

The Influence of Drift Angle on the Flow Field around KVLCC2 Tanker Using CFD

Dr. Nawar Abbas*
Nermin Al-Aji**

(Received 9 / 11 / 2021. Accepted 22 / 2 / 2022)

□ ABSTRACT □

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

Reynolds Averaged Navier Stoke method (RANS) and $k - \omega$ SST model were used to solve Navier Stokes equations, where the equations were approximated using Finite Volumes Method (FVM). The program ANSYS was used in this research.

The flow around the tanker under different sailing conditions (at straight course and at different drift angles) were performed, the resistance and moments affecting the tanker during sailing was calculated as well the pressure distribution on the hull surface. The numerical results were compared with experimental data. This Comparison showed how much CFD technology is accurate in calculation of this type of flow cases.

Keywords: drift angle, 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

** Master Student, Department of Maritime Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria Email: nrmeeen828@gmail.com

تأثير زاوية الانحراف على حقل التدفق حول السفينة الناقلة KVLCC2 باستخدام CFD

د. نوار عباس*

نرمين العجي**

(تاريخ الإيداع 9 / 11 / 2021. قُبِلَ للنشر في 22 / 2 / 2022)

□ ملخص □

في هذا البحث تم تحليل ودراسة التدفق حول بدن نموذج السفينة الناقلة من نوع KVLCC2 وذلك باستخدام ديناميك الموائع الحسابية CFD، حيث تم التركيز بشكل أساسي على التدفق خلف بدن السفينة في منطقة عمل الرفاص لما له من أهمية في معرفة ظروف عمل الرفاص.

تم الانطلاق في الحل من معادلات نافيه - ستوكس، والتي تم حلها باستخدام طريقة الـ RANS (Reynolds Averaged Navier Stoke)، والموديل الرياضي $k - \omega$ SST، حيث تم تقريب المعادلات جبرياً باستخدام طريقة الحجم المنتهية وذلك باستخدام برنامج الـ ANSYS.

تم حساب التدفق حول بدن السفينة في ظروف إبحار مختلفة، حيث تم إجراء الحسابات أثناء إبحار السفينة إلى الأمام مباشرة وبزاويا انحراف مختلفة، كما تم حساب المقاومات والعزوم المؤثرة على السفينة أثناء الإبحار وتوزع حقل الضغط على بدن السفينة. تم مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية والمقارنة أظهرت مدى دقة CFD في حساب مثل هذا النوع من الجريانات، وبالتحديد دراسة تأثير زاوية الانحراف على حقل التدفق المتشكل حول وخلف بدن السفينة الناقلة.

الكلمات المفتاحية: زاوية الانحراف، السفينة الناقلة KVLCC2، CFD - ديناميك 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.

الإيميل: noarabbas@yahoo.com

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

الإيميل: nrmeen828@gmail.com

مقدمة:

يعتبر نموذج السفينة الناقلة KVLCC2 من أكثر النماذج استخداماً في حسابات السفن الرقمية، وذلك بسبب توفر الكثير من النتائج التجريبية لهذا النموذج، وهذا أحد أهم أسباب اختيارنا لهذا النوع من النماذج. تعتبر الدراسات Lee et al. عام 2003 [1] و Kume et al. عام 2006 [2] من أهم الدراسات التي تم فيها تعميم النتائج التجريبية لهذا النوع من السفن. حيث سيتم اعتماد النتائج في هاتين الدراستين من أجل التأكد من دقة النتائج الرقمية.

في عام 2011 قام البروفسور Kornev [3] وفريق البحث الخاص به في جامعة روستوك في ألمانيا بتعميم النتائج التي حصلوا عليها لحساب التدفق حول بدن السفينة الناقلة KVLCC2، وتم فيها حساب حقل السرعة وحقل الطاقة الحركية خلف السفينة في مستوي عمل الرافص، كما وتم تقدير الدفع من خلال حقل السرعة الذي تم الحصول عليه. قامت هذه المجموعة أيضاً بتطوير طريقة هجينة جديدة لإغلاق معادلات رينولدز، نتائج هذه الطريقة أعطت تطابقاً جيداً مع النتائج التجريبية.

قام كل من Xing وآخرون في بحثهم الذي أجروه في عام 2012 [4] بحساب التدفق حول السفينة الناقلة KVLCC2 باستخدام الموديل الرياضي الهجين (DES, Detached Eddy Simulation)، والذي تم تطويره من قبل Spalart وآخرون عام 1997 [5]، وقد سمي الموديل الرياضي بهذا الاسم وذلك لأنه في المنطقة القريبة من الجدار والتي يتواجد فيها دوامات صغيرة يتم استخدام طريقة الـ URANS، بينما في المنطقة البعيدة عن الجدار حيث تتواجد الدوامات الكبيرة يتم استخدام طريقة الـ LES. تم في هذه الدراسة حساب بروفايل السرعة والطاقة الحركية في مستوى عمل الرافص وذلك في حالة السفينة التي تتحرك إلى الأمام مباشرة كذلك السفينة تتحرك بزوايا انحراف، كما وتم أيضاً دراسة الدوامات التي تتشكل خلف بدن السفينة بشكل تفصيلي.

في عام 2017 قام Pereira et al. [6] بتحديد مقدار الخطأ في الحل الرقمي للتدفق حول السفينة الناقلة KVLCC2 لكل من النموذج والسفينة الحقيقية كما تم أيضاً حساب كل من حقل السرعة والطاقة الحركية في مستوى عمل الرافص، وكذلك حساب معامل المقاومة اللابيدي.

في عام 2019 استطاع الباحث Lee وآخرون [7] بالتنبؤ بالعلاقة بين السرعة والطاقة اللازمة لعملية الدفع، وذلك من خلال اجراء الحسابات على السفينة الناقلة من النوع KVLCC2 بوجود وبدون وجود الأمواج، تم أخذ التدفق ثنائي الطور بعين الاعتبار أثناء عملية الدراسة، كما وتم دراسة تأثير الأمواج على الدفع الناتج عن الرافص.

إجراء الحسابات الرقمية لنماذج السفن أمرٌ شائعٌ جداً وبالأخص بعد التطور الكبير في الحواسيب، فمثلاً في الدراسة التي قام بها الباحث Hizir وآخرون عام 2019 [8] تم حساب المقاومة المضافة (added resistance) للسفينة الناقلة KVLCC2 مع أطوال أمواج مختلفة وذلك باستخدام CFD. في البداية تم اختبار جودة الشبكة الحسابية من خلال اختبار العديد من الشبكات مع أمواج مختلفة الطول وذلك من أجل الحصول على أفضل شبكة رقمية لإجراء حسابات الـ CFD، وفي الخطوة التالية تم إجراء الحسابات الرقمية وتم تحديد قيمة المقاومة الإضافية، كما تم تحديد الحركة العمودية للسفينة بفعل الأمواج القصيرة والطويلة. في هذه الدراسة تم التأكد من النتائج النهائية من خلال مقارنتها مع النتائج التجريبية، والتي أظهرت تطابق جيد مع النتائج التجريبية.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف هذا البحث إلى دراسة التدفق حول بدن السفينة الناقلة KVLCC2 وخلفها عند ظروف ابحار مختلفة والذي يعتبر أمراً مهماً جداً قبل عملية بناء السفينة، وذلك من أجل معرفة المقاوّمات العزوم والإجهادات التي يتعرض لها بدن السفينة أثناء العمل في الظروف البحرية المختلفة (الإبحار إلى الأمام مباشرة، مع زوايا انحراف وأثناء المناورة). كما يساعد هذا البحث في المعرفة الدقيقة للتدفق القادم من بدن السفينة إلى منطقة عمل الرفاص وهذا يساعد بشكل كبير في تقدير الأحمال المضطربة التي من الممكن أن يتعرض لها الرفاص أثناء العمل خلف بدن السفينة، والتي تسبب اهتزازات في جسم الرفاص وتنتقل بدورها إلى بدن السفينة.

طرائق البحث ومواده:

الدراسة في هذا البحث تعتمد على حل المعادلات الناظمة للتدفقات المعقدة والتي هي معادلات نافيه ستوكس من خلال استخدام برنامج الـ ANSYS. المجسم الهندسي للسفينة المراد دراستها متوفر كصيغة¹ .iges.

الأبعاد الهندسية

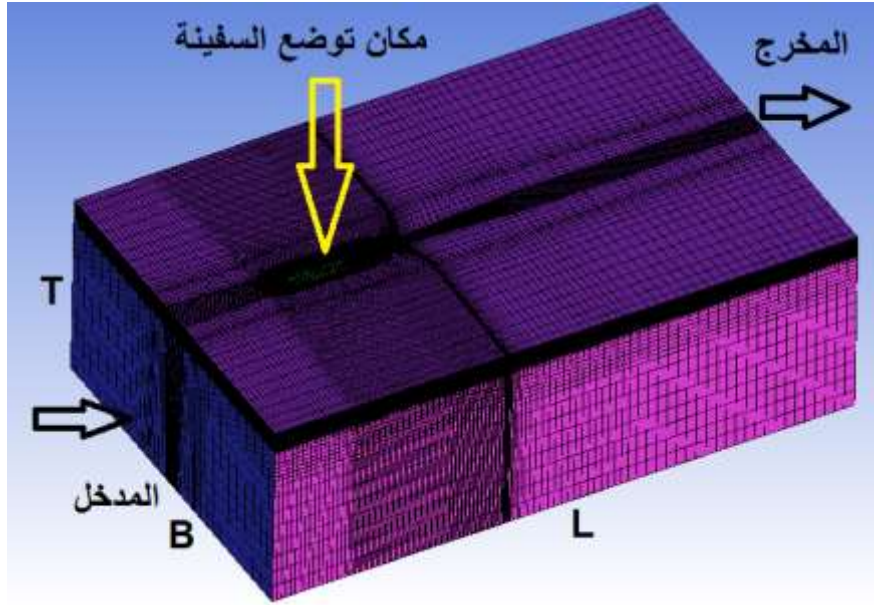
تم التركيز في هذه الدراسة على حساب السفينة لوحدها بدون الملحقات، إن المجال الحسابي الذي تم استخدامه في هذه الدراسة هو متوازي مستطيلات وله الأبعاد الهندسية التالية:

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

حيث أن L_{pp} هو الطول بين المتعامدين للسفينة المدروسة. L, B, T هي طول وعرض وارتفاع المجال الحسابي المدروس وهي موضحة في الشكل 1. وعلى اعتبار أننا سنقوم في هذا البحث بمقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية فلقد تم استخدام السفينة الناقلة KVLCC2 بمقياس $\frac{1}{64.4}$ ، وهو نفس المقياس المستخدم في التجربة، بهدف إجراء مقارنة مباشرة مع النتائج التجريبية المتوفرة.

¹ المجسم الهندسي للسفينة وملحقاتها متوفر على الموقع التالي:

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



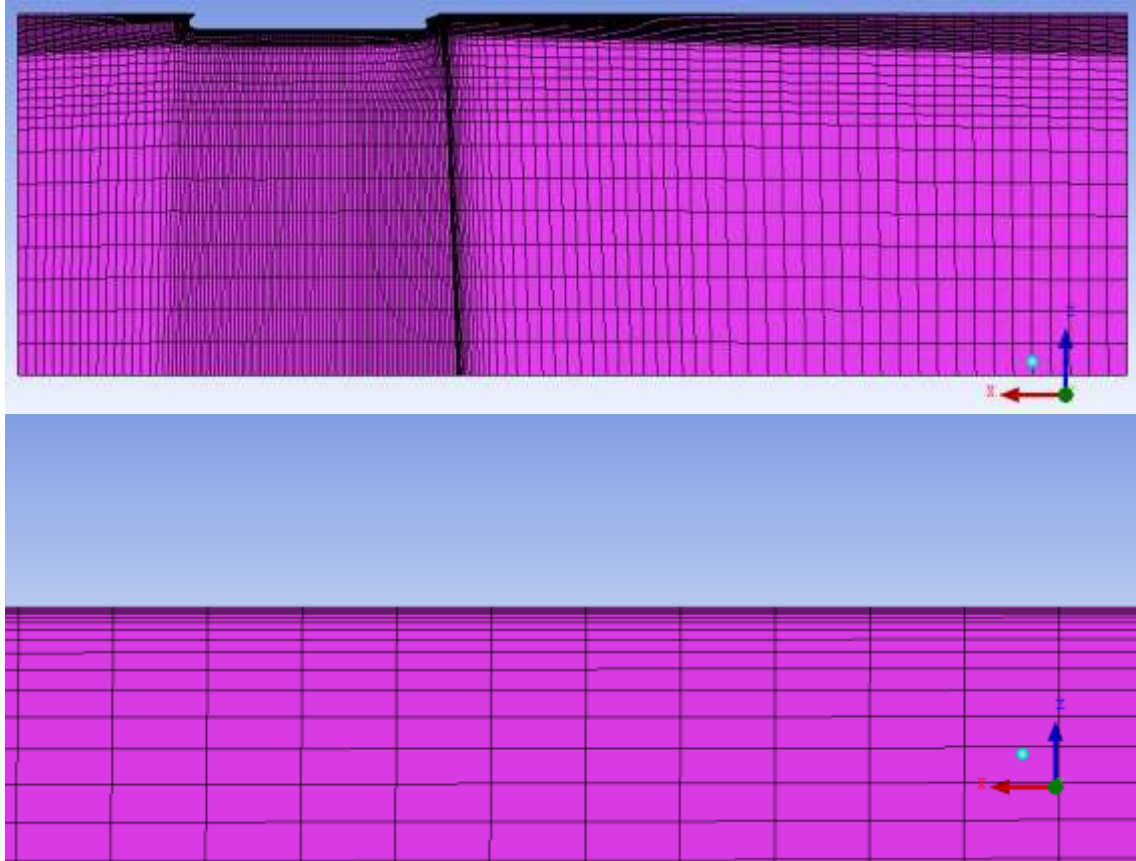
الشكل 1: المجال الحسابي المدروس، في الأعلى المجال الحسابي الذي تم استخدامه، في الأسفل صورة السفينة الناقلة KVLCC2. الجدول 1 يوضح الأبعاد الهندسية للنموذج الذي تم استخدامه في هذا البحث.

الجدول 1: الأبعاد الهندسية للنموذج ذو المقياس $Scale = \frac{1}{64.4}$.

أبعاد النموذج المستخدم	الواحدة	الرمز	الأبعاد الرئيسية
4.9700	m	L_{pp}	الطول بين العمودين
0.9008	m	B	عرض السفينة
0.3231	m	d	الغاطس
6.5597	m^2	S_w	مساحة السطح المبلل دون الملحقات
0.8098	---	C_b	معامل امتلاء بدن السفينة
0.1420	---	Fr	رقم فرود
3.95×10^6	---	Re	رقم رينولدز

البيئة الرقمية واعتباراتها

في هذا البحث تم إجراء الحسابات للمائع حول بدن السفينة الناقلة KVLCC2، حيث تم وضع السفينة ضمن قناة وتم إدخال التدفق إلى القناة بسرعة مساوية لسرعة السفينة (القناة لها شكل متوازي المستطيلات المبين في الشكل 1)، تم إهمال مقاومة الأمواج وذلك لأن رقم فرود صغير وعليه فإن مقاومة الأمواج صغيرة مقارنة بقيمة المقاومة الكلية للسفينة وبالتالي يمكن إهمالها.

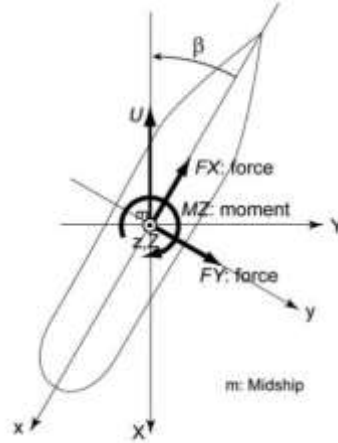


الشكل 2: تقسيم المجال الحسابي المدروس إلى خلايا على شكل متوازي مستطيلات.

من أجل حل التدفق بشكل صحيح في هذه القناة لابد من تقسيم القناة إلى خلايا صغيرة، ولهذا السبب نقوم بتقسيمها إلى مجموعة من الخلايا على شكل متوازي المستطيلات، هذا النوع من الشبكات يسمى بالشبكات المنتظمة، وهي تعطي أفضل النتائج بالمقارنة مع الأنواع الأخرى من الشبكات الرقمية، إلا أنها تحتاج الكثير من الوقت من أجل بنائها [9], [10]. الشكل 1 يوضح الشبكة الرقمية التي تم استخدامها، والذي يظهر فيها كيفية تقسيم المجال الحسابي إلى عدد كبير من الخلايا (عدد الخلايا التي تم استخدامها هو مليون خلية حسابية لكامل السفينة)، وعلى اعتبار أن تدرج السرعة في الاتجاه العمودي على السطح في منطقة الطبقة الحدية كبير جداً، فقد تم زيادة عدد الخلايا بشكل كبير في المنطقة القريبة من جدار السفينة لأنها المنطقة التي تتشكل فيها الطبقة الحدية، الشكل 2 الصورة في الأعلى توضح مقطع طولي في مستوى التناظر للشبكة حيث تظهر السفينة في الجزء العلوي اليساري، ويظهر تنعيم الخلايا في المنطقة المجاورة لبدن السفينة، الشكل 2 الصورة في الأسفل توضح تنعيم الخلايا بجوار البدن، نسبة التنعيم التي تم استخدامها هي 1.2.

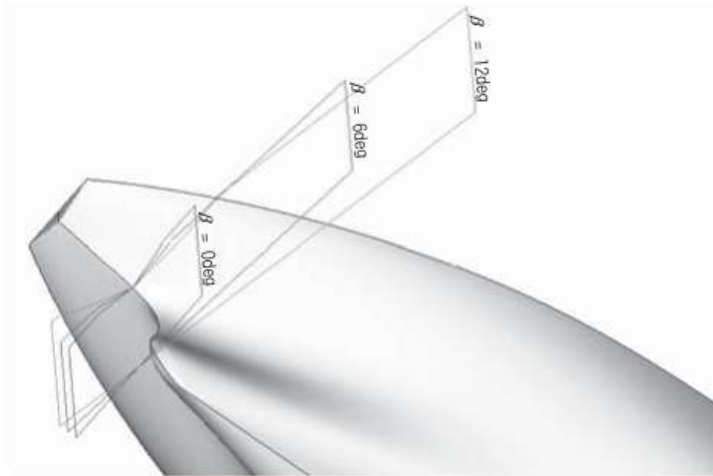
النتائج والمناقشة:

أحد أهم أهداف هذا البحث هو معرفة التغيرات التي تحدث في حقل التدفق حول بدن السفينة، وبالأخص في منطقة عمل الرفاص عند بدء دوران السفينة، وكما ذكرنا سابقاً، فإن الدراسة التجريبية المتوفرة عن السفينة KVLCC2 مع زاوية انحراف هي دراسة Kume et al. 2006 [2].



الشكل 3: نظام الاحداثيات المستخدم في التجربة [2].

وعليه تم دراسة ثلاثة زوايا انحراف مختلفة لهذا النموذج وهي (0، 6 و 12 درجة). الشكل 3 يوضح نظام الإحداثيات الذي تم استخدامه في التجربة التي أجراها Kume et al، ولقد تم اعتماد نفس نظام الإحداثيات في الحسابات الرقمية. عند كل زاوية انحراف سيتم عرض وتحليل كل من القوى والعزوم المؤثرة على السفينة وحقل السرعة في مستوي الرفاص وكذلك حقل الضغط على سطح السفينة ونظام الدوامات عند الجزء الخلفي من بدن السفينة. الشكل 4 يوضح المستوي الذي تم إجراء القياسات عنده من أجل كل زاوية انحراف ($\beta = 0^\circ, 6^\circ, 12^\circ$) حيث تم اعتماد نفس المستويات في الحسابات الرقمية.



الشكل 4: مستوي الرفاص الذي تم فيه القياس عند كل زاوية انحراف [2].

الزاوية $\beta = 0^\circ$

القوى والعزوم المؤثرة على السفينة

لقد تم حساب معاملات القوى والعزم وفق العلاقات التالية [2]:

$$C_X = \frac{F_X}{\frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot L_{pp} \cdot d} \quad (1)$$

$$C_Y = \frac{F_Y}{\frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot L_{PP} \cdot d}$$

$$C_N = \frac{M_Z}{\frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot L_{PP}^2 \cdot d}$$

حيث أن F_X, F_Y, M_Z القوى باتجاه المحور X والمحور Y والعزم حول المحور Z على التوالي. ρ, L_{PP}, d, U كثافة الماء، الطول بين المتعامدين، الغاطس وسرعة السفينة على التوالي، C_X, C_Y, C_N معاملات القوة F_X والقوة F_Y والعزم M_Z .

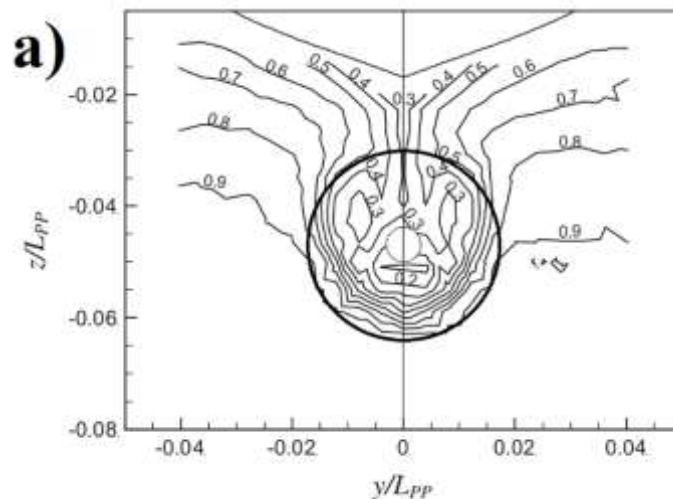
الجدول 2: القوى والعزوم المؤثرة على السفينة في حالة $\beta = 0^\circ$.

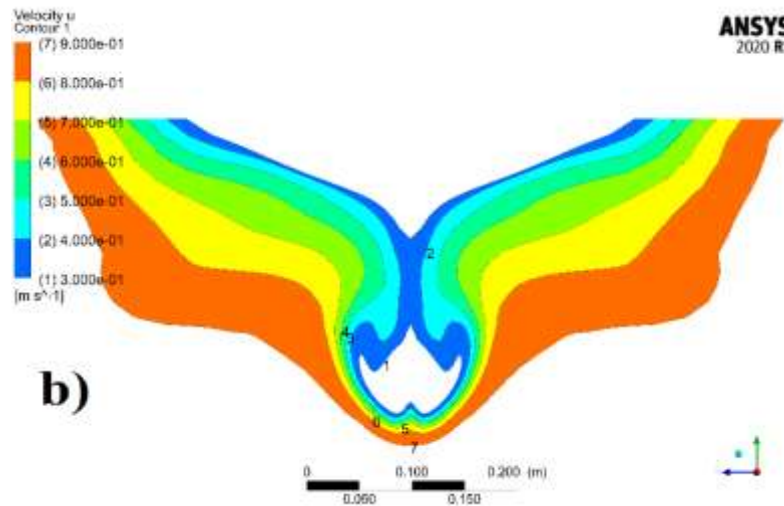
$\beta = 0^\circ$	Exp	CFD	Error %
C_X	0.0175	0.017	-2.85
C_Y	0	0	0
C_N	0	0	0

الجدول 2 يوضح القوى المؤثرة على السفينة بدون زاوية انحراف، وكما يتضح من الجدول هناك تطابق كبير بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية، وأيضاً يمكننا ملاحظة أنه خلال إبحار السفينة إلى الأمام مباشرة فإن القوى الجانبية والعزم حول المحور الشاقولي تكون معدومة.

حقل السرعة في مستوي الرفاص

لابد في بادئ الأمر من عرض نتائج الزاوية 0 درجة لهذا النموذج وذلك لمعرفة التغيرات التي تحدث في حقل التدفق عند بدء دوران السفينة. الشكل 5 يوضح بروفائل السرعة في مستوي الرفاص، (a) النتيجة التجريبية، (b) النتيجة الرقمية. بمقارنة النتيجة مع بعضهما البعض نلاحظ مقدار التطابق الكبير بينهما.





الشكل 5: حقل السرعة في مستوى الرفاص مع $\beta = 0^\circ$ ، (a) النتيجة التجريبية [2]، و (b) النتيجة الرقمية.

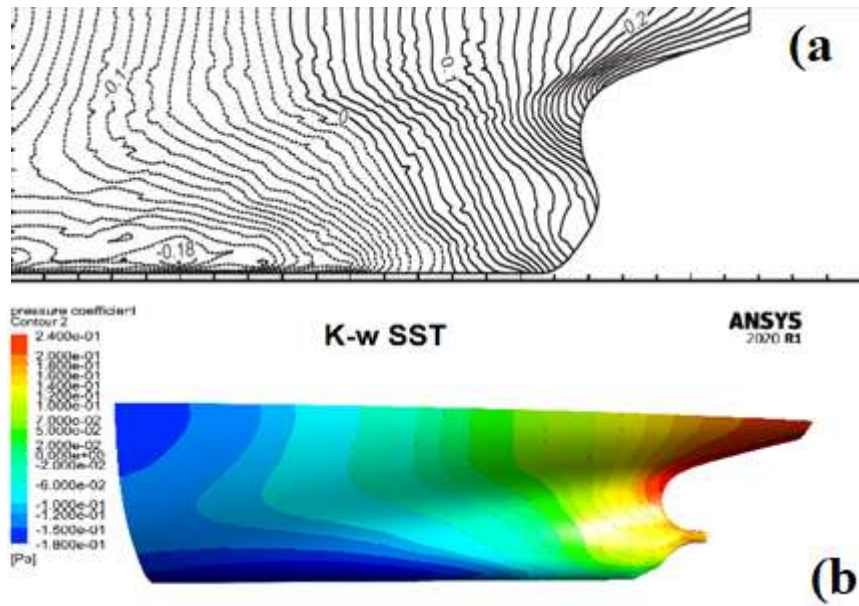
وعلى الرغم من أن النتيجة الرقمية جيدة جداً بالمقارنة مع النتيجة التجريبية إلا أنه بالتركيز أكثر ضمن دائرة قرص الرفاص نلاحظ أن القيمة 0.3 (والتي تمثل نقاط التدفق التي سرعتها 0.3) لا تحقق تطابق جيد جداً مع التجربة مثل بقية القيم، ويعود السبب إلى أمرين أساسيين، الأول هو أن هذه المنطقة يتشكل فيها دوامات كبيرة ناتجة عن الجزء الأنبوبي الخلفي من مؤخرة السفينة (حيث أن سفن ناقلات النفط وسفن الحمولات السائبة تتميز بأن الجزء الخلفي السفلي منها يأخذ شكل الأنبوب، وهو السبب الأساسي في تشكل مثل هذا النوع من الدوامات)، انظر الشكل 7، الشرح التفصيلي لتشكيل هذا النوع من الدوامات يمكن إيجاده في بحث Gorski، [11]. وهذا يعني أنه في هذه المنطقة يوجد الكثير من الاضطرابات وتعتبر طريقة الـ RANS غير قادرة على حل الاضطرابات بشكل جيد، ويجب استخدام طرق أخرى مثل طريقة الـ Large Eddy Simulation. السبب الثاني والمهم في عدم القدرة على إيجاد حل دقيق لحقل السرعة في هذه المنطقة، أن عدد الخلايا الذي تم استخدامه هو مليون خلية فقط لكامل السفينة، وذلك بسبب الإمكانيات الحاسوبية المحدودة.

حقل الضغط على سطح السفينة

الشكل 6 يوضح توزيع معامل الضغط عند مؤخرة السفينة، الشكل 6-a يوضح النتيجة التجريبية من عمل Kume et al. 2006 [2]، و الشكل 6-b يمثل النتيجة الرقمية. تم حساب معامل الضغط وفق العلاقة التالية:

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

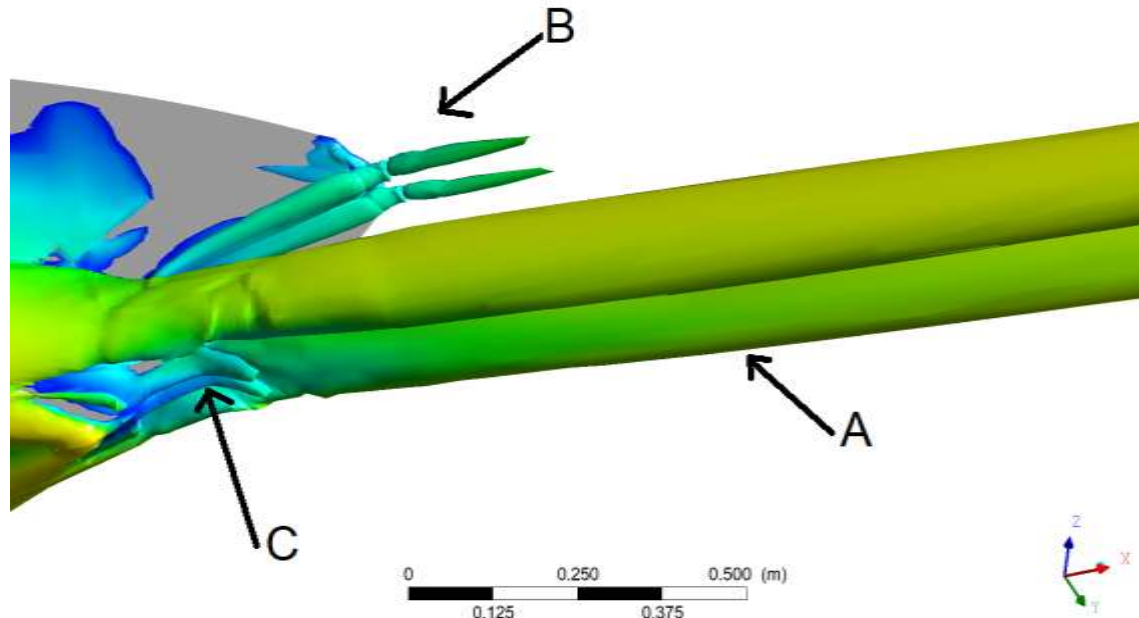
حيث أن P, P_0 هما الضغط الجوي والضغط على سطح السفينة على التوالي، و ρ, U هما سرعة السفينة وكثافة الماء. بمقارنة النتيجة الرقمية مع النتيجة التجريبية نلاحظ أن نتيجة الموديل $k - \omega$ SST تعطي نتائج جيدة لحقل الضغط بالمقارنة مع النتيجة التجريبية. وكما هو واضح من الشكل 6، يمكننا ملاحظة منطقة الضغط المرتفع عند أعلى مؤخرة السفينة، بينما يتشكل منطقة ضغط منخفض على الجهة السفلية من جانبي مؤخرة السفينة حيث نلاحظ أن معامل الضغط ينخفض إلى القيمة -0.18.



الشكل 6: حقل الضغط عند مؤخرة السفينة، (a) النتيجة التجريبية [2]، و (b) النتيجة الرقمية .

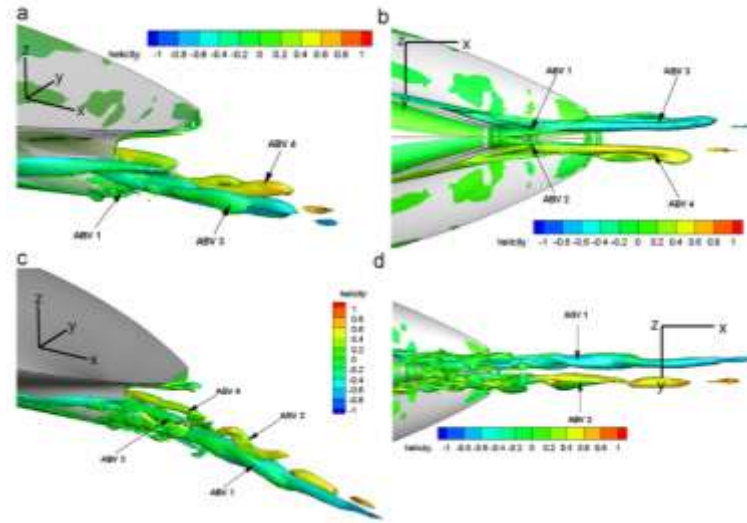
نظام الدوامات خلف بدن السفينة

يتم تصميم أبدان السفن لتكون انسيابية قدر الإمكان، وذلك لتفادي عملية انفصال الطبقة الحدية، وبالتالي التقليل من المقاومة قدر الإمكان. إن دراسة نظام الدوامات المتشكل حول بدن السفن يعتبر أمراً غاية في الأهمية ويحظى بالكثير من الاهتمام في مجال بناء السفن، وذلك لما يسببه من عدم تجانس في التدفق الذي يدخل إلى قرص الرفاص، وهذا بدوره يؤدي إلى اهتزازات في الرفاص والتي تنتقل إلى مؤخرة السفينة ومنها إلى بدن السفينة، بالإضافة إلى الدور الكبير الذي تلعبه هذه الدوامات في تشكل المقاومات والعزوم المؤثرة على السفينة.



الشكل 7: النتيجة الرقمية للموديل k – ω SST للدوامات المتشكلة خلف بدن السفينة KVLCC2، بدون زاوية انحراف.

كما هو واضح في الشكل 7، يتشكل خلف بدن السفينة المدروسة دوامتين طويلتين ضخمتين (A)، بالإضافة إلى دوامتين صغيرتين عند السطح (B)، ودوامتين صغيرتين عند منطقة تركيب محور الرفاص (C). الدوامات التي عند السطح تتأثر بشكل كبير بالسطح الحر وبالأمواج التي تتشكل أثناء الإبحار. أكثر الدوامات أهمية وتأثيراً، هما الدوامتين الضخمتين (A)، وذلك لأنهما يدخلان بشكل مباشر إلى منطقة عمل الرفاص. تتشكل هذه الدوامات الضخمة خلف الجزء الأنوبي من السفن الناقلة (Tankers) وسفن الصب (Bulk Carriers). الشكل 8 يوضح الدوامات الضخمة المتشكلة خلف بدن السفينة الناقلة KVLCC2 وفقاً لعمل [4] Xing et al. (2012).

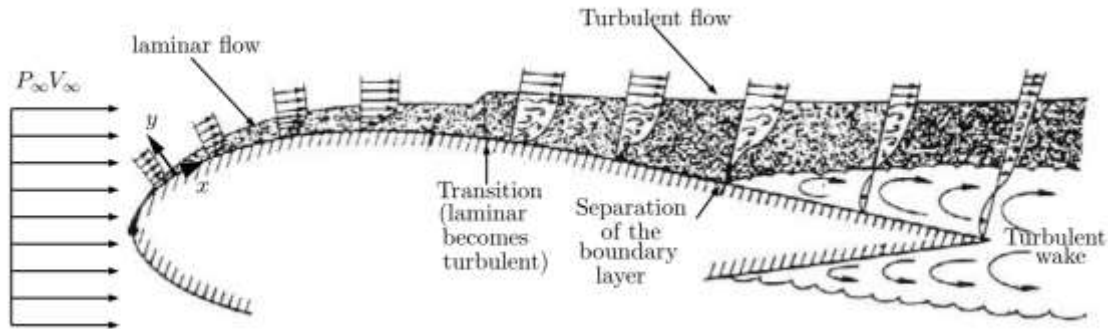


الشكل 8: الدوامات المتشكلة خلف بدن السفينة KVLCC2 والمأخوذة من عمل [4] Xing et al. 2012.

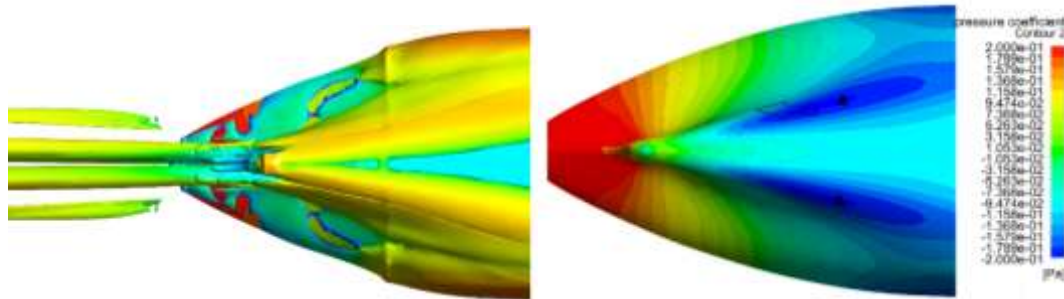
كما يتضح من هذا الشكل يوجد دوامتين ضخمتين خلف بدن السفينة (مثل الدوامتين A) بالإضافة إلى الدوامات الصغيرة التي تتشكل بالقرب من السطح وعند محور الرفاص (مثل الدوامات B, C)، بالمقارنة بين الشكلين نلاحظ وجود تطابق كبير بين النتيجتين، والفرق الأساسي بين النتيجتين، هو أنه في عمل Xing et al. تم استخدام طريقة الـ LES والطرق الهجينة التي تجمع طريقة الـ URANS مع طريقة الـ LES مع عدد كبير جداً من الخلايا (مئات الملايين من الخلايا)، وبالتالي تم حل الاضطرابات بشكل جيد جداً.

كما نعلم فإن السبب الأساسي لتشكل الدوامات هو انفصال الطبقة الحدية عن جسم السفينة، والذي يحدث بسبب زيادة الاضطرابات في التدفق. إن الرقم الأساسي المميز للاضطراب هو رقم رينولدز، حيث تكون قيمته عند مقدمة السفينة مساوية للصفر ($Re = \frac{u \cdot x}{\nu}$ ، حيث أن x هو الاحداثي الطولي، انظر الشكل 9) وتزداد قيمته كلما اتجهنا باتجاه المؤخرة حتى يحقق القيمة الحرجة، عند هذه القيمة تحدث عملية الانتقال من التدفق الصفحي إلى التدفق المضطرب، وبالاتجاه أكثر باتجاه المؤخرة تزداد قيمته أكثر وعند النقطة التي يتحقق فيها ($\frac{\partial u_x}{\partial y}|_{y=0} = 0$) يحدث انفصال الطبقة الحدية عن البدن. خلف هذه المنطقة باتجاه التدفق تكون الاضطرابات كبيرة جداً وتتشكل سرعات سالبة تتجه عكس التدفق وتظهر مناطق دوران عكسية للتدفق وفي هذه المنطقة تتحقق الشروط التالية ($\frac{\partial P}{\partial x} > 0$ and $\frac{\partial u_x}{\partial y}|_{y=0} < 0$) [12]. الشكل 10 يوضح المنطقة التي يتحقق فيها شروط انفصال الطبقة الحدية لحالة السفينة التي تتحرك بدون زاوية انحراف، حيث نلاحظ في هذا الشكل المناطق A والتي فيها قيمة الضغط سالبة، وباتجاه التدفق تصبح $\frac{\partial P}{\partial x} > 0$

هاتين المنطقتين هما بداية تشكل الدوامتين الضخمتين اللتان تتشكلان خلف بدن السفينة عند الإبحار بدون زاوية انحراف، الشكل 10 يوضح هاتين الدوامتين.



الشكل 9: تطور الطبقة الحدية على طول جناح رافع [13].



الشكل 10: منطقة انفصال الطبقة الحدية عند مؤخرة السفينة بدون زاوية انحراف.

الزاوية $\beta = 12^\circ$

القوى والعزوم المؤثرة على السفينة

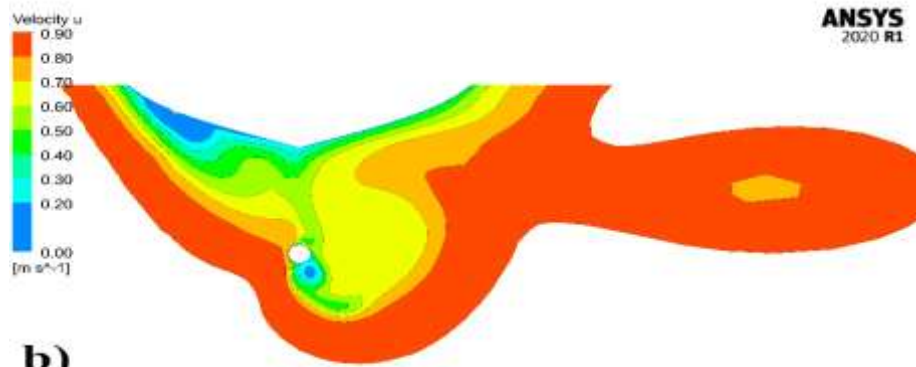
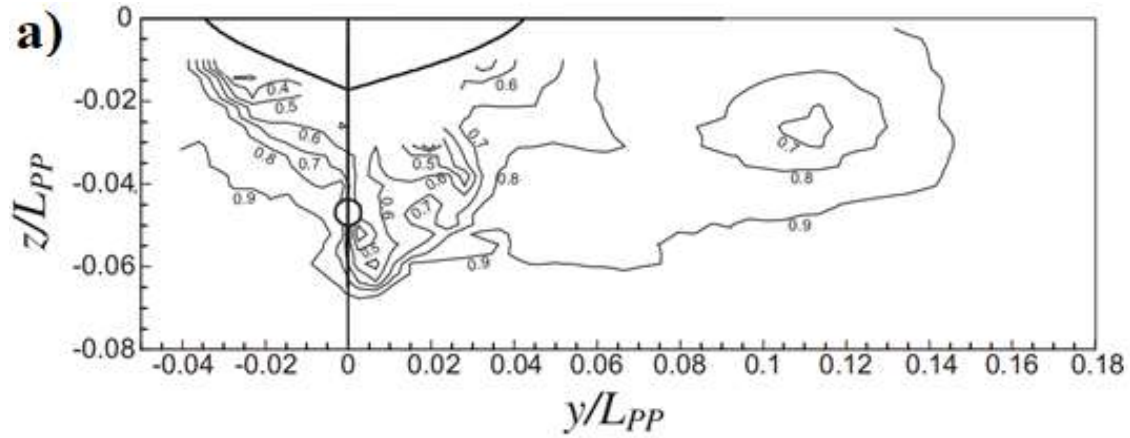
الجدول 3 يوضح القوى والعزوم المؤثرة على السفينة عند زاوية الانحراف 12 درجة. في البداية يمكن ملاحظة مقدار التطابق الكبير بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية لكل من معامل القوة الطولية والعرضية، وكما في الحالة السابقة فإن المقاومة الطولية باتجاه المحور X لا تزداد كثيراً عن حالة السفينة بدون زاوية انحراف، إلا أن المقاومة العرضية والعزم حول المحور Z يزدادان بشكل كبير، وهذا يؤكد أنه مع زيادة دوران السفينة تزداد القوى العرضية والعزوم المؤثرة على السفينة بشكل كبير.

الجدول 3: القوى والعزوم المؤثرة على لسفينة في حالة $\beta = 12^\circ$.

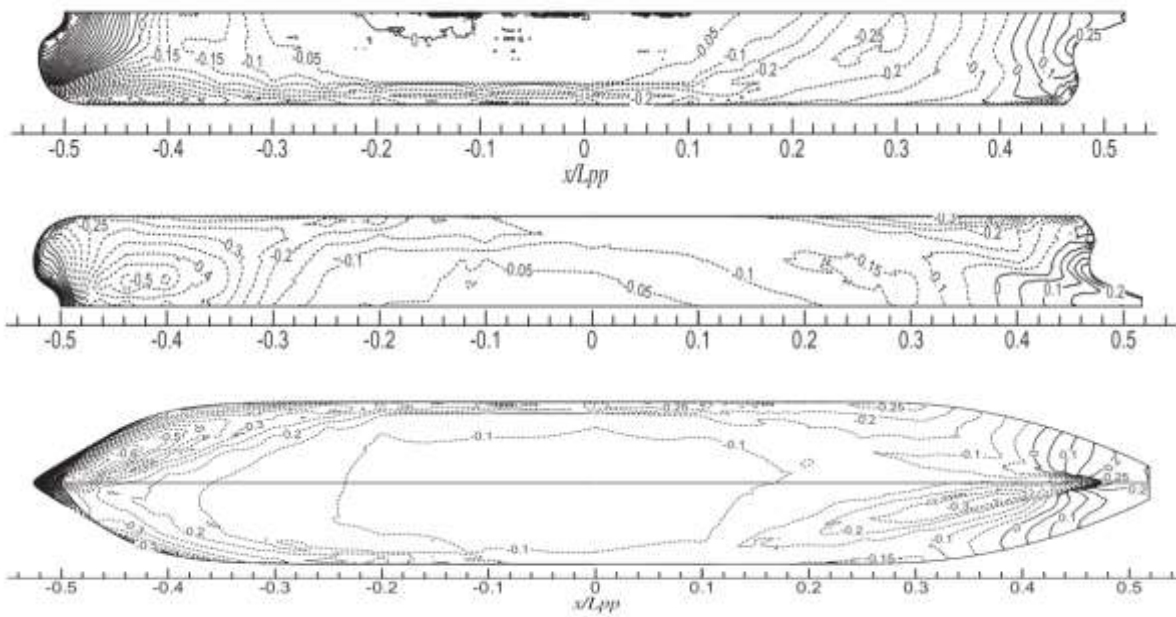
$\beta = 12^\circ$	Exp	CFD	Error %
C_X	0.0174	0.0173	-0.6
C_Y	0.07	0.0693	-1.0
C_N	0.026	0.024	-7.7

حقل السرعة في مستوي الرفاص

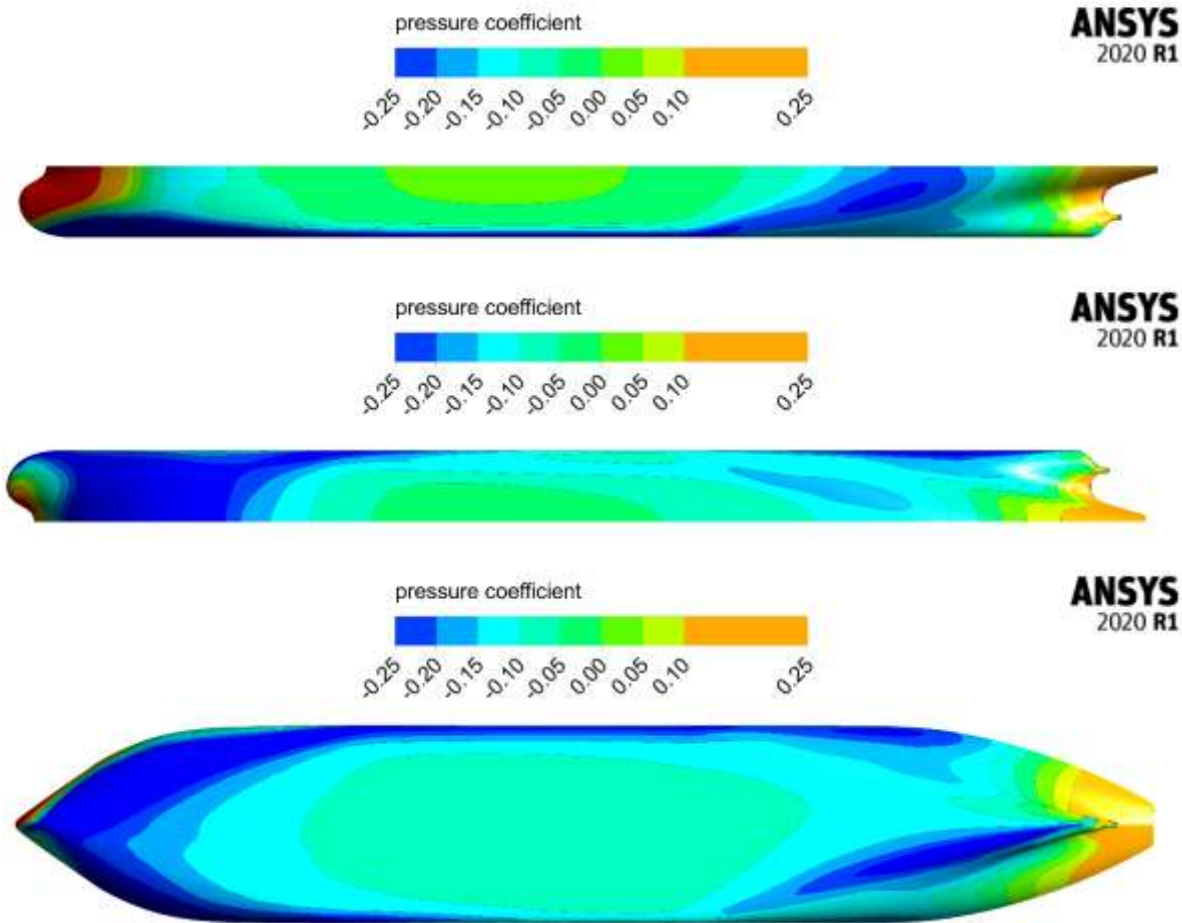
الشكل 11 يوضح بروفائل السرعة في مستوي الرفاص مع زاوية الانحراف $\beta = 12^\circ$ (a) النتيجة التجريبية [2]، (b) النتيجة الرقمية. بمقارنة النتيجتين مع بعضهما البعض نلاحظ مقدار التطابق الكبير بينهما، وهذا يؤكد من جديد فعالية CFD في مسائل التدفق. هنا نلاحظ كيف أنه مع زيادة زاوية الانحراف يزداد عدم التجانس في حقل التدفق ضمن قرص الرفاص والذي يؤدي بدوره إلى زيادة تأرجح الأحمال التي يتعرض لها الرفاص وبالتالي زيادة الاهتزازات في الرفاص وفي بدن السفينة.



الشكل 11: حقل السرعة في مستوى الرفاص مع $\beta = 12^\circ$ ، (a) النتيجة التجريبية [2]، (b) النتيجة الرقمية. حقل الضغط على سطح السفينة



الشكل 12: النتيجة التجريبية لتوزيع معامل الضغط على سطح السفينة عند $\beta = 12^\circ$ ، [2].



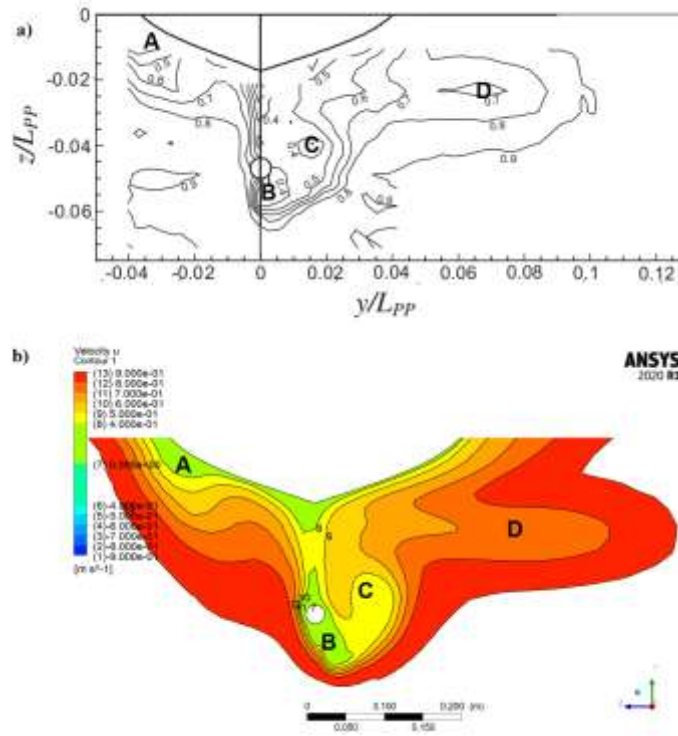
الشكل 13: النتيجة الرقمية لتوزيع معامل الضغط على سطح السفينة عند $\beta = 12^\circ$.

- الشكل 12 يوضح النتيجة التجريبية لتوزيع معامل الضغط على سطح السفينة من الجهة اليسرى واليمنى وعلى القاع، والشكل 13 يوضح النتيجة الرقمية لتوزيع معامل الضغط على سطح السفينة من الجهات الثلاث. بمقارنة الشكلين مع بعضهما البعض نلاحظ مباشرة مقدار التطابق بين النتيجةين. كما يمكننا ملاحظة الآتي:
- الضغط عند المقدمة على الجانب الأيمن يقل مع زيادة زاوية الانحراف، في حين يزداد على الجانب الأيسر.
 - ازدياد الضغط بشكل قليل على الجزء الوسطي من الجانب الأيسر.
 - عند أسفل المؤخرة من الجهة اليمنى نلاحظ انخفاض في الضغط على عكس الجهة الأخرى الذي يزداد الضغط فيها قليلاً.
 - تتشكل منطقة ضغط منخفض أسفل السفينة والتي تزداد مع زيادة زاوية الانحراف.
 - عند مؤخرة السفينة من الجهة العلوية اليسارية تتشكل منطقة ضغط منخفض أيضاً، وتزداد شدتها مع زيادة زاوية الانحراف. السبب الفيزيائي للنتائج السابقة هو أنه في المناطق التي يصطدم بها المائع في بدن السفينة يحدث هبوط فجائي للسرعة والذي يؤدي بدوره إلى زيادة الضغط المحل، وهذا هو السبب في زيادة الضغط على الجانب الأيسر من بدن السفينة وهي المنطقة التي يصطدم بها التدفق في بدن السفينة. في النقطة التي يصطدم بها التدفق ببدن السفينة تكون قيمة السرعة ورقم رينولدز المحلي مساوية للصفر، ومع حركة جزيئات الماء على البدن تزداد

سرعتها ويزداد معها رقم رينولدز، وكلما زادت السرعة كالم قل الضغط، هذا الأمر الذي يفسر انخفاض الضغط على الجانب الأيمن من بدن السفينة، فهو الجانب التي ينفصل فيه التدفق عن بدن السفينة، بعد أن تكون قيمة رينولدز تجاوزت القيمة الحدية.

نظام الدوامات خلف بدن السفينة

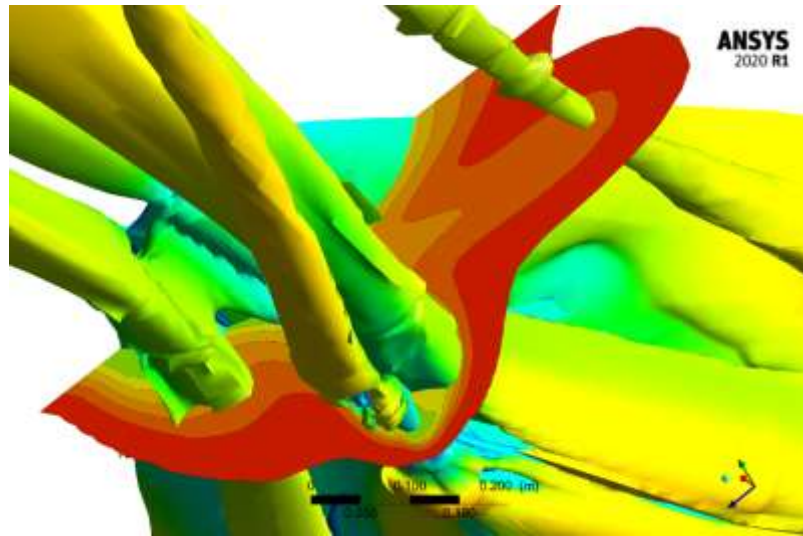
سيتم توضيح نظام الدوامات مع زاوية الانحراف $\beta = 6^\circ$ ومن ثم الزاوية 12° .



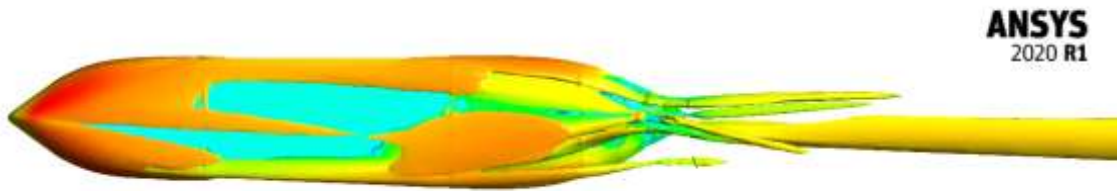
الشكل 14: مراكز الدوامات في بروفيل السرعة، (a) النتيجة التجريبية و(b) النتيجة الرقمية عند الزاوية $\beta = 6^\circ$.

الشكل 14 يوضح بروفيل السرعة ومراكز الدوامات في هذا البروفيل في كل من النموذجي التجريبي والرقمي عند الزاوية $\beta = 6^\circ$. بالتدقيق في بروفيل السرعة نلاحظ وجود مراكز لأربع دوامات أساسية، وهي المراكز A, B, C, D، حيث أنه في هذه المراكز تنخفض السرعة، وهذا الأمر متطابق في النتيجتين التجريبية والرقمية. الدوامات الأربعة التي تم ذكرها في الأعلى موضحة في الشكل 15.

بمقارنة الشكل 7 لنظام الدوامات بدون زاوية انحراف مع الشكل 15 والشكل 16 نلاحظ أنه مع زاوية الانحراف $\beta = 6^\circ$ تندمج الدوامتين الضخمتين المتشكلتين خلف بدن السفينة (الدوامات A في الشكل 7) مع بعضهما البعض لتشكلا دوامة كبيرة جدا (الدوامة C في الشكل 14، انظر أيضا الشكل 15 لرؤية الدوامة بشكل أوضح). كما ونلاحظ أنه بوجود زاوية الانحراف تتشكل دوامات جديدة (الدوامات A, D في الشكل 14).

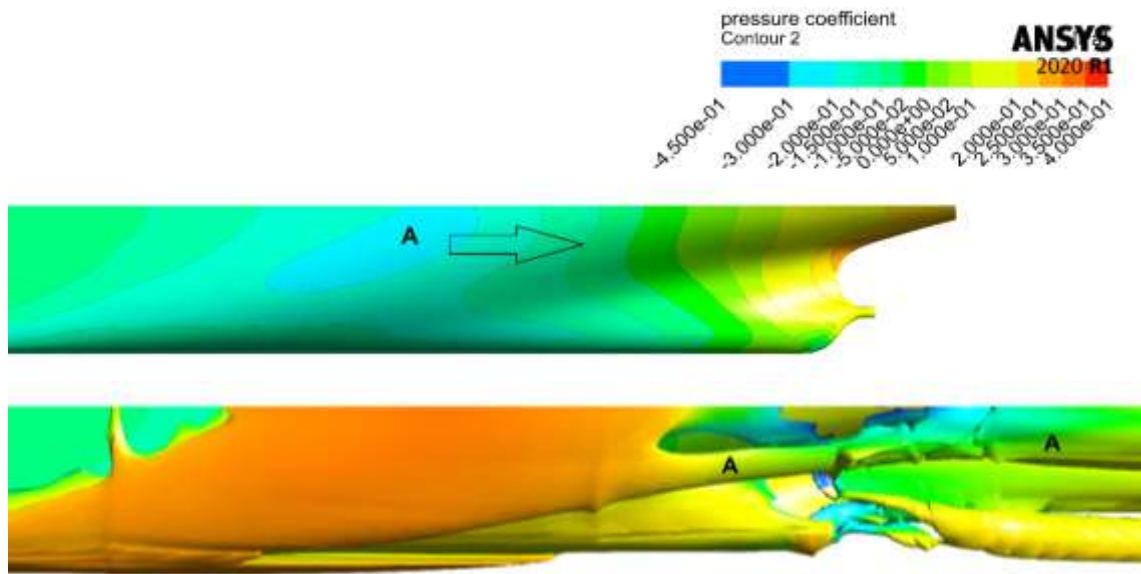


الشكل 15: الدوامات الأربعة الأساسية عند زاوية الانحراف $\beta = 6^\circ$.

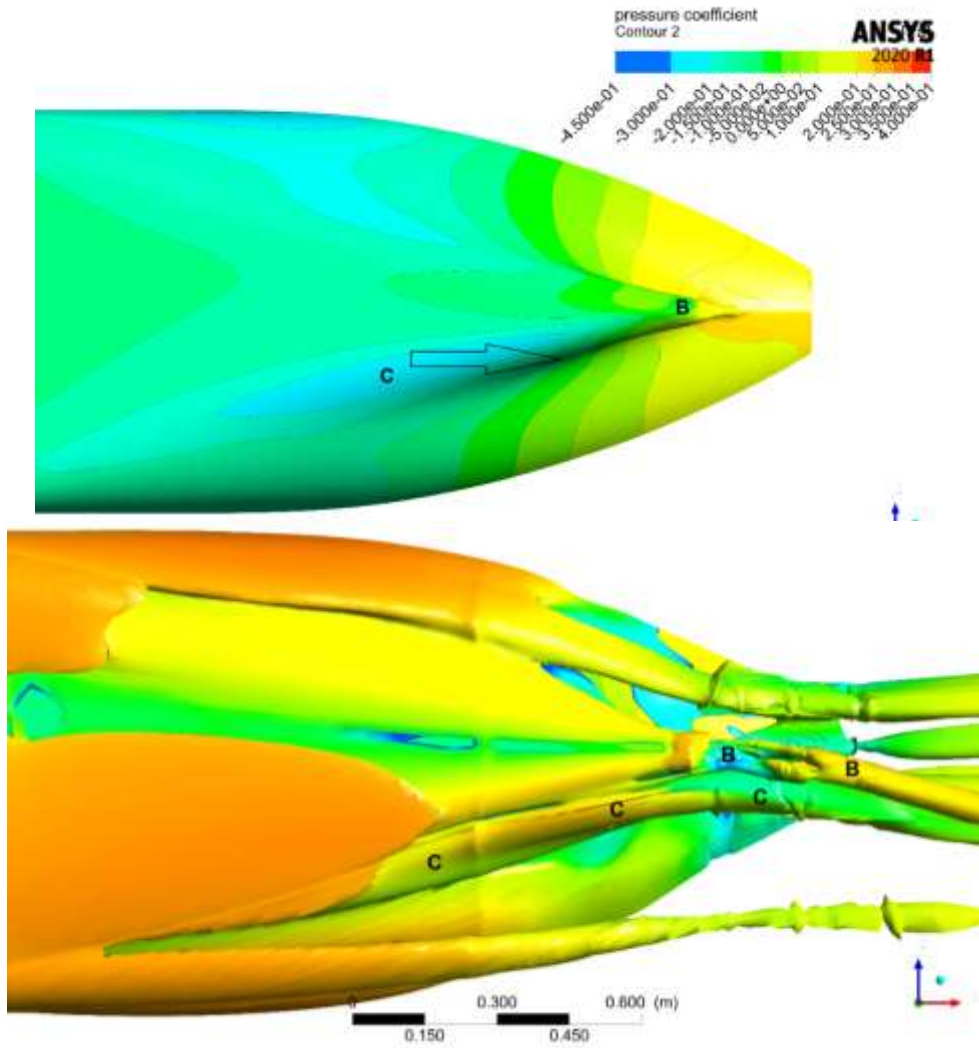


الشكل 16: نظام الدوامات خلف بدن السفينة KVLCC2 مع زاوية انحراف $\beta = 6^\circ$.

إذا ما أردنا معرفة منشأ هذه الدوامات فلابد من العودة مرة أخرى لحقل الضغط على سطح السفينة. الشكل 17 يوضح منشأ الدوامة A وهو المنطقة العلوية الخلفية اليسارية، حيث نلاحظ وبشكل واضح كيف يتشكل منطقة ضغط منخفض (انظر المنطقة A في الشكل 17)، وبتجاه التدفق يكون تدرج الضغط موجب $\frac{\partial P}{\partial x} > 0$.

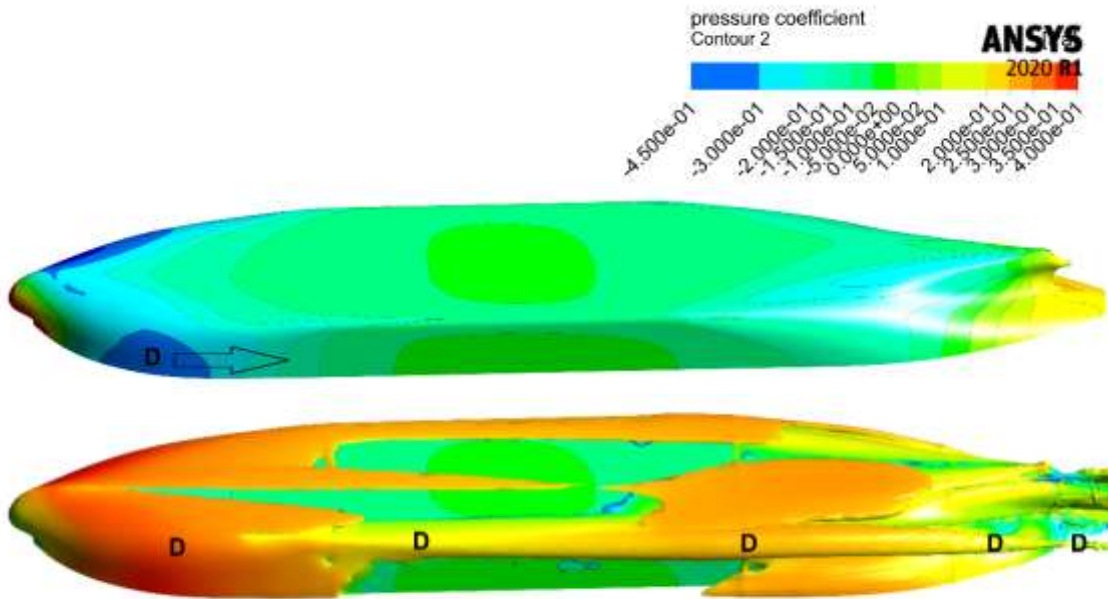


الشكل 17: منشأ الدوامة A عند زاوية انحراف $\beta = 6^\circ$.

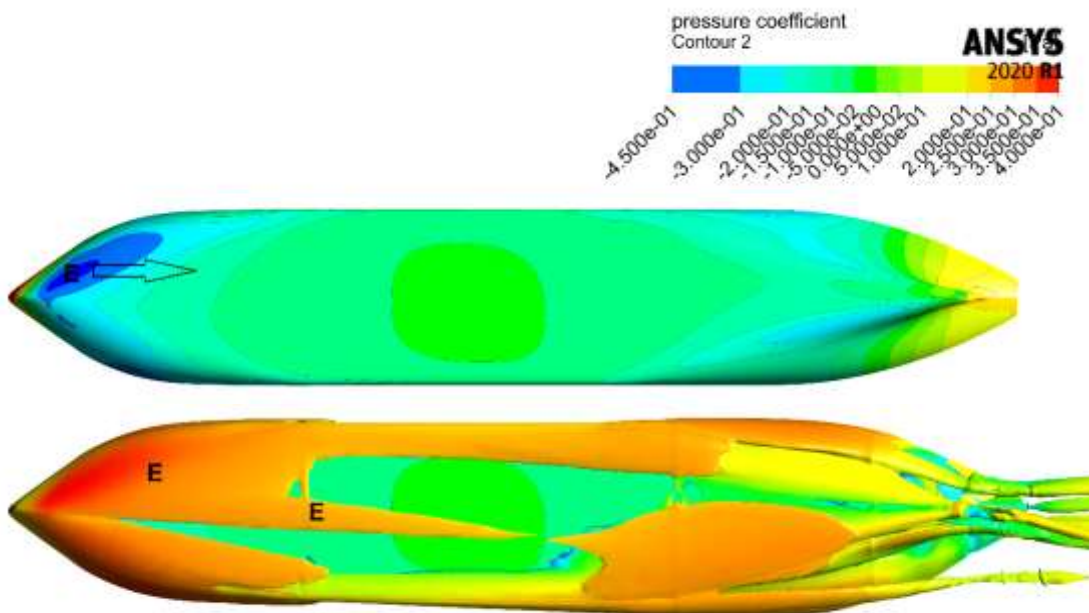


الشكل 18: منشأ الدوامتين B, C مع زاوية الانحراف $\beta = 6^\circ$.

الشكل 18 يوضح منشأ الدوامتين B, C، حيث نلاحظ أن منشأ الدوامة C هو أسفل ويمين مؤخرة السفينة، وهو مشابه لمنشأ الدوامة A في حالة السفينة المبحرة بدون زاوية انحراف مع انزياح قليل نحو الخارج، وهذا بفعل تأثير زاوية الانحراف. وأما الدوامة B فنلاحظ أن منشأها هو أسفل المنطقة التي يخرج منها عمود الرفاص. وأما بالنسبة للدوامة D، فكما يوضح الشكل 19، فإن منشأها عند مقدمة السفينة على الجانب الأيمن. وهناك دوامة خامسة منشأها الجهة السفلية اليسرى من مقدمة السفينة، هي الدوامة E، انظر الشكل 20. هذه الدوامة مع زاوية الانحراف $\beta = 6^\circ$ ليست قوية بما يكفي لتصل إلى منطقة خلف السفينة، ولهذا السبب لم يتم ملاحظتها في بروفایل السرعة في الشكل 14.

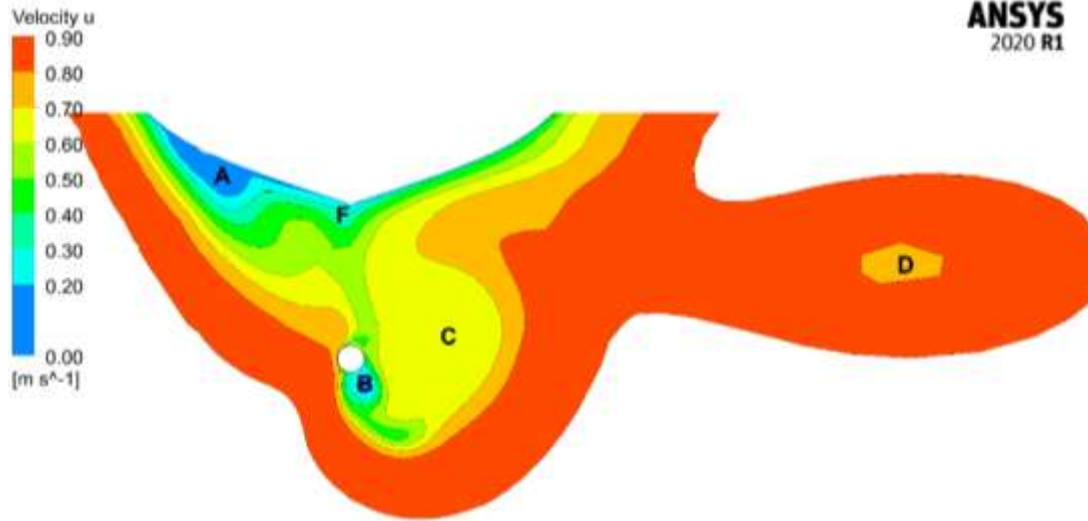


الشكل 19: منشأ الدوامة D مع زاوية الانحراف $\beta = 6^\circ$.



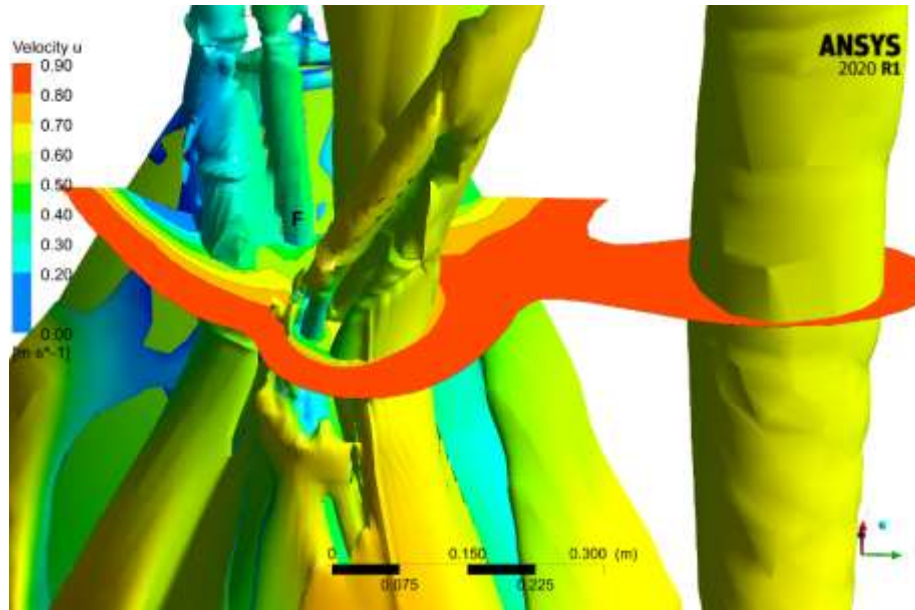
الشكل 20: منشأ الدوامة E عند زاوية الانحراف $\beta = 6^\circ$.

الشكل 21 يوضح مراكز الدوامات الأساسية المتشكلة خلف بدن السفينة مع زاوية الانحراف $\beta = 12^\circ$ ، النتيجة متطابقة في كل من نموذج التجريبي (انظر الشكل 11-a) والحسابات الرقمية. مع زيادة زاوية الانحراف يزداد انحراف الدوامات وتزداد شدتها. يمكننا ملاحظة أيضا أن الدوامة B أصبحت أصغر حيث أن قسماً منها اندمج مع الدوامة الضخمة C والتي تزداد شدتها بشكل كبير مع زيادة زاوية الانحراف، وهذا يعني أنه مع الزوايا الأكبر من الممكن أن تخففي الدوامة B لتندمج بشكل كامل ضمن الدوامة C.



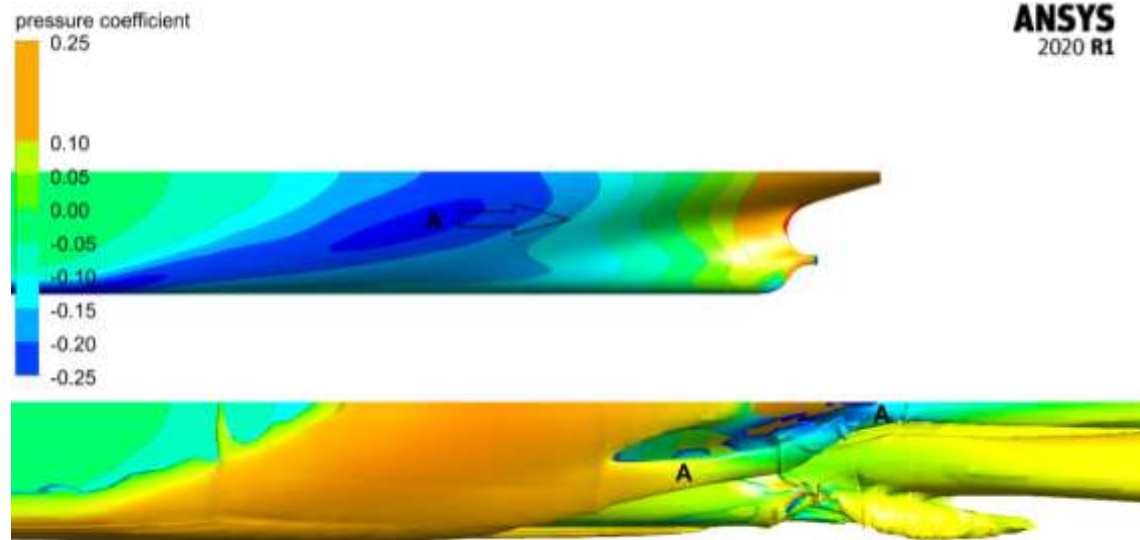
الشكل 21: مراكز الدوامات في بروفائل السرعة مع زاوية الانحراف $\beta = 12^\circ$.

كما ونلاحظ أيضاً أن الدوامة D تنحرف أكثر نحو الخارج وتزداد شدتها، انظر الشكل 22، والذي يظهر فيه وبشكل واضح كيف أن الدوامة B أصبحت أصغر نوعاً ما، وأن جزء منها اندمج مع الدوامة C. في هذا الشكل نلاحظ ظهور دوامة جديدة، وهي الدوامة F موضحة أيضاً في الشكل 21. بالنسبة لمراكز نشوء هذه الدوامات فهي مشابهة تماماً لحالة زاوية الانحراف $\beta = 6^\circ$ ، ونلاحظ أن الدوامة E فقط تصبح أكثر شدة وتمتد لتندمج مع الدوامة D، انظر الشكل 27.

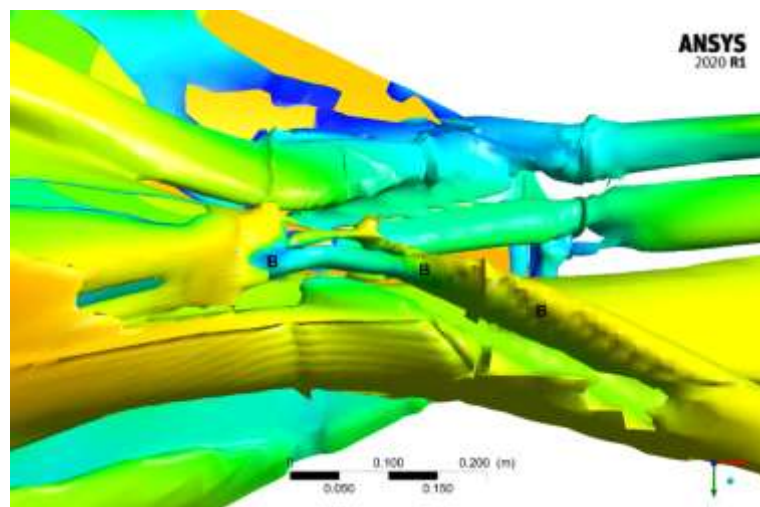
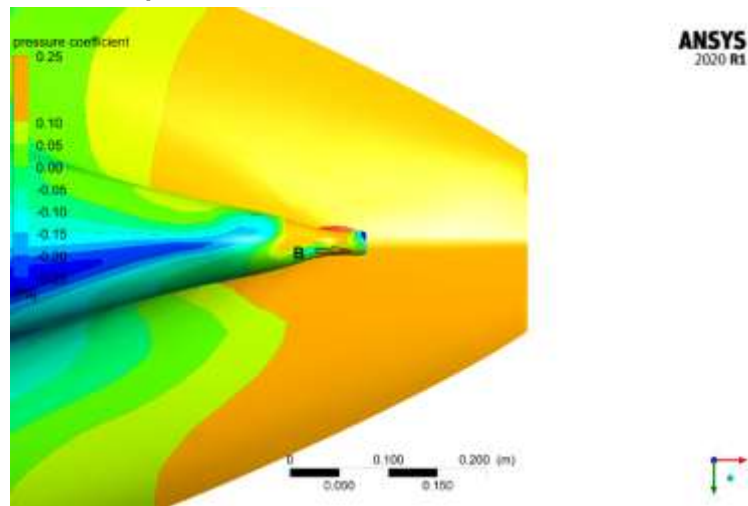


الشكل 22: الدوامات الأربعة الأساسية عند زاوية الانحراف $\beta = 12^\circ$.

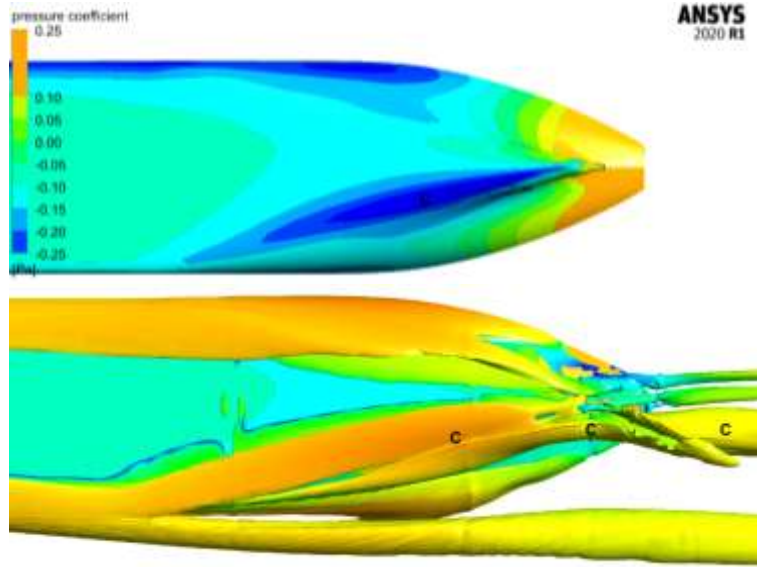
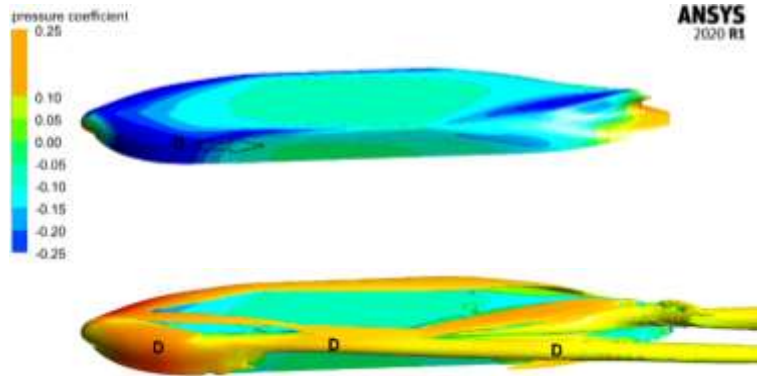
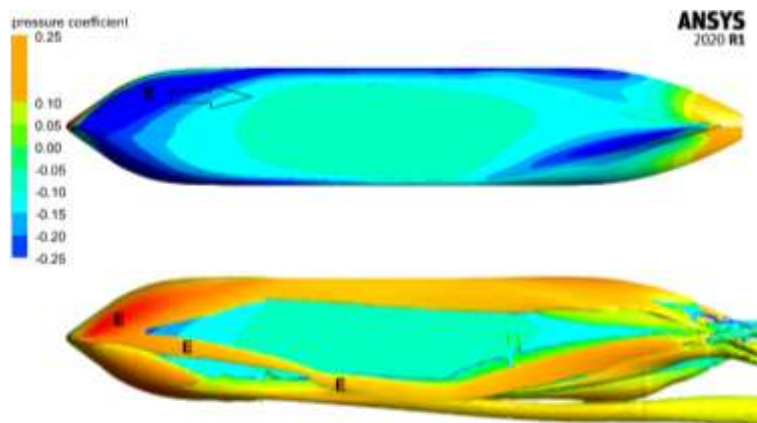
الشكل 23 وحتى الشكل 27 توضح منشأ الدوامات A, B, C, D, E على التوالي في حالة زاوية الانحراف $\beta = 12^\circ$.



الشكل 23: منشأ الدوامة A عند زاوية انحراف $\beta = 12^\circ$.



الشكل 24: منشأ الدوامة B عند زاوية انحراف $\beta = 12^\circ$.

الشكل 25: منشأ الدوامة C عند زاوية انحراف $\beta = 12^\circ$.الشكل 26: منشأ الدوامة D عند زاوية انحراف $\beta = 12^\circ$.الشكل 27: منشأ الدوامة E عند زاوية انحراف $\beta = 12^\circ$.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

من خلال ما سبق يمكننا استنتاج الآتي:

- إن الموديل $k - \omega$ SST من أفضل الموديلات التي يمكن استخدامها في طريقة الـ RANS لحل التدفقات حول بدن السفينة.
- إن زاوية الانحراف تؤثر بشكل قليل على المقاومة الطولية للسفينة، في حين أنها تؤثر وبشكل كبير جدا على كل من المقاومة العرضية وعزم الدوران للسفينة، كلما زادت زاوية الانحراف كلما زادت المقاومة العرضية وعزم الدوران المؤثران على السفينة.
- تتشكل الدوامات بشكل أساسي بفعل انفصال الطبقة الحدية عندما يتحول التدفق إلى تدفق مضطرب مع زيادة رقم رينولدز.
- السفن الناقلة بشكل عام بالإضافة إلى سفن الحمولة السائبة، يتشكل خلفها دوامتان كبيرتان يدخلان في قرص الرفاص ويؤثران بشكل كبير على الدفع الناتج عن الرفاص، وذلك في حالة إبحار السفينة إلى الأمام مباشرة بدون أية زاوية انحراف.
- أثناء إبحار السفينة مع زاوية انحراف، نلاحظ أن نظام الدوامات يصبح أكثر تعقيداً، حيث تندمج الدوامتان الضخمتان في دوامة واحدة أكثر قوة، وتتحرف الدوامات باتجاه التدفق، بالإضافة إلى ظهور دوامات إضافية جديدة.

التوصيات:

- أن يتم اعتماد الموديل الرياضي $k - \omega$ SST مع طريقة الـ RANS لحل المعادلات الناقمة للتدفق، وذلك في حالة الإمكانيات المحدودة للحاسب الذي يتم استخدامه. أما في حال توفر حاسب مركزي ذو إمكانيات كبيرة فينصح باستخدام الطرق الهجينة والتي تجمع بين طريقة الـ URANS and LES.
- دراسة التدفق حول بدن السفينة مع زوايا انحراف مختلفة.
- دراسة تأثير زاوية الانحراف على السفينة بوجود الرفاص والدفة.

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: 02-Apr-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] 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.

- [4] 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.
- [5] 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/>.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] J. Tu, G. H. Yeoh, and C. Liu, *Computational fluid dynamics: A practical approach*. 2018.
- [10] Z. Ali, P. G. Tucker, and S. Shahpar, "Optimal mesh topology generation for CFD," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 317, 2017, doi: 10.1016/j.cma.2016.12.001.
- [11] 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>.
- [12] H. Schlichting and K. Gersten, *Boundary-Layer Theory*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [13] "fugahumana - Human Flight: Image." <https://fugahumana.files.wordpress.com/2012/03/boundarylayeraerofoil.jpg> (accessed Jan. 10, 2022).