

CFD Study of the Influence of the Roughness and Partially Submerged Propeller on its Thrust

Dr. Nawar Abbas*

Ali Taleb**

(Received 30 / 6 / 2023. Accepted 20 / 8 / 2023)

□ ABSTRACT □

This study aims to determine the influence of the submerged surface roughness of the hull with the propeller of marine vehicles on propulsion at different values of roughness height in several cases, whether on the entire wet surface with the propeller or on the propeller blades only, and the influence of partially submerged propeller on its thrust at different values of the immersion ratio using CFD (Computational Fluid Dynamic).

The URANS method and $k-\omega$ 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 free surface and the interaction between the two phases (water and air) around the hull. In addition to using both the frame motion and the mesh motion to calculate the mutual effect between the hull and propeller.

The study was carried out on a JBC (Japan Bulk Carrier) model and a DARPA Suboff model. The comparison between the CFD and Exp-results of total resistance and thrust shows a good agreement.

Keywords: JBC (Japan Bulk Carrier), DARPA Suboff, submerged surface roughness, partially submerged propeller, Ventilation, CFD, K- ω 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

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

دراسة تأثير خشونة السطح والغمر الجزئي للرفاص على الدفع الناتج عن الرفاص باستخدام تقنية CFD

د. نوار عباس*

علي طالب**

(تاريخ الإيداع 30 / 6 / 2023. قُبِلَ للنشر في 20 / 8 / 2023)

□ ملخص □

تم في هذا البحث دراسة تأثير خشونة السطح المغمور للبدن مع الرفاص للمركبات البحرية على الدفع عند قيم مختلفة لارتفاع الخشونة في عدة حالات سواء على كامل السطح المبلل مع الرفاص أو على شفرات الرفاص فقط، وتأثير الغمر الجزئي للرفاص على الدفع عند قيم مختلفة لنسبة الغمر، وذلك من خلال استخدام تقنية CFD. لقد تم استخدام طريقة الـ URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes Equations) والموديل الرياضي K- ω SST لحل معادلات نافيه ستوكس ضمن برنامج الـ ANSYS. كما تم استخدام طريقة الـ VOF (Volume Of Fluid) من أجل حل السطح الحر ودراسة التأثير المتبادل بين الماء والهواء. بالإضافة إلى استخدام كل من نموذج الإطار المتحرك Frame Motion ونموذج الشبكة المتحركة mesh motion لحساب التأثير المتبادل بين البدن والرفاص. تم إجراء الدراسة على نموذج لناقلة الصب JBC (Japan Bulk Carrier) ونموذج الغواصة DARPA Suboff. المقارنة بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية المتوفرة للمقاومة الكلية والدفع تظهر تطابق كبير بين النتائج وهذا يؤكد مدى دقة الـ CFD في معالجة هذا النوع من التطبيقات البحرية.

الكلمات المفتاحية: ناقل الصب JBC، الغواصة DARPA Suboff، خشونة السطح المغمور، الغمر الجزئي للرفاص، Ventilation - دخول الهواء إلى مكان عمل الرفاص، CFD - ميكانيك الموائع الحسابية، K- ω SST.

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



CC BY-NC-SA 04

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

الايمل: dr.nawarnabilabbas@tishreen.edu.sy

** طالب ماجستير - قسم الهندسة البحرية - جامعة تشرين - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - اللاذقية - سورية. الايمل:

masterengali@gmail.com

مقدمة

سابقاً كان يتم الاعتماد بشكل كبير على نظرية الجريان الكموني (جريان غير لزج) لدراسة الجريان في مكان عمل الرفاص، لكن الأساليب القائمة على هذه النظرية لا تستطيع التنبؤ بالأداء الهيدروديناميكي وحقل الاضطراب حول الرفاص بمستوى كافٍ من الدقة. تشير الدراسات الأخيرة إلى أن تغيرات الحمل المطبق على شفرات الرفاص بسبب الأمواج أكبر بكثير مما كان مفترض لفترة طويلة من الزمن على الرغم من أخذ عوامل الأمان بعين الاعتبار. في البحار الهائجة، يؤدي إبحار السفينة في هذه الظروف إلى الخروج المتكرر لشفرات الرفاص فوق سطح الماء، وهذا ينشأ عنه تقلبات كبيرة في الأحمال الديناميكية المطبقة على شفرات الرفاص نتيجة التغير المتكرر لمساحة سطح الشفرة الملامس للماء، والتي تؤدي بدورها إلى تناقص في قوة الدفع وحدث مشاكل انشائية وأعطال ميكانيكية للمحرك وآلية نقل الحركة والرفاص.

