

Study of the Influence of Stern Flaps on the Resistance of the High-speed Vessels using CFD

Dr. Michel Barbahan*
Zain Dayoub**

(Received 8 / 5 / 2023. Accepted 20 / 6 / 2023)

□ ABSTRACT □

This study aims to determine the influence of the stern flaps on the hydrodynamic performance of high-speed vessels using CFD (Computational Fluid Dynamic). The URANS method and $k-\omega$ Shear Stress Transport (SST) model with the ANSYS program were used to solve the Navier-Stokes equations. The Volume of the Fluid method was used to capture the free surface and the interaction between the two phases (water and air) around the hull. The comparison between the CFD and Exp-results of total resistance, the rise of the center of gravity, and trim show a good agreement. According to the CFD results, the interceptor gives the best results regarding the ship's hydrodynamic performance.

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

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

*Professor, Maritime Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. Email: dr.michelvouzeffbarbahan@tishreen.edu.sy

** Master Student, Department of Maritime Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria Email: zainian634@gmail.com

دراسة تأثير أجنحة المؤخرة على مقاومة القوارب السريعة باستخدام تقنية CFD

د. ميشيل بربهان*

زين ديوب**

(تاريخ الإيداع 8 / 5 / 2023. قُبِلَ للنشر في 20 / 6 / 2023)

□ ملخص □

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير الأجنحة الرفرافة Stern flaps على الأداء الهيدروديناميكي 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. تم في البداية مقارنة النتائج الرقمية لكل من المقاومة الكلية والانزياح الشاقولي لمركز النقل والدفلة الطولية مع النتائج التجريبية المتوفرة، المقارنة أظهرت التطابق الكبير بين النتائج وهذا يؤكد مدى دقة الـ CFD في حل هذا النوع من التدفقات. أثبتت نتائج هذا البحث بأن المعترض يعطي أفضل النتائج في تحسين الأداء الهيدروديناميكي للسفن السريعة مع السرعات العالية، وذلك بالمقارنة مع الأنواع الأخرى من ملحقات المؤخرة.

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

مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



حقوق النشر

CC BY-NC-SA 04

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

الايمل: dr.michelyouzeffbarbahan@tishreen.edu.sy

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

الايمل: zainian634@gmail.com

مقدمة:

يعود تاريخ الأجنحة الرافعة إلى السبعينيات من القرن الماضي، عندما تم تطوير جهاز أيروديناميكي يسمى Gurney Flap والذي يشبه هندسياً المعترض ويستخدم لزيادة معامل الرفع في الحوامات. في وقت لاحق، تم استخدامه في مجال الملاحة للتحكم في الدرفلة والتوجيه على الطوافات السريعة، وثبتت فعاليته على القوارب ثنائية الأبدان في العام 2000. فيما بعد وجد أن ملحقات المؤخرة قادرة على تقليل مقاومة القوارب السريعة وتم استخدامها مع اليخت Ecover 3 في عام 2008 لهذا الغرض [1]. ومع ذلك، الدراسات التي تناولت تأثير ملحقات المؤخرة على الأداء الهيدروديناميكي للقوارب بشكل عام وعلى المقاومة بشكل خاص قليلة نسبياً.

ففي عام 2011 قام كل من Day and Cooper بمقارنة عمل المعترض مع الجهاز الأيروديناميكي Gurney flap المستخدم على أجنحة الطائرات. ودراسة تأثير المعترض على المقاومة. حيث حقق المعترض فعالية عالية في تخفيض مقاومة البدن في المياه الهادئة. وعند السرعة 7.5 و 15 عقدة أظهر المعترض فعالية أكبر بتصحيح الدرفلة [2].

في نفس العام 2011 قام الباحث De Luca [3] 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، والدرفلة الديناميكية للبدن (بدون ملحقات) واعتبارها مرجعية للمقارنة بعد تركيب المعترض. حيث تم اختبار خمس مواقع مختلفة لتركيب المعترض.

John et. al., 2011 [4] قاموا بدراسة تحسين الأداء الهيدروديناميكي للسفينة من خلال إجراء مجموعة من التجارب على نماذج مختلفة من الأبدان (كاتامران بوساند هوائية، طوافات انزلاقية) وذلك لمعرفة الفائدة من استخدام ملحقات المؤخرة (أوتاد المؤخرة، أجنحة المؤخرة، المعترض) حيث تم اختبار فعالية الترتيب ومكان التركيب الأفضل لهذه الأجهزة وفعالية تركيب جهاز واحد أو اثنين معاً. فمثلاً في السفن الإزاحية، فعالية التركيب المزدوج (وتد مع جناح) أعلى من فعالية كل منهما منفصلاً. تقليل أثر المخر أكبر عند الاستخدام المزدوج (وتد - معترض) و(وتد - جناح). تأخير انفصال الطبقة الحدية عند السرعة 4 عقدة باستخدام الترتيب (وتد - جناح)، وعند السرعة 2 عقدة باستخدام المعترض فقط. بالنسبة للطوافات الانزلاقية أمكن تقليل الدرفلة بشكل جيد بواسطة الترتيب (وتد - معترض)، ولكن المعترض أكثر فعالية من الأوتاد. تأثير الأجهزة الثلاثة على الأبدان المزدوجة مشابه لما ورد ذكره.

في عام 2013 قام كل من Salas and Tampier [5] بإجراء دراسة لتأثير 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%.

Mansoori et. al., 2017 [6] قاموا باستخدام الـ CFD لتحديد التصميم المثالي للمعترض، وذلك من خلال دراسة تأثير أبعاد المعترض على تغيرات الضغط عند المؤخرة، الدرفلة، الجر ومساحة السطح المبلل. اعتمد في دراسته على حل معادلات نافيه ستوكس بطريقة العناصر المنتهية FEM مستخدماً حلالات RANSE وطريقة الـ VOF لضبط

السطح الحر. وضحت الدراسة الخصائص الهيدروديناميكية التي تنتج عن وجود المعترض من مقاومة إضافية، ورفع إضافي، وعزم. وأكدت على ضرورة تساوي العزم الناتج مع عزم الدرفلة لضمان فعالية المعترض وتجنب التأثير السلبي عند اختلاف قيم العزمين والذي قد يسبب درفلة سلبية تؤدي إلى غمر المقدمة وتؤثر على أمان القارب.

Talaat et. al., 2017 [7] قدموا نموذج معترض مثقب يقوم بتسخير طاقة الجريان أسفل البدن لتوليد الطاقة الكهربائية، حيث يقوم المعترض باعتراض الجريان وتغيير توزيع الضغط لخلق قوة الرفع الهيدروديناميكية، اقترحت الدراسة تعديل على تصميم المعترض يتضمن إحداث فتحات ضمن الشفرة بشكل يسمح للماء بالمرور عبرها إلى مجموعة من الأنابيب المتصلة مع الفتحات ضمن جسم المعترض، تمتد الأنابيب شاقولياً بشكل موازي للمؤخرة وتؤدي إلى عنفة هيدروليكية تقوم بتوليد الطاقة الكهربائية كخطوة نوعية للتقليل من طاقة الدفع الضائعة خلف الرفاص نتيجة تأثير المخر ضمن إطار العمل على تمكين استخدام الطاقة الخضراء على السفن.

Song et. Al., 2018 [8] قاموا بدراسة الأداء الهيدروديناميكي لسفينة ذات بدن بشكل V عند إضافة نوعين من ملحقات المؤخرة (معترض وجناح رفراف)، لتحديد أثر هذه الملحقات على خصائص مقاومة الجر، الدرفلة وهبوط السفينة المعترضة. تم إجراء الدراسة تجريبياً ورقمياً عند حالات مختلفة تتضمن تركيب معترض فقط، جناح فقط وكليهما معاً. بينت النتائج أن تخفيض المقاومة الكلية يعود إلى تخفيض المقاومة المتبقية بشكل أساسي، حيث تبلغ نسبة تخفيض المعترض للمقاومة المتبقية 80% من التخفيض الكلي، بينما يقوم الجناح بتخفيضها بنسبة 93%، أما بالنسبة للأبعاد المثالية فإن نسبة ارتفاع المعترض إلى طول البدن $d/L=0.0015$ تعطي التخفيض الأكبر للمقاومة بنسبة 7.85% عند رقم فرويد 0.534، بينما تعطي النسبة اللابعديّة لارتفاع الجناح الرفراف $h/L=0.0026$ (stern flap) تخفيضاً بنسبة 8.61% عند رقم فرويد 0.4. يقوم كل من المعترض والجناح بزيادة الضغط عند المؤخرة وخلق قوة رفع تساهم في تعديل الدرفلة الحالية، بالإضافة إلى زيادة الطول الفعال لخط الماء، وتقليل ارتفاع موجة الأثر الذيلي، وزيادة الفجوة الهوائية أسفل البدن مما يقلل الهبوط وطاقة الأمواج المستهلكة على حد سواء. ركزت الدراسة على التأثير المشترك لاستخدام نوعي الملحقات بهدف زيادة إمكانية توفير الطاقة على السفن، وأوضحت أن الدمج المنطقي للمعترض والجناح (باستخدام الأبعاد المثالية لكليهما) يحسن الأداء الهيدروديناميكي بشكل كبير.

Gultiken and Barlas, 2019 [9] بدراسة 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 الدرفلة غير المرغوبة عند السرعات العالية، مما يقلل من مقاومة الجر ويزيد السرعة، تم رصد الهبوط الأعظمي لجميع الحالات عند رقم فرويد 0.5. مع ملاحظة أنه يجب سحب المعترض عند السرعات المنخفضة لأنه يسبب زيادة في المقاومة بالمقارنة مع البدن العاري. بلغ التخفيض الأعظمي 18%.

Pacuraru et. al., 2019 [10] قاموا بدراسة تأثير ملحقات المؤخرة (أوتاد المؤخرة و المعترض) على الأداء الهيدروديناميكي لسفينة ركاب بطول 31 m، من خلال حساب المقاومة والتأرجح الشاقولي والطولي ضمن مجال السرعة (4.4 – 13.4 m/s). تم استخدام برنامج الـ NUMECA/FineMarine لحساب الجريان حول السفينة. تم استخدام طريقة الـ RANS والموديل الرياضي $k-\omega$ SST من أجل حل معادلات نافيه ستوكس.

Song et. Al. 2019 [11] قاموا بدراسة تأثير الأجنحة الرفرافة على الأداء الهيدروديناميكي لسفينة الـ DTMB5415، تمت الدراسة على كل من النموذج والسفينة الحقيقية، بهدف دراسة تأثير فرق مقياس السفينة على

أدائها الهيدروديناميكي. لقد أثبتت هذه الدراسة أن إضافة ملحقات المؤخرة يؤثر بشكل إيجابي جدا عند السرعات العالية للسفينة، حيث أنها تقلل من مقاومة السفينة ومن درفلتها الطولية. تم في هذه الدراسة أيضا إجراء تجربة على نموذج السفينة المدروسة وتمت مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية التي تمت الحصول عليها. المقارنة أثبتت أن تقنية الـ CFD تعطي نتائج جيدة جدا بالمقارنة مع الواقع الحقيقي.

يهدف هذا البحث إلى تسليط الضوء على المكاسب الممكنة في استهلاك الوقود عند استخدام الأجنحة الرافعة مع القارب السريع FFG-7. سيتم استخدام تقنية CFD (Computational Fluids Dynamics) لدراسة التدفق حول بدن القارب وتقدير تأثير أجنحة المؤخرة بزوايا مختلفة على تغيير قيمة المقاومة، كما سيتم مقارنة نتائج الأجنحة الرافعة مع نتائج المعترض التي تم نشرها من قبل الباحثة هلا داؤد على نفس القارب [12].

تعتمد تقنية CFD على حل المعادلات النازمة 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). تطوير العديد من البرامج التي تستخدم هذه التقنية يتيح ضبط الشروط الحدية للجريان وعرض النتائج بشكل دقيق. استخدام تقنية CFD في الهندسة البحرية مهم جدا لعدم توفر إمكانية الاعتماد الدائم على الطرق التجريبية في هذا المجال وبالأخص عندما يتعلق الأمر بحسابات السفينة الحقيقية.

أهمية البحث وأهدافه:

يعد حساب مقاومة الجر والسعي لتخفيضه من الأمور الأساسية التي يجب مراعاتها أثناء تصميم السفينة، حيث يؤثر بشكل مباشر على قدرة الدفع المطلوبة وبالتالي على كفاءة استثمار السفينة. وهناك العديد من الطرق التي يمكن من خلالها تقليل هذه المقاومة. يعتبر تصميم البدن بشكل انسيابي وإضافة ملحقات المؤخرة مثل الأجنحة الرافعة والمعترضات وأوتاد المؤخرة من الطرق التي تهدف إلى تقليل المقاومة. وقد وجد أن الملحقات الثابتة تقلل المقاومة عند السرعات العالية وتزيدها عند السرعات المنخفضة، مما دفع إلى تطوير ملحقات قابلة للضبط مثل الأجنحة الرافعة (stern flaps) لتجنب هذا التأثير السلبي. وهنا تكمن أهمية هذا البحث من خلال اختبار تأثير الجناح الرافع على تقليل مقاومة السفينة عند السرعات العالية واختبار عدة زوايا ميلان له.

طرائق البحث ومواده:

- البرنامج الذي تم استخدامه في هذه الدراسة هو برنامج الـ ANSYS، [13].
- تم حل المعادلات النازمة للتدفق (معادلات نافيه ستوكس) بالاعتماد على طريقة رينولدز الوسطية والتي يطلق عليها "معادلات رينولدز نافيه ستوكس (RANS, Reynolds Averaged Navier Stokes)" وستوضح بشكل مفصل لاحقاً.
- تم استخدام سفينة الـ FFG-7 وهي مدمرة حربية سريعة.
- تم استخدام طريقة الـ VOF من أجل حساب السطح الحر بين الهواء والماء.

المعادلات الناظمة للتدفق

لقد تم استخدام معادلات الـ RANS, Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations في هذه الدراسة 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:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial \bar{u}_i \cdot \bar{u}_j}{\partial x_j} = \rho \bar{F}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j) \quad (1)$$

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

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

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

$$\tau_{ij} = \begin{bmatrix} -\rho \cdot u'_x u'_x & -\rho \cdot u'_x u'_y & -\rho \cdot u'_x u'_z \\ -\rho \cdot u'_x u'_y & -\rho \cdot u'_y u'_y & -\rho \cdot u'_y u'_z \\ -\rho \cdot u'_x u'_z & -\rho \cdot u'_y u'_z & -\rho \cdot u'_z u'_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

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.

الموديل الرياضي SST k - ω

يعتمد موديل SST k - ω المقترح من قبل Menter عام 1993 على دمج اثنين من الموديلات الثنائية المعادلات k-ε و ω للاستفادة من المميزات التي يوفرها كل منهما [14]، 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-ω بشكل جيد في الجريانات الانفصالية حيث يكون تدرج الضغط شديداً [15].

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

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

أما بالنسبة لمعدل انتشار الطاقة النوعي فيعطى بالمعادلة التالية:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (5)$$

معادلة لزوجة الدوامة μ_t :

$$\mu_t = \frac{\rho \alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)}, \quad S = \partial u / \partial y \quad (6)$$

حيث أن:

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

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (7)$$

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

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

علماً أن الثوابت الخاصة بهذا الموديل موضحة في الجدول 1.

الجدول 1: قيمة الثوابت المستخدمة في الموديل الرياضي SST $k - \omega$.

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 (VOF) Volume Of Fluid 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 $\alpha = 1$ [16]. 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:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha u) + \nabla \cdot (\alpha(1 - \alpha)u_r) = 0 \quad (8)$$

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 المعبرين بالشكل التالي:

$$\mu(X_{cell}, t) = \mu_{water} \alpha(X_{cell}, t) + \mu_{air} (1 - \alpha(X_{cell}, t)) \quad (9)$$

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

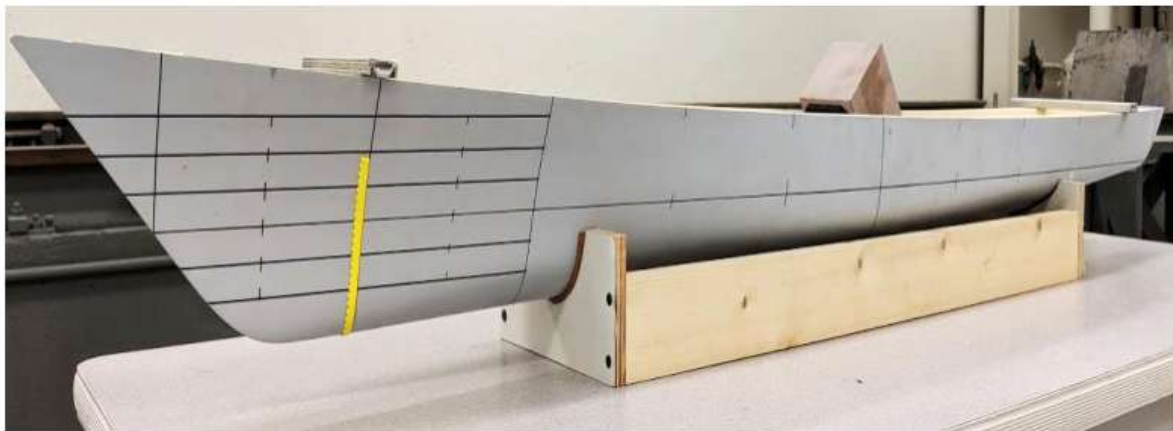
$$\rho = \alpha \rho_{water} + (1 - \alpha) \rho_{air} \quad (10)$$

الأبعاد الهندسية

يبين الشكل 1 السفينة المدروسة، في الأعلى القارب السريع FFG-7 الحقيقي في البحر، في الأسفل النموذج الهندسي الذي تم اعتماده في الدراسة، حيث تم الحصول على هذا النموذج من موقع GrabCAD [17]. هذا النموذج مشابه تماما للنموذج الذي تم إجراء تجارب عليه في الجامعة والمعهد التقني في ولاية فرجينيا Virginia Polytechnic Institute and State University [16]، انظر الشكل 2.



الشكل 1: النموذج الهندسي للقارب FFG-7 بعد تعديله في برنامج الـ ICEM وإزالة الجزء العلوي من المعدات.



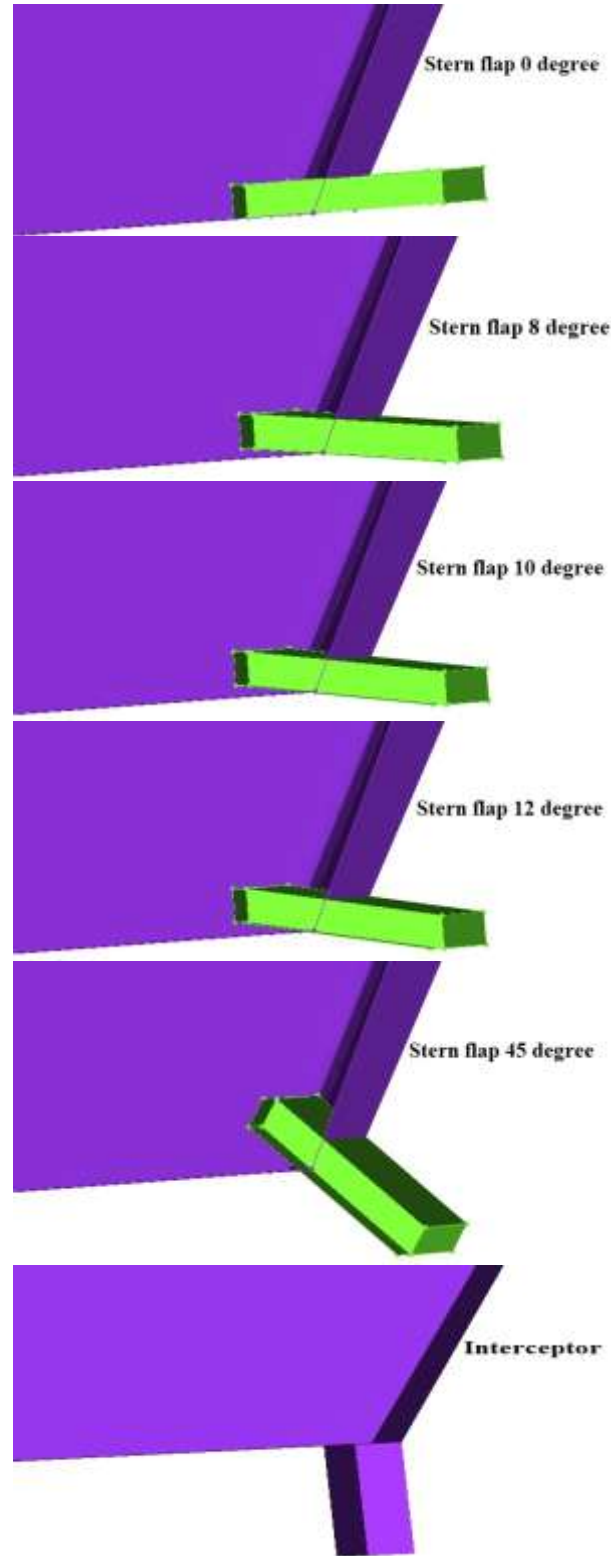
الشكل 2: نموذج السفينة FFG-7 الذي تم اختباره في الجامعة والمعهد التقني لولاية فرجينيا [16].

أبعاد النموذج الذي تم إجراء الدراسة عليه موضحة في الجدول 1، معامل التصغير بالنسبة للقارب الحقيقي هو $\lambda = 1/80$.

الجدول 2: الأبعاد الهندسية للسفينة FFG-7.

القيمة	الواحدة	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

الشكل 3 يوضح منطقة مؤخرة السفينة مع إضافة الجناح الرافع مع أربع قيم لزاوية ميلان الجناح الرافع، بالإضافة إلى صورة توضح توضع المعترض.



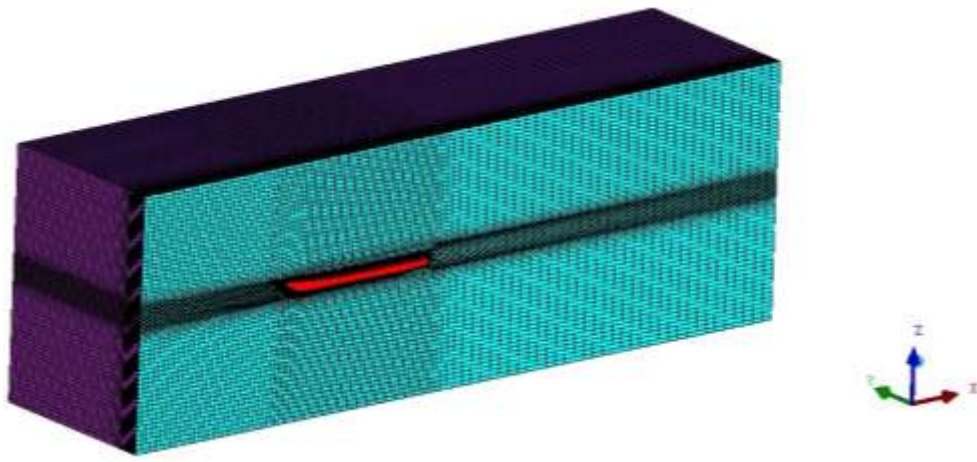
الشكل 3: كيفية توضع المعترض والجناح الرافع مع أربع زوايا ميلان عند مؤخرة السفينة.

الشروط الحدية والبيئة الرقمية واعتباراتها

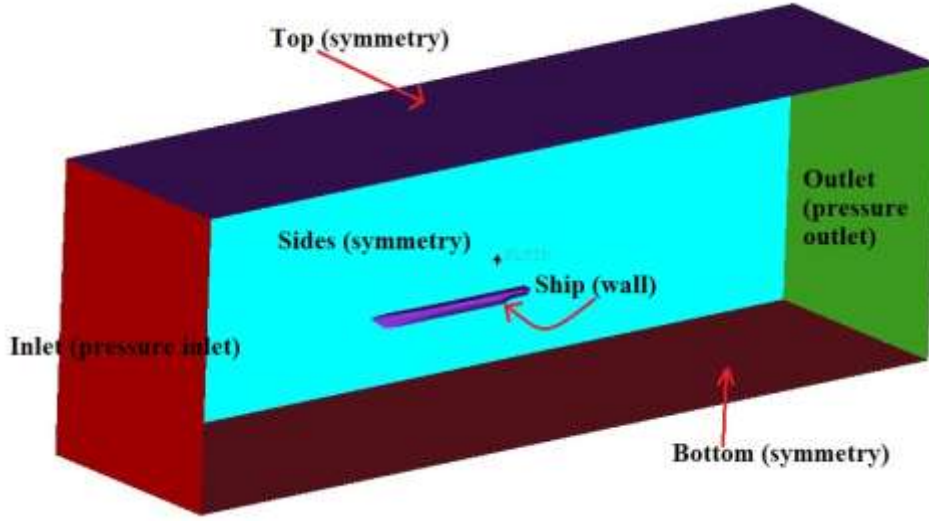
يتطلب استخدام تقنية الـ CFD لحساب التدفق حول بدن السفينة بناء مجال كبير حولها على شكل متوازي مستطيلات يمثل قناة الاختبار، وتقسيم هذا المجال إلى عدد كبير من الخلايا لحل المعادلات الناظمة في مركز كل خلية حسابية. ويعد مركز كل خلية حسابية حساس قياس يتم فيه قراءة بارامترات التدفق المختلفة، وللحصول على نتيجة جيدة يجب زيادة عدد الحسابات والخلايا قدر المستطاع. الشكل 4 يوضح 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 بتعيم الشبكة الرقمية الذي يهدف إلى رصد التغيرات الكبيرة الحاصلة في منطقة الطبقة الحدية بأفضل شكل ممكن. يبين الشكل 4 المجال الحسابي الذي تم بناؤه حول بدن السفينة باستخدام برنامج ICEM وبأبعاد تتلاءم مع أبعاد النموذج وتسمح بتطور الجريان أمام وخلف النموذج. أبعاد المجال الحسابي هي:

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

الشكل 5 يوضح 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). لقد تم إعطاء السفينة درجتى حرية وهما الدوران حول المحور العرضي y (الدرفلة الطولية)، والحركة الشاقولية على المحور z (الانزياح نحو الأعلى والأسفل).



الشكل 4: تقسيم المجال الحسابي إلى خلايا صغيرة.



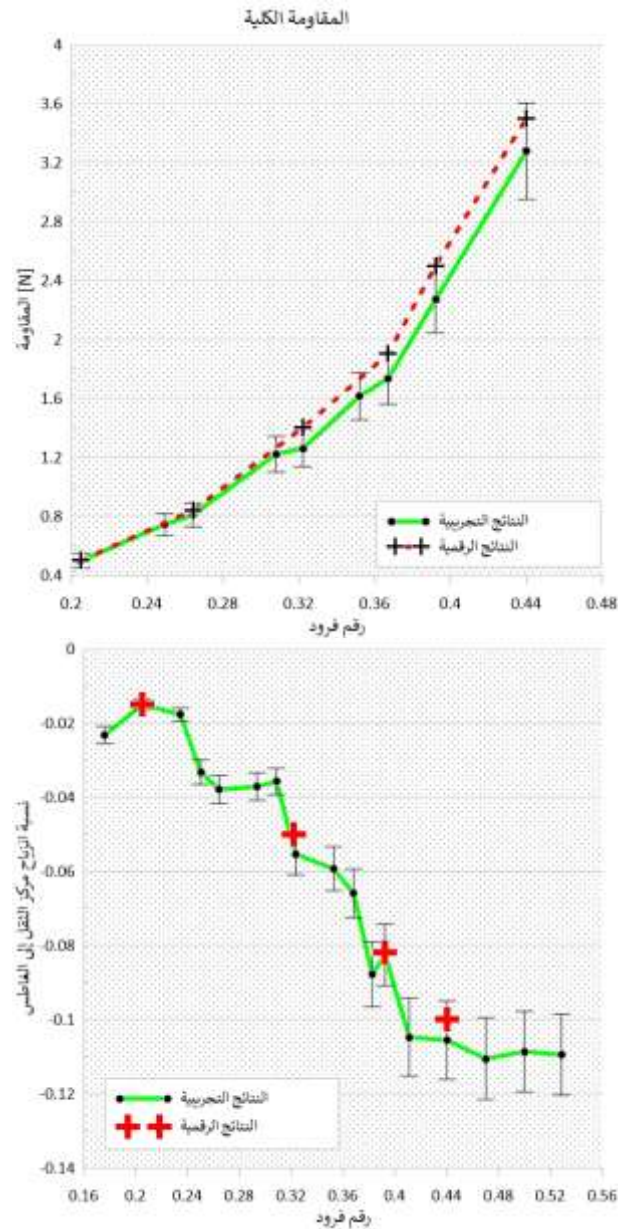
الشكل 5: الشروط الحدية والمجال الحسابي حول بدن السفينة.

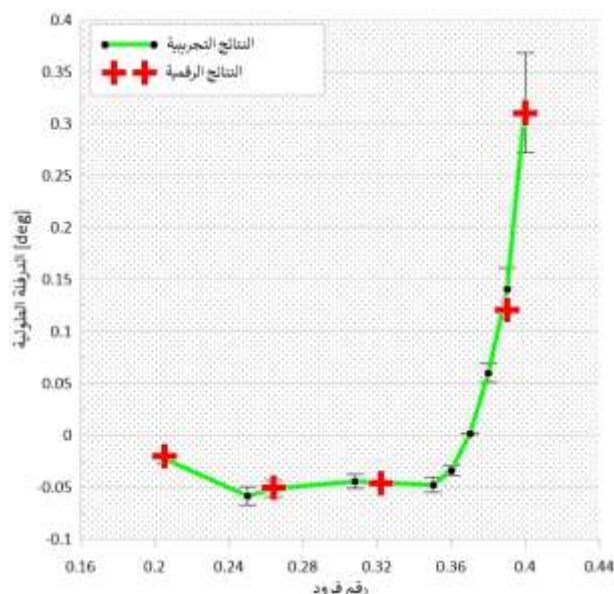
النتائج والمناقشة:

تقييم النتائج الرقمية لحالة السفينة بدون ملحقات المؤخرة

قبل عرض وتحليل النتائج الرقمية بوجود ملحقات المؤخرة، يجب التأكد من جودة ودقة الطريقة والموديل الرياضي والشبكة الرقمية المستخدمة لحل المعادلات الناظمة للتدفق. ولذلك، تمت مقارنة النتائج الرقمية بالنتائج التجريبية لكل من المقاومة الكلية والدفلة الطولية (زاوية الدوران حول المحور y) وتأرجح مركز النقل لنموذج السفينة FFG-7 دون وجود المعترض، وهنا لا بد من التنويه إلى أن الباحثة هلا داوود هي أول من قام بحساب هذا القارب السريع كما وقامت بمقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية، وكان التوافق بين النتائج جيد جداً، وبناء على هذا الأمر تم استخدام نفس الشبكة ونفس الإعدادات الرقمية التي قامت الباحثة باستخدامها.

الشكل 6 يوضح مقارنة بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية التي تم الحصول عليها من المرجع [16] لكل من المقاومة الكلية، الانزياح الشاقولي لمركز الثقل والدفلة الطولية للسفينة عند قيم مختلفة لرقم فرود. ويلاحظ من الشكل أن النتائج التجريبية تحتوي على انحرافات أعلى وأسفل القيمة الوسطية، والتي يتم تمثيلها بما يسمى Error bars. ومن الملاحظ أن النتائج الرقمية والتجريبية تتطابق بشكل جيد جداً مع بعضها البعض، مما يدل على دقة الـ CFD في إجراء مثل هذه الحسابات. هنا لا بد من التنويه إلى أن النتائج الرقمية التي تم الحصول عليها في هذا البحث للقارب السريع FFG-7 مع وبدون معترض تتوافق بشكل كبير مع النتائج التي حصلت عليها الباحثة هلا داوود في دراستها [12].





الشكل 6: مقارنة بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية لكل من المقاومة الكلية، مقدار الانزياح الشاقولي لمركز الثقل والدفلة الطولية لنموذج السفينة FFG-7 بدون وجود أية من ملحقات المؤخرة.

تأثير وجود ملحقات المؤخرة

تأثير ملحقات المؤخرة على مقاومة السفينة

لقد تم إضافة كل من الجناح الرفراف مع زوايا ميلان مختلفة والمعترض على نهاية مؤخرة السفينة كما تم توضيحه في الشكل 3. كما هو واضح من هذا الشكل، لقد تم إضافة الجناح الرفراف مع خمس زوايا ميلان وهي $(0^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 12^\circ, 45^\circ)$ وفي النهاية تم إضافة المعترض. لقد تم اختبار نفس المعترض الذي استخدمته الباحثة هلا داؤد ذو الارتفاع 4 ملم أي 0.25% من طول السفينة، ونفس الارتفاع تم اختياره للجناح الرفراف مع كامل زوايا الميلان. كما هو متوقع، فإن إضافة ملحقات المؤخرة 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)، بعد هذه القيمة نلاحظ أن ملحقات المؤخرة تلعب دوراً إيجابياً في تقليل قيمة المقاومة الكلية للقارب. الجدول 3 يوضح نتيجة الـ CFD لنسبة تخفيض المقاومة الكلية للقارب مع وبدون ملحقات المؤخرة، وكما هو واضح من هذا الجدول فإنه ضمن المجال $0.205-0.322$ لرقم فرود (السرعات المنخفضة) فإن ملحقات المؤخرة تتسبب في زيادة المقاومة الكلية للقارب، في حين أنه وبعد هذه القيمة لرقم فرود 0.322 (أي مع السرعات العالية نسبياً) فإن ملحقات المؤخرة تلعب دوراً إيجابياً في تقليل مقاومة السفينة، كما ويمكننا ملاحظة أن المعترض هو الأكثر فعالية في تقليل مقاومة القارب مع السرعات العالية حيث تصل نسبة التخفيض إلى 30% تقريباً، وهو رقم يعتبر كبير نسبياً ويساعد بشكل كبير في تحسين سرعة السفينة عند نفس عدد دورات الرفراف.

الجدول 3: النسبة المئوية لتقليل المقاومة الكلية للقارب بوجود ملحقات المؤخرة بالمقارنة مع حالة البدن بدون أية ملحقات عند قيم مختلفة لرقم فرود.

Fr [-]	Bare hull	flap 0°	flap 8°	flap 10°	flap 12°	flap 45°	interceptor
0.205	0.5	0.2	2.2	18	22	26	30
0.264	0.53	0	5.67	9.44	13.21	15.1	18.87
0.322	1.4	-0.72	-1.43	-1.79	-2.15	-3.22	-3.58
0.392	2.5	-0.4	-2	-2.21	-2.4	-5.2	-6
0.44	3.5	-0.29	-2.29	-2.58	-2.86	-6	-7.15
0.5	3.85	-0.13	-3.9	-6.5	-10.39	-14.29	-29.88

تأثير ملحقات المؤخرة على تأرجح مركز الثقل

الجدول 4 يوضح النسبة المئوية لمقدار انزياح مركز ثقل القارب بالمقارنة مع حالة القارب بدون أية ملحقات عند المؤخرة، إشارة الناقص تدل على انزياح مركز الثقل باتجاه الأسفل. كما هو واضح في هذا الجدول فإن وجود ملحقات المؤخرة يلعب دورا إيجابيا في انزياح مركز الثقل حتى مع السرعات المنخفضة، ويزداد مقدار الانزياح مع زيادة سرعة السفينة. يلعب هذا الانزياح دورا إيجابيا في زيادة اتزان السفينة. التفسير الفيزيائي لهذا الأمر سيأتي لاحقا.

الجدول 4: النسبة المئوية لمقدار انزياح مركز الثقل للقارب بوجود ملحقات المؤخرة بالمقارنة مع حالة البدن بدون أية ملحقات عند قيم مختلفة لرقم فرود.

Fr [-]	Bare hull	flap 0°	flap 8°	flap 10°	flap 12°	flap 45°	interceptor
0.205	-0.015	0	-0.67	-2.67	-3.34	-4.67	-6.67
0.264	-0.025	-0.41	-2	-3.21	-3.61	-6.01	-8.01
0.322	-0.05	-1	-2	-4	-6.01	-8.01	-12
0.392	-0.082	-0.13	-2.44	-3.66	-4.88	-12.2	-19.52
0.44	-0.1	-1	-5	-8.01	-9.01	-15	-20
0.5	-0.12	-0.84	-5.84	-6.67	-7.5	-20.84	-25

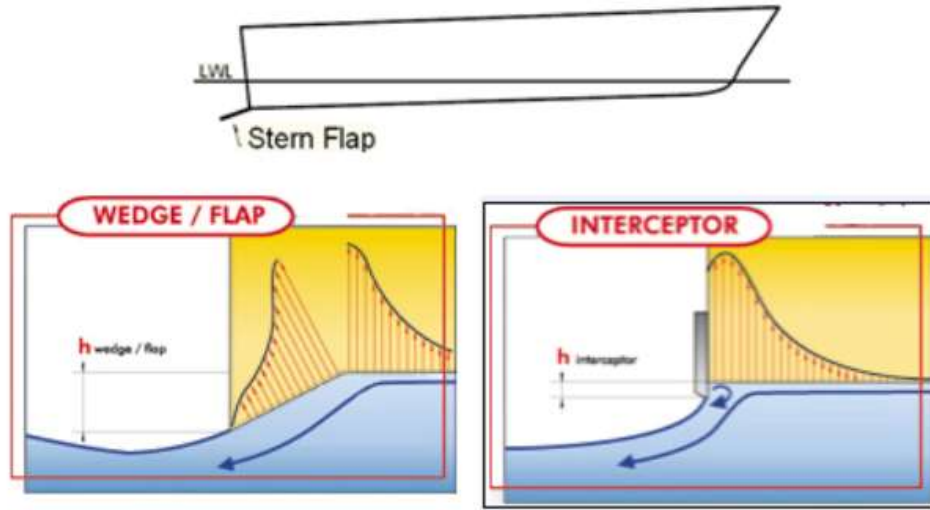
تأثير ملحقات المؤخرة على الدرفة الطولية للسفينة

الجدول 5 يوضح تأثير وجود ملحقات المؤخرة على الدرفة الطولية للسفينة، كما هو واضح في هذا الشكل فإن وجود ملحقات المؤخرة يساعد في تقليل مقدار الدرفة الطولية للسفينة عند كل السرعات.

الجدول 5: النسبة المئوية لتقليل الدرفة الطولية للقارب بوجود ملحقات المؤخرة بالمقارنة مع حالة البدن بدون أية ملحقات عند قيم مختلفة لرقم فرود.

Fr [-]	Bare hull	flap 0°	flap 8°	flap 10°	flap 12°	flap 45°	interceptor
0.205	-0.02	0	-1.51	-1.51	-2.5	-3	-3.5
0.264	-0.051	-0.99	-1.97	-2.16	-3.93	-5.89	-7.85
0.322	-0.04632	-0.7	-1.78	-2.85	-5.01	-9.33	-13.65
0.392	0.12	-0.84	-2.5	-3.34	-6.67	-12.5	-16.67
0.44	0.62	-0.81	-4.84	-6.46	-9.68	-16.13	-19.36
0.5	1.175	-0.43	-6.39	-11.49	-14.9	-19.15	-23.41

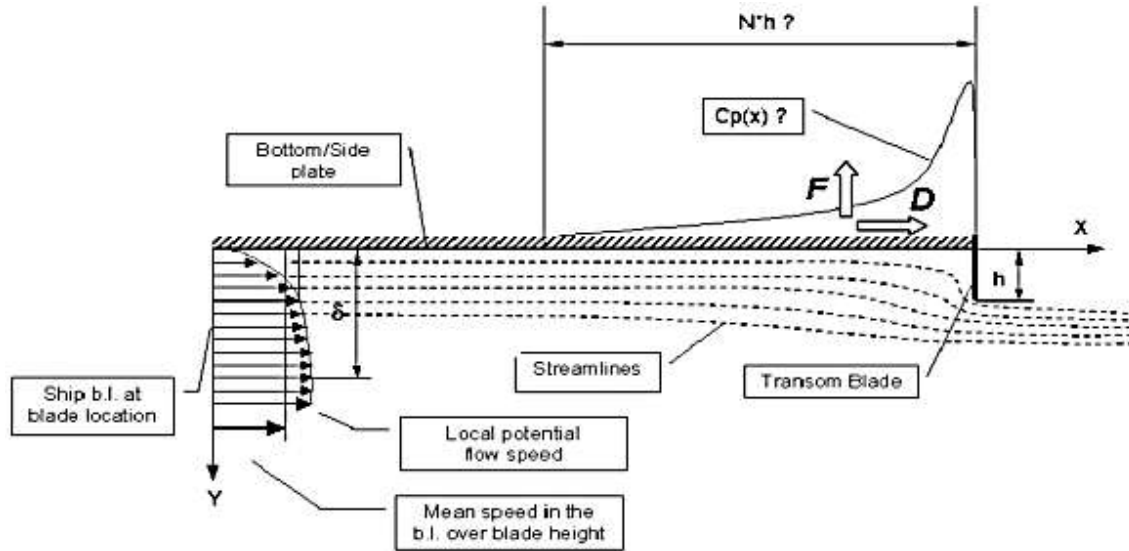
من خلال تحليل النتائج السابقة يتضح لدينا أن المعترض (بالمقارنة مع الأجنحة الرفرافة) يلعب الدور الإيجابي الأكبر في تقليل مقاومة السفينة وتزداد فعاليته بشكل كبير عند السرعات العالية للسفينة، نفس التأثير نجده في حالة الانزياح الشاقولي لمركز الثقل والدفلة الطولية للسفينة. التفسير الفيزيائي لهذه النتائج يمكن توضيحه من خلال الشكل 7، ملحقات المؤخرة التي تم استخدامها هي عبارة عن لوح رقيق مستطيل الشكل، أقرب ما يكون لشفرة، يتم تثبيتها على مؤخرة القارب السريع بحيث تبرز بشكل يصنع زاوية مع قاع القارب في منطقة المؤخرة، وتشكل مساحة الشفرة عائقاً أمام تيار الماء الجاري أسفل البدن، يسبب هذا العائق إبطاء مفاجئ للتيار وتشكل نقاط توقف تؤدي إلى انحراف خطوط التيار (المتوازية سابقاً) بدءاً من مسافة معينة أمام المستطيل، 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 الدفلة الآتية، والتي بدورها تؤدي إلى تقليل مساحة السطح المبلل للقارب وبالتالي تقليل المقاومة الكلية للقارب. 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 المخر [16].



الشكل 7: التأثير الهيدروديناميكي لملحقات المؤخرة [4].

هنا لابد من الانتباه إلى أن قوة الضغط الناتجة عن الأجنحة الرفرافة تنقسم إلى جزئين، الأول يؤثر بشكل عمودي على قاع القارب، والثاني يؤثر بشكل عمودي على الجناح الرفراف. في حين أنه في حالة المعترض فإن كامل تركيز قوة الضغط يؤثر بشكل عمودي (نحو الأعلى) على قاع القارب، وهذا هو السبب في كون تأثير المعترض أكبر من تأثير الأجنحة الرفرافة، وبالأخص عند السرعات العالية للقارب.

يبين الشكل 8 مقطع جانبي لتوضع المعترض وكيفية انحراف خطوط التيار [12]، يدعى الامتداد العمودي للمعترض "ارتفاع المعترض" ويرمز له عادة بـ h ، والامتداد باتجاه عرض البدن يرمز له بـ S . يجب الانتباه إلى ضرورة أن يكون ارتفاع المعترض محتوى بشكل تام ضمن الطبقة الحدية ذات الثخانة δ [18].



الشكل 8: التأثير الهيدروديناميكي للمعترض [12].

ينتج عن وجود المعترض قوة رفع كلية F ، ومقاومة إضافية D كما هو واضح في الشكل 8 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 السلبية 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) [16], [12].

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات

- ملحقات المؤخرة لها تأثير سلبي مع السرعات المنخفضة، حيث تؤدي إلى زيادة مقاومة السفينة.
- مع زيادة سرعة السفينة، تلعب ملحقات المؤخرة دوراً إيجابياً في تقليل مقاومة السفينة.
- المعترض له تأثير أكبر من أجنحة المؤخرة في تقليل المقاومة عند أرقام فرود الكبيرة.

التوصيات

- يجب استخدام ملحقات المؤخرة مع السفن ذات السرعات العالية.
- يجب أن تكون ملحقات المؤخرة قابلة للتحكم، أي أنه يمكن إزالتها عن السرعات المنخفضة ومن ثم تتم إضافتها في حال السرعات العالية، وبالتالي يمكن تفادي تأثيرها السلبي مع السرعات المنخفضة.

التوصيات للأعمال المستقبلية

- أن يتم اختبار ملحقات المؤخرة في حالة وجود الرفاص والدفة للتأكد من دوره الإيجابي مع وجود كامل الملحقات للسفينة.

- أن يتم اختبار إضافة أكثر من نوع من ملحقات المؤخرة في نفس الوقت.
- تغيير ارتفاع ملحقات المؤخرة وإعادة الحسابات مرة أخرى من أجل معرفة الارتفاع الأنسب تبعاً لطول السفينة.

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] S. Day, "An Experimental Study of Interceptors for Drag Reduction on High-Performance Sailing Yachts."
- [3] F. De Luca, "Experimental Study on Interceptor's Effectiveness," Università degli studi di Napoli "Federico II," 2011.
- [4] S. John and D. Organisation, "Hydrodynamic performance enhancement using stern wedges , stern flaps and interceptors for ships," no. June, 2016.
- [5] M. Salas and G. Tampier, "Assessment of appendage effect on forward resistance reduction," vol. 7, no. July 2013, pp. 37–45.
- [6] M. Mansoori, A. C. Fernandes, and H. Ghassemi, "Interceptor design for optimum trim control and minimum resistance of planing boats," *Phys. Procedia*, vol. 69, pp. 100–115, 2017, doi: 10.1016/j.apor.2017.10.006.
- [7] W. M. Talaat, K. A. Hafez, and A. A. Banawan, "A CFD presentation and visualization for a new model that uses interceptors to harness hydro-energy at the wash of fast boats," *Ocean Eng.*, vol. 130, no. January 2016, pp. 542–556, 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.12.014.
- [8] K. Song, C. Guo, J. Gong, P. Li, and L. Wang, "In fl uence of interceptors , stern fl aps , and their combinations on the hydrodynamic performance of a deep-vee ship," vol. 170, no. May, pp. 306–320, 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.10.048.
- [9] 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.
- [10] I. O. P. C. Series and M. Science, "Numerical investigation hydrodynamics on fast displacement ship," 2019, doi: 10.1088/1757-899X/591/1/012111.
- [11] K. wei Song, C. yu Guo, C. Wang, C. Sun, P. Li, and R. fan Zhong, "Experimental and numerical study on the scale effect of stern flap on ship resistance and flow field," *Ships Offshore Struct.*, vol. 15, no. 9, 2019, doi: 10.1080/17445302.2019.1697091.
- [12] H. Daoud, "Study of the influence of an Interceptor on the resistance of the high-speed vessels using CFD," Master Thesis, Tishreen University, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Department of Marine Engineering, 2022.
- [13] "Ansys - Wikipedia." <https://en.wikipedia.org/wiki/Ansys> (accessed Jul. 07, 2020).
- [14] F. R. Menter, "Zonal two equation κ - ω turbulence models for aerodynamic flows," in *AIAA 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference*, 1993.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] "GrabCAD Makes Additive Manufacturing at Scale Possible." <https://grabcad.com/> (accessed Dec. 06, 2021).
- [18] s. Brizzolara, "Hydrodynamic analysis of interceptors with cfd methods," no. October 2003, 2014.