مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (33) العدد (5) 2011
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (33) No. (5) 2011

النمذجة والمحاكاة للأخطاء الحركية في المسننات الدودية وطرق تصحيحها

د. محمد زهرة*

(تاريخ الإيداع 26 / 6 / 2011. قُبِل للنشر في 28 / 8 / 2011)

□ ملخّص □

تصف هذه الدراسة عمليات قياس مصادر الخطأ في المسننات الدودية ، وتقييم تأثيرها من خلال تطوير نموذج حاسوبي من أجل محاكاة سلوك هذه المسننات ، ولهذا الغرض تم تصنيع العديد من المسننات الاختبارية ، ثم جرت مراقبة العملية من خلال عمليات قياس منظمة ضمن مراحل متعددة باستخدام بعض الأجهزة والمعدات ذات الحساسية والدقة العالية.

وتمت كتابة برنامج على الحاسب لتمثيل خواص هذه المسننات وأزواج المسننات الدودية ضمن شروط عمل مختلفة، وذلك بهدف كشف مصادر الأخطاء فيها ، وتحسين سلوك عمل هذه المسننات. وتم التأكد من هذه الاختبارات اعتماداً على معدات لقياس الدقة الدورانية للمحاور الداخلة والخارجة تحت تأثير حمولة عزم الفتل.

الكلمات المفتاحية: مسننات دودية، أخطاء حركية، نمذجة حاسوبية، محاكاة.

* أستاذ مساعد – قسم هندسة التصميم والإنتاج – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (33) العدد (5) 2011
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (33) No. (5) 2011

Modeling and Simulation of Kinetics Errors in Worm Gears and Their Correction Methods

Dr. Mohamad Zahra*

(Received 26 / 6 / 2011. Accepted 28 / 8 / 2011)

□ ABSTRACT □

This Study Describes The Measurement of Error Sources in Worm Gears and Evaluating Their Effects by Developing a Computer-Model to Simulate The Behaviour of These Gears. Test Gears Were Manufacturing The Process Was Monitored by Systematic Measurements Through Various Steps Using Specific Instruments With a High Sensitivily and Accuracy.

A Computer – Program Was Written to Simulate The Program of These Gears (in Pairs) in Different Working Conditions to Figure Out The Error Sources and to Improve The Behaviour of These Gears. These Tests Were Inspected Using Measuring Instruments For The Rotationl Accuracy of The Interal and External Under The Effects of Torsional Moment.

Keywords: Worm gears, Kinetics Errors, Modeling, Simulation**.**

* **Associate Professor - Production and Design Engineering Department – Faculty of Mechanical & Electronic Engineering - Tishreen University – Latakia – Syria.**

المقدمة:

يتم استخدام مسننات التعشيق الدودية الدقيقة في تصنيع أدوات وعدد تشغيل الآلات والطاولات الدوارة والروبوتات. وتتراوح درجة دقة الوضعية بين arc secs 15-7، ولكن هذا قد يتأثر بنوعية التصميم وشروط الإنتاج والتشغيل. لقد تم إجراء تحاليل وبحوث سابقة حول تصميم مسننات التعشيق الدودية خلال القرن الماضي [3], [4], [1], [2] على يد كثير من الباحثين ولا يزال البحث جاريا حتى الآن. ولكن تقييم الأداء كان يتم في كل مرة على أساس تجريبي، وقد تم التوصل إلى نتائج غير مؤكدة في حالات عديدة. ولقد ساعدت التحسينات التي طرأت على طاقة الحاسبات الالكترونية وتكنولوجيا صناعة الأدوات والمعدات الصناعية خلال السنوات الماضية على إجراء المزيد من الأبحاث والدراسات في هذا المجال. ولقد تم وضع برامج للأبحاث في جامعات أوروبية كثيرة مثل جامعة هوديرسفيلد وغيرها...، للاستفادة من هذه التطورات. وكان الهدف هو فهم تأثير التصميم على خواص المسننات الدودية. وسنقوم هنا في هذا البحث من الاستفادة من البرامج المتطورة حاليا على الحاسب في كشف الأخطاء المحتملة كافة ، وتحسين سلوك هذه المسننات باستخدام هذه البرامج [5]، [6]. ونشير هنا إلى أنه تم إجراء البحث في مخابر كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة تشرين في الفترة من 15 / 7 / 2010 حتى 25 /5 /2011.

أهمية البحث وأهدافه:

إن من المسائل الهامة التي يجب معالجتها في المسننات تلك الأخطاء الناتجة عن نقل الحركة، حيث يتم بشكل عام تقييم المسنن الدودي عن طريق معاينة نمط تعليم أو أثر التلامس التي تشير إلى أن شروط الدخول والخروج كافية لعملية تزييت الأسطح. لكن هذه الطريقة لا تتميز بالحساسية الكافية لاستخدامها في تطبيقات ذات درجة عالية من الدقة، نظراً لقابلية إنجاز شروط مقبولة بطرق متعددة وبدرجة دقة مختلفة. وفي كل مرة قام عدد من الباحثين بتطوير فكرة وقياس أخطاء نقل الحركة خلال الفترة الماضية في المسننات الأسطوانية [7]، والتي يمكن تطبيقها كذلك على أي شكل من أشكال المسننات.

