

دراسة تأثير السلوك الستاتيكي والديناميكي على سماكة فلم التزييت بين أسنان المسننات المستقيمة

د. ثائر أحمد عثمان *

(تاريخ الإيداع 2021/ 12/ 16 . قُبل للنشر في 2022/ 4/ 26)

□ ملخص □

تم في هذا البحث دراسة توزع سماكة فلم التزييت في كافة نقاط التعشيق على البروفایل الفعال للمسننات ذات الاسنان المستقيمة من جهة، ودراسة تأثير سرعة الدوران، والعزم المنقول ونوع الزيت المستخدم على قيمة هذه السماكة من جهة أخرى ضمن شروط التحميل الستاتيكي والديناميكي لنقل الحركة بالمسننات المستقيمة. ولأجل هذا، تم تطوير نموذج ديناميكي لنقل الحركة بالمسننات المستقيمة ثنائي درجة الحرية بالفتل، وتطبيق شروط التزييت الهيدروليكي المرن EHD من أجل حساب سماكة فلم التزييت وتوزعها في نقاط التعشيق. تشير نتائج الدراسة في هذا البحث إلى أن سماكة فلم التزييت تختلف من نقطة لأخرى على طول البروفایل الفعال للسن، وأن سماكة فلم التزييت تتعلق بشكل كبير بسرعة الدوران والعزوم المنقول من جهة، ونوع وطبيعة الزيوت المستخدمة من جهة أخرى .

كلمات مفتاحية: سلوك ديناميكي - سماكة فلم التزييت - شروط التزييت الهيدروديناميكي المرن.

* استاذ مساعد في كلية الهندسة التقنية- جامعة طرطوس - سوريا

Study of static and dynamic behavior effects on the lubrication film thickness between the spur gears teeth

Dr. Thaer Ahmad OSMAN *

(Received 16/ 12/ 2021 . Accepted 26/ 4/ 2022)

□ ABSTRACT □

In this article , we studied the distribution of lubrication film thickness in all contact points on the active profile of spur gear teeth, and study the effect of torque , rotational speed and type of used lubrication on value of thickness under influence of static and dynamic behavior of geared transmission. For this end, a dynamic model of geared transmission in two degrees of freedom, with EHD lubrication conditions, are used. The results show that lubrication film thickness varies in all contact points on teeth profile, and widely depends on values of transmitted torque , rotational speed and type of used oil.

Keywords: dynamic behavior – film thickness – elastohydrodynamic conditions.

* Associated Professor- Faculty of Technical Engineering – Tartous University

1. مقدمة:

يعتمد الاستخدام المتواصل للعناصر الميكانيكية في الآلات، كالمسننات (gears) والرولمانات (bearings)، على سبيل المثال، ولفترة طويلة من الزمن، على خصائص ونوعية مادة التزييت (lubrications) المستخدمة بين السطوح المتماصة. حيث يسهل التزييت الحركة ويمنع الاحتكاك (friction) المباشر بين سطوح هذه الأجزاء. كما أنه يقلل الصداً والتآكل (wear) ويقوم بمهمة التبريد (cooling) أيضاً وبالنتيجة إطالة عمر (فترة عمل) هذه الأجزاء. بالمقابل، ونتيجة لتزايد المتطلبات التكنولوجية، فإن الشروط الوظيفية للعناصر الميكانيكية تصبح قاسية، كتزايد قيم التحميل (loading) المطبق على سبيل المثال، فإن سماكة فلم التزييت (film thickness) تصبح غير كافية للفصل بين هذه السطوح وبالنتيجة ارتفاع مستوى الاحتكاك وزيادة التآكل والاهتراء و حدوث العيوب على سطوح هذه العناصر، [1-4]. ونتيجة لذلك من المهم دراسة تأثير الشروط الوظيفية والديناميكية للمسنتات ونوع مادة التزييت المستخدمة على سماكة فلم التزييت، بهدف تحديد شروط العمل المناسبة، بحيث تبقى سماكة فلم التزييت كافية للفصل بين السطوح مع مراعاة نوع مادة التزييت المستخدمة.

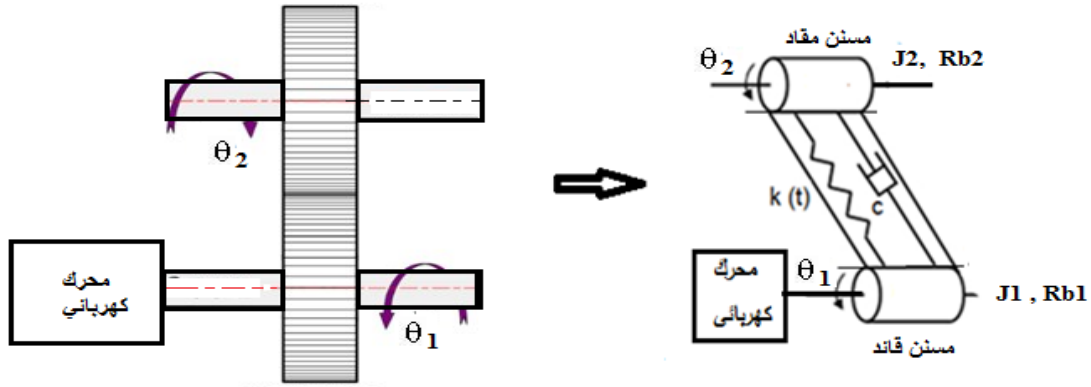
2. أهمية البحث وأهدافه:

على الرغم من كثرة الدراسات المتوفرة في المراجع العلمية، والتي اهتمت بدراسة شروط التزييت بين المسننات، لكن غالبيتها قد درست التزييت ضمن شروط استاتيكية معينة وأهملت تأثير شروط التحميل الديناميكية. وبالتالي فإن نتائج هذه الدراسات لا تعطي منهج معين يمكن أتباعه في تحديد نوع وشروط التزييت الواجب استخدامه في المسننات. لأجل ذلك، يهدف البحث المقدم هنا لدراسة توزع سماكة فلم التزييت في كل نقطة تماس على طول البروفيل الفعال لأسنان المسننات المستقيمة، وذلك بالاعتماد على شروط التزييت الهيدروديناميكي المرن (elastohydrodynamic lubrication) (EHD). من جهة، ودراسة تأثير السلوك الديناميكي للمسنتات على سماكة وتوزع فلم التزييت، من جهة أخرى. وذلك باستخدام نموذج ديناميكي ثنائي درجة الحرية (dynamic model in two degree of freedom) في الفتل (torsion) للمسنتات. بحيث يوصف السلوك الديناميكي لهذه المسننات من خلال تحليل معادلة الحركة الديناميكية خطوة بخطوة مع الزمن. أن النتائج المقدمة في البحث، تمكن الباحث والمهتم من معرفة شروط العمل المناسبة للمسنتات، بحيث تكون سماكة طبقة التزييت كافية للفصل بين سطوح أسنان المسننات.

