

## دراسة إمكانيات وضع موديل تشخيصي (مرحلة التلقين) لاهتزازات المحركات في السفينة

الدكتور محمد شلوف \*

تاريخ الإيداع 28 / 3 / 2016. قُبل للنشر في 29 / 6 / 2016

### □ ملخص □

قمنا في هذه الدراسة بوضع نموذج رياضي شكّل أساساً لوضع نموذج رقمي تشخيصي لمسألة العلاقة بين عزم دوران المحرك (وبالتالي الاستطاعة)، والخلوصات في المضجعين الأساسي والثانوي لعمود المرفق، وذلك لتشخيص قيم الخلوصات في هذه المضاجع/والتي تؤثر حتماً على العزم وعلى اهتزازات المحرك/ حيث أجريت تجارب متعددة وكبيرة الحجم لمختلف الحالات من خلال إجراء المحاكاة والتجريب الحسابي على النموذج التشخيصي، والذي يشكل المرحلة الأولى والأساسية (مرحلة التلقين) لعملية التشخيص الكاملة، وفي النهاية قمنا بمناقشة النتائج ووضعنا بعض الاستنتاجات والتوصيات لاستكمال العمل في المستقبل.

**الكلمات المفتاحية:** عزم الدوران - زاوية دوران المحرك - قيم الخلوص - قيم الانزياح - تابع النقل - قوة العطالة.

\* أستاذ مساعد - قسم الهندسة البحرية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## Studying of Possibilities for Performing a Diagnostics' Model (Instruction phase) of Marine Engines' Vibrations Onboard Ships

Dr. Mohammad Shallouf\*

(Received 28 / 3 / 2016. Accepted 29 / 6 / 2016)

### □ ABSTRACT □

In this study, we have developed a mathematical model, which formed the basis for the development of a digital diagnostic model, for the question of the relation between the engine torque (and therefore power), and the clearances in the basic and secondary bearings of the crankshaft, to diagnose clearance values in these bearings, /which will inevitably affect on the torque and the vibrations of the engine/, where multiple and various grand-scale case experiments were carried out through simulation and arithmetic experimentation on a diagnostic model, which constituted the first and main phase (the instruction phase) of the full diagnosis. And at the end we discussed the results and put some conclusions and recommendations to complete the work in the future.

**Keywords:** Torque - Engine rotation angle - Clearance values - Displacement values – Transfer function - Force of inertia.

---

\*Associate Professor, Department of Marine Engineering, Faculty of Mech. & Elec. Engineering - Tishreen University, Lattakia – Syria.

## مقدمة:

تمثل السفينة منشأة ميكانيكية معقدة من الآلات والميكانيزمات (الآليات)، وبالتالي فإن مبادئ وطرائق انتشار الإشارات الصوتية فيها تكون معقدة أيضاً، ولهذا السبب يصح تخفيض انتشار الضجيج الداخلي فيها هدفاً صعباً بسبب الطبيعة الخاصة لها كمنشأة عائمة تتأثر بكثير من العوامل الخارجية. يشكل بدن السفينة (Ship's Hull) تصميمياً منفصلاً يحوي عدد من مصادر الضجيج العالي، وهذا الأمر صحيح بشكل خاص في غرفة المحركات التي هي عبارة عن فراغ محدود يحوي المحرك الرئيسي و المحركات المساعدة، وعلبة السرعة، وعمود الرافص والتجهيزات المساعدة ومولدات الكهرباء والمضخات والمراوح والضواغط وغيرها. تجعل هذه المحدوديات (المحددات) الاستخدام الكامن لبعض طرق تخفيض تأثيرات الاهتزازات المترافقة مع العمليات المذكورة أعلاه صعباً جداً. من الأهمية بمكان لمكافحة الضجيج تحديد كل من المصدرين الأساسيين لتولد وانتشار طاقة الضجيج والاهتزازات المؤثرة بطريقة مباشرة أو التي تتخذ شكل الصدى و/أو الموجات الانعكاسية التي تولد صوتاً في الهواء أو المواد [1،3].

بناءً على ما سبق يلزم معرفة وفهم طرق ومنابع تولد الضجيج في السفينة وطرق انتشاره، لنتمكن بدورنا من وضع الطرق والوسائل اللازمة لمكافحة صدوره وتولده، لكن الأمور تصبح أكثر كمالاً في حال تكمننا من تشخيص الحالة الفنية للآلات والآليات في السفينة، وتحديد دور الاهتزازات المتولدة والمولدة للضجيج، ومصادر تلك الاهتزازات، من أجل التدخل في الوقت المناسب لمنع "أو على الأقل تخفيض" تولد الاهتزازات وإصدار الضجيج. من خلال التحليل المعمق لمصادر الضجيج والاهتزازات في السفينة يتبين أن المصدر الأساسي للإشارات الاهتزازية في السفينة هو محركات الاحتراق الداخلي، أي المحرك الرئيسي والمحركات المساعدة التي تحرك مولدات التيار الكهربائي. المصدر الآخر للاهتزازات المحسوسة هو التجهيزات المساعدة كالمضخات والضواغط والنظم الهيدروليكية وعلبة السرعة الخاصة بالمحرك الرئيسي والرافصات ومنظومات التكيف والتهوية. يعتمد اسهام كل مصدر من مصادر الضجيج في المستوى العام للضجيج في غرفة المحركات على موقعه في البدن وعلى نوع وأبعاد السفينة. وتكون هذه المصادر في الغالب في الجزء الخلفي من البدن، وتؤثر من هناك على أماكن المعيشة والعمل في السفينة. الضجيج الغالب في فراغ غرفة المحركات هو الضجيج الهوائي سواء المباشر أو المنعكس، أما في الأجزاء أو الفراغات البعيدة فيسيطر الضجيج البنائي (الهيكلي). وبسبب نقل الطاقة الميكانيكية فإن المحرك الرئيسي الذي يصدر الاهتزازات الناجمة عن فعل القوى المختلفة يعتبر المصدر الأساسي للطاقة الصوتية (الضجيج) من النوعين المذكورين أعلاه (الهوائي والبنائي) [4] (سنتكون هذه المشكلة موضوعاً لدراسة لاحقة). جدير بالذكر أنه تم البدء بهذا البحث منذ سنوات، ولكن العمل الفعلي فيه بدأ في صيف العام 2015 في جامعة تشرين.

## أهمية البحث وأهدافه:

يسبب الضجيج تأثيراً ضاراً في الجملة العصبية، وفي نفسية الفرد، وبحسب شدة الضجيج وطبيعته ودوام تأثيره، فإنه يؤثر سلباً في المعنويات، ويسبب التعب، ويقود إلى النرفزة والضعف الجسدي (تراجع القدرة على الحركة والعمل)، ويخفف الإنتاجية. ويمكن أن يؤدي تأثيره الطويل إلى أمراض مهنية، وإصابات سمعية وعصبية دائمة [2]. من هنا تأتي أهمية البحث الذي نسعى من خلاله إلى دراسة السبل الآيلة إلى تخفيض الضجيج، من خلال وضع موديل تشخيصي للاهتزازات أهم مصادره وهي محركات الاحتراق الداخلي، سعياً لوضع الطرق الكفيلة بتخفيضه.

## طرائق البحث ومواده:

تعتبر الجمل الميكانيكية في السفينة كمحركات الاحتراق الداخلي مع الدولاب المعدل والرفاص مع عموده من المصادر الأساسية للضجيج والاهتزازات في غرفة المحركات والسفينة بشكل عام، وبالتالي يمكن استخدامها كموضوع للتشخيص الفني الاهتزازي [5]. على هذا الأساس يمكن استخدام معطيات قياس عزوم الفتل والاهتزازات الناتجة عنها كمؤشرات تشخيصية تسمح بتحديد ومعالجة المسببات، التي تمثل خلوصات الازدواجات الحركية (كالمفاصل المتحاكة في المحركات) أوضح صورها [6]. في هذا الإطار فإن الطرق الأساسية لتشخيص الحالة الفنية لمختلف الآلات والتجهيزات في الوقت الحاضر هي طرق تقوم على أساس نظرية تعرف الأشكال، وهذه الطرق تتطلب الحصول على المعلومات الضرورية عن الآلة على مدى فترة استثمارية (تشغيلية) طويلة نسبياً، وبكمية كبيرة من نتائج قياس عدد من البارامترات، وذلك لنتمكن من وضع تصور عن الحالة الفنية وتشخيصها بشكل أقرب للصحة، وتدقيق قيم المؤشرات التشخيصية [7]. من هنا نرى أن استخدام الطرق الوظيفية العامة ذات الموديلات الديناميكية المبنية مسبقاً يسمح بتقليل الوقت اللازم لتحديد المؤشرات التشخيصية، وتقليل التكاليف اللازمة للدراسات التجريبية، والحصول السريع على النتائج المؤهلة لاتخاذ القرارات بشأن تخفيض الاهتزازات والضجيج الصادر عنها. في هذا الإطار يعتبر المخطط البياني المأخوذ من الأسطوانات المختلفة لمحرك السفينة مصدراً غنياً بالمعلومات عن انحرافات أو أعطال مختلفة لأجزاء المحرك [8].

تؤثر عزوم فتل محرك على الكتلتين الأوليتين في المحرك، بينما يؤثر عزم ممانعة من جهة الآلة العاملة (هنا تتمثل في الرفاص) على الكتلة الأخيرة. في كثير من الأحيان ولغايات التحكم المستمر لدورة العمل في المحركات الرئيسية والمساعدة في السفينة تتم دراسة تأثير التنظيم والتحكم في الأسطوانات على عزم الدوران وعزم فتل عمود الرفاص، وتسمح الطرق والبرامج الموضوعية لهذه الغايات بما يأتي:

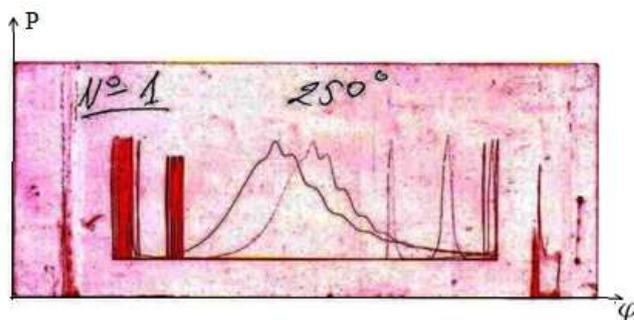
- تحديد المركبات الديناميكية لعزم الدوران الكلي في المحرك غير الخاضع للتحكم، وعمود مرفق مطلق الصلابة.

- تحديد المركبات الديناميكية لعزم الدوران، مع الأخذ بالاعتبار مواصفات المرونة والتخامد لعناصر عمود الرفاص.

- الأخذ بالاعتبار تأثير المركبات الديناميكية لعزم الرفاص لكلا الحالتين السابقتين.

على هذا الأساس سنقوم بنمذجة ومحاكاة العلاقة بين عزم دوران المحرك وخلوصات الازدواجات المتحاكة الأساسية فيه، للوصول إلى علاقة تبادلية تسمح بتحديد قيمة الخلوصات في المزدوجات المذكورة من خلال قياس عزم الدوران، وبالعكس، وذلك لتحديد لحظة التدخل لإزالة الخلل.

تسمح برامج المحاكاة في هذه الحالة بالقيام بالنمذجة الرقمية لنظم متعلقة بسرعات مختلفة لمواصفة الرفاص، عند التحكم العشوائي أو المحدد للمحرك اعتماداً على الضغط المتوسط البياني [9،10] (نورد في الشكل (1) مثلاً على تلك المخططات، والتي قمنا بأخذها بواسطة ميين عادي من السفينة السورية "سوريا" التابعة للمؤسسة العامة السورية للنقل البحري)، وذلك لدراسة تأثير انعدام التحكم في الأسطوانات على عزم الدوران الكلي للمحرك. يبلغ الانحراف الأعظمي للضغط البياني في الأسطوانات حوالي  $\pm 10\%$  من الضغط المتوسط البياني للمحرك ككل.



الشكل (1) المخطط البياني للأسطوانة الأولى للمحرك مأخوذ بواسطة مبيّن ميكانيكي عادي (مرتين للمقارنة)

يدل التحليل المعمول في [11] على أنه في حالات عدم التحكم في طيف العزم الكلي تظهر إشارات من الأسطوانات غير الخاضعة للتحكم، وإشارات متناغمة ذات مطالات قابلة للمقارنة مع مطال الهارمونيك الرئيسي الثاني. بهذا المعنى فإن نتائج الاحتمال النموذجي لعمل المحرك البحري (بدون رفاص وعند عمود مرفق ذي صلابة مطلقة)، تعطي أيضاً الأساس الكافي لإجراء التجريب الحسابي على الجملة الديناميكية ذات عزوم العطالة الكتلية الفعلية، والمواصفات التخميدية عند شروط تحريض نموذجي حقيقي لعمود الرفاص. ولتحقيق هذا الهدف يجب عمل طريقة حسابية لتحديد (حساب) اهتزازات القتل القسرية التخميدية، مع الأخذ بالاعتبار الوضع الخاص للمسألة المعروضة أعلاه للحصول على مؤشر تشخيصي غير مباشر من المعطيات التجريبية التي تم قياسها بالطرق العادية (التقليدية). من الطرق الواردة في كثير من المراجع [5, 6, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 22] يمكن اختيار أكثرها مناسبة لحل المسألة الديناميكية للتحريض المنمذج هي طريقة المحاور الرئيسية. يسمح هذا المنهج بما يلي:

-دراسة تأثير جميع الأشكال على استجابة المنظومة، وليس فقط على الهارمونيك الطنيني في المنظومة المدروسة.

- التكامل المباشر للعزوم التحريضية على دورة عمل كاملة من دون إجراء عمليات تقريب أو نشر بفورييه، ومنه على العشوائية، بما في ذلك عزوم الصدم والتحميل المميز، والتي هي تحميل مميز لاستثمار عمود الرفاص في ظروف الجليد.
- الأخذ بالاعتبار التشوه بأشكال مختلفة، وإجراء تحليل للخواص التخميدية لعناصر عمود الرفاص.
- إجراء دراسات لحالات التحميل الديناميكي لعمود الرفاص عند النظم الانتقالية للتحميل.
- يتطلب استخدام المنهج المحدد للتشخيص الاهتزازي للآلات المكبسية (بشكل خاص محركات الاحتراق الداخلي) في السفينة وضع موديل رياضي يشمل جميع الأعطال النموذجية للمحرك. هذا يعني أن التعامل مع محرك الاحتراق الداخلي كموضوع للتشخيص الفني (وبخاصة الاهتزازي)، يتطلب شمول المحرك ذاته وأكثر مفاصله أهمية في الموديل التشخيصي [12]. ونورد فيما يلي أهم هذه المفاصل:

  - 1 العناصر التي تحول الطاقة الكيميائية إلى طاقة حرارية أو ميكانيكية (منظومة الوقود، منظومة الهواء، مجموعة المكابس والأسطوانات، محور توزيع الحركة والصمامات).
  - 2 العناصر التي تقوم بنقل الطاقة الميكانيكية (عمود المرفق، توابع عمود المرفق "مضاجع، رؤوس منزلقة... إلخ").
  - 3 العناصر المساعدة التي تؤمن عمل العناصر الأساسية السابق ذكرها (دارة التزييت، دارة التبريد).

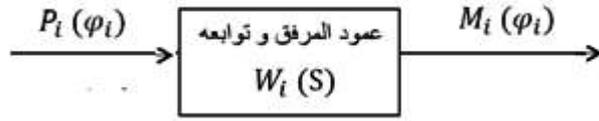
وفقاً لما ذكرنا أعلاه سنتعامل مع المحرك ومفاصله على عدة مستويات:

- 1 - المستوى الأول: يتمثل في تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة حرارية وطاقة حركية. فمنظومة الوقود، ومنظومة إعطاء الهواء إلى الأسطوانات من أجل عملية الاحتراق، كما مجموعة المكابس والأسطوانات، ومجموعة عمود الكامات (عمود توزيع الحركة) والصمامات، كلها تؤمن النوعية المطلوبة لدور الاحتراق. فجميع الأعطال ستؤثر في النهاية على القيم المتضمنة في المخططات البيانية للمحرك  $P(\varphi)$ ، وهدفنا أن نكتشف ما هو بالضبط تأثير كل عطل على شكل وقيم المخطط البياني:

$$P(\varphi) = P(\varphi, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_g) \quad (1)$$

حيث:  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_g$  - ثوابت تحتسب (تأخذ بالاعتبار) الحالة الفنية لمختلف المفاصل.

- 2 - المستوى الثاني: يتمثل في إعطاء أو نقل للطاقة الحركية، والذي يظهر الشكل (2) مودياً له:



الشكل (2) موديل تشخيصي لمجموعة نقل الحركة

حيث:  $\omega_i (s)$  - تابع النقل، ويمثل تحويل القوى المؤثرة في عزوم الدوران.

تتمثل أعطال مجموعة نقل الحركة (عمود المرفق وتوابعه) بشكل رئيسي في تآكل المزدوجات الكينيماتيكية (المضاجع الرئيسية وأذرع الوصيل).

- 3 - المستوى الثالث: مهمته تأمين العمليات الواردة في المستويين الأول والثاني.

إذا فرضنا أن عملية التزييت تؤثر بشكل ما في تخميد اهتزازات الفتل الممتلئة من خلال ثوابت معينة في الموديل الرياضي، فمن الضروري الأخذ بالاعتبار تأثير لزوجة الزيت على الفعالية الاهتزازية للمحرك [16، 14]. في هذه الحالة يمكن القبول بأنه عند حالة فنية محددة تكون الثوابت المذكورة ثابتة القيمة، ويمكن تحديدها من خلال طرق تحديد المنظومات (الجمل) الميكانيكية المعروفة في علم التشخيص الفني.

يجب دراسة العمليات الفيزيائية بشكل معمق في المستويات المختلفة، والتأثير المتبادل فيما بينها لوضع

موديل ديناميكي كافٍ لهذه العمليات. هناك دراسات متعددة حول تأثير وجود عطل (انحراف عن الحالة الفنية الصحيحة) في مجموعة المكابس والأسطوانات، وعلى منظومة الوقود والصمامات على شكل مخطط الضغط البياني [8]. في بعض الدراسات يمكن أن يمثّل المخطط البياني المنشور من خلال توابع تجريبية، لا تتعلق بالحالة الفنية للمحرك:

$$P_i(\varphi_i) = P_{i0}(\varphi_i) + \eta_i \cdot P_{i1}(\varphi_i) \quad (2)$$

حيث: 0 يرمز إلى الحالة الأولية (الصحيحة) للمحرك.

يؤدي التأثير المتزامن لبعض الأعطال النموذجية على الإشارات التشخيصية إلى بعض الصعوبات في

التحديد الدقيق لمكان هذه الأعطال [17]، ولذلك نرى أنه في كثير من الدراسات يتم تطبيق طرق الأمثلة [18]. لقد

كانت دراسة المستوى الأول موضوع دراسة سابقة، وسنقوم في هذه الدراسة بدراسة المستوى الثاني (المتعلق بشكل أساسي باهتزازات المحرك البحري).  
يتم الحصول على تابع النقل من قانون انحفاظ الطاقة (بالتحديد هنا الطاقة الميكانيكية)، وبناءً عليه نأخذ علاقة العمل البسيطة:

$$dA = M(\varphi).d\varphi = P(\varphi).dx$$

فنحصل على علاقة للانتقال الزاوي:

$$F_i(\varphi_i) = dx_i/d\varphi_i = M_i(\varphi_i)/P_i(\varphi_i) \quad (3)$$

بدون الأخذ بالاعتبار التآكل في المزدوجات الكينيماتيكية (المزدوجات المتحاكة كالمضاجع مثلاً) لمنظومة عمود المرفق وملحقاته، يأخذ تابع النقل شكلاً آخرًا [13]، أي:

$$F_i(\varphi_i) = \ell \cdot \sin(\varphi_i) + (h/2) \cdot \sin(2\varphi_i) \quad (4)$$

$$\text{حيث: } h = \ell/L$$

$\ell$  - نصف قطر ركبة أو ساق عمود المرفق.

$L$  - هي طول ذراع التوصيل (الشكل 4).

عندما يكون هناك خلوصات في الازدواج الكينيماتيكية نتوقع أن تحصل تغيرات كما في تابع النقل، كذلك في قوى العطالة للمكبس. لنفرض الآن أنه يوجد خلوص بين عينة المرفق والمضجع مساوية لـ  $B = R - r$ ، فيصبح التوضع المتبادل بين العينة والمضجع تحت تأثير القوة  $Q$  كما هو مبين على الشكل (3).

بالنظر للشكلين (3 و 4) أعلاه:  $O_1 \cdot O_2 = R - r = B$

حيث:  $R$  و  $r$  هي أقطار العينة والمضجع. و:

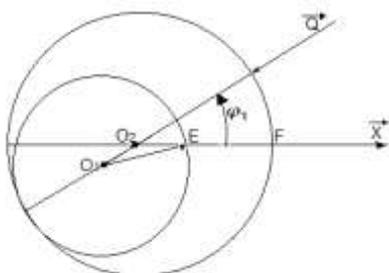
$$\delta_x(\varphi_1) = EF = R - O_2E$$

$$\left( \frac{\vec{x}}{x}, \frac{\vec{Q}}{Q} \right) = \pi - \varphi_1$$

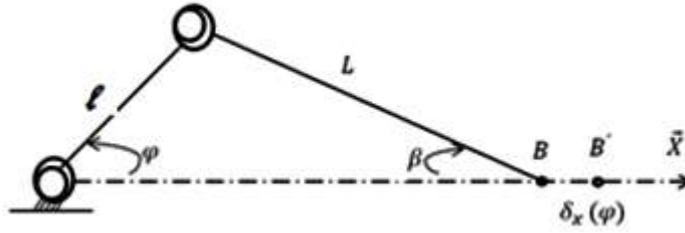
$$\frac{\vec{x}}{(O_1E)^2} = \left( \frac{\vec{x}}{O_1O_2} + \frac{\vec{x}}{O_2E} \right)^2$$

$$\delta_x(\varphi_1) = B + B \cdot \cos \varphi_1 + (B \cdot \sin \varphi_1)^2 / r$$

وبما أن:  $B \ll 1$  نقبل:



الشكل (3) التوضع المتبادل المفترض بين عينة عمود المرفق والمضجع في حال وجود خلوص بينهما



الشكل (4) مجموعة المرفق - ذراع التوصيل

$$\delta_x(\varphi_1) = B + B \cdot \cos \varphi_1 \quad (5)$$

يحدد انتقال المكبس (مع الأخذ بالاعتبار الخلوص "شكل 4") بالعلاقة:

$$X = OB \quad ; \quad BB' = \delta_{OX}(\varphi) + \delta_{MX}(\varphi) \quad (6)$$

حيث:  $\delta_{OX}(\varphi) = \delta_0(1 + \cos \varphi)$  ;  $\delta_{MX}(\varphi) = \delta_M(1 + \cos \beta)$    
  $\delta_{OX}(\varphi)$  و  $-\delta_{MX}(\varphi)$  الخلوصات بالمحور  $OX$  وبالتالي في المضجع الأساسي والثانوي (المتصل مع ذراع التوصيل).

نرى من الشكل (4) أن  $X = OB' - BB'$  ، وبعد حساب تجيب الزاوية  $\beta$  :

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - h^2 \cdot \sin^2 \varphi} = 1 - \left( \frac{h^2}{2} \right) \cdot \sin^2 \varphi \quad (7)$$

نحصل على:

$$X(\varphi) = \left( \frac{\ell}{h} - \delta_m \right) + (\ell - \delta_o) - (\ell - \delta_o) \cos \varphi + \left( \frac{\ell}{h} - \delta_m \right) \sqrt{1 - \left( \frac{\ell - \delta_o}{\frac{\ell}{h} - \delta_m} \right)^2 \sin^2 \varphi} \quad (8)$$

حيث:  $\delta_o$  هو الخلوص في المضجع الرئيسي، و  $\delta_m$  هو الخلوص في المضجع الثانوي   
 بعد إهمال العنصر الحاوي على  $h^2$  ينتج:

$$F(\varphi) = dX/d\varphi = M/P = (\ell - \delta_o) \sin \varphi + \frac{(\ell - \delta_o)^2 \sin 2\varphi}{2 \left( \frac{\ell}{h} - \delta_m \right) \sqrt{1 - \left( \frac{\ell - \delta_o}{\frac{\ell}{h} - \delta_m} \right)^2 \sin^2 \varphi}} \quad (9)$$

وتكون قوة العطالة الخاصة بالمكبس:

$$\phi(\varphi) = m \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot [\ell \cdot (\cos \varphi + h \cdot \sin 2\varphi) - \delta_o \cdot \cos \varphi] + m \cdot \ddot{\varphi} \cdot [\ell \cdot (\sin \varphi + \left( \frac{h}{2} \right) \cdot \sin 2\varphi) - \delta_o \cdot \sin \varphi] \quad (10)$$

كما نرى فإن الخلوصات في المزدوجات الكينيماتيكية الرئيسية تؤثر من خلال  $F(\varphi)$  و  $\phi(\varphi)$  على اهتزازات الفتل، ويكون تأثير الخلوصات في المزدوجات الثانوية (المضاجع المتصلة مع أذرع التوصيل) قليلاً جداً. من جهة أخرى هناك خاصية هامة أيضاً ذات صلة هامة بالتأثير المتبادل بين منظومات التحكم الآلي واهتزازات الفتل في محرك السفينة، فكما نعلم تقوم منظومات التحكم الآلي بتنظيم السرعة الوسطية لدوران عمود المرفق. تسبب اهتزازات الفتل الكبيرة عدم تناغم للاحتراق في أسطوانات المحرك (يحدث أن يتم حقن الوقود في بعض الأسطوانات مبكراً، وفي

بعضها الآخر متأخراً) حتى عندما تكون الحالة الفنية لمنظومة حقن الوقود جيدة، ويظهر ذلك بشكل جلي أثناء الاستثمار الفني عند حدوث الطنين أو حول منطقة الطنين. تكون القوة العامة المؤثرة على المكبس الأول:

$$P_i(\varphi_i) = P_i^r(\varphi_i) - \phi_i(\varphi_i) \quad (11)$$

$$\varphi_i = \omega \cdot t + \theta_i + \tilde{\varphi}_i = \varphi_{iC} + \tilde{\varphi}_i \quad \text{حيث:}$$

وبذلك يمكن التعبير عن النوعية (الميزة) الجديدة من خلال العلاقة:

$$P_i(\varphi_i) = P_i(\varphi_{iC}) + \frac{dP_i}{d\varphi_i} \cdot \tilde{\varphi}_i = P_i(\varphi_{iC}) + D_{P_i} \cdot \tilde{\varphi}_i \quad (12)$$

حيث:

$$D_{P_i} = D_{P_i(\varphi_i=\varphi_{iC})} + D_{\phi_i(\varphi_i=\varphi_{iC})} \quad (13)$$

$$F_i(\varphi_i) = F_i(\varphi_{iC}) + D_{F_i(\varphi_i=\varphi_{iC})} \cdot \tilde{\varphi}_i \quad (14)$$

حيث: D- تابع حساسية للقوى ولتتابع النقل من اهتزازات الفتل.

$$M_i(\varphi_i) = F_i(\varphi_{iC}) \cdot P_i(\varphi_{iC}) + [D_{F_i} \cdot P_i(\varphi_{iC}) + D_{P_i} \cdot F_i(\varphi_{iC})] \cdot \tilde{\varphi}_i \quad (15)$$

تتضمن العلاقة الأخيرة مؤشرات تأكل منظومة عمود المرفق وملحقاته، وتأثير اهتزازات الفتل على العزوم من خلال مركب إضافي يحوي توابع الحساسية.

تعطي العلاقة بين اهتزازات الفتل والمؤشرات البيانية إمكانية لتشخيص الحالة الفنية من خلال وضع موديلات تشخيصية للمحرك، التي عادة ما تكون الأجزاء اليمنى من المعادلات التفاضلية التقليدية التي توصف اهتزازات الفتل في المحرك.

يتم حل (15) في الحالة العامة حسابياً، وفي بعض الحالات يمكن حلها تحليلياً (كالحل بطريقة الاتزان المتناغم على سبيل المثال). حيث يمكن بمساعدة الطريقة المذكورة أعلاه (أو بطرق مماثلة) حل مسألة التشخيص الاهتزازي للحالة الفنية للمحرك بشكل كامل ودقيق.

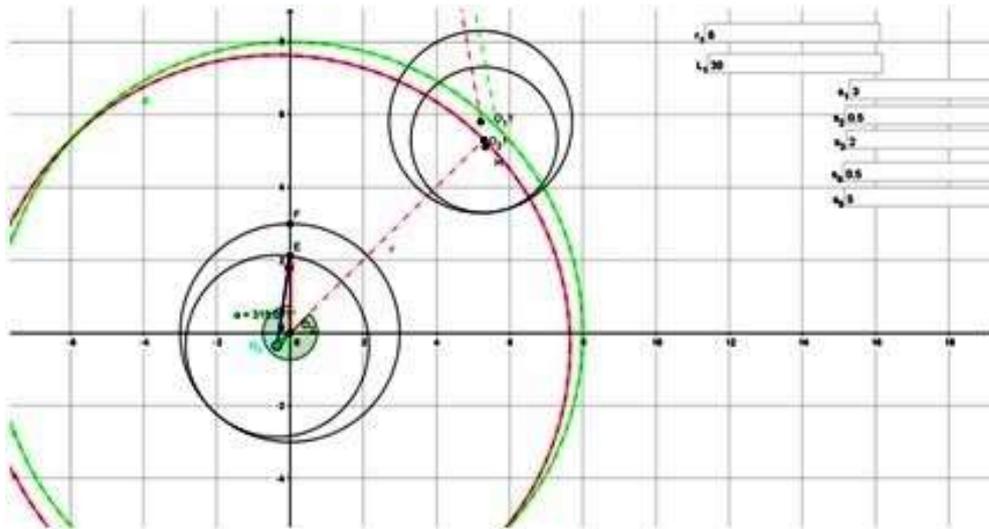
## النتائج والمناقشة:

بناءً على ماسبق تم تصميم تطبيق لحساب قيم عزوم الدوران والفتل والعزوم المحصلية باستخدام برنامج MATLAB، وإجراء محاكاة لدوران المحرك، وتحديد التوضع المتبادل للخلوصات في المضجعين الأساسي والثانوي، ومن ثم حساب العزوم وتوابع النقل والقوى المؤثرة على المكابس كتوابع لزاوية الدوران في عدة حالات:

1 - تُظهر المحاكاة التوضع المتبادل للخلوصات في المضجعين الأساسي والثانوي عند كل درجة من دوران عمود المرفق (من  $0^\circ$  حتى  $360^\circ$  حيث تم تثبيت نقطة الصفر في النقطة الميتة العليا لاعتبارات خاصة بطبيعة هذه الدراسة)، ولعدة دورات، وتبين الأشكال (5 ÷ 9) أمثلة مختارة لهذا التوضع، كما تظهر الألوان الحمراء والزرقاء تغير مسار محور المضجعين نتيجة لهذا الخلوص:

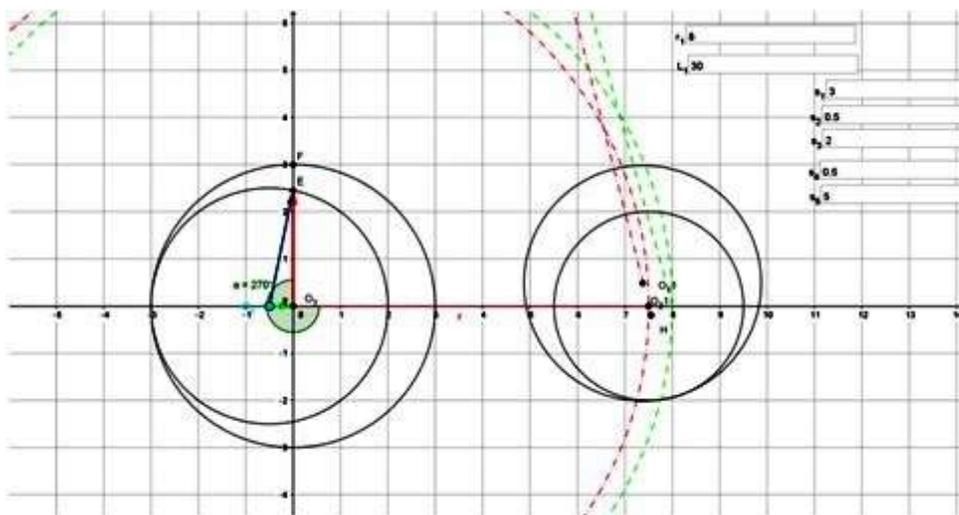
أ - الشكلان 5 و6 عند النقطة الميتة العليا TDC، معتبرة كنقطة بدء، أي زاوية  $0^\circ$  (وضعنا شكلين الأول يبين التوضع العام والثاني مكبر لزيادة الوضوح).





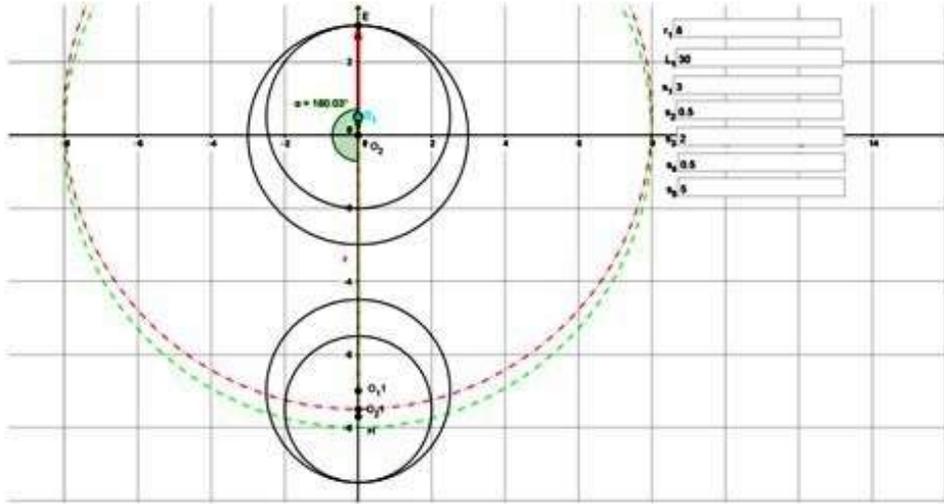
الشكل (7) التوضع المتبادل للخلوص (مكبراً) عند زاوية دوران  $45^\circ$  باتجاه اليمين

ت - الشكل 8 عند زاوية  $90^\circ$  باتجاه عقارب الساعة لنفس السبب السابق.



الشكل (8) التوضع المتبادل للخلوص (مكبراً) عند زاوية دوران  $90^\circ$  باتجاه اليمين

ث - الشكل 9 عند زاوية  $180^\circ$  باتجاه عقارب الساعة.

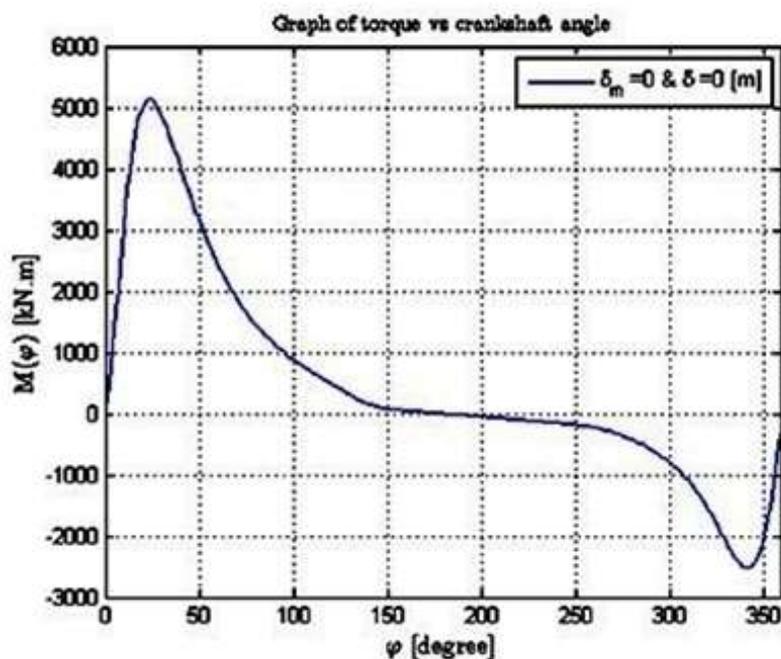


الشكل (9) التوضع المتبادل للخلوص (مكبراً) عند زاوية دوران  $180^\circ$  باتجاه اليمين

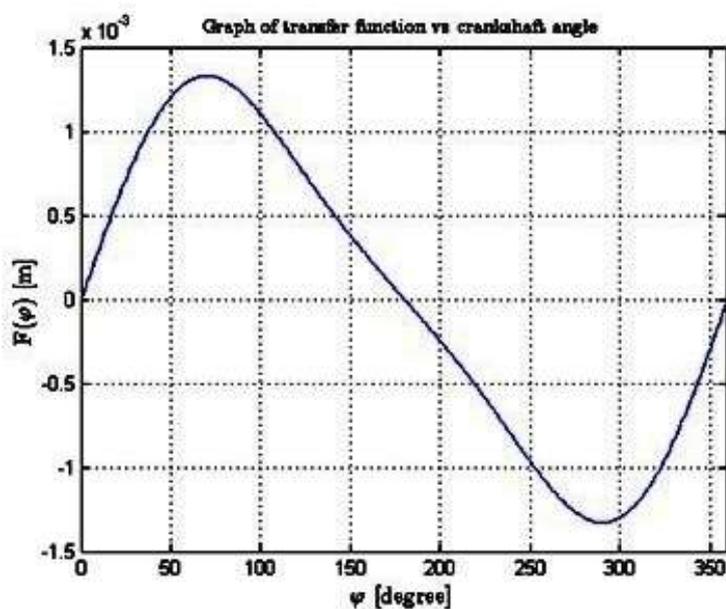
2 - تم إجراء التجريب الحسابي بواسطة تطبيق صمم لهذه الغاية على برنامج MATLAB، وذلك من خلال دراسة العلاقة بين الاهتزازات وعزوم الدوران والفتل (من خلال تابع النقل) والعزوم المحصلية للدورة كاملة ( مرة لأسطوانة واحدة وفي دورة عمل واحدة، ومرة لكامل المحرك أي لست أسطوانات ولدورة عمل واحدة أيضاً، ومرة لأكثر من دورة لكامل المحرك) عند عدد كبير جداً من مرات التجريب، وفي حالات مختلفة مثل حالة عدم وجود خلوص في كل من المضجعين، وحالة وجود خلوص متنوع القيمة في المضجع الرئيسي فقط، وفي حال وجود خلوصات متغيرة القيمة في المضجعين، كما تمت دراسة تأثير سرعة الدوران على العزوم، والعلاقة بين العزوم والخلوصات، إضافة إلى حالة خاصة هي دراسة الحالات السابقة عند وجود خلوصات كبيرة القيمة.

نبين فيما يأتي أمثلة على حالات مختارة لهذا التجريب تم انتقاؤها من بين العدد الكبير من النتائج، لكونها تحمل بوضوح صفة تشخيصية تعطي إمكانية إيجاد الخلوصات في مرحلة التشخيص، من خلال قياس العزوم والقوى كعملية عكسية لعملية التلقين. ويجدر أن نذكر أننا سنعرض في الحالة الأولى نتائج التجريب بالعزم (تفصيلاً) وتابع النقل وقوى العطالة، بينما في الحالات الأخرى سنكتفي بعرض النتائج بالعزوم تفصيلاً كتابع لزاوية الدوران، والعزم المحصلي لدورة كاملة كتابع لزاوية الدوران أيضاً، باعتبار بقية التتابع تخدم عملية الوصول إلى إيجاد التتابع المذكورة.

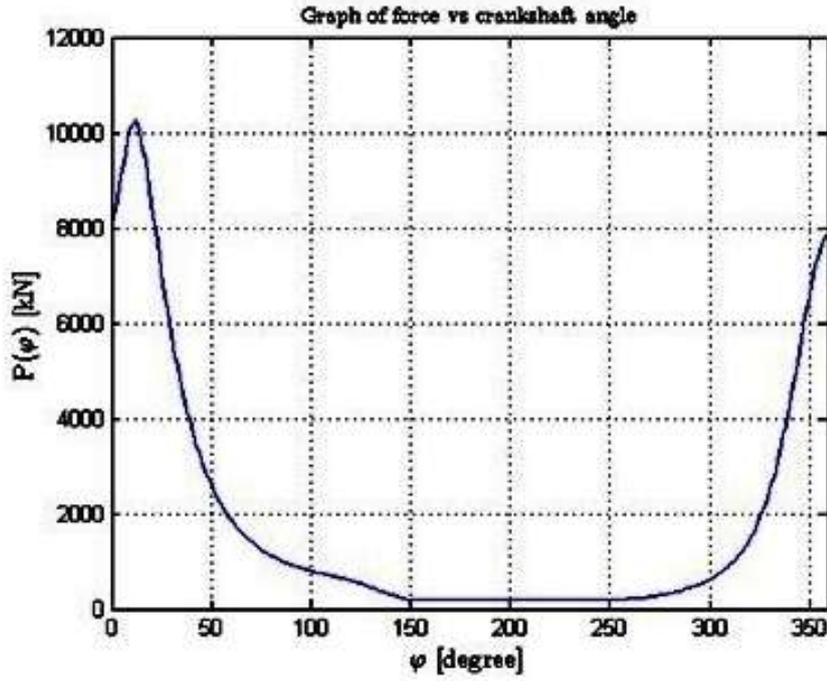
أ - حالة التجريب والتلقين عند عدم وجود خلوصات في المضجعين لأسطوانة واحدة وخلال دورة كاملة لعمود المرفق بدءاً بالنقطة الميتة العليا:



الشكل (10) العزم التفصيلي كتابع لزاوية دوران عمود المرفق في حالة  $\delta_{mx} = 0$  و  $\delta_{ox} = 0$

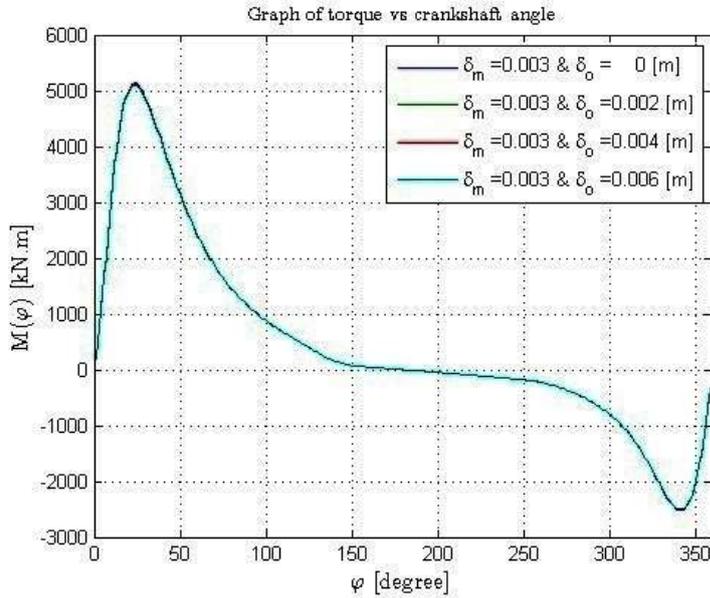


الشكل (11) تابع النقل كتابع لزاوية دوران عمود المرفق في حالة  $\delta_{mx} = 0$  و  $\delta_{ox} = 0$

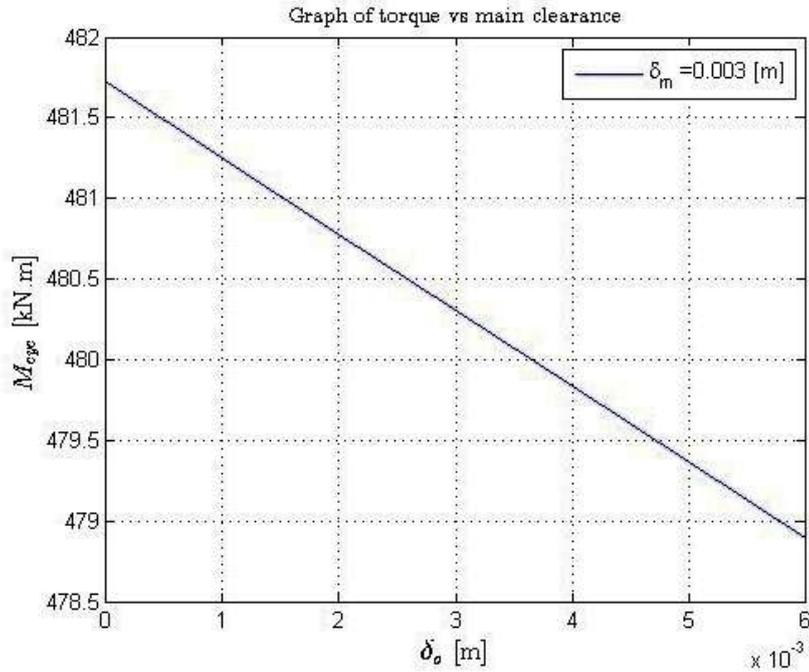


الشكل (12) قوى العطالة المؤثرة كتابع لزاوية دوران عمود المرفق في حالة  $\delta_{mx} = 0$  و  $\delta_{ox} = 0$

ب - حالة التجريب والتلقين عند وجود خلوص في المضجع الرئيسي فقط لأسطوانة واحدة وخلال دورة كاملة لعمود المرفق بدءاً بالنقطة الميتة العليا:

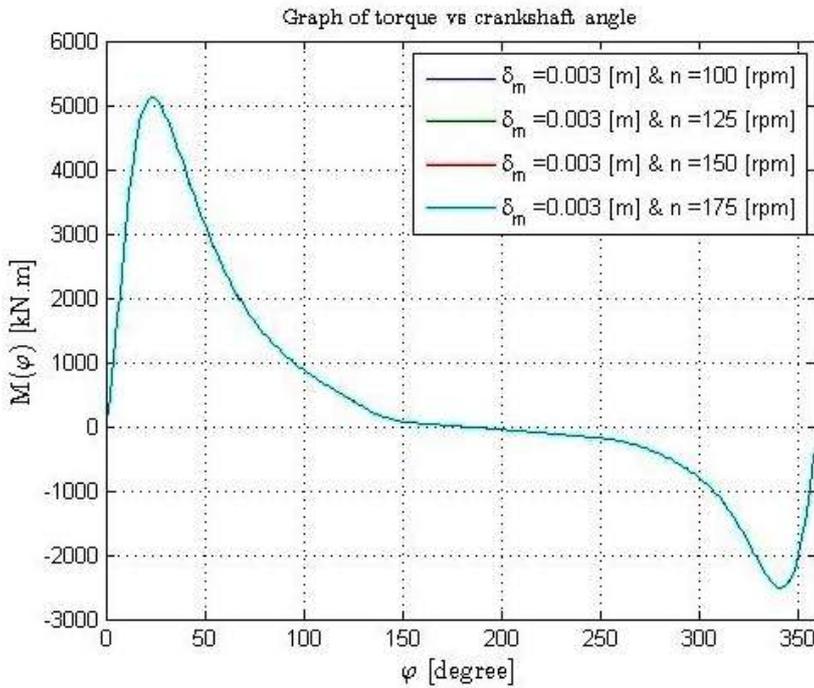


الشكل (13) العزم التفصيلي كتابع لزاوية دوران عمود المرفق في حالة  $\delta_{ox} = 0 \div 0.006 \text{ m}$  و  $\delta_{mx} = 0.003 \text{ m}$

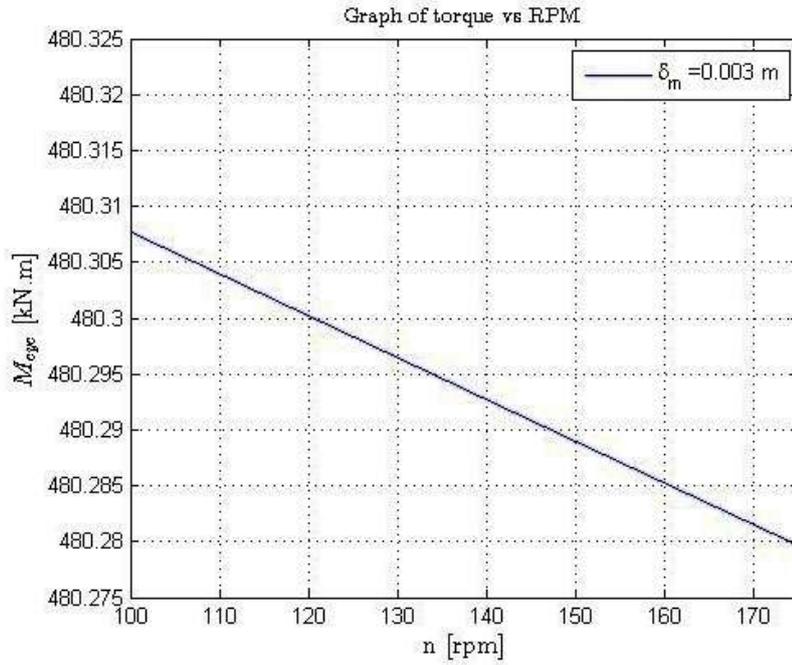


الشكل (14) العزم المحصلي في حالة  $M_{cyc} = f(\delta_0)$

ت - حالة التجريب والتلفين عند دراسة تأثير سرعة الدوران على العزم (ومنه الخلوص) لأسطوانة واحدة وخلال دورة كاملة لعمود المرفق بدءاً بالنقطة الميتة العليا:

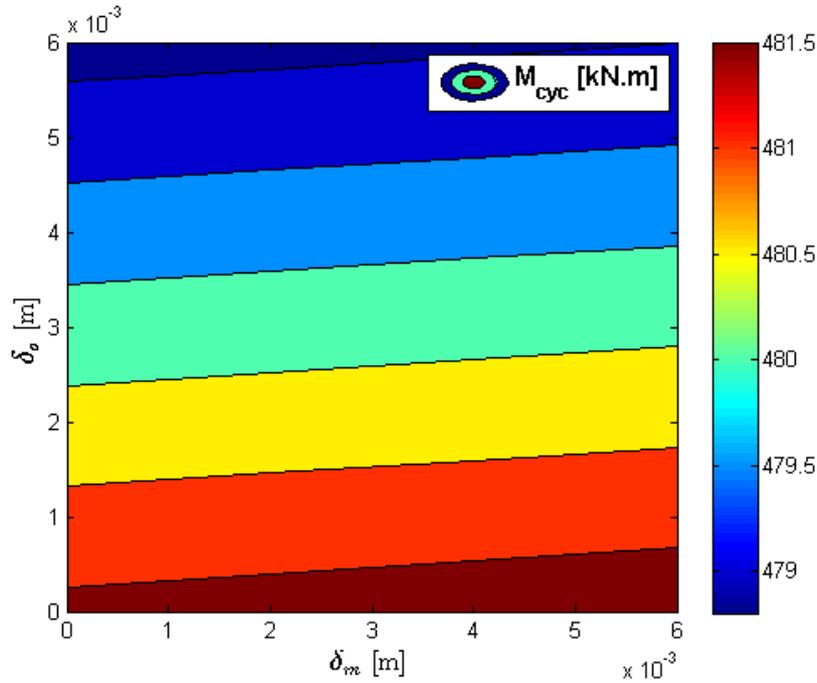


الشكل (15) العزم التفصيلي في حالة  $M_\varphi = f(\varphi)$  خلال دورة كاملة لعمود المرفق

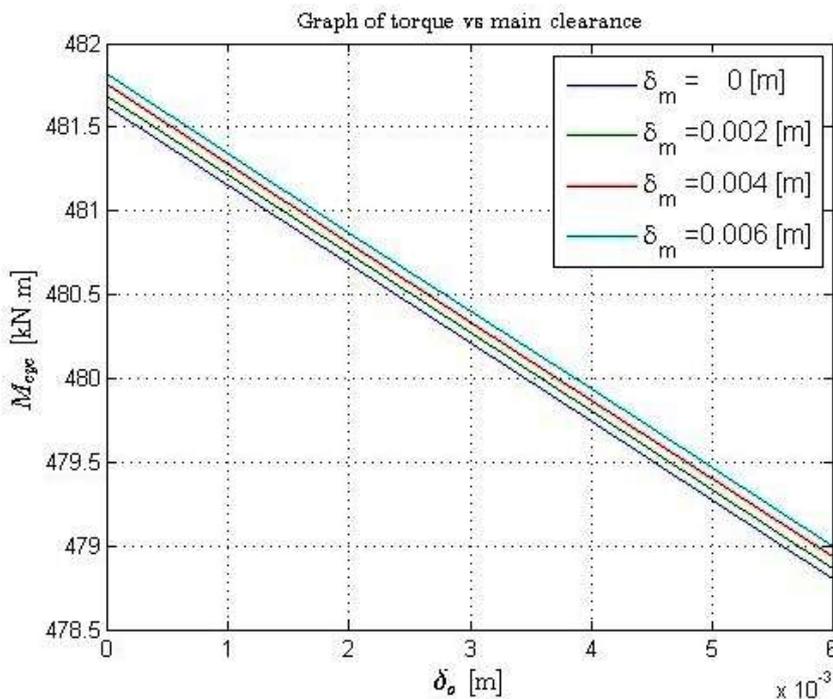


الشكل (16) العزم المحصلي في حالة  $M_{cyc} = f(n)$

ث - حالة التجريب والتلقين عند دراسة العزوم والخلوصات لأسطوانة واحدة وخلال دورة كاملة لعمود المرفق بدءاً بالنقطة الميتة العليا:

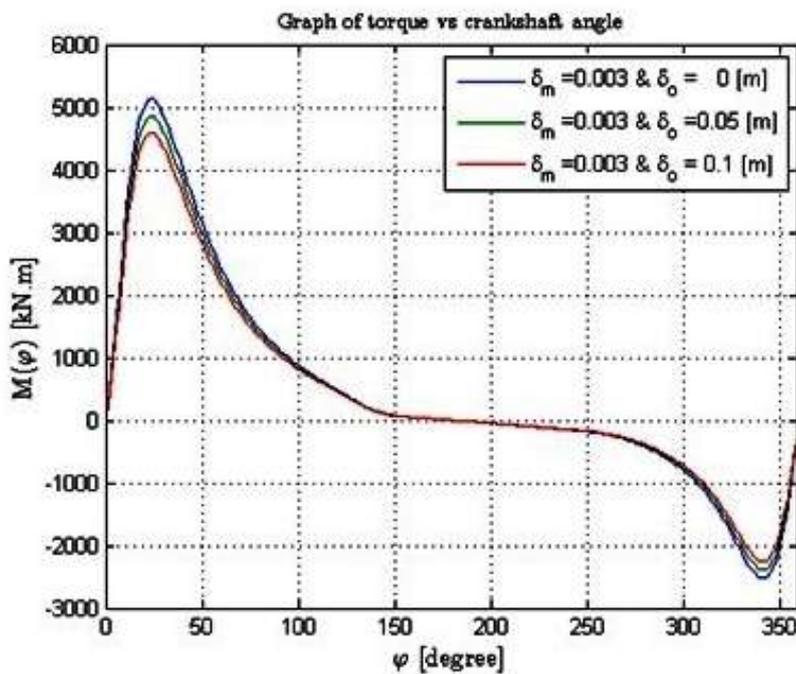


الشكل (17) العلاقة بين  $\delta_{mx}$  و  $\delta_{ox}$  خلال دورة كاملة لعمود المرفق

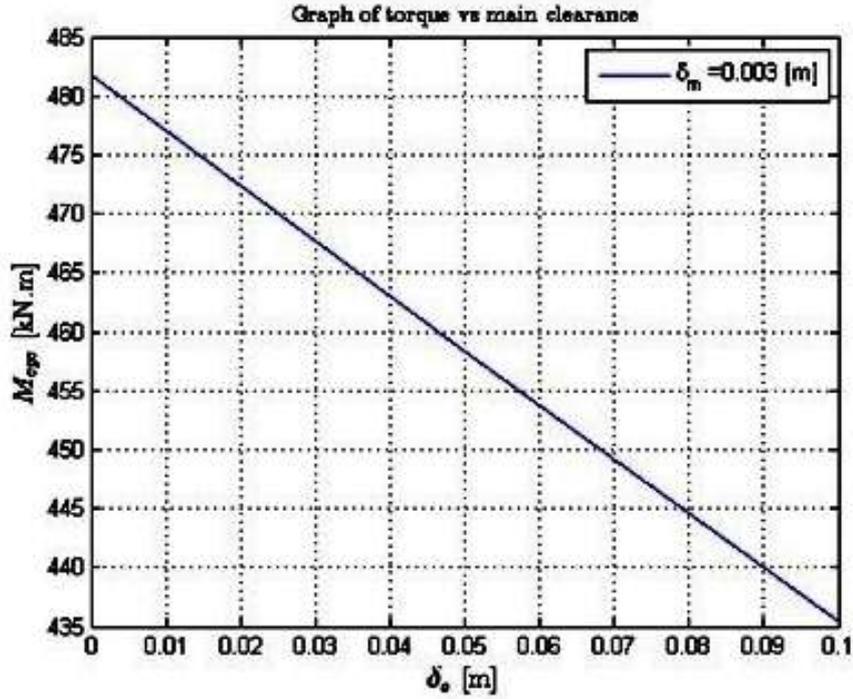


الشكل (18) العزم المحصلي في حالة ثبات  $\delta_o$  وتغير  $\delta_m$

ج - العزوم عند قيم مرتفعة للخلوص نحو 0.1 m لأسطوانة واحدة وخلال دورة كاملة لعمود المرفق بدءاً بالنقطة الميتة العليا:

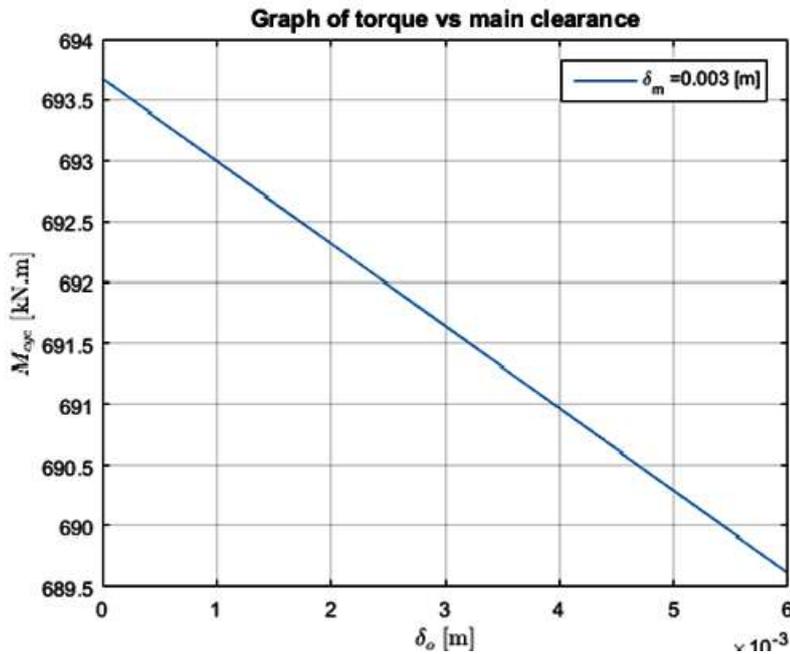


الشكل (19) العزم التفصيلي في حالة  $M_\varphi = f(\varphi)$  عند قيم مرتفعة للخلوص



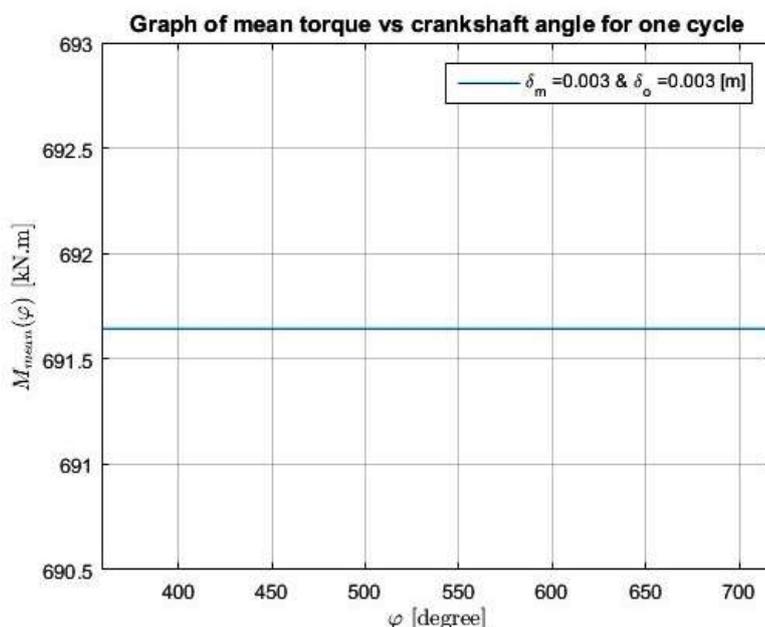
الشكل (20) العزم المحصلي في حالة  $M_{cyc} = f(\delta_o)$  عند قيم مرتفعة للخلوص

ح - العزوم عند قيم مرتفعة للخلوص نحو 0.1 m لكامل المحرك خلال دورة كاملة لعمود المرفق بدءاً بالنقطة الميتة العليا:



الشكل (21) العزم المحصلي في حالة  $M_{cyc} = f(\delta_o)$  لكامل المحرك عند قيم مرتفعة للخلوص

د- العزم المحصلي الوسطي لكامل المحرك (الأسطوانة الستة) كتابع لزاوية دوران المحرك، المقاس على محور خرج المحرك ولدورة واحدة أو أكثر (بدون الدخول في تفاصيل تغير العزم كتابع لزاوية الدوران):



الشكل (22) العزم المحصلي في حالة  $M_{cyc} = f(\varphi)$  لكامل المحرك

### الاستنتاجات والتوصيات:

- 1 بالنظر للأشكال رقم 5 و 6 و 7 و 8 و 9 نرى أن الخلوص في كل من المضجعين يبدل مكانه مع تغير زاوية الدوران، الأمر الذي يُعتبر من أهم الأسباب لحدوث الاهتزازات، وتبين الدراسة أنه كلما زاد الخلوص فإن الاهتزازات تزيد بنسبة محدودة بسبب التأثير المتبادل بين الوحدات (جملة أسطوانة+ذراع توصيل+عينة عمود مرفق)..
- 2 بمقارنة الأشكال 13 ÷ 22 حيث يوجد خلوص متنوع القيمة والمكان، مع الأشكال 10 ÷ 12 ويظهر ذلك بوضوح أكبر عن القيم العالية للخلوص، مما يعطي الأساس لاعتبار عزم الدوران مؤشر تشخيصي ذات ثقل تشخيصي عالٍ، سواء أُخذَ كتابع لزاوية الدوران أو للخلوص.
- 3 بينت النتائج أن تزايد سرعة الدوران تؤثر سلباً على العزم بوجود خلوصات في المضجعين، ويزداد ذلك التأثير السيء تناسباً مع زيادة الخلوصات، كما أنه يزيد من الاهتزازات ويقلل من اتزان عمل المحرك.
- 4 تظهر النتائج نجاح خوارزمية وبرنامج التلقين في إيجاد علاقة المتبادلة بين قيم الخلوصات وعزم الدوران الوسطي لكامل المحرك، مما يعطينا الأساس لتوقع نجاح خوارزمية وبرنامج التعرف (أي المرحلة الثانية من عملية التشخيص).
- 5 توصي باستكمال الدراسة اسواء من قبلنا أم من قبل باحثين آخرين لإيجاد مرحلة التعرف بعد إنجاز مرحلة التلقين بنجاح، وذلك في الاتجاهين الآتيين:
  - أ -دراسة العلاقة العكسية والمباشرة بين قيم الخلوص في المضجعين (الرئيسي والثانوي) لعمود المرفق لتحديد القيم اللحظية للخلوصات اعتماداً على القياسات المباشرة لعزم دوران المحرك، وذلك من خلال تزويد السفينة بالتأمين البرمجي والتجهيزات المناسبة.

ب -إنجاز دراسة المستوى الثالث الذي سبق الحديث عنه في معرض الحديث عن مستويات التعامل مع المحرك الرئيسي ومفاصله في هذه الدراسة.

### المراجع:

1. د. محمد خنيسي، ديناميك الآلات والاهتزازات، جامعة تشرين - اللاذقية 2008-2009، 560.
2. د. محمد ابراهيم الشاذلي، محركات الديزل وتطبيقاتها البحرية، جامعة الاسكندرية، 421÷374.
3. د. محمد شولوف، التدفئة والتبريد والتهوية في السفن، جامعة تشرين - اللاذقية 2014-2015، 225÷189.
4. Gardulski. J., Vibration and noise minimization in living and working ship compartments, PMR 2(60) 2009 Vol 16, pp 54-59, 10.2478/v10012-008-0022-8.
5. Минчев. Н. А., До Дък Лъу, Вибродиагностика на машинни агрегати, включващи бутални машини, Вгора нац. Сесия по диагностика на машини и съоразения, Варна - Октомври 1990.
6. Минчев. Н., Григоров. В., Вибродиагностика на ротационни и бутални машини, ТУ, София 2008.
7. Минчев. Н., Григоров. В., Вибродиагностика на ротационни и бутални машини В кн. Диагностика и безразрушителен контрол на машини и съоразения. Първа национална конференция, Варна 1998.
8. Examples of Faults on combustion pressure- Autronica NK-108STE 090186 DK/ABR.
9. Драганчев. Хр., Вълков. М., Изследване на чувствителността на неравномерността на въртящ момент към експлоатационните изменения на някои пряметри на пропусивната уредба, Сесия по диагностика на машини и съоразения, Варна - Октомври 1990.
10. Jenser. J, Vibration analysis for modern ship machinery, Sulzer 1987.
11. Вълков. М., Драганчев. Хр., Изследване влиянието на разрегулирането на КДД върху вътрешния момент на валопровода, доклад на Юбил. Науч. Сесия ВНВМУ, Варна 11.1999.
12. Минчев. Н. Д., До Дък Дъу, Димитров. Д. А., Вибродиагностичен чодел на буталните машини, Сесия по диагностика на машини и съоразения, Варна - Октомври 1998.
13. Минчев. Н. Д., Григоров. В. Г., Вибродиагностика на ротационни и бутални машини, София 1988.
14. Минчев. Н. Д. Динамика на корабни машини, София 1983.
15. Вейц. Е. Д., Динамика управляемых машинных агрегатов, Москва 1984.
16. Явленский. К. Н. Явленский. Я. К., Вибродиагностика и прогнозиране качества механических систем, Ленинград 1983.
17. Неделчев. Н, Жеков. М, Воденичаров. К, Арнаудов. Д, Корабни машини, механизми и системи, второ издание, Галактика, Варна 2004.
18. Proper Engine Room Ventilation, Cushman power solution, [PDF] 2010.
19. Растрингин. Л., Маджаров. Н., Марков. С., Оценяване на параметри и състояния на динамически обекти, Техника, София 1978.
20. Кдллакот. Р. А., Диагностирование механического оборудования, Судостроение, Ленинград 1980.
21. Мозгалевский. А. В., Гаскаров. Д. В., Техническая диагностика, Высшая Школа, Москва 1975.
22. Попчев. И. П., и Др., Оптимизация на производствени системи, Техника, София 1987.
23. Marinediesels.co.uk, S-T DIESEL AND MARINE GROUP, London – DHTML 2014