ويمكن تعريف خطأ نقل الحركة على أنه (خطأ وضعية الخرج لمحور أو عمود المسننات من أجل وضعية محددة لمحور الدخل منسوبة إلى نسبة التعشيق). يمكن قياس هذا عن طريق تركيب أجهزة قياس ذو شاشة مراقبة لقياس الوضع الزاوي على أعمدة الدخول والخروج لصندوق مسننات اختباري وربطها مع الحاسب. بهذه الطريقة يمكن تحقيق قيم دقة دوران تصل إلى 0.3 arc secs. ومع أن خطأ نقل الحركة هو مقياس لدقة التوضع لمجموعة مسننات التعشيق ،ولكن تبين من البحث أنه يمكن ربط عدم دقة التوضع هذه مباشرة بالتشويش والاهتزازات [8]. ومن أجل تحسين أي من هذه المجالات، بجب تأكيد كافة التأثيرات الناتجة عن عناصر المسننات الدودية.

إن الطبيعة الهندسية لهذا النوع من المسننات من ناحية الشكل يتطلب عدة مئات من العمليات الحسابية لإجراء عملية تحليل أساسية لها. وحين تشترك هذه الطبيعة الهندسية مع حساسية الأخطاء نسبة إلى تسامحات التشغيل يجعل من الصعب توقع حتى أبسط التغيرات الخفية في التصميم، الأمر الذي يجعل من الضروري إنتاج مسننات التعشيق الدودية وعدد تشغيل الآلات على شكل أزواج مسننات بشكل متميز جداً. وتكمن أهداف البحث وأهميته في الوصول إلى هذا الإنتاج المتميز لهذه المسننات وتقييم أدائها، وذلك من خلال إنشاء نموذج حاسوبي للتكهن بمصادر الأخطاء وفهم سلوك هذه المسننات تحت تأثير جملة من الشروط المحددة.

طرائق البحث ومواده:

إن طريقة البحث ومواده تعتمد على مجموعة من التجارب تتضمن تصنيع عدد من المسننات ثم إجراء عمليات قياس متكررة باستخدام أجهزة قياس عالية الدقة والحساسية بهدف معرفة الأخطاء الناتجة عن حركة المسننات، ثم إيجاد نموذج حاسوبي لمحاكاة عملية تصحيح الأخطاء وذلك باستخدام برامج حاسوبية متطورة، بالإضافة إلى الاعتماد على مراجع علمية متخصصة ، وبحوث علمية منشورة في مجلات عالمية في هذا المجال.

النتائج والمناقشة:

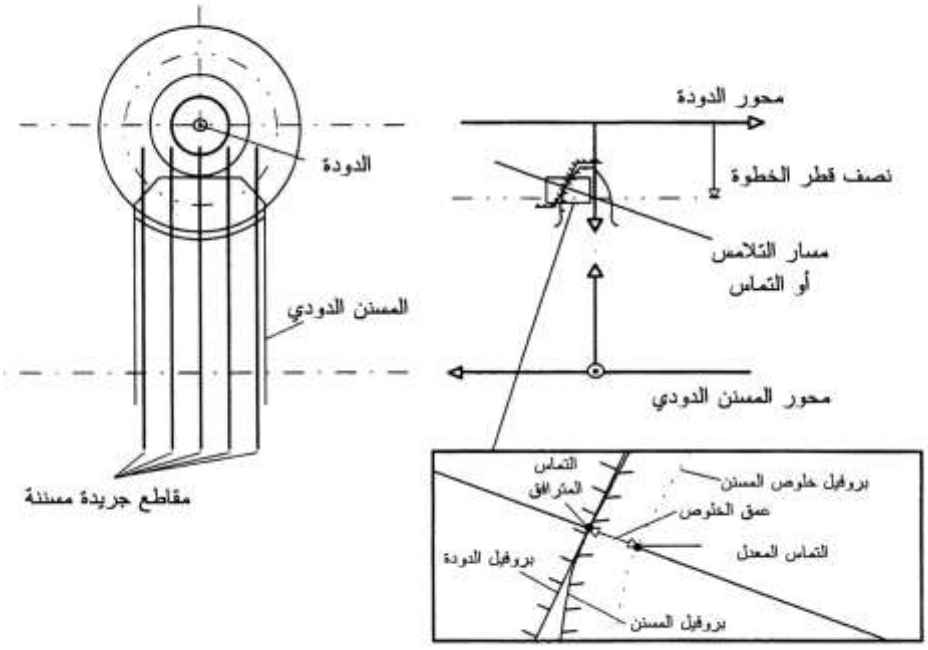
بعد إجراء مجموعة من التجارب على المسننات المصنعة تم تحديد مصادر الخطأ في هذه المسننات كما يلي:

1-أخطاء التصميم

يستند التصميم على تعديل قاطع Cutter المسنن الدودي (المسنن المقاد) والمعروف باسم (عدم التوافق). والذي يؤدي للأخذ بالاعتبار المسار ونصف قطر القاطع أو المقطع والبروفيل الانفليوتي (الالتفاف الداخلي) نسبة إلى أبعاد الدودة (المسنن القائد). كل هذه البارمترات قابلة للتغيير مع حدوث ميلان خفيف لمحور القطع بالنسبة إلى محور التشغيل.

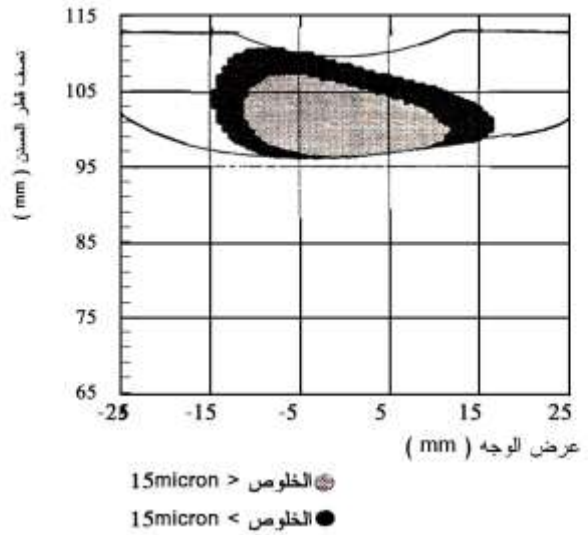
وفي حال عدم الحاجة لإدخال تعديلات ستكون أداة القطع نسخة عن سن الدودة والتلامس بين الدودة والمسنن الدودي (الدولاب) وهو ما نسميه الاقتران أو التعشيق. ومن الناحية العملية نعتبر عملية التعديل المدروسة أساسية للتصميم، وذلك لتأمين عملية تزييت أسطح التلامس، ولكن إذا فعلنا ذلك يتعرض أي تصميم للمسننات الدودية لخطأ نقل حركة. ولأجل التحليل يتم تقسيم مجموعة المسنن الدودي إلى مقاطع متعددة من مسنن وجريدة مسننة مكافئة كما هو مبين على الشكل (1).

من أجل كل مقطع جريدة مسننة يمكن حساب اختلاف وضعية عدم التطابق والتعشيق للأسنان على طول مسار التلامس. وهذه هي القيمة الرئيسية للخلوص، وتمثل مقدار المعدن الذي سيتم إزالته نسبة إلى سن مسنن التعشيق لمقطع نظامي من أجل وضعية زاوية عشوائية كما في الشكل (1)



الشكل(1) مخطط يوضح مقاطع جريدة مسننة نموذجية في مسننات دودية وتأثير الخلوص في مقطع تقليدي.

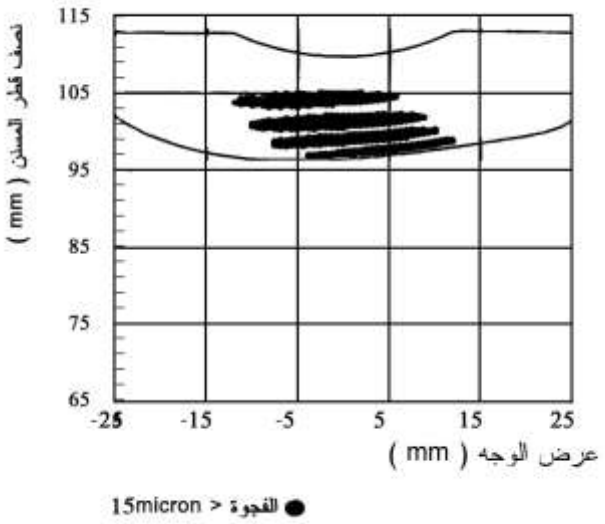
ومن حساب قيم الخلوص في كل مقطع جريدة مسننة لسلسلة وضعيات زاوية من خلال زاوية القطع يمكن توضيحه بمخطط خلوص توبولوجي [9] (توبولوجي: أي دراسة الخصائص الهندسية التي لاتتاثر بتغير الحجم أو الشكل) فوق سن المسنن كما في الشكل(2).



الشكل(2) مثال على مخطط خلوص توبولوجي ذي عمق كونتور (خطوط مستقيمة تبين الارتفاعات المتساوية) لتصميم نموذج لمسنن تعشيق.

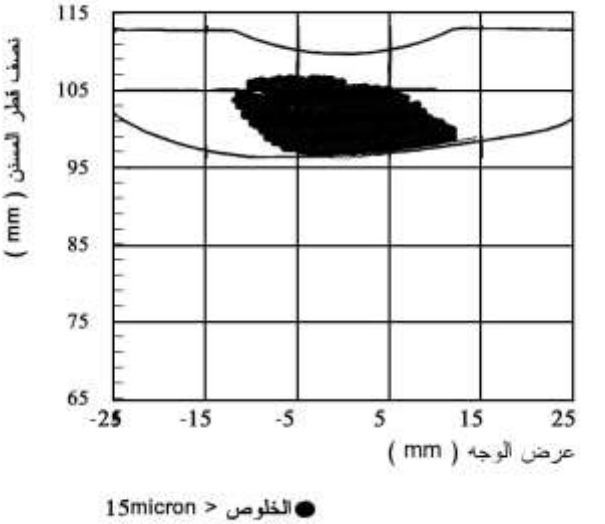
في كل وضعية زاوية يكون مقطع الجريدة المسننة ذات قيم الخلوص الأقل ملامسة وتصبح وضعية التلامس المرافقة المعدلة خطأ لنقل الحركة. ومن حساب هذا التأثير في سلسلة من وضعيات زاوية من خلال تعشيق الأسنان يمكن وضع مخطط بياني لخطأ نقل الحركة. وبعد تحديد خطأ نقل الحركة يمكن فحص شروط التلامس. ولأجل أية

وضعية زاوية يمكن حساب الفجوة بين الجوانب المترافقة. ويمكن أن نوضح مثالاً على هذا كما في الشكل (3) حيث تم إجراء عملية حساب الفجوة في أربع وضعيات زاوية.



الشكل (3) مثال على حسابات الفجوة الجانبية لدودة ومسنن دودي في أربع وضعيات زاوية لمسنن نموذجي.

وبعد إعداد سلسلة من هذه الحسابات عن طريق دورة التعشيق يمكن إيجاد قيمة الفجوة الدنيا– أي قيم الخلوص– عند كل نقطة من سطح سن المسنن. ويبين الشكل (4) مثالاً على مخطط الخلوص لمناطق سن المسنن مع تحديد قيمة الخلوص المحددة، وذلك من أجل تقييم فعالية التزييت. وهذه هي عملية مكافئة لإجراء اختبار تعليم أو أثر التلامس.



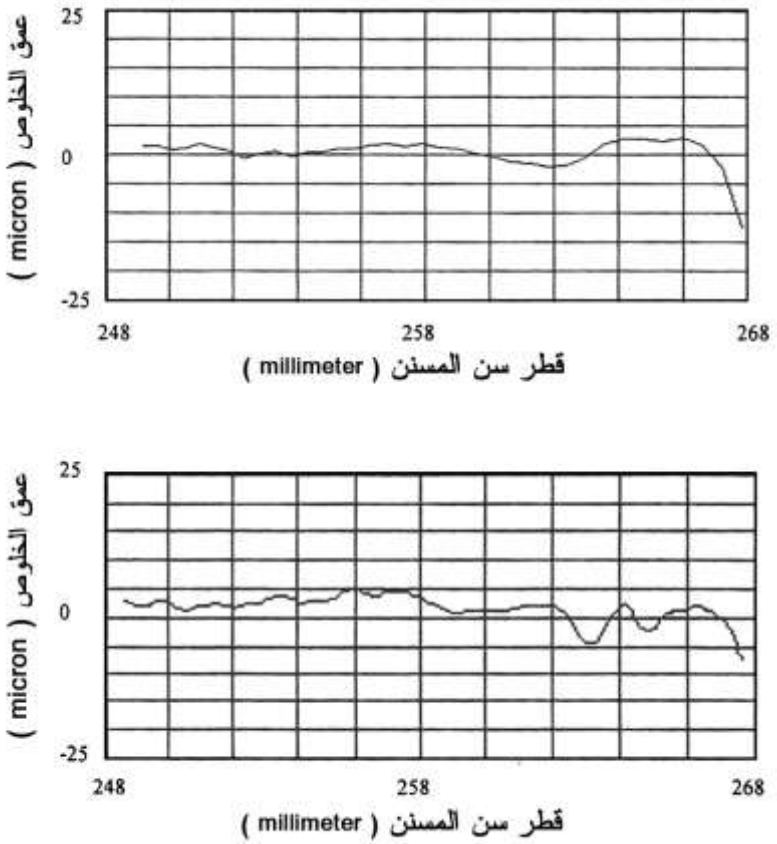
الشكل(4) مثال على مخطط الخلوص لتصميم مسنن نموذجي.

