

Study Of The Scale Effect On The Resistance Components And The Flow Field Around The Tanker Ship

Dr. Nawar Abbas*

(Received 17 / 10 / 2024. Accepted 18 / 12 / 2024)

□ ABSTRACT □

Historically, the field of marine engineering has relied on a combination of model testing and similarity laws, known as the extrapolation approach, which relies on using a set of approximate relationships to predict the power requirements of a real ship. Several problems with the extrapolation approach have been identified as the values obtained through these approximate relationships are not accurate compared to reality, but due to the lack of accurate alternative relationships, it has continued to be used up to the present day. This research focuses on studying the effects of scale on the basic components of the resistance of oil ships (tanker) and the flow field around them using a CFD approach. The study was conducted on the oil tanker KVLCC2 using six different scales at a fixed value of Froude number $Fr = 0.142$, which is the value corresponding to the nominal speed of the ship. To analyze the effect of scale on resistance, the total resistance components were divided into individual components and the ratio of the individual resistances to the total resistance of each scale was calculated and then compared with each other. The numerical results were compared with experimental data to verify their validity. The comparison demonstrated the accuracy of the setup and the numerical grid used. Finally, we studied and analyzed the effect of the scale on the velocity, pressure and vortices fields around the hull, as these are the basic parameters that must be studied in detail when designing any ship.

Keywords: KVLCC2, Scale effect, URANS, CFD, $k - \omega$ SST.

Copyright



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

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

دراسة تأثير تغيير المقياس على مكونات المقاومة وحقل التدفق حول ناقلات النفط

د. نوار عباس*

(تاريخ الإيداع 17 / 10 / 2024. قُبل للنشر في 18 / 12 / 2024)

□ ملخص □

تاريخياً، اعتمد مجال الهندسة البحرية على مزيج من اختبار النماذج وقوانين التشابه، والمعروفة باسم منهج الاستقراء والذي يعتمد على استخدام مجموعة من العلاقات التقريبية للتنبؤ بمتطلبات الطاقة للسفينة الحقيقية. تم تحديد العديد من المشاكل المتعلقة بمنهج الاستقراء حيث أن القيم التي يتم الحصول عليها من خلال هذه العلاقات التقريبية لا تكون دقيقة بالمقارنة مع الواقع، ولكن نظراً لعدم وجود علاقات دقيقة بديلة، فقد استمر استخدامها حتى وقتنا الحالي. يركز هذا البحث على دراسة تأثيرات المقياس على المكونات الأساسية لمقاومة سفن النفط وحقل التدفق حولها باستخدام نهج الـ CFD. تم إجراء الدراسة على ناقلة النفط KVLCC2 باستخدام ستة مقاييس مختلفة وذلك عند قيمة ثابتة لرقم فرود $Fr=0.142$ وهي القيمة المقابلة للسرعة الاسمية للسفينة. لتحليل تأثير المقياس على المقاومة، قمنا بتقسيم مكونات المقاومة الإجمالية إلى مكونات فردية وتم حساب نسبة المقاومات الفردية من المقاومة الكلية لكل مقياس ليتم بعدها مقارنتها مع بعضها البعض. تمت مقارنة النتائج الرقمية مع البيانات التجريبية للتحقق من صحتها. المقارنة أثبتت دقة الإعدادات والشبكة الرقمية التي تم استخدامها. أخيراً، قمنا بدراسة وتحليل تأثير المقياس على كل من حقل السرعة والضغط والدوامات حول بدن السفينة وذلك على اعتبارها هي البارامترات الأساسية التي يجب دراستها بالتفصيل عند تصميم أية سفينة.

الكلمات المفتاحية: ناقلات النفط، تأثير المقياس، URANS، CFD، ميكانيك الموائع الحسابية، SST $k - \omega$.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

* أستاذ مساعد - قسم الهندسة البحرية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة تشرين - اللاذقية - سورية. الايميل:

dr.nawarnabilabbas@tishreen.edu.sy

مقدمة:

تاريخياً، اعتمد مجال الهندسة المعمارية البحرية على مزيج من اختبار النماذج وقوانين التشابه، المعروفة باسم إجراءات الاستقرار، وذلك للتنبؤ بمتطلبات الطاقة للسفينة الحقيقية. ولضمان الأداء الصحيح للسفينة الحقيقية في البحر، يقوم المهندسون البحريون بشكل روتيني بإجراء حسابات للتنبؤ بسلوك النموذج الأولي الذي يتم بناؤه في المراحل الأولى من تصميم السفينة الحقيقية حيث أن نسبة التصغير بين نموذج الحوض والسفينة الكامل عادة ما تكون 50/1 أو أكبر. وعادة ما يكون التصميم الهندسي عملية تكرارية تبدأ بأدوات تحليل منخفضة الدقة والتي تزداد تعقيداً مع الانتهاء من التصميم. ومن المتطلبات الأساسية للنموذج الأولي الناجح توفر أدوات ناضجة بدرجة كافية لتقريب البيئة الحقيقية قدر الإمكان. وبصرف النظر عن الثقة التي قد يتمتع بها المهندس البحري في أداة التحليل، فإن التجارب تُجرى عادةً على نطاق منخفض. وتهدف هذه التجارب على نطاق النموذج إلى تمثيل النماذج الأولية في العالم الحقيقي ويمكن استخدامها للتركيز على التصميم النهائي مع تجاوز افتراضات النمذجة المحتملة والتبسيطات مثل إهمال الظواهر غير الخطية أو التأثيرات اللزجة في الحسابات.

غالباً ما تؤدي الضغوط الاقتصادية، أو محدودية مساحة أحواض الجر، إلى إنشاء نماذج صغيرة عمداً، والتي قد تؤدي إلى أخطاء غير قابلة للإهمال فيما يتعلق بالنموذج الأولي للسفينة الحقيقية، مما قد يؤدي إلى قيم قياسية غير دقيقة لسرعة النموذج والمعاملات الميكانيكية (مثل مقاومة الهيكل، ودفع المروحة، وعزم الدفع). علاوة على ذلك، يمكن أن تؤدي أخطاء القياس الطفيفة إلى انحرافات كبيرة في توقع أداء السفينة الحقيقية [2], [1]. يمكن أن تنتج هذه الأخطاء عن العديد من التأثيرات (Heller, 2011 [3]):

1. تأثيرات النموذج (Model effects): نتيجة لإعادة إنتاج غير صحيحة لبدن النموذج، أو خصائص التدفق في الحوض مثل الاضطراب، أو خصائص الأمواج التي يتم توليدها في قناة الجر.
2. تأثيرات القياس (Measurement effects): نتيجة لتقنيات مختلفة لجمع البيانات بين النموذج والنموذج الأولي. على سبيل المثال، تحدث De Rouck et al., 2005 [4] عن تأثير موقع القياس ومقدار الارتياح (الخطأ) المرتبط بالموقع على النتائج التجريبية وبالأخص على تنبؤات انتشار الموجة.
3. تأثيرات المقياس (Scale effects): نتيجة للفرقات الكبيرة في نسب القوة المؤثرة على النموذج وبدن السفينة الحقيقية. إن معرفة خصائص التدفق (حقل السرعة في مستوي الرفاص والمخر المتشكل خلف السفينة بالإضافة إلى توزيع الضغط على سطح السفينة وأيضاً حقل الدوامات حول بدن السفينة وفي منطقة المؤخرة) ومقاومة السفينة الحقيقية في المراحل الأولى من التصميم تعتبر من الأمور المهمة والصعبة التي تواجه المهندسين البحريين، وذلك على اعتبار أنه من المستحيل أن يتم بناء نموذج للسفينة بالأبعاد الحقيقية وإجراء التجارب عليه. يمكن حصر المركبات الأساسية للمقاومة في مقاومة الضغط ومقاومة الاحتكاك ومقاومة الهواء، وعلى اعتبار أنه سيتم إهمال الأجزاء العلوية من سفينة النفط التي سنتم دراستها فإن مقاومة الهواء لا تلعب دوراً مهماً في هذه الدراسة لذا سيتم إهمالها.

يرتبط كل من المخر المتشكل خلف السفينة وحقل الضغط على سطح السفينة ارتباطاً أساسياً بشكل ونوع وخط إبحار السفينة. من جهة أخرى، فإن المخر مسؤول عن تخفيض سرعة التدفق في قرص الرفاص مما يؤدي إلى زيادة الدفع وتحسين كفاءة المركبة البحرية بشكل عام، كما أن عدم انتظام حقل السرعة يسبب تأرجح في الدفع الناتج عن الرفاص خلال الزمن مما ينتج عنه اهتزازات قوية في الرفاص والتي تنتقل بدورها إلى بدن المركبة. يقدم توزيع الضغط على

سطح السفينة فكرة شاملة عن توزيع الإجهادات والقوى المطبقة على بدن السفينة كما يعطينا تصوراً دقيقاً عن أماكن انفصال الطبقة الحدية وتشكل الدوامات حول البدن.

لقد تم في هذه الدراسة اختيار نموذج سفينة النفط KVLCC2 نظراً للكمية الكبيرة من البيانات التجريبية المتاحة لهذه السفينة، بالإضافة إلى أنها سفينة مستخدمة على نطاق واسع في مجال النقل البحري وتم إجراء العديد من الدراسات التجريبية عليها [5]، ولا يزال الكثير من الباحثين يجرؤون العديد من الأبحاث عليها حتى وقتنا الحالي [6], [7], [7]. تم استخدام ديناميك الموائع الحسابية (CFD, Computational fluid dynamics) وبرنامج ANSYS لتحليل ودراسة التدفق حول بدن السفينة المدروسة بدون وجود الرفاص وعند مقاييس مختلفة. تم التركيز بشكل أساسي على مركبات المقاومة، حقل التدفق ضمن منطقة الطبقة الحدية وتوزيع الضغط على سطح السفينة، والذي يقودنا إلى معرفة تأثير تغيير المقياس على هذه البارامترات. تم في البداية مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية المتوفرة في الدراسات المرجعية، وذلك للتأكد من صحة الحسابات الرقمية.

إن دراسة تأثير مقياس السفينة على خصائص التدفق حول بدن السفينة والقوى التي تؤثر على هذه السفينة ليس بموضوع جديد، وهناك الكثير من الباحثين الذي قاموا بإجراء مثل هذه الدراسات ولا تزال هذه الدراسات مستمرة لما لهذا الأمر أهمية في تصميم وبناء السفينة.

أكد Tod (1965) [18] أنه إذا عرفنا المزيد عن الطريقة الحقيقية والصحيحة للتنبؤ بخصائص التدفق ومقاومة السفينة الحقيقية انطلاقاً من النموذج، فإن هذا الأمر سيساعد في التقليل من قدرة المحرك المستخدم مع السفينة الحقيقية، وذلك على اعتبار أن زيادة الخطأ في التنبؤات يمكن أن يؤدي إلى زيادة غير ضرورية في قدرة المحرك المستخدم مع السفينة الحقيقية. لا تزال هذه المشكلة قائمة حتى اليوم ومن الممكن الحصول على الكثير من التنبؤات الفريدة لمتطلبات الطاقة الكاملة للسفينة اعتماداً على الطريقة المستخدمة لحساب كل مكون من مكونات المقاومة الكلية [19] Terziev et al. 2019.

إن الصعوبة الرئيسية تنشأ بسبب الطبيعة المعقدة بطبيعتها لتدفق السوائل. ورغم أن المهندسين المعماريين البحريين مجهزون بأساليب نمذجة متقدمة للغاية وبرامج متوفرة تجارياً، فإن فهم وتوقع خصائص التدفق حول بدن السفينة الحقيقية يظل صعباً. والأداة الرئيسية في ترسانة المهندسين المعماريين البحريين في هذا الصدد هي برامج ديناميكيات السوائل الحسابية (CFD) لحل معادلات نافيه-ستوكس للتنبؤ بالتدفق حول السفينة.

1992 Oh and Kang [20] قاما بدراسة التدفق حول سفينة HSVA على كل من النموذج والسفينة الحقيقية. تمت دراسة التدفق اللزج في منطقة مؤخرة السفينة عند قيمتين لرقم رينولدز. تمت مقارنة النتائج العديدة للسفينة النموذج مع النتائج التجريبية من حيث توزيع معامل الضغط على طول البدن وتوزيع السرعة داخل منطقة الطبقة الحدية. تم دراسة وتحليل التفاعل المتبادل بين منطقة الطبقة الحدية والمخر المتشكل خلف بدن السفينة. تم التوصل في هذه الدراسة إلى أن منطقة المخر تقل في حالة السفينة الحقيقية بالمقارنة مع النموذج.

2015 Wang et al. [21]، تم في هذه الدراسة دراسة حقل المخر الاسمي (بدون وجود الرفاص) خلف بدن سفينة حاويات كبيرة. تم استخدام عدة مقاييس للسفينة في الدراسة بالإضافة إلى دراسة السفينة الحقيقية. تم دراسة العلاقة بين حقل المخر الاسمي ورقم رينولدز لجميع المقاييس التي تمت دراستها. تم أيضاً دراسة تأثير السطح الحر على توزيع السرعة المحورية في منطقة المخر. تم معايرة النتائج الرقمية من خلال مقارنتها مع النتائج التجريبية المتوفرة، كما وتم إجراء عملية تحقق وتحقق (Verification and Validation Study) لدراسة تأثير نعومة الشبكة الحسابية على

دقة النتائج الرقمية. في النهاية تم إجراء دراسة دقيقة وتفصيلية عن تأثير المقياس على حقل المخر الاسمي خلف بدن السفينة، وتم اقتراح طريقة من أجل تخمين حقل التدفق خلف بدن هذا النوع من السفن.

2023 Guo et al. [22] قاموا بدراسة تأثير تغيير المقياس على مقاومة سفينة صب ذات حمولة 230 ألف طن. تم اختبار نموذجين لهذه السفينة في قناة جر (نسبة التصغير λ كانت 13، 53.215)، وتم استخدام النتائج التي تم الحصول عليها من أجل اقتراح طريقة تساعد في تقدير مقاومة السفينة الحقيقية. الطريقة التي تم اقتراحها تعطي نتائج جيدة جداً وقريبة جداً من الواقع. تم في هذه الدراسة أيضاً دراسة تأثير تغيير المقياس على معامل الشكل. ومن خلال هذه الدراسة تم التوصل إلى أن طريقة الـ ITTC-57 هي الأفضل من أجل حساب مقاومة اللزوجة لهذا النوع من السفن إذا كان رقم فرود أصغر من 0.145، وطريقة Grigson هي الأفضل لحساب مقاومة اللزوجة إذا كان رقم فرود أكبر من 0.145. وعليه وبناء على نتائج هذه الدراسة يجب استخدام كل من طريقة الـ ITTC-57 وطريقة Grigson عند حساب قيم المقاومة المقابلة لقيم مختلفة لأرقام فرود.

هناك الكثير من الدراسات الأخرى في هذا المجال والتي تركز بشكل أساسي على إيجاد الفروقات بين نتائج النموذج والسفينة الحقيقية ومحاولة استنباط علاقة لإيجاد مقاومة السفينة الحقيقية انطلاقاً من النموذج، ومن هنا تأتي أهمية هذا البحث والذي يركز بشكل أساسي على هذه الأمور وبشكل خاص بالنسبة لناقلات النفط KVLCC2.

أهمية البحث وأهدافه:

يمكن تلخيص أهمية البحث وأهدافه في الأمور التالية:

- دراسة خصائص حقل التدفق حول بدن ناقلات النفط KVLCC2 لوحدها عند مقاييس مختلفة للسفينة، بهدف معرفة تأثير تغيير المقياس على حقل التدفق حول وخلف السفينة، وهذا الأمر يساعد بشكل كبير في معرفة ظروف عمل الرصاص خلف السفينة الحقيقية.
- دراسة تأثير تغيير المقياس على مركبات المقاومة الفردية لناقلات النفط المدروسة.

1. منهجية البحث

- تحليلية تجريبية في بيئة الـ ANSYS الافتراضية.

طرائق البحث ومواده:

يمكن تلخيص المواد التي تم استخدامها في هذا البحث بالتالي:

- النموذج الهندسي لناقلات النفط KVLCC2.
- تقنية الـ CFD ضمن برنامج الـ Ansys-Fluent. حيث تم استخدام طريقة الـ URANS والموديل الرياضي SST-K لحل معادلات نافيه ستوكس (والمتوفرة أصلاً في برنامج الـ Ansys-Fluent) والتي تم عرض معادلاتها بشكل مفصل في أعمال سابقة، انظر [23], [17], [9], [8].

2. فروض البحث

يقوم البحث على الفرضية التالية:

- إن سلوك حقل التدفق حول النموذج مشابه بشكل كبير لسلوك حقل التدفق حول بدن السفينة الحقيقية.

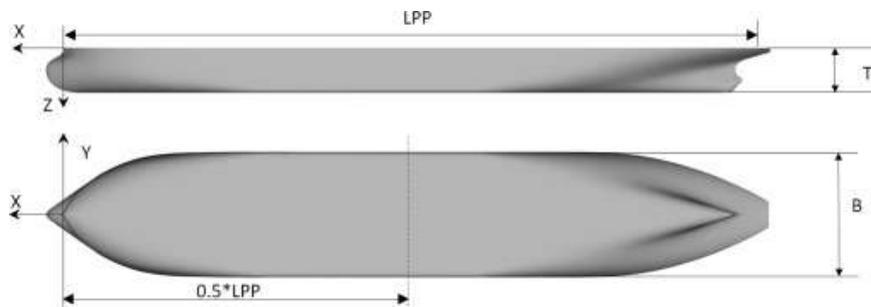
3. الأبعاد الهندسية والشبكة الرقمية

الأبعاد الهندسية والشبكة الرقمية للسفينة مع الرفاص الخاص بها موضحة في كل من الجدول 1 و

الشكل 1.

الجدول 1: الأبعاد الهندسية لناقلة النفط المدروسة KVLCC2 [24].

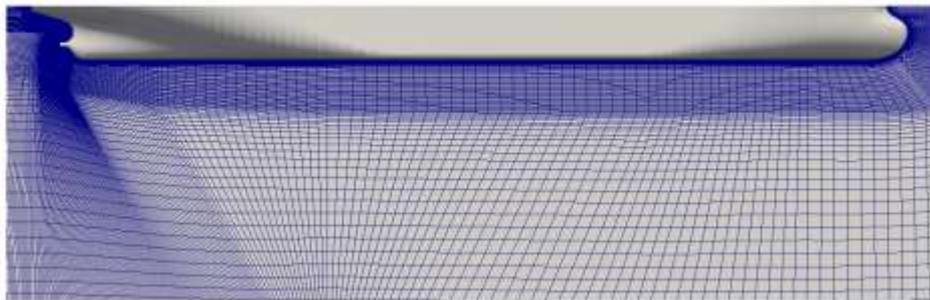
Item	Symbol	Unit	Full scale
Length between perpendiculars	L_{pp}	m	320.0
Breadth (molded)	B	m	58.0
Draft (molded)	d	m	20.8
Wetted surface area	S_w	m^2	27194.0
Blockage coefficient	C_B	-	0.8089
Froude number	F_r	-	0.142
Reynolds number	Re	-	2.55×10^9



الشكل 1: ناقلة النفط KVLCC2 التي تمت دراستها [25].

لقد تم استخدام الشبكات المنتظمة لكل الحالات المدروسة والتي تم بناؤها باستخدام برنامج الـ ICEM، انظر

الشكل 2. كما هو واضح من هذا الشكل لقد تم تعميم الخلايا في منطقة الطبقة الحدية بجوار السفينة وفي منطقة عمل الرفاص وذلك من أجل حل التدفق بأدق شكل في هذه المناطق.



الشكل 2: الشبكة الرقمية المنتظمة التي تم استخدامها لكل الحالات المدروسة.

4. تقييم النتائج الرقمية

لقد تم في هذه الدراسة استخدام ستة نسب تصغير مختلفة للسفينة وهي ($\lambda = 1, 10, 20, 30, 40, 58$). وعلى اعتبار أن النتائج التجريبية متوفرة لأكثر من نموذج تم اختيار النموذج ذو نسبة التصغير $\lambda = 58$ [5] من أجل عملية المعايرة، حيث تم مقارنة النتيجة الرقمية لكل من المقاومة الكلية وحقل السرعة في مستوي الرفاص وحقل الضغط على سطح السفينة مع النتائج التجريبية المتوفرة.

4.1. تقييم النتائج الرقمية للمقاومة

يعرض الجدول 2 الفرق بين النتيجة الرقمية والنتيجة التجريبية لقيمة معامل المقاومة الكلي لنموذج ناقلة النفط ذو مقياس التصغير $\frac{1}{58}$ النتيجة التجريبية تم الحصول عليها من Lee et al., 2003 [5] وذلك عند قيمة رقم فرود 0.142. كما هو واضح من هذا الجدول فإن قيمة الخطأ هي 1.36% - وهي قيمة مقبولة جداً. يمكن اسناد هذا الفرق إلى سببين أساسيين:

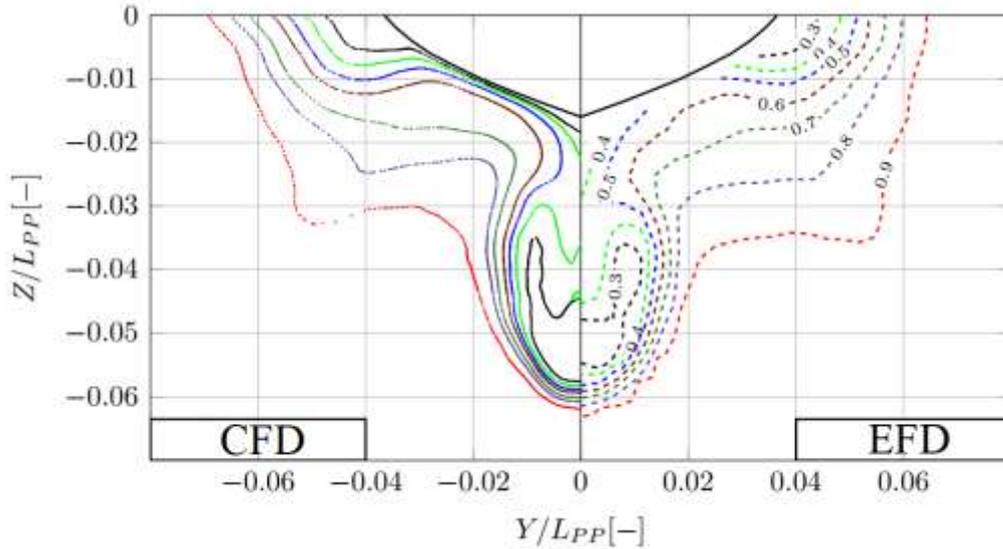
- 1- إن عدد الخلايا الرقمية التي تم استخدامها في هذا العمل لا يتجاوز الـ 2 مليون خلية وذلك بسبب الإمكانيات الحاسوبية المحدودة.
- 2- لم يتم أخذ مقاومة الأمواج بعين الاعتبار، حيث تم إجراء الحسابات من الغاطس وما دون وذلك لأن السفينة ذات سرعة خدمة محدودة وبالتالي يمكن إهمال مقاومة الأمواج.

الجدول 2: نتائج معامل المقاومة الحسابية والتجريبية.

	Experiment	k - ω SST	Error
$C_T \times 10^{-3}$	4.11	4.05	-1.36%

4.2. تقييم النتائج الرقمية لحقل السرعة في مستوي الرفاص

يعرض الشكل 3 مقارنة بين النتيجة الرقمية (CFD) لحقل السرعة المحورية اللابعدية في مستوي الرفاص مع النتيجة التجريبية (EFD) [5] عند قيمة رقم فرود 0.142. كما هو واضح من هذا الشكل فإن النتائج الرقمية تحقق تطابق جيد جداً بالمقارنة مع النتائج التجريبية وهذا الأمر يؤكد دقة الشبكة والإعدادات الرقمية التي تم استخدامها في هذا العمل.

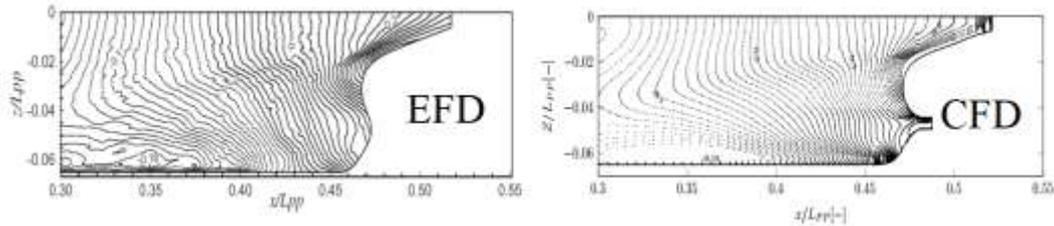


الشكل 3: مقارنة النتيجة الرقمية لحقل السرعة للمركبة المحورية u قبل مستوي الرفاص (CFD) مع النتيجة التجريبية (EFD).

4.3. تقييم النتائج الرقمية لحقل الضغط

يعرض الشكل 4 مقارنة بين النتيجة الرقمية (CFD) والنتيجة التجريبية (EFD) لمعامل الضغط عند منطقة المؤخرة للسفينة. كما هو واضح من هذا الشكل فهناك توافق جيد جداً بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية. أعلى قيمة لمعامل

الضغط هي 0.2 وتتحقق عند المؤخرة أعلى الرفاص والسبب الأساسي في هذا الأمر هو أنه في هذه المنطقة يحدث ركود كبير في التدفق والذي ينتج عنه انخفاض كبير في السرعة ووفقاً لبرنولي سيؤدي هذا الأمر إلى زيادة في قيمة الضغط.



الشكل 4: مقارنة النتيجة الرقمية لحقل الضغط عند مؤخرة السفينة (CFD) مع النتيجة التجريبية (EFD).

من خلال ما سبق ومن خلال المقارنة بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية يمكننا أن نتأكد من أن الـ CFD قادرة على حل التدفق بشكل جيد جداً وقادرة على التنبؤ بمقاومة السفينة بشكل جيد جداً.

5. دراسة تأثير تغيير المقياس على مركبات المقاومة المؤثرة على السفينة

لقد تم في هذه الدراسة استخدام ستة نسب تصغير مختلفة للسفينة وهي ($\lambda = 1, 10, 20, 30, 40, 58$). تمت الدراسة عند السرعة الاسمية للسفينة (سرعة الخدمة) والتي تقابل رقم فرود 0.142، وعليه كانت سرعة كل نموذج كما هو موضح في الجدول 3.

الجدول 3: سرعة كل نموذج من النماذج الستة التي تمت دراستها.

مقياس النموذج	السفينة الحقيقية	النموذج 10/1	النموذج 20/1	النموذج 30/1	النموذج 40/1	النموذج 58/1
السرعة [m/s]	7.97	2.516	1.78	1.453	1.258	1.047

عند قيمة رقم فرود 0.142 تكون مقاومة الأمواج صغيرة ولهذا السبب تم إهمال تأثيرات السطح الحر وتم إجراء الحسابات الرقمية بدون حساب مقاومة الأمواج المتشكلة بفعل حركة السفينة.

في كل حالة من الحالات المدروسة تم حساب كل من مقاومة الضغط ومقاومة الاحتكاك على اعتبارهما المركبات الأساسية للمقاومة الكلية، كما تم حساب المقاومة الكلية للنموذج المدروس. بعد ذلك تم حساب نسبة مقاومة الاحتكاك من المقاومة الكلية وتمت مقارنة قيمة هذه النسبة بين كل المقياس.

الجدول 4 يوضح قيمة كل من مركبة الضغط F_p ومركبة الاحتكاك F_f والمقاومة الكلية F_T التي تم الحصول عليها من الحسابات الرقمية. بناء على هذه النتائج تم حساب النسبة المئوية لمقاومة الاحتكاك من المقاومة الكلية F_f/F_T ، وكما هو واضح من الجدول فإن هذه القيمة ثابتة تقريباً لكل المقياس وتساوي تقريباً 81.55% (تم أخذ القيمة الوسطية لكل النسب التي تم الحصول عليها من كل المقياس). بناء على هذه النتيجة فإنه يمكننا تقدير مقاومة السفينة الحقيقية وفق الطريقة التالية:

- يتم حساب معامل مقاومة الاحتكاك من خلال استخدام علاقة الـ ITTC-57، انظر العلاقة (1)، والتي هي الأفضل مع أرقام فرود الصغيرة (الأصغر من 0.145) وفقاً لدراسة [22] Guo et al. 2023.
- يتم من خلال معامل المقاومة التي يتم حسابها $C_{f_{ITTC}}$ حساب مقاومة الاحتكاك باستخدام العلاقة (2).
- يتم ضرب النتيجة التي يتم الحصول عليها بالنسبة $\frac{100}{81.55}$ ليتم الحصول على المقاومة الكلية للسفينة بالمقياس الحقيقي أو أي مقياس آخر.

$$C_{f_{ITTC}} = \frac{0.075}{(\log Re - 2)^2} \quad (1)$$

$$F_f = \frac{1}{2} C_{f_{ITTC}} \rho V^2 S_W \quad (2)$$

حيث أن Re هو رقم رينولدز، ρ كثافة الماء وهي 998.2 kg/m^3 للماء العذب (للمناذج)، و 1025 kg/m^3 للماء المالح (للسفينة الحقيقية)، V السرعة m/s و S_W مساحة السطح المبلل m^2 . الخطوات السابقة تم حسابها وعرضها في الجدول 4 حيث تم حساب قيمة معامل مقاومة الاحتكاك $C_{f_{ITTC}}$ وفقاً لطريقة الـ $ITTC-57$ ليتم بعدها حساب مقاومة الاحتكاك باستخدام العلاقة (2) والمقاومة الكلية $F_{T_{assum}}$ من خلال ضرب مقاومة الاحتكاك بـ $\frac{100}{81.55}$. النتيجة التي تم الحصول عليها للمقاومة الكلية وفقاً لهذه الطريقة تمت مقارنتها مع النتيجة الرقمية للمقاومة الكلية F_T وتم حساب الفرق بينهما كنسبة مئوية $Deviation \%$. كما هو واضح من الفرق بين القيمتين فإن العلاقة المقترحة (3) تعطي تقريبا جيدا جدا لقيمة المقاومة الحقيقية للسفينة في كل المقاييس.

$$F_{T_{assum}} = F_{f_{ITTC}} \times \frac{100}{81.55} \quad (3)$$

الجدول 4: قيم مركبات المقاومة رقمياً وحسابياً.

λ	V	L_{PP}	F_p	F_f	F_T	F_f/F_T	Re	S_W	$C_{f_{ITTC}}$	$F_{T_{assum}}$	Deviation
[-]	[m/s]	[m]	[N]	[N]	[N]	[%]	[-]	[m ²]	[-]	[N]	[%]
1	7.970	320	280194	1234637	1514832	81.5	2.55×10^9	27194	0.00136	1484164.9	-2.024
10	2.561	32	411.7	1862.9	2274.6	81.9	8.1952×10^7	271.94	0.00214	2341.09	2.92
20	1.780	16	59.8	268.2	328.0	81.7	2.848×10^7	67.985	0.00252	332.32	1.31
30	1.453	10.667	19.48	86.43	105.92	81.6	15.499×10^6	30.215	0.00278	108.69	2.61
40	1.258	8	8.82	38.72	47.54	81.4	10.064×10^6	16.996	0.00299	49.33	3.76
58	1.047	5.5172	3.2	13.9	17.1	81.2	5.776×10^6	8.0838	0.0033	17.93	4.91

من خلال ما سبق يمكننا ملاحظة الأمور التالية:

- أن نسبة مقاومة الاحتكاك من المقاومة الكلية ثابتة تقريباً عند كل المقاييس، وهذا يساعدنا بشكل كبير في حساب المقاومة الكلية لأي مقياس يراد دراسته.
- إن علاقة الـ $ITTC-57$ تعطي تقديراً جيداً جداً لمقاومة الاحتكاك عند أرقام فرود الصغيرة، وهي نفس النتيجة التي توصلت إليها الدراسة [22] Guo et al. 2023.
- يمكن اعتماد العلاقة (3) لحساب المقاومة الكلية لسفينة الـ KVLCC2 عند أي مقياس.

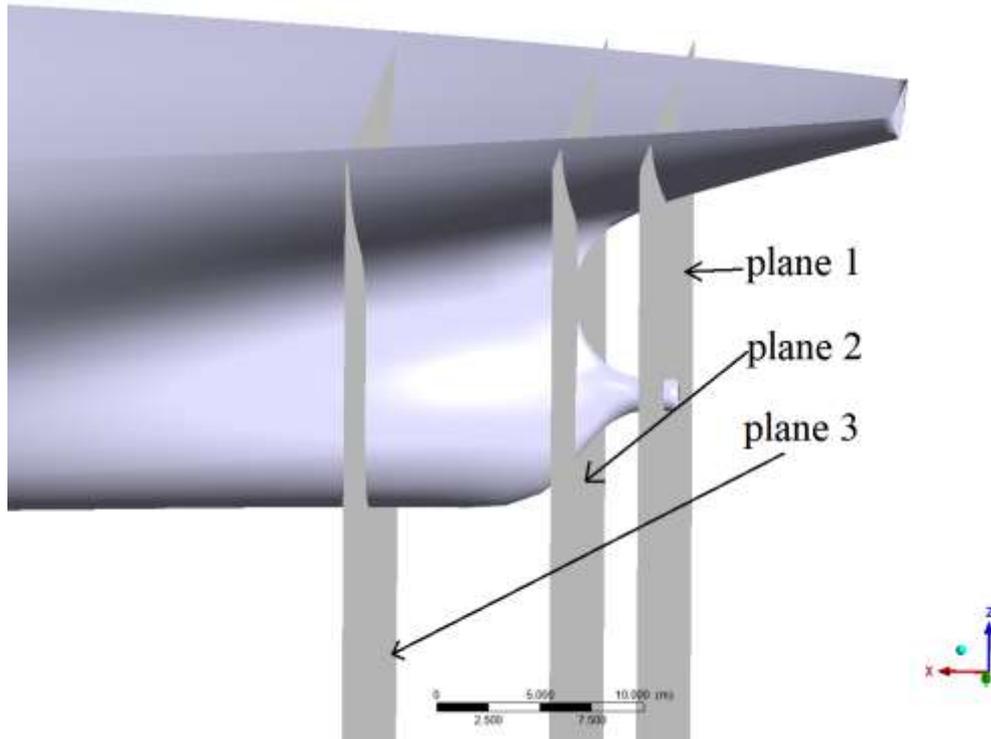
6. دراسة تأثير تغيير المقياس على حقل التدفق حول بدن السفينة

يعتبر حقل السرعة في مستوي الرفاص وحقل الضغط على سطح السفينة من أهم البارامترات التي يجب دراستها وتحليلها فيما يخص حقل التدفق حول البدن السفينة، وهذه البارامترات مهمة جداً في المراحل الأولى من التصميم من أجل معرفة ظروف عمل الرفاص والتي تساعدنا في اختيار وتصميم الرفاص المناسب للسفينة، ومن أجل معرفة توزع القوى والعزوم التي تتعرض لها السفينة. بناء على ذلك سيتم عرض كل من حقل السرعة في مستوي الرفاص للمقاييس

الخمسة، توزع الضغط على سطح السفينة، بالإضافة إلى حقل الدوامات خلف السفينة والتي تعتبر مهمة جداً لمعرفة الأحمال التي سيتعرض لها الرفاص بفعل انفصال الطبقة الحدية خلف البدن.

6.1. حقل السرعة

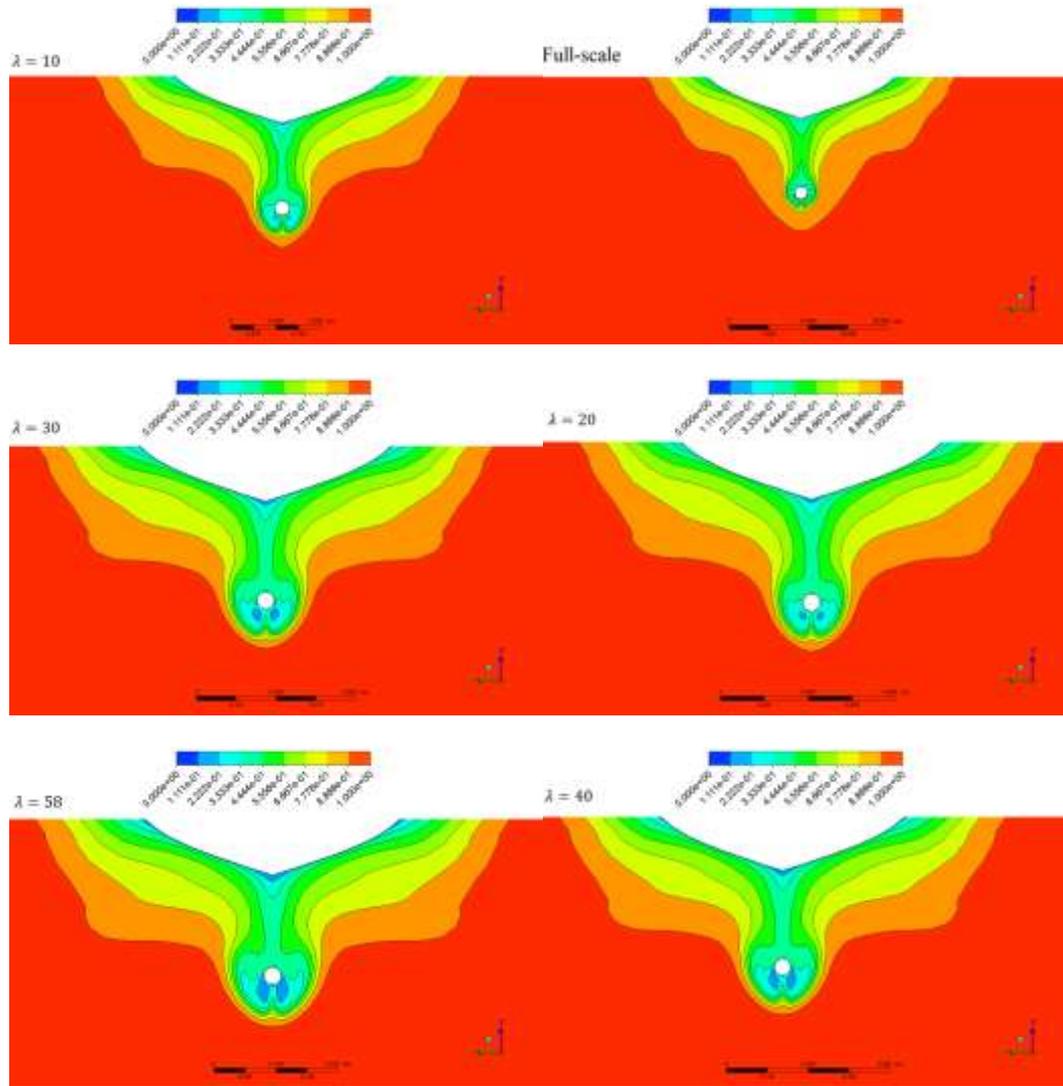
تم مقارنة حقل السرعة في ثلاثة مستويات في منطقة المؤخرة، المستويات الثلاثة التي تم عرض حقل السرعة فيها موضحة في الشكل 5. لقد تم تمثيل السرعة بشكل لا بعدي حيث تم تقسيم سرعة التدفق في كل نقطة في المستويات الثلاثة على سرعة السفينة وهذا ما يسمى بحقل المخر الاسمي (nominal wake).



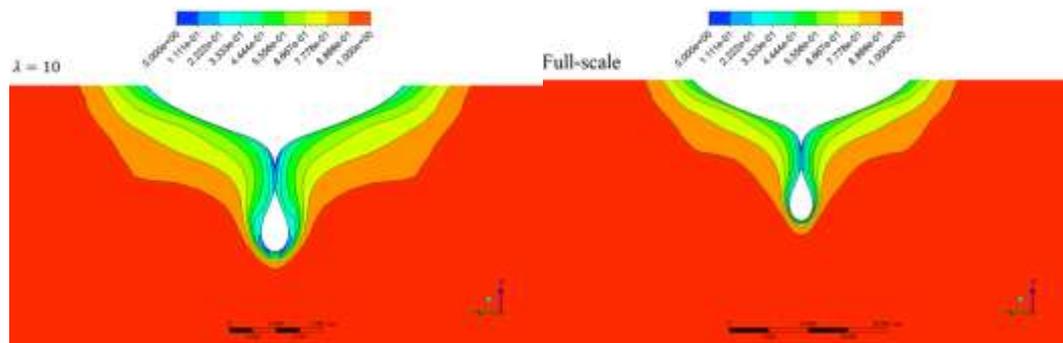
الشكل 5: المستويات الثلاث التي تم فيها قياس حقل السرعة.

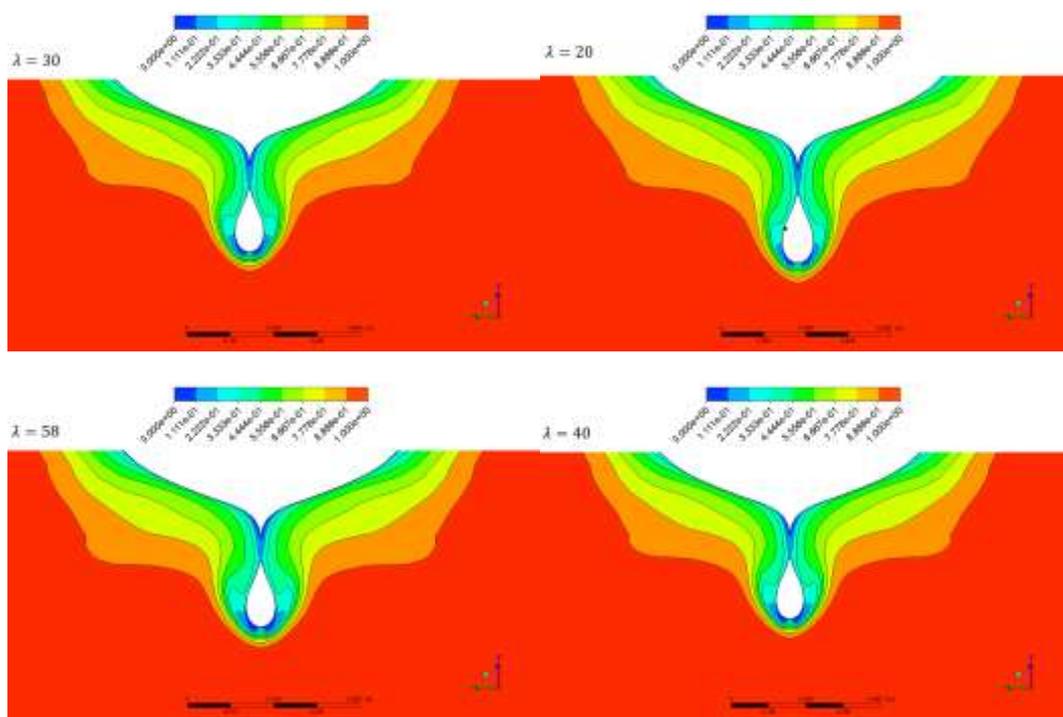
الشكل 6 والشكل 7 والشكل 8 توضح حقل السرعة اللابعدية في المستويات الثلاثة خلف المقاييس المختلفة لسفينة الـ KVLCC2. من هذه الأشكال يمكننا ملاحظة الأمور التالية:

- هناك تشابه كبير بين حقول السرعة خلف جميع النماذج مع حقل السرعة خلف السفينة الحقيقية وبشكل كبير جداً، والفرق الوحيد هو انخفاض منطقة التدفق المنخفض السرعة حول محور الرفاص في حالة السفينة الحقيقية بالمقارنة مع النماذج الأصغر قياساً.
- في كل المقاييس يكون التدفق ضمن قرص الرفاص غير متجانس، حيث نلاحظ عند مخرج محور الرفاص انخفاض كبير في حقل السرعة بالمقارنة مع حقل السرعة بعيداً عن المحور، حيث تزداد سرعة التدفق كلما ابتعدنا عن محور الرفاص وصولاً إلى منطقة التدفق الحر، والسبب الأساسي في هذا الأمر هو انفصال الطبقة الحدية عن البدن، والذي يسبب تشكل مناطق السرعة المنخفضة، وأيضاً هو السبب في هذا التدرج في قيمة السرعة (التوزيع الغير متجانس للسرعة حول محور الرفاص).
- يتوضع الرفاص بشكل كامل ضمن منطقة المخر خلف بدن السفينة، وهذا الأمر يتحقق في كل المقاييس.

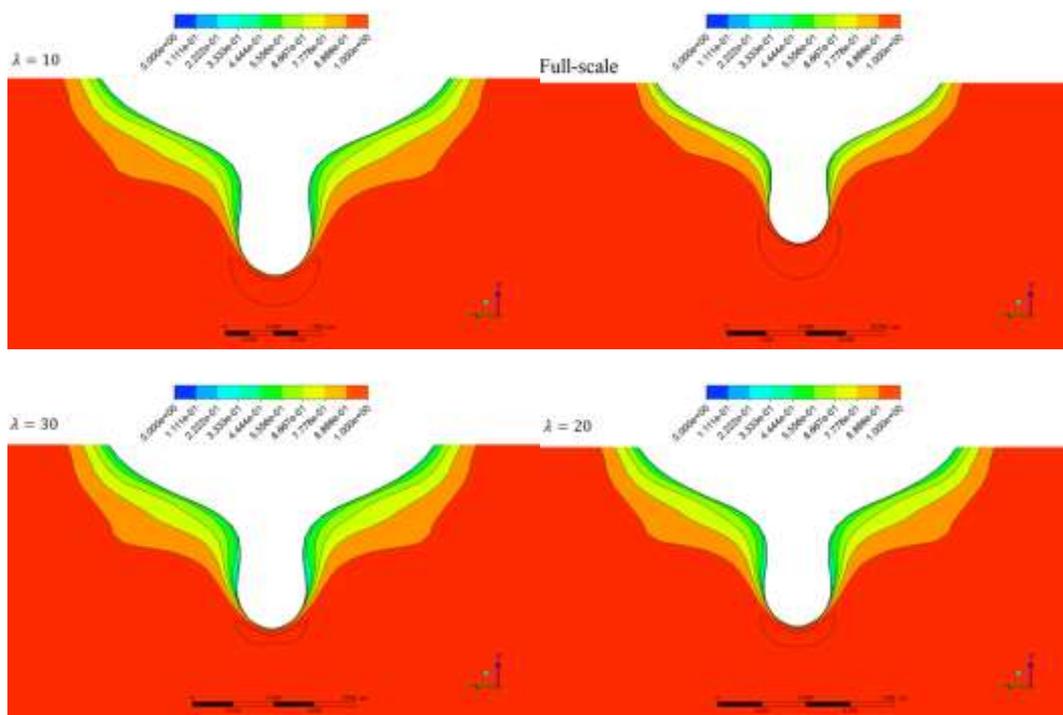


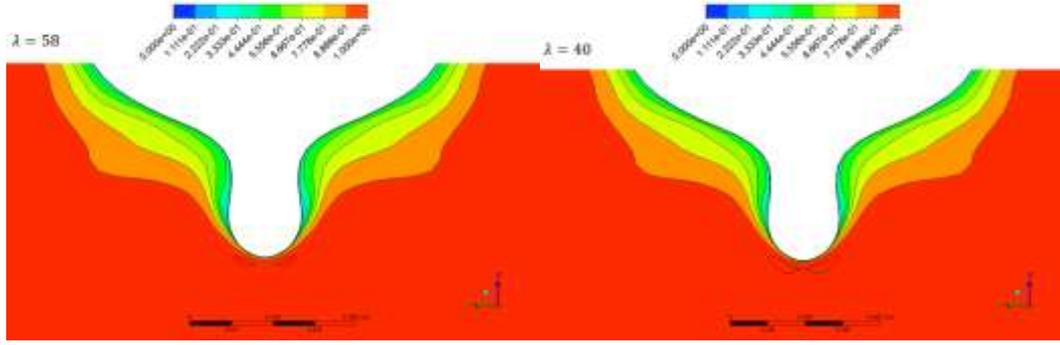
الشكل 6: حقل السرعة اللابعدي في المستوى الأول plane 1 خلف المقاييس المختلفة لناقلة النفط KVLCC2.





الشكل 7: حقل السرعة اللابعدية في المستوي الثاني plane 2 خلف المقاييس المختلفة لناقلة النفط KVLCC2.





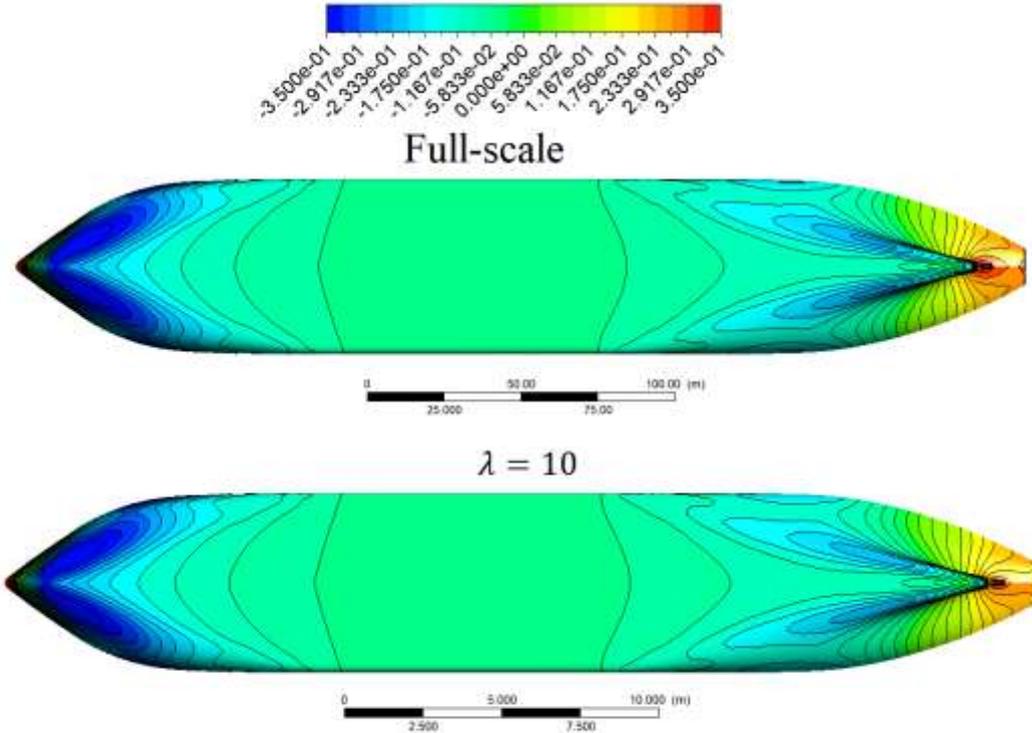
الشكل 8: حقل السرعة اللاحدية في المستوي الثالث plane 3 خلف المقاييس المختلفة لناقلة النفط KVLCC2.

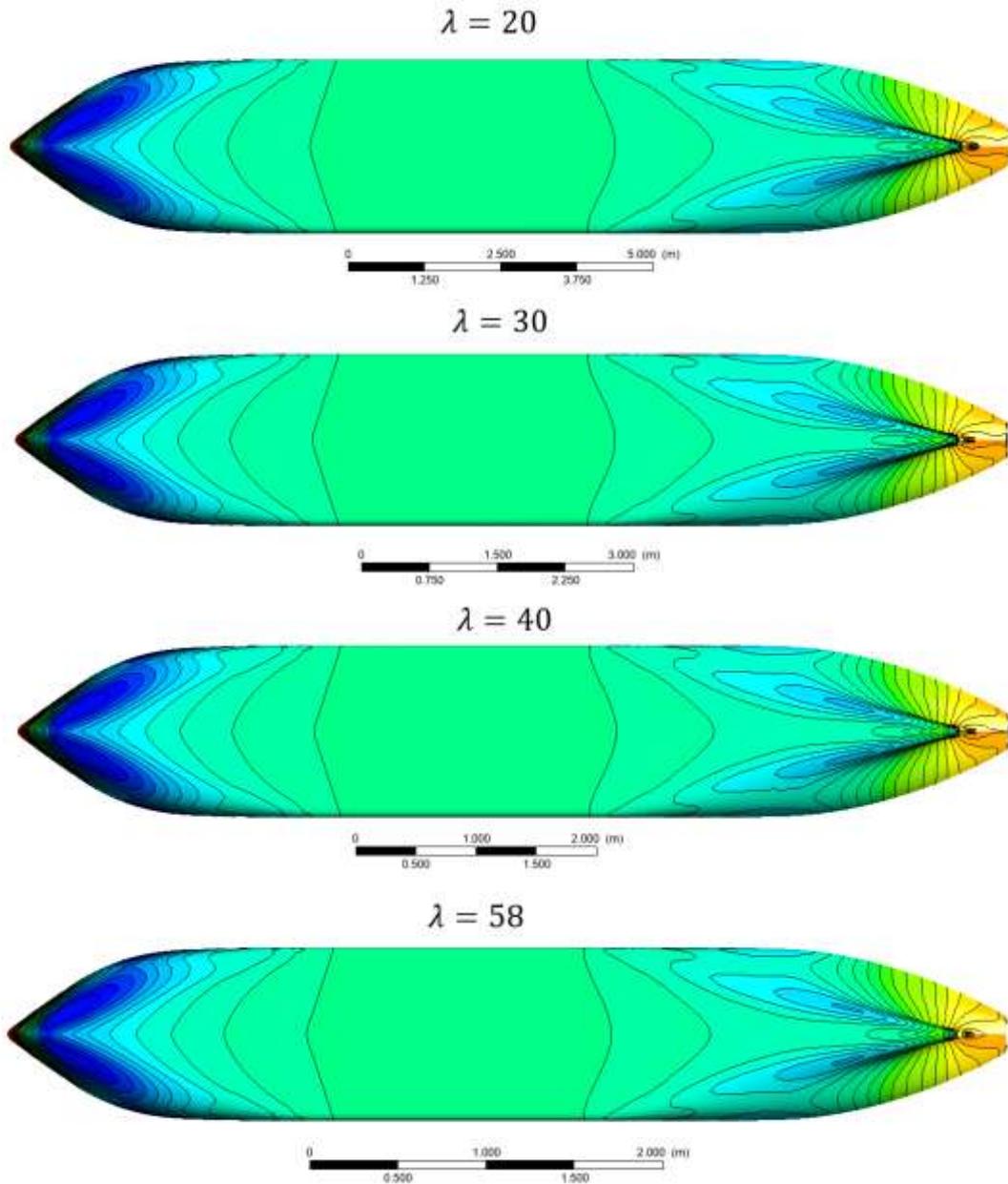
6.2. حقل الضغط

لقد تم حساب معامل الضغط وفق العلاقة التالية:

$$C_p = \frac{P - P_0}{0.5 \cdot \rho \cdot V^2} \quad (4)$$

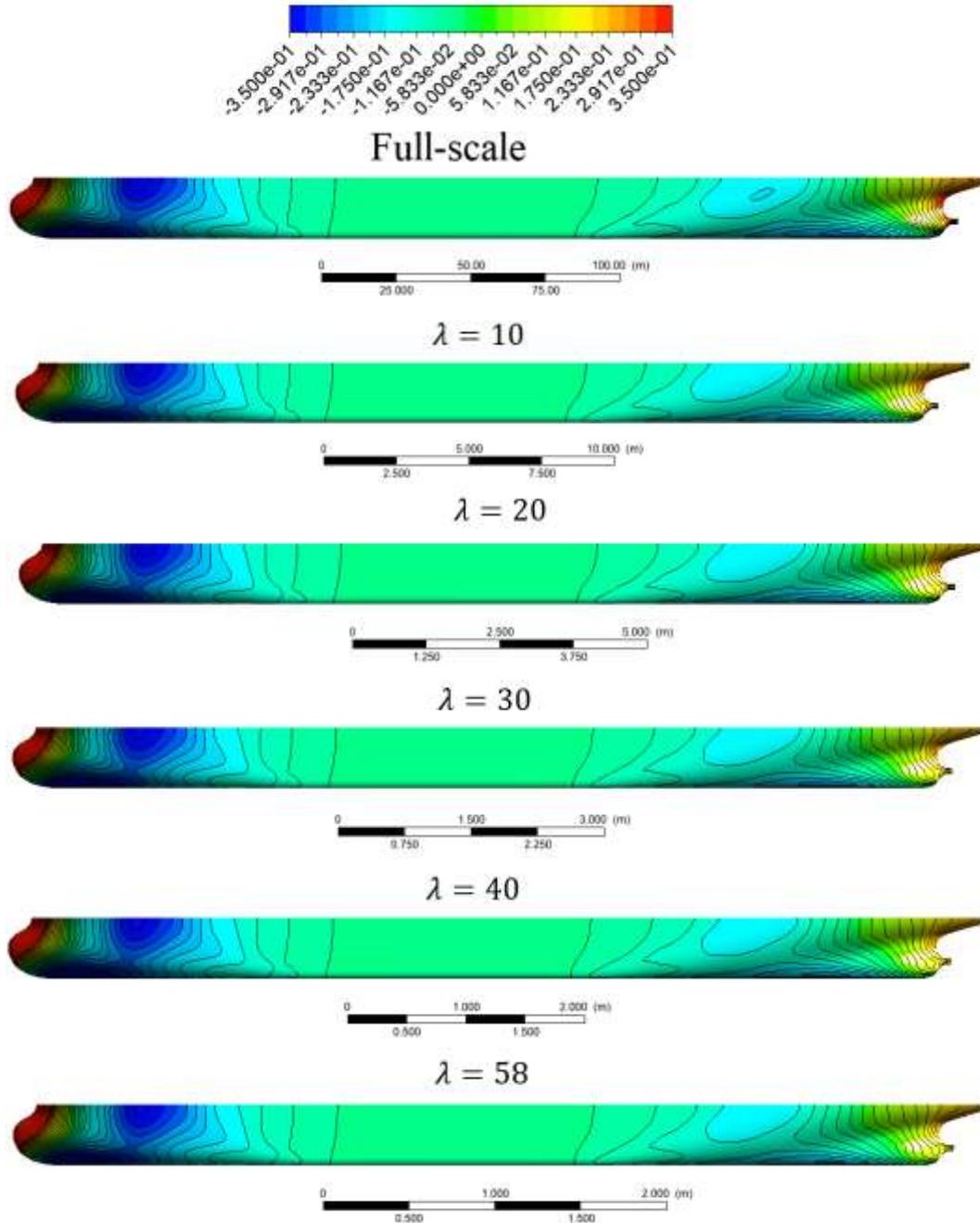
- حيث أن P هو الضغط في كل نقطة، P_0 هو الضغط الجوي، ρ كثافة الماء، V سرعة السفينة.
- الشكل 9 وحتى الشكل 11 توضح توزيع معامل الضغط لكل المقاييس على كل من أسفل ويسار ويمينة السفينة. وكما هو واضح من هذه الأشكال يمكننا ملاحظة الأمور التالية:
- هناك تشابه كبير جداً في توزيع معامل الضغط على سطح السفينة لكل المقاييس، وبالتالي فإن دراسة النموذج بأي مقياس تصغير سيقدم صورة صحيحة وحقيقية عن توزيع قوى الضغط المؤثرة على البدن.
 - يتشكل عند المقدمة منطقة ضغط مرتفع، حيث أن منطقة المقدمة هي منطقة بداية اصطدام الماء بالبدن الأمر الذي يؤدي إلى توقف حركة جزيئات الماء، وبالتالي ووفقاً لبرنولي سيتسبب هذا الأمر في زيادة الضغط بشكل كبير.



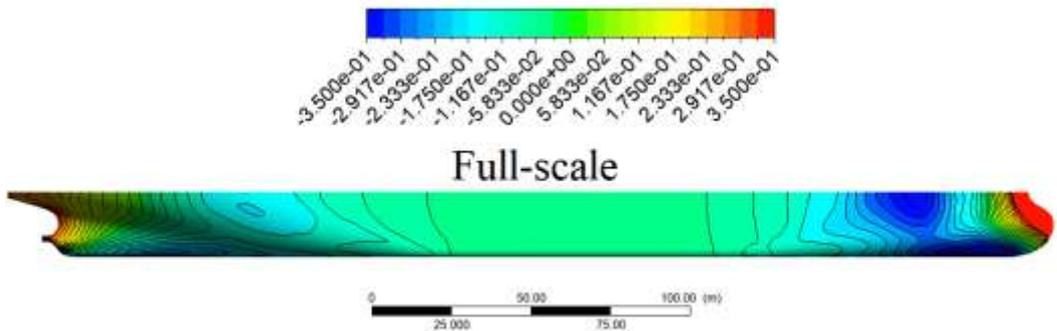


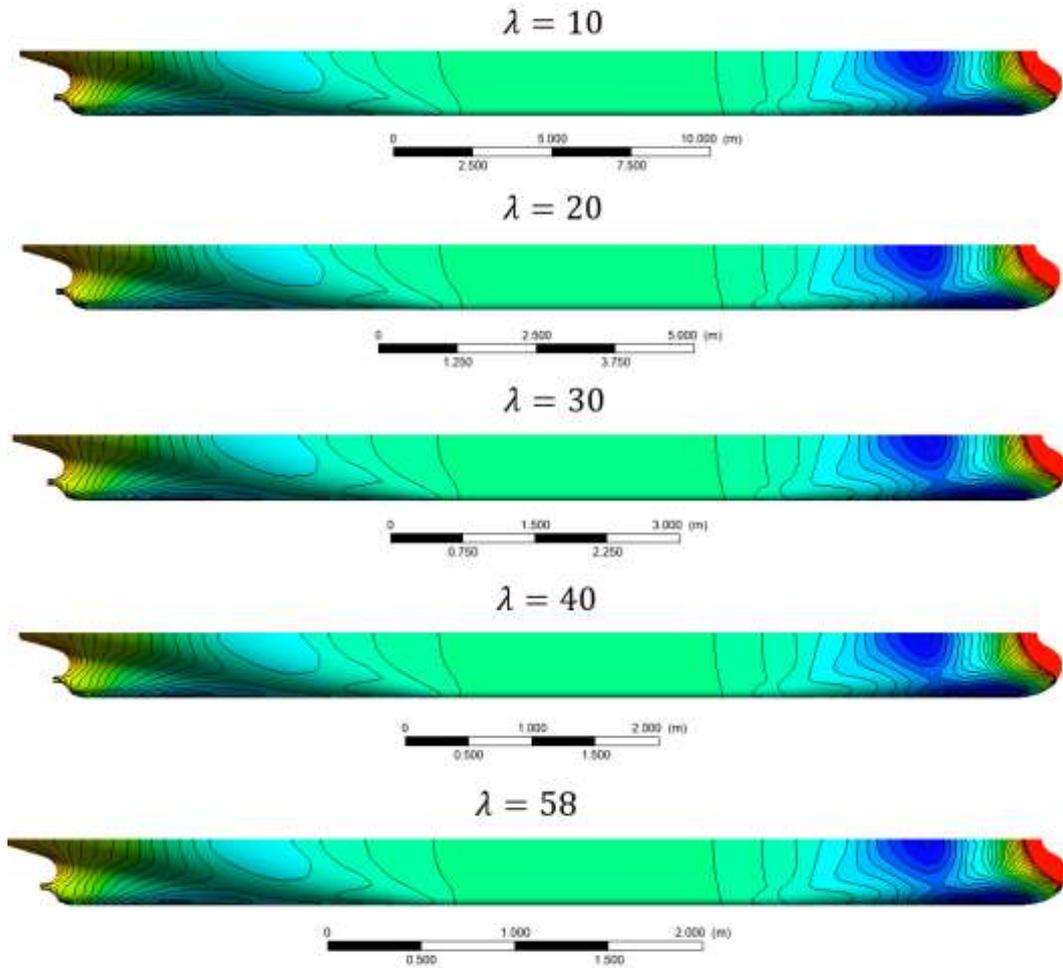
الشكل 9: توزيع معامل الضغط أسفل السفينة لكل المقاييس.

- أعلى مؤخرة السفينة يتشكل منطقة ضغط مرتفع، والسبب في هذا هو انفصال الطبقة الحدية والذي يتسبب في انخفاض سرعة التدفق ومرة أخرى وفقاً لبرنولي سيتسبب هذا الأمر في زيادة الضغط المحلي.
- في الجزء الأخير من قاع السفينة يتشكل منطقتي ضغط منخفض يكونان متناظران بالنسبة لمنتصف السفينة، السبب الأساسي في تشكل هاتين المنطقتين هو بداية انفصال الطبقة الحدية، وتعتبر هاتين المنطقتين بداية تشكل دوامتين كبيرتين يدخلان إلى قرص الرفاص، والتي سيتم عرضهما بشكل مفصل لاحقاً.
- على يمين ويسار الجزء الأمامي من البدن يتشكل منطقة ضغط منخفض لكل الحالات.



الشكل 10: توزيع معامل الضغط على يسار السفينة لكل المقاييس.





الشكل 11: توزيع معامل الضغط على يمين السفينة لكل المقاييس.

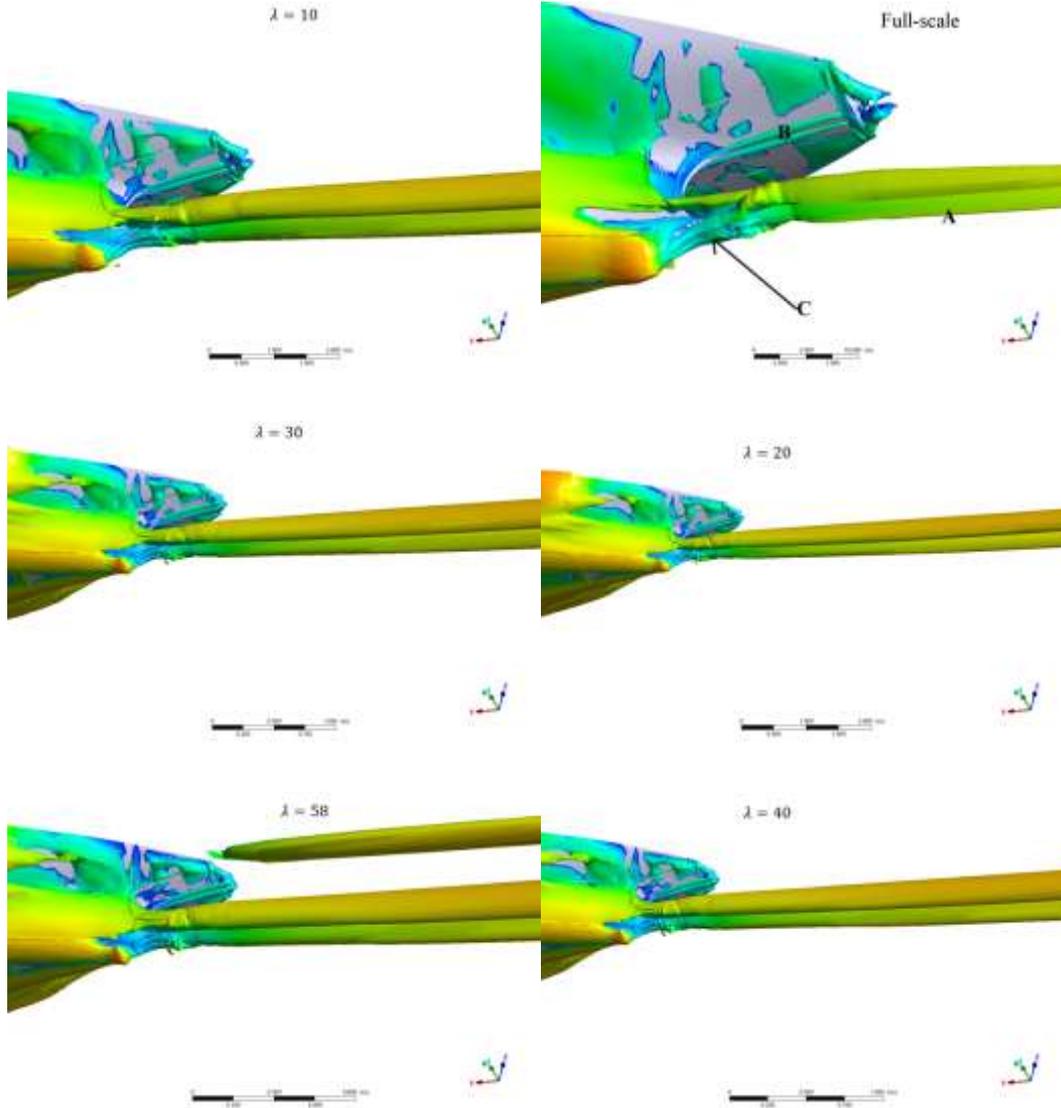
- هناك تناظر تام في حقل الضغط على جانبي السفينة في حالة غياب زاوية الانحراف للسفينة، وهذا هو السبب في انعدام القوى العرضية المؤثرة على السفينة عند الإبحار إلى الأمام مباشرة.
- هناك تشابه كبير بين نتائج كل المقاييس.
- كما في الأشكال السابقة يتشكل منطقة ضغط مرتفع أعلى مؤخرة السفينة، والسبب كما ذكرنا سابقاً هو انفصال الطبقة الحدية وتشكل المخر (منطقة سرعة منخفضة)، انظر الشكل 6، ووفقاً لبرنولي سيتسبب هذا الأمر في زيادة الضغط.
- على يمين ويسار محور الرفاص يتشكل منطقة ضغط منخفض صغيرة، والسبب الأساسي في هذا الأمر هو وجود دوامتين ضخمتين، الدوامات A كما هو موضح في الشكل 13.

6.3. حقل الدوامات

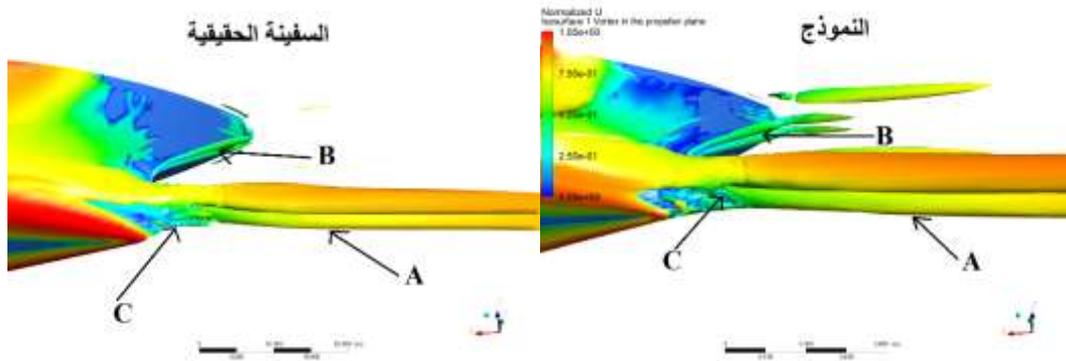
إن دراسة نظام الدوامات المتشكل حول بدن السفن يعتبر أمر غاية في الأهمية ويحظى بالكثير من الاهتمام في مجال بناء السفن، وذلك لما يسببه من عدم تجانس في التدفق الذي يدخل إلى قرص الرفاص، وهذا بدوره يؤدي إلى اهتزازات في الرفاص والتي تنتقل إلى مؤخرة السفينة ومنها إلى بدن السفينة [26].

يعرض الشكل 12 حقل الدوامات المتشكل خلف بدن السفينة الناقلة KVLCC2 للمقاييس الستة التي تمت دراستها. كما هو واضح في الشكل 12، يتشكل خلف بدن سفينة الـ KVLCC2 في كل المقاييس دوامتان طوليتان ضخمتان (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 في أثناء الإبحار. والدوامتان الأكثر أهمية وتأثيراً، هما الدوامتان الضخمتان (A)، وذلك لأنهما يدخلان بشكل مباشر إلى منطقة عمل الرفاص. تتشكل هذه الدوامات الضخمة خلف الجزء الأنيوبي من السفن الناقلة (Tankers) وسفن الصب (Bulk Carriers)، وقد تم في دراسة سابقة دراسة تأثير تغيير المقياس على سفينة الصب JBC وتم الحصول على نتيجة مشابهة بشكل كبير إلى هذه النتيجة، انظر الشكل 13.

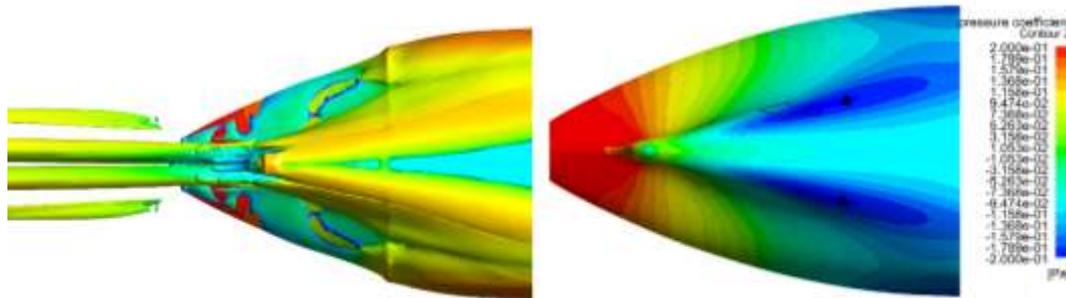


الشكل 12: الدوامات المتشكلة خلف سفينة النفط KVLCC2.



الشكل 13: الدوامات المتشكلة خلف سفينة الصب JBC بدون زاوية انحراف [27].

والسبب في تشكل هذه الدوامات كان قد تم شرحه بشكل مفصل في العمل السابق [27]. حيث أن 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 ($Re = \frac{u \cdot x}{\nu}$) وتزداد قيمته كلما اتجهنا باتجاه المؤخرة حتى يحقق القيمة الحرجة، عند هذه القيمة تحدث عملية الانتقال من التدفق الصفحي إلى التدفق المضطرب، وبالتالي 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 $(\frac{\partial P}{\partial x} > 0 \text{ and } \frac{\partial u_x}{\partial y} (y = 0) < 0)$. الشكل 14 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، انظر الشكل 14 [27].



الشكل 14: منطقة انفصال الطبقة الحدية عند مؤخرة السفينة، وهي منطقة بداية تشكل الدوامتين الضخمتين A المعروضتين سابقاً [27].

من الشكل 12 نلاحظ هناك تطابق كبير بين حقل الدوامات المتشكل خلف السفينة الحقيقية وكل النماذج المدروسة، وهذا الأمر يعتبر مهم جداً ويوضح أهمية دراسة النماذج واعتمادها لتوقع سلوك السفينة الحقيقية. كما هو واضح من الأشكال السابقة، فإن الدوامتين الضخمتين تدخلان في قرص الرفاص تماماً، وهذا يعني أن الرفاص سيتعرض لأحمال كبيرة بفعل هاتين الدوامتين، وهذا الأمر ضروري جداً أن يتم أخذه بعين الاعتبار عند اختيار وتصميم الرفاص المناسب لهذا النوع من السفن.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات

- هناك تشابه كبير في سلوك التدفق حول بدن النموذج وبدن السفينة الحقيقية، الأمر الذي يوضح أهمية دراسة النماذج.
- إن التجارب على النماذج تقدم صورة دقيقة عما ستعرض له السفينة الحقيقية من ظروف عمل أثناء الإبحار في المياه الحقيقية.
- يمكن استخدام العلاقة التي تم التوصل إليها لحساب مقاومة ناقلات النفط الحقيقية، والنتيجة التي يتم الحصول عليها يمكن أن يضاف لها مقاومة الهواء التي ستعرض لها الأجزاء العلوية من البدن، وستكون نتيجة هذه العلاقة قريبة جدا من الواقع.

التوصيات

- دراسة تأثير تغيير المقياس على السلوك الهيدروديناميكي للسفينة أم في غاية الأهمية ويساعد بشكل كبير في تحديد تأثير المقياس على كل من حقل التدفق والقوى والعزوم المؤثرة على كل من السفينة وملحقاتها.

التوصيات للأعمال اللاحقة

- يجب ان تتضمن الدراسات الرقمية التي تخص حقل التدفق حول المركبات البحرية كافة ملحقات المركبة وبالأخص الرفاص لما له من تأثير كبير على خصائص حقل التدفق حول بدن المركبة البحرية.
- إجراء نفس الدراسة على سفينة الحاويات KCS من أجل التوصل إلى علاقة مشابهة تساعدنا في حساب مقاومة السفينة الحقيقية بالاعتماد على مقاومة النموذج.
- استخدام طرق أكثر دقة من طريقة الـ URANS مثل الطرق الهجينة وذلك في حال توفر الإمكانيات الحاسوبية الجيدة.

References:

- [1] Q. Zeng, R. Hekkenberg, C. Thill, and H. Hopman, "Scale effects on the wave-making resistance of ships sailing in shallow water," *Ocean Eng.*, vol. 212, p. 107654, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2020.107654.
- [2] S. Hai-Long, E. O. Obwogi, and S. Yu-Min, "Scale effects for rudder bulb and rudder thrust fin on propulsive efficiency based on computational fluid dynamics," *Ocean Eng.*, vol. 117, pp. 199–209, May 2016, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2016.03.046.
- [3] V. Heller, "Scale effects in physical hydraulic engineering models," *J. Hydraul. Res.*, vol. 49, no. 3, pp. 293–306, Jun. 2011, doi: 10.1080/00221686.2011.578914.
- [4] J. De Rouck, J. Geeraerts, P. Troch, A. Kortenhaus, T. Pullen, and L. Franco, "New results on scale effects for wave overtopping at coastal structures," *Int. Conf. Coastlines, Struct. Break.* 2005, pp. 29–43, 2005, [Online]. Available: <https://www.vliz.be/imisdocs/publications/ocrd/222608.pdf>.
- [5] 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.
- [6] D. M. Park, Y. Kim, M. G. Seo, and J. Lee, "Study on added resistance of a tanker in head waves at different drafts," *Ocean Eng.*, vol. 111, pp. 569–581, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2015.11.026.
- [7] N. Abbas, N. Kornev, I. Shevchuk, and P. Anschau, "CFD prediction of unsteady forces on marine propellers caused by the wake nonuniformity and nonstationarity," *Ocean Eng.*, 2015, doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.06.007.

- [8] N. Abbas and B. Oderah, "CFD Study of the Bulbous Bow Effect on the Resistance of the Tanker-KVLCC2," Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser., vol. 43, no. 4, 2021, [Online]. Available: <https://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/10823>.
- [9] N. Abbas and Z. Ali, "CFD Study of the Effect of Surface Roughness on the Resistance of KVLCC2 tanker," Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser., vol. 44, no. 1, 2022, [Online]. Available: <https://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/12028>.
- [10] A. Zedan and N. Abbas, "Studying the Effect of Stratified Fluid on the Resistance and Flow Field of the KVLCC2 Tanker and DARPA Suboff using CFD," Tishreen Univ. Journal-Engineering Sci. Ser., vol. 46, no. 1, pp. 303–320, 2024, [Online]. Available: <https://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/16467>.
- [11] N. Kornev, I. Shevchuk, N. Abbas, P. Anschau, and S. Samarbakhsh, "Potential and limitations of scale resolved simulations for ship hydrodynamics applications," Sh. Technol. Res., vol. 66, no. 2, 2019, doi: 10.1080/09377255.2019.1574965.
- [12] N. Abbas and N. Kornev, "Study of unsteady loadings on the propeller under steady drift and yaw motion using URANS, hybrid (URANS-LES) and LES methods," Sh. Technol. Res., vol. 63, no. 2, pp. 121–131, May 2016, doi: 10.1080/09377255.2016.1211582.
- [13] 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.
- [14] S. H. Lee, K. J. Paik, H. S. Hwang, M. J. Eom, and S. H. Kim, "A study on ship performance in waves using a RANS solver, part 1: Comparison of power prediction methods in regular waves," Ocean Eng., vol. 227, p. 108900, May 2021, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2021.108900.
- [15] H. Liu, N. Ma, and X. Gu, "Experimental Study on Ship-Bank Interaction of Very Large Crude Carrier in Shallow Water," J. Shanghai Jiaotong Univ., vol. 23, no. 6, 2018, doi: 10.1007/s12204-018-1999-5.
- [16] N. Abbas and N. Kornev, "Validation of hybrid URANS/LES methods for determination of forces and wake parameters of KVLCC2 tanker at manoeuvring conditions," Sh. Technol. Res., vol. 63, no. 2, pp. 96–109, May 2016, doi: 10.1080/09377255.2016.1157275.
- [17] N. Abbas and N. Al-Aji, "The Influence of Drift Angle on the Flow Field around KVLCC2 Tanker Using CFD," Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser., vol. 44, no. 1, 2022, [Online]. Available: <https://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/12043>.
- [18] F. H. Todd, "The Model-Ship Correlation Problem," Mar. Technol. SNAME News, vol. 3, no. 02, pp. 152–157, 1966, [Online]. Available: <https://onepetro.org/MTSN/article-abstract/3/02/152/175666>.
- [19] M. Terziev, T. Tezdogan, and A. Incecik, "A geosim analysis of ship resistance decomposition and scale effects with the aid of CFD," Appl. Ocean Res., vol. 92, p. 101930, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.APOR.2019.101930.
- [20] K. J. Oh and S. H. Kang, "Full scale Reynolds number effects for the viscous flow around the ship stern," Comput. Mech., vol. 9, no. 2, pp. 85–94, Mar. 1992, doi: 10.1007/BF00370064/METRICS.
- [21] Z. Z. Wang, Y. Xiong, R. Wang, X. R. Shen, and C. H. Zhong, "Numerical study

- on scale effect of nominal wake of single screw ship,” *Ocean Eng.*, vol. 104, pp. 437–451, Aug. 2015, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2015.05.029.
- [22] C. Guo, X. Zhong, and D. Zhao, “Research on Scale Effect of Resistance Components for Full-Formed Ship Based on Large-Scale Model Towing Test,” *J. Mar. Sci. Eng.* 2023, Vol. 11, Page 1300, vol. 11, no. 7, p. 1300, Jun. 2023, doi: 10.3390/JMSE11071300.
- [23] N. Abbas and H. Daoud, “Study of the Influence of an Interceptor on the Resistance of the High-speed Vessels Using CFD,” *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 44, no. 3, 2022, [Online]. Available: <https://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/11698>.
- [24] Simman 2008, “MOERI KVLCC2 Geometry and Conditions, SIMMAN 2008, FORCE Technology.” Accessed: 26-Jun-2021. [Online]. Available: http://www.simman2008.dk/KVLCC/KVLCC2/kvlcc2_geometry.html.
- [25] C. Fureby, S. L. Toxopeus, M. Johansson, M. Tormalm, and K. Petterson, “A computational study of the flow around the KVLCC2 model hull at straight ahead conditions and at drift,” *Ocean Eng.*, vol. 118, pp. 1–16, May 2016, doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.03.029.
- [26] N. Al-Aji, “Calculation and analysis of the flow around the KVLCC2 model at different sailing conditions using CFD,” Master Thesis, Tishreen University, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Department of Marine Engineering, 2022.
- [27] N. Abbas, “Study of the scale effect on the resistance components and the flow field around the bulk carrier ship,” *Tishreen Univ. Journal-Engineering Sci. Ser.*, vol. 46, no. 1, pp. 23–41, 2024, [Online]. Available: <https://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/16715>.
- [28] H. Schlichting and K. Gersten, *Boundary-Layer Theory*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000.