

دراسة تأثير التنقر التآكلي على السلوك الستاتيكي والديناميكي لنقل الحركة بالمسننات المستقيمة والحلزونية

د. ثائر عثمان *

(تاريخ الإيداع 2023/5/2 . قُبل للنشر في 2023/10/22)

□ ملخص □

يهدف هذا البحث إلى دراسة ونمذجة تأثير ضرر التنقر على السلوك الستاتيكي والديناميكي لنقل الحركة بالمسننات ذات الاسنان المستقيمة والحلزونية، وذلك من خلال دراسة تأثيرها على توزيع وقيمة الحمل من جهة، وعلى أخطاء النقل من جهة أخرى. لأجل هذا الغرض، فقد تم تطوير نموذج ديناميكي ثنائي درجة الحرية بالفتل لنقل الحركة بالمسننات، مع تحديد موقع نقاط التماس بين اسنان المسننات في كل لحظة زمنية. معادلة الحركة لهذا النظام تكون محللة خطوة بخطوة مع الزمن بالاعتماد على خوارزمية التماس العادي وطريقة نيومارك. تشير النتائج على أن التنقر يغير بشكل كبير من السلوك الديناميكي للمسننات من خلال تأثيره على مستويات التحريض والاهتزازات من جهة، وعلى قيم التحميل الديناميكي من جهة أخرى.

كلمات مفتاحية: التنقر - نقل الحركة بالمسننات - سلوك ديناميكي - أخطاء النقل - صلابة التعشيق.

Study of corrosion pitting effects on static and dynamic behavior of spur and helical geared transmission

Dr. Thaer OSMAN *

(Received 2/5/2023 . Accepted 22/10/2023)

□ ABSTRACT

This article aims to study and simulate the influence of contact pitting on static and dynamic behavior of spur and helical geared transmission, by studying its influence on the values and distribution load and the transmission errors. For this propos, a dynamic model is developed to geared transmission with two degree of freedom in torsion with defining the position of contact points at each time-step. The equations of motion are solved by combining a time-step integration algorithms with several iterative and Newmark's method. The results show that pitting greatly affects on oscillation levels and vibration between the gears teeth on one hand, and on dynamic load values on the other.

Key words: pitting - gears transmission - dynamic behavior – transmission errors - mesh stiffness.

¹ . Associated Professor, Faculty of Technical Engineering – Tartous University – Syria.

1. مقدمة:

تعتبر المسننات من أكثر ميغانيزمات نقل الحركة استخداماً، لما تمتلك من خصائص وظيفية مفيدة جداً، وخصوصاً عندما يتعلق الأمر بنقل عزوم دوران عالية، زيادة سرعة الدوران أو إحداث تغيير في اتجاه حركة الدوران. من جهة أخرى، تعبر من أكثر العناصر تضرراً في جمل نقل الحركة حيث تتوضع 60% من العيوب (التعب (fatigue) - التقر (pitting) - الاهتراء (wear)) على المسننات كما تشير الإحصائيات على أسباب الفشل وتوضع العيوب في الأنظمة الميكانيكية [1]، والتي تؤثر على أدائها ومردودها من جهة، وعلى فترة عملها من جهة أخرى، وذلك نتيجة لطبيعة التماس بين سطوح أسنانها، حيث تمتلك حركة نسبية مركبة من الانزلاق (sliding) والدوران (rolling) في آن واحد ضمن شروط التحميل المتكرر. حيث يعتبر التقر (pitting)، إحدى المشاكل الرئيسية في المسننات، والذي يترافق بفقدان جزء من المعدن ويرتبط حدوثه بمجموعة كبيرة من العوامل الوظيفية (الحمل الزائد، ظهور الإجهادات المماسية...) والعوامل التصميمية (درجة إنهاء السطوح، الخشونة) [2-4]. لقد أجرت العديد من الدراسات في المراجع العلمية لوصف ضرر التقر على اسنان المسننات من خلال تقديم نماذج حاسوبية أو دراسة تجريبية من جهة، وعلى دراسة تأثير البارامترات الوظيفية والتصميمية على سرعة انتشاره و تزايد مساحته من جهة أخرى [4-5]. بينما تعتبر الدراسات المتخصصة في موضوع فهم التأثير المتبادل بين هذا الضرر والسلوك الديناميكي لنقل الحركة بالمسننات قليلة نسبياً من جهة، ولا تزال مجزأة ولا توفر على وجه الخصوص منهج عام يمكن أتباعه لوصف هذا التأثير المتبادل من جهة أخرى. حيث تقتصر هذه الدراسات على شروط التحميل شبه الساتاتيكي (semi-static)، أو دراسة تأثير شروط التحميل الوظيفية، وأهملت لحد كبير تأثيره على السلوك الديناميكي وخصوصاً للمسننات ذات الاسنان الحلزونية، حيث اقتصرت مجمل الدراسات على دراسة هذا التأثير للمسننات ذات الاسنان المستقيمة. [6-9].

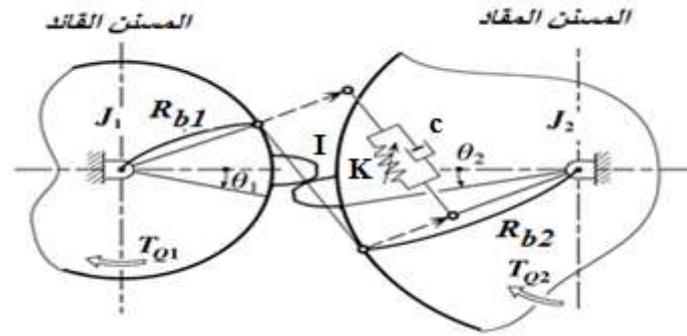
2. أهمية البحث وأهدافه:

في هذا المقال، تم تقديم دراسة تحليلية لتأثير ضرر (عيوب) التقر على السلوك الساتاتيكي والديناميكي لنقل الحركة بالمسننات المستقيمة والحلزونية، وذلك من خلال تأثيره على أخطاء النقل، والتي تعتبر كمقياس هام في تحديد مقدار التحريض (تناقص صلابة التعشيق) ومستوى الاهتزازات في المسننات، بهدف امتلاك المعلومات اللازمة التي تمكننا من فهم طبيعة التأثير المتبادل بين هذه العيوب ونقل القدرة بالمسننات. ولتحقيق هذا الهدف تم بناء نموذج ديناميكي للمسننات باستخدام درجتي حرية في القتل (للمسنن القائد والمقاد). حيث تم اعتبار أجسام المسنن القائد والمقاد قابلة للتشوه ومقسمة إلى عدد كبير من الشرائح الرقيقة، وأن خطوط التماس تتحرك ضمن نافذة العمل بسرعة خطية، بهذه الطريقة نستطيع وصف الخسارة في مادة المسننات نتيجة للتقر بدقة في كل نقطة تماس بين سطوح أسنان المسننات، وتحديد النقاط والمساحة من سطح السن الذي تعرض لضرر التقر.

3. مواد وطرائق البحث:

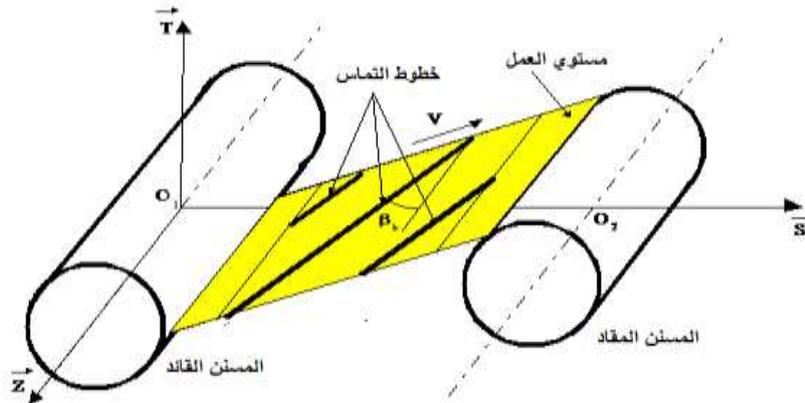
1-3. النموذج الديناميكي لنقل الحركة بالمسنتات:

النموذج الديناميكي للمسنتات المستخدم في هذه الدراسة هو نموذج ديناميكي ثنائي درجة الحرية في الفتل (two degrees of freedom in torsion), الشكل (1). يعتمد هذا النموذج على بارامترات الكتلة وعزوم العطالة J للمسنت القائد (pinion) والمقاد (gear) - التخميد والنوابض. وبالتالي فالسلوك الديناميكي للمسنتات سيتحدد من خلال الفتل لكلا المسنين (θ_1 : للمسنت القائد و θ_2 للمسنت المقاد). من جهة أخرى, سنعتبر المسنت القائد والمقاد مكافئين لاسطوانتين في طور التعشيق, ونتيجة لذلك فإن شروط التماس بين أسنان المسنتات ضمن نافذة العمل تكون موصوفة بالاعتماد على صلابة التعشيق $k(t)$ وقيم التخميد c اللزج الناتج عن وجود التزييت بين أسنان المسنتات.