يؤدي تبديل بارامترات التعديل لتغيير حجم ووضعية الخلوص وبالتالي حصول التلامس. والغرض من ذلك هو تركيز التلامس على منطقة معينة من سن المسنن. إن عملية إنتاج مجموعات المسننات الدودية الدقيقة هو إجراء

سلسلة من عمليات التوافق بين شروط التزييت الكافية والصحيحة ، ودقة الحركة الدورانية [10]. من أجل تطبيق معين عن طريق تبديل بارامترات التعديل يتم تحقيق مجالات خطا نقل حركة نظرية بحدود 1–2 ميكرون، مع توفر استمرار شروط تماس أو تلامس مقبولة.

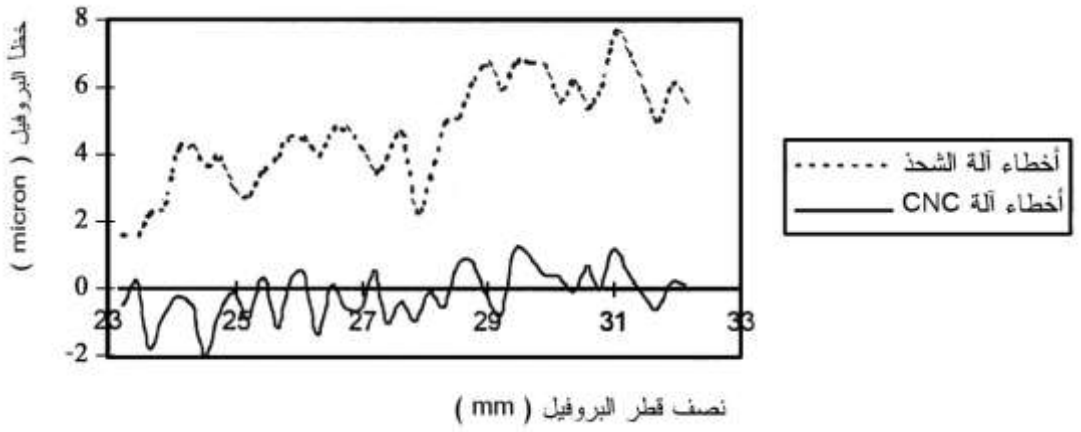
2– أخطاء التصنيع:

تعتمد الدقة النهائية لعمل مجموعة المسنن على قدرة آلات التشغيل على إعادة إنتاج التصميم النظري بشكل دقيق. ومثال على هذه الحالة هو خطأ البروفيل في آلة قطع المسنن. حيث يبين الشكل (5) مقارنة بين أخطاء بروفيل سن المسنن الافتراضية والمحسوبة باستخدام بروفيلات أداة قطع مسنن مقاسة، مع أخطاء البروفيل من قطع مسنن دودي (الدولاب) منجزة بواسطة هذه الأداة. وهذا يبين لنا أنها قد انتقلت مباشرة إلى بروفيل المسنن الدودي (الدولاب) حتى 1–2 ميكرون. وفي معظم الحالات يمكن لأخطاء البروفيل أن تتغلب على التماس أو التلامس وتسبب حدوث أخطاء نقل حركة. وطبعاً من الأفضل الحصول على بروفيلات أكثر دقة.



الشكل (5) المقارنة بين أخطاء بروفيل المسنن الدودي المقاسة والافتراضية (المتوقعة) من أداة قطع تم إنتاجها باستخدام آلة تسوية وجلخ قاطعة.

إن استخدام آلة جلخ قاطعة نظامية يمكن أن يعطي هذه البروفيلات حتى حدود ± 10 ميكرون من الشكل الأصلي. وتستطيع آلات القطع طراز CNC أن تدخل تحسينات على سلسلة بروفيلات الإنتاج حتى ± 2 ميكرون. ويبين الشكل (6) أمثلة على أخطاء البروفيل قي آلة قطع تم إنتاجها باستخدام آلة جلخ قاطعة ،وآلة قطع CNC.