3. طرائق البحث ومواده:

1-3: نمذجة السلوك الديناميكي للمسنتات:

أن النموذج الديناميكي للمسنتات المستخدم في هذا البحث موضح في الشكل (1). وهو عبارة عن نموذج ثنائي درجة الحرية في الفتل (θ_1 للمسنن القائد، θ_2 للمسنن المقاد). حيث يوصف كل من المسنن القائد والمقاد بعزم عطالته القطبي (J)، نصف قطر الانحناء (Rb) (والذي يدعى بنصف قطر دائرة الأساس) وقيمة العزم المطبق (C_m): العزم على المسنن القائد. C_r : العزم على المسنن المقاد). بالمقابل توصف شروط التماس بين أسنان المسننات ضمن مستوي العمل على البروفيل الفعال لأسنان المسننات، بصلاية التعشيق (K) وثابت التخמיד (C).



الشكل (1): نموذج ديناميكي لنقل الحركة بالمسننات ثنائي درجة الحرية (2DOF).

بالاعتماد على نظرية العزم الديناميكي فإن معادلة الحركة لكل من المسنن القائد والمقاد تكتب وفق الصيغة التفاضلية التالية:

$$C_m \quad (1) \quad J_1 [\dot{\Omega}_1 + \ddot{\theta}_1] = -\{C. [Rb_1. \dot{\theta}_1 + Rb_2. \dot{\theta}_2] + K. [Rb_1. \theta_1 + Rb_2. \theta_2]\}. Rb_1 +$$

$$C_r \quad (2) \quad J_2 [\dot{\Omega}_2 + \ddot{\theta}_2] = -\{C. [Rb_1. \dot{\theta}_1 + Rb_2. \dot{\theta}_2] + K. [Rb_1. \theta_1 + Rb_2. \theta_2]\}. Rb_2 +$$

بما أن السرعة الزاوية لكل من المسنن القائد Ω_1 والمقاد Ω_2 تعتبر ثابتة وبالتالي فإن $\dot{\Omega}_1 = \dot{\Omega}_2 = 0$ ، فإنه يمكننا التعبير عن المعادلتين السابقتين بالصيغة التالية:

$$\begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \left\{ C. \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + K. \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \right\} \cdot \begin{bmatrix} Rb_1^2 & Rb_1 Rb_2 \\ Rb_1 Rb_2 & Rb_2^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_r \\ C_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

بضرب السطر الأول من المعادلة السابقة بـ $Rb_1 J_2$ والسطر الثاني بـ $Rb_2 J_1$ وتقسيم المعادلة على

نحصل على المعادلة التفاضلية التالية:

$$m_{tot} \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = F_s \quad (4)$$

الكتلة الكلية المكافئة للمسننات وتعطى بالعلاقة التالية: $m_{tot} = \frac{J_1 J_2}{J_1 Rb_2^2 + J_2 Rb_1^2}$

، C, k : ثابت صلابة التعشيق المكافئ والتخميد للنموذج الديناميكي على الترتيب والذي يحسب

بالاستناد على نظام ISO 6336 [5].

x : موجه درجات الحرية في الفتل للمسنن القائد والمقاد ويعطى وفق العلاقة:

$$x = Rb_1 \theta_1 + Rb_2 \theta_2 \quad (5)$$

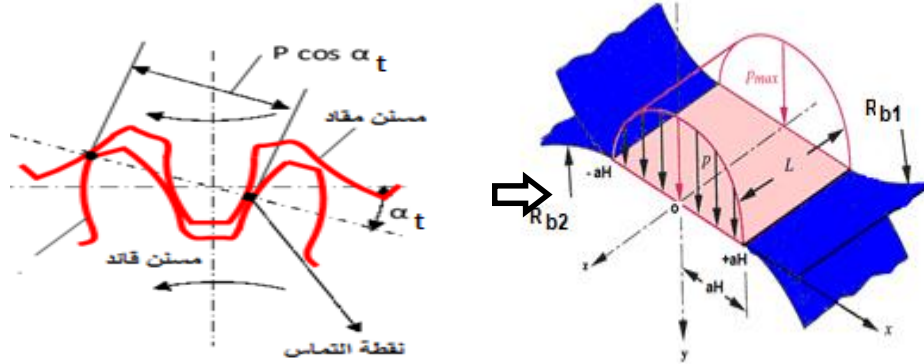
F_s : الحمل الستاتيكي المؤثر على المسننات ويحسب وفق العلاقة التالية

$$\frac{C_m}{Rb_1} = \frac{C_r}{Rb_2}$$

أن معادلة الحركة السابقة تكون محللة خطوة بخطوة مع الزمن باستخدام طريقة نيومارك (Newmark) [6] والتي تعتبر من أكثر طرق التحليل استخداماً في إيجاد حلول للمشاكل الديناميكية وتحليل معادلات الحركة لجمل النقل. خلال تحليل معادلة الحركة يجب التأكد من عدم وجود حمل سالب على أسنان المسننات. خلال كل خطوة من الزمن، فإن خطوط التماس تتزاح ضمن مستوي العمل وبالتالي

فإن نقطة التماس M ستنتقل مع الزمن عبر خطوط التماس، وبالتالي فإن الميزات الهندسية والوظيفية للمسننات (توزع الحمل - توزع الضغط - عرض منطقة التماس.....) ستكون متغيرة نتيجة لاختلاف موقع نقطة التماس على بروفيل أسنان المسننات. من أجل عملية تحليل معادلة الحركة، فقد استخدمنا 48 فترة تعشيق بهدف الحصول على نظام مستقر لتعشيق المسننات، عدد التزايدات الكلية في الزمن تساوي 2048. بما أن نقطة التماس بين أسنان المسنن القائد والمقاد تتحرك على طول بروفيل السن خلال الزمن، لأجل هذا فإن بروفيل (profile) أسنان المسننات سيكون موصوف بالنسبة $\frac{t}{T_m}$ حيث أن t : الزمن، T_m : فترة التعشيق. خلال الحساب يكون مقدار تزايد الزمن Δt محسوب وفق العلاقة $\Delta t = \frac{T_m}{tt}$. حيث tt : عدد تزايدات الزمن خلال فترة التعشيق الواحدة والتي تحسب من خلال عدد التزايدات الكلية في الزمن مقسومة على عدد فترات التعشيق. بعد حساب الحمل الديناميكي F في كل نقطة تماس M على أسنان المسننات بالنسبة لعرض السن (b) فإن توزع الضغط الناظمي $P(x)$ على طول عرض منطقة التماس aH يحسب بالاعتماد على نظرية هرتز (Hertz theory)، الشكل (2)، وفق مايلي:

$$P(x) = P_{max}(M) \cdot \sqrt{1 - \frac{x}{aH(M)}} = \frac{2 \cdot \pi}{aH(M)} \cdot \frac{F(M)}{b} \sqrt{1 - \frac{x}{aH(M)}} \quad (6)$$



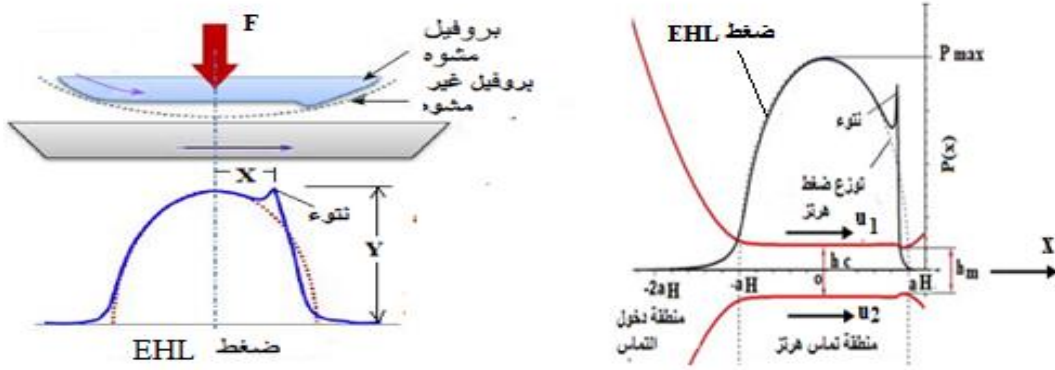
الشكل (2): نمذجة توزع الضغط الناظمي في نقاط التماس بين أسنان المسننات

، αt : زاوية الضغط، p : الخطوة، R_{b2}, R_{b1} : نصف قطر انحناء المسنن القائد والمقاد على الترتيب.

2-3: حساب سماكة فلم التزييت بين أسنان المسننات:

يستخدم التزييت بشكل دائماً للفصل بين سطوح أسنان المسننات في طور التعشيق وذلك لأن التزييت ينقص الاحتكاك والتآكل بين السطوح. وبالتالي عندما تكون سماكة طبقة التزييت كافية للفصل بين السطوح المشوهه تحت تأثير الحمل المطبق، كما في حالة المسننات، [3, 4, 7]، فإن شروط التزييت تلك تدعى بالتزييت الهيدروديناميكي المرن ويرمز له اختصاراً بالرمز EHL حيث تكون سماكة طبقة التزييت بحدود $1 \mu m$. يظهر الشكل (3) الحل النموذجي للتزييت EHL حيث يتدفق الزيت في هذا الشكل من اليسار لليمين. عند مدخل التماس، تكون سماكة فلم التزييت كبيرة جداً. بالمقابل وفي منطقة تطبيق الضغط تتناقص سماكة فلم التزييت وتبقى ثابتة وبشكل موازي لاتجاه الحركة، على طول منطقة تطبيق الضغط، وتدعى بسماكة فلم التزييت المركزية (central film thickness) ويرمز لها بالرمز h_c . بالإضافة لذلك، يوجد هناك قيمة عظمى أخرى للضغط تسبب بنتوء (spick) عند مخرج منطقة تطبيق الضغط، هذا البنتوء ناتج عن الحركة الانزلاقية النسبية المرتفعة بين السطوح عند مخرج التماس وتترافق مع قيمة صغرى لسماكة فلم التزييت (thickness minimum film) ويرمز لها بالرمز h_m ، أن التناقص في قيمة سماكة

التزيت في هذه المنطقة يمكن تفسيره بالتناقص قيمة اللزوجة الديناميكية لمادة التزيت بسبب التناقص في قيم الضغط حيث تعود اللزوجة لقيمتها عند الضغط الجوي (الضغط المطبق معدوم). يتعلق توزيع الضغط EHL وقيمة النتوء بالعديد من العوامل ولكن من أهمها لزوجة (viscosity) مادة التزيت وسرعة الانزلاق النسبية بين السطوح المتماصة. هنا يجب التنويه إلى أن وجود هذا النتوء في توزيع الضغط الهيدروليكي المرن (EHD) ينتج اجهادات قص مرتفعة جداً بالقرب من سطح المسننات. كما أن استخدام نظرية هرتز لتوزيع الضغط (لا يوجد نتوء في هذه الحالة) لا يغير من قيمة النتائج بشكل كبير، ولكن سماكة فلم التزيت ضمن منطقة تطبيق الضغط تبقى ثابتة وتساوي لقيمة سماكة فلم التزيت المركزية h_c ، أي أن $h_c = h_m$.



الشكل (3): نمذجة توزيع سماكة فلم التزيت وفق نظرية EHD. حيث X يمثل اتجاه الدوران

بعد تحديد توزيع جميع بارامترات التعشيق على طول البروفيل الفعال للسن (الحمل - الضغط - عرض منطقة التماس)، فإن سماكة فلم التزيت المركزية h_c والأصغرية h_m (الموافقة لقيمة نتوء الضغط) لكل نقطة تماس بين أسنان المسننات القابلة للتشوه ضمن شروط التحميل الديناميكي، وبالإعتماد على شروط التزيت الهيدروديناميكي المرن (EHL)، تعطى وفق العلاقة التالية، [8]:

$$h_c(M) = [3,06 \cdot G^{0,56} \cdot U^{0,69} \cdot W^{-0,1}] \cdot R' \cdot \varphi_T \quad (7)$$

$$h_m(M) = [2,65 \cdot G^{0,54} \cdot U^{0,7} \cdot W^{-0,13}] \cdot R' \cdot \varphi_T \quad (8)$$

أن أحداثيات نتوء الضغط (X, Y) ، كما يظهر الشكل (3)، تعطى بالعلاقات التالية:

$$Y = (0.267 G^{0.219} U^{0.174} W^{-0.375}) \cdot P_{max} \quad (9)$$

$$X = (1 - 2.469 G^{0-0.848} U^{0.206} W^{-0.941}) \cdot a_H \quad (10)$$

حيث أن:

G : بارامتر المادة ويعطى بالعلاقة التالية: $G = \alpha^* \cdot E'$

U : بارامتر السرعة ويعطى بالعلاقة التالية: $U = \eta_0 \frac{u_1 + u_2}{E' \cdot R'}$

W : بارامتر الحمل ويعطى بالعلاقة التالية: $W = \frac{F(M)}{b \cdot E' \cdot R'}$

u_1, u_2 : السرعة المحيطة للمسنن القائد والمقاد على الترتيب.

α^* : معامل اللزوجة - ضغط (pressure-viscosity coefficient).