الشكل(1): النموذج الديناميكي للمسنتات ثنائي درجة الحرية

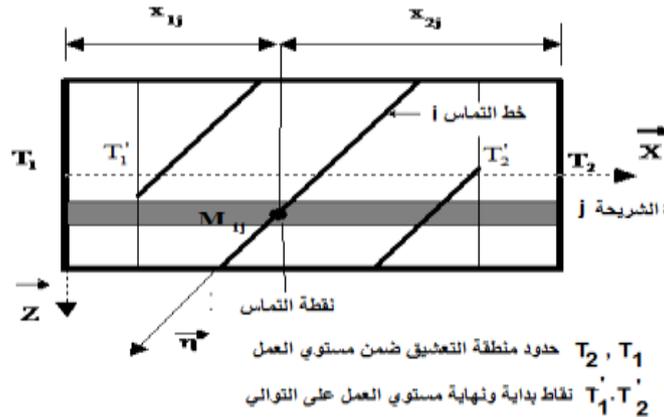
وبالاعتماد على شروط التعشيق بين المسنتات, فإن نقطة التماس على أسنان المسنتات ستتحرك مع الزمن على طول البروفيل الفعال للسنت, كما أن التماس بين البروفيلات الفعالة لأسنان المسنتات هو تماس خطي, وأن خطوط التماس, والتي تميل بزاوية الحلزون β_b ضمن مستوي العمل, ستسحب على هذا المستوي بسرعة خطية مقارها V ($V = R_{b1} \omega_1$), كما هو موضح بالشكل (2). حيث أن R_{b1} نصف قطر قاعدة أسنان المسنت القائد و ω_1 سرعة دوران المسنت القائد.



الشكل (2): وصف هندسي للمسنتات

من جهة أخرى ومن أجل تحديد موضع نقطة التماس على بروفيل السن, سنفرض أن أجسام المسنتات مقسمة إلى عدد من الشرائح الاسطوانية الرقيقة ومحددة بالمؤشر j , الشكل (3). وبالتالي فإن موضع أي نقطة تماس ضمن

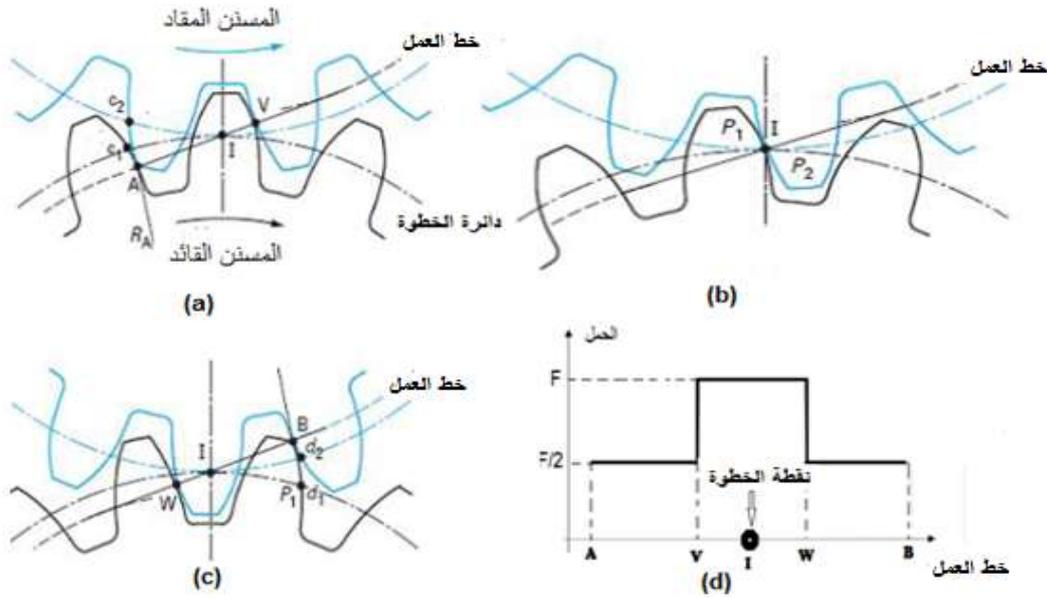
مستوي العمل ستحدد بالاحداثي z وفق M_{ij} (أ) يشير إلى رقم خط التماس في لحظة زمنية معينة و l : رقم الشريحة الرقيقة).



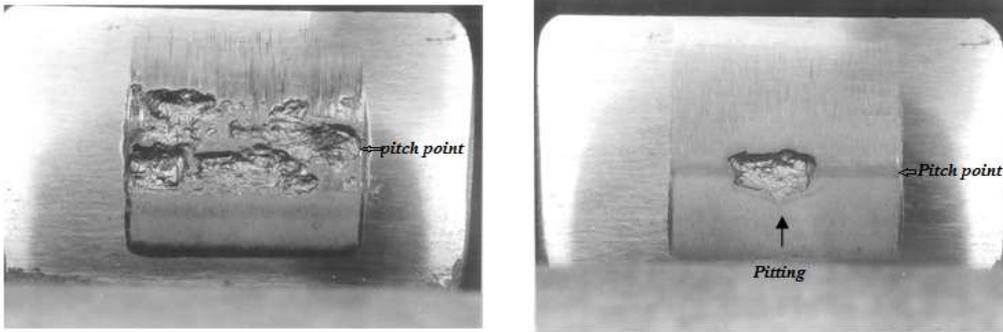
الشكل (3): وصف موقع نقطة التماس ضمن مستوي العمل

3-2. نمذجة التآكل على أسنان المسننات:

كما هو معلوم تصميماً، فإن البروفایل الفعال للمسنن القائد يتميز بثلاث نقاط أساسية، وهي نقطة بداية التصادم أو بداية التعشيق (النقطة A)، نقطة نهاية التعشيق (النقطة B) ونقطة الخطوة (النقطة I). إضافة لذلك، فإن التماس بين أسنان المسننات يكون متميزاً بعدد الاسنان في طور التعشيق، حيث تتغير من زوجين من الأسنان (زوجين على كل مسنن)، الشكل (4-a, c) إلى زوج واحد من الأسنان (سن على المسنن القائد مع آخر على المقاد)، الشكل (4-d). وعلى افتراض أن العزم المنقول بالمسننات ثابت القيمة على كامل بروفایل السن، فإن مجموع القوى المؤثرة على سطح السن يجب أن يكون ثابت. وبناء عليه، فإن القوى المؤثرة على بروفایل السن في مكان زوجين من الأسنان في طور التعشيق ستكون نصف قيمة القوى المؤثرة أماكن تواجد زوج واحد فقط من الأسنان، الشكل (4-d)، [10-11]. وبالنتيجة يمكننا القول، أن المنطقة الأخطر لنشوء ضرر التآكل على أسنان المسننات كما تشير إليه الدراسات التجريبية هي المنطقة المجاورة لنقطة الخطوة [10-12]، حيث تكون الحملية أعظمية مقارنة ببقية مناطق التعشيق على أسنان المسننات، الشكل (5). بالإضافة لذلك، وبناء على الجمعية الأميركية للمعادن (ASM) [12]، فإن نقاط التعشيق في المنطقة المجاورة لنقطة الخطوة تمتلك سرعة انزلاقية منخفضة جداً، قوى احتكاك مرتفعة، مع شروط ضعيفة لتشكيل سماكة تزييت ثابتة، مقارنة ببقية نقاط التعشيق على اسنان المسننات، مما يهيئ الشروط المناسبة لنشوء شقوق التعب الأولية التي تتطور وتنتشر مع تكرار الحملية ليتشكل ضرر التآكل في هذه المنطقة. كما ينشأ التآكل بداية على اسنان المسنن الصغير (المسنن القائد غالباً)، وذلك بسبب سرعة الدوران المرتفعة والتي ينشأ عنها عدد أكبر لتكرار الحملية خلال فترات زمنية قليلة نسبياً.



الشكل (4): طبيعة التحميل في مختلف نقاط التماس على أسنان المسننات



الشكل (5): منطقة ظهور التنقر على أسنان المسننات .