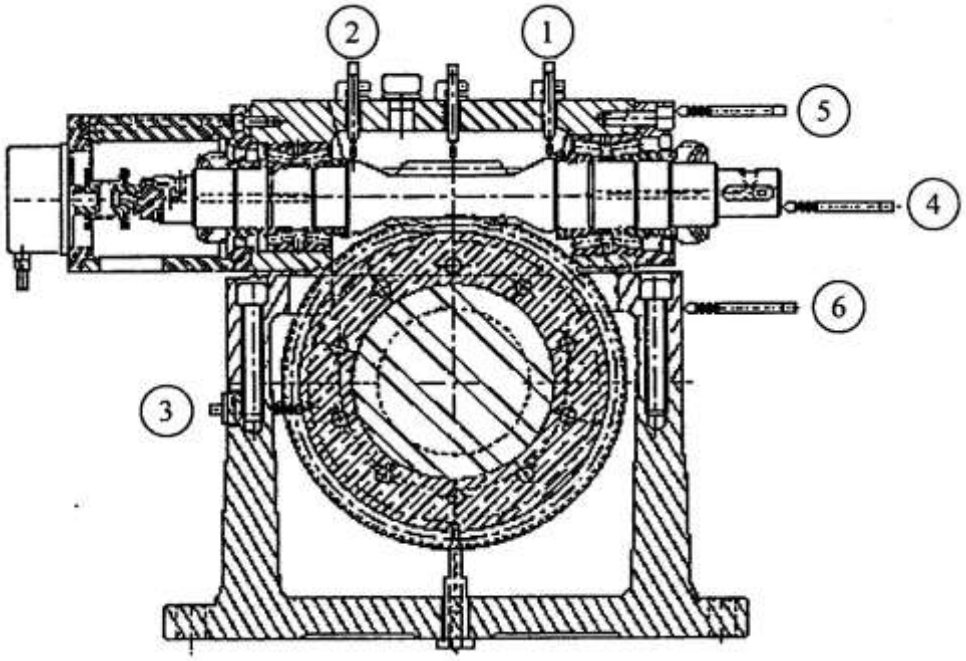


الشكل (6) مخطط أخطاء البروفيل في آلة قطع مسننات منتجة باستخدام آلة جلخ أو شحذ مع آلة قطع نظامية CNC.

إن مصادر الخطأ الرئيسية الأخرى موجودة في مسار المسنن الدودي الذي يحدد الشكل اللولبي للمسنن الدودي، وخطوة سن المسنن التي تحدد المسافة الزاوية. وهذه غالباً تنتج عن طريق أخطاء عمل مسنن آلة التشغيل التي تحدد نسب التلقيم أو التغذية. إن نموذج المسنن الدودي المصنع بواسطة الجلخ والتسوية يجب أن يحقق قيم دقة بروفيل عالية، والعمل على إبقاء أخطاء المسار ضمن حدود ± 4 ميكرون لكل 100 مم من سن اللولب. ويمكن المحافظة على أخطاء الخطوة بحدود ± 3 ميكرون بين الأسنان المتجاورة.

3- أخطاء التجميع:

إن تراصف (محاذاة) مجموعة المسننات داخل الصندوق يمكن أن يسبب حدوث تبدلات صغيرة في قيمة أخطاء نقل الحركة، وهي تترك تأثيرات أكبر في شروط تلامس الدخول والخروج. يحدث الانحراف (سوء التراصف) بسبب وجود تسامحات تسوية في الأسطح المقارنة المرجعية أو عن طريق الحركة النصف قطرية في المحامل مما يسبب حدوث انحراف في الأربطة (الأعصاب) المرجعية المصنّعة لعناصر الدودة والمسنن الدودي. يمكن استخدام مقاييس تحريضية خطية لتحديد هذا التأثير. ويبين الشكل (7) مجسات (أجهزة القياس) (1) و(2) التي تكشف وترصد الحركات في الأربطة المرجعية للمسنن الدودي والمجس رقم (3) الذي يقيس الحركة في أربطة المسنن الدودي المرجعية.ويتم استخدام مجموعة مماثلة من مجسات القياس متعامدة مع المقاييس الأخرى وظيفتها مراقبة التبدلات الجانبية في المجموعة.

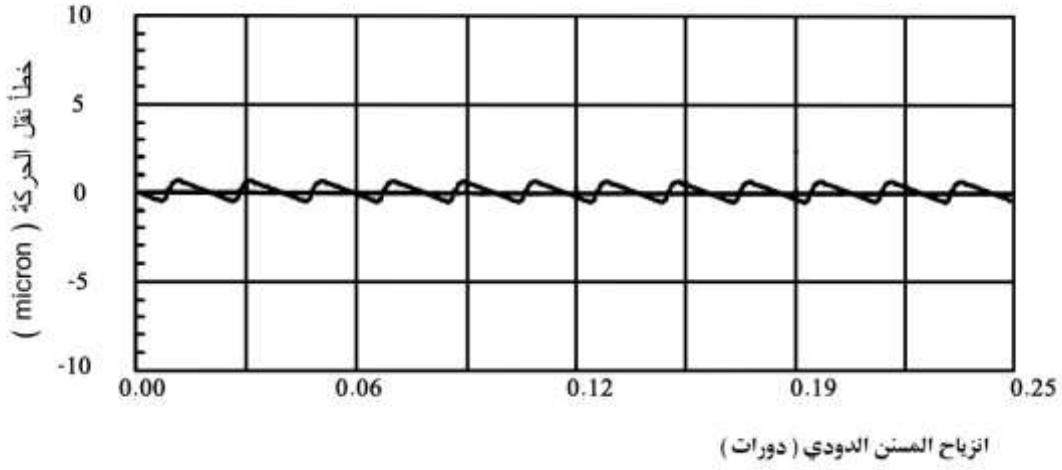


الشكل (7) مخطط نقاط لقياس ومراقبة انحراف التجميع واختبار حركة الصندوق تحت تأثير الحمل.

