

نمذجة الاهتراء بين القطع الاحتكاكية اعتماداً على بعض الدوال الرياضية المشهورة

د. هالة شمس الدين محمد *

د. عدنان علي احمد **

(تاريخ الإيداع 2019/ 10/14. قُبل للنشر في 2020/ 3 /8)

□ ملخص □

تم استخدام العديد من الدوال الرياضية لوصف ظاهرة الاحتكاك بين القطع الميكانيكية أثناء الحركة والعمل بظروف قاسية، ولكن جميعها كانت تقريبية، وغير دقيقة بالقدر الكافي الذي يمكننا من تقدير العمر الاستثماري للآلية وتحديد كثافة الاهتراء (ΔS)، وسرعته ($\Delta V/S$) وتسارعه ($\Delta J/S$) في المرحلة الأولى ((التشغيل الأولي (الروداج)) والمرحلة الثانية (الاستثمار)). يمكن تحقيق هذا الهدف من خلال استخدام الدوال الرياضية المشهورة التي يمكن التحكم من خلالها بمقدار الاهتراء الناتج عن الاحتكاك في المرحلتين المذكورتين، حيث تم حساب كثافة الاهتراء وسرعته وتسارعه خطياً ثم بشكل غير خطي، وحساب نسبة الخطأ من خلال النمذجة بالبرنامج المشهور (MATLAB)، مع الأخذ بعين الاعتبار الشروط المحيطة بالعمل (درجة الحرارة، نوع التحميل، نوع المواد، نوع الاحتكاك... وهكذا).

تم دراسة التغيرات الفيزيائية المتكاملة بالانحراف الفني عن الأبعاد التصميمية والتصنيعية للقطع الاحتكاكية اعتماداً على الاحتكاك السائل، نصف السائل ونصف الجاف. بناءً عليه، يمكننا التنبؤ بمرحلة عدم فاعلية الاحتكاك وبدء مرحلة العمل غير الموثوق، بحيث تكثر الأعطال وتظهر الاهتزازات وخروج الآلات من الاستثمار بسبب عدم توفر شروط الأمان وانخفاض اقتصاديتها، وتعتبر هذه المعايير هي المؤشرات الرئيسية للقيام بتجديد القطع وإجراء المعالجات الحرارية والكيميائية في الورش الخاصة بذلك في الوقت المناسب.

الكلمات المفتاحية: دوال الاحتكاك الرياضية، التحولات الفيزيائية للاحتكاك الرطب، القطع الاحتكاكية، كثافة وسرعة وتسارع الاهتراء.

* مدرسة في قسم الرياضيات - كلية العلوم - جامعة طرطوس

** مدرس في قسم هندسة المكننة الزراعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس.

Modeling of wear between friction pieces in using some famous mathematical functions

Dr. Hala Mohammad*

Dr. Adnan Ali Ahmed**

(Received 14/10 /2019. Accepted 8/ 3 /2020)

□ ABSTRACT □

Many mathematical functions have been used to describe the phenomenon of friction between mechanical parts during movement and working in harsh conditions, but all were approximate, and not sufficiently accurate to enable us estimate the investment life of the mechanism and determine the density of wear (Δs), speed (ΔV s) and acceleration (ΔJ s) In the first stage ((initial operation (Rodaj)) and the second stage (investment).

This goal can be achieved through the use of famous mathematical functions that can control the amount of wear resulting from friction in the two phases, where the density, speed and acceleration of wear were estimated linearly and then non-linearly, and the error rate was calculated through the famous modeling program (MATLAB), Taking into account the working conditions (temperature, load type, material type, friction type, etc.).

Physical changes controlled by technical deviation from the design and manufacturing dimensions of friction pieces were studied based on liquid, half-liquid and half-dry friction. Accordingly, we can predict the ineffective phase of friction and the start of the unreliable work stage, so that faults and vibrations and the exit of machines due to lack of safety conditions and low economics are frequent.

These criteria are considered to be the main indications for renewal of pieces and carrying out the chemical and thermal treatment in the specialised workshops in the due time.

Keywords: mathematical friction functions, physical shifts of wet friction, friction pieces, density, speed and acceleration of wear.

* Lecturer in the Department of Mathematics, Faculty of Science, Tartous University.

** Lecturer, Department of Agricultural Mechanization, Faculty of Technical Engineering, Tartous University

المقدمة

يعرف الاحتكاك بأنه المقاومة التي تظهر أثناء الحركة النسبية بين جسمين متماسين، أما العمل المنجز فهو جداء قوة الاحتكاك بطول طريق الاحتكاك، يؤثر الاحتكاك بين القطع في مختلف الآليات والمعدات على تغير الحالة الفنية لها، هذا التغير يتعلق بنوعية الاحتكاك المؤثر، وهنا نميز خمسة أنواع [1][6]:

أ- **الاحتكاك الجاف:** يحصل هذا الاحتكاك عندما يكون هناك تماس كامل بين السطحين الاحتكاكيين وعدم وجود طبقة زيتية بينهما، ويكون بين البطانين الاحتكاكية واسطوانة الكابح وبين السطوح الاحتكاكية للترس القائد والمقاد في الفاصل واصل، يؤدي هذا الاحتكاك إلى اهتراء كبير ويرافقه ارتفاع في درجة حرارة السطوح.

