

## التحديد التقريبي للبارامترات الإحصائية المميزة للتأرجحات العرضية للسفن المبحرة عبر الأمواج الحقيقية غير المنتظمة

الدكتور ميشيل بريهان\*

( قبل للنشر في 20/4/2005 )

### □ الملخص □

تعتبر دراسة سلوك السفن المتأرجحة عرضياً بفعل الأمواج الحقيقية غير المنتظمة من المسائل ذات الأهمية الخاصة نظراً لارتباط هذه الحركات بالأمان التوازني للسفينة أثناء إبحارها، ولارتباطها أيضاً بكفاءة بعض الأنظمة والعمليات التي تجرى ضمن السفينة.

يتضمن هذا البحث تحديد البارامترات الإحصائية المميزة للتأرجحات العرضية العشوائية للسفينة المبحرة عبر الأمواج الحقيقية غير المنتظمة المتعامدة مع بدن السفينة بدلالة البارامترات الرئيسة للسفينة وحالة البحر. تم وضع نموذج رياضي استناداً لنظرية الأمواج الجيبية، نظرية الموديل الخطي لديناميكية حركة السفينة ونظرية التحليل الطيفي لطاقة الأمواج غير المنتظمة مع استخدام العديد من العلاقات التقريبية التجريبية الموثوقة. تم إجراء الحسابات باستخدام الحاسب. عرضت النتائج على شكل شبكة من المنحنيات البيانية التي تبين العلاقة بين السعة مع 3% أمان للتأرجحات العرضية و عرض السفينة، عند قيم مختلفة للنسبة  $GM_0 / B$ ، وأيضاً من أجل قيم مختلفة لسرعة الرياح  $v$ . تعتبر هذه الشبكة عامة تصلح للاستخدام بالنسبة لأي سفينة تتمتع ببارامترات معينة وبالنسبة لحالات بحر مختلفة قد تصادفها السفينة أثناء إبحارها، وذلك لتقييم سلوك السفينة المتأرجحة عرضياً بفعل الأمواج. أثبتت النتائج أنه لا يمكن الاعتماد على ارتفاع الميتاسنتر العرضي الأولي للسفينة  $GM_0$  في تقييم سلوك السفينة المتأرجحة عرضياً بفعل الأمواج. هذا الاستنتاج يتوافق مع الحالة السكونية للانحراف العرضي، إذ لا يعتمد كما هو معروف في علم اتزان السفن على  $GM_0$  في تقييم الحالة التوازنية عند زوايا الميلان العرضية الكبيرة.

\* مدرس في قسم الهندسة البحرية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سوريا.

## Approximate Estimation of Distinct Statistical Parameters of Rollings for Ships Sailing across Irregular Real Waves

Dr. Michel Barbahan \*

(Accepted 20/4/2005)

### □ ABSTRACT □

The study of rolling ship behaviour under irregular real waves is considered a specially important matter due to these motions which are related to safety of ship stability during sailing and also to performance of systems and operations conducted in ships.

This research includes approximate estimation of distinct statistical parameters of rollings for ships sailing across irregular real waves perpendicular to ship body with function of main parameters of ship and state of sea. Mathematical model is formulated based on sinusoidal wave theory, linear model theory of ship dynamics, spectrum analysis of energy of irregular waves with use of various reliable empirical approximate relations. Estimations are made by computer. Results are shown on a cascade of curves that indicate to relation between amplitude with 3% safety of rolling and ship width upon variable values of ratio  $GMo/B$  and also for variable values of wind velocity  $v$ . This cascade is considered as a general one valid to be used for any ship having certain parameters, and for different sea states that occurred during ship sailing in order to evaluate behaviour of rolling ship under waves. Results established that it is impractical to depend on high of metacentric  $GMo$  to evaluate behavior of rolling ship under waves. This conclusion corresponds to static state of heel because it is impractical to depend on  $GMo$  as known in stability of ship to evaluate state of stability in large angles of heel.

---

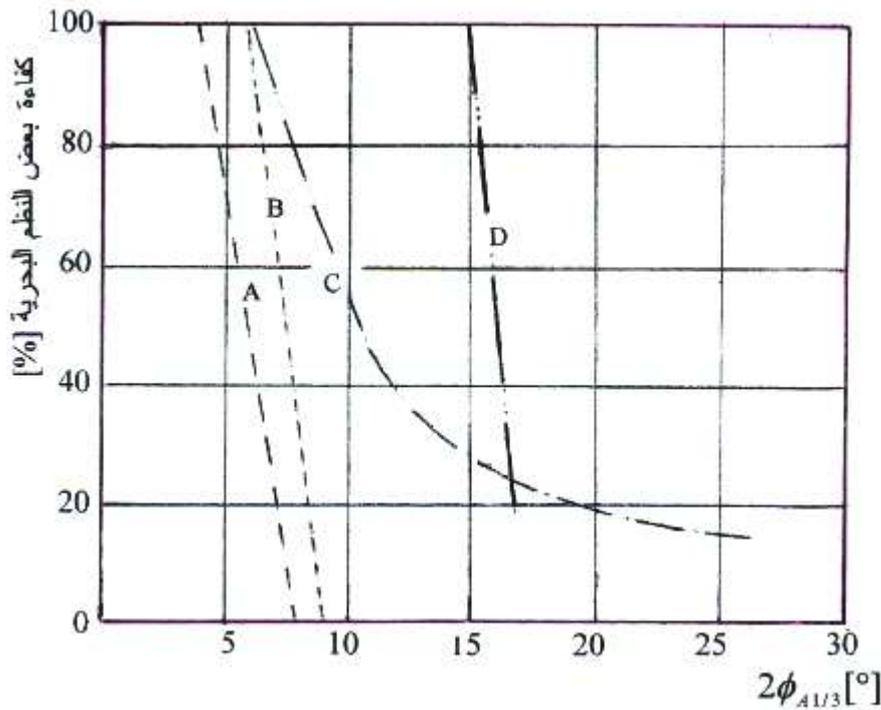
\*Assistant Prof, Department Of Marine Engineering, Faculty Of Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**مقدمة:**

تعرف الحركات التآرجحية للسفينة بأنها حركات تذبذبية تؤديها السفينة عند ابحارها في المياه الساكنة والمياه المتموجة نتيجة لانزياحها عن وضعية توازنها الأولية بفعل تعرضها لتأثير قوى وعزوم خارجية.

تتمتع السفينة كنظام ديناميكي بست درجات حرية، إذ تمتلك إمكانية القيم بست حركات، ثلاث منها دورانية حول المحاور الاحداثية المرتبطة بيدن السفينة والمارة بمركز ثقلها ( $Gxyz$ ) وثلاث حركات خطية وفق المحاور الاحداثية المفروضة. في الواقع تكون كل حركة من هذه الحركات متزامنة أو مقترنة بباقي الحركات الأخرى، وتكون حركة السفينة هي محصلة لهذه الحركات.

إن أكثر هذه الحركات أهمية هي ما يسمى بالتأرجحات العرضية للسفينة، أي الحركة الدورانية التذبذبية حول المحور الطولي  $Gx$  المار بمركز ثقل السفينة والمتجه نحو مقدمتها، نظراً لارتباطها المباشر بالأمان التوازني للسفينة أثناء ابحارها، ولارتباطها أيضاً بكفاءة بعض الأنظمة والعمليات التي تجرى ضمن السفينة ( أنظر الشكل 1). لهذا السبب تولى هذه الحركات مكانة خاصة عند دراستها بالمقارنة بباقي الحركات الأخرى [1,2].



الشكل ( 1 ) العلاقة بين كفاءة بعض الأنظمة - العمليات ضمن السفينة والتأرجحات العرضية الحاصلة:  
A - إطلاق الطوربيدات والصواريخ ، B - إقلاع وهبوط المروحيات ، C - كفاءة عمل الطاقم، D - التزود بالوقود

**هدف البحث:**

يهدف هذا البحث إلى تحديد البارامترات الاحصائية المميزة للتأرجحات العرضية العشوائية للسفينة المبحرة عبر الأمواج الحقيقية غير المنتظمة المتعامدة مع بدن السفينة ( أي الأمواج الجانبية )، بغية دراسة سلوك السفينة المتأرجحة عرضياً بفعل الأمواج بدلالة البارامترات الرئيسة للسفينة وحالة البحر أثناء الإبحار، لما لهذا الموضوع من أهمية كبيرة كما ذكرنا في الفقرة السابقة.

## الأسس النظرية:

لدراسة التأرجحات العرضية للسفينة المبحرة عبر الأمواج غير المنتظمة سنعتبر كمرحلة أولى أن هذه الأمواج هي جيبية منتظمة وأن أبعاد السفينة ( العرض والغطاس ) صغيرة بالمقارنة مع أبعاد الموجة ( الطول والارتفاع )، وأيضاً مستوي تناظر السفينة متعامد مع الاتجاه الرئيس لانتشار الأمواج. تخضع السفينة في هذه الحالة بالتوافق مع حركة جزيئات الماء على مداراتها لتأثير قوة الثقالة ( أي وزنها الذاتي ) و القوة الطاردة المركزية. تدعى محصلة هاتين القوتين التي تتجه عند أي موضع للموجة وفق الناظم على سطحها بالوزن الظاهري للسفينة. تخضع السفينة أيضاً لتأثير قوة أخرى هي قوة الدفع الظاهري بفعل تأثير المياه وهي تتجه باتجاه معاكس للوزن الظاهري وفق الناظم على سطح الموجة. تتغير قيمة واتجاه هاتين القوتين وفقاً لوضعية السفينة بالنسبة للأمواج وهما يشكلان مزدوجة تسعى إلى تدوير السفينة حول محورها الطولي  $Gx$  للوصول إلى وضعية التوازن اللحظي، بحيث يصبح مستوى تناظر السفينة متعامداً مع سطح الموجة. يدعى عزم هذه المزدوجة بعزم الاسترجاع أو الاستبدال الذي يسعى إلى إنقاص زاوية انحراف السفينة للوصول إلى حالة التوازن اللحظي [3]. يعطى هذا العزم وفقاً للعلاقة الآتية عند افتراض قيمة صغيرة للزاوية  $(\phi - \alpha)$ :

$$M_w = D GM_0 (\phi - \alpha) \quad (1)$$

حيث أن:

$D$  - قوة الدفع (الإزاحة)  $[t]$ .

$GM_0$  - ارتفاع الميتاسنتر العرضي الأولي للسفينة  $[m]$ .

$\phi$  - زاوية الميلان العرضي للسفينة بالنسبة للشاقول  $[rad]$ .

$\alpha$  - الزاوية التي يصنعها الناظم على سطح الموجة مع الشاقول، وهي تمثل زاوية انحراف الموجة

الجيبية  $[rad]$ .

$(\phi - \alpha)$  - زاوية الميلان العرضي للسفينة بالنسبة للناظم على سطح الموجة  $[rad]$ .

تحدد الحركات التأرجحية العرضية للسفينة المبحرة عبر الأمواج الجيبية المنتظمة المتعامدة مع بدن السفينة وفقاً

للمعادلة التفاضلية التالية:

$$I_x \phi'' = \sum M_{Gx} \quad (2)$$

حيث أن:

$\phi''$  - التسارع الزاوي للسفينة حول المحور  $Gx$ .

$I_x$  - عزم عطالة كتلة السفينة حول المحور  $Gx$ .

$\sum M_{Gx}$  - مجموع العزوم الخارجية المؤثرة على السفينة حول المحور  $Gx$  ويساوي:

$$\sum M_{Gx} = -D GM_0 (\phi - \alpha) - 2N_\phi (\phi' - \alpha') - I_{xx} (\phi'' - \alpha'') \quad (3)$$

حيث أن:

$N_\phi$  - معامل تخادم التأرجحات العرضية بفعل مقاومة الاحتكاك للمياه.

$I_{xx}$  - عزم عطالة كتلة المياه المرافقة حول المحور  $Gx$ .

يمثل الحد الأول من المعادلة (3) عزم استبدال يسعى إلى إعادة السفينة إلى حالة التوازن اللحظي على سطح الموجة. أما الحد الثاني فيمثل عزم يتناسب مع السرعة الزاوية النسبية للسفينة ويدعى بعزم التخادم العرضي. وأخيراً يمثل الحد الثالث من هذه المعادلة عزم يتناسب مع التسارع الزاوي النسبي للسفينة ويدعى بعزم عطالة كتلة المياه المرافقة أثناء التأرجح العرضي للسفينة.

يتضح مفهوم المياه المرافقة من حقيقة أن الكتلة المتسارعة أثناء حركة السفينة في المياه تتألف من كتلة السفينة بالإضافة إلى كتلة المياه في منطقة التماس المباشر مع السفينة المتسارعة. يعود السبب في ذلك إلى التصاق جزيئات الماء المجاورة للبدن به وتحركها معه بفعل لزوجة الماء. تنتقل تسارعات بدن السفينة نحو الماء المحيط به بشكل متعامد مع سطح البدن وتتلاشى على مسافة معينة من هذا البدن [4]. ومنه:

$$I_x \phi'' = -D GM_0 (\phi - \alpha) - 2N_\phi (\phi' - \alpha') - I_{xx} (\phi'' - \alpha'') \quad (4)$$

$$(I_x + I_{xx}) \phi'' + 2N_\phi \phi' + D GM_0 \phi = \underbrace{D GM_0 \alpha + 2N_\phi \alpha' + I_{xx} \alpha''}_{M_x}$$

يمثل الطرف الأيمن من المعادلة الأخيرة العزم المحرض للتأرجحات العرضية بفعل الأمواج الجيبية المنتظمة. يتألف هذا العزم من مركبتين، الأولى وتشمل الحد الأول من الطرف الأيمن للمعادلة الأخيرة وتحسب وفقاً لنظرية Froud-krylow من خلال التكامل على كامل السطح المبلل للبدن الساكن بالنسبة للضغوط الديناميكية المتولدة بفعل الموجة الغير متأثرة بوجود البدن. أما المركبة الثانية فتشمل الحد الثاني والثالث من الطرف الأيمن للمعادلة المذكورة، وهي تدعى بالمركبة الانحرافية. تنتج هذه المركبة عن الاضطرابات الحاصلة لتوزع حقل السرعة والضغط بالنسبة للموجة بفعل تأثير البدن الساكن [5,6].

يمكن كتابة المعادلة التفاضلية السابقة على النحو الآتي:

$$\phi'' + 2\mu_\phi \omega_{\phi 0} \phi' + \omega_{\phi 0}^2 \phi = \omega_{\phi 0}^2 \alpha + 2\mu_\phi \omega_{\phi 0} \alpha' + q_\phi \alpha'' \quad (5)$$

حيث إن:

$\omega_{\phi 0}$  - التردد الذاتي غير المتخادم للتأرجحات العرضية ويساوي:

$$\omega_{\phi 0}^2 = \frac{D GM_0}{I_x + I_{xx}} \quad (6)$$

$\mu_\phi$  - معامل التخادم الابعدي للتأرجحات العرضية ويساوي:

$$\mu_\phi = \frac{N_\phi}{I_x + I_{xx}} \frac{1}{\omega_{\phi 0}} \quad (7)$$

$q_\phi$  - معامل ويساوي:

$$q_\phi = \frac{I_{xx}}{I_x + I_{xx}} \quad (8)$$

تحدد الزاوية  $\alpha$  بين الناظم على سطح الموجة والشاقول، أي زاوية انحراف الموجة وفقاً لنظرية الأمواج الجيبية على النحو التالي [4]:

$$\alpha = \chi_\phi \alpha_0 \sin \omega t = \alpha_m \sin \omega t \quad (9)$$

حيث إن:

$\alpha_0$  - زاوية الانحراف الأعظمي للموجة.

$\chi_\phi$  - معامل تخفيض العزم المحرض للتأرجحات العرضية.

$\alpha_m$  - الزاوية الفعالة لانحراف الموجة.

باشتقاق العلاقة الأخيرة مرتين بالنسبة للزمن يمكن تحديد  $\alpha'$ ,  $\alpha''$ . بعد تعويض كل من  $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $\alpha''$

في الطرف الأيمن من المعادلة (5) وإجراء بعض الاختصارات يمكن تحديد العزم المحرض للتأرجحات العرضية وفقاً للعلاقة الآتية:

$$M_x = \alpha_m \sqrt{(\omega_{\phi_0}^2 - q_\phi \omega^2)^2 + 4\mu_\phi^2 \omega_{\phi_0}^2 \omega^2} \sin(\omega t + \beta_\phi) \quad (10)$$

حيث أن:

$A$  - السعة التحريضية.

$\beta_\phi$  - إزاحة طوريه وتساوي:

$$\text{tg} \beta_\phi = \frac{2\mu_\phi \omega_{\phi_0} \omega}{\omega_{\phi_0}^2 - q_\phi \omega^2} \quad (11)$$

وبالتالي ستأخذ المعادلة التفاضلية الخاصة بالتأرجحات العرضية الشكل الآتي:

$$\phi'' + 2\mu_\phi \omega_{\phi_0} \phi' + \omega_{\phi_0}^2 \phi = \alpha_m \sqrt{(\omega_{\phi_0}^2 - q_\phi \omega^2)^2 + 4\mu_\phi^2 \omega_{\phi_0}^2 \omega^2} \sin(\omega t + \beta_\phi) \quad (12)$$

وهي تمثل معادلة تفاضلية خطية غير متجانسة من الدرجة الثانية. يتألف حل هذه المعادلة من حل المعادلة التفاضلية المتجانسة بدون طرف ثاني ( أي من دون الأخذ بعين الاعتبار تأثير الأمواج المحرصة للتأرجحات العرضية) بالإضافة للحل الخاص لهذه المعادلة مع وجود الطرف الثاني. إذا حل المعادلة التفاضلية يظهر أن التأرجحات العرضية للسفينة بفعل الأمواج تتألف من تأرجحات ذاتية متخامدة وتأرجحات قسرية. بما أن التأرجحات الذاتية تتخامد وتختفي بعد وقت محدد، عندئذٍ ستبقى فقط التأرجحات العرضية القسرية. في هذه الحالة يأخذ حل المعادلة التفاضلية الشكل النهائي التالي:

$$\phi = \phi_m \sin(\omega t + \beta_\phi - \delta_\phi) \quad (13)$$

حيث إن:

$\delta_\phi$  - إزاحة طوريه بين استجابة السفينة والمؤثر التحريضي وهي تساوي:

$$\text{tg} \delta_\phi = \frac{2\mu_\phi \omega_{\phi_0} \omega}{\omega_{\phi_0}^2 - \omega^2} \quad (14)$$

$\phi_m$  - سعة التأرجحات العرضية القسرية وتساوي:

$$\phi_m = \alpha_m \sqrt{\frac{(\omega_{\phi_0}^2 - q_\phi \omega^2)^2 + 4\mu_\phi^2 \omega_{\phi_0}^2 \omega^2}{(\omega_{\phi_0}^2 - \omega^2)^2 + 4\mu_\phi^2 \omega_{\phi_0}^2 \omega^2}} \quad (15)$$

تدعى نسبة سعة التأرجحات العرضية القسرية  $\phi_m$  إلى زاوية الانحراف الأعظمي للموجة بالخاصية السعوية

للتأرجحات العرضية وتساوي [7]:

$$|Y_\phi| = \frac{\phi_m}{\alpha_0} = \chi_\phi \sqrt{\frac{(\omega_{\phi_0}^2 - q_\phi \omega^2)^2 + 4\mu_\phi^2 \omega_{\phi_0}^2 \omega^2}{(\omega_{\phi_0}^2 - \omega^2)^2 + 4\mu_\phi^2 \omega_{\phi_0}^2 \omega^2}} \quad (16)$$

يمكن للتبسيط إهمال تأثير المركبة الانحرافية للعزم المحرض للتأرجحات العرضية بفعل الأمواج، وستأخذ المعادلة التفاضلية الخاصة بالتأرجحات العرضية الشكل الآتي:

$$\phi'' + 2\mu_\phi \omega_{\phi_0} \phi' + \omega_{\phi_0}^2 \phi = \alpha_m \omega_{\phi_0}^2 \sin \omega t \quad (17)$$

بعد حل هذه المعادلة يمكن تحديد الخاصية السعوية التي تعطى في الجملة الاهتزازية المبسطة وفقاً للعلاقة التالية [1,3,8]:

$$|Y_\phi| = \frac{\phi_m}{\alpha_0} = \frac{\chi_\phi \omega_{\phi_0}^2}{\sqrt{(\omega_{\phi_0}^2 - \omega^2)^2 + 4\mu_\phi^2 \omega_{\phi_0}^2 \omega^2}} \quad (18)$$

إن العلاقة الأخيرة وعلى الرغم من كونها أقل دقة فهي توصف التأرجحات العرضية بشكل أفضل من العلاقة (16). هذا التناقض يمكن تفسيره على النحو الآتي: تتزامن التأرجحات العرضية المدروسة وفقاً للنظرية الخطية الخاصة بديناميكية حركة السفينة مع التأرجحات الخطية الجانبية على امتداد المحور  $Gy$  والتأرجحات الدورانية حول المحور الشاقولي  $Gz$  والتي تدعى بالزوغان. تؤثر عادة التأرجحات الدورانية حول المحور الشاقولي  $Gz$  بصورة غير فعالة على التأرجحات العرضية، في حين يكون تأثير التأرجحات الخطية الجانبية أكثر فعالية. يتمتع العزم الناشئ عن التأرجحات الخطية الجانبية بقيمة مطلقة مساوية للقيمة المطلقة للمركبة الانحرافية الخاصة بالعزم المحرض للتأرجحات العرضية بفعل الأمواج، ولكن مع وجود إزاحة طورية مقدارها  $180^\circ$ ، أي أن العزمين متساويين بالقيمة ومتعاكسين بالاتجاه. لذلك فإن إهمال تزامن التأرجحات العرضية مع التأرجحات الخطية الجانبية بالإضافة إلى تأثير المركبة الانحرافية الخاصة بالعزم المحرض للتأرجحات العرضية عند تشكيل المعادلة التفاضلية للحركة المدروسة هو أكثر مصداقية من إهمال التزامن الحاصل بين هذه الحركات فقط [1,3].

في المرحلة الثانية يدرس تأثير الأمواج البحرية كأموح حقيقية غير منتظمة أي عشوائية وفقاً لنظرية التحليل الطيفي في وصف ديناميكية حركة السفينة والمنسوبة للعالمين Pirson و Denis. تعتبر الموجة البحرية غير المنتظمة وفقاً لهذه النظرية كمجموع عدد كبير من الأمواج المنتظمة الجيبية التي تتمتع بسعات، ترددات، اتجاهات و إزاحات طورية مختلفة. فإن رد فعل السفينة أي استجابتها لتأثير الأمواج غير المنتظمة ما هو إلا مجموع الاستجابات العنصرية الناتجة عن تأثير الأمواج المنتظمة التوافقية المشكلة للموجة البحرية غير المنتظمة. تعتمد نظرية التحليل الطيفي على الأسس الرياضية للعمليات العشوائية المعروفة في علم الاحتمالات [4].

توصف عادة الأمواج البحرية غير المنتظمة باستخدام مفهوم تابع الكثافة الطيفي لطاقة الأمواج  $S_\alpha(\omega)$  (مؤشر الدخل العشوائي) الذي يبين كيفية توزيع الطاقة الوسطية الإجمالية للموجة غير المنتظمة على واحدة المساحة بين المركبات العنصرية المنتظمة التوافقية المكونة للموجة البحرية غير المنتظمة. وعند اعتماد السفينة كنظام ديناميكي خطي أثناء حركتها [7]، فإن تابع الكثافة الطيفي لاستجابة السفينة، أي لتأرجحها عرضياً (مؤشر الخرج العشوائي) سيعطى وفقاً للعلاقة الآتية:

$$S_\phi(\omega) = |Y_\phi|^2 S_\alpha(\omega) \quad (19)$$

حيث إن  $S_\alpha(\omega)$  يمثل تابع الكثافة الطيفي لزوايا انحراف الموجة الذي يرتبط بتابع الكثافة الطيفي لسعات الموجة  $S_\zeta(\omega)$  وفقاً للعلاقة الآتية:

$$S_\alpha(\omega) = k^2 S_\zeta(\omega) \quad (20)$$

حيث إن  $k$  يمثل الرقم الموجي ويساوي:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (21)$$

أما  $\lambda$  فيمثل طول الموجة.

يرتبط الرقم الموجي  $k$  مع التردد الزاوي للموجة  $\omega$  بعلاقة خاصة تعطى على النحو الآتي [4]:

$$k g = \omega^2 \quad (22)$$

حيث إن  $g$  يمثل تسارع الجاذبية الأرضية، ومنه:

$$S_\alpha(\omega) = \frac{\omega^4}{g^2} S_\zeta(\omega) \quad (23)$$

وبالتالي:

$$S_\phi(\omega) = |Y_\phi|^2 \frac{\omega^4}{g^2} S_\zeta(\omega) \quad (24)$$

لتحديد البارامترات الإحصائية المميزة للتأرجحات العرضية العشوائية، ينبغي تحديد ما يسمى بتباين التأرجحات العرضية العشوائية ( مربع الانحراف المعياري ) الذي يمثل المساحة الكلية أسفل تابع الكثافة الطيفي  $S_\phi(\omega)$ :

$$D_\phi = \int_0^\infty S_\phi(\omega) d\omega = \int_0^\infty |Y_\phi|^2 \frac{\omega^4}{g^2} S_\zeta(\omega) d\omega \quad (25)$$

باعتقاد منحني توزيع Rayleigh لسعات الأمواج البحرية العشوائية و سعات التأرجحات العرضية العشوائية، يمكن تحديد البارامترات الإحصائية المميزة للتأرجحات العرضية العشوائية على النحو التالي [1,5,7]:

السعة الوسطية للتأرجحات العرضية العشوائية:

$$\phi_A = 1.25 \sqrt{D_\phi} \quad (26)$$

السعة الفعالة، أي السعة الوسطية للثلث الأعظمي من سعات التأرجحات العرضية العشوائية:

$$\phi_{A1/3} = 2.00 \sqrt{D_\phi} \quad (27)$$

السعة مع 3% أمان:

$$\phi_{A3\%} = 2.635 \sqrt{D_\phi} \quad (28)$$

ويقصد بها القيمة الأصغر وسطياً من 3% من مجمل السعات، بمعنى أنه وسطياً لكل 100 تأرجح عرضي لدينا ثلاثة تأرجحات لها سعات أكبر من هذه القيمة.

**الفرضيات المعتمدة:**

عند إجراء الحسابات لتحديد البارامترات الاحصائية المميزة للتأرجحات العرضية العشوائية بدلالة البارامترات الرئيسية للسفينة وحالة البحر، تم الأخذ بعين الاعتبار الفرضيات الإضافية الآتية:

- يمثل معامل التخماد اللابعدي للتأرجحات العرضية  $\mu_\phi$  مقدار ثابت ويساوي بصورة مستقلة عن السفينة

[4]:

$$2\mu_\phi = 0.1 \quad (29)$$

- يتعلق التردد الذاتي غير المتخامد للتأرجحات العرضية  $\omega_{\phi 0}$  فقط بارتفاع الميئاسنتر العرضي الأولي للسفينة وعرضها، ويحدد وفقاً للعلاقة الآتية [7]:

$$\omega_{\phi 0} = 7.86 \sqrt{\left(\frac{GM_0}{B}\right) \frac{1}{B}} \quad (30)$$

ويحدد الدور الذاتي للتأرجحات العرضية غير المتخامدة وفقاً للعلاقة التالية:

$$T_{\phi 0} = \frac{2\pi}{\omega_{\phi 0}} = 0.8 \frac{B}{\sqrt{GM_0}} \quad (31)$$

حيث إن:

$B$  - عرض السفينة [m].

$GM_0$  - ارتفاع الميئاسنتر العرضي الأولي للسفينة [m].

- يحدد معامل تخفيض العزم الممرض للتأرجحات العرضية وفقاً للعلاقة التالية [8]:

$$\chi_\phi = \frac{\sin \frac{kB}{2}}{kB/2} \frac{1 - e^{-kT}}{kT} \quad (32)$$

حيث إن:

$T$  - غاطس السفينة [m].

$k$  - الرقم الموجي [rad/m].

تعتبر العلاقة الأخيرة دقيقة للسفن التي تتمتع بمقاطع عرضية مستطيلة الشكل.

- يحدد تابع الكثافة الطيفي لطاقة الأمواج وفقاً للعلاقة الآتية المقترحة من قبل ITTC المؤتمر العالمي

لأحواض اختبارات النماذج (International Towing Tank Conference) [1]:

$$S_\zeta(\omega) = \frac{a}{\omega^5} \exp\left(\frac{-b}{\omega^4}\right) \quad [cm^2 s] \quad (33)$$

حيث إن  $a, b$  ثوابت تعطى كما يلي:

$$a = 8.10 \cdot 10^{-3} g^2$$

$$b = 3.11 \cdot 10^4 / \zeta_{\omega^{1/3}}^2$$

حيث إن:

$g$  - تسارع الجاذبية الأرضية [ $cm/s^2$ ].

$\zeta_{\omega/3}$  - الارتفاع الفعال للموجة [cm]، أي الارتفاع الوسطي ل 1/3 من الارتفاعات الأعظمية الخاصة بالموجة غير المنتظمة. حدد ITTC العلاقة بين السرعة الوسطية للرياح  $v$  والارتفاع الفعال للموجة  $\zeta_{\omega/3}$  على النحو التالي [1]:

جدول (1) يبين العلاقة بين السرعة الوسطية للرياح  $v$  والارتفاع الفعال للموجة  $\zeta_{\omega/3}$

$v [mil/h]$	20	30	40	50	60
$\zeta_{\omega/3} [cm]$	440	560	810	1100	1460

## النتائج والمناقشة:

استناداً للأسس النظرية والفرضيات المعتمدة نستنتج أن البارامترات الإحصائية المميزة للتأرجحات العرضية العشوائية تتعلق بالبارامترات التالية:

- $v$  - سرعة الرياح.
- $B$  - عرض السفينة.
- نسبة ارتفاع الميئاسنتر العرضي الأولي إلى عرض السفينة  $GM_0/B$ ، أو ارتفاع الميئاسنتر العرضي الأولي عند قيمة معينة ل  $B$ .

بالنسبة لغاطس السفينة له تأثير ضعيف على البارامترات المميزة للتأرجحات العرضية، لذلك ستجرى الحسابات وفقاً للنسب المحددة التالية الموافقة لحالة استثمار السفن التجارية:

$B/T [-]$	2.0	3.0	4.0
-----------	-----	-----	-----

بالنسبة للبارامترات الأخرى المذكورة فإن الحسابات ستجرى وفقاً للقيم التالية:

$v [mil/h]$	20	30	40	50	60
-------------	----	----	----	----	----

$B [m]$	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5
$B [m]$	20	22.5	25	30	35	40	

$GM_0/B [-]$	0.05	0.10	0.15	0.20
--------------	------	------	------	------

تم إعداد برنامج على الحاسب بلغة Turbo Paskal 7 وفقاً للنموذج الرياضي المقترح. يتضمن هذا البرنامج أربع حلقات أساسية لتغيير البارامترات الرئيسية للسفينة وحالة البحر المذكورة أعلاه بغية حساب تباين التأرجحات العرضية العشوائية ( مربع الانحراف المعياري ) الذي يمثل المساحة الكلية أسفل تابع الكثافة الطيفي  $S_{\phi}(\omega)$  وفقاً للعلاقة الأساسية (25). عملياً يتراوح مجال التكامل في هذه العلاقة من  $\omega = 0.2 [rad/s]$  بدلاً من  $\omega = 0$  وحتى  $\omega = 3.5 [rad/s]$  بدلاً من  $\omega = \infty$ ، لأن منحنى تابع

الكثافة الطيفي لطاقة الأمواج  $S_c(\omega)$  المعطى بالعلاقة (33) يبدأ بالتزايد اعتباراً من القيمة  $\omega = 0.2 [rad/s]$  ، في حين ينتهي أسياً إلى الصفر بصورة تقريبية عند القيمة  $\omega = 3.5 [rad/s]$  . تم حساب التكامل باستخدام طريقة المستطيلات الرقمية مع اعتماد قيمة صغيرة لطول قطاع التقسيم مقدارها:  $\Delta\omega = 0.01 [rad/s]$  بغية رفع دقة الحسابات [9]. يسمح حساب تباين التآرجحات العرضية العشوائية بتحديد البارامترات الاحصائية المميزة للتآرجحات العرضية العشوائية. وأخيراً تم تخزين النتائج الرقمية في ملف خاص.

عرضت نتائج هذا البرنامج على شكل شبكة مؤلفة من ثلاث مجموعات من المنحنيات البيانية وفقاً لقيم النسبة  $B/T$  . تبين هذه المنحنيات العلاقة بين السعة مع 3% أماناً للتآرجحات العرضية و عرض السفينة، عند قيم مختلفة للنسبة  $GM_0/B$  ، وأيضاً من أجل قيم مختلفة لسرعة الرياح  $v$  . يمكن أيضاً إنشاء هذه الشبكة من المنحنيات بالنسبة للسعة الوسطية أو السعة الفعالة للتآرجحات العرضية العشوائية، لكن مع وجود اختلاف فقط في التدرج على محور العيّنات، نظراً لاختلاف قيمة المعامل الرقمي الخاص بهذه السعات ( العلاقات 25- 26- 27). وتبين الأشكال الملحقة شبكة المنحنيات البيانية المذكورة.

قبل مناقشة النتائج (شبكة المنحنيات البيانية)، ينبغي الإشارة إلى أن هذه الشبكة هي شبكة عامة تصلح للاستخدام بالنسبة لأي سفينة تتمتع ببارامترات معينة، وذلك لتحديد سلوك السفينة المتأرجحة عرضياً بفعل الأمواج غير المنتظمة التي هي أقرب ما تكون إلى الواقع. يمكن تكثيف منحنيات هذه الشبكة، بالإضافة إلى توسيع مجالاتها بسهولة من خلال التحكم بمعطيات برنامج الحاسب المعد وفقاً للنموذج الرياضي المقترح. لتحليل تأثير بارامترات السفينة على سلوك السفينة المتأرجحة عرضياً تم بصورة إضافية إنشاء مجموعة من المنحنيات البيانية المساعدة انطلاقاً من منحنيات الشبكة المذكورة بغية التركيز على توضيح تأثير كل بارامتر من بارامترات السفينة. استناداً إلى تحليل الأشكال البيانية والمنحنيات المساعدة تم التوصل إلى بعض النتائج والملاحظات الآتية:

1- إن ازدياد سرعة الرياح  $v$  وازدياد الارتفاع الفعّال للأمواج  $\zeta_{0.1/3}$  يسبب في ازدياد سعة التآرجحات العرضية العشوائية، نظراً لازدياد الطاقة الكلية للأمواج التي تتناسب مع مربع الارتفاع الفعّال للأمواج.

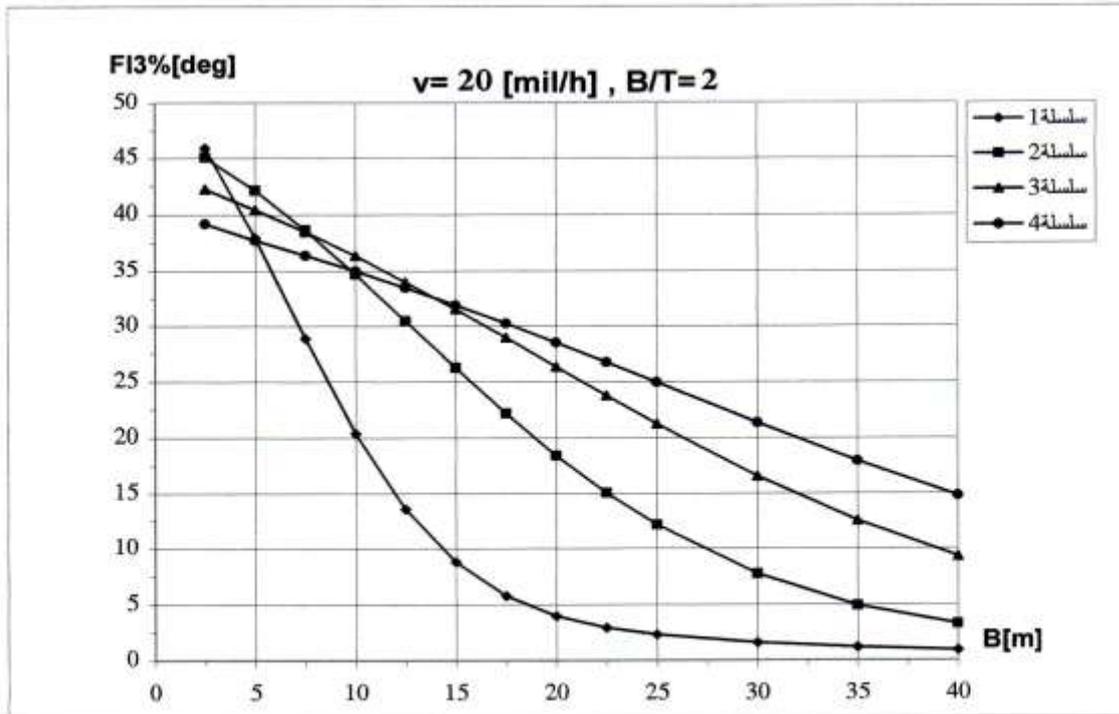
2- إن ازدياد النسبة  $B/T$  وتناقص غاطس السفينة عند قيمة معينة للعرض  $B$  ( $T = \frac{1}{B/T} B$ ) يسبب في ازدياد

سعة التآرجحات العرضية العشوائية بنسب منخفضة تزداد قليلاً مع ازدياد النسبة  $GM_0/B$  ، مما يؤكد أن لغاطس السفينة تأثير ضعيف على البارامترات المميزة للتآرجحات العرضية العشوائية.

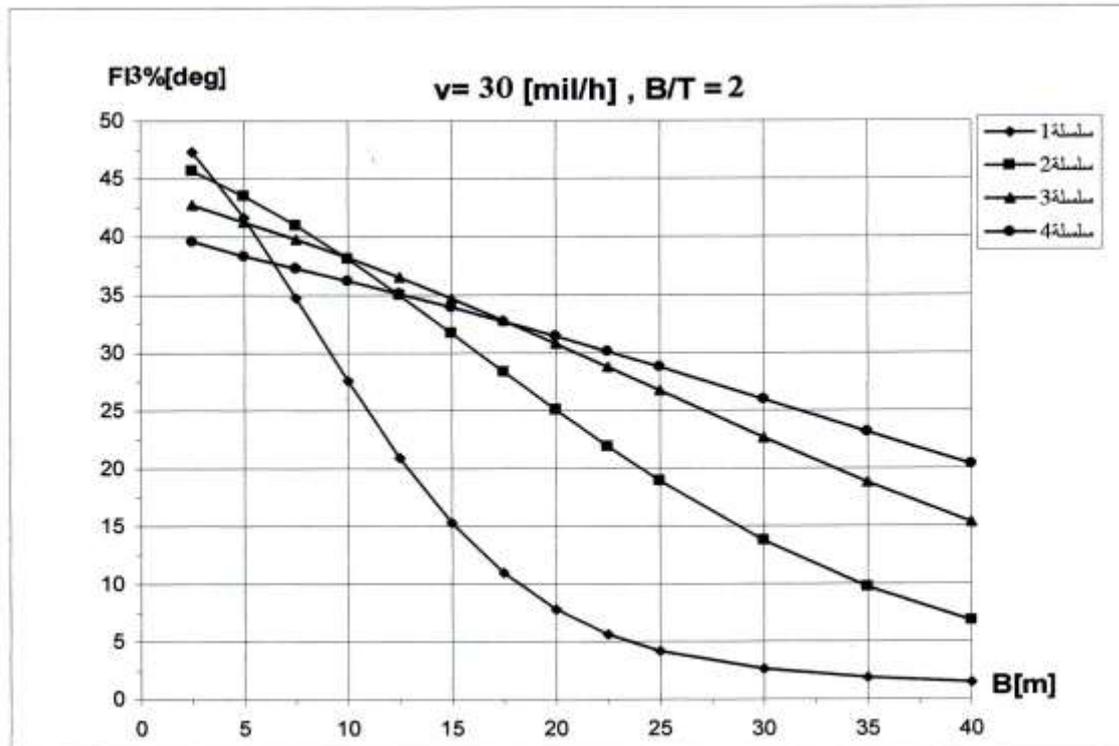
3- إن ازدياد العرض  $B$  يسبب في تناقص سعة التآرجحات العرضية العشوائية مهما كانت قيمة كل من  $GM_0/B$  ،  $B/T$  ،  $v$  . يعود السبب في ذلك إلى أن تزايد العرض  $B$  سيترافق بتزايد عزم عطالة كتلة السفينة بالنسبة لمحورها الطولي  $Gx$  ، مما يسبب في ازدياد مقدار العزم الديناميكي المتعلق بعطالة كتلة السفينة والذي يتجه باتجاه معاكس لاتجاه الانحراف الزاوي الديناميكي الحاصل بفعل العزم التحريضي للأمواج. أيضاً يترافق تزايد

العرض  $B$  للسفينة بتزايد مقدار عزم الاستبدال الذي يتجه باتجاه معاكس لاتجاه الانحراف الزاوي الحاصل بصورة سكونية فيعمل على إعادة السفينة إلى وضعيتها الأولية كما هو معروف في علم اتزان السفن [10,11].

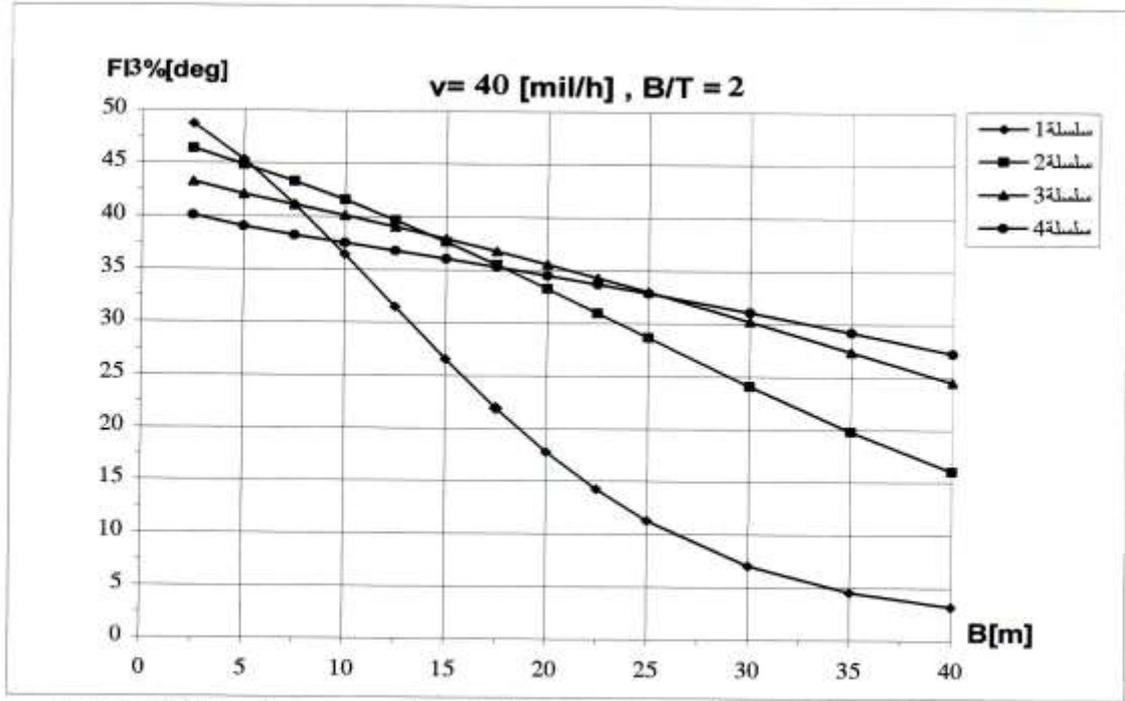
4 - عند دراسة تأثير تغير النسبة  $GM_0 / B$  على تغير سعة التأرجحات العرضية العشوائية، أي عند دراسة تأثير تغير ارتفاع الميتاسنتر العرضي الأولي للسفينة  $GM_0$  بفعل تغير حالة التحميل للسفينة ذات العرض  $B$  ( $GM_0 = \frac{GM_0}{B} B$ )، يمكن تمييز وجود ثلاثة مناطق رئيسية على شبكة المنحنيات تتالي خلف بعضها بعض. تظهر المنطقة الأولى عند قيم  $B$  الصغيرة وفيها يحدث تناقص لسعة التأرجحات العرضية العشوائية مع ازدياد  $GM_0$ . إن هذه المنطقة هي في الواقع منطقة ديناميكية تتزاح باتجاه تزايد قيم  $B$  على محور السينات مع ازدياد قيم كل من  $B/T$ ,  $\nu$ . تأتي المنطقة الثانية مباشرة بعد المنطقة الأولى باتجاه تزايد قيم  $B$ . في هذه المنطقة قد يترافق ازدياد  $GM_0$  بازدياد أو تناقص سعة التأرجحات العرضية العشوائية. هذه المنطقة تعتبر أيضاً منطقة ديناميكية تتزاح باتجاه تزايد قيم  $B$  على محور السينات مع ازدياد قيم كل من  $B/T$ ,  $\nu$ . يلي المنطقة الثانية ظهور منطقة ثالثة باتجاه تزايد قيم  $B$  وفيها يترافق ازدياد  $GM_0$  بازدياد سعة التأرجحات العرضية العشوائية. تعتبر أيضاً هذه المنطقة كمنطقة ديناميكية تتزاح باتجاه تزايد قيم  $B$  على محور السينات مع ازدياد قيم كل من  $B/T$ ,  $\nu$ . إن عدم ثبات مجالات هذه المناطق وتعلقها بباقي البارامترات المؤثرة على التأرجح العرضي المدروس لا يسمح باستيضاح مفهوم العلاقة بين ارتفاع الميتاسنتر العرضي الأولي للسفينة  $GM_0$  وسعة التأرجحات العرضية العشوائية، بمعنى أنه لا يمكن الاعتماد على  $GM_0$  في تقييم سلوك السفينة المتأرجحة عرضياً بفعل الأمواج. هذا الاستنتاج يتوافق مع الحالة السكونية للانحراف العرضي إذ لا يعتمد كما هو معروف في علم اتزان السفن على ارتفاع الميتاسنتر العرضي الأولي للسفينة  $GM_0$  في تقييم الحالة التوازنية عند زوايا الميلان العرضية الكبيرة. يتم عادة تقييم هذه الحالة باستخدام مفهوم منحنى أذرع عزم الاستبدال كتابع لزوايا الميلان العرضية وفقاً لمعايير موضوعة من قبل IMO المنظمة البحرية الدولية (International Maritime Organization) [10,11]. للتحكم بسلوك السفينة المتأرجحة عرضياً بفعل الأمواج تستخدم أجهزة فرملة أو تخامد تعمل من حيث المبدأ على زيادة عزم التخامد الديناميكي كالأرينة الجانبية أو أرينة القاع أو خزانات الاستقرار. يمكن أيضاً التحكم بسلوك السفينة المتأرجحة عرضياً من خلال تغيير سرعة السفينة وزاوية التوجيه، أي الزاوية بين اتجاه حركة السفينة واتجاه انتشار الأمواج. أن مثل هذه القضايا جديرة بالاهتمام وتصلح لأن تكون هدفاً لدراسات أخرى.



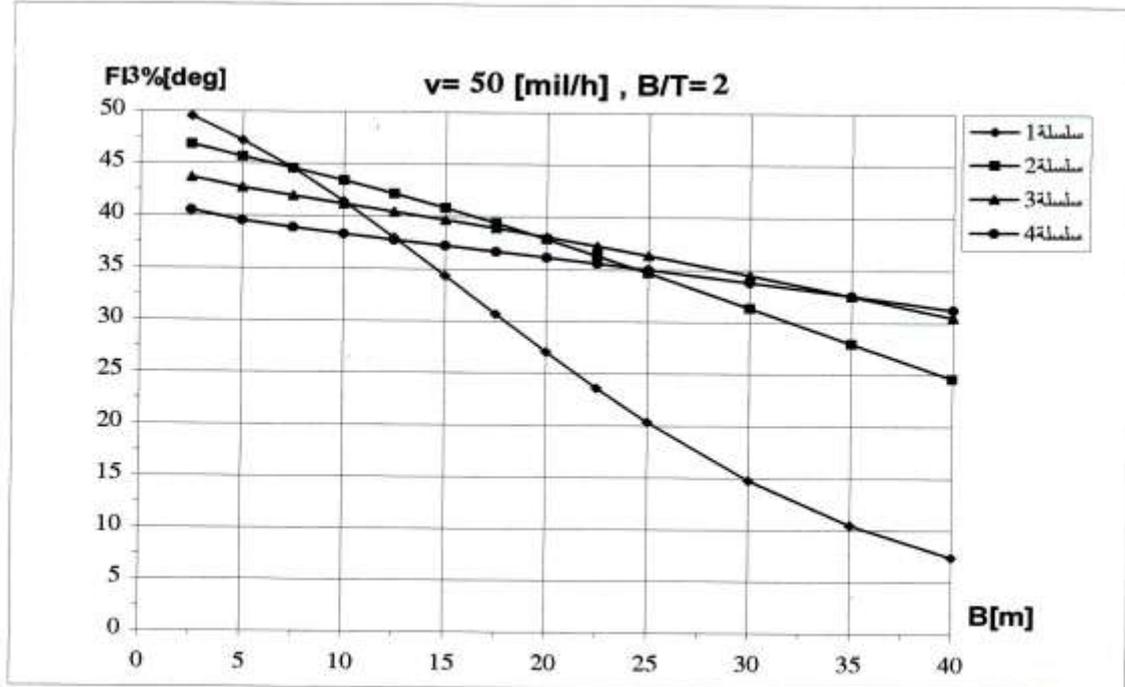
الشكل ( 2 ) منحنيات تغير السرعة مع 3% أمان كتابع لعرض السفينة  $B$  بدلالة  $v$  و  $B/T$  و قيم مختلفة ل  $GM_0 / B$   
 سلسلة 1 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.05$  ، سلسلة 2 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.1$  ، سلسلة 3 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.15$  ، سلسلة 4 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.2$



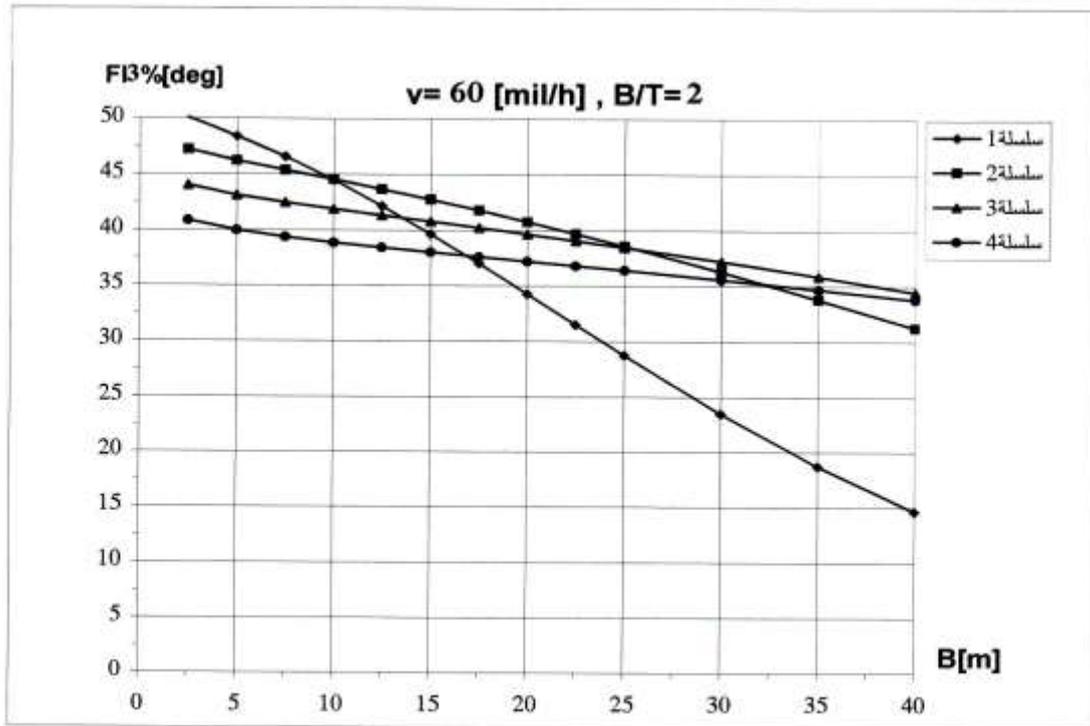
الشكل ( 3 ) منحنيات تغير السرعة مع 3% أمان كتابع لعرض السفينة  $B$  بدلالة  $v$  و  $B/T$  و قيم مختلفة ل  $GM_0 / B$   
 سلسلة 1 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.05$  ، سلسلة 2 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.1$  ، سلسلة 3 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.15$  ، سلسلة 4 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.2$



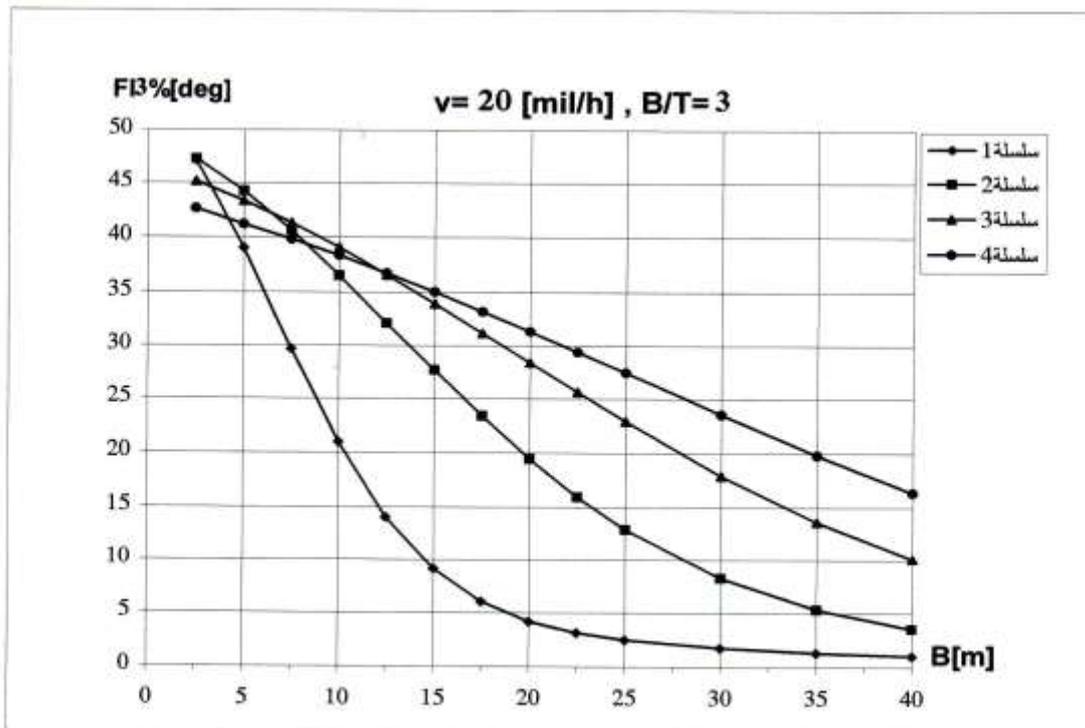
الشكل ( 4 ) منحنيات تغير السعة مع 3% أمان كتابع لعرض السفينة  $B$  بدلالة  $v$  و  $B/T$  و قيم مختلفة ل  $GM_0 / B$   
سلسلة 1 -  $GM_0 / B = 0.05$  ، سلسلة 2 -  $GM_0 / B = 0.1$  ، سلسلة 3 -  $GM_0 / B = 0.15$  ، سلسلة 4 -  $GM_0 / B = 0.2$



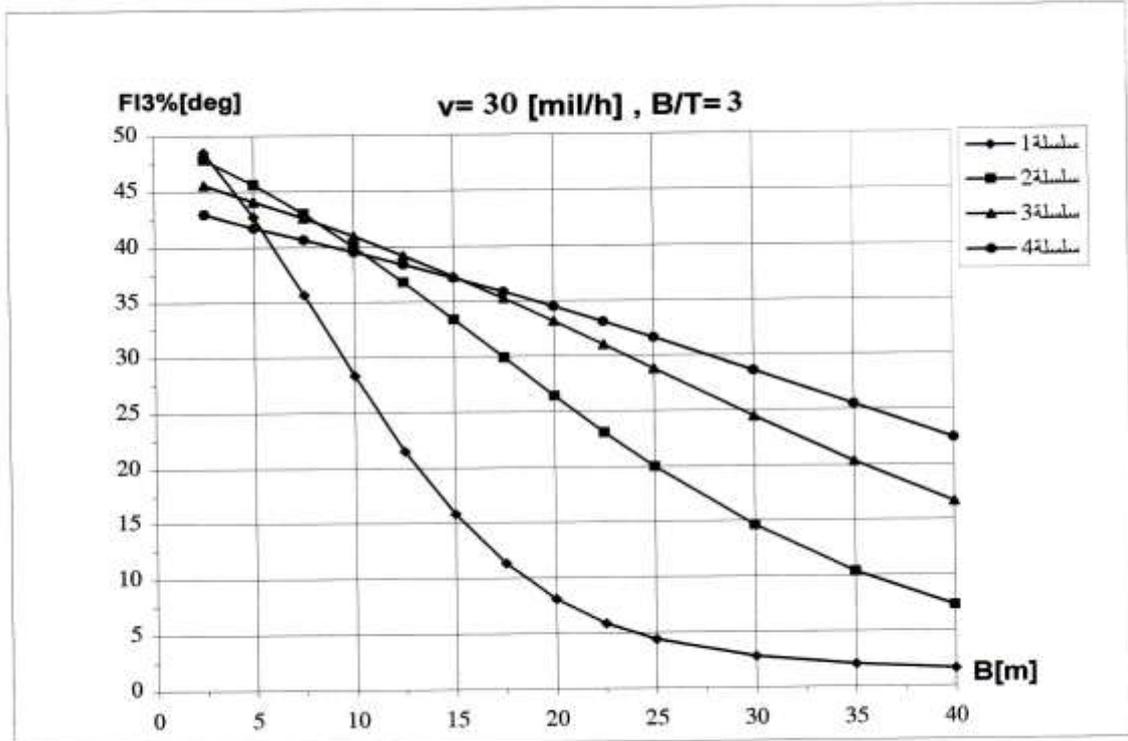
الشكل ( 5 ) منحنيات تغير السعة مع 3% أمان كتابع لعرض السفينة  $B$  بدلالة  $v$  و  $B/T$  و قيم مختلفة ل  $GM_0 / B$   
سلسلة 1 -  $GM_0 / B = 0.05$  ، سلسلة 2 -  $GM_0 / B = 0.1$  ، سلسلة 3 -  $GM_0 / B = 0.15$  ، سلسلة 4 -  $GM_0 / B = 0.2$



الشكل ( 6 ) منحنيات تغير السرعة مع 3% أمان كتابع لعرض السفينة  $B$  بدلالة  $v$  و  $B/T$  و قيم مختلفة ل  $GM_0/B$   
 سلسلة 1 -  $GM_0/B = 0.05$  ، سلسلة 2 -  $GM_0/B = 0.1$  ، سلسلة 3 -  $GM_0/B = 0.15$  ، سلسلة 4 -  $GM_0/B = 0.2$

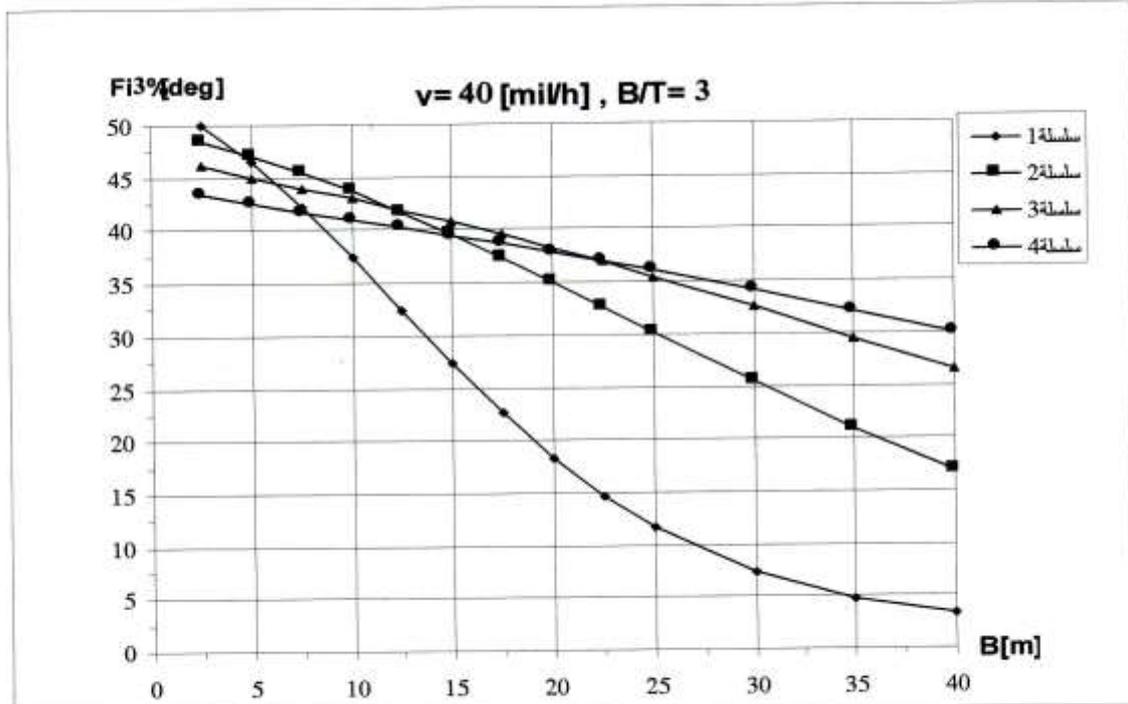


الشكل ( 7 ) منحنيات تغير السرعة مع 3% أمان كتابع لعرض السفينة  $B$  بدلالة  $v$  و  $B/T$  و قيم مختلفة ل  $GM_0/B$   
 سلسلة 1 -  $GM_0/B = 0.05$  ، سلسلة 2 -  $GM_0/B = 0.1$  ، سلسلة 3 -  $GM_0/B = 0.15$  ، سلسلة 4 -  $GM_0/B = 0.2$



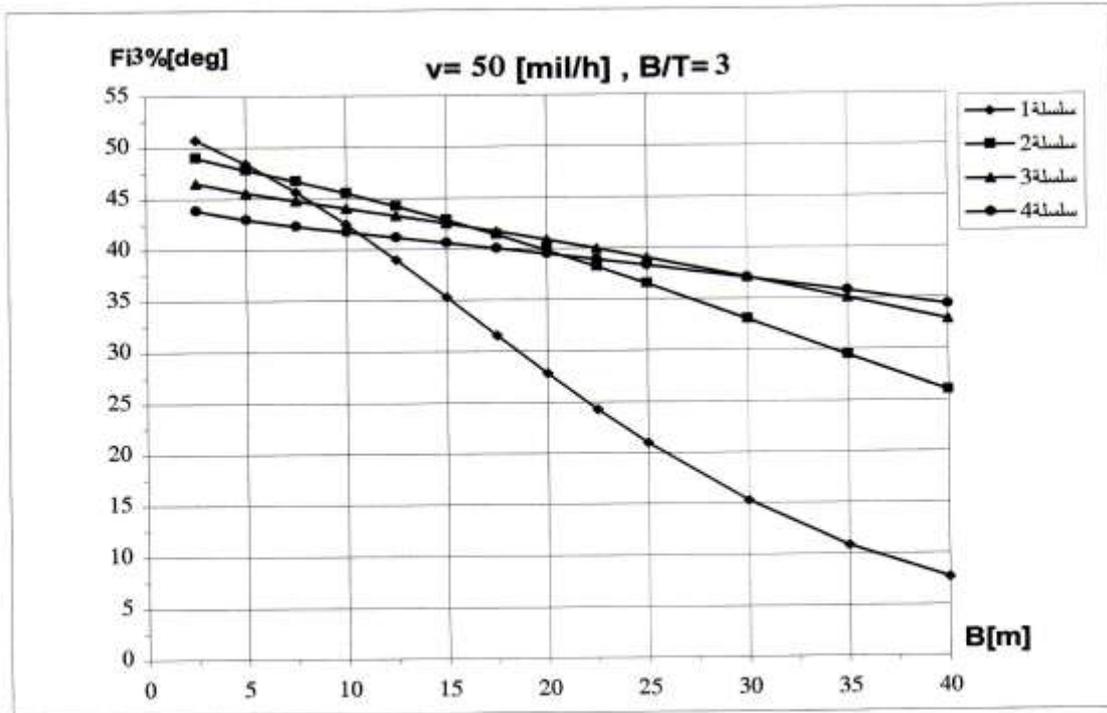
الشكل (8) منحنيات تغير السعة مع 3% أمان كتابع لعرض السفينة  $B$  بدلالة  $v$  و  $B/T$  و قيم مختلفة ل  $GM_0 / B$

$$\frac{GM_0}{B} = 0.2 \text{ - سلسلة 4, } \frac{GM_0}{B} = 0.15 \text{ - سلسلة 3, } \frac{GM_0}{B} = 0.1 \text{ - سلسلة 2, } \frac{GM_0}{B} = 0.05 \text{ - سلسلة 1}$$

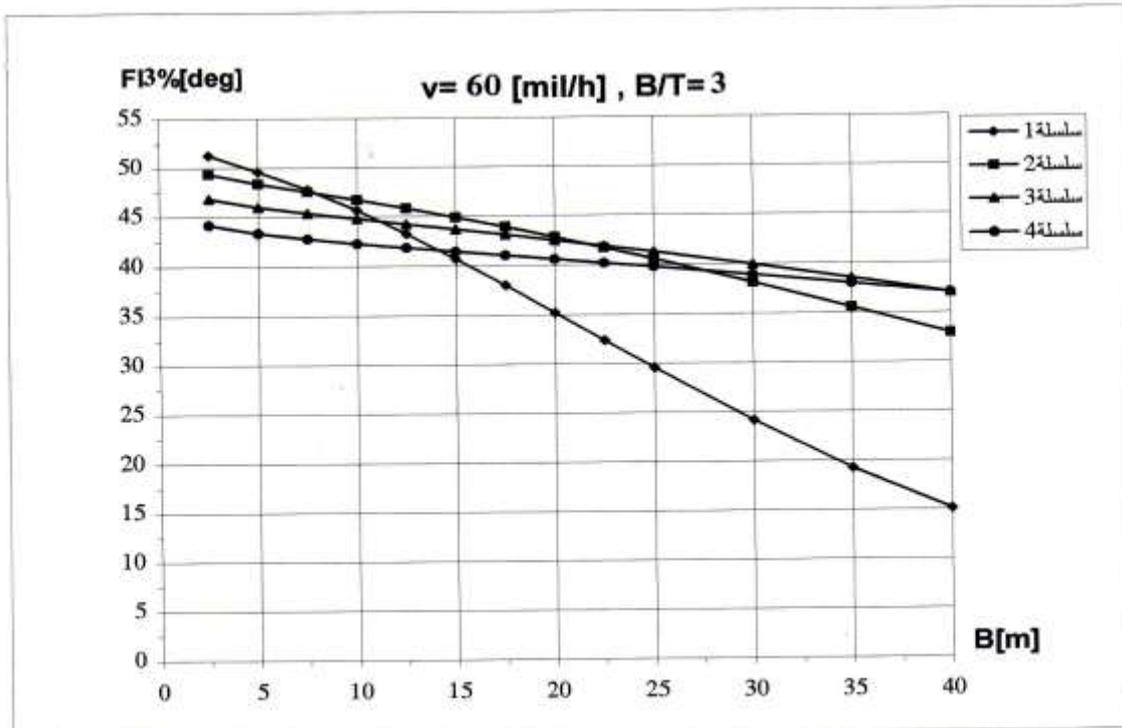


الشكل (9) منحنيات تغير السعة مع 3% أمان كتابع لعرض السفينة  $B$  بدلالة  $v$  و  $B/T$  و قيم مختلفة ل  $GM_0 / B$

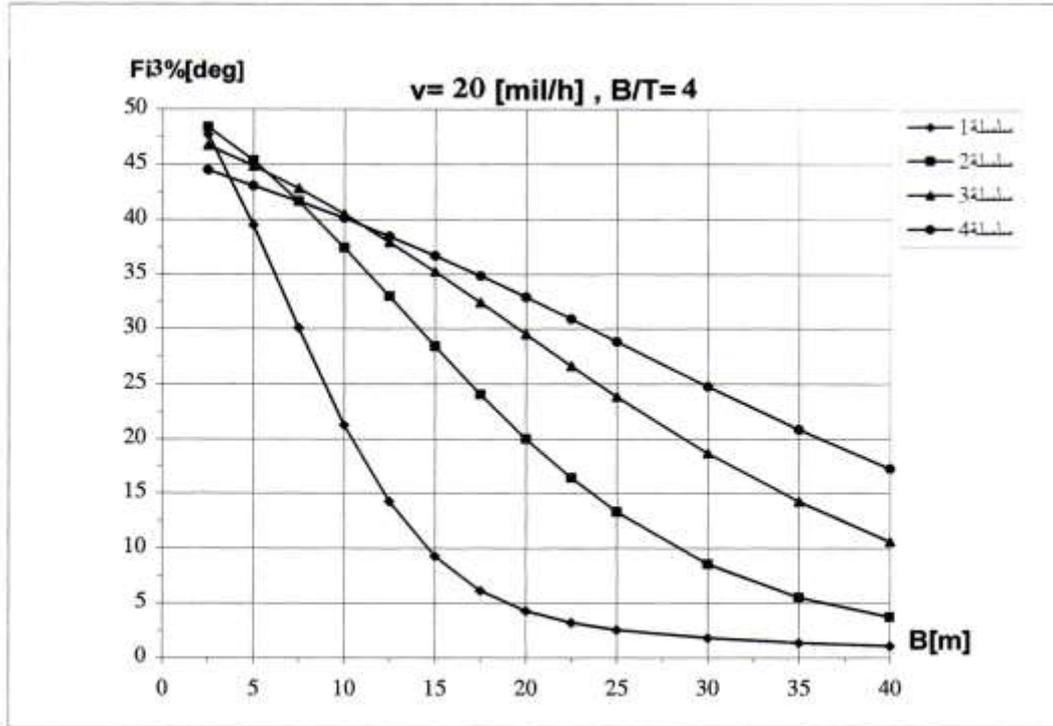
$$\frac{GM_0}{B} = 0.2 \text{ - سلسلة 4, } \frac{GM_0}{B} = 0.15 \text{ - سلسلة 3, } \frac{GM_0}{B} = 0.1 \text{ - سلسلة 2, } \frac{GM_0}{B} = 0.05 \text{ - سلسلة 1}$$



الشكل ( 10 ) منحنيات تغير المسعة مع 3% أمان كتابع لعرض السفينة  $B$  بدلالة  $v$  و  $B/T$  و قيم مختلفة ل  $GM_0 / B$   
سلسلة 1 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.05$  ، سلسلة 2 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.1$  ، سلسلة 3 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.15$  ، سلسلة 4 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.2$

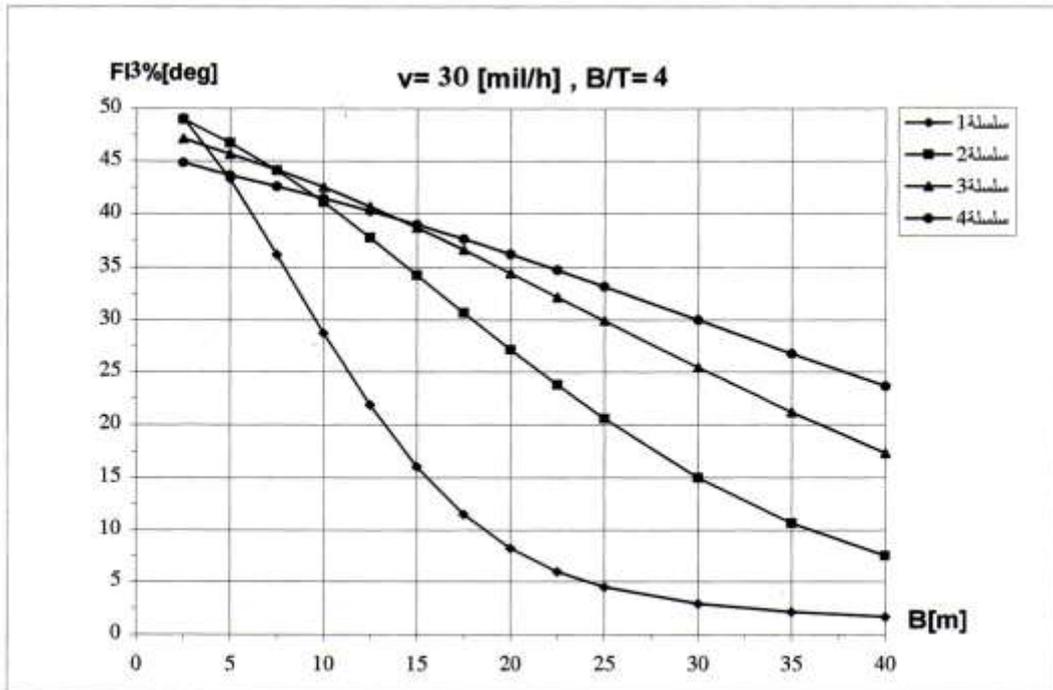


الشكل ( 11 ) منحنيات تغير المسعة مع 3% أمان كتابع لعرض السفينة  $B$  بدلالة  $v$  و  $B/T$  و قيم مختلفة ل  $GM_0 / B$   
سلسلة 1 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.05$  ، سلسلة 2 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.1$  ، سلسلة 3 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.15$  ، سلسلة 4 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.2$



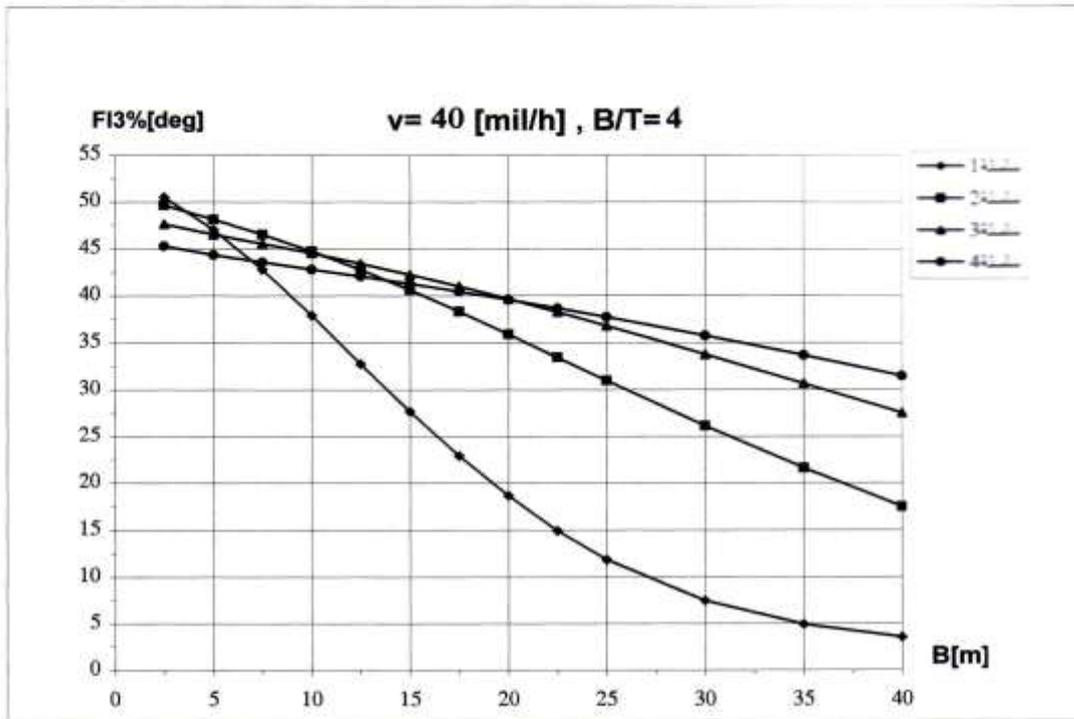
الشكل ( 12 ) منحنيات تغير السعة مع 3% أمان كتابع لعرض السفينة  $B$  بدلالة  $v$  و  $B/T$  و قيم مختلفة ل  $GM_0 / B$

سلسلة 1-  $\frac{GM_0}{B} = 0.05$  ، سلسلة 2-  $\frac{GM_0}{B} = 0.1$  ، سلسلة 3-  $\frac{GM_0}{B} = 0.15$  ، سلسلة 4-  $\frac{GM_0}{B} = 0.2$

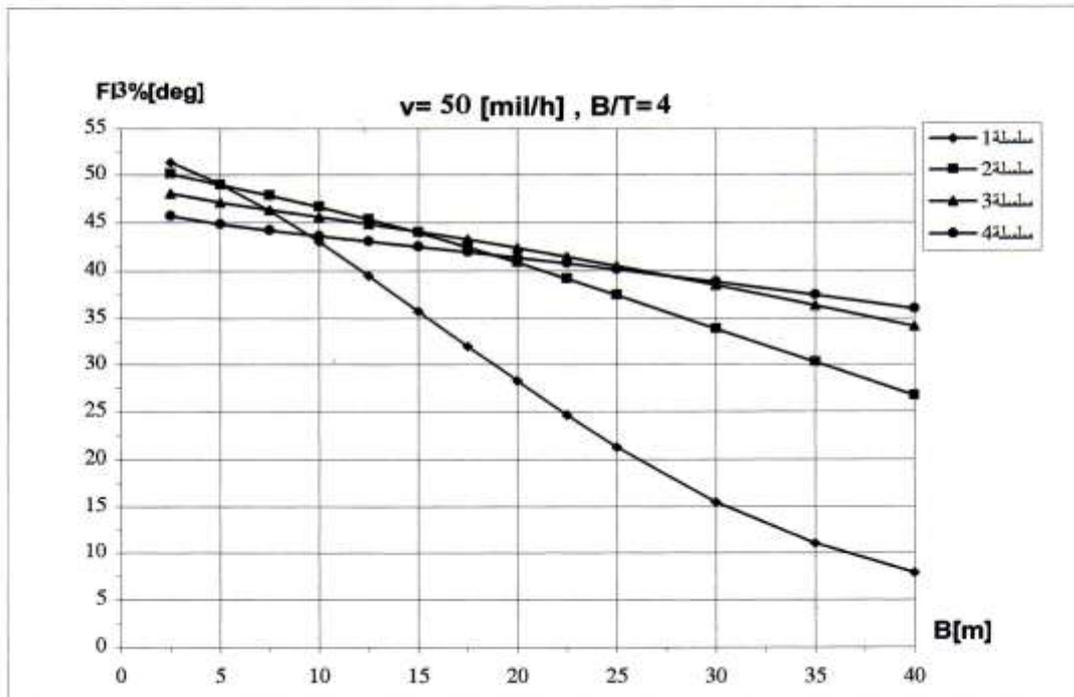


الشكل ( 13 ) منحنيات تغير السعة مع 3% أمان كتابع لعرض السفينة  $B$  بدلالة  $v$  و  $B/T$  و قيم مختلفة ل  $GM_0 / B$

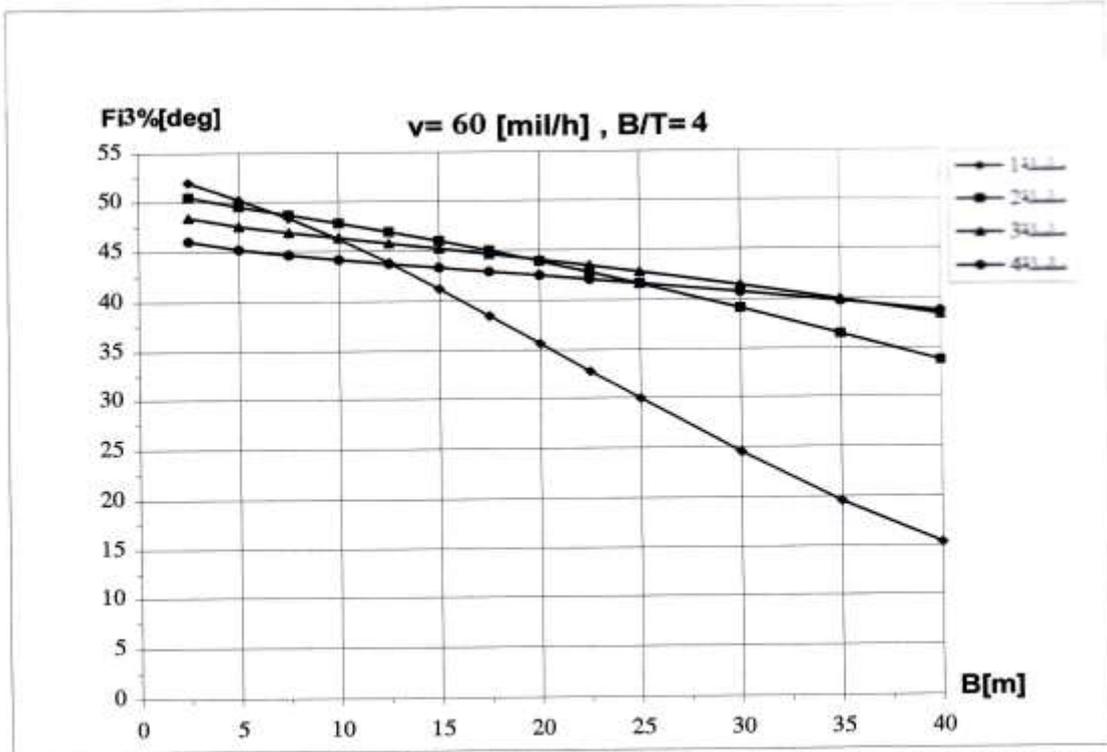
سلسلة 1-  $\frac{GM_0}{B} = 0.05$  ، سلسلة 2-  $\frac{GM_0}{B} = 0.1$  ، سلسلة 3-  $\frac{GM_0}{B} = 0.15$  ، سلسلة 4-  $\frac{GM_0}{B} = 0.2$



الشكل ( 14 ) منحنيات تغير السعة مع 3% أمان كتابع لعرض السفينة  $B$  بدلالة  $v$  و  $B/T$  و قيم مختلفة ل  $GM_0 / B$   
 سلسلة 1 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.05$  ، سلسلة 2 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.1$  ، سلسلة 3 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.15$  ، سلسلة 4 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.2$



الشكل ( 15 ) منحنيات تغير السعة مع 3% أمان كتابع لعرض السفينة  $B$  بدلالة  $v$  و  $B/T$  و قيم مختلفة ل  $GM_0 / B$   
 سلسلة 1 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.05$  ، سلسلة 2 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.1$  ، سلسلة 3 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.15$  ، سلسلة 4 -  $\frac{GM_0}{B} = 0.2$



الشكل ( 16 ) منحنيات تغير السرعة مع 3% أمان كتابع لعرض السفينة B بدلالة v و B/T و قيم مختلفة لـ  $GM_0 / B$

$$\frac{GM_0}{B} = 0.2 \text{ - سلسلة 4 ، } \frac{GM_0}{B} = 0.15 \text{ - سلسلة 3 ، } \frac{GM_0}{B} = 0.1 \text{ - سلسلة 2 ، } \frac{GM_0}{B} = 0.05 \text{ - سلسلة 1}$$

## المراجع:

1. Dudziak, J: *Okręt na fali*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1980.
2. Pawłowski, M: *Równania ruchu Okrętu*, Raport Techniczny Nr 47, Gdańsk 2002.
3. Dudziak, J: *Teoria okrętu*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1988.
4. Wełnicki, W: *Mechanika ruchu okrętu*, Skrypt dla studentów, Instytut Okrętowy PG, Gdańsk 1989.
5. Błocki, W: *Bezpieczeństwo stateczności statku w sytuacjach rezo- nansowych*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2000.
6. Pawłowski, M: *Wyznaczanie sił Froude, A-Kryłowa za pomocą ob- liczeń wypornościowych dla falowania o dużej intensywności*, Praca Badawcze Nr 3/99/DS, Gdańsk 1999.
7. Pawłowski, M: *Liniowy model ruchów statku na fali nieregularnej*, Raport Techniczny Nr 41, Gdańsk 2001.
8. Polaki Rejestr Statków : *Ship motion and loads - formulation of rules*, Publication No.2, Gdańsk 1993.
9. عثمان، محمود: *الأسس العامة للتحليل العددي* ، مطبوعات جامعة تشرين ، 1987.
10. حوا، رامي - حمود ، بسام - بريهان ، ميشيل : *مدخل إلى الهندسة البحرية* ، مطبوعات جامعة تشرين ، 2005.
11. Kabaciński, J: *Stateczność I niezatapialność statku*, Wyższa Szkoła Morska, Szczecin 1995.