4- أخطاء الانحراف:

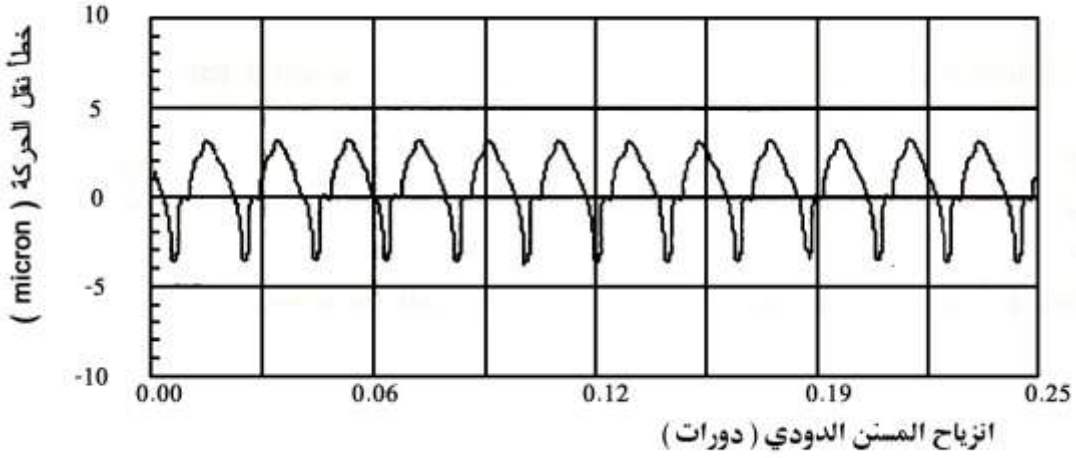
تتعرض الأسنان للتشوه بتأثير الانضغاط والانحناء حين يتم تطبيق حمل عزم دوران على مجموعة المسننات. ويؤدي تبدل شكل الأسنان وتشوهها إلى تبدل نقاط التماس وحدوث أخطاء نقل حركة مباشرة. كذلك تحدث الحركة بشكل محوري في المحامل وفي هيكل صندوق المسننات. وينتج عن تبدل وضعية الدودة بالنسبة للمسنن الدودي أو الدولاب المسنن أخطاء نقل حركة تكشفها وحدات ترميز القياس (Encoders)، حيث يمكن استخدام نتائج عمليات القياس من أجل تقييم هذا التأثير. ويبين الشكل (7) جهاز القياس (4) الذي يقوم بمراقبة الحركة في محور المسنن الدودي محورياً، وجهاز القياس (5) يشير إلى حركة علبة المسنن الدودي، ولكن جهاز القياس (6) يراقب وضعية غطاء المسنن الدودي. يمكن حساب الحركة الصافية للمسنن الدودي اعتماداً على هذه النتائج. وعندما يتم طرحها من نتائج خطأ نقل الحركة الكلي يحدث تأثير تشوهات الأسنان.

وبالاعتماد على نتائج التجريب والقياس للأخطاء تم تصميم (نموذج) بتطوير برنامج على الحاسب من أجل حساب تأثيرات البارامترات في تصميم المسنن الدودي وتم بعد ذلك توسيع العملية كي يسمح بعملية التحليل بما فيها مصادر الخطأ. وتم استخدامها بعد ذلك من أجل معرفة خواص العديد من مجموعات المسننات الإنتاجية، وكلها تعتمد على تصميم بنسبة نقل 50:1 ومركز تشغيل 152 مم. ويبين المخطط البياني على الشكل (8) المحاكاة الرياضية بواسطة الحاسب لخطأ نقل الحركة النظري على أساس الحسابات المأخوذة من أحد مواصفات التصميم.



