

## دراسة تأثير المقدمة البصلية على مقاومة السفينة الناقلة KVLCC2 باستخدام تقنية CFD

د. نوار عباس\*

بشار عديرة\*\*

(تاريخ الإيداع 4 / 7 / 2021. قُبِلَ للنشر في 10 / 8 / 2021)

### □ ملخص □

التصميم الهيدروديناميكي الأمثل للمقدمة البصلية ما يزال أحد التحديات الكبيرة، والسبب المباشر في ذلك هو التكاليف المرتفعة لاختبارات النماذج في أحواض الاختبار، واستخدام براءات الاختراع الخاصة بهذا المجال. ويعتبر تصميم المقدمة البصلية ضرورة ملحة خلال المرحلة الأولية من التصميم وذلك لأنه يتيح إمكانية التنبؤ بالسرعة والقدرة. في هذا البحث تم تحليل ودراسة التدفق حول بدن نموذج السفينة الناقلة KVLCC2، وذلك باستخدام تقنية ديناميك الموائع الحسابية أو ما يسمى (Computational Fluid Dynamic) CFD، حيث تم التركيز على التغير الحاصل على مقاومة السفينة بعد إضافة المقدمة البصلية إليها. تمت الدراسة باستخدام برنامج الـ ANSYS، تم استخدام طريقة الحجوم المنتهية (Volume of Fluid) VOF وطريقة رينولدز RANS والموديل  $k - \omega$  SST لحل معادلات نافيه ستوكس الناعمة للتدفق.

تمّ حساب كل من حقل السرعة والطاقة الحركية في مستوي الرفاص عند حركة السفينة إلى الأمام مباشرة وتمّ مقارنتها مع النتائج التجريبية. بينت المقارنة مقدار التطابق الكبير بين النتائج. تم حساب المقاومة الكلية لثلاثة نماذج مختلفة من السفينة الناقلة KVLCC2 مع وبدون مقدمة بصلية. تم مناقشة الفرق الحاصل بين النماذج الثلاثة وتحديد أهمية المقدمة البصلية للسفينة.

**الكلمات المفتاحية:** المقدمة البصلية، السفينة الناقلة KVLCC2، CFD- ميكانيك الموائع الحسابية،  $k - \omega$  SST، برنامج الـ ANSYS، معادلات رينولدز نافيه ستوكس الوسطية.

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

## CFD Study of the Bulbous Bow Effect on the Resistance of the Tanker-KVLCC2

Dr. Nawar Abbas\*  
Bashar Oderah\*\*

(Received 4 / 7 / 2021. Accepted 10 / 8 / 2021)

### □ ABSTRACT □

In this paper, the flow around the Tanker KVLCC2 body has been analyzed and studied using the Computational Fluid Dynamic (CFD) technology. The study focuses on the changes in the Tanker resistance performance by adding the bulbous bow. The RANS method, Volume of Fluid (VOF), and turbulence  $k - \omega$  SST model were used to solve Navier Stocks Equations.

The resistance of the tanker with bulbous bow was calculated, as well as the fields of velocity, and turbulent kinetic energy. The obtained results were compared with the experimental results. The comparison demonstrated a good agreement between the CFD and EFD results, which confirms the quality of CFD technology.

The total resistance of three different tanker models of KVLCC2 (with and without bulbous bow) was calculated and compared with each other, to show the effect of bulbous bow on the resistance of the ship.

**Keywords:** Bulbous bow, KVLCC2, CFD,  $k - \omega$  SST, ANSYS, RANS.

---

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

\*\* Master Student, Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.

**مقدمة:**

يعتبر نموذج السفينة الناقلة KVLCC2 من أكثر النماذج استخداماً في الحسابات الرقمية للسفن، وذلك بسبب توفر الكثير من النتائج التجريبية لهذا النموذج، وهذا أحد أهم أسباب اختيارنا لهذا النوع من النماذج. وعند البحث في الدراسات السابقة نجد أن الكثير من الباحثين يختارون هذا النموذج ولذلك لنفس السبب السابق، وهو توفر الكثير من النتائج التجريبية لهذا النموذج. إن الدراسة التي أجراها الباحث Lee وآخرون في عام 2003 [1] والدراسة التي أجراها الباحث Kume وآخرون عام 2006 [2] تعتبران من أهم الدراسات التي تم فيها تعميم النتائج التجريبية على هذا النوع من السفن. النتائج في هاتين الدراستين سيتم اعتمادهما من أجل التأكد من دقة النتائج التي سيتم الحصول عليها. توصف المقدمة البصلية بأنها امتداد بدن السفينة تحت خط الماء، وقد يمتد جزء منها فوق خط الماء. من الممكن أن تأخذ أشكال وحجوم مختلفة والهدف الأساسي منها هو إنشاء منطقة ضغط منخفض للتقليل أو إلغاء تأثير مقاومة أمواج المقدمة، وكذلك لتقليل قوة الجر اللازمة للسفينة فضلاً عن تأثيرها الإيجابي في تخميد تأرجحات السفينة، والإبحار في الحالات الحرجة، والحالات الخاصة، كما أن السفن التي تبحر في مناطق الجليد بحاجة لتصميم مقدمة يعطي السفينة القدرة على تحطيم الجليد أمامها خلال سيرها، والتي يطلق عليها اسم كاسحات الجليد. تعمل المقدمة البصلية في ظروف مختلفة، والتصميم الأفضل هو الذي يعطي المردود الأفضل للسفينة مع الأخذ بعين الاعتبار مختلف الظروف المؤثرة. نلاحظ أنه في حالة السرعات المنخفضة فإن المقدمة البصلية سوف تحتجز الماء فوق المقدمة بدون تشكيل منطقة ضغط منخفض لإلغاء تأثير أمواج المقدمة، وهذا بالتأكيد سوف يتطلب زيادة في قوة الجر، والذي سوف يتسبب في انخفاض المردود، وهذا ما أكدته مقترحات الدراسة [3] التي أجراها Podder وآخرون بأن المقدمة البصلية تكون ذات جدوى ضمن السرعات المحدود  $0.283 \leq F_n \leq 0.563$ ، وبشكل عام يمكن القول أن تأثير المقدمة البصلية في حالة السرعات المنخفضة سلبي، ومع زيادة رقم فرود يصبح تأثيرها إيجابي ويزيد إلى القيمة العظمى. هناك العديد من الدراسات التي تناولت تحليل أشكال مختلفة للمقدمة البصلية ولتصاميم متنوعة من السفن.

في عام 1965 قام Sato وزملاؤه في دراستهم [4] باختبار تأثير المقدمة البصلية على المقاومات للسفن الناقلة الكبيرة. تم اختبار السفينة في حالتها التحميل الكامل والإبحار بدون أية حمولة (على الصابورة). في الحالة الأولى (حالة التحميل الكامل) تم دراسة سفينة ذات سرعة منخفضة، حيث مقاومة اللزوجة أكبر من مقاومة الأمواج، وفي هذه الحالة وجد بأن القيمة المنخفضة للنسبة  $L / B$  أدت إلى زيادة ملحوظة في قيمة المقاومة المتبقية. أثبتت الدراسة في أجزاء متقدمة منها أن زيادة مقاومة اللزوجة يأتي من التدفق المضطرب الذي يتشكل على جوانب المقدمة، ويمكن تحسين النتائج من خلال تعديل انسيابية نموذج المقدمة. أما في الحالة الثانية وهي حالة إبحار السفينة بدون حمولة (على الصابورة)، وبالتالي فإن سرعة السفينة ستزداد وعليه فإن مقاومة الأمواج ستكون ذات قيمة كبيرة نسبياً، ولهذا السبب فقد حددت الدراسة بأن التقليل من تأثير مقاومة الأمواج هو الضرورة الأولى في حالة الإبحار دون حمولة. كما توصلت الدراسة إلى أن التدفق حول المقدمة في هذه الحالة يتأثر بشكل كبير بقيمة غاطس المقدمة والدرفلة، ونتيجة لذلك تصبح قيم المقاومة غير مستقرة.

كما اقترح Hoyle وآخرون [5] في عام 1986 منهجية لتصميم المقدمة البصلية للسفن ذات السرعات العالية، مع الأخذ بعين الاعتبار التصميم الأمثل لبدن السفينة، وتم الاعتماد في الدراسة على مخططات العالم كراخت المطورة من أجل تصميم البدن المثالي مع وجود مقدمة بصلية، حيث تم تطوير مجموعة من الأشكال البصلية لمقدمة النموذج FFG-7، ومن ثم اختبار هذه الأشكال من خلال الطرق التجريبية والطرق الرقمية لفهم خصائص المقاومات

وخصائص السفينة في حالات الإبحار المختلفة. أظهرت الدراسة أن إضافة المقدمة البصلية إلى النموذج FFG-7 أدى إلى انخفاض طفيف في خصائص (أداء السفينة) عند بعض السرعات، ولكن هذا الانخفاض في الأداء ليس له تأثير كبير عند مقارنته بالقيمة الكبيرة للتخفيض في المقاومات الذي تم تحقيقه عند إبحار السفينة في ظروف عملها الطبيعي. قام الباحث Kyriazis في دراسته [5] عام 1988 باعتماد النموذج TGC-770، حيث تم تصميم مجموعة من الأبدان المختلفة انطلاقاً من النموذج الأصلي TGC-770، مع مقدمات بصلية مختلفة وتم تحليل هذه الاختلافات هيدروديناميكياً باستخدام الكود SWAN، وذلك بهدف إظهار تأثير التغييرات في بارامترات المقدمة على المقاومة في المياه الهادئة، وأداء السفينة في الحالات الحرجة. إن معاملات مقاومة الأمواج التي تم حسابها باستخدام SWAN، تم دمجها مع نتائج اختبارات النموذج الخاصة بتخمين المقاومة الكلية للنموذج في المياه الهادئة من أجل البدن ككل. تم إنتاج ثلاث عشرة تصميم مختلف للمقدمة البصلية انطلاقاً من النموذج الأساسي من خلال الزيادة في قيم البارامترات الأساسية للمقدمة البصلية، وقد وجد أن النماذج جميعها كانت ذات مقاومة أقل من مقاومة النموذج الأصلي للسفينة في المياه الهادئة، وبالتالي فإن الزيادة في أبعاد المقدمة يؤدي إلى تخفيض قيمة المقاومة الإجمالي، وقد تم اختيار التصميم السبعة الأفضل ودراسة أدائها في حالات إبحار مختلفة، ووجد بأن المقدمة البصلية تقلل وبشكل كبير وواضح من المقاومة الكلية للسفينة.

قام Islam وآخرون [6] وآخرون عام 2005 بدراسة تأثير شكل المقدمة البصلية على سلوك الأمواج لنموذج سفينة إنقاذ وبحث. اشتملت الدراسة على تصميم العديد من المقدمات البصلية لسفينة الإنقاذ المدروسة باستخدام برامج ال CAD، وتم دراسة خصائص الحركة للسفينة بعد إضافة نموذج المقدمة البصلية إليها. لوحظ من خلال هذه الدراسة أن إضافة المقدمة البصلية لشكل بدن السفينة أثرت على حركة السفينة بشكل ملموس.

قام كل من Lee والباحثون المشاركون في الدراسة [7] عام 2019 باستخدام تقنية ال CFD للكشف عن الطرق والأساليب التي يمكن من خلالها تقليل المقاومات في المياه الهادئة وفي حالة الأمواج من خلال تغيير شكل المقدمة، وقد شملت الدراسة على العديد من الأشكال للمقدمة البصلية من الشكل الحاد إلى الشكل عديم الحواف (الانسيابي) للنموذج نفسه وهو ناقلة بضائع صب بوزن ميت قدره 66000 طن. تم في هذه الدراسة استخدام معادلة نافيه ستوكس الوسيطة URANS ونموذج الاضطراب  $k - \epsilon$  لحل معادلات نافيه - ستوكس، كما تم الاعتماد على طريقة VOF (Volume of fluid) لضبط السطح الحر، ومن الجدير بالملاحظة هو تطابق النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها من خلال اختبارات النماذج في حوض التجريب. لوحظ خلال الدراسة بأن البدن مع المقدمة الحادة تتخفف فيه مقاومة الضغط بنسبة 8.9% في المياه الهادئة وبنسبة 6.4-12% عند وجود أمواج سطحية منتظمة، ولم يلاحظ اختلاف في قيمة مركبة مقاومة الاحتكاك بين الشكلين الحاد والانسيابي.

إن زيادة فعالية الدفع والأمان والقدرة التشغيلية للسفينة، يعتبر من أهم العوامل في تصميم السفن اليوم وخصوصاً للسفن التي تعمل في مناطق ملاحية عاصفة مثل بحر الشمال وبحر البلطيق. يمكن تحليل أداء السفن والخرسانات في المياه بعدة طرق، ولكن الطريقة الأكثر أهمية في يومنا هذا هي CFD. إن التطور في القدرات الحاسوبية يتيح بشكل كبير إجراء عملية محاكاة لأداء السفينة في الحالات الحرجة. فمثلاً تم في البحث [8] الذي قام به الباحث Niklas and Pruszek عام 2019 وهو دراسة تأثير شكل مقدمة السفينة على سلوكها أثناء أبحارها في المياه الهادئة وفي الأمواج ومع سرعات مختلفة للسفينة. الدراسة تمت على القارب (IMO 9161247) MS Navigator XXI مع شكلين مختلفين للمقدمة البصلية. تم التأكد من دقة النتائج الرقمية التي تم الحصول عليها من خلال مقارنتها مع النتائج

التجريبية التي تم الحصول عليها في أحواض الاختبار، وقد أظهرت المقارنة توافق جيد بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية. لوحظ بأن التصميم المعدل للقارب قلل بشكل كبير من المقاومة الكلية للسفينة وذلك ضمن مجال السرعة (12-5) knots. من أجل السرعات بين (5-8) عقدة، فإن نسبة الانخفاض في المقاومة كانت حوالي 12 %، أما من أجل السرعات (11-12) عقدة، فإن نسبة الانخفاض في المقاومة الكلية هي حوالي 6%.

من أجل سرعات أعلى فإن النموذج المعدل يعاني من زيادة في المقاومة تصل إلى 44 % عند السرعة القصوى 15 عقدة. النتائج التي تم الحصول عليها من التحليل الرقمي تتطابق بشكل كبير مع اختبارات النماذج. الخطأ النسبي بين الطريقتين هو 1% في حالة السرعات العالية ويصل إلى 15 % من أجل حالات السرعات المنخفضة، ولم يتم التأكد في البحث من أن إجراء الحسابات بطرق مختلفة للتصاميم سيعطي نتائج متماثلة، ويعود ذلك لقلة النتائج المتوفرة عن اختبارات النماذج للتصميم الثاني، ولكن من المتوقع أن تكون النتائج في الحسابات متماثلة نسبياً.

### أهمية البحث وأهدافه:

إن الاعتماد على وسائل النقل البحرية في العمليات التجارية يزداد يوماً بعد يوم، الأمر الذي أدى بدوره إلى زيادة استهلاك الوقود، وعلى الرغم من وجود مصادر بديلة كطاقة الرياح والطاقة الشمسية إلا أن الوقود المعتمد على الكربون بقي أكثر أنواع الطاقة استخداماً في المجال البحري.

وبنتيجة ذلك أصبح تقليل استهلاك الوقود أمراً ضرورياً بالنسبة لشركات الشحن فقد حاولت هذه الشركات تحديد أساليب التشغيل والصيانة إما لخفض تكاليف التشغيل أو لزيادة أرباح الشركة إضافة إلى الحد من انبعاثات الغازات الدفيئة. إحدى أهم البارامترات التي تؤثر بشكل مباشر على السرعة ومتطلبات الطاقة واستهلاك الوقود هي مقاومة بدن السفينة، ولهذا السبب يعد تقليلها أحد المتطلبات الأساسية للمهندسين البحريين بغرض تقديم المنفعة والفائدة لمالكي السفن.

إن التصميم المثالي للمقدمة البصلية يندرج ضمن التصميم المثالي لأبدان السفن، حيث أن السفينة تستطيع أن تبحر بدون مقدمة بصلية، ولكن وجود هذه المقدمة يحقق فعالية إضافية للسفينة من خلال تخفيض استهلاكها من الوقود عند سرعات معينة.

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 التي تعرف بالشروط الحدية. يكون التحقق الأولي من جودة نتائج الـ CFD غالباً بمقارنة نتائجها مع النتائج التجريبية لحالات معروفة بالإضافة إلى اللجوء إلى التحقق من النتائج العددية باستخدام النظريات الفيزيائية المناسبة للحالة المدروسة.