ب- **الاحتكاك السائل:** يحدث هذا النوع من الاحتكاك عندما يفصل بين السطوح الاحتكاكية طبقة زيتية سميكة، بحيث تُعمر النتوءات الناتجة عن خشونة السطح أثناء التصنيع، وتتحرك جزيئات الزيت وتحتك بالسطوح نتيجة الحركة، ومثال ذلك: الاحتكاك السائل بين عمود المرفق ومضاجعه.

ت- **الاحتكاك الوسطي:** يحدث هذا النوع من الاحتكاك عندما تفصل السطوح الاحتكاكية طبقة زيتية رقيقة جداً ناتجة عن تبخر بعض الجزيئات الزيتية، وهو حالة وسطية بين الاحتكاك الجاف والسائل. يلاحظ هذا النوع من الاحتكاك في الروملانات والمناطق التي يحصل فيها ضغوط عالية بين السطوح المتحاكة أثناء الحركة، وتزيد في حالات معينة عن الضغوط المقدره بسبب نوعية التحميل.

ث- **الاحتكاك نصف الجاف ونصف السائل[7]:** ويمثل هذا النوع من الاحتكاك الحالة الوسطية بين الاحتكاكات السابقة.

تتعلق قوى الاحتكاك بجودة مواد التصنيع ونوعية عمليات التتعيم، والمواصفات الفنية للطبقات الزيتية المستخدمة، ونظام عمل القطع الاحتكاكية (النظام الحراري، نظام السرعة).

عملية الاهتراء هي التغير المستمر لقياسات وأبعاد القطع الاحتكاكية والذي يتبعه ظهور برادة المعدن بمختلف أشكالها وتغير أشكال القطع وغير ذلك من الظواهر التي تغير الحالة الفنية للمعدة أو الآلية والتي تظهر بكثافة في مرحلة التشغيل الأولي. أما الاهتراء هو نتيجة لعملية الاهتراء، ويمكن التعبير عنه بتغير أبعاد القطع وشكلها وحجمها ووزنها. تختلف نسبة هذا التغير بحسب ظروف العمل بالمقارنة مع الحالة الفنية الأساسية للآلية [8].

يمكن تحديد الأسباب التي تؤدي إلى تغيير الحالة الفنية للمعدات والآليات بشكل عام إلى: الحالة الفنية للميكانيزمات ونظريات الاحتكاك و الاهتراء، الحالة الفنية هي مجموعة الانحرافات لجميع قطع الآلية عن المواصفات الفنية الأولية، والتي بدورها تحدد مدى صلاحية الآلة وتقرير استمرار عملها أو تحويلها إلى ورش الإصلاح وتعطى بالعلاقة التالية [2] [3]:

$$\Delta_{X_1} = X_{H_1} - X_{n_1} \quad (1)$$

حيث: Δ_{X_1} : القيمة التي تحدد جودة العمل الآتية.

X_{H_1} : القيمة التي تحدد الحالة الفنية البدائية.

X_{n_1} : القيمة التي تحدد الحالة الفنية النهائية.

أهمية البحث وأهدافه

تعددت الدوال الرياضية المستخدمة لحساب كثافة الاهتراء وسرعته وتسارعه، وبعض هذه الدوال أعطت نتائج تقريبية مقبولة مقارنة مع النتائج التجريبية وبعضها الأخر أعطت نتائج بعيدة، لذلك قمنا باختيار دالة رياضية مشهورة $(C_1 l_1^2)$ [2]، من أجل حساب الاهتراء والسرعة والتسارع خلال مرحلة التشغيل الأولي (الروداج) ومرحلة الاستثمار الطبيعي بالنسبة للمسافة المقطوعة، وبعد الحصول على النتائج قمنا بنمذجتها باستخدام البرنامج المشهور (MATLAB)، ورسمنا الخطوط البيانية للكثافة والسرعة والتسارع في كل مرحلة وكانت النتائج دقيقة وقريبة جداً من الدراسة التجريبية.

الدراسة النظرية والحسابية

يتم التعبير عن كثافة الاهتراء بالعلاقة التالية [5][8]:

$$\frac{ds}{dl} = C \cdot P^m \left(1 - K \cdot \frac{V \cdot \mu \cdot l_n}{h^2 \cdot P}\right) \quad (2)$$

حيث: ds : تغير الأبعاد الطولية للقطع الاحتكاكية.

l : طول طريق الاحتكاك.

$C \cdot m$: ثوابت لها علاقة بنوعية وظروف الاحتكاك (عامل الاحتكاك).

P : الضغط النوعي.

K : عامل يحدد العامل الهيدروديناميكي في طبقة الزيت.

V : الحركة النسبية لحركة القطع الاحتكاكية.

μ : لزوجة الزيت: العلاقة (3).

l_n : القياس الطولي لسطح الاحتكاك.

h : الخلوص الطولي بين السطوح الاحتكاكية.

نجد اللزوجة (μ) من خلال:

$$\text{viscosity} = \frac{\text{force} \times \text{distance}}{\text{velocity} \times \text{area}} = \frac{N \times m}{\frac{m}{s} \times m^2}$$

$$\mu = \frac{\frac{Kg \cdot m}{s^2} \cdot m}{\frac{m \times m^2}{s}} = \frac{Kg \cdot m^2}{s^2} \times \frac{s}{m^3}$$

$$\mu = \frac{Kg}{m \cdot s} = Kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = \text{poise} \quad (3)$$

وانطلاقاً من العلاقة (2) و (3) يمكن حل المعادلة الأساسية لكثافة الاهتراء في الوسط الرطب:

$$\frac{ds}{dl} = C \cdot \frac{Kg}{m^2} \left(1 - \frac{\frac{m}{s} \cdot \frac{Kg}{m \cdot s} \cdot m}{m^2 \cdot \frac{Kg}{cm^2}}\right) = \frac{Kg}{m^2} - \frac{\frac{Kg}{m^2} \cdot \frac{m}{s} \cdot \frac{Kg}{m \cdot s} \cdot m}{m^2 \cdot \frac{Kg}{m^2}}$$

$$\frac{ds}{dl} = C P^m - \frac{C \cdot P^m \cdot v \cdot \mu \cdot l_n}{n^2 \cdot P} \quad (3')$$

نحل المعادلة (3') المُعبّرة عن كثافة الاهتراء باستخدام البرنامج (MATLAB):

$$\left\{ \begin{array}{l} s = \text{dsolve} \\ s = \frac{P^3}{3} + 1 \end{array} \right. \quad (4)$$

تحدد العلاقة $\left(K \cdot \frac{V \cdot \mu \cdot l_n}{h^2 \cdot P}\right)$ من العلاقة (2) ، قيمة الجزء المنقول بواسطة الطبقة الزيتية من مجموع الاحتكاك وفق

الشروط المحيطة التالية:

• عندما يكون الاحتكاك جاف، عندها تكون كثافة الاهتراء متعلقة بالضغط النوعي فقط:

$$\frac{ds}{dl} = C \cdot P^m \quad (4)$$

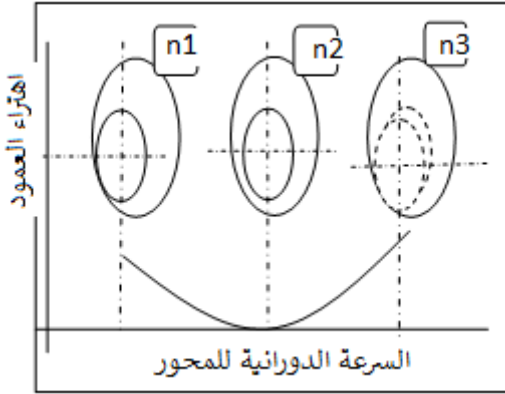
• عندما تؤمن الطبقة الزيتية فصل كامل بين السطوح الاحتكاكية، عندها يكون عمل الاحتكاك يساوي الصفر

أي:

$$\frac{ds}{dt} = 0 \quad (5)$$

تمر القطع الاحتكاكية أثناء فترة الاستثمار بمراحل

مختلفة للاهتراء (عدد دورات منخفضة، خلوص كبير، لزوجة زيت منخفضة، تحميل غير منتظم....)، ينتج عن ذلك زيادة كبيرة في كثافة الاهتراء وتغير شديد للحالة الفنية للمعدات [4].



يبين الشكل (1) منحنى تغير كثافة الاهتراء لعمود مركب على مضجع، وذلك بتغير عدد الدورات والمحافظة على الشروط الأخرى (تحميل منتظم، لزوجة ثابتة للزيت، نظام حراري ثابت وغير ذلك).

الشكل (1): تغير كثافة الاهتراء بالنسبة لسرعة دوران المحور

نلاحظ من الشكل (1)، أن هناك ثلاث مراحل لكثافة الاهتراء عند إجراء التجربة بسرعات دورانية مختلفة (n1, n2, n3)، وأن كثافة الاهتراء للمجموعة المدروسة ذات قيم متغيرة وغير ثابتة، وتتغير هذه الكثافة مع تغير ظروف العمل، ويكون الاهتراء في هذه المجموعة أقل ما يمكن عدد دورات (n2)، حسب الشكل (1) [3].

