

تحديد القيم المميزة المثلى لهواء إقلاع المحركات البحرية

الدكتور بسام حمود*

(تاريخ الإيداع 15 / 3 / 2009. قُبِلَ للنشر في 14 / 5 / 2009)

□ الملخص □

يتم إقلاع المحركات البحرية ومحركات الديزل ذات الاستطاعات الكبيرة والمتوسطة بواسطة الهواء المضغوط، الذي تتراوح قيمة ضغطه ضمن المجال (0.5 – 3.2) MPa.

يهدف هذا البحث إلى تحديد المقادير الأساسية المتعلقة بهواء إقلاع محرك الديزل البحري باستخدام الحاسوب، ودراسة تأثير ضغط هواء الإقلاع والسرعة الزاوية الدنيا للمحرك أثناء الإقلاع على الزمن اللازم للإقلاع وعلى العمل المصروف على ضاغط الهواء، ويركز البحث أيضاً على حساب اقتصادية عملية الإقلاع عبر حساب مردود العملية بمجمّلها.

عُرِضت في نهاية البحث النتائج التي تم التوصل إليها بعد إعداد برنامج على الحاسب، حيث بينت الحسابات بأنه توجد قيمة محددة لضغط هواء الإقلاع يكون عندها العمل المبذول في أثناء عملية الانضغاط أصغرياً و بأنه عند كل قيمة ثابتة محددة للسرعة الزاوية الدنيا لإقلاع المحرك ω_{min} توجد قيمة مثلى لمردود عملية الإقلاع.

الكلمات المفتاحية: محركات الديزل البحرية، الإقلاع.

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

Calculation of the Optimal Parameters of Marine Diesel Engines' Air Starting

Dr. Bassam Hammoud *

(Received 15 / 3 / 2009. Accepted 14 / 5 / 2009)

□ ABSTRACT □

The starting of marine and large diesel engines is carried out by compressed air with pressures between 0.5 and 3.2 MPa.

This paper aims to calculate the main air parameters of marine diesel engines' air starting, using the computer. It also studies the effect of air pressure and the minimum angular velocity (ω_{\min}) of the engine on the necessary starting time and the necessary work for the air compressor. Special focus has been placed on the assessment of economy and efficiency of the whole starting process.

At the end of the study, the results of computer calculation have been presented. They have illustrated that there is a certain value of air pressure, whereby the necessary compression work is minimal and that for every (ω_{\min}) there is an optimal efficiency for starting process.

Key words: Marine diesel engines – Starting.

*Associate Professor, Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering , Tishreen University, Syria.

مقدمة:

إن عمليات إقلاع المحرك ومناورته وإيقافه عن العمل وتغيير حمولته، تُشكل في مجملها ما يُسمى أنظمة العمل غير المستقرة أو الأنظمة الانتقالية. وهذه الأنظمة تلعب الدور الرئيس في حدوث غالبية الأعطال التي تتعرض إليها المحركات بشكل عام، إذ أثبتت الدراسات والأبحاث أن إقلاعاً واحداً لمحرك ديزل بارد يُعادل حوالي (3-5) ساعات عمل على نظام الاستطاعة الكاملة [1] و [2] .

لتأمين إقلاع المحرك يجب تدوير عمود المرفق بوساطة مصدر طاقة خارجي، ريثما تصل سرعة دورانه إلى القيمة التي تؤمن الجريان الطبيعي للعمليات التالية: خلط المزيج القابل للاشتعال ثم الانضغاط والاشتعال الذاتي، أي حتى الوصول إلى احتراق مستقر للخليط العامل.

عموماً يجب أن تكون عملية إقلاع المحرك قصيرةً وألا تستغرق إلا بضع ثوانٍ، ويتم تحديد الاحتياطي المطلوب من هواء الإقلاع استناداً إلى المعايير الدولية، التي تشترط أن تكون هذه الكمية كافية لتحقيق عدد محدد من عمليات الإقلاع المتتالية لا يقل عن $(6 \div 12)$ عملية إقلاع [3] ، وذلك حسب نوع السفينة وظروف استئمارها.

أهمية البحث وأهدافه:

تُعتبر اقتصادية عملية إقلاع المحرك من المؤشرات الفنية الأساسية لمحطات القدرة البحرية، وهي ذات أهمية كبيرة جداً وخاصة بالنسبة لتلك السفن التي تتطلب طبيعة مهامها القيام بعمليات مناورة متعددة. وهكذا يهدف البحث إلى محاكاة عملية إقلاع المحرك البحري وإعداد برنامج حاسوبي يتيح:

- تحديد الزمن اللازم لإقلاع المحرك
- تحديد كمية الهواء المضغوط اللازمة لإقلاع المحرك وحجم أسطوانات هواء الإقلاع
- حساب العمل اللازم لتحضير كمية الهواء اللازمة للإقلاع
- حساب مردود عملية الإقلاع.

طرائق البحث ومواده:

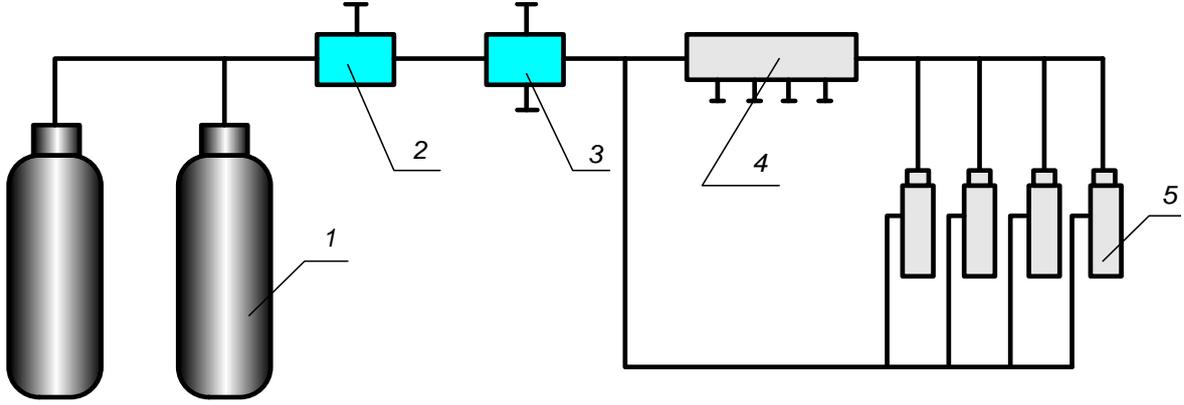
لتحقيق الأهداف المذكورة أعلاه تم اختيار نموذج رياضي مناسب لمحاكاة العمليات المعقدة والكثيرة التي تصف إقلاع المحرك البحري، ثم جرى وضع برنامج في بيئة برنامج MATLAB يتيح حساب المؤشرات الرئيسة لهواء الإقلاع، وإيجاد ضغط الهواء الأمثل الذي يحقق الاقتصادية الأعلى للعملية.

النتائج والمناقشة:**1- منظومات الإقلاع بالهواء المضغوط**

تُستخدم منظومات الإقلاع بالهواء المضغوط في معظم أنواع محركات الاحتراق الداخلي البحرية ذات الاستطاعات المختلفة، وتتميز هذه المنظومات عن غيرها (الكهربائية مثلاً) بالقدرة على تحقيق عزوم إقلاع كبيرة. يوضح الشكل (1) المخطط النمطي لأجزاء مجموعة إقلاع محركات الاحتراق الداخلي البحرية بالهواء المضغوط [4].

يجب ألا يتجاوز الزمن t_{start} اللازم لإقلاع محركات الديزل البحرية s 10، حتى عندما تصل درجة حرارة الوسط الخارجي ومياه تبريد المحرك إلى $5^\circ C = t_0$. كما يجب أن تكون سعة منظومة الإقلاع من الطاقة (الهواء

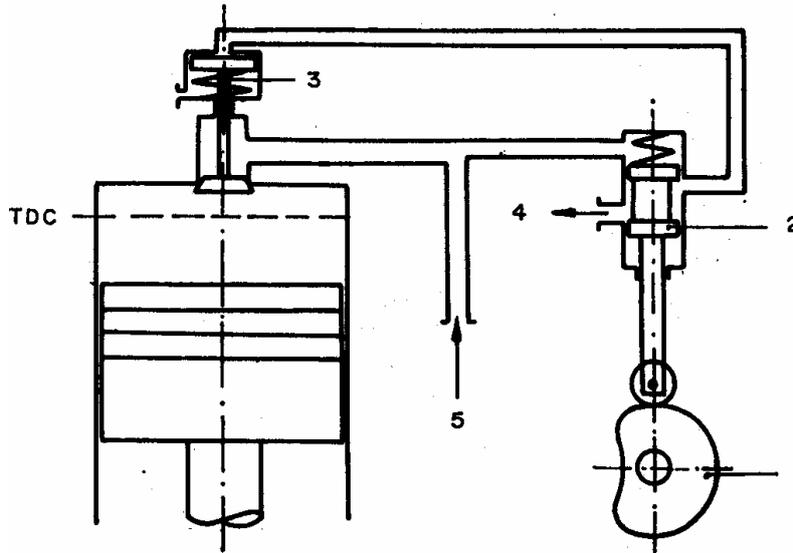
المضغوط) كافية لتأمين العدد المطلوب من عمليات الإقلاع المتكررة، وأن تكون قادرة على استعادة هذه السعة من الطاقة في أثناء عمل المحرك. إضافة إلى ذلك يجب أن تكون منظومة الإقلاع رخيصة الكلفة، منخفضة الكتلة وسهلة الاستخدام [5] .



الشكل (1) مخطط منظومة الإقلاع بالهواء المضغوط المستخدمة في المحركات البحرية

- 1- أسطوانات الهواء المضغوط، 2- صمام عدم رجوع، 3- صمام الإقلاع الرئيسي 4 - موزع الهواء
5 - صمامات إقلاع الأسطوانات (توزيع هواء الإقلاع الرئيس على أسطوانات المحرك حسب تسلسل محدد)

تتراوح قيمة الضغط لهواء الإقلاع ضمن المجال (0.5 – 3.2 MPa)، حيث يبدأ الإقلاع في كل أسطوانة عندما يتواجد مكبسها في بداية شوط التمدد (في النقطة الميتة العليا)، في هذه اللحظة يتم دفع كمية من الهواء المضغوط إلى الأسطوانة عبر صمام الإقلاع 3 كما هو مبين في الشكل (2).



الشكل (2) آلية هواء الإقلاع

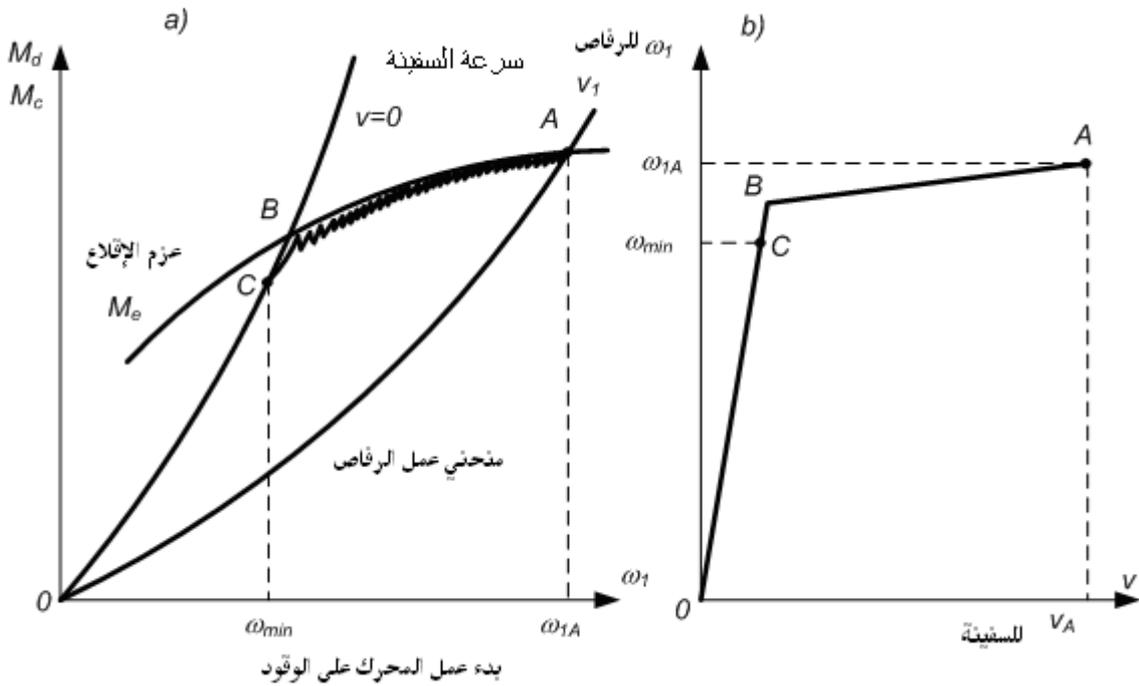
- 1 - حديبة، 2 - مكبس تحكم، 3 - صمام هواء الإقلاع، 4 - فتحة تنفيس، 5 - هواء الإقلاع

تحت تأثير ضغط الهواء يتحرك المكبس نحو الأسفل وبذلك يقوم بتدوير الجذع المعقوف. في أثناء الإقلاع يتم إرسال دفعات الهواء المضغوط إلى الأسطوانات بالتتالي وفق ترتيب الاشتعال للمحرك.

2- حساب المؤشرات الأساسية اللازمة لإقلاع المحرك البحري

1-2- تحديد الزمن اللازم لإقلاع المحرك

لنفرض أنه لدينا محرك ديزل بحري يعمل على رفاص من خلال مخفض ميكانيكي (آلية نقل ميكانيكية) متوضع داخل هيكل المحرك وبنسبة تخفيض ثابتة $i_p = n_d/n_p = const$. ولنفرض في الوضعية الابتدائية أن القيمة الفعلية لعزم الدوران المطبق على مجموعة المحرك والرفاص معدومة $M_d = 0$ ، وأن الرفاص ثابت لا يدور (السرعة الزاوية $\omega_1 = 0$)، والسفينة ثابتة لا تتحرك ($v = 0$). عند فتح صمام الإقلاع الرئيس يتجه الهواء المضغوط إلى أسطوانات المحرك ويُنتج عزم دوران محدد M_d . عملية إقلاع المحركات الرئيسة البحرية موضحة بيانياً على الشكل (3) في جملتي الإحداثيات $(\omega_1 - v)$ و $(M_c - M_d)$. يبدأ الإقلاع في النقطة O وينتهي في النقطة C ، وبعد ذلك يبدأ عمل المحرك على الوقود.



الشكل (3) المخطط البياني لعملية إقلاع المحرك الرئيسي للسفينة (محرك ديزل يعمل لتدوير رفاص السفينة)

بذلك نرى أن عملية إقلاع محرك الديزل هي حركة انتقالية نشيطة* (المنحني OC). إذا وقعت النقطة C على قسم الحركة الانتقالية الخاملة (المنحني BA) فسوف تزداد مدة الإقلاع وكمية الهواء اللازمة للإقلاع. في أثناء الإقلاع تبقى سرعة السفينة ثابتة، لذلك يُمكن توصيف عملية الإقلاع بمعادلة تفاضلية واحدة للعزوم [6]:

$$(1) \quad (J_1 + \lambda + i_p^2 \cdot J_j) \cdot \frac{d\omega_1}{dt} = i_p \cdot (M_d - M_{tr}) - M_{1tr} - M_c$$

حيث تم توضيح مدلول الرموز في أول البحث.

بحل المعادلة السابقة (1) بالنسبة للزمن t (s) نحصل على العلاقة التي تُحدد الزمن اللازم لإقلاع المحرك:

$$t_{start} = (J_1 + \lambda + i_p^2 \cdot J_j) \cdot \int_0^{\omega_1^{min}} \frac{d\omega_1}{i_p \cdot (M_d - M_{tr}) - M_{1tr} - M_c} \quad (2)$$

بما أن قيم M_{tr} و M_{1tr} لا تتغير مع الزمن فيمكن إدخالهما كقيم ثابتة مع M_d . و لتحديد الزمن اللازم لإقلاع المحرك t_{start} يجب أن نحصل على العلاقة التي تربط كلاً من M_d و M_c مع المتحول ω_1 . سنعتبر عن هاتين العلاقتين بواسطة السلاسل الأسية (سلسلة تايلور):

$$\left. \begin{aligned} M_d(\omega_1) &= a_0\omega_1^2 + a_1\omega_1 + a_2; \\ M_c(\omega_1, v) &= b_0\omega_1^2 + b_1\omega_1v + b_2v^2. \end{aligned} \right\} (3)$$

إذا أخذنا بالاعتبار أن أية عملية مناورة لمجمع الدفع على السفينة يُمكن التعبير عنها بقطعة مستقيمة في جملة الإحداثيات $\omega_1 - v$ (انظر الشكل 3)، فإنه يُمكن أن نكتب:

$$v = \alpha_2 \cdot \omega_1 + \beta_2 \quad (4)$$

حيث: α_2 و β_2 قيم ثابتة.

نعوض العلاقتين (3) و (4) في العلاقة (2) فنحصل على:

$$(5) \quad t_{start} = (J_1 + \lambda + i_p^2 \cdot J_j) \cdot \int_{\omega_{10}}^{\omega_1^{min}} \frac{d\omega_1}{B_0 + B_1 \cdot \omega_1 + B_2 \cdot \omega_1^2}$$

$$\left. \begin{aligned} B_0 &= a_0 - b_{02}\beta_2^2; \\ B_1 &= \beta_2(b_{11} + 2\alpha_2 b_{02}) - a_1; \\ B_2 &= (b_{20} + b_{11}\alpha_2 + b_{02}\alpha_2^2) - a_2 \end{aligned} \right\} \text{حيث:}$$

a, b - الحدود الثابتة في السلاسل الأسية (3)؛

ω_{10} - السرعة الزاوية الابتدائية لدوران الرافص (1/s) (عند إقلاع المحرك في وضعية المراصفة للسفينة
؛ $\omega_{10} = 0$)

* إن أية عملية مناورة لمجمع الدفع على السفينة (المحرك الرئيسي - الرافص - البدن) يُمكن اعتبارها عملية مركبة مؤلفة من نوعين مختلفين للحركة: حركة نشيطة وحركة خاملة. في المرحلة النشيطة لا تتعلق حركة الآلات (المحرك وتوابعه) بقانون حركة السفينة، أما في المرحلة الخاملة فإن حركة الآلات (المحرك وتوابعه) تجري بتوافق كامل مع قانون حركة السفينة (تتعلق بالسرعة التقدمية للسفينة).

عندها ما يلي: $\omega_{\min} = \frac{\pi \cdot n_{\min}}{30}$ السرعة الزاوية الدنيا المستقرة لدوران عمود المرفق اللازمة لإقلاع المحرك التي يتحقق

درجة حرارة الهواء في نهاية عملية الانضغاط تكون كافية لحدوث الاشتعال الذاتي للوقود داخل أسطوانات المحرك؛

عمليات تذيرر الوقود وتهوية الأسطوانات وتزييت الأسطح المحتكة تجري بشكل جيد ؛
احتياطي العطالة للكتل المتحركة يكون كافياً لتحقيق الدوران القسري للآليات المختلفة داخل المحرك بين النقاط الميتة؛

درجة حرارة جدران الأسطوانات والمكابس تكون كافية وقادرة على استقبال نواتج الاحتراق الساخنة دون حدوث إجهادات حرارية كبيرة.

من العلاقة (5) وبعد المكاملة نحصل على:

$$(6) \quad t_{start} = \mu \cdot \left(\text{Arth} \frac{\omega_{\min} + \frac{D}{2}}{N} - \text{Arth} \frac{\omega_{10} + \frac{D}{2}}{N} \right)$$

$$\mu = \frac{(J_1 + \lambda + i_p^2 \cdot J_r)}{B_2 N}, \quad D = \frac{B_1}{B_2}, \quad N = \sqrt{\left(\frac{B_1}{2B_2} \right)^2 + \frac{B_0}{B_2}} \quad (7) \quad \text{حيث:}$$

و $\text{Arth}(x) = \frac{1}{2} \ln \frac{1+x}{1-x}$, ($|x| < 1$) وهي تساوي: العلاقة التثلثية العكسية للمتحول x

بالانتقال إلى العلاقات اللوغاريتمية يُمكن أن نكتب العلاقة النهائية التي تحدد الزمن اللازم لإقلاع المحرك على

الشكل التالي:

$$(8) \quad t_{start} = \frac{\mu}{2} \cdot \ln \left(\frac{N + \frac{D}{2} + \omega_{1\min}}{N - \frac{D}{2} + \omega_{1\min}} \cdot y_0 \right)$$

$$y_0 = \frac{N - \frac{D}{2} - \omega_{10}}{N + \frac{D}{2} + \omega_{10}} \quad \text{باعتبار:}$$

لاستخدام العلاقة (8) يجب أن نُحدد قيم الثوابت: B_0, B_1, B_2 . تُحدد قيم هذه الثوابت عن طريق معالجة المعطيات الإحصائية واستخدام قيم مخططات إقلاع محركات الديزل البحرية، وعلى سبيل المثال يمكن

$$B_2 \approx 65,2 \cdot 10^5 \frac{N_{enom}}{n_{dnom}^3} \eta_w \quad \text{استخدام العلاقة التالية [6] :}$$

حيث: N_{enom} - استطاعة المحرك على نظام العمل الاسمي (HP)؛

n_{dnom} - سرعة دوران المحرك على نظام العمل الاسمي (rpm)؛

η_w - مردود آلية نقل الطاقة (عمود الرفاص).

إذا كنا نُعالج حالة إقلاع المحرك على سفينة واقفة أي ($v=0$)، فإنَّ قيم الثوابت α_2 و β_2 في العلاقة (4) تكون مساويةً للصفر. من هنا نستنتج أيضاً أنَّ الثابت B_1 يكون مساوياً للصفر أيضاً (في حال كون عزم المحرك ثابتاً يصبح $a_0 = const = M_{1tr} - (M_d - M_{tr}) \cdot i_p$ ، بذلك يكون $a_1 = 0, a_2 = 0$) وتكون قيمة الثابت D مساويةً للصفر أيضاً $D=0$. عندها تُصبح العلاقة التي تعطي الزمن اللازم للإقلاع من أجل سفينة واقفة على الشكل التالي:

$$(9) \quad t_{start} = \mu \cdot \left(\text{Arth} \frac{i_p}{N} \right) = \frac{\mu}{2} \ln \left(\frac{N + \frac{\omega_{min}}{i_p}}{N - \frac{\omega_{min}}{i_p}} \right)$$

تُوضح العلاقة (9) أن زمن الإقلاع يتناسب طردياً مع عزم عتالة الكتل المتحركة J_0 (حيث إن العلاقة 7 تعطي $\mu = \frac{(J_1 + \lambda + i_p^2 \cdot J_J)}{B_2 N}$)، لذلك فمن جهة يجب أن تكون قيمته أكبر ما يُمكن، بقصد توازن أفضل في أثناء دوران عمود المرفق، ومن جهة أخرى من الأفضل أن تكون قيمته أقل ما يُمكن لتأمين إقلاع المحرك بأقل وقت ممكن.

2-2- تحديد كمية الهواء المضغوط اللازمة لإقلاع المحرك وحجم أسطوانات هواء الإقلاع

يؤثر الاختيار المناسب لحجم أسطوانات هواء الإقلاع بشكل كبير على قدرة المحرك في تنفيذ عمليات المناورة، وخاصةً عند الحاجة إلى تكرار عمليات الإقلاع وعمليات عكس اتجاه دوران عمود مرفق المحرك (وبالتالي عمود الرافص)، أو في تلك العمليات المطلوبة لتفادي حوادث اصطدام السفينة بالسفن الأخرى أو بأي نوع من الحواجز البحرية و الملاحية.

إضافةً إلى مهارات طاقم السفينة، فإن كمية الهواء المُستهلكة لإقلاع المحرك تتعلق بالعوامل الأساسية التالية:

- أبعاد المحرك وبنيته
- عدد أسطوانات المحرك المشاركة في عملية الإقلاع
- الحالة الحرارية للمحرك (فيما إذا كان المحرك الذي نريد إقلاعه ساخناً أو بارداً)
- درجة حرارة وضغط هواء الإقلاع
- سرعة حركة السفينة وخصائص الرافص (في حالات المناورة قد يُلجأ إلى إيقاف المحرك وتدويره بالعكس لكبح حركة السفينة ثم إعادة إقلاعه، وعند ذلك تكون السفينة في حالة الحركة!).

عند القيم المنخفضة لضغط هواء الإقلاع تكون كتلة هذا الهواء غير كبيرة، وفي هذه الحالة نحتاج إلى عدد كبير من دورات عمود المرفق حتى نصل إلى السرعة الزاوية المطلوبة لاستقرار عمل المحرك والتي تُسمى السرعة الزاوية الدنيا للإقلاع ω_{min} . وبالعكس عند القيم المرتفعة لضغط هواء الإقلاع تكون كتلة الهواء المطلوبة للوصول إلى سرعة الدوران ω_{min} غير كبيرة.

مقدار استهلاك الهواء G_b (بالكيلوغرام kg) بالنسبة لنوع محدد من المحركات، عند قيمة محددة لنسبة ملء الأسطوانة a_n يتناسب طردياً مع كلٍ من زاوية دوران عمود المرفق α ومتوسط كثافة الهواء في الأسطوانة في أثناء عملية الإقلاع:

$$(10) \quad G_b = V_h \cdot i_{pc} \cdot a_n \cdot \rho_b \cdot \alpha / (2 \cdot \pi \cdot z)$$

حيث: $\alpha = 2 \cdot \pi \cdot x$

i_{pc} عدد أسطوانات المحرك المستخدمة في الإقلاع

α الزاوية الإجمالية لدوران عمود المرفق في أثناء عملية الإقلاع (حتى لحظة مباشرة عمل المحرك على

الوقود)؛

x عدد دورات عمود المرفق خلال فترة إقلاع المحرك؛

V_h الحجم العامل لأسطوانة المحرك في أثناء الإقلاع بدون ضغط (يدخل في قيمة V_h بالإضافة إلى الحجم

العامل حجم حجرة الاحتراق $(V_c = 0,06 \cdot V_h)$ ؛

z ثابت مرتبط بعدد أشواط المحرك (للمحركات الثنائية $z=1$ ، للمحركات الرباعية $z=2$)؛

a_n نسبة ملء الأسطوانة بالهواء في أثناء إقلاع المحرك $0.50 \div 0.60$ ؛

ρ_b كثافة الهواء الوسطية في الأسطوانة في أثناء عملية الإقلاع (kg/m^3)، التي تتحدد من خلال المعادلة

العامة للغازات:

$$(11) \quad \rho_b = \frac{\theta_b (p_b + 1)}{R \cdot T_{pc} \cdot 100} = \theta_b \cdot \varphi_b (p_b + 1)$$

حيث: R الثابت العام للغازات (kg.m/kmol.K)

T_{pc} درجة حرارة الهواء في أسطوانة المحرك في أثناء الإقلاع (للمحرك البارد $T_{pc} = 320 \text{ K}$ ، أما

للمحرك الساخن فإن $T_{pc} = 350 \text{ K}$)

θ_b ثابت تجريبي يأخذ بالاعتبار انخفاض الضغط في الأسطوانة في أثناء عملية ملء واحدة

للأسطوانة، تتراوح قيمته ضمن المجال $0,80 \div 0,85$

p_b القيمة المتوسطة لضغط الهواء في أسطوانات المحرك خلال مرحلة الإقلاع.

$$(12) \quad \varphi_b = \frac{1}{R \cdot T_{pc} \cdot 100} \quad \text{إذا استخدمنا الرموز التالية:}$$

$$(13) \quad y_b = \frac{2\pi \cdot z}{\alpha_n \cdot V_h \cdot \theta_b \cdot \varphi_b \cdot i_{pc}}$$

$$(14) \quad \alpha = y_b \cdot \frac{G_b}{p_b + 1} \quad \text{نحصل على:}$$

بحلّ المعادلة الأخيرة بالنسبة لاستهلاك الهواء G_b (kg) نجد:

$$(15) \quad G_b = \frac{\alpha \cdot (p_b + 1)}{y_b}$$

عند وجود مخفض للدوران فإن زاوية دوران عمود المرفق: $\alpha = \alpha_1 \cdot i_p$

حيث: α_1 زاوية دوران عمود الرفاص

i_p معامل النقل.

عندها تُصبح العلاقة (15) على الشكل التالي:

$$(16) \quad G_b = \frac{\alpha_1 \cdot i_p \cdot (p_b + 1)}{y_b}$$

يمكن حساب الزاوية α_1 بالاستعانة بقانون تغير زاوية دوران عمود الرفاص بالنسبة للمرحلة "النشيطة" لحركة السفينة في اللحظة الابتدائية للزمن ($t = 0$) كما يلي [6]:

$$(17) \quad \alpha_1 = \mu \cdot N \cdot \ln \frac{\frac{1}{y_0} \exp\left(\frac{2t}{\mu}\right) + 1}{\frac{1}{y_0} + 1} - \left(\frac{D}{2} + N\right)t + \alpha_{10}$$

تحدد قيم الثوابت (μ, N, D, y_0) (الموجودة في العلاقة الأخيرة (17) من العلاقة (7) ومراعاة أن :

$$y_0 = \frac{N - \frac{D}{2} - \omega_{10}}{N + \frac{D}{2} + \omega_{10}}$$

نعوض قيمة α_1 من العلاقة الأخيرة في العلاقة (16)، ولكي نتخلص من الزمن t في العلاقة (17) نعوض عن قيمة t باستخدام العلاقة (6)، فنحصل في الحالة العامة (عندما تكون سرعة السفينة $v \neq 0$) على العلاقة التالية:

$$(18) \quad G_b = \frac{i_p \cdot (p_b + 1) \cdot (J_1 + \lambda + i_p^2 \cdot J_j)}{2B_2 \cdot y_b} \times \left\{ \ln \frac{1 - \left(\frac{D}{2N}\right)^2}{1 - \frac{1}{N^2} \cdot \left(\frac{\omega_{\min}}{i_p} + \frac{D}{2}\right)^2} + \frac{D}{N} \cdot \left[\text{Artn} \frac{D}{2N} - \text{Artn} \frac{1}{N} \cdot \left(\frac{\omega_{\min}}{i_p} + \frac{D}{2}\right) \right] \right\}$$

حيث إنه عندما يكون ($t = 0$)، فإن السرعة الزاوية $\omega = 0$ ، وزاوية الدوران أيضاً $\alpha = 0$. عند إقلاع المحرك في حالة مراصفة السفينة (السفينة ثابتة لا تتحرك)، أي عندما يكون $D = 0$ ، فإن العلاقة الأخيرة (18) تُصبح أكثر بساطة وتأخذ الشكل التالي:

$$(19) \quad G_b = \frac{i_p \cdot (p_b + 1) \cdot (J_1 + \lambda + i_p^2 \cdot J_j)}{2B_2 \cdot y_b} \cdot \ln \frac{1}{1 - \frac{\omega_{\min}^2}{i_p^2 \cdot N^2}}$$

عندها يكون حجم الهواء المُستهلك لإنجاز إقلاع واحد للمحرك يساوي:

$$V_b = \frac{G_b}{\rho_b} \quad (20)$$

وعند درجة الحرارة T_o والضغط p_o :

$$(21) \quad V_{bo} = \frac{V_b \cdot p_b}{p_o} \cdot \frac{T_o}{T_z}$$

الحجم الإجمالي الذي تُحدده المكابس المتحركة في الأسطوانات المستخدمة لإقلاع المحرك يساوي:

$$(22) \quad i \cdot V_h = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S \cdot i$$

الاستهلاك النوعي لهواء الإقلاع منسوباً إلى الحجم الإجمالي لأسطوانات المحرك:

$$(23) \quad V_B = \frac{V_{bo}}{i \cdot V_h}$$

تتراوح كمية الهواء المستهلكة لإقلاع الأنواع المختلفة من المحركات البحرية ضمن المجال $litter / litter (1 \div 16)$ وهو واسع نسبياً. أما حجم أسطوانات تخزين الهواء اللازم لتحقيق عدد m من إقلاعات المحركات البحرية الرئيسية فهو يساوي:

$$(24) \quad V_{BB} = \frac{V_{bo} \cdot p_o}{p_b} \cdot m$$

وعدد الأسطوانات اللازمة لتخزين الكمية المطلوبة من هواء الإقلاع يساوي:

$$(25) \quad n_B = \frac{V_{BB}}{V_{BSt}}$$

حيث: V_{BSt} الحجم القياسي المعتمد عالمياً للبالونات المستخدمة لتخزين الهواء اللازم لإقلاع المحركات البحرية. وتوجد عادةً أربعة أحجام قياسية: $V_{BSt} = (80, 100, 200, 400) litter$.

3-2- تحديد اقتصادية ومردود عملية إقلاع المحرك

سنحدد قيمة العمل اللازم لتحضير كمية الهواء التي تُستهلك خلال إقلاع واحد، عند قيم مختلفة لمؤشرات عملية الإقلاع، ومن ثم نحدد مردود عملية الإقلاع.

نفترض أن عملية ضغط الهواء الذي سيستخدم في الإقلاع تجري في ضاغط وحيد المرحلة، في هذه الحالة وللقيام بضغط كمية من الهواء مقدارها $G_b [kg]$ من القيمة $1) kg/cm^2$ إلى القيمة $(\varepsilon' \cdot p_{bc} + 1) kg/cm^2$ يجب أن نبذل عملاً مقداره [7]:

$$(26) \quad L_b = G_b RT_0 \frac{m_1}{m_1 - 1} \cdot \left[(\varepsilon' \cdot p_{bc} + 1)^{\frac{m_1 - 1}{m_1}} - 1 \right]$$

حيث: $p_b = \varepsilon' \cdot p_{bc}$

p_{bc} ضغط الهواء في أسطوانات المحرك

ε' ثابت يتعلق بعوامل مختلفة أهمها وجود مخفض للضغط على خط نقل الهواء المضغوط والضاغطات ضمن الأنابيب والتجهيزات إلخ...

T_0 درجة الحرارة المطلقة للهواء الخارجي.

نعوض في العلاقة الأخيرة قيمة G_b من العلاقة (19) ونستخدم الرموز التالية:

$$C_t = RT_0 \frac{m_1}{m_1 - 1} \quad , \quad C_y = \frac{i_p (J_1 + \lambda + i_p^2 \cdot J_j)}{2y_b \cdot B_2}$$

فنحصل على العلاقة التالية التي تعطي العمل المبذول:

$$(27) \quad L_b = C_i \cdot \left[(\varepsilon' p_{bc} + 1)^{\frac{m_1-1}{m_1}} - 1 \right] \times C_y (p_{bc} + 1) \ln \left\{ \frac{1}{1 - \frac{\omega_{min}^2}{i_p^2 \cdot N^2}} \right\}$$

مردود عملية الإقلاع الذي يقيم اقتصادية هذه العملية هو النسبة بين الطاقة الحركية للأقسام المتحركة في أثناء عملية الإقلاع (داخل المحرك، آلية نقل الطاقة بكافة مكوناتها، الرفاص) وتحديداً في لحظة بلوغ القيمة ω_{min} ، وبين العمل المستهلك لتحضير الهواء المضغوط في الضاغط، المستخدم في الإقلاع:

$$(28) \quad \eta_n = \frac{(J_1 + \lambda + i_p^2 \cdot J) \cdot \omega_{min}^2}{2L_b}$$

حيث $(J_1 + \lambda + i_p^2 \cdot J)$ هو العزم الإجمالي للعطالة (kg.m.s^2).

3- وصف البرنامج الحاسوبي

تم في إطار هذه الدراسة وضع برنامج في بيئة **Matlab** يسمح بحساب مؤشرات الإقلاع المختلفة بناءً على العرض السابق. وهكذا تم تصميم واجهة تسمح بإدخال المعطيات الأساسية التي تشمل عدة مجموعات:

1- *مواصفات المحرك*: استطاعة المحرك، السرعة الزاوية الدنيا المستقرة للإقلاع، سرعة الدوران الاسمية للمحرك، درجة حرارة المحرك أثناء الإقلاع، ثابت تخفيض علبة السرعة، العزم الإجمالي للعطالة، قطر الأسطوانة، الشوط، نصف قطر المرفق، عدد أسطوانات المحرك، عدد الأسطوانات المخصصة للإقلاع، عدد أشواط المحرك، الأس البوليتروبي لمرحلة الانضغاط.

2- *مواصفات هواء الإقلاع*: متوسط ضغط هواء الإقلاع، متوسط ضغط الهواء في نهاية عملية الإقلاع، ثابت ضياعات ضغط هواء الإقلاع، الحجم القياسي لبالون هواء الإقلاع.

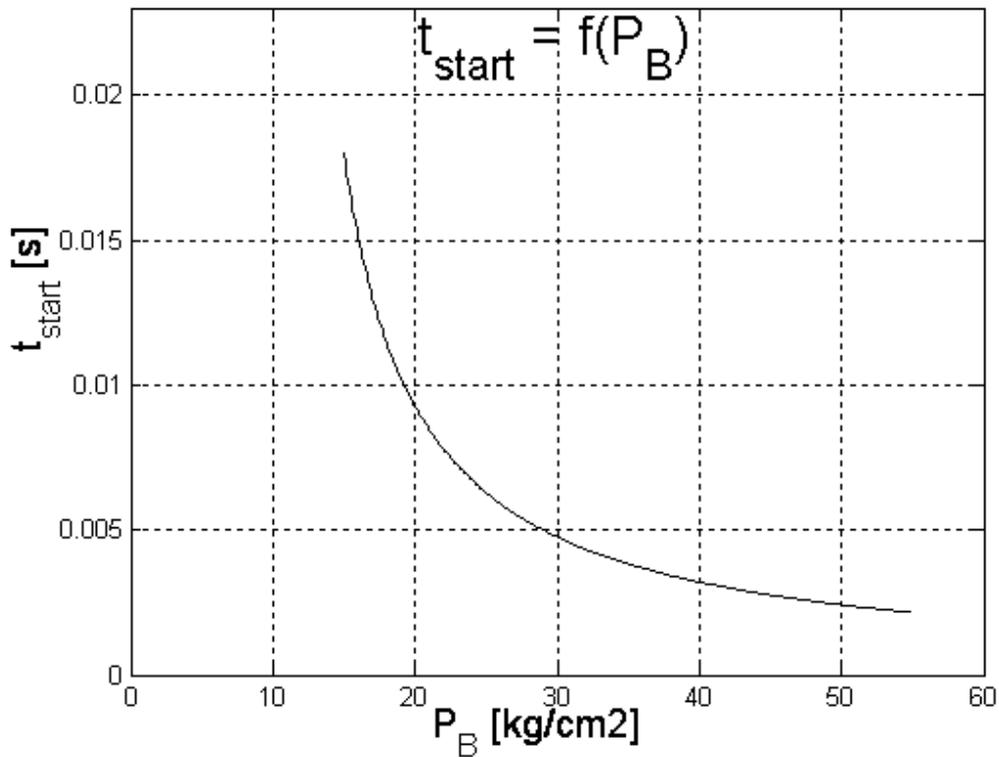
3- *مواصفات الهواء المحيط*: درجة حرارة الوسط المحيط وضغطه.

4- *ثوابت الشروط الابتدائية*: مردود عمود الرفاص، معامل ملء الأسطوانات بالهواء أثناء الإقلاع، الثابت العام للغازات،

وبإعطاء أمر البدء يباشر البرنامج بحساب المقادير المختلفة الواردة في المعادلات (7) حتى (28). يلي ذلك خيار تحديد مجال تغير كل مقدار من المؤشرات المدروسة من أجل رسم العلاقات بين المؤشرات المختلفة لعملية الإقلاع ثم تحديد القيم المثلى.

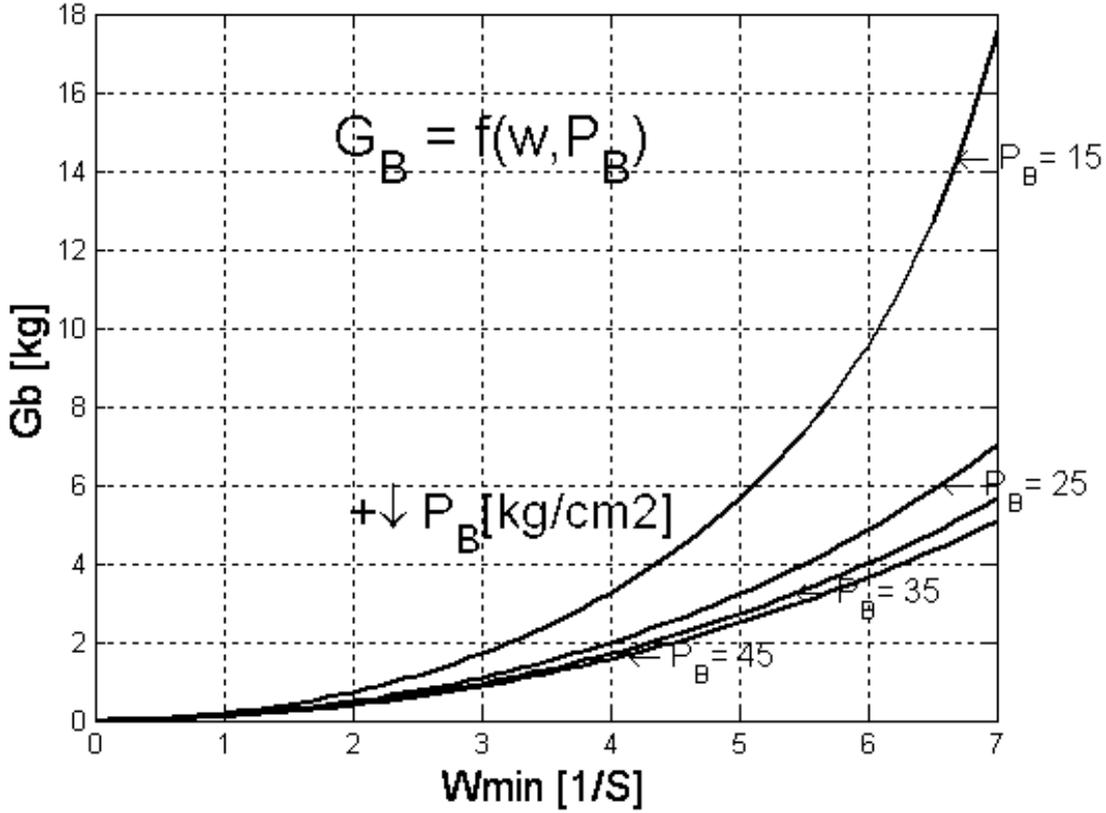
4- نتائج الحساب باستخدام الحاسب

يبين الشكل (4) العلاقة بين الزمن اللازم لإقلاع المحرك البحري وضغط الهواء المستخدم في عملية الإقلاع.

الشكل (4) العلاقة بين زمن إقلاع المحرك وضغط الهواء المستخدم p_b

ويتضح من الشكل $t_{start} = f(p_b)$ أنه توجد قيمة صغيرة محددة للضغط p_b يكون إقلاع المحرك عندها غير ممكن، أي أن $t_{start} = \infty$. بازدياد قيمة ضغط الهواء ينخفض الزمن اللازم للإقلاع، إلا أنه توجد هناك قيمة لا يؤدي ازدياد الضغط بعدها إلى انخفاض يُذكر في الزمن اللازم للإقلاع (بعد الضغط $50 kg/cm^2$ نلاحظ استمرار الزمن اللازم للإقلاع كما هو أي $0.0025 s$ دون نقصان)، لذلك فإن الشكل (4) يتيح تحديد القيمة الملائمة لضغط الهواء حتى يتحقق الإقلاع بسهولة ودون كلفة كبيرة.

لدراسة استهلاك المحرك للهواء المضغوط عند الإقلاع G_b ، وارتباط ذلك بالسرعة الزاوية الدنيا ω_{min} وضغط الهواء أمكن بالاستعانة بالبرنامج الموضوع للحصول على الشكل (5)، الذي يبين نتائج حساب استهلاك هواء الإقلاع المضغوط عند قيم مختلفة للضغط في أسطوانات التخزين وسرعات دوران مختلفة لعمود المرفق.