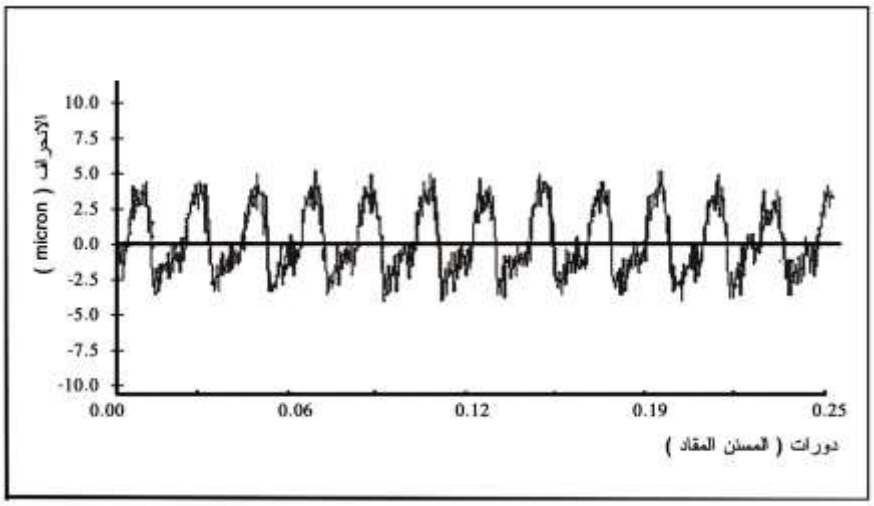
الشكل (8) خطا نقل الحركة النظري من اجل اختبارتصميم المسنن الدودي.

لقد تم تصميم مجموعة مسننات وإنتاجها اعتماداً على هذه المواصفات، وتم تسجيل العديد من مصادر الخطأ مثل أخطاء بروفيل أداة القطع للمسنن بحدود 7 ميكرون– خطأ الانحراف في الدودة والمسنن الدودي 5 ميكرون– خطأ انحراف مركز التشغيل 5 ميكرون.أضفناها إلى البرنامج الحاسوبي، وقمنا بحساب القيمة المفترضة (المتوقعة) لخطأ نقل الحمولة، وحصلنا على النتائج المبينة على المخطط البياني للشكل (9).



الشكل (9) حساب خطأ نقل الحمولات المفترضة (المتوقعة) لمجموعة اختبار مسنن دودي.

وبعد ذلك تم إجراء عملية اختبار على مجموعة مسنن كامل (منجز)، وذلك للحصول على مخطط أخطاء نقل الحركة المقاسة، والنتائج موضحة على المخطط في الشكل (10). وذلك لمقارنتها مع النتائج المحسوبة من خلال المخطط المبين على الشكل (9).



الشكل (10) أخطاء نقل الحركة المقاسة في مجموعة مسنن دودي انتاجي.

الاستنتاجات والتوصيات:

من المخططات السابقة نتوصل إلى عدة استنتاجات هي:

- يتبين من نتائج الشكل (8) أنه يمكن إنتاج التصاميم النظرية بدرجة دقة عالية نسبياً, وبمقارنة هذا مع النتائج المفترضة (المتوقعة) للشكل (9) نستنتج أن وجود نسبة اختلاف ضئيلة يمكن أن تزيد وتضخم خطأ النقل. ورغم هذا إذا كنا نعرف عدد مصادر خطأ كافية عندئذ يمكن استخدام نموذج حاسوبي لتوقع أخطاء الخواص العائدة للمسنن الدودي بالميكرون الواحد كما هو واضح من مقارنة الشكل (9) مع الشكل (10).
- إن الارتباط الجيد بالنسبة لهذه النتائج يسمح لنا بأن نعتبر النموذج الحاسوبي على شكل أداة نستخدمها لاستقصاء تأثيرات تعديل التصميم أو لتحديد أي مصدر خطأ (التي هي أكبر تأثيراً لتحديد الخطأ) بدون الحاجة إلى نفقات إنتاج عالية.

المراجع:

1- ALENE, E– Theory and Problem 0f Machine Design, Hall ,GR, M.S.M.E., Sepore, 1983, 1300p.

2- BERNARD J. H –BO O.J –STEVEN R.S- Fundamental of Machine Element, McGraw –HILL Companies, Notre Dame, 1999, 936p.

3- COLBOURNE, J,R- The Use of Oversize Hobs To Cut Worm Gear, AGMA paper89 FTM8 1989.

4- ZHANGE, F- HU, J- An Improved Kinematic Method, Proc of 5th International Conference of CAPE, Edinburgh, UK, 1989, pp232-239.

5- Melamed, B- Simulation Modeling and Analysis, Academic Press, ISBN: 01237055231, Australia, 2007, 440p.

6- LAURENE, V.F- Applied Numerical Analysis Using MATLAB, Prentice HALL, ISBN: 0132397285, Australia, 2007, 673p.

7- MUNRU,R.G & YILDRIM, N- Some Measurement of Static and Transmission Errors of Spur Gear, New Castle Upon Tyne, 1994, pp371-376.

8- PULMAR, D. & MURNO, R.G.- Measurement of Transmission Error Vi bration And Noise in Spur Gear, British Gear Association Conference , Sheffieled, Technical Paper, November 1995.

9- JANNINCK, W.I,- Contact Surface Topology of Worm Gear Teeth, AGMA paper 87 FTM14, 1987.

10- Goldfarb, Lunin, Truboczev," Advanced computer Modeling Technique in Gear Engineering", ASME Design Engineering Technical Conference, September 2-6, Chicago, 2003.