

نمذجة وحساب رفاصات السفن البحرية بمساعدة الحاسوب

الدكتور رامي حوا*

الدكتور ميشيل بريهان**

(تاريخ الإيداع 2 / 3 / 2008. قُبِلَ للنشر في 29/4/2008)

□ الملخص □

يُنْدرج هذا البحث ضمن قائمة الأعمال الهامة التي تهدف إلى إعداد نماذج متطورة لتنفيذ الحسابات الهندسية التصميمية باستخدام الحاسوب . يتناول هذا البحث أحد الموضوعات الهامة في مجال تطوير صناعة السفن، وهو يهدف إلى اختصار الزمن والجهد المبذول عند القيام بعمليات تصميم الرفاصات للسفن البحرية للوصول إلى أفضل توافق بين الرفاص والمحرك في المراحل الأولى لتصميم السفينة. يتضمن هذا البحث شرحاً للطرائق المستخدمة في حساب الرفاصات باستخدام المخططات البيانية المستنتجة من اختبارات النماذج المنهجية الخاصة بالرفاصات.

تمَّ إعداد برنامج حاسوبي بلغة (Visual Basic 6) لتنفيذ الحسابات وفقاً للنموذج الذي تمَّ إعداده. سمح ذلك بدراسة تأثير بعض العوامل التصميمية (عدد شفرات الرفاص وعدد المحاور) (نظام الدفع) على تغير منحنيات بعض البارامترات التصميمية لأداء الرفاص (القطر ، المردود و الاستطاعة الفعلية للمحرك) كتابع لعدد دورات المحرك عند السرعة التصميمية المفروضة للسفينة.

الكلمات المفتاحية: تصميم الرفاص - منحنى استطاعة الجر - مردود الرفاص.

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

Simulating and Calculating Marine Vessel Propellers

Dr. Rami Hawa *

Dr. Michel Barbahan **

(Received 2 / 3 / 2008. Accepted 29 / 4 / 2008)

□ ABSTRACT □

This study includes a list of significant activities aimed at preparing an advanced model for carrying out design engineering calculations, using a computer. This paper deals with a critical topic in the field of developing ship industry. It aims to minimize time scale and effort made when designing ship propellers, geared to obtaining the best harmony between propeller and engine in the preliminary stages of ship design. This paper comprises an explanation of the methods used in calculating propellers, using diagrams extracted from the experiments of the methodological models of propellers. A computer software has been prepared, using (Visual Basic 6) to execute calculations in the light of the prepared model. This allows studying the influence of some design factors on the diagram behaviour of some design parameters for propeller performance, being as a function of engine (R.P.M) for the vessel's virtual design speed.

Keywords: propeller design, propeller efficiency

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

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

مقدمة:

يُعد النقل البحري عموماً من أفضل وأرخص وسائل النقل تكلفه وأقلها تعقيداً ، كما أنه يعد من وسائل النقل الآمنة من حيث السلامة على البضائع المنقولة .

وبما أن السفينة هي العنصر الذي يلعب الدور الأساسي والأقوى في مجمل مراحل عملية النقل البحري فقد احتلت المكانة الأولى في الدراسات المخصصة لزيادة الجدوى الاقتصادية من حيث زيادة قدرتها على نقل البضائع و الركاب، تخفيض استهلاكها للوقود، تحسين تصميم كل من: بدنها، محطة الدفع ووسيلة الدفع ، ونظراً لوجود شركات متخصصة وعريقة بتصميم وبناء المحركات البحرية على اتساع تنوعها من حيث الاستطاعة وسرعة الدوران والمردود واتجاه الدوران فقد أغرق السوق التجاري بأنواع متعددة من المحركات البحرية ذات التصاميم المختلفة والأحجام المختلفة والتي تعود إلى عدد كبير ومختلف من الشركات المصنعة. وبالتالي انصبحت الدراسة باتجاه تصميم الرفاص المناسب للمحرك المناسب للسفينة الهدف بحيث يضمن هذا الرفاص الأداء الأمثل للمحرك المختار للسير بالسرعة القصوى للسفينة والاستفادة القصوى من استطاعة المحرك و الاستهلاك الأدنى للوقود.

لقد حظيت عملية تصميم الرفاصات على مر الزمن بقسم كبير جداً وواسع من الدراسات التي أفضت في النهاية إلى وجود طرق مختلفة للحسابات وأنواع مختلفة من أشكال الرفاصات المستخدمة في السفن. تقوم عادةً الرفاصات بتحويل الطاقة الميكانيكية المقدمة إليها من المحركات إلى قوة دفع تؤمن حركة السفينة.

لتقييم عمل هذه الرفاصات يُستخدم مفهوم المردود (مردود الدفع) الذي يُحدد فعالية وسائل الدفع ومدى توافقها مع البدن ، وهو يُعبر عن الضياعات الحاصلة أثناء عملية تحويل الاستطاعة المقدمة من محطة القدرة إلى قوة دفع في وسائل الدفع . ولزيادة مردود الرفاصات تستخدم أجهزة خاصة أو رفاصات خاصة نذكر منها: فوهة Kort، رفاص Schnittger، الرفاصات القابلة للحركة والرفاصات العكسية [1] .

وبشكل عام فإن الرفاصات تؤدي حركة دورانية ينتج من خلالها قوة تؤدي إلى دفع السفينة للأمام أو للخلف، وتتألف الرفاصات عموماً من عدة أرياش أو شفرات يتراوح عددها من 3 إلى 5 شفرات مثبتة قطرياً على محور دوران الرفاص .

هدف البحث وأهميته:

تتخصر أهداف هذا البحث بما يلي:

1. عرض للطرق المستخدمة في تصميم الرفاصات والمستندة لاختبارات النماذج المنهجية الخاصة بالرفاصات، مع الأخذ بعين الاعتبار معايير التصميم الحديثة.
2. إعداد برنامج حاسوبي لتنفيذ الحسابات وفق النماذج التي تم إعدادها.
3. الاستفادة من البرنامج في دراسة تأثير عدد شفرات الرفاص وعدد المحاور (نظام الدفع) على التغيرات الحاصلة لبعض البارامترات التصميمية لأداء الرفاص (القطر، المردود والاستطاعة الفعلية للمحرك) كتابع لعدد دورات المحرك.

تكمن أهمية البحث في إمكانية الاستفادة من النموذج الرياضي في عمليات التصميم للرفاصات في المراحل الأولى لتصميم السفينة في ترسانات بناء السفن للوصول إلى أفضل توافق بين الرفاص والمحرك وذلك بالاستعانة ببرنامج حاسوبي دقيق وشامل يختصر المراحل ويسهل عملية الحساب.

طريقة البحث ومواده:

أدت الدراسات والأبحاث التي أجريت على الرفاصات إلى الوصول إلى أفضل وأسهل طريقة لتحديد الأبعاد الرئيسية للرفاصات ألا وهي طريقة المخططات البيانية المستنتجة من اختبارات النماذج المنهجية الخاصة بالرفاصات. تجرى هذه الاختبارات لعدة سلاسل من الرفاصات التي تتمتع بخصائص هندسية متماثلة ، مع خطوة متغيرة بصورة متتالية. تختلف هذه السلاسل عن بعضها البعض بـ عدد الشفرات (Z) ، نسبة المساحة القرصية (S₀/S) ، مقطع و عرض الشفرات . يتم عرض نتائج اختبارات كل سلسلة على شكل مخططات بيانية في جمل إحدائية مختلفة ، حيث تُستخدم هذه المخططات في التصميم الأولي للرفاصات [1]،[2]،[3] .

تُوجد عدة طرق لتصميم الرفاصات نذكر منها طريقة **Wageningen** التي يتم وفقها استخدام المخططات البيانية الخاصة بالجمليتين الإحدائيتين (Bu-δ) و (Bp-δ) ، أما الطريقة الثانية فهي طريقة **Pampel** التي تستخدم المخططات البيانية الخاصة بالجمليتين الإحدائيتين (K₂-λ_p) و (K₁-λ_p) . سنستعرض في هذا البحث بالتفصيل النموذج الرياضي لطريقة **Wageningen** نظراً لاستخدامها الواسع في حساب الرفاصات. يُستخدم في هذه الطريقة نوعان من المخططات البيانية التي تتضمن المعاملات التالية: (δ - η_p - H/D - B_p - B_u) . تُحدد هذه المعاملات وفقاً للعلاقات التالية [1]،[2]،[3]،[4]:

$$B_p = \frac{n \cdot DHP^{0.5}}{V_p^{2.5}} \quad (1)$$

$$B_u = \frac{n \cdot THP^{0.5}}{V_p^{2.5}} = 0.05541 \frac{n \cdot T^{0.5}}{V_p^2} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{n \cdot D}{V_p} \quad (3)$$

و يراعى استخدام التحويلات المناسبة عندما يلزم ذلك.

حيث أن:

DHP: الاستطاعة المقدمة للرصاص [HP] ، **THP**: استطاعة الدفع وتُعطى بالعلاقة التالية:

$$THP = \frac{T \cdot V_p}{325.86} \quad [HP] \quad (4)$$

T : قوة الدفع [lb] ، n : عدد الدورات [rpm] ، D : قطر الرصاص [ft] ، δ : مقلوب الخطوة النسبية [-]

B_p : معامل الاستطاعة المقدمة للرصاص [-] ، B_u : معامل استطاعة الدفع [-] ، H : خطوة الرصاص [ft] ، V_p : السرعة الأمامية للرصاص [Knot] .

في كلا نوعي المخططات البيانية تُوضع قيم معامل الخطوة (H/D) على محور العينات العمودي ، أما على محور السينات الأفقي تُوضع قيم المعامل (B_p) بالنسبة لمخططات النوع الأول و قيم المعامل (B_u) بالنسبة لمخططات النوع الثاني. تتضمن هذه المخططات منحنيات المردود (η_p) ومنحنيات المعامل (δ) وأيضاً منحنى (منقطع) يصل بين النقاط الواقعة على منحنيات المعامل (δ) و المقابلة للمردود المثالي .

إن المخططات البيانية في الجمليتين (B_u-δ) و (B_p-δ) و التي تُستخدم في هذه الطريقة تخص عدة سلاسل من رفاصات ثلاثية و رباعية الشفرات عند عدة قيم لنسبة المساحة (S₀/S) وهي تنتمي لمجموعة **B- Wageningen**، المُستنتجة في معهد اختبارات النماذج في هولندا ، والمُستخدمة بشكل واسع في مجال حساب

وتصميم الرفاصات . إن الرمز (B.3,35) على سبيل المثال الذي يميز أحد أشكال المخططات البيانية يُشير إلى سلسلة رفاصات من المجموعة B ثلاثية الشفرات لها نسبة مساحة قرصية تساوي (0.35) .

حساب الرفاصات:

يتم تصميم رفاص لسفينة ما بحيث يُؤمن السرعة المطلوبة لهذه السفينة في الظروف المناخية الوسطية عند خط الإبحار المفروض و بحيث يكون المردود أكبر ما يمكن و كذلك الاستفادة الكاملة من استطاعة محرك الدفع . عندما تعطى استطاعة و عدد دورات محرك الدفع، فإن الرفاص يُصمم بحيث تكون سرعة السفينة أكبر ما يمكن، أما في حالة القواطر فإنه يتم تصميم الرفاص بحيث تكون قوة القطر أو الجر أكبر ما يمكن عند السرعة المحددة [3].

لتصميم الرفاص وفق هذه الطريقة يلزم توفر المعطيات التالية:

1. بارامترات بدن السفينة (الأبعاد الرئيسية ، معاملات الامتلاء ، رسمة الخطوط النظرية).
2. معامل المص (t) ، و معامل أثر المخر (ω) ، و يُحدد كل من المعاملين السابقين بعلاقات تقريبية متعلقة بمعاملات الامتلاء [1]، [3] :

لسفن ذات رفاص واحد:

$$\omega = 0.5 C_b - 0.05 \quad (5)$$

$$t = (1.57 - 2.3 \frac{C_b}{C_w} + 1.5 C_b) \omega \quad (6)$$

لسفن ذات رفاصين:

$$\omega = 0.55 C_b - 0.2 \quad (7)$$

$$t = (1.67 - 2.3 \frac{C_b}{C_w} + 1.5 C_b) \omega \quad (8)$$

حيث أن :

C_w : معامل امتلاء سطح الطفو ، C_b : معامل امتلاء بدن السفينة.

3. منحنى المقاومة $R = f(V)$ أو منحنى استطاعة الجر $EHP = f(V)$ ، الذي يسمح بتحديد العلاقة بين قوة الدفع (T) و السرعة الأمامية للرفاص (V_p) ، حيث يُحسبان وفقاً للعلاقات التالية :

$$T = \frac{R}{1-t} = \frac{325.86 EHP}{V(1-t)} \quad [lb] \quad (9)$$

$$V_p = V(1-\omega) \quad (10)$$

حيث أن :

EHP : استطاعة الجر اللازمة لتحريك السفينة [HP] ، V : سرعة السفينة [Knot] ،

R : المقاومة الكلية للسفينة [lb] .

4. بارامترات عمل محرك الدفع (الاستطاعة ، عدد الدورات)

عندما تكون استطاعة محرك الدفع معلومة ، فإنه من الممكن تحديد الاستطاعة المقدمة للرفاص

وفقاً للعلاقة التالية :

$$DHP = SHP \cdot \eta_{shaft} = BHP \cdot \eta_{shaft} \cdot \eta_{Ger} = N_i \cdot \eta_{shaft} \cdot \eta_{Ger} \cdot \eta_m \quad (11)$$

حيث أن :

DHP : الاستطاعة المقدمة للرفاص العامل مع وجود البدن [HP] .

SHP : الاستطاعة المنقولة من محرك الدفع إلى عمود نقل الحركة [HP] .

BHP : الاستطاعة الفعالة عند قارنه المحرك [HP] .

N_i : الاستطاعة الاسمية لمحرك الدفع [HP] .

η_{shaft} : مردود عمود نقل الحركة و هو يمثل معياراً لضياح الطاقة عند المحامل المتوضعة على

امتداد طول هذا العمود و تتراوح قيمة هذا المردود ضمن المجال التالي [0.96 ÷ 0.98]

η_{Ger} : مردود مخفض السرعة و هو يتعلق بنوعية المخفضات المستخدمة و تتراوح قيمة هذا

المردود ضمن المجال :

[0.96 ÷ 0.98] بالنسبة لمخفضات السرعة الميكانيكية بدون قابض .

[0.93 ÷ 0.96] بالنسبة لمخفضات السرعة الميكانيكية مع قابض هيدروليكي أو كهرومغناطيسي .

η_m : المردود الميكانيكي و هو يتعلق ببنية و استطاعة و عدد دورات محرك الدفع و تتراوح

قيمة هذا المردود بين القيمتين : (0.85) للمحركات الصغيرة (0.94) للمحركات

الكبيرة .

5. القطر الأعظمي للرفاص الذي يمكن تركيبه مع الأخذ بعين الاعتبار شكل مؤخرة البدن و يُعطى

$$D_{max} = K * T$$

حيث أن T : هو غاطس السفينة ، K : ثابت تتعلق قيمته بعدد أعمدة الرفاص كالتالي [5] :

لسفن أحادية عمود الرفاص (0.68 ÷ 0.785) $K =$

لسفن ثنائية محاور الدفع (0.62 ÷ 0.7) $K =$

6. غاطس الرفاص الذي يأخذ بعين الاعتبار بعد محور الرفاص عن خط الماء الإنشائي و ارتفاع

موجة المؤخرة .

7. درجة الحرارة الأعظمية لمياه البحر .

يُجرى تصميم الرفاص وفقاً لهذه الطريقة على مرحلتين ، في المرحلة الأولى يُحدد قطر الرفاص الأولي وعدد

دوراته و أيضاً مقدار الاستطاعة اللازمة لتأمين السرعة المطلوبة مما يسمح باختيار محرك الدفع ، أما في المرحلة

الثانية فإنه يتم تحديد أبعاد و عناصر الرفاص بدقة مع الأخذ بعين الاعتبار شروط التكيف ، في هذه المرحلة يكون

معلوماً لدينا على الأغلب استطاعة ، عدد دورات محرك الدفع و القطر المثالي للرفاص .

في المرحلة الأولى تُحدد السرعة الأمامية للرفاص V_p [Knot] وفقاً للعلاقة رقم (10) و ذلك من أجل قيمة معطاة

لسرعة السفينة V [Knot] ، وبعد ذلك تُحدد قيمة المقاومة الكلية أو استطاعة الجر من منحنى المقاومة أو منحنى

استطاعة الجر الخاص بالسفينة . في هذه الحالة ينبغي زيادة قيمة الاستطاعة بمقدار معين (بفعل تدهور الأحوال

الجوية الأمر الذي يسبب زيادة في المقاومات التي تتعرض لها السفينة) ، مع مراعاة خط الإبحار الذي تبحر عليه

السفينة . يوضح الجدول رقم (1) نسب الزيادة اللازمة للاستطاعة وفق خطوط الإبحار [3] .

الجدول (1) يبين نسب التكبير اللازمة للاستطاعة وفق خطوط الإبحار

الترتيب	خط الإبحار	Δ EHP %
---------	------------	----------------

1	خط المحيط الأطلسي الشمالي (باتجاه الشرق)	15 ÷ 20
2	خط المحيط الأطلسي الشمالي (باتجاه الغرب)	20 ÷ 30
3	خط المحيط الأطلسي الجنوبي	12 ÷ 18
4	الخط الأسترالي	12 ÷ 18
5	خط المحيط الهادئ	15 ÷ 30
6	خط شرق آسيا	15 ÷ 20

ومن ثم تُحدد قوة دفع الرفاص T [lb] وفقاً للعلاقة رقم (9) مما يسمح بتحديد استطاعة الدفع THP' مقدره بـ [HP] وفقاً للعلاقة التالية:

$$THP' = \frac{T \cdot V_p}{325.86} \quad [HP] \quad (12)$$

حيث أن : T [lb] ، V_p [Knot]

تُعدل هذه الاستطاعة بالنسبة للوزن النوعي للمياه العذبة ، وذلك لأن المخططات البيانية المستخدمة في هذه الطريقة مُستنتجة من اختبارات النماذج المنهجية للرفاصات في المياه العذبة:

$$THP = THP' \cdot \frac{1000}{1025} \quad (13)$$

في الحسابات التالية الخاصة بهذه المرحلة سُستخدم مخططات الجملة $(Bu-\delta)$ لأن استطاعة الدفع THP أصبحت معلومة لدينا . تُحدد قيم المعامل (Bu) وفقاً للعلاقة رقم (2) وذلك من أجل عدة قيم معروفة و متتالية لعدد دورات الرفاص (n) يتم اختيار المخطط البياني في الحسابات المتتالية من خلال تحديد عدد شففات الرفاص و أيضاً من خلال التحديد التقريبي لنسبة المساحة القرصية التي لا تُؤثر قيمتها بصورة هامة خلال هذه المرحلة . بعد اختيار المخطط البياني المناسب يتم من خلاله قراءة قيم (δ) عند المنحني المتقطع (منحني المردود المثالي (η_p)) opt بدلالة القيم المتتالية لـ (Bu) ، وبعد ذلك يتم تخفيض قيم δ بمقدار % (5 ÷ 8) في حالة السفن أحادية الرفاص ، وبمقدار % (4) في حالة السفن ثنائية الرفاص وذلك نظراً للتوزيع غير المنتظم لحقل سرعة جريان الماء عبر دائرة الرفاص [4] .

تقرأ بعد ذلك من المخطط البياني قيم $(H/D - \eta_p)$ بدلالة القيم المصغرة لـ (δ) المقابلة لـ (Bu) ، ومن ثم تُحدد قيم القطر (D) وفق العلاقة رقم (3) بدلالة القيم المصغرة لـ (δ) و القيم المتتالية و المفروضة لعدد الدورات (n) ، و أيضاً تُحدد الاستطاعة المنقولة إلى عمود نقل الحركة أو الاستطاعة الفعالة (BHP) باستخدام العلاقات التالية :

$$SHP = \frac{EHP}{\eta \cdot \eta_w} = \frac{EHP}{\eta_K \cdot \xi_r \cdot \eta_p \cdot \eta_{shaft}} \quad (14)$$

$$BHP = \frac{EHP}{\eta \cdot \eta_{shaft} \cdot \eta_{Ger}} = \frac{EHP}{\eta_K \cdot \xi_r \cdot \eta_p \cdot \eta_{shaft} \cdot \eta_{Ger}} \quad (15)$$

حيث أن :

η : مردود الدفع و يمثل نسبة استطاعة الجر (EHP) إلى الاستطاعة المقدمة للرفاص (DHP) و تتراوح قيمة هذا المردود ضمن المجال [0.6 ÷ 0.75] في حالة السفن التجارية ذات أشكال البدن التقليدية، والمجال [0.5 ÷ 0.6] في حالة السفن الساحلية ، ويمثل هذا المردود معيار الاستفادة من الاستطاعة المقدمة للرفاص للتغلب على مقاومات السفينة .

η_K : مردود البدن و يمثل نسبة استطاعة الجر (EHP) إلى استطاعة الدفع (THP) ، يتعلق هذا المردود بقيم المعاملات (t , ω) و بالتالي يتعلق بشكل بدن السفينة و عدد الرفاصات ، ففي حالة السفن أحادية الرفاص يكون مردود البدن عادة أكبر من الواحد لأن ($\omega > t$) ، أما في حالة السفن ثنائية الرفاص فيكون هذا المردود على الأغلب أصغر من الواحد .

η_P : مردود الرفاص و يمثل نسبة استطاعة الدفع (THP) إلى الاستطاعة المقدمة للرفاص الحُر (DHP) ويتعلق هذا المردود بالخصائص الهندسية للرفاص ، شروط عمله و جودة تصنيعه .

ξ_r : المردود الدوراني و يمثل نسبة مردود الرفاص العامل خلف البدن (η_{PS}) إلى مردود الرفاص الحُر (η_P) . يتعلق هذا المردود بتوزيع السرعة ضمن أثر المخر ، و بالتالي يتعلق بشكل الجزء الخلفي من بدن السفينة وتوضع الرفاص ضمن هذا الأثر ، و بالتالي يتعلق بعدد الرفاصات ، وبشكل عام فإن هذا المردود يملك قيمة قريبة من الواحد ، و في حالة السفن أحادية الرفاص فقد تتجاوز قيمته الواحد .

تُمثل نتائج هذه الحسابات بصورة منحنيات بيانية $D = f(n)$ و $SHP = f(n)$ أو $BHP = f(n)$ ، و استناداً لهذه المنحنيات يتم اختيار استطاعة و عدد دورات محرك الدفع .

بعد تمثيل المنحنيات المذكورة ، فإننا نجد أن جميع النقاط الواقعة على المنحني $BHP = f(n)$ و فوقه تقابل أو تناسب استطاعات المحرك التي تؤمن السرعة المعطاة للسفينة .

عندما يكون قطر الرفاص المقابل لعدد مختار من الدورات أكبر من القطر المسموح به ، عندئذ يعتبر القطر المسموح به كقيمة معلومة و يحدد من أجله قيمة (δ) و تقرأ من المخططات البيانية ($Bu-\delta$) مرة أخرى قيمة كل من ($H/D - \eta_P$) ، و أخيراً تحدد قيمة الاستطاعة (SHP) أو (BHP) [4].

في المرحلة الثانية يتم تصميم الرفاص بحيث يتم الحصول على أكبر سرعة ممكنة للسفينة و ذلك من أجل استطاعة معطاة لمحرك الدفع و عدد دورات محدد . تُحل هذه المسألة عادة باستخدام طريقة التقريبات المتتالية، و لإجراء ذلك تفرض قيمة افتراضية لسرعة السفينة [Knot] V و تُحسب من أجلها السرعة الأمامية للرفاص [V_P Knot] من العلاقة رقم (10) و تُحدد أيضاً الاستطاعة المقدمة للرفاص (DHP) من العلاقة رقم (11) بعد تعديلها لتصبح ملائمة لشروط الإبحار في المياه العذبة وفق العلاقة التالية:

$$DHP = SHP \cdot \eta_{shaft} \cdot \frac{1000}{1025} = BHP \cdot \eta_{shaf} \cdot \eta_{Ger} \cdot \frac{1000}{1025} \quad (16)$$

في الحسابات التالية ستُستخدم مخططات الجملة ($B_p-\delta$) ، و تُحدد قيمة المعامل (B_p) وفق العلاقة رقم (1) وذلك من أجل قيمة مفروضة لعدد دورات الرفاص .

تقرأ قيم (δ) عند المنحني المنقطع (منحنى المردود المثالي (η_P)_{opt}) بدلالة قيمة (B_p) من مخططين بيانيين لسلسلتي رفاصات لهما نفس عدد الشفرات و يختلفان بنسبة المساحة ، و يتم اختيار هذه المخططات البيانية بحيث تقع القيمة المتوقعة لنسبة المساحة بين قيم نسب المساحات لهذه المخططات و من ثم تخفض قيم (δ) كما في المرحلة الأولى. ثم تُحدد من المخططين البيانيين المختارين قيم كل من ($H/D - \eta_P$) بدلالة القيمة المصغرة لـ (δ) المقابلة لـ (B_p) ، و تُحدد بعد ذلك أقطار الرفاص وفق العلاقة رقم (3).

يُجرى اختيار القيمة الأصغر المناسبة لمعامل المساحة بحيث يتم تجنب ظاهرة التكهف. من أجل ذلك تستخدم معايير التكهف ، هذه المعايير تم صياغتها استناداً لنتائج اختبارات النماذج المنهجية الخاصة بالرفاصات و التي

أجريت ضمن ما يسمى بالنفق التكهفي وهي تعطى بشكل منحنى بياني كما في الشكل (1) ، الذي يبين تغير النسبة $\frac{T/S_p}{P_0 - P_d}$ كتابع لرقم التكهف (σ_0) الذي يُعطى وفقاً للعلاقة التالية [6] :

$$\sigma_0 = \frac{P_0 - P_d}{0.5 \rho V_p^2} \quad (17)$$

حيث أن :

P_0 : الضغط السكوني عند محور الرفاص و تحدد قيمته وفقاً للعلاقة التالية :

$$p_0 = p_b + \gamma \cdot h \quad [\text{Kgf} / \text{m}^2] \quad (18)$$

p_b : الضغط الجوي النظامي و يساوي : $10333 [\text{Kgf} / \text{m}^2]$

γ : الوزن النوعي للماء البحري و يساوي : $1025 [\text{Kgf} / \text{m}^3]$

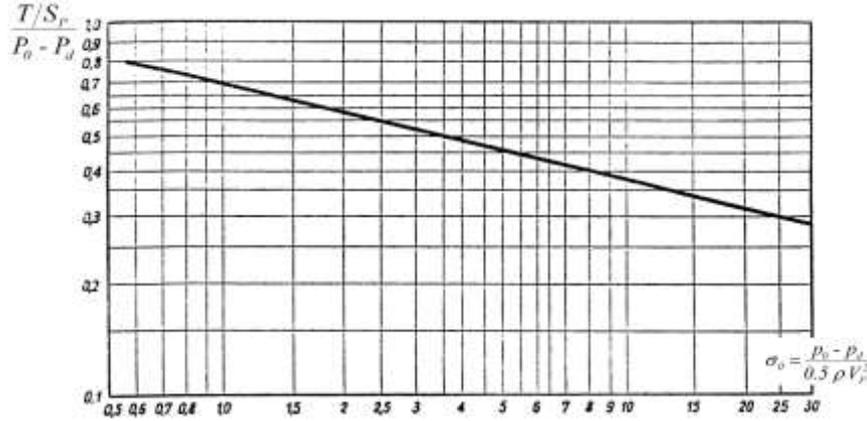
h : غاطس محور الرفاص أسفل سطح الماء مع الأخذ بعين الاعتبار ارتفاع موجة المؤخرة .

p_d : ضغط بخار الماء المشبع وتحدد قيمته كتابع لدرجة حرارة الماء وفق الجدول (2) :

الجدول (2) يبين قيم ضغط بخار الماء المشبع كتابع لدرجة حرارة الماء

t [C°]	0	5	10	15	20	25	30	35
$p_d [\text{Kgf} / \text{m}^2]$	62	89	125	174	283	323	433	575

أما كثافة الماء البحري فتساوي $\rho = 104.5 [\frac{\text{Kgf} \cdot \text{sec}^2}{\text{m}^3}]$ وأخيراً تعطى V_p بوحدة $[\text{m} / \text{s}]$



الشكل (1) يمثل نتائج اختبارات النماذج المنهجية الخاصة بالرفاصات

لتحديد نسبة المساحة القرصية المطلوبة عند الأخذ بعين الاعتبار التكهف، يُحسب رقم التكهف (σ_0)، ومن

الشكل (1) تقرأ القيمة $\frac{T/S_p}{P_0 - P_d}$. ولتحديد القيمة المطلوبة لمساحة السطح المُسقط (S_p) التي تُؤمن عمل الرفاص

بدون تكهف ، تُحدد قوة الدفع على النحو التالي :

$$T = \frac{325.86 DHP \cdot \zeta_r \cdot \eta_p}{V_p} \quad [\text{lb}] \quad (19)$$

و يراعى استخدام التحويلات المناسبة عندما يلزم ذلك .

حيث أن :

DHP : الاستطاعة المقدمة للرفاص في حالة المياه البحرية بوحدة [HP] .

V_p : السرعة الأمامية للرفاص وحدة [Knot] .

تُحدد مساحة السطح المُسقط وفقاً للعلاقة التالية [6] :

$$S_p = \frac{T}{(p_0 - p_d) \cdot \frac{T/S_p}{p_0 - p_d}} [m^2] \quad (20)$$

تُحدد القيمة الحقيقية لمساحة السطح المُسقط ($S_{p\bar{0}}$) للرفاص عند قيم محددة للمعاملات ($H/D - S_0/S$) وفقاً للعلاقة التقريبية التالية [6] :

$$S'_p = \frac{S_0}{S} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot (1.067 - 0.229 \frac{H}{D}) [m^2] \quad (21)$$

تُحدد قيم كل من ($D - H/D - \eta_p - T - S_p - S_{p\bar{0}}$) لكلا المخططين البيانيين ($B_p - \delta$) و تُمثل هذه القيم بيانياً كتابع لنسبة المساحة القرصية و ذلك بعد وصل النقاط المحددة بخطوط مستقيمة .

تُحدد نقطة تقاطع المستقيمتين ($S_p - S_{p\bar{0}}$) قيمة نسبة المساحة القرصية المطلوبة عند الأخذ بعين الاعتبار

التكهن ، وعند هذه القيمة تُقرأ قيم كل من ($D - \eta_p - H/D$) [4].

وأخيراً تُحدد الاستطاعة المطلوبة من الرفاص وفقاً للعلاقة التالية :

$$DHP = \frac{EHP}{\eta} = \frac{EHP}{\eta_K \cdot \eta_p \cdot \zeta_r} \quad (22)$$

علماً أن قيمة (EHP) تُؤخذ من منحنى استطاعة الجر .

إن الاستطاعة المطلوبة من قبل الرفاص ينبغي أن تكون مساوية للاستطاعة المقدمة للرفاص من قبل محرك الدفع ، و في حالة عدم توافق الاستطاعات ينبغي إنقاص أو زيادة السرعة بصورة مناسبة و من ثم إجراء الحسابات مرة ثانية ، عادة يحصل التوافق المقبول في الاستطاعات في التقريب الثاني أو في التقريب الثالث كحد أقصى .

عندما يكون قطر الرفاص المثالي المحدد وفقاً للحسابات أكبر من القطر المسموح به للرفاص (D_{max}) يُعتمد القطر الأعظمي كقيمة مفروضة و تُحدد قيمة (δ) المقابلة لها و التي تعتمد في هذه الحالة بدون تصغير، و تُحدد بعد ذلك من المخططات البيانية قيم ($\eta_p - H/D$) .

بالنسبة لرفاصات القواطر التي تُصمم من أجل قوة قطر أو جر أعظمية، عند سرعة جر معينة (V)، فإن الحسابات تُجرى كما ذكرنا سابقاً و لكن دون تقريبات متتالية ، أي أنه عند نهاية الحسابات تُحدد قوة الدفع وفق العلاقة

$$(19) ، \text{ أما قوة جر القاطر } (L) \text{ فتُحدد وفقاً للعلاقة التالية [3] :} \\ L = T(1-t) - R \quad (23)$$

برنامج الحسابات التصميمية للرفاصات:

في هذا البحث قبل كتابة برنامج حساب وتصميم الرفاصات تم إعداد خوارزمية تُظهر خطوات تنفيذ النموذج الرياضي. يبين الشكل (2) المخطط الانسيابي لخوارزمية بناء برنامج حساب وتصميم رفاصات السفن البحرية، وهي تتضمن وصفاً شاملاً لسير العمليات الحسابية التي تعطي حلاً للمسألة بالطريقة المقترحة.

استناداً للنموذج الرياضي المقترح وللخوارزمية المعدة تم إعداد برنامج بلغة *Visual Basic 6* الإصدار السادس. يتضمن البرنامج نوافذ عديدة تتالى تباعاً. إن جميع العناصر المكونة للنوافذ كافة وخلال طول مرحلة العمل تعمل بشكل متناسق ومتناغم بحيث يتم تفعيل بعضها وإلغاء الآخر بما يتوافق مع متطلبات مراحل التنفيذ. يستطيع هذا البرنامج معالجة الحالات المتعلقة بالمسائل المدروسة كافة، بالإضافة إلى استخدامه للقيام بالأعمال البحثية المتعلقة بدراسة تأثير بعض العوامل التصميمية (عدد شفرات الرصاص وعدد المحاور (نظام الدفع)) على التغيرات الحاصلة لبعض البارامترات التصميمية لأداء الرصاص (القطر ، المردود و الاستطاعة الفعلية للمحرك) كتابع لعدد دورات المحرك كما سنرى لاحقاً. فيما يلي سنستعرض بعض النوافذ الأساسية للبرنامج مع الإشارة إلى الخدمات أو المعلومات التي تقدمها هذه النوافذ:

النافذة الأولى (الشكل (3)) : وهي النافذة الرئيسية في البرنامج و التي تسمح بإدخال بارامترات السفينة المدروسة ومن ثم إظهار المواصفات الأولية للرفاص بعد الضغط على زر حساب ،ثم نمر بعدها على سلسلة من النوافذ المتتالية والتي سوف نستعرضها بالترتيب .

النافذة الثانية (الشكل (4)): وتعرض منحنى استطاعة الجر الذي تم رسمه بالاعتماد على السلسلة 60 الخاصة بالسفن التجارية بغية قراءة قيمة استطاعة الجر الموافقة للسرعة التصميمية المعتبرة [1] [5].

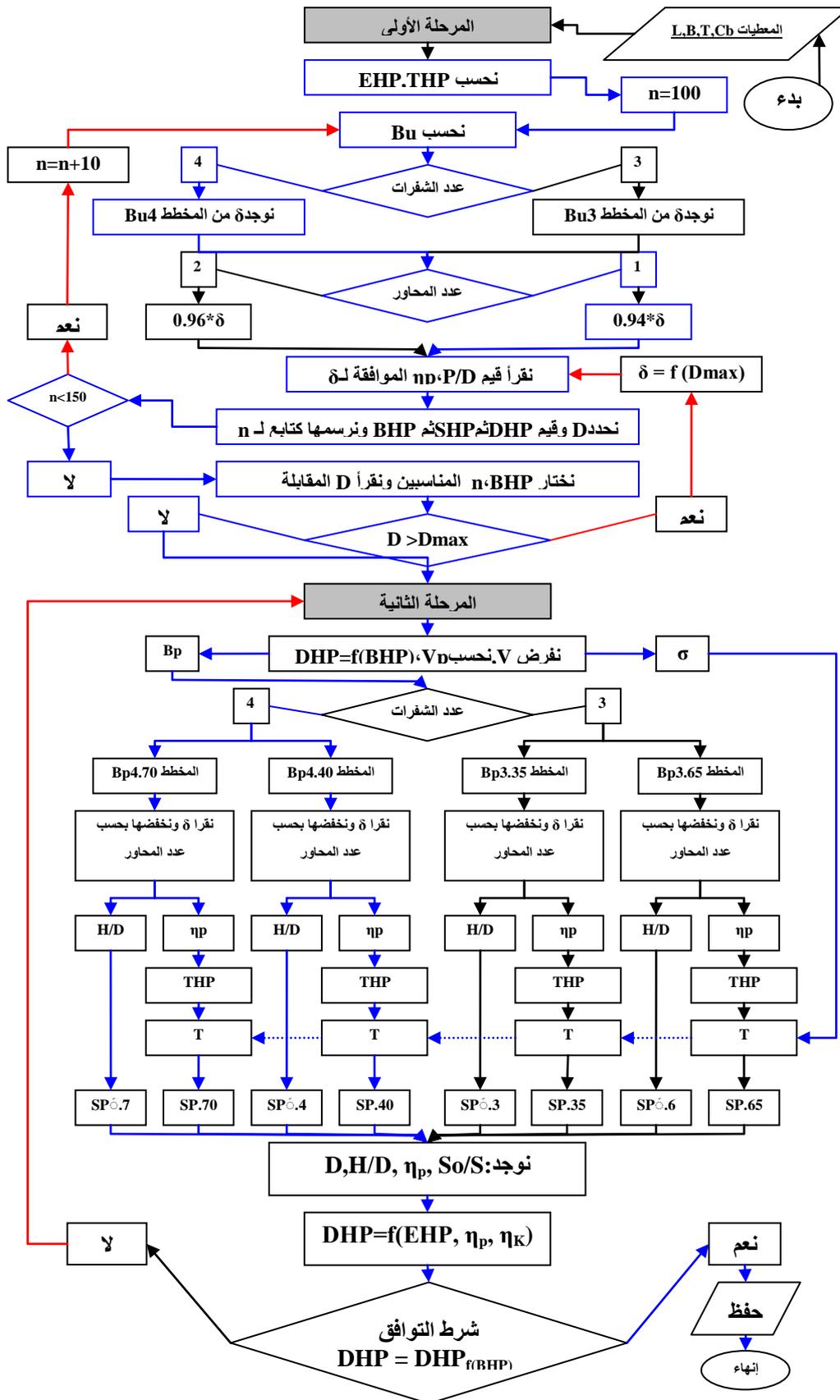
النافذة الثالثة (الشكل (5)): وتُظهر مخطط $Bu - \delta$ عند قيمة محددة لنسبة المساحة القرصية (S_0/S) وعدد الشفرات الذي تم اختياره من النافذة الرئيسية، بهدف تحديد قيم كل من η_p ، H/D ، δ ، وذلك عند عدة قيم لـ Bu بعد تصغير قيمة δ بنسبة معينة .

النافذة الرابعة (الشكل (6)): وتُظهر منحنيات تغير قيمة المردود والقطر واستطاعة المحرك الفعلية كتابع لعدد الدورات في نهاية المرحلة الأولى بهدف اختيار استطاعة المحرك المناسبة لتحقيق السرعة التصميمية .

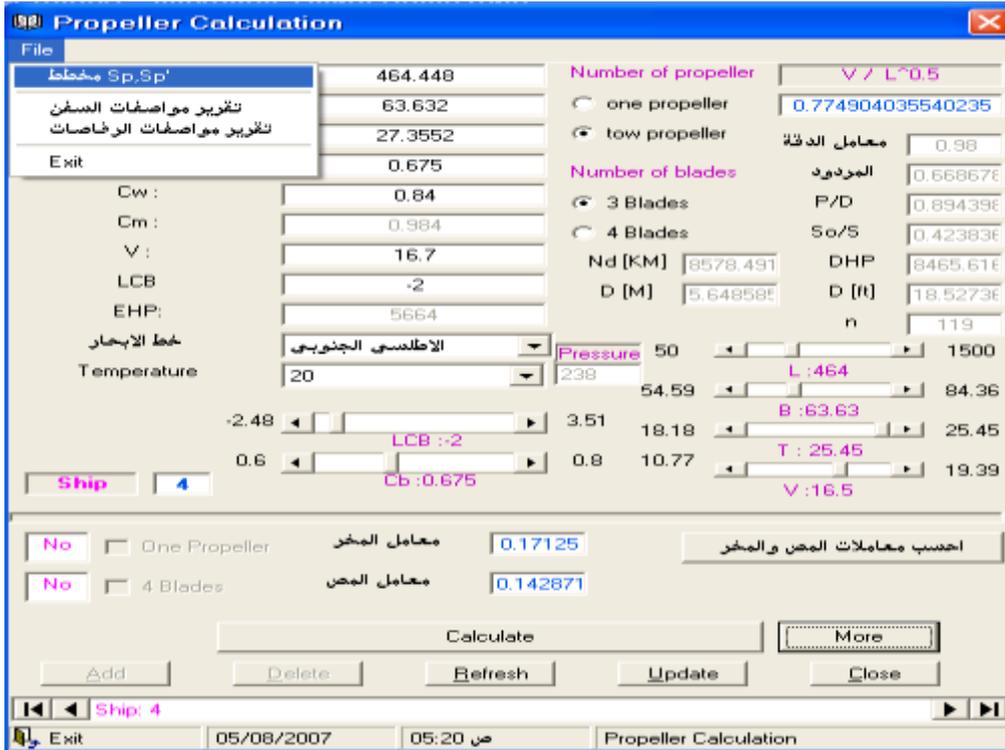
النافذة الخامسة (الشكل (7)): وهي تُمثل بداية المرحلة الثانية من تصميم الرصاص والتي تهدف إلى التحديد الدقيق لكل من نسبة المساحة القرصية والسرعة العظمى للسفينة. تُظهر هذه النافذة منحنى ($Bp-\delta$) عند عدد شفرات محدد وقيمة محددة لنسبة المساحة القرصية (S_0/S) وتسمح بتحديد قيمة η_p ، H/D ، δ مع تكرار هذه العملية من أجل مخطط آخر يتضمن قيمة أخرى للنسبة (S_0/S) .

النافذة السادسة (الشكل (8)): وتُظهر منحنيات (S_p) ، (S_p^-) ، (η_p) ، (D) ، (H/D) ضمن المجال المفروض لنسبة المساحة القرصية (S_0/S) ، تسمح هذه النافذة بقراءة القيمة النهائية لكل من ($\eta_p, H/D, D$) عند القيمة النهائية لـ (S_0/S) الموافقة لنقطة تقاطع مستقيمي (S_p^- ، S_p) .

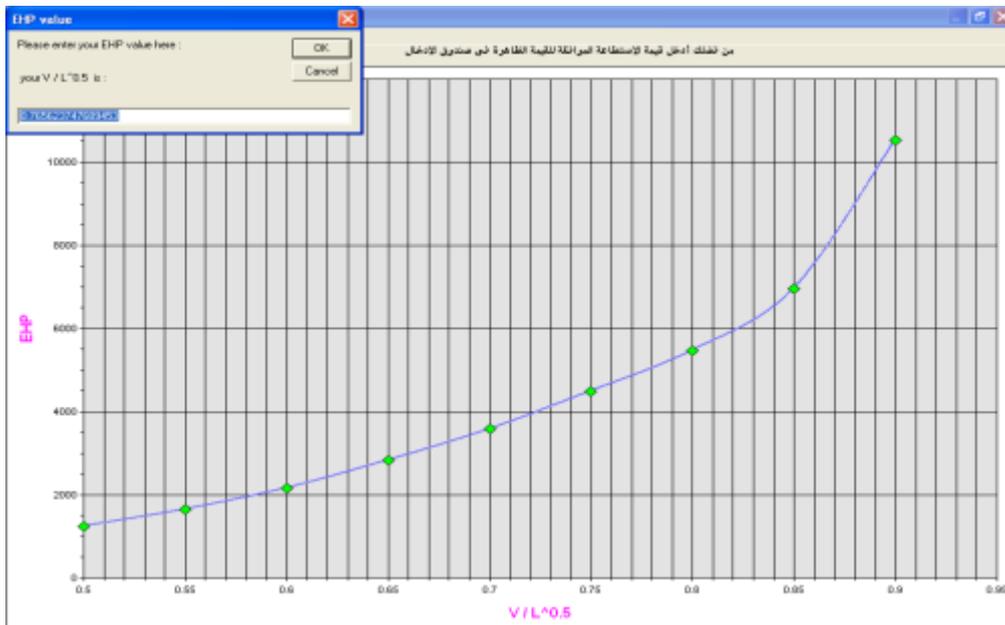
النافذة السابعة (الشكل (9)) : وهي تُمثل نافذة النتائج وهي النافذة التي تعرض النتائج النهائية للرفاص من حيث المواصفات الهندسية والديناميكية وتسمح كذلك بإجراء المقارنات بين الرفاصات المحسوبة سابقاً والمحافظة في قاعدة البيانات .



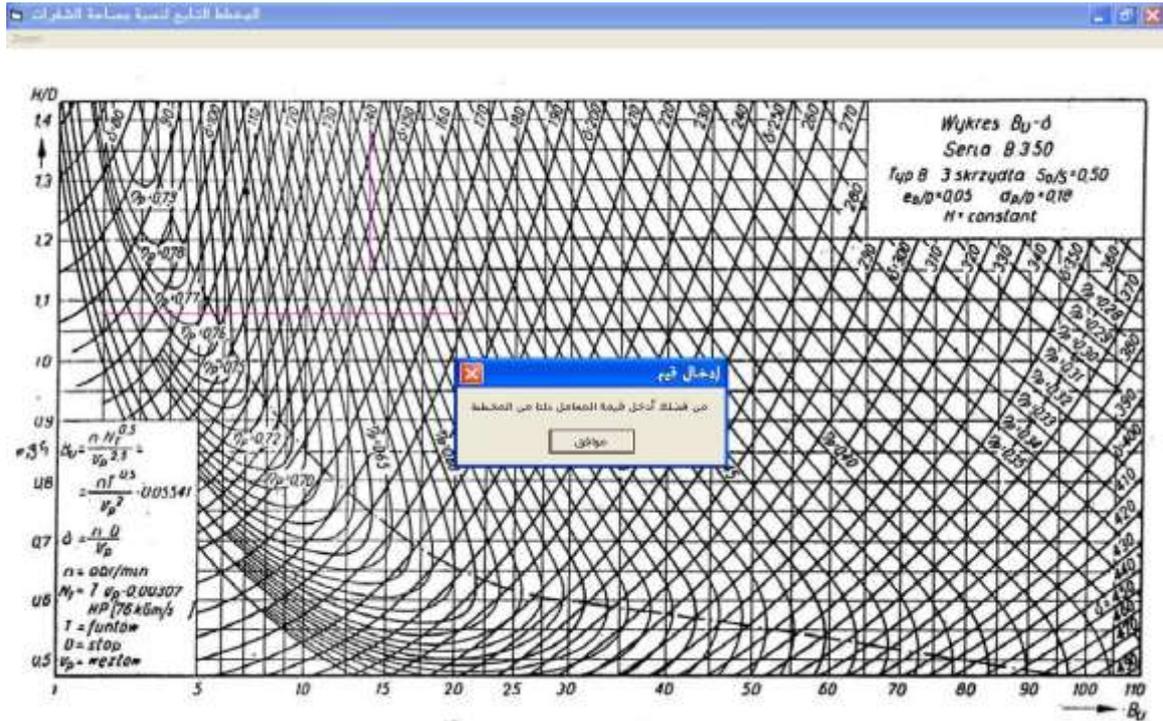
الشكل (2) المخطط الانسيابي (خوارزمية بناء برنامج حساب وتصميم رفاصات السفن البحرية)



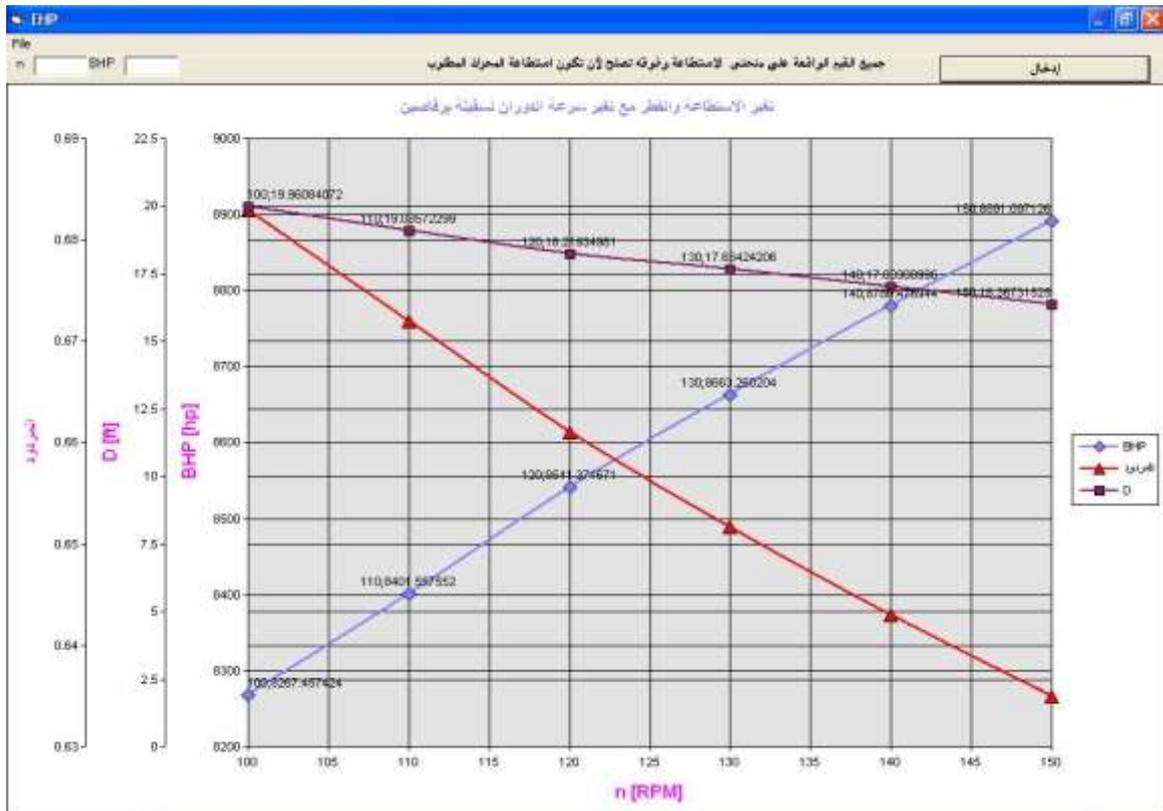
الشكل (3) الخاص بالنافذة الأولى



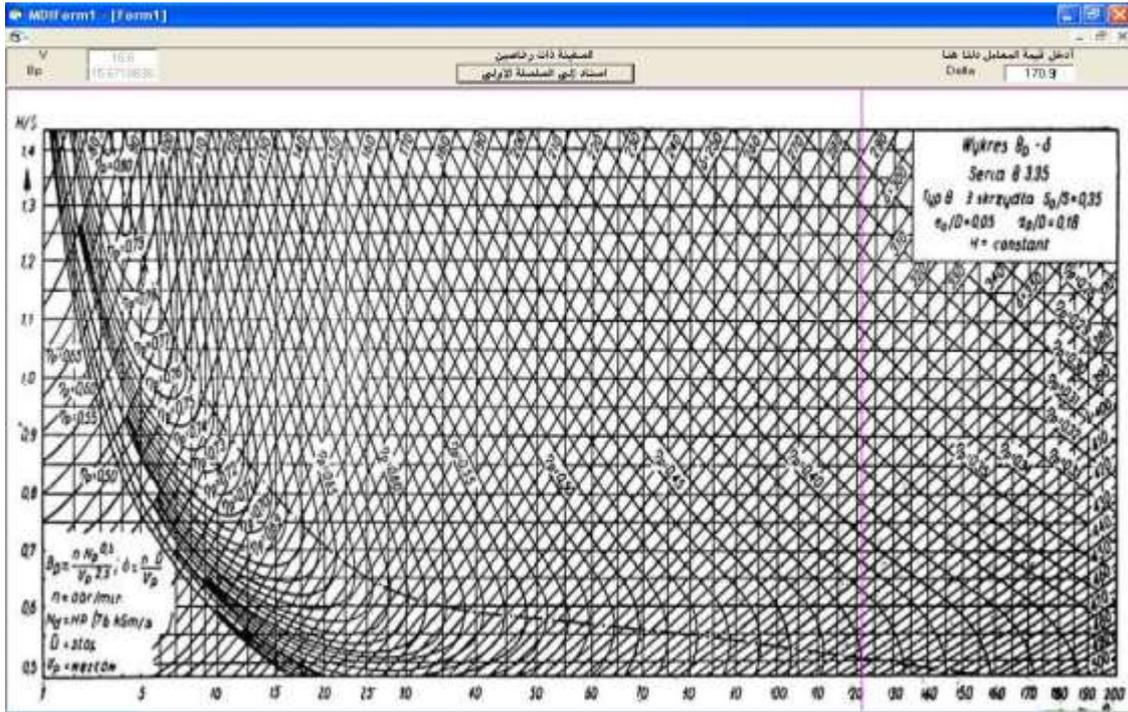
الشكل (4) الخاص بالنافذة الثانية



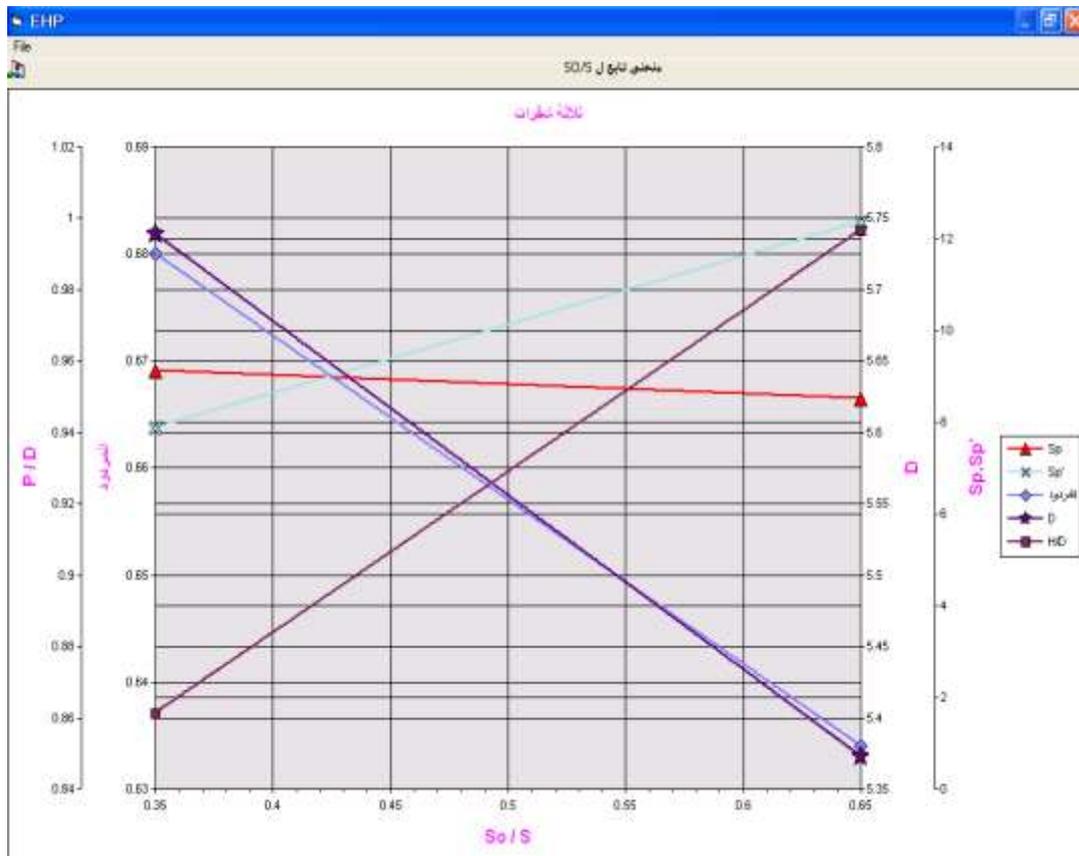
الشكل (5) الخاص بالنافذة الثالثة



الشكل (6) الخاص بالنافذة الرابعة



الشكل (7) الخاص بالنافذة الخامسة



الشكل (8) الخاص بالنافذة السادسة



الشكل (9) الخاص بالنافذة السابعة

النتائج والمناقشة:

بناءً على النموذج الرياضي المقترح لتصميم الرفاص وباستخدام البرنامج المصمم لهذه الغاية تم حساب الرفاص واختيار محرك الدفع لسفينة بضائع عامة تتمتع بالموصفات التالية :

$$L = 464.448 \text{ [ft]}, Lwk = 464.448 \text{ [ft]}, B = 63.632 \text{ [ft]}, T = 27.3552 \text{ [ft]}$$

$$\zeta_r = 1.025, \quad \eta_{shaft} = 0.97, \quad C_b = 0.675, \quad C_w = 0.84, \quad C_m = 0.97$$

$$(\eta_{Ger} = 1) \text{ لأن الدفع مباشر.}$$

$$\text{حمولة هذه السفينة [Kg] } 10500 * 10^3 \text{ وإزاحتها [Kg] } 15950 * 10^3,$$

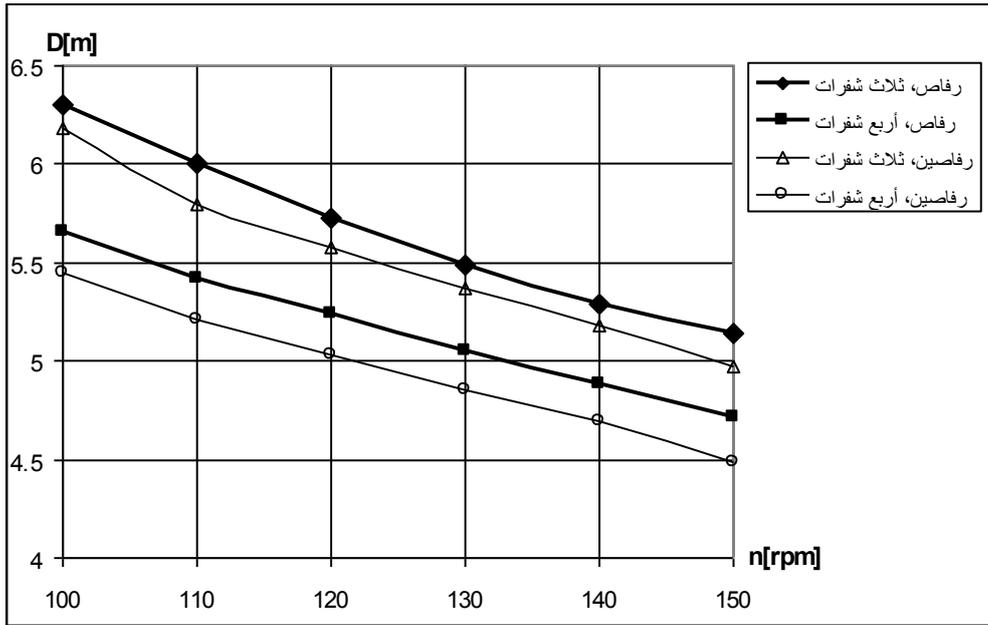
بحيث يؤمن سرعة وسطية مقدارها 16.5 عقدة على خط إبحار أمريكا الجنوبية مع العلم أن :

درجة الحرارة الأعظمية لمياه البحر $t = 20 \text{ [C}^0\text{]}$ ، $D_{max} = 5.8 \text{ [m]} = 19.024 \text{ [ft]}$ ، و يبعد محور

رفاص السفينة عن خط الماء الإنشائي بمقدار 4.9 [m] .

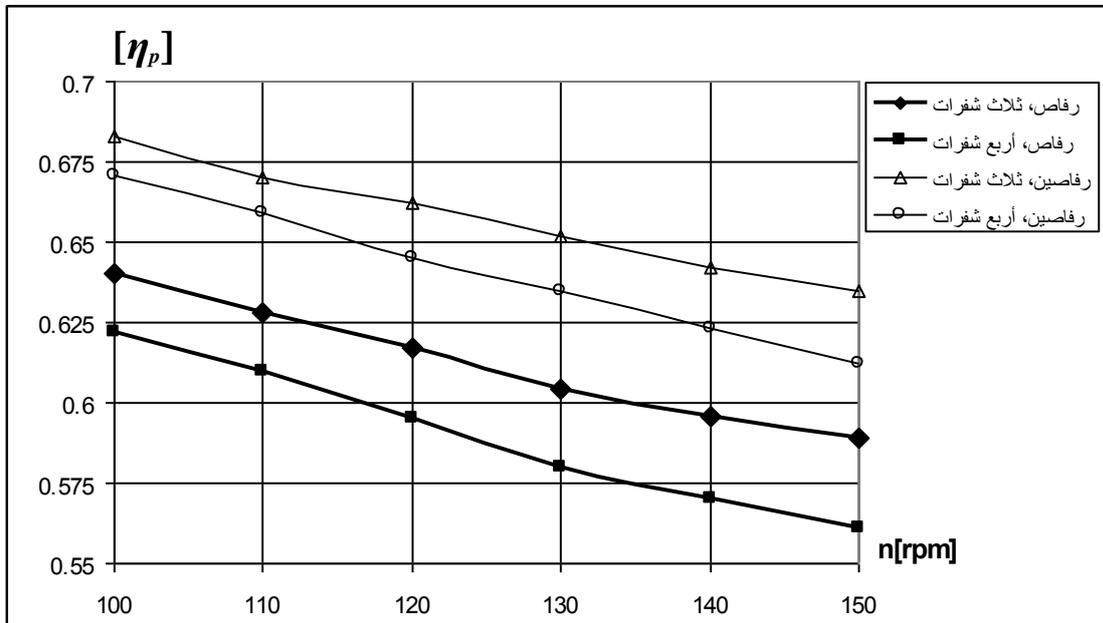
تم استخدام البرنامج لحالات مختلفة من عدد الشفرات وعدد المحاور عند نفس السرعة التصميمية للسفينة المفروضة، واستناداً لنتائج البرنامج تم دراسة تأثير عدد الشفرات وعدد المحاور على سلوك منحنيات قطر الرفاص، مردود الرفاص والاستطاعة الفعلية للمحرك، كتابع لعدد دورات المحرك .

يبين الشكل (10) منحنيات تغيير قطر الرفاص (D) كتابع لعدد دورات المحرك n عند حالات مختلفة من عدد المحاور وعدد الشفرات، ويُلاحظ من هذا الشكل أنه مع زيادة عدد الدورات يتناقص قطر الرفاص اللازم لتحقيق السرعة التصميمية المعتمدة. كما و يُلاحظ إمكانية تخفيض قطر الرفاص عند عدد معين من الدورات من خلال زيادة عدد المحاور عند عدد الشفرات المختار أو زيادة عدد الشفرات عند عدد المحاور المختارة .



الشكل (10) منحنيات تغير قطر الرفاص كتابع لعدد دورات المحرك عند حالات مختلفة من عدد المحاور وعدد الشفرات

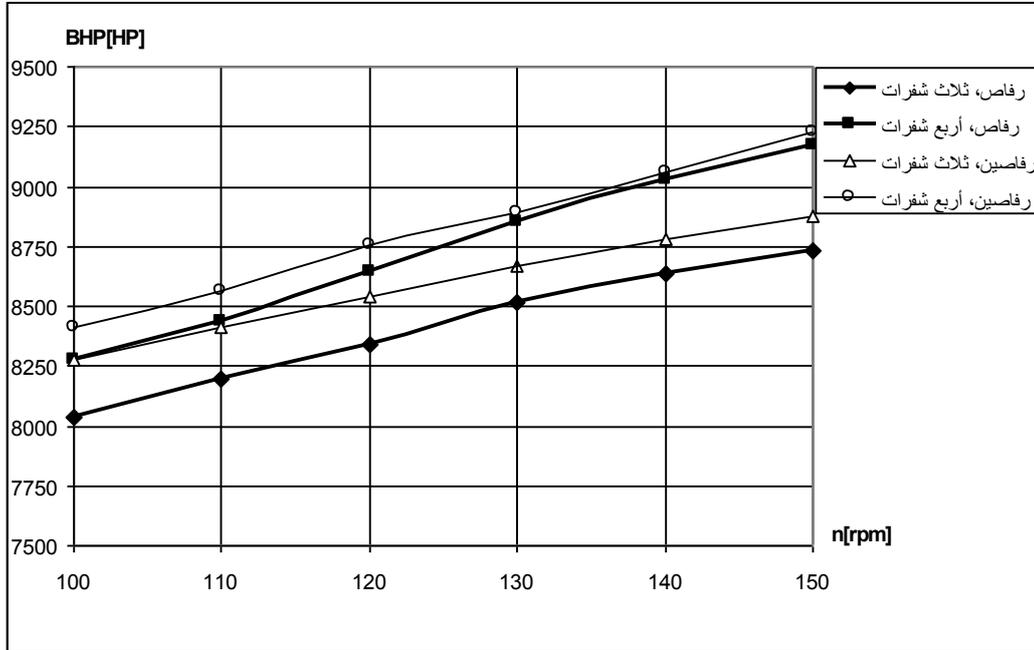
يبين الشكل (11) منحنيات تغير مردود الرفاص (η_p) كتابع لعدد دورات المحرك n عند حالات مختلفة من عدد المحاور وعدد الشفرات، ويُلاحظ من هذا الشكل أنه مع زيادة عدد الدورات يتناقص مردود الرفاص اللازم لتحقيق السرعة التصميمية المعتمدة. كما ويُلاحظ إمكانية استخدام رفاصات ذات مردود أعلى عند عدد معين من الدورات من خلال زيادة عدد المحاور عند عدد الشفرات المختار أو من خلال انقاص عدد الشفرات عند عدد المحاور المختارة.



الشكل (11) منحنيات تغير مردود الرفاص كتابع لعدد دورات المحرك عند حالات مختلفة من عدد المحاور وعدد الشفرات

يبين الشكل (12) منحنيات تغير استطاعة المحرك الفعلية (BHP) المطلوبة للتغلب على استطاعة الجر للسفينة عند السرعة التصميمية المعتمدة، كتابع لعدد الدورات n وذلك عند حالات مختلفة من عدد المحاور وعدد

الشفرات، ويُلاحظ من هذا الشكل أنه مع زيادة عدد الدورات تزداد الاستطاعة المطلوب تقديمها من المحرك (بالمقابل يتناقص قطر الرفاص) بهدف الإبحار عند نفس السرعة التصميمية المعتبرة. كما و يُلاحظ إمكانية تخفيض استطاعة المحرك اللازمة للتغلب على استطاعة الجر عند عدد دورات معين من خلال إنقاص عدد المحاور عند عدد الشفرات المختار أو إنقاص عدد الشفرات عند عدد المحاور المختارة.



الشكل (12) منحنيات تغير استطاعة المحرك الفعلية كتابع لعدد دورات المحرك عند حالات مختلفة من عدد المحاور وعدد الشفرات

وبإلقاء نظرة شاملة على المخططات السابقة يتبين أنه عند المحافظة على عدد الرفاصات (أعمدة الدفع) و زيادة عدد شفرات الرفاص عند السرعة التصميمية المعتبرة وعند عدد دورات معين لعمود الرفاص فإننا نستنتج الآتي :

- تتناقص قيمة قطر الرفاص المستخدم (D).
- تتناقص قيمة مردود الرفاص (η_P) .
- تتزايد قيمة استطاعة المحرك اللازم (BHP).

كما أنه في حالة تثبيت عدد شفرات الرفاص و زيادة عدد الرفاصات ، أي زيادة عدد محاور الدفع عند السرعة التصميمية المعتبرة و عند عدد دورات معين لعمود الرفاص فإننا نستنتج الآتي:

- تتناقص قيمة قطر الرفاص المستخدم (D).
- تتزايد قيمة المردود (η_P).
- تتزايد قيمة استطاعة المحرك اللازم (BHP).

الاستنتاجات والتوصيات:

بناءً على ما تقدم من دراسة تحليلية ومن نمذجة على الحاسوب تم التوصل إلى النتائج والتوصيات الآتية:

1- تسمح منحنيات تغير البارامترات التصميمية المميزة لأداء الرفاص (القطر، المردود والاستطاعة الفعلية للمحرك) كتابع لعدد دورات المحرك بإعطاء فكرة واضحة عن مزايا استخدام أنظمة الدفع المختلفة للسفن التجارية البحرية، مما يسمح باختيار نظام الدفع المناسب في مراحل التصميم الأولية للسفينة، عن طريق المفاضلة بين مزايا أو خصائص هذه الأنظمة وفقاً لمتطلبات التصميم. إن مزايا استخدام هذه الأنظمة هي كالتالي:

- إن استخدام النظام ثنائي الدفع للسفن بأربع شفرات يؤمن إمكانية استخدام رفاصات بأقطار صغيرة مع مردود عالي نسبياً و لكنه يُلزم باستخدام محركات ذات استطاعات عالية.

- إن استخدام النظام ثنائي الدفع بثلاث شفرات يؤمن مردود جيد جداً بالإضافة إلى أنه لا يُلزمنا باستخدام محركات ذات استطاعات عالية و إنما تكفيه استطاعة منخفضة نسبياً لتأمين دفع السفينة ، و لكن هذا النظام يحتاج لزيادة قطر الرفاص .

- إن استخدام النظام ثلاثي الشفرات لعمود دفع واحد يؤمن مردود جيد نسبياً بالإضافة إلى أنه لا يُلزمنا باستخدام محركات ذات استطاعات عالية و إنما تكفيه استطاعة منخفضة نسبياً لتأمين دفع السفينة ، و لكن هذا النظام يحتاج لزيادة كبيرة في قطر الرفاص .

- أما النظام رباعي الشفرات لعمود دفع واحد فهو نظام مناسب نسبياً من حيث استطاعة المحركات اللازمة و قطر الرفاص، إلا أن عيبه الوحيد يكمن في مردوده المنخفض نسبياً ، و لكن في الآونة الأخيرة فقد تم تلافي هذا العيب باستخدام الرفاصات متغيرة الخطوة التي تعمل على تحسين قيمة المردود .

2- عندما يكون نظام الدفع للسفينة محدد بصورة مسبقة لاعتبارات تصميمية متعلقة بأبعاد السفينة، شكل بدنها، تقسيمها الداخلي ووظيفتها الأساسية، فإن هذه الدراسة تسمح باختيار الرفاص المناسب للسفينة المصممة عن طريق تحديد بارامتراته المميزة

3- يُفضل تصميم رفاصات السفن البحرية في مراحل التصميم الأولية وفقاً لسلسلة *B-Wageningen* مع الأخذ بعين الاعتبار متطلبات التصميم الحديثة، على الرغم من أن ذلك يتطلب إجراء عمليات حسابية أكثر تعقيداً وصعوبةً بالمقارنة مع طرق التصميم التقليدية كطريقة *Pampel* ، كون الطريقة المعتمدة في هذا البحث وفقاً للسلسلة المذكورة تعمل على تحديد البارامترات التصميمية المميزة لأداء الرفاص عند السرعة التصميمية المعدلة للسفينة، للوصول إلى أفضل توافق بين عمل الرفاص ومحرك الدفع، عن طريق تأمين المساواة بين الاستطاعة المطلوبة من الرفاص والاستطاعة المقدمة للرفاص من محرك الدفع باستخدام طريقة التقريبات المتتالية عند القيمة المطلوبة (الأصغر) لنسبة المساحة القرصية التي تؤمن عمل الرفاص بدون تكهف.

المراجع:

- 1-STALIŃSKI, J . *Teoria Okrętu* , Wydawnictwo Morski , Gdańsk 1979, 507.
- 2-DUDZIAK, J . *Teoria Okrętu* , Wydawnictwo Morski , Gdańsk 1988, 618.
- 3-KOBYLIŃSKI, L. *Śruby Okrętowe*, Wydawnictwo Komunikacyjne , Warszawa 1965, 390.
- 4-PŁAWŁOWSKI, M . *Badania Modelowe I Projektowanie Śrub*, Raport Techniczny Nr 53, Gdańsk 2007.
- 5-BUCZKOWSKI, L . *Metody Obliczeniowe Wstępnego Projektowania Statków*, Wydawnictwo Morski , Gdańsk 1976, 560.
- 6-EDWARD, V . *Principles of Naval Architecture* , United States of America 1988,760.