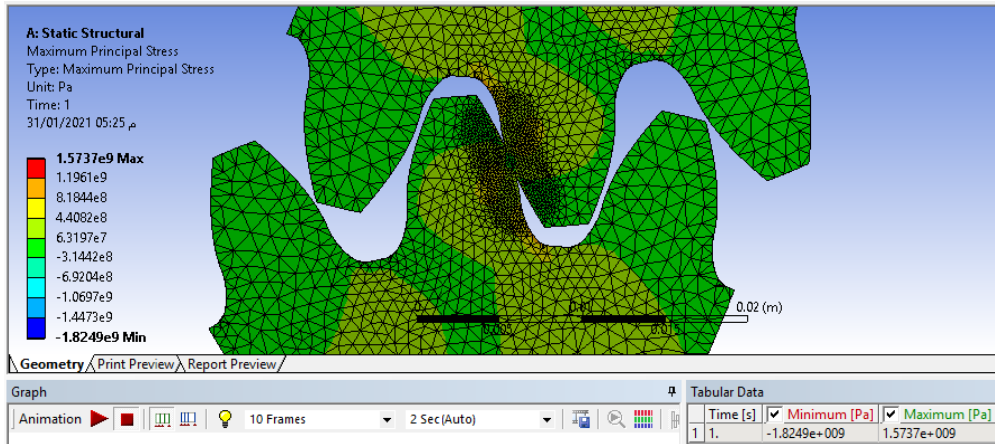
سن انقليوتي عدل متناظر الجوانب بزاوية ضغط 20° وجذر معدل ليصبح منحنى قطع ناقص محوره الكبير 4mm مائل بزاوية 25° مماس للمنحنى الانقليوتي عند بدايته ومماس لدائرة الجذر، كما هو موضح بالشكل (34-3).



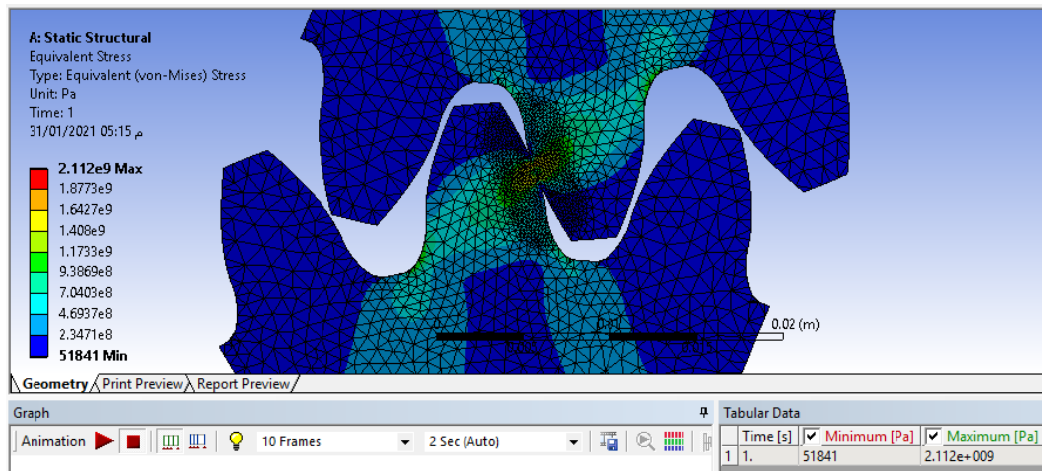
الشكل (34-3) النموذج الرابع

التجربة 7:

باستخدام المخدم Static Structural واعتماد النموذج الرابع وإجراء التحليل لشبكة العناصر المنتهية تم الحصول على أكبر إجهاد انحناء مؤثر موضح بالشكل (35-3)، وأكبر إجهاد هصر شكل (36-3).



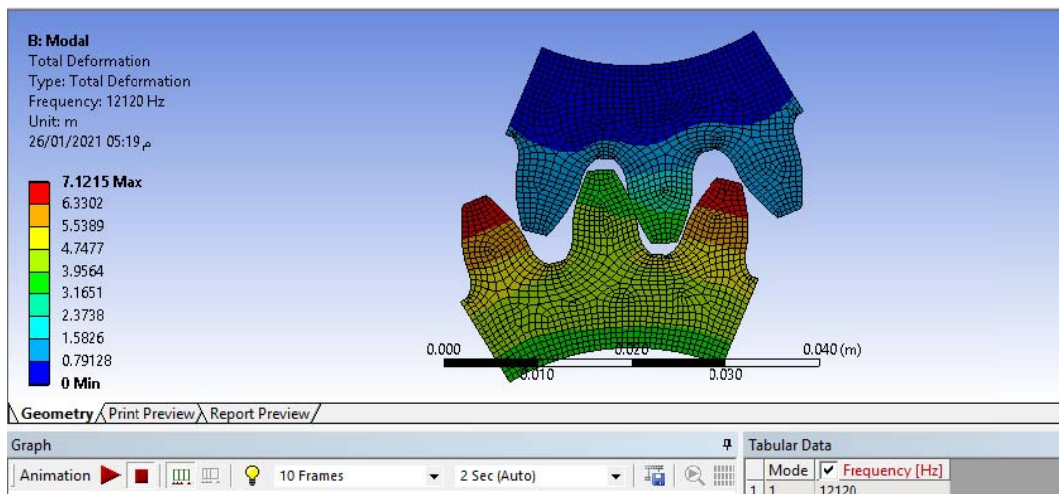
الشكل (35-3) إجهاد الانحناء المؤثر بالنموذج الرابع



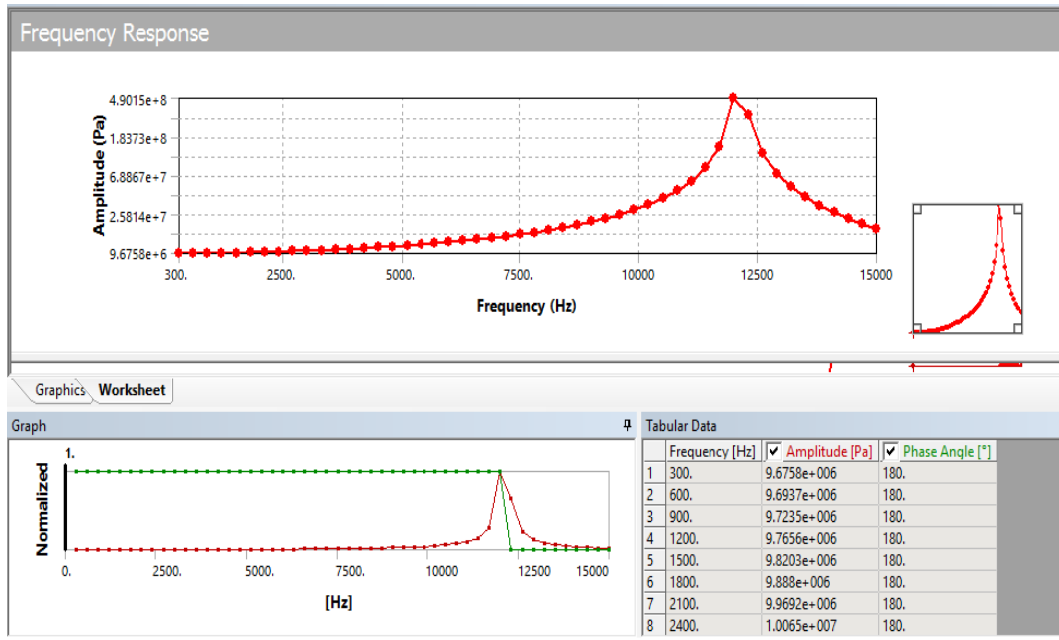
الشكل (36-3) إجهاد الهصر المؤثر بالنموذج الرابع

التجربة 8 :

باستخدام المخدمين modal و Harmonic Response واعتماد النموذج الرابع وإجراء التحليل بالعناصر المنتهية تم الحصول على التردد الطبيعي الموضح بالشكل (37-3) واستجابة التردد شكل (38-3) .



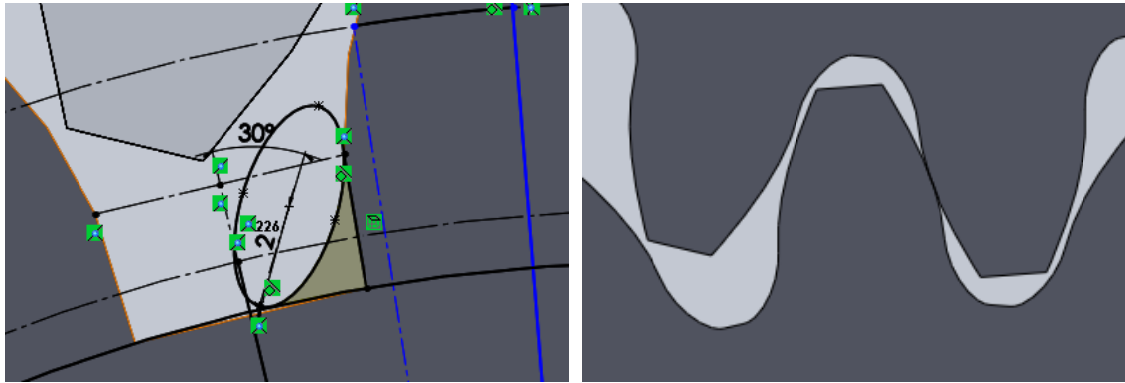
الشكل (37-3) الترددات الطبيعية للنموذج الرابع



الشكل (38-3) استجابة التردد للنموذج الرابع

5.3.4.3. النموذج الخامس:

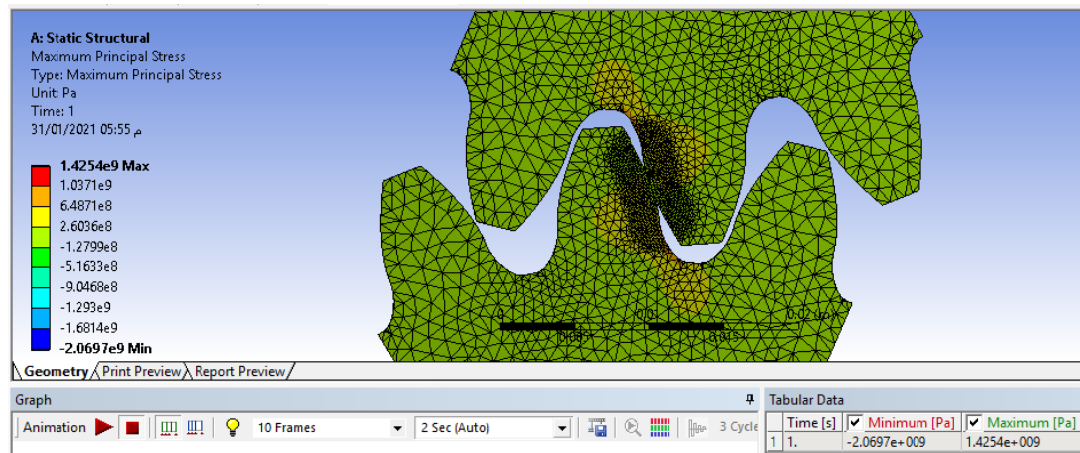
سن انقليوتي عدل متناظر الجوانب بزاوية ضغط 20° وجذر معدل ليصبح منحنى قطع ناقص محوره الكبير 4mm مائل بزاوية 30° مماس للمنحنى الانقليوتي عند بدايته ومماس لدائرة الجذر، كما هو موضح بالشكل (38-3).



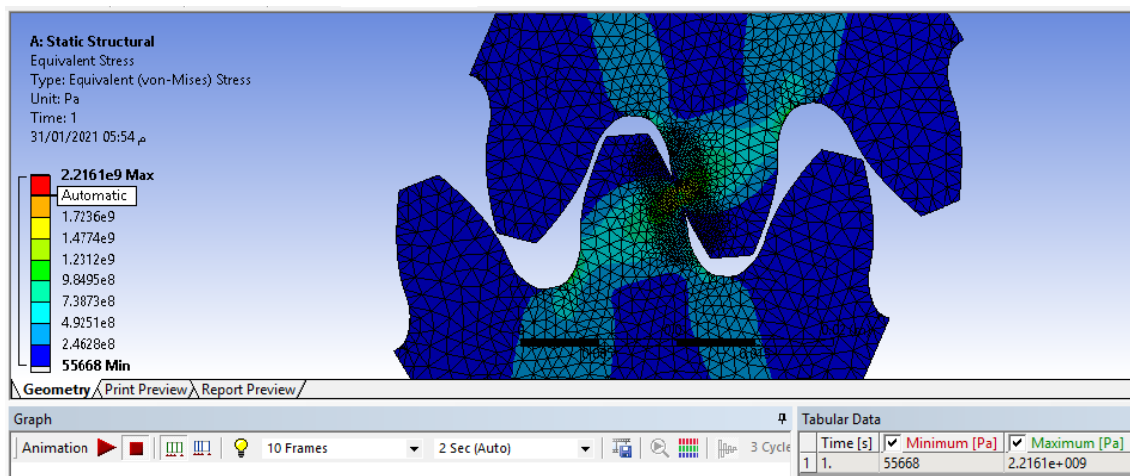
الشكل (39-3) النموذج الخامس

التجربة 9:

باستخدام المخدم Static Structural واعتماد النموذج الخامس وإجراء التحليل لشبكة العناصر المنتهية تم الحصول على أكبر إجهاد انحناء مؤثر موضح بالشكل (40-3)، وأكبر إجهاد هصر شكل (41-3).



