

Studying the Effect of Stratified Fluid on the Resistance and Flow Field of the KVLCC2 Tanker and DARPA Suboff using CFD

Dr. Nawar Abbas*
Amani Zedan**

(Received 20 / 11 / 2023. Accepted 21 / 2 / 2024)

□ ABSTRACT □

This research aims to study the effect of stratified fluid on the resistance and flow field of ships and submarines. The influence of different speeds, drift angles, and positions of the internal surface on the resistance, the velocity field in the propeller plane, and the pressure field on the hull was studied.

The CFD, URANS method, and the $k-\omega$ Shear Stress Transport (SST) model with the ANSYS program were used to solve the Navier-Stokes equations. The Volume of Fluid method was used to capture the internal surface between stratified fluid layers. The study was carried out on a KVLCC2 model and a DARPA Suboff model. The numerical results were compared with the experimental ones, which agreed well. The effect of the presence of the stratified fluid on both the resistance and the flow field around these marine vehicles was then studied. The results confirmed that sailing a ship or submarine within a stratified fluid will inevitably lead to an increase in resistance and affect the flow field's characteristics around the vehicle's hull. The study proved that submarines are less affected by stratified fluid than ships due to their streamlined shape.

Keywords: DARPA Suboff, KVLCC2, CFD-Computational Fluid Mechanics, $k-\omega$ SST, ANSYS, URAN, VOF method, stratified fluid.

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

** Master Student, Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. Email: amanyzedan34@gmail.com

دراسة تأثير المائع الطبقي على المقاومة وحقل التدفق لكل من ناقلة النفط KVLCC2 والغواصة DARPA Suboff باستخدام تقنية CFD

د. نوار عباس*

أماني زيدان**

تاريخ الإيداع 20 / 11 / 2023. قُبِلَ للنشر في 21 / 2 / 2024

□ ملخص □

تم في هذا البحث دراسة تأثير تغير كثافة ماء البحر على المقاومة وحقل التدفق للسفن والغواصات عند سرعات أمامية مختلفة، كما تمت دراسة تأثير كل من زاوية الانحراف وتغير موضع السطح البيني internal surface على المقاومة وحقل السرعة في مستوى الرفاص وحقل الضغط على كل من بدن السفينة والغواصة. تم استخدام تقنية الـ CFD، طريقة الـ URANS والموديل الرياضي $K - \omega$ SST لحل معادلات نافيه ستوكس ضمن برنامج الـ Ansys. تم استخدام طريقة VOF من أجل حل السطح البيني بين طبقات المائع المختلفة الكثافة. الدراسة تمت على نموذج كل من السفينة الناقلة KVLCC2 والغواصة DARPA Suboff. تم في البداية التأكد من دقة النتائج الرقمية من خلال مقارنتها مع النتائج التجريبية، حيث حققت تطابقاً جيداً جداً. تم بعد ذلك دراسة تأثير وجود المائع الطبقي على كل من المقاومة وحقل التدفق حول وخلف هذه المركبات البحرية. أكدت النتائج أن إبحار السفينة أو الغواصة ضمن منطقة مائع طبقي ستؤدي حتماً إلى زيادة في المقاومة، وستؤثر على خصائص حقل التدفق حول بدن المركبة. أثبتت الدراسة أن الغواصات أقل تأثراً بالمائع الطبقي من السفن وذلك بسبب شكلها الانسيابي.

الكلمات المفتاحية: الغواصة DARPA، السفينة الناقلة KVLCC2، CFD - ميكانيك الموائع الحسابية، k - ω SST، برنامج الـ ANSYS، معادلات URANS، طريقة الـ VOF، المائع الطبقي.

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.

الإيميل: dr.nawarnabilabbas@tishreen.edu.sy

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

amanyzedan34@gmail.com

مقدمة:

إن أغلب الدراسات التجريبية والرقمية تقوم على فرضية أن المائع الذي تتحرك فيه المركبات البحرية ذو كثافة ثابتة لا تتغير، إلا أنه في الواقع هناك حالات تكون فيها كثافة ماء البحر غير ثابتة على كامل ارتفاع غاطس السفينة، حيث أنه عند الإبحار بالقرب من مصبات الأنهار، أو في المناطق الجليدية، فإننا نلاحظ أن هناك طبقة من المياه العذبة تطفو فوق المياه المالحة، كما وتلاحظ نفس الحالة عندما تطفو طبقة من التيارات المحيطية الدافئة فوق طبقة من التيارات الباردة. هذه الحالات تؤدي إلى تشكل مائع طبقي مختلف الكثافة ضمن غاطس السفينة أو الغواصة التي تبحر بالقرب من السطح، هذا التغيير في كثافة الماء وبالأخص في الاتجاه الشاقولي يؤثر بشكل كبير على خواص التدفق (وبشكل خاص في منطقة الطبقة الحدية) حول بدن المركبة البحرية والذي بدوره يؤثر على منطقة انفصال الطبقة الحدية وبالتالي يغير من نظام الدوامات المتشكل ومن المقاومات والعزوم المؤثرة على البدن.

تعتبر دراسة تأثير تغيير كثافة ماء البحر على المقاومة وخواص التدفق حول المركبات البحرية أمر بالغ الأهمية لأنه يساعد على التنبؤ وحل العديد من المشاكل الهيدروديناميكية الناتجة عن الإبحار في الموائع الطبقيّة التي تؤثر بدورها على الأداء الهيدروديناميكي للسفن والغواصات. لدراسة التقسيم الطبقي في المحيط، نقوم بتبسيط هذه الحالة المعقدة إلى حالة مائع من طبقتين، يفصل بين الطبقتين طبقة رقيقة تسمى Pycnocline أو سطح بيني internal surface، حيث يكون هذا التقسيم مستقرًا، ولكن عند وجود اضطرابات مثل (حركة السفينة أو الغواصة، تأثير اجهاد الرياح، حركة التيارات فوق تضاريس القاع) فإنه سيحدث تخلخل في هذا الاستقرار، ونتيجة لهذا التخلخل تولد مجموعة من الأمواج تسمى بالأمواج الداخلية، تقوم هذه الأمواج بنقل الزخم والطاقة وفي بعض الأحيان تقوم بنقل الكتلة، لذلك تلعب الأمواج الداخلية دوراً مهماً في توزيع درجات الحرارة والمغذيات في المياه الداخلية والساحلية، تكون الأمواج الداخلية أبطأ من الأمواج السطحية وذلك لأن فرق الكثافة بين طبقتي المائع يكون صغيراً، ولكن سعة الأمواج الداخلية تكون كبيرة وبالتالي يكون لها تأثير كبير على البيئة [1].

تتواجد الأمواج الداخلية في كثير من البحار والمحيطات، ومنها مضيق جبل طارق حيث تلتقي مياه المحيط الأطلنطي مع مياه البحر المتوسط، ونتيجة اختلاف الملوحة تتدفق مياه الأطلنطي شرقاً (الطبقة العليا) فوق مياه البحر المتوسط (الطبقة السفلية) الذي يتجه غرباً. وتعتبر الأمواج الداخلية ظاهرة مهمة في مضيق جبل طارق والتي تتشكل من خلال تفاعل تيارات المد والجزر الداخلي مع عتبة في القاع تسمى camarinal نتيجة لهذا التفاعل تتشكل الأمواج الداخلية في السطح الفاصل بين مياه البحر والمحيط، تتشكل الأمواج الداخلية أيضاً في المحيط الأطلنطي في المناطق التي تحتوي على جبال بحرية (ترتفع بحدود 1000 متر فوق قاع المحيط) حيث أن حركة التيارات فوق هذه التضاريس تولد الأمواج الداخلية [2].