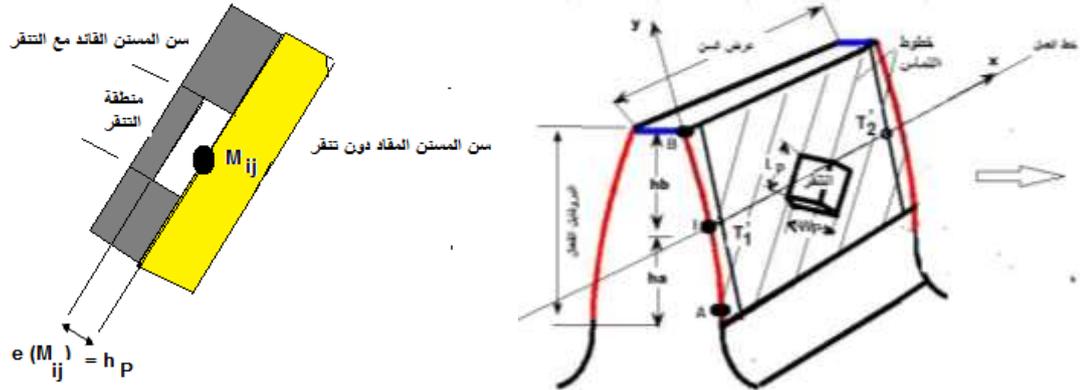
بشكل عام، يتم توصيف هندسية منطقة التنقر على اسنان المسننات على شكل مقطع مستطيل أو دائري، الشكل (6)، وذلك بناء على طرق النمذجة المقدمة في الدراسات المرجعية لوصف منطقة التنقر والتي تعتمد على الملاحظات التجريبية، [13-15]. في بحثنا هذا، سنعتبر منطقة التنقر تنشأ في المنطقة المجاورة لنقطة الخطوة مع توزع على شكل مقطع مستطيل الشكل، كما هو مبين في الشكل (7). واعتماداً على الجمعية الاميركية للمعادن، [12] ، سنعتبر أن التنقر ينشأ على السن الأول للمسنن القائد فقط (سن بداية التعشيق خلال مرحلة العمل) في منطقة نقطة الخطوة، وبما أن مستوي التعشيق بين أسنان المسننات تم توصيفه سابقاً على شكل شرائح رقيقة (j) مع خطوط تماس (i) ، فإن جميع نقاط التماس ضمن مستوي العمل المحدد بالنقاط $T_1'T_2'$ على السن المتضرر بالتنقر (يوصف بالتنقر بطوله L_p بالنسبة لعرض السن، وعرضه w_p بالنسبة لارتفاع السن ابتداءً من نقطة الخطوة) ضمن هذه المنطقة، ستملك خطأ نسبي في الشكل $e(M_{ij})$ قيمته تساوي عمق ضرر التنقر h_p في هذه المنطقة. أي أن:

$$e(M_{ij}) = h_p \quad (1)$$

وبناء على ذلك فإن هندسية الاسنان المتضررة في المنطقة المجاورة لنقطة الخطوة، ستتحرف عن القيم المثلى لشكل السن الابتدائي قبل حدوث التنقر، الشكل (7).



الشكل (6): طرق نمذجة منطقة التتقر على أسنان المسننات.



الشكل (7): نمذجة منطقة التتقر على اسنان المسننات

3-3: أخطاء النقل:

تعتبر أخطاء النقل أهم مؤشر لوصف سلوك للمسننات ضمن مختلف ظروف التحميل المختلفة، وتمثل هذه الأخطاء الفرق بين موضع المسنن المقاد، لأجل موضع معطى للمسنن القائد، بالنسبة إلى الموضع الذي سيشغله إذا كانت المسننات ذات شكل هندسي نظامي.. وتقسيم هذه الأخطاء إلى :

- أخطاء النقل دون وجود الحمل (No-load transmission errors): ويرمز لها بالرمز NLTE وهي الأخطاء الناتجة عن عملية التصنيع كأخطاء التراصف واللامركزية، أخطاء التصنيع، على سبيل المثال.
- أخطاء النقل تحت تأثير الحمل (transmission errors under load) ويرمز لها بالرمز TE والتي تنتج نتيجة لتغير موضع نقاط التماس عند السرعة الدورانية المنخفضة نتيجة للانحناء الاسنان تحت تأثير الحمل المنقول . وتعطى بالعلاقة التالية:

$$TE = x + NLTE = R_{b1} \cdot \theta_1 + R_{b2} \cdot \theta_2 + NLTE \quad (2)$$

حيث أن x : موجه درجة الحرية (الإزاحة) ، θ_1, θ_2 : درجات الحرية في الفتل حسب موقع المسنن القائد والمقاد (الرمز 1 يشير للمسنن القائد و 2 للمسنن المقاد). R_{b2}, R_{b1} نصف قطر دائرة القاعدة للمسنن القائد والمقاد على الترتيب .

3-4: معادلة الحركة للنموذج الديناميكي للمسننات:

تعطى معادلة الحركة للنموذج الديناميكي للمسننات بالاعتماد على ثابت الاخماد c والصلابة k ، وفق الشكل التفاضلي الآتي:

$$m_{tot} \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = F_s + \frac{F_e}{\cos \beta_b} \quad (3)$$

حيث أن :

m_{tot} : الكتلة الكلية المكافئة للمسنن القائد والمقاد, و k : ثابت صلابة التعشيق المكافئ للنموذج الديناميكي والذي يعطى بالاستناد على نظام ISO 6336، [11]، وفق الشكل التالي:

$$k = k_m(1 + a.g)\cos^2\beta_b \quad (4)$$

حيث أن k_m : ثابت صلابة التعشيق الوسطي . a : التغير النسبي في شروط التماس بين أسنان المسننات ($a < 1$) . g : ثابت يأخذ بعين الاعتبار جهة الدوران ويملك القيمة 1 أو -1 .

F_s : الحمل الستاتيكي المؤثر على المسننات وبحسب بالاعتماد على عزم المحرك TQ_1 ونصف قطر قاعدة الاساس للمسنن القائد Rb_1 وفق العلاقة التالية:

$$F_s = \frac{TQ_1}{Rb_1} \quad (5)$$

F_e : الحمل المؤثر بوجود الخطأ الناتج عن التغير في السطح الفعال للسفن ، نتيجة لضرر التنقر تبعاً لموضع نقطة التماس $e(M_{ij})$ ويعطى وفق الشكل التالي:

$$F_e = k.e(M_{ij}) = [k_m(1 + a.g).e(M_{ij})]\cos^2\beta_b \quad (7)$$

باستعمال علاقة التردد الطبيعي ω ، فإن الشكل النهائي لمعادلة الحركة يصبح وفق الشكل الآتي ، [11]:

$$\ddot{x} + 2.\zeta.\omega.\dot{x} + \omega^2(1 + a.g)x = \frac{F_s}{m_{tot}.\Omega_1^2} + \omega^2(1 + a.g).\frac{e(M_{ij})}{\cos\beta_b} \quad (8)$$

حيث أن: $\omega = \frac{1}{\Omega_1}.\cos\beta_b.\sqrt{\frac{k_m}{m_{tot}}}$

ζ : عامل الأخماد وتتراوح قيمته بين 0.02 ÷ 0.1 لنقل الحركة بالمسننات [16]

إن معادلة الحركة السابقة تكون محللة خطوة بخطوة مع الزمن باستخدام طريقة نيو مارك (Newmark) 1659 [17]، والتي تعتبر من أكثر الطرق استخداماً في إيجاد حلول للمشاكل الديناميكية، وتحليل معادلات الحركة لجمل النقل. خلال تحليل معادلة الحركة يجب التأكد من عدم وجود حمل سالب، وعدم وجود نقاط تماس تقع خارج مستوي العمل والمحدد بالنقاط. T_1T_2 ، الشكل (3). خلال كل خطوة من الزمن، فإن خطوط التماس تتزاح ضمن مستوي العمل، وبالتالي فإن نقطة التماس ستنتقل مع الزمن عبر خطوط التماس، ونتيجة لذلك، فإن الميزات الهندسية للمسننات (توزع الحمل - توزع الضغط - عرض منطقة التماس.....) ستكون متغيرة نتيجة لاختلاف موقع نقطة التماس على بروفيل أسنان المسننات. بالمقابل، عند تعشيق اسنان المسننات مع بعضها البعض خلال فترات التعشيق المتكررة ، يجب أن لا يحصل ضياع في الحمولة، أو أن تتناقص قيمة الحمل الديناميكي F_d المؤثر (الذي يمثل مجموع قوى التعشيق اللحظية لمختلف نقاط التعشيق الفردية ضمن مستوي العمل)، عن الحمل الستاتيكي، لأجل هذا الغرض، تم إدخال مفهوم معامل الحمولة الديناميكية الأعظمي CF_{dyn} ، [18] ، والذي يعطى بالعلاقة الآتية:

$$CF_{dyn} = \max\left(\frac{F_d}{F_s}\right) = \max\left(\frac{k.\cos\beta_b.x_d}{F_s}\right) \geq 1 \quad (9)$$

حيث أن x_d تمثل الازاحة الديناميكية المؤثرة خلال فترة التعشيق اللحظية بين أسنان المسننات، وتحسب بالاعتماد على الازاحة الستاتيكية x_s وموجه درجات الحرية للمسننات x ، وفق الآتي:

$$x_d = x - x_s = x - \frac{F_s}{k_m.\cos\beta} \quad (10)$$

من خلال هذه العلاقة يمكننا التحقق من صحة تحليل معادلة الحركة من جهة، والتأكد من عدم حصول ضياع أو تناقص في الحمولة الديناميكية على أسنان المسننات من جهة أخرى.

4. النتائج ومناقشتها:

يبين الجدول (1)، المعطيات الهندسية والوظيفية للمسننات المستعملة في هذه الدراسة.

الجدول (1): المعطيات الهندسية والوظيفية لجمل نقل الحركة بالمسننات

Z2=32 ، Z1= 20	عدد أسنان المسنن القائد والمقاد
b1 = b2= 15	عرض المسنن القائد والمقاد (mm)
4	المودول (mm)
15 & 0	زاوية الحلزون (درجة)
20	زاوية الضغط (درجة)
300	عزم المحرك (m.N)
m1= 1 m2=1.4,	كتلة المسنن القائد والمقاد (kg)
w1=100	السرعة الزاوية للمسنن القائد (rad/sec)

من أجل التحليل الديناميكي فقد استخدمنا 16 فترة تعشيق، بهدف الحصول على نظام مستقر لتعشيق المسننات وعدد التزايدات الكلية في الزمن تساوي 2048، وذلك بهدف التوصيف الدقيق لنقطة التماس خلال طور التعشيق بين أسنان المسننات. كما أن كل خط تماس ضمن مستوي العمل، تم تقسيمه إلى 80 قسم. وبما أن نقطة التماس بين أسنان المسنن القائد والمقاد تتحرك على طول بروفييل السن خلال الزمن، لأجل هذا فإن بروفييل أسنان المسننات سيكون موصوف بالنسبة: $\frac{t}{T_m}$. حيث أن t : الزمن و T_m فترة التعشيق. خلال الحساب يكون مقدار تزايد الزمن Δt يكون محسوب وفق العلاقة $\Delta t = \frac{T_m}{tt}$. حيث tt: عدد تزايدات الزمن خلال فترة التعشيق، يظهر الجدول (2) حدود منطقة العمل والتعشيق المحسوبة تبعاً للمعطيات الهندسية والوظيفية للمسننات. بينما أبعاد منطقة التنقر على سطح أسنان المسنن القائد موضحة في الجدول (3)، بحيث لا تتجاوز أبعاد هذه المنطقة عن $800 \mu m$ ، [19-20].

الجدول (2): بارامترات مستوي العمل للمسننات

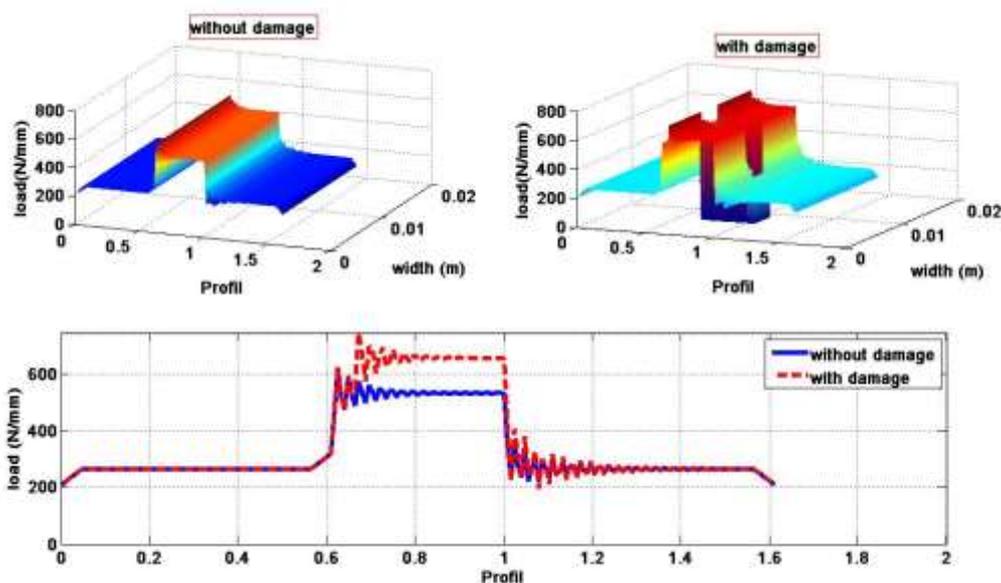
$T_1T_2 = \sqrt{(x_e)^2 - (rb_1 + rb_2)^2}$	0.03557m	x_e : البعد المركزي. r_a : نصف قطر دائرة الرأس r_b : نصف قطر دائرة القاعدة 1يشير للمسنن القائد. 2 للمسنن المقاد
$T_1T'_2 = \sqrt{(ra_1)^2 - (rb_1)^2}$	0.02287	
$T_2T'_1 = \sqrt{(ra_2)^2 - (rb_2)^2}$	0.03174	
$T_1T'_1 = T_1T_2 - T_2T'_1$	0.00383	
$T'_2T'_1 = T_1T'_2 - T_1T'_1$	0.01904	
tt	192	
t_m	0.01sec	
Δt	0.08333 sec	

الجدول (3): بارامترات منطقة التنقر على اسنان المسنن القائد

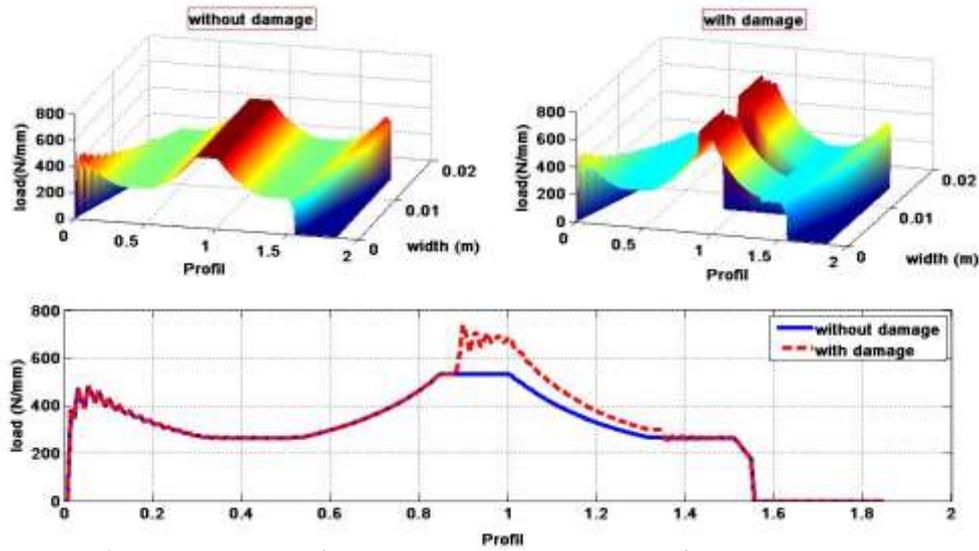
عدد الاسنان المتضررة	1 سن
رقم الاسنان	السن الأول للتعشيق
عمق منطقة التنقر	$h_p = 250 \mu m$
طول منطقة التنقر	$L_p = 750 \mu m < 800 \mu m$
عرض منطقة التنقر	$W_p = 500 \mu m < 800 \mu m$
مركز التنقر على بروفيل السن	نقطة الخطوة
مركز بداية التنقر بالنسبة لعرض السن	منتصف عرض السن

1-4: تأثير التنقر على توزيع الحمل:

يظهر الشكل (8) و الشكل (9) مقارنة بين توزيع الحمل على زوج من أسنان المسننات المستقيمة والحلزونية على التوالي، في طور التعشيق مع وبدون ضرر التنقر على سن واحد فقط على المسنن القائد (السن الأول لبداية دورة التعشيق).



الشكل (8): تمثيل 3D لتأثير التنقر على توزيع الحمل على زوج من أسنان المسننات المستقيمة



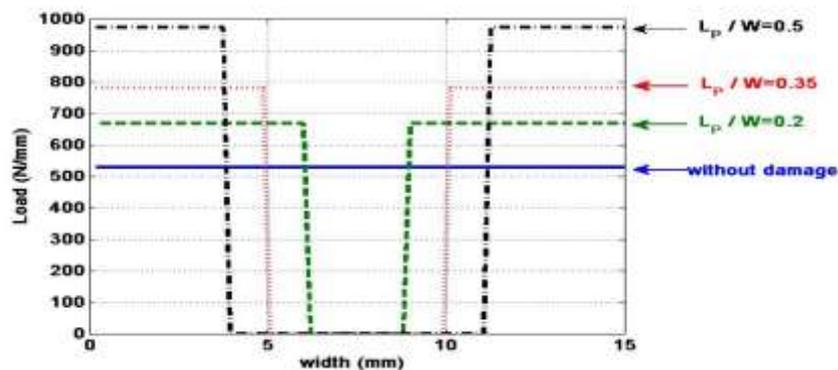
الشكل (9): تمثيل 3D لتأثير التقر على توزيع الحمل على زوج من أسنان المسننات الحلزونية

حيث نلاحظ ما يلي:

- في حالة عدم وجود ضرر: توزيع الحمل يكون متجانس على طول بروفيل السن مع تركيز القيم العظمي في الجزء الوسطي لبروفيل السن، أي في المنطقة المجاورة لنقطة الخطوة (pitch point) وهذا يتوافق مع النتائج التجريبية [10-12]، مع انحراف على طول عرض السن (width) للمسننات الحلزونية وذلك بسبب تأثير زاوية الحلزون (في حالة المسننات المستقيمة يكون توزيع الحمل بشكل مستقيم على عرض السن لأن زاوية الحلزون = 0).

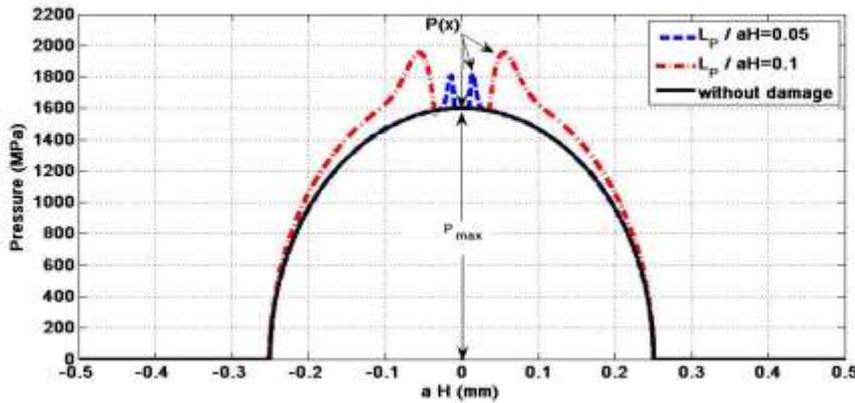
- في حال وجود الضرر في منطقة زوجين من الاسنان في طور التعشيق (جوار النقطة الابتدائية): نلاحظ التغير الكبير في قيمة الحمل من خلال تناقص قيمته إلى الصفر في منطقة الضرر (فقدان المادة) من جهة وفي تزايد قيمته في المنطقة المجاورة للضرر حيث يصبح الحمل أعظمياً، من جهة أخرى (بسبب نقص مساحة التماس بين الأسنان) وذلك للمسننات المستقيمة والحلزونية معاً. وبما أن اسنان المسننات تخضع للتحميل المتكرر فإن تزايد قيمة الحمل في هذه المنطقة، يؤدي إلى سرعة في انتشار الضرر وتزايد قيمته بصورة سريعة، مما يؤدي إلى فقدان كمية أكبر من المادة مؤدياً ذلك إلى انخفاض مردودها وتناقص فترة حياتها.

وبالنتيجة، يمكن القول أن زيادة أبعاد المنطقة المزالة من المادة على سطح سن المسنن القائد نتيجة لضرر التقر، ستؤدي إلى إنقاص سطح التماس بين هذا السن المتضرر والأسنان الأخرى المقابلة لها على المسنن المقاد ، ونتيجة لذلك سترتفع قيمة الحمولة على بقية أسطح السن وتزيد بشكل يتوافق مع زيادة أبعاد منطقة التقر، كما هو موضح في الشكل (10).



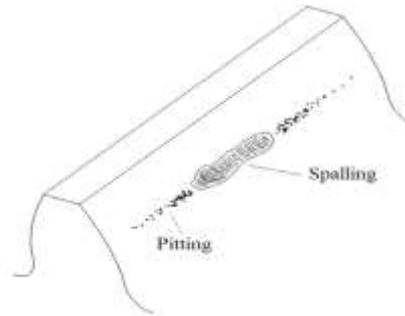
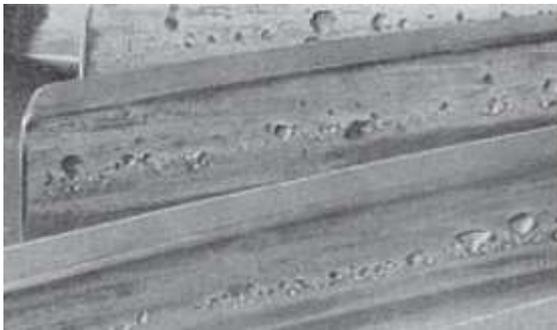
الشكل (10): تأثير طول الضرر بالنسبة لعرض السن (w) على توزيع الحمل بالنسبة لعرض المسننات المستقيمة

إن النمذجة السابقة تسمح بدراسة تأثير ضرر التنقر في كل نقطة تماس M_{ij} على أسنان المسننات، وكما هو معلوم توصف نقاط التماس بموقعها على البروفایل الفعال، من جهة، وبارامترات نصف عرض منطقة التماس (half-width contact) وضغط هرتز (Hertz pressure)، من جهة أخرى . فعلى سبيل المثال في نقطة الخطوة الشكل (11)، يبلغ الضغط الأعظمي 1600MPa مع نصف عرض منطقة تماس قدره $aH=0.250\text{mm}$ مع وجود ضرر التنقر المعبر عنه كنسبة من نصف عرض هذه المنطقة، يمكننا التحقق بشكل جيد أن تواجد التنقر يغير من شكل توزع الضغط من جهة، ومن قيمته العظمى ومكان توضع من جهة أخرى. حيث تتزاح القيمة العظمى للضغط P_{max} من مركز التماس $x=0$ (دون ضرر) إلى حدود منطقة التنقر الخالية من هذا الضرر، ويتناسب تزايد قيمة الضغط الأعظمي مع طول التنقر.



الشكل (11): تأثير طول الضرر بالنسبة لنصف عرض منطقة التماس (aH) على توزع الضغط في نقطة الخطوة

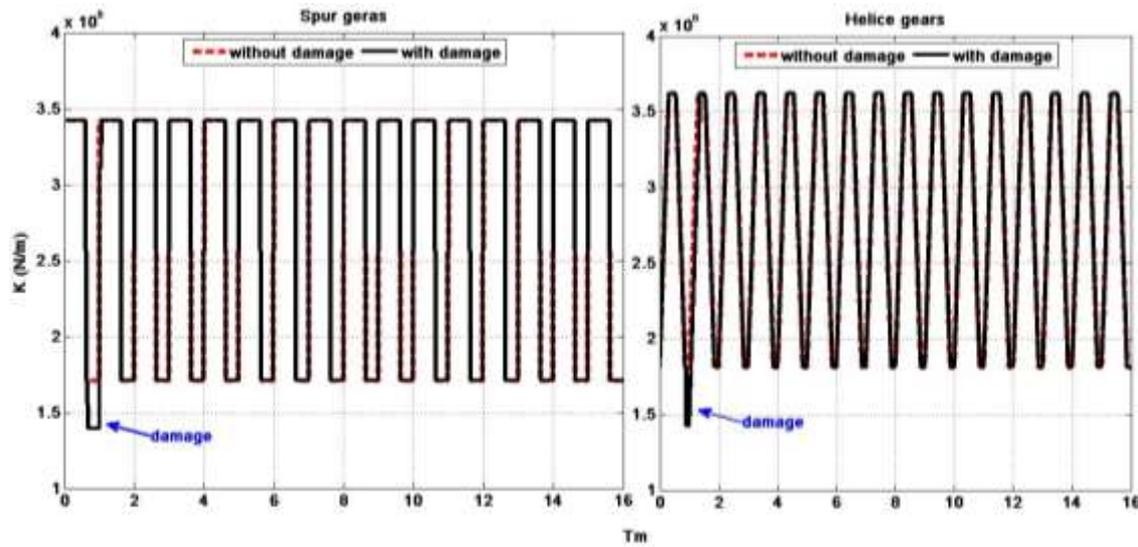
هنا لابد من الإشارة إلى أن الشكل (11) يعطي التصور الحقيقي لميغانيزم انتشار الضرر من نقطة تماس لأخرى، من جهة، وسرعة انتشار هذا الضرر من جهة أخرى. وكما هو معلوم أن اسنان المسننات تتعرض لأحمال دورية متكررة خلال فترات متساوية من الزمن، فعند نشوء التنقر في منطقة ما على سطح السن، فإن الضغط الأعظمي في هذه النقاط سينتقل ويضاف إلى قيمته في النقاط الأخرى السليمة (دون ضرر)، مما يسبب في تزايد قيمة الضغط الأعظمي في هذه النقاط، وبالنتيجة حصول التنقر وانتشاره على مساحة أوسع من سطح السن. هنا لابد من التنويه، إلى أن تزايد حجم المنطقة المزالة من المادة بسبب التنقر الأولي عن حدود 0.8mm في القطر (أو الطول) فإن الضرر يدعى في هذه الحالة ضرر التنقر أو التشظية (spalling)، [20]، الشكل (12) .



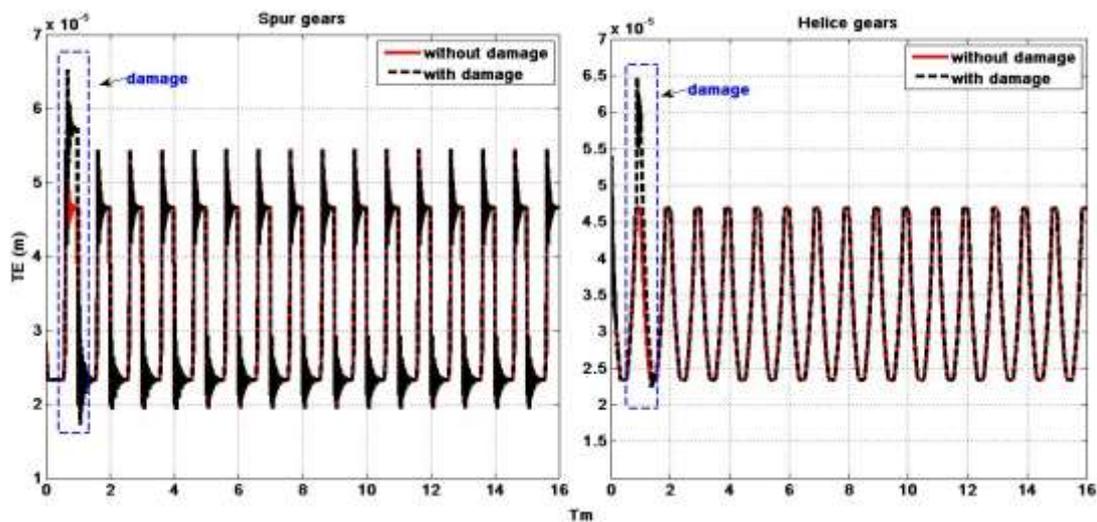
الشكل (12): مقارنة بين أبعاد المنطقة المتضررة بسبب التنقر والتشظي، [20].