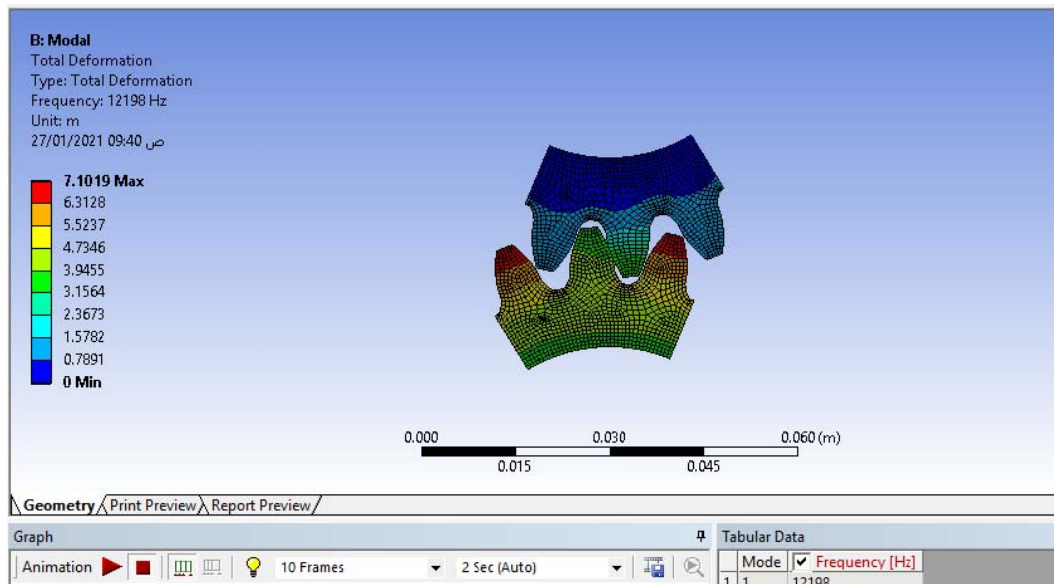
الشكل (3-40) إجهاد الانحناء المؤثر بالنموذج الخامس



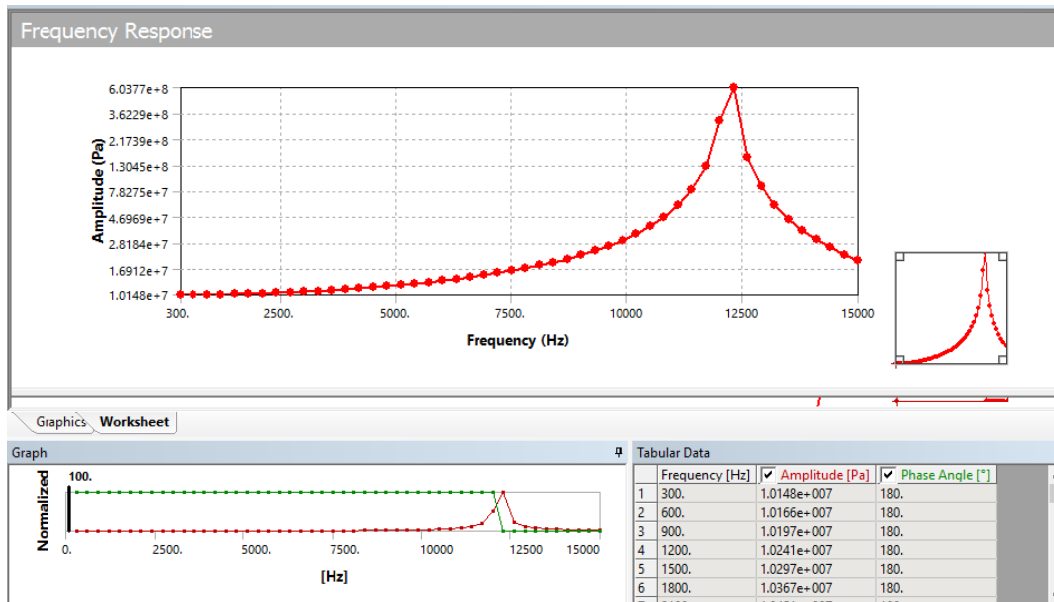
الشكل (3-41) إجهاد الهصر المؤثر بالنموذج الخامس

التجربة 10 :

باستخدام المخدمين modal و Harmonic Response واعتماد النموذج الخامس وإجراء التحليل بالعناصر المنتهية تم الحصول على التردد الطبيعي الموضح بالشكل (3-41) واستجابة التردد شكل (3-42).



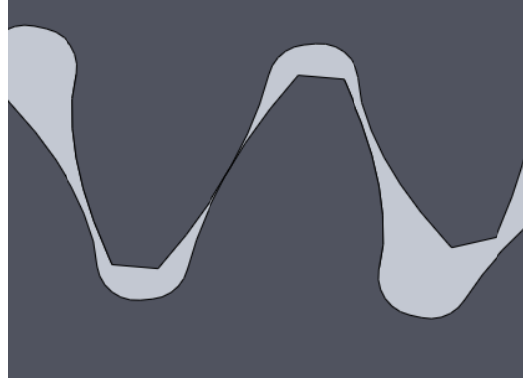
الشكل (42-3) الترددات الطبيعية للنموذج الخامس



الشكل (43-3) استجابة التردد للنموذج الخامس

6.3.4.3. النموذج السادس:

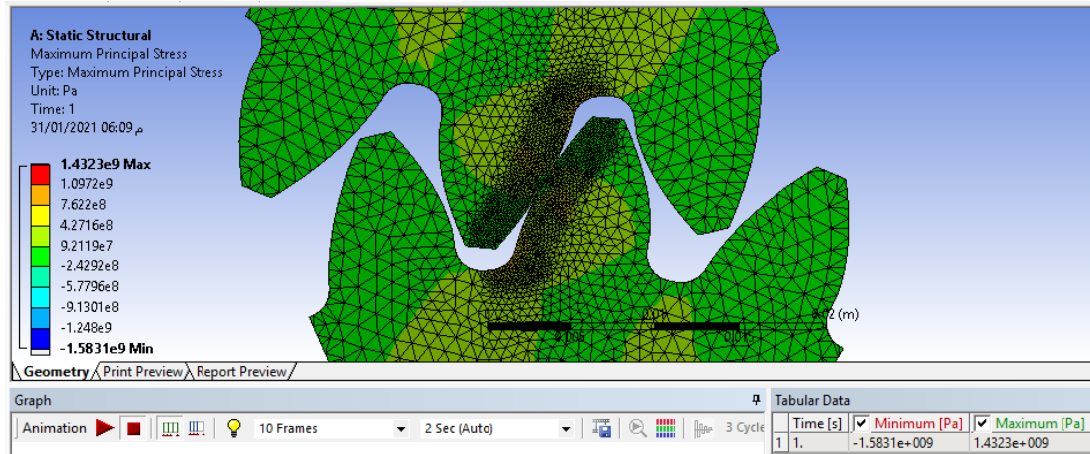
سن انفليوتي عدل قياسي غير متناظر الجوانب بزاويتي ضغط 20° و 30° ونصف قطر جذر قياسي دائري $R=0.4 \cdot m=1.6$ [mm] كما هو موضح بالشكل (44-3)، حيث تم اعتماد الجانب العامل ذو الزاوية ضغط الأكبر 30° كما هو حل أفضل في الدراسة المرجعية الأولى.



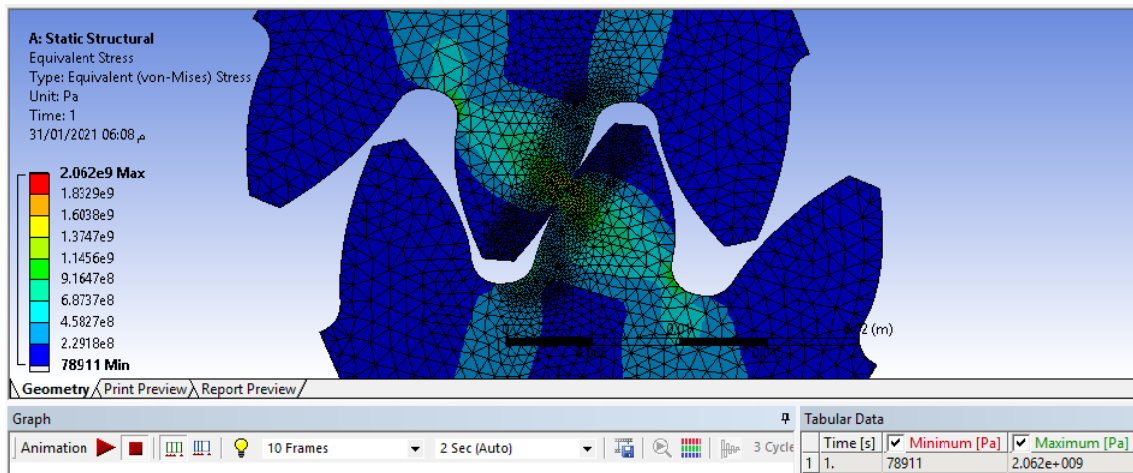
الشكل (3-44) النموذج السادس

التجربة 11 :

باستخدام المخدم Static Structural واعتماد النموذج السادس وإجراء التحليل لشبكة العناصر المنتهية تم الحصول على أكبر إجهاد انحناء مؤثر موضح بالشكل (3-45)، وأكبر إجهاد هصر شكل(3-46).



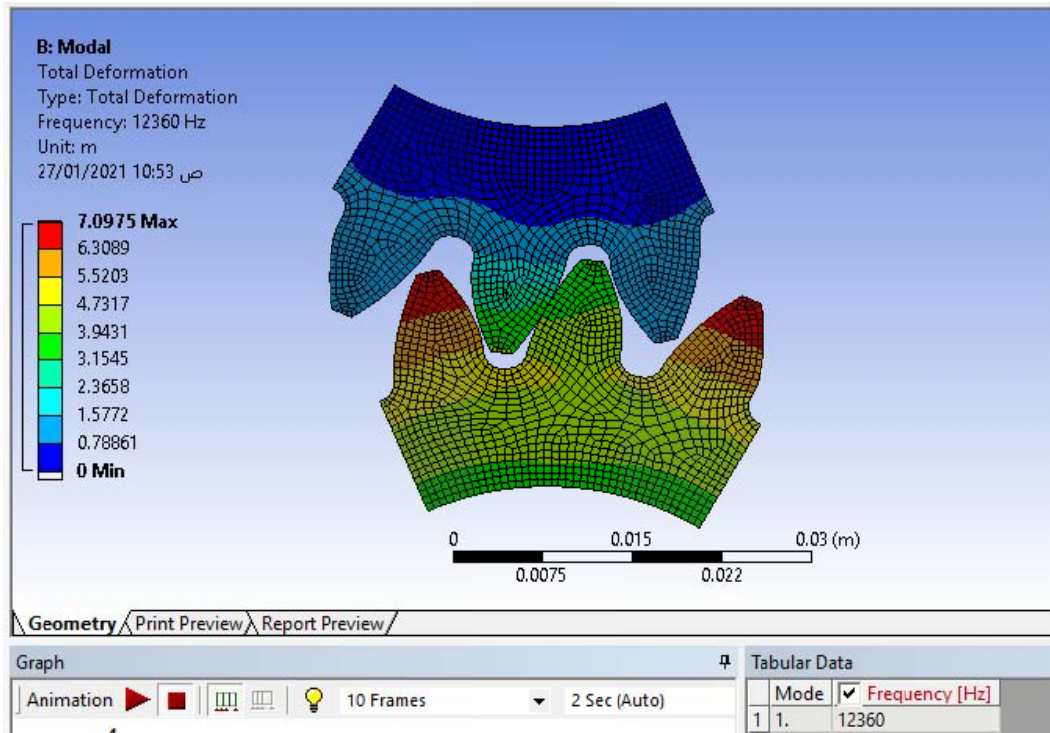
الشكل (3-45) إجهاد الانحناء المؤثر بالنموذج السادس



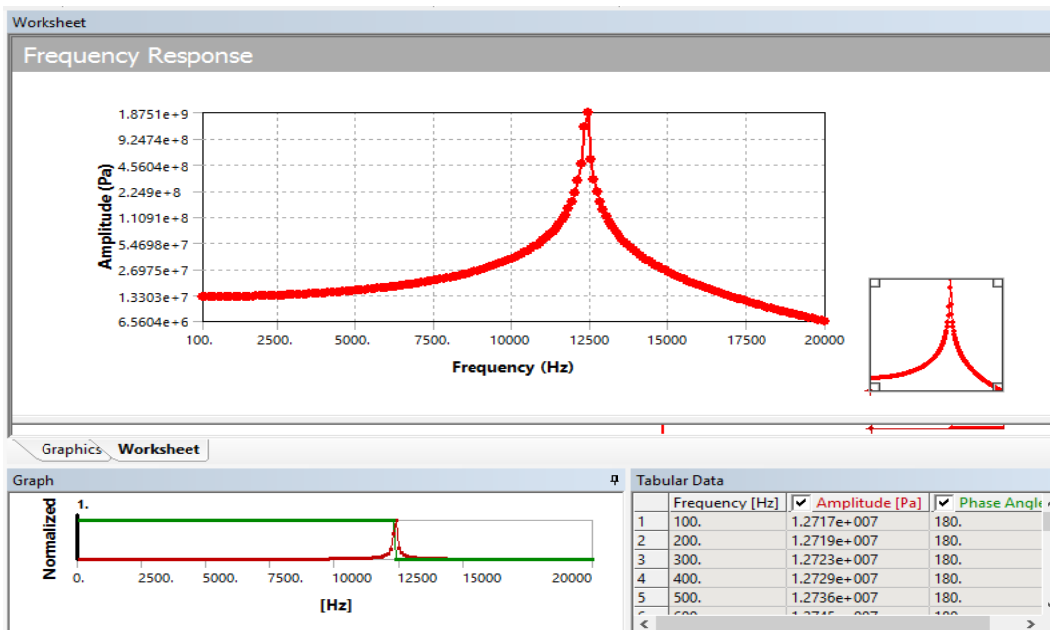
الشكل (3-46) إجهاد الهصر المؤثر بالنموذج السادس

التجربة 12 :

باستخدام المخدمين modal و Harmonic Response واعتماد النموذج السادس وإجراء التحليل بالعناصر المنتهية تم الحصول على التردد الطبيعي الموضح بالشكل (3-47) واستجابة التردد شكل (3-48).



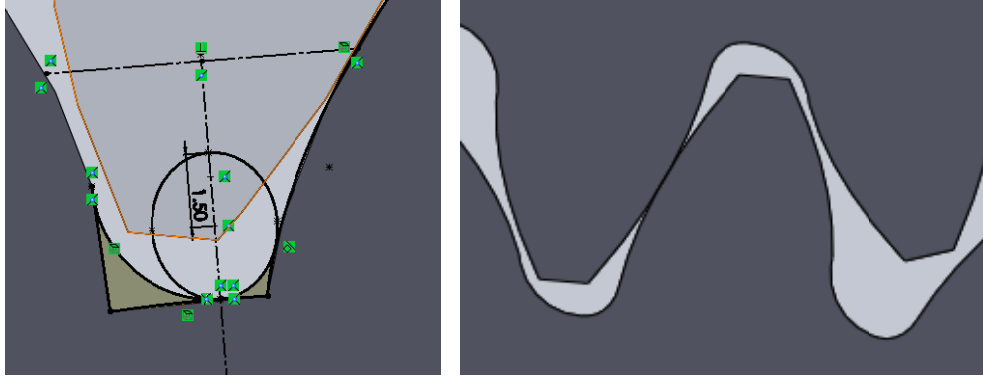
الشكل (3-47) الترددات الطبيعية للنموذج السادس



الشكل (3-48) استجابة التردد للنموذج السادس

7.3.4.3. النموذج السابع:

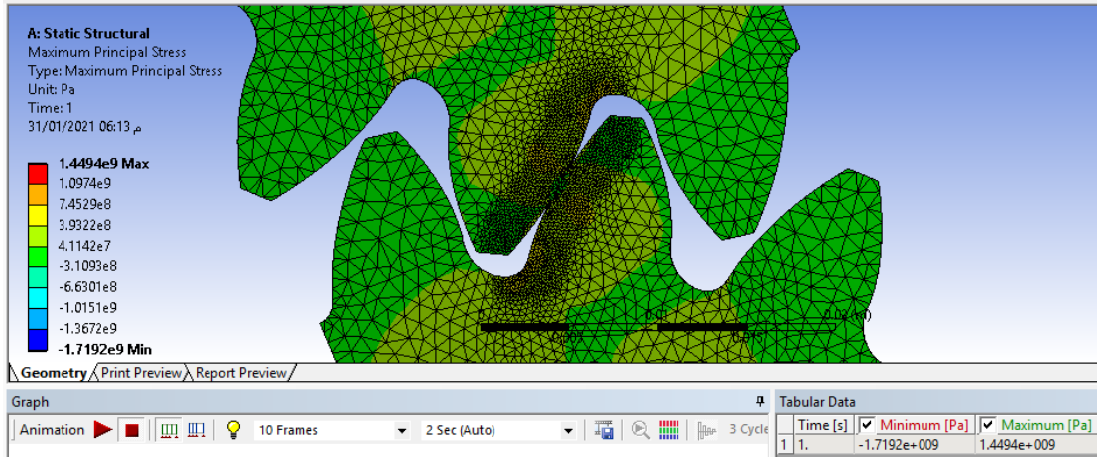
سن انقليوتي عدل غير متناظر الجوانب بزوايتي ضغط 20° و 30° وجذر معدل أيمن ليصبح منحنى قطع ناقص مماس لدائرة الجذر ومماس للمنحنى الانقليوتي ذو الزاوية ضغط 30° عند نقطة تحت آخر نقطة تعشيق محوره الكبير 3mm، و جذر أيسر معدل ليصبح منحنى قطع ناقص مماس لدائرة الجذر ومماس للمنحنى الانقليوتي ذو الزاوية ضغط 20° عند بدايته، كما هو واضح بالشكل (3-49).