عندما تبحر السفينة في المياه المتغيرة الكثافة فإن الاضطراب الناتج عن حركة السفينة يخلق موجات عند السطح الفاصل بين الطبقتين حيث يتم إنفاق طاقة السفينة في إثارة الموجات الداخلية بدلاً من دفعها للأمام والتغلب على الأمواج المتشكلة، مما يتسبب في إعاقة حركة السفينة وتباطؤها وهذا ما يعرف بتأثير الماء الميت (Dead water). إن تأثير الأمواج الداخلية لا يقتصر فقط على السفن، حيث يمكن أن تتسبب الأمواج الداخلية في غرق الغواصات، ففي حال تعرضت غواصة لموجة داخلية ودخلت في قاع الموجة، فإنها تصبح فجأة في مياه ذو كثافة منخفضة فيحدث فقدان مفاجئ في الطفو، وعندها يزداد غمر الغواصة بحيث تصل بسرعة إلى أقصى عمق مسموح به، إذا لم يتم اتخاذ

إجراءات مناسبة للحفاظ على العمق ذاته يمكن أن يتسبب ذلك في غرق الغواصة، وهذا يمكن أن يحدث عند إبحار الغواصات في المناطق التي يوجد فيها ينابيع مياه عذبة.

الدراسات المرجعية

يعتبر الباحث النرويجي Fridtjof Nansen في عام 1897 أول من لاحظ هذه الظاهرة وذلك عندما كان مركبه يبحر شمال صربيا فقد لاحظ أنه وبشكل مفاجئ انخفضت سرعة المركب خمسة أضعاف بدون أي تغيير في سرعة دوران المحرك. لاحظ Nansen أنه وأثناء حدوث هذا الانخفاض الكبير في السرعة هناك أمواج داخلية *Internal waves* في البحر تمر من خلالها السفينة [3].

Tulin and Zilman, 1993 [4] قام بتقديم نظرية خطية لتفسير ظاهرة المياه الميتة، الدراسة تمت على جسم نحيل شبيه بالغواصة يتحرك بثبات في مائع ثنائي الطبقة، تم إجراء محاكاة عددية لحساب مقاومة الأمواج والسطح الفاصل بين الطبقتين. تم في هذا العمل تقديم مخطط لمقاومة الأمواج بدلالة رقم فروود حيث لوحظ ارتفاع مفاجئ في المقاومة عند وجود أمواج داخلية في المائع الأكثر كثافة، وهذا يعطي تفسيراً نظرياً لظاهرة المياه الميتة، قدمت هذه الدراسة نمطاً نموذجياً للموجة الداخلية الناتجة عن حركة الجسم النحيف في حالة المياه الميتة، توافقت أنماط الانحراف للسطح الفاصل بين الطبقتين مع أنماط الانحراف التي تمت ملاحظتها في دراسات سابقة.

Duchene, 2011 [5] ظاهرة المياه الميتة باستخدام نماذج غير خطية، فقد لاحظ بالمحاكاة العددية أنه في حالة السائل المكون من طبقتين فإنه عندما تكون الطبقة العليا أكثر سماكة من الطبقة السفلية تصبح الموجة المتولدة أكثر اتساعاً، لذلك تكون ظاهرة المياه الميتة أقوى في هذه الحالة.

Mercier et.al., 2011 [3] أعاد النظر في الدراسات التجريبية التي أجراها إيكمان على المياه الميتة باستخدام تقنيات حديثة، وذلك باستخدام أنواع مختلفة من التقسيم الطبقي (سائل طبقي من ثلاث طبقات، وسائل طبقي خطي) ، حيث لاحظ نفس السلوك غير المستقر المرتبط بالمياه الميتة في حالة السائل من طبقتين وثلاثة طبقات، في حالة السائل الطبقي الخطي لاحظ نشوء عدة موجات عند تحرك القارب مع انتشار عدة أوضاع عند كل تسارع للقارب.

Grue, 2015 [6] قام بدراسة الموجات الداخلية ومقاومة المياه الميتة الناتجة عن سفينة تتحرك على طول الطبقة العليا من سائل ثنائي الطبقة بواسطة نموذج نظري رقمي غير خطي ثلاثي الأبعاد. تبين الحسابات أن القيمة C_{dw} $(b_0/h_0)^2$ تعتمد على عدد فروود فقط في النطاق القريب من السرعة الحرجة بغض النظر عن غاطس السفينة، حيث b_0 هو غاطس السفينة، h_0 ارتفاع الحافة العليا لسطح السفينة، C_{dw} معامل المقاومة في المياه الميتة (Dead water resistance coefficient). تبلغ هذا القيمة الحد الأقصى لها عند رقم فروود دون الحرج اعتماداً على الغاطس، النتائج الرقمية التي تم الحصول عليها حققت توافق جيد مع النتائج التجريبية.

Esmailpour et. al., 2016 [7] منهجية لحساب التدفقات الطبقة في المجال القريب من السفن والغواصات باستخدام تقنية الـ CFD. في الجزء الأول من الدراسة قام بإجراء اختبار على تجويف مربع الشكل، وعلى كرة تتحرك في مائع طبقي مستقر، حيث توافقت النتائج بكلتا الحالتين مع البيانات التجريبية والعديد المتاحة. في القسم الأخير قام بدراسة تأثيرات التدفق حول سفينة الأبحاث أثينا التي تتحرك في سائل طبقي مستقر، والتدفق حول الغواصة الافتراضية Joubert BB2 التي تعمل بالقرب من السطح، ثم حلل اضطرابات الكثافة بالقرب من كليهما، حيث وجد أنه بالنسبة للسفينة فإن هذه الاضطرابات في المجال القريب من البدن لا ترتبط بنظام الموجة السطحية الحرة التي تسببها السفينة.

أما في حالة الغواصة فأظهرت المحاكاة أن المسافة إلى المنطقة التي تزداد فيها الكثافة بسرعة مع ازدياد العمق تؤثر بشدة على الموجة الداخلية المتولدة بفعل وجود الغواصة. Killingstad, 2018 [8] استندت هذه الدراسة على تقنية ديناميك الموائع الحسابية (CFD) باستخدام برنامج OpenFOAM لدراسة ظاهرة المياه الميتة، تمت دراسة قوة السحب والزيادة الحاصلة في هذه القوة في حالة المائع الطبقي. تم إجراء الحسابات الرقمية في حالتي الماء المتغير والثابت الكثافة باستخدام طريقة الـ RANS وتمت المقارنة بينهما. وشملت هذه الدراسة أيضاً على مقارنة بين نتائج الموديلين الرياضيين $k-\epsilon$ و $k-\omega$ لتحديد النموذج الأكثر قابلية للتطبيق في المحاكاة.

أهمية البحث أهدافه:

يمكن تلخيص أهداف البحث كما يلي:

- دراسة تأثير المائع الطبقي (تغير كثافة ماء البحر) على مقاومة كل من ناقله النفط KVLCC2 والغواصة DARPA Suboff عند قيم مختلفة لرقم فرود.
- دراسة تأثير المائع الطبقي على حقل السرعة في مستوى الرفاص وحقل الضغط على سطح كل من المركبتين البحريتين السابقتين.
- دراسة تأثير تغير موضع السطح البيني على كل من المقاومة وحقل السرعة وحقل الضغط عند سرعات مختلفة لكل من السفينة والغواصة.
- دراسة تأثير الانحراف على المقاومة وحقل التدفق في حالة تغير كثافة الماء ووجود سطح بيبي وذلك عند سرعات مختلفة.

منهجية البحث

- تحليلية تجريبية في بيئة الـ ANSYS الافتراضية.

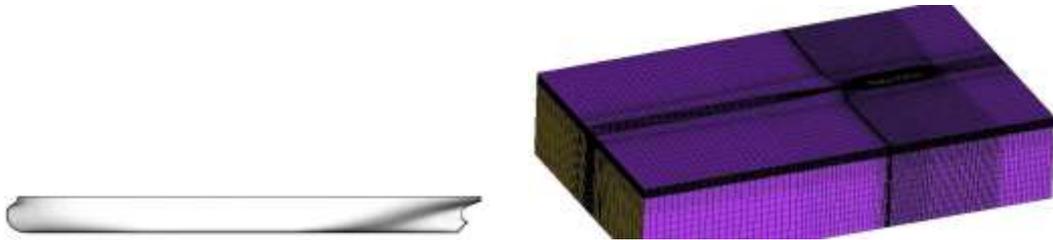
طرائق البحث ومواده:

- النماذج الهندسية للمركبات البحرية المدروسة (السفينة الناقله KVLCC2، والغواصة DARPA Suboff).
- تقنية الـ CFD ضمن برنامج الـ ANSYS.
- طريقة الـ URANS والموديل الرياضي $SST - \omega - K$ لحل معادلات نافيه ستوكس. المعادلات الناظمة للتدفق وموديل الاضطراب $SST - \omega - K$ تم توضيحها بشكل مفصل في أعمال سابقة، على سبيل المثال لا الحصر ننصح القارئ بالاطلاع على الأبحاث التالية [14]–[9].
- طريقة VOF (Volume of Fluid) من أجل حل السطح البيني بين طبقات المائع المختلفة الكثافة.

