

دراسة السلوك الديناميكي للسفينة المتأرجحة عرضياً على الأمواج الجيبية المنتظمة

الدكتور ميشيل بريهان*

رامي علي**

(تاريخ الإيداع 21 / 7 / 2014. قُبِلَ للنشر في 20 / 11 / 2014)

□ ملخص □

تعتبر دراسة السلوك الديناميكي للسفينة المتأرجحة عرضياً على الأمواج من المواضيع ذات الأهمية الخاصة، وذلك نظراً لارتباطها الوثيق بأمان السفينة التوازني، وتأثيرها المباشر على كفاءة عمل بعض الأنظمة والعمليات داخل بدن السفينة.

يتضمن هذا البحث شرحاً للنموذج الرياضي المقترح والخاص بدراسة السلوك الديناميكي للسفينة المتأرجحة عرضياً على الأمواج الجيبية المنتظمة بهدف حساب تابع الخاصية السعوية لاستجابة السفينة بفعل الموجة المحرصة على التآرجح العرضي، ومن ثم تحديد تردد الطنين والقيمة العظمى للخاصية السعوية. تم إعداد برنامج حاسوبي بلغة (Visual Studio) لتنفيذ الحسابات وفقاً للنموذج المقترح، مما سمح بدراسة تأثير بعض البارامترات الاستثمارية للسفينة (كسرعة السفينة، وزاوية خط سيرها بالنسبة إلى الاتجاه الرئيسي لانتشار الأمواج) على تردد الطنين والقيمة العظمى للخاصية السعوية، كما سمح أيضاً بدراسة تأثير بعض بارامترات الوسط المحيط (كتردد الموجة الجيبية) على القيمة العظمى للخاصية السعوية. تم التوصل من خلال هذا البحث إلى استخراج علاقات رياضية تسمح بوضع تفسير دقيق وواضح للسلوك الديناميكي للسفينة المتأرجحة عرضياً على الأمواج البحرية.

الكلمات المفتاحية: التآرجح العرضي - منحنى الخاصية السعوية - الأمواج الجيبية المنتظمة

* أستاذ - قسم الهندسة البحرية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
** طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم الهندسة البحرية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

The Study of the Dynamic Behavior of the Rolling Ship on Regular Waves

Dr. Michael Barbahan*
Rami Ali**

(Received 21 / 7 / 2014. Accepted 20 / 11 / 2014)

□ ABSTRACT □

The study of the dynamic behavior of the rolling ship on sea waves is one of most interesting topics, due to its close association with the ship stability and its direct impact on the efficiency of the work of some of the systems and processes inside the hull. This research includes an explanation of the proposed mathematical model to study the dynamic behavior of the rolling ship on regular sinusoidal waves in order to calculate the Transfer Function of ship response continued to the act of wave-induced transverse oscillation and thus determine the frequency of resonance and the maximum value for the Transfer Function. A computer program was prepared to perform calculations according to the proposed model, which allowed studying the effect of some parameters of the investment of the vessel (ship speed, and the angle of its route for the main direction of spread of the waves) at a frequency of resonance and the maximum value for the Transfer Function, and also allowed to study the effect of Some of the parameters of the surrounding medium (wave frequency) to the maximum value for the Transfer Function. Through this research, it had been reached to extract mathematical equation which allows a precise and clear explanation of the dynamic behavior of the ship rolling on waves.

Keywords: Rolling Ship; Transfer Function; Sinusoidal Waves.

* Professor; Department of Maritime Engineering; Faculty of Mechanical & Electrical Engineering; University of Tishreen, Lattakia, Syria.

** Postgraduate Student, Department of Maritime Engineering; Faculty of Mechanical & Electrical Engineering; University of Tishreen, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تؤثر الأمواج في كافة أنواع المنشآت البحرية الطافية منها والمغمورة، المبحرة والمستقرة، بأحمال ديناميكية تتغير في الشدة والاتجاه، مع الزمن وفي المكان. مما يجعل الفهم الدقيق لفيزيائية الأمواج وطبيعتها وآلية تشكلها وطرق تأثيرها على المنشآت البحرية أمراً في غاية الأهمية من شأنه تطوير الصناعة البحرية من جهة، والحفاظ على سلامة السفن المبحرة وأمنها، من جهة أخرى [1].

تستجيب السفينة لفعال الأمواج، بانزياحات زاوية وخطية عن وضع توازنها الأولي، تعرف هذه الحركات بالحركات التآرجحية أو التذبذبية للسفينة. تتمتع السفينة كنظام ديناميكي بست درجات حرية، إذ تمتلك إمكانية القيام بست حركات تآرجحية، ثلاث منها دورانية حول المحاور الإحداثية المرتبطة مع بدن السفينة والمارة من مركز ثقلها $GXYZ$ ، وثلاث حركات خطية وفق المحاور المفروضة [2,3,4]. في الواقع تكون كل حركة من هذه الحركات متزامنة مع باقي الحركات الأخرى، ومن ثم تكون حركة السفينة هي محصلة لجملة هذه الحركات.

عموماً تعتبر التآرجحات العرضية الشديدة من الظواهر السلبية المرافقة لحياة السفينة الاستثمارية، وسبباً مباشراً لانقلاب العديد من السفن البحرية، وهذا ما دفع الهيئات والمنظمات البحرية إلى البحث عن حلول تصميمية (خزانات تخميد الدرفة، قرائن الموازنة الجانبية) للتخفيف من شدة التآرجحات العرضية وأخرى استثمارية (تغيير سرعة السفينة وزاوية خط سيرها بالنسبة إلى الأمواج) قادرة على تجنب السفينة خطر الانقلاب عند تعرضها المفاجئ للطين. يركز هذا البحث على الحلول المتعلقة بالجانب الاستثماري حيث يناقش الحلول المتبعة من حيث جدواها وأهمية تطبيقها عند مختلف حالات الإبحار المعتبرة.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذا البحث في معالجته لإحدى القضايا الهامة الخاصة بمراكز الأبحاث وترسانات بناء السفن حول العالم والمتعلقة بإعداد نماذج رياضية متطورة لدراسة السلوك الديناميكي للسفينة المتأرجحة عرضياً على الأمواج الجيبية المنتظمة عند مختلف زوايا خط السير بهدف تحديد الترددات الطنينية للموجة ومن ثم الابتعاد بالسفينة عن حالة التآرجحات العرضية الشديدة من خلال الاختيار المناسب والمتزامن لسرعة السفينة وزاوية خط سيرها بالنسبة إلى الاتجاه الرئيسي لانتشار الأمواج وذلك بالاعتماد على علاقات رياضية جديدة مستخرجة ضمن الموديل الرياضي المقترح بالإضافة للبرنامج الحاسوبي المعد خصيصاً لهذا الغرض.

تتحصر أهداف البحث في ما يأتي:

1- إعداد نموذج رياضي خاص بدراسة السلوك الديناميكي للسفينة المبحرة على الأمواج الجيبية المنتظمة يسمح بدراسة:

- تأثير كل من البارامترات الاستثمارية للسفينة (سرعة السفينة v_s ، زاوية خط سير السفينة بالنسبة للاتجاه الرئيسي لانتشار الأمواج γ)، وحالة البحر (تردد الموجة ω) على السلوك الديناميكي للسفينة ممثلاً بمنحني الخاصية السعوية لاستجابة السفينة المبحرة على الأمواج الجيبية المنتظمة Y_φ ("Response Amplitude Operator" RAO).

- مناطق الطنين وكيفية الابتعاد بالسفينة عن حالة التآرجحات العرضية الشديدة.

2- تنفيذ الحسابات وفق النموذج الرياضي المقترح، بالاعتماد على برنامج حاسوبي معد خصيصاً لهذا الغرض.

3- تحليل وصياغة النتائج ومخرجات البرنامج الحاسوبي، من أجل الوصول إلى استنتاجات متعلقة بالسلوك الديناميكي للسفينة المتأرجحة عرضياً والمرتبطة بالأمان التوازني للسفينة عند مختلف الحالات المدروسة، مع وضع التوصيات المناسبة.

طرائق البحث ومواده:

تخضع السفينة أثناء إبحارها على الأمواج الجيبية المنتظمة إلى تأثير مجموعة من القوى والعزوم الخارجية التي تدفعها إلى التآرجح عرضياً حول وضع توازنها الأولي بسعات وتسارعات وزاوية تتعلق بسرعة السفينة وزاوية خط سيرها بالنسبة إلى الاتجاه الرئيسي لانتشار الأمواج.

تأخذ المعادلة التفاضلية الخاصة بالحركة التآرجحية العرضية الشكل الآتي [2,3,4]:

$$I_x \varphi'' = \sum M_x \quad (1)$$

حيث إن:

$-I_x$ - عزم عطالة كتلة السفينة بالنسبة إلى المحور Gx .

$-\varphi''$ - التسارع الزاوي حول المحور Gx .

$-\sum M_x$ - مجموع عزوم القوى الخارجية المؤثرة في السفينة حول المحور Gx ، ويساوي:

$$\sum M_x = \underbrace{-D \cdot h_0 \cdot (\varphi - \alpha)}_1 - \underbrace{2N_\varphi (\varphi' - \alpha')}_2 - \underbrace{I_{xx} (\varphi'' - \alpha'')}_3 \quad (2)$$

حيث إن:

D - قوة دافعة أرخميدس.

h_0 - ارتفاع الميتاسنتر العرضي الأولي للسفينة.

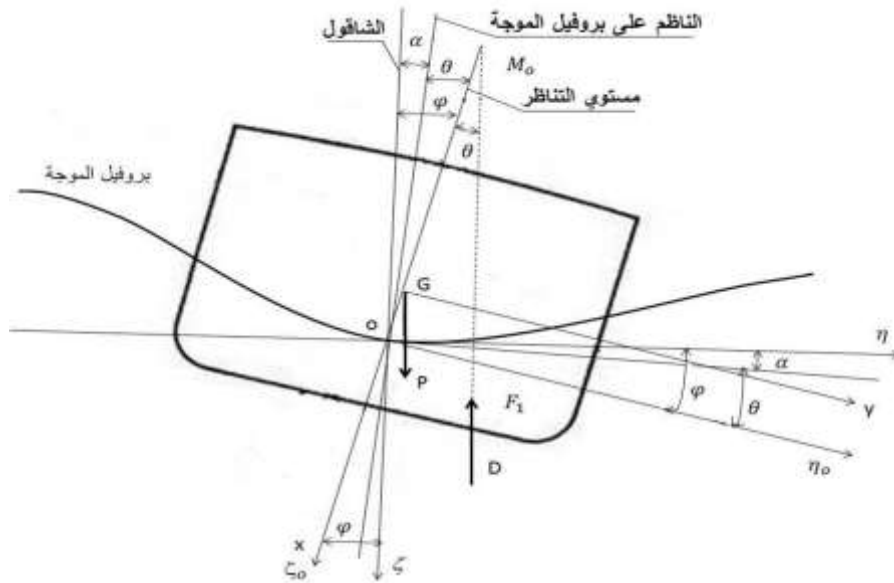
α - زاوية انحدار الموجة وهي الزاوية الحاصلة بين الناظم على سطح الموجة والشاقول والمبينة في

الشكل (1).

φ - زاوية الميلان العرضي للسفينة.

N_φ - معامل تخامد التآرجح العرضي للسفينة.

$-I_{xx}$ - عزم عطالة كتلة المياه المرافقة بالنسبة للمحور Gx .



الشكل (1) زاوية الميلان العرضي للسفينة φ وزاوية انحدار الموجة α عند انحراف السفينة عن وضعية التوازن اللحظي.

يمثل الحد الأول من المعادلة (2) عزم استرجاع يسعى إلى إيصال السفينة إلى حالة التوازن اللحظي على سطح الموجة.

يمثل الحد الثاني من المعادلة (2) عزمًا يتناسب مع السرعة الزاوية النسبية للسفينة ويدعى بعزم التخامد العرضي.

يمثل الحد الثالث من المعادلة (2) عزمًا يتناسب مع التسارع الزاوي النسبي للسفينة ويدعى بعزم قوة عطالة المياه المرافقة أثناء التآرجح العرضي للسفينة.

بتعويض العلاقة (2) في العلاقة (1) نجد:

$$I_x \varphi'' = -D \cdot h_0 \cdot (\varphi - \alpha) - 2N_\varphi (\varphi' - \alpha') - I_{xx} (\varphi'' - \alpha'') \quad (3)$$

$$(I_x + I_{xx}) \varphi'' + 2N_\varphi \varphi' + D \cdot h_0 \cdot \varphi = \underbrace{I_{xx} \alpha'' + 2N_\varphi \alpha' + D \cdot h_0 \cdot \alpha}_{M_x}$$

يمثل الحد الأيمن من المعادلة التفاضلية (3) عزم تأثير الأمواج الجيبية المنتظمة المحرصة للتأرجحات العرضية.

بتقسيم طرفي العلاقة (3) على $(I_x + I_{xx})$ نجد:

$$\varphi'' + 2h_\varphi \varphi' + \omega_{0\varphi}^2 \varphi = q_\varphi \alpha'' + 2h_\varphi \alpha' + \omega_{0\varphi}^2 \alpha \quad (4)$$

حيث إن:

$-h_\varphi$ - معامل تخامد التآرجح العرضي.

$-k_{xx}$ - معامل عزم عطالة كتلة المياه المرافقة بالنسبة إلى المحور Gx .

$-\omega_{0\varphi}$ - التردد الذاتي غير المتخامد للتأرجحات العرضية.

$-q_\varphi$ - معامل لابعدي.

تعطى زاوية انحدار الموجة α وفق العلاقة الآتية [5]:

$$\alpha = \xi_{\varphi} \alpha_o \sin \omega. t = \alpha_m \sin \omega. t \quad (5)$$

حيث إن:

$-\alpha_o$ زاوية الانحدار الأعظمية للموجة وتعطى بالعلاقة الآتية:

$$\alpha_o = \frac{\pi.H_f}{\lambda} \quad (6)$$

$-\xi_{\varphi}$ معامل تخفيض يأخذ بالاعتبار تأثير الأبعاد المحدودة للسفينة، ويعطى بالعلاقة الآتية:

$$\xi_{\varphi} = e^{-0.0212B\omega^2 \sin \gamma} \quad (7)$$

$-\alpha_m$ الزاوية الفعالة لانحدار الموجة.

يؤدي إهمال المركبة الانحرافية (الحد الأول والثاني من عزم تأثير الأمواج الجيبية المنتظمة M_x) إلى توصيف أفضل للحركة التآرجحية العرضية، حيث إن الحركات التآرجحية العرضية تتزامن مع الحركات التآرجحية الدورانية حول المحور الشاقولي Gz والتي تعرف بالزوجان إضافة إلى قيام السفينة بحركة خطية جانبية على امتداد المحور Gy يؤثر الزوجان بصورة غير فعالة في التآرجحات العرضية في حين يكون تأثير التآرجحات الخطية الجانبية أكثر فعالية على التآرجحات العرضية.

يتمتع العزم الناشئ عن التآرجحات الخطية الجانبية بقيمة مطلقة مساوية في القيمة للمركبة الانحرافية للعزم المحرض للتآرجحات العرضية ولكن بإزاحة طورية قدرها 180، لذلك يعتبر إهمال تزامن الحركة العرضية مع الحركات الجانبية إضافة إلى إهمال المركبة الانحرافية أكثر مصداقية من إهمال التزامن الحاصل بين هذه الحركات فقط. تأخذ المعادلة التفاضلية للحركة التآرجحية العرضية عند إهمال المركبة الانحرافية الشكل الآتي [2]:

$$\varphi'' + 2h_{\varphi}\varphi' + \omega_{0\varphi}^2\varphi = \omega_{0\varphi}^2\alpha \quad (8)$$

يسمح حل المعادلة التفاضلية السابقة بتحديد التابع اللحظي φ_t لاستجابة السفينة المبحرة على الأمواج الجيبية المنتظمة بسرعات مختلفة وزوايا خط سير مختلفة:

$$\varphi_t = \varphi_m \cdot \sin(\omega_e t - \varepsilon_{\varphi M})$$

$$\varphi_t = \sin \gamma \frac{\xi_{\varphi} \cdot \alpha_o \cdot \omega_{0\varphi}^2}{\sqrt{(\omega_{0\varphi}^2 - \omega_e^2)^2 + 4 \mu_{\varphi}^2 \omega_{0\varphi}^2 \omega_e^2}} \cdot \sin(\omega_e t - \varepsilon_{\varphi M}) \quad (9)$$

كما يسمح أيضاً بالحصول على تابع الخاصية السعوية للسفن المبحرة على الأمواج الجيبية المنتظمة بسرعات مختلفة وزوايا خط سير مختلفة:

$$Y_{\varphi}(\omega, \gamma, v) = \frac{\varphi_m}{\alpha_o} = \sin \gamma \frac{\xi_{\varphi} \cdot \omega_{0\varphi}^2}{\sqrt{(\omega_{0\varphi}^2 - \omega_e^2)^2 + 4 \mu_{\varphi}^2 \omega_{0\varphi}^2 \omega_e^2}} \quad (10)$$

حيث إن:

$-\varphi_m$ زاوية الميلان العرضي الأعظمية للسفينة المتأرجحة عرضياً على الأمواج الجيبية المنتظمة ذات التردد

ω .

$-\varepsilon_{\varphi M}$ فرق الصفحة بين عزم الموجة المحرصة على التآرجح العرضي واستجابة السفينة.

$-\omega_e$ التردد الفعال (الظاهري) للموجة ويعطى بالعلاقة الآتية [6]:

$$\omega_e = \omega - Kv \cos \gamma \quad (11)$$

حيث إن:

$-\omega$ تردد الموجة الجيبية المنتظمة.

v - سرعة السفينة، [knot].

γ - زاوية خط سير السفينة بالنسبة إلى الاتجاه الرئيسي لانتشار الأمواج، [Degree].

K - الرقم الموجي الذي بدوره يرتبط مع تردد الموجة ω وفق العلاقة $\omega^2 = K \cdot g$ [1].

μ_φ - معامل التخماد اللابعدي ويساوي $\frac{h_\varphi}{\omega_{0\varphi}}$ ، ويحسب تقريبا على النحو الآتي:

• للسفن من دون قرينة جانبية:

$$2\mu_\varphi = 0.05 \div 0.10 \quad (12)$$

• للسفن المجهزة بقرينة جانبية:

$$2\mu_\varphi = 0.11 \div 0.14 \quad (13)$$

• باستخدام علاقة *Nikotajew*:

$$2\mu_\varphi = K \frac{LB^4}{D(B^2+H^2)} \varphi_m \quad (14)$$

حيث إن:

K - معامل قيمته في حالة السفن البحرية $0.055 \div 0.06$.

φ_m - سعة التآرجح العرضي مقاسة بالراديان وتساوي تقريبا $0.5 \div 0.6$.

D, H, B, L - قوة الطفو والأبعاد الرئيسية لبدن السفينة.

• عند الأخذ بالاعتبار سرعة السفينة:

$$\mu_\varphi = \frac{N_{v\varphi}}{\sqrt{(1+K_{XX})I_X D h_0}} \varphi_m \quad (15)$$

حيث إن:

D - قوة الطفو، وتحسب على النحو الآتي $D = \rho \cdot g \cdot V = \rho \cdot g \cdot \delta \cdot L \cdot B \cdot T$

$(1 + K_{XX})I_X$ - عزم العطالة الظاهري، ويحسب باستخدام علاقات تقريبية.

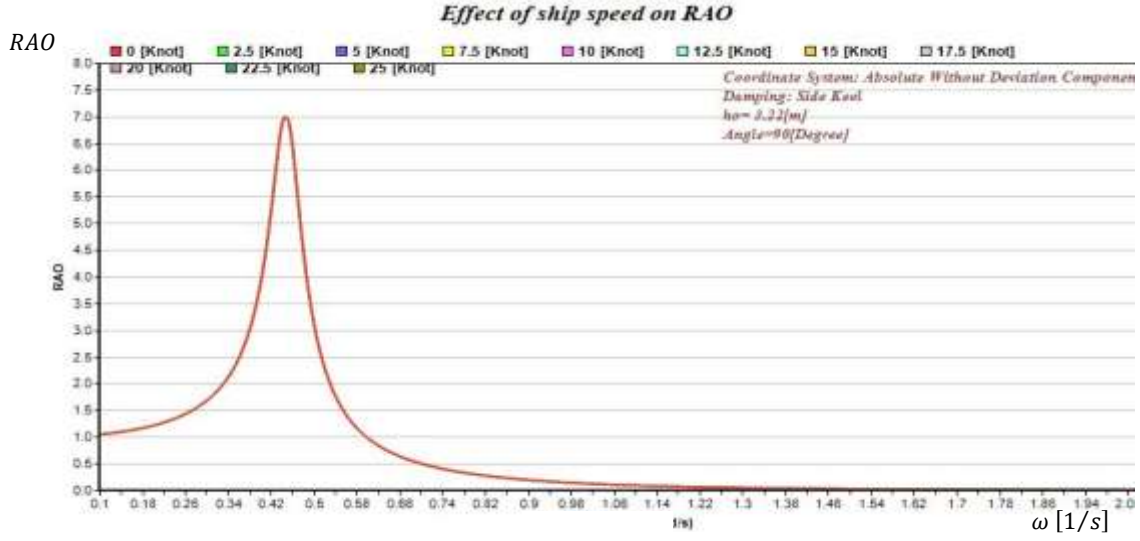
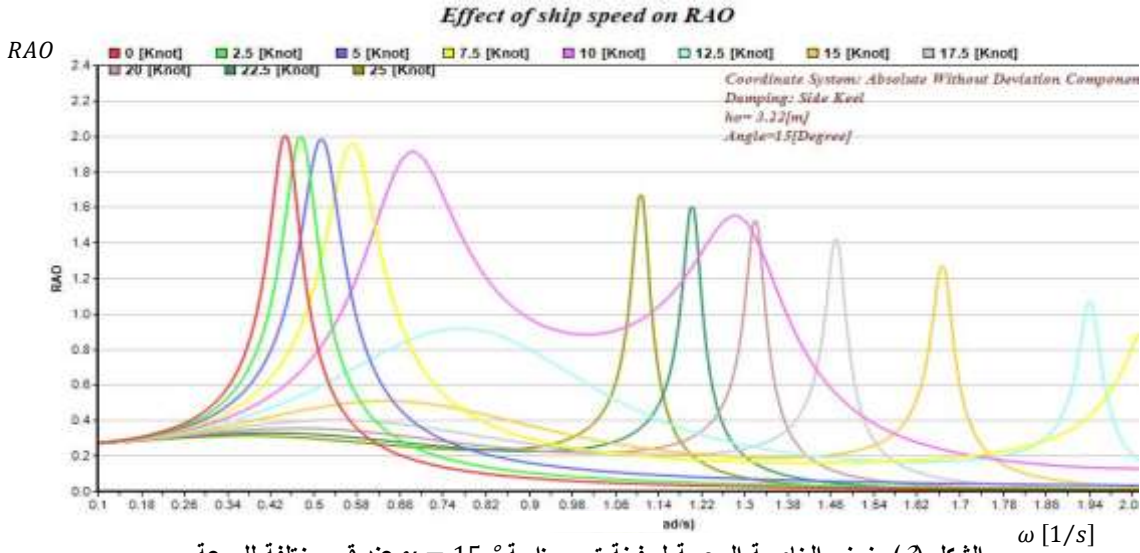
$N_{v\varphi}$ - معامل المقاومة عند السرعة v ، ويحسب بالعلاقة $N_{v\varphi} = N_{0\varphi}(1 + 6Fr)$

Fr - رقم فرويد ويساوي $Fr = \frac{v}{\sqrt{Lg}}$.

$N_{0\varphi}$ - معامل المقاومة عند السرعة $v = 0$ [kt]، ويحسب بالعلاقة:

$$2N_{0\varphi} = 0.85K_\varphi LB^4 \omega_e \varphi_m \quad (16)$$

حيث $K_\varphi = 0.002$ للسفن ذات الأشكال التقليدية مع وجود الأجزاء البارزة.

الشكل (2) منحنى الخاصية السعوية لسفينة تبحر بزاوية $\gamma = 90^\circ$ عند قيم مختلفة للسرعة.الشكل (3) منحنى الخاصية السعوية لسفينة تبحر بزاوية $\gamma = 15^\circ$ عند قيم مختلفة للسرعة.

يبين الشكل (2) شكلاً نموذجياً لمنحنى الخاصية السعوية Y_ϕ لسفينة تبحر عند زاوية خط سير $\gamma = 90^\circ$ على سبيل المثال لا الحصر.

تقابل الذروة في منحنيات الخاصية السعوية حالة التآرجحات العرضية الشديدة للسفينة المبحرة على الأمواج الجيبية المنتظمة عند القيم المعتبرة لسرعة السفينة وزاوية خط سيرها، حيث تعبر قيمة الذروة عن شدة التآرجحات العرضية [4].

يبين الشكل (3) منحنيات الخاصية السعوية Y_ϕ المحددة وفقاً للعلاقة (10) كتابع لتردد الموجة لسفينة تبحر بزاوية خط سير مقدارها $\gamma = 15^\circ$ عند قيم مختلفة لسرعة السفينة. يُلاحظ من مقارنة منحنيات الشكل (3) أن عدد الذرى الطنينية وقيمها الأعظمية ومواقعها الترددية تتغير بشكل عشوائي مع تغير سرعة السفينة عند زاوية خط السير المعتبرة، كما يلاحظ أيضاً أن هذا السلوك للمنحنيات يتكرر عند تمثيل منحنيات الخاصية السعوية عند زوايا خط سير

أخرى، وهذا ما دفع للبحث عن جميع الترددات الطنينية لمنحني الخاصية السعوية، وذلك من خلال تحديد جذور مشتقه، تمهيدا لتحديد مجالاتها ولدراسة تحولاتها كتابع لسرعة السفينة وزاوية خط سيرها بالنسبة إلى الأمواج، وذلك على النحو الآتي:

يُعطى تابع الخاصية السعوية وفقا للعلاقة (10) والعلاقة (7) على النحو الآتي:

$$Y_{\varphi} = \frac{\sin \gamma \omega_{0\varphi}^2}{e^{0.0212B \sin \gamma \omega^2} \sqrt{(\omega_{0\varphi}^2 - \omega_e^2)^2 + 4\mu_{\varphi}^2 \omega_{0\varphi}^2 \omega_e^2}}$$

بفرض أن $b = 0.0212B \sin \gamma$ ، نجد:

$$Y_{\varphi} = \frac{\sin \gamma \omega_{0\varphi}^2}{e^{b\omega^2} \sqrt{(\omega_{0\varphi}^2 - \omega_e^2)^2 + 4\mu_{\varphi}^2 \omega_{0\varphi}^2 \omega_e^2}} \quad (17)$$

وهو تابع كسري نحصل على مشتقه بالنسبة لتردد الموجة ω باتباع الطرق الرياضية التقليدية، كما نحصل على

التردد الموافق لنهاياته المحلية من خلال مساواة مشتقه بالصفر وذلك على النحو الآتي:

$$y'_{\varphi} = \frac{-\sin \gamma \omega_{0\varphi}^2 \left[e^{b\omega^2} \sqrt{(\omega_{0\varphi}^2 - \omega_e^2)^2 + 4\mu_{\varphi}^2 \omega_{0\varphi}^2 \omega_e^2} \right]'}{\left(e^{b\omega^2} \sqrt{(\omega_{0\varphi}^2 - \omega_e^2)^2 + 4\mu_{\varphi}^2 \omega_{0\varphi}^2 \omega_e^2} \right)^2} = 0$$

بمتابعة الحل الرياضي نجد أن:

$$\begin{aligned} Y'_{\varphi} = & 4bH^4\omega^8 - 16bH^6\omega^7 + (24bH^2 + 8H^4)\omega^6 - (28H^3 + 16bH)\omega^5 + (36H^2 + 4b - \\ & 8b\omega_{0\varphi}^2 H^2 + 16b\mu_{\varphi}^2 \omega_{0\varphi}^2 H^2)\omega^4 + (16b\omega_{0\varphi}^2 H - 20H - \\ & 32b\mu_{\varphi}^2 \omega_{0\varphi}^2 H)\omega^3 + (16\mu_{\varphi}^2 \omega_{0\varphi}^2 H^2 + 16b\mu_{\varphi}^2 \omega_{0\varphi}^2 - 8b\omega_{0\varphi}^2 - 8\omega_{0\varphi}^2 H^2 + 4)\omega^2 + \\ & (12\omega_{0\varphi}^2 H - 24\mu_{\varphi}^2 \omega_{0\varphi}^2 H)\omega + (8\mu_{\varphi}^2 \omega_{0\varphi}^2 - 4\omega_{0\varphi}^2 + 4b\omega_{0\varphi}^4) = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$H = \frac{v \cos \gamma}{g} \quad \text{حيث إن:}$$

تمثل العلاقة (18) تابع من الدرجة الثامنة بالنسبة لـ ω لا يمكن حله بالطرق الرياضية التقليدية، وإنما يحل بالطرق التجريبية من خلال تخمين جذور افتراضية للتابع وتعويضها في معادلتها ثم قبول تلك الجذور التي تعدم التابع إلا أن هذه الطريقة تقتضي حل التابع عند قيم معينة ومفروضة لمتحولاته، في حين أن المطلوب هو إيجاد حل التابع بدلالة متحولاته، لذلك سنلجأ إلى مناقشة تحولات تابع الخاصية السعوية Y_{φ} بشكل منطقي ورياضي مبسط إلى أن نصل إلى تحديد تردد الذروة ω_p الخاص بمنحني الخاصية السعوية Y_{φ} ، وذلك على النحو الآتي:

بالعودة إلى العلاقة (17) نجد أن تابع الخاصية السعوية هو تابع كسري بسطه لا يتعلق بتغير تردد الموجة

الجيبية المنتظمة ω المحرصة على التآرجح العرضي، ومن ثم فهو يمتلك قيمة أعظمية عندما يكون المقام أصغرياً.

بمناقشة المقام نجد انه مكون من حدين، الحد الأول هو التابع الأسّي $f_1(\omega)$:

$$f_1(\omega) = e^{b\omega^2} = e^{0.0212B\omega^2 \sin \gamma} \quad (19)$$

وهو تابع أسّي متزايد دائماً ولا يمتلك نقاط انعطاف أو نهايات حدية ضمن مجال تغير تردد الموجة $[0 -$

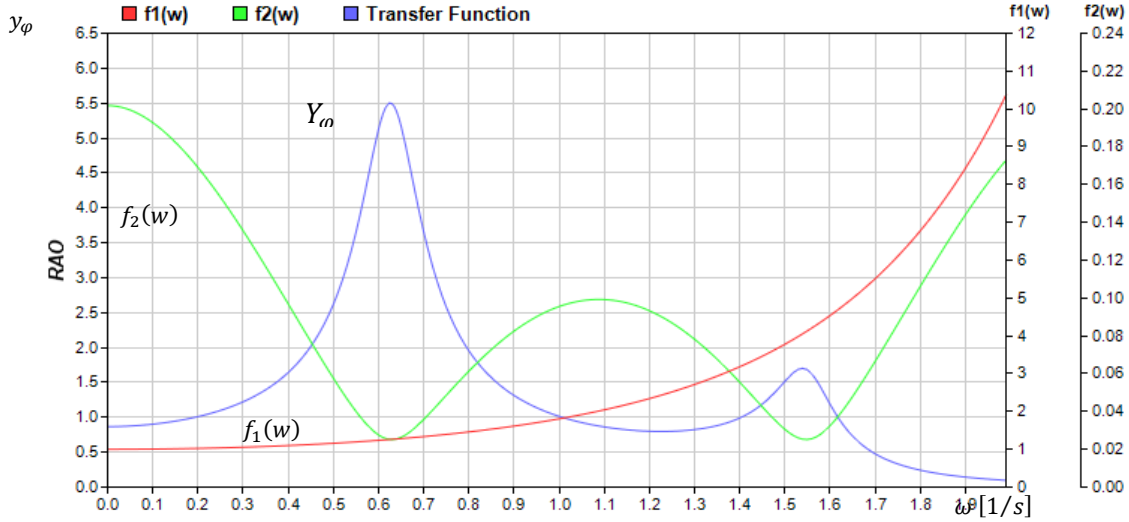
2.5]، لذا يمكن إهماله بهدف تبسيط دراسة تحولات Y_{φ} ، أما الحد الثاني هو التابع الجذري $f_2(\omega)$:

$$f_2(\omega) = \sqrt{(\omega_{0\varphi}^2 - \omega_e^2)^2 + 4\mu_{\varphi}^2 \omega_{0\varphi}^2 \omega_e^2} \quad (20)$$

الذي سنعمل على دراسة تحولاته آخذين بالاعتبار أن تابع الخاصية السعوية الكسري Y_φ يصل إلى قيمة أعظمية عندما يمتلك التابع $f_2(\omega)$ قيمة أصغر، كما هو مبين في الشكل (4).
ولتحديد النهايات المحلية الصغرى للتابع $f_2(\omega)$ ضمن المجال $[0 - 2.5]$ لابد من اشتقاقه بالنسبة إلى ω ومساواة المشتق إلى الصفر، بمتابعة الحل الرياضي نجد أن:

$$-4\omega_e \omega_e' [(\omega_{0\varphi}^2 - \omega_e^2) - 2\mu_\varphi^2 \omega_{0\varphi}^2] = 0 \quad (21)$$

Transfer Function Components



الشكل (4) منحنيات مركبات مقام الخاصية السعوية كتابع لتردد الموجة

عندئذٍ يوجد احتمالان:

• الاحتمال الأول:

الحد الأول $(\omega_{0\varphi}^2 - \omega_e^2) - 2\mu_\varphi^2 \omega_{0\varphi}^2$ يساوي الصفر، من ثم لهذه المعادلة حلان مختلفان:
الحل الأول:

$$\omega_e = +\omega_{0\varphi} \sqrt{1 - 2\mu_\varphi^2} \quad (22)$$

في الحالة العامة عندما $v \neq 0$ و $\gamma \neq 90$ فإن علاقة التردد الفعال ω_e يمكن التعبير عنها بالشكل الآتي:

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2}{g} v \cos \gamma = \omega - H \cdot \omega^2 \quad (23)$$

بتعويض العلاقة (23) في العلاقة (22) وحل المعادلة، نجد أن:

$$\omega_{1,2} = \frac{g \mp \sqrt{g^2 - 4gv \cos \gamma \omega_{0\varphi} \sqrt{1 - 2\mu_\varphi^2}}}{2v \cos \gamma} \quad (24)$$

عندما $v = 0$ أو $\gamma = 90$ فإن التردد الفعال للموجة ω_e يتوافق مع تردد الموجة ذاتها ($\omega_e = \omega$) وفق

العلاقة (11)، أو العلاقة (23). بالتعويض في العلاقة (22)، نجد أن:

$$\omega_8 = +\omega_{0\varphi} \sqrt{1 - 2\mu_\varphi^2} \quad (25)$$

الحل الثاني:

$$\omega_e = -\omega_{0\varphi} \sqrt{1 - 2\mu_\varphi^2} \quad (26)$$

في الحالة العامة ($v \neq 0$ و $\gamma \neq 90$) عند تعويض العلاقة (23) في العلاقة (26) وحل المعادلة، نجد أن:

$$\omega_{3,4} = \frac{g \mp \sqrt{g^2 + 4gv \cos \gamma \omega_{0\phi} \sqrt{1 - 2\mu_\phi^2}}}{2v \cos \gamma} \quad (27)$$

عندما $v = 0$ أو $\gamma = 90$ فإن التردد الفعال للموجة ω_e يتوافق مع تردد الموجة نفسها ω ($\omega_e = \omega$) بالتعويض في العلاقة (26)، نجد أن:

$$\omega_9 = -\omega_{0\phi} \sqrt{1 - 2\mu_\phi^2} \quad (28)$$

• الاحتمال الثاني:

الحد الثاني $-4\omega_e \omega'_e$ يساوي الصفر، ومن ثم:

إما $\omega_e = \omega - H\omega^2 = 0$ عندئذ:

$$\omega_5 = 0 \quad (29)$$

$$\omega_6 = \frac{1}{H} = \frac{g}{v \cos \gamma} \quad (30)$$

أو $\omega_e' = (\omega - H\omega^2)' = 0$ عندئذ:

$$\omega_7 = \frac{1}{2H} = \frac{g}{2v \cos \gamma} \quad (31)$$

تجدر الإشارة هنا إلى أن هذه الحلول تعتبر وتقريب جيد حلوياً مقبولة لمشتق تابع الخاصية السعوية Y_ϕ' ، على الرغم من إهمال التابع الأسّي $f_1(\omega)$ ، إذ إن تعويض أي منها جبرياً أو رقمياً في معادلة مشتق تابع الخاصية السعوية (18)، سيعطي قيمة قريبة جداً من الصفر، ومن ثم يمكن القول إن هذه الحلول تمثل أيضاً ترددات الموجة المقابلة للنهايات المحلية لتابع الخاصية السعوية Y_ϕ ، كما هو مبين في الشكل (4)، ومن ثم يمتلك التابع الرياضي لمنحني الخاصية السعوية بالمجمل عشر نهايات محلية تحسب كل منها بعلاقة رياضية خاصة متضمنة الحل $\omega_{10Re} = \omega_1 + \omega_2 = \omega_7$ ، يظهر منها كحد أقصى ثلاث ذرى طنينية ضمن المجال المقبول لترددات الأمواج البحرية، تبعاً لسرعة السفينة وزاوية خط سيرها بالنسبة إلى الأمواج.

عند إنشاء منحنيات الخاصية السعوية عند قيمة معينة لزاوية خط سير السفينة $\gamma < 90$ من أجل عدة قيم لسرعة السفينة، يلاحظ وجود قيمة معينة للسرعة يحدث عندها تبدل في سلوك الذروة الطنينية الأولى، كما يلاحظ أيضاً تكرار هذه الظاهرة على كامل مجال زوايا خط السير $\gamma < 90$ وغيابها عن المجال $\gamma > 90$.

تم التوصل بالتحليل الرياضي لتابع الخاصية السعوية إلى أن هذه السرعة تُحسب بالعلاقة الآتية:

$$v = v_{c1} = \frac{g}{4\omega_{0\phi} \cos \gamma \sqrt{1 - 2\mu_\phi^2}} \quad (32)$$

تُعرف السرعة المحددة بالعلاقة السابقة بالسرعة الحرجة v_{c1} .

ويُعرف تردد الذروة الطنينية الموافق لإبحار السفينة بهذه السرعة بالتردد الحرج ويُحسب وفق العلاقة الآتية:

$$\omega_c = 2\omega_{0\phi} \sqrt{1 - 2\mu_\phi^2} \quad (33)$$

كما يُلاحظ أيضاً وجود زاوية معينة يحدث عندها تبدل في سلوك الذروة الطنينية الأولى من منحنى الخاصية السعوية عند قيم معينة للسرعة وغياب هذه الظاهرة عند قيم أخرى للسرعة.

كما تم التوصل من خلال التحليل الرياضي لتابع الخاصية السعوية إلى أن هذه الزاوية تُعطى وفق العلاقة الآتية:

$$\gamma = \gamma_c = \cos^{-1} \frac{g}{4\omega_0 \varphi v \sqrt{1-2\mu_\varphi^2}} \quad (34)$$

تُعرف الزاوية المحددة بالعلاقة السابقة بالزاوية الحرجة γ_c ويشترط لوجودها إبحار السفينة بسرعة أكبر من السرعة الحرجة الأصغرية الموافقة لـ $\cos \gamma = 1$ والمحددة وفق العلاقة الآتية:

$$v_{c \text{ mine}} = \frac{g}{4\omega_0 \varphi \sqrt{1-2\mu_\varphi^2}} \quad (35)$$

يبين الجدول (1) عدد الذرى الطنينية والعلاقات التي تحددها تبعاً لسرعة السفينة وزاوية خط سيرها بالنسبة إلى الأمواج .

الجدول (1) المجالات المقبولة لحلول معادلة تابع الخاصية السعوية.

γ	v	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7	ω_8	ω_9	ω_{10Re}	عدد الذرى	
$\gamma < 90$	$v = 0$	x	x	x	x	x	x	x	√	x	x	1	
	$v > 0$	$v < v_{c1}$	√	√	x	√	x	x	x	x	x	x	3
		$v = v_{c1}$	√	√	x	√	x	x	√	x	x	x	2*
		$v > v_{c1}$	x	x	x	√	x	x	√	x	x	√	2**
$\gamma = 90$		x	x	x	x	x	x	√	x	x	1		
$\gamma > 90$	$v = 0$	x	x	x	x	x	x	x	√	x	x	1	
	$v > 0$	$v < v_{c3}$	√	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1
		$v = v_{c3}$	√	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1
		$v > v_{c3}$	√	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1

ملاحظة: تدل الإشارة √ على أن الحل مقبول ضمن المجال المحدد بقيم السرعة والزاوية الموافقة.

*الجنور ω_1 و ω_2 و ω_7 متطابقة، **الجنوران ω_7 و ω_{10Re} متطابقان

تهمل الذرى الذيلية من منحنى الخاصية السعوية نظراً لظهورها عند قيم عالية لترددات الموجة لا تتوافق مع القيم الحقيقية لترددات الأمواج البحرية، وليس لها أية أهمية عند دراسة تأثير الأمواج الحقيقية غير المنتظمة على سلوك السفينة، لذلك سنركز دراستنا على سلوك الذروة الطنينية الأولى من حيث ترددها ومطالها الأعظمي كتابع لسرعة السفينة وزاوية خط سيرها بالنسبة إلى الاتجاه الرئيس لانتشار الأمواج.

استناداً إلى الجدول (1) يمكن استخلاص العلاقات الرياضية المعبرة عن تردد الذروة الطنينية الأولى من منحنى الخاصية السعوية وذلك تبعاً لسرعة السفينة وزاوية خط سيرها بالنسبة إلى الأمواج وذلك على النحو الآتي:

– حالة $\gamma < 90$:

• عندما $v > v_{c1}$ المقابلة للتردد الحرج ω_c ، يُعطى تردد الذروة الأولى بالعلاقة الآتية:

$$\omega = \omega_1 = \frac{g - \sqrt{g^2 - 4g\omega_0\varphi v \cos \gamma} \sqrt{1 - 2\mu_\varphi^2}}{2v \cos \gamma} \quad (36)$$

• عندما $v = v_{c1}$ المقابلة للتردد الحرج ω_c ، يُعطى تردد الذروة الأولى بالعلاقة الآتية:

$$\omega = \omega_{1,2,7} = \frac{g}{2v \cos \gamma} = 2\omega_0\varphi \sqrt{1 - 2\mu_\varphi^2} \quad (37)$$

• عندما $v_{c1} < v$ المقابلة للتردد الحرج ω_c ، يُعطى تردد الذروة الأولى بالعلاقة الآتية:

$$\omega = \omega_{7,10Re} = \frac{g}{2v \cos \gamma} \quad (38)$$

– حالة $\gamma = 90$: يُعطى تردد الذروة الأولى بالعلاقة الآتية (عند أي قيمة لسرعة السفينة $0 < v$):

$$\omega = \omega_8 = +\omega_0\varphi \sqrt{1 - 2\mu_\varphi^2} \quad (39)$$

– حالة $180 > \gamma > 90$: يُعطى تردد الذروة الأولى بالعلاقة الآتية (عند أي قيمة لسرعة السفينة $0 < v$):

$$\omega = \omega_1 = \frac{g - \sqrt{g^2 - 4g\omega_0\varphi v \cos \gamma} \sqrt{1 - 2\mu_\varphi^2}}{2v \cos \gamma}$$

النتائج والمناقشة:

بناءً على النموذج الرياضي المقترح وباستخدام البرنامج الحاسوبي المصمم لهذه الغاية بلغة (Visual Studio) تم حساب منحنى الخاصية السعوية لسفينة حاويات تتمتع بالمواسفات الآتية:

$$L = 268,38 [m], B = 32,16 [m], T = 9,144 [m], H = 15,24 [m]$$

$$C_w = 0,6413, \delta = 0,5072, \rho = 1,025 t/m^3, h_o = 3,216 [m]$$

حيث L, B, T, H الأبعاد الرئيسية للسفينة، h_o ارتفاع الميناسنتر العرضي، ρ كثافة المياه، δ معامل امتلاء البدن، C_w معامل امتلاء خط الماء.

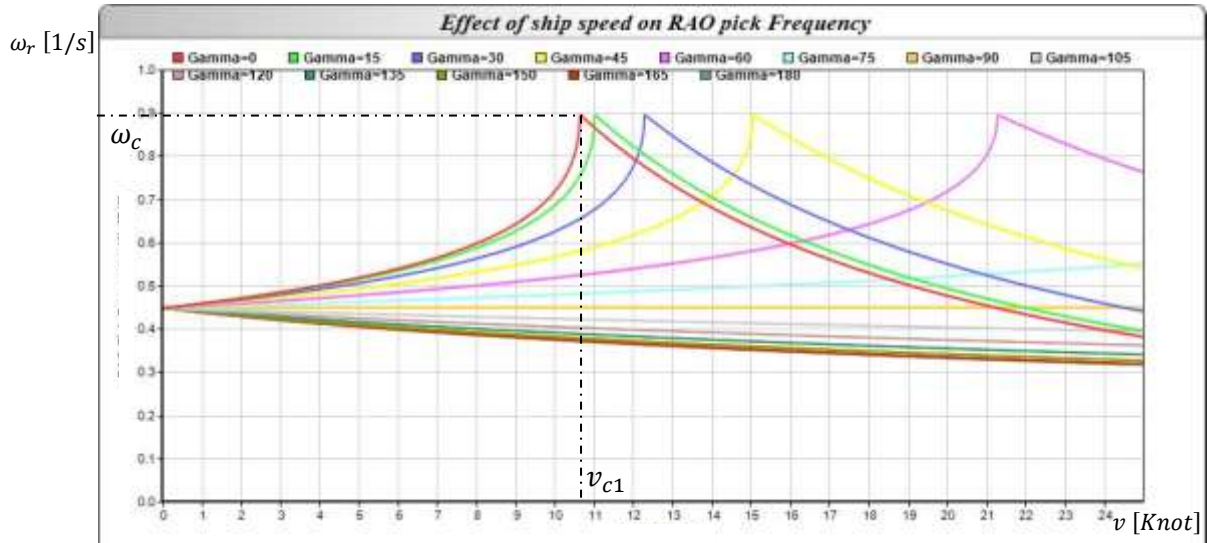
استخدم البرنامج لحالات مختلفة من سرعة السفينة وزاوية خط سيرها بالنسبة إلى الأمواج واستناداً لنتائج البرنامج تم دراسة تأثير سرعة السفينة وزاوية خط سيرها على تردد الذروة الطنينية الأولى من منحنى الخاصية السعوية وعلى قيمتها الأعظمية عند إبحار السفينة على الأمواج الجيبية المنتظمة.

1.1. دراسة التأثير على التردد الطنيني:

تؤكد الحسابات التي أجريت باستخدام العلاقات السابقة (36)، (37)، (38)، (39) أن تردد الذروة الطنينية الأولى من منحنى الخاصية السعوية يتعلق بسرعة السفينة وزاوية خط سيرها، إلا أنه لن يتجاوز قيمة معينة محددة بالعلاقة (33) تعرف بالتردد الحرج ω_c ، وذلك مهما تغيرت سرعة السفينة أو زاوية خط سيرها، كما تسمح هذه العلاقات أيضاً بالوصول إلى استنتاجات مؤكدة تتعلق بتأثير سرعة السفينة وزاوية خط سيرها بالنسبة إلى الأمواج على تردد الطنين المقابل للقيمة العظمى للخاصية السعوية.

1.1.1. تأثير سرعة السفينة:

سمحت الحسابات التي أجريت باستخدام العلاقات السابقة (36)، (37)، (38)، (39) بإنشاء منحنى الترددات الطنينية الأولى من منحنى الخاصية السعوية كتابع لسرعة السفينة عند مختلف زوايا خط السير بتزايد مقداره $\Delta\gamma = 15^\circ$ ، السير كما في الشكل ().



الشكل (5) منحني الترددات الطنينية للذروة الأولى كتابع لسرعة السفينة عند زوايا خط سير مختلفة.

يُظهر الشكل () التأثير الواضح لسرعة السفينة على تردد الذروة الطنينية الأولى عند إبحار السفينة ضمن مجال زوايا خط السير $0 < \gamma < 90$ في حين يكون تأثيرها محدوداً عند إبحارها ضمن مجال زوايا خط السير $90 < \gamma < 180$.

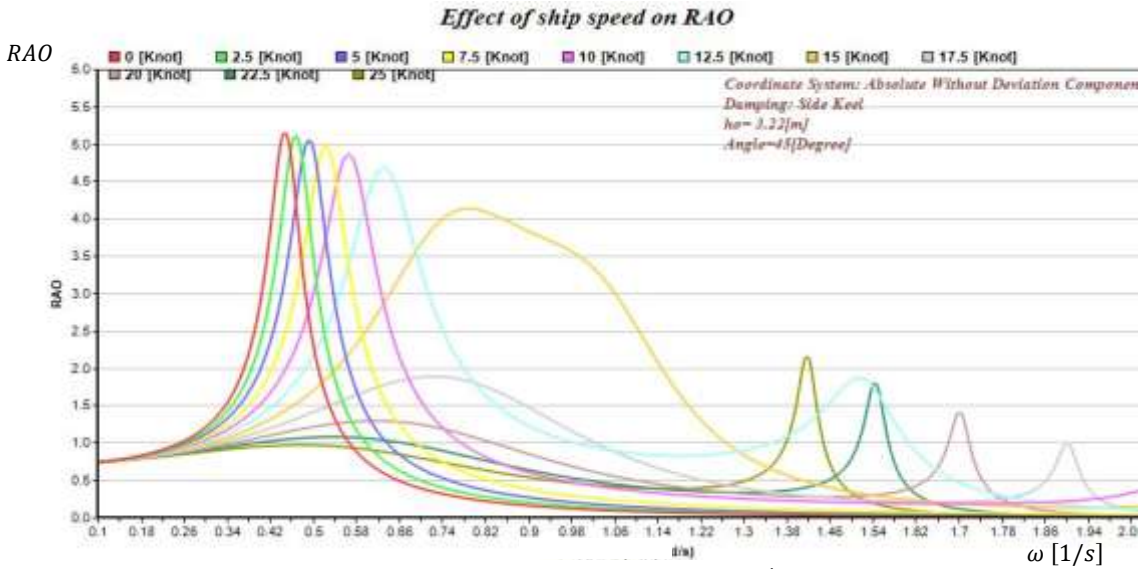
يُلاحظ من الشكل () أن زيادة سرعة السفينة عند إبحارها ضمن مجال زوايا خط السير $0 < \gamma < 90$ تسبب انزياح الذروة الأولى من منحنى الخاصية السعوية باتجاه القيم الأعلى للتردد وصولاً إلى قيمة معينة للتردد تعرف بالتردد الحرج ω_c والموافقة لإبحار السفينة بالسرعة الحرجة v_{c1} ، ثم يبدأ بعدها بالانحدار التدريجي باتجاه القيم الأدنى للتردد.

في حين تسبب زيادة سرعة السفينة عند إبحارها ضمن مجال زوايا خط السير $90 < \gamma < 180$ انزياح تدريجي لتردد الذروة الطنينية الأولى من منحنى الخاصية السعوية باتجاه القيم الأدنى للتردد على كامل مجال سرعات الإبحار المقبولة للسفينة.

كما ويلاحظ أيضاً أنه لا يمكن للسفينة الساكنة $v = 0 [Knot]$ الابتعاد عن حالة الطنين من خلال تغيير زاوية خط سيرها بالنسبة إلى الاتجاه الرئيس لانتشار الأمواج، إذ إنّ جميع منحنيات الترددات الطنينية تتقاطع في نقطة واحدة عندما $v = 0 [Knot]$ ، تمثل هذه النقطة قيمة التردد الطنيني المحسوب بالعلاقة (25).

يبين الشكل (6) مثلاً عن تغير منحنيات الخاصية السعوية عند قيم مختلفة لسرعة السفينة وقيمة معينة لزاوية خط سير السفينة مقدارها $\gamma = 45^\circ$. يُلاحظ من هذا الشكل انزياح الذرى الطنينية الأولى من منحنيات الخاصية السعوية باتجاه القيم الأعلى للتردد مع ازدياد سرعة السفينة، ويتوافق ذلك بانخفاض القيم العظمى للخاصية السعوية. وعند قيمة معينة للسرعة مساوية للسرعة الحرجة v_{c1} تنزاح الذرى الطنينية باتجاه القيم الأدنى للتردد مع حدوث انخفاض شديد في قيمة الخاصية السعوية. يُلاحظ أن هذا التحليل يتوافق تماماً مع تحليل سلوك منحنيات الشكل (). وعليه للحصول على تأرجحات عرضية مخفضة للسفينة المبحرة عبر الأمواج يفضل خفض قيمة السرعة الحرجة للسفينة عن طريق انقاص زاوية خط السير γ .

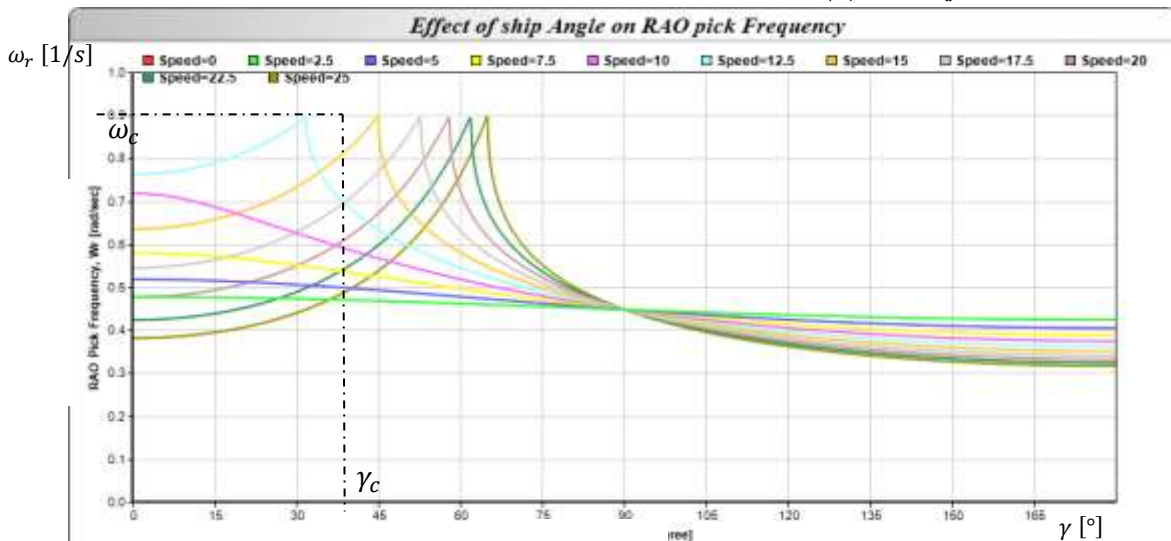
ينبغي الإشارة هنا إلى أن قيمة السرعة الحرجة المحددة رياضياً بالعلاقة (32)، والتي تبدأ بعدها الذرى الطنينية بالانزياح نحو القيم الأدنى للتردد، تختلف عن قيمتها الحقيقية وذلك بسبب الفرضيات التي استخدمت بهدف تبسيط الحل الرياضي أثناء استخراج العلاقة، إلا أن الفروقات بين القيمة الحقيقية للسرعة الحرجة والقيمة المحددة بالعلاقة (32) تعتبر صغيرة ولا تؤثر على سلوك المنحنيات.



الشكل (6) تأثير سرعة السفينة على القيمة العظمى للخاصية السعوية

2. 1. 1 . تأثير زاوية خط السير

سمحت الحسابات التي أجريت باستخدام العلاقات السابقة (36)، (37)، (38)، (39) بإنشاء منحنى الترددات الطنينية الأولى من منحنى الخاصية السعوية كتابع لزاوية خط سير السفينة عند سرعات إبحار مختلفة، بتزايد مقداره $\Delta v = 5 [knot]$ كما في الشكل (7).



الشكل (7) منحنى الترددات الطنينية للذروة الأولى كتابع لزاوية خط سير السفينة عند سرعات إبحار مختلفة.

يُظهر الشكل (7) التأثير الواضح لزواوية خط سير السفينة على تردد الذروة الطنينية الأولى عند إبحار السفينة ضمن مجال زوايا خط السير $0 < \gamma < 90^\circ$ في حين يكون تأثيرها محدوداً عند إبحارها ضمن مجال زوايا خط السير $90^\circ < \gamma < 180^\circ$.

تؤدي زيادة زواوية خط السير ضمن مجال الزوايا $90^\circ < \gamma < 180^\circ$ عند أي سرعة للسفينة إلى انزياح الذرى باتجاه القيم الأدنى للتردد، كما يبين الشكل (7).

تمتلك منحنيات الترددات الطنينية انحداراً تدريجياً على كامل مجال زوايا خط السير $0 < \gamma < 180^\circ$ عند إبحار السفينة السفينة بسرعة $v < 10.64 [Knot]$ والتي تعرف بالسرعة الحرجة الأصغرية v_{cmin} والمحسوبة بالعلاقة (35)، أما عند إبحار السفينة بسرعة أكبر من السرعة الحرجة الأصغرية $v_{cmine} = 10.64 [Knot]$ فيلاحظ وجود زواوية معينة γ يحدث عندها تبدل في سلوك الذروة الطنينية الأولى من منحنى الخاصية السعوية، إذ تتزاح الذرى الطنينية بداية مع زيادة زواوية خط السير باتجاه القيم الأعلى للتردد حتى الوصول إلى التردد الحرج، ومع زيادة زواوية خط السير يحدث انزياح واضح وشديد ومفاجئ لذرى الطنين باتجاه القيم الأدنى للتردد. تعرف هذه الزواوية بالزواوية الحرجة γ_c ، وتحسب بالعلاقة (34).

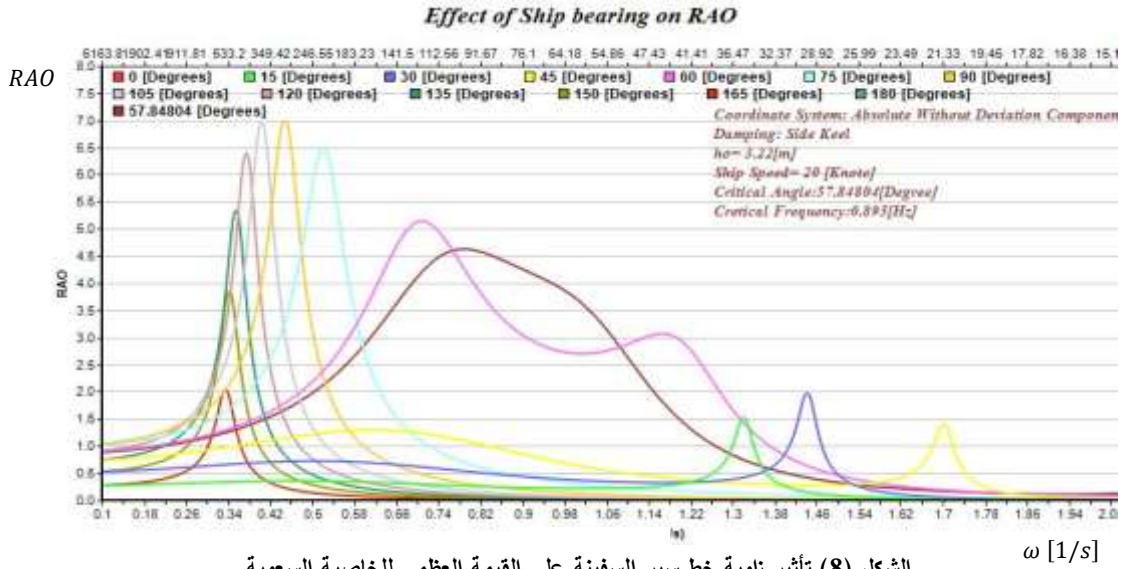
تظهر الزواوية الحرجة γ_c في منحنيات الترددات الطنينية فقط عند إبحار السفينة بسرعات أكبر من السرعة الحرجة الأصغرية v_{cmin} .

كما ويلاحظ أيضاً أن تغيير سرعة السفينة لا يفيد في الابتعاد عن حالة الطنين عند إبحار السفينة بشكل متعامد مع الاتجاه الرئيس لانتشار الأمواج $\gamma = 90^\circ$ ، إذ إنّ جميع منحنيات الترددات الطنينية تتقاطع في نقطة واحدة، تمثل هذه النقطة قيمة التردد الطنيني المحدد بالعلاقة (25).

يبين الشكل (8) مثلاً عن تغير منحنيات الخاصية السعوية عند قيم مختلفة لزواوية خط سير السفينة وقيمة معينة لسرعة السفينة $v = 20 [knot]$ ، وفيه يظهر بوضوح وجود مجال من زوايا خط السير يمتد حتى الزواوية الحرجة $\gamma_c = 57.8^\circ$ تحافظ فيه الذرى الطنينية على قيمة منخفضة للخاصية السعوية.

تتعلق قيمة الزواوية الحرجة γ_c بسرعة السفينة v وتزداد مع ازديادها وذلك وفق العلاقة (34)، وعليه لزيادة عرض مجال زوايا خط السير الذي تحافظ فيه التآرجحات العرضية على قيم منخفضة، يجب زيادة قيمة الزواوية الحرجة γ_c وذلك عن طريق زيادة سرعة السفينة v . أي إنّ إبحار السفينة بسرعات عالية يتيح لها مجال أكبر من زوايا خط السير تكون قادرة على المناورة ضمنه بعيداً عن حالة التآرجحات العرضية الشديدة.

يلاحظ من هذا الشكل انزياح الذرى الطنينية باتجاه القيم الأعلى للتردد مع زيادة زواوية خط سير السفينة، وعند قيمة معينة لزواوية خط السير مساوية للزواوية الحرجة γ_c تتزاح الذرى الطنينية باتجاه القيم الأدنى للتردد، يترافق هذا السلوك مع زيادة في القيمة العظمى للخاصية السعوية عند الاقتراب من زواوية خط السير $\gamma = 90^\circ$.

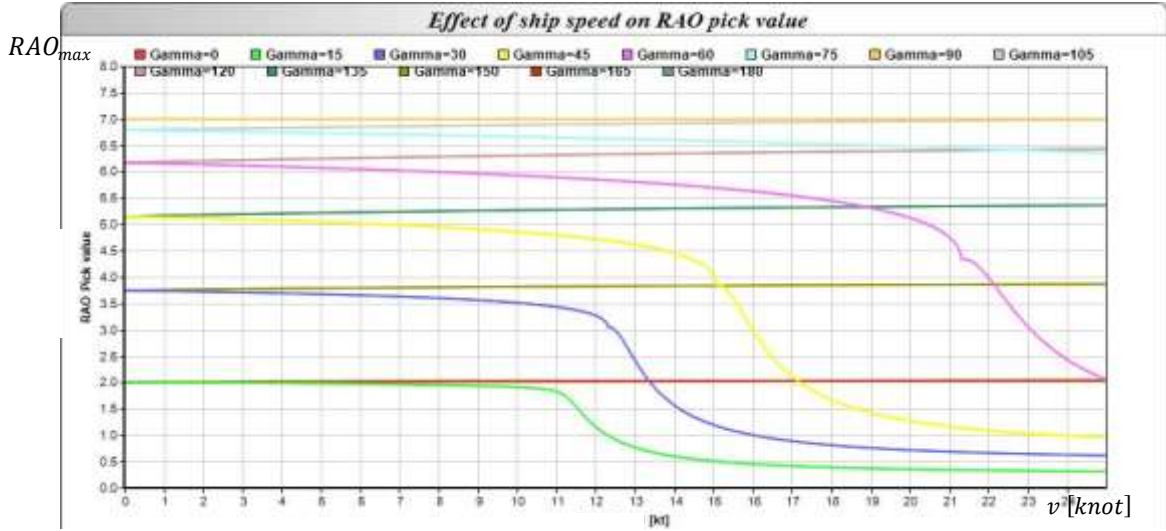


الشكل (8) تأثير زاوية خط سير السفينة على القيمة العظمى للخاصية السعوية

2. 1 . دراسة التأثير على القيمة العظمى للخاصية السعوية:

1. 2. 1 . تأثير سرعة السفينة على القيمة العظمى لمنحني الخاصية السعوية:

لدراسة تأثير سرعة السفينة على القيمة العظمى للخاصية السعوية سيتم إنشاء منحني الذرى الطنينية (القيم العظمى للخاصية السعوية) كتابع لسرعة السفينة v عند زاوية خط سير معينة γ ، وذلك من خلال تحديد الترددات الطنينية كتابع لسرعة السفينة عند هذه الزاوية وذلك بالاعتماد على العلاقات (36)، (37)، (38)، (39)، ثم تعويض قيم الترددات الطنينية الناتجة في العلاقة (10) بهدف تحديد قيم الذرى الطنينية المقابلة لها (القيم العظمى للخاصية السعوية). تكرر هذه العملية عند عدة زوايا خط سير بتزايد مقداره $\Delta\gamma = 15^\circ$ ، كما في الشكل (9). يمكن استنتاج هذه المنحنيات من سلسلة من مجموعات المنحنيات الخاصة بالخاصية السعوية كتابع لتردد الموجة عند قيم مختلفة للسرعة مقابلة لزاوية خط سير معينة خاصة بكل مجموعة من المنحنيات ضمن السلسلة كما في الشكل (6). يظهر الشكل (9) أن سلوك الذروة الطنينية الأولى من منحني الخاصية السعوية عند إبحار السفينة بزوايا خط سير $\gamma < 90^\circ$ يختلف عن سلوكها عند إبحار السفينة بزوايا خط سير $\gamma > 90^\circ$ ، حيث يغلب الطابع الخطي على منحنيات الذرى الطنينية عند إبحار السفينة بزوايا خط سير $\gamma > 90^\circ$ ، كما لا تشاهد أية تحولات تذكر في القيمة العظمى للخاصية السعوية مهما تغيرت سرعة السفينة عند إبحارها ضمن المجال المذكور لزوايا خط السير، في حين يغيب السلوك الخطي عن منحنيات الذرى الطنينية عند إبحار السفينة بزوايا خط سير $\gamma < 90^\circ$ ، حيث يلاحظ وجود تحولات واضحة في القيمة العظمى للخاصية السعوية مع تغير سرعة السفينة.



الشكل (9) منحنى القيمة العظمى للخاصية السعوية كتابع لسرعة السفينة عند زوايا خط سير مختلفة.

لذلك عند دراسة تأثير سرعة السفينة على القيمة العظمى للخاصية السعوية لأبد من التمييز بين حالة إبحار السفينة ضمن مجال زوايا خط السير $0 < \gamma < 90^\circ$ وحالة إبحارها ضمن مجال زوايا خط السير $90^\circ < \gamma < 180^\circ$ ، وذلك على النحو الآتي:

السفينة مبحرة مع الأمواج $0 < \gamma < 90^\circ$

1. تؤثر سرعة السفينة بشكل فعال في القيمة العظمى للخاصية السعوية عند إبحار السفينة ضمن مجال زوايا خط السير $0 < \gamma < 90^\circ$ ، حيث تؤدي زيادة سرعة السفينة بشكل عام إلى تناقص القيمة العظمى للخاصية السعوية.

2. يحدث تغير واضح في منحنى الذرى الطنينية عند تتجاوز سرعة السفينة قيمة معينة تعرف باسم السرعة الحرجة v_c ، وهي السرعة الموافقة لقيمة التردد الحرج والتي تحدد بالعلاقة (32).

3. تؤدي زيادة سرعة السفينة من $v = 0$ إلى السرعة الحرجة $v = v_c$ إلى انخفاض طفيف في القيمة العظمى للخاصية السعوية في حين أن أية زيادة للسرعة فوق هذه القيمة تسبب:

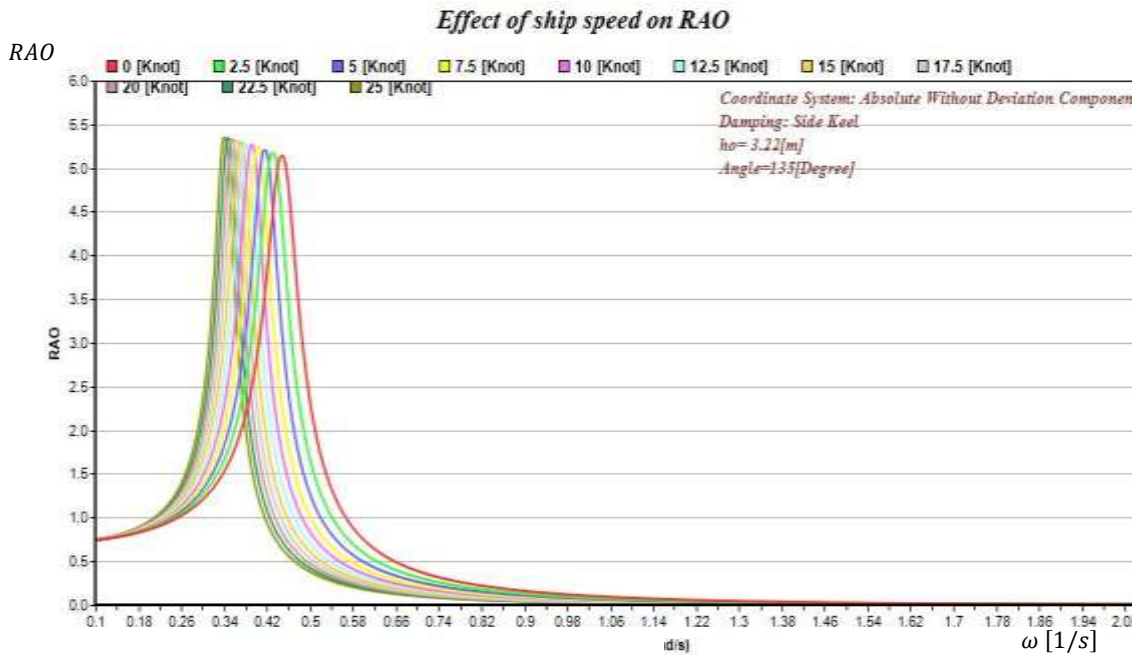
• انخفاضاً واضحاً في القيمة العظمى للخاصية السعوية، كما هو مبين في الشكل (9).

• زيادة تفلطح وتحدب ذروة الطنين (والتي توافق أصلاً قيمة منخفضة للخاصية السعوية) مما يزيد من عرض مجال الترددات الذي تحافظ فيه السفينة على نفس القيمة للخاصية السعوية، ومن ثمّ يستقر السلوك الديناميكي للسفينة عند طيف واسع من ترددات الأمواج أي ضمن مجال واسع من التغيرات المناخية (حيث تؤثر سرعة الرياح وشدتها في ارتفاع الأمواج وطولها ومن ثمّ على ترددها)، كما هو مبين في الشكل (6).

السفينة مبحرة عكس الأمواج $90^\circ < \gamma < 180^\circ$

يعتبر تأثير سرعة السفينة على القيمة العظمى للخاصية السعوية طفيفاً عند إبحار السفينة ضمن مجال زوايا خط السير $90^\circ < \gamma < 180^\circ$ ، حيث تسبب زيادة سرعة السفينة زيادة طفيفة فقط في القيمة الأعظمية للخاصية السعوية.

يبين الشكل (10) تأثير سرعة السفينة على قيمة تابع الخاصية السعوية عند زاوية خط سير $\gamma = 135^\circ$ على سبيل المثال لا الحصر.

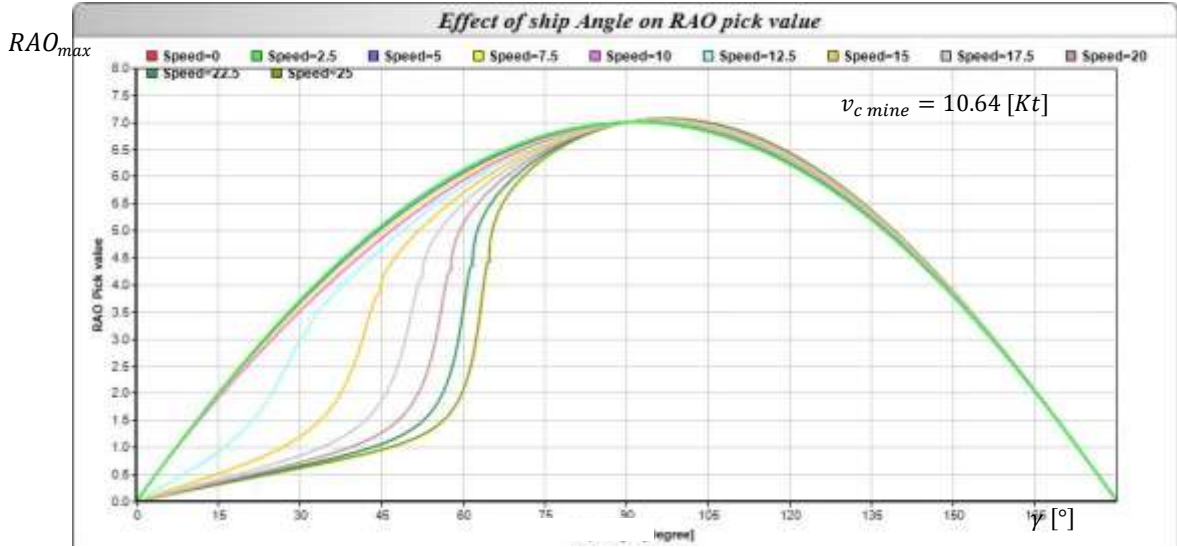


الشكل (10) تأثير سرعة السفينة على قيمة تابع الخاصية السعوية عند زاوية خط سير $\gamma = 135^\circ$

2. 2. 1 . تأثير زاوية خط سير السفينة على القيمة العظمى لمنحني الخاصية السعوية:

لدراسة تأثير زاوية خط سير السفينة على القيمة العظمى للخاصية السعوية سيتم إنشاء منحني الذرى الطنينية كتابع لزاوية خط سير السفينة γ عند قيمة معينة لسرعة السفينة v ، وذلك من خلال تحديد الترددات الطنينية كتابع لزاوية خط سير السفينة γ عند هذه السرعة وذلك بالاعتماد على العلاقات (36)، (37)، (38)، (39)، ثم تعويض قيم الترددات الطنينية الناتجة في العلاقة (10) بهدف تحديد قيم الذرى الطنينية المقابلة لها، تكرر هذه العملية عند عدة سرعات تتزايد بفاصل مقداره $\Delta v = 2.5 [Knot]$ ، كما في الشكل (8). يمكن أيضاً استنتاج هذه المنحنيات من سلسلة من مجموعات المنحنيات الخاصة بالخاصية السعوية كتابع لتردد الموجة عند قيم مختلفة لزاويا خط السير مقابلة لسرعة معينة خاصة بكل مجموعة من المنحنيات ضمن السلسلة كما في الشكل (8).

يلاحظ من الشكل (8) وجود اختلاف في سلوك الذروة الطنينية الأولى عند إبحار السفينة ضمن مجال زوايا خط السير $\gamma < 90^\circ$ عن سلوكها في حال إبحار السفينة ضمن مجال زوايا خط السير $\gamma > 90^\circ$ ، لذلك لابد من دراسة تأثير زاوية خط سير السفينة على القيمة العظمى للخاصية السعوية في الحالتين الآتيتين:



الشكل (11) منحنى القيمة العظمى للخاصية السعوية كتابع لزواوية خط سير السفينة عند قيم مختلفة للسرعة.

السفينة مبحرة مع الأمواج $0 < \gamma < 90$

تؤدي زيادة زاوية خط السير ضمن المجال المذكور عند قيمة معينة لسرعة السفينة إلى زيادة القيمة العظمى للخاصية السعوية، وكما يبدو من الشكل () فإن منحنى الذرى الطنينية يمتلك انحداراً تدريجياً على كامل مجال زوايا خط السير $\gamma < 90$ عندما تبحر السفينة بسرعة $v < 10.64 [Knot]$ والتي تعرف بالسرعة الحرجة الأصغرية $v_{c min}$ والمحددة بالعلاقة (35)، أما عند إبحار السفينة بسرعة أكبر من السرعة الحرجة الأصغرية $v_{c min} = 10.64 [knot]$ فيلاحظ وجود زاوية معينة γ يحدث عندها زيادة واضحة شديدة ومفاجئة في القيمة العظمى للخاصية السعوية، تعرف هذه الزاوية بالزاوية الحرجة γ_c ، وتحسب بالعلاقة (34).

تظهر الزاوية الحرجة γ_c في منحنيات الذرى الطنينية فقط عند إبحار السفينة بسرعات أكبر من السرعة الحرجة الأصغرية $v_{c min}$ ، كما هو مبين في الشكل (7) والشكل (8). وبناءً على ما سبق، فإن زاوية خط سير السفينة γ تؤثر بشكل فعال في القيمة العظمى للخاصية السعوية عند إبحار السفينة ضمن مجال زوايا خط السير $0 < \gamma < 90$ ، وتؤدي زيادتها عموماً إلى تزايد واضح في القيمة الأعظمية للخاصية السعوية، كما تؤدي إلى تزايد قيمة السرعة اللازمة لإحداث انخفاض واضح في القيمة الأعظمية للخاصية السعوية والتي تعرف باسم السرعة الحرجة v_c ، كما هو مبين في الشكل () والشكل ()، ومن ثم يتناقص مجال السرعة الآمنة التي يمكن لربان السفينة المناورة بها دون المرور بذرى طنينيه أو المرور بذرى طنينيه ذات قيمة منخفضة، لذلك ينصح بشكل عام بانقاص زاوية خط سير السفينة بالنسبة إلى الأمواج.

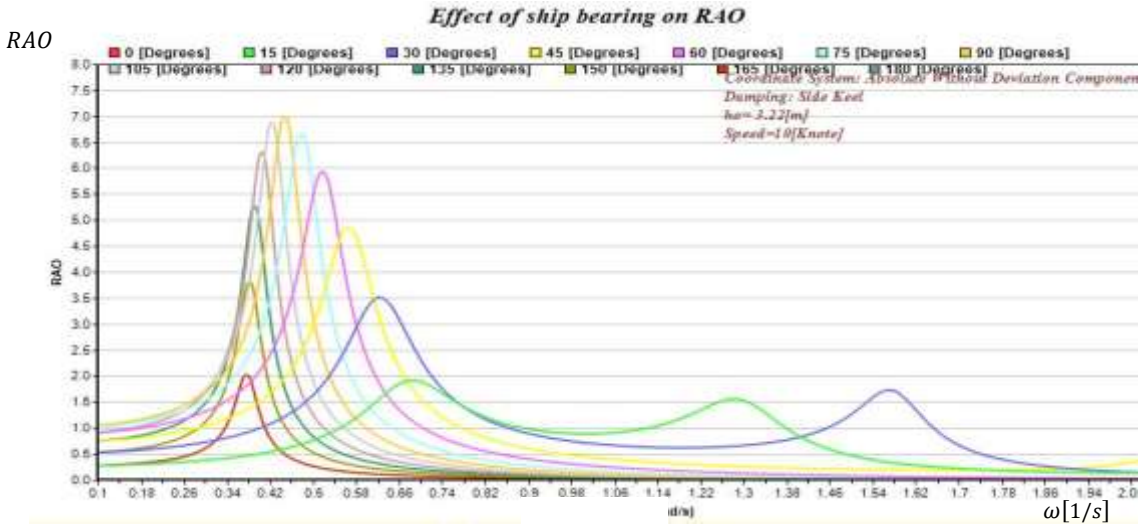
يبين الشكل (8) مثلاً عن تأثير زاوية خط سير السفينة على تابع الخاصية السعوية عند سرعة $v = 20 [Knot]$ أكبر من السرعة الحرجة الأصغرية $v_{c min} = 10.64 [knot]$ ، وفيه يشاهد التغير المفاجئ في القيمة العظمى للخاصية السعوية ضمن مجال زوايا خط السير $0 < \gamma < 90$ وذلك عند الزاوية $\gamma = 45^\circ$.

السفينة مبحرة عكس الأمواج $90^\circ < \gamma < 180^\circ$

يُلاحظ من الشكل () أن منحنيات الذرى الطنينية تمتلك انحداراً تدريجياً على كامل مجال زوايا خط السير $\gamma > 90^\circ$ وذلك مهما تغيرت سرعة السفينة، كما يلاحظ أيضاً غياب الزاوية الحرجة γ_c التي يحدث عندها تغير واضح في

القيمة العظمى للخاصية السعوية، عموماً تؤدي زيادة زاوية خط السير γ ضمن المجال $90^\circ < \gamma < 180^\circ$ إلى انخفاض في القيمة الأعظمية للخاصية السعوية.

يبين الشكل (12) مثلاً عن تأثير زاوية خط سير السفينة على تابع الخاصية السعوية عند سرعة $v = 10 [Knot]$ أصغر من السرعة الحرجة الاصغرية $v_{c\,mine} = 10.64 [Knot]$ ، وفيه يشاهد التغير التدريجي في القيمة العظمى للخاصية السعوية على كامل مجال زوايا خط السير $0 < \gamma < 180^\circ$.



الشكل (12) تأثير زاوية خط سير السفينة على تابع الخاصية السعوية عند سرعة $v = 10 [knot]$.

الاستنتاجات والتوصيات:

بناءً على الدراسة التحليلية والنمذجة الرياضية تم الوصول إلى الاستنتاجات الآتية:

1- يعتبر السلوك الديناميكي للسفينة المتأرجحة عرضياً على الأمواج الجيبية المنتظمة سلوكاً مضبوطاً بقواعد وعلاقات رياضية محددة، حيث:

- نحصل على أكبر تردد للذروة الأولى من منحنى الخاصية السعوية والمعروف باسم التردد الحرج ω_c عند إبحار السفينة بالسرعة الحرجة v_{c1} المحددة بالعلاقة (32)، أو عند إبحار السفينة بالزاوية الحرجة γ_c المحددة بالعلاقة (34).

- يُعطى التردد الحرج ω_c الذي يمثل القيمة العظمى للمجال الذي تتغير ضمنه ترددات الذروة الأولى من منحنى الخاصية السعوية عند زاوية خط سير معينة، وذلك مهما اختلفت سرعة السفينة وفق العلاقة (33).
- تبقى قيمة ω_c ثابتة مهما اختلفت سرعة السفينة أو زاوية خط سير السفينة.

2- تؤثر سرعة السفينة بشكل فعال في القيمة العظمى للخاصية السعوية عند إبحار السفينة ضمن مجال زوايا خط السير $0 < \gamma < 90^\circ$ ، ويتعلق ذلك بقيمة سرعة الإبحار مقارنة مع السرعة الحرجة v_c حيث:

- يسبب إبحار السفينة بسرعة $v < v_c$ عند زاوية خط السير المعتبرة من المجال $0 < \gamma < 90^\circ$ انخفاضاً طفيفاً في القيمة العظمى للخاصية السعوية وانزياح الذرى باتجاه القيم الأعلى للتردد
- يسبب إبحار السفينة بسرعة $v > v_c$ عند زاوية خط السير المعتبرة من المجال $0 < \gamma < 90^\circ$ انخفاضاً واضحاً في القيمة الأعظمية للخاصية السعوية وانزياح الذرى باتجاه القيم الأدنى للتردد.

- 3- يعتبر تأثير سرعة السفينة على القيمة العظمى للخاصية السعوية طفيفاً عند إبحار السفينة ضمن مجال زوايا خط السير $90^\circ < \gamma < 180^\circ$ ، حيث تسبب زيادة سرعة السفينة زيادة طفيفة في القيمة الأعظمية للخاصية السعوية وانزياح الذرى باتجاه القيم الأدنى للتردد.
- 4- تزداد القيمة العظمى للخاصية السعوية بالاقتراب من $\gamma = 90^\circ$.
- 5- تعطى السرعة الحرجة الأصغر $v_{c\,mine}$ بالعلاقة (35).
- 6- عند إبحار السفينة بسرعة أصغر من السرعة الحرجة الأصغر $v_{c\,mine}$ تؤدي زيادة زاوية خط السير γ ضمن المجال $0 < \gamma < 180^\circ$ إلى انزياح الذرى باتجاه القيم الأدنى للتردد.
- 7- يسبب إبحار السفينة بسرعة أكبر من السرعة الحرجة الأصغر $v_{c\,mine}$ ظهور زاوية حرجة γ_c يحدث عندها تبدل في سلوك الذروة الطنينية الأولى عند السرعة المعتمدة للسفينة، حيث:
- تتزاح الذرى باتجاه القيم الأعلى للتردد عندما $\gamma < \gamma_c$.
- تتزاح الذرى باتجاه القيم الأدنى للتردد عندما $\gamma > \gamma_c$.
- 8- تمتلك الذروة الطنينية قيمة منخفضة عند زوايا خط السير الأصغر من الزاوية الحرجة.
- 9- تزداد قيمة الزاوية الحرجة مع زيادة سرعة السفينة فوق السرعة الحرجة الأصغر $v_{c\,mine}$ ، لذلك ينصح بإبحار السفينة بسرعة أكبر من السرعة الحرجة الأصغر.
- 10- ينصح بشكل عام بانقاص زاوية خط سير السفينة بالنسبة إلى الأمواج، أو إجراء زيادة متزامنة لسرعة السفينة مع زاوية خط سيرها.
- 11- ينصح بشكل عام بإبحار السفينة بسرعة أكبر من السرعة الحرجة المقابلة لزاوية خط السير المعتمدة.
- 12- ينصح بشكل عام بإبحار السفينة بزاوية أصغر من الزاوية الحرجة عند سرعة الإبحار المعتمدة.
- 13- لا ينصح بزيادة السرعة عند إبحار السفينة ضمن المجال $90^\circ < \gamma < 180^\circ$.
- بناء على ما سبق تتضح أهمية الموديل الرياضي مع العلاقات المستخرجة والبرامج المعدة في هذا البحث كهدف بحثي واستثماري يتعلق بالاختيار المناسب لسرعة السفينة وزاوية خط سيرها عند حالة بحر معينة بهدف الابتعاد عن حالة التآرجحات العرضية الشديدة.

المراجع:

- [1] J.M.J. Journée & W.W. Massie., Offshore Hydrodynamics, Netherlands, 2001.
- [2] K.J.Rawson & E.C.Tupper., Basic Ship Theory, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001.
- [3] Tony Molland., Maritime Engineering Reference Book, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2008.
- [4] Lech k. Kobylinski & Sigismund Kastner., Stability and Safety of Ship, 2003.
- [5] Welnicki, W., Mechanika Ruchu okretu, Skrypt dla studentow, Instytut Okretowy PG, Gdansk 1989.
- [6] Volker Bertram., Practical Ship Hydrodynamics, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.