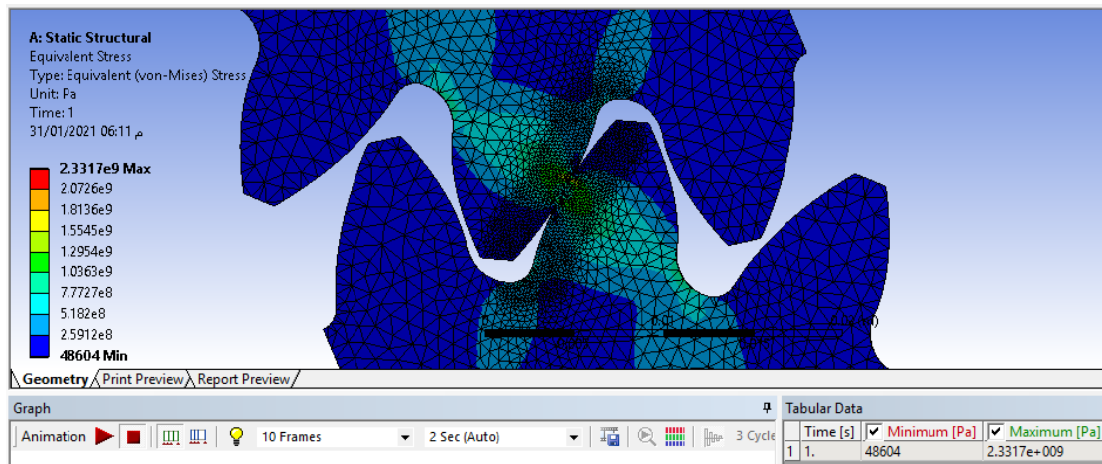
الشكل (3-49) النموذج السابع

التجربة 13 :

باستخدام المخدم Static Structural واعتماد النموذج السابع وإجراء التحليل لشبكة العناصر المنتهية تم الحصول على أكبر إجهاد انحناء مؤثر موضح بالشكل (3-50)، وأكبر إجهاد هصر شكل (3-51).



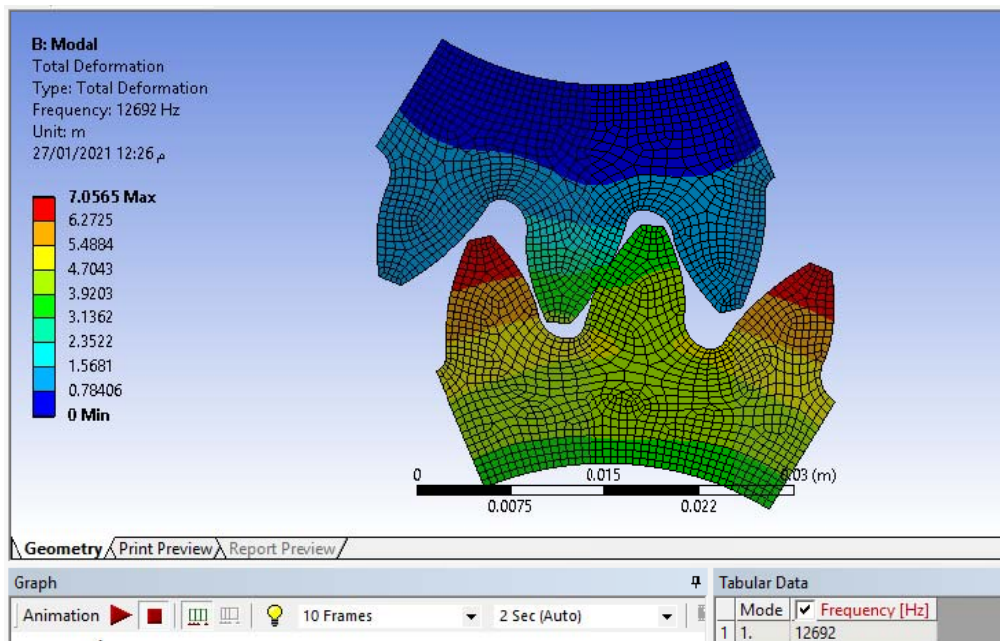
الشكل (3-50) إجهاد الانحناء المؤثر بالنموذج السابع



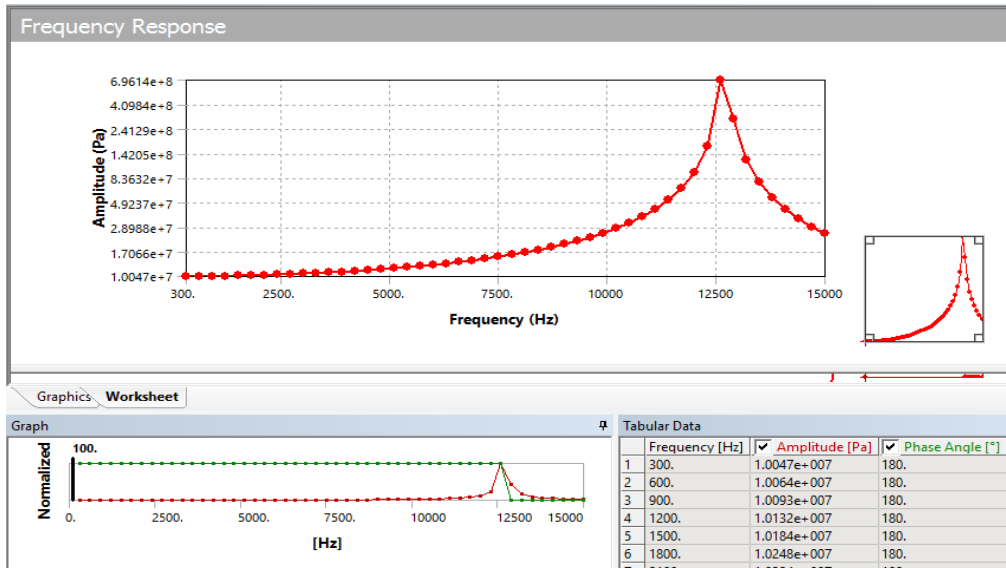
الشكل (3-51) إجهاد الهصر المؤثر بالنموذج السابع

التجربة 14 :

باستخدام المخدمين modal و Harmonic Response واعتماد النموذج السابع وإجراء التحليل بالعناصر المنتهية تم الحصول على التردد الطبيعي الموضح بالشكل (3-52) واستجابة التردد شكل (3-53) .



الشكل (3-52) الترددات الطبيعية للنموذج السابع

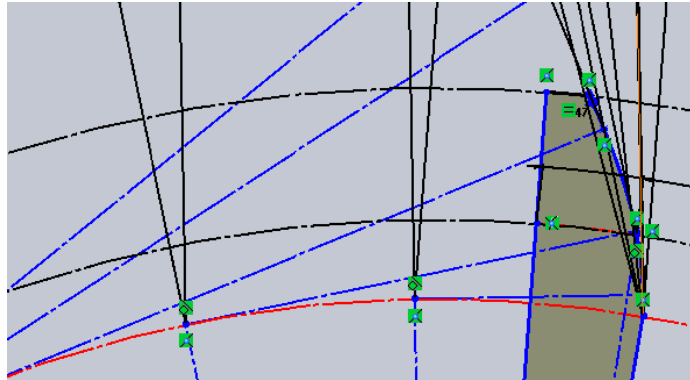


شكل (3-53) استجابة التردد للنموذج السابع

8.3.4.3. النموذج الثامن:

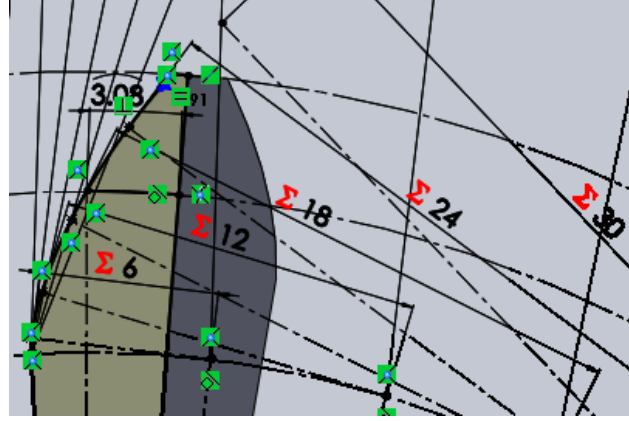
سن انقليوتي عدل غير متناظر الجوانب معدل بجعل الجانب الأيسر انقليوتي بزاوية ضغط 30° والجانب الأيمن فتم تحويله إلى منحنى دائري قطر دائرته المماس لدائرة الساق 4.5mm بنصف قطر منحنى دائري جانبي 8mm كما هو موضح بالشكل (3-56).
وذلك بإتباع الخطوات التالية:

1- رسم المنحنى الانقليوتي الأيمن بزاوية الضغط 20° ، شكل (3-54).



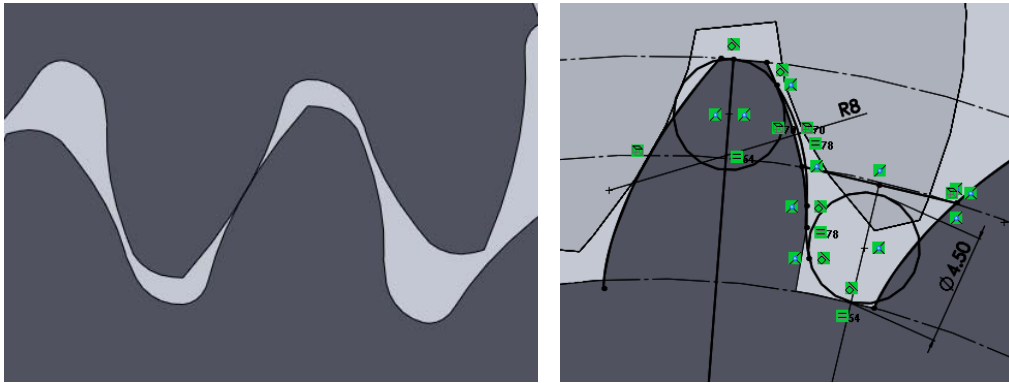
الشكل (3-54) رسم المنحنى الانقليوتي الأيمن بزاوية الضغط 20°

2- رسم المنحنى الانقليوتي الأيسر بزاوية الضغط 30° ، شكل (3-55).



الشكل (3-55) رسم المنحني الانفليوتي الأيسر بزاوية الضغط 30°

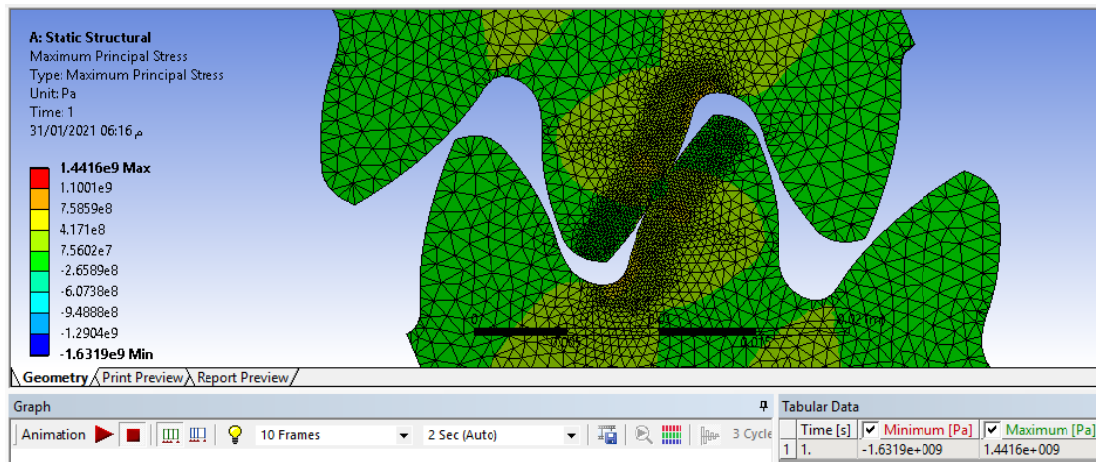
3- تحويل المنحني الأيمن للسن إلى لمنحني دائري قطر دائرته مماسة لدائرة الساق ودائرة الجذر 4.5mm بنصف قطر المنحني الدائري الجانبي 8mm كما هو موضح بالشكل (3-56).



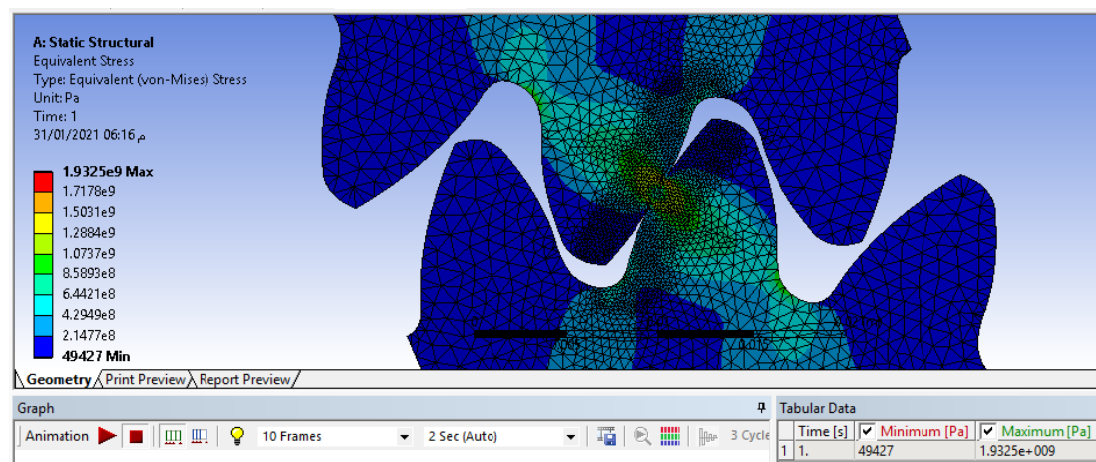
الشكل (3-56) النموذج الثامن

التجربة 15 :

باستخدام المخدم Static Structural واعتماد النموذج الثامن وإجراء التحليل لشبكة العناصر المنتهية تم الحصول على أكبر إجهاد انحناء مؤثر موضح بالشكل (3-57)، وأكبر إجهاد هصر شكل (3-58).