2-4: تأثير التفر على أخطاء النقل (TE):

خلال فترة التعشيق فإن الحركة النسبية المركبة (انزلاق ودوران) لتمام الاسنان مع بعضها البعض، والتغير في صلابة التعشيق للأسنان، بالإضافة إلى انحناء الاسنان الناتج عن نقل الحمولة (حيث يتزايد الانحناء مع تزايد الحمولة على السن)، تسبب مجتمعة نوع من أنواع التحريض القسري في المسننات مؤدياً لمستويات مرتفعة من الاهتزاز، [21-22, 18]. بوجود التفر فإن هندسية بروفایل الاسنان تتغير (تناقص في مساحة التماس بين الأسنان بسبب فقدان المادة من سطوح اسنان المسننات)، ونتيجة تغير قيمة الحمولة في كل نقطة تماس بين أسنان المسننات (مع تزايد قيمتها بشكل كبير في منطقة تواجد الضرر) فإن قيم الانحناء الاعظمي للأسنان ستتغير، حيث يزداد الانحناء مع تزايد الحمولة، [21] من جهة، والازاحة اللحظية المرتبطة بزوايا الفتل والدوران للمسننات ستتزايد من جهة أخرى، وبالنتيجة فإن صلابة التعشيق اللحظية بين الاسنان ستتناقص في مكان تواجد الضرر على السن، الشكل (13)، بينما تبقى محافظة على شكلها ومطالها على الاسنان السليمة (صلابة التعشيق تتكرر بنفس الشكل والقيمة خلال كل فترات التعشيق المتتالية)، مؤدياً هذا إلى ارتفاع حاد في مطال أخطاء النقل (ET) تحت تأثير الحمل بين أسنان المسننات المستقيمة والحلزونية في المنطقة الموافقة لتواجد هذا الضرر، الشكل (14).



الشكل (13): تأثير التفر على صلابة التعشيق بين اسنان المسننات



الشكل (14): تأثير التفر على أخطاء النقل (TE)

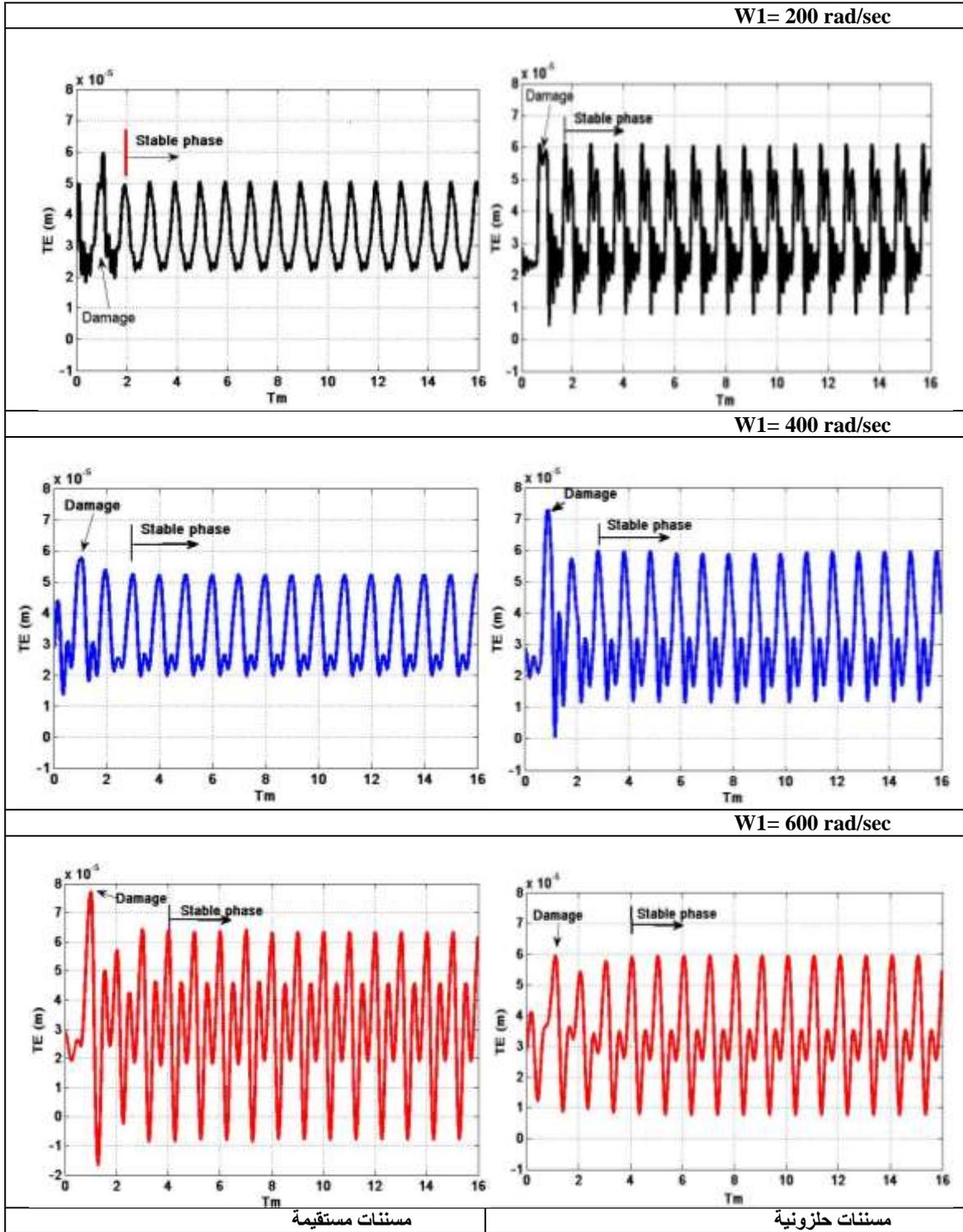
وبالتالي فإن مستوى الضجيج والاهتزاز سيتزايد بشكل كبير في مكان تواجد الضرر، لأن أخطاء النقل تحت تأثير الحمل تعتبر كمقياس هام لمستوى التحريض في المسننات، وبالتالي لقياس مستويات الاهتزازات والضجيج الناتج عن نقل القدرة، [18, 21-22]. وبالنتيجة يمكن القول أن أخطاء النقل تتأثر بشكل كبير بمكان تواجد الضرر، حيث تتزايد قيمتها نتيجة لانخفاض صلابة التعشيق في المنطقة الموافقة لتواجد هذا الضرر، كما يمكن اعتبارها كمقياس هام لتنبؤ بوجود ضرر التنقر على اسنان المسننات. كما يمكننا ملاحظة، أن القيم العظمى لأخطاء النقل في المسننات ذات الاسنان الحلزونية السليمة (دون ضرر)، تكون أقل (مع صلابة تعشيق أعلى)، من القيم الموافقة لها في المسننات المستقيمة خلال جميع فترات التعشيق، الشكل (14)، وهذا يفسر النقل الهادئ ومستوى الضجيج المنخفض عند نقل الحركة بهذه المسننات، مقارنة بالمسننات المستقيمة. بالمقابل، أن زيادة أبعاد التنقر على أسنان المسننات، والذي يترافق مع زيادة كبيرة في قيمة الحمولة المطبقة على السن، انظر الشكلين (10) و (11)، ستؤدي إلى تزايد كبير في قيمة أخطاء النقل، وبالنتيجة قيمة أكبر للتحريض على السن ومستوى أعلى من الاهتزاز والضجيج.

4-3: تأثير سرعة دوران المسنن القائد:

من المعلوم تصميمياً، أنه عند عمل المسننات في ظروف التحميل الديناميكي والناتج عن السرعة الدورانية المرتفعة للمسنن القائد، فإن الإزاحة في نقاط التماس بين أسنان المسننات ستزيد نتيجة لتزايد قيم الفتل من جهة، وتزايد سرعة نقل الحركة من نقطة لأخرى ضمن نافذة العمل من جهة أخرى، وبالتالي سيخضع كل سن من الاسنان المتعشقة لحمولة متكررة بمرور أعلى مقارنة بشروط التحميل الستاتيكي. ونتيجة لذلك فإن قيم أخطاء النقل ستزيد مع تزايد سرعة الدوران. يبين الشكل (15) تأثير سرعة الدوران للمسنن القائد على توزع أخطاء النقل مع تواجد ضرر التنقر على السن الأول فقط من أسنان المسنن القائد، حيث يمكننا ملاحظة الآتي:

- يتغير شكل وتوزع أخطاء النقل على أسنان المسننات الحلزونية والمستقيمة مع تزايد السرعة الدورانية. وذلك نتيجة لشكل وقيمة الحمولة التي تؤثر في نقاط التماس بين أسنان هذه المسننات. كما تعتبر المسننات المستقيمة أكثر تأثراً بالشروط الديناميكية مقارنة بالمسننات الحلزونية، حيث ترتفع مطالات هذه الأخطاء ويتغير شكل توزعها بصورة أكثر تعقيداً في نقاط التماس خلال جميع فترات التعشيق.

- مع وجود التنقر ومع تزايد سرعة الدوران، ترتفع قيم ومطالات هذه الأخطاء بصورة أكبر في المسننات المستقيمة مقارنة بالحلزونية. إضافة لذلك، فإن طور الاستقرار (stable phase) لهذه الأخطاء بالنسبة للمسننات المستقيمة والحلزونية، يزداد باتجاه فترات التعشيق الأبعد من فترة وجود الضرر على السن. وذلك بسبب سرعة نقل الحمولة من نقطة لأخرى على السن من جهة، وتزايد الانحناء الأعظمي من جهة أخرى. فعلى سبيل المثال، يتواجد الضرر على السن الأول أي خلال فترة التعشيق الأولى، فالاستقرار في شروط التحميل الديناميكي يحصل خلال الفترة الثانية عند السرعة الزاوية $w1 = 200 \frac{rad}{sec}$ لكلا المسننات المستقيمة والحلزونية. وعند السرعة الأعلى ينتقل الاستقرار إلى فترة التعشيق الثالثة ($w1 = 400 \frac{rad}{sec}$) والرابعة ($w1 = 600 \frac{rad}{sec}$). وبالنتيجة يمكننا القول أنه عند شروط التحميل الديناميكي بوجود ضرر التنقر تصبح المسننات خاضعة لمستويات مرتفعة من التحريض ينتج عنها تضخيم أكبر لمستويات الاهتزاز والضجيج.

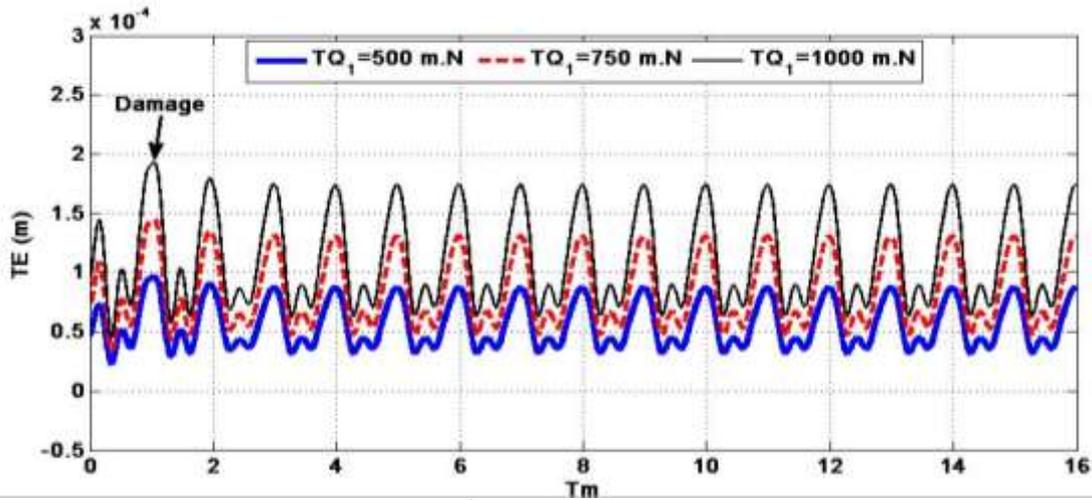
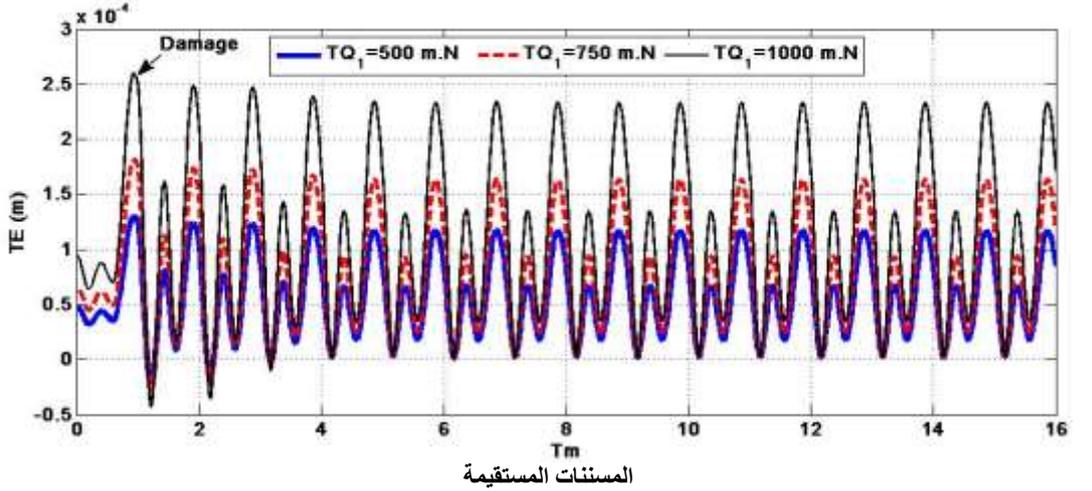


الشكل (15): تأثير التفرق على أخطاء النقل للمسننات العاملة ضمن شروط وظيفية ديناميكية

4-4: تأثير العزم المنقول من المحرك:

إن تزايد العزم المنقول من المحرك الكهربائي سيسبب في تزايد كبير في القيمة المتوسطة لأخطاء النقل (TE)، وذلك بسبب تزايد قيمة التحميل على اسنان المسننات المستقيمة والحلزونية (الحمل الستاتيكي والديناميكي)، من جهة، وتزايد مقدار الانحناء للأسنان من جهة أخرى. فخلال فترة تعشيق واحدة ستعرض

نقاط التماس لانحناء اعظمي عند انتقال الاستجابة الديناميكية من نقطة لأخرى على البروفابل الفعال . ويتواجد التنقر على سن المسنن القائد، فإن قيمة هذه الأخطاء ستتزايد (دون تغير في شكل توزيعها)، وبالتالي فإن مستوى الضجيج والاهتزازات سيتزايد، وبالنتيجة فإن التنقر المترافق مع زيادة في العزم المنقول من المحرك الكهربائي سيؤدي إلى مستوى تحريض اهتزازي أعلى في المسننات، كما هو مبين في الشكل (16). مع التأكيد أن مستوى التحريض والاهتزاز في المسننات المستقيمة أكبر منه في الحلزونية.



المسننات الحلزونية
الشكل (16): تأثير العزم المنقول على أخطاء النقل

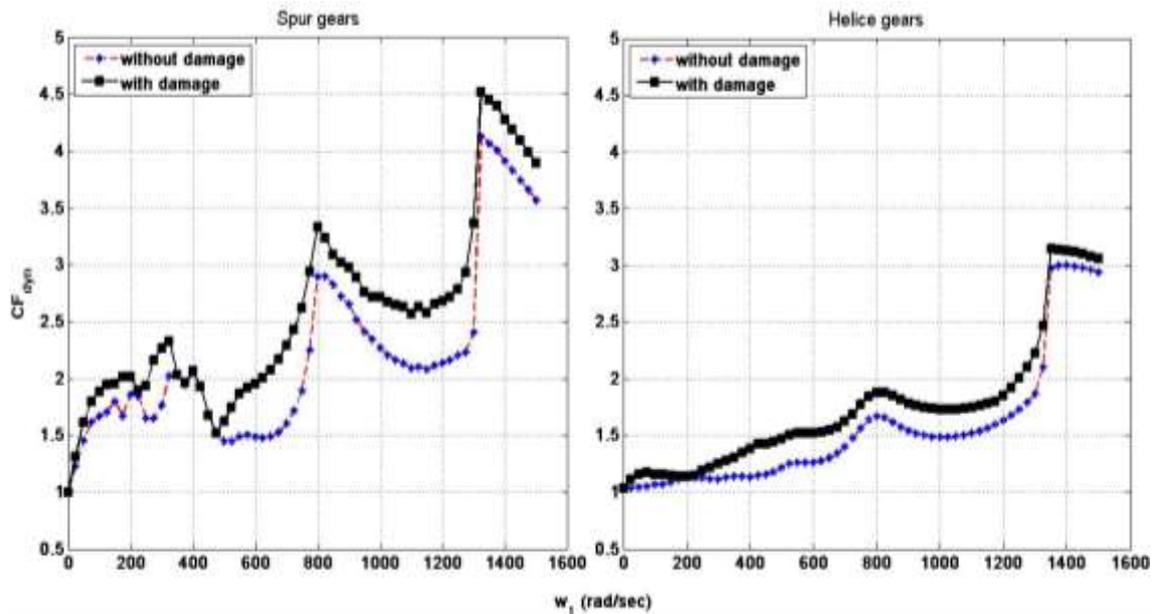
4-5: تأثير التنقر على الحمولة الديناميكية:

النتائج الحاصلة لتأثير التنقر على معامل الحمولة الديناميكية الأعظمي CF_{dyn} والمحسوب وفق العلاقة (10) للمسننات المستقيمة والحلزونية تبعاً للسرعة الدورانية للمسنن القائد مبينة في الشكل (17). حيث يعتبر مخطط CF_{dyn} دون تنقر كأساس مرجعي. حيث يمكننا ملاحظة ما يلي:

- يرتفع مطال المعامل الديناميكي الأعظمي بسبب التنقر لكل من المسننات المستقيمة والحلزونية (بسبب تناقص صلابة التعشيق). مع ملاحظة أن الحمولة الديناميكية المؤثرة على المسننات المستقيمة أكبر من تلك المؤثرة على المسننات الحلزونية بدون ضرر التنقر و مع وجوده. وهذا يفسر أيضاً مقدار التحريض والاهتزازات في هذه المسننات مقارنة بالمسننات الحلزونية بغض النظر عن السرعة الدورانية للمسنن القائد.