ومن الظواهر الشائعة التي قد تحدث للرفاصات هي دخول الهواء إلى منطقة عمل الرفاص والذي يسمى (Ventilation) ويقصد بهذه الظاهرة عمل الرفاص في الهواء أو ضمن وسط غازي، وهذا يحدث بشكل واضح عندما تخترق شفرات الرفاص السطح الحر للماء فتقوم الشفرات المخترقة للسطح والملامسة للهواء بسحب الهواء أثناء دورانها من أعلى السطح الحر باتجاه أسفل السطح فتصبح الشفرات المغمورة (أسفل السطح) محاطة بسحابة من الفقاعات (جيوب هوائية) وبالتالي تتناقص مساحة سطح الشفرات الملامسة للماء وهذا يقود بدوره إلى تناقص قوة الدفع والتوزيع غير المنتظم للضغط على سطح الشفرات. هذه الظاهرة لا تحدث فقط للرفاصات المغمورة جزئياً، بل حتى الرفاصات المغمورة كلياً في الماء والتي تعمل بالقرب من السطح الحر بسرعات دوران عالية يمكن أن تتعرض لدخول الهواء. قد تكون الخسائر الاقتصادية لشركات الشحن البحري نتيجة غير مباشرة لظاهرة الـ Ventilation بسبب الإصلاحات المتكررة وبالتالي زيادة التكاليف التشغيلية. يتزايد احتمال حدوث هذه الظاهرة كلما كان الرفاص أقرب من السطح الحر. تم ملاحظة هذه الظاهرة بشكل كبير بالنسبة لسفن الإمداد البحري (offshore supply vessels) والمخصصة لخدمة منصات النفط والرياح العائمة، وبسبب تزايد أهمية المنشآت البحرية العائمة في السنوات الأخيرة تم إعطاء اهتمام كبير لهذه الظاهرة [1].

نظراً للنمو المتزايد في قدرات الحواسيب، يتم حالياً اللجوء إلى استخدام طريقة الـ URANS لحل الجريان اللزج في منطقة عمل الرفاص (منطقة الاضطراب)، والتي تسمح بإجراء دراسة للتأثير المتبادل لبدن المركبة البحرية مع الرفاص وذلك لتقدير تغيرات الحمل المتوقعة في حالات التشغيل النموذجية.

كذلك من الضروري أن يتم أخذ خشونة سطح شفرات الرفاص بالاعتبار وهذه الخشونة ناتجة بشكل أساسي عن تفتت وتحطم طبقات الدهان وما ينجم عنها من تنشيط لعملية الأكسدة (الصدأ) وسوء التحضير للسطح قبل إعادة تطبيق الطلاء بالإضافة لنمو الحشيف البحري على سطح الشفرات، حيث يوجد في بحار العالم أكثر من 4000 نوع من الحشيف يمكن أن تلوث السطح المغمور للسفن. تعتمد شدة التلوث على العديد من المعايير، ونشوء الحشيف الحيوي على السطح المغمور يحدث في ثلاث مراحل: تشكيل غشاء ملائم على سطح الشفرة، ثم تشكيل طبقة على شكل حمأة (وحل)، ثم يتشكل حشيف كبير [2]. ووفقاً للدليل الفني للسفن البحرية (2002 Naval Ship Technical Manual) يتم تصنيف الحشيف الحيوي إلى ناعم وصلب ومركب [3]. سيؤدي وجود الحشيف الحيوي على سطح مغمور إلى زيادة خشونة السطح مما يؤدي بشكل أساسي إلى زيادة مقاومة الاحتكاك [4]، وبالتالي زيادة في المقاومة الكلية.

تعتبر التكاليف المتعلقة بالحشف الحيوي في مجال صناعة السفن كبيرة جداً، وبالتالي فإن أي نفقات تتعلق بتطوير وشراء وتطبيق الطلاءات المضادة للحشف، فضلاً عن الإجراءات التقنية أو الإدارية التي يحتمل أن تكون باهظة الثمن لاتخاذ القرار فيما يتعلق بتكرار تنظيف البدن والرفاص له ما يبرره اقتصادياً حتى لو أدى إلى تحسين طفيف في حالة تلوث بدن المركبة البحرية والرفاص [5]. بالإضافة إلى الجوانب الاقتصادية المتعلقة بالحشف الحيوي، هناك قلق بيئي أيضاً، نظراً لأن تدهور أداء السفن سيؤدي إلى زيادة استهلاك الوقود وبالتالي زيادة انبعاثات غازات الدفيئة (GHG) [3]. أثناء تحليل تأثير الحشف على أداء المركبة البحرية غالباً ما يتم إهمال تأثير حالة سطح شفرات الرفاص [6]، ويعتبر تأثير حالة تلوث الرفاص طفيفاً مقارنةً بظروف تلوث البدن، ولكن إذا تم تحليلها إلى كل وحدة مساحة فإن تأثير حالة تلوث الرفاص يكون أكثر أهمية بكثير من تأثير حالة تلوث البدن على أداء المركبة [7]. فإذا تمت مقارنة انخفاض انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون (CO₂) الناتجة عن تلميع الرفاص لوحده مع الانخفاض الناتج عن تنظيف البدن سيكون الفرق قليل بين الحالتين، بالإضافة إلى أن تنظيف الهيكل أكثر تكلفة بكثير [8]. وبالتالي فإن تلميع الرفاص يمثل طريقة رخيصة وفعالة لتقليل استهلاك الوقود وانبعاثات غازات الدفيئة.