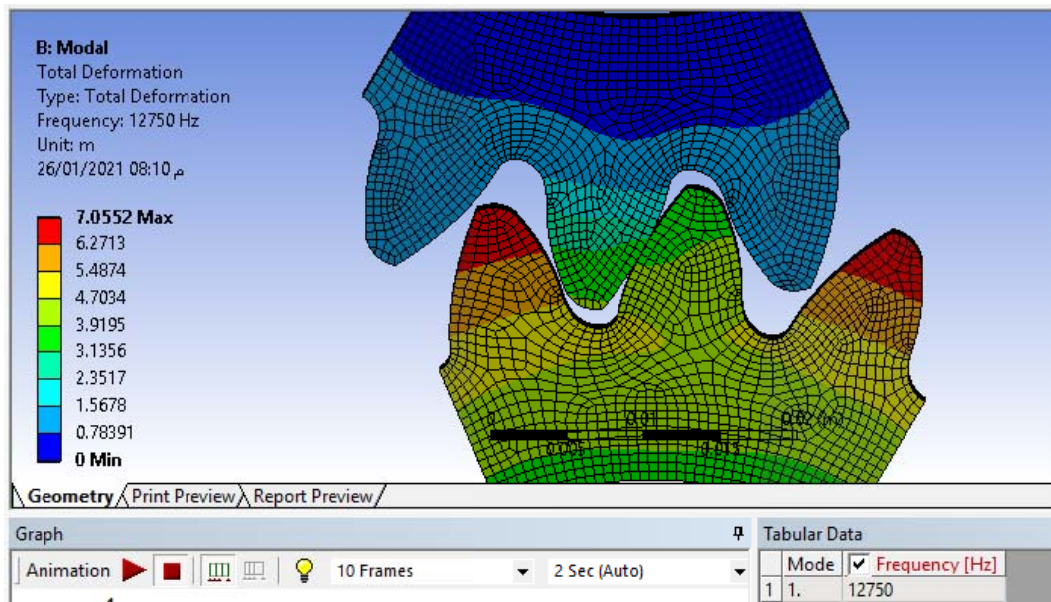
الشكل (3-57) إجهاد الانحناء المؤثر بالنموذج الثامن



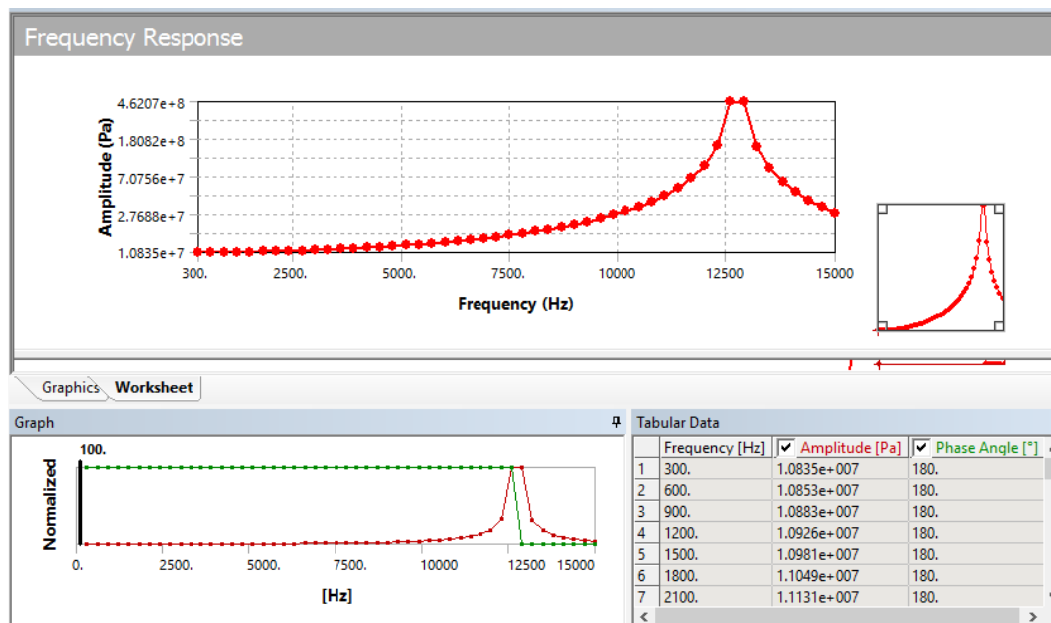
الشكل (3-58) إجهاد الهصر المؤثر بالنموذج الثامن

التجربة 16 :

باستخدام المخدمين modal و Harmonic Response واعتماد النموذج الثامن وإجراء التحليل بالعناصر المنتهية تم الحصول على التردد الطبيعي الموضح بالشكل (3-59) واستجابة التردد شكل (3-60).



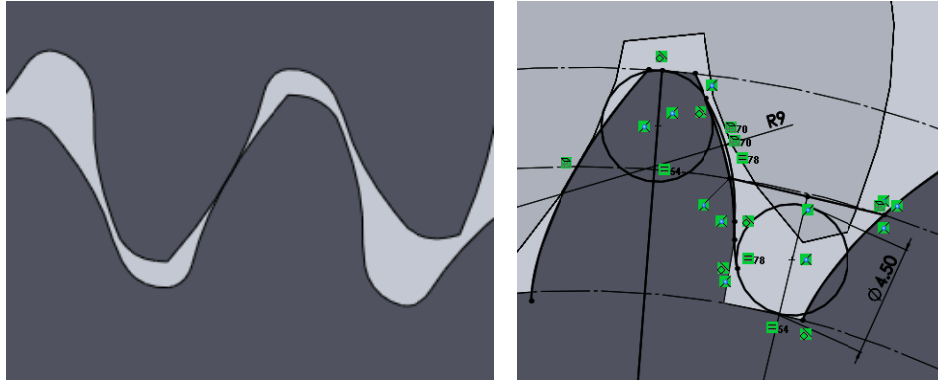
الشكل (3-59) الترددات الطبيعية للنموذج الثامن



الشكل (3-60) استجابة التردد للنموذج الثامن

9.3.4.3. النموذج التاسع:

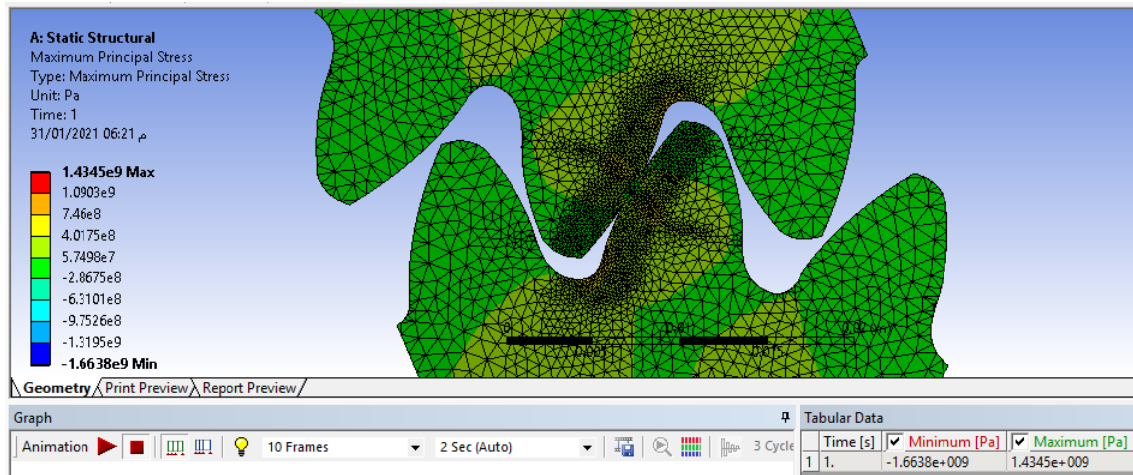
سن انقليوتي عدل غير متناظر الجوانب معدل بجعل الجانب الأيسر انقليوتي بزاوية ضغط 30° والجانب الأيمن تم تحويله إلى منحنى دائري قطر دائرته المماسية لدائرة الساق ودائرة الجذر 4.5mm بنصف قطر منحنى دائري جانبي 9mm كما هو موضح بالشكل (3-61).



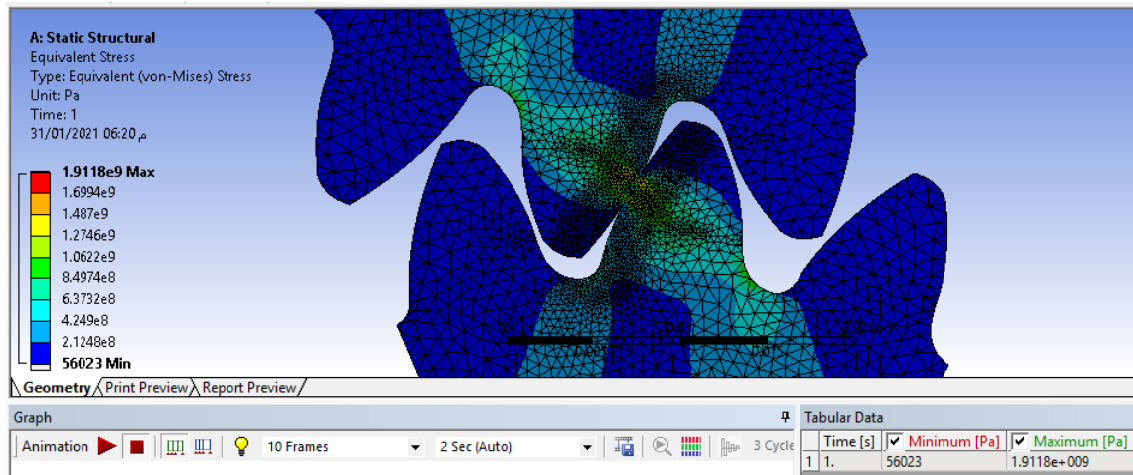
الشكل (3-61) النموذج التاسع

التجربة 17 :

باستخدام المخدم Static Structural واعتماد النموذج التاسع وإجراء التحليل لشبكة العناصر المنتهية تم الحصول على أكبر إجهاد انحناء مؤثر موضح بالشكل (3-62)، وأكبر إجهاد هصر شكل(3-63).



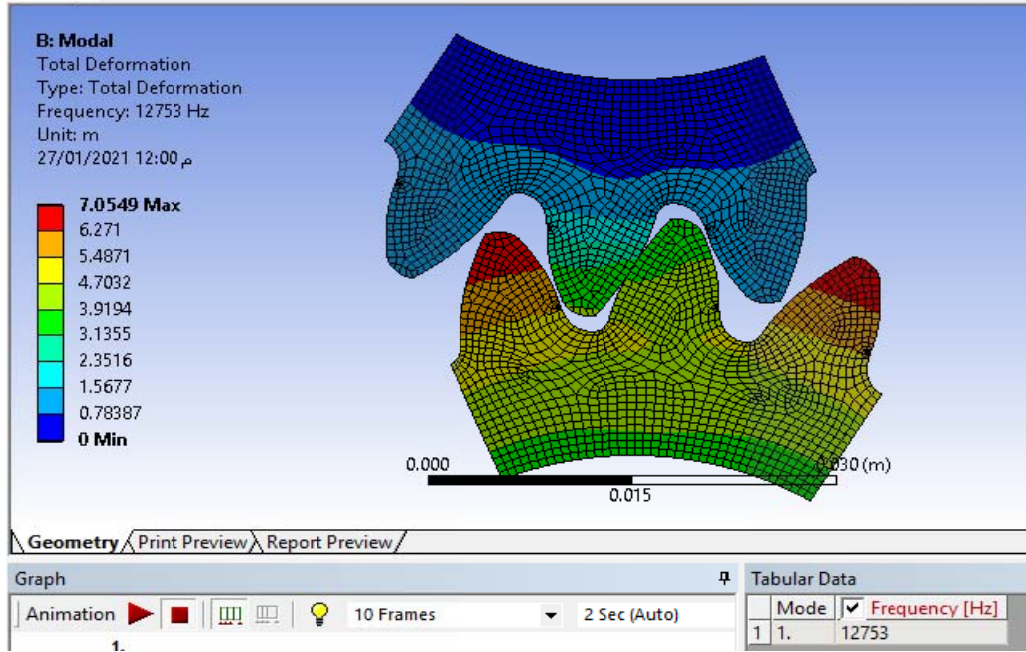
الشكل (3-62) إجهاد الانحناء المؤثر بالنموذج التاسع



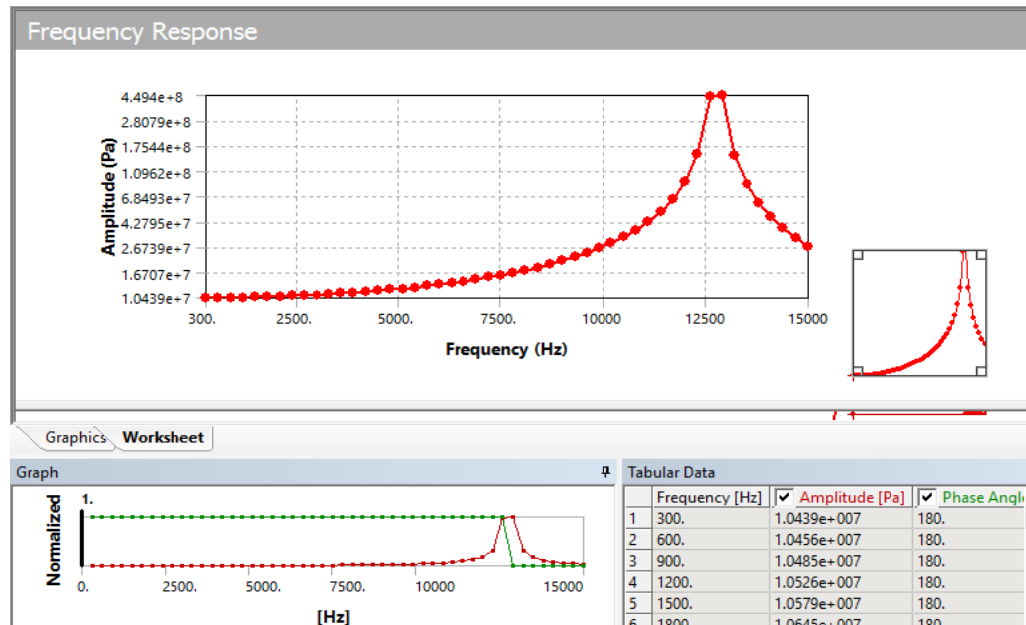
الشكل (3-63) إجهاد الهصر المؤثر بالنموذج التاسع

التجربة 18 :

باستخدام المخدمين modal و Harmonic Response واعتماد النموذج التاسع وإجراء التحليل بالعناصر المنتهية تم الحصول على التردد الطبيعي الموضح بالشكل (3-64) واستجابة التردد شكل (3-65).



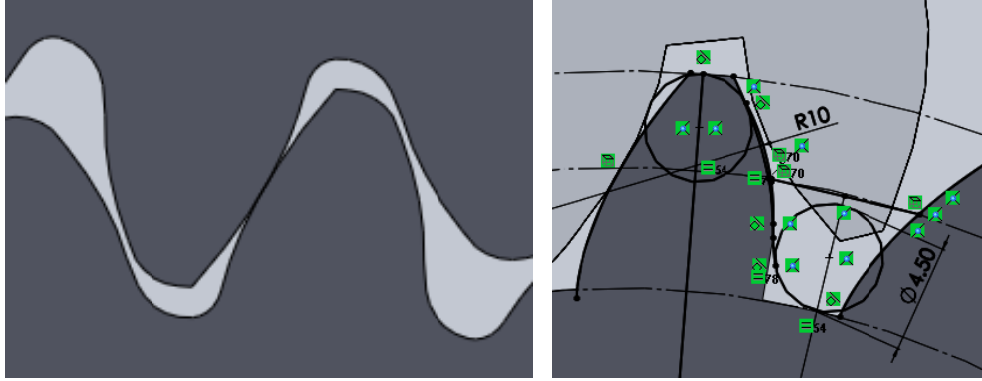
الشكل (3-64) الترددات الطبيعية للنموذج التاسع



الشكل (3-65) استجابة التردد للنموذج التاسع

10.3.4.3. النموذج العاشر:

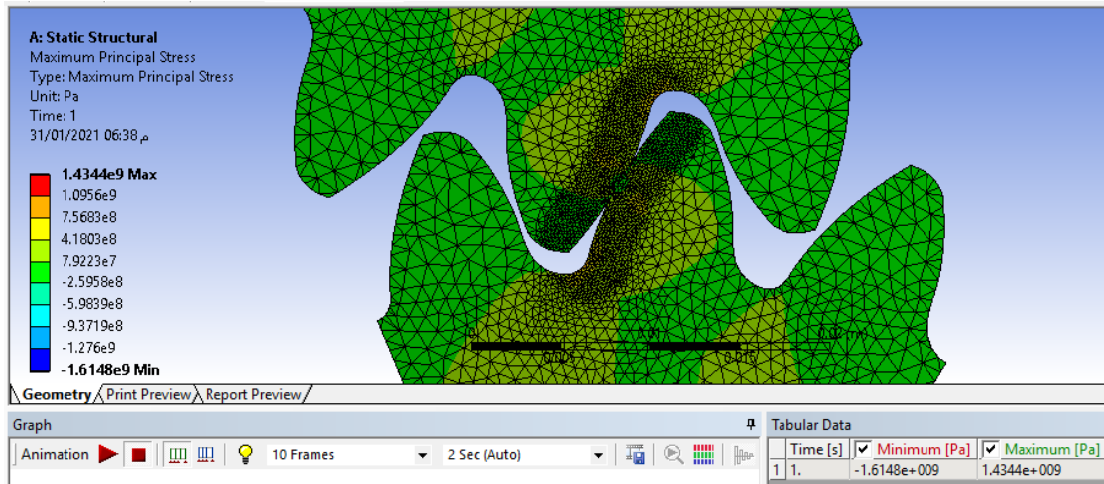
سن انفليوتي عدل غير متناظر الجوانب معدل بجعل الجانب الأيسر انفليوتي بزاوية ضغط 30° والجانب الأيمن فتم تحويله إلى منحنى دائري قطر دائرته المماس لدائرة الساق ودائرة الجذر 4.5mm بنصف قطر منحنى دائري جانبي 10mm كما هو موضح بالشكل (3-66).



