

Studying the Influence of Grid Type and Turbulence Model on the Results of Numerical Calculations Using CFD

Dr. Nawar Abbas*

(Received 9 / 10 / 2022. Accepted 5 / 12 / 2022)

□ ABSTRACT □

In this research, the flow around the KVLCC2 model is calculated and analyzed using Computational Fluid Dynamics (CFD). It was focused on the flow behind the hull at the propeller plane due to its importance in determining the Propeller working conditions.

Reynolds Averaged Navier Stoke method (RANS) was used to solve Navier Stokes equations, where the equations were approximated using the Finite Volumes Method (FVM). The program ANSYS was used in this research.

The flow around the tanker was calculated using different grid types and different turbulence models. The resistance, velocity field at the propeller plane, and pressure distribution on the hull surface were calculated.

The numerical results were compared with experimental data. This Comparison showed that the combination of the structured grid and the $\kappa-\omega$ SST turbulence model demonstrated the best results in solving the RANS equations in shipbuilding applications.

Keywords: Grid types, turbulence model, KVLCC2, CFD, $k-\omega$ SST, ANSYS, RANS.

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

دراسة تأثير نوع الشبكة الحسابية وموديل الاضطراب على نتيجة الحسابات الرقمية باستخدام تقنية CFD

د. نوار عباس*

(تاريخ الإيداع 9 / 10 / 2022. قُبل للنشر في 5 / 12 / 2022)

□ ملخص □

في هذا البحث تم تحليل ودراسة التدفق حول بدن نموذج السفينة الناقلة من نوع KVLCC2 وذلك باستخدام تقنية ديناميك الموائع الحسابية أو ما يسمى (Computational fluid dynamic) CFD، حيث تم التركيز بشكل أساسي على التدفق خلف بدن السفينة في منطقة عمل الرصاص، لما له من أهمية في معرفة ظروف عمل الرصاص. تم استخدام طريقة الـ RANS (Reynolds Averaged Navier Stoke) لحل معادلات نافيه ستوكس الناظمة للتدفق. تم تقريب المعادلات جبرياً باستخدام طريقة الحجم المنتهية (Finite Volume Method, FVM) وذلك باستخدام برنامج الـ ANSYS.

تم حساب التدفق حول بدن السفينة باستخدام عدة أنواع من الشبكات الرقمية والعديد من موديلات الاضطراب، كما تم حساب كل من مقاومة السفينة وحقل السرعة في مستوي الرصاص بالإضافة لحقل الضغط على سطح السفينة. بينت النتائج الرقمية التي تم الحصول عليها والذي تم مقارنتها مع النتائج التجريبية المتوفرة، أن استخدام الشبكة المنتظمة وموديل الاضطراب $k-\omega$ SST يعطيان نتائج جيدة جدا في طريقة الـ RANS لحل حالات التدفق في التطبيقات البحرية.

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

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

noarabbas@yahoo.com

مقدمة:

لقد تم اختيار نموذج السفينة الناقلة KVLCC2 في هذه الدراسة بسبب توفر الكثير من النتائج التجريبية لهذا النموذج. فمن خلال البيانات التجريبية المتوفرة، يستطيع الباحث في بداية بحثه التأكد من جودة المعادلات والموديلات الرياضية والشبكات الرقمية التي يستخدمها من أجل حل المعادلات النازمة للتدفق.

هناك الكثير من الباحثين حالياً يستخدمون هذا النموذج في أغراضهم البحثية. أكثر الطرق الكلاسيكية المتبعة من أجل اختبار السفن وملحقاتها هي الطرق التجريبية، ولكن ومع ازدياد تكلفة أجهزة القياس في التجارب والزمن اللازم لتنفيذ التجربة ومحدودية قنوات الاختبار أصبح الأمر صعباً نوعاً ما لذلك يتم حالياً دراسة الجريان رقمياً باستخدام ديناميكا الموائع الحسابية (CFD, Computational Fluid Dynamics)، التي تعتبر إحدى 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. يتم غالباً التحقق الأولي من جودة الـ CFD بمقارنة نتائج الحسابات الرقمية مع النتائج التجريبية لحالات معروفة، بالإضافة إلى اللجوء إلى التحقق من النتائج العددية باستخدام النظريات الفيزيائية المناسبة للحالة المدروسة.

هناك العديد من الدراسات التي استخدمت فيها هذه التقنية لحساب التدفق حول بدن السفينة الناقلة KVLCC2. فقد قام البروفيسور [1] Kornev وفريق البحث الخاص به في جامعة روستوك في ألمانيا في عام 2011، باستخدام طريقة الـ CFD لحساب التدفق حول بدن السفينة الناقلة KVLCC2، وتم حساب حقل السرعة وحقل الطاقة الحركية خلف السفينة في مستوى عمل الرفاص، كما وتم تقدير الدفع من خلال حقل السرعة التي تم الحصول عليه. كما قاموا بتطوير طريقة هجينة جديدة لإغلاق معادلات رينولدز، بينت نتائج هذه الطريقة تطابقاً جيداً مع النتائج التجريبية.

قام كل من Xing وزملائه في بحثهم الذي أجروه في عام 2012 [2] باستخدام تقنية الـ CFD لحساب التدفق حول السفينة الناقلة KVLCC2 باستخدام الموديل الرياضي الهجين (DES, Detached Eddy Simulation)، والذي تم تطويره من قبل Spalart وزملائه عام 1997 [3]. تم في هذه الدراسة حساب بروفايل السرعة والطاقة الحركية في مستوى عمل الرفاص وذلك في حالة السفينة التي تتحرك إلى الأمام مباشرة والتي تتحرك بزوايا انحراف، كما تم أيضاً دراسة الدوامات التي تتشكل خلف بدن السفينة بشكل تفصيلي.

في عام 2017 قام Pereira [4] وزملاؤه باستخدام تقنية الـ CFD لتحديد مقدار الخطأ في الحل الرقمي للتدفق حول السفينة الناقلة KVLCC2 لكل من النموذج والسفينة الحقيقية. تم أيضاً حساب كل من حقل السرعة والطاقة الحركية في مستوى عمل الرفاص، كما وتم حساب معامل المقاومة اللاعدي.

في عام 2019 قام الباحث Hizir وزملاؤه [5] بحساب المقاومة المضافة (added resistance) للسفينة الناقلة KVLCC2 مع أطوال أمواج مختلفة وذلك باستخدام تقنية الـ CFD. تم اختبار العديد من الشبكات مع أمواج مختلفة الطول وذلك من أجل الحصول على أفضل شبكة رقمية لإجراء حسابات الـ CFD. ثم تم إجراء الحسابات الرقمية لتحديد قيمة المقاومة الإضافية، وتحديد الحركة العمودية للسفينة بفعل الأمواج القصيرة والطويلة. تم مقارنة النتائج النهائية مع النتائج التجريبية، والتي أظهرت توافقاً جيداً مع التجربة.

في عام 2019 قام الباحث Islam وزملاؤه [6] باستخدام برنامج الـ OpenFOAM وتقنية الـ CFD من أجل حساب التدفق وتقدير قيمة الخطأ في الحل الرقمي على أربع أنواع من السفن وهي الـ KSC, DTC, KVLCC2 and JBC. وتم استخدام أكثر من طريقة من أجل تقدير الخطأ الرقمي، وتم مقارنة النتائج مع بعضها البعض.

وعلى اعتبار أن الهدف الأساسي من هذه الدراسة هو اختيار الموديل الرياضي والشبكة الرقمية الأفضل لحل المعادلات النازمة للتدفقات المعقدة في التطبيقات البحرية، فإننا سنذكر بعض الدراسات التي اختبرت أنواع مختلفة من الموديلات الرياضية والشبكات، فمثلاً قام Zhao Zahng وزملاؤه عام 2007 [9], [8]، باختبار ثمانية موديلات اضطراب مختلفة على حالة تدفق هواء ضمن غرفة. هذه الموديلات تستخدم مع الكثير من الطرق المستخدمة لحل معادلات نافيه ستوكس، مثل طريقة الـ RANS (Reynolds Averaged Navier Stocks Equation) وطريقة الـ LES (Large Eddy Simulation) والطرق الهجينة التي تجمع بين طريقة الـ URANS والـ LES. تم التركيز بشكل أساسي على دقة الحسابات التي تعطيها الموديلات المختلفة بالإضافة إلى الزمن الحسابي التي تحتاجه لإتمام عملية الدراسة. توصلت الدراسة إلى أن طريقة الـ LES تعطي نتائج أفضل مع كل الموديلات بالمقارنة مع طريقة الـ RANS ولكنها تحتاج إلى وقت حسابي أطول بكثير. وأما بالنسبة لطريقة الـ RANS فإنها تعطي أفضل النتائج عند استخدام الموديلين RNG k-ε والموديل $\bar{v}^2 - f$ modified.

لقد قام Guojun Yu وزملاؤه في عام 2012 [10] بدراسة تأثير نوعين من الشبكات الرقمية على دقة وتقارب الحل باستخدام طريقة الحجم المنتهية، الشبكة الأولى ذات خلايا رباعية الأضلاع والثانية ذات خلايا ثلاثية الأضلاع، الدراسة تمت على حالات ثنائية البعد فقط. تم التوصل إلى أنه في حالة الشبكات ذات الخلايا ثلاثية الأضلاع فإننا بحاجة إلى 413 ضعف الخلايا رباعية الأضلاع للحصول على نفس الدقة التي نحصل عليها من الشبكات ذات الخلايا رباعية الأضلاع. بالإضافة لما سبق تم التوصل إلى أن الشبكات ذات الخلايا ثلاثية الأضلاع تحتاج إلى زمن أطول لكي يتقارب فيها الحل بشكل جيد.

في الدراسة التي قام بها Duan et al عام 2015 [11]، تم استخدام ثلاث أنواع من الشبكات (الشبكات المنتظمة، الهرمية والهجينة) مع أعداد مختلفة من الخلايا (3، 6، 12، 24 و 38) مليون خلية لتبيان تأثيرها على دقة الحل في حساب تدفق الهواء في مقصورة الدرجة الأولى لطائرة ركاب باستخدام تقنية الـ CFD. لقد توصلت هذه الدراسة إلى أن الشبكة المنتظمة تعطي أفضل النتائج لتوزيع الهواء في المقصورة، وللحصول على نفس النتائج باستخدام الشبكات الأخرى فهناك حاجة إلى عدد أكبر بكثير من الخلايا. من خلال هذه الدراسة تم إيضاح أن السلبية الوحيدة لهذا النوع من الشبكات (المنتظمة) هو الوقت الطويل الذي يحتاجه المستخدم في بناء هذه الشبكة.

في عام 2018 قام H.A. Warda وزملاؤه [12] باستخدام نوعين من الشبكات لدراسة تدفق السائل عبر مضخة، في كلتا الحالتين تم استخدام موديل الاضطراب Standard K-ε model. تم التركيز بشكل أساسي على حساب مخطط التدفق (liter/min) مع تغير الضغط $Q - \Delta P$ ، وذلك من أجل مقارنته مع النتائج التجريبية المتوفرة. المقارنة أثبتت أن الشبكات الهجينة والتي تتضمن خلايا (tetra, prism and hexa) تعطي نتائج أفضل بكثير بالمقارنة مع الشبكات التي تتضمن خلايا tetra فقط.

أهمية البحث وأهدافه:

تعتبر عملية بناء الشبكة الرقمية الصحيحة أهم خطوة أثناء استخدام تقنية الـ CFD، يليها من حيث الأهمية اختيار الطريقة وموديلات الاضطراب المناسبة لحل معادلات نافيه ستوكس. حيث أنه إذا ما تم استخدام شبكة رقمية غير

جيدة أو استخدام طريقة وموديل رياضي غير مناسبين للحالة المدروسة، فإن ذلك سيؤدي حتماً إلى الوصول إلى نتائج غير صحيحة للحالة المدروسة.

وعلى اعتبار أن الإمكانيات الحاسوبية المتاحة تعتبر منخفضة نسبياً، سيتم استخدام طريقة الـ RANS لحل المعادلات الناظمة للتدفق (معادلات نافيه ستوكس)، وبالتالي فإن أهمية هذا البحث وأهدافه تتجسد في الأمور التالية:

- 1- تحديد موديل الاضطراب الأفضل لإغلاق نظام المعادلات في طريقة الـ RANS.
- 2- تحديد الشبكة الرقمية الأفضل لحساب التدفق في التطبيقات البحرية.
- 3- دراسة التدفق حول بدن نموذج السفينة الناقلة KVLCC2.

طرائق البحث ومواده:

الدراسة في هذا البحث تعتمد على حل المعادلات الناظمة للتدفقات المعقدة والتي هي معادلات نافيه ستوكس من خلال استخدام طريقة الـ RANS والعديد من الشبكات والموديلات الرياضية المناسبة لهذه الطريقة وذلك ضمن برنامج الـ ANSYS، حيث أن الجسم الهندسي للسفينة المراد دراستها متوفر كصيغة iges1.

منهجية البحث

يقوم البحث على منهجية تحليلية تجريبية في بيئة افتراضية. حيث سيتم دراسة التدفق حول نموذج السفينة الناقلة KVLCC2 باستخدام برنامج الـ ANSYS، الذي يستخدم تقنية الـ CFD لحل معادلات الجريان. سيتم الحل باستخدام العديد من الشبكات الرقمية المختلفة مع موديل الاضطراب $k - \omega$ SST، ثم سيتم التحقق من دقة النتائج الرقمية من خلال مقارنتها مع النتائج التجريبية المتوفرة. بعد تحديد الشبكة الأفضل لإجراء الحسابات، سيتم اختبار أربع موديلات رياضية مختلفة مع الشبكة الأفضل ومن ثم سيتم مقارنة النتائج التي سنحصل عليها مع النتائج التجريبية لتحديد موديل الاضطراب الأفضل للحالة المدروسة.

المعادلات الناظمة للجريانات المعقدة

تستخدم معادلات نافيه ستوكس ومعادلة الاستمرارية لوصف جريان الموائع النيوتونية غير القابلة للانضغاط والتي يمكن تمثيلها في أربع معادلات أساسية وهي معادلة مصونية الكتلة ومعادلات مصونية كمية الحركة في الاتجاهات x, y, z [13]–[16].

إن الحل التحليلي لمعادلات الجريان أمر متاح لحالات الجريان البسيطة، أما في حالات الجريانات المعقدة، فإنه من الصعب جداً الحصول على الحل التحليلي للمعادلات السابقة، في مثل هذه الحالات يعد الحل الرقمي باستخدام الـ CFD (Computational Fluid Dynamic) هو الأفضل والأكثر شيوعاً.

تعتمد تقنية الـ CFD على المعادلات المذكورة سابقاً لوصف حركة المائع، والتي يمكن حلها بالشكل التكاملية أو بالشكل التفاضلي. من أجل الحل الرقمي لمعادلات الجريان يوجد طرق مختلفة كطريقة الفروق المنتهية (FDM: Finite Difference Method)، طريقة العناصر المنتهية (FEM: Finite Element Method)، وطريقة الحجم المنتهية (FVM: Finite Volume Method). طريقة الفروق المنتهية هي أقدم طرق الحل الرقمي وتستخدم الشكل التفاضلي للمعادلات الرئيسية [2]–[4]، [17].

¹ الجسم الهندسي للسفينة وملحقاتها متوفر على الموقع التالي:

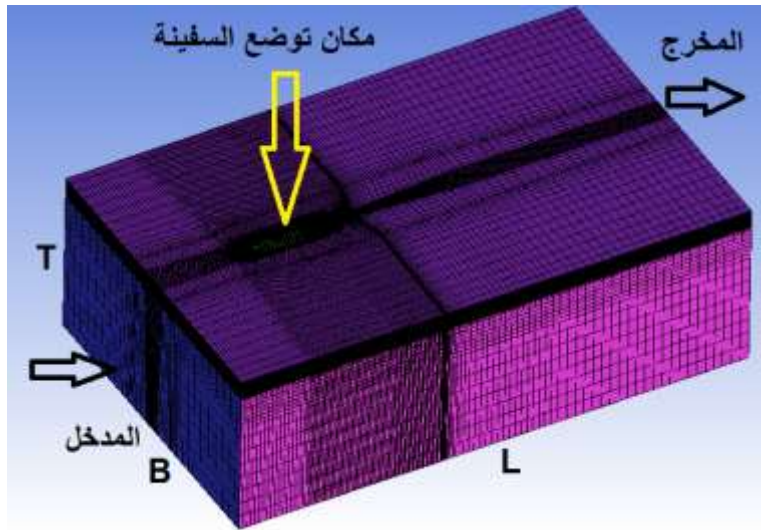
http://www.simman2008.dk/KVLCC/KVLCC2/kvlcc2_geometry.html

الأبعاد الهندسية

لقد تم التركيز في هذه الدراسة على حساب السفينة بدون الملحقات، إن المجال الحسابي الذي تم استخدامه في هذه الدراسة هو متوازي مستطيلات وله الأبعاد الهندسية التالية:

$$L \times B \times T = 4.615 \cdot L_{pp} \times 2.885 \cdot L_{pp} \times 1.5 \cdot L_{pp}$$

يوضح الشكل 1 المجال الحسابي الذي تم استخدامه، إذ إن L_{pp} هو الطول بين المتعامدين. وعلى اعتبار أننا سنقوم في هذا البحث بمقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية فلقد تم استخدام السفينة الناقلة بمقياس $\frac{1}{58}$ وهو المقياس الذي استخدمه Lee وزملاؤه في تجربة عام 2003، [18].



الشكل 1: المجال الحسابي الذي تم استخدامه في هذه الدراسة.

الشكل 2 يوضح منظر جانبي للسفينة الناقلة التي تمت دراستها. كما ويوضح الجدول 1 الأبعاد الهندسية للنموذج والسفينة الحقيقية.



الشكل 2: السفينة الناقلة KVLCC2.

الجدول 1 : الأبعاد الهندسية للسفينة الحقيقية والنموذج الذي تم استخدامه.

النموذج	السفينة الحقيقية	الوحدة	الرمز	الأبعاد الرئيسية
5.5172	320.0	m	L_{pp}	الطول بين العمودين
1.000	58.0	m	B	عرض السفينة
0.3586	20.8	m	d	الغاطس
8.8038	27194	m^2	S_w	مساحة السطح المغمور دون الملحقات
0.8098	0.8098	---	C_b	معامل امتلاء بدن السفينة
0.1420	0.1420	---	Fr	رقم فرود
5.22×10^6	4.48×10^9	---	Re	رقم رينولدز

موديلات الاضطراب المستخدمة

تمّ في هذه الدراسة استخدام أربع موديلات اضطراب مختلفة لإغلاق نظام المعادلات في طريقة الـ RSNS المستخدمة لحل معادلات نافيه ستوكس، هذه الموديلات هي:

1- الموديل Spalart-Allmaras (SA): هو موديل رياضي بسيط نسبياً يتضمن معادلة تفاضلية واحدة يتم من خلالها إيجاد قيمة للزوج الدوامية المضطربة [19]، [20].

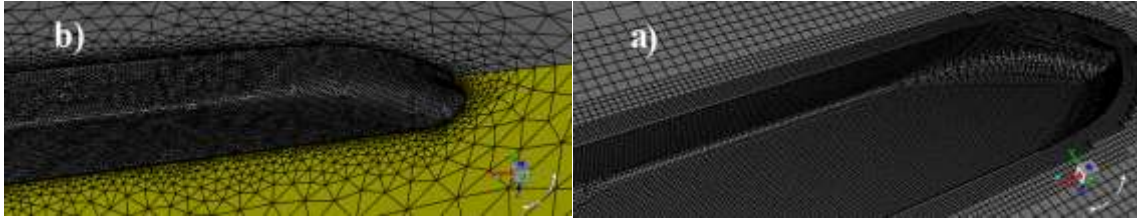
2- الموديل $k - \varepsilon$: وهو من أكثر الموديلات الرياضية شيوعاً، وبشكل عام يوجد صيغتين رئيسيتين للموديل $k - \varepsilon$ [21] [22]، وهما النموذج القياسي Standard K-Epsilon والنموذج المقدم من قبل Launder and Sharma. يتضمن هذا الموديل متغيران أساسيان، الأول هو الطاقة الحركية للاضطراب k والتي نستطيع بواسطتها تحديد طاقة الاضطراب، أما الثاني هو معامل التبدد للاضطراب ε (انتشار الطاقة الحركية للاضطراب) والذي يحدد مدى انتشار الاضطراب. الموديل $k - \omega$: يعد هذا الموديل أيضاً من الموديلات الشائعة، ويتضمن معادلتين انتقال تصف تأثير الاضطراب في الجريان، ويوجد متغيرين في هذا الموديل أيضاً هما: الطاقة الحركية للاضطراب، ومعامل التبدد النوعي للاضطراب (تردد الاضطراب) [23]، [24].

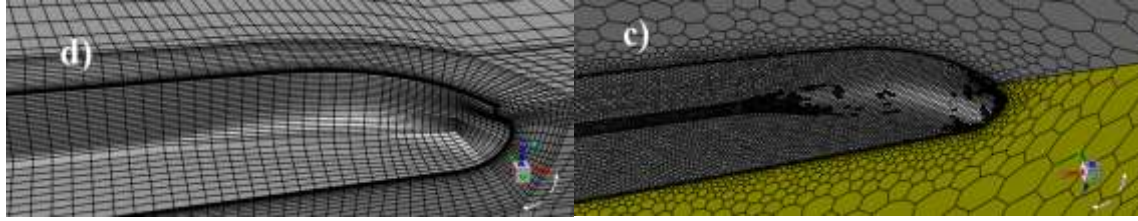
3- الموديل SST $k - \omega$: قدّم هذا الموديل الذي يعتمد مفهوم للزوج الدوامية من قبل (Menter 1993) وهو يعد دمجاً لخصائص الموديلين $k - \varepsilon$ و $k - \omega$ ، يتم فيه استخدام الموديل $k - \omega$ ضمن الاجزاء الداخلية للطبقة الحدية (بالقرب من الجدار) حيث يقدم هذا الموديل ($k - \omega$) أفضل النتائج ضمن هذه المنطقة، والموديل $k - \varepsilon$ في منطقة الجريان الحر، بعيداً عن الجدار، [25][27]، [26].

الشبكات الرقمية المستخدمة

تم في هذا البحث إجراء الحسابات للمائع حول بدن السفينة الناقلة KVLCC2، حيث تم وضع السفينة ضمن قناة وتم إدخال التدفق إلى القناة بسرعة مساوية لسرعة السفينة (القناة هي متوازي المستطيلات المبين في الشكل 1)، تم اهمال مقاومة الأمواج وذلك لأن رقم فرود صغير ($Fr=0.142$) وعليه فإن مقاومة الأمواج صغيرة جداً مقارنة بقيمة المقاومة الكلية للسفينة وبالتالي يمكن اهمالها. الشبكات الرقمية المستخدمة لهذه الحالة جميعها تملك عدد الخلايا نفسه وهو 500 ألف خلية السفينة، وهي موضحة في الشكل 3 وهي كالتالي:

- (a) الشبكة الديكارتية: Cartesian Mesh،
 (b) الشبكة الغير منتظمة (خلايا هرمية): Unstructured Mesh (tetra cells)،
 (c) الشبكة الغير منتظمة (خلايا سداسية): Unstructured Mesh (polyhedral cells)،
 (d) الشبكة المنتظمة الملائمة لجسم السفينة: Structured Mesh.





الشكل 3: الشبكات التي تم استخدامها لتقسيم المجال الحسابي حول السفينة KVLCC2.

النتائج والمناقشة:

اختيار الشبكة الرقمية الأفضل للدراسة

كما ذكر سابقاً فقد أجريت هذه الدراسة لبدن السفينة من دون ملحقات وبمقياس $M=1/58$ وتم في الخطوة الأولى استخدام نفس الموديل الرياضي $k-\omega$ SST لكل الشبكات، مع استخدام نفس عدد الخلايا لكل الشبكات.

التحقق من معامل مقاومة السفينة C_t

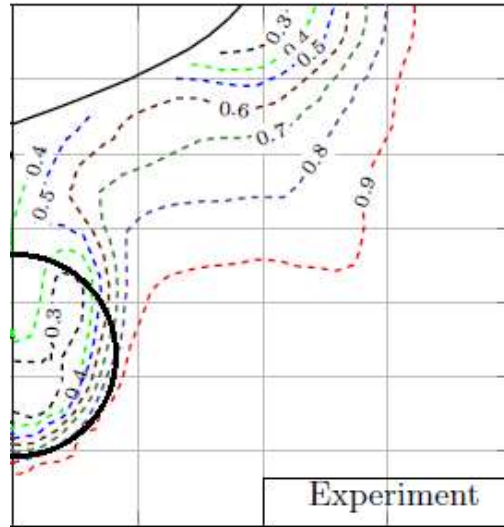
يوضح الجدول 2 قيم معامل مقاومة السفينة المدروسة للشبكات الرقمية المستخدمة ونسبة الخطأ لكل شبكة عن القيمة التجريبية، مع التنويه إلى أن تأثير السطح الحر للماء مهم (مقاومة الأمواج). ونلاحظ من الجدول أن أقرب القيم إلى القيمة التجريبية هي قيمة معامل المقاومة لحالة الشبكة الديكارتية، حيث أنها أكبر من القيمة التجريبية بمقدار 2.45%، تأتي بعدها قيمة معامل المقاومة لحالة الشبكة المنتظمة، والتي هي أصغر من القيمة التجريبية بمقدار 4.36%. ذكر سابقاً بأنه تم إهمال مقاومة الأمواج، لذلك لو تم حساب مقاومة الأمواج وتمت إضافتها إلى قيمة معامل المقاومة الذي تم الحصول عليه من الشبكات المختلفة فإن نتيجة الشبكة الديكارتية ستصبح أكثر تباعداً عن القيمة التجريبية، ونتيجة الشبكة المنتظمة ستصبح أكثر قرباً من النتيجة التجريبية، وعليه يمكن القول بأن نتيجة الشبكة المنتظمة هي الأفضل.

الجدول 2: التحقق من النتيجة الرقمية لمعامل مقاومة السفينة لأنواع مختلفة من الشبكات.

E%D	$C_T \times 10^{-3}$	
-	4.11	النتيجة التجريبية
الشبكة الديكارتية		
+ 2.45	4.2107	k- ω SST
الشبكة المنتظمة		
-4.36	3.9306	k- ω SST
الشبكة الغير منتظمة (الهرمية)		
-5.085	3.9010	k- ω SST
الشبكة الغير منتظمة (سداسية الوجوه)		
-9.82	3.7062	k- ω SST

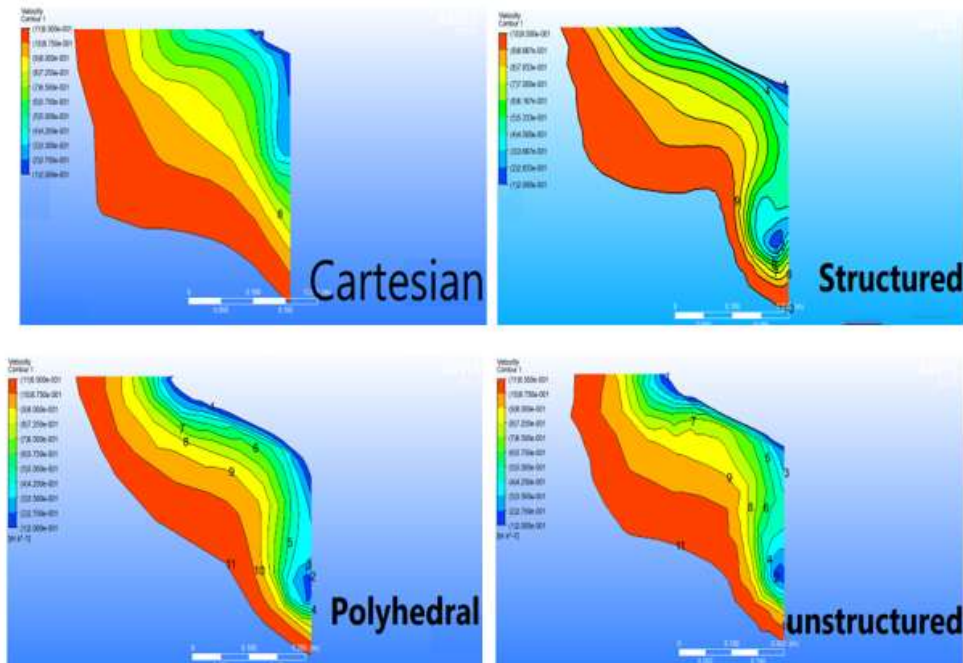
التحقق من بروفيل السرعة

يبين الشكل 4 النتيجة التجريبية لتوزيع السرعة في مستوي الرفاص لنموذج السفينة KVLCC2، بينما يبين الشكل 5 النتائج الرقمية باستخدام الـ CFD وباستخدام شبكات مختلفة.



الشكل 4: النتيجة التجريبية لتوزيع السرعة في مستوي الرفاص، [28].

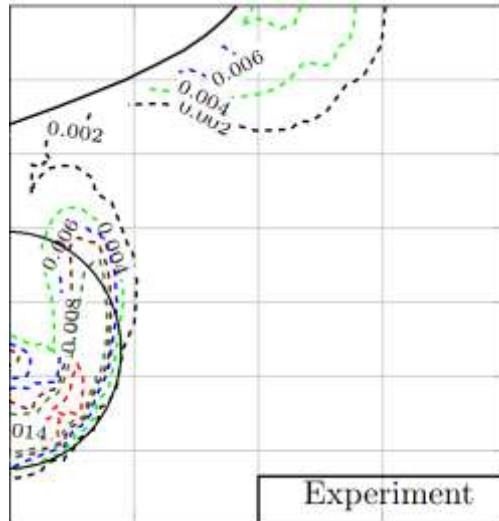
يلاحظ من خلال المقارنة بين النتيجة التجريبية والنتائج الرقمية أن الشبكات الرقمية الأربعة قدمت تقارب من ناحية قيم السرعة حيث تكون القيم الدنيا ضمن قرص الرفاص وتزداد باتجاه الخارج (في الاتجاه العمودي على مستوي التناظر) حتى بلوغ القيمة العظمى في منطقة التدفق الحر. من خلال التدقيق في النتائج يمكن ملاحظة أن نتيجة الشبكة المنتظمة هي الأقرب إلى النتيجة التجريبية، حيث تظهر دوامة طويلة كبيرة عند قرص الرفاص ودوامة ثانية أسفل سطح المؤخرة قريبة من السطح الحر ولكنها أصغر بالمقارنة مع الدوامة السابقة وهذا مطابق للنتائج التجريبية، سيتم توضيح الدوامات المتشكلة خلف بدن السفينة بشكل مفصل في فقرة لاحقة.



الشكل 5: النتيجة الرقمية لتوزيع السرعة في مستوي الرفاص للشبكات المختلفة.

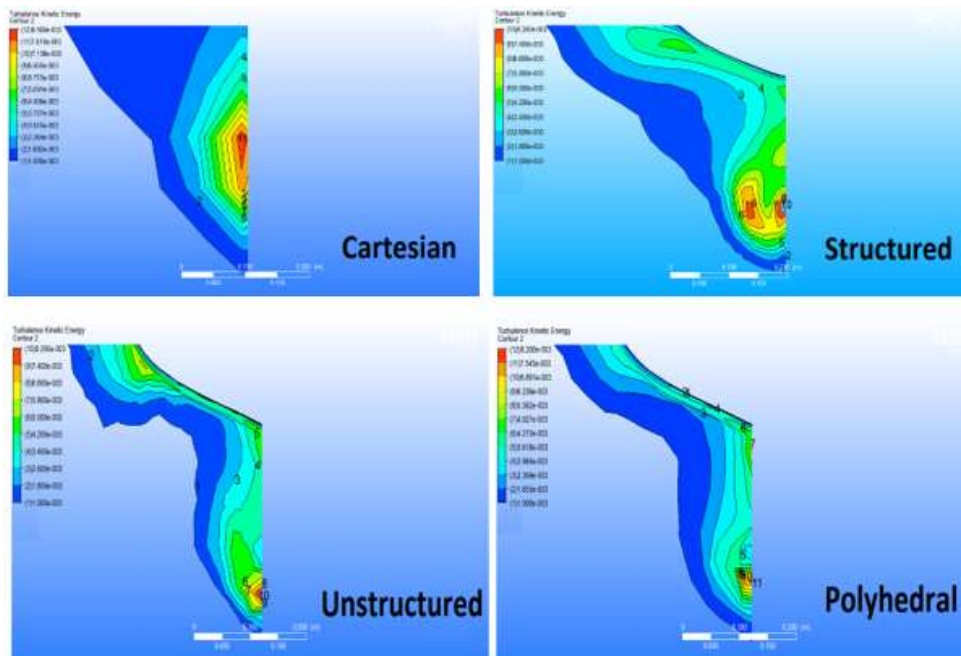
التحقق من الطاقة الحركية

يوضح الشكل 6 النتيجة التجريبية للطاقة الحركية في مستوى الرفاص خلف بدن السفينة. المنحنيات ماثلة لمنحنيات السرعة الموضحة في الشكل 4 والشكل 5.



الشكل 6: النتيجة التجريبية لتوزيع الطاقة الحركية في مستوى الرفاص، [28].

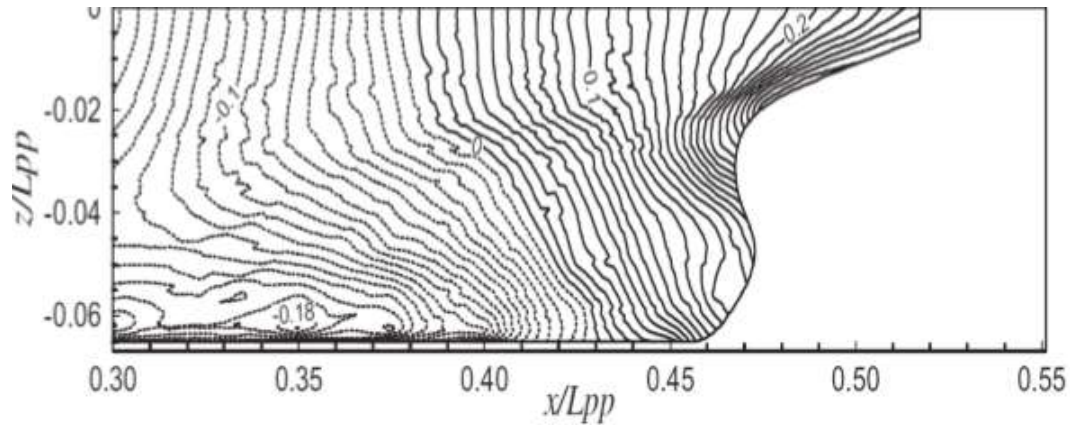
الشكل 7 يوضح النتيجة الرقمية لحقل الطاقة الحركية، وكما هو واضح من هذا الشكل فإن القيمة العظمى تتحقق في منطقة قرص الرفاص وتنخفض بعيدا عن قرص الرفاص وهذا محقق عند كل الشبكات المستخدمة ولكن النتيجة الأفضل والأقرب للنتيجة التجريبية محققة في الشبكة المنتظمة.



الشكل 7: النتيجة الرقمية لتوزيع الطاقة الحركية في مستوى الرفاص للشبكات المختلفة.

التحقق من قيم معامل الضغط على مؤخرة السفينة

الشكل 8 يعرض النتيجة التجريبية لتوزيع معامل الضغط عند مؤخرة السفينة.



الشكل 8 : النتيجة التجريبية لتوزيع قيم معامل الضغط على منطقة مؤخرة السفينة، [28].

تم حساب معامل الضغط وفقا للعلاقة التالية:

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho \cdot U^2} \quad (1)$$

حيث:

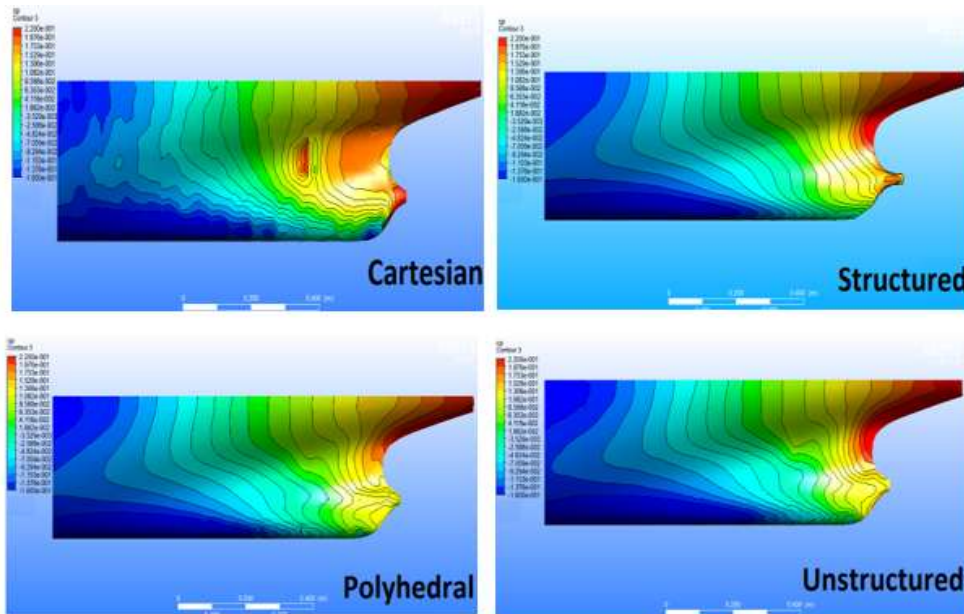
- P_0 [N/m²]: الضغط الجوي،

- P [N/m²]: الضغط على بدن السفينة،

- P [Kg/m³]: كثافة الماء،

- U [m/s]: السرعة.

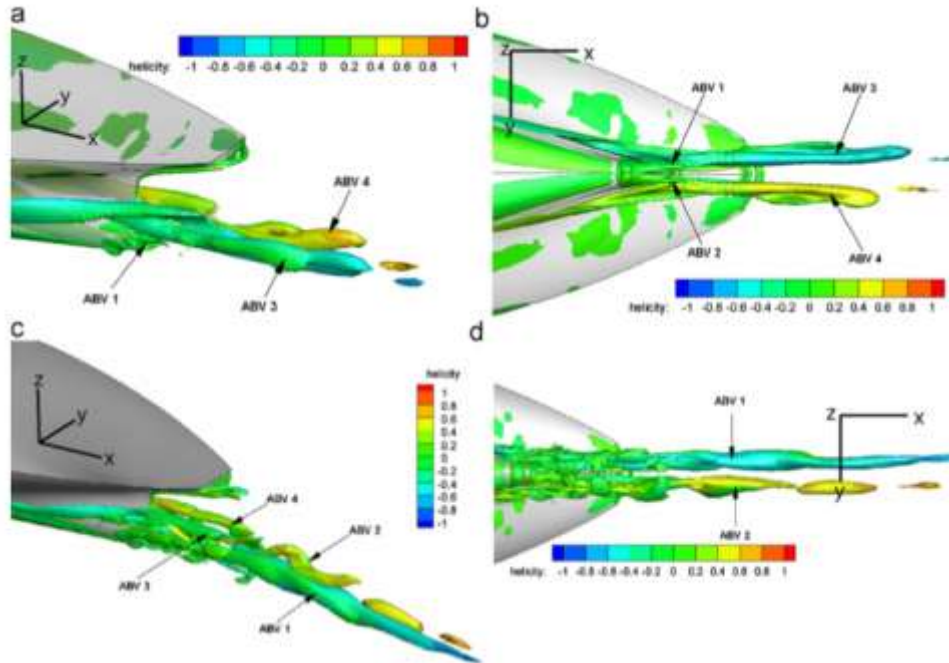
نلاحظ من النتيجة التجريبية أن قيم معامل الضغط السالبة تكون ضمن المجال $0.2 < x/L_{pp} < 0.38$ ، بينما القيم الموجبة ضمن المجال $0.38 < x/L_{pp} < 0.5$. وبالمقارنة بين النتائج الرقمية الشكل 9 نجد أن النتيجة الأفضل تم الحصول عليها باستخدام الشبكة المنتظمة.



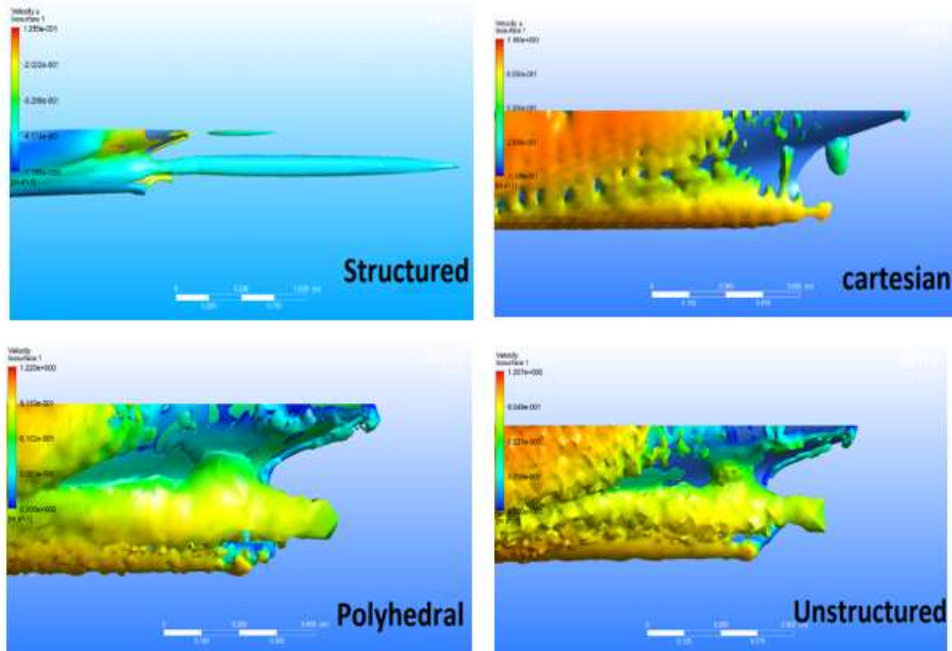
الشكل 9: النتيجة الرقمية لتوزيع قيم معامل الضغط على منطقة مؤخرة السفينة باستخدام الشبكات المختلفة.

التحقق من الدوامات

يعرض الشكل 10 النتيجة الرقمية التي حصل عليها الباحث Xing وزملاؤه في عام 2012 لتشكل الدوامات خلف بدن نموذج السفينة الناقلة KVLCC2 وذلك باستخدام الطرق الهجينة ومئات الملايين من الخلايا الحسابية، [2].



الشكل 10: شكل مرجعي للدوامات المتشكلة عند مؤخرة نموذج السفينة الناقلة KVLCC2 [2].

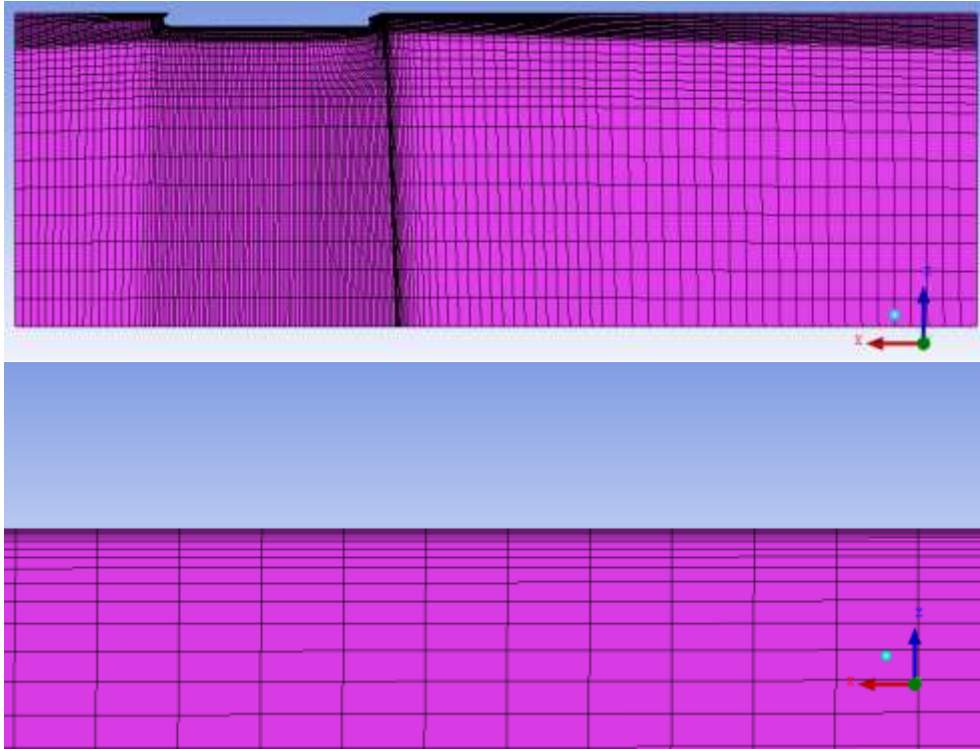


الشكل 11: النتائج الرقمية للدوامات المتشكلة خلف بدن نموذج السفينة باستخدام الشبكات المختلفة.

يظهر في الشكل 10 تشكل أربع دوامات في مؤخرة السفينة (نظراً لعدم وجود نتائج تجريبية للدوامات فإن مقارنة النتائج الرقمية ستكون مع هذا الشكل المرجعي المعتمد). بمقارنة نتائج الشبكات المختلفة في الشكل 11 مع نتيجة Xing et. al. 2012 نلاحظ أن النتيجة الأفضل والأقرب للشكل المرجعي المعتمد هي نتيجة الشبكة المنتظمة.

اختبار موديل الاضطراب الأفضل في المجال البحري

من خلال النتائج السابقة التي تم الحصول عليها لأنواع مختلفة من الشبكات، تم التأكد بأن الشبكات المنتظمة الملائمة للجسم تعطي أفضل النتائج وعليه من أجل حل التدفق بشكل صحيح تم استخدام الشبكات المنتظمة لإتمام هذه الدراسة. يوضح الشكل 12 الشبكة الرقمية التي سيتم اعتمادها للحسابات اللاحقة، والذي يظهر فيها كيفية تقسيم المجال الحسابي إلى عدد كبير من الخلايا المتوازية المستطيلات (عدد الخلايا التي تم استخدامها هو 500 ألف خلية)، وعلى اعتبار أن تدرج السرعة في الاتجاه العمودي على السطح في منطقة الطبقة الحدية كبير جداً، فلقد تم زيادة عدد الخلايا بشكل كبير في المنطقة القريبة من جدار السفينة لأنها المنطقة التي تتشكل فيها الطبقة الحدية، يوضح الشكل 12 في الأعلى مقطع طولي في مستوي التناظر للشبكة حيث تظهر السفينة في الجزء العلوي اليساري، ويظهر تنعيم الخلايا في المنطقة المجاورة لبدن السفينة، الصورة في الأسفل توضح تنعيم الخلايا بجوار البدن، نسبة التنعيم التي تم استخدامها هي 1.2.



الشكل 12: الشبكة المنتظمة التي سيتم اعتمادها في اختبار موديل الاضطراب الأفضل.

والآن سنعرض نتائج استخدام هذه الموديلات من أجل تحديد الموديل الأفضل.

القوى والعزوم المؤثرة على السفينة

يوضح الجدول 3 مقارنة بين القيمة الرقمية والقيمة التجريبية لمعامل المقاومة الكلية للسفينة، من خلال التدقيق في النتائج نلاحظ للوهلة الأولى أن أسوأ النتائج هي نتيجة الموديل SA وأفضلها هي نتيجة الـ $k - \epsilon$. ولكن تمت الحسابات الرقمية للسفينة من دون أخذ مقاومة الأمواج بعين الاعتبار، حيث تم إهمال قيمة مقاومة الأمواج، وبالتالي

يمكن القول بأن نتيجة كل من الموديلين $K - \omega$, $K - \varepsilon$ يمكن أن تصبحا أكبر من قيمة المقاومة الحقيقية إذا ما تم أخذ مقاومة الأمواج بعين الاعتبار، في حين أن نتيجة الـ $k - \omega$ SST ستكون هي الأفضل في حال إضافة مقاومة الأمواج.

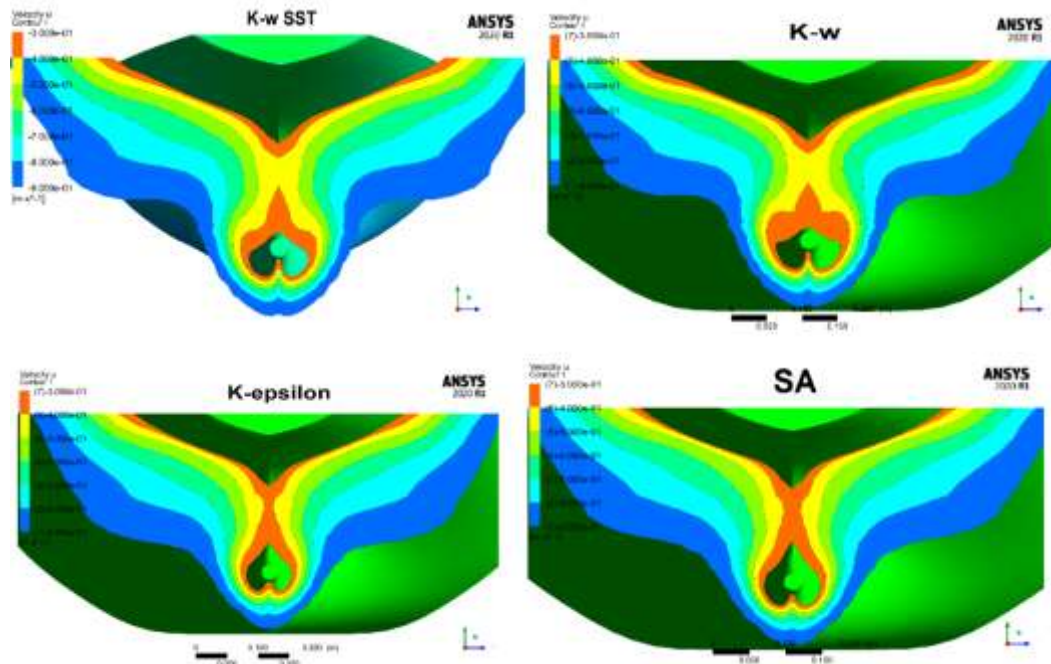
الجدول 3: مقارنة قيمة معامل المقاومة الناتج من الموديلات الأربعة مع قيمة معامل المقاومة التجريبي.

Turbulence model	$C_d \times 10^{-3}$	Error %
Experiment	4.11	-
$k - \omega$ SST	3.9306	-4.360 %
$k - \omega$	4.018	-2.238 %
$k - \varepsilon$	4.093	-0.413 %
SA	3.757	-8.588 %

حقل السرعة في مستوي الرفاص

يوضح الشكل 13 النتيجة الرقمية لبروفائل السرعة في مستوي عمل الرفاص التي تم الحصول عليها من الموديلات الأربعة، الشكل 4 يوضح النتيجة التجريبية [18]، حيث أن عدد الخلايا الذي تم استخدامه لكامل السفينة هو 500 ألف خلية فقط، بمقارنة النتائج الرقمية مع النتيجة التجريبية يلاحظ أن أفضل النتائج هي للنموذجين $k - \omega$ و $k - \varepsilon$ SST، وبالأخص في منطقة تشكل الدوامات في مكان توضع الرفاص تماما (الدائرة في الشكل 4 توضح قرص الرفاص). الشكل 10 والشكل 11 يوضحان الدوامات المتشكلة خلف بدن السفينة.

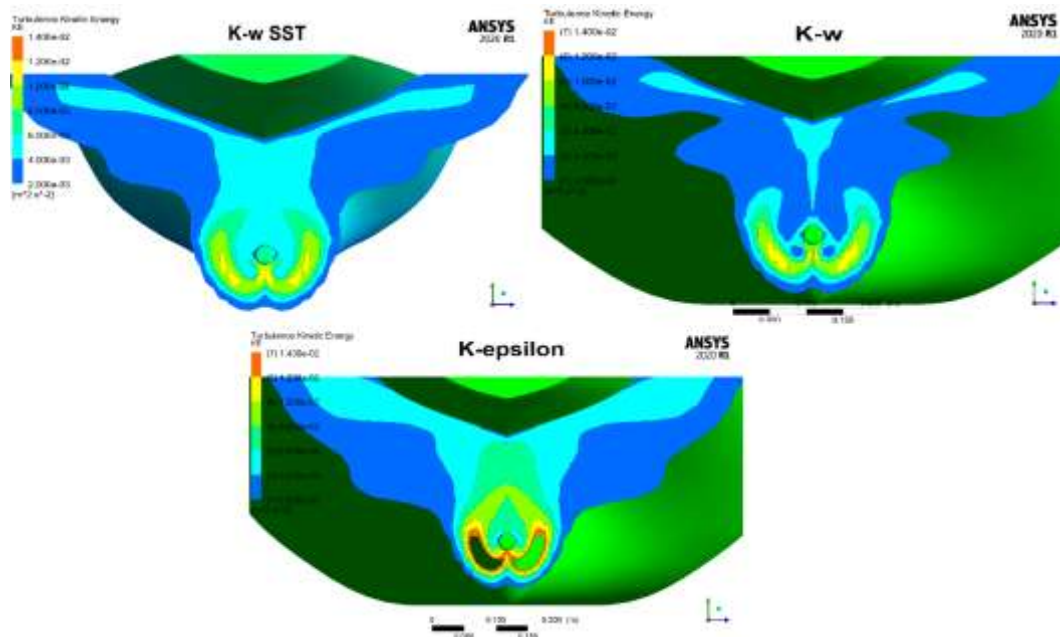
وعلى الرغم من أن نتيجة هذين الموديلين هي الأفضل بالمقارنة مع الموديلات الأخرى إلا أنه بالتركيز أكثر ضمن دائرة قرص الرفاص نلاحظ أن القيمتين 0.3 و 0.4 لا يتحققان بشكل جيد بالمقارنة مع القيم التجريبية، ويعود السبب إلى أمرين أساسيين، الأول هو أن هذه المنطقة يتشكل بها دوامات كبيرة ناتجة عن الجزء الأنبوبي الخلفي من مؤخرة السفينة (حيث أن السفن الناقلة وسفن الصب تتميز بأن الجزء الخلفي السفلي منها يأخذ شكل الأنبوب، وهو السبب الأساسي في تشكل مثل هذا النوع من الدوامات)، الشرح التفصيلي لتشكل هذا النوع من الدوامات يمكن إيجاده في عمل Gorski. J 2003، انظر [29]. وهذا يعني أنه في هذه المنطقة يوجد الكثير من الاضطرابات وتعد طريقة الـ RANS غير قادرة على حل الاضطرابات بشكل جيد، ويجب استخدام طرق أخرى مثل طريقة الـ LES, Large Eddy Simulation. **السبب الثاني** والمهم في عدم القدرة على حل هذه المنطقة بشكل دقيق هو عدد الخلايا الذي تم استخدامه والذي هو 500 ألف خلية فقط، ومن أجل الحل الجيد يجب زيادة عدد الخلايا بشكل كبير جداً، وهذا الأمر غير ممكن حالياً.



الشكل 13: النتيجة الرقمية لبروفائل السرعة في مستوي الرفاص من الموديلات الأربعة.

حقل الطاقة الحركية في مستوي الرفاص

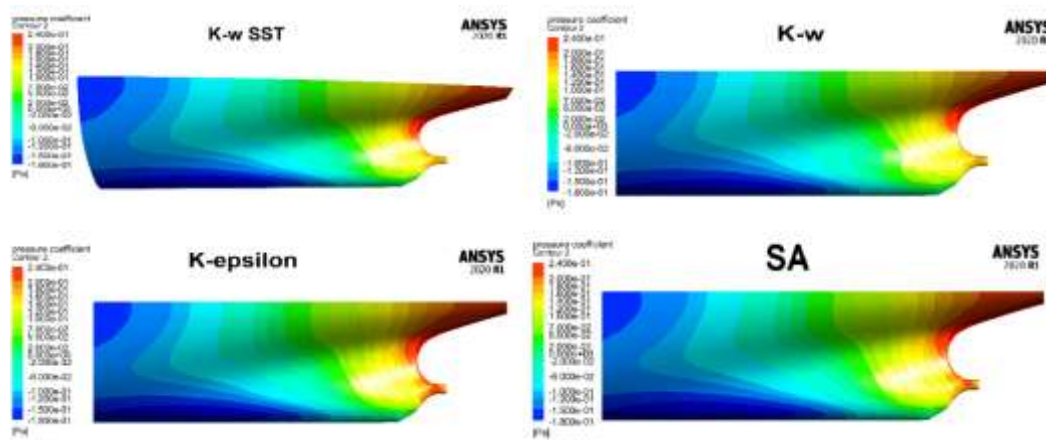
يوضح الشكل 14 النتائج الرقمية لثلاثة موديلات فقط لتوزيع الطاقة الحركية في مستوي عمل الرفاص، الشكل 6 يوضح النتيجة التجريبية، Lee et al. 2003، [18]. على اعتبار أن الموديل SA هو موديل وحيد المعادلة ولا يحوي معادلة خاصة بالطاقة الحركية فهو لا يحسبها. كما هو واضح من هذا الشكل فإن نتيجة الموديلين $k - \omega$ SST و $k - \omega$ هي الأفضل بالمقارنة مع النتيجة التجريبية.



الشكل 14: النتيجة الرقمية لبروفائل الطاقة الحركية في مستوي الرفاص من ثلاث موديلات مختلفة.

حقل الضغط على سطح السفينة

يوضح الشكل 15 النتيجة الرقمية لتوزيع معامل الضغط عند مؤخرة السفينة التي تم الحصول عليها من الموديلات الأربعة، الشكل 8 يوضح النتيجة التجريبية. بمقارنة النتائج الرقمية مع بعضها البعض وبمقارنتها مع النتيجة التجريبية نلاحظ أن الموديلات جميعها تعطي نتائج جيدة لحقل الضغط بالمقارنة مع النتيجة التجريبية. من خلال ما سبق يمكننا القول بأن الموديلين $k - \omega$ SST، $k - \omega$ هما الأفضل، وعلى اعتبار أن الموديل $k - \omega$ SST يجمع إيجابيات كل من الموديلين $k - \omega$ ، $k - \epsilon$ وبالتالي يمكن القول بأن الموديل $k - \omega$ SST هو الأفضل لإغلاق نظام المعادلات في طريقة الـ RANS.



الشكل 15: النتيجة الرقمية لحقل الضغط عند مؤخرة السفينة.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات

- من خلال النتائج التي تم عرضها في هذا البحث تم التوصل إلى النتائج التالية:
- إن عملية بناء الشبكة الرقمية تعتبر أهم خطوة بعد بناء الجسم الهندسي الصحيح، وإذا كانت الشبكة الرقمية التي يتم بناؤها غير جيدة، فالنتائج التي يتم الحصول عليها ستكون غير جيدة.
- الشبكة المنتظمة تعتبر من أفضل أنواع الشبكات المستخدمة لتقسيم المجال الحسابي.
- موديل الاضطراب $k - \omega$ SST هو الموديل الأفضل لإغلاق نظام المعادلات في طريقة الـ RANS في التطبيقات البحرية.

التوصيات

- اعتمادا على النتائج التي تم التوصل إليها يوصى بما يلي:
- بالرغم من الوقت الكبير الذي يحتاجه الباحث لبناء الشبكات المنتظمة، إلا أنه ينصح باستخدامها عند إجراء الحسابات باستخدام تقنية الـ CFD، وذلك بسبب الدقة الكبيرة التي تعطيها في النتائج.

- ينصح عند استخدام تقنية الـ CFD أن يتم البدء بإجراء الحسابات لحالة مرجعية مشابهة للحالة المدروسة لتقييم دقة النتائج التي يتم الحصول عليها من الـ CFD بمقارنتها مع النتائج التجريبية المتوفرة للتأكد من دقة الحسابات والإعدادات التي استخدمت في الحل.
- ينصح باستخدام موديل الاضطراب SST $k - \omega$ لحل التدفقات في التطبيقات البحرية وذلك في حال كانت الإمكانيات الحاسوبية المتوفرة محدودة الإمكانيات.

References:

- [1] N. Kornev, A. Taranov, E. Shchukin, and L. Kleinsorge, "Development of hybrid URANS-LES methods for flow simulation in the ship stern area," *Ocean Eng.*, vol. 38, no. 16, pp. 1831–1838, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.oceaneng.2011.09.024.
- [2] T. Xing, S. Bhushan, and F. Stern, "Vortical and turbulent structures for KVLCC2 at drift angle 0, 12, and 30 degrees," *Ocean Eng.*, vol. 55, pp. 23–43, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.oceaneng.2012.07.026.
- [3] P. R. Spalart, W. H. Jou, M. K. Strelets, and S. R. Allmaras, "Comments on the feasibility of LES for wings and on a hybrid RANS/LES approach," *Adv. DNS/LES*, vol. 1, no. JANUARY, pp. 4–8, 1997, Accessed: 03-Apr-2020. [Online]. Available: <https://ci.nii.ac.jp/naid/20001674527/>.
- [4] F. S. Pereira, L. Eça, and G. Vaz, "Verification and Validation exercises for the flow around the KVLCC2 tanker at model and full-scale Reynolds numbers," *Ocean Eng.*, vol. 129, pp. 133–148, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.11.005.
- [5] O. Hizir, M. Kim, O. Turan, A. Day, A. Incecik, and Y. Lee, "Numerical studies on non-linearity of added resistance and ship motions of KVLCC2 in short and long waves," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 143–153, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2018.02.015.
- [6] H. Islam and C. Guedes Soares, "Uncertainty analysis in ship resistance prediction using OpenFOAM," *Ocean Eng.*, vol. 191, p. 105805, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.02.033.
- [7] J. Tu, G. H. Yeoh, and C. Liu, *Computational fluid dynamics: A practical approach*. 2018.
- [8] Z. J. Zhai, Z. Zhang, W. Zhang, and Q. Y. Chen, "Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by cfd: Part 1—summary of prevalent turbulence models," *HVAC R Res.*, vol. 13, no. 6, 2007, doi: 10.1080/10789669.2007.10391459.
- [9] Z. Zhang, W. Zhang, Z. J. Zhai, and Q. Y. Chen, "Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part 2—comparison with experimental data from literature," *HVAC R Res.*, vol. 13, no. 6, 2007, doi: 10.1080/10789669.2007.10391460.
- [10] G. Yu, B. Yu, S. Sun, and W. Q. Tao, "Comparative study on triangular and quadrilateral meshes by a finite-volume method with a central difference scheme," *Numer. Heat Transf. Part B Fundam.*, vol. 62, no. 4, 2012, doi: 10.1080/10407790.2012.709416.
- [11] R. Duan *et al.*, "Mesh type and number for the CFD simulations of air distribution in an aircraft cabin," *Numer. Heat Transf. Part B Fundam.*, vol. 67, no. 6, 2015, doi: 10.1080/10407790.2014.985991.
- [12] H. A. Warda, I. G. Adam, A. B. Rashad, and M. W. Gamal-Aldin, "Bi-directional integral pumping devices for dual mechanical seals: Influence of mesh type on accuracy of numerical simulations," *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, no. 4, 2018, doi:

10.1016/j.aej.2017.11.013.

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] C. M. Lee, J. H. Seo, J. W. Yu, J. E. Choi, and I. Lee, "Comparative study of prediction methods of power increase and propulsive performances in regular head short waves of KVLCC2 using CFD," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 883–898, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2019.02.001.
- [18] 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: 02-Apr-2020. [Online]. Available: <https://www.ingentaconnect.com/content/sname/jsr/2003/00000047/00000001/art00003>.
- [19] P. Sagaut, S. Deck, and M. Terracol, *Multiscale and Multiresolution Approaches in Turbulence*. IMPERIAL COLLEGE PRESS, 2006.
- [20] P. SPALART and S. ALLMARAS, "A one-equation turbulence model for aerodynamic flows," in *30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 1992, no. 1, pp. 5–21, doi: 10.2514/6.1992-439.
- [21] W. P. Jones and B. E. Launder, "The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence," *Int. J. Heat Mass Transf.*, 1972, doi: 10.1016/0017-9310(72)90076-2.
- [22] B. Launder, "Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 1, no. 2, pp. 131–137, Dec. 1974, doi: 10.1016/0735-1933(74)90024-4.
- [23] "Wilcox's k-omega model - CFD-Wiki, The free CFD reference." Accessed: 27-May-2020. [Online]. Available: https://www.cfd-online.com/Wiki/Wilcox%27s_k-omega_model.
- [24] D. C. Wilcox, "Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models," *AIAA J.*, 1988, doi: 10.2514/3.10041.
- [25] F. R. Menter, "Zonal two equation κ - ω turbulence models for aerodynamic flows," in *AIAA 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference*, 1993.
- [26] 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.
- [27] CFD Online, "k-omega SST model -- CFD-Wiki, the free CFD reference," 2011. https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model (accessed Apr. 17, 2022).
- [28] N. Abbas, "Determination of Unsteady Loadings on Marine Propellers Using Hybrid URANS/LES Methods," 2016.
- [29] J. Gorski, "Marine Vortices and Their Computation," *Tech. Rep.*, 2003, Accessed: 03-Oct-2021. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Marine-Vortices-and-Their-Computation-Gorski/beb3bde72b31ad689121c78b01f1433052d22769>.