نمذجة عمليات الاهتراء الرطب

تستمر عمليات الاهتراء بدون توقف خلال فترة استثمار الآلات وعمل القطع الاحتكاكية مع بعضها البعض، لذلك يمكن رسم مخططات الاهتراء البيانية بين تغير كثافة الاهتراء (S) كتابع للزمن (t) أو كتابع للمسافة المقطوعة التي تقطعها الآلية خلال مرحلة الاستثمار (L)، وكون عمليات الاهتراء ليست بعمليات فجائية تؤدي لتغير الحالة الفنية للمعدات، نستطيع أن نميز الخواص التالية لهذه العمليات [5]:

1. عملية الاهتراء، ذات استمرارية، أي تزداد كثافة الاهتراء (S) خلال فترات الاستثمار بمقدار محدد.
2. مخطط الاهتراء ذات قيم متزايدة لكثافة الاهتراء (S).
3. يتألف مخطط الاهتراء لأي مجموعة عاملة من ثلاث مراحل:

(1) **مرحلة التشغيل الأولى (L₁):** يتم حساب كثافة الاهتراء باستخدام الدالة [6]، وهي الدالة

التي أعطت نتائج حسابية قريبة جداً من الواقع عند استخدام الطرق المباشرة في القياس:

$$\Delta S_1 = y = C_1 l_1^n \quad (6)$$

حيث ΔS_1 : كثافة الاهتراء في مرحلة التشغيل الأولى.

C_1 ، n : ثوابت تحدد تجريبياً.

L_1 : المسافة المقطوعة في مرحلة التشغيل الأولى (km).

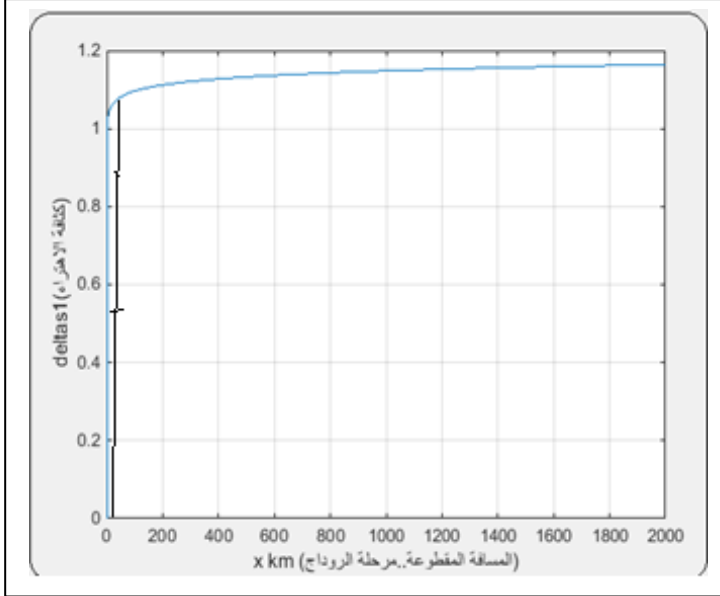
انطلاقاً من العلاقة (6)، يمكن الحصول على سرعة الاهتراء وتسارعه:

$$\frac{d(\Delta S_1)}{dt} = v_{s1} = n C_1 l_1^{n-1} \quad (7)$$

$$\frac{dv_1}{dt} = j_{s1} = n(n-1)C_1 l_1^{n-2} \quad (8)$$

نستطيع من خلال العلاقات (6) و (7) و (8) نمذجة المخططات البيانية في برنامج الماتلاب وفق ما يلي:

• العلاقة بين كثافة الاهتراء والمسافة الكيلومترية:



الشكل(2): العلاقة بين كثافة الاهتراء والمسافة المقطوعة (الروداج)

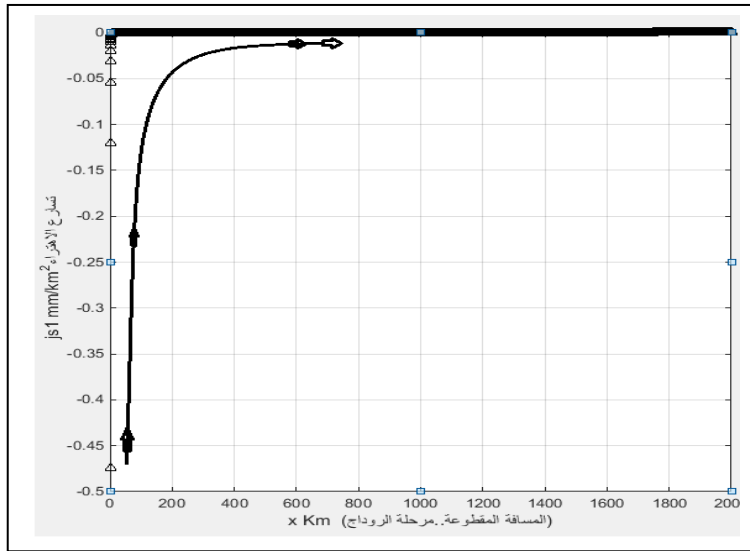
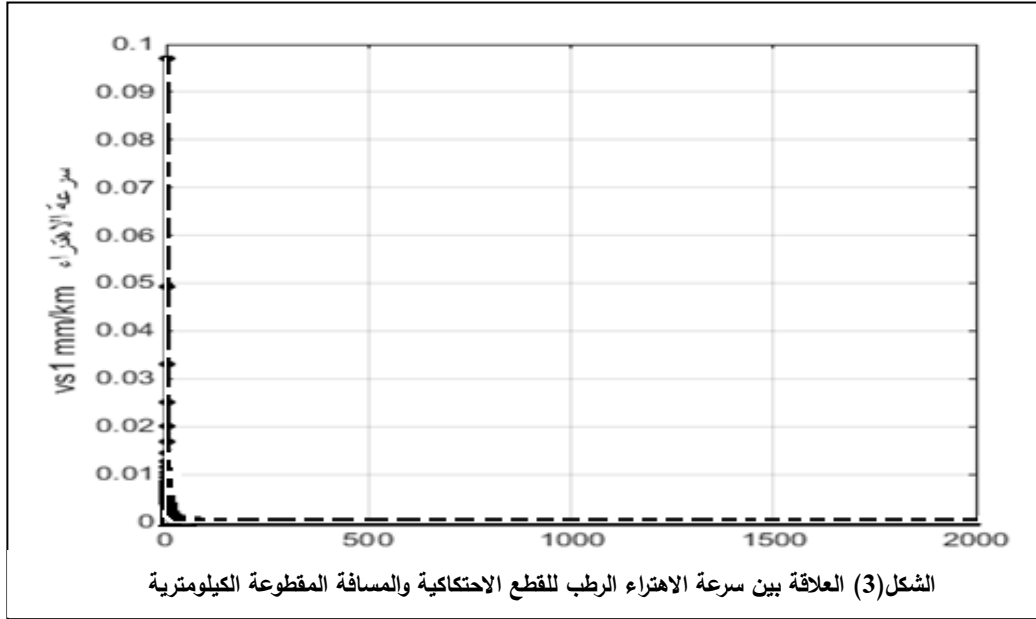
يفرض أن المسافة الموصى فيها من قبل المصدر [6] لمرحلة التشغيل الأولى هي $l_1=2000$ Km، وأن درجة الانحناء لتزايد المخطط البياني $(n=0.02)$ ، وبعد نمذجة الدالة الرياضية (6) وفق برنامج (MATLAB)، نحصل على الشكل(2):

نلاحظ من الشكل(2)، أن كثافة الاهتراء تزداد بشكل حاد خلال المسافة $(l=0 - 50$ Km).

يعود السبب في ذلك إلى وجود تنوعات بين المعادن المحتكة الناتجة عن عمليات التصنيع في الشركة، ثم تبدأ كثافة الاهتراء بالانخفاض تدريجياً من المسافة $(l=200$ km) حتى نهاية المرحلة (الروداج). تختلط التنوعات المزلة من سطوح المعادن الاحتكاكية بالزيت للمحرك، مما تُسبب بفقدان خواصه الفيزيائية والكيميائية.

• العلاقة بين سرعة وتسارع كثافة الاهتراء مع المسافة الكيلومترية:

نقوم بنمذجة سرعة الاهتراء من العلاقة (7)، وتسارع الاهتراء من العلاقة (8) باستخدام برنامج (MATLAB) فنحصل على الشكل(3): أنه في بداية مرحلة التشغيل الأولى، تكون سرعة الاهتراء مرتفعة ثم تبدأ بالانخفاض بشكل حاد خلال المسافة $(L=0-100$ Km) ثم تبدأ بالزيادة بشكل قليل مع المسافة حتى نهاية المرحلة وهذا ما يفسر كثافة الاهتراء الحاد ضمن المجال المذكور.



أما تسارع الاهتراء في مرحلة التشغيل الأولي (الروداج)، الشكل (4)، نلاحظ أن التسارع يكون سالباً لحظة بدء العمل (-0.5 mm/km^2)، ثم يبدأ بالزيادة مع تناقص سرعة الاهتراء ليصبح صفراً عند المسافة المقطوع $[L=0-100 \text{ Km}]$.