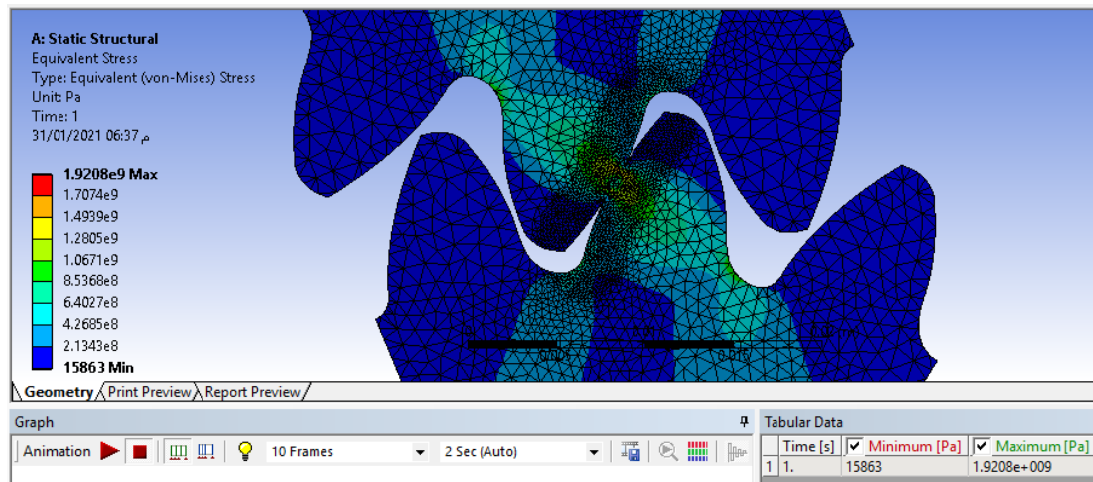
الشكل (3-66) النموذج العاشر

التجربة 19 :

باستخدام المخدم Static Structural واعتماد النموذج العاشر وإجراء التحليل لشبكة العناصر المنتهية تم الحصول على أكبر إجهاد انحناء مؤثر موضح بالشكل (3-67)، وأكبر إجهاد هصر شكل(3-68).



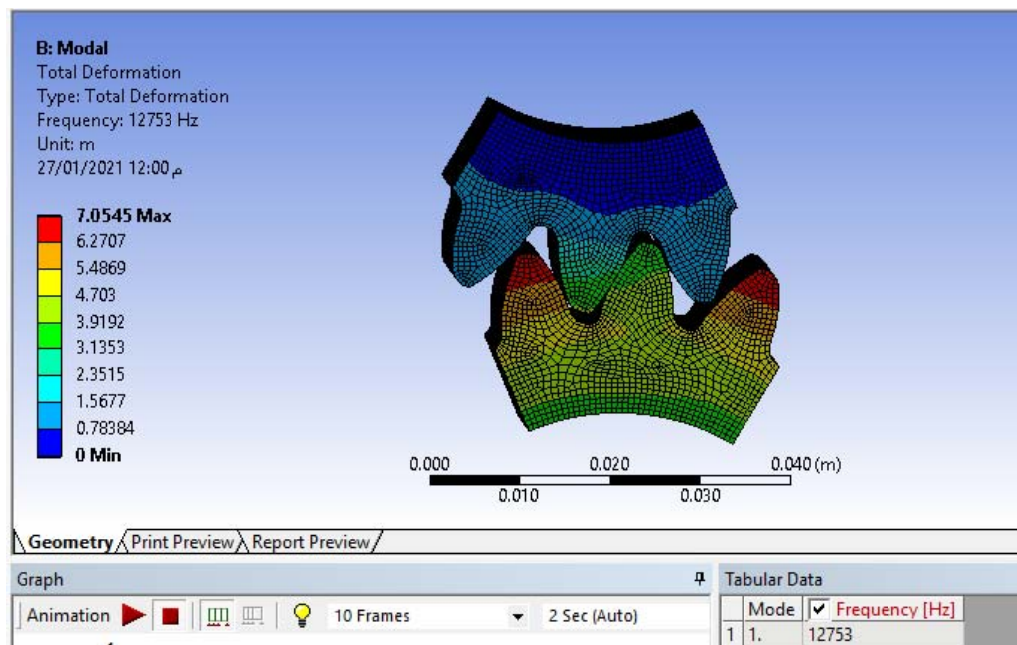
الشكل (3-67) إجهاد الانحناء المؤثر بالنموذج العاشر



الشكل (3-68) إجهاد الهصر المؤثر بالنموذج العاشر

التجربة 20 :

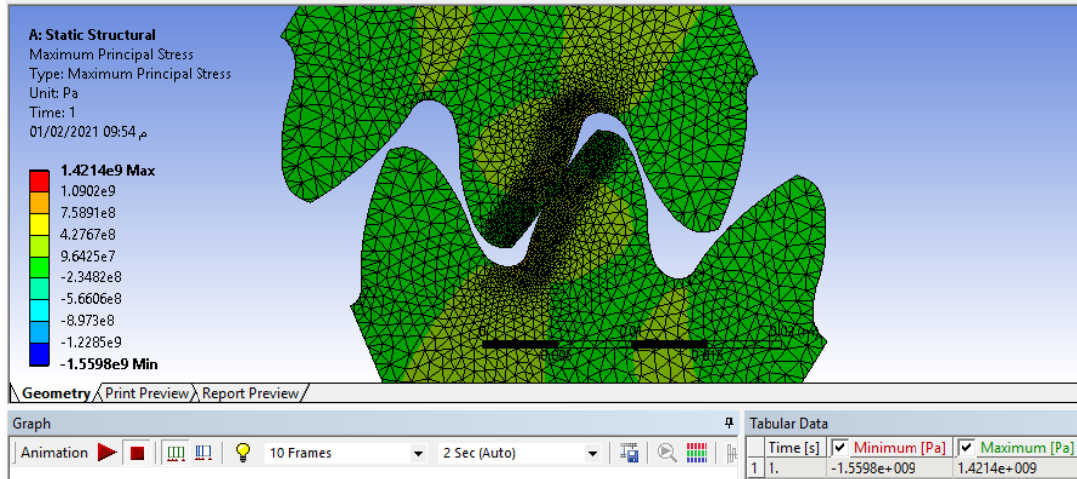
باستخدام المخدمين modal و Harmonic Response واعتماد النموذج العاشر وإجراء التحليل بالعناصر المنتهية تم الحصول على التردد الطبيعي الموضح بالشكل (3-69) واستجابة التردد شكل (3-70) .



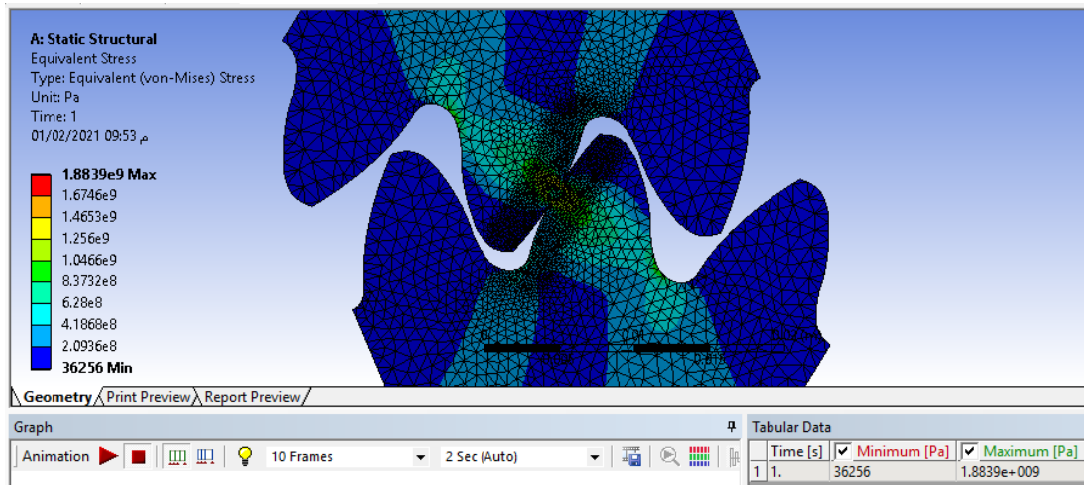
الشكل (3-69) الترددات الطبيعية للنموذج العاشر

التجربة 21 :

باستخدام المخدم Static Structural واعتماد النموذج الحادي عشر وإجراء التحليل لشبكة العناصر المنتهية تم الحصول على أكبر إجهاد انحناء مؤثر موضح بالشكل (3-72)، وأكبر إجهاد هصر شكل(3-73).



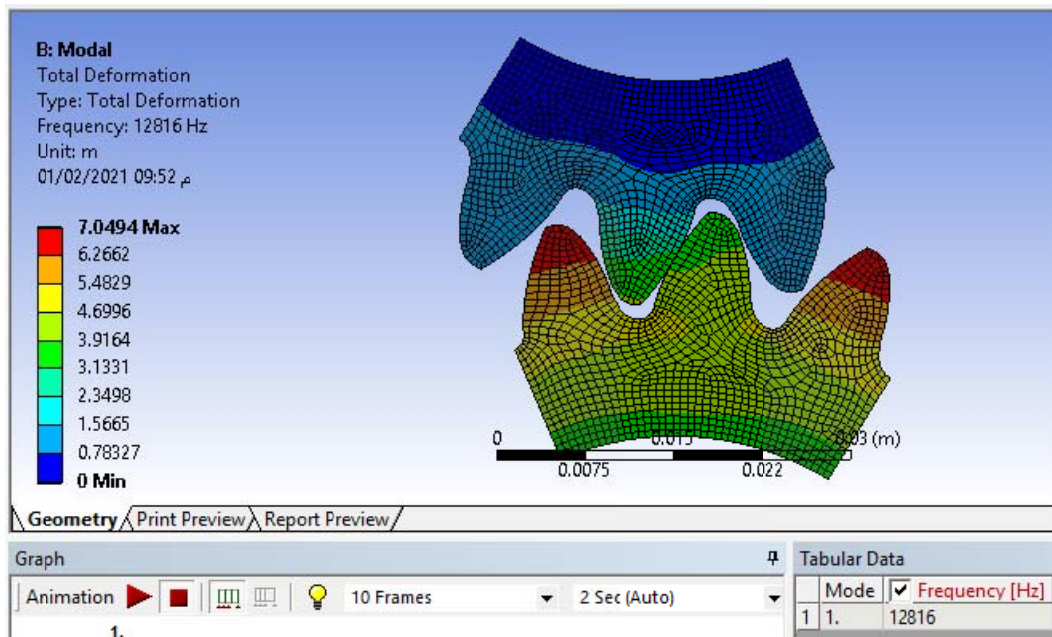
الشكل (3-72) إجهاد الانحناء المؤثر بالنموذج الحادي عشر



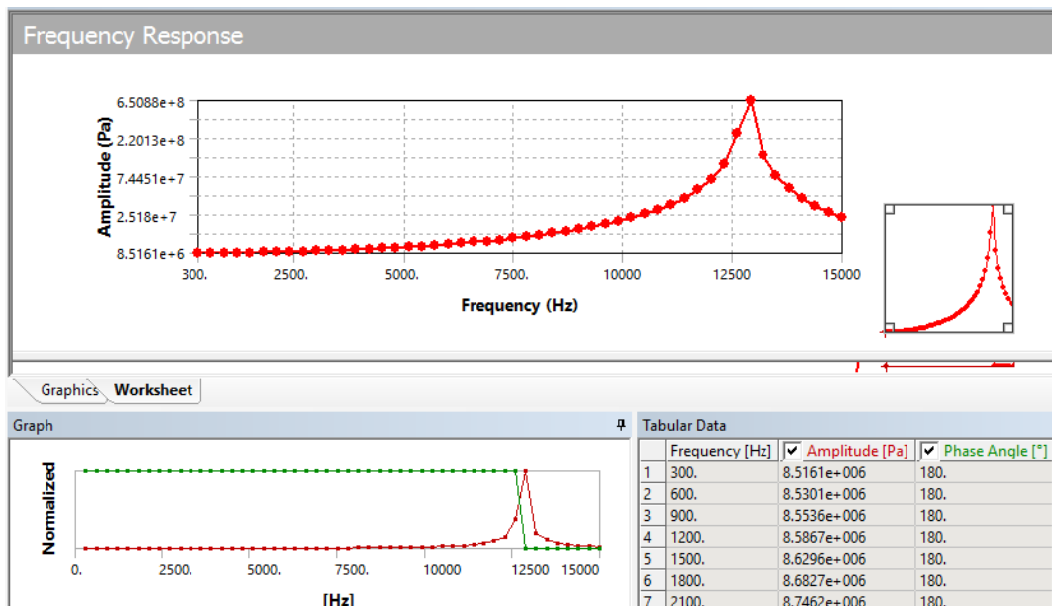
الشكل (3-73) إجهاد الهصر المؤثر بالنموذج الحادي عشر

التجربة 22:

باستخدام المخدمين modal و Harmonic Response واعتماد النموذج الحادي عشر وإجراء التحليل بالعناصر المنتهية تم الحصول على التردد الطبيعي الموضح بالشكل (3-74) واستجابة التردد شكل (3-75).



