

CFD Study of the Effect of Surface Roughness on the Resistance of KVLCC2 tanker

Dr. Nawar Abbas*

Zainab Ali**

(Received 29 / 8 / 2021. Accepted 9 / 1 / 2022)

□ ABSTRACT □

This research aims to determine the effect of surface roughness on the resistance of KVLCC2 tanker at different values of roughness height and in several cases. The ship hull is divided into bow, middle parallel part (center) and stern. In the first case the whole surface of the ship hull was made rough, then only the surface of bow was made rough and the remained part of the hull was clean, in the third case only the middle part was made rough and finally, the stern was made rough. The RANS equations and $k-\omega$ SST model were used to solve the Navier Stocks Equations. To validate the CFD method, a benchmark test of plate with roughness was calculated. The numerical results show a good agreement with the experimental results.

Keywords: KVLCC2, ship hull roughness, CFD, $k-\omega$ SST.

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

** Postgraduate Student (Master), Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. Email: zainab.a.ali9595@gmail.com

دراسة تأثير خشونة السطح على مقاومة السفينة الناقلة KVLCC2 باستخدام تقنية CFD

د. نوار عباس*

زينب علي**

(تاريخ الإيداع 29 / 8 / 2021. قُبِلَ للنشر في 9 / 1 / 2022)

□ ملخص □

يهدف هذا البحث إلى تحديد تأثير خشونة السطح على مقاومة السفينة الناقلة KVLCC2 عند قيم مختلفة لارتفاع الخشونة وفي عدة حالات سواء على كامل سطح السفينة أو على كل جزء من هذا السطح (المقدمة، الجزء المتوازي من البدن والمؤخرة، كل على حدة)، وذلك باستخدام تقنية الـ CFD. تم استخدام طريقة الـ RANS والموديل الرياضي SST $k - \omega$ لحل معادلات نافيه ستوكس. في بادئ الأمر تم إجراء الحسابات على صفيحة معيارية وتمت مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية المتوفرة، المقارنة بينت مقدار جودة النتائج التي يمكن الحصول عليها باستخدام تقنية الـ CFD. كما تم في هذا البحث دراسة تأثير الخشونة على كل مركبة من مركبات المقاومة (مركبتي الضغط واللزوجة).

الكلمات المفتاحية: السفينة الناقلة KVLCC2، خشونة سطح السفينة، CFD - ميكانيك الموائع الحسابية، SST $k - \omega$.

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

dr.nawarnabilabbas@tishreen.edu.sy

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

zainab.a.ali9595@gmail.com

مقدمة:

في الآونة الأخيرة تم الاعتماد بشكل أكبر على وسائل النقل البحرية لما لها من ميزات عديدة في مجال التخزين والنقل. وبنسبة ذلك أصبح تقليل استهلاك الوقود المستخدم في السفن أمراً ضرورياً بالنسبة لشركات النقل البحري فقد حاولت هذه الشركات تحديد أساليب التشغيل والصيانة إما لخفض تكاليف التشغيل أو لزيادة أرباح الشركة إضافة إلى الحد من انبعاثات الغازات الدفيئة.

إحدى البارامترات الهامة التي تؤثر بشكل مباشر على السرعة ومتطلبات الطاقة واستهلاك الوقود هي مقاومة بدن السفينة بفعل الاحتكاك، حيث تشكل هذه المقاومة أكثر من 70% من المقاومة الكلية للسفينة المنخفضة السرعة، أثناء عمل السفينة في الظروف البحرية يتراكم الكثير من الحشوف والأوساخ على السطح المبلل لبदन السفينة، والذي بدوره يؤدي إلى زيادة كبيرة في مقاومة الاحتكاك، بسبب الاضطرابات الكبيرة التي تسببها هذه الأوساخ في منطقة الطبقة الحدية حول البدن. بشكل عام يعتبر تطبيق المعالجة الفيزيائية والبيولوجية لبदन السفينة من أفضل الطرق لتقليل مقاومة الاحتكاك. يمكن التقليل من الخشونة الفيزيائية عن طريق تطبيق بعض التدابير الوقائية ولكن من الصعب السيطرة على الخشونة البيولوجية (الحشوف والأصداف البحرية) ولهذا السبب يتم بشكل دوري تنظيف بدن السفينة من الحشوف وطلائها باستخدام دهانات خاصة للتقليل من تجمع الحشوف على السطح المبلل للبدن.

أوصى مؤتمر الـ ITTC في عام 2011 [1]، بأن يقوم الباحثون بإنشاء قاعدة بيانات واسعة النطاق لتوابع الخشونة للطلاء المانع للحشوف والأوساخ المختلفة، وذلك لأن مثل هذه التوابع يجب أن تكون معروفة من أجل التنبؤ بتأثير الخشونة على مقاومة السفينة. يمكن تقييم دقة مثل هذه التوابع عن طريق التجارب في أحواض الاختبار أو أثناء عمل السفينة في الظروف البحرية الحقيقية. وبناءً عليه لا تزال الكثير من الشركات المطورة للطلاء المانع للحشوف تعتمد على التجارب من أجل تقييم جودة هذا الطلاء وتأثيره على مقاومة السفينة [2]. كما أوصى هذا المؤتمر (ITTC,2011) باستخدام علاقات الخشونة المسموح بها، والتي تم تفصيلها في التقرير الذي خرج به مؤتمر الـ ITTC في عام 1990 [3]، لأنها الخيار الأفضل المتاح حالياً. ومع ذلك يحذر الـ ITTC -أيضا من عدم الدقة المحتملة في هذه العلاقات في بعض الحالات وبالتالي يوصي الباحثين بتطوير صيغ أو طرق جديدة باستخدام البيانات التجريبية التي يمكن توفيرها للتنبؤ بآثار الطلاء والحشوف على مقاومة السفينة.

يعد استخدام الطلاء المقاوم للحشوف البحري طريقة شائعة تستخدم لتنعيم أسطح البدن لتقليل مقاومة الاحتكاك وبالتالي استهلاك الوقود من قبل السفينة. ومع ذلك سيكون لهذا الطلاء خشونة سطحية أولية ستؤثر على مقاومة الاحتكاك للسفينة. وبالتالي فإن أية وسيلة لتقييم آثار مثل هذا الطلاء على مقاومة الاحتكاك ستكون ذات فائدة كبيرة. ومع ذلك في الوقت الحاضر لا توجد طرق دقيقة متاحة للتنبؤ بتأثير خشونة السفن بسبب استخدام الدهانات المانعة للحشوف (ITTC,2008, [4]; ITTC, 2011, [1]).

أثناء تحسين كفاءة السفن الحالية التي تم طلاؤها بدهانات جديدة مانعة للحشوف، من المهم بنفس القدر وضع تصور دقيق للتأثيرات المختلفة للحشوف على مقاومة السفينة وإثبات أهمية التخفيف من هذه الآثار من خلال إجراء البحوث العلمية. تعتبر الحسابات الرقمية للموائع (CFD, Computational Fluid Dynamics) أحد فروع ميكانيك الموائع التي تستخدم الطرق العددية والخوارزميات لحل المسائل التي تتضمن جريان الموائع وتحليل نتائج المحاكاة. يتم استخدام الحواسيب لإجراء ملايين الحسابات اللازمة لمحاكاة التفاعل والتأثير المتبادل بين الموائع والأسطح المختلفة. لذلك في السنوات الأخيرة أعطيت تقنية الـ CFD اهتمام أكبر كبديل عن الطرق التجريبية.

ولدراسة وتحليل الجريانات المختلفة يتم اعتماد طريقتين:

- الطرق التجريبية (التمثيلية): يتم فيها قياس التدفق والقوى من خلال أجهزة قياس محددة.
- الطرق الرقمية: وفيها يتم حل ودراسة هذه المشاكل رقمياً باستخدام ما يسمى ديناميك الموائع الحسابية (CFD, Computational Fluids Dynamics).

غير أن الطرق التجريبية وحتى يومنا هذا لا تزال تواجه العديد من الصعوبات، أبرزها:

1. تأمين شروط الجريان التي تحقق توافق ما بين أن تكون مناسبة للتجربة من جهة ومطابقة للواقع من جهة أخرى.
2. الأبعاد المحدودة لقنوات الاختبار مثل قنوات جر السفن وبالتالي عملية قياس محدودة.
3. التكاليف المادية والزمنية الكبيرة اللازمة للقياس.
4. 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 ويشكل كبير من صعوبة القياسات، وذلك بسبب الأبعاد الهندسية المعقدة والصغيرة للملحقات بالمقارنة مع السفينة.
5. لا يمكن تحديد السطح الخشن ببارامتر واحد فقط مثل مقدار ارتفاع الخشونة لكن يجب أخذ نسيج الخشونة بعين الاعتبار.

6. عدم وجود قياسات دقيقة للخشونة وتباين درجة الخشونة من سفينة إلى أخرى.

7. الاضطرابات التي تحدث في منطقة الطبقة الحدودية تزيد من صعوبة القياسات التجريبية.

في السنوات الأخيرة جذبت الطرق الرقمية (CFD)، الاهتمام لتكون كبديل عن الطرق التجريبية، حيث يوفر إمكانية حساب الجريانات بدقة أكبر وتحت أية شروط للإبحار، إضافة إلى القدرة على تلافي جميع المشاكل السابقة. أبرز تلك الطرق:

- طريقة الحل المباشر (DNS= Direct Numerical Simulation Method) والتي لا يمكن استخدامها في حالة الجريانات المعقدة ذات القيمة الكبيرة لأرقام رينولدز، بسبب حاجتها لعدد خلايا كبير جداً، الأمر الذي يزيد من التكاليف الحسابية.

• طرق الـ URANS والـ LES وتعتبر من أكثر الطرق استخداماً في مجال الجريانات.

• الطرق الهجينة (Hybrid Method) وهي طرق تدمج بين الـ URANS والـ LES.

في الوقت الراهن يتم استخدام تقنية الـ CFD في الكثير من التطبيقات الهندسية، انظر الدراسات [8]–[5] [9]، سواء في المجال الجوي، البحري، الطبي، وحتى في أبحاث الفضاء، وغيرها من المجالات الأخرى. في هذه الدراسة سيتم استخدام هذه التقنية من أجل دراسة تأثير خشونة السطح على مقاومة السفينة.

الدراسات المرجعية

يوجد الكثير من الباحثين الذين يحاولون دراسة التغييرات التي تحدثها خشونة السطح في التدفق حول هذا السطح، ولهذا نجد العديد من الدراسات الرقمية والتجريبية لتأثير الخشونة على التدفق حول الصفيحة. في الوقت الحالي وبسبب التطور الكبير في الحواسيب التي تدعم تقنية الـ CFD نلاحظ قيام العديد من الباحثين بإجراء دراسات حول تأثير الخشونة على خصائص التدفق حول بدن السفينة، سنذكر فيما يلي أكثر الأبحاث أهمية وارتباطاً بعملنا هذا:

- في عام 1982 ناقش King et al [10] بعض مشاكل القياس السطحي على هياكل السفن مع بارامترات خشونة ذات صلة، وأعطى نتائج قياسات الخشونة باستخدام أجهزة قياسية واقترح نظام للقياس المباشر للخشونة على سطح بدن مغمور.
- قام الباحث Schultz في عام 2004 [11]، بإجراء دراسة تجريبية لدراسة تأثير خشونة السطح على مقاومة الاحتكاك. حيث قام بقياس المقاومة في حالة السطح النظيف (بدون وجود حشف) والسطح الخشن (مع وجود حشف). تم إجراء التجربة على صفيحة في قناة جر بأرقام رينولدز تتراوح بين $2.8 - 5.5 \times 10^6$. لوحظ أن وجود الطلاء يؤثر بشكل قليل جداً على مقاومة الاحتكاك، بينما لوحظ أنه مع ازدياد خشونة السطح بفعل تجمع الحشف عليه تزداد مقاومة الاحتكاك بشكل كبير (وذلك بعد 278 يوم من التعرض لظروف العمل البحرية).
- وفي عام 2013 قام كل من Usta and Korkut [12]، بإجراء دراسة تجريبية على خمس صفائح من الألمنيوم تملك البارامترات الهندسية ذاتها وتختلف عن بعضها البعض في خصائص خشونة السطح، حيث تم طلاء أربع صفائح بطبقات مختلفة من المواد العازلة وتركزت إحدى الصفائح دون طلاء (صفيحة مرجعية). أجريت التجارب ضمن قناة بحدود سرعة تتراوح بين 1,5-3,75 متر/ثانية. بينت التجارب أن الصفيحة التي تملك أعلى قيمة لـ R_a (متوسط ارتفاع الخشونة) قد أظهرت مقاومة أكبر بالمقارنة مع الصفائح الأخرى وهذا ما يوافق النتائج التي تم الحصول عليها عند تحليل تلك الصفائح رقمياً باستخدام تقنية الـ CFD وبنفس الشروط التجريبية.
- ولدراسة تأثير الأصداف البحرية (التي تتجمع على سطح السفينة المبلل) على مقاومة الاحتكاك والمقاومة المتبقية أجرى Osman Turan et al في عام 2016 [6]، سلسلة من اختبارات الجر مع سرعات جر مختلفة تتراوح بين (1,5-3,6). تم أولاً طباعة نماذج ثلاثية الأبعاد لأصداف بحرية حقيقية من أجل توليد أصداف صناعية، أصقت فيما بعد بثلاث صفائح مسطحة بنسب تغطية مختلفة (0%, 10%, 20%) بالإضافة إلى صفيحة مرجعية بدون أصداف عليها. ونتيجة لذلك تبين أن الصفيحة ذات نسبة التغطية الأكبر تبدي مقاومة أعلى لمقاومة الجر بين جميع الأسطح.
- استخدم Demirel et al في عام 2017 [13]، تقنية الـ CFD من أجل التنبؤ بتأثير الطلاء والحشف على مقاومة البدن والقوة الفعالة اللازمة لجر سفينة حاويات (KCS). تم استخدام طريقة الـ URANS من أجل حل معادلات نافيه ستوكس. في بادئ الأمر تم تطوير نموذج رياضي يأخذ بعين الاعتبار تأثير وجود الطلاء والحشف، حيث تم الاعتماد على توابع الخشونة المتوفرة في المراجع. في الخطوة التالية تم دمج هذا التابع الرياضي في توابع الجدار الموجودة ضمن برنامج الـ STAR-CCM+. النتيجة التي تم التوصل لها من هذه الدراسة، أنه كلما زادت خشونة السطح بفعل سوء الطلاء الموجود أو تراكم الأوساخ كلما ازدادت مقاومة السفينة وازدادت الطاقة اللازمة لجر السفينة، كما تم التوصل إلى أن مقاومة ونظام الأمواج المتشكل يتأثر بشكل كبير بخشونة سطح السفينة المبلل.
- قام Song et al في عام 2019 [14]، بتطوير نموذج رياضي للتنبؤ بتأثير الحشف (الأصداف البحرية) بشكل أساسي على مقاومة السفينة. تم استخدام هذا النموذج ضمن توابع الجدار المستخدمة في تقنية الـ CFD لتمثيل الشروط السطحية لتواجد الأصداف البحرية على السطح. في البداية ومن أجل تقييم هذا النموذج الرياضي تم استخدامه من أجل حساب تأثير خشونة السطح على المقاومة في حالة الصفيحة والنتائج التي تم الحصول عليها تمت مقارنتها مع النتائج التجريبية المتوفرة. بعد ذلك تم تطبيق هذا النموذج على سفينة حاويات KCS، وتم دراسة تأثير خشونة السطح على كل من مقاومة الاحتكاك، مقاومة الضغط، مقاومة الأمواج والمقاومة المتبقية.

- عرض Uzun et al. في عام 2019 [15]، نتائج استخدام موديل رياضي يدرس تأثير الحشف على مقاومة وطاقة الدفع للسفينة، مع العلم أن هذا الموديل يأخذ بعين الاعتبار نمو الحشف بشكل يومي على سطح السفينة. تم اختبار هذا النموذج على ناقلة طولها 176 م مع افتراض تشغيلها لمدة عام كامل، والنتائج التي تم الحصول عليها تمت مقارنتها مع البيانات الحقيقية التي تم الحصول عليها من نفس الناقلة بواسطة أجهزة قياس مثبتة على الناقلة. خلال هذه المدة ازدادت مقاومة الاحتكاك للسفينة بنسبة 32%. في الخطوة الثانية تم تطبيق هذا الموديل على ناقلة نفط بطول 258 م، وتم افتراض أنها عملت لمدة ثلاث سنوات متتالية. تم ملاحظة أنه خلال هذه المدة ازدادت طاقة الدفع اللازمة بمقدار 25%.
- في نفس العام 2019 تم في البحث Yeginbayeva et al. [16] إجراء دراسة متعددة الجوانب توضح العلاقة بين مرور الزمن ونوع الطلاء التجاري المستخدم وتشكل الحشف وتأثير ذلك على مقاومة السفينة وتوفير الطاقة.
- في عام 2020 استخدم Seok et al. [17] تقنية الـ CFD لدراسة التغيير في مقاومة السفينة بسبب زيادة خشونة السطح وذلك باستخدام برنامج Star-CCM+ التجاري، الذي يحل التدفق اللزج غير القابل للانضغاط بالاعتماد على معادلات نافيه ستوكس. تم التأكد من صحة الشروط الحدية المستخدمة في الحسابات الرقمية من خلال مقارنتها مع الشروط التجريبية المتوفرة. تم تطبيق هذه الشروط على ثلاث سفن لتقييم التغيير في المقاومة وفقاً لخشونة السطح.
- وفي العام ذاته 2020 قام Song et al. [18] بتطوير موديل رياضي ضمن طريقة الـ URANS للتنبؤ بتأثير الحشف على خصائص الدفع الذاتي لسفينة حاويات KCS، في البداية تم إجراء الحسابات لكل من الرفض والبدن كل على حدى ثم للبدن والرفض سوياً باستخدام تقنية الـ CFD. وقد تبين أنه عند أعلى خشونة للبدن (20%B) تزداد معاملات المقاومة الكلية بنسبة تصل إلى 52% في حين تأثير الرفض على قيم المقاومة الكلية لا يكاد يذكر. تمت ملاحظة أن سرعة دوران الرفض تزداد عند نقطة الدفع الذاتي بسبب تراكم الحشف على كل من البدن والرفض، إضافة إلى أن حقول السرعة، توزع الضغط، أبعاد الطبقة الحدية وشكل الموجة حول السفينة يتأثر بشكل كبير بدرجة خشونة البدن بينما تأثيرات خشونة الرفض والدفة طفيفة نسبياً. أحدى نتائج هذه الدراسة المثيرة للاهتمام هي انخفاض الدوامات على الحافة الأمامية للدفات ودوامات محور الرفض المتشكلة تحت الرفض المغطى بالحشف، هذا ما يمكن اعتباره إيجابياً من ناحية التكهف والضجيج.

أهمية البحث وأهدافه:

تعتبر دراسة المقاومة التي تتعرض لها السفينة واحدة من أهم الأمور في علم هيدروديناميك السفن وذلك لارتباطها بالتصميم الأفضل لبدن السفينة ورفع كفاءتها كما تساعد بشكل كبير في تخفيض تكاليف التشغيل. مقاومة السفينة تتأثر بالكثير من العوامل أثناء العمل في الظروف البحرية، تعتبر خشونة السطح المتشكلة بفعل تراكم الحشف البحري على سطح السفينة من أكثر العوامل المؤثرة على مقاومة السفينة، وبالتالي فإن هذا البحث يهدف بشكل أساسي إلى دراسة تأثير خشونة السطح على مقاومة السفينة الناقلة KVLCC2.

طرائق البحث ومواده:

في هذه الدراسة تم استخدام طريقة الـ CFD لدراسة وتحليل التغير في المقاومة بسبب زيادة خشونة السطح. ونظراً لكون برنامج الـ ANSYS يملك 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). وعليه فقد تم استخدام برنامج الـ ANSYS والذي يمكننا من استخدام توابع جدار خاصة تأخذ بعين الاعتبار تأثير خشونة السطح على الطبقة الحدية بالقرب من بدن السفينة، وبالتالي حساب التغيرات التي تطرأ على المقاومة عند وجود خشونة للسطح ومقارنتها مع السطح الناعم (الأملس). كما يمكننا من الجمع بين تأثيرات الخشونة والتأثيرات غير الخطية (كالتوزيع المكاني للحشف، وحركة السفينة في الأمواج، والدفق) على مقاومة السفينة، بالإضافة إلى تأثير خشونة السطح على مقاومة الضغط والاحتكاك المتشكلة على البدن.

معادلات نافيه ستوكس Navier Stokes equations

معادلات نافيه ستوكس ومعادلة مصونية الكتلة تصف حركة الموائع النيوتونية غير القابلة للانضغاط والتي يمكن تقسيمها إلى أربع معادلات أساسية، وهي مصونية الكتلة ومصونية كمية الحركة في الاتجاهات x, y, z . تستخدم المعادلات الأربع هذه لوصف الاضطراب والتدفق وسيتم توضيحها في الأقسام التالية. تستند الـ CFD الحديثة إلى هذه المعادلات التي يمكن حلها بشكلها التكاملي أو التقاضي باستخدام إحدى الطرق الرقمية التالية: طريقة الفروق المنتهية (Finite Element Method) FEM وطريقة العناصر المنتهية (Finite Difference Method) FDM وطريقة الحجم المنتهية (Finite Volume Method) FVM. طريقة FDM تعتبر أقدم طريقة للحل الرقمي للمعادلات التقاضلية الجزئية [21]–[19], [5].

الشكل التقاضي للمعادلات الناظمة للجريان

الشكل التقاضي لمعادلة مصونية الكتلة في الإحداثيات الديكارتيّة:

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

الشكل التقاضي 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 التقاضي 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 التقاضي 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 أن p هو الضغط، u, v, w هي مركبات السرعة على المحاور الإحداثية الديكارتيّة x, y, z ، ρ كثافة المائع، g_i مركبات تسارع الجاذبية الأرضية على المحاور الإحداثية الديكارتيّة، τ_{ij} هو مصفوفة إجهادات رينولدز المضطربة (وهو عبارة عن مصفوفة ثلاثية الأبعاد 3×3 ومتناظرة بالنسبة للقطر الرئيسي) ويمكن كتابته بالشكل التالي:

$$\tau_{ij} = \begin{bmatrix} -\rho \cdot u'_x u'_x & -\rho \cdot u'_x u'_y & -\rho \cdot u'_x u'_z \\ -\rho \cdot u'_x u'_y & -\rho \cdot u'_y u'_y & -\rho \cdot u'_y u'_z \\ -\rho \cdot u'_x u'_z & -\rho \cdot u'_y u'_z & -\rho \cdot u'_z u'_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

حيث أن u'_i هي قيمة تآرجحات السرعة على المحاور الاحداثية الديكارتية. مصفوفة إجهادات رينولدز المضطربة غير معروفة القيمة وتجعل من نظام المعادلات غير مغلق لذلك يجب حسابها، ولهذا الغرض يتم استخدام الموديلات الرياضية لحساب قيمة هذه الاجهادات.

الشكل التكاملي للمعادلات الناظمة للجريان

الشكل التكاملي لمعادلة مصونية الكتلة:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV + \iint_A \rho \vec{u} dA = 0 \quad (6)$$

إن مجموع القوى المؤثرة على حجم المراقبة dV تساوي إلى معدل تغير كمية الحركة خلال الزمن، ولهذا يمكن كتابة معادلة كمية الحركة بالشكل التكاملي كمايلي:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho u_i dV + \int_A \rho u_i u_j dA = - \int_A T_{ij} dA + \int_V \rho f_i dV \quad (7)$$

حيث أن T_{ij} يمثل مصفوفة الإجهادات العامة والتي تعرف طبقاً لفرضية نيوتن كالتالي:

$$T_{ij} = - \left(p + \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \delta_{ij} + 2\mu S_{ij} \quad (8)$$

δ_{ij} هو ثابت كرونكر، S_{ij} مصفوفة الانفعالات وتعطى بالشكل التالي:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

الأبعاد الهندسية

تم اختيار نموذج السفينة KVLCC2 للحسابات وذلك بسبب توفر الكثير من البيانات التجريبية الخاصة بهذا النموذج. أبعاد السفينة KVLCC2 المستخدمة في هذه الدراسة موضحة في الجدول 1 ، وباعتبار رقم فرود الذي تمت عنده الدراسة صغير $F_R = 0.142$ تم اهمال تأثير تشوهات السطح الحر.

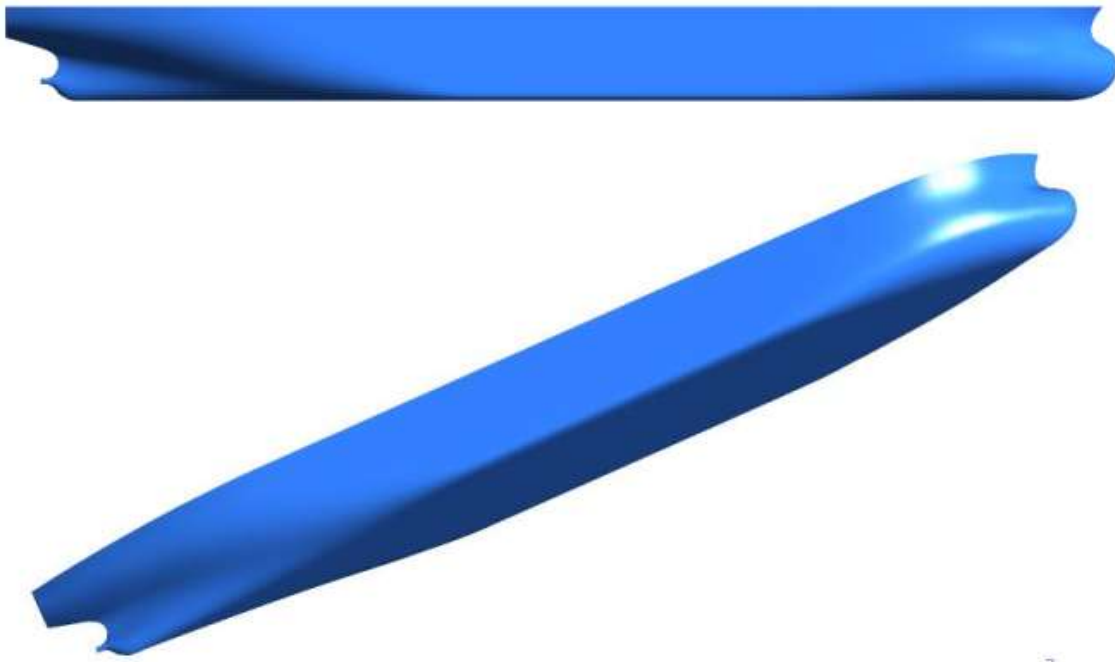
وعلى اعتبار أن أهم الخطوات عند استخدام تقنية الـ CFD هي التأكد من جودة المعادلات والموديلات الرياضية المستخدمة، وبالتالي لابد في البداية من تقييم النتائج التي يتم الحصول عليها ومقارنتها مع النتائج التجريبية المتوفرة. ولأنه لا يوجد أية نتائج تجريبية لمقاومة السفينة بوجود الخشونة، فلقد تم في بادئ الأمر دراسة حالة معيارية لصفحة لها العديد من النتائج التجريبية. الصفحة التي تم استخدامها هي الصفحة المستخدمة في تجربة Schultz في عام 2004 [11]، فيما يلي سنقدم موجز عن الأبعاد الهندسية لكل من السفينة والصفحة.

الأبعاد الهندسية لنموذج السفينة الناقلة KVLCC2:

الأبعاد الهندسية الأساسية الخاصة بالنموذج KVLCC2 مع المقارنة بأبعاد السفينة الأصلية موضحة في الجدول التالي، نسبة التصغير $\lambda=58$:

الجدول 1: الأبعاد الأساسية للسفينة KVLCC2 ونموذجها [22]

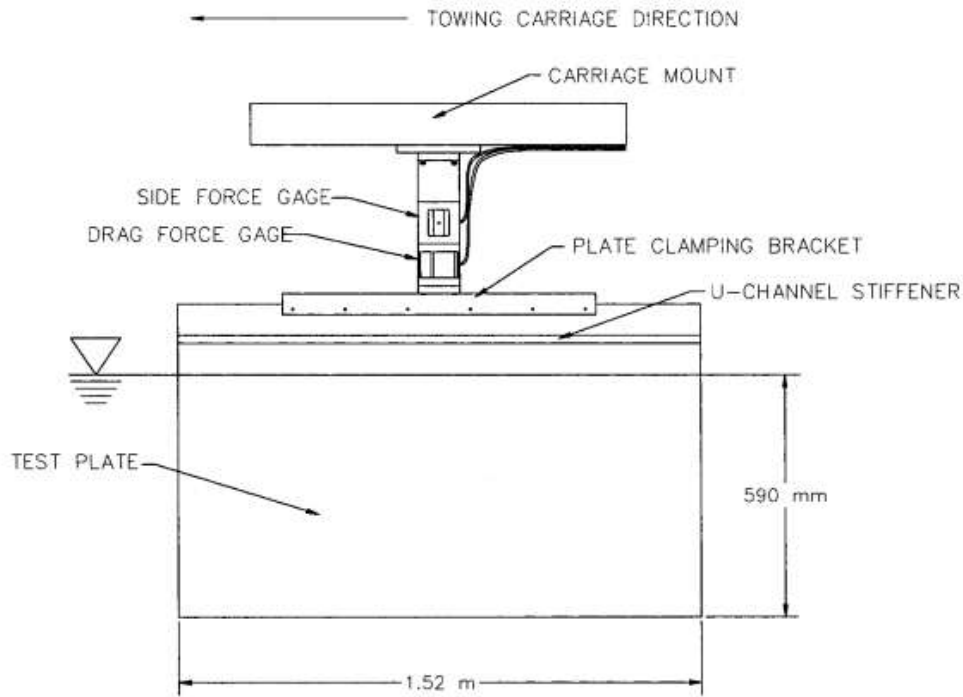
الوحدة	النموذج KVLCC2	السفينة KVLCC2	البعد الهندسي
m	5.5172	320	طول السفينة (L_{pp})
m	1	58	عرض السفينة (B)
m	0.3586	20.8	غاطس السفينة (T)
-	0.8098	0.8	C_B
m^2	8.0838	27194	مساحة السطح المبلل (S)
m^3	1.6023	312622	الإزاحة (V)



الشكل 1: نموذج السفينة الناقلة [22].

الأبعاد الهندسية للصفحة:

الصفحة بطول 1.52m وارتفاع 590 mm، تبلغ سماكتها 3.2 mm كما هو موضح بالشكل 2. في حين تم تنعيم الحواف لتصبح نصف دائرية بقطر 1.6 mm [11].

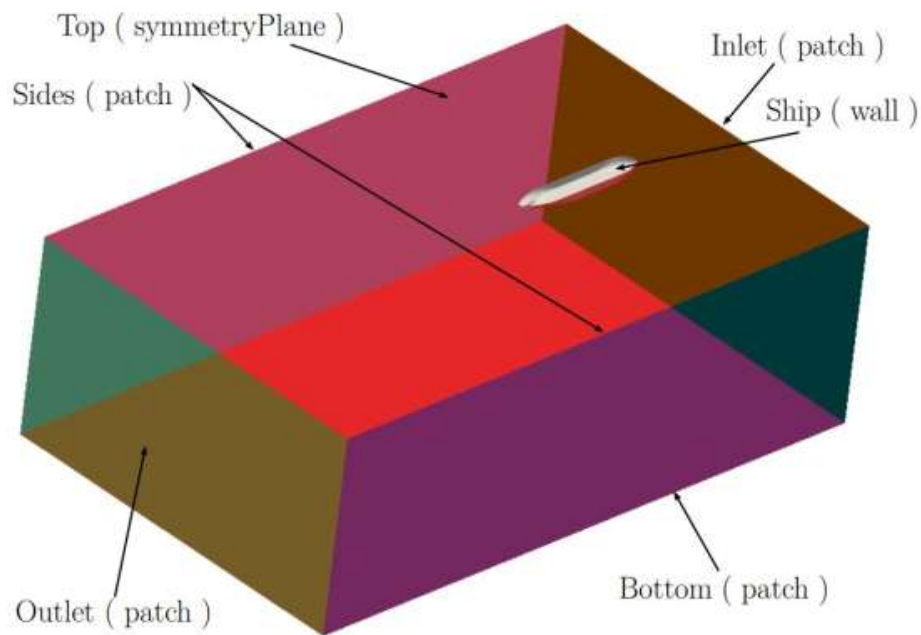


الشكل 2: أبعاد الصفیحة التي قام ببنائها Schultz [11]

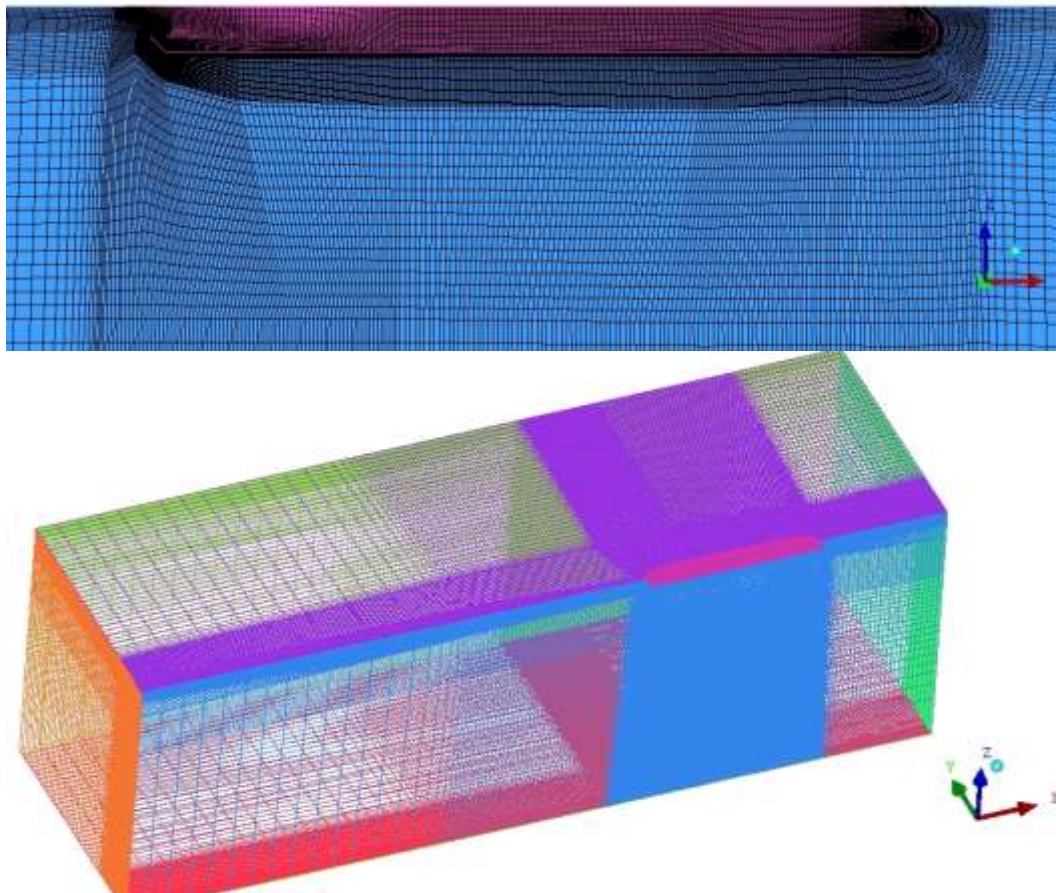
بناء الشبكة الرقمية:

إن بناء الشبكة الرقمية يعتبر من أهم الخطوات في مرحلة ما قبل الحسابات الرقمية وبعد مرحلة بناء المجسم الهندسي، كما يعتبر الخطوة الأولى الحاسمة في عملية النمذجة الرقمية للمعادلات المختلفة الموصفة للحالة الفيزيائية. يتطلب الحل باستخدام تقنية الـ CFD تقسيم المجال الحسابي المدروس إلى أجزاء صغيرة (شبكة من الخلايا، عناصر أو حجوم تحكم) تغطي كامل المجال الحسابي المدروس. فمن خلال الحل الرقمي لمعادلات الجريان ضمن مراكز هذه الخلايا يمكن تحديد الخصائص المميزة للجريان كالسرعة، الضغط ودرجة الحرارة والعديد من البارامترات المتغيرة الهامة الأخرى. يوضح الشكل 3، المجال الحسابي الذي تتوضع ضمنه السفينة والذي يمثل قناة الاختبار. لقد تم تثبيت السفينة وتحريك المائع بسرعة مساوية لسرعة السفينة والتي تحقق رقم فرود التي تعمل عنده السفينة.

مدخل المائع هو السطح Inlet والمخرج هو السطح Outlet. إن دقة الحسابات الرقمية يعتمد على عدد الخلايا الحسابية ضمن المجال الحسابي، فكلما زاد عدد الخلايا الحسابية كلما زادت دقة النتائج التي نحصل عليها. تعتبر الشبكات المنتظمة الأفضل من ناحية الذاكرة والتخزين، بالإضافة إلى تقارب الحل بشكل أسرع. أما من ناحية سرعة توليد وبناء الشبكة فإن الشبكات الغير منتظمة لها الأفضلية، ولكن في هذه الحالة يحتاج الحل إلى وقت أكثر لكي يتقارب. بيد أنه في حال أراد الباحث بناء شبكة منتظمة فإنه سيحتاج إلى الكثير من الوقت من أجل إنشاء الشبكة الرقمية للمجال الحسابي المدروس، وأيضاً الأمر يعتمد على مهارات الباحث في تصميم الشبكة المناسبة للتوفيق بين الدقة المطلوبة وتكلفة الحل.



الشكل 3: المجال الحسابي الذي تتوضع ضمنه السفينة.



الشكل 4: الشبكة الرقمية التي تم بنائها حول السفينة الناقلة KVLCC2 (في الأسفل) والتنعيم في منطقة الطبقة الحدية (في الأعلى).

الشكل 4 يوضح الشبكة الرقمية التي تم بناؤها حول بدن السفينة KVLCC2 باستخدام برنامج الـ ICEM. أبعاد المجال الحسابي (والذي يمثل القناة التي تبحر فيها السفينة) هي على النحو التالي:

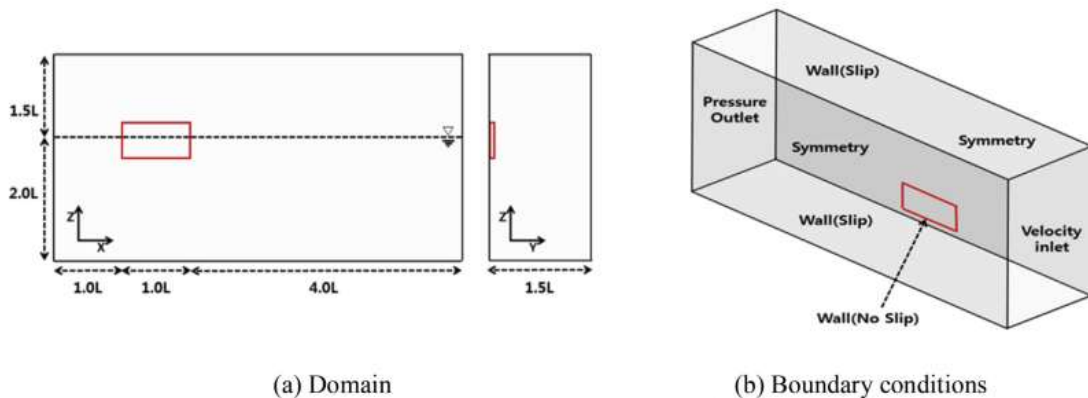
$$L \times B \times T = 4.615 L_{pp} (m) \times 2.885 L_{pp} (m) \times 1.5L_{pp} (m)$$

حيث L يمثل طول المجال الحسابي، B عرضه و T ارتفاع المجال الحسابي. كما هو واضح في الشكل السابق، فلقد تم تنعيم الشبكة الحسابية بالقرب من بدن السفينة، في منطقة الطبقة الحدية. عدد الخلايا التي تم استخدامه هو 1 مليون خلية حول كامل بدن السفينة. للأسف لا نستطيع استخدام عدد خلايا أكثر من ذلك وذلك بسبب الإمكانيات المحدودة للكمبيوتر المتوفر لدينا وبسبب عدم توفر كلاسترات (كمبيوترات مركزية، ذات إمكانيات حاسوبية ضخمة جداً) خاصة بالأبحاث العلمية في الجامعات السورية.

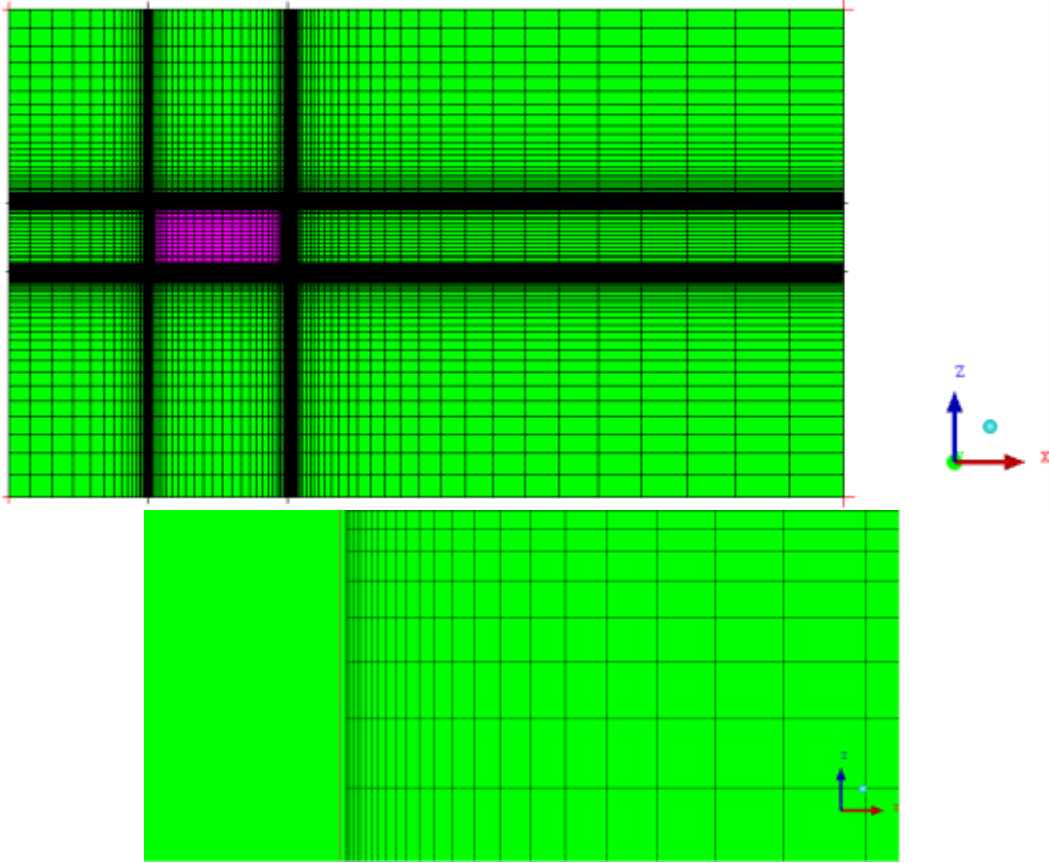
إن المجال الحسابي الذي تم استخدامه في حالة الصفيحة هو متوازي مستطيلات وله الأبعاد الهندسية المحددة وفقاً لتجربة Schults [11] كما يلي:

$$L \times B \times T = 6L_{plate} \times 1.5L_{plate} \times 3.5L_{plate}$$

تم اعتماد شروط الحدود التي يوفرها الـ ANSYS كما هو موضح بالشكل 5، استخدمت أيضاً شبكة منتظمة مؤلفة من حوالي مليون خلية متوازية المستطيلات ومتشابهة بنيت بواسطة الـ ICEM من أجل المحاكاة الرقمية، انظر الشكل 6 والذي يوضح في الأعلى الشبكة المنتظمة التي تم بناؤها حول الصفيحة، وفي الأسفل يوضح تنعيم الشبكة في منطقة الطبقة الحدية. وعلى اعتبار أن كل من الصفيحة والسفينة تعتبر أجسام متناظرة، فلقد تم إجراء المحاكاة لنصف الصفيحة والسفينة فقط.



الشكل 5: المجال الحسابي والشروط الحدية [23].



الشكل 6: الشبكة الحسابية المنتظمة التي تم بناؤها حول السفينة (الصورة في الأعلى)، التعميم في منطقة الطبقة الحدية (الصورة في الأسفل).

الموديل الرياضي SST $k - \omega$

تم اقتراح موديل SST $k - \omega$ من قبل Menter في عام 1994، [24]. هذا النموذج هو مزيج من الموديلين $k - \omega$ و $k - \varepsilon$. يتم دمج مزاي كلا الموديلين في هذا الموديل. يتم تطبيق الموديل $k - \omega$ قريباً من الجدار داخل منطقة الطبقة الحدية بينما الموديل $k - \varepsilon$ يستخدم خارج منطقة الطبقة الحدية في منطقة التدفق الحر. معادلات الانتقال للطاقة الحركية المضطربة k ومعدل التبديد المحدد ω ، يمكن أن تكتب بالشكل التالي:

معادلة الـ k :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (10)$$

معادلة نسبة تبدد الاضطراب النوعية (بتردد الاضطراب $[1/S]$) ω :

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (11)$$

معادلة اللزوجة الدورانية (اللزوجة الدوامة) μ_t :

$$\mu_t = \frac{\rho \alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)}, \quad S = \partial u / \partial y \quad (12)$$

حيث أن:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= \tanh \left\{ \left[\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right]^4 \right\} \\
 F_2 &= \tanh \left[\left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \\
 P_k &= \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right) \\
 CD_{k\omega} &= \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)
 \end{aligned} \tag{13}$$

الثابت الخاصة بهذا الموديل موضحة في الجدول (2).

الجدول 2: قيمة الثوابت المستخدمة في الموديل الرياضي $k - \omega$ SST

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

النتائج والمناقشة:

في البداية لا بد من تقييم جودة الشبكة الرقمية، المعادلات والموديل الرياضي المستخدم لحل المعادلات النازمة للتدفق، ولهذا سيتم مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها لحالة الصفيحة المعيارية مع النتائج التجريبية المتوفرة.

تقييم النتائج الرقمية لحالة الصفيحة

إن تابع الخشونة المستخدم في برنامج الـ ANSYS لا يزال حتى الآن قيد الدراسة والتطوير وعليه فلا بد في البداية من اختبار هذا التابع على حالة معيارية للتأكد من جودة نتائجه، تم استخدام الصفيحة المعيارية التي استخدمها الباحث Schultz في عام 2004، ونشر عنها الكثير من النتائج التجريبية، انظر [11]. بالإضافة لتابع الخشونة تم استخدام طريقة الـ RANS والموديل الرياضي $k - \omega$ SST لحل معادلات نافيه ستوكس. الجدول 3 يوضح مقارنة بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية لمقاومة الصفيحة عند قيم مختلفة لارتفاع الخشونة. تم اختبار الصفيحة عند قيمتين للسرعة، الأولى 2.0 m/s حيث رقم فرود مساو لـ 0.518 والثانية 3.8 m/s عند رقم فرود 0.984. كما هو واضح من النتائج فإن النسبة المئوية للخطأ تزداد بازدياد كل من السرعة (رقم فرود) وارتفاع الخشونة، وعلى اعتبار أن سفينتنا تعمل عند رقم فرود 0.142 وهو أصغر بكثير من الأرقام الموضحة في الجدول، وبالتالي يفترض أن تكون النتائج التي سنحصل عليها في السفينة أكثر دقة منه في حالة الصفيحة. تجدر الإشارة إلى أن نسخة الـ ANSYS المستخدمة في هذا البحث من إصدار 2015 والنتائج كانت ستكون أكثر دقة باستخدام إصدارات أحدث ولكن تعذر ذلك بسبب الإمكانيات الضعيفة لبعض الشيء للحاسب المستخدم، غير أن النتائج التالية مرضية وتعطي صورة شبه صحيحة عن قيم المقاومة الناتجة.

الجدول 3: مقارنة بين القيم التجريبية والرقمية لمعاملات المقاومة لحالة للصفحة.

Velocity (m/s)	d (μm)	$C_{T,EFD}$	$C_{T,CFD}$	Error percentage
2.0 Fr=0.518	0.0	0.003605	0.00359	0.413%
	85.0	0.003663	0.00377	3.1%
	129.0	0.003783	0.00397	5.1%
3.8 Fr=0.984	0.0	0.003226	0.00320	0.8%
	85.0	0.003423	0.00353	3.3%
	129.0	0.003500	0.00369	5.4%

من خلال مقارنة النتائج مع بعضها البعض نلاحظ أن أكبر قيمة للفرق بين النتائج هو 5.4% عند رقم فرود 0.984 والخشونة 129 μm، وهذا الفرق يعتبر مقبول جداً، وهكذا نجد أنه عند تطبيق الشروط المذكورة سابقاً (تابع الخشونة، معادلات الـ RANS والموديل الرياضي SST-K) لدراسة مقاومة الصفحة، كانت النتائج متوافقة مع النتائج التجريبية من منظور كمي ونوعي. نتيجة لذلك، تم اعتبار هذه الشروط مناسبة لحالة السفن، وبالتالي تم تطبيقها في المرحلة التالية على السفينة الناقلة KVLCC2.

تقييم النتيجة الرقمية لمقاومة السفينة

إن القيمة التجريبية لمعامل المقاومة للنموذج الأصلي للسفينة الناقلة KVLCC2 ذات البدن النظيف متوفرة لدينا عند رقم فرود 0.142، وبالتالي يمكن مقارنة النتيجة الرقمية التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج ANSYS مع النتيجة التجريبية، كما يلي، انظر الجدول 4:

الجدول 4: مقارنة القيمة الرقمية لمقاومة السفينة الكلية مع القيمة التجريبية.

Velocity (m/s)	C_T CFD	C_T EFD	Error percentage %
1.047	0.00394	0.00411	-4.1

إن التطابق بين النتائج التجريبية والنتائج التي حصلنا عليها باستخدام تقنية الـ CFD مرضية جداً حيث أن نسبة الخطأ طفيفة لم تتجاوز 4.1%، وذلك من أجل مليون خلية حسابية، مما يدل على دقة النتائج التي يمكن الحصول عليها باستخدام برنامج الـ ANSYS. يتم الحصول على قيم $C_{T,CFD}$ مباشرة من الحسابات الرقمية، وبالتالي النسبة المئوية للخطأ يتم حسابها كما يلي:

$$\text{Error percentage} = \frac{C_{T,CFD} - C_{T,EFD}}{C_{T,EFD}} \cdot 100\% = \frac{0.00394 - 0.00411}{0.00411} \cdot 100\% = -4.1\% \quad (14)$$

دراسة تأثير خشونة كامل البدن على مقاومة السفينة

يبين الجدول 5 النتائج الرقمية لمقاومة السفينة عند رقم فرود 0.142 وقيم مختلفة لارتفاعات الخشونة على كامل سطح السفينة، كما هو واضح من هذا الجدول، أول ارتفاع للخشونة تم أخذه هو 0.5 ملم وأكبر ارتفاع للخشونة تم أخذه هو 5 ملم. ومع العلم أن قيمة معامل المقاومة للبدن النظيف هي 0.00411، نلاحظ مقدار الزيادة الكبير في معامل

المقاومة والتي تصل إلى أكثر من 100% في حالة ارتفاع الخشونة 5 ملم. وهذا يؤكد أن ارتفاع خشونة السطح له تأثير كبير جداً على مقاومة السفينة.

الجدول 5: معامل المقاومة عند ارتفاعات مختلفة للخشونة وفق للنتائج الرقمية.

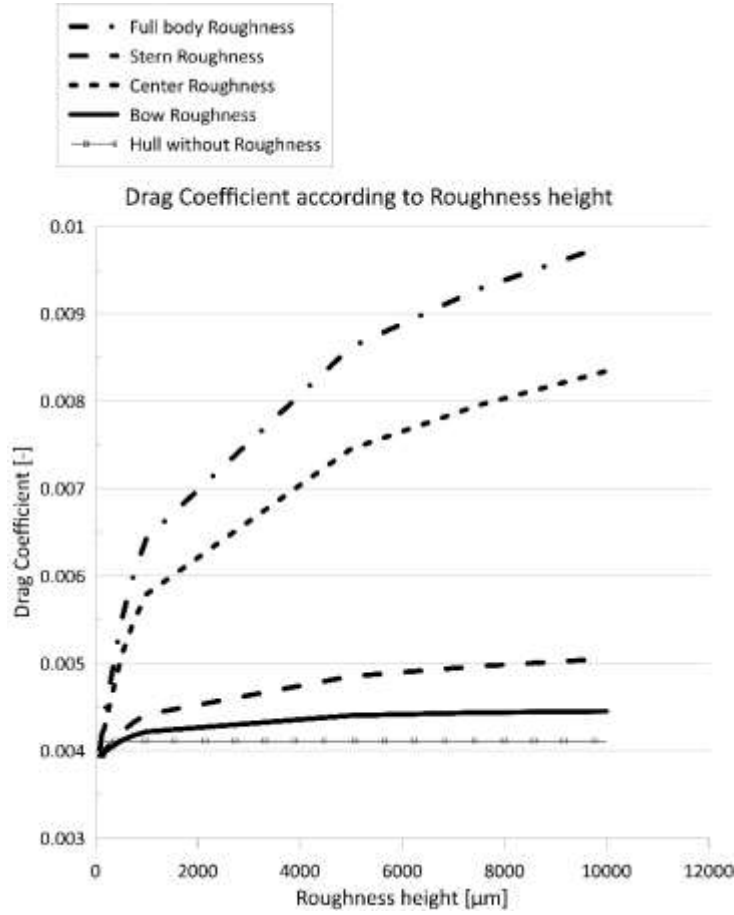
d (m)	$C_{T,CFD}$
0.0005	0.0054504
0.001	0.0069575
0.002	0.0073167
0.003	0.0078524
0.004	0.0082590
0.005	0.0085967

دراسة تأثير خشونة كل جزء من أجزاء السفينة على مقاومتها

تم وباستخدام برنامج الـ ICEM تقسيم بدن السفينة الناقلة إلى ثلاثة أقسام، المقدمة، الجزء الأوسط المتوازي من البدن، والمؤخرة (Bow, Center, Stern) ومن ثم تم اختبار تأثير خشونة كل جزء من هذه الأجزاء على المقاومة الكلية للسفينة.

الجدول 6: معاملات المقاومة عند تطبيق ارتفاعات مختلفة للخشونة على كل من المقدمة (Bow)، الجزء المتوازي الأوسط (Center)، المؤخرة (Stern) وكامل البدن (Full Body).

d (μ m)	C_d (Bow)	C_d (center)	C_d (Stern)	C_d (Full body)
0	0.00394	0.00394	0.00394	0.00394
85	0.00394	0.00400	0.00394	0.00403
150	0.00397	0.00418	0.00394	0.00428
200	0.00399	0.00433	0.00401	0.00447
500	0.00413	0.00507	0.00420	0.00546
750	0.00417	0.00548	0.00432	0.00602
1000	0.00421	0.00579	0.00441	0.00643
5000	0.00440	0.00745	0.00485	0.00861
7500	0.00443	0.00795	0.00496	0.00928
10000	0.00445	0.00834	0.00505	0.00978



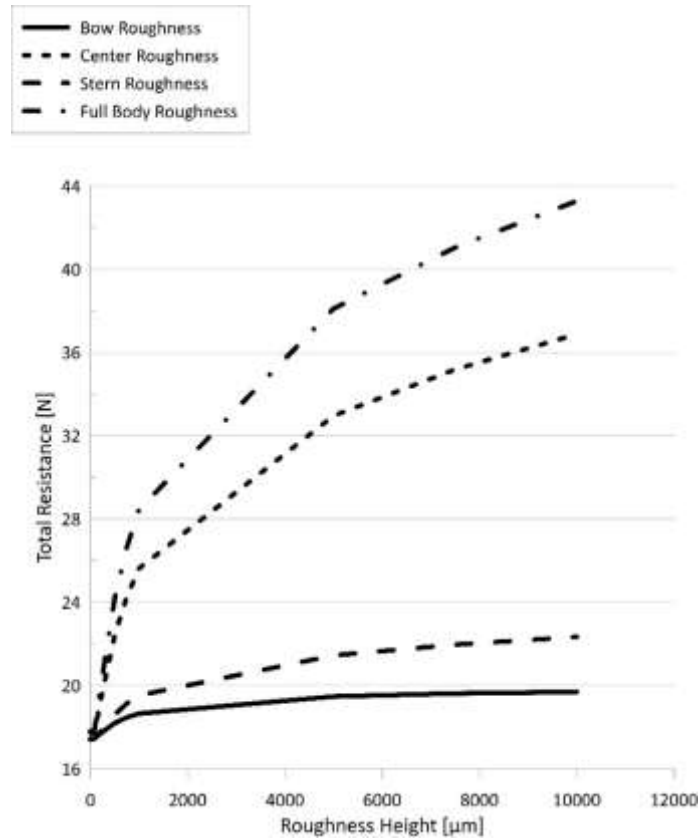
الشكل 7: تغير معامل المقاومة مع تغير خشونة الأجزاء المختلفة من البدن.

تشير النتيجة إلى أن خشونة القسم الأوسط (Center) تلعب الدور الأكبر في زيادة المقاومة في حين تأثير خشونة المقدمة والمؤخرة أقل بكثير بالمقارنة مع الجزء الأوسط. الجدول 7 يبين مقدار الزيادة في معامل المقاومة بوجود خشونة بالمقارنة مع حالة البدن النظيف بدون خشونة. تأكيداً للفكرة السابقة، نجد أنه عند ارتفاع 7.5 mm للخشونة مطبق في منطقة الوسط يزداد معامل المقاومة أكثر من 103%، ويزداد حوالي الربع (26.884%) عند نفس ارتفاع الخشونة على المؤخرة فقط، بينما يزداد بمقدار (13.340%) عند تطبيق الخشونة على المقدمة فقط.

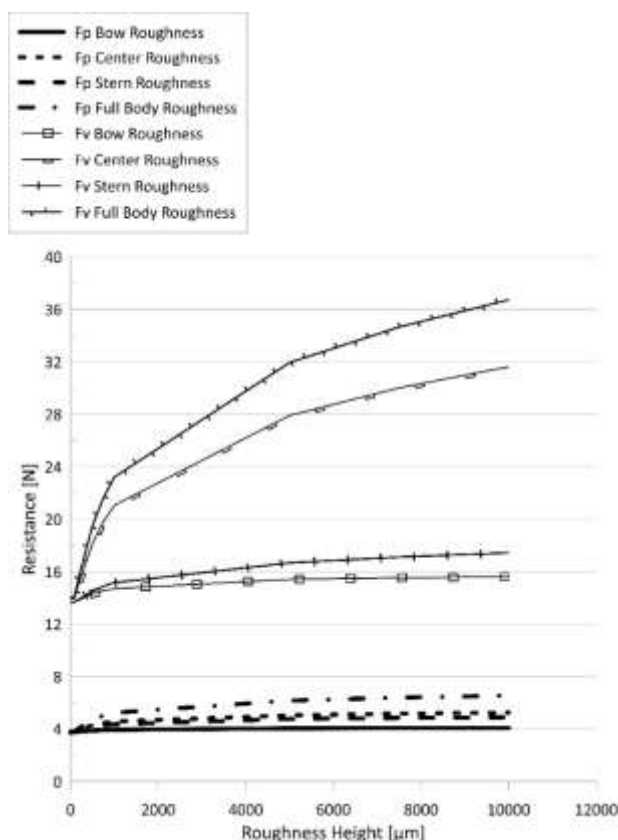
الجدول 7: النسبة المئوية لمقدار زيادة معامل المقاومة عند الارتفاعات المختلفة للخشونة بالمقارنة مع حالة البدن النظيف.

d (μm)	$\Delta C_d(\text{Bow})\%$	$\Delta C_d(\text{Center})\%$	$\Delta C_d(\text{Stern})\%$	$\Delta C_d(\text{Full body})\%$
0	0	0	0	0
85	0.792	2.402	0.69	3.084
150	1.456	7.053	1.712	9.378
200	2.121	10.759	2.581	14.387
500	5.111	29.568	7.487	39.713
750	6.670	40.173	10.554	53.973
1000	7.743	47.968	12.777	64.370
5000	12.484	90.391	23.945	120.163
7500	13.340	103.168	26.884	137.158
10000	13.723	113.135	29.056	150

وعليه المحافظة على القسم الأوسط نظيفاً قدر المستطاع تؤدي إلى تقليل المقاومة بشكل كبير. كما نعلم فإن المركبتين الأساسيتين لقوة المقاومة هما مقاومة الضغط ومقاومة الاحتكاك، وفي هذا النوع من الناقلات وعند أرقام فرود الصغيرة، فإن الجزء الأكبر من المقاومة يتشكل بفعل مقاومة الاحتكاك والتي قد تصل إلى 80% من قيمة المقاومة الكلية. وعليه لابد من دراسة تأثير خشونة على كل جزء من أجزاء المقاومة على حده. الشكل 8 يوضح تغير المقاومة الكلية مع تغير خشونة الأجزاء المختلفة من البدن. الشكل 9 يوضح تأثير خشونة كل جزء من أجزاء البدن على كل من مركبتي الضغط والاحتكاك. وكما هو واضح من هذا الشكل، فإن التأثير الأكبر لخشونة السطح هو على مقاومة الاحتكاك، والتي تتأثر بشكل كبير جداً بخشونة السطح بالمقارنة مع مقاومة الضغط، والذي يكاد يكون تأثرها بالخشونة لا يذكر. وهذا هو الأمر المتوقع، وذلك على اعتبار أن خشونة السطح تؤثر بشكل مباشر على التدفق في منطقة الطبقة الحدية، وتؤدي إلى زيادة الاضطرابات في هذه المنطقة، الأمر الذي يؤدي إلى زيادة المقاومة، حيث أن تشكل هذه الاضطرابات سيؤدي إلى سحب طاقة إضافية من السفينة، والتي تؤدي بشكل حتمي إلى زيادة المقاومة.



الشكل 8: تغير المقاومة الكلية للسفينة مع تغير خشونة الأجزاء المختلفة للبدن.



الشكل 9: تغير مقاومة الضغط والاحتكاك مع تغير خشونة الأجزاء المختلفة من البدن، F_p مقاومة الضغط، F_v مقاومة الاحتكاك.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- تم في هذا البحث استخدام تقنية الـ CFD من أجل دراسة تأثير ارتفاع الخشونة على مقاومة السفينة، وتم التوصل إلى ما يلي:
- إن طريقة الـ RANS والموديل الرياضي $k - \omega SST$ وتابع الخشونة المستخدم في برنامج الـ Ansys تعطي نتائج جيدة جداً في التطبيقات البحرية وتساعد في توفير التكاليف المادية والوقت، بالأخص عند حساب المقاومات.
- للخشونة تأثير كبير على القوى المؤثرة على السفينة وخصائص التدفق حول الهيكل. وبالتالي هذه النتائج مفيدة للتنبؤ بالطاقة المطلوبة لعمل السفينة في الظروف البحرية واستهلاك الوقود وانبعاثات الغازات الدفيئة.
- التأثير الأكبر للخشونة ناتج عن تلوث الجزء الأوسط المتوازي من البدن، وبالتالي الحفاظ على هذا الجزء نظيفاً قدر الإمكان من شأنه تقليل المقاومة وزيادة السرعة، أو على الأقل الحفاظ على نفس السرعة مع استهلاك كمية وقود أقل وبالتالي توفير مادي كبير.
- زيادة مقاومة الاحتكاك بفعل الخشونة أسرع وأكبر بكثير كنسبة مئوية من زيادة مقاومة الضغط.

التوصيات:

- بناء على نتائج هذه الدراسة نوصي بأن يكون استخدام الطلاءات المانعة للحشوف أمر إلزامي لما له من آثار إيجابية تنعكس على المقاومة.

- محاولة تنظيف الجزء الأوسط من البدن بشكل دوري في هذا النوع من الناقلات، وعدم تأجيل عملية التنظيف حتى دخول السفينة إلى الأحواض عند الكشف الدورية.
- التوصيات للأعمال المستقبلية**
- دراسة تأثير الخشونة بشكل مباشر على الرفاص.
- دراسة التأثير المتبادل بين الرفاص والسفينة بوجود قيم مختلفة للخشونة.
- دراسة تأثير الخشونة على سفن ذات سرعة أكبر.
- إعداد قاعدة بيانات شاملة لمجموعة كبيرة من السفن عند قيم مختلفة للخشونة الأمر الذي يسهل اختيار نوع الطلاء المانع للحشف المناسب.
- أن يقوم الباحثون بإنشاء قاعدة بيانات شاملة لتوابع الخشونة لمختلف أنواع الدهانات المانعة للحشف، وذلك من أجل التنبؤ بتأثير الخشونة الذي تحدثه تلك الدهانات على مقاومة السفينة على اعتبار أن لها خشونة أولية صغيرة غالباً تأثيرها يتركز على مقاومة الاحتكاك.

References

- [1] ITTC, "Specialist Committee on Surface Treatment," in *26th International Towing Tank Conference-Volum II*, 2011, [Online]. Available: <https://www.ittc.info/downloads/proceedings/26th-conference-rio-de-janeiro-2011/volume-2/>.
- [2] Y. Demirel, "Modelling the roughness effects of marine coatings and biofouling on ship frictional resistance," 2015.
- [3] ITTC, "Report of the Power Performance Committee," in *19th International Towing Tank Conference*, 1990, [Online]. Available: <http://itc.info/media/2304/report-of-the-power-performance-committee.pdf>.
- [4] ITTC, "Testing and Extrapolation Methods, Propulsion, Performance, Predicting Powering Margins," in *ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, Procedure 7.5-02-03-01.5, Reversion 01*, 2008, [Online]. Available: <http://itc.info/media/1237/75-02-03-015.pdf>.
- [5] S. Lecheler, *Numerische Strömungsberechnung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.
- [6] O. Turan, Y. K. Demirel, S. Day, and T. Tezdogan, "Experimental Determination of Added Hydrodynamic Resistance Caused by Marine Biofouling on Ships," in *Transportation Research Procedia*, 2016, doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.130.
- [7] T. von Karman, "Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz," *Nachr Ges. Wiss. Göttingen*, pp. 58–76, 1930.
- [8] C. Yang, H. D. Lu, and R. Löhner, "On the simulation of highly nonlinear wave-breakwater interactions," in *Journal of Hydrodynamics*, 2010, vol. 22, no. 5 SUPPL. 1, pp. 975–981, doi: 10.1016/S1001-6058(10)60055-8.
- [9] Y. M. Ahmed, "Numerical simulation for the free surface flow around a complex ship hull form at different Froude numbers," *Alexandria Eng. J.*, vol. 50, no. 3, pp. 229–235, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.aej.2011.01.017.
- [10] D. A. Johnson and L. S. King, "A mathematically simple turbulence closure model for attached and separated turbulent boundary layers," *AIAA J.*, vol. 23, no. 11, pp. 1684–1692, Nov. 1985, doi: 10.2514/3.9152.
- [11] M. P. Schultz, "Frictional resistance of antifouling coating systems," *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, 2004, doi: 10.1115/1.1845552.
- [12] O. Usta and E. Korkut, "A study for the effect of surface roughness on resistance

characteristics of flat plates,” in *RINA, Royal Institution of Naval Architects - International Conference on Marine Coatings*, 2013.

[13] Y. K. Demirel, O. Turan, and A. Incecik, “Predicting the effect of biofouling on ship resistance using CFD,” *Appl. Ocean Res.*, 2017, doi: 10.1016/j.apor.2016.12.003.

[14] S. Song, Y. K. Demirel, and M. Atlar, “An investigation into the effect of biofouling on the ship hydrodynamic characteristics using CFD,” *Ocean Eng.*, 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.01.056.

[15] D. Uzun, Y. K. Demirel, A. Coraddu, and O. Turan, “Time-dependent biofouling growth model for predicting the effects of biofouling on ship resistance and powering,” *Ocean Eng.*, 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106432.

[16] I. A. Yeginbayeva, L. Granhag, and V. Chernoray, “A multi-aspect study of commercial coatings under the effect of surface roughness and fouling,” *Prog. Org. Coatings*, 2019, doi: 10.1016/j.porgcoat.2019.05.041.

[17] J. Seok and J. C. Park, “Numerical simulation of resistance performance according to surface roughness in container ships,” *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, 2020, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2019.05.003.

[18] S. Song, Y. K. Demirel, and M. Atlar, “Penalty of hull and propeller fouling on ship self-propulsion performance,” *Appl. Ocean Res.*, vol. 94, p. 102006, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.apor.2019.102006.

[19] A. Cura Hochbaum, “Ein Finite-Volumen Verfahren zur Berechnung turbulenter Schiffsumströmungen,” 1993. Accessed: 03-Apr-2020. [Online]. Available: <http://www.tuhh.de/vss>.

[20] J. Ferziger and M. Peric, *Numerische Strömungsmechanik*. 2008.

[21] H. Schlichting and K. Gersten, *Boundary-Layer Theory*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000.

[22] “MOERI KVLCC2 Geometry and Conditions, SIMMAN 2008, FORCE Technology.” http://www.simman2008.dk/KVLCC/KVLCC2/kvlcc2_geometry.html (accessed Jun. 26, 2021).

[23] J. Seok and J. Park, “Numerical simulation of resistance performance according to surface roughness in container ships,” *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, no. June, pp. 1–9, 2019, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2019.05.003.

[24] 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.

[25] U. Analysis, “ITTC – Recommended Procedures ITTC – Recommended Procedures,” 2002.