الشكل (4) العلاقة بين تسارع الاهتراء والمسافة الكيلومترية

(2) مرحلة التشغيل الطبيعي (L_2): كما مر معنا سابقاً، ومن خلال نمذجة كثافة الاهتراء وسرعته وتسارعه، نلاحظ أن الكثافة تزداد بشكل ثابت خلال مسافات كيلو مترية متساوية، لذلك تكون سرعة الاهتراء ثابتة والتسارع صفراً، كما توضح المخططات، الشكل (5).

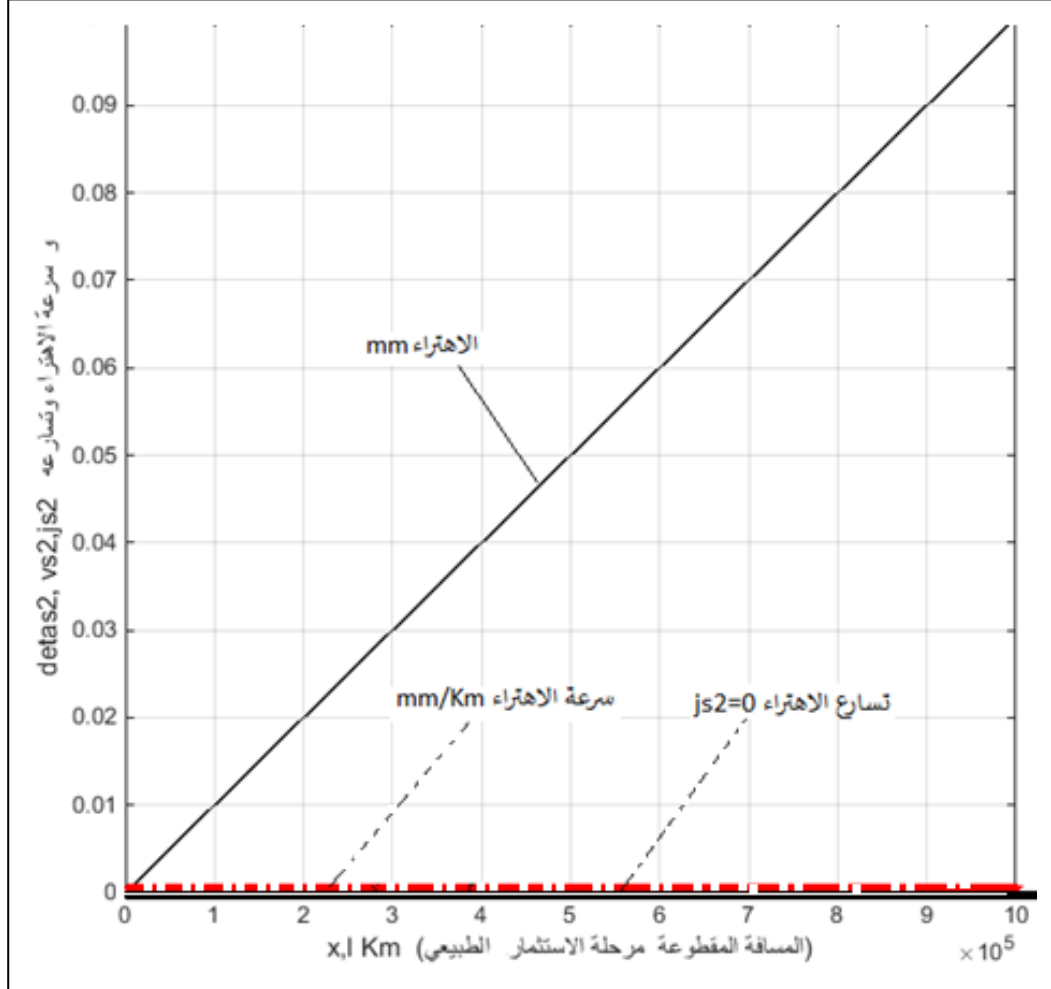
ممن سبق يمكن كتابة العلاقات (6) و (7) و (8) وفق الشروط التالية في مرحلة الاستثمار وفق ما يلي:

$$S_2 = C_2 \cdot L_2 \quad (9)$$

$$v_{S_2} = C_2 \quad (10)$$

$$j_{S_2} = 0 \quad (11)$$

باعتبار أن (c_2) هو ثابت تجريبي، والمسافة تبدأ بمرحلة الاستثمار ($L_2=2000$ Km) وتنتهي عند ($L_2=1000000$ Km)، يكون المخطط البياني باستخدام الماتلاب كما يوضح الشكل(5).



نلاحظ من خلال الشكل(5)، أن الاهتراء يزداد بشكل قليل جداً خلال مسافة كيلومترية (مرحلة الاستثمار) التي تصل إلى ($L_2=1000000$ Km)، وتكون سرعته ثابتة وتسارعه معدوم.

(3) **مرحلة التشغيل الشديد (L_3):** قبل الوصول إلى هذه المرحلة يجب إرسال الآلية إلى ورش الإصلاح لأن كثافة الاهتراء تزداد بشكل كبير، يؤدي ذلك إلى خروجها من الاستثمار وانخفاض اقتصاديتها وعدم وثوقيتها[4].

النتائج والمناقشة

عندما تتخفف قيمة التسارع (j_s)، تزداد سرعة الاهتراء بين القطع الاحتكاكية، أما عندما تكون قيمة التسارع سالبة، فإن عملية الاهتراء تتجه نحو الاهتراء الطبيعي المنتظم، أما الحالة الثالثة، عندما يكون ايجابيا فان الاهتراء يتجه إلى الزيادة الشديدة.

نلاحظ من الأشكال (2,3,4)، ما يلي:

✓ **مرحلة التشغيل الأولي أو الروداج (x_1, L_1):** تأخذ القطع الاحتكاكية وضعيتها النهائية تحت تأثير الاحتكاك ويزداد الخلوص (الاهتراء) بين تلك القطع من القيمة الإسمية (S_n) المحددة من المصنع إلى القيمة (S_1)، وهنا أخذنا القيمة من النشرة الفنية لمحرك سيارة وقيمتها ($s_n=0.02 \text{ mm}$) [3]، وقيمة الخلوص نهاية مرحلة التشغيل ($s_{\max}=0.1 \text{ mm}$)، بعد هذه المرحلة تتناقص سرعة التغير للقطع الاحتكاكية، وكذلك كثافة الاهتراء وتتخفف كثافة الأعطال الطارئة.

تعرض الآلة في هذه المرحلة إلى اهتراء شديد مع ارتفاع لدرجات الحرارة بسبب الاجهادات التي تتعرض لها المجموعة خلال العمل.

يتم إنقاص قيمة الخلوص (الاهتراء) في نهاية مرحلة التشغيل الأولي مع الإبقاء على كثافة الاهتراء والمتمثلة بزاوية المماس على المنحني ومحور المسافة الكيلو مترية. يمكن تحقيق ذلك إذا تمت في مرحلة التشغيل الأولي الإجراءات التالية:

- نظام تحميل منخفض: أي عدم زيادة التحميل والسرعات أثناء الروداج، وعدم صعود المنحدرات والابتعاد عن الوسط الخارجي الملوث (هواء وغبار).
- نظام حراري ثابت: العمل ضمن ظروف جيدة ومراقبة دارة التبريد أثناء الروداج.
- نظام سرعات محددة.
- تبديل الزيوت والشحوم والمصافي أثناء مرحلة الروداج وخاصة عند قطع مسافات قصيرة ($l_1=200\div 600 \text{ Km}$) بسبب تراكم النتوءات والأوساخ الناتجة عن عمليات التصنيع في الزيت والمصافي.

كما نلاحظ من الشكل (5) :

✓ **مرحلة الاستثمار والعمل المنتظم (l_2, x_2):** تكون سرعة الاهتراء ثابتة تقريباً، ولها علاقة مع زاوية ميلان المماس للخط البياني مع محور المسافة الكيلومترية، وبالتالي تبقى نسبة كثافة الأعطال ثابتة تقريباً، وتعتبر أطول مرحلة للآلية (السيارات السياحية الحديثة حوالي مليون كيلومتر). ويجب هنا لأن نذكر أن هذا المخطط لا يشمل الأعطال المفاجئة الناتجة من سوء القيادة أو استخدام الآلية ضمن شروط قاسية.

تتخفف قيمة الاهتراء بشكل كبير ويزداد بشكل طردي مع مسافات كيلومترية متساوية. تؤثر على المخطط عمليات الفك والتركيب وإجراء الصيانات الدورية مما قد يزيد مرحلة الاستثمار أو يخفها.

✓ العوامل الأخرى المؤثرة على سرعة وكثافة الاهتراء خلال مرحلة التشغيل الأولي ومرحلة الاستثمار:

تؤدي عملية التحميل زيادة عن الحد المسموح إلى ظهور ظاهرة الطرّق، أي الخفق بين القطع الاحتكاكية نتيجة لتوسع الخلوص (الاهتراء) بينها عن الحد المسموح به، مما يؤدي إلى تغيرات في النظام الحراري وظروف التزييت الأساسية. تزداد في هذه الظروف نسبة الميكرونشقوق وتزداد نسبة الاهتراء الميكانيكي، مما يؤدي إلى زيادة كبيرة في الأعطال وانخفاض وثوقية الآلة واقتصادية الوقود، لذلك استمر استثمار الآليات في هذه الظروف يصبح غير فعال وغير مسموح به.