R' : نصف قطر الاتحناء المكافئ في نقطة التماس المدروسة (M): $R' = \frac{Rb_1 Rb_2}{Rb_1 + Rb_2}$

E' : معامل يونغ (موديل المرونة) المكافئ: $E' = \frac{2E_1 E_2}{E_1(1 - \nu_2^2) + E_2(1 - \nu_1^2)}$

v, E : موديل يونغ ونسبة بواسون على الترتيب (1 يشير للمسنن القائد و 2 للمسنن المقاد).
بالمقابل فإن جريان مادة التزييت بين أسنان المسننات لا يكون مثالي بشكل تام، حيث يؤدي تسخين الزيت (نتيجة ارتفاع درجة الحرارة) ضمن منطقة تشكل الضغط بين أسنان المسننات إلى إنقاص سماكة طبقة التزييت، لأجل ذلك فإنه من الضروري الأخذ بعين الاعتبار هذه الظاهرة من خلال استعمال عامل التصحيح الحراري φ_T والذي يحسب وفق العلاقة التالية، [9]:

$$\varphi_T(M) = \frac{1 - 13,2 \cdot \left(\frac{P_{max}(M)}{E'}\right) \cdot L^{0,42}}{1 + 0,213 \left(1 + 2,23 \cdot \left(2 \frac{u_1 + u_2}{u_1 - u_2}\right)^{0,83}\right) \cdot L^{0,640}} \quad (11)$$

حيث L : بارامتر يصف الحالة الحرارية لمادة التزييت في طور عمل المسننات وتحدد قيمته بالاعتماد على قيمة الموصلية الحرارية K_L ، اللزوجة الديناميكية η ، درجة الحرارة الوظيفية T_0 لمادة التزييت المستعملة، ومعامل اللزوجة الحرارية β ، وفق العلاقة التالية:

$$L = \eta \frac{\beta \cdot (u_1 + u_2)^2}{4K_L T_0^2} \quad (12)$$

تعتبر لزوجة (viscosity) الزيت من أهم الصفات الفيزيائية والكيميائية لنوع التزييت المستخدم في المسننات. والتي تحدد وتصف الضياعات بالاحتكاك وسماكة طبقة التزييت. تعتمد اللزوجة على شروط التماس بين أسنان المسننات. وتتعلق قيمها بقيم الحمل والحرارة والسرعة للمسننات في طور التعشيق، حيث تنخفض اللزوجة بشكل كبير مع ازدياد درجة الحرارة للسطوح المتماصة. بالمقابل، في شروط العمل القاسية للمسننات وعند نقل قيم عزوم كبيرة جداً، قد تصل قيم الضغط على أسنان المسننات لقيم مرتفعة جداً حيث تتجاوز قيمته 10^9Pa ، [8]، مما يسبب في إنقاص المسافة بين جزيئات مادة التزييت (تقترب الجزيئات من بعضها البعض) وبالنتيجة تزايد كبير في قيم اللزوجة. ونتيجة لذلك فإن اللزوجة الديناميكية η في كل نقطة تماس (M) على أسنان المسننات يجب أن توصف كتابع لقيم الضغط الاعظمي المطبق واللزوجة عند الضغط الجوي η_0 ، وفق العلاقة التالية، [9]:

$$\eta(M) = \eta_0 \cdot e^{\alpha^* P_{max}(M)} \quad (13)$$

4. النتائج والمناقشة:

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

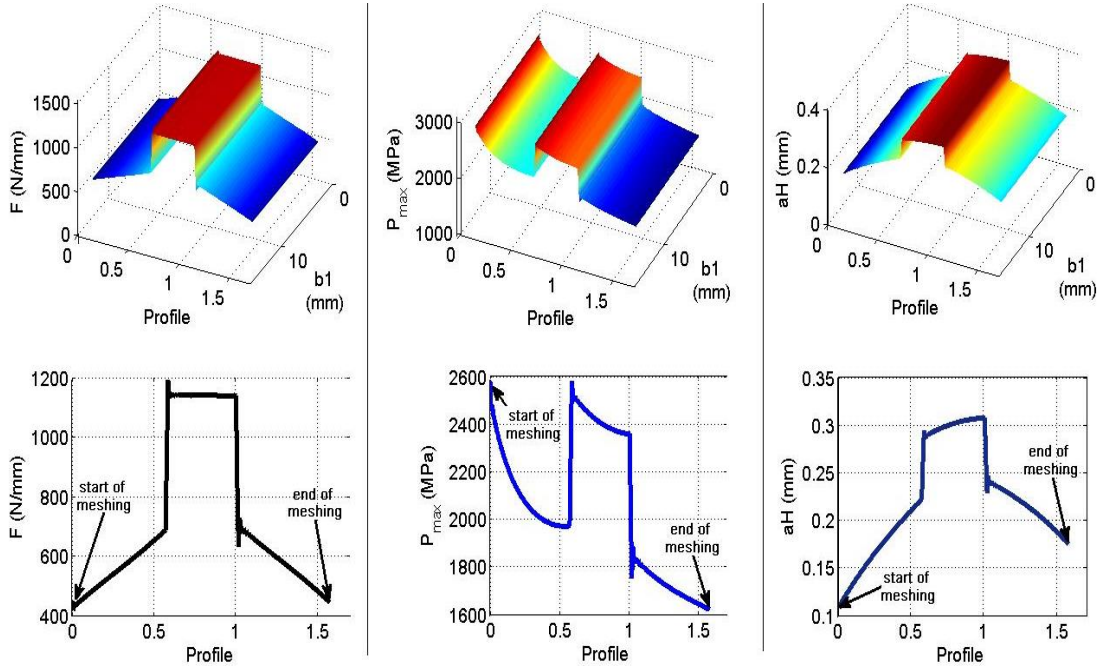
الجدول (1): المعطيات الهندسية والوظيفية لجملة نقل الحركة بالمسننات المستقيمة

Z1=18,	Z2=26	عدد أسنان المسنن القائد والمقاد
b1 =13 ,	b2=12	عرض المسنن القائد والمقاد (mm)
4		المودول (mm)
20		زاوية الضغط (درجة)
750		عزم المحرك (N.m)
$\Omega_1 =100$		السرعة الزاوية لدوران المسنن القائد (rad/sec)
$\eta_0 = 0.0404 \text{ Pa} \cdot \text{sec}$,	$\alpha^* = 0.0172 \text{ pa}^{-1}$	مادة التزييت (زيت معدني)

1-4: توزيع سماكة فلم التزيت:

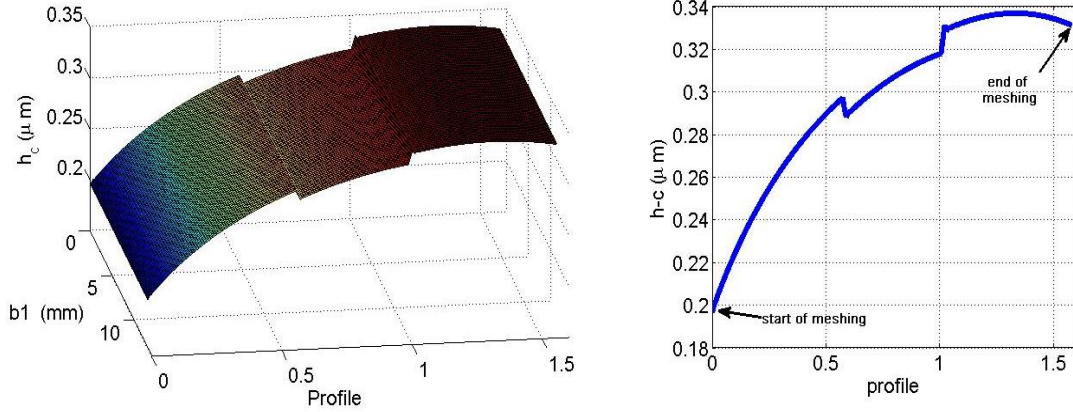
من المهم قبل دراسة توزيع سماكة فلم التزيت بين أسنان المسننات المستقيمة، معرفة توزيع بارامترات التشعيق كالحمل الديناميكي، الضغط الأعظمي وعرض منطقة التشعيق في كل نقطة تماس بين أسنان المسننات. حيث تتعلق سماكة طبقة التزيت بهذه البارامترات. النتائج التي تم الحصول عليها موضحة في الشكل (4). حيث يمكننا ملاحظة أن توزيع هذه البارامترات غير متجانس على طول بروفيل السن (profile)، حيث تملك كل نقطة تماس قيم مختلفة لهذه البارامترات وفق ما يلي:

- تكون قيم الحمل F وعرض منطقة التماس aH منخفضة جداً في نقاط بداية التشعيق (start of meshing) ونهاية التشعيق (end of meshing)، مع قيم أكثر انخفاضاً في نقاط بداية التشعيق، بينما تتركز القيم الأعظمية لهذه البارامترات في الجزء المركزي على بروفيل السن (المنطقة المجاورة لنقطة الخطوة وهي النقطة التي تمر بها دائرة الخطوة). تتواجد القيم المرتفعة للضغط الأعظمي P_{max} في نقاط بداية التشعيق، وعلى الجزء المركزي لبروفيل السن، مع قيم أكثر انخفاضاً في نقاط نهاية التشعيق.
- هنا لا بد من التنويه على أن توزيع هذه البارامترات بالنسبة لعرض السن ($b1$) يكون بشكل مستقيم وذلك لأن خطوط التماس بالنسبة لعرض السن تكون مستقيمة وتوازي محور المسننات .
- أن الاختلاف في المعطيات الهندسية للمسننات المستعملة في هذه الدراسة (كعرض السن وعدد الأسنان للمسنن القائد والمقاد) يسبب في اختلاف قيم التحميل بين نقاط بداية ونهاية التشعيق.



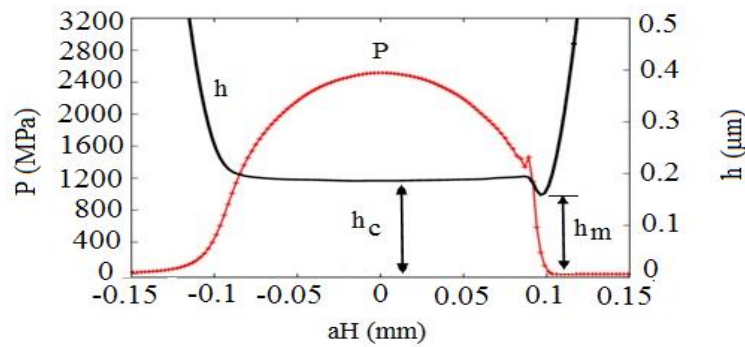
الشكل (4): تمثيل 3D لتوزيع الحمل (F) بالنسبة لعرض السن، الضغط الأعظمي (P_{max}) وعرض منطقة التماس aH على أسنان المسننات المستقيمة. ($b1$: عرض أسنان المسنن القائد. $profile$: بروفيل السن)

أن الاختلاف في قيم بارامترات التعشيق في نقاط التماس بين أسنان المسننات، يسبب في اختلاف سماكة فلم التزييت في كل نقطة تماس على بروفيل السن كما هو موضح في الشكل (5). حيث نلاحظ أن القيمة الصغرى لسماكة فلم التزييت المركزية $h_c = 0.198 \mu\text{m}$ تقع في نقاط بداية التعشيق (وهي النقاط التي تتميز بقيم منخفضة للحمل وللسرعة الدورانية وقيم مرتفعة جداً للضغط)، بينما السماكة العظمى ($h_c = 0.331 \mu\text{m}$) تتوضع في نقاط نهاية التعشيق التي تملك قيم مرتفعة جداً للسرعة الدورانية ومنخفضة جداً للضغط والحمل.



الشكل (5): تمثيل 3D لتوزيع سماكة فلم التزييت المركزية h_c بين أسنان المسننات المستقيمة

يظهر الشكل (6) توزيع الضغط EHL وسماكة طبقة التزييت في نقطة بداية التعشيق والتي تملك سماكة طبقة تزييت مركزية ($h_c = 0.195 \mu\text{m}$) وضغط أعظمي $P_{\max} = 2625 \text{ Mpa}$. حيث نلاحظ أن سماكة طبقة التزييت الأصغرية h_m ، الموافقة لموضع النتوء في توزيع ضغط EHL تتوضع في نهاية منطقة التماس. حيث تبلغ السماكة الأصغرية $h_m = 0.158 \mu\text{m}$ ومطال النتوء 1600 MPa . ومنه يمكننا الاستنتاج أن سماكة فلم التزييت الأصغرية، في مثالنا هذا، تمثل حوالي 81% من قيمة سماكة فلم التزييت المركزية، هذه القيمة توافق النتائج التجريبية والتي تبين أن: $h_m = (0.75 \div 0.85)h_c$ [10].



