Effect Of The Longitudinal Trim Of KCS Container Ship On Its Resistance At Different Speeds

Dr. Rami Hawa*[*]
Dr. Sayr Sliba**
Boushra Nassif***

(Received 22 / 11 / 2024. Accepted 23 / 12 / 2024)

□ ABSTRACT □

In this research, CFD technique was used to study the effect of the longitudinal trim of a container ship KCS on its resistance at a constant draft and at different values of ship speed. The URANS method and the k-omega SST turbulence model were used to solve the Navier-Stokes equations. The study was carried out at the following longitudinal trim angles -0.8, -0.6, -0.4, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 and at each angle the calculations were carried out at three values of Froude number which are 0.108, 0.195, 0.282. Both the ship's draft and its scale were fixed. The study was conducted on the $\frac{1}{31.6}$ scale model due to the availability of a large number of experimental results for this model, which were used to validate both the grid and the numerical settings. Therefore, the calculations were initially performed for several cases that were completely identical to the experimental cases, and the numerical results were compared with the available experimental results, and the agreement between the results was very good. In the next step, the effect of the longitudinal trim angle on the ship's resistance was studied at different speed values. The results obtained confirmed that at low ship speeds, the effect of the trim angle is negative and does not help in reducing the resistance, and with increasing ship speed, the positive effect of the longitudinal trim angle appears in reducing the ship's resistance. The results also confirmed that the negative trim angle (in which the bow draft is greater than the stern draft) negatively affects the resistance, unlike the positive trim angle, which helps in reducing the ship's resistance.

Keywords: KCS container ship, URANS, VOF, ANSYS, Fluent, CFD, K-□ SST.

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

[*]**Professor, Marine Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. Email: dr.ramimostafahawa@tishreen.edu.sy**
**** Associate Professor, Marine Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. Email: dr.sayrsliba@tishreen.edu.sy**
***** PhD Student, Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. Email: boushranassif@tishreen.edu.sy**

تأثير الميل الطولي لسفينة الحاويات KCS على مقاومتها عند سرعات مختلفة

د. رامي حوا*

د. سائر صليبه**

بشرى ناصيف ***

(تاريخ الإيداع 22 / 11 / 2024. قُبِل للنشر في 23/ 12 / 2024)

□ ملخّص □

تم في هذا البحث استخدم تقنية الـ CFD من أجل دراسة تأثير الميل الطولي لسفينة الحاويات KCS على مقاومتها عند غاطس ثابت وعند عدة قيم لسرعة السفينة. تم استخدام طريقة الـ URANS وموديل الاضطراب k-omega SST من أجل حل معادلات نافييه ستوكس. تم إجراء الدراسة عند زوايا الميلان الطولية التالية $-0.8, -0.6, -0.4, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ وعند كل زاوية تم إجراء الحسابات عند ثلاثة قيم لرقم فرود وهي 0.282 ,0.195 ,0.108. تم تثبيت كل من غاطس السفينة ومقياسها. تم إجراء الدراسة على النموذج ذو مقياس التصغير $\frac{1}{31.6}$ وذلك بسبب توفر كم كبير من النتائج التجريبية لهذا النموذج والتي تم استخدامها من أجل معايرة كل من الشبكة والإعدادات الرقمية، وعليه في بداية الأمر إجراء الحسابات لعدة حالات مطابقة تماما للحالات التجريبية وتم مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية المتوفرة، وكان التوافق جيد جدا بين النتائج. في الخطوة التالية تم دراسة تأثير زاوية الميل الطولي على مقاومة السفينة عند قيم مختلفة للسرعة. النتائج التي تم الحصول عليها أكدت أنه عند السرعات المنخفضة للسفينة فإن تأثير زاوية الميل يكون سلبيا ولا تساعد في تقليل المقاومة ومع زيادة سرعة السفينة يظهر التأثير الإيجابي لزاوية الميل الطولي في تقليل مقاومة السفينة. كما أكدت النتائج أن زاوية الميل السالبة (والتي يكون فيها غاطس المقدمة أكبر من غاطس المؤخرة) تؤثر سلبا على المقاومة على عكس زاوية الميل الموجبة والتي تساعد في تقليل مقاومة السفينة.

الكلمات المفتاحية: سفينة الحاويات KCS، طريقة رينولدز نافييه ستوكس الوسطية – طريقة الـ VOF، برنامج الـ Fluent، موديل الاضطراب $K-\omega\ SST$.

حقـوق النشـر : مجلـة جامعـة تشـرين– سـورية، يحـتفظ المؤلفـون بحقـوق النشـر بموجـب التـرخيص CC BY–NC–SA 04

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

الايميل: dr.ramimostafahawa@tishreen.edu.sy

** **أستاذ مساعد – قسم الهندسة البحرية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة تشرين – اللاذقية – سورية. الايميل: dr.sayrsliba@tishreen.edu.sy**

*** **طالب دكتوراه – قسم الهندسة البحرية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية. الايميل: boushranassif@tishreen.edu.sy**

مقدمة:

في ظل ازدياد الاعتماد على السفن وخاصة السفن الضخمة في التجارة العالمية وبالأخص ضمن شبكة النقل متعدد الوسائط، وصلت حاجة التقليل من الانبعاثات الكربونية للنقل البحري إلى نقطة حاسمة. مما يدفع العمل على التكامل بين النقل وقضايا البيئة والعمل الهندسي. من خلال اقتراح وتحليل تصاميم مبتكرة للسفن وتقديم حلول ملموسة تتوازن بين الكفاءة التصميمية والجدوى الاقتصادية والمسؤولية البيئية وإيجاد تحول في صناعة النقل البحري نحو سفن لا تؤدي فقط إلى تحسن في حركة نقل البضائع ولكنها تتماشى أيضا مع مبادئ الحفاظ على البيئة، وإلقاء الضوء على الحاجة الملحة للممارسات المستدامة في صناعة النقل البحري والبحث في تصميمات السفن وإمكانياتها.

يعتبر تشغيل السفينة بأقل قدر من المقاومة عند سرعة وإزاحة محددتين من أهم الأمور في مجال بناء السفن، حيث أن المقاومة الكلية ذات أهمية قصوى للسفينة، والتي تؤثر بشكل مباشر على السرعة ومتطلبات الطاقة واستهلاك الوقود. يمكن تعزيز الأداء الهيدروديناميكي للسفينة عن طريق تحسين إدارة تشغيل السفينة بشكل صحيح أثناء الاستثمار. ومن هنا تأتي أهمية وأهداف هذا البحث حيث سيتم العمل على تحسين إدارة تشغيل السفينة من خلال البحث عن قيمة الميل الطولي الأمثل أثناء عملية استثمار السفينة وذلك تبعا لسرعة السفينة وحالة التحميل بالشكل الذي يقلل من المقاومات المؤثرة على السفينة مع المحافظة على نفس القدرة التحميلية لها.

يعرف الـ Trim بأنه الفرق بين غاطس المؤخرة وغاطس المقدمة، ويعطى بالعلاقة التالية:

$$\text{Trim}=T_A - T_F \quad (1)$$

حيث أن T_A الغاطس عند المؤخرة و T_F الغاطس عند المقدمة.

الإبحار بأفضل قيمة للدرفلة الطولية يعد أحد أسهل الطرق وأرخصها لتحسين أداء السفينة وتقليل استهلاك الوقود. لا يتطلب الأمر أي تعديل في شكل الهيكل أو تحسين في المحرك. يمكن إجراء التحسين عن طريق الصابورة المناسبة أو اختيار خطة التحميل المناسبة. على الرغم من أن اختبارات تحسين الدرفلة تعتبر أقل أهمية من اختبارات النماذج الأخرى التي تهتم بحساب القوى والعزوم التي تتعرض لها السفن، إلا أنها يمكن أن توفر وفورات كبيرة وعائدًا على الاستثمار، اعتمادًا على نوع السفينة وتشغيلها وعدد السفن في السلسلة. هناك الكثير من الدراسات في هذه المجال وعلى اعتبار أن هذا الجانب مهم في بحثنا سنتطرق هنا بشكل مفصل إلى الدراسات التي تم فيها البحث عن أفضل قيمة للدرفلة وماذا تم في هذه الدراسات.

Reichel et al., 2014 [1] قدمت هذه الورقة البحثية وصفاً تفصيليا لعملية تحسين الدرفلة لسفينة شحن كبيرة. تم وصف الفيزياء الكامنة وراء تغيير المقاومة مع تغير الدرفلة وتم عرض التحليلات من أجل وضع الظروف المثلى لعملية الإبحار. تم عرض طرق مختلفة للتنبؤ بقدرة المحرك المطلوبة أثناء الدرفلة وتمت مقارنة النتائج مع بعضها البعض. تم مناقشة مزايا وعيوب كل طريقة.

تعد FORCE Technology شركة استشارية رائدة في مجال تحسين الدرفلة، حيث تم إجراء اختبارات الدرفلة المثالية لما يقرب من 300 سفينة بما في ذلك الناقلات وسفن الحاويات وناقلات الغاز الطبيعي المسال وسفن Ro-Ro والعبارات. يُظهر الاختبار الذي تم إجراؤه حتى الآن إمكانية توفير الوقود بنسبة تصل إلى 15% في ظروف محددة مقارنة بحالة الإبحار بدون درفلة [1].

Sun et al., 2016 [2]، الهدف الأساسي من هذا البحث هو البحث عن القيمة الأفضل للدرفلة لنموذج سفينة حاويات سعة 4250 حاوية نمطية بمقياس تصغير 1/40. تم دراسة تأثير الدرفلة على المقاومة باستخدام تقنية الـ

CFD مع إجراء اختبارات تجريبية لنموذج هذه السفينة. في الجزء الأول من هذه الدراسة، تم تطبيق منهج التحقق والتحقيق المقترح من قبل الـ ITTC 2008 [3] من أجل معرفة مقدار الخطأ الرقمي الناتج عن عدد خلايا ونوع الشبكة المستخدمة، وتم الاعتماد على النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها من أجل إجراء عملية الدراسة. بالإضافة إلى ذلك تم مقارنة النتيجة الرقمية لحقل الأمواج مع النتائج التجريبية عند قيم مختلفة لرقم فرود.

بعد ذلك، تم الحصول على حساب مركبات المقاومة عند قيم مختلفة للدرفلة وقيم مختلفة لرقم فرد وذلك بهدف معرفة القيمة الأفضل للدرفلة عند كل سرعة وعند كل حالة تحميل. تم أيضا تمثيل بروفايل الأمواج عند قيم مختلفة للدرفلة. في النهاية تم حساب مقدار التوفير في طاقة المحرك في حالة الإبحار بالقيمة المثالية للدرفلة وذلك لكل حالة تحميل للسفينة وتم تمثيلها بمخططات توضح هذا الأمر.

Gao et al., 2019 [4]، الغرض من هذه الورقة هو البحث عن قيمة الدرفلة الأفضل لسفينة الحاويات TEU-4250، تم إجراء الدراسة على نموذج السفينة بمقياس تصغير 1/40. تم إجراء الحسابات الرقمية باستخدام برنامج Ansys-Fluent حيث تم استخدام طريقة الـ RANS وموديل الاضطراب $k-\omega\ SST$. في البداية تم مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية، وكان هناك توافق كبير جدا، مما يؤكد قدرة الـ CFD على التنبؤ بالسلوك الهيدروديناميكي لسفينة الحاويات المدروسة عند أية ظروف إبحار. بعدها تم حساب المقاومة عند قيم مختلفة للسرعة وللدرفلة. وتم اقتراح القيم المثلى للدرفلة تبعا لسرعة السفينة ولغاطسها.

Le et al., 2021 [5]، يعرض هذا البحث نتائج دراسة تأثير الدرفلة على مقاومة نموذج المقاتلة البحرية الأمريكية طراز DTMB 5415 عند ثلاث غواطس مختلفة ورقمين فرود باستخدام طريقة الـ URANS بالتزامن مع إجراء اختبارات تجريبية لهذا النموذج. أولاً، تم تطبيق منهج التحقق والتحقيق المقترح من قبل الـ ITTC 2008 بهدف دراسة تأثير نعومة الشبكة على النتائج الرقمية. بعد ذلك تم التحقق من النتائج الرقمية لحالة السفينة بدون درفلة من خلال مقارنتها مع النتائج التجريبية، وكان التوافق جيد جدا، ثم تم إجراء سلسلة من الحسابات الرقمية من أجل حساب المقاومة عند قيم مختلفة للدرفلة عند حالات تحميل مختلفة وسرعات مختلفة. تشير النتائج إلى أن الاتجاه المتغير لمقاومة السفينة الإجمالية في ظروف درفلة مختلفة يختلف باختلاف مجموعات السرعة والغاطس، كما أن تباين مركبة مقاومة الضغط بسبب الدرفلة أكبر بكثير من مركبة مقاومة الاحتكاك. وأخيرا، يقدم البحث تفاصيل عن خصائص التدفق حول السفينة مثل أنماط الأمواج على السطح الحر، وتوزيع الضغط ومعامل الاحتكاك على سطح البدن، وسطح الماء الحر من أجل شرح الظاهرة الفيزيائية لتغيير مقاومة السفينة عند ظروف مختلفة. بالإضافة إلى الأعمال السابقة يوجد العديد من الأعمال التي تتعلق بالبحث عن القيمة المثلى للدرفلة [6] ,[5] ,[1] والتي تركز على حساب الميلان الطولي المثالي للإبحار والذي عنده تكون قيمة المقاومة أقل ما يمكن وذلك من أجل سرعات مختلفة للسفينة. بالإضافة إلى عمل Tu et al., 2023 [7] والذي تم فيه استخدام تقنية الذكاء الصنعي من أجل التنبؤ بالميل الطولي الأمثل لسفينة حاويات 13500-TEU.

الكثير من الدراسات السابقة يتم فيها استخدام تقنية الـ CFD من أجل إجراء الحسابات، والتي أثبتت دقتها وكفاءتها في مثل هذه الحسابات، وعليه سيتم في هذا العمل استخدام هذه التقنية (CFD) المتوفرة ضمن برنامج الـ Ansys من أجل البحث عن القيمة المثلى للميلان الطولي لسفينة الحاويات KCS. المعادلات الناظمة للتدفق والطريقة التي تم استخدامها للحل مع موديل الاضطراب $K-\omega\ SST$ الذي تم استخدامه لإغلاق نظام المعادلات تم عرضها وشرحها في أعمال سابقة في مجلة جامعة تشرين [14]–[8].

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذا البحث وأهدافه في:

- دراسة الخصائص الهيدروديناميكية لسفينة الحاويات KCS بوجود درجتي حرية (الانزياح الشاقولي Heave والدرفلة الطولية Pitch) مع قيم مختلفة للسرعة ومقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية.
- إيجاد القيمة المثلى للميلان الطولي والتي تحقق أقل قيمة لمقاومة السفينة.
- دراسة تأثير سرعة السفينة على القيمة المثلى للميلان الطولي.

1. منهجية البحث

- تحليلية تجريبية في بيئة الـ ANSYS الافتراضية.

طرائق البحث ومواده:

يمكن تلخيص المواد التي تم استخدامها في هذا البحث بالتالي:

- النموذج الهندسي لسفينة الحاويات KCS [15].
- برنامج الـ ANSYS-Fluent.
- طريقة الـ URANS من أجل حل المعادلات الناظمة للتدفق.
- موديل الاضطراب $K-\omega\ SST$ لإغلاق نظام المعادلات.

2. الأبعاد الهندسية

السفينة التي تم استخدامها في هذا البحث هي سفينة الحاويات النموذجية KCS، الأبعاد الهندسية الأساسية لكل من السفينة الحقيقية والنموذج الذي تمت دراسته موضحة في الجدول 1. تم اختيار نسبة التصغير $\lambda = 31.6$، بسبب توفر الكثير من القياسات التجريبية لهذا النموذج [16]، الأمر الذي يساعد بشكل كبير في تقييم كل من الشبكة والإعدادات الرقمية التي تم استخدامها للتأكد من جودتها ودقتها. يعرض الشكل 1 السفينة KCS التي تم إجراء الدراسة عليها.

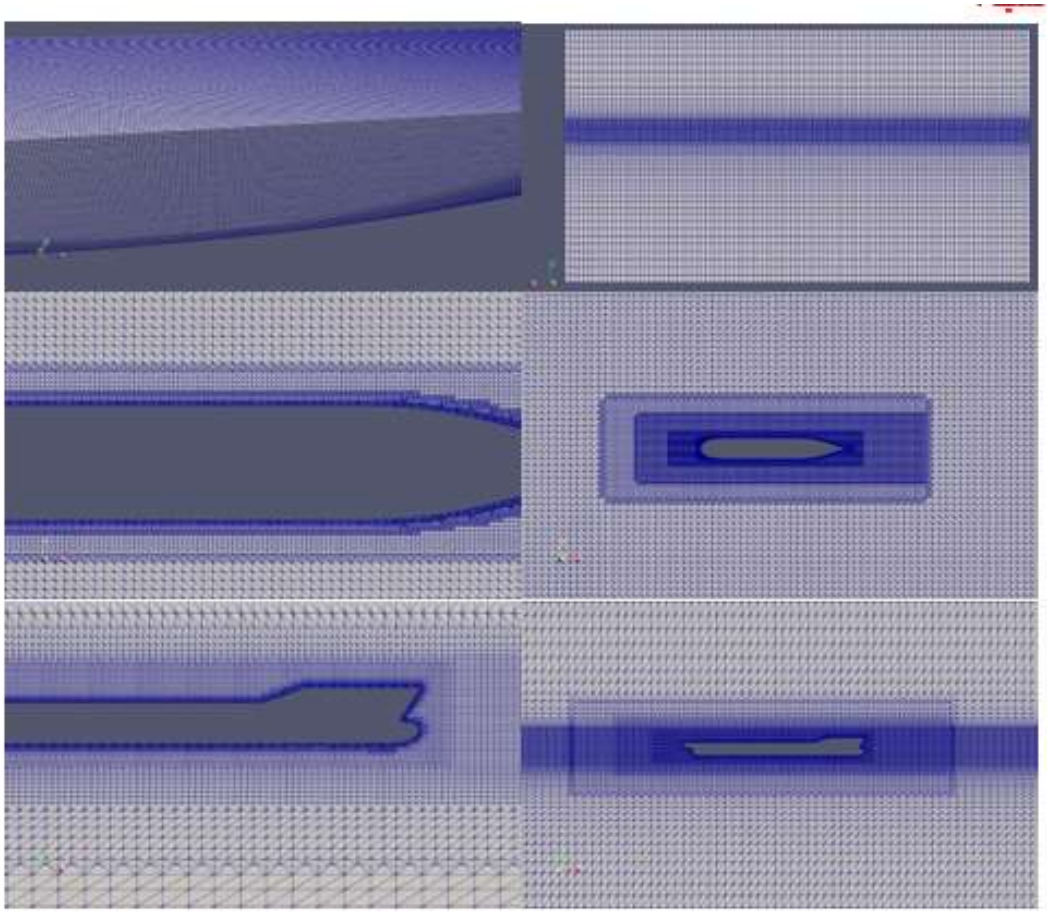
الجدول 1: الأبعاد الأساسية لسفينة الحاويات KCS الأصل ونموذجها المدروس [17].

Terms	Symbol	Unit	Full-scale	Model scale
Length between perpendiculars	L_{PP}	m	230	7.2786
Breadth	B	m	32.2	1.0190
Draft	D	m	10.8	0.3418
Block coefficient	C_B	-	0.6505	0.6505
Wetted surface area without appendages	S_w	m^2	9424	9.4379
Displacement	∇	m^3	52030	1.6490

الشكل 1: نموذج سفينة الحاويات KCS [17].

3. الشبكة الرقمية

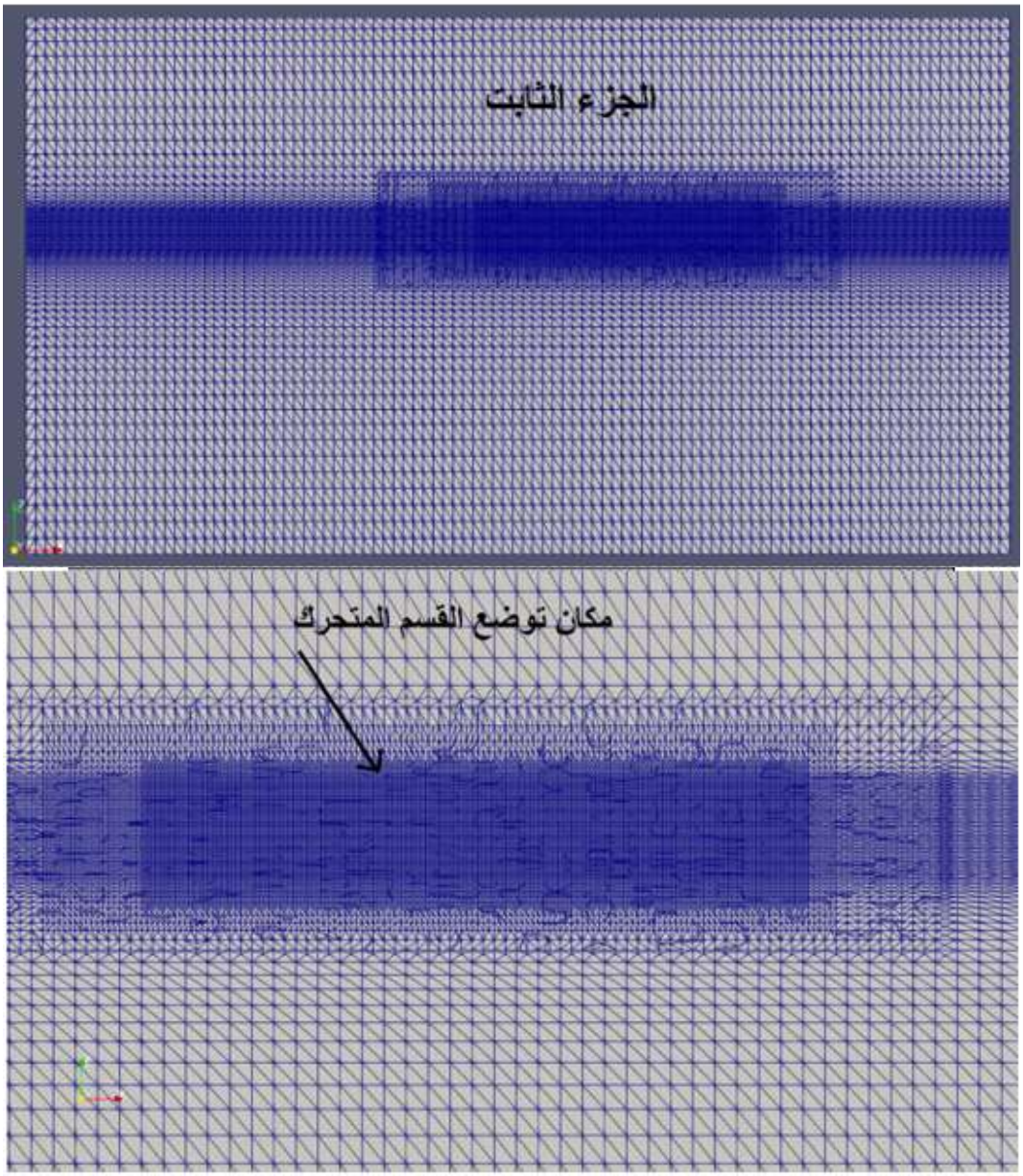
الشكل 2 يوضح الشبكة الرقمية المنتظمة التي تم بناؤها حول بدن سفينة الصب JBC، وكما هو واضح من هذا الشكل فلقد تم تنعيم الشبكة الرقمية على مرحلتين متدرجتين بالقرب من السفينة، على اعتبار أن التدفق في المناطق البعيدة عن السفينة لا يوجد له أية أهمية في عملية الدراسة، ولذلك تم تركيز الخلايا في كل من منطقة السطح الحر وفي منطقة الطبقة الحدية بجوار السفينة، وتم تقليل عدد الخلايا في المناطق البعيدة عن السفينة. تم استخدام 12 مليون خلية حسابية لحالة السفينة لوحدها. يعرض الشكل 2 الخلايا المنتظمة على سطح السفينة، حيث يظهر من خلال هذا الشكل نعومة الخلايا الكبيرة على سطح السفينة.



الشكل 2: الشبكة الرقمية المنتظمة التي تم بناؤها حول بدن نموذج سفينة الصب JBC.

لقد تم استخدام الشبكات المنتظمة لأنها الأفضل من ناحية الدقة الحسابية وتحتاج زمن أقل في الحسابات، [13] ,[8]. كما نلاحظ من الشكل 2 فلقد تم تنعيم الشبكة الحسابية في منطقة السطح الحر من أجل حل الأمواج بشكل مناسب على اعتبار أن الأمواج المتشكلة بفعل البدن تلعب دورا أساسيا في التأثير على السلوك الهيدروديناميكي للبدن وبالأخص بوجود درجات حرية للبدن أثناء الحسابات. كما نلاحظ أيضا من هذا الشكل أنه تم تنعيم الشبكة في منطقة الطبقة الحدية وذلك على اعتبار أن التدفق يتغير بشكل كبير وسريع في هذه المنطقة فإن زيادة عدد الخلايا ضروري جدا هنا من أجل أن يتم حل التدفق بالشكل الفيزيائي الصحيح. وكما ذكرنا سابقا، في المناطق البعيدة عن البدن لم يتم تنعيم الشبكة الرقمية لأن التدفق في هذه المناطق غير مهم في الدراسة.

في الحالات المعيارية والتي تم فيها مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية فإن السفينة تملك درجتي حرية وهما حرية الدرفلة الطولية وحرية الإزاحة الشاقولية، وعليه من أجل تحقيق هذا الأمر في الحسابات الرقمية يجب استخدام ما يسمى بالشبكات الديناميكية والتي يتم فيها السماح للسفينة بالحركة بفعل القوى المؤثرة عليها، وعليه من أجل تحقيق هذا الأمر كان لا بد من تقسيم الشبكة إلى جزئين الجزء الأول هو الجزء الثابت والذي يتضمن قناة الاختبار وهو موضح في الشكل 3، وكما نلاحظ من هذا الشكل تم استخدام نفس الاستراتيجية السابقة في بناء الشبكة الرقمية حيث تم استخدام الخلايا المنتظمة بنفس العدد ونفس الأبعاد مع التنعيم المتدرج في المناطق المهمة وبالأخص في منطقة السطح الحر.

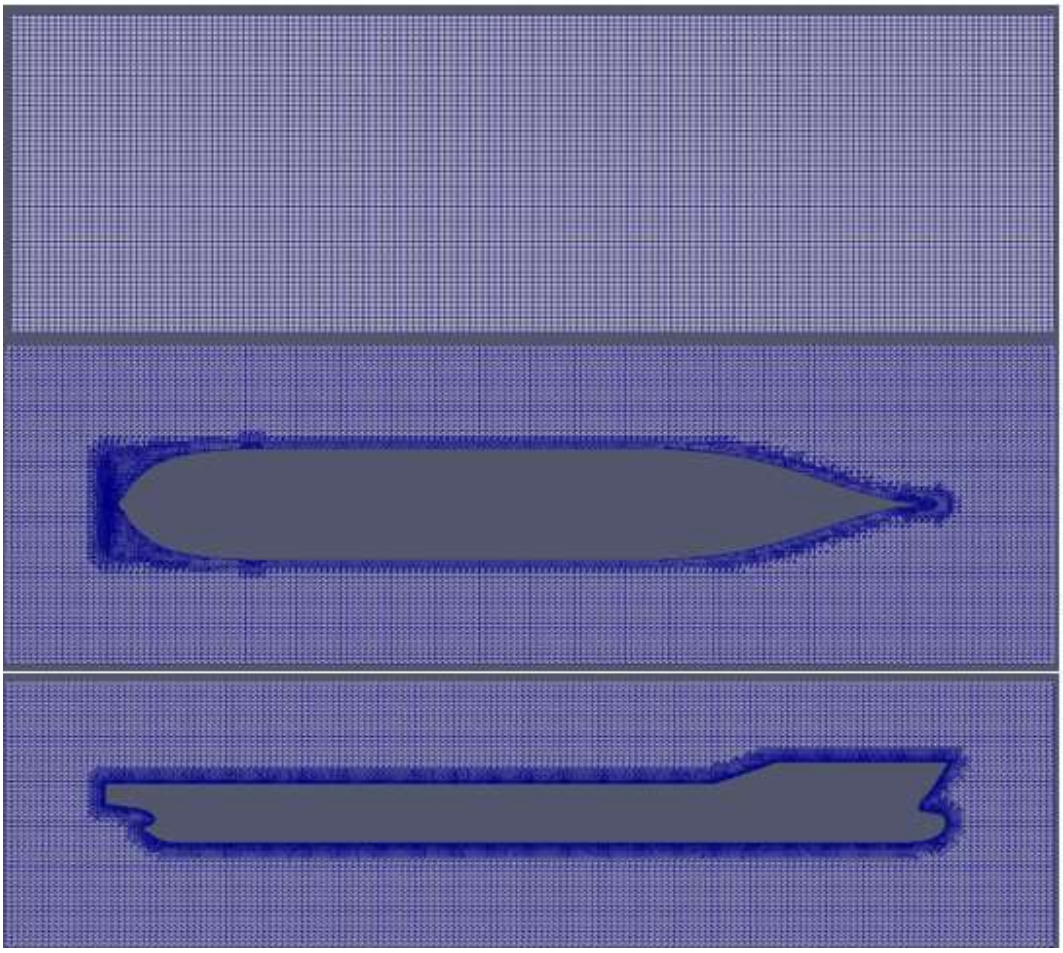


الشكل 3: الجزء الثابت من الشبكة.

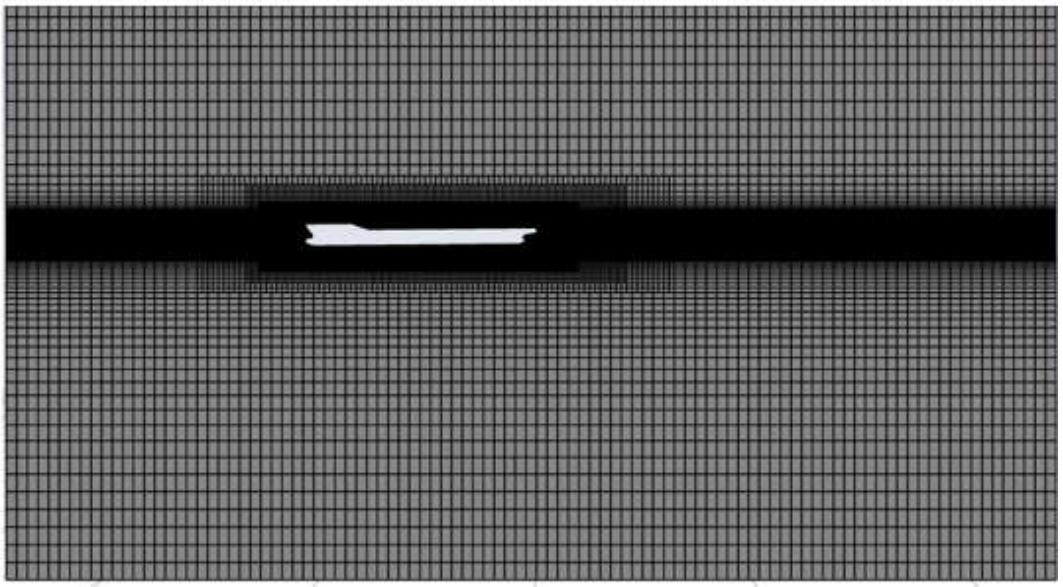
والجزء الثاني هو الجزء المتحرك ويتضمن السفينة وهو موضح في الشكل 4. من هذا الشكل نلاحظ أن أبعاد الخلايا ضمن المجال المتحرك مطابقة لأبعاد الخلايا ضمن الجزء الثابت في مكان توضح الجزء المتحرك وهذا موضح في الشكل 3. بعد أن يتم بناء الشبكة لكل من الجزء الثابت والجزء المتحرك بشكل مستقل يتم دمجهما مع بعضهما البعض

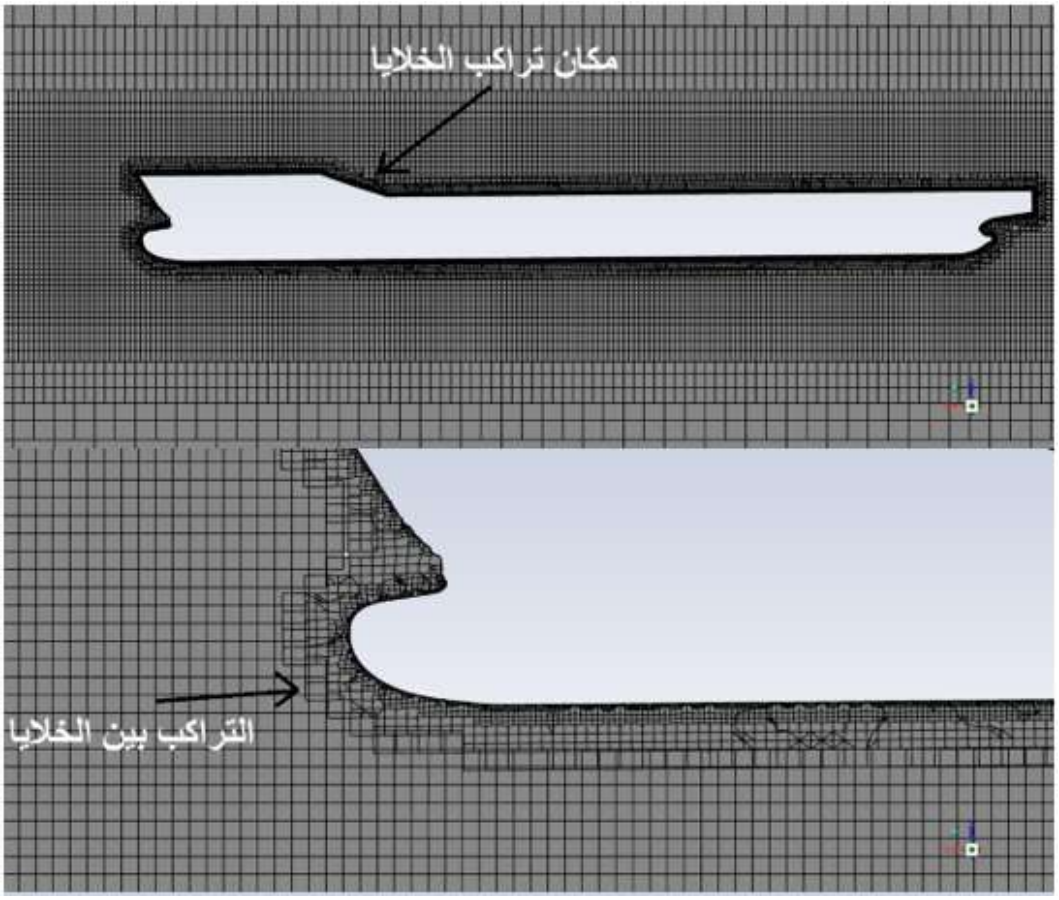
من خلال استخدام تقنية الشبكات المتراكبة (Overset Grid)، انظر الشكل 5، والتي يتم فيها نقل المعلومات من الجزء الثابت إلى الجزء المتحرك في كل لحظة زمنية مع حرية الحركة للجزء المتحرك وفقا لدرجات الحرية التي يتم إعطاؤها.

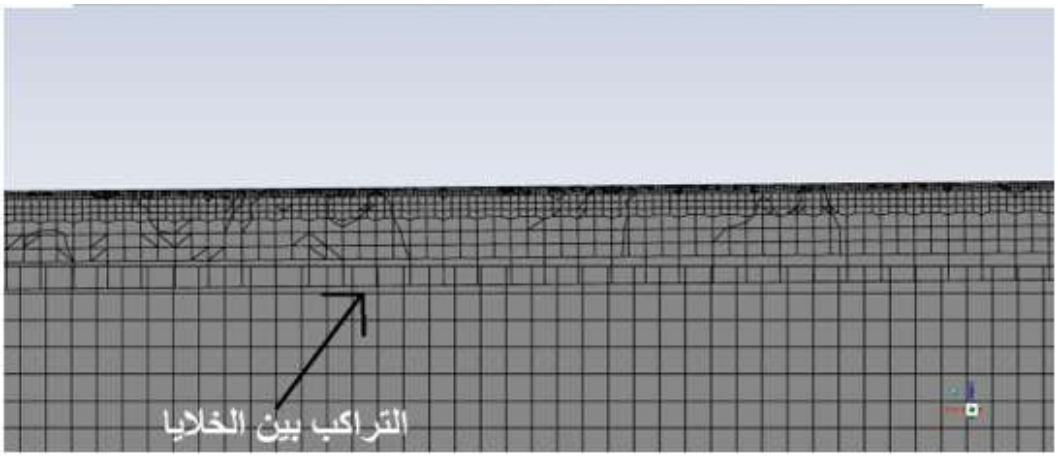
هذه التقنية تساعد في حل مثل هذا النوع من الحالات وتسمح بحرية الحركة مع عدم تشكل أي نوع من أنواع الخلايا السلبية التي تنشأ في حال السماح بتشوه الشبكة أثناء الحل وهذا الأمر يؤدي إلى توقف الحل.



الشكل 4: الجزء المتحرك.




مكان تراكب الخلايا
التراكب بين الخلايا



الشكل 5: تركيب الجزئين الثابت والدوار ضمن برنامج الـ Fluent من خلال تقنية الـ Overset Grid.

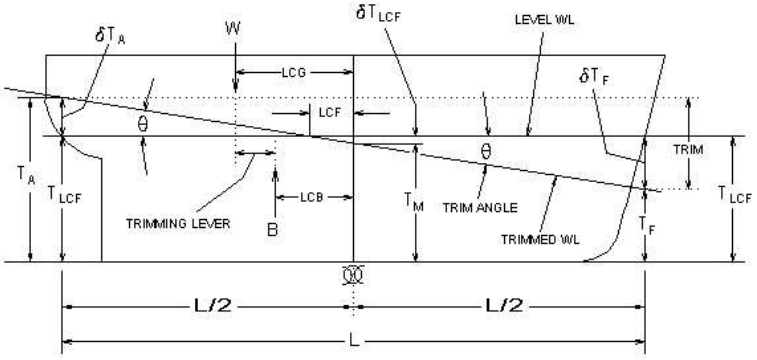
النتائج والمناقشة:

قبل البدء بعرض وتحليل النتائج التي تخص البحث عن قيمة الدرفلة الأفضل للسفينة تبعا لسرعتها، لا بد في البداية من التأكد من جودة كل من الشبكة والإعدادات الرقمية التي تم استخدامها والتأكد من أنها تعطي نتائج قريبة من الواقع، وعليه فإن أول خطوة في الحسابات هي إجراء الحسابات للحالات التي تملك نتائج تجريبية من أجل مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية للتأكد من صحة الإعدادات والشبكة الرقمية.

هنا لا بد من التنويه إلى أن المهندس محمد حسام الدين قام إجراء الحسابات الرقمية على سفينة الحاويات KCS بنفس المقياس $\frac{1}{31.6}$ [18] بهدف دراسة تأثير الأبعاد الهندسية للمقدمة البصلية على السلوك الهيدروديناميكي للسفينة، وقام باستخدام الشبكات الرقمية المنتظمة ولكن بدون التدرج في التنعيم. عملية المعايرة التي قام بها المهندس الدين كانت بدون السماح للسفينة بأية درجة حرية، ولهذا السبب وصلت قيمة الخطأ حتى 8%. في هذا العمل تم استخدام نفس نوع الشبكات الرقمية (الشبكات المنتظمة) ولكن باستراتيجية تنعيم مختلفة، حيث تم التركيز في التنعيم على المناطق المهمة ولم يتم التنعيم في المناطق الغير مهمة.

1. الحالات التي تمت دراستها

كما ذكرنا سابقا فإن الميل الطولي يعرف بأنه غاطس المؤخرة T_A منقوصا منه غاطس المقدمة T_F، وعليه فإن قيمة الميل الطولي تكون موجبة إذا كان غاطس المؤخرة أكبر من غاطس المقدمة $T_A > T_F$. يمكن أن يتم إعطاء الميل الطولي بالدرجة وذلك وفقاً لزاوية الميل الطولي والتي تعتبر موجبة عند الميل باتجاه المؤخرة الأمر الذي ينتج عنه غاطس مؤخرة أكبر من غاطس المقدمة وفي الحالة المعاكسة تكون الزاوية سالبة. يعرض الشكل 6 كل من زاوية الميل الطولي Trim angle θ وغاطس المقدمة والمؤخرة والغاطس الوسطي T_{LCF}.



الشكل 6: البارامترات الهامة المميزة للدرفلة الطولية Trim [19].

من أجل تحقيق الميل الأمثل للسفينة لا بد من تطبيق عزم خارجي يساعد في تدوير السفينة بزاوية الميل الأمثل، وغالبا ما يتم تحقيق ذلك من خلال تغيير توزع مياه الصابورة الأمر الذي ينتج عنه عزم خارجي يساعد في تدوير السفينة حول المحور العرضي بالزاوية المطلوبة، أو من خلال توزيع الأحمال بالشكل الذي يحقق الميلان الطولي الأمثل للسفينة، انظر الشكل 7. في حالة الدرفلة الطولية بفعل العزم الخارجي فإن السفينة لا تدور حول مركز ثقلها وإنما تدور حول مركز سطح الطفو Center of Floating (CF) والموضح في الشكل 6 والذي يتغير تبعا لغاطس السفينة، وعليه لا بد من تحديد موقع هذه النقطة قبل البداء بحسابات الميل الطولي للسفينة.

في هذا البحث تم دراسة السفينة عند ثلاثة قيم للسرعة وهي موضحة في الجدول 2، وعند كل قيمة للسرعة تم دراسة زوايا الدرفلة التالية: 1.2, 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1, 0, -0.1, -0.2, -0.4, -0.6, -0.8 وبالتالي يكون عدد الحالات التي تمت دراستها هي 39 حالة.

الجدول 2: السرع التي تمت عندها الدراسة.

$V\ [\frac{m}{s}]$	Fn
0.915	0.108
1.647	0.195
2.379	0.282

الشكل 7: توزع الأحمال على سفينة حاويات بالشكل الذي يحقق حالة بدون درفلة ومع درفلة إلى الأمام وإلى الخلف [20].

2. تقييم النتائج الرقمية

يتوفر نتائج تجريبية لستة حالات تجريبية عند قيم مختلفة لرقم فرود. الحالات التجريبية التي تتوفر بياناتها التجريبية موضحة في الجدول 3. تم في هذا العمل تقييم كل من نتائج المقاومة والدرفلة الطولية والإزاحة الشاقولية لمركز الثقل لثلاثة حالات فقط من الحالات التجريبية الستة وفق السرعات الموضحة في الجدول 2.

الجدول 3: الحالات التي تم دراستها تجريبياً [21].

No.	1	2	3	4	5	6
Speed [m/s]	0.915	1.281	1.647	1.922	2.196	2.379
Fr	0.108	0.152	0.195	0.227	0.260	0.282
Re	5.23×10^6	7.33×10^6	9.42×10^6	1.10×10^7	1.26×10^7	1.36×10^7

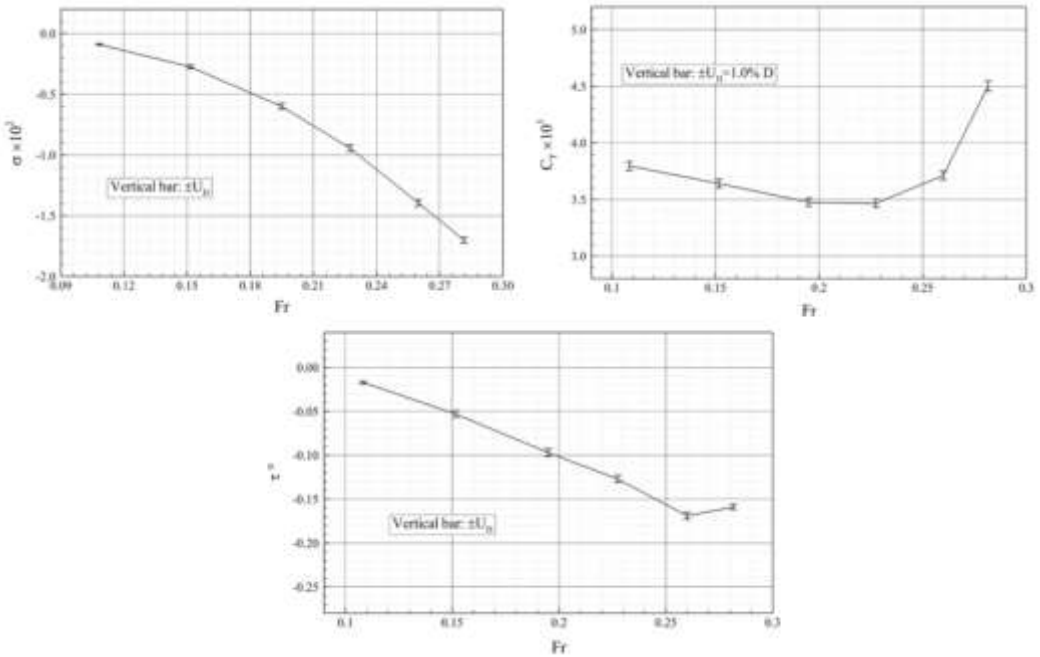
كما ذكرنا سابقا لقد تم في التجربة إجراء عملية سحب السفينة ضمن القناة مع إعطائها درجتي حرية للسفينة وهما حرية الحركة الانتقالية الشاقولية Sinkage وحرية الدوران حول المحور العرضي (الدرفلة الطولية) Pitch، وبناء عليه فإن التجربة تعطينا قيم كل من معامل المقاومة الكلية C_T والازاحة الشاقولية عند المقدمة S_f وعند المؤخرة S_a ومتوسط الإزاحة الشاقولية σ وزاوية الدرفلة τ° [21].

الجدول 4 يعرض مقارنة بين النتائج التجريبية والنتائج الرقمية التي تم الحصول عليها للحالات الثلاثة التي تم حسابها وه الحالات 1، 3، 6 من التجربة والموضحة في الجدول 3.

كما هو واضح من الجدول 4 فإن أكبر قيمة للخطأ هي 2.7% ومع الأخذ بعين الاعتبار أن قيمة الخطأ في القياسات التجريبية هو $U_D = \mp 1\%$، انظر الشكل 8، وبالتالي فإن التطابق بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية جيد جدا ويمكن القول أن الشبكة والإعدادات الرقمية التي تم استخدامها تعطي نتائج جيدة جدا وقريبة جدا من الواقع.

الجدول 4: مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية لمقاومة السفينة.

No.	1	3	6
Fr	0.108	0.195	0.282
$C_{T_{EFD}} \times 10^3$	3.796	3.475	4.501
$C_{T_{CFD}} \times 10^3$	3.720	3.388	4.397
Error%	**-2.0%**	**-2.5%**	**-2.3%**
$\sigma_{EFD} \times 10^2[\mathrm{m}]$	-0.090	-0.599	-1.702
$\sigma_{CFD} \times 10^2[\mathrm{m}]$	-0.088	-0.583	-1.661
Error%	**-2.2%**	**-2.7%**	**-2.4%**
$\tau_{EFD}[°]$	-0.0170	-0.097	-0.159
$\tau_{CFD}[°]$	-0.0167	-0.095	-0.155
Error%	**-1.7%**	**-2.0%**	**-2.5%**



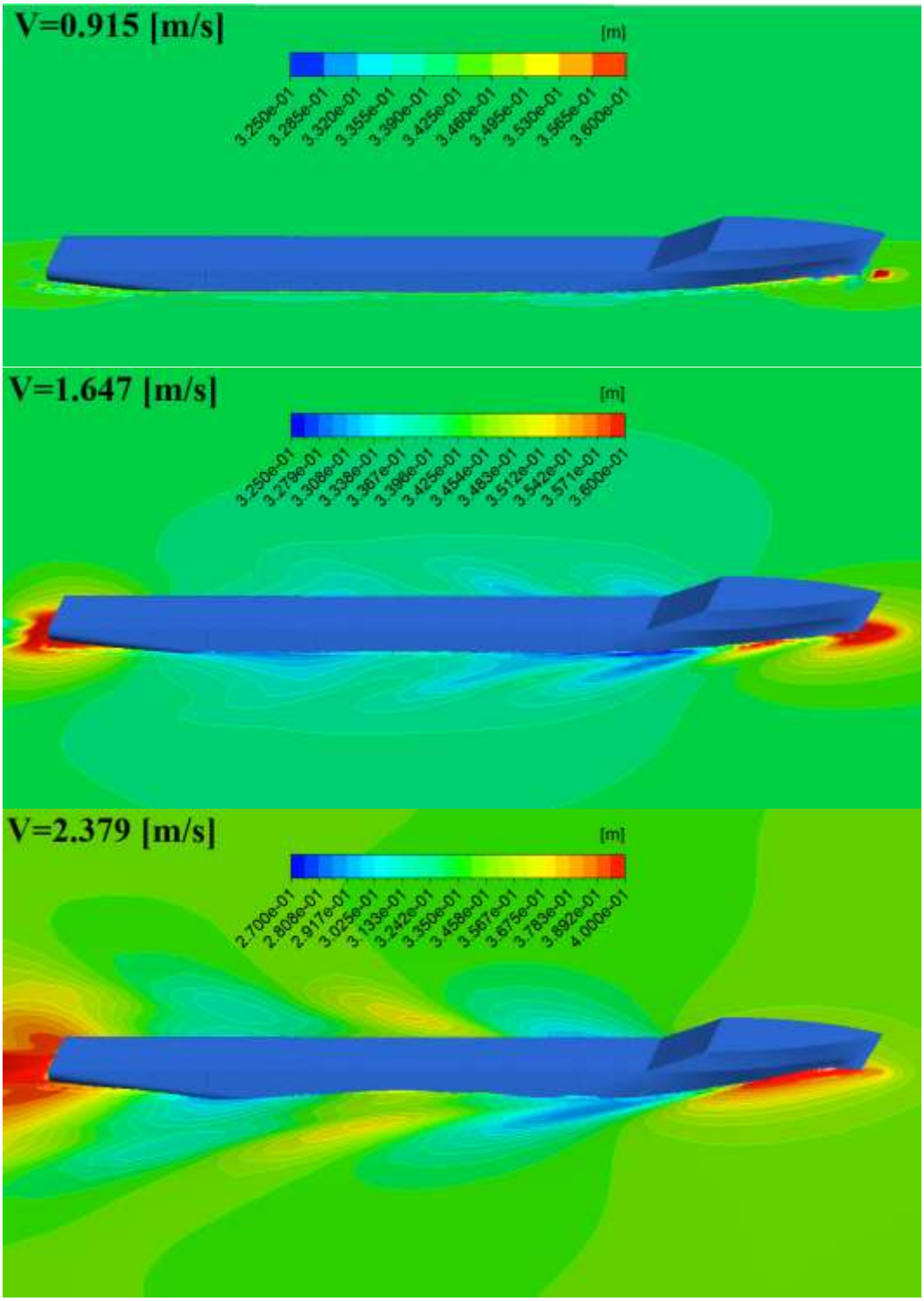
الشكل 8: قيمة الخطأ في النتائج التجريبية [21].

تم حساب قيمة الخطأ بالمقارنة مع التجربة وفق العلاقة التالية:

$$\mathrm{Error}_{\%} = \frac{\emptyset_{CFD} - \emptyset_{EFD}}{\emptyset_{\mathrm{EFD}}} . 100\ \% \qquad (2)$$

حيث أن $\emptyset$ هي البارامتر الذي يتم حسابه.

يعرض الشكل 9 حقل الأمواج المتشكل حول بدن سفينة الحاويات عند كل حالة من الحالات المدروسة. من هذا الشكل نلاحظ زيادة ارتفاع قمة الموجة عند المقدمة والمؤخرة وزيادة عدد قمم الأمواج على جانبي السفينة مع زيادة سرعة السفينة.

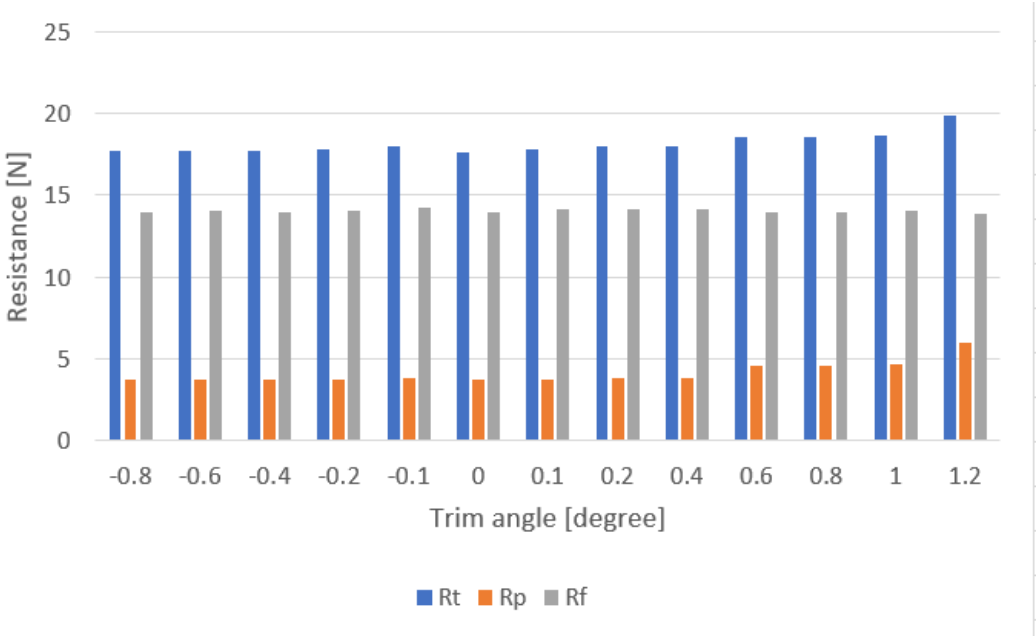


الشكل 9: حقل الأمواج المتشكل حول بدن سفينة الحاويات KCS للحالات الثلاثة المدروسة.

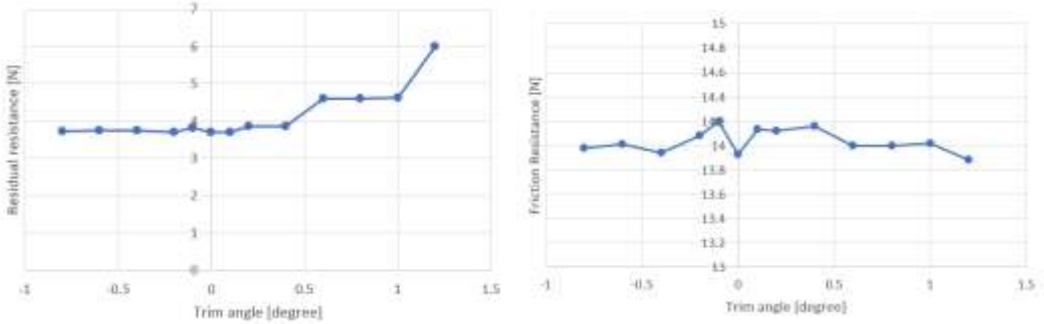
2. تأثير الملان الطولي على مقاومة السفينة

على اعتبار أن الميلان الطولي الذي يحدث بفعل مؤثر خارجي يتم حول مركز سطح الطفو (Center of Floating) لذلك كان لا بد في البداية من تحديد مركز سطح الطفو للسفينة عند الغاطس المدروس وهو T=10.8 m، ومن أجل تحديد هذا المركز كان لا بد من استخدام برنامج الـ MAXSURF والذي يمكننا من تحديد كل المخططات الهيدروستاتيكية للسفينة في حال توفر مجسم السفينة مع الغاطس، وعليه تم استخدام هذا البرنامج من أجل تحديد مركز سطح الطفو والذي يملك الاحداثيات التالية $(x, y, z) = (101.96, 0, 10.8)[m]$. بعد ذلك تم تدوير السفينة حول هذه النقطة للحصول على كل الحالات المراد دراستها والتي تم ذكرها سابقا.

يعرض الشكل 10 النتائج الرقمية لكل من المقاومة الكلية R_t ومركباتها (مقاومة الضغط R_p ومقاومة الاحتكاك R_f) عند قيم مختلفة للميلان الطولي للسفينة وعند رقم فرود 0.108. كما هو واضح من هذا الشكل فإن مقاومة الاحتكاك تتأثر بشكل أقل بكثير من مقاومة الضغط عند تغيير الميلان الطولي للسفينة وهذا واضح في الشكل 11.



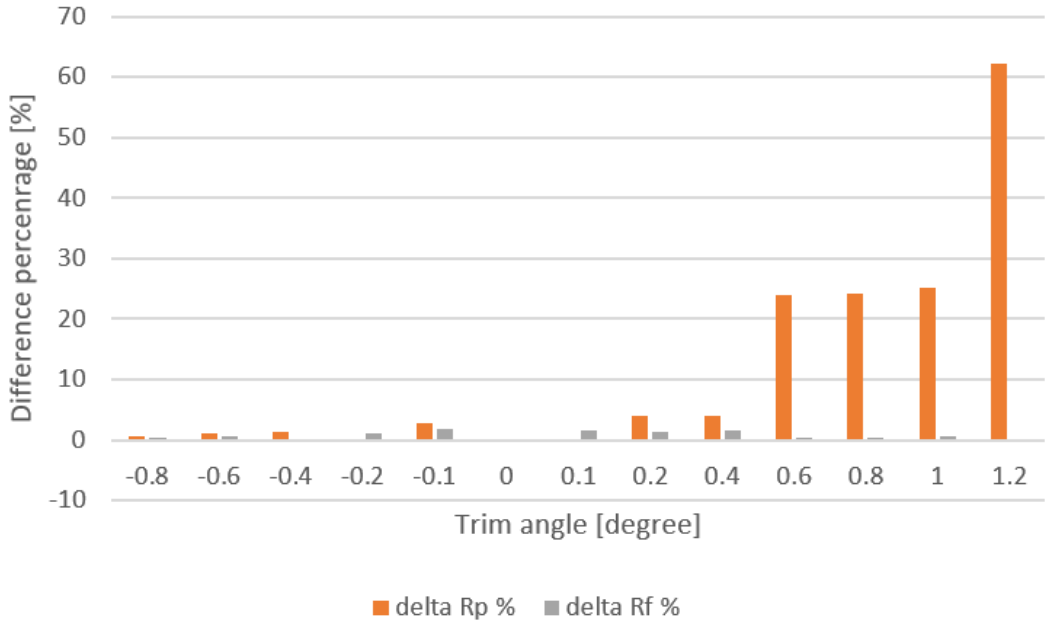
الشكل 10: النتائج الرقمية لكل من المقاومة الكلية ومركباتها عن رقم فرود 0.108 وعند قيم مختلفة للميلان الطولي.



الشكل 11: مقاومة الضغط والاحتكاك عن رقم فرود 0.108 وعند قيم مختلفة للميلان الطولي.

الشكل 12 يعرض النسبة المئوية للتغير في مقاومة الضغط والاحتكاك عند كل زاوية ميلان طولي بالمقارنة مع حالة بدون ميلان طولي. كما هو واضح من هذا الشكل فإن التغيير الأساسي يحدث في مقاومة الضغط في حين أن مقاومة

الاحتكاك تتأثر بشكل قليل جدا وهذا يتطابق مع أبحاث الباحثين الآخرين [5] ,[2]، والسبب الأساسي في هذا الأمر أن مساحة السطح المبلل لا تتغير كثيرا مع زوايا الميلان الطولي المدروسة في حين أن نظام الأمواج المتشكل حول بدن السفينة يتغير مع تغير زاوية الميل الطولي والذي ينعكس بشكل مباشر على مقاومة الضغط وبالتالي على المقاومة الكلية.

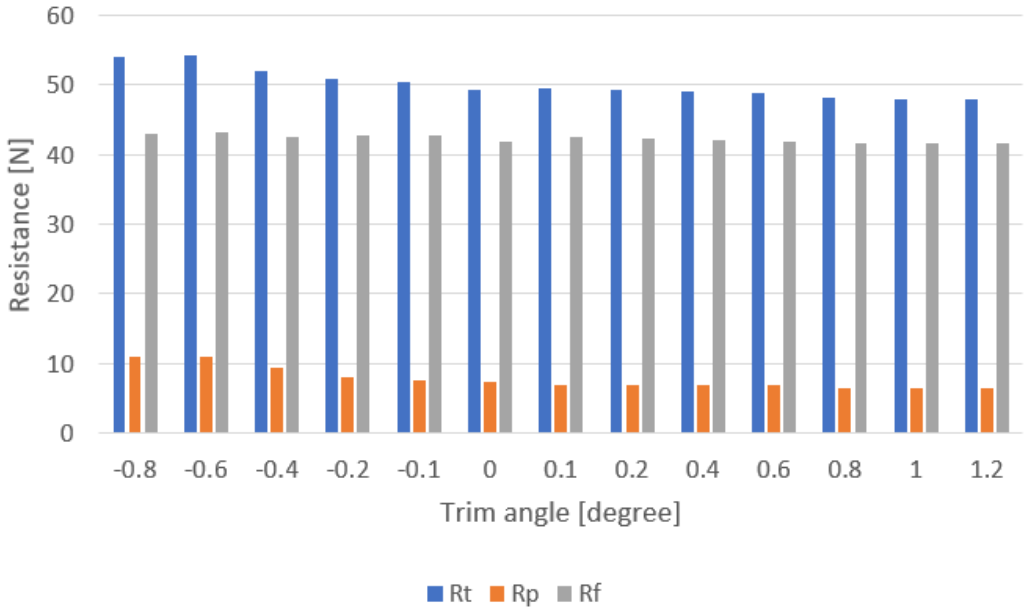


الشكل 12: النسبة المئوية للتغير في مقاومة الضغط والاحتكاك عند كل زاوية ميلان طولي بالمقارنة مع حالة بدون ميلان طولي عند رقم فرود 0.108.

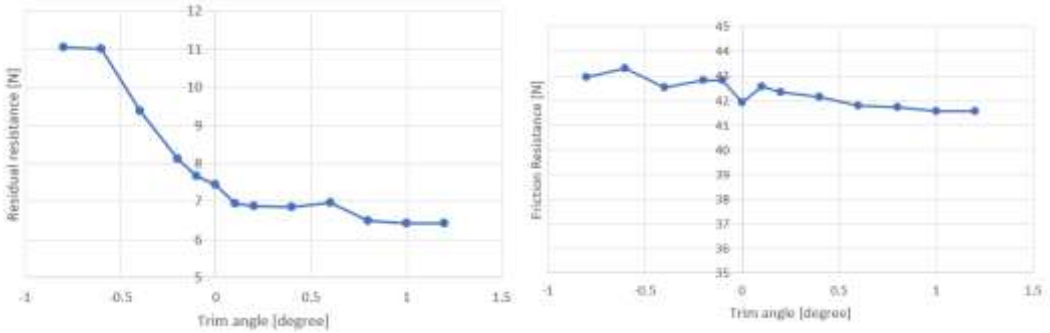
من الأشكال الثلاثة السابقة نلاحظ أنه عند السرعة المنخفضة فإن الميلان الطولي للسفينة لا يلعب دور إيجابي في تقليل مقاومة السفينة. الشكل 13 وحتى الشكل 18 تعرض تأثير الميلان الطولي للسفينة على مقاومة السفينة ومركباتها عند كل من رقمي فرود 0.195 و0.282.

من هذه الأشكال يمكننا ملاحظة الأمور التالية:

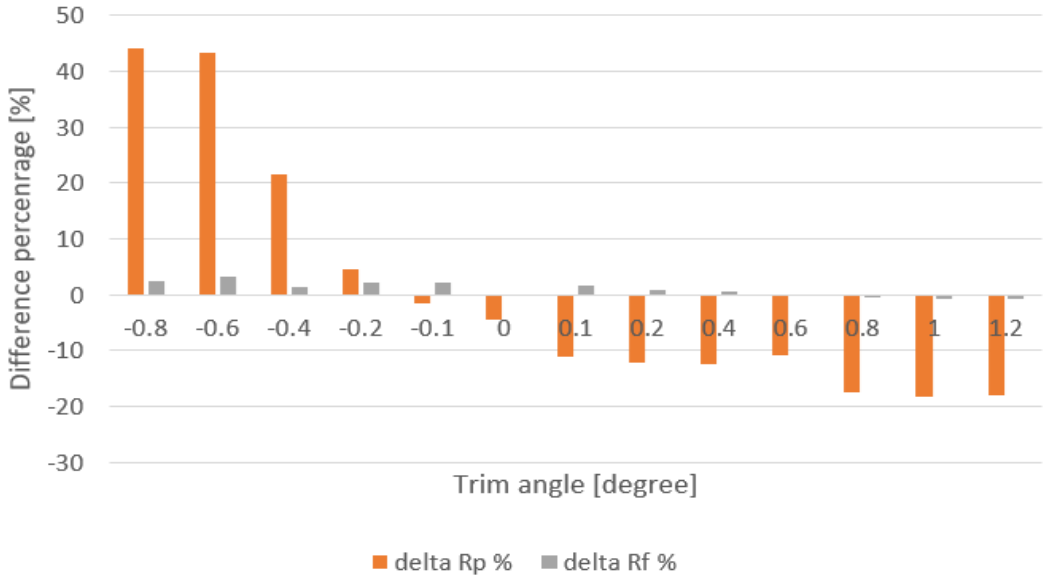
- مع زيادة سرعة السفينة نلاحظ أن تأثير الميلان الطولي يتغير، حيث أنه عند كل من رقمي فرود 0.195 و0.282 نلاحظ أنه مع زاوية الميلان الموجة والتي يكون فيها غاطس المؤخرة أكبر من غاطس المقدمة يظهر التأثير الإيجابي في تقليل المقاومة التي تصل إلى نسبة 4.6% مع رقم فرود 0.282 وزوايا الميلان $1.2° - 0.8°$، وهذا واضح في الشكل 16.
- لزاوية الميل تأثير إيجابي في تقليل مقاومة السفينة والذي يستقر بعد قيمة معينه لزاوية الميل، أي أنه يصل لأفضل قيمة له مع الزاوية 0.8 ولا يزداد أكثر.
- في كل الحالات المدروسة لا تتأثر مقاومة الاحتكاك كثيرا بزاوية الميل الطولي وهذا واضح في كل من الشكل 14 والشكل 17.
- التأثير الأكبر لزاوية الميل يكون على مقاومة الضغط وكما ذكرنا سابقا، السبب الأساسي هو التأثير على نظام الأمواج المتشكل والذي يؤثر على مقاومة الضغط، وهذا واضح في كل من الشكل 15 والشكل 18.



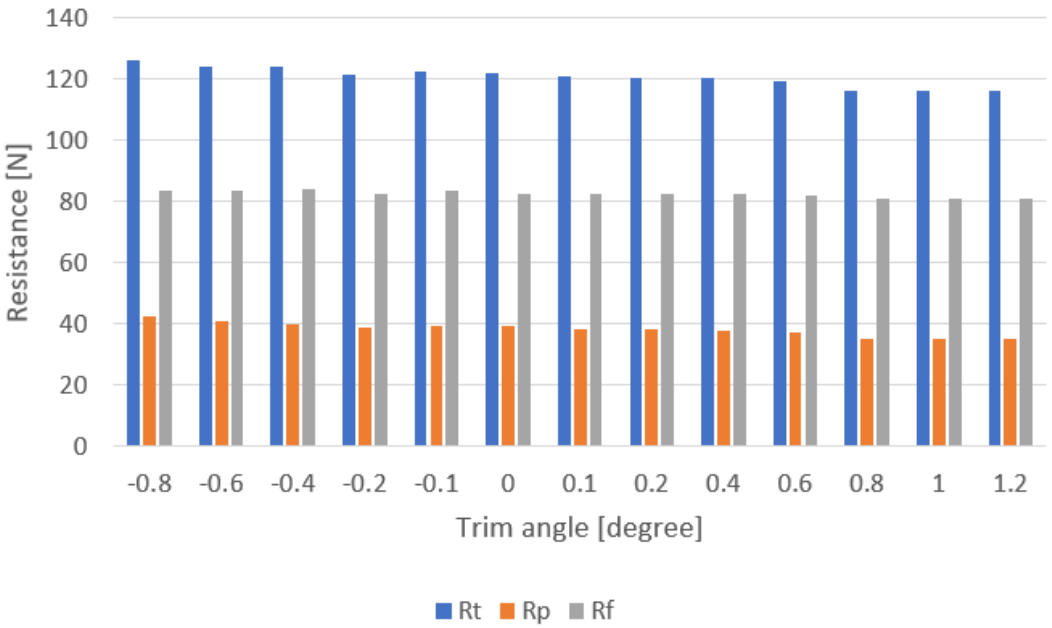
الشكل 13: النتائج الرقمية لكل من المقاومة الكلية ومركباتها عن رقم فرود 0.195 وعند قيم مختلفة للميلان الطولي.



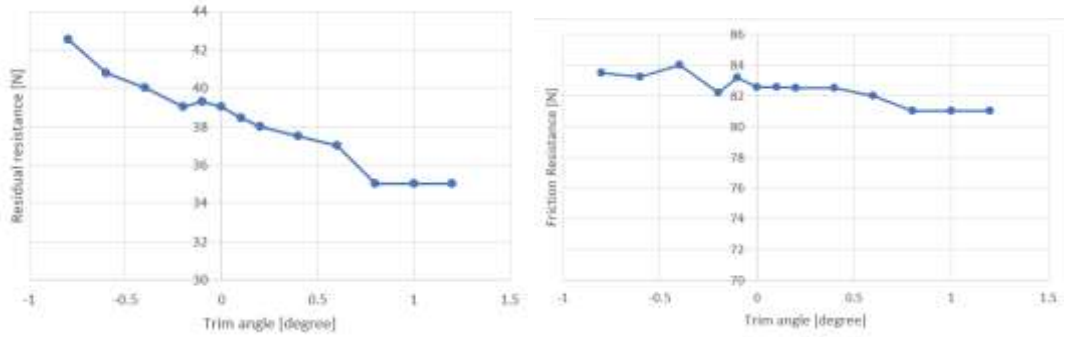
الشكل 14: مقاومة الضغط والاحتكاك عن رقم فرود 0.195 وعند قيم مختلفة للميلان الطولي.



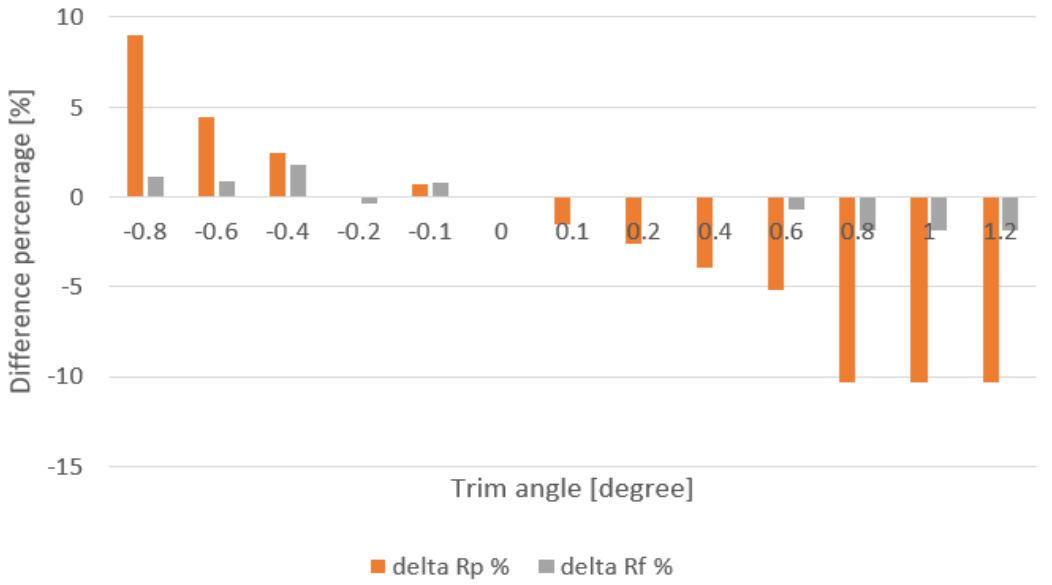
الشكل 15: النسبة المئوية للتغير في مقاومة الضغط والاحتكاك عند كل زاوية ميلان طولي بالمقارنة مع حالة بدون ميلان طولي عند رقم فرود 0.195.



الشكل 16: النتائج الرقمية لكل من المقاومة الكلية ومركباتها عن رقم فرود 0.282 وعند قيم مختلفة للميلان الطولي.



الشكل 17: مقاومة الضغط والاحتكاك عن رقم فرود 0.282 وعند قيم مختلفة للميلان الطولي.



الشكل 18: النسبة المئوية للتغير في مقاومة الضغط والاحتكاك عند كل زاوية ميلان طولي بالمقارنة مع حالة بدون ميلان طولي عند رقم فرود 0.282.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات

- زوايا الميل السالبة لا تلعب دورا إيجابيا في تقليل مقاومة السفينة.
- عند السرعات المنخفضة يكون لزاوية الميل تأثير سالب حيث أنها تسبب زيادة المقاومة.
- مع زيادة سرعة السفينة يزداد تأثير الدور الإيجابي للميل الطولي في تقليل مقاومة السفينة.
- لا تتأثر مقاومة الاحتكاك كثيرا بزاوية الميل الطولي للسفينة وذلك عند كل مجال السرع.
- تتأثر مقاومة الضغط بشكل كبير بزاوية الميلان الطولية وذل بسبب تأثر نظام الأمواج المتشكل حول السفينة بزاوية الميل الطولية للسفينة.

التوصيات

- إجراء مثل هذه الدراسات يعتبر مهم جدا قبل بدء السفينة برحلاتها البحرية لما له من دور كبير في تقليل مقاومة السفينة وبالتالي تقليل صرف الوقود الأمر الذي ينعكس إيجابا على اقتصادية السفينة وتقليل تلوث الهواء.

التوصيات للأعمال المستقبلية

- يجب أن يتم في الدراسات اللاحقة إجراء الحسابات على السفينة الأصلية للتأكد من أنها تسلك نفس السلوك.
- يجب إدخال الرفاص في الحسابات اللاحقة لما له من تأثير كبير على مقاومة السفينة.

References:

[1] M. Reichel, A. Minchev, and N. L. Larsen, "Trim Optimisation - Theory and Practice," *TransNav, Int. J. Mar. Navig. Saf. od Sea Transp.*, vol. 8, no. 3, pp. 387–392, Oct. 2014, doi: 10.12716/1001.08.03.09.

[2] J. Sun, H. Tu, Y. Chen, D. Xie, and J. Zhou, "A Study on Trim Optimization for a Container Ship Based on Effects due to Resistance," *J. Sh. Res.*, vol. 60, no. 01, pp. 30–47, Mar. 2016, doi: 10.5957/JSR.2016.60.1.30.

[3] ITTC, "Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures," *25th International Towing Tank Conference*. pp. 1–12, 2008, [Online]. Available: https://www.ittc.info/media/8153/75-03-01-01.pdf.

[4] X. Gao, K. Sun, S. Shi, B. Wu, and Z. Zuo, "Research on Influence of Trim on a Container Ship's Resistance performance," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1300, no. 1, p. 012105, Aug. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1300/1/012105.

[5] T. H. Le *et al.*, "Numerical investigation on the effect of trim on ship resistance by RANSE method," *Appl. Ocean Res.*, vol. 111, p. 102642, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.APOR.2021.102642.

[6] Y. Du, Q. Meng, S. Wang, and H. Kuang, "Two-phase optimal solutions for ship speed and trim optimization over a voyage using voyage report data," *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 122, pp. 88–114, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.TRB.2019.02.004.

[7] H. Tu, K. Xia, E. Zhao, L. Mu, and J. Sun, "Optimum trim prediction for container ships based on machine learning," *Ocean Eng.*, vol. 277, p. 111322, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2022.111322.

[8] N. Abbas and N. Al-Aji, "The Influence of Drift Angle on the Flow Field around KVLCC2 Tanker Using CFD," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 44, no. 1, 2022, [Online]. Available: https://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/12043.

[9] N. Abbas and B. Oderah, "CFD Study of the Bulbous Bow Effect on the Resistance of the Tanker-KVLCC2," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 43, no. 4, 2021, [Online]. Available: https://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/10823.
[10] N. Abbas and H. Daoud, "Study of the Influence of an Interceptor on the Resistance of the High-speed Vessels Using CFD," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 44, no. 3, 2022, [Online]. Available: https://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/11698.
[11] N. Abbas and Z. Ali, "CFD Study of the Effect of Surface Roughness on the Resistance of KVLCC2 tanker," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 44, no. 1, 2022, [Online]. Available: https://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/12028.
[12] N. Abbas, "CFD Prediction of the Most Appropriate Values of Prandtl Kolmogorov Constant in the Turbulent Boundary Layer," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 41 No.6, 2019.
[13] N. Abbas, "Studying the influence of grid type and turbulence model on the results of numerical calculations using CFD," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 44 No.6, 2022.
[14] R. Hawa, N. Abbas, and W. Hatem, "Study of the forces affecting the KVLCC2 tanker and the propeller MP687 using the Verification and Validation procedure and CFD," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 45, no. 6, 2023, [Online]. Available: https://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/15634.
[15] Simman 2008, "MOERI Container Ship, SIMMAN 2008, FORCE Technology." Accessed: 22-Jan-2023. [Online]. Available: http://www.simman2008.dk/KCS/container.html.
[16] Tokyo2015, "KRISO Container Ship (KCS)-Case 2.1," *T2015 Workshop*, 2015. https://www.t2015.nmri.go.jp/Instructions_KCS/Case_2.1/Case_2-1.html (accessed Jul. 26, 2024).
[17] Tokyo2015, "T2015 - KCS," *T2015 Workshop*, 2015. https://www.t2015.nmri.go.jp/kcs_gc.html (accessed Jul. 26, 2024).
[18] M. Al-Deen and M. Barbahan, "Studying the Effect of the Geometric Dimensions of the Bulbous Bow on the Resistance of the KCS Container Ship using CFD," *Tishreen Univ. Journal-Engineering Sci. Ser.*, vol. 46, no. 4, pp. 537–557, 2024, [Online]. Available: https://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/18067.
[19] Hawaii Marine Company, "Trim and Stability for Ships, Boats, Yachts and Barges – Part 2." Accessed: 27-Jan-2024. [Online]. Available: https://hawaii-marine.com/templates/Trim_Article.htm.
[20] S. Ghosh, "What Is A Ship Trim?" https://www.marineinsight.com/naval-architecture/ship-trim/ (accessed Dec. 22, 2024).
[21] J. Kim, "Experimental Data for KCS Resistance, Sinkage, Trim, and Self-propulsion," *Lect. Notes Appl. Comput. Mech.*, vol. 94, pp. 53–59, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-47572-7_3.