

## إمكانيات تحسين أداء محرك السفينة اعتماداً على ديناميكية الإصدار الحراري في الأسطوانة من خلال تحليل المخطط البياني

الدكتور محمد شلوف\*

(تاريخ الإيداع 18 / 10 / 2015. قُبل للنشر في 14 / 1 / 2016)

### □ ملخص □

أثبتت الدراسات أن المخطط البياني للضغط العامل في أسطوانة المحرك البحري يمكن أن يعطي معلومات كثيرة ليس فقط عن الضغط بأنواعه، وإنما عن عدد كبير من المقادير المفيدة في تحسين أداء المحرك، ولهذا نحاول في هذا البحث دراسة المؤشرات التي تؤدي إلى إكمال الصورة الفيزيائية لدورة العمل. تتمثل هذه المحاولة في استخدام موديل رياضي شامل وعميق للحصول على تلك المؤشرات واستخدامها لتكوين صورة واضحة عن دورة العمل اعتماداً على ديناميكية الإصدار الحراري في الأسطوانة، سعياً لتحسين الأداء وتحقيق استثمار فني أفضل وأكثر اقتصاديةً نصل بالنتيجة إلى جملة من الاستنتاجات والتوصيات التي تساعد عند اعتمادها على الحصول على مواصفة أكمل لدورة العمل وبدقة عالية للعملية الحسابية.

الكلمات المفتاحية: مخطط الضغط البياني - الضغط الأعظمي للاحتراق - سرعة تزايد الضغط في نقطة الاشتعال - مزيج الاحتراق في الأسطوانة - تابع الاحتراق - الحصة النسبية من جرعة الوقود - القانون التفاضلي للاحتراق.

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

## Studying of the possibilities of enhancing ship engine performance based on the dynamics of heat release in the cylinder via the analyzing of indicating pressure charts

Dr. Mohammad Shallouf\*

(Received 18 / 10 / 2015. Accepted 14 / 1 / 2016)

### □ ABSTRACT □

Studies have proven that the indicating pressure chart of marine engine cylinder can provide many information not only about pressure, but also about a large number of parameters that are useful in enhancing engine performance. Therefore, in this research paper, we attempt to study the indicators that complete the physical image of the work cycle. This attempt uses an elaborate and comprehensive mathematical model for obtaining and using these parameters in order to form a clear image of the work cycle based on the dynamics of heat release in the cylinder, for the purposes of enhancing performance and achieving a more efficient, more economical mechanical operation.

As a result we will reach a number of conclusions and recommendations which, upon being approved and used, can help to achieve with great mathematical accuracy a more optimized characteristic of the work cycle.

**Keywords:** indicator pressure chart – maximum pressure of combustion – pressure increase rate at the point of combustion – combustion mixture in the cylinder – combustion function – the relative ration of the fuel portion – differential law for combustion.

---

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

## مقدمة:

يعبر المخطط البياني بشكل شبه كامل عن دورة عمل المحرك البحري، وخاصة عملية الاحتراق. يرتبط التحليل الكامل للمخطط البياني بدراسة مسائل هامة كتحديد شدة الاحتراق، القانون التكاملي لإصدار الحرارة، كمية الحرارة المعطاة إلى مياه التبريد وغيرها. إلا أنه للأسف في التطبيق العملي تتضاءل إمكانيات معالجة المخطط البياني لتتحصر في تحديد المؤشرات التي يمكن الوصول إليها كالضغط الأعظمي عند الاحتراق  $P_z$ ، وسرعة تزايد الضغط في نقطة الاشتعال  $(dP/d\varphi)_{max}$ ، والضغط المتوسط البياني المفترض  $P_i$ ، أما المعلومات ذات القيمة عن عملية الاحتراق وإصدار الحرارة في الأسطوانة فلا تُستخرج وتضيق مع جملة معلومات أخرى [2 و 3].

يسمح استخدام الحواسيب في الوقت الحاضر، وبشرط وجود طريقة رياضية مناسبة تبنى على أساسها خوارزمية للحساب وبرنامج مناسب، باختصار كبير للوقت اللازم لإجراء تحليل شامل للمخطط البياني ورفع نوعية ودقة الحسابات والنتائج. وقد طُرحت فكرة معالجة المخطط البياني بواسطة الحواسيب منذ الربع الأخير للقرن الماضي في عدة مؤسسات بحثية [3 و 4]، إلا أن السعي المستمر لتحسين دقة وفاعلية العمليات الحسابية يطرح دائماً متطلبات جديدة تتعلق بنوعية الموديلات الرياضية المستخدمة.

## أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية البحث من النتائج المرجوة منه لرفع أداء المحرك الرئيسي في سفن الأسطول الوطني السوري (المؤسسة العامة للنقل البحري)، وتقليل الضياعات وتحقيق عائدية اقتصادية متمثلة في وفر الوقود، وتقليل نسب التلوث البيئي، حيث يهدف البحث لدراسة دورة عمل المحرك الرئيسي البحري في ظروف العمل، وتحديد الضياعات الحرارية بشكل عام، كالضياعات في الوسط المحيط (خاصة مع مياه التبريد)، وتحديد تسربات الغازات عبر أساور الإحكام بغية إيجاد السبل لتقليل كافة الضياعات، بغية الوصول للهدف النهائي وهو تحسين أداء المحرك الرئيسي في السفينة من خلال تقليل الضياعات ورفع المردود.

## طرائق البحث ومواده:

ثمة العديد من الباحثين الذين وضعوا موديلات رياضية لحساب معدلات (شدة) إصدار الحرارة، من أهمها الموديل الذي وضعه الباحثان (Borman و Kreiger) [1]، والموديل الذي وضعه الباحث (Gonchar) [3 و 4]. يلقي الموديل الرياضي المقترح من قبل الباحث غونتش ار (Gonchar) رواجاً كبيراً في الوقت الحاضر نظراً لدقته العالية وسعة النتائج التي يمكن الحصول عليها بواسطته، والذي يساعد على التعبير عن دورة عمل محرك الديزل، وتحديدًا في شوط الاحتراق، من خلال جملة العلاقات التالية:

$$(c'_v G'') \frac{dT}{d\varphi} = Q''_p \cdot q_c \frac{dx}{d\varphi} + \frac{dQ_w}{d\varphi} - 0.1605D^2 \cdot S \cdot B \cdot P \quad (1)$$

$$P = k_1 \frac{T}{\varepsilon_x} (G' + G'') \quad (2)$$

$$\frac{dG'}{d\varphi} = -L_0 \cdot q_c \frac{dx}{d\varphi}; \quad \frac{dG''}{d\varphi} = q_c (L_0 + 1) \frac{dx}{d\varphi} \quad (3)$$

حيث [5]:  $\varphi$  - زاوية دوران عمود المرفق.

$P$  و  $T$  - الضغط ودرجة حرارة مزيج الاحتراق في الأسطوانة.

$c_v$  - السعة الحرارية النوعية بثبوت الحجم.

G - كتلة المزيج.

D - قطر الأسطوانة.

S - شوط المكبس.

$\theta = \frac{dS(\varphi)}{d\varphi}$  - السرعة النسبية للمكبس ( $S(\varphi)$  هو الانتقال اللحظي للمكبس).

$\epsilon_x$  - درجة الانضغاط اللحظية.

$k_1$  - ثابت يتعلق ببارامترات الشحن الجاهزة للاشتعال في بداية شوط الانضغاط ( $k_1 = \frac{P_c}{T_a \cdot G_a}$ ).

$q_c$  - الكتلة اللازمة من مياه التبريد في الشوط.

$\frac{dQ_w}{d\varphi}$  - شدة التدفق الحراري في مياه التبريد.

$\frac{dx}{d\varphi}$  - شدة احتراق الوقود.

$L_0$  - الكمية النظرية للهواء اللازمة لاحتراق 1 كغ من الوقود.

'- تخص الهواء النقي الداخل إلى الأسطوانة.

'- تخص نواتج الاحتراق عند معامل زيادة الهواء ( $\alpha = 1$ ).

بالنظر إلى العلاقة (1)، فإن الجهة اليسرى تمثل الشدة الكلية لتغير الطاقة الداخلية للمحتوى في الأسطوانة

على حساب تغير درجة الحرارة وكمية الغازات والهواء. أما الجهة اليمنى فتمثل مجموع كل من شدة تولد أو إصدار

الحرارة الناتجة عن احتراق الوقود، والتبادل الحراري مع الوسط المحيط، والعمل المنجز من خلال تغير الحجم عند

حركة المكبس. بهذا المعنى، تمثل المعادلة (1) قانون انحفاظ الطاقة معبراً عنه بما يتوافق مع القانون الأول

للترموديناميك. ويتم حل هذه المعادلة بالتوازي مع معادلة الحالة (2) والمعادلة (3) التي تمثل جميعها ديناميكية تغير

كتل الهواء والغازات في شوط الاحتراق.

يعطي التحليل الدقيق للمعادلة (1) أساساً لنعتبر أنه يمكن توسيع إمكاناتها إذا قمنا بالأخذ بالاعتبار

"وبطريقة مناسبة" بعض المؤشرات الإضافية التي تكمل إيضاح الصورة الفيزيائية لدورة العمل. لكن هذا يعطي انطباعاً

بأنه على المخطط البياني لا يؤخذ بالاعتبار تغير كتلة الغازات بنتيجة تسربها عبر أساور الإحكام، وضخ الوقود خلال

فترة الحقن. وبالإضافة لذلك فإن إهمال كمية أبخرة الوقود التي لم تحترق بعد يؤدي إلى أخطاء في تحديد السعة الحرارية

النوعية للمزيج الجاهز للاحتراق، وينعكس هذان العاملان على سرعة تغير الطاقة الداخلية. من جهة أخرى يصاحب

تبخر الوقود المحقون ضياعات حرارية إضافية، وعندما تكون درجة الحرارة في الأسطوانة أعلى من  $1800^\circ\text{C}$

(حوالي  $2000^\circ\text{K}$ ) يصبح من الممكن ظهور أخطاء إضافية من تفكك المزيج الجاهز للاحتراق، لكن هذه

الإشكالات لم تحدث منذ ثمانينات القرن الماضي [3].

يمكن التعبير عن الضياعات الناتجة عن تبخر الوقود كمجموع كمية الحرارة اللازمة لتسخين الوقود بدءاً من

درجة حرارة حقن الوقود في الحاقن  $T_{com}$  حتى درجة الحرارة الوسطية الجزئية للتبخير  $T_{ev}$  من جهة، ومن جهة أخرى

تحتسب الحرارة الكامنة للتبخير، وذلك من المعادلة [6]:

$$\frac{dQ_{ev}}{d\varphi} = [C_{com}(T_{ev} - T_{com}) + q_{ev}] \cdot q_c \frac{d\sigma}{d\varphi}; \quad (4)$$

حيث:  $C_{com}$  - السعة الحرارية النوعية للوقود المتشكل من قطرات دقيقة.

$q_{ev}$  - الحرارة النوعية الكامنة للتبخر.

يمكن وبدقة كافية أن نعتبر  $T_{com} = 340 - 350 \text{ } ^\circ\text{K}$  و  $T_{ev} = 520 - 550 \text{ } ^\circ\text{K}$ . لكي يكون للمعادلة (4) معنى لابد أن يكون بالإمكان إيجاد علاقة تفاضلية معينة لها للاحتراق، الأمر الذي يتجلى في المعادلة التالية لشدة التبخر [6]:

$$\frac{d\sigma}{d\varphi} = \frac{\dot{q}}{t} \left[ 1 - (1 - b \cdot t)^{3/2} \right] \cdot \frac{1}{6n} \quad (5)$$

حيث:  $\dot{q}$  - الحصة النسبية من جرعة الوقود في كل دورة عمل محقونة حتى اللحظة  $t$  المحسوبة من بداية الحقن.

$b$  - ثابت حسابي يتعلق بقطر فتحات الحاقن.

على هذا الأساس فإنه يمكن التعبير عن تغير كمية المزيج في الأسطوانة للجزء البياني من العملية بشكل تفاضلي من خلال معادلة التوازن الكتلي:

$$\frac{dG}{d\varphi} = \frac{dq_\varphi}{d\varphi} + \frac{dG_\ell}{d\varphi} \quad (6)$$

حيث:  $q_\varphi$  و  $G_\ell$  - كمية الوقود والتسرب من خلال أساور الإحكام، أما الكتلة اللحظية للخليط في الأسطوانة فتصبح مجموع كتلة الهواء الطازج والوقود الصافي وأبخرة الوقود ( $G = G' + G'' + G'''$ ) بينما يمكن تحديد السعة الحرارية النوعية بواسطة قانون الخلط الغازية أي ( $C_v = r' \cdot C'_v + r'' \cdot C''_v + r''' \cdot C'''_v$ ) حيث الأس ( $'''$ ) يخص أبخرة الوقود.

يمكن الحصول على العلاقات التالية للحصص النسبية للمركبات:

$$r' = \frac{q_c}{G} \cdot L_0 (\alpha - x); \quad (6)'$$

$$r'' = \frac{q_c}{G} [\gamma_r \cdot \alpha \cdot L_0 + x(L_0 + 1)]; \quad (6)''$$

$$r''' = \frac{q_c}{G} (\sigma - x); \quad (6)'''$$

بحيث أن  $r' + r'' + r''' = 1$  في هذه الحالة  $\sigma$  و  $x$  هما الحصص النسبية للوقود المتبخر والمحترق حتى اللحظة المدروسة من الزمن. عند الأخذ بالاعتبار هذه العلاقات، وبعد الاشتقاق يمكن تحديد شدة تغير السعة الحرارية النوعية للمزيج بثبوت الضغط من خلال العلاقة:

$$\frac{dC_v}{d\varphi} = \frac{q_c}{G} \left\{ C_v''' \left( \frac{d\sigma}{d\varphi} - \frac{dx}{d\varphi} \right) - [C'_v \cdot L_0 - C''_v (L_0 + 1)] \frac{dx}{d\varphi} \right\} \quad (7)$$

بحيث يتم احتساب قيم السعات الحرارية النوعية  $C'_v$  و  $C''_v$  و  $C_v'''$  وفقاً لدرجات الحرارة المقابلة في الأسطوانة. تعطي المعادلات (6) و (7) الامكانية لتحديد تغير الطاقة الداخلية للمزيج في الأسطوانة بنتيجة تغير السعة الحرارية، وتغير كتلة المزيج على حساب التسرب عبر أساور الإحكام وحقن الوقود:

$$\left( \frac{dU}{d\varphi} \right)_T = T \cdot \frac{d(C_v \cdot G)}{d\varphi} = C_v \cdot T \frac{dG}{d\varphi} + G \cdot T \frac{dC_v}{d\varphi} = C_v \cdot T \left( \frac{dq_v}{d\varphi} - \frac{dG_{vT}}{d\varphi} \right) + q_c \cdot T \left\{ C_v''' \left( \frac{d\sigma}{d\varphi} - \frac{dx}{d\varphi} \right) - [C'_v \cdot L_0 - C''_v (L_0 + 1)] \frac{dx}{d\varphi} \right\} \quad (8)$$

يمكن التعبير عن تسربات المزيج عبر أساور الإحكام بشكل تفاضلي من خلال المعادلة [7]:

$$\frac{dG_\ell}{d\varphi} = \frac{F_i}{h_i} \cdot \frac{1}{R_i} \left( P_i - P_{i+1} + \frac{G_i}{F_i} \right) \cdot \frac{1}{6n}; \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

حيث:  $-F_i$  - سطح مقطع الخلوص بين أسواره الإحكام ذات الرقم  $i$  والأسطوانة.

$-h_i$  - سماكة (ارتفاع) الأسواره.

$P_i$  و  $-P_{i+1}$  - الضغط قبل وبعد أسواره الإحكام ذات الرقم  $i$ .

$-G_i$  - كتلة التسريبات في الفراغ فوق أسواره الإحكام المعنية.

يمكن حل المعادلة السابقة لطمق من أساور الإحكام عدده  $n$ .

لمكاملة المعادلة (8) من المناسب التعبير عن القانون (التابع) التفاضلي لحقن الوقود من خلال الطريقة

المذكورة سابقاً [3]:

$$\frac{dq_\varphi}{d\varphi} = \frac{6q_c}{\varphi_{inj}} \left( \frac{\theta}{\varphi_{inj}} - \frac{\theta^2}{\varphi_{inj}^2} \right) \quad (10)$$

حيث:  $-q_c$  - جرعة الوقود التي يتم حقنها في كل دورة عمل.

$\theta = \varphi - \varphi_{inj}$  - الزاوية اللحظية المحسوبة اعتباراً من بدء الحقن.

$\varphi_{inj}$  - استمرارية الحقن.

يعطي احتساب المؤشرات الإضافية المذكورة أعلاه توافقاً مع القانون الأول للترموديناميك إمكانية حل المعادلة

الأساسية التي تعبر عن العملية البيانية أثناء دور الاحتراق بالشكل الآتي:

$$C_v \cdot G \frac{dT}{d\varphi} = [Q_p^H + C_v' \cdot T \cdot L_0 - C_v'' \cdot T (L_0 + 1)] q_c \frac{dx}{d\varphi} - \alpha_g \cdot F_x \cdot \frac{T - T_w}{6n} - P \frac{dV}{d\varphi} - \frac{dQ_{ev}}{d\varphi} - \frac{dQ_d}{d\varphi} - C_v''' \cdot q_c \cdot T \left( \frac{d\sigma}{d\varphi} - \frac{dx}{d\varphi} \right) - C_v \cdot T \left( \frac{dq_\varphi}{d\varphi} - \frac{dG_f}{d\varphi} \right) \quad (11)$$

تختلف هذه المعادلة عن المعادلة رقم (1) بالمركبات الأربعة الإضافية (من الرابعة حتى السابعة) في

الطرف الأيمن من المعادلة. تشكل المعادلات (2) و (9) و (11) جملة يؤدي حلها (مكاملتها) باستخدام المعادلات

المساعدة الضرورية إلى الحصول على منحنى تغير الضغط في الأسطوانة كتابع لزاوية دوران عمود المرفق، أي

الحصول على المخطط البياني للضغط في الأسطوانة. للحصول على ذلك يجب بطريقة ما (تحليلية أو جدولية) أن

يعطى قانون (تابع) الاحتراق. حيث أن تحديد  $dx/d\varphi$  بشكل مباشر غير ممكن بالطريقة التجريبية (حسب المعادلة

(11))، لكن يمكن الحصول عليه من خلال حل المسألة العكسية، أي من خلال معالجة المخطط البياني الذي تم

الحصول عليه تجريبياً.

يمكن بسهولة تحويل المعادلة (11) إلى شكل مناسب لتحديد القانون التفاضلي للاحتراق [7]، أي:

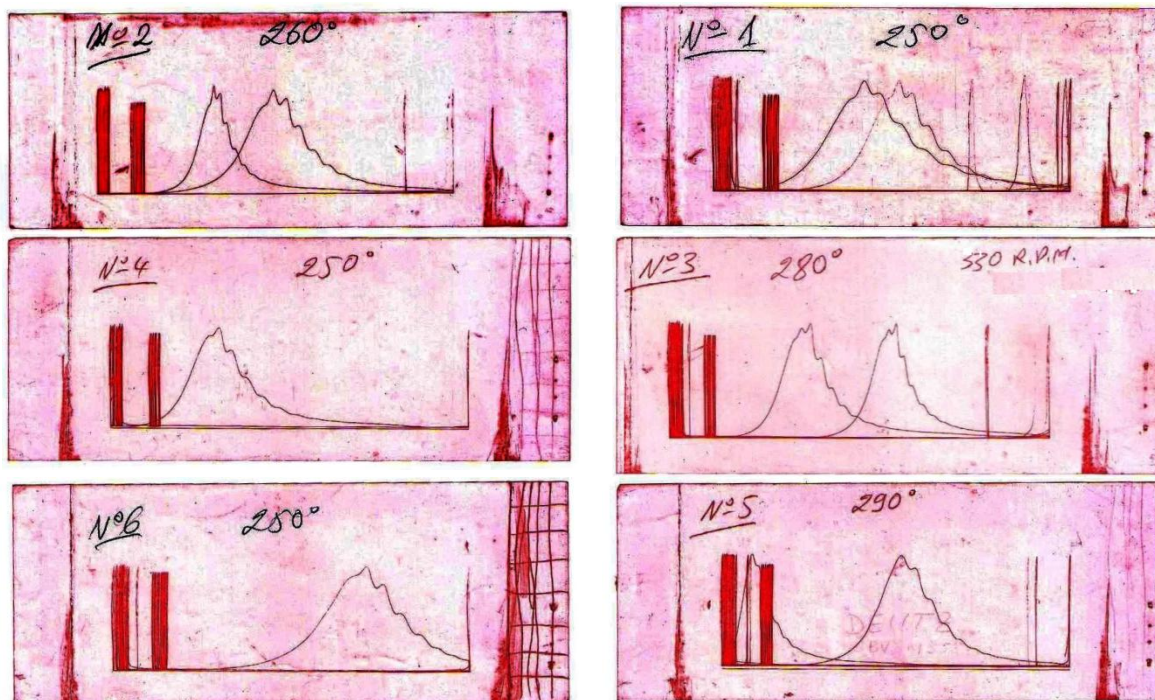
$$\frac{dx}{d\varphi} = \frac{P \frac{dV}{d\varphi} + \alpha_g \cdot F_x \cdot \frac{T - T_w}{6n} + C_v \cdot G \frac{dT}{d\varphi} + C_v \cdot T \left( \frac{dq_\varphi}{d\varphi} - \frac{dG_f}{d\varphi} \right) + q_c \cdot C_v''' \cdot T \frac{d\sigma}{d\varphi} + \frac{dQ_{ev}}{d\varphi} + \frac{dQ_d}{d\varphi}}{q_c [Q_p^H + C_v' \cdot T \cdot L_0 - C_v'' \cdot T (L_0 + 1) + C_v''' \cdot T]} \quad (12)$$

ولهذه الغاية يلزم تقسيم المخطط البياني الذي تم الحصول عليه تجريبياً إلى مجالات متساوية (لاتزيد

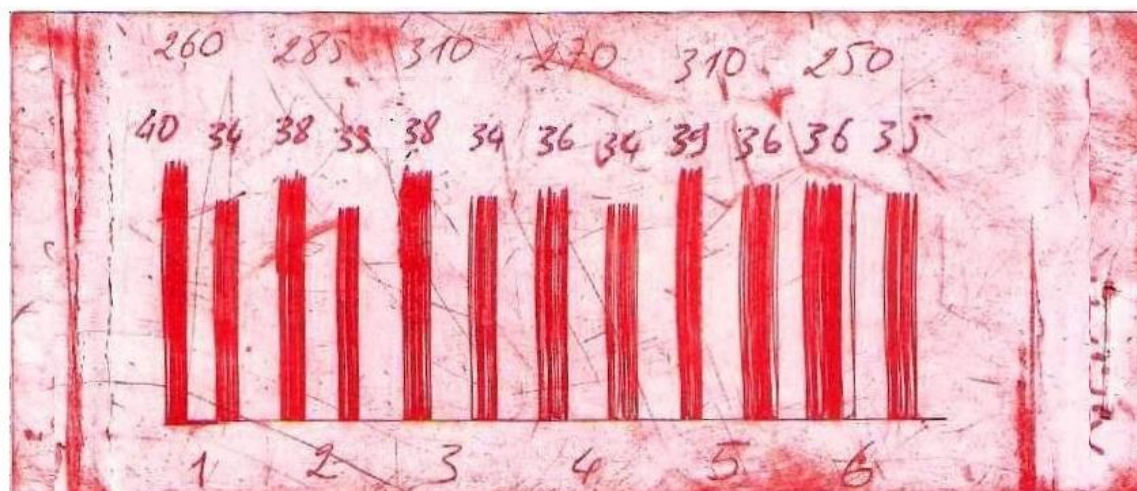
عن 2-3 درجات من دوران عمود المرفق "على محور السينات") ونقوم بقراءة الضغط لكل مجال "محور العيّنات"

وبذلك نحصل على القيم الابتدائية.

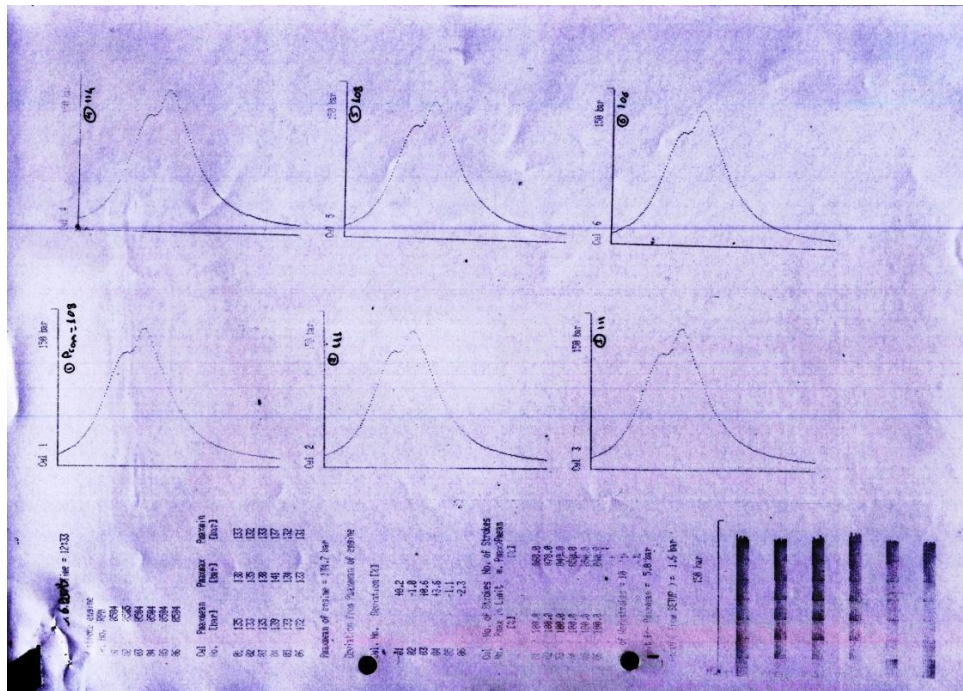
تمت القياسات على المحرك الرئيسي للسفينة السورية "سوريا" التابعة للمؤسسة العامة السورية للنقل البحري بواسطة نوعين من المبيئات الأول ميكانيكي عادي طراز (SIKA-manometer Type Rohrfactor-MRE-g)، والثاني الالكتروني مدمج في وحدة التحكم المركزية بالمحرك يتلقى إشارة الضغط من حساسات مركبة على الأسطوانات، ويتم أخذ القراءات من خلال تشغيل مفتاح الضغط (Pressure switch A5.05.11.01.02.02) الموجود على لوحة التحكم المركزية (Central control unit) [8 و 9 و 10]، وبفترة شهرين بين عملية قياس وأخرى، حيث تمت القياسات الأولى (بالمبين العادي) في 16-09-2014 بينما تمت القياسات الثانية (بواسطة المقياس الإلكتروني) على فترتين الأولى في 16-11-2014 والثانية في 16-01-2015.



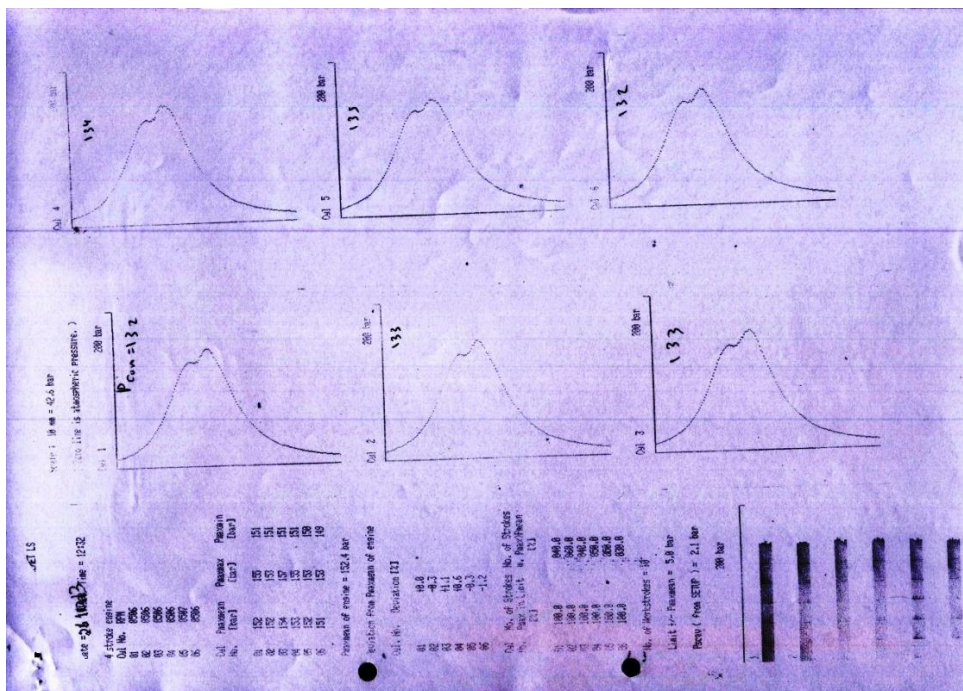
الشكل (1) المخطط البياني لأسطوانات المحرك مأخوذ بواسطة مبين ميكانيكي عادي  
(Mechanical indicator SIKA-manometer Type Rohrfactor-MRE-g)



الشكل (2) مخطط ضغط الانضغاط والاحتراق لأسطوانات المحرك مأخوذ بواسطة المبين الميكانيكي العادي (mechanical indicator SIKA-manometer Type Rohrfactor-MRE-g)



الشكل (3) المخطط البياني لأسطوانات المحرك مأخوذ بواسطة مبيّن الكتروني (بنوكهربائي) متوضع في وحدة التحكم المركزية ( Central control unit) يتم تشغيله بواسطة مفتاح التحكم (Pressure switch A5.05.11.01.02.02)



الشكل (4) المخطط البياني لأسطوانات المحرك مأخوذ بعد فترة شهرين من المخطط المبيّن في الشكل (3)



## النتائج والمناقشة:

للحصول على الشكل الرقمي للموديل الرياضي المذكور أعلاه لتحليل المخطط البياني التجريبي تم استخدام برنامج يتضمن برنامج أساسي، وبرنامج فرعي لتحديد المواصفات الفيزيائية الحرارية للمزيج في الأسطوانة. تتم قراءة المعلومات الأولية الضرورية من البارامترات التصميمية وبارامترات العمل في البرنامج الأساسي، ومن خلال مجموعات بيانات مخزنة في ذاكرة الحاسوب يتم إدخال عينات المخطط البياني وقيم السعة الحرارية بثبوت الحجم وبثبوت الضغط للغازات وللغذاء الطازج كتابع لدرجة الحرارة (المجال الحراري يكون بحدود 100 درجة في النطاق الحراري من 0 وحتى 2500 درجة). في البرنامج الفرعي يتم تحديد القيم الحقيقية لـ  $C_p$  و  $C_v$  كتابع لدرجة الحرارة في الأجزاء (الحصص) النسبية للمركبات وفقاً لأشكال الاستيفاء لنيوتن. يقوم الحاسوب بطباعة نتائج الحساب بشكل منحنيات كتابع لزاوية دوران عمود المرفق، وتحتوي الزاوية اللحظية لدوران عمود المرفق، والقيم اللحظية للضغط ولمعدل زيادة الضغط لكامل مجال المخطط البياني، ودرجة حرارة المزيج في الأسطوانة، والحصص النسبية للمركبات (الهواء، الغازات، أبخرة الوقود)، والقيم اللحظية لشدة لحقن الوقود، وتبخر واحتراق الوقود، ولحظات قيم هذه المقادير. ونظراً لضخامة المعطيات والنتائج أخذنا كمثال رقمي (عددي) معالجة المخطط البياني التجريبي للمحرك الرئيسي MaK 6M43 مسجلة عند  $n = 500 - 530 \text{ min}^{-1}$ ، وقمنا باستعراض نتائج المعالجة للأسطوانة الأولى على الأشكال (5÷10).

يظهر على الشكل (5) المخطط البياني التجريبي (المقاس)  $P = f(\varphi)$  مع القيم المحسوبة لدرجة الحرارة  $T = f(\varphi)$ ، أما على الشكل (6) فنرى المخطط البياني التجريبي (المقاس)  $P = f(\varphi)$  مع القانون (التابع) التكاملية للاحتراق  $\frac{dx}{d\varphi} = f(\varphi)$ ، بينما يبين الشكل (7) المخطط البياني التجريبي (المقاس)  $P = f(\varphi)$  والقانون التكاملية لإصدار الحرارة  $x = f(\varphi)$ . كما يبين الشكل (8) المنحنيات الخاصة بـ  $\frac{dP}{d\varphi}$ ، بينما يبين الشكل (9) شدة تدفق الغازات إلى جدران الأسطوانة  $\frac{dQ_w}{d\varphi} = f(\varphi)$ ، أما على الشكل (10) فنرى المنحني التكاملية للاستطاعة الناتجة  $Q_w = f(\varphi)$ .

نلاحظ أن منحنيات إصدار الحرارة لها طبيعة انسيابية ناعمة (Smooth) في الوقت الذي تأخذ فيه الشدة الأعظمية للاحتراق قيمة منخفضة  $[(\frac{dx}{d\varphi})_{\max} = 0.025 \text{ s}^{-1}]$  عند زاوية دوران لعمود المرفق مساوية لـ 17 درجة بعد بداية الاحتراق، وقد تم إجراء مقارنة مع المنحنيات التي تم الحصول عليها من خلال المعادلة رقم (1). تم تسجيل وحساب المؤشرات البيانية للعملية (دورة العمل) وهي:

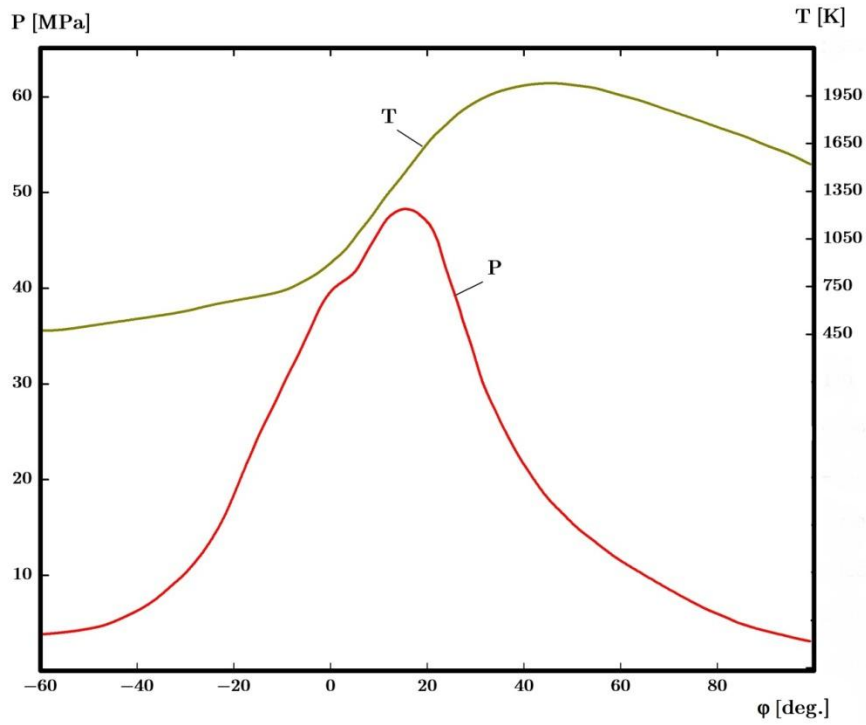
$$- P_i \text{ [MPa]} \text{ الضغط المتوسط البياني}$$

$$- g_i \text{ [kg/kW.h]} \text{ الاستهلاك البياني للوقود}$$

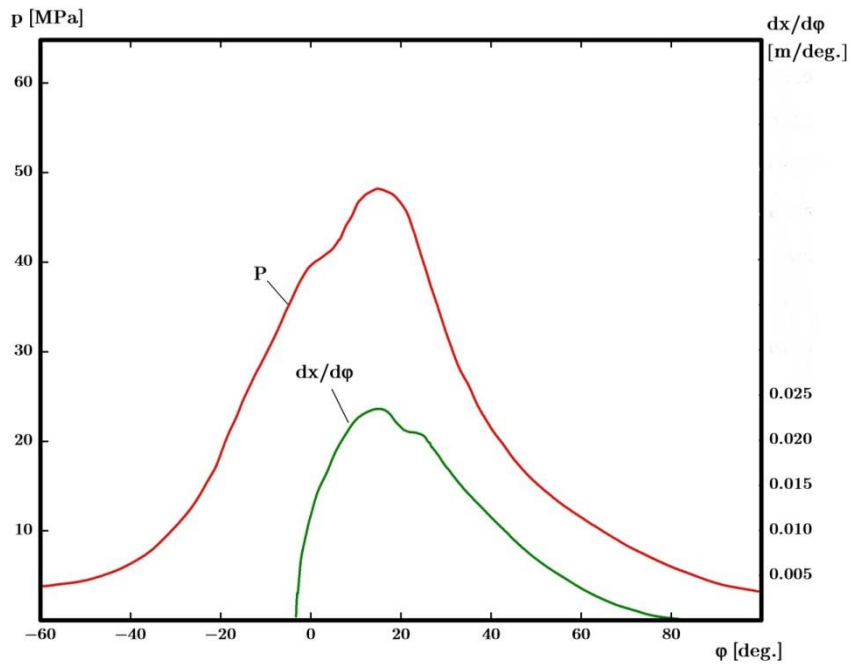
$$- \eta_i \text{ المردود البياني}$$

$$- \sigma_f \text{ [%]} \text{ كمية التسربات عبر أساور الإحكام (من الجرعة الأولية في بداية الانضغاط).}$$

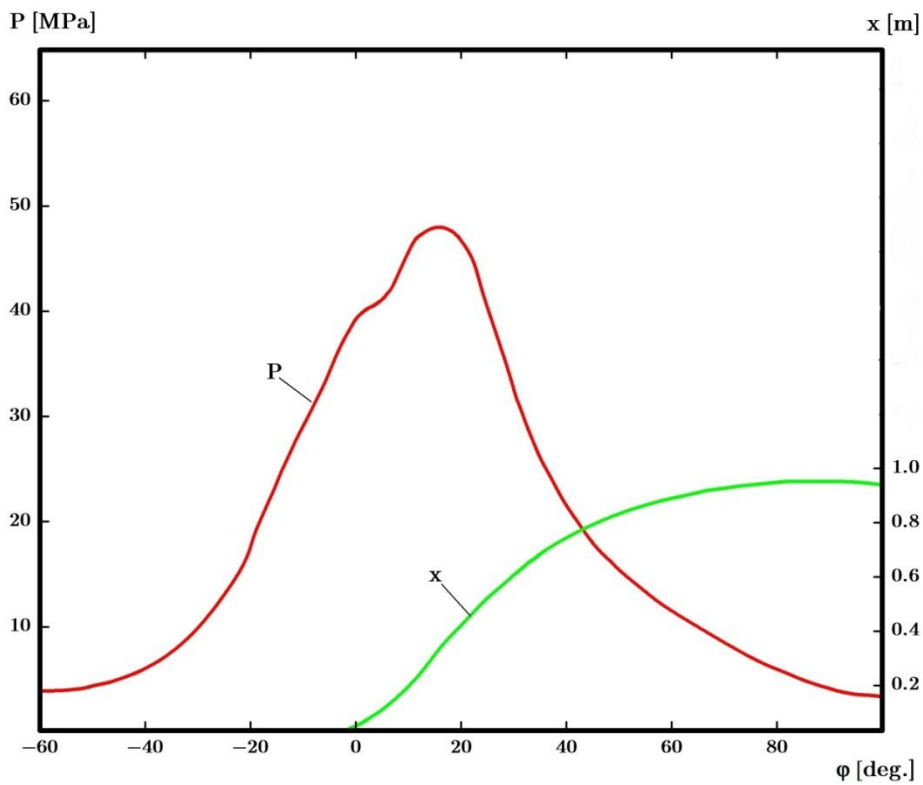
$$- q_{c,w} \text{ [%]} \text{ الضياعات الحرارية في مياه التبريد}$$



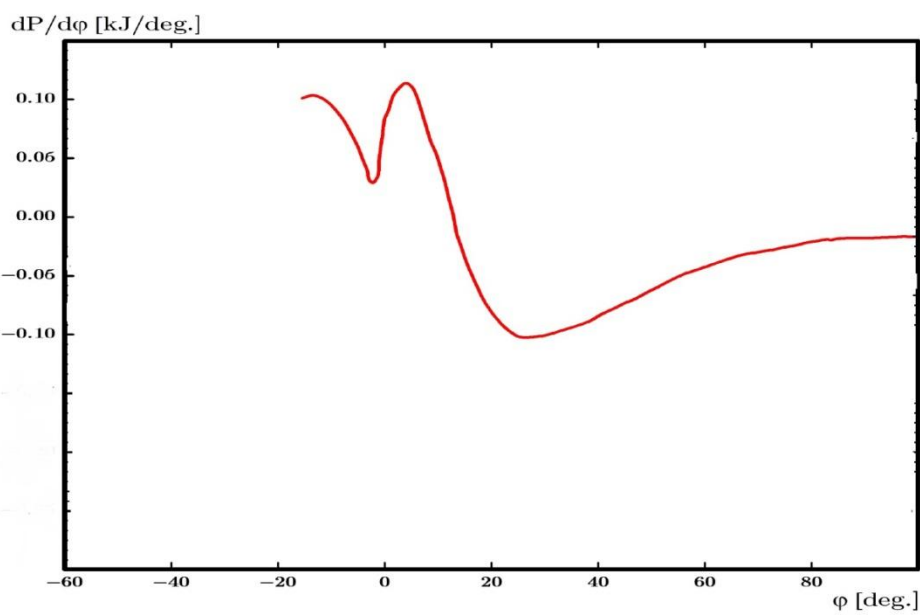
الشكل (5) المخطط البياني التجريبي (المقاس)  $P = f(\varphi)$  ، والقيم المحسوبة لدرجة الحرارة  $T = f(\varphi)$



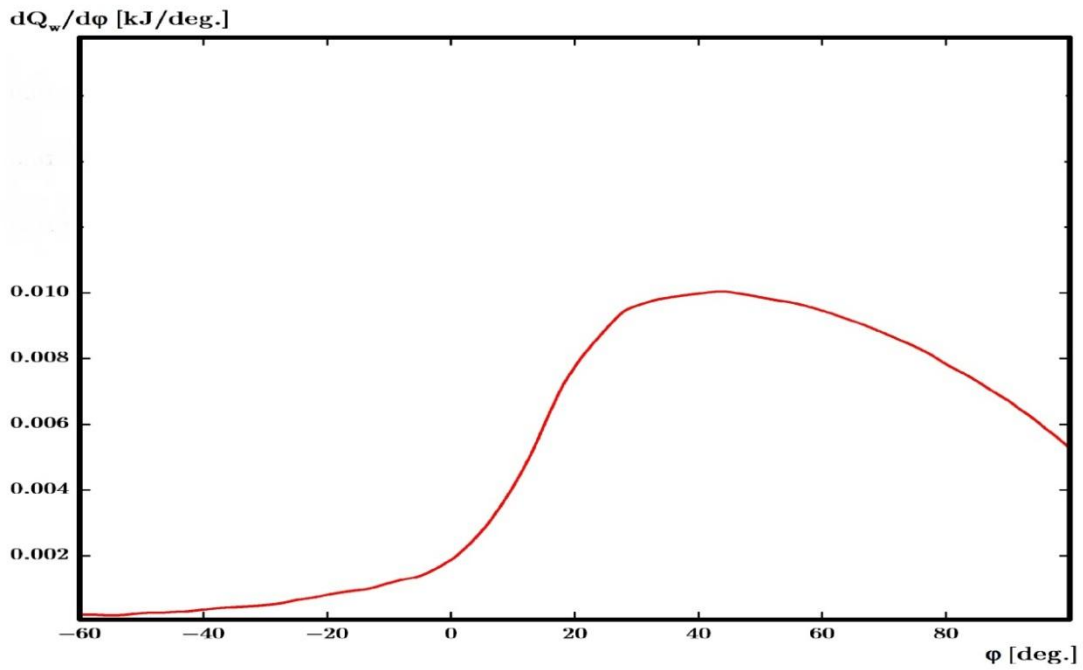
الشكل (6) المخطط البياني التجريبي (المقاس)  $P = f(\varphi)$  ، والقانون (التابع) التكاملي للاحتراق  $dx/d\varphi = f(\varphi)$



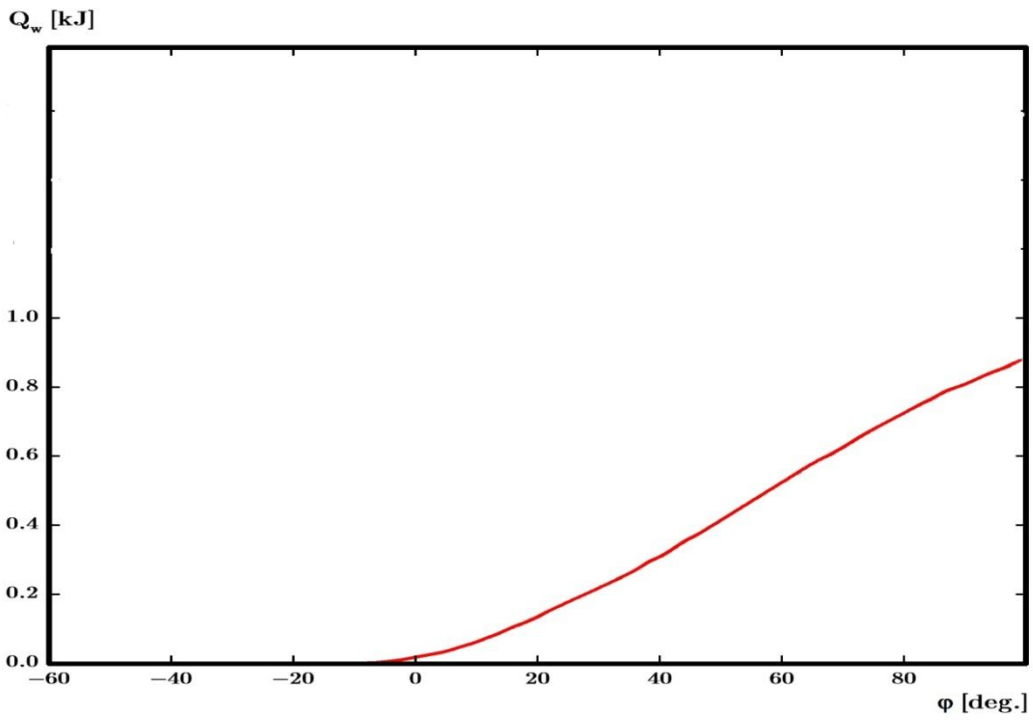
الشكل (7) المخطط البياني التجريبي (المقاس) ،  $P = f(\phi)$  ، والقانون التكاملي لإصدار الحرارة  $x = f(\phi)$



الشكل (8) المنحني الخاص بتغير الضغط مع زاوية دوران عمود المرفق  $dP/d\phi$



الشكل (9) شدة تدفق الغازات إلى جدران الأسطوانة  $dQ_w/d\phi = f(\phi)$



الشكل (10) المنحني التكاملية للاستطاعة  $Q_w = f(\phi)$

## الاستنتاجات والتوصيات:

1. عند استخدام المعادلة ( 11 ) مع احتساب تأثير بعض المؤشرات الإضافية فإن قيمة الشدة الأعظمية للاحتراق  $(dx/d\varphi)_{max}$  تكون أكبر بحدود 3.5 % من قيمتها عند تحديدها بواسطة معادلة غوننتشار (Gonchar)، أما الحصة النسبية لكمية الحرارة المحددة في نهاية شوط الاحتراق  $X_z$  فلها القيمة نفسها تقريباً للمعادلتين (الفرق بحدود 2 %). بينما النقطة الأعظمية لمخطط القانون التفاضلي للاحتراق المحدد بالمعادلة ( 11 ) فمزاخة بمقدار 2-3 درجة ل دوران عمود المرفق لجهة اليمين، أما درجة الحرارة في الأسطوانة أثناء شوط الاحتراق والتمدد فهي حوالي  $80\text{ }^\circ\text{C}$  (بسبب احتساب تغير الكتلة والخواص الفيزيائية - الحرارية للمزيج). بنتيجة ذلك تتخفض الضياعات الحرارية في مياه التبريد لتصبح بحدود 2-3 % أقل.
2. يمكن الحكم بشكل أكبر (أو أكثر شمولية ودقة) على تأثير المؤشرات الإضافية التي تم احتسابها إذا قمنا بحل المسألة الخطية، أي الحصول على مخططات بيانية عددية (رقمية) ومقارنتها بالمخططات البيانية التجريبية (التي تم الحصول عليها بواسطة المبيانات) لأنظمة عمل مختلفة. ولتحقيق تطابقها من الضروري إيجاد علاقة تحليلية موثوقة لقانون (تابع) الاحتراق.
3. للحصول على نتائج موثوقة يجب معالجة المخططات البيانية معالجة نوعية (بنوعية عالية). من المناسب على سبيل المثال استخدام مخططات تم الحصول عليها بمساعد مبيانات بنيوكهربائية حيث نحصل على النقاط التي تشكل مسار المخطط من دورات عديدة، وهذا يعطي الإمكانية لتقريب المخطط من منحنى أقرب ما يكون إلى المتوسط الحسابي لقيم النقاط. بهذه الطريقة تتم فلتره الضجيج العشوائي الذي يصاحب رسم المخطط إلى حد كبير.
4. تسمح الخوارزمية والبرنامج اللذان تم وضعهما بالحصول على مواصفة أكمل لدورة العمل في الأسطوانة وبدقة عالية للعملية الحسابية.
5. الاستنتاجات السابقة تخص المثال العددي المنشور، وهناك نتائج أخرى لأجزاء أخرى من الدراسة سيتم نشرها لاحقاً.

## المراجع:

1. د. بسام حمود، محطات القدرة البحرية 11، جامعة تشرين، اللاذقية 2011. ص 341 - 365.
2. محمد ابراهيم الشالي، محركات الديزل وتطبيقاتها البحرية، جامعة الاسكندرية، الاسكندرية 1980. ص576.
3. Данов, С.; Изследване Динамиката на Топлоотделяне в Цилиндъра на ГДД ВМЕИ- Варна, 1998, 223.
4. Гончар, Б. М. Численое Моделирование Рабочего Процеса Дизелей, Энергомашиностроение, 1993, No.12 стр. 1-20.
5. Ваншейдт, Л., „Справочник Дизели“, Машиностроение, 2003, стр. 87-93 , „Редактирано издание“
6. Разлейцев, Н. Ф., К Разчету Испарения Топливо в Цилиндре Дизеля на Участке Топливопадачи “ сб. „Двигатели Внутреннего Сгорания, кн. 23, Харьков“, 1978 стр. 18-25.
7. Данов, С. Н. Изследване Влиянието на Утечките през Буталните Пръстени Върху Индикаторните Показатели на Дизелов Двигател, сб.

- Доклади от Юбирейната Научна Сесия на ВМЕЙ- Варна, 1996, стр. 15-32.  
8. MaK.6M43Engine operating instructions, June 2010, 2585.  
9. Technical Documentation, Syriamar, Lattakia,  
10. M/V SURIA, MACHINERY MAINTENANCE SCHEDULE, 2012