في عام 2011 قام كل من Califano و [9] Steen بدراسة ظاهرة دخول الهواء إلى مكان عمل الرفاص (Ventilation) لرفاص مغمور كلياً في الماء ويعمل بالقرب من السطح الحر وذلك بالاعتماد على تقنية CFD. تم استخدام طريقة الـ URANS والموديل الرياضي K- ω SST ضمن برنامج FLUENT من أجل حل معادلات نافيه ستوكس، كذلك تم تجريب نماذج اضطراب أخرى مثل k- ϵ و (realizable & standard) k- ϵ ، وتم الحصول على منحنيات نسبة معامل الدفع كتابع لنسبة الغمر عند قيم مختلفة لمعامل التقدم ونسبة التحميل وكذلك منحنيات نسبة معامل الدفع كتابع لزاوية الشفرة عند قيم مختلفة لنسبة الغمر، بالإضافة لمجموعة من منحنيات الخصائص الهيدروديناميكية لشفرة الرفاص. المقارنة أبدت تطابق جيد بين النتائج التي تم الحصول عليها بحل نماذج الاضطراب السابقة والنتائج المأخوذة بالطرق التجريبية.

في عام 2018 قام كل من Sungwook Lee و Kwang-Jun Paik [10] بدراسة تأثير الغمر الجزئي للرفاص لنموذج سفينة حاويات (KRISO container ship, KCS) باستخدام تقنية الـ CFD. تمت الدراسة على نموذج رفاص KP505 مغمور جزئياً. تم استخدام طريقة الـ URANS والموديل الرياضي K- ω SST ضمن برنامج STAR-CCM+ من أجل حل معادلات نافيه ستوكس. معاملات الدفع وعزم الدوران وعلاقتها بمعامل التقدم للرفاص، تأثير سرعة الدوران ونسبة الغمر على انخفاض قيمة الدفع وعزم الدوران تم حسابها ومن ثم تم مقارنتها مع النتائج التجريبية المتوفرة. المقارنة أبدت تطابق مقبول بين النتائج. توزع الضغط على سطح الشفرات عند نسب غمر مختلفة تم عرضها وتحليلها من أجل الحصول على نظرة أعمق عن تأثير الغمر الجزئي للرفاص على أدائه.

في عام 2020 قام Andrea Farkas وآخرون [3] بتقييم تأثير الحشف المتمثل على شفرات الرفاص على أدائه لناقلة حمولات سائبة (handymax) باستخدام تقنية CFD. تم دراسة تأثير كل من الحشف الحيوي والعوالق الصلبة المتمسكة على شفرات الرفاص. تم اختبار ثلاثة نماذج من الرفاصات WB, KP505, KP458 في المياه المفتوحة. تم استخدام طريقة الـ RANS والموديل الرياضي K- ω SST ضمن البرنامج STAR-CCM+ من أجل حل معادلات نافيه ستوكس. معاملات الدفع وعزم الدوران وفعالية الرفاص في حالة الحشف الحيوي والعوالق الصلبة وحالة الرفاص الناعم (بدون حشف) تم حسابها ومقارنتها مع النتائج التجريبية المتوفرة. المقارنة أبدت تطابق جيد بين النتائج.

حقل السرعة حول شفرات الرفاص وتوزيع الضغط على سطح الشفرات وتوزيع اجهاد القص تم عرضها وتحليلها من أجل الحصول على نظرة أعمق عن تأثير تشكل الحشف على شفرات الرفاص على أدائه. في عام 2022 قام كل من Vu Ngoc Bich و Nguyen Thi Ngoc Hoa [11] بدراسة تأثير خشونة سطح شفرات الرفاص على أدائه باستخدام تقنية CFD. تم اختبار نموذج الرفاص VP1304 في المياه المفتوحة. تم استخدام طريقة الـ RANS والموديل الرياضي K- ω SST ضمن البرنامج STAR-CCM+ من أجل حل معادلات نافيه ستوكس. معاملات الدفع وعزم الدوران وفعالية الرفاص تم حسابها عند قيم مختلفة لمعاملات التقدم وذلك عندما يكون سطح الرفاص ناعم بلا خشونة وعندما يكون ارتفاع الخشونة 0.1 mm و 1 mm. توزيع معاملات الضغط والاحتكاك على سطح الشفرات لكل من جانبي السحب والضغط للرفاص، وكذلك توزيع حقل السرعة حول الرفاص عند القيم المختلفة لارتفاع الخشونة تم عرضها بالتفصيل للحصول على نظرة أعمق حول تأثير خشونة الرفاص على أدائه.

أهمية البحث وأهدافه:

أهداف البحث

تكمن أهمية البحث وأهدافه في الأمور التالية:

- دراسة تأثير خشونة السطح على مقاومة المركبات البحرية، والدفع الناتج عن الرفاص لهذه المركبات.
- دراسة تأثير الغمر الجزئي للرفاص على الدفع الناتج عنه.
- دراسة الظواهر المرافقة لهذه الحالات.

طرائق البحث ومواده:

- تحليلية تجريبية في بