

Study of the Influence of an Interceptor on the Resistance of the High-speed Vessels Using CFD

Dr. Nawar Abbas*
Hala Daoud**

(Received 16 / 2 / 2022. Accepted 22 / 5 / 2022)

□ ABSTRACT □

This study aims to determine the influence of an interceptor on the total resistance of high-speed vessels using CFD (Computational Fluid Dynamic).

The URANS method and $k-\omega$ Shear Stress Transport (SST) model with ANSYS program were used to solve the Navier-Stokes equations. The Volume of Fluid method was used to capture the free surface and the interaction between the two phases (water, air) around the hull. The comparison between the CFD and Exp-results of total resistance shows a good agreement.

Keywords: interceptor, high-speed vessels, CFD, $k - \omega$ SST.

* Assistant Professor. Maritime Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.Email: noarabbas@yahoo.com

** Master Student, Department of Maritime Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.Email: hla.daoud22@gmail.com

دراسة تأثير المعترض على مقاومة القوارب السريعة باستخدام تقنية CFD

د. نوار عباس*

هلا داؤد**

(تاريخ الإيداع 16 / 2 / 2022. قُبِلَ للنشر في 22 / 5 / 2022)

□ ملخص □

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير المعترض Interceptor على المقاومة الكلية للقوارب السريعة، وذلك من خلال استخدام تقنية الـ CFD.

لقد تم استخدام طريقة الـ URANS والموديل $k - \omega SST$ وبرنامج الـ ANSYS لحل معادلات نافيه ستوكس الناظمة للتدفق. كما وتم استخدام طريقة الـ VOF من أجل حل السطح الحر ودراسة التأثير المتبادل بين الماء والهواء. المقارنة بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية للمقاومة الكلية تظهر تطابق كبير بين النتائج وهذا يؤكد مدى دقة الـ CFD في حل هذا النوع من التدفقات.

الكلمات المفتاحية: المعترض، القوارب السريعة، CFD- ميكانيك الموائع الحسابية، $k - \omega SST$.

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

الايمل: noarabbas@yahoo.com

** طالبة ماجستير - قسم الهندسة البحرية - جامعة تشرين - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

الايمل: hla.daoud22@gmail.com

مقدمة:

يعود تاريخ المعترض إلى سبعينات القرن الماضي، حيث يرتبط مبدأ عمله بجهاز أيروديناميكي تم تطويره في تلك الفترة يدعى Gurney Flap، وهو مشابه هندسياً للمعترض، استخدم آنذاك لزيادة معامل الرفع في الحوامات. لاحقاً بدأ استخدامه في مجال الملاحة على الطوافات ذات السرعة من المتوسطة إلى العالية (على وجه الخصوص الأبدان الانزلاقية، ونصف الانزلاقية) كوسيلة لضبط الدرفلة والتوجيه، وفي العام 2000 أثبتت فعاليته في القوارب ثنائية الأبدان (Catamaran)، على صعيد آخر وجد أن المعترض يملك القدرة على تقليل مقاومة القوارب وكان يخت Ecover 3 أول يخت استخدم فيه المعترض لهذا الغرض عام 2008 [1]. على الرغم من الانتشار الواسع للمعترضات إلا أن الدراسات التي تناولت تأثيره على الأداء الهيدروديناميكي للقوارب بشكل عام، وعلى المقاومة بشكل خاص تعتبر قليلة نسبياً، ويهدف هذا البحث إلى تسليط الضوء على المكاسب التي يمكن تحقيقها إذا ما أخذ بعين الاعتبار تأثيره بشكل مباشر على استهلاك الوقود الذي كان ولا يزال هاجساً لمشغلي السفن.

في سبيل ذلك، تم في هذا البحث استخدام تقنية ميكانيك الموائع الحاسوبية CFD, Computational Fluids Dynamics) لدراسة وحساب التدفق حول بدن قارب سريع مع وبدون وجود المعترض، وتقود هذه الدراسة إلى معرفة تأثير وجود المعترض على تغير شروط التدفق حول بدن السفينة والتي بدورها تؤدي إلى تغيير قيمة المقاومة، ومن ثم مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية المتوفرة.

تعتمد تقنية الـ CFD على حل المعادلات الناظمة للتدفق باستخدام إحدى الطرق الرقمية التالية، طريقة الحجوم المنتهية (Finite Volumes Method, FVM)، طريقة الفروق المنتهية (Finite Differencing Method, FDM) وطريقة العناصر المنتهية (Finite Elements Method, FEM)، وخلال السنوات السابقة تم تطوير العديد من البرامج التي تستخدم هذه التقنية، على سبيل المثال لا الحصر نذكر منها برنامج الـ OpenFOAM وبرنامج الـ ANSYS الذي يتم استخدامهما كثيراً في الوقت الحالي لحل التدفقات المعقدة. تعطي هذه البرامج إمكانية ضبط الشروط الحدية للجريان بسهولة، وكذلك تمكن من عرض النتائج على شكل مخططات بيانية ملونة تتيح تحليل النتائج بشكل دقيق.

من الجدير بالذكر أن الانتشار الكبير لتقنية الـ CFD في مجال الهندسة البحرية بشكل خاص لأسباب ترتبط بعدم القدرة على الاعتماد الدائم على الطرق التجريبية في دراسة الجريانات البحرية وذلك لوجود المعوقات التالية:

- صعوبة تأمين شروط الجريان المناسبة للتجربة (والمطابقة مع الواقع).
 - زيادة صعوبة إجراء التجربة عندما يكون الجسم المدروس كبير ويحوي ملحقات صغيرة جداً بالنسبة لحجمه ويجب أخذها بعين الاعتبار عند إجراء التجربة مثل السفينة وملحقاتها (الرفاص، الدفة،... إلخ)، مما يزيد وبشكل كبير من صعوبة القياسات، وذلك بسبب الأبعاد الهندسية المعقدة والصغيرة للملحقات بالمقارنة مع السفينة.
 - الطول المحدود لقنوات الاختبار مثل قنوات جر السفن، مما يحد من عملية القياس.
 - التكاليف المادية الكبيرة، والحاجة الزمنية الكبيرة للقياس.
- يمكن تفادي الصعوبات المذكورة أعلاه باستخدام الطرق الرقمية (CFD)، والتي من خلالها يمكن خلق شروط الجريان الموافقة لأي حالة إبحار.

الدراسات المرجعية:

قام الباحث De Luca, 2011 [2] بتقييم فعالية المعترض بالاعتماد على الطرق التجريبية والرقمية. ففي الدراسة الرقمية تم استخدام طريقة الـ RANS من أجل حل معادلات نافيه ستوكس، مع استخدام طريقة الـ VOF (Volume of Fluid) من أجل حل السطح الحر في المائع ثنائي الطور (ماء، هواء). في الدراسة التجريبية تم إجراء سلسلة من التجارب في حوض الجر التابع لقسم الهندسة البحرية في The University Of Naples. شملت التجارب اختبار نموذجين من القوارب، الأول هو C954 ذو بدن دائري، الثاني: 3 أبدان موشورية تختلف بزوايا نهوض المقدمة. في جميع التجارب تم حساب مقاومة البدن، والدفلة الديناميكية للبدن (بدون ملحقات) واعتبارها مرجعية للمقارنة بعد تركيب المعترض. حيث تم اختبار خمس مواقع مختلفة لتركيب المعترض.

درس كل من Salas and Tampier, 2013 [3] تأثير ملحقات المؤخرة على مقاومة نوعين من الأبدان (الإزاحية، ونصف الإزاحية) باستخدام تقنية الـ CFD، وتمت مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية. تمت دراسة التأثير المستقل لكل من المعترض وأجنحة المؤخرة على مقاومة الأبدان الإزاحية. عزت الدراسة تأثير الأجنحة والمعترض على المقاومة إلى تغيير حقل الضغط أسفل البدن. النتائج الرقمية حققت تطابق جيد مع النتائج التجريبية، تراوح تخفيض المقاومة للأجهزة الثلاثة بين 5-10%.

قدم الباحث Karimi, 2013 [4] دراسة هيدروديناميكية لشرح طريقة عمل المعترض في كيفية إعاقة التيار المائي أسفل البدن مسبباً إبطاء حركة جزيئات الماء، وانحراف خطوط التيار (نشوء منطقة ركود أمام الشفرة) مما يسبب زيادة الضغط الذي يؤثر بأسفل البدن مشكلاً قوة رفع تقوم بتقليل مساحة السطح المبلل للبدن، والذي يساهم جنباً إلى جنب مع تقليل زاوية الدفلة في تقليل المقاومة التي يتعرض لها البدن. أظهرت هذه الدراسة فعالية المعترض في تقليل المقاومة، وإمكانية تحسين الأداء الهيدروديناميكي بتغيير موقع تثبيت المعترض وبتغيير أبعاده الهندسية.

أجرى كل من Gultiken and Barlas, 2019 [5] دراسة تجريبية للتأثير الهيدروديناميكي للمعترض على القوارب السريعة، باستخدام ترتيبات مختلفة تشمل 3 مواقع عرضية لتثبيت المعترض، بالتوافق مع 6 قيم مختلفة للارتفاع ضمن مجال السرعة 5-30 عقدة. بينت الدراسة فعالية المعترض في تخفيض زوايا الدفلة غير المرغوبة عند السرعات العالية، مما يقلل من مقاومة الجر ويزيد السرعة، تم رصد الهبوط الأعظمي لجميع الحالات عند رقم فرود 0.5. مع ملاحظة أنه يجب سحب المعترض عند السرعات المنخفضة لأنه يسبب زيادة في المقاومة بالمقارنة مع البدن العاري. بلغ التخفيض الأعظمي 18%.

أهمية البحث وأهدافه:

يعتبر حساب مقاومة الجر والسعي إلى تخفيضها من القضايا البالغة الأهمية أثناء تصميم السفينة، لما له من تأثير مباشر على استطاعة الدفع المطلوبة وبالتالي على الفعالية الاستثمارية للسفينة، وهناك سعي دائم لتقليل هذه المقاومة قدر الإمكان سواء باللجوء لتصميم البدن بشكل انسيابي، أو بإضافة ملحقات للبدن مثل أوتاد المؤخرة، الأجنحة الررفافة والمعترضات، والتي تساعد بشكل أو بآخر في تقليل مقاومة البدن. ولقد وجد أن الملحقات الثابتة تقوم بتقليل المقاومة عند السرعات العالية، ولكنها تتسبب بزيادتها عند السرعات المنخفضة الأمر الذي دفع لتطوير ملحقات قابلة للضبط لتجنب التأثير السلبي عند السرعات المنخفضة، ويعطي المعترض (Interceptor) هذه الإمكانية نظراً لبساطة تصميمه وسهولة تركيبه، مما يجعله موضوعاً هاماً للدراسة الهيدروديناميكية.

الفائدة الثانية لهذا البحث تكمن في حساب الانزياح الشاقولي لمركز الثقل والدفلة الطولية للسفينة، لما لهما من تأثير على مقاومة السفينة، كذلك تم توضيح دور المعترض في تقليلهما.

طرائق البحث ومواده:

تم في هذا البحث استخدام CFD لحساب التدفق بأدق تفاصيله، وتوفير الجهد والتكلفة في إجراء الحسابات، حيث تم استخدام برنامج الـ ANSYS، [6]. باستخدام هذا البرنامج يتم حل المعادلات الناظمة للتدفق (معادلات نافيه ستوكس) بالاعتماد على طريقة رينولدز الوسطية والتي يطلق عليها "معادلات رينولدز نافيه ستوكس (RANS, SST لإغلاق نظام المعادلات المتشكل. يملك برنامج الـ ANSYS الكثير من الميزات التي تمكننا من حل أي مشكلة في ميكانيك الأوساط المستمرة، بالإضافة إلى ميكانيك الموائع بأنواعها المختلفة (النيوتونية، غير النيوتونية، القابلة للانضغاط وغير القابلة للانضغاط).

الشكل التفاضلي للمعادلات الناظمة للجريان

الشكل التفاضلي لمعادلة مصونية الكتلة في الإحداثيات الديكارتية، [7]–[9]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

الشكل التفاضلي لمعادلة مصونية كمية الحركة على المحور X:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u^2 + p - \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot u \cdot v - \tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot u \cdot w - \tau_{zx}) - \rho \cdot g_x = 0 \quad (2)$$

الشكل التفاضلي لمعادلة مصونية كمية الحركة على المحور Y:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot v \cdot u - \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot v^2 + p - \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot v \cdot w - \tau_{zy}) - \rho \cdot g_y = 0 \quad (3)$$

الشكل التفاضلي لمعادلة مصونية كمية الحركة على المحور Z:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot w \cdot u - \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot w \cdot v - \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot w^2 + p - \tau_{zz}) - \rho \cdot g_z = 0 \quad (4)$$

حيث P الضغط، u, v, w مركبات السرعة على المحاور الإحداثية x, y, z، τ_{ij} إجهاد القص، ρ كثافة المائع.

معادلات رينولدز نافيه ستوكس الوسطية غير المستقرة RANS:

وهي عبارة عن تبسيط لمعادلات نافيه ستوكس، وتعتمد على تمثيل كل متغير في المعادلات بقيمته الوسطية مضافاً لها التغير الآني لهذا المتغير، وعليه يمكن كتابة هذه المعادلات بالصيغة الوسطية على الشكل التالي:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial \bar{u}_i \cdot \bar{u}_j}{\partial x_j} = \rho \bar{F}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\tau}_{ij} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad (5)$$

حيث أن u'_i هي قيمة تارجحات السرعة على المحاور الإحداثية الديكارتية. بينما $\bar{\tau}_{ij}$ يمثل إجهادات القص الصفائحية، وتعطى بالشكل:

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

أما الحد الأخير من المعادلة τ_{ij} فيمثل إجهادات رينولدز المضطربة التي يعبر عنها من خلال مصفوفة الإجهادات التالية:

$$\tau_{ij} = \begin{bmatrix} -\rho \cdot u'_x u'_x & -\rho \cdot u'_x u'_y & -\rho \cdot u'_x u'_z \\ -\rho \cdot u'_x u'_y & -\rho \cdot u'_y u'_y & -\rho \cdot u'_y u'_z \\ -\rho \cdot u'_x u'_z & -\rho \cdot u'_y u'_z & -\rho \cdot u'_z u'_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

مصفوفة إجهادات رينولدز المضطربة غير معلومة ويجب حسابها، حيث تجعل نظام المعادلة غير مغلق ومن هنا تتبثق الحاجة لاستخدام موديلات الاضطراب التي تقوم بحساب المصفوفة وإغلاق نظام المعادلات.

الشكل التكاملي للمعادلات الناظمة للجريان

الشكل التكاملي لمعادلة مصونية الكتلة [9]–[7]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV + \iint_A \rho \vec{u} dA = 0 \quad (8)$$

بما أن مجموع القوى المؤثرة على حجم التحكم dV تساوي إلى معدل تغير كمية الحركة خلال الزمن، فيمكن كتابة معادلة كمية الحركة بالشكل التكاملي كما يلي:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho u_i dV + \int_A \rho u_i u_j dA = - \int_A T_{ij} dA + \int_V \rho f_i dV \quad (9)$$

حيث أن T_{ij} يمثل مصفوفة الإجهادات العامة ويمكن تحديدها تبعاً لفرضية نيوتن بالشكل التالي:

$$T_{ij} = - \left(p + \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \delta_{ij} + 2\mu S_{ij} \quad (10)$$

δ_{ij} هو ثابت كرونكر، الذي يأخذ القيمة 0 عندما $i \neq j$ ، والقيمة 1 عندما $i = j$. أما S_{ij} فيمثل مصفوفة الانفعالات، وتعطى بالعلاقة:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

الموديل الرياضي SST - $k - \omega$

يعتمد موديل SST - $k - \omega$ المقترح من قبل Menter عام 1993 على دمج اثنين من الموديلات الثنائية المعادلات k- ϵ و ω للاستفادة من المميزات التي يوفرها كل منهما [10]، من خلال تابع دمج F1 يعمل على تغيير ثوابت المعادلات بحيث يتم تفعيل الموديل k- ω بجوار الجدار ضمن طبقة تأثير اللزوجة، وبذلك يمكن استخدام الـ k- ω SST عند أرقام رينولدز المنخفضة دون الحاجة لتوابع تخميد، بعيداً عن الجدار وفي مناطق التيار الحر يتم تفعيل الموديل k- ϵ . يعمل موديل SST - $k - \omega$ بشكل جيد في الجريانات الانفصالية حيث يكون تدرج الضغط شديداً [11].

تعطى معادلة الطاقة الحركية حسب نموذج الـ K- ω SST بالشكل التالي:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (12)$$

أما بالنسبة لمعدل انتشار الطاقة النوعي فيعطى بالمعادلة التالية:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (13)$$

معادلة لزوجة الدوامية μ_t :

$$\mu_t = \frac{\rho \alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)}, \quad S = \partial u / \partial y \quad (14)$$

حيث أن:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right]^4 \right\}$$

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (15)$$

$$P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$$

علماً أن الثوابت الخاصة بهذا الموديل موضحة في الجدول (1).

الجدول (1): قيمة الثوابت المستخدمة في الموديل الرياضي SST $k - \omega$ [10].

β^*	α_1	β_1	σ_{k1}	σ_{k2}	$\sigma_{\omega 1}$	α_2	β_2	$\sigma_{\omega 2}$
$\frac{9}{100}$	$\frac{5}{9}$	$\frac{3}{40}$	0.85	1	0.5	0.44	0.0828	0.856

المعادلات في حالة الجريان ثنائي الطور

تفرض طبيعة جريان الماء حول بدن السفينة، وخاصة عند السرعات العالية تعقيدات إضافية في حل المعادلات النازمة لهذا الجريان. هذه التعقيدات ناجمة عن وجود طورين مختلفين للمائع المحيط بالبدن (ماء، هواء) ولتجاوز هذه الصعوبات تستخدم طريقة الـ Volume Of Fluid (VOF) التي تعتمد على معيار كمي α يدعى معامل حجم الطور، ويعبر عن النسبة المئوية لطور المائع الموجود في كل خلية من خلايا الشبكة، وبالتالي يحدد خواص أي مائع سيتم أخذها بالاعتبار عند حل المعادلات. ويعبر عن طور الهواء بـ $\alpha = 0$ ، وطور الماء بـ $\alpha = 1$ [12]. باعتبار $\alpha = \frac{V_{water}}{V}$ حيث V_{water} حجم الماء في الخلية، V حجم الخلية الكلي، وبالتالي عند أخذ معامل حجم الطور بالاعتبار تأخذ معادلة الاستمرار الشكل التالي:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (u\alpha) + \nabla \cdot (\alpha(1 - \alpha)u_r) = 0 \quad (16)$$

حيث u_r السرعة في موضع التماس بين الطورين، ويظهر من المعادلة عندما $\alpha = 1$ ينعدم الحد الذي يحوي u_r وبالتالي المائع في الخلية المدروسة هو ماء فقط، أما عندما $\alpha = 0$ ينعدم الحد الذي يحوي u ويكون المائع في الخلية هواء فقط. ويمكن التعبير عن خصائص المائع لكل طور من الطورين المعترضين بالشكل التالي:

$$\mu(X_{cell}, t) = \mu_{water} \alpha(X_{cell}, t) + \mu_{air} (1 - \alpha(X_{cell}, t)) \quad (17)$$

حيث μ الخاصية المميزة لطور المائع ضمن المجال المدروس، وعليه تصبح كثافة الماء والهواء ضمن أي خلية من الخلايا بالشكل التالي:

$$\rho = \alpha \rho_{water} + (1 - \alpha) \rho_{air} \quad (18)$$

الأبعاد الهندسية

يبين الشكل (2-c) السفينة المدروسة، الشكل (1-a) السفينة الحقيقية في البحر، الشكل (1-b) النموذج الهندسي الذي تم اعتماده في الدراسة، حيث تم الحصول على النموذج الهندسي الموضح في الشكل (2-c) على اليمين من موقع GrabCAD [13]، تم إجراء بعض التعديلات على النموذج بهدف التقليل من التعقيد أثناء بناء الشبكة الرقمية، حيث تم إزالة كامل المعدات العلوية، كما تم اقتطاع الجزء المنحرف نحو الأعلى (فوق سطح الماء) من المقدمة. الصورة في الأسفل على اليسار توضح النموذج بعد إجراء التعديلات عليه. هذا النموذج مشابه تماما للنموذج الذي تم إجراء تجارب عليه في الجامعة والمعهد التقني في ولاية فرجينيا Virginia Polytechnic Institute and State University [12]، المبين بالشكل (4).



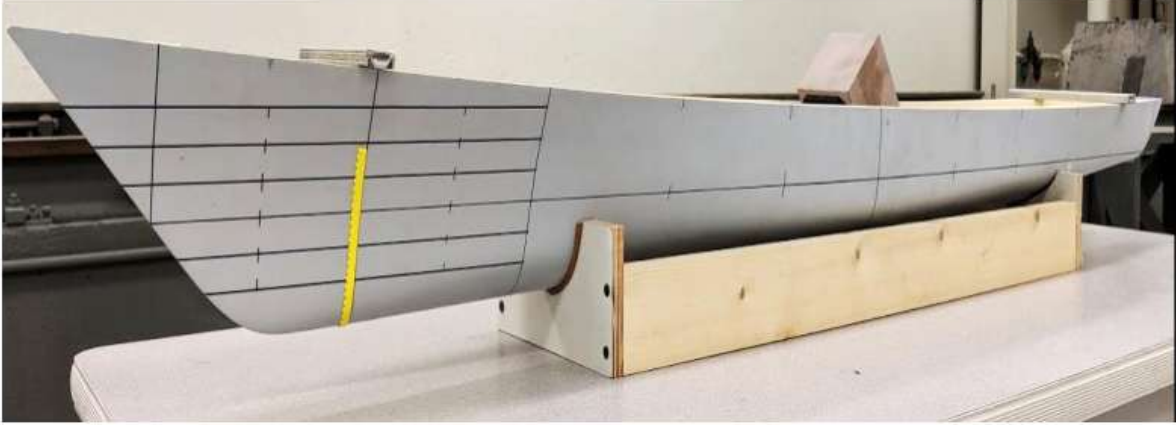
الشكل (1-a): القارب FFG-7.



الشكل (3-b): النموذج المعتمد في الدراسة.



الشكل (2-c): النموذج الهندسي للقارب FFG-7



الشكل (4): نموذج السفينة FFG-7 الذي تم اختباره في مختبر جامعة ولاية فرجينيا، [12].

يبين الجدول (2) أبعاد النموذج، معامل التصغير بالنسبة للسفينة الأصل هو $\lambda = 1/80$.
الجدول (2): الأبعاد الهندسية للنموذج FFG-7.

القيمة	الوحدة	رمز العنصر	العنصر
1.569	M	L_{pp}	الطول بين المتعامدين
0.172	M	B_{wl}	العرض عند خط الماء
0.0628	M	T	الغاطس
0.2771	m ²	S	مساحة السطح المبلل

الشروط الحديدية والبيئة الرقمية واعتباراتها

كما هو معروف فإن استخدام تقنية الـ CFD لحساب التدفق حول بدن السفينة يتطلب بناء مجال كبير حول السفينة على شكل متوازي مستطيلات يمثل قناة الاختبار التي ستختبر بها السفينة، ولابد من تقسيم هذا المجال إلى عدد كبير من الخلايا بحيث يتم حل المعادلات الناظمة للتدفق في مركز كل خلية حسابية، وبالتالي فإن مركز كل خلية حسابية يمثل حساس قياس يتم فيه قراءة بارامترات التدفق المختلفة (السرعة، الضغط، الطاقة الحركية، درجة الحرارة، إلخ). بناء على ما سبق فإنه من أجل الحصول على نتيجة جيدة لابد من زيادة عدد الحساسات قدر المستطاع، وهذا يعني زيادة عدد الخلايا قدر المستطاع. يبين الشكل 6 المجال الحسابي الذي تم بناؤه حول بدن السفينة. تم بناء هذا

المجال بواسطة برنامج ICEM وقد اختيرت أبعاده بما يتلاءم مع أبعاد النموذج، وبما يسمح بتطور الجريان أمام وخلف النموذج، أبعاد المجال الحسابي كما يلي:

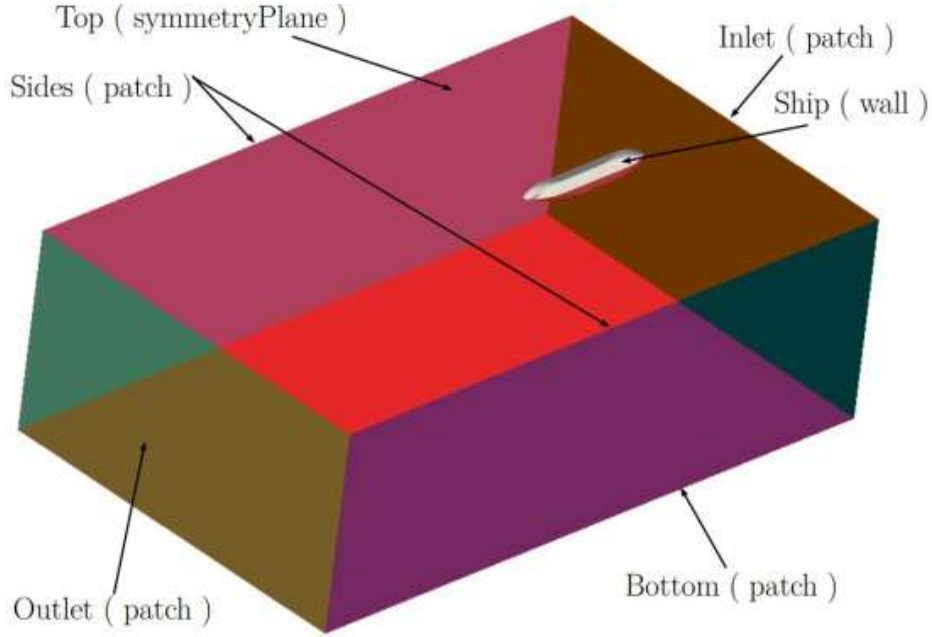
$$L = 5L_{BP}, B = 1.6L_{BP}, T = 2.5L_{BP}$$

كما يوضح الشكل 5 كيف تم تقسيم المجال الحسابي إلى عدد كبير من الخلايا بهدف حل المعادلات الناظمة للتدفق في مراكز هذه الخلايا من أجل تحديد الخصائص المختلفة للجريان. يمكن أيضاً ملاحظة زيادة عدد الخلايا في المناطق القريبة من القارب وهذا ما يسمى بتنعيم الشبكة الرقمية الذي يهدف إلى رصد التغيرات الكبيرة الحاصلة في منطقة الطبقة الحدية بأفضل شكل ممكن.

كما يوضح الشكل 6 الشروط الحدية التي تم استخدامها لحل المعادلات الناظمة، وقد تم ضبط الشروط الحدية الخاصة بكل قيمة من قيم السرعة المدروسة التي تتراوح بين (0.804-1.72) m/s الموافقة لأرقام فرويد (0.205-0.44).



الشكل 5: تقسيم المجال الحسابي إلى خلايا صغيرة.



الشكل 6: الشروط الحدية والمجال الحسابي حول بدن السفينة.

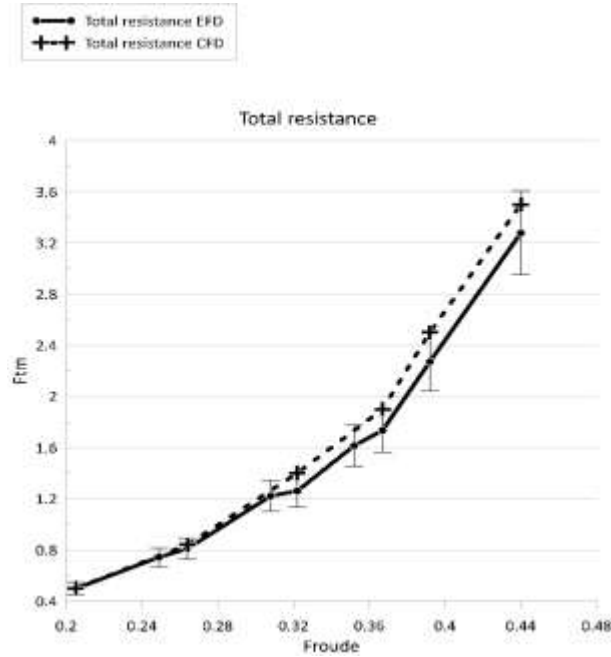
النتائج والمناقشة:

1. تقييم النتائج الرقمية لحالة السفينة بدون معترض

قبل البدء بعرض وتحليل النتائج الرقمية لابد من التأكد من جودة ودقة الطريقة والموديل الرياضي والشبكة الرقمية التي تم استخدامها لحل المعادلات النازمة للتدفق. ولهذا السبب تم أولاً مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية المتوفرة لكل من المقاومة الكلية والدرقطة الطولية (زاوية الدوران حول المحور y) وتأرجح مركز الثقل لنموذج السفينة FFG-7 بدون وجود المعترض.

تقييم النتائج الرقمية للمقاومة باستخدام CFD

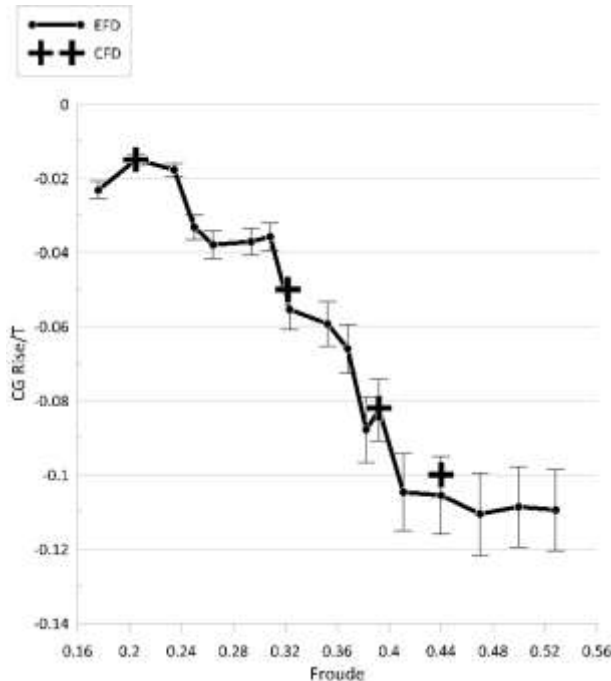
يوضح الشكل مقارنة بين النتائج الرقمية المحسوبة باستخدام CFD والنتائج التجريبية انظر [12] لقيمة المقاومة الكلية للسفينة عند قيم مختلفة لرقم فرود. كما هو واضح من هذا الشكل فإن النتائج التجريبية تحوي مقدار من الانحراف أعلى وأسفل القيمة الوسطية، والذي يتم تمثيله من خلال ما يسمى بال Error bars. بالمقارنة بين النتيجتين الرقمية والتجريبية يمكننا ملاحظة مقدار التطابق الجيد جدا بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية، وهذا يؤكد مدى دقة الـ CFD في حساب مقاومة السفينة.



الشكل (7): مقارنة بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية للمقاومة الكلية لنموذج السفينة FFG-7 بدون وجود معترض.

تقييم النتائج الرقمية لتأرجح مركز الثقل

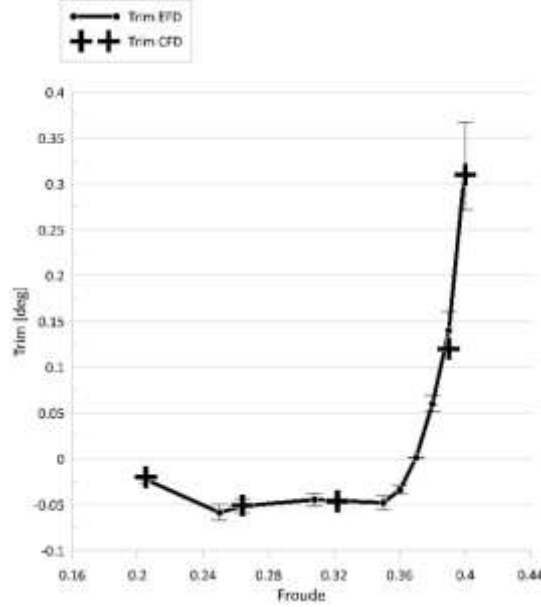
يوضح الشكل المقارنة بين النتائج الرقمية والتجريبية لتأرجح مركز الثقل عند قيم مختلفة لرقم فرود لنموذج السفينة FFG-7 بدون وجود المعترض، المحور الأفقي يمثل رقم فرود، والمحور الشاقولي يمثل مقدار انزياح مركز الثقل منسوباً إلى غاطس السفينة. كما هو واضح من هذا الشكل فإن التطابق بين النتائج جيد جداً، حيث أن النتائج الرقمية تتوضع دائماً ضمن مجال النتائج التجريبية [12].



الشكل (8): مقارنة بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية لانزياح مركز الثقل لنموذج السفينة FFG-7 في الاتجاه الشاقولي بدون وجود معترض.

تقييم النتائج الرقمية لدرفلة السفينة

يوضح الشكل (9) المقارنة بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية لدرفلة السفينة في الاتجاه الطولي حول المحور y. مرة أخرى يظهر لنا مدى جودة تقنية الـ CFD في حساب الجريانات المعقدة في مثل هذه الحالات. وعليه ومن خلال هذه النتائج يمكننا الانتقال إلى الخطوة التالية وهي حساب البارامترات السابقة للنموذج بوجود المعترض ودراسة تأثير وجود المعترض على هذا النوع من السفن.

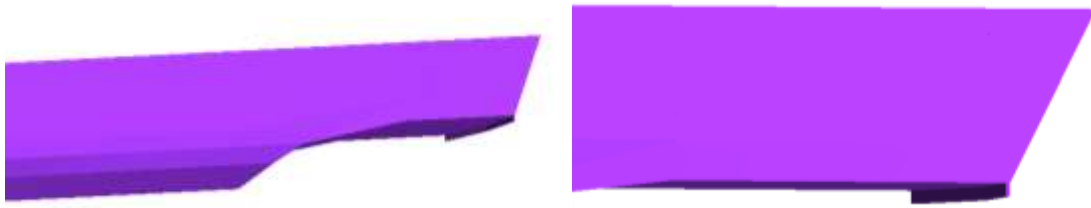


الشكل (9): مقارنة بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية لدرفلة نموذج السفينة FFG-7 في الاتجاه الطولي حول المحور y بدون وجود معترض [12].

2. تأثير وجود المعترض

تأثير المعترض على مقاومة السفينة

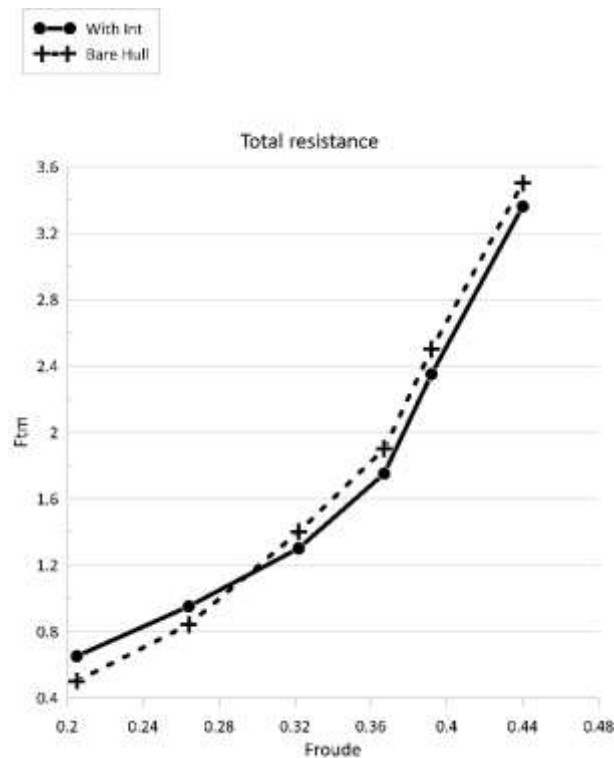
لقد تم إضافة المعترض على نهاية مؤخرة السفينة، مكان توضع المعترض عند المؤخرة موضح في الشكل (10). وعلى اعتبار عدم وجود تقدير دقيق للارتفاع الأنسب للمعترض، فلقد تم اختبار المعترض ذو الارتفاع 4 ملم أي 0.25% من طول السفينة.



الشكل (10): مكان توضع المعترض عند مؤخرة السفينة.

كما هو متوقع، فإن إضافة المعترض له تأثير سلبي مع السرعات المنخفضة (مع أرقام فرود الصغيرة، ضمن المجال 0.205-0.322)، حيث أن وجود المعترض يسبب زيادة في المقاومة في هذا المجال للسرعات، ولكن مع زيادة سرعة السفينة (أرقام فرود الأكبر من 0.322) نلاحظ أن المعترض يلعب دوراً إيجابياً في تقليل قيمة المقاومة الكلية للسفينة. يوضح الشكل (11) نتيجة الـ CFD للمقاومة الكلية للسفينة مع وبدون المعترض، وكما هو واضح من هذا الشكل فإنه ضمن المجال 0.205-0.322 لرقم فرود (السرعات المنخفضة) فإن المعترض يتسبب في زيادة المقاومة الكلية للسفينة،

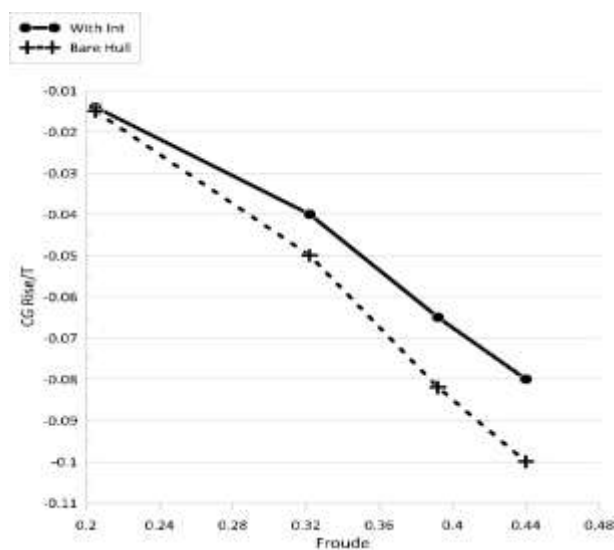
في حين أنه وبعد هذه القيمة لرقم فرود 0.322 (أي مع السرعات العالية نسبياً) فإن المعترض يلعب دوراً إيجابياً في تقليل مقاومة السفينة.



الشكل (11): مقارنة بين قيم المقاومة الكلية للسفينة مع وبدون معترض (المعترض ذو ارتفاع 0.04 متر).

تأثير المعترض على تأرجح مركز الثقل

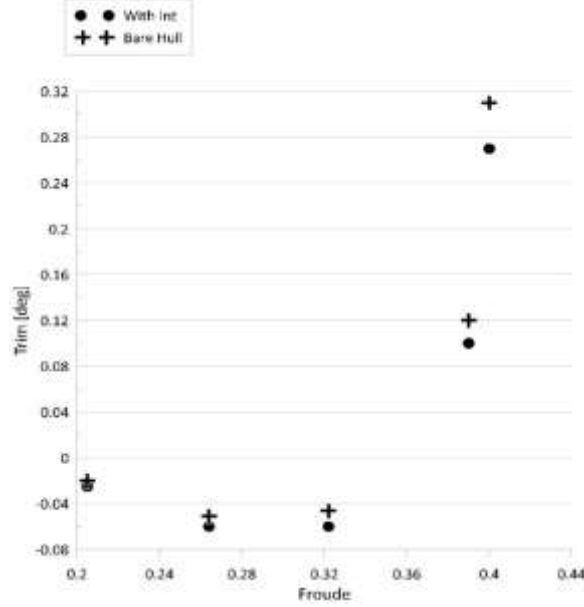
يوضح الشكل (12) مقدار انزياح مركز الثقل كنسبة من الغاطس بالنسبة لرقم فرود. كما هو واضح في هذا الشكل فإن وجود المعترض يلعب دوراً إيجابياً في تقليل انزياح مركز الثقل كلما ازدادت السرعة، التفسير الفيزيائي لهذا الأمر سيأتي لاحقاً.



الشكل (12): انزياح مركز ثقل السفينة مع وبدون معترض.

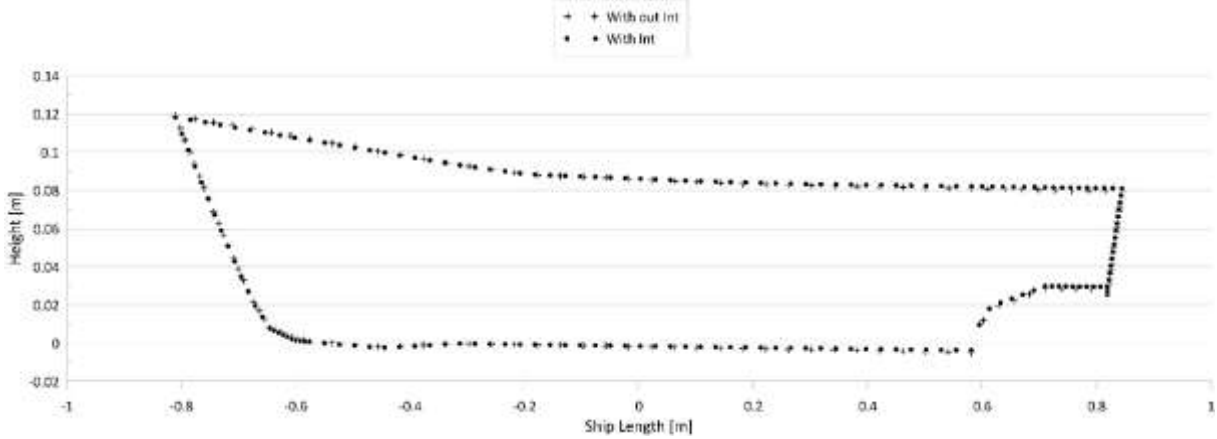
تأثير المعترض على الدرفة الطولية للسفينة

يوضح الشكل تأثير وجود المعترض على الدرفة الطولية للسفينة، كما هو واضح في هذا الشكل فإن وجود المعترض يساعد في تقليل مقدار الدرفة الطولية للسفينة عند كل السرعات. وبشكل خاص عند السرعات العالية.



الشكل (13): تأثير وجود المعترض على الدرفة الطولية للسفينة.

يوضح الشكل (14) مقدار النقصان في الدرفة الطولية للسفينة بوجود المعترض، إشارات الـ + تمثل موضع السفينة بدون معترض، والنقط الدائرية تمثل موضع السفينة بوجود المعترض. كما هو واضح من هذا الشكل فإن وجود المعترض يؤدي إلى رفع الجزء الخلفي من البدن والذي يؤدي بدوره إلى تقليل مقدار الدرفة الطولية للسفينة.

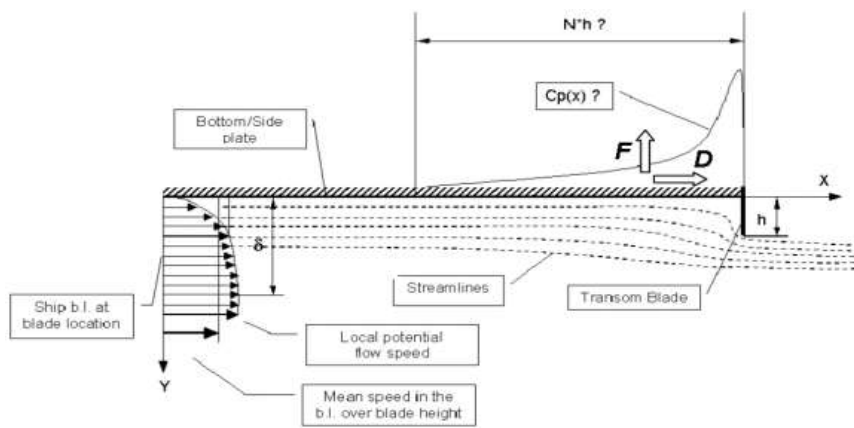


الشكل (14): تأثير وجود المعترض على الدرفة الطولية للسفينة عند رقم فرود 0.392.

3. التفسير الفيزيائي للنتائج السابقة

من خلال تحليل النتائج السابقة يتضح لدينا أن وجود المعترض له دور إيجابي في تقليل مقاومة السفينة ولو بمقدار قليل عند السرعات العالية للسفينة، كما ويلعب دوراً إيجابياً في تقليل كل من الانزياح الشاقولي لمركز الثقل بالإضافة

إلى تقليل الدرفة الطولية للسفينة. التفسير الفيزيائي لهذه النتائج يمكن توضيحه كالتالي، المعترض هو عبارة عن لوح رقيق مستطيل الشكل، أقرب ما يكون لشفرة، يتم تثبيته على مؤخرة السفينة بحيث يبرز بشكل عمودي أسفل المؤخرة، وتشكل مساحة الشفرة عائقاً أمام تيار الماء الجاري أسفل البدن، بسبب هذا العائق إبطاء مفاجئ للتيار وتشكل نقاط توقف تؤدي إلى انحراف خطوط التيار (المتوازية سابقاً) بدءاً من مسافة معينة أمام المعترض، هذا الانحراف يعني زيادة طول الطريق المسلك من قبل جزيئات الماء وبالتالي انخفاض سرعتها، الأمر الذي يتسبب بزيادة الضغط المحلي، وخلق قوة رفع تؤثر على البدن وتساهم في تعديل الدرفة الآتية، وتقليل المقاومة في آن معاً. بذلك تنفصل خطوط التيار عند طرف الشفرة، في حين أن الانفصال الطبيعي كان ليحدث عند حافة المؤخرة في حالة البدن العاري، وبعد هذه النقطة يتشكل تيار حر [12].



الشكل 15: التأثير الهيدروديناميكي للمعترض [14].

يبين الشكل 15 مقطع جانبي لتوضع المعترض وكيفية انحراف خطوط التيار، يدعى الامتداد العمودي للمعترض "ارتفاع المعترض" ويرمز له عادة بـ h ، والامتداد باتجاه عرض البدن يرمز له بـ S . يمكن ملاحظة أن ارتفاع المعترض محتوي بشكل تام ضمن الطبقة الحدية ذات السمك δ [14].

ينتج عن وجود المعترض قوة رفع كلية F ، ومقاومة إضافية D كما هو واضح في الشكل 15 تعود المقاومة D بشكل أساسي إلى تأثير ضغط التوقف على المعترض، خاصةً عند السرعات المنخفضة، تؤدي هذه المقاومة إلى زيادة المقاومة الكلية، الأمر الذي طرح ضرورة إضافة نظام تحكم مزود بمحرك يقوم بسحب المعترض لداخل البدن عند السرعات المنخفضة، هذا الأمر الذي يعطي إمكانية التحكم بارتفاع المعترض حسب سرعة السفينة.

أما عند السرعات العالية، فإن قوة الرفع الناتجة عن الضغط المحلي المرتفع تعمل على تصحيح الدرفة وكذلك تقليل مساحة السطح المبلل للبدن، وبالتالي تقليل المقاومة، وبذلك تعوض هذه التأثيرات التأثير السلبى للمقاومة الإضافية. من الأهمية بمكان ملاحظة أن الامتداد الطولي الكبير لمنطقة الضغط المرتفع أمام المعترض، يضع قوى الضغط المرتفع الناتجة عنه بموقع الأفضلية عند مقارنتها مع مصححات الدرفة الأخرى من ملحقات المؤخرة (الأجنحة والأوتاد)، أي أنه وعند نفس العزم يعمل المعترض بذراع أقصر وقوة أكبر (منطقة أكبر، ضغط أعلى) [12].

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- من خلال هذه الدراسة يمكننا التأكيد على أهمية تقنية الـ CFD في حساب التدفقات حول أبدان السفن، حيث أنه من خلال هذه التقنية يمكننا حساب الكثير من البارامترات التي تهتمنا أثناء عملية تصميم السفينة.
- الموديل $k - \omega SST$ يعتبر من أفضل النتائج في طريقة الـ RANS وهو يعطي نتائج جيدة جدا في المجال البحري.
- المعترض له تأثير سلبي مع السرعات المنخفضة، حيث يؤدي إلى زيادة مقاومة السفينة.
- مع زيادة سرعة السفينة، يلعب المعترض دورا إيجابيا في تقليل مقاومة السفينة.
- يقلل المعترض كل من الدفلة الطولية، وانزياح مركز الثقل على كامل مجال السرعة المدروسة.

التوصيات:

- يجب استخدام المعترض مع السفن ذات السرعات العالية.
- لا ينصح أبدا باستخدام المعترض مع السفن ذات السرعات المنخفضة، لأنه سيؤدي حتما إلى زيادة مقاومة السفينة.

التوصيات للأعمال المستقبلية

- أن يتم اختبار المعترض في حالة وجود الرفاص والدفة للتأكد من دوره الإيجابي مع وجود كامل الملحقات للسفينة.
- أن يتم تغيير مكان توضع المعترض، قبل الرفاص مثلا، ودراسة تأثيره على كل من مقاومة السفينة وميلانها الطولي والطبقة الحدية وحقل السرعة في مستوي الرفاص.
- تغيير ارتفاع المعترض وإعادة الحسابات مرة أخرى من أجل معرفة الارتفاع الأنسب تبعا لطول السفينة.
- إجراء الحسابات السابقة على السفينة الحقيقية مع ارتفاعات مختلفة للمعترض والتأكد من التأثير الإيجابي للمعترض مع السرعات العالية.

References:

- [1] A. H. Day and C. Cooper, "An experimental study of interceptors for drag reduction on high-performance sailing yachts," *Ocean Eng.*, vol. 38, no. 8–9, pp. 983–994, Jun. 2011, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2011.03.006.
- [2] F. De Luca, "Experimental Study on Interceptor's Effectiveness," Università degli studi di Napoli "Federico II," 2011.
- [3] M. Salas and G. Tampier, "Assessment of appendage effect on forward resistance reduction," vol. 7, no. July 2013, pp. 37–45.
- [4] M. H. Karimi and P. D. Student, "An experimental study of interceptor's effectiveness on hydrodynamic performance of high-speed planing crafts," vol. 20, no. 2, pp. 21–29, 2013.
- [5] A. G. Avci and B. Barlas, "An experimental investigation of interceptors for a high speed hull," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 256–273, 2019, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2018.05.001.
- [6] "Ansys - Wikipedia." <https://en.wikipedia.org/wiki/Ansys> (accessed Jul. 07, 2020).
- [7] B. Schönung, *Numerische Strömungsmechanik: Inkompressible Strömungen mit komplexen Berandungen*. 2013.
- [8] J. Ferziger and M. Peric, *Numerische Strömungsmechanik*. 2008.
- [9] S. Lecheler, *Numerische Strömungsberechnung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.
- [10] F. R. Menter, "Zonal two equation $\kappa-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows," 1993.
- [11] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA J.*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, Aug. 1994, doi: 10.2514/3.12149.
- [12] R. P. Salian, S. Brizzolara, and J. A. P. Jr, "Adjustable Energy Saving Device for Transom Stern Hulls Adjustable Energy Saving Device for Transom Stern Hulls," 2019.

[13] “GrabCAD Makes Additive Manufacturing at Scale Possible.” <https://grabcad.com/> (accessed Dec. 06, 2021).

[14] S. Brizzolara, “Hydrodynamic analysis of interceptors with cfd methods,” no. October 2003, 2014.