

دراسة تأثير البارامترات الرئيسية لبدن السفينة في سلوك منحني الاتزان السكوني

الدكتور ميشيل بربهان*

(تاريخ الإيداع 24 / 9 / 2007. قُبِلَ للنشر في 7/11/2007)

□ الملخص □

يُعالج البحث واحدة من القضايا الهامة الخاصة بمراكز الأبحاث وتراسانات بناء السفن التي تتعلق بطرائق إنشاء ودراسة خصائص منحني الاتزان السكوني الذي يُعبر عن الحالة الحقيقية لإمكانات السفينة في المحافظة على توازنها أثناء إبحارها أو رسوها في الموانئ. يتضمن هذا البحث شرح الطرائق التحليلية والتقريبية المستخدمة في إنشاء منحني الاتزان السكوني في المراحل الأولى لتصميم السفن، والتي تُستكمل بطرائق تجريبية تُستخدم في المراحل التالية للتصميم وذلك لتدقيق شكل منحني الاتزان السكوني (منحني أذرع عزوم الاستبدال) الذي تمّ الحصول عليه بالطرائق التحليلية. تمّ إعداد برنامج حاسوبي بلغة (Visual Basic) لتنفيذ الحسابات وفقاً للنموذج الذي تمّ إعداده. سمح ذلك بدراسة تأثير البارامترات الأساسية التصميمية والاستثمارية لبدن السفينة (عرض السفينة B ، الارتفاع الجانبي H أو ارتفاع الحد الحر F_b ، غاطس السفينة T وارتفاع مركز ثقل السفينة z_G) في سلوك منحني الاتزان السكوني وبارامتراته المميزة التي تُستخدم في معايرة أمان السفن التوازني وفقاً لمتطلبات المنظمة البحرية الدولية IMO وهيئات الإشراف والتصنيف المعتمدة عالمياً.

كلمات مفتاحية: اتزان سفن - منحني الاتزان السكوني - منحني أذرع عزوم الاستبدال

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

A Study of Main Parameters Impact of Ship Hull on Behavior of Static Stability Curve

Dr. Michel Barbhan *

(Received 24 / 9 / 2007. Accepted 7/11/2007)

□ ABSTRACT □

This paper deals with the methods of drawing and studying characteristics of static stability curve which conveys the real state of ship capacity in keeping its balance during sailing or standing at sea ports.

This research includes an explanation of analytical and approximate methods used in drawing static stability curve in initial stages of ship design which are later completed by empirical methods used in advanced stages of design aiming at checking shape of static stability curve (curve of righting levers) obtained by analytical methods.

A computer program was prepared by *Visual Basic* to implement the calculations as per mathematical model. This made it possible to study the impact of operational and design basic parameters of ship hull (ship breadth B , depth of ship H or free board F_b , draught T , height of center of gravity z_G) on the behavior of curve of static stability and its extinct parameters used in evaluating safety of ship balance as per requirements of International Maritime Organization (IMO) and international classification societies (shipping registers).

Key Words: *Ship Stability*, Static Stability Curve, Curve of Righting Levers.

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

مقدمة:

يُعرّف الاتزان على أنه ميل أو نزعة السفينة المنحرفة عن وضعيتها توازنها للعودة إلى وضعيتها الأولية عند انعدام السبب الذي أدى إلى هذا الانحراف.

نعلم أن الانحرافات الممكنة للسفينة عن وضعيتها توازنها الأولية هي انحرافات خطية وانحرافات زاوية. سنُدرس في هذا البحث الانحرافات الحاصلة للسفينة بالنسبة إلى المحور الطولي x ، أي في المستوى العرضي oyz . يُسمى هذا الانحراف بالميلان العرضي للسفينة، وهو ناتج عن تأثير عزم خارجي، يُدعى بعزم الميلان العرضي والمرتبطة بما يُسمى بالاتزان أو الاستقرار العرضي للسفينة.

تُجرى دراسة الاتزان العرضي للسفن إلى شقين أو جزأين منفصلين بحسب مقدار الانحراف أو الميلان العرضي الحاصل، وهنا نميز ما يُسمى بالاتزان العرضي عند زوايا الميلان العرضي الصغيرة، حيث أن الانحراف الحاصل يتناسب خطياً مع عزم الميلان الخارجي المؤثر، ونميز أيضاً ما يُسمى بالاتزان العرضي للسفن عند زوايا الميلان العرضي الكبيرة، حيث تكون العلاقة بين الانحراف الحاصل وعزم الميلان المؤثر غير خطية [1].

أثبتت الدراسات صحة الفرضية التي ترى أن ارتفاع الميتاسنتر الأولي h_o يُمثل مقدراً ثابتاً عند زوايا الميلان العرضي التي لا تتجاوز 10° ، حيث إن الأخطاء المرتكبة في مثل هذه الحالات صغيرة وليس لها أية أهمية عملياً [2].

عند زوايا الميلان العرضي الكبيرة (أكبر من 10°) لا يُمكن افتراض أن منحنى مراكز الطفو يمثل قوساً من دائرة مركزها الميتاسنتر العرضي الأولي M_o . في الواقع يُمثل هذا المنحنى منحنى مركباً من مجموعة أقواس لدوائر ذات أنصاف أقطار مختلفة ومراكز مختلفة. أما الميتاسنتر العرضي فيكون عبارة عن نقطة متغيرة تُمثل المركز اللحظي لأقواس الدوائر المشكلة لمنحنى مراكز الطفو. في هذه الحالة يبتعد الميتاسنتر على نحو واضح عن نقطة بداية منحنى منشأ الميتاسنتر، ويبتعد أيضاً عن مستوى تناظر بدن السفينة. وعليه تسقط فرضية ثبات موضع الميتاسنتر، ومن ثمة ثبات قيمة ارتفاع الميتاسنتر [3].

تمّ قديماً تقييم اتزان السفن استناداً لقيمة ارتفاع الميتاسنتر الأولي h_o فقط، إلا أن العدد الكبير لحوادث غرق السفن دفع الباحثين باتجاه إجراء تحليل دقيق لمثل هذه القضايا. ونتيجة لذلك تم إدخال ما يُعرف بمنحنى أذرع عزوم الاستعداد إلى حسابات الاتزان، أو ما يُسمى بمنحنى REED (عموماً يُسمى هذا المنحنى بمنحنى الاتزان السكوني) [1]. يُعرف منحنى الاتزان السكوني بأنه منحنى العلاقة بين ذراع عزم الاستعداد l وزاوية الميلان العرضي للسفينة. يسمح هذا المنحنى بتحديد مقدار ذراع عزم الاستعداد عند أي زاوية ميلان عرضي للسفينة عند قوة طفو معينة ومركز ثقل غير متغير.

اهتمت المنظمة البحرية العالمية **IMO** (International Maritime Organization) بأمان السفن التوازني. ومنذ عام 1962 قامت هذه المنظمة بإجراء الأبحاث العلمية البحرية التي تهدف إلى صياغة معايير عالمية خاصة باتزان السفن التجارية وسفن الصيد. تعتمد معايير الاتزان المقدمة من قبل IMO، وأيضاً المعايير المعتمدة كقوانين في العديد من البلدان على الطرائق الحسابية المرتبطة بعلم اتزان السفن، وخاصة، يُستخدم منحنى أذرع عزوم الاستعداد في عملية المعايرة، من خلال تقييم مسار هذا المنحنى، وبارامتراته المميزة وقيم هذا المنحنى عند زوايا الميلان العرضي المختلفة [4].

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في معالجته لوحدة من أهم المسائل المتعلقة بتأمين حيوية السفينة وسلامة إبحارها وذلك من خلال الحصول على منحني الاتزان السكوني الذي يُعبر عن الحالة الحقيقية لإمكانات السفينة في المحافظة على أمانها التوازني أثناء إبحارها أو رسوها في الموانئ. تتحصر أهداف هذا البحث بما يلي:

1. شرح الطرائق التحليلية والتقريبية المستخدمة في إنشاء منحني الاتزان السكوني في المراحل الأولى لتصميم السفن والتي تُستكمل بطرائق تجريبية تُستخدم في المراحل التالية للتصميم وذلك لتدقيق شكل منحني الاتزان السكوني الذي تم الحصول عليه بالطرائق التحليلية.
2. إعداد برنامج حاسوبي لتنفيذ الحسابات وفق النماذج التي تم إعدادها.
3. دراسة تأثير بعض البارامترات الأساسية التصميمية والاستثمارية للسفينة في سلوك منحني الاتزان السكوني وبارامتراته المميزة التي تُستخدم في تقييم ومعايرة أمان السفن التوازني وفقاً لمتطلبات المنظمة البحرية الدولية وهيئات الإشراف والتصنيف المعتمدة عالمياً.

الأسس النظرية للنموذج الرياضي:

سننظر في بداية البحث لاستعراض العلاقات التحليلية الخاصة بحساب ذراع عزم الاستعداد وإحداثيات مركز الطفو عند ميلان السفينة عرضياً على النحو التالي:

عند ميلان السفينة عرضياً بزوايا مختلفة، يرسم مركز الطفو F_ϕ خطاً منحنياً يُدعى بمنحني مراكز الطفو الواقع في المستوى القطاعي العرضي. تكون خطوط تأثير قوة الطفو D ووزن السفينة P متوازية ومتعامدة مع خط الماء الجديد W_ϕ مما يؤدي إلى نشوء مزدوجة تسعى إلى إعادة السفينة إلى وضعيتها الأولية بعد زوال السبب الذي أدى إلى انحرافها، الشكل (1).

المسافة بين خط تأثير هاتين القوتين تساوي $GH = \bar{l}$ ، وتُدعى بذراع الاتزان السكوني أو ذراع عزم الاستعداد. من الشكل (1)، نجد أن:

$$l = l_K - l_C = l_{K_I} - l_{C_I} \quad (1)$$

حيث إن:

$$l_C = a \cdot \sin \phi \quad (2)$$

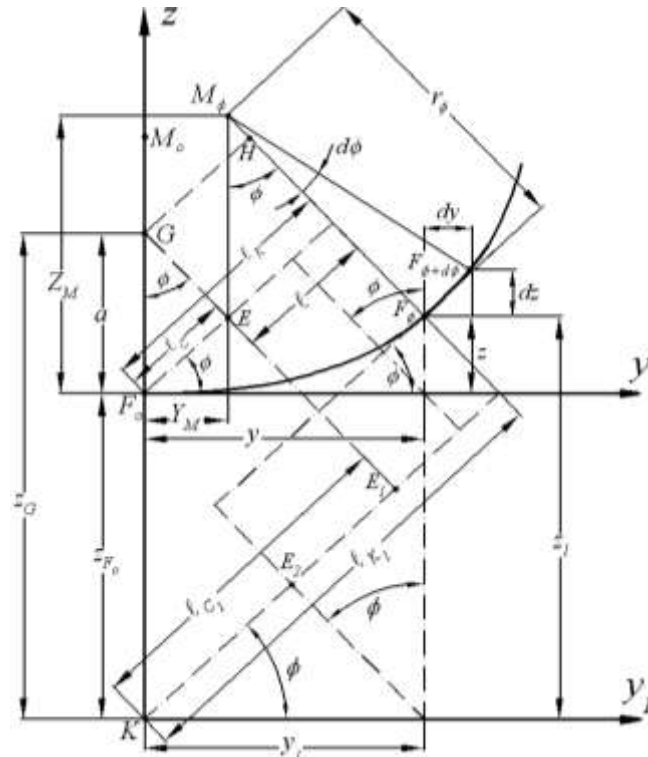
$$l_{C_I} = z_G \cdot \sin \phi \quad (3)$$

تدعى المقادير l_K, l_{K_I} بأذرع الاتزان السكوني العرضي المتعلقة بالشكل، لأنها تتعلق فقط بشكل البدن والزوايا ϕ . أما المقادير l_C, l_{C_I} فتدعى بأذرع الاتزان السكوني العرضي المتعلقة بالوزن، لأنها تتعلق بتوزع الأوزان داخل السفينة وبارتفاع مركز ثقل السفينة z_G .

المقدار a يُمثل المسافة الشاقولية الفاصلة بين مركز ثقل السفينة ومركز الطفو F_O في الحالة الأولية من دون أي ميلان عرضي $\phi = 0$ ، ويساوي:

$$a = z_G - z_{F_0} \quad (4)$$

إن ذراع الاتزان السكوني المتعلق بالشكل l_K أو l_{K_1} وفقاً لمبدأ جملة المحاور الإحداثية المفروضة يمكن تحديده بواسطة إحداثيات مركز الطفو F_ϕ للسفينة المائلة عرضياً بزوايا ϕ .



الشكل (1) تحديد إحداثيات مركز الطفو عند زوايا الميلان الكبيرة

عند اختيار النقطة F_0 مبدأً لجملة المحاور الإحداثية كما في الشكل (1) سيعطى هذا الذراع وفقاً للعلاقة:

$$l_K = y \cdot \cos \phi + z \cdot \sin \phi \quad (5)$$

أما ذراع عزم الاستبدال أو ذراع الاتزان السكوني فيساوي [5]:

$$l = l_K - l_C = y \cdot \cos \phi + z \cdot \sin \phi - a \cdot \sin \phi \quad (6)$$

تمثل y, z إحداثيات مركز الطفو للسفينة المائلة عرضياً بزوايا ϕ بالنسبة إلى جملة محاور مبدؤها النقطة F_0 .

عند اختيار مبدأً لجملة المحاور الإحداثية في النقطة K الواقعة على الحافة العليا للقرينة سيعطى ذراع الاتزان السكوني المتعلق بالشكل وفقاً للعلاقة التالية، الشكل (1):

$$l_{K_1} = y_1 \cdot \cos \phi + z_1 \cdot \sin \phi \quad (7)$$

أما ذراع عزم الاستبدال فيساوي [5]:

$$l = l_{K_1} - l_{C_1} = y_1 \cdot \cos \phi + z_1 \cdot \sin \phi - z_G \cdot \sin \phi \quad (8)$$

تمثل y_1, z_1 إحداثيات مركز الطفو للسفينة المائلة بزوايا ϕ بالنسبة إلى جملة محاور مبدؤها النقطة K . العلاقة بين إحداثيات مركز الطفو (y, z) و (y_1, z_1) هي كالتالي:

$$\left. \begin{array}{l} y = y_I \\ z = z_I - z_{F_o} \end{array} \right\} \quad (9)$$

يُمكن تحديد إحداثيات منحني منشأ الميْتاسنتر (منحني M) بدلالة إحداثيات مركز الطفو F_ϕ ونصف قطر الميْتاسنتر الصغير r_ϕ وفقاً للعلاقات التالية، الشكل (1) [5]:

$$\left. \begin{array}{l} Y_M = y - r_\phi \cdot \sin \phi \\ Z_M = z + r_\phi \cdot \cos \phi \end{array} \right\} \quad (10)$$

أما ارتفاع الميْتاسنتر العام h_ϕ الذي يُمثل مشتق ذراع عزم الاستعداد بالنسبة إلى زاوية الميلان العرضي فيُعطى بالعلاقة التالية [5]:

$$h_\phi = r_\phi - y \cdot \sin \phi + z \cdot \cos \phi - a \cdot \cos \phi \quad (11)$$

من الشكل (1)، نجد أن:

$$\overline{HF}_\phi = y \cdot \sin \phi - z \cdot \cos \phi + a \cdot \cos \phi \quad (12)$$

ومنه:

$$h_\phi = r_\phi - \overline{HF}_\phi = \overline{M}_\phi H \quad (13)$$

إذاً ارتفاع الميْتاسنتر العام يمثل المسافة بين الميْتاسنتر الحقيقي اللحظي M_ϕ ومسقط مركز ثقل السفينة G على خط تأثير قوة الطفو.

تُحدد إحداثيات مركز الطفو للسفينة المائلة عرضياً بزاوية ϕ بدلالة نصف قطر الميْتاسنتر r_ϕ وفقاً للعلاقات التالية [4]، [5]:

$$y = \int_0^\phi r_\phi \cdot \cos \phi \cdot d\phi \quad (14)$$

$$z = \int_0^\phi r_\phi \cdot \sin \phi \cdot d\phi \quad (15)$$

ويُعطى نصف قطر الميْتاسنتر الصغير للسفينة المائلة عرضياً وفقاً للعلاقة التالية:

$$r_\phi = J_{\xi\phi} / V_\phi \quad (16)$$

حيث أن:

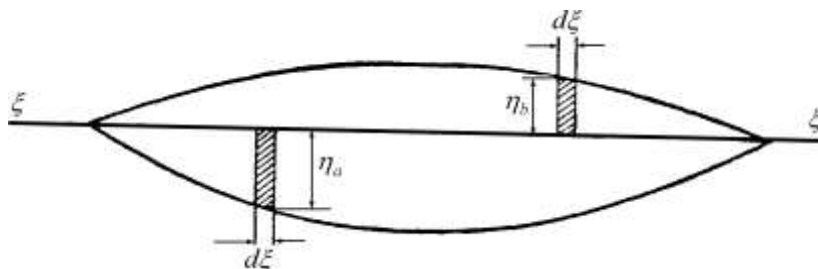
$J_{\xi\phi}$ - يُمثل عزم عطالة سطح الطفو عند خط الماء المتساوي الحجم W_ϕ بالنسبة إلى المحور الطولي المار بمركز ثقل هذا السطح.

V_ϕ - حجم الجزء الغاطس من البدن والمحدد بخط الماء المتساوي الحجم W_ϕ .

إذاً ينبغي في البداية تحديد المقدار $J_{\xi\phi}$ عند كل زاوية ميلان عرضي. لحساب هذا المقدار نتبع ما يلي:

تُحدد الإحداثيات العرضية (η_{a_i}, η_{b_i}) لسطح الطفو عند خط الماء المتساوي الحجم W_ϕ عند كل مقطع

عرضي وفقاً للتقسيم القطاعي العرضي المعتمد للسفينة، الشكل (2).



الشكل (2) سطح الطفو عند خط الماء المتساوي الحجم W_ϕ

بعد تحديد الإحداثيات العرضية لسطح الطفو عند خط الماء المتساوي الحجم W_ϕ يُمكن تحديد العناصر الهندسية لسطح الطفو المذكور على النحو التالي [2]:

1. مساحة سطح الطفو:

$$S_{WL\phi} = \int_{-L/2}^{+L/2} (\eta_a + \eta_b) \cdot d\xi \quad (17)$$

ينبغي الإشارة إلى أن الإحداثيات العرضية (η_{a_i}, η_{b_i}) تُؤخذ بالقيمة المطلقة بغض النظر عن إشارتها.

2. العزم السكوني لسطح الطفو عند خط الماء W_ϕ بالنسبة إلى المحور الطولي $(\xi - \xi_c)$ المار بمركز ثقل خط الماء W_o :

$$M_{\xi\phi} = \frac{1}{2} \cdot \int_{-L/2}^{+L/2} (\eta_a^2 - \eta_b^2) \cdot d\xi \quad (18)$$

3. بُعد مركز ثقل سطح الطفو عند خط الماء عن المحور الطولي $(\xi - \xi_c)$:

$$\eta_{C\phi} = \frac{M_{\xi\phi}}{S_{WL\phi}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \int_{-L/2}^{+L/2} (\eta_a^2 - \eta_b^2) \cdot d\xi}{\int_{-L/2}^{+L/2} (\eta_a + \eta_b) \cdot d\xi} \quad (19)$$

4. عزم عطالة سطح الطفو عند خط الماء W_ϕ بالنسبة إلى المحور الطولي $(\xi - \xi_c)$ المار بمركز ثقل خط الماء W_o :

$$J'_{\xi\phi} = \frac{1}{3} \cdot \int_{-L/2}^{+L/2} (\eta_a^3 \cdot d\xi + \eta_b^3 \cdot d\xi) \quad (20)$$

5. عزم عطالة سطح الطفو عند خط الماء W_ϕ بالنسبة إلى المحور الطولي المار بمركز ثقله:

$$J_{\xi\phi} = J'_{\xi\phi} - S_{WL\phi} \cdot \eta_{C\phi}^2 \quad (21)$$

إذاً ينبغي تحديد نصف قطر الميئاسنتر الصغير r_ϕ لكل خط من خطوط الماء المتساوية الحجم عند عدة زوايا ميلان عرضي متتالية من أجل $V = const$ ، ثم تحديد إحداثيات مركز الطفو للسفينة المائلة عرضياً، مما يُمكن بالنتيجة من تحديد أذرع الاتزان السكوني المتعلق بالشكل ℓ_K المقابلة لهذه الزوايا.

يتضح مما سبق أن صعوبة الحسابات تنحصر في تحديد ذراع الاتزان السكوني العرضي المتعلقة بالشكل l_K أو l_{K1} وهي تستند إلى رسم الخطوط النظرية لبدن السفينة، وتتطلب إجراء حسابات معقدة نسبياً لتحديد موضع مركز الطفو لكل حالة من حالات الميلان.

من الصعوبات الجمة التي تُرافق عملية تحديد خط الماء المتساوي الحجم W_ϕ عند كل زاوية ميلان، وجود بعض الفرضيات التي تبسط العمليات الحسابية الخاصة بألية الانتقال من خط الماء المساعد إلى خط الماء المتساوي الحجم W_ϕ عند كل زاوية ميلان ولكن على حساب دقة النتائج، لذلك تؤخذ بالحسبان الأخطاء المرتكبة عند قياس الإحداثيات العرضية لسطح الطفو عند خط الماء المتساوي الحجم W_ϕ عند كل زاوية ميلان، والأخطاء الحسابية التي ترافق استخدام الطرائق الرقمية التقريبية في حل التكاملات المذكورة أعلاه، وإذا أخذنا بالحسبان أيضاً أن هذه الحسابات تستند إلى رسم الخطوط النظرية لبدن سفينة معينة ذات بارامترات محددة، بحيث لا يُمكن استخدامها مباشرة للقيام بالأعمال البحثية لدراسة تأثير بعض البارامترات الأساسية التصميمية والاستثمارية للسفينة في سلوك منحني الاتزان السكوني وبارامتراته المميزة التي تُستخدم في تقييم ومعايرة أمان السفن التوازني، فإنه تجنباً للصعوبات المذكورة تُستخدم غالباً علاقات تقريبية تجريبية تُعطي دقة كافية من الناحية العملية [6]، [7].

تستند العلاقات التقريبية التجريبية إلى نتائج تخص عدداً كبيراً من النماذج أو الماكينات لسفن حقيقية تم الحصول عليها باستخدام طرائق تجريبية تعتمد من حيث المبدأ على تمثيل السفينة عرضياً بفعل عزم ميلان عرضي خارجي مساوٍ لعزم الاستبدال عند كل زاوية ميلان.

إن أكثر هذه العلاقات استخداماً في عالم تصميم السفن هي كالتالي [5]، [6]، [7]:

علاقة Pozdiunin:

تُعطي هذه العلاقة قيمة تقريبية لأذرع الاتزان السكوني كتابع لثلاثة بارامترات مميزة لشكل بدن السفينة: $b = y_{90}$ ، $h = z_{90} - z_{F_0}$ ، أيضاً نصف قطر الميتاستنتر الصغير r_0 . تُحدد المقادير (h, b) وفقاً للعلاقات التالية:

$$\left. \begin{aligned} b = y_{90} &= \frac{1}{2} \cdot \left(1 - 0.972 \cdot \frac{T}{H_1} \right) \cdot B \\ h = z_{90} - z_{F_0} &= 0.64 \cdot \left(1 - 1.032 \cdot \frac{T}{H_1} \right) \cdot H_1 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

حيث إن:

H_1 - يُمثل الارتفاع الجانبي الاصطلاحي للبدن ويُحدد وفقاً للعلاقة:

$$H_1 = \left(1 + \chi \cdot \frac{V_W}{V} \right) \cdot H \quad (23)$$

B - عرض السفينة.

V - حجم الجزء الغاطس من البدن.

V_W - حجم الأجزاء الكتيمية من بدن السفينة الواقعة أعلى خط الماء المقابل للغاطس $T = H$.

χ - معامل الامتلاء الشاقولي للبدن $\chi = \delta/\alpha$.

H - الارتفاع الجانبي للبدن عند المستوى القطاعي العرضي المنصّف ∞ .

يُعطى ذراع عزم الاستبدال (ذراع الاتزان السكوني) وفقاً للعلاقة التالية:

$$\ell = \left[\frac{r_o}{\sqrt{1+q^2 + \frac{3 \cdot p \cdot q^2}{1+(1-p) \cdot q^2}}} - \frac{h}{\sqrt{1+\frac{1}{S^2} + \frac{3 \cdot p}{1+(1-p) \cdot S^2}}} - (a-h) \right] \cdot \sin \phi \quad (24)$$

تُحدد بعض القيم الخاصة بالعلاقة الأخيرة كما يلي:

$$q^2 = m^2 \cdot \tan^2 \phi, \quad a = z_G - z_{F_0}, \quad S^2 = \frac{m^4}{k^4} \cdot \frac{1}{q^2}, \quad p = 1 - \frac{k}{m}$$

$$m = \frac{r_o}{b}, \quad k = \frac{b}{h} \quad \text{حيث إن:}$$

لتحديد نصف قطر الميناسنتر الصغير r_o بصورة تقريبية يُمكن استخدام العلاقات التالية [2]:

1- علاقة Van de Fleet:

$$r_o = \frac{\alpha^2}{11.4 \cdot \delta} \cdot \frac{B^2}{T} \quad (25)$$

2- علاقة Wlasow:

$$r_o = \frac{(0.09 \cdot \alpha - 0.02)}{\delta} \cdot \frac{B^2}{T} \quad (26)$$

3- علاقة Normand:

$$r_o = \frac{(0.008 + 0.074 \cdot \alpha^2)}{\delta} \cdot \frac{B^2}{T} \quad (27)$$

لتحديد الإحداثي الرأسي لمركز الطفو z_{F_0} كتابع للغاطس بصورة تقريبية يُمكن استخدام العلاقات التالية [2]:

1- علاقة عامة:

$$z_{F_0} = \frac{1.5 - \chi}{2 - \chi} \cdot T \quad (28)$$

2- علاقة Pozdiunin:

$$z_{F_0} = \frac{1}{1 + \chi} \cdot T \quad (29)$$

3- علاقة Normand:

$$z_{F_0} = \frac{1}{3} \cdot (2.5 - \chi) \cdot T \quad (30)$$

إن حجم الأجزاء أو الفراغات الكتيمية V_W من بدن السفينة الواقعة أعلى خط الماء المقابل للغاطس $T = H$ يتعلق بنقوس أو انحناء خط السطح المُسمى انحدار السطح الذي يساعد في تسريع تصريف مياه البحر التي قد تتراكم على السطح. وهنا نميز ما يسمى بانحدار السطح الأمامي الذي يمثل ارتفاع مستوى سطح السفينة من منتصفها لجهة المقدمة عن المستوى الأفقي مقياساً عند عمود المقدمة وهو يُعطى بالعلاقة التالية [1]:

$$W_D = 50 \cdot \left(\frac{L}{3} + 10 \right) \quad (31)$$

يقاس W_D بالـ mm و L بالـ m .

أيضاً نميز ما يُسمى بانحدار السطح الخلفي W_R الذي يُمثل ارتفاع مستوى سطح السفينة من منتصفها لجهة المؤخرة عن المستوى الأفقي مقاساً عند عمود المؤخرة، وعادةً يكون انحدار السطح الأمامي أكبر من هذا الانحدار بمقدار الضعف.

يُحدد الحجم V_W على النحو التالي:

$$V_W = V_{W_D} + V_{W_R} \quad (32)$$

حيث إن:

V_{W_D} - حجم الأجزاء الكتيمية في القسم الأمامي من بدن السفينة أعلى خط الماء المقابل للغاطس $T = H$.

V_{W_R} - حجم الأجزاء الكتيمية في القسم الخلفي من بدن السفينة أعلى خط الماء المقابل للغاطس $T = H$.

تُحدد هذه الحجوم وفقاً للعلاقات التالية [5]:

$$V_{W_R} = \frac{8 \cdot W_R}{L^2} \cdot \int_0^{L/2} x^2 \cdot y(x) \cdot dx = \frac{16 \cdot W_R}{3 \cdot L^2} \cdot d \cdot \sum_i (C_i \cdot x_i^2 \cdot y_i) \quad (33)$$

$$V_{W_D} = \frac{8 \cdot W_D}{L^2} \cdot \int_{L/2}^L x^2 \cdot y(x) \cdot dx = \frac{16 \cdot W_D}{3 \cdot L^2} \cdot d \cdot \sum_i (C_i \cdot x_i^2 \cdot y_i) \quad (34)$$

حيث إن:

$d = L/n$ - طول قطاع التقسيم المعتمد لسطح الطفو عند استخدام قاعدة سيمبسون I .

L - طول السفينة بين المتعامدين.

n - عدد قطاعات التقسيم وفقاً للتقسيم القطاعي المعتمد لسطح الطفو.

x_i, y_i - الإحداثيات الطولية والعرضية لسطح الطفو عند خط الماء المقابل للغاطس $T = H$.

C_i - معامل سيمبسون I وفقاً للتقسيم القطاعي المعتمد لسطح الطفو.

علاقة Wlasow:

تأخذ علاقة $Wlasow$ الخاصة بتحديد ذراع الاتزان السكوني العلاقة التالية:

$$\ell = b \cdot f_1(\phi) + h \cdot f_2(\phi) + r_o \cdot f_3(\phi) + r_{90} \cdot f_4(\phi) - a \cdot \sin \phi \quad (35)$$

تُحدد المقادير (b, h) الخاصة بهذه العلاقة تماماً كما في حالة علاقة $Pozdiunin$ ، في حين أن r_{90} الذي

يُمثل نصف قطر الميتاسنتر الصغير عند زاوية الميلان العرضي $\phi = 90^\circ$ فيُحدد وفقاً للعلاقة التقريبية التالية:

$$r_{90} = \left(\frac{h}{b} \right)^3 \cdot r_o \quad (36)$$

التتابع $[f_4(\phi), \dots, f_1(\phi)]$ غير متعلقة بشكل بدن السفينة وتُحدد قيمتها كل 10° وفقاً للجدول (1):

الجدول (1) قيم التتابع $f_i(\phi)$ كتابع للزاوية ϕ

ϕ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°

$f(\phi)$										
$f_1(\phi)$	0	0.05	0.34	0.84	1.28	1.36	1.06	0.58	0.21	0
$f_2(\phi)$	0	-0.04	-0.24	-0.56	-0.72	-0.51	0.03	0.60	0.93	1.00
$f_3(\phi)$	0	0.15	0.18	0.08	-0.07	-0.15	-0.13	-0.06	-0.01	0
$f_4(\phi)$	0	0.01	0.06	0.13	0.15	0.07	-0.08	-0.18	-0.15	0

علاقة Pawlenk:

تأخذ هذه العلاقة الصورة التالية:

$$\ell = \left[-2 \cdot C \cdot \cos \phi - B' \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \phi \right) - (a - h) \right] \cdot \sin \phi \quad (37)$$

$$\left. \begin{aligned} B' &= 2.33 \cdot [2 \cdot b - (r_o + h)] \\ C &= (b - r_o) - B' \end{aligned} \right\} \text{حيث إن:}$$

تُحدد المقادير (b, h) الخاصة بهذه العلاقة تماماً كما في الحالات السابقة المذكورة.

من جهة أخرى يُمكن توصيف منحنى أذرع عزوم الاستبدال لنماذج السفن الصندوقية أو مثلثية المقطع ذات الأبدان بسيطة الشكل بعلاقات رياضية وفقاً للطريقة التحليلية بالنسبة إلى الميلانات العرضية من 0° وحتى الزاوية 90° أو أكبر، وذلك ضمن ثلاثة مجالات أو قطاعات. يُحدّد القطاع الأول الذي يُمثل المجال الأولي للتوازن بزاوية دخول السطح في الماء (أو زاوية خروج السنينة بحسب حالة التحميل) التي يرمز لها بالرمز ϕ_1 وهي تساوي الزاوية الأصغر من هاتين الزاويتين. تُدعى الزوايا ϕ الأكبر من ϕ_1 بزوايا الميلان العرضي الكبيرة.

يُحدد القطاع الثاني لمنحنى أذرع عزوم الاستبدال بالزاوية ϕ_2 المقابلة لخروج السنينة من الماء (أو لدخول السطح في الماء بحسب حالة التحميل)، وهي تساوي الزاوية الأكبر من هاتين الزاويتين.

بالنسبة إلى القطاع الثالث من منحنى أذرع عزوم الاستبدال فهو يمتد اعتباراً من الزاوية ϕ_2 صعوداً حتى زاوية افتراضية $\phi_3 \geq 90^\circ$.

بعد تحديد عرض خطوط الماء المتساوية الحجم في كل مجال من مجالات زوايا الميلان العرضي يُمكن تحديد مساحات سطوح الطفو، أنصاف أقطار المبتاسنتر وإحداثيات مركز الطفو في جملة المحاور الإحداثية المفروضة، وبالمحصلة يُمكن تحديد أذرع عزوم الاستبدال باستخدام العلاقات التحليلية التالية [8]، [9]:

• بالنسبة لنموذج السفن الصندوقية:

نميز حالتين (وفقاً لحالة التحميل):

$$-1 \leq T \leq H/2, \text{ والزاويا الحديدية هي:}$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{2 \cdot T}{B}, \quad \phi_2 = \tan^{-1} \frac{H^2}{2 \cdot B \cdot T}$$

عندئذٍ يُحدد ذراع عزم الاستبدال كما يلي:

- عندما $\phi \in [0 \div \phi_1]$:

$$\ell = \left[\frac{B^2}{12 \cdot T} \cdot \left(1 + \frac{\tan^2 \phi}{2} \right) - a \right] \cdot \sin \phi \quad (38)$$

- عندما $\phi \in [\phi_1 \div \phi_2]$

$$\ell = \left[\frac{B}{2} \cdot \cot \phi - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot B \cdot T} \cdot (\sqrt{\cot^3 \phi} - \sqrt{\tan \phi}) - \frac{T}{2} - a \right] \cdot \sin \phi \quad (39)$$

- عندما $\phi \in [\phi_2 \div \phi_3]$

$$\ell = \left[\frac{H-T}{2 \cdot H} \cdot (B \cdot \cot \phi + H) - \frac{H^3}{12 \cdot B \cdot T} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \cot^3 \phi + \cot \phi \right) - a \right] \cdot \sin \phi \quad (40)$$

-2 $T \geq H/2$ ، والزوايا الحدية هي:

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{2 \cdot (H-T)}{B}, \quad \phi_2 = \tan^{-1} \frac{H^2}{2 \cdot B \cdot (H-T)}$$

عندئذٍ يُحدد ذراع عزم الاستعداد كما يلي:

- عندما $\phi \in [0 \div \phi_1]$ يُحدد ذراع عزم الاستعداد وفقاً للعلاقة (38).

- عندما $\phi \in [\phi_1 \div \phi_2]$

$$\ell = \left[\frac{H-T}{T} \cdot \left(\frac{B \cdot \cot \phi}{2} - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot B \cdot (H-T)} \cdot (\sqrt{\cot^3 \phi} - \sqrt{\tan \phi}) - \frac{H-T}{2} \right) - a \right] \cdot \sin \phi \quad (41)$$

- عندما $\phi \in [\phi_2 \div \phi_3]$ يُحدد ذراع عزم الاستعداد وفقاً للعلاقة (40).

• بالنسبة لنموذج السفن مثلثية المقطع:

نميز حالتين (وفقاً لحالة التحميل):

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{2 \cdot H \cdot (H^2 - T^2)}{B \cdot (H^2 + T^2)} \quad -1 \quad T \geq H/2, \text{ والزوايا الحدية الأولى هي:}$$

عندئذٍ يُحدد ذراع عزم الاستعداد كما يلي:

- عندما $\phi \in [0 \div \phi_1]$

$$\ell = \left[\frac{b^2}{6 \cdot T} \cdot \left(2 \cdot H \cdot \frac{(4 \cdot H^2 + B^2)}{B^2 \cdot \sqrt{4 \cdot H^2 - B^2 \cdot \tan^2 \phi}} - \frac{4 \cdot H^2}{B^2} \right) - a \right] \cdot \sin \phi \quad (42)$$

حيث إن: $b = \frac{B \cdot T}{H}$ يمثل عرض سطح الطفو عند الغاطس المفروض.

- عندما $\phi \in [\phi_1 \div \phi_3]$

$$\ell = \left[\frac{H^2 - T^2}{T^2} \cdot \left(\frac{B \cdot \cot \phi}{2} - \frac{H}{3} - \sqrt{2 \cdot B \cdot (H^2 - T^2)} \cdot \frac{(B \cdot \cot \phi + H \cdot \cot^2 \phi - H)}{3 \cdot H \cdot \sqrt{B + 2 \cdot H \cdot \cot \phi}} \right) + \frac{2}{3} \cdot (H - T) - a \right] \cdot \sin \phi \quad (43)$$

-2 $T < H/\sqrt{2}$

عندئذٍ يُحدد ذراع عزم الاستبدال كما يلي:

- عندما $\phi \in [0 \div \phi_1]$: يُحدد ذراع عزم الاستبدال وفقاً للعلاقة (42).

- عندما $\phi \in [\phi_1 \div \phi_2]$:

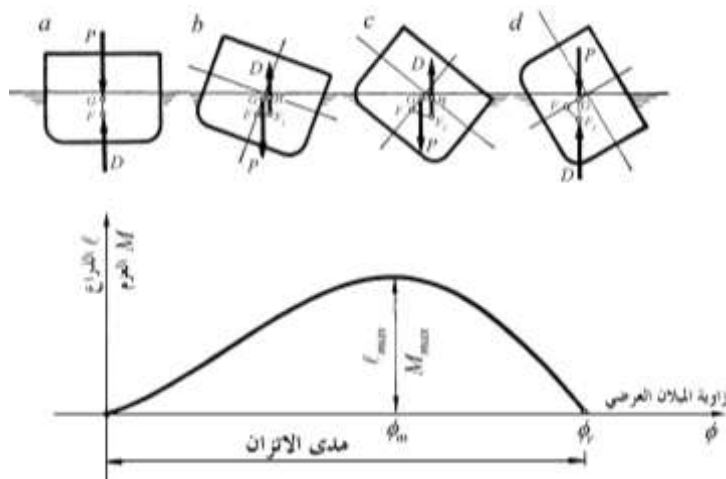
$$\phi_2 = \cot^{-1} \frac{(H^2 - 2 \cdot T^2) \cdot B}{2 \cdot H^3} \quad \text{حيث إن:}$$

يُحدد ذراع عزم الاستبدال وفقاً للعلاقة (43).

- عندما $\phi \in [\phi_2 \div \phi_3]$:

$$\ell = \left[\frac{B \cdot \cot \phi}{2} + H - \frac{2 \cdot T}{3} - \frac{\sqrt{2 \cdot B \cdot T}}{3 \cdot H \cdot \sqrt{B - 2 \cdot H \cdot \cot \phi}} \cdot (B \cdot \cot \phi - H \cdot \cot^2 \phi + H) - a \right] \cdot \sin \phi \quad (44)$$

يبين الشكل (3) مساراً نموذجياً لمنحنى أذرع عزم الاستبدال.



الشكل (3) منحنى الاتزان السكوني (الشكل العام)

تتميز منحنيات أذرع عزم الاستبدال بالبارامترات التالية [10]:

- (1)- مقدار h_o ، الذي يمثل ظل زاوية ميل المماس للمنحنى عند مبدأ جملة المحاور .
- (2)- مقدار ذراع عزم الاستبدال الأعظمي l_{max} والزاوية ϕ_m المقابلة له .
- (3)- زاوية تلاشي الاتزان أو اختفائه ϕ_r المقابلة لانعدام ذراع عزم الاستبدال .
- (4)- مجال زوايا الميلان العرضي التي يحافظ عندها ذراع عزم الاستبدال على قيم موجبة، والذي يُدعى بمدى الاتزان .

يُستخدم منحنى أذرع عزم الاستبدال في عملية معايرة الاتزان، من خلال تقييم مسار هذا المنحنى، وبارامتراته

المميزة وقيم هذا المنحنى عند زوايا الميلان العرضي المختلفة.

إن جميع التوصيات الخاصة بمعايير الاتزان وفقاً لمتطلبات IMO تقود إلى قاسم مشترك يتعلق بتحديد الارتفاع

المسموح به لمركز ثقل السفينة الموافق لهذه المعايير عند الإزاحة الحجمية المُعطاة.

النتائج والمناقشة:

تتضمن الحسابات التطبيقية لهذا البحث وفقاً للنموذج الرياضي المقترح كمرحلة أولى تقييم سلوك منحنيات أذرع عزوم الاستعداد المحددة استناداً للطرائق التقريبية عن طريق مقارنتها بمنحنيات أذرع عزوم الاستعداد المحددة بعلاقات رياضية تحليلية خاصة بنماذج أو ماكينات لسفن صندوقية وأخرى مثلثية المقطع، بحيث نستطيع بتقريب جيد كمرحلة لاحقة استخدام هذه العلاقات التقريبية في دراسة تأثير بعض البارامترات التصميمية والاستثمارية للسفينة في سلوك منحنيات أذرع عزوم الاستعداد (منحنيات الاتزان السكوني) الذي يؤثر على نحو مباشر في الأمان التوازني للسفينة في شروط الإبحار المختلفة.

لإنجاز الحسابات المقترحة وفقاً للنموذج الرياضي تم إعداد برنامج حاسوبي بلغة (Visual Basic). يتضمن هذا البرنامج عدة واجهات برمجية. يستطيع البرنامج معالجة جميع الحالات المتعلقة بالمسألة المطروحة، بحيث يمكننا من تقييم سلوك منحنيات أذرع عزوم الاستعداد المحددة استناداً للطرائق التقريبية، ومن ثم دراسة تأثير بعض البارامترات التصميمية والاستثمارية للسفينة في سلوك هذه منحنيات.

تبين الأشكال (4) و(5) و(6) مقارنة بين منحنيات أذرع عزوم الاستعداد الخاصة بنماذج سفن صندوقية الشكل (الأقرب إلى السفن البطيئة والضخمة كناقلات النفط وسفن البضائع السائبة التي لها أبدان مثلثة) ومنحنيات أذرع عزوم الاستعداد التقريبية المطبقة على هذا النوع من السفن.

يُلاحظ من هذه الأشكال وجود تطابق جيد بين هذه المنحنيات ضمن مجال زوايا الميلان العرضي الصغيرة حتى الزاوية $10^0 \approx \phi$ ، في حين يُلاحظ وجود تقارب جيد بين هذه المنحنيات اعتباراً من هذه الزاوية وحتى الزاوية المقابلة للقيمة الأعظمية لذراع عزم الاستعداد الخاص بنماذج سفن صندوقية الشكل. وأخيراً يُلاحظ وجود تباين ثابت بين هذه المنحنيات بحيث تبقى موازية لبعضها بعضاً تقريباً في الجزء الهابط من منحني أذرع عزوم الاستعداد.

تبين الأشكال (7) و(8) و(9) مقارنة بين منحنيات أذرع عزوم الاستعداد الخاصة بنماذج سفن مثلثية المقطع (الأقرب إلى السفن السريعة عالية المناورة كالسفن الحربية من طرادات ومدمرات التي لها أبدان نحيلة) ومنحنيات أذرع عزوم الاستعداد التقريبية المطبقة على هذا النوع من السفن.

يُلاحظ من هذه الأشكال وجود تطابق جيد بين هذه المنحنيات ضمن مجال زوايا الميلان العرضي الصغيرة حتى الزاوية $10^0 \approx \phi$ ، في حين يُلاحظ وجود تباين بين هذه المنحنيات اعتباراً من هذه الزاوية وحتى زاوية معينة تقع في القسم الهابط من منحني أذرع عزوم الاستعداد الخاص بنماذج سفن مثلثية المقطع. وأخيراً يُلاحظ وجود تقارب جيد يصل إلى حد التطابق بين هذه المنحنيات في القسم المتبقي من الجزء الهابط من منحني أذرع عزوم الاستعداد.

مما سبق نستنتج ما يلي:

- أن المنحنيات الخاصة بالعلاقات التقريبية متطابقة مع بعضها بعضاً بصورة جيدة عند أية زاوية ميلان عرضي مما يسمح باستبدالها بمنحني مكافئ تمثل إحداثياته القيمة الوسطية لإحداثيات المنحنيات التقريبية.
- إن التباين الحاصل بين المنحنيات الخاصة بالعلاقات التقريبية ومنحنيات أذرع عزوم الاستعداد الخاصة بنماذج السفن مثلثية المقطع وصندوقية الشكل لا يؤثر في الشكل العام لمسار هذه المنحنيات، وهو من جهة أخرى منطقي ومقبول عملياً إذا أخذنا بالحسبان أن العلاقات التقريبية معدة أصلاً لإنشاء منحني أذرع عزوم الاستعداد لنماذج سفن حقيقية لها معاملات امتلاء محددة وهي تختلف من حيث الشكل ومعاملات الامتلاء عن النماذج الحديدية التجريدية المستخدمة في عملية المقارنة.

• يمكن وتقريب جيد استخدام المنحنى المكافئ للمنحنيات الخاصة بالعلاقات التقريبية في دراسة تأثير بعض البارامترات التصميمية والاستثمارية للسفينة في سلوك منحنيات الاتزان السكوني، بغض النظر عن استخدامه في عملية المعايرة الدقيقة للحالة التوازنية للسفينة وفقاً لمتطلبات IMO.

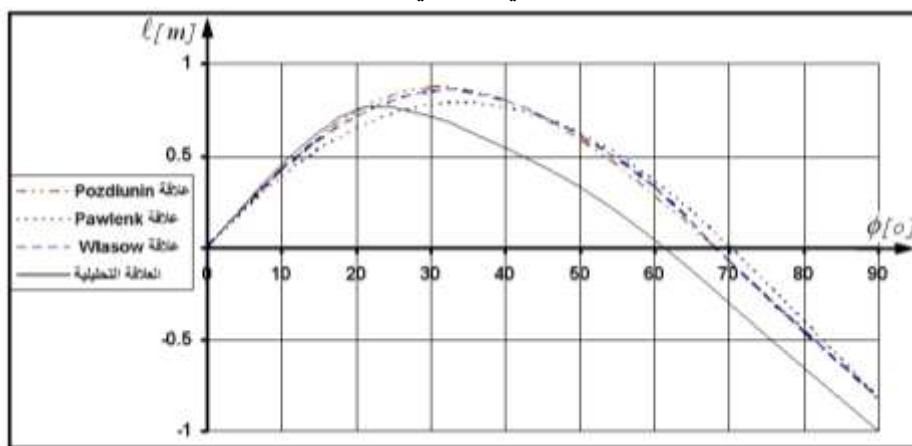
الآن بالعودة للنموذج الرياضي المقترح نستنتج أن البارامترات الأساسية المؤثرة على سلوك منحنى أذرع عزوم الاستعداد هي كالتالي:

B - عرض السفينة.

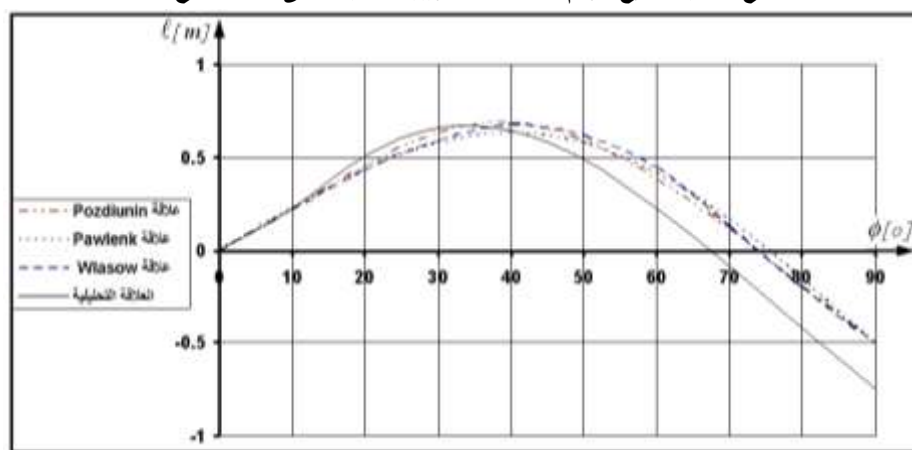
H - الارتفاع الجانبي للسفينة عند المستوى القطاعي العرضي المنصف، أو ارتفاع الحد الحر F_b

للسفينة عند قيمة معينة لغاطسها T .

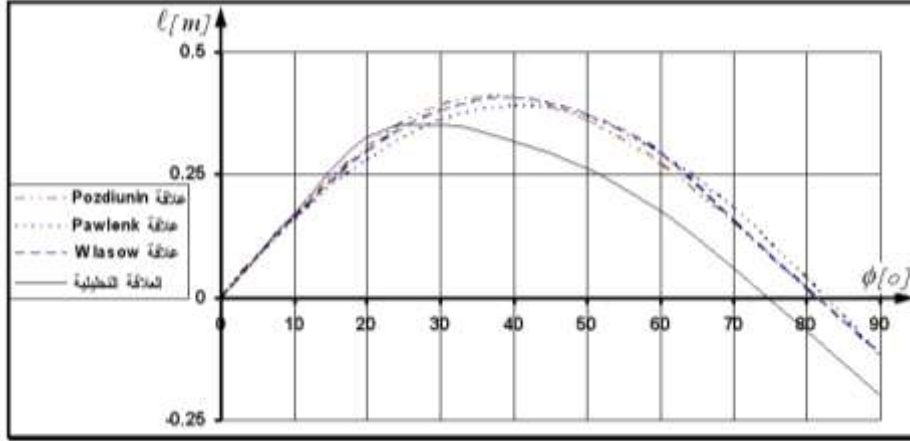
T - غاطس السفينة عند المستوى القطاعي العرضي المنصف.



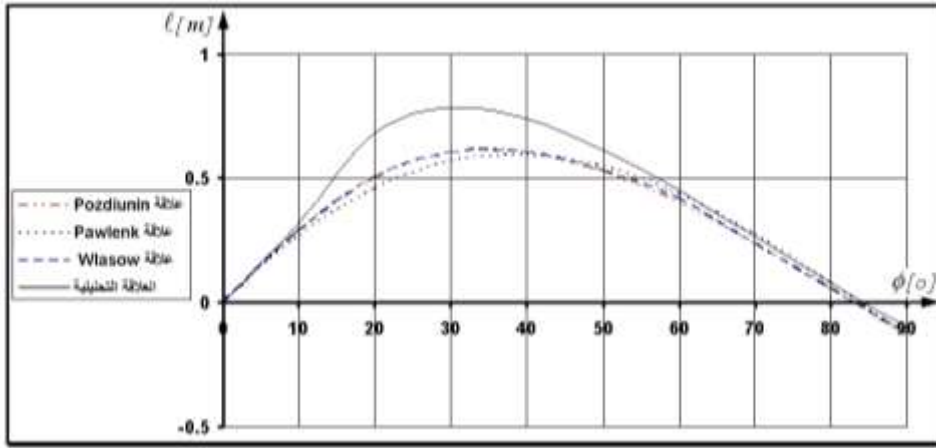
الشكل (4) مقارنة منحنى أذرع عزوم الاستعداد الخاص بنموذج سفينة صندوقية الشكل أبعادها ($L = 150 m$, $B = 22 m$, $H = 11 m$, $T = 8.5 m$, $z_G = 6.5 m$) مع منحنيات أذرع عزوم الاستعداد التقريبية المطبقة على هذا النموذج.



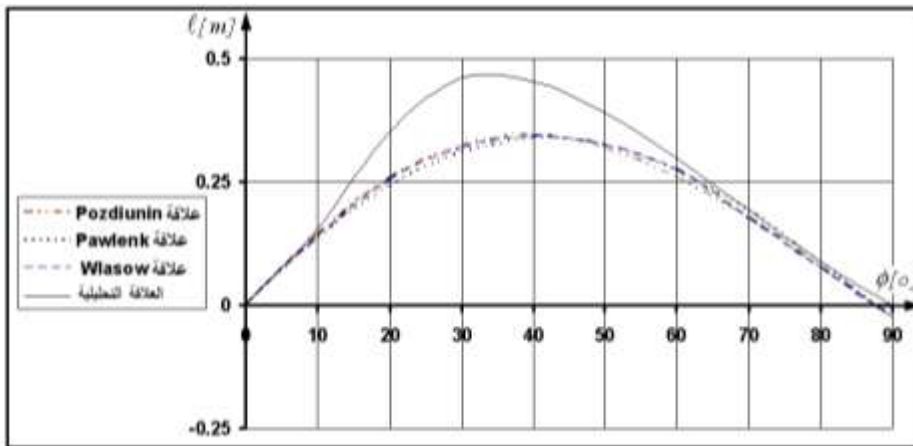
الشكل (5) مقارنة منحنى أذرع عزوم الاستعداد الخاص بنموذج سفينة صندوقية الشكل أبعادها ($L = 95 m$, $B = 14 m$, $H = 7.5 m$, $T = 5 m$, $z_G = 4.5 m$) مع منحنيات أذرع عزوم الاستعداد التقريبية المطبقة على هذا النموذج.



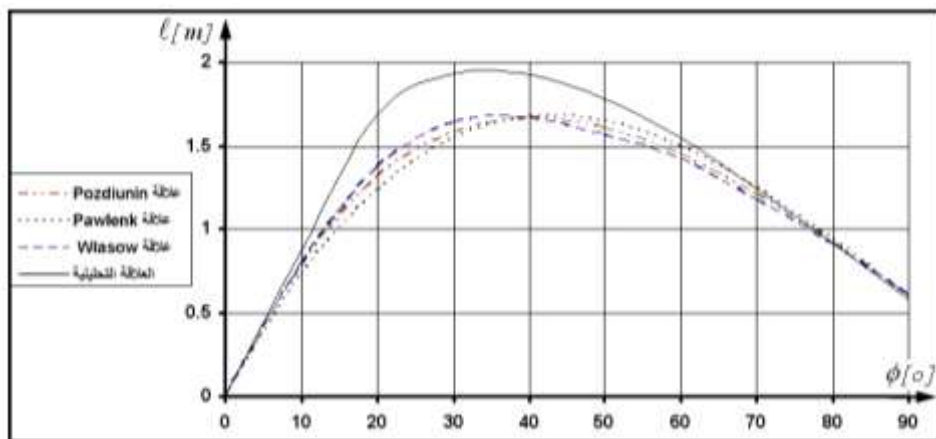
الشكل (6) مقارنة منحني أذرع عزوم الاستعداد الخاص بنموذج سفينة صندوقية الشكل أبعادها $(L = 60 m , B = 8.5 m , H = 4.6 m , T = 3.5 m , z_G = 2.5 m)$ مع منحنيات أذرع عزوم الاستعداد التقريبية المطبقة على هذا النموذج.



الشكل (7) مقارنة منحني أذرع عزوم الاستعداد الخاص بنموذج سفينة مثلثية المقطع أبعادها $(L = 80 m , B = 11.5 m , H = 6 m , T = 4.5 m , z_G = 4 m)$ مع منحنيات أذرع عزوم الاستعداد التقريبية المطبقة على هذا النموذج.



الشكل (8) مقارنة منحني أذرع عزوم الاستعداد الخاص بنموذج سفينة مثلثية المقطع أبعادها $(L = 55 m , B = 8 m , H = 5 m , T = 3.75 m , z_G = 3.25 m)$ مع منحنيات أذرع عزوم الاستعداد التقريبية المطبقة على هذا النموذج.



الشكل (9) مقارنة منحنى أذرع عزوم الاستعداد الخاص بنموذج سفينة مثلثية المقطع أبعادها
 $(L = 150 m , B = 22 m , H = 11 m , T = 8.5 m , z_G = 6.5 m)$
 مع منحنيات أذرع عزوم الاستعداد التقريبية المطبقة على هذا النموذج.

z_G - ارتفاع مركز ثقل السفينة عن المستوى الأساسي، أو ارتفاع الميتاسنتر العرضي الأولي للسفينة
 $GM_o = h_o$ بافتراض ثبات موقع نقطة الميتاسنتر عند زوايا الميلان العرضي الصغيرة.
 لدراسة تأثير البارامترات التصميمية والاستثمارية للسفينة المذكورة أعلاه في سلوك منحنيات أذرع عزوم
 الاستعداد (منحنيات الاتزان السكوني) سنعمد سفينة تجارية ثنائية الرفاصات مخصصة لنقل البضائع العامة.

المعطيات الأساسية لهذه السفينة عند حالة تحميل معينة هي كالتالي:

$$L = 130 m , V_o = 14950 m^3 , B = 18 m , z_G = \overline{KG} = 7 m$$

$$H = 11 m , T = 8 m , \alpha = 0.82 , \delta = 0.75$$

سُجِرى تغيير قيم البارامترات المؤثرة المذكورة أعلاه على النحو التالي:

سنعمد قيم البارامترات المعطاة للسفينة المعتبرة كقيم وسطية، ثم سنغير زيادةً ونقصاناً ضمن المجال المعتمد
 لقيم نسب الأبعاد الرئيسية للسفن التجارية المخصصة لنقل البضائع العامة. في هذه الحالة سنعمد القيم التالية لهذه
 البارامترات وفقاً للجدول (2) التالي:

الجدول (2) القيم المعتمدة للبارامترات الرئيسية للسفينة

$B [m]$	$H [m]$	$T [m]$	$z_G [m]$
19	10	7	6
18.5	10.5	7.5	6.5
18	11	8	7
17.5	11.5	8.5	7.5
17	12	9	8

لدراسة تأثير عرض السفينة في مسار منحنى أذرع عزوم الاستعداد سيتم تغيير عرض بدن السفينة المعتبرة كما
 في الجدول (2)، أما باقي الأبعاد فستبقى دون تغيير.

يبين الشكل (10) منحنيات أذرع عزوم الاستعداد لأبدان النماذج الخمسة. من هذا الشكل نلاحظ أن زيادة
 عرض بدن السفينة تتسبب في زيادة قيم أذرع عزوم الاستعداد، في حين أن تأثير ذلك في مدى الاتزان يكون قليلاً

جداً. كما نلاحظ أن ذراع عزم الاستعداد يتمتع بقيمة واحدة بالنسبة إلى النماذج الخمسة عند الزاوية 80° . إن العامل الأساسي الذي أدى إلى زيادة قيم أذرع عزوم الاستعداد هو ازدياد عزم عطالة سطح الطفو الذي يتناسب مع مكعب عرض السفينة.

لدراسة تأثير الارتفاع الجانبي للسفينة H (أو ارتفاع الحد الحر F_b للسفينة عند قيمة معينة لغاطسها T) في مسار منحنى أذرع عزوم الاستعداد سيتم تغيير الارتفاع الجانبي لبدن السفينة المعتبرة كما في الجدول (2). أما باقي الأبعاد فستبقى دون تغيير.

من الشكل (11) الذي يُظهر منحنيات أذرع عزوم الاستعداد للنماذج الخمسة، نستنتج أن زيادة الارتفاع الجانبي للسفينة H تؤدي بالمقارنة مع زيادة عرض بدن السفينة إلى زيادة أكبر لقيم أذرع عزوم الاستعداد ومدى الاتزان لهذه المنحنيات. فعند زيادة عرض السفينة سيكون مدى الاتزان للنماذج الخمسة في حدود الزاوية 80° ، في حين أن زيادة ارتفاع الحد الحر تؤدي إلى امتداد مدى الاتزان إلى ما بعد الزاوية 90° . ويُلاحظ من هذا الشكل أن منحنيات أذرع عزوم الاستعداد للنماذج الخمسة ينطبق بعضها على بعض حتى زوايا معينة مقابلة لدخول حافة السطح العليا في الماء.

هذا يعني أن المماس لمنحنى أذرع عزوم الاستعداد عند المبدأ ($\phi = 0^\circ$) يتمتع بميل ثابت بالنسبة إلى النماذج الخمسة المدروسة، ومن ثمة ستكون قيم ارتفاع الميتاسنتر الأولي الخاصة بها متساوية. إذاً تغير الارتفاع الجانبي للسفينة H ليس له أي تأثير على الاتزان الأولي عند زوايا الميلان العرضي الصغيرة. لدراسة تأثير غاطس السفينة في منحنى أذرع عزوم الاستعداد سيتم تغيير قيم هذا الغاطس وفقاً للجدول (2)، أما باقي الأبعاد فستبقى دون تغيير.

يبين الشكل (12) منحنيات أذرع عزوم الاستعداد لأبدان النماذج الخمسة. من هذا الشكل نلاحظ أن تزايد غاطس السفينة يؤدي إلى تناقص قيم أذرع عزوم الاستعداد ومدى الاتزان لهذه المنحنيات. بصورة عامة يُمكن القول: إن زيادة غاطس السفينة مع افتراض ثبات جميع الأبعاد الأخرى تؤثر بصورة سلبية في اتزان السفينة عند زوايا الميلان العرضي الكبيرة.

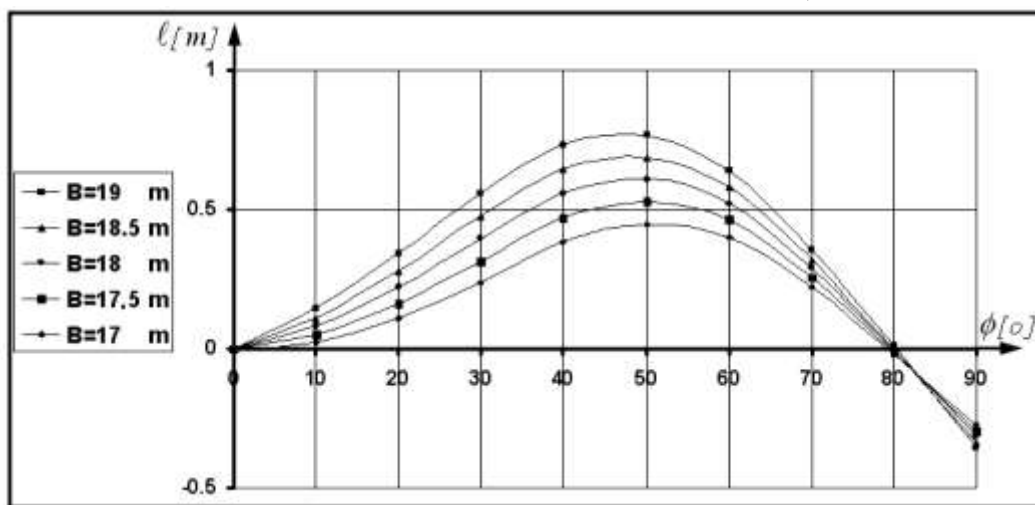
لدراسة تأثير تغير ارتفاع مركز ثقل السفينة Z_G (أو ارتفاع الميتاسنتر العرضي الأولي للسفينة $GM_o = h_o$) سنفترض أن كل الأبعاد الرئيسية لبدن السفينة ثابتة في حين سيتم تغيير ارتفاع مركز النقل وفقاً للجدول (2).

من الشكل (13) الذي يُظهر منحنيات أذرع عزوم الاستعداد للنماذج الخمسة نستنتج أن تناقص ارتفاع مركز النقل G يؤدي إلى تزايد كبير في قيم أذرع عزوم الاستعداد إضافةً إلى مدى الاتزان لهذه المنحنيات. في هذه الحالة ينزاح ذراع عزم الاستعداد الأعظمي l_{max} باتجاه تزايد زوايا الميلان العرضي ϕ .

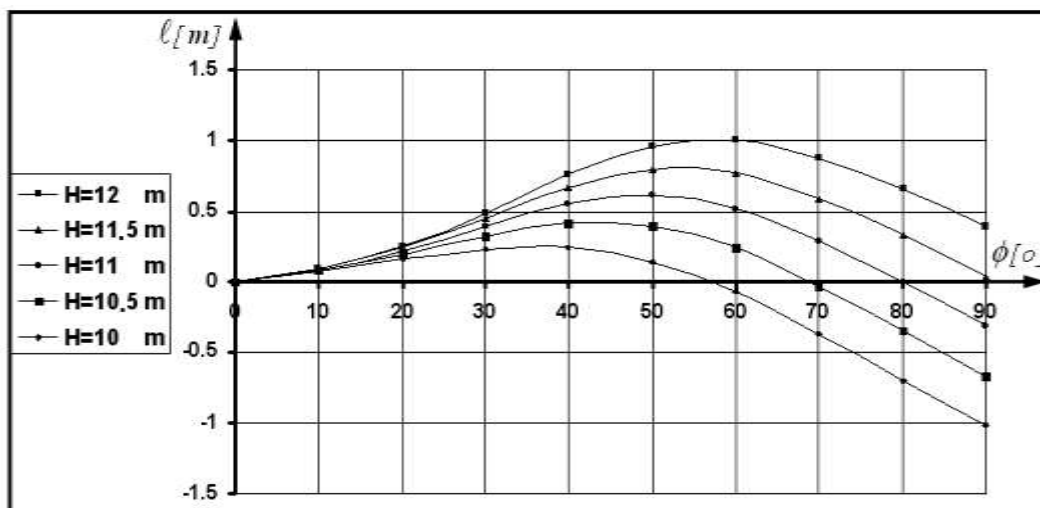
نلاحظ من الشكل (13) أنه عند وقوع مركز ثقل السفينة عالياً فوق الميتاسنتر الأولي M_o سيتمتع ارتفاع الميتاسنتر h_o بقيمة سالبة ويصبح اتزان السفينة سالباً، ومن ثمة تميل السفينة عرضياً تحت تأثير أدنى قوة خارجية مؤثرة بزاوية ϕ مما يؤدي إلى انتقال السفينة من جديد إلى وضعية التوازن الدائم، ومن ثمة، إبحارها بميلان عرضي دائم على أحد جانبيها.

ينبغي الإشارة أخيراً إلى أنه بالإمكان تطوير عمل البرنامج الحاسوبي لتحديد مدى دقة العلاقات التقريبية عندما تكون الغاية الأساسية استخدامها في عملية المعايرة الدقيقة للحالة التوازنية للسفينة وفقاً لمتطلبات IMO وهيئات

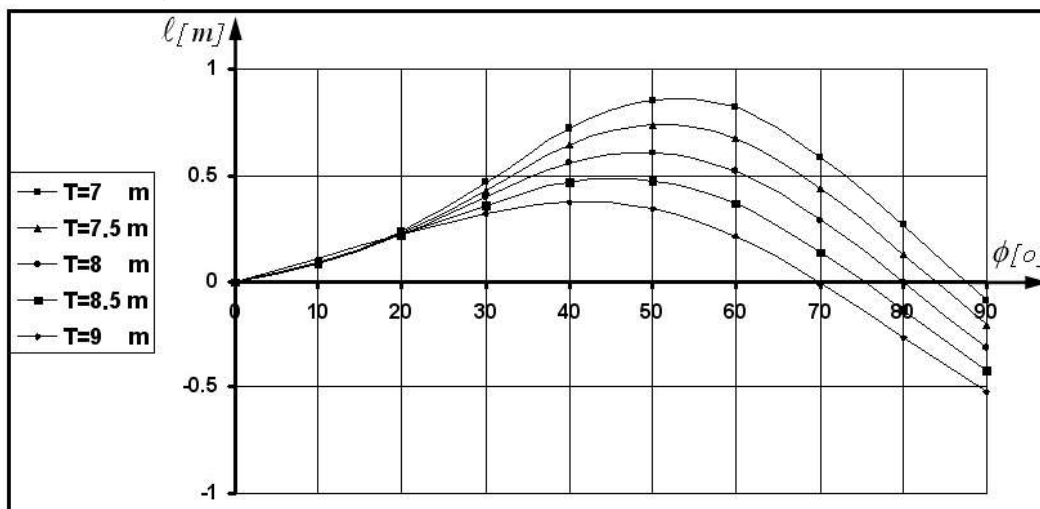
الإشراف والتصنيف. يتطلب ذلك تأمين قاعدة بيانات واسعة للمقارنة تخص منحنيات الاتزان الثابتة (cross curve of stability) لعدد كبير من السفن الحقيقية قيد الاستثمار.



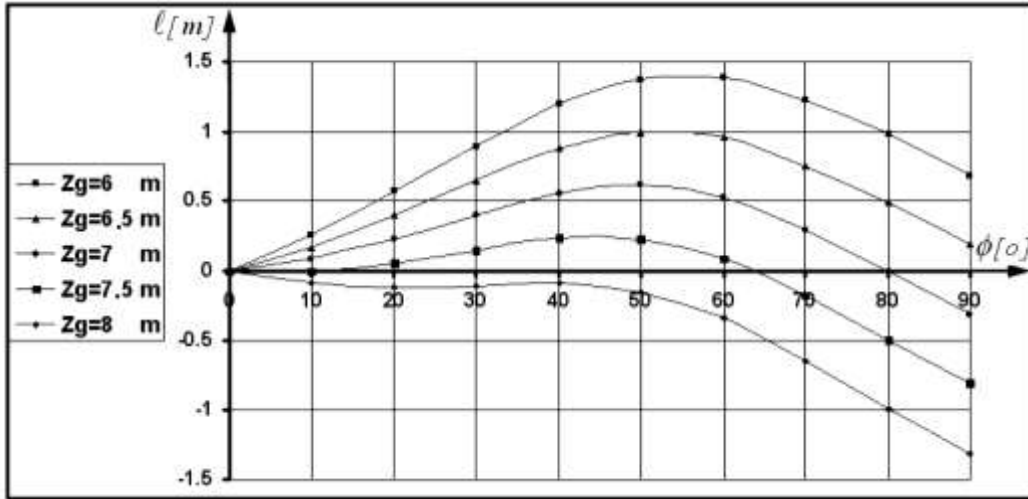
الشكل (10) منحنيات أذرع عزوم الاستعداد للسفينة المعتبرة عند قيم مختلفة للعرض B



الشكل (11) منحنيات أذرع عزوم الاستعداد للسفينة المعتبرة عند قيم مختلفة للارتفاع الجانبي H



الشكل (12) منحنيات أذرع عزوم الاستعداد للسفينة المعتبرة عند قيم مختلفة للغاطس T



الشكل (13) منحنيات أذرع الاستعداد للسفينة المعتبرة عند قيم مختلفة لارتفاع مركز الثقل Z_G

الاستنتاجات:

من الدراسة التحليلية المنفذة في هذا البحث يُمكن استخلاص الاستنتاجات التالية:

- 1- يُمكن استخدام، وبدقة، المنحنى المكافئ للمنحنى الخاصة بالعلاقات التقريبية في دراسة تأثير البارامترات التصميمية والاستثمارية للسفينة في سلوك منحنى الاتزان السكوني.
- 2- يؤثر تزايد عرض السفينة بصورة إيجابية في الحالة التوازنية للسفينة. هذه الخاصية ينبغي أخذها بالحسبان في مراحل التصميم الأولية لكن ضمن حدود معينة نظراً لارتباط ذلك بزيادة المقاومات الهيدروليكية لبدن السفينة ومن ثمة ازدياد الاستطاعة المطلوبة لجرها بسرعة معينة.
- 3- يؤثر تزايد غاطس السفينة بصورة سلبية في الحالة التوازنية للسفينة في حين يؤثر تزايد ارتفاع الحد الحر بصورة إيجابية. يُظهر ذلك ضرورة التقيد بعلامات خطوط الشحن لسفن البضائع أثناء عمليات الشحن والتفريغ للسفن للوصول إلى غاطس أعظمي وحد حر أصغري بشروط جيدة للحالة التوازنية للسفينة.
- 4- أن ارتفاع مركز ثقل السفينة وانتقالاته الشاقولية الحاصلة تلعب دوراً هاماً في تحديد الحالة التوازنية للسفينة المتعلقة بصورة مباشرة بأمان السفن المبحرة. لذلك فإن المعرفة الدقيقة لموضع مركز ثقل السفينة من قبل ربانها من الأمور الأساسية التي تسمح بالتحديد المسبق لسلوك السفينة المبحرة في أية حالة من حالات التحميل المحتملة. إن عدم الاهتمام بهذا الموضوع قد يقود إلى وضعيات غير آمنة للسفينة تؤدي في بعض الأحيان إلى انقلاب السفينة وغرقها نتيجة للتحميل غير المناسب.

المراجع:

- 1- PŁOAWŁOWSKI, M. *Ćwiczenia Z Hydromechaniki Okrętu* ,Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej , Gdańsk 1978, 394.
- 2- KAŻMIERCZAK, J. *Pływalność I Stateczność okrętu* , Wydawnictwo Komunikacyjne , Warszawa 1984, 431.
- 3- STALIŃSKI, J. *Teoria okrętu* , Wydawnictwo Morski , Gdańsk 1979, 507.
- 4- FRĄCKOWIAK, M. *Statyka Okrętu* , Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej , Gdańsk 1999, 239.
- 5- KRĘŻLEWSKI, M. *Zbiór Zadań Z Teorii okrętu* , Państwowe Wydawnictwo Naukowe , Poznan 1987, 247.
- 6- KABACIŃSKI, J. *Stateczność I Niezatapialność statku* , Wyższa szkoła Morska , Szczecin 1995, 269.
- 7- KABACIŃSKI, J. *Stateczność I Niezatapialność statku* , Zbiór Zadań , Wyższa Szkoła Morska , Szczecin 2001, 215.
- 8- DUDZIAK, J. *Teoria Okrętu* , Wydawnictwo Morski , Gdańsk 1988, 618.
- 9- EDWARD, V. *Principles of Naval Architecture* , United States of America 1988,760.
- 10- DERRETT, D. *Ship Stability for Masters and Mates* , Butterworth - Heinemann , Oxford 2002, 441.