• يظهر تأثير التنقر بشكل واضح عند السرعة الدورانية الكبيرة (أكبر من 450 rad/sec)، حيث يرتفع مطال المعامل الديناميكي مقارنة بقيم السرعة المنخفضة. وذلك يفسر بزيادة زمن عدم الاستقرار في عمل المسننات خلال مجمل فترات التعشيق عند زيادة السرعة الدورانية للمسنن القائد، من جهة، وزيادة مقدار الازاحة الديناميكية لمجمل نقاط التعشيق من جهة أخرى. وهذه النتيجة مطابقة لتأثير التنقر على أخطاء النقل والموضحة في الشكل (15).

• لا يغير التنقر من موقع السرعة الحرجة لكلا المسننات المستقيمة والحلزونية. مع ملاحظة تواجد ثلاث سرع حرجة للمسننات المستقيمة ($w_{1,critic} = 325, 800, 1325 \frac{rad}{sec}$) والتي تتوافق مع مدى التحريض المرتفع لمطال الاهتزازات في هذه المسننات، [18, 21-22]. بينما نلاحظ تواجد فقط سرعتين حرجتين للمسننات الحلزونية ($w_{1,critic} = 800, 1325 \frac{rad}{sec}$)، وهذا يشير إلى أن مستويات الاهتزازات والتحريض في هذه المسننات تزداد وترتفع فقط عند السرعة الدورانية المرتفعة.



الشكل (17): تأثير ضرر التنقر على معامل الحمولة الديناميكية الأعظمي تبعاً للسرعة الدورانية للمسنن القائد

5 . الاستنتاجات:

يملك ضرر التنقر تأثير سلبي على شروط نقل الحركة بالمسننات المستقيمة والحلزونية، وذلك من خلال تأثيره الكبير على توزيع الحمل على أسنان المسننات من جهة، وتأثيره على توزيع أخطاء النقل من جهة أخرى، ويمكن تلخيص هذا التأثير من خلال مايلي:

- تزايد مساحة المنطقة المتضررة بالتنقر (مساحة المادة المزالة من سطح السن)، تسبب في تزايد كبيرة لشروط التحميل على أسنان المسننات.
- تعتبر المسننات المستقيمة أكثر تأثراً بضرر التنقر مقارنة بالمسننات الحلزونية، من ناحية تزايد الحمولة الساتاتيكية والديناميكية، من جهة، ومن خلال تزايد القيم المتوسطة لمطالات أخطاء النقل من جهة أخرى.
- يسبب التنقر تزايد كبير بقيمة الحمل على أسنان المسننات المستقيمة والحلزونية، وتتركز القيمة الأعظمية للحمولة في المنطقة المجاورة لتواجده. وبالنتيجة فأن عيوب أخرى كالتشطي قد تظهر نتيجة لهذا التأثير، وبالمحصلة فأن فترة حياة المسننات تتناقص مقارنة مع المسننات التي لا تملك هذه العيوب.

- يسبب ضرر التنقر في تزايد مطال أخطاء النقل، ويظهر هذا التزايد بشكل أساسي مع السرعة الدورانية المرتفعة للمسنن القائد، وينتج عن هذا التزايد مستوى ضجيج واهتزازات كبيرة على اسنان المسننات من جهة، وزيادة فترة عدم الاستقرار لعمل هذه المسننات من جهة أخرى.
- تعتبر أخطاء النقل كمقياس هام يمكن من خلاله التنبؤ بوجود ضرر التنقر على مسننات نقل القدرة. وبناء على ما سبق، فأنا نوصي بما يلي:
- ✓ استخدام النموذج الديناميكي المقدم في هذا المقال للدراسة تأثير عيوب أخرى من عيوب نقل الحركة بالمسنتات ، كالتعب والاهتراء على سبيل المثال.
- ✓ استخدام المسننات الحلزونية كبديل عن المسننات المستقيمة عند نقل عزوم كبيرة بسرعة دورانية مرتفعة.

6. المراجع العلمية:

- [1] M. R. Stewart, *The specification and developpement of a standard gearbox monitoring*. 2nd International Conference on Vibration in Rotating Machines, Cambridge, 1980. P.353-358.
- [2] Y.F. HuangFu, K.K. Chen, H. Ma, X. Li, *Meshing and dynamic characteristics analysis of spalled gear systems: A theoretical and experimental study*, Mech. Syst. Signal Process. Vol. 139 (2020) , p.106-181.
- [3] S.A. Abouel-seoud, E.S. Dyab, M.S. Elmorsy, *Influence of tooth pitting and cracking on gear meshing stiffness and dynamic response of wind turbine gearbox*, Int. J. Sci. Adv. Technol. Vol. 2 (3) (2012), P. 151–165.
- [4] X. Liang, H. Zhang, L. Liu, M.J. Zuo, *The influence of tooth pitting on the mesh stiffness of a pair of external spur gears*, Mech. Mach. Theory, Vol. 106 (2016) P.1–15.

- [5] Y. Lei, Z. Liu, D. Wang, X. Yang, H. Liu, J. Lin, *A probability distribution model of tooth pits for evaluating time-varying mesh stiffness of pitting gears*, Mech. Syst. Signal Process. Vol. 106 (2018), P. 355–366 .
- [6] Z. Meng, F. Wang, G. Shi, *A nouvel evolution model of pitting failure and effect on time-varying meshing stiffness of spur gears*, Eng. Failure Analysis, Vol. 120 (2021), P.105-128.
- [7] X. Liang, M.J. Zuo, Z. Feng, *Dynamic modeling of gearbox faults: a review*, Mech. Syst. Sig. Process. Vol. 98 (2018), P. 852–876.
- [8] Y. Lei, Z. Liu, D. Wang, X. Yang, H. Liu, J. Lin, *A probability distribution model of tooth pits for evaluating time-varying mesh stiffness of pitting gears*, Mech. Syst. Signal Process. Vol. 106 (2018), P. 355–366 .
- [9] T. Chen, Y. Wang, Z. Chen, *A novel distribution model of multiple teeth pits for evaluating time-varying mesh stiffness of external spur gears*, Mech. Syst. Signal Process. Vol.129 (2019), P. 479–501.
- [10] [37] R.A. Hassan, *Contact stress analysis of spur gear teeth pair*, World Academy of Science, Eng. & Technology. vol. 58 (2009), P. 611–616.
- [11] ISO/DIS 6336. *Calculation of load capacity of spur and helical gears- Part I: Basic principles and influence factors*. Draft International Standard, 1990. P.87-95.
- [12] P.J. Blau, *ASM Handbook, - Friction, lubrication, and wear technology*. ASM International, Volume 18 . 1992.
- [13] R. Ma, Y. Chen, Q. Cao, *Research on dynamics and fault mechanism of spur gear pair with spalling defect*, J. Sound Vib. Vol. 331 (9) (2012) ,P. 2097–2109.
- [14] S.A. Abouel-seoud, E.S. Dyab, M.S. Elmorsy, *Influence of tooth pitting and cracking on gear meshing stiffness and dynamic response of wind turbine gearbox*, Int. J. Sci. Adv. Technol. Vol. 2 (3) (2012), P. 151–165.
- [15] Z. Cheng, N. Hu, F. Gu, G. Qin, *Pitting damage levels estimation for planetary gear sets based on model simulation and grey relational analysis*, Trans. Can. Soc. Mech. Eng. Vol. 35 (3) (2011), P. 403–417.
- [16] F. Litvin, A. Fuentes, *Gear geometry and applied theory*. 2nd edition, Cambridge University press. UK, 2004. 2.85-2.90. P.655.
- [17] N. M. Newmark. *A method of computation for structural Dynamics*. ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol.85 (1959). P. 67-94.
- [18] M. Ajmi, P. Velex, *A model for simulation the quasi-static and dynamic behavior of solid wide-faced spur and helical gears*, Mech. & Mach. Theory, Vol. 40 (2005), P. 173-190.

[19] G. Morales-Espejel, P. Rycerz, A. Kadiric, *Prediction of micropitting damage in gear teeth contacts considering the concurrent effects of surface fatigue and mild wear*, Wear , Vol. 398 (2018), P. 99–115.

[20] Y. Luo, N. Baddour, M. Liang, *Dynamical modeling and experimental validation for tooth pitting and spalling in spur gears*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 119 (2019), P. 155-181

[21] P. Sainsot, P. Velex, O. Duverger, *Contribution of gear body to tooth deflections—a new bidimensional analytical formula*, J. Mech. Des. Vol. 126 (2004), P. 748–752.

[22] P. Sainsot, P. Velex, *On contact deflection and stiffness in spur and helical gears*, Mech. Mach. Theory, Vol.154 (2020), P. 258-271