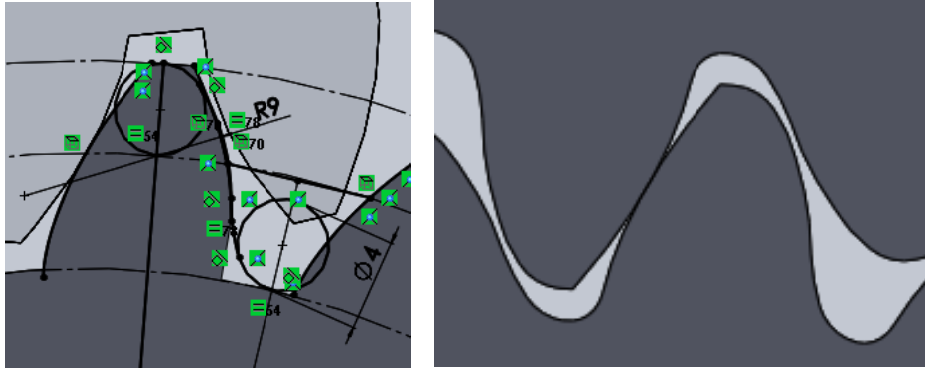
الشكل (3-74) الترددات الطبيعية للنموذج الحادي عشر



الشكل (3-75) استجابة التردد للنموذج الحادي عشر

12.3.4.3. النموذج الثاني عشر:

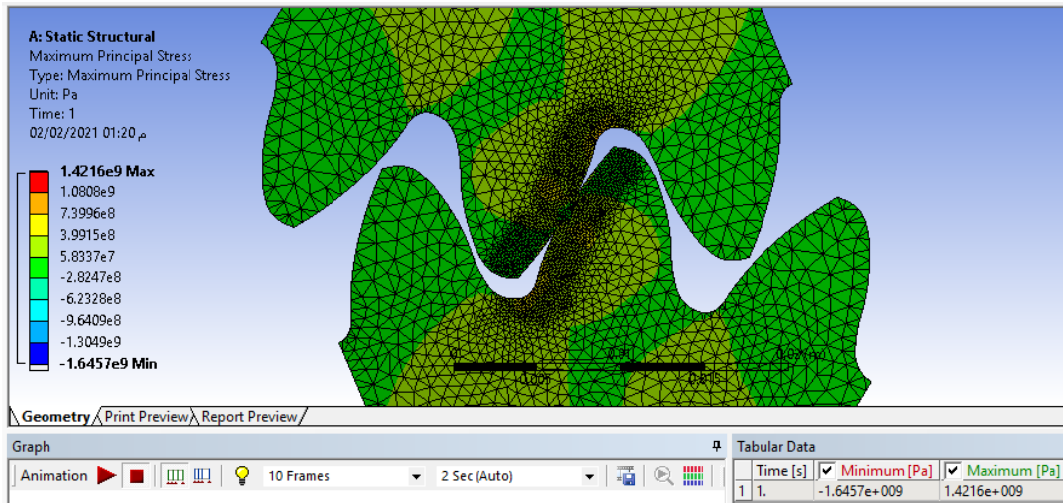
سن انقليوتي عدل غير متناظر الجوانب معدل بجعل الجانب الأيسر انقليوتي بزاوية ضغط 30° أما الجانب الأيمن فتم تحويله إلى منحنى دائري قطر دائرته المماس لدائرة الساق ودائرته المماس لدائرة الجذر 4mm بنصف قطر منحنى دائري جانبي 9mm كما هو موضح بالشكل (3-76).



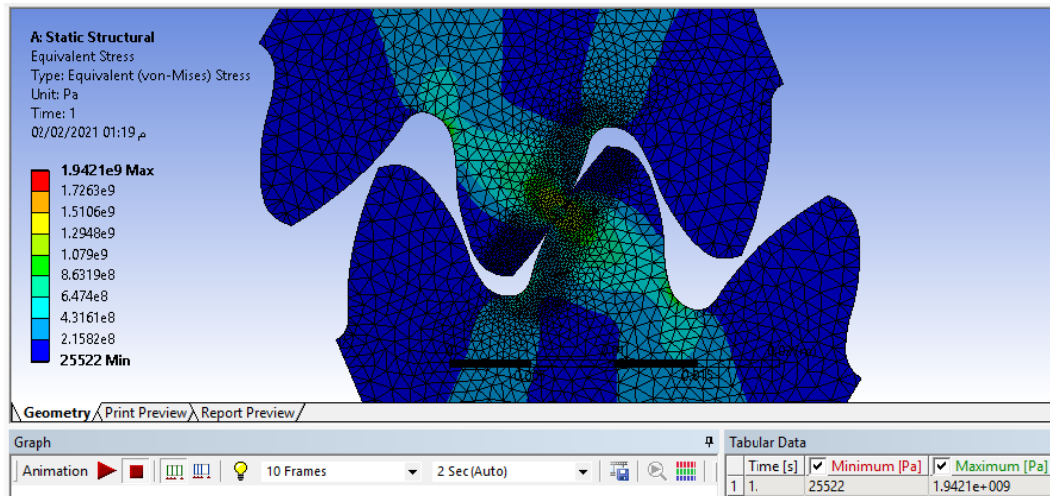
الشكل (76-3) النموذج الثاني عشر

التجربة 23:

باستخدام المخدم Static Structural واعتماد النموذج الثاني عشر وإجراء التحليل لشبكة العناصر المنتهية تم الحصول على أكبر إجهاد انحناء مؤثر موضح بالشكل (77-3)، وأكبر إجهاد هصر شكل (78-3).



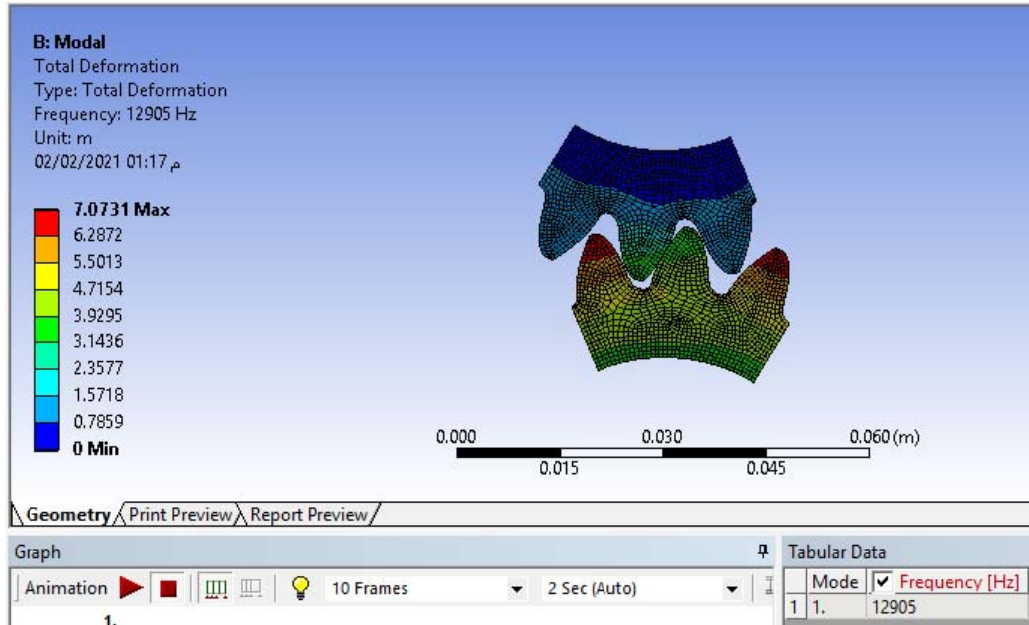
الشكل (77-3) إجهاد الانحناء المؤثر بالنموذج الثاني عشر



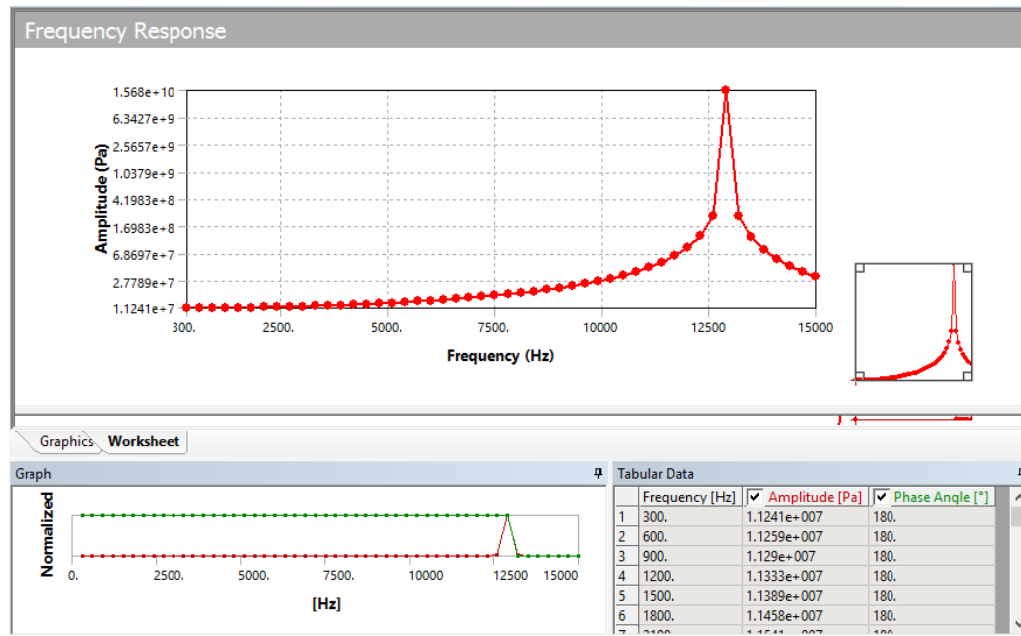
الشكل (78-3) إجهاد الهصر المؤثر بالنموذج الثاني عشر

التجربة 24:

باستخدام المخدمين modal و Harmonic Response واعتماد النموذج الثاني عشر وإجراء التحليل بالعناصر المنتهية تم الحصول على التردد الطبيعي الموضح بالشكل (3-79) واستجابة التردد شكل (3-80).



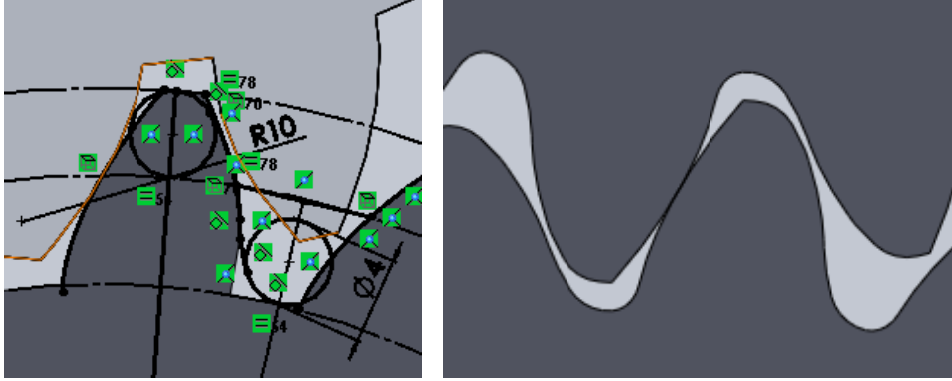
الشكل (3-79) الترددات الطبيعية للنموذج الثاني عشر



الشكل (3-80) استجابة التردد للنموذج الثاني عشر

13.3.4.3. النموذج الثالث عشر:

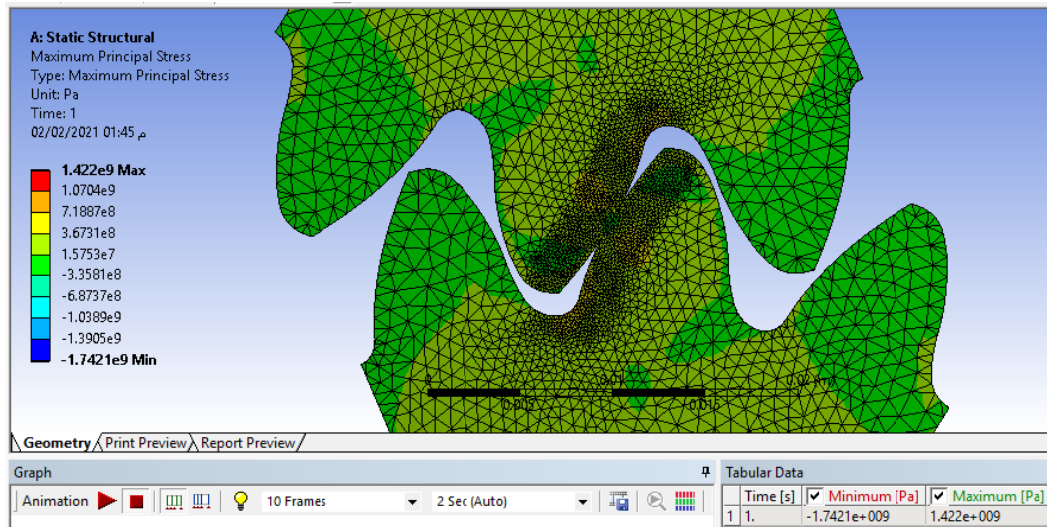
سن انقليوتي عدل غير متناظر الجوانب معدل بجعل الجانب الأيسر انقليوتي بزاوية ضغط 30° أما الجانب الأيمن فتم تحويله إلى منحنى دائري قطر دائرته المماسية لدائرة الساق ودائرته المماسية لدائرة الجذر 4mm بنصف قطر منحنى دائري جانبي 10mm كما هو موضح بالشكل (3-81).



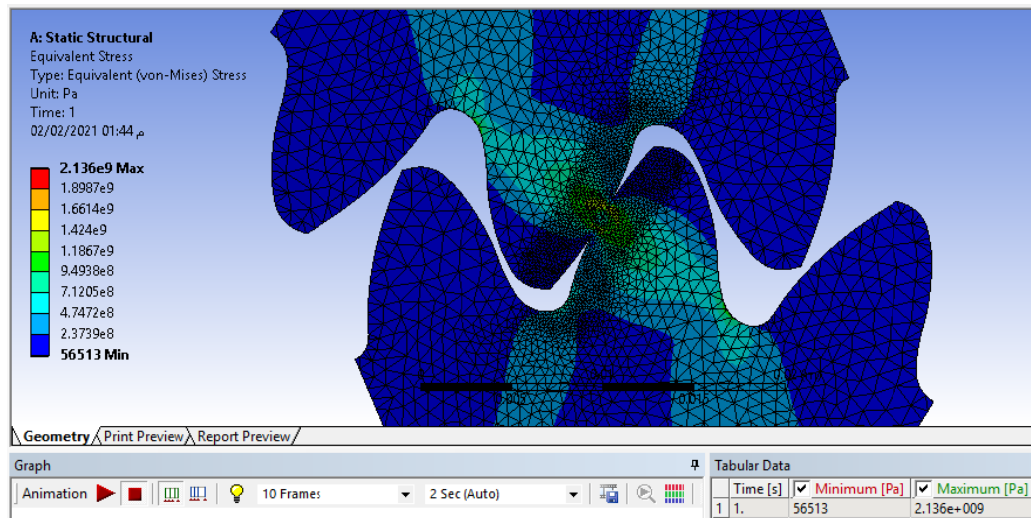
الشكل (3-81) النموذج الثالث عشر

التجربة 25:

باستخدام المخدم Static Structural واعتماد النموذج الثالث عشر وإجراء التحليل لشبكة العناصر المنتهية تم الحصول على أكبر إجهاد انحناء مؤثر موضح بالشكل (3-82)، وأكبر إجهاد هصر شكل (3-83).