وبناء على ما ذكر سابقاً، فإن دراسة التدفق حول بدن السفينة وحساب القوى المؤثرة عليها بوجود وبدون وجود المقدمة البصلية يساعد وبشكل كبير في عملية التحسين من تصميم بدن السفينة بالشكل الذي يساعد في التقليل من استهلاك الوقود، وعلى اعتبار أن الدراسات التجريبية مكلفة وتحتاج إلى الكثير من الوقت والجهد، فإن تقنية الـ CFD هي الخيار الأفضل من ناحية الوقت والجهد والتكلفة، حيث تم استخدام ANSYS لحساب كل من حقل الطاقة الحركية

عند قرص الرفاص وحقل السرعة عند قرص الرفاص وحقل الأمواج للنماذج الثلاثة، وكذلك تمّ حساب قيمة المقاومة الكلية للسفينة عند سرعات مختلفة.

### طرائق البحث ومواده:

الدراسة في هذا البحث تعتمد على حل المعادلات الناظمة للتدفق من خلال استخدام تقنية الـ CFD والذي يوفرها الكثير من البرامج حالياً. تمّ في هذه الدراسة استخدام برنامج الـ ANSYS. إن هذا البرنامج 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). أنسيس ANSYS هي شركة أمريكية عامة مقرها في كانونسبرغ، بنسلفانيا. تقوم بتطوير وتسويق برامج المحاكاة الهندسية. يستخدم برنامج أنسيس لتصميم المنتجات وأشباه الموصلات، وكذلك لإنشاء المحاكاة التي تختبر متانة المنتج، وتوزيع درجة الحرارة، وحركات السوائل، والخصائص الكهرومغناطيسية.

### الشكل التفاضلي للمعادلات الناظمة للجريان

الشكل التفاضلي لمعادلة مصونية الكتلة في الإحداثيات الديكارتية:

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

الشكل التفاضلي لمعادلة مصونية كمية الحركة على المحور X:

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

الشكل التفاضلي لمعادلة مصونية كمية الحركة على المحور Y:

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

الشكل التفاضلي لمعادلة مصونية كمية الحركة على المحور Z:

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

حيث أن  $p$  هو الضغط،  $u, v, w$  هي مركبات السرعة على المحاور الإحداثية الديكارتية  $x, y, z$ ،  $\rho$  كثافة المائع،  $g_i$  مركبات تسارع الجاذبية الأرضية على المحاور الإحداثية الديكارتية،  $\tau_{ij}$  هو مصفوفة إجهادات رينولدز المضطربة (وهو عبارة عن مصفوفة ثلاثية الأبعاد  $3 \times 3$  ومتناظرة بالنسبة للقطر الرئيسي) ويمكن كتابته بالشكل التالي:

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

حيث أن  $u'_i$  هي قيمة تآرجحات السرعة على المحاور الاحداثية الديكارتيّة. 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:

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

$\delta_{ij}$  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

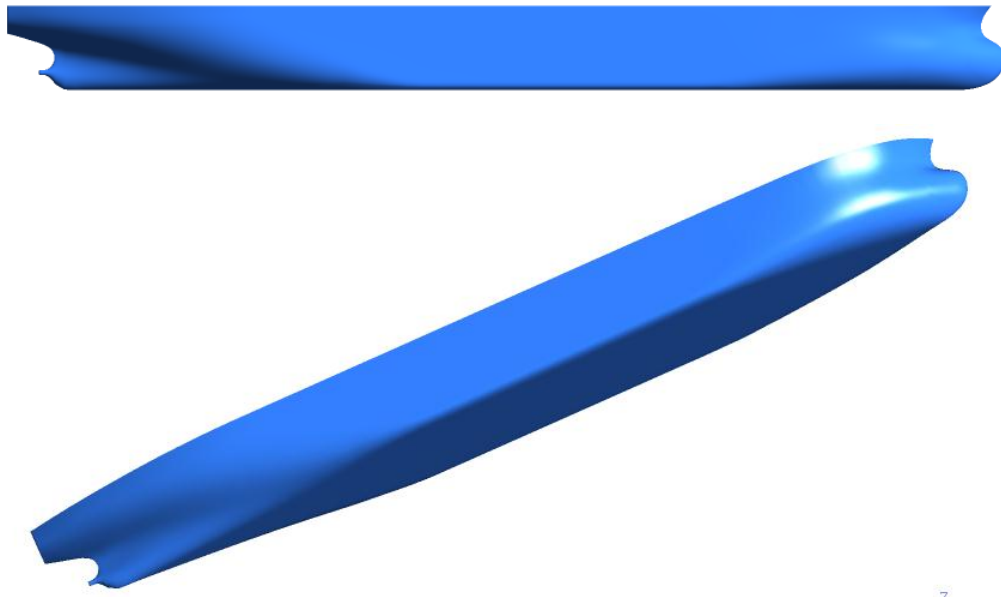
كما أسلفنا سابقاً، تم استخدام ثلاثة نماذج من السفينة الناقلة KVLCC2 في هذا العمل، النموذج الأول وهو KVLCC2\_M1 (مع مقدمة بصلية) وهو النموذج المستخدم حالياً في كثير من الأبحاث، انظر مثلاً [9]–[11]، والنموذج KVLCC2\_M2 والثالث KVLCC2\_M3 (بدون مقدمة بصلية)، فيما يلي تُعطي موجز عن الأبعاد الهندسية لكلا النموذجين.

الأبعاد الهندسية لنموذج السفينة الناقلة KVLCC2\_M1

الأبعاد الهندسية الأساسية الخاصة بالنموذج KVLCC2\_M1 بالمقارنة مع السفينة الأصلية موضحة في الجدول التالي، نسبة التصغير  $\lambda = 58$ :

الجدول 1: الأبعاد الأساسية للسفينة الناقلة KVLCC2\_M1 ونموذجها [12].

الوحدّة	النموذج KVLCC2_M1	السفينة KVLCC2_M1	البُعد الهندسي
M	5.5172	320.0	طول السفينة ( $L_{pp}$ )
M	1.0	58.0	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	Displacement



الشكل 1: نموذج السفينة الناقلة KVLCC2\_M1 (مع مقدمة بصلية).

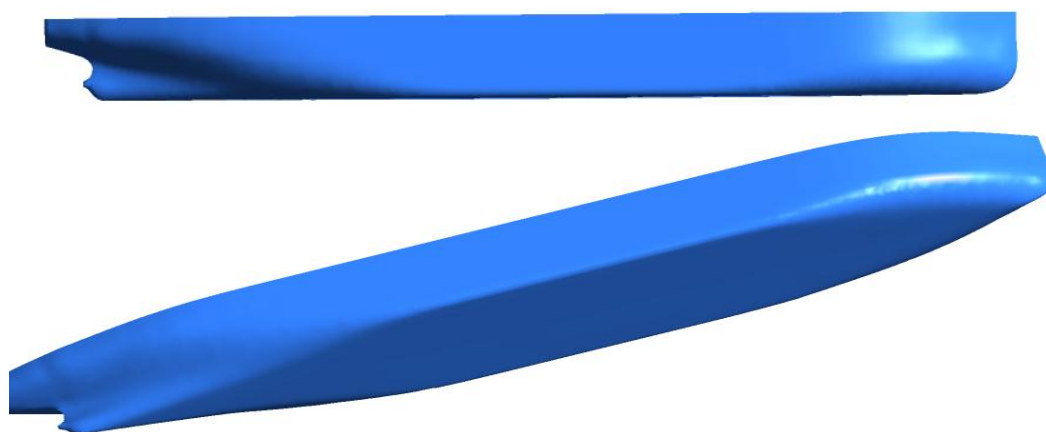
#### الأبعاد الهندسية لنموذج السفينة الناقلة KVLCC2\_M2

KVLCC2\_M2: هو نموذج السفينة الناقلة KVLCC2 بعد إزالة المقدمة البصلية من بدن السفينة حيث لا يمتاز هذا النموذج بوجود انتفاخ في مقدمة بدن السفينة، وقد تم بناءه من النموذج الأصلي KVLCC2\_M1 باستخدام البرنامج الهندسي MAXSURF. الأبعاد والبارامترات الأساسية للنموذج KVLCC2\_M2 موضحة وفقاً للجدول التالي:

الجدول 2: الأبعاد الأساسية للسفينة الناقلة KVLCC2\_M2 ونموذجها.

الوحد	النموذج KVLCC2_M2	السفينة KVLCC2_M2	البُعد الهندسي
m	5.655	328.0	طول السفينة ( $L_{pp}$ )
m	1.0	58.0	عرض السفينة (B)
m	0.3586	20.8	غاطس السفينة (T)
-	0.7911	0.7911	$C_B$
$m^2$	8.2603	27787.7	مساحة السطح المبلل S
$m^3$	1.6044	313049.4	Displacement





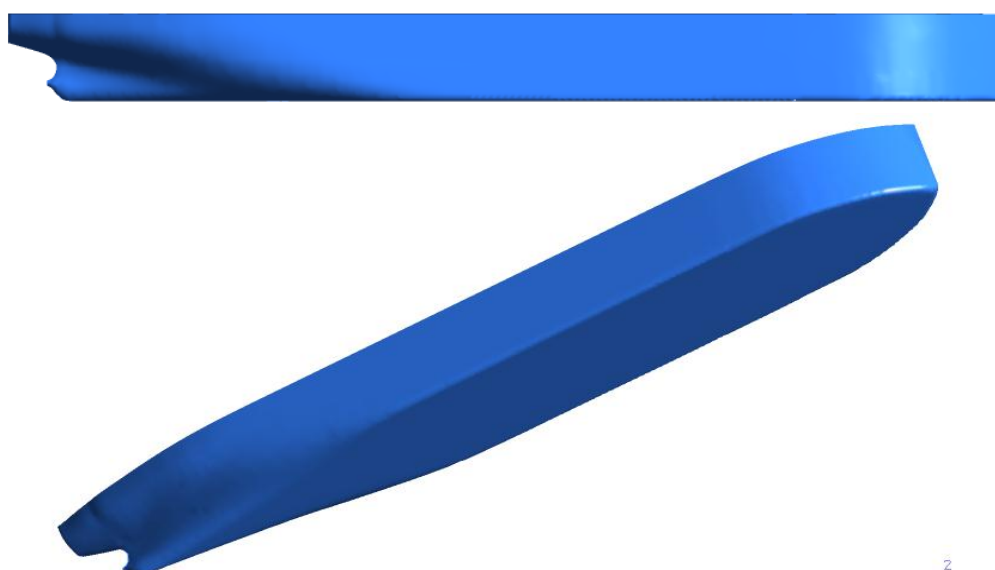
الشكل 2: نموذج السفينة الناقلة KVLCC2\_M2 (بدون مقدمة بصلية).

### الأبعاد الهندسية لنموذج السفينة الناقلة KVLCC2\_M3

KVLCC2\_M3: تم في هذا النموذج إزالة المقدمة البصلية، وتم بناء المقدمة بحيث يكون قاع السفينة وسطحها عند المقدمة متشابهين، انظر الشكل 3. الأبعاد والبارامترات الأساسية للنموذج KVLCC2\_M3 موضحة وفقاً للجدول التالي:

الجدول 3: الأبعاد الأساسية للسفينة الناقلة KVLCC2\_M3 ونموذجها.

الواحدة	النموذج KVLCC2_M3	السفينة KVLCC2_M3	البعد الهندسي
m	5.5172	320.0	طول السفينة ( $L_{pp}$ )
m	1.0	58.0	عرض السفينة (B)
m	0.3586	20.8	غطاس السفينة (T)
-	0.814	0.814	$C_B$
$m^2$	8.3669	28146.4	مساحة السطح المبلل S
$m^3$	1.6112	314373.1	Displacement

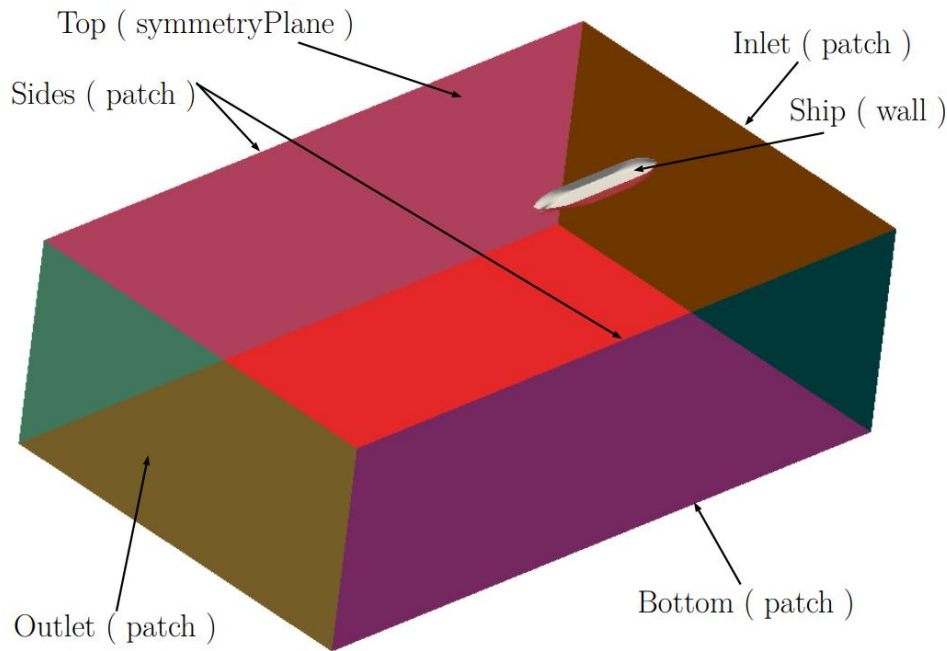


الشكل 3: نموذج السفينة الناقلة KVLCC2\_M3 (بدون مقدمة بصلية).

كما هو واضح من الجداول الثلاثة السابقة، فإن حجم الجزء الغاطس ومساحة السطح المبلل تزداد قليلا في النموذجين M2, M3 بالمقارنة مع النموذج M1. ولكن هذه الزيادة صغيرة جدا.

### بناء الشبكة الرقمية

الشكل 4 يوضح المجال الحسابي الذي تتوضع ضمنه السفينة والذي يمثل قناة الاختبار. كما هو واضح من هذا الشكل، لقد تم تثبيت السفينة وتحريك المائع بسرعة مساوية لسرعة السفينة والتي تحقق رقم رينولدز التي تعمل عنده السفينة. مدخل المائع هو السطح Inlet والمخرج هو السطح Outlet. إن دقة الحسابات الرقمية يعتمد على عدد الخلايا الحسابية ضمن المجال، فكلما زاد عدد الخلايا الحسابية كلما زادت دقة النتائج التي نحصل عليها. تعتبر الشبكات المنتظمة الأفضل من ناحية الذاكرة والتخزين والفعالية للحاسوب الذي تجري عليه العمليات، 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. 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.

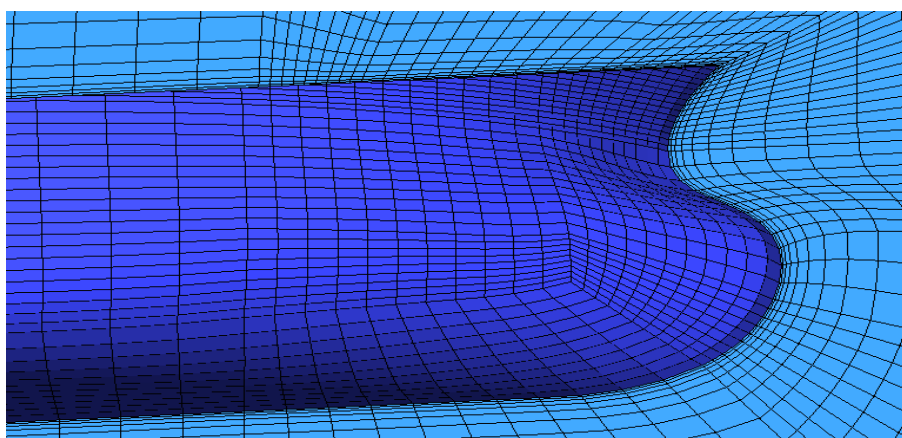
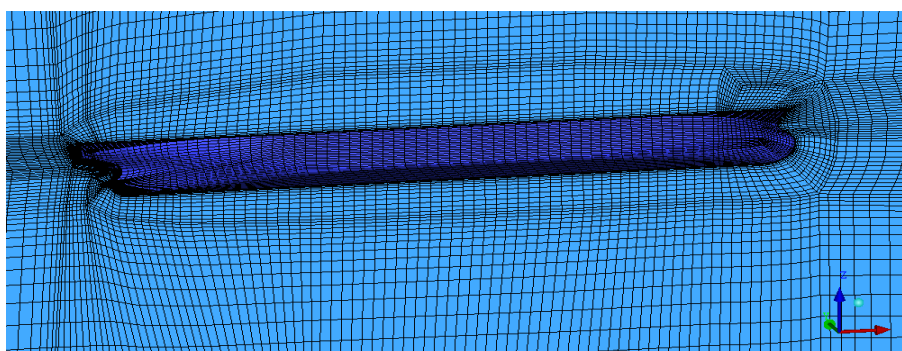
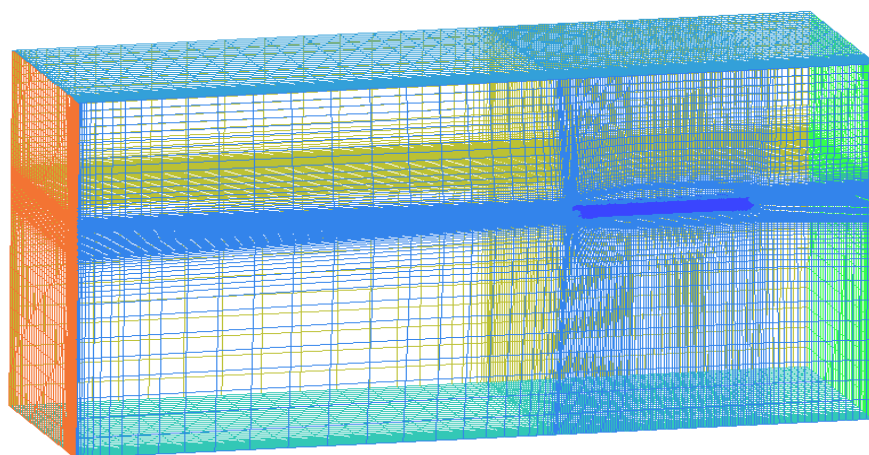


الشكل 4: المجال الحسابي التي تتوضع ضمنه السفينة.

في هذه الدراسة قمنا باستخدام الشبكة المنتظمة، تم بناؤها باستخدام برنامج الـ ICEM والذي هو أحد برامج الـ Ansys مع ملاحظة أن الحسابات على سفينة الـ KVLCC2 أجريت لها وحدها بدون وجود الملحقات مع مقياس 1/58 وكانت في مسار مستقيم بدون أي زاوية انحراف. الشكل 5 يوضح الشبكة الرقمية التي تم بناؤها حول بدن السفينة باستخدام برنامج الـ ICEM. أبعاد المجال الحسابي (والذي يمثل القناة التي تبحر فيها السفينة) هي على النحو التالي:

$$L \times B \times T = 4.615 L_{pp}(m) \times 2.885 L_{pp}(m) \times 3L_{pp}(m)$$

حيث  $L$  يمثل طول المجال الحسابي،  $B$  عرضه و  $T$  ارتفاع المجال الحسابي. كما هو واضح في الشكل 5، 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 (كمبيوترات مركزية، ذات إمكانيات حاسوبية ضخمة جداً) خاصة بالأبحاث العلمية في الجامعات السورية.



الشكل 5: الشبكة الرقمية التي تم بناؤها حول بدن السفينة الناقلة KVLCC2 والتنعيم في منطقة الطبقة الحدية.

### الموديل الرياضي SST k - ω

تم اقتراح هذا الموديل الرياضي من قبل الباحث Menter [7] وهو عبارة عن دمج الموديلين الرياضيين k - ω و k - ε. تم دمج ميزات الموديلين الرياضيين المذكورين في هذا الموديل، حيث أنه ومن خلال استخدام تابع دمج خاص يتم تطبيق الموديل k - ω في منطقة الطبقة الحدية القريبة من الجدار، ويتم تطبيق الموديل k - ε خارج الطبقة الحدية (في منطقة التدفق الحر)، والسبب في هذا أن الموديل الرياضي k - ω يعطي نتائج ممتازة (داخل الطبقة الحدية) في المنطقة القريبة من الجدار، وعلى العكس من هذا فإن الموديل الرياضي k - ε يعطي نتائج ممتازة خارج الطبقة الحدية. المعادلات الأساسية في هذا الموديل يمكن كتابتها بالشكل التالي، انظر:

معادلة ال 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 (وتسمى أيضا بتعدد الاضطراب  $\left(\frac{1}{S}\right)$ ):

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

معادلة لزوجة الدوامية  $\mu_t$ :

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

حيث أن:

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

$$F_2 = \tanh \left[ \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (13)$$

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

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

الثوابت الخاصة بهذا الموديل موضحة في الجدول (4).

الجدول 4: قيمة الثوابت المستخدمة في الموديل الرياضي SST k - ω

$\beta^*$	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\sigma_{k1}$	$\sigma_{k2}$	$\sigma_{\omega 1}$	$\alpha_2$	$\beta_2$	$\sigma_{\omega 2}$
$\frac{9}{100}$	$\frac{5}{9}$	$\frac{3}{40}$	0.85	1	0.5	0.44	0.0828	0.856

## النتائج والمناقشة:

في بداية الأمر وقبل الخوض في دراسة تأثير المقدمة البصلية على مقاومة السفينة، سيتم تقييم كفاءة الشبكة الرقمية والموديل الرياضي التي تم استخدامها.

### تقييم النتيجة الرقمية لمقاومة السفينة

تتوفر لدينا القيمة التجريبية لمقاومة النموذج الأصلي للسفينة الناقلة KVLCC2 عند رقم فرود 0.142، وعليه تمت مقارنة النتيجة الرقمية التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج ANSYS مع النتيجة التجريبية، والنتائج التي حصلنا عليها كانت على الشكل التالي:

الجدول 5: مقارنة القيمة الرقمية لمقاومة السفينة الكلية مع القيمة التجريبية.

السرعة (م/ثانية)	$C_T$ CFD	$C_T$ EFD	Error percentage
1.047	0.0042	0.00411	2.2%

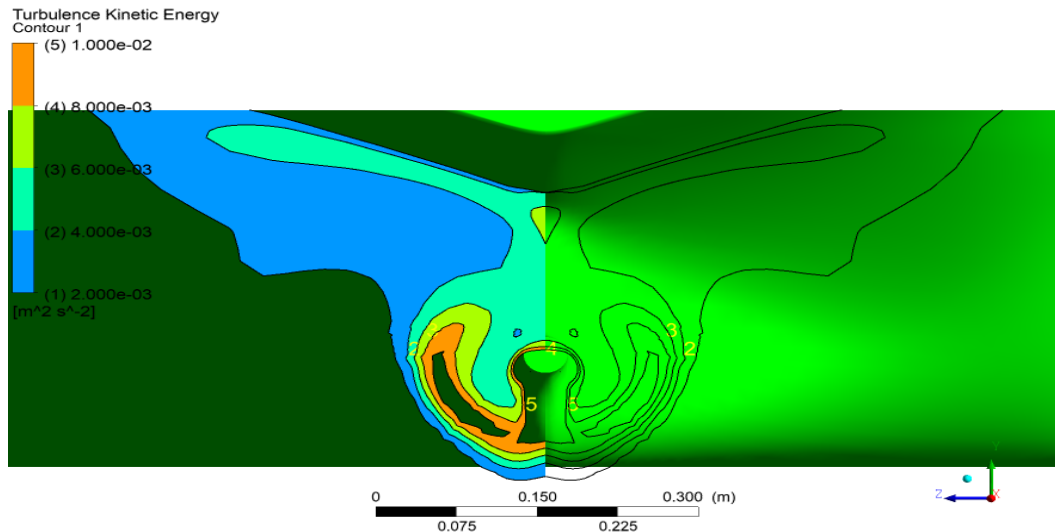
إنّ التوافق كبير ومُرضي بين النتائج التجريبية والنتائج التي حصلنا عليها بالدراسة الحاسوبية باستخدام تقنية CFD. نسبة الخطأ لم تتجاوز 2.5% وهذا يدل على دقة النتائج التي حصلنا عليها باستخدام الحاسب.  $C_{T,CFD}$  يتم الحصول عليها مباشرة من الحسابات الرقمية، وقيمة الخطأ بالمقارنة مع التجربة يتم حسابها كالتالي:

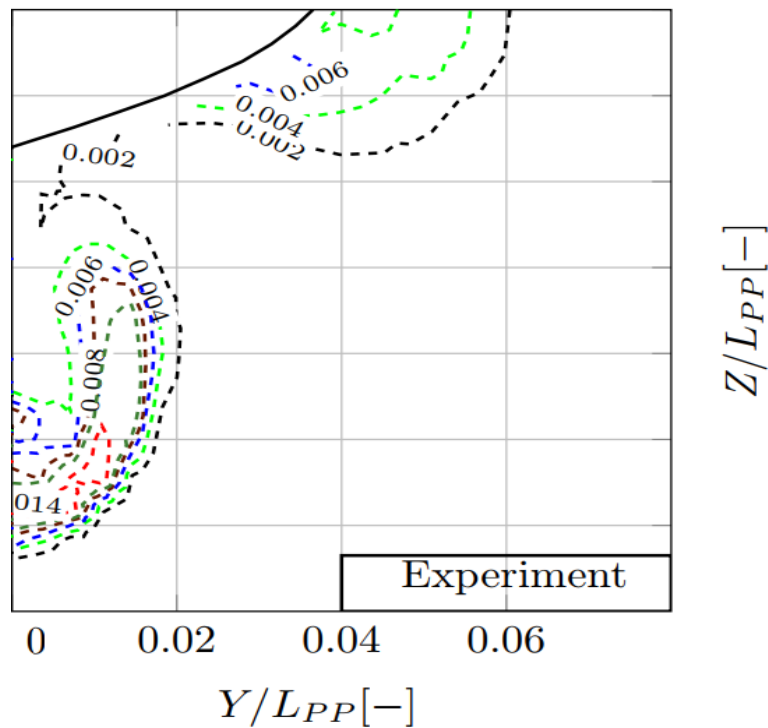
$$Error_{percentage} = \frac{C_{T,CFD} - C_{T,EFD}}{C_{T,EFD}} \cdot 100 \% = \frac{0.0042 - 0.00411}{0.00411} \cdot 100 \% \quad (14)$$

$$Error_{percentage} = 2.2\%$$

### تقييم حقل الطاقة الحركية في مستوى الرفاص

الشكل 6 في في الصفحة التالية يوضح النتيجة الرقمية لحقل الطاقة الحركية لحالتنا المدروسة، وفي الأسفل النتيجة التجريبية لسفينة الـ KVLCC2 [1]، بالمقارنة بين النتيجتين، نلاحظ مقدار التشابه في حقل الطاقة الحركية في منطقة عمل الرفاص لكل من السفينتين. حيث يتضح وبشكل واضح كيف أنه في مركز الدوامة الطولية يوجد ارتفاع واضح في قيمة الطاقة الحركية.



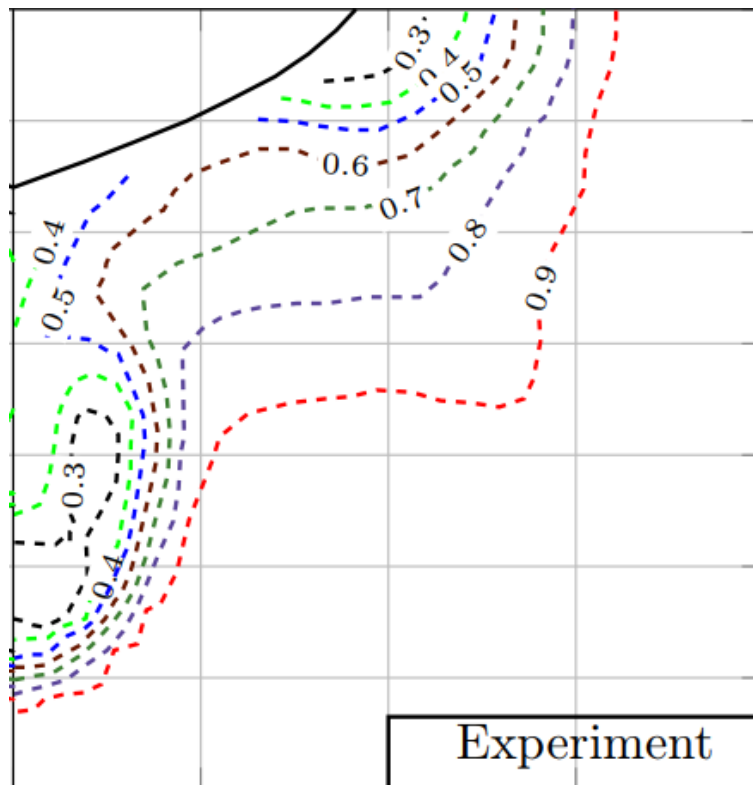
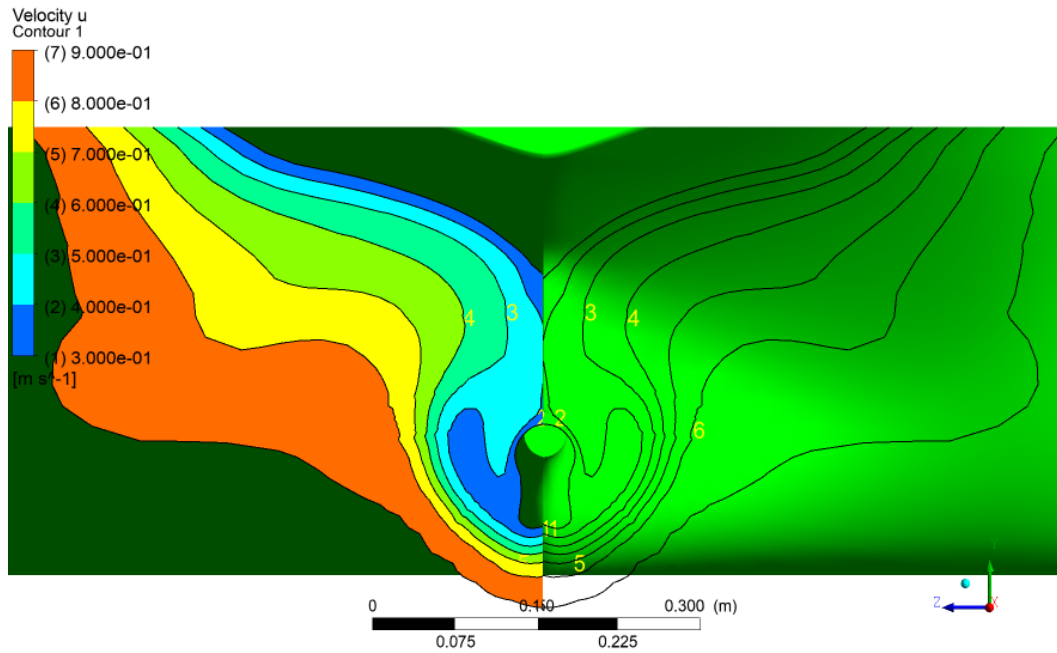


الشكل 6: حقل الطاقة الحركية في مستوى الرفاص، النتيجة الرقمية في الأعلى والنتيجة التجريبية في الأسفل.

كما هو واضح فإن قيم الطاقة الحركية في النتيجة التجريبية تتراوح ضمن المجال 0.006-0.014، ولكن في النتيجة الرقمية، فإن القيمة 0.014 غير محققة، هناك سببان لهذا الأمر: السبب الأول أن عدد الخلايا الذي تم استخدامه يعتبر غير كافي لمثل هذه الحالات، والسبب الثاني هو أنه في حالتنا استخدمنا طريقة الـ RANS لحل معادلات نافيه ستوكس وهي طريقة حل مستقرة، والتي تعتبر غير قادرة على حل الاضطرابات التي تتشكل خلف بدن السفينة وهذا يلعب الدور الأساسي في عدم قدرتنا على ضبط القيم الصحيحة في مركز تشكل الدوامة الطولية. بالطبع يوجد طرق أخرى غير طريقة الـ RANS قادرة على حل الاضطرابات بشكل صحيح ودقيق (مثل طرق الـ Hybrid, LES) إلا أن هذه الطرق تحتاج إلى أعداد خلايا كبيرة جداً وإلى كمبيوترات مركزية من أجل إتمام عمليات الحل، وعليه لا يمكن استخدام هذه الطرق في الوقت الحالي في جامعاتنا.

#### تقييم حقل السرعة في مستوى الرفاص

كما هو واضح من الشكل 7 في الأسفل نلاحظ مقدار التطابق الكبير الذي تحققه طريقة الـ RANS والموديل المستخدم ( $k - \omega$  SST) مع النتائج التجريبية، وهذا يؤكد مدى جودة هذا الموديل في التطبيقات البحرية. وأيضاً في هذا الشكل يتضح لنا مكان تشكل الدوامة الطولية، حيث يوجد دوامتين طوليتين على جانبي محور الرفاص، هاتين الدوامتين تدخلان إلى قرص الرفاص، وهذا الأمر سيؤدي حتماً إلى عمل الرفاص في ظروف تدفق غير متجانسة، والتي تؤدي إلى تغيير كبير في الدفع المطبق على شفرة الرفاص، وبالتالي إلى تغيير الحمل المطبق على الرفاص، وبالتالي اهتزازات في جسم الرفاص. من هنا تأتي أهمية دراسة بدن السفينة قبل البدء بتصميم الرفاص، وذلك لكي يكون لدينا فكرة واضحة عن الظروف التي سيعمل بها الرفاص، وهذا يساعد بشكل كبير في اختيار الرفاص والمحرك المناسب.



الشكل 7: حقل السرعة في مستوي الرفاص، النتيجة الرقمية في الأعلى والنتيجة التجريبية في الأسفل.

### دراسة تأثير إضافة المقدمة البصلية على مقاومة السفينة الناقلة KVLCC2

تمّ وباستخدام ANSYS – FLUENT حساب قيمة المقاومة الكلية المؤثرة على السفينة عند قيم مختلفة لرقم فرود تتراوح ضمن المجال (0.034-0.272) لكل من النماذج الثلاثة السابقة.

الجدول 6 يبين قيم المقاومة الكلية التي تم الحصول عليها من الحسابات الرقمية لكل من النموذجين M1, M2 عند قيم مختلفة لأرقام فرود. تم اعتماد قيمة المقاومة الكلية للنموذج M1 (مع مقدمة بصلية كقيمة مرجعية في حساب الفرق بين القيمتين)، وعليه تم حساب الفرق بين القيمتين عند كل رقم فرود كالتالي:

$$\Delta F = \frac{F_{T,M1} - F_{T,M2}}{F_{T,M1}} \times 100\% \quad (15)$$

الجدول 6: قيمة المقاومة الكلية المؤثرة على النموذجين M1, M2 باستخدام برنامج الـ Ansys.

Velocity (m/s)	Froude Number	المقاومة الكلية $F_T$		الفرق بين القيمتين %
		KVLCC2_M1	KVLCC2_M2	
0.25	0.034	1.905	1.62	14.96
0.5	0.068	5.105	6.186	-21.17
0.75	0.102	17.097	14.282	16.46
1.0	0.136	18.493	24.665	-33.37
1.25	0.17	26.324	35.178	-33.63
1.5	0.2	43.27	46.575	-7.63
2.0	0.272	140.325	155.406	-10.747

كما هو واضح من الجدول السابق، فإن إضافة المقدمة البصلية أدى إلى زيادة المقاومة بمقدار 14.96% وبمقدار 16.46% عن أرقام فرود 0.034 و 0.102 على التوالي، وعند أرقام فرويد الأخرى نلاحظ أن المقاومة انخفضت بشكل ملحوظ ضمن المجال (7-34) % من قيمة المقاومة للنموذج بدون مقدمة بصلية.

الجدول 7: قيمة المقاومة الكلية المؤثرة على النموذجين M1, M3 باستخدام برنامج الـ Ansys.

Velocity (m/s)	Froude Number	$F_T$		الفرق بين القيمتين %
		KVLCC2_M1	KVLCC2_M3	
0.25	0.034	1.905	1.81	4.98
0.5	0.068	5.105	8.44	-65.32
0.75	0.102	17.097	19.185	-12.21
1.0	0.136	18.493	34.952	-89.00
1.25	0.17	26.324	51.397	-95.24
1.5	0.2	43.27	77.61	-79.36
2.0	0.272	140.325	222.78	-58.76



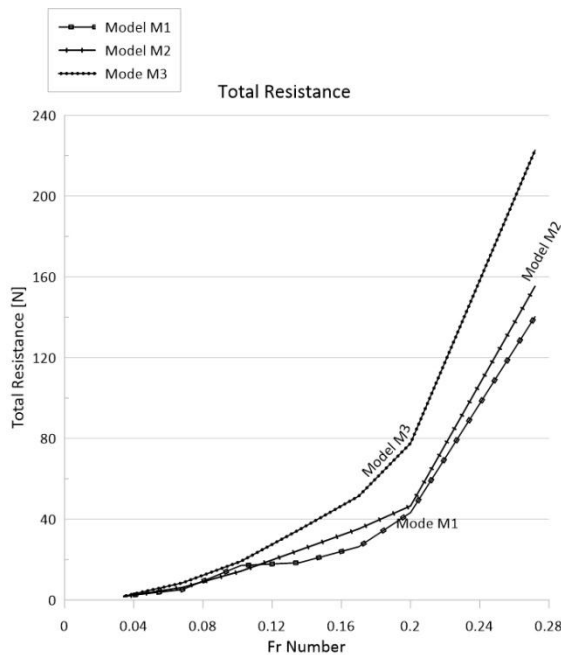
الجدول 7 يبين قيم المقاومة الكلية التي تم الحصول عليها من الحسابات الرقمية لكل من النموذجين M1, M3 عند قيم مختلفة لأرقام فرود. وهنا أيضا تم اعتماد قيمة المقاومة الكلية للنموذج M1 (مع مقدمة بصلية كقيمة مرجعية في حساب الفرق بين القيمتين)، وعليه تم حساب الفرق بين القيمتين عند كل رقم فرود كالتالي:

$$\Delta F = \frac{F_{T,M1} - F_{T,M3}}{F_{T,M1}} \times 100\% \quad (16)$$

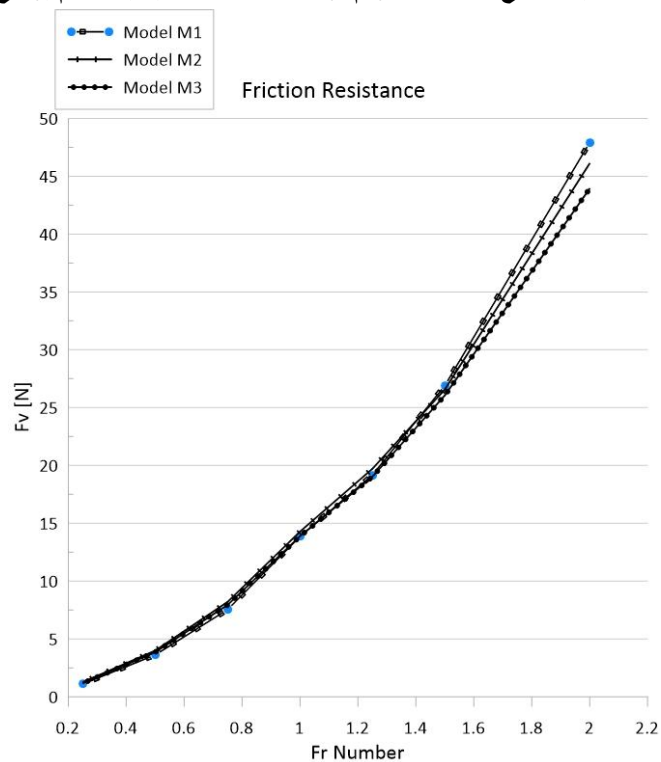
من

الجدول 7 يتضح لدينا أن إضافة المقدمة البصلية أدى إلى زيادة المقاومة بمقدار 4.98% عند السرعة المنخفضة جدا (0.25 m/s). عند أرقام فرود الأخرى نلاحظ أن المقاومة مع إضافة المقدمة البصلية انخفضت بشكل ملحوظ ضمن المجال (12-90) % من قيمة المقاومة للنموذج بدون مقدمة بصلية.

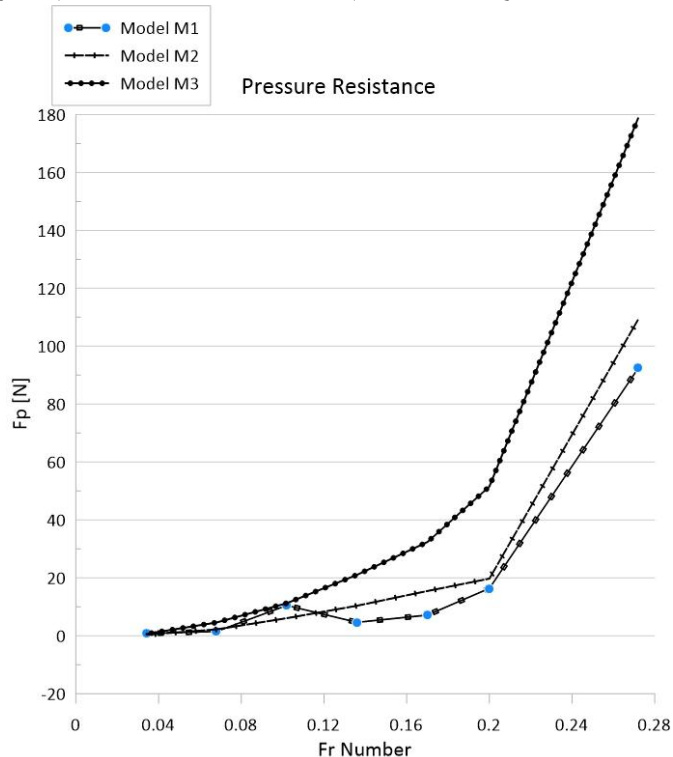
إن المكونين الأساسيين للمقاومة الكلية للسفينة، هما مقاومة الضغط ومقاومة الاحتكاك. مقاومة الأمواج هي جزء من مقاومة الضغط. الأشكال الثلاثة التالية (الشكل 8 إلى الشكل 10) تبين مقارنة باستخدام المخططات بين المقاومة الكلية، مقاومة الاحتكاك ومقاومة الضغط للنماذج الثلاثة كما هو مبين بالشكل 9. يظهر من المخططات بأن جزء المقاومة المتعلق بالاحتكاك (والذي يرتبط بشكل مباشر بمساحة السطح الذي يتعرض للاحتكاك بفعل لزوجة المائع الحقيقي)، انظر الشكل 9، لا يختلف بشكل كبير بين النماذج الثلاثة. بينما الجزء المتعلق بمقاومة الضغط، كما هو مبين بالشكل 10، يمكن تجزئته إلى جزئين، الجزء الأول، وهو عند أرقام فرود التي تتراوح ضمن المجال (0.03-0.1) فالفرق بين القيم المختلفة لمقاومة الضغط ليس كبير، والسبب الأساسي هنا أن الأمواج التي تتشكل عند هذه السرعات تكون ضعيفة وبالتالي المقاومة المتشكلة بفعل الأمواج يمكن إهمالها. أما الجزء الثاني والذي يتضمن أرقام فرود الأكبر من الـ 0.1 وفي هذا الجزء وبفعل زيادة سرعة السفينة، فإن مقاومة الأمواج تزداد بشكل ملحوظ، وهنا نلاحظ كيف تزداد المقاومة المتشكلة على كل من النموذجين M2, M3 (بدون مقدمة بصلية) بالمقارنة مع المقاومة المتشكلة على النموذج M1 (مع مقدمة بصلية). السفينة تعمل عند رقم فرود 0.142، وهو يقع ضمن المجال الذي يبدأ فيه التأثير الإيجابي لوجود المقدمة البصلية.



الشكل 8: المقاومة الكلية للنماذج الثلاثة عند أرقام فرود مختلفة، المحسوبة باستخدام برنامج الـ Ansys.



الشكل 9: مقاومة الاحتكاك للنماذج الثلاثة عند أرقام فرود مختلفة، المحسوبة باستخدام برنامج الـ Ansys.



الشكل 10: مقاومة الضغط للنماذج الثلاثة عند أرقام فرود مختلفة، المحسوبة باستخدام برنامج الـ Ansys.

بناء على ما سبق يمكننا استنتاج أهمية وجود المقدمة البصلية في ناقلات النفط العملاقة ودورها في تخفيض مقاومة السفينة والذي يؤثر بدوره على تقليل استهلاك الوقود، وبالتالي التقليل من التكاليف الاقتصادية اللازمة لحركة السفينة، والتقليل من التلوث الناتج عن السفينة.

## الاستنتاجات والتوصيات:

### الاستنتاجات

تم في هذا البحث استخدام تقنية الـ CFD من أجل دراسة تأثير إضافة المقدمة البصلية على مقاومة السفينة، وتم التوصل إلى الأمور التالية:

- إن طريقة الـ RANS والموديل الرياضي  $k - \omega SST$  تعطي نتائج جيدة جدا في التطبيقات البحرية، وبالأخص إذا كان الأمر يتعلق بحساب القوى والعزوم المؤثرة على السفينة.
- إن إضافة المقدمة البصلية إلى السفن الناقلة يقلل من المقاومة التي تتعرض لها السفينة والذي يقلل بدوره من الوقود اللازم لإبحار السفينة وبالتالي يقلل من التلوث البيئي.

### التوصيات

- من أهم الأمور التي يوصي بها الباحث في الأعمال اللاحقة هي: أن يتم دراسة تأثير المقدمة البصلية على السفن السريعة، مثل سفينة الـ DTMB 4515، انظر [12]، والتي تعتبر من أكثر السفن السريعة استخداما في الأبحاث، لتوفر الكثير من الدراسات التجريبية لها، وأيضا سفينة الـ FFG7 وهي مدمرة أمريكية، انظر [13].
- أن يتم تغيير شكل المقدمة البصلية ودراسة تأثير شكلها على المقاومة الكلية للسفينة.
- إن استخدام هذا النوع من المقدمات يجب أن يكون إلزاميا في الناقلات الضخمة.

## References:

- [1] S. J. Lee, H. R. Kim, W. J. Kim, and S. H. Van, "Wind tunnel tests on flow characteristics of the KRISO 3,600 TEU containership and 300K VLCC double-deck ship models," *J. Sh. Res.*, vol. 47, no. 1, pp. 24–38, 2003, Accessed: Apr. 02, 2020. [Online]. Available: <https://www.ingentaconnect.com/content/sname/jsr/2003/00000047/00000001/art00003>.
- [2] K. Kume, J. Hasegawa, Y. Tsukada, J. Fujisawa, R. Fukasawa, and M. Hinatsu, "Measurements of hydrodynamic forces, surface pressure, and wake for obliquely towed tanker model and uncertainty analysis for CFD validation," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 2, pp. 65–75, Jun. 2006, doi: 10.1007/s00773-005-0209-y.
- [3] D. Podder, O. P. Gupta, S. Das, and N. R. Mandal, "Experimental and numerical investigation of effect of welding sequence on distortion of stiffened panels," *Weld. World*, vol. 63, no. 5, pp. 1275–1289, Sep. 2019, doi: 10.1007/s40194-019-00747-8.
- [4] S. Sato, S. Okada, S. Sudo, and M. Takagi, "Effect of a Bulbous Bow upon the Resistance of Ships with Small Length-Beam Ratio and Large Block Coefficient," *J. Zosen Kiokai*, vol. 1965, no. 118, pp. 71–83, 1965, doi: 10.2534/jjasnaoe1952.1965.118\_71.
- [5] G. Kyriazis, "Bulbous bow design optimisation for fast ships," 1988. [Online]. Available: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/40238/36001502-MIT.pdf;sequence=2>.
- [6] M. R. Islam, Z. I. Awal, and B. H. Mojumder, "10 th Naval Platform Technology

- Seminar,” 2005. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/272085237>.
- [7] C. M. Lee, J. W. Yu, J. E. Choi, and I. Lee, “Effect of bow hull forms on the resistance performance in calm water and waves for 66k DWT bulk carrier,” *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 723–735, 2019, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2019.02.007.
- [8] K. Niklas and H. Pruszko, “Full scale CFD seakeeping simulations for case study ship redesigned from V-shaped bulbous bow to X-bow hull form,” *Appl. Ocean Res.*, vol. 89, no. October 2018, pp. 188–201, 2019, doi: 10.1016/j.apor.2019.05.011.
- [9] J. Lee, D.-M. Park, and Y. Kim, “Comparison of Added Resistance for Different Bow Shapes of KVLCC2,” *Ship & Ocean Engineering Research Exchange Meeting*. 2013, [Online]. Available: [http://www.naoe.eng.osaka-u.ac.jp/kashi/SOEMeeting/PPT/2013SOE6\\_Lee.pdf](http://www.naoe.eng.osaka-u.ac.jp/kashi/SOEMeeting/PPT/2013SOE6_Lee.pdf).
- [10] J. Lee, D. M. Park, and Y. Kim, “Experimental investigation on the added resistance of modified KVLCC2 hull forms with different bow shapes,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.*, vol. 231, no. 2, pp. 395–410, 2017, doi: 10.1177/1475090216643981.
- [11] J. W. Yu, C. M. Lee, J. E. Choi, and I. Lee, “Effect of ship motions on added resistance in regular head waves of KVLCC2,” *Ocean Eng.*, vol. 146, pp. 375–387, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.09.019.
- [12] “MOERI KVLCC2 Geometry and Conditions, SIMMAN 2008, FORCE Technology.” .
- [13] 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.