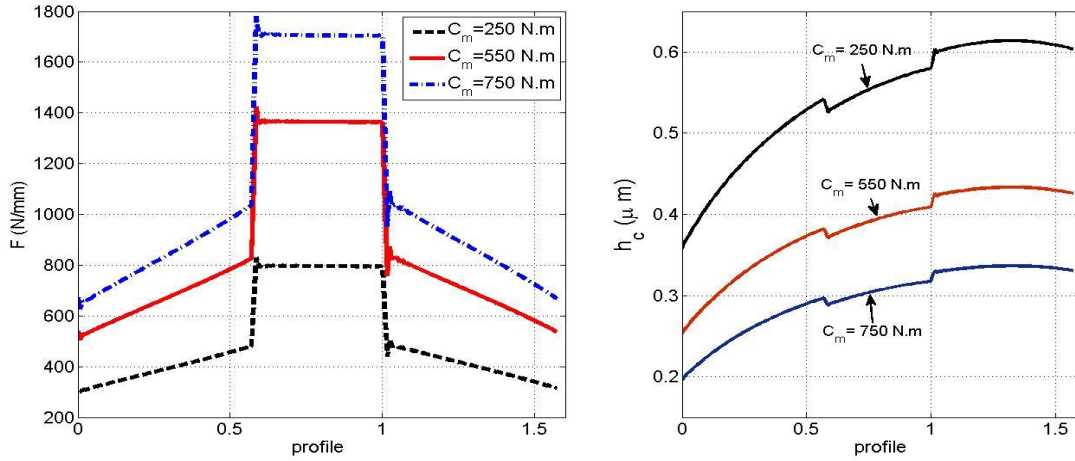
الشكل (6): توزيع كل من الضغط EHL وسماكة فلم التزييت المركزية h_c والأصغرية h_m في نقطة بداية التعشيق على أسنان المسنن القاعد.

بالاعتماد على ما سبق، يمكننا أن نستنتج أن نقاط بداية التعشيق تملك قيم منخفضة لسماكة فلم التزييت (وبالنتيجة قيم مرتفعة للاحتكاك)، الشكل (5)، من جهة، وقيم مرتفعة جداً للضغط الأعظمي، الشكل (4)، من جهة أخرى، مقارنة ببقية نقاط التماس على بروفيل السن. وبالتالي فإن هذه النقاط هي النقاط الأخطر على أسنان المسننات

لظهور مختلفة أنواع العيوب (كتعب التماس (contact fatigue) - التآكل والاهتراء (wear)... الخ) والتي يتعلق ظهور هذه العيوب بقيم سماكة فلم التزييت، من جهة، وقيم الضغط الأعظمي من جهة أخرى.

4-2: تأثير عزم المحرك:

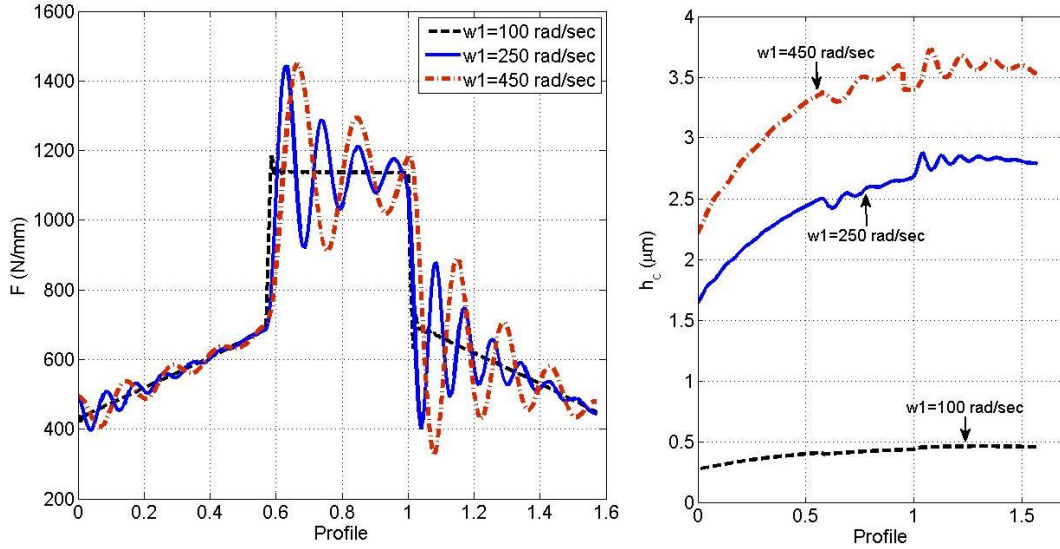
عند تزايد عزم المحرك الكهربائي المنقول للمسنن القائد، فإن الحمل المؤثر على أسنان المسننات سيزداد (تزايد الحمل الستاتيكي المؤثر) ونتيجة لذلك فإن بارامتر الحمل سيزداد W في معادلة حساب سماكة فلم التزييت المركزي أو الأصغري. وبما أن هذا البارامتر مرفوع للأس سالب ($W^{-0,1}$) في معادلة حساب السماكة المركزية على سبيل المثال) فإن تزايد قيمته سيؤدي إلى تناقص في قيمة سماكة فلم التزييت كما هو موضح في الشكل (7). وكما هو معلوم من الواقع التجريبي، فإن تزايد عزم المحرك الكهربائي (وبالنتيجة تزايد العزم الدوراني المنقول للمسنن القائد)، فإن إجهادات الضغط أو التحميل (Bearing stress) الناتجة عن قوى الأنضغاط بين أسنان المسننات ستزداد وبالتالي فإن سماكة طبقة التزييت الفاصلة بين الأسنان المتعشقة ستتناقص. أي أن أسنان المسننات العاملة في ظروف قاسية (نقل عزوم دورانية كبيرة) ستعرض للاحتكاك بشكل أكبر من أسنان المسننات التي تنقل عزوم دورانية أقل وذلك بسبب تناقص سماكة فلم التزييت. وبالنتيجة ظهور عيوب التعب والاهتراء بشكل أكبر على أسنانها مما يعرضها للانهايار.



الشكل (7): تأثير عزم المحرك على توزيع الحمل F وسماكة فلم التزييت المركزي h_c في نقاط التعشيق على طول البروفابل الفعال للمسنن.

4-3: تأثير سرعة الدوران:

عندما تزداد السرعة الدورانية للمسنن القائد تزداد سرعة دوران المسنن المقاد وبالنتيجة تزداد السرعة المحيطية لكل من المسنن القائد u_1 والمقاد u_2 . مما يصبح السن يتعرض لتأثير حمل ديناميكي متغير بشكل كبير في كامل نقاط التعشيق مقارنة بالحمل الستاتيكي المؤثر والذي ينتج عن سرعة الدوران المنخفضة. ونتيجة لتزايد السرعة المحيطية يزداد بارامتر السرعة U ، مما يؤدي إلى تزايد في سماكة فلم التزييت EHD الفاصل بين أسنان المسننات في طور التعشيق (بارامتر السرعة مرفوع لأس موجب $U^{0,69}$). هذه النتيجة موضحة على الشكل (8).



الشكل (8): تأثير سرعة دوران المسنن القائد على توزيع الحمل F وسماكة فلم التزييت h_c في نقاط التشبيك على طول البروفائل الفعال للسفن.

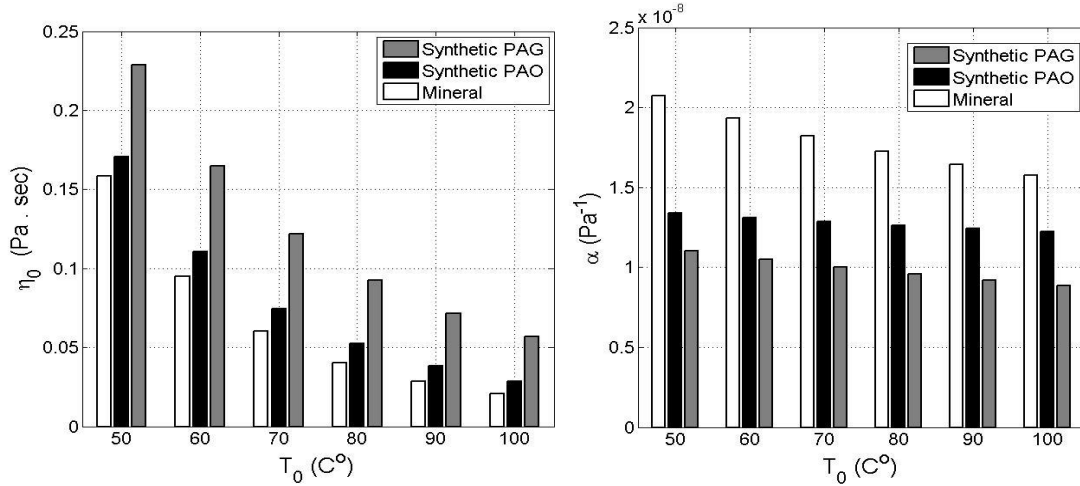
4-4: تأثير نوع التزييت:

تتكون جميع زيوت التزييت المستعملة في الوقت الحاضر، من سائل أساسي يدعى بأساس التزييت، والذي يمكن أن يكون صناعي (synthetic) أو من مصدر معدني (mineral) والذي يضاف إليه العديد من الإضافات بغية تحسين بعض الخواص الفيزيائية والكيميائية أو الوظيفية (كإضافات منع الاحتراء - منع الأكسدة - إضافات تحسين مؤشر اللزوجة... الخ). في مثالنا هذا، وبالاعتماد على AGMA 925 ، [10]، سنستخدم ثلاث أنواع من زيوت التزييت (زيت معدني - زيت صناعي Poly alpha olefin والذي يرمز له بالرمز PAO- زيت صناعي Poly alkylene glycol والذي يرمز له بالرمز PAG) والتي تستخدم بكثرة في مجال عمل جمل نقل الحركة بالمسنتات، وذلك بغية حساب سماكة فلم التزييت الأعظمية، والموافقة لكل نوع من هذه الأنواع في مختلف درجات الحرارة الوظيفية، وبالتالي معرفة أي هذه الزيوت أفضل للاستخدام في مجال عمل المسنتات. أن الخصائص الفيزيائية للزيوت المستعملة موضحة في الجدول (2).

الجدول (2): اللزوجة المطلقة η_0 ومعامل اللزوجة - ضغط α تبعاً لدرجة الحرارة الوظيفية لزيوت التزييت المستخدمة

درجة الحرارة (C°)	زيت معدني (Mineral oil)		زيت صناعي (Synthetic oil)			
			PAO		PAG	
	η_0 (Pa.sec)	α (Pa ⁻¹) $\times 10^{-6}$	η_0 (Pa.sec)	α (Pa ⁻¹) $\times 10^{-6}$	η_0 (Pa.sec)	α (Pa ⁻¹) $\times 10^{-6}$
50	0.15861090	0.020730	0.17075820	0.013401	0.22882	0.011041
60	0.09498155	0.019346	0.11041060	0.013108	0.16462	0.010484
70	0.06044313	0.018202	0.07469445	0.012851	0.12181	0.010000
80	0.04049869	0.017246	0.05254688	0.012623	0.09242	0.009575
90	0.02835234	0.016437	0.03824137	0.012422	0.07169	0.009200
100	0.02060709	0.015745	0.02866405	0.012241	0.05671	0.008867

من المعلوم أن اللزوجة المطلقة η_0 تؤثر على بارامتر السرعة U في معادلة حساب سماكة فلم التزييت الأصغرية h_m والمركزية h_c وعند زيادة قيمة هذه اللزوجة يزداد قيم هذا البارامتر، بالمقابل لذلك، فإن قيم معامل لزوجة-ضغط α يؤثر على بارامتر المادة G في معادلات حساب قيم سماكة فلم التزييت. حيث يمكننا ملاحظة من الشكل (9) أن الزيت المعدني يملك قيم أكثر ارتفاعاً لمعامل لزوجة-ضغط α مقارنة مع الزيوت الصناعية PAO و PAG في مجال درجات الحرارة المختلفة. بالمقابل لذلك فإن الزيوت الصناعية PAG تمتلك القيم الأكثر ارتفاعاً لمعامل اللزوجة المطلقة η_0 .



الشكل (9): الخصائص الفيزيائية (α ، η_0) للزيوت المعدنية والصناعية تبعاً لدرجات الحرارة

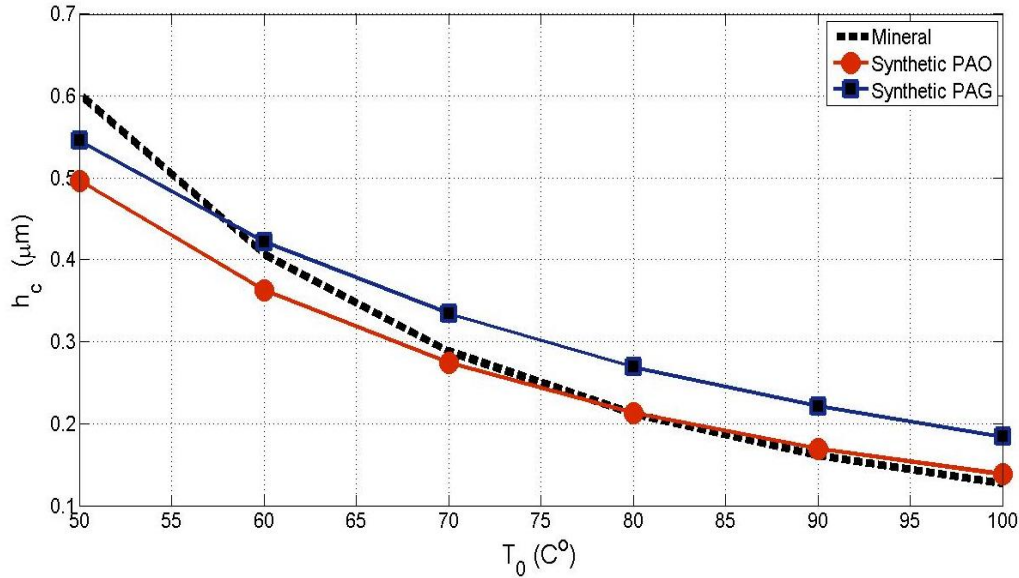
ونتيجة للاختلاف في قيم كل من α و η_0 بين الزيوت المستعملة في نطاق درجات الحرارة فإن قيم سماكة فلم التزييت المركزية ستكون مختلفة كما هو موضح في الشكل (10). حيث يمكننا ملاحظ ما يلي:

- تملك الزيوت الصناعية ميل مشابه لتغير سماكة فلم التزييت EHD مع تغير درجات الحرارة، مع قيم أكثر ارتفاعاً لسماكة فلم التزييت للزيوت الصناعية PAG مقارنة مع الزيوت الصناعية PAO. بالمقابل لذلك، فإن الزيت المعدني يملك منحني أكثر انحداراً لسماكة طبقة التزييت مقارنة مع الزيوت الصناعية المستخدمة.
- مع ازدياد درجة الحرارة تنخفض قيم سماكة فلم التزييت للزيوت المستعملة وذلك نتيجة تزايد قيم معامل التصحيح الحراري φ_T . ومن المعلوم نظرياً وعملياً أن ارتفاع درجات الحرارة تسبب في نقصان لزوجة الزيت وبالتالي تناقص سماكته.

- يعطي الزيت المعدني أكبر سماكة لفلم الزيت عند درجات الحرارة المنخفضة (أصغر من 57°C). بينما عند درجات الحرارة الأكثر ارتفاعاً (أكبر من 57°C) فإن الزيت الصناعي PAG يعطي أكبر سماكة لفلم التزييت المركزي. بالمقابل لذلك، وفي مجال درجات الحرارة بين 58°C-80) فإن الزيت المعدني يعطي سماكة فلم تزييت أكبر من الزيت الصناعي PAO ولكن أقل من الزيت الصناعي PAG.

- عند درجات الحرارة الأكبر من 71°C فإن الزيوت الصناعية تكون أفضل للاستخدام من الزيت المعدني وذلك بسبب سماكة التزييت الأكبر التي تعطيها هذه الزيوت. حيث تكون سماكة فلم التزييت للزيوت الصناعية PAO أكبر بـ 5% من الزيت المعدني، ولكن لأجل الزيت الصناعي

PAG فإنه يعطي سماكة لفم التزييت أكبر من (37 - 16) % من السماكة التي يعطيها الزيت المعدني. أي أن الزيوت الصناعية PAO, PAG هي الأفضل للاستخدام عند درجات الحرارة المرتفعة مقارنة مع الزيت المعدني



الشكل (10): سماكة فلم التزييت المركزية للزيوت المستخدمة تبعاً لدرجات الحرارة.

5: الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث نمذجة توزيع فلم التزييت EHD في نقاط التعشيق على طول البروفائل الفعال لاسنان المسننات المستقيمة. حيث تم حساب سماكة فلم التزييت ضمن شروط التزييت الهيدروليكي المرن من خلال نموذج حسابي مطور ثنائي درجة الحرية في الفتل لنقل الحركة باستخدام المسننات المستقيمة. حيث لاحظنا ما يلي:

- تختلف سماكة فلم التزييت في كل نقطة تعشيق على أسنان المسننات، حيث أصغر قيمة لهذه السماكة تتوضع في نقاط بداية التعشيق، مع قيم أكثر ارتفاعاً للسماكة في نقاط نهاية التعشيق.
 - تزداد سماكة فلم التزييت عند زيادة عدد دورات المسنن القائد، بينما تتناقص هذه السماكة مع تزايد قيمة العزم المنقول من المحرك الكهربائي.
 - تحافظ الزيوت الصناعية (PAO, PAG) في بحثنا هذا) على سماكة أكبر لفم التزييت مقارنة بالزيوت المعدنية عند درجات الحرارة الأكثر ارتفاعاً.
- ولأجل هذا، يجب الاهتمام :

- بطبيعة ونوع سوائل التزييت المستخدمة في المسننات عند نقل عزوم دورانية كبيرة، أو التي تعمل في درجات حرارة مرتفعة،
- باختيار زيوت مناسبة مع بعض الإضافات التي تعمل تحسب خصائصها لوظيفية والفيزيائية (كإضافات مقاومة الاهتراء أو تحسين اللزوجة).
- بنقاط بداية التعشيق في البروفائل الفعال للأسنان من خلال اجراء معالجات حرارية مخصصة تساهم في تقليل نشوء العيوب كالتعب أو الاهتراء نتيجة لصغر قيمة سماكة فلم التزييت في هذه النقاط.
- بإجراء المعالجات الحرارية للمسننات والتي يمكن أن تساهم في تقليل نشوء العيوب كالتعب والاهتراء.

6: المراجع:

- [1] Xiangyang. X, Junbin. L, Christoph. L, Peter. T, Max. W, Peng. D, 2019., *A model to predict initiation and propagation of micro-pitting on tooth flanks of spur gears*, International Journal of Fatigue, Vol. 122. P. 106-115.
- [2] Divya. T, Andrea. V, Stephanie, W. 2019, *On the lubrication performance of external gear pumps for aerospace fuel delivery applications*. Mechanical Systems and Signal Processing , Vol. 129, P. 659-676
- [3] Jing, W. Aigiang, Z. PAN, G. 2016., *A study of spur gear pitting under EHL condition: Theoretical analysis and experiments*. Tribology International. Vol.94., p.146-154.
- [4] Zhang, J. Ying, P. Wang, J. GUO, F. 2015. *The effects of an oscillatory entrainment velocity on the film thickness in thermal EHL point contact*. Tribology International. Vol. 90, p.519-532.
- [5] ISO 6336. 2006, *Calculation of load carrying capacity of spur and helical gears, Part 5: strength and quality of materials*,
- [6] KAabou, T, M. Bouchaala, N. Chaari, F. Fakhfakh. T, Haddar, M. 2011, *Study of a spur gear dynamic behavior in transient regime*. Mechanical Systems and Signal Processing. Vol. 25, p.3089-3101.
- [7] ZHU, D. Wang, J, Q. 2011, *Elastohydrodynamic lubrication: A gateway to interfacial mechanics – review and prospect*. Journal of Tribology, Vol. 133, p. 282-296.
- [8] Anuradha, P. Kumar, P. 2012, *Effect of lubricant selection on EHL performance of involute spur gears*. Tribology International, Vol. 50. p. 82-90.
- [9] Dong, Z., Q.Jane, W. 2011, *Elastohydrodynamic lubrication: A gateway to interfacial mechanics—review and prospect*, Journal of Tribology, Vol. 133, p. 118-132.
- [10] AGMA 925 – A03, Information sheet. *Effect of lubrication on gear surface distress*. 2003