الأبعاد الهندسية والشبكة الرقمية:

تم في هذا البحث استخدام نوعين من المركبات البحرية وهما نموذج السفينة الناقله KVLCC2 [15]، ونموذج الغواصة DARPA Suboff [16]، تم استخدام الشبكات المنتظمة للنموذجين المدروسين. تمت دراسة السفينة KVLCC2 من دون ملحقات، لإجراء مقارنة بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية فلقد تم استخدام السفينة الناقله بمقياس $\frac{1}{58}$ (وهو المقياس الذي تم استخدامه في القياسات التجريبية [17]) وذلك لكي نستطيع إجراء مقارنة بدون

الحاجة إلى أية تصحيحات. يوضح الشكل 1 المجال الحسابي الذي تم استخدامه ونموذج السفينة المدروسة، ويبين الجدول 1 الأبعاد الهندسية للنموذج.

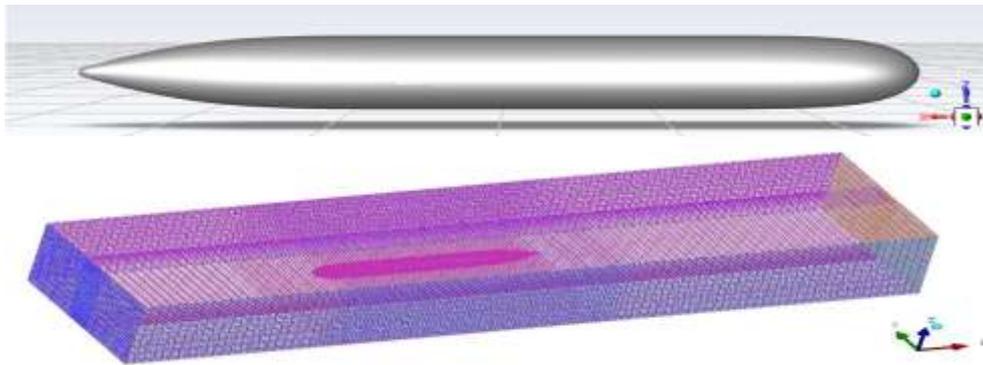


الشكل 1: نموذج السفينة KVLCC2 والمجال الحسابي الذي تم استخدامه.

الجدول 1: الأبعاد الهندسية للسفينة KVLCC2 [15].

القيم	الواحدة	الرمز	الأبعاد الرئيسية
5.5172	m	L_{pp}	الطول بين العمودين
1.000	m	B	عرض السفينة
0.3586	m	D	الغاطس
8.8038	m^2	S_w	مساحة السطح المغمور دون ملحقات
0.8098	-	C_b	معامل امتلاء بدن السفينة
0.1420	-	F_r	رقم فرود
$10^6 \times 4.62$	-	R_e	رقم رينولدز

بالنسبة للغواصة DARPA فإن الشكل 2 يبين النموذج المستخدم (نسبة التصغير $\frac{1}{25}$) والمجال الحسابي لها، والأبعاد الهندسية للغواصة موضحة في الجدول 2.



الشكل 2: نموذج الغواصة DARBA والمجال الحسابي الذي تم استخدامه.

الجدول 2: الأبعاد الهندسية للغواصة DARBA.

$10^7 \times 1.2$	رقم رينولدز
4.356	طول البدن
0.508	قطر البدن

النتائج والمناقشة:**تقييم النتائج الرقمية لمقاومة السفينة KVLCC2**

تم حساب مقاومة السفينة الكلية ضمن برنامج الـ ANSYS وذلك في حالة الكثافة الثابتة للماء $\rho = 998,2k g/m^3$ عند السرعة $1.047 m/s$ ، حيث تتوفر النتائج التجريبية للسفينة عند هذه السرعة. بمقارنة النتيجة الرقمية التي حصلنا عليها مع القيمة التجريبية للسفينة عند نفس السرعة ونفس الكثافة [17] Lee et al., 2003 وجدنا تطابق كبير بين القيم وذلك بوجود نسبة خطأ بلغت 3.8 % وفق الجدول التالي:

الجدول 3: مقارنة القيمة الرقمية مع القيمة التجريبية لمقاومة السفينة KVLCC2.

سرعة السفينة (m/s)	R_T - CFD (N)	R_T - EFD (N)	النسبة المئوية للخطأ
1.047	17.3	18	3.8 %

حيث تم حساب نسبة الخطأ وفق التالي:

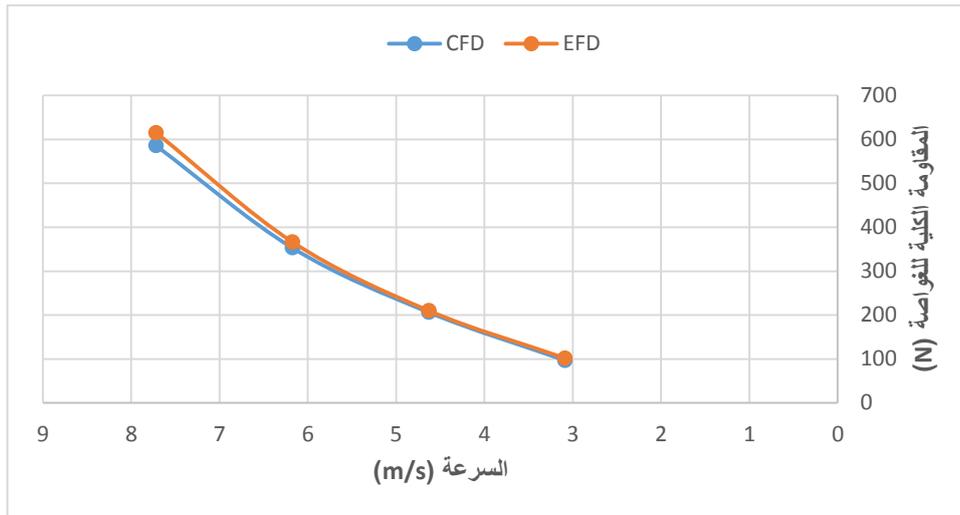
$$\text{Error}_{\text{percentage}} = \frac{(R_T)_{EFD} - (R_T)_{CFD}}{(R_T)_{EFD}} \times 100 \% = \frac{18 - 17.3}{18} \times 100 \% = 3.8 \%$$

تقييم النتائج الرقمية لمقاومة الغواصة DARPA Suboff

كما في حالة السفينة تم حساب مقاومة الغواصة في حالة الكثافة الثابتة للماء $\rho = 998,2k g/m^3$ عند سرعات أمامية مختلفة 3.08, 4.63, 6.17, 7.72 m/s، يبين الشكل 3 كيف تتغير مقاومة الغواصة تبعاً لتغير السرعة حيث تزداد المقاومة الكلية بازدياد السرعة، تمت مقارنة النتائج التي حصلنا عليها مع النتائج التجريبية المتوفرة للغواصة Chase 2012 [16] نلاحظ وجود تقارب جيد جداً بين النتائج التجريبية والنتائج الرقمية، وهذا يدل على دقة النتائج التي يمكن الحصول عليها باستخدام الـ Ansys، القيم الرقمية والتجريبية موضحة في الجدول 4

الجدول 4: مقارنة القيم الرقمية مع القيم التجريبية لمقاومة الغواصة DARPA

السرعة (m/s)	R_T - CFD (N)	R_T - EFD (N)	النسبة المئوية للخطأ
3.08	96.848626	101.84	% 4.9
4.63	206.23878	210	% 1.79
6.17	352.8572	366.35	% 3.68
7.72	585.47029	615	% 4.6



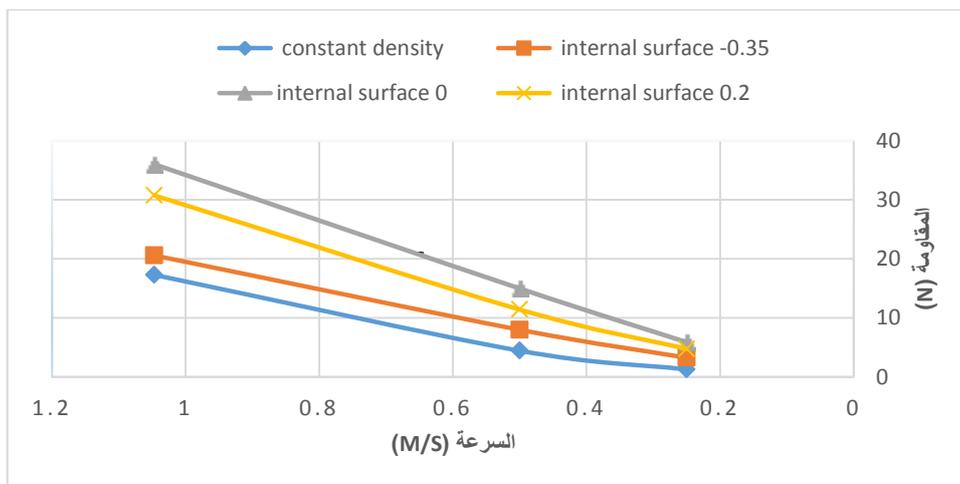
الشكل 3: القيم التجريبية والرقمية لمقاومة الغواصة DARPA.

تأثير تغيير كثافة الماء على مقاومة السفينة KVLCC2

تمت دراسة تأثير تغيير كثافة الماء على نموذج السفينة باستخدام برنامج الـ ANSYS، حيث تم إدخال طبقتين من الماء مختلفتي الكثافة، الطبقة العليا ماء عذب كثافتها $\rho_1 = 998,2 \text{ kg/m}^3$ ، والطبقة السفلية ماء مالح كثافتها $\rho_2 = 1025 \text{ kg/m}^3$ ، يتشكل سطح فاصل (سطح بيني) بين الطبقتين بسبب اختلاف الكثافة، اعتمدنا ثلاث مواقع مختلفة للسطح الفاصل وذلك لمعرفة تأثير تغيير موضع السطح الفاصل على المقاومة، وهي: سطح فاصل يمر بم منتصف غاطس السفينة (عند $z = 0.2$)، سطح فاصل يمر بقاع السفينة (عند $z = 0$)، سطح فاصل أسفل قاع السفينة بقليل (عند $z = -0.35$)، كما تمت الدراسة عند سرعات مختلفة للنموذج هي: 1.25, 1.047, 0.5, 0.25 m/s.

يعرض الشكل 4 التغيرات التي تطرأ على المقاومة الكلية للسفينة في حالة وجود سطح فاصل عند مواقع مختلفة مقارنة مع المقاومة في حالة الكثافة الثابتة، من المخطط نلاحظ:

- زيادة المقاومة في حالة الماء ذو كثافة متغيرة مقارنة بحالة الكثافة الثابتة.
- تكون المقاومة أكبر في الحالة التي يكون فيها السطح الفاصل ماراً بقاع السفينة.



الشكل 4: تغيير مقاومة السفينة مع تغيير موقع السطح الفاصل عند سرعات مختلفة.

يمكن تفسير هذه النتائج وفق الآتي:

عندما تبحر سفينة في ماء متغير الكثافة فإنها تحدث اضطراب في التدفق يخلق في السطح البيئي أمواج داخلية، فتعمل طاقة السفينة على زيادة نمو هذه الأمواج، الطاقة اللازمة لتوليد هذه الأمواج يتم سحبها من بدن السفينة، الأمر الذي يؤدي إلى ضياع طاقة المحرك للتغلب على هذه الأمواج بدلاً من دفع السفينة إلى الأمام مما يسبب زيادة كبيرة في المقاومة.

عندما يمر السطح الفاصل بالقاع تتعرض السفينة لمقاومة أكبر بسبب قوة دفع الماء المالح والتفاعلات الحاصلة بين الأمواج المتولدة وبدن السفينة. من

الجدول 5 يمكننا ملاحظة أن الزيادة في المقاومة الكلية تعود إلى الزيادة الكبيرة في قيمة مقاومة الضغط، حيث لا تساهم مقاومة الاحتكاك في الزيادة المفاجئة للمقاومة الكلية ويعود ذلك لوجود الأمواج الداخلية التي تزيد من مقاومة الضغط بشكل كبير (الأمواج السطحية لم تأخذ بعين الاعتبار في هذه الدراسة).

الجدول 5: مقاومة الضغط والاحتكاك في حالة الكثافة الثابتة للماء وعند السطح الفاصل المار بالقاع 0 internal Surface.

internal surface 0			constant density			Velocity [m/s]
R _{total} [N]	F _{viscosity} [N]	F _{pressure} [N]	R _{total} [N]	F _{viscosity} [N]	F _{pressure} [N]	
5.87	2.62	3.25	1.29	1.02	0.27	0.25
14.97	5.27	9.69	4.46	3.51	0.95	0.5
35.99	17.24	18.75	17.30	13.62	3.67	1.047
45.68	22.99	22.68	24.02	18.92	5.10	1.25

تُظهر قيم مقاومة الضغط والاحتكاك عند المواقع الأخرى للسطح الفاصل التي تمت دراستها الأمر نفسه لكن سنكتفي بعرض نتائج المقاومة عند السطح الفاصل المار بالقاع.

الجدول 6: قيم مقاومة السفينة عند مواضع مختلفة للسطح الفاصل.

R _{internal surface 0.2} [N]	R _{internal surface 0} [N]	R _{internal surface -0.35} [N]	R _{constant density} [N]	Velocity [m/s]
4.77	5.87	3.27	1.29	0.25
11.43	14.97	8.01	4.46	0.5
30.76	35.99	20.59	17.30	1.047
39.50	45.68	25.44	24.02	1.25

من

الجدول 6 نلاحظ أن معدل تغير المقاومة الكلية بسبب وجود الأمواج الداخلية يختلف تبعاً لسرعة السفينة وموقع السطح الفاصل، حيث يبلغ معدل تغير المقاومة $\frac{R_{stratified}}{R_{constant density}}$ عند السرعة 0.25 وعندما يمر السطح الفاصل في قاع السفينة تكون قيمة $\frac{R_s}{R_{const}} = 4.52$ بينما يبلغ معدل تغير المقاومة عند نفس السطح الفاصل وعند السرعة 1.25 القيمة 1.901 وبالتالي فإن تأثير الأمواج الداخلية يكون أقوى عند السرعات المنخفضة للسفينة. بحساب سرعة أقصى موجة

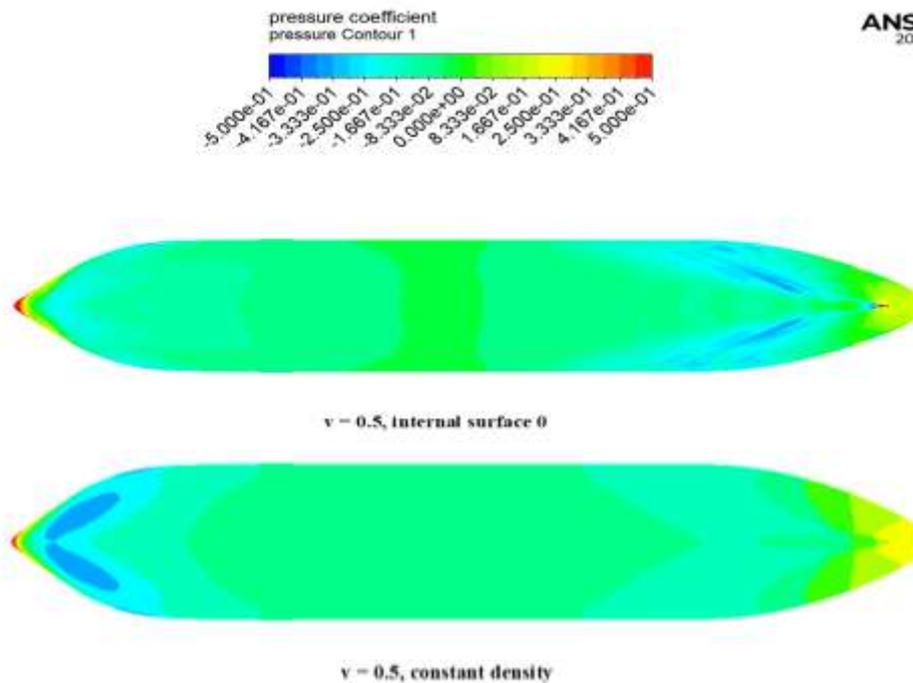
داخلية للحالة الأولى ($v = 0.25$, internal surface 0) وفق العلاقة (1) حيث h هو البعد بين السطح الحر والسطح البيني [2].

$$C = \sqrt{gh \frac{\Delta\rho}{\rho_1}} \quad (1)$$

نلاحظ أن سرعة السفينة في هذه الحالة مساوية تقريباً لسرعة أقصى موجة داخلية والتي بلغت $C = 0.303$ وهذا ما يفسر زيادة المقاومة بمقدار أربعة أضعاف تقريباً عن المقاومة في حالة الكثافة الثابتة، هذه النتيجة تتوافق مع النتائج التجريبية لـ Ekman والتي أكدها أيضاً Mercier في دراسته التجريبية [3].

تأثير تغيير كثافة الماء على حقل التدفق حول السفينة KVLCC2

يعرض الشكل 5 حقل الضغط على سطح السفينة في حالة الماء ذو الكثافة الثابتة ومع وجود سطح فاصل يمر بقاع السفينة وذلك عند السرعة 0.5.



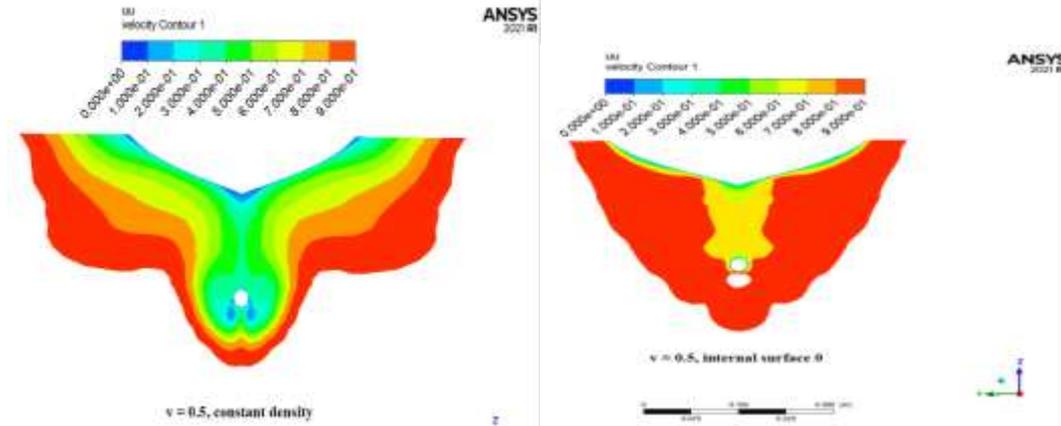
الشكل 5: توزيع حقل الضغط على سطح السفينة.

نلاحظ أنه في حالة الكثافة الثابتة فإن الضغط في مقدمة السفينة يكون مرتفع بسبب اصطدام المائع في مقدمة السفينة حيث تصبح سرعة جزيئات المائع في منطقة الصدم معدومة وبالتالي يكون الضغط مرتفع (وفقاً لبرنولي). أيضاً عند مؤخرة السفينة تتشكل منطقة ضغط مرتفع قليلاً وذلك بسبب انفصال الطبقة الحدية حيث يحدث انخفاض في السرعة وزيادة في الضغط.

أما في حالة الكثافة المتغيرة نلاحظ زيادة مساحة منطقة الضغط المنخفض عند مؤخرة السفينة بالمقارنة مع حالة الكثافة الثابتة (أيضاً وفقاً لبرنولي). هذا الفرق في الضغط بين المقدمة والمؤخرة يسبب زيادة في مقاومة الضغط وبالتالي حدوث زيادة مفاجئة في المقاومة الكلية للسفينة.

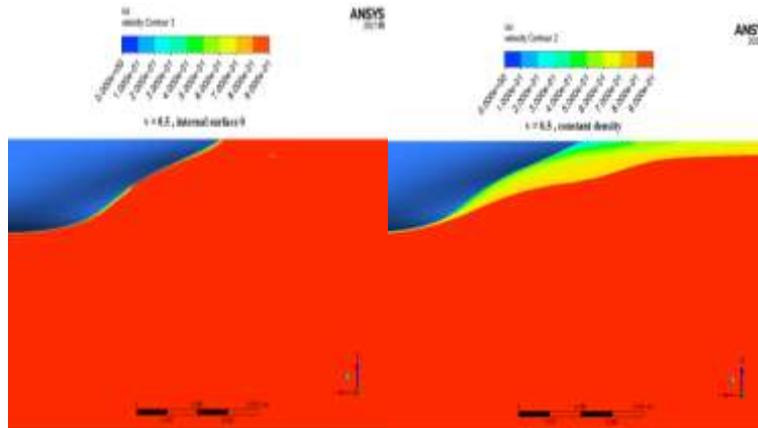
يبين الشكل 6 حقل السرعة في مستوى الرفاص للسفينة في حالة الكثافة الثابتة وفي حالة الكثافة المتغيرة مع وجود خط فاصل يمر بقاع السفينة عند السرعة 0.5. من هذا الشكل نلاحظ تغير بروفائل السرعة في حالة الكثافة المتغيرة وذلك

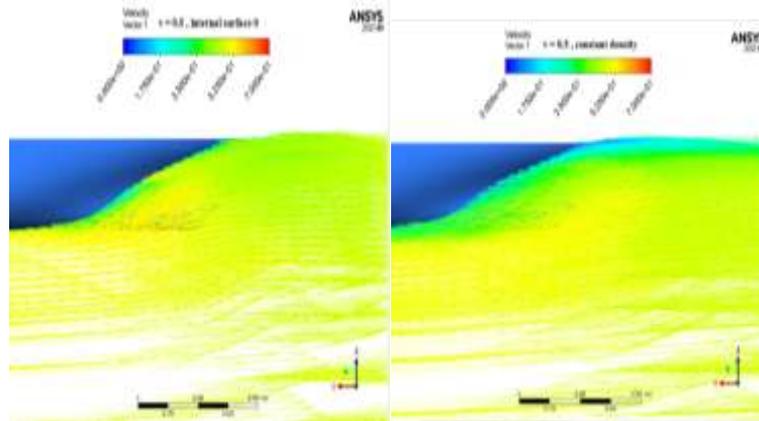
لأن السطح البيني يؤثر على نشوء الطبقة الحدية وعلى منطقة انفصالها وعلى تشكل الدوامات. كما يمكننا ملاحظة أن وجود المائع الطبقي يؤدي إلى سيطرة التدفق الحر ضمن منطقة قرص الرفاص الأمر الذي ينعكس سلباً على أداء الرفاص عند نفس عدد الدورات، وهذا سيزيد من فرملة السفينة عند مرورها في مناطق متغيرة الكثافة، حيث أن زيادة مقاومة السفينة بفعل ظاهرة الماء الميت ستترافق مع انخفاض في الدفع الناتج عن الرفاص وبالتالي ستكون عملية الفرملة مضاعفة.



الشكل 6: حقل السرعة في مستوى الرفاص عند السرعة 0.5 في حالة الكثافة الثابتة والسطح الفاصل المار بالقاع.

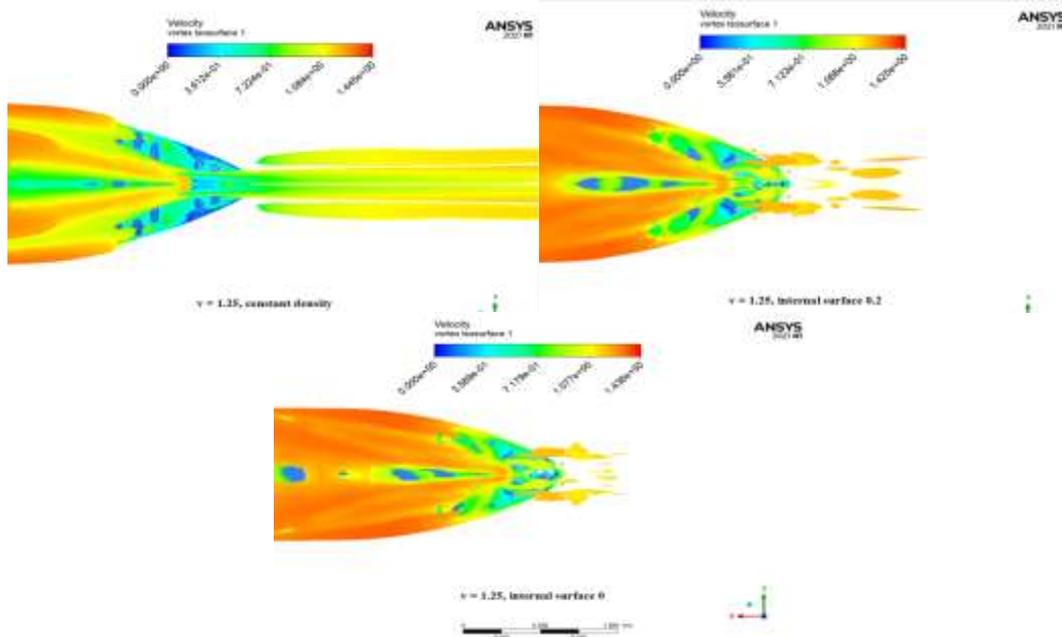
في حالة الكثافة الثابتة نلاحظ أن الطبقة الحدية تتطور وتتفصل بشكل طبيعي ويظهر أثر المخر خلف بدن السفينة، أما في حالة الكثافة المتغيرة، يحدث تغير في الطبقة الحدية وانفصالها حيث يبقى التدفق الحر مسيطر على سطح السفينة وخلفها بالإضافة إلى أن أثر المخر يكون قليلاً جداً. وتكون منطقة انفصال الطبقة الحدية صغيرة في حال الكثافة المتغيرة مقارنة بالحالة الثابتة حيث يحدث تأخر في انفصال الطبقة الحدية. كما هو موضح في الشكل 7.





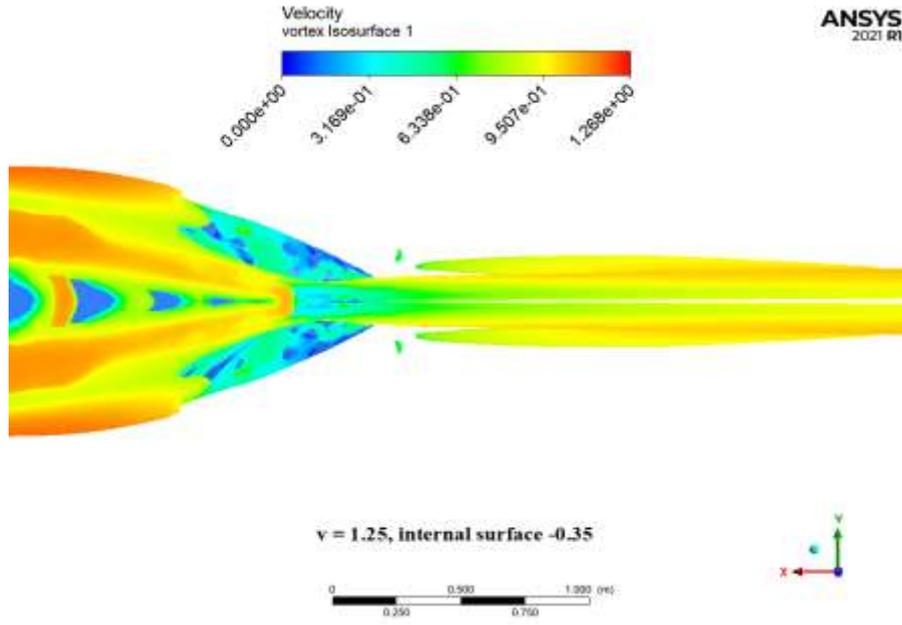
الشكل 7: منطقة انفصال الطبقة الحدية.

هذا التغير يحدث نتيجة عدم اختلاط الماء المالح والعذب بشكل جيد وبسرعة حيث يحدث تنشيط للاضطراب الحاصل بسبب تأثير قوى الطفو الاسترجاعية التي تعمل على إعادة توازن جزيئات المائع تبعاً لكثافتها. هذا الأمر يؤثر على نظام الدوامات المتشكلة خلف بدن السفينة ويثبطها مقارنة بالدوامات الناتجة في حالة الكثافة الثابتة كما هو موضح في الشكل 8.



الشكل 8: نظام الدوامات خلف بدن السفينة.

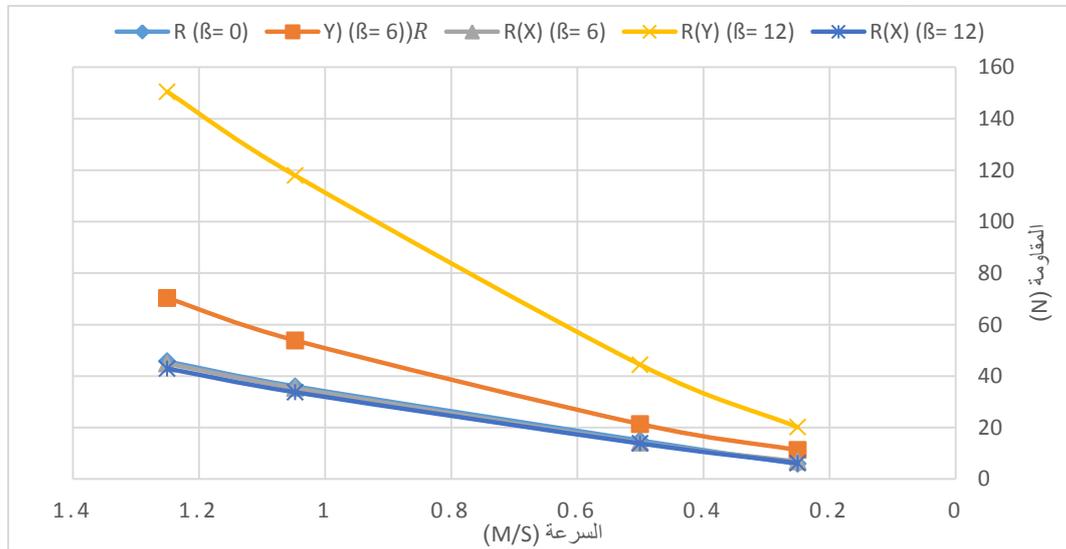
لكن عندما يكون السطح الفاصل عند أسفل قاع السفينة بقليل ($\text{internal surface } -0.35$) وعند السرعات العالية للسفينة فإن نظام الدوامات يكون مشابه لنظام الدوامات في حالة الكثافة الثابتة للماء الشكل 9 وبالتالي فإن تأثير الأمواج الداخلية عندما يبتعد السطح الفاصل عن السفينة وعند السرعات العالية يصبح ضئيل، وقد لاحظنا ذلك أيضاً من الجدول 6 حيث تكون الزيادة في المقاومة عند هذه الحالة ضئيلة مقارنة بالحالات الأخرى.



الشكل 9: نظام الدوامات خلف بدن السفينة عند $\beta = -0.35$ internal Surface.

تأثير زاوية الانحراف على مقاومة السفينة KVLCC2 في الماء المتغير الكثافة

يعرض الشكل 10 قيم المقاومة العرضية والطولية عند سرعات مختلفة للسفينة عندما يمر السطح الفاصل بقاع السفينة وذلك عند زوايا انحراف مختلفة ($\beta = 0^\circ$, $\beta = 6^\circ$, $\beta = 12^\circ$)، نلاحظ أن المقاومة الطولية $R(x)$ باتجاه المحور x لا تزداد كثيراً مع زيادة زاوية الانحراف. بالمقابل فإن المقاومة العرضية $R(y)$ تزداد بشكل كبير عند بدء دوران السفينة وتصل إلى قيم كبيرة مع زيادة زاوية الانحراف.

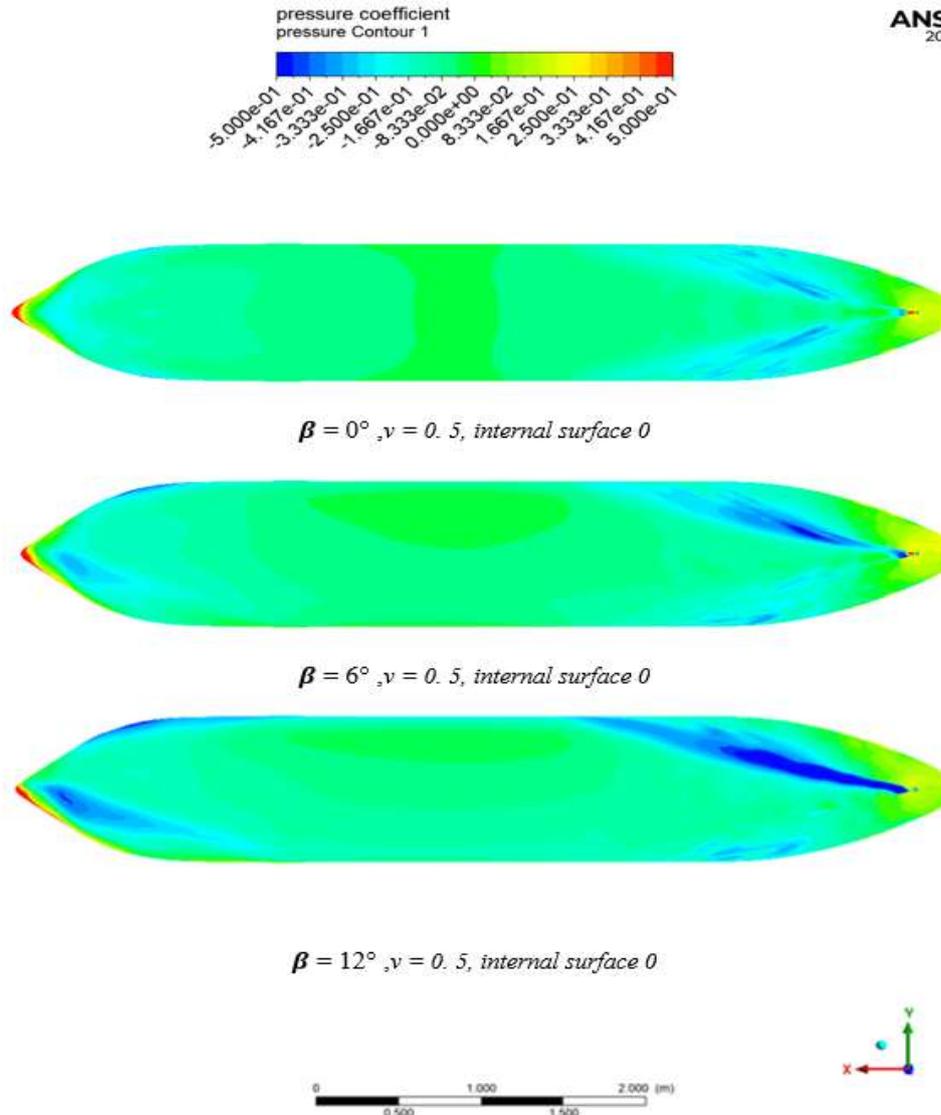


الشكل 10: تأثير زاوية الانحراف على القوى العرضية والطولية للمقاومة في حالة الماء المتغير الكثافة.

تأثير زاوية الانحراف على حقل التدفق حول السفينة KVLCC2 في الماء المتغير الكثافة

تمت دراسة تأثير الانحراف على خصائص التدفق حول السفينة لمعرفة التغيرات الحاصلة في التدفق وذلك عند سرعات مختلفة وزوايا انحراف مختلفة وعند مواضع مختلفة للسطح الفاصل. تم حساب حقل الضغط وحقل السرعة لكل

حالة، سنكتفي بعرض بعض هذه النتائج. يبين الشكل 11 توزيع حقل الضغط على سطح السفينة عند السرعة 0.5 مع سطح فاصل يمر بقاع السفينة وذلك عند زوايا انحراف (0، 6، 12). نلاحظ أنه مع زيادة الانحراف يزداد الفرق في الضغط على جانبي السفينة وبالتالي تتشكل قوى عرضية وعزوم تؤثر على السفينة، يلاحظ الأمر ذاته بالنسبة لمواقع السطح الفاصل الأخرى.



الشكل 11: توزيع حقل الضغط على سطح السفينة عند زوايا انحراف مختلفة.

في الشكل 12 نعرض حقل السرعة في مستوى الرفاص عند السرعة 0.5 والسطح الفاصل المار بالقاع عند زوايا الانحراف المختلفة، نلاحظ أنه مع زيادة الانحراف يتغير حقل التدفق حول البدن ويصبح بروفيل السرعة في منطقة عمل الرفاص غير متناظر مما يزيد من الأحمال والاهتزازات التي تتعرض لها السفينة.

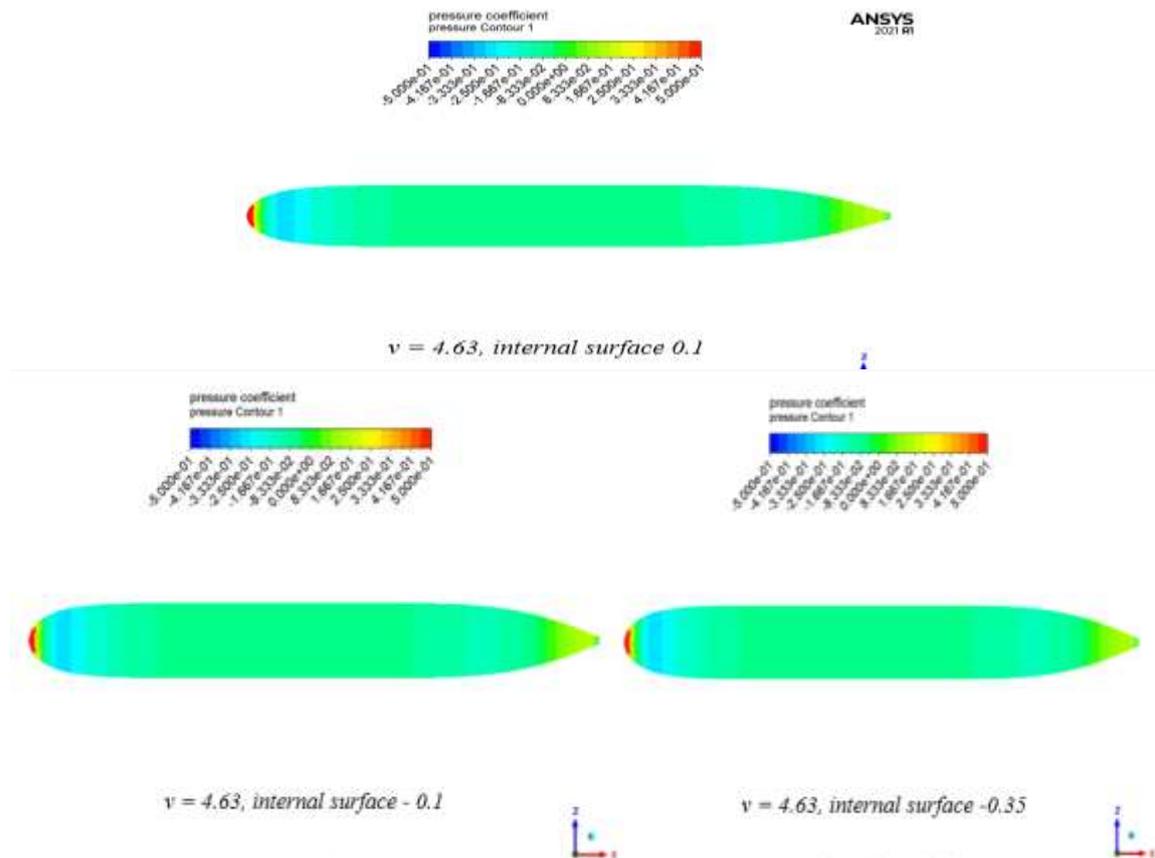
تأثير تغير كثافة الماء على مقاومة الغواصة DARPA Suboff

تمت دراسة الغواصة DARPA كما في حالة السفينة بوجود طبقتين مختلفتي الكثافة (ماء عذب وماء ملح)، أيضاً اعتمدنا ثلاث مواضع مختلفة للسطح الفاصل هي: سطح فاصل يمر بمنتصف الغواصة (عند $z = 0.1$)، سطح فاصل

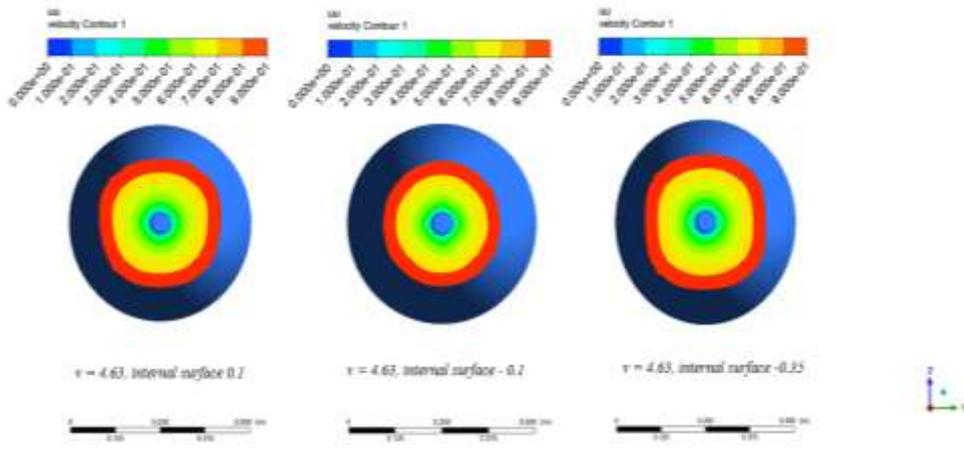
كبير في تأخير انفصال الطبقة الحدية بغياب زاوية الانحراف، وبالتالي يقلل ويشكل كبير من المخز والدوامات المتشكلة خلف بدن الغواصة، الأمر الذي يقلل ويشكل كبير من مقاومة الغواصة.

تأثير تغيير كثافة الماء على حقل التدفق حول الغواصة DARPA Suboff

يعرض الشكل 14 و الشكل 15 على التوالي حقل الضغط على سطح الغواصة وحقل السرعة في مستوى الرفاص وذلك عند السرعة 4.63 m/s مع مواضع مختلفة للسطح الفاصل. من الواضح أن حقل التدفق حول بدن الغواصة يتغير أيضاً بشكل طفيف مع تغيير موضع السطح الفاصل مقارنة مع السفينة وهذا يعود بشكل أساسي لتصميم الغواصة وانسيابية بدنها.



الشكل 14: توزيع حقل الضغط على بدن الغواصة عند مواضع مختلفة للسطح الفاصل.



الشكل 15: حقل السرعة عند مستوى الرفاص عند مواضع مختلفة للسطح الفاصل.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- مرور السفينة ضمن المائع الطبقي يؤدي إلى زيادة مفاجئة في المقاومة مع تغير خصائص حقل التدفق حول بدن السفينة بسبب وجود الأمواج الداخلية.
- يبلغ معدل زيادة المقاومة أقصى قيمة له عند السرعة المنخفضة للسفينة وعندما يمر السطح الفاصل بقاع السفينة وهي الحالة التي تكون فيها سرعة السفينة مساوية تقريباً لسرعة أقصى موجة داخلية.
- عند السرعات العالية للسفينة وعندما يكون السطح البيني بعيداً عن قاع السفينة يصبح تأثير الأمواج الداخلية ضئيل والزيادة في المقاومة ضئيلة.
- انحراف السفينة ضمن المائع الطبقي يؤدي إلى زيادة فرق الضغط على جانبي السفينة بالإضافة إلى زيادة عدم تجانس بروفيل السرعة على جانبي الرفاص، والذي يؤدي إلى زيادة القوى العرضية والعزم المؤثر على السفينة، وأيضاً زيادة الاهتزازات في جسم الرفاص والتي تنتقل بدورها إلى بدن السفينة.
- تزداد المقاومة الكلية للغواصة نتيجة مرورها في المائع الطبقي بفعل وجود الأمواج الداخلية لكنها لا تتأثر بتغير موضع السطح الفاصل، كما أن حقل التدفق حول الغواصة يكون مشابه لحقل التدفق في حالة الماء ذو كثافة ثابتة.

التوصيات:

- زيادة سرعة السفينة في المناطق التي تتواجد فيها الأمواج الداخلية وذلك للتغلب على الزيادة في المقاومة ولتفادي المرور في حالة تساوي سرعة السفينة مع سرعة الأمواج الداخلية.
- عندما تفقد السفينة قدرتها على الحركة والتوجيه بسبب الأمواج الداخلية ينصح بإطفاء المحرك حتى تنكسر الأمواج الداخلية المتولدة ثم الإبحار عند سرعات عالية للتغلب على هذه الأمواج.
- إذا كان خط سير السفينة يفترض مرورها في مناطق المائع الطبقي، فيجب إجراء مثل هذه الدراسات على السفينة مع وبدون الملحقات (الرفاص والدفة) ومع وبدون زاوية انحراف، من أجل دراسة وتحليل الظروف التي ستعمل بها السفينة ولأخذ هذه المعطيات في الحسبان عند اختيار محرك السفينة.

التوصيات للأعمال اللاحقة

- دراسة تأثير تغير كثافة الماء على مقاومة السفينة مع أخذ بعين الاعتبار تأثير السطح الحر (بين الهواء والماء) والأمواج السطحية.
- دراسة تأثير تغير كثافة الماء على مقاومة السفينة بوجود الرفاص والدفة وكذلك الأمر بالنسبة للغواصة.
- إعادة نفس الدراسة على أنواع أخرى من السفن وبالأخص السفن السريعة مثل سفينة الـ FFG-7.

References:

- [1] Y. Gou, X. Chen, and T. Bin, "A Time-Domain Boundary Element Method for Wave Diffraction in a Two-Layer Fluid," *J. Appl. Math.*, vol. 2012, pp. 1–15, 2012, doi: 10.1155/2012/686824.
- [2] N. D. Katopodes, *Free-Surface Flow: Environmental Fluid Mechanics*, no. October. Butterworth-Heinemann, 2019.
- [3] M. J. Mercier, R. Vasseur, and T. Dauxois, "Resurrecting dead-water phenomenon," *Nonlinear Process. Geophys.*, vol. 18, no. 2, pp. 193–208, Mar. 2011, doi: 10.5194/npg-18-193-2011.
- [4] T. Miloh, M. P. Tulin, and G. Zilman, "Dead-Water Effects of a Ship Moving in Stratified Seas," 1993.
- [5] V. Duchêne, "Asymptotic models for the generation of internal waves by a moving ship, and the dead-water phenomenon," *Nonlinearity*, vol. 24, no. 8, pp. 2281–2323, Aug. 2011, doi: 10.1088/0951-7715/24/8/008.
- [6] J. Grue, "Nonlinear dead water resistance at subcritical speed," *Phys. Fluids*, vol. 27, no. 8, p. 082103, Aug. 2015, doi: 10.1063/1.4928411.
- [7] M. Esmaeilpour, J. E. Martin, and P. M. Carrica, "Near-field flow of submarines and ships advancing in a stable stratified fluid," *Ocean Eng.*, vol. 123, pp. 75–95, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.06.038.
- [8] P. E. Killingstad, "A study of dead water resistance Reynolds Averaged Navier Stokes simulations of a barge moving in stratified waters," 2018. [Online]. Available: <https://www.duo.uio.no/handle/10852/63458>.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] N. Abbas, "CFD Prediction of the Most Appropriate Values of Prandtl Kolmogorov Constant in the Turbulent Boundary Layer," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 41 No.6, 2019.
- [14] N. Abbas, "Studying the influence of grid type and turbulence model on the results

of numerical calculations using CFD,” *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 44 No.6, 2022.

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

[16] N. Chase, “Simulations of the DARPA Suboff submarine including self-propulsion with the E1619 propeller,” University of Iowa, 2012.

[17] 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.