نلاحظ عند استثمار الآليات أن احتمال ظهور الأعطال الطارئة سببه الاحتكاك بين القطع، ويؤدي الارتفاع الكبير في مقدار القوى المؤثرة على القطع والتي لا يتحملها المعدن المصنعة منه، لذلك يجب تصنيع القطع بمتانة تتناسب وظروف الاستثمار، في فترة التشغيل الأولي، يكون احتمال ظهور هذه الأعطال كبير جداً، أما في فترة الاهتراء المنظم يكون احتمال ظهورها قليل جداً، وفي فترة الاهتراء السريع يكون احتياطي الأمان للقطع منخفضاً، يزداد احتمال ظهور هذه الأعطال بشكل كبير جداً.

الاستنتاجات والتوصيات

1. كثافة الاهتراء للمجموعة المدروسة ذات قيم متغيرة وغير ثابتة، وتتغير هذه الكثافة مع تغير ظروف العمل، ويكون الاهتراء في هذه المجموعة أقل ما يمكن عندما تكون سرعة الدوران متوسطة.
2. الدالة الرياضية المستخدمة لنمذجة كثافة الاهتراء، ومن ثم سرعته وتسارعه في مرحلة التشغيل الأولي ومرحلة الاستثمار، أعطت نتائج قريبة من الواقع بالمقارنة مع القيم التجريبية.
3. تتعرض الآلة في مرحلة التشغيل الأولي إلى اهتراء شديد مع ارتفاع لدرجات الحرارة بسبب الاجهادات التي تتعرض لها المجموعة خلال العمل، بحيث تتناقص السرعة من قيم موجبة إلى أن تصل إلى قيمة ثابتة والتسارع يتزايد من قيمة سالبة إلى أن يصبح معدوماً.
4. تعمل الآلة بدون أعطال مفاجئة عند تبديل الزيوت في المحرك والمصافي مرتين خلال مرحلة التشغيل الأولي وضمن شروط جيدة (سرعات منخفضة- نظام حراري ثابت - شروط خارجية مناسبة- تحميل متدرج).
5. تكون سرعة الاهتراء ثابتة تقريباً في مرحلة الاستثمار، ولها علاقة مع زاوية ميلان المماس للخط البياني مع محور المسافة الكيلومترية (صغيرة جداً جداً)، وبالتالي تبقى نسبة كثافة الأعطال ثابتة تقريباً.
6. يمكن ومن خلال المخطط البياني لكثافة الاهتراء تحديد المسافة المقطوعة لخروج الآلة من الاستثمار.
7. استخدام معادن للقطع الاحتكاكية بعد خضوعها للمعالجات الحرارية والكيميائية، لتخفيض كمية الحبيبات المنتقلة للقطع الأخرى من خلال الزيت، حيث تكون قساوتها أكبر من قساوة المعدن المصنعة منه بسبب الشروط الداخلية والمواد الصمغية الموجودة أصلاً في الزيت.

المراجع المستخدمة

1. العربية:

1. د.موسى المحمد، د.عدنان علي أحمد وآخرون، دراسة مخططات الاهتزاز في منظومة عمل الفرامل، مجلة جامعة تشرين للعلوم الهندسية، المجلد(37)، العدد(4)، 2015.
2. أحمد فايز الزبيق، أسس الصيانة والإصلاح، جامعة دمشق، مطبعة رياض، 1983، ص(14-56).
3. أحمد فايز الزبيق، محطات الصيانة والإصلاح، جامعة دمشق، مطبعة الداودي، 1984، ص(180-150).
4. عادل الصفار، المرجع الميكانيكي العام(ترجمة) ، دار مير - موسكو، يوكانشوف.أ ، 1987.
5. بتروف.يو.ن، سيلفانوف، آ. وغيرهما، صيانة وإصلاح المعدات الثقيلة، 1982.

2. المراجع الأجنبية

6. TANEL,M, OSORIO,G ; BERNARDO,D,M ; ASTOLFI ,A . Existence, stability and robustness analysis of limit cycles in hybrid anti-lock braking system, International journal of control, Vol. 82, No. 4, April 2009, 659–678. 4
7. OZDALYAN , B, Development of a slip control anti-lock braking system model. International Journal of Automotive Technology .Vol. 9, No. 1 , 2008 , pp.71-80.
2. Çağlar Başlamışli,S ; Emre Köse, İ ; Günay Anlaş . Robust control of antilock brake System . Vehicle system Dynamics: International journal of Vehicle mechanics and mobility, Vol. 45, No. 3, March 2007, 217–232.
8. OLSON, W, and MILACIC, 1996,. Development of antilock braking traction and control systems of the advanced technology demonstrator II using DADS simulation code. Int. J. Vehicle Design 17, 3, 295-317.