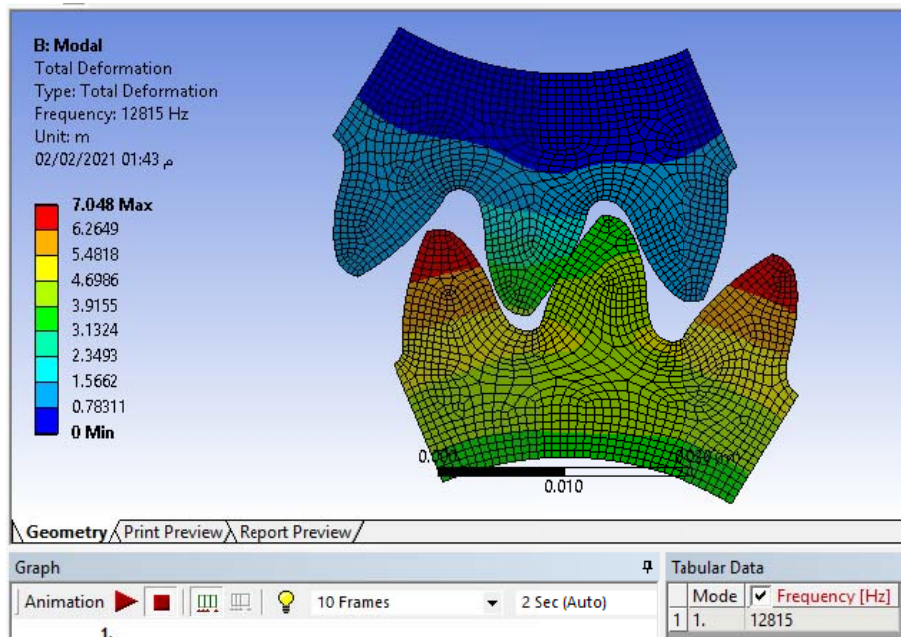
الشكل (3-82) إجهاد الانحناء المؤثر بالنموذج الثالث عشر



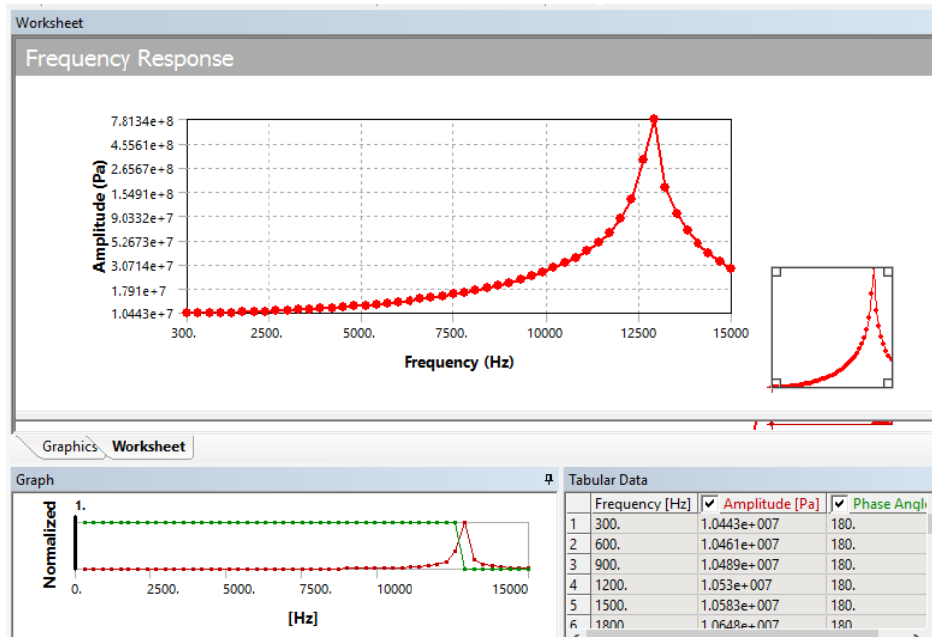
الشكل (3-83) إجهاد الهصر المؤثر بالنموذج الثالث عشر

التجربة 26:

باستخدام المخدمين modal و Harmonic Response واعتماد النموذج الثالث عشر وإجراء التحليل بالعناصر المنتهية تم الحصول على التردد الطبيعي الموضح بالشكل (3-84) واستجابة التردد شكل (3-85).



الشكل (3-84) الترددات الطبيعية للنموذج الثالث عشر



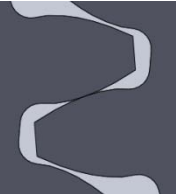
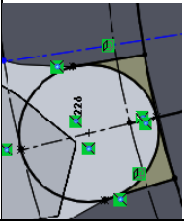
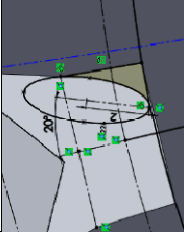
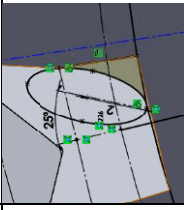
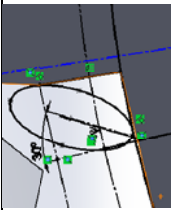
الشكل (3-85) استجابة التردد للنموذج الثالث عشر

4.4.3. تحليل نتائج الاختبارات ومناقشتها:

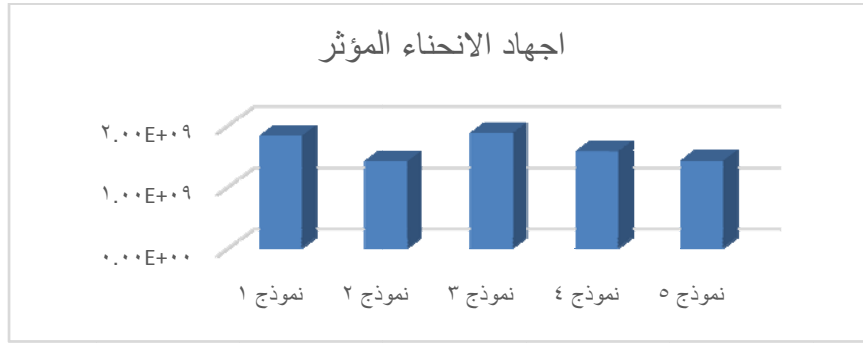
1.4.4.3. تحليل نتائج التجارب لنماذج الأسنان متناظرة الجوانب:

النماذج من الأول وحتى الخامس متناظرة الجوانب مصنوعة من الستانلس ستيل ويؤثر عليها عزم دوران 1000 N.m أجريت عليها تجارب كانت نتائجها كالجدول (3-7) التالي:

جدول (3-7) نتائج التجارب لنماذج الأسنان متناظرة الجوانب

النماذج	الأول	الثاني	الثالث	الرابع	الخامس
هندسة السن					
أكبر إجهاد انحناء مؤثر [GPa]	1.8304	1.4106	1.8748	1.5737	1.4254
أكبر إجهاد هصر مؤثر [GPa]	2.4745	2.3405	2.3086	2.1120	2.2161
عند 300 Hz سعة الاهتزاز لاستجابة التردد [MPa]	46.811	10.457	5.8244	9.6758	10.148
وزن المسنن [g]	282.15	284.62	284.10	284.85	285.47

- قمنا برسم مخطط تغير اجهاد الانحناء بين النماذج متناظرة الجوانب المدروسة:



الشكل (3-86) تغير اجهاد الانحناء بين النماذج متناظرة الجوانب المدروسة

نلاحظ من المخطط أن النموذج الثاني هو الأفضل بقيمة متقاربة مع النموذجين الرابع والخامس فقد بلغ التحسن في مستوى اجهاد الانحناء مقارنة مع النموذج الأول المتناظر القياسي:

بالنموذج الثاني :

$$100 - \left(\frac{1.4106}{1.8304} \times 100 \right) = 22.93\%$$

بالنموذج الرابع :

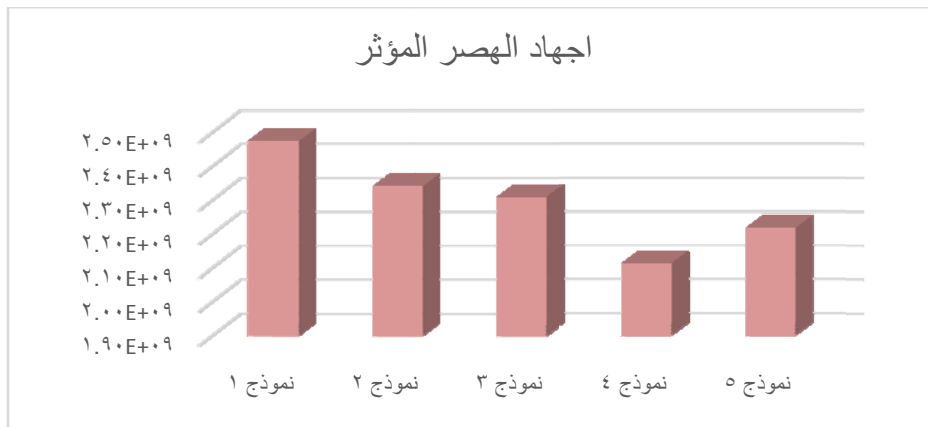
$$100 - \left(\frac{1.5737}{1.8304} \times 100 \right) = 14.02\%$$

بالنموذج الخامس :

$$100 - \left(\frac{1.4254}{1.8304} \times 100 \right) = 22.12\%$$

أما النموذج الثالث فكان اجهاد الانحناء به أعلى من النموذج القياسي الأول.

- رسم مخطط تغير اجهاد الهصر المؤثر بين النماذج متناظرة الجوانب المدروسة:



الشكل (3-87) تغير اجهاد الهصر بين النماذج متناظرة الجوانب المدروسة

نلاحظ من المخطط أن النموذج الرابع هو الأفضل وبلغ التحسن في مستوى اجهاد الهصر مقارنة مع النموذج الأول المتناظر القياسي:

بالنموذج الثاني :

$$100 - \left(\frac{2.3405}{2.4745} \times 100 \right) = 5.42\%$$

بالنموذج الثالث :

$$100 - \left(\frac{2.3086}{2.4745} \times 100 \right) = 6.70\%$$

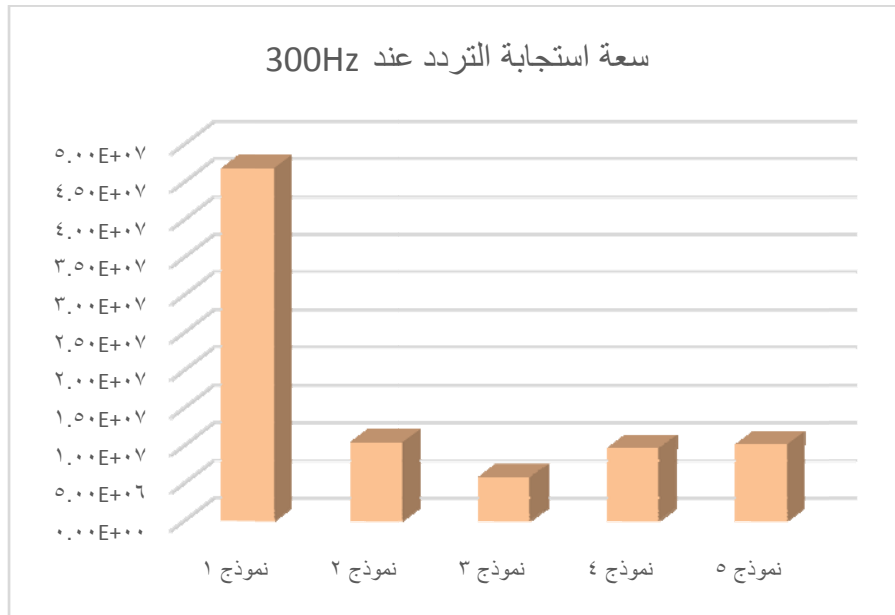
بالنموذج الرابع :

$$100 - \left(\frac{2.1120}{2.4745} \times 100 \right) = 14.65\%$$

بالنموذج الخامس :

$$100 - \left(\frac{2.2161}{2.4745} \times 100 \right) = 10.44\%$$

• رسم مخطط تغير سعة اهتزاز استجابة التردد بين النماذج متناظرة الجوانب المدروسة:



الشكل (3-88) تغير سعة اهتزاز استجابة التردد بين النماذج متناظرة الجوانب المدروسة

نلاحظ من المخطط أن النموذج الثالث هو الأفضل بقيم متقاربة مع النماذج الثاني والرابع والخامس وبلغ التحسن في مستوى سعة الاهتزاز مقارنة مع النموذج الأول المتناظر القياسي:

بالنموذج الثاني :

$$100 - \left(\frac{10.457}{46.811} \times 100 \right) = 77.66\%$$

بالنموذج الثالث :

$$100 - \left(\frac{5.8244}{46.811} \times 100 \right) = 87.56\%$$

بالنموذج الرابع :

$$100 - \left(\frac{9.6758}{46.811} \times 100 \right) = 79.33\%$$

بالنموذج الخامس :

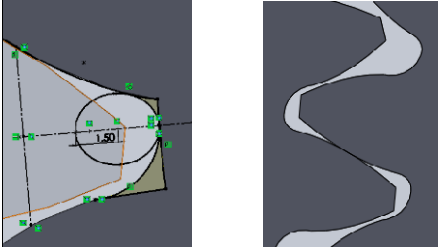
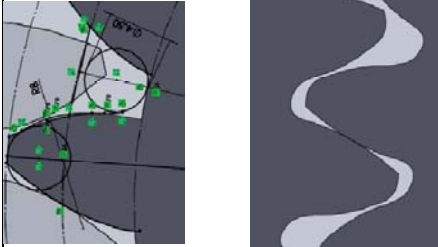
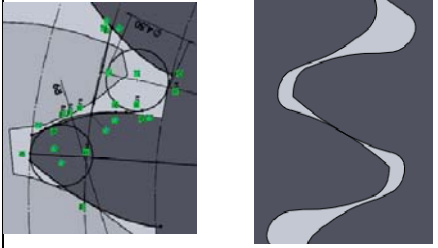
$$100 - \left(\frac{10.148}{46.811} \times 100 \right) = 78.32\%$$

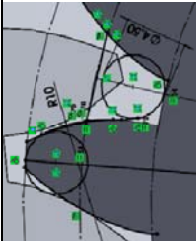
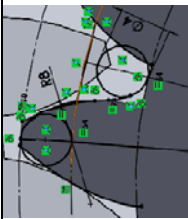
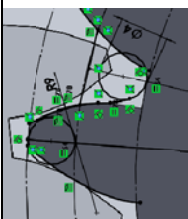
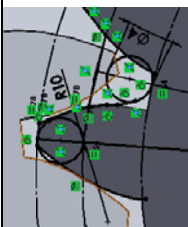
2.4.4.3. تحليل نتائج التجارب لنماذج الأسنان غير متناظرة الجوانب:

النماذج من السادس وحتى الثالث عشر غير متناظرة الجوانب مصنوعة من الستانلس

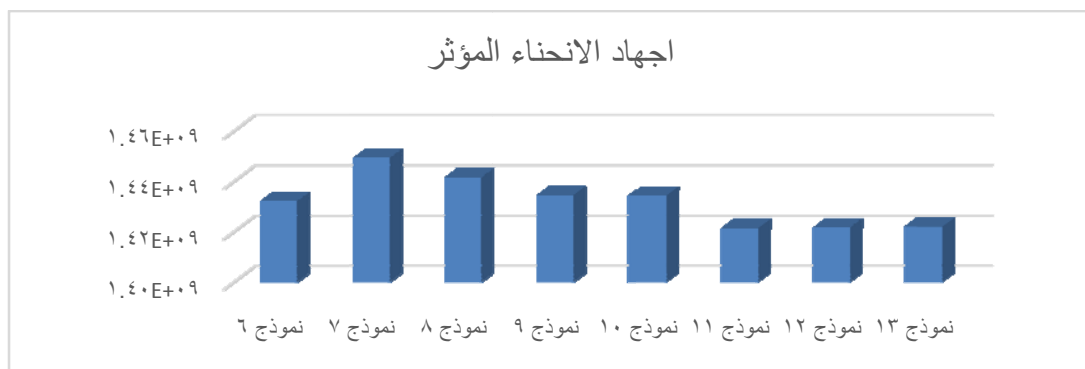
ستيل ويؤثر عليها عزم دوران 1000 N.m كانت نتائجها بالجدول (3-8) التالي:

جدول (3-8) نتائج التجارب لنماذج الأسنان غير متناظرة الجوانب

النماذج	السادس	السابع	الثامن	التاسع
هندسة السن				
أكبر إجهاد انحناء [GPa] مؤثر	1.4323	1.4494	1.4416	1.4345
أكبر إجهاد الهصر [GPa] مؤثر	2.062	2.3317	1.9325	1.9118
عند 300 Hz سعة الاهتزاز لاستجابة التردد [MPa]	12.723	10.047	10.835	10.439
وزن المسنن [g]	285	286.09	285.93	285.94

النماذج	هندسة السن	أكبر إجهاد انحناء مؤثر [GPa]	أكبر إجهاد هصر مؤثر [GPa]	عند 300 Hz سعة الاهتزاز لاستجابة التردد [MPa]	وزن المسنن [g]
العاشر	 	1.4344	1.9208	8.5539	285.96
الحادي عشر	 	1.4214	1.8839	8.5161	286.19
الثاني عشر	 	1.4216	1.9421	11.241	286.20
الثالث عشر	 	1.422	2.136	10.443	286.21

• قمنا برسم مخطط تغير اجهاد الانحناء بين النماذج غير متناظرة الجوانب المدروسة:



الشكل (3-89) تغير اجهاد الانحناء بين النماذج غير متناظرة الجوانب المدروسة

نلاحظ من المخطط أن النموذج الحادي عشر هو الأفضل بقيمة متقاربة جداً مع النموذجين الثاني عشر والثالث عشر فقد بلغ التحسن في مستوى اجهاد الانحناء مقارنة مع النموذج السادس غير المتناظر القياسي:

بالنموذج الحادي عشر :

$$100 - \left(\frac{1.4214}{1.4323} \times 100 \right) = 0.76\%$$

بالنموذج الثاني عشر :

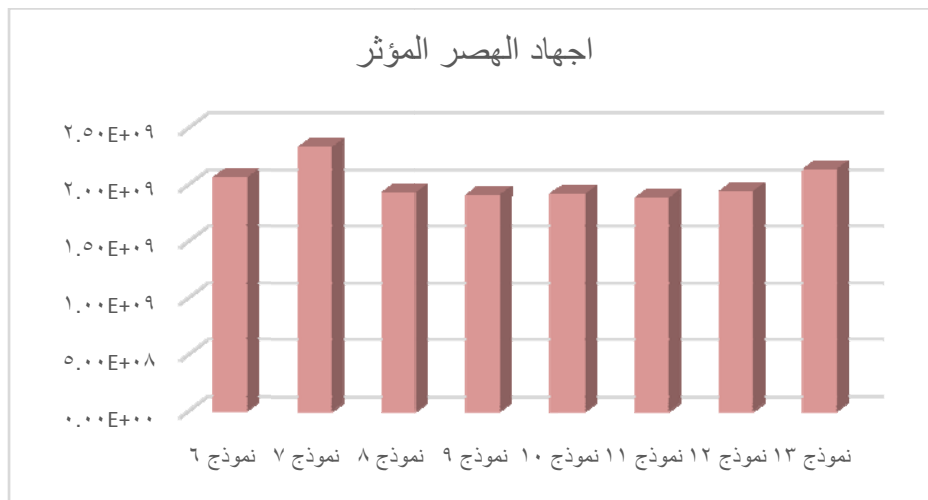
$$100 - \left(\frac{1.4216}{1.4323} \times 100 \right) = 0.75\%$$

بالنموذج الثالث عشر :

$$100 - \left(\frac{1.422}{1.4323} \times 100 \right) = 0.72\%$$

أما النماذج (7-8-9-10) فكان اجهاد الانحناء بها أعلى من النموذج القياسي السادس.

- رسم مخطط تغير اجهاد الهصر بين النماذج غير متناظرة الجوانب المدروسة:



الشكل (3-90) تغير اجهاد الهصر بين النماذج غير متناظرة الجوانب المدروسة

نلاحظ من المخطط أن النموذج الحادي عشر هو الأفضل بقيمة وبلغ التحسن في مستوى اجهاد الهصر مقارنة مع النموذج السادس غير المتناظر القياسي:

بالنموذج الثامن :

$$100 - \left(\frac{1.9325}{2.062} \times 100 \right) = 6.28\%$$

بالنموذج التاسع :

$$100 - \left(\frac{1.9118}{2.062e9} \times 100 \right) = 7.28\%$$

بالنموذج العاشر :

$$100 - \left(\frac{1.9208}{2.062} \times 100 \right) = 6.85\%$$

بالنموذج الحادي عشر :

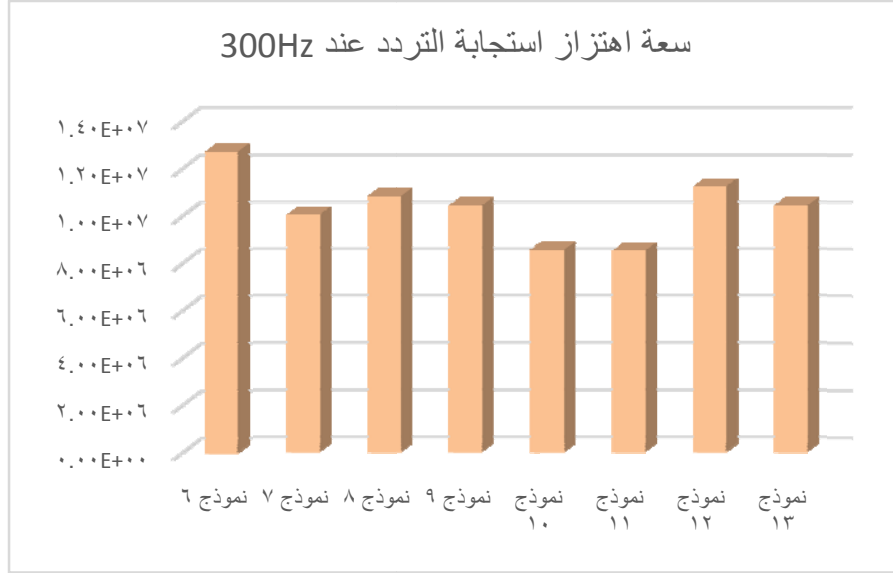
$$100 - \left(\frac{1.8839}{2.062} \times 100 \right) = 8.64\%$$

بالنموذج الثاني عشر :

$$100 - \left(\frac{1.9421}{2.062} \times 100 \right) = 5.81\%$$

أما النماذج (7-13) فكان اجهاد الهصر بها أعلى من النموذج القياسي السادس.

- رسم مخطط تغير سعة اهتزاز استجابة التردد بين النماذج غير متناظرة الجوانب المدروسة:



الشكل (3-91) تغير سعة اهتزاز استجابة التردد بين النماذج غير متناظرة الجوانب المدروسة

نلاحظ من المخطط أن النموذج الحادي عشر هو الأفضل وبلغ التحسن في مستوى سعة الاهتزاز

مقارنة مع النموذج السادس غير المتناظر القياسي:

بالنموذج السابع :

$$100 - \left(\frac{10.047}{12.723} \times 100 \right) = 21.03\%$$

بالنموذج الثامن :

$$100 - \left(\frac{10.835}{12.723} \times 100 \right) = 14.84\%$$

بالنموذج التاسع :

$$100 - \left(\frac{10.439}{12.723} \times 100 \right) = 17.95\%$$

بالنموذج العاشر :

$$100 - \left(\frac{8.5539}{12.723} \times 100 \right) = 32.77\%$$

بالنموذج الحادي عشر :

$$100 - \left(\frac{8.5161}{12.723} \times 100 \right) = 33.07\%$$

بالنموذج الثاني عشر :

$$100 - \left(\frac{11.241}{12.723} \times 100 \right) = 11.64\%$$

بالنموذج الثالث عشر :

$$100 - \left(\frac{10.443}{12.723} \times 100 \right) = 17.92\%$$

5.3. نتائج البحث:

- عبر نمذجة سن انفليوتي متناظر الجوانب بزواوية ضغط 20° وقطر دائرة خطوة 80mm وموديول 4mm مصنوع من الستانلس ستيل ويطبق عليه عزم 1000N.m والذي سميناه النموذج الأول، بالتعديل عليه بإنشاء النماذج من الثاني وحتى الخامس بينت الدراسة أن النموذج الأمثل بين النماذج من الأول وحتى الخامس هو النموذج الرابع، حيث أبدى مقارنة مع النموذج القياسي الأول تخفيض بإجهاد الانحناء بمقدار 14.02% وتخفيضاً بإجهاد الهصر بمقدار 14.65% وانخفاض بسعة اهتزاز تجاوب التردد بمقدار 79.33% .
- النموذج المتناظر الأول وزنه 282.15 غرام لو أردنا أن يكون إجهاد الانحناء المؤثر به كما بالنموذج الرابع لاحتجنا لمسنن من النموذج الأول سماكته 13.96 مم ووزنه 328.23 غرام فيكون التوفير بالمعدن 46 غراماً ما يعادل 14%، ولو أردنا مسننا من النموذج الأول يساوي بإجهاد الهصر النموذج الرابع لاحتجنا لمسنن سماكته 16.23 مم ووزنه 381.6 غرام فيكون التوفير 99 غرام ما يعادل 26% .
- عند نمذجة سن انفليوتي غير متناظر الجوانب بزوايا ضغط 20° و 30° وقطر دائرة خطوة 80mm وموديول 4mm مصنوع من الستانلس ستيل ويطبق عليه عزم 1000N.m والذي سميناه النموذج السادس والتعديل عليه بإنشاء النماذج من السابع وحتى الثالث عشر، وباعتمادنا نتائج الدراسة المرجعية (1) بأن يكون الطرف العامل هو زاوية الضغط 30° ،

بينت الدراسة أن النموذج الأمثل بين النماذج من السادس وحتى الثالث عشر هو النموذج الحادي عشر حيث أبدى مقارنة مع النموذج القياسي السادس تقريبا نفس إجهاد الانحناء فقد بلغ التخفيض بإجهاد الانحناء بمقدار 0.76% وتخفيضاً بإجهاد الهصر بمقدار 8.64% وانخفاض بسعة اهتزاز تجاوب التردد بمقدار 33.07%.

- النموذج الحادي عشر والنموذج السادس متقاربين بإجهاد الانحناء لكن بإجهاد الهصر لو أردنا مسنن من النموذج السادس يماثل الحادي عشر بإجهاد الهصر لاحتجنا لمسنن سماكته 14.28 مم بدلا من 12 مم ووزنه 339.15 غرام بدلا من 286.19 غرام فيكون التوفير بالمعدن 52.9 غرام ما يعادل 15%.

6.3. مقارنة النتائج مع الدراسات السابقة:

- تم اعتماد بالدراسة العملية نتائج الدراسة المرجعية (1) بأن يكون الطرف العامل هو زاوية الضغط الأكبر 30° .
- في الدراسة المرجعية رقم (2) بينت أن الشكل المتناظر الأمثل أبدى تخفيض بإجهاد الانحناء كان 20% ولكن لم تدرس التأثير على إجهاد الهصر ولا تجاوب التردد.
- في الدراسة المرجعية رقم (3) نموذجها الأمثل لجذر السن المتناظر كان دائري لكن بقطر أكبر من الدائري القياسي وبينت الدراسة رقم (4) أن جذرها الأمثل ذو المنحني قطع ناقص أفضل من الجذر الدائري الأكبر.
- في الدراسة المرجعية رقم (4) الشكل الأمثل لجذر السن المتناظر هو منحني القطع الناقص قمنا بنمذجته من خلال النموذج الثاني، حيث أبدى بالنسبة للنموذج القياسي الأول تخفيض بإجهاد الانحناء بمقدار 22.93% وتخفيضاً بإجهاد الاتصال بمقدار 5.42% وانخفاض بسعة اهتزاز تجاوب التردد بمقدار 77.66% وهذا يتوافق مع نتائج الدراسة، وبذلك يكون النموذج الأمثل وهو الرابع بدراستنا أفضل منه حيث تفوق عليه بأغلب البارامترات المدروسة.

7.3. المقترحات والتوصيات:

- إتباع طريقة التصميم المباشر في تصميم المسننات كونها تعطي نتائج أفضل من المسننات القياسية.
- مراعاة وظيفة المسنن عند إجراء تعديلات عليه فالسن غير المتناظر الجوانب يصلح للتطبيقات ذات اتجاه دوران واحد.
- دراسة تأثير تعديلات جانبية المسنن على معادن مستخدمة في تصنيعه غير الستانلس ستيل.
- دراسة تأثير تعديلات جانبية المسنن على موديولات مختلفة عن التي درسناه.

المراجع:

- [1] Kohara Gear Industry Co.(2015) "Gear Types And Terminology"
Nakacho Kawaguchi ,Japan
- [2] University of Valladolid (2001) "GEARS AND GEAR DRIVES"
Valladolid ,Spain, A145-168
- [3] بركات، خ. (1998) "أطلس في التصميم الميكانيكي"
- [4] Hermann J, Stadtfeld and Jasmin K, (2015) "Non-Involute Gearing,
Function and Manufacturing Compared to Established Gear Designs" *Gear
technology* ,USA, January/February , p 42-51.
- [5] <https://en.wikipedia.org/wiki/Cycloid>
- [6] <https://en.wikipedia.org/wiki/Trochoid>
- [7] <https://encyclopediaofmath.org/wiki/Trochoid>
- [8] Geqiang L, Longfei Z and Weifeng H, (2018)" Profile design and
displacement analysis of the low pulsating gear pump" *Advances in
Mechanical Engineering*, Vol. 10(3) 1–11.
- [9] X.P. Zhang, X.Cai, H.J.hen, Ch. Qu and J.liu, (2014)" A Parametric
Moleling Method for Hyperboloidal-type Normal Circular-arc Gear"
Journal of Applied Sciences, ISSN 1812-5654.
- [10] R.S.Khurmi and J.K.Gupta, (2005) "Theory of Machines" ,India.
- [11] Faydor L, Alfonso F, (2004) "Gear Geometry and Applied Theory" 2nd ,
Cambridge University press, USA.
- [12] Alex.L and Yuriy.V, (2016) "Rating of Asymmetric Tooth Gears"
Power Transmission Engineering, p40-45.
- [13] K.Gopinath and M.Mayuram, (2009) "Machine design II " *The National
Program on Technology Enhanced Learning (NPTEL)*, Module2-Gears,
lecture 7- Spur Gear Design.
- [14] I. Boiadjiev, J. Witzig, T. Tobie and K.Stahl, (2015) "Tooth Flank
Fracture – Basic Principles and Calculation Model for a Sub-Surface-
Initiated Fatigue Failure Mode of Case-Hardened Gears" *Gear
technology*, USA, August, p 58-64.
- [15] W.H.Dornfeld (2018) "Gear Tooth Strength Analysis" *Scribd*.

[16] Richard G. and J. Keit , "Shigley's Mechanical Engineering Design" 9th,
The McGraw-Hill Companies, New York, USA ,Chapter 14 Spur and
Helical Gear.

[17] Osama A, (2014) " Analysis of Spur and Helical Gears factors"
University of Jordan Faculty of Engineering and Technology
Mechanical Engineering Department, Jordan.

[18] <http://arab-ency.com.sy/detail/7126>

الدراسات المرجعية :

- (1) A Kapelevich, (2000) “Geometry and design of involute spur gears with asymmetric teeth “, *Elsevier* , Volume 35, Issue 1, Pages 117-130
- (2) A Kapelevich, Y Shekhtman , (2009) “ Tooth fillet profile optimization for gears with symmetric and asymmetric teeth “, *Gear technology* ,USA, September/October 2009 , p 73.
- (3) S Poluru , V Pandey , (2017) “Improving The Bending Strength of Spur Gear Tooth Through Profile Modification Using CAD “ *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, India ,ISSN (P): 2249-6890; ISSN (E): 2249-8001 Vol. 7, Issue 4, p 39-48 .
- (4) T G Yılmaz, F Karpat, (2018) “Influence of Root Geometry on Bending Stress for Involute Spur Gears “ *Proceedings of the 4th World Congress*