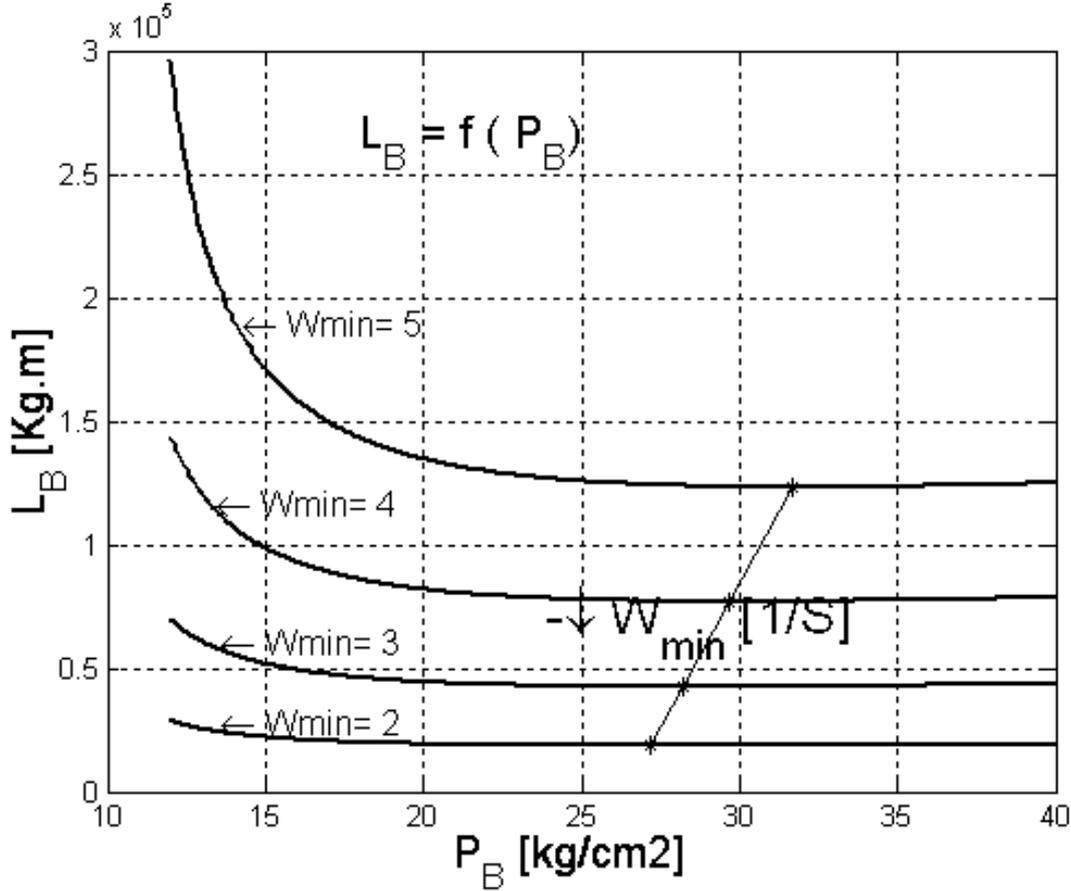
الشكل (5) العلاقة بين استهلاك المحرك للهواء وكل من p_b و ω_{min}

يتضح من الشكل (5) أنه عند ثبات قيمة ضغط الهواء p_b فإنه مع ازدياد قيمة ω_{min} يزداد استهلاك الهواء G_b ، وتكون التغيرات في العلاقة $G_b = G_b(\omega_{min})$ كبيرة جداً عند القيم المنخفضة لضغط هواء الإقلاع (انظر منحنى الضغط 15 kg/cm² على الشكل 5). ويؤدي رفع ضغط هواء الإقلاع إلى تقليل استهلاك الهواء G_b عند جميع السرعات الزاوية للإقلاع، ولكن الشكل السابق يبين بأنه ثمة مجال لسرعة الدوران يؤدي فيه رفع ضغط الهواء إلى زيادة استهلاك المحرك للهواء المضغوط دون تحقيق فوائد ذات أهمية. مثلاً عند $\omega_{min} = 3$ يكون الفرق في كمية الهواء المضغوط الممكن توفيره عند الضغطين 25 و 45 kg/cm² طفيفاً جداً وبالتالي فلا مبرر للرفع الكبير للضغط في اسطوانات الهواء ما لم يكن لذلك جدوى اقتصادية. وينطبق هذا على مجال السرعات الزاوية ذات القيمة التي تفوق $\omega_{min} = 3$ (1/s).

ويجب أن نأخذ بالاعتبار أن $(\omega_{min}$ و p_b) هما مؤثران مرتبطان مع بعضهما البعض في التأثير على استهلاك الهواء، فعند سرعة زاوية محددة دنيا لإقلاع المحرك يسبب ازدياد قيمة ضغط الهواء p_b ارتفاع فعالية تبريد المزيج الغازي في أسطوانات المحرك في أثناء تمدد هواء الإقلاع وانخفاض كمية الهواء اللازمة لإقلاع، ومن هنا تتضح أهمية الحصول على المخططات في الشكل (5).

لدراسة تأثير العمل المبذول على الضاغط L_b بمواصفات هواء الإقلاع وفقاً لما تم التوصل إليه في هذه الدراسة يمكن الاستعانة بالشكل (6)، الذي يوضح بأن مقدار العمل المستهلك ينخفض مع زيادة ضغط الهواء الإقلاع وصولاً إلى نقطة معينة مقابلة لسرعة الدوران الدنيا، وبعد هذه النقطة يبدأ ازدياد العمل المستهلك.

يمكن الاستنتاج من الشكل (6) أنه بانخفاض السرعة الزاوية اللازمة للإقلاع ω_{min} يصبح من الممكن إقلاع المحرك بهواء ضغطه p_b أقل (مثلاً عند $5 \omega_{min} = 5$ تبلغ قيمة $p_b = 32$ وعند $2 \omega_{min} = 2$ تبلغ قيمة $p_b = 27$) ويرافق ذلك انخفاض كبير في العمل اللازم لضغط الهواء (L_b) المقابل لـ $5 \omega_{min} = 5$ هو $1.25 \times 10^5 \text{ kg.m}$ بينما تبلغ قيمة L_b المقابل لـ $2 \omega_{min} = 2$ المقدار $(0.25 \times 10^5 \text{ kg.m})$ ، أي أن تناقص ω_{min} بنسبة 40% خفض العمل اللازم لضغط الهواء خمس مرات.

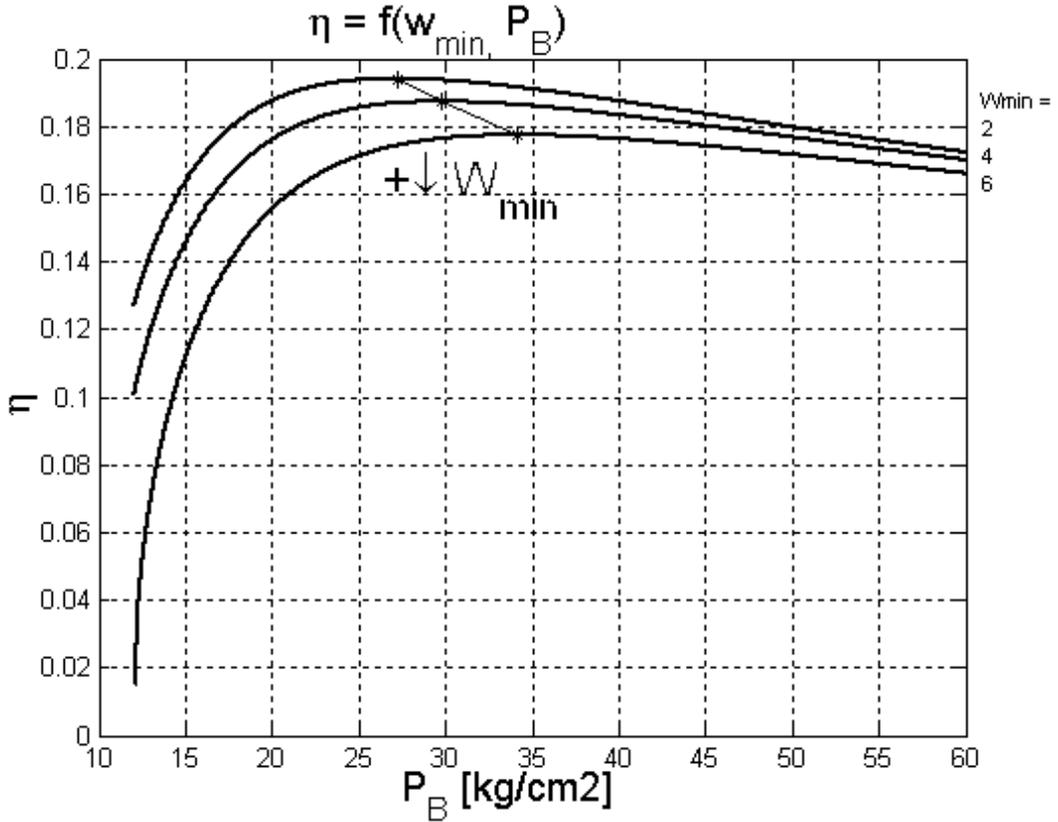


الشكل (6) منحنيات العلاقة بين العمل المستهلك في أثناء ضغط الهواء وقيمة الضغط عند عدة قيم للمؤشر ω_{min}

وهكذا نجد أنه بالنسبة لأية قيمة ثابتة للمؤشر $\omega_{min} = const$ توجد قيمة محددة لضغط هواء الإقلاع يكون عندها العمل المبذول في أثناء الانضغاط أصغرياً (قيمة دنيا للعمل المطلوب)، ولهذه النتيجة قيمة عملية كبيرة حيث إنها تتيح تجنب الوصول إلى قيم عالية للضغط تسبب زيادة العمل المستهلك دون تحقيق فائدة.

بعد تحديد قيمة الضغط والسرعة الزاوية الدنيا للإقلاع فإن من المهم دراسة اقتصادية عملية الإقلاع بمجملها، عبر الاستعانة بالمعادلة (28) لحساب المردود باعتباره النسبة بين الطاقة الحركية للأقسام المتحركة في أثناء عملية الإقلاع في لحظة بلوغ القيمة وبين العمل المُستهلك لتحضير الهواء المضغوط في الضاغط المُستخدم في الإقلاع. يسمح حساب المردود بمراعاة كافة مؤشرات الهواء المضغوط التي تمت دراسة تغيراتها، وبالتالي فإن تحديد قيمته القصوى كما هو مبين في الشكل (7) يمكن من معرفة p_b و ω_{min} الملائمتين.

يتضح من الشكل (7) بأنه عند كل قيمة ثابتة محددة للسرعة الزاوية الدنيا للإقلاع ω_{min} توجد قيمة ملائمة أي أكثر اقتصادية لضغط هواء الإقلاع p_b ، وبأن المردود يرتفع بانخفاض قيمة ω_{min} من أجل نفس مجال الضغط.



الشكل (7) منحنيات العلاقة بين مردود عملية الإقلاع وقيمة ضغط هواء الإقلاع عند قيم محددة للمؤشر ω_{min}

كما يلاحظ من الشكل أن انخفاض ω_{min} يرفع مردود عملية الإقلاع قليلاً ويزيح نقطة المردود الأقصى باتجاه الضغوط الدنيا للهواء (نحو اليسار والأعلى في الشكل 7) وهذا يتواءم مع ما تم عرضه في الشكل 6.

الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث وضع برنامج في بيئة Matlab يتيح حساب المؤشرات الرئيسية لعملية إقلاع المحرك بالهواء المضغوط واستنتاج القيم التي تجعل العملية تجري بشكل اقتصادي وهي: ضغط هواء الإقلاع، السرعة الزاوية الدنيا اللازمة للإقلاع، زمن الإقلاع، العمل المُستهلك في أثناء ضغط الهواء، ومردود عملية الإقلاع.

والبرنامج الذي تم إعداده قابل للتطوير والتوسيع بحيث يمكن دراسة تأثير عوامل إضافية أخرى على عملية الإقلاع مثل:

- خصائص وسيلة الدفع (الرفاص)
 - المواصفات الهندسية للمحرك
 - معامل التخفيض للمخفض الميكانيكي
 - الضياعات الميكانيكية في المحرك وفي عمود الرفاص
 - السرعة الابتدائية لحركة السفينة (β_2)
 - عزم عطالة كتل الأقسام المتحركة وعزم عطالة الكتل الدوارة مع عمود الرفاص.
- ويتم الآن العمل على ذلك من أجل عرض النتائج في بحوث لاحقة.

قائمة بالرموز ودلالاتها:

واحدة القياس	الرمز	التسمية
hp	N_{enom}	استطاعة المحرك الرئيسي
min^{-1}	n_{min}	سرعة دوران المحرك الدنيا المستقرة للإطلاق
min^{-1}	n_{nom}	سرعة الدوران الاسمية
kg.m	M_d	عزم الدوران المطبق على محور المحرك
kg.m	M_{tr}	العزم المطبق على محور المحرك الناجم عن قوى الاحتكاك بين قطع المحرك
kg.m	M_c	عزم المقاومة لدوران الرفاص الناجم عن مقاومة المياه لحركة بدن السفينة
(kg.m.s^2)	J_1	عزم عطالة القطع والآلات المتحركة والمرتبطة مع عمود الرفاص
$\text{kg/cm}^2, K$	P_0, T_0	درجة حرارة الوسط الخارجي وضغطه
(kg.m.s^2)	λ	عزم العطالة المضاف الناجم عن كتلة المياه التي تدور مع الرفاص
(kg.m.s^2)	J_j	عزم العطالة المطبق على محور المحرك بسبب كتلة القطع والأقسام المرتبطة معه بشكل ميكانيكي
K	T_{pc}	درجة حرارة المحرك في أثناء الإقلاع (320 للمحرك الساخن و 350 K للمحرك البارد)
-	i_p	ثابت النقل (التخفيض)
kg/cm^2	P_b	متوسط ضغط هواء الإطلاق
kg/cm^2	p_c	متوسط ضغط الهواء في نهاية عملية الإطلاق ($p_c = 4 \div 6 \text{ kg/cm}^2$)
kgm.s^2	$J_1 + \lambda + i_p^2 J_j$	العزم الإجمالي للعطالة
cm	S/D_c	قطر أسطوانة المحرك / طول شوط المكبس
$\text{kgm}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$	R	الثابت العام للغازات
-	η_w	مردود عمود الرفاص ($\eta_w = 0.98 \div 0.985$)
cm	R	نصف قطر المرفق
-	i	عدد أسطوانات المحرك

-	i_{pc}	عدد الأسطوانات المخصصة للإقلاع
-	α_n	معامل ملء الأسطوانات بالهواء في أثناء الإقلاع ($\alpha_n = 0.5 \div 0.6$)
-	z	ثابت تحديد عدد الأثواط
-	s_p	ثابت التناسب ($s_p = 0.60 \div 0.65$)
-	m	العدد المطلوب من عمليات إطلاق المحرك ($m = 6 \div 12$)
-	V_{BSI}	الحجوم القياسية لبالونات الهواء المضغوط ($V_{BSI} = 80. 100. 200. 400 \text{ dm}^3$)
kg	G_b	مقدار استهلاك الهواء من أجل الإقلاع
kg.m	L_b	العمل المُستهلك لتحضير الهواء المضغوط في الضاغط
-	η_n	مردود عملية الإقلاع

المراجع:

1. MOECK, E., STRICKERT, H. , BERGMANN, J. *Schiffsmaschinenbetrieb*, 5. Auflage, Verlag Technik Gmbh Berlin, Germany, 1990, 90 - 96 .
2. NEUMEISTER, O., ERBLING, H.G. *Betrieb von Schiffsmotorenanlagen*. Germany, 2. Auflage, Verlag Technik Berlin 1989. 37-39.
3. *Rules for Classification and Construction – Seagoing Ships – Germanischer Lloyd – Machinery Installations – Edition 2000.*
4. MEIER-PETER, H. *Handbuch Schiffsbetriebstechnik*. 1.Auflage, Seehafen Verlag, Germany, 2006, 786-788.
5. http://www.Marinediesels_co_uk.
6. أحمد ، معروف ، نظرية السفينة ، أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية، 2007.
7. EASTOP, T.D. , McCONKEY, A. *Applied Thermodynamics for Engineering Technologists*, 5th edition, Longman Scientific & Technical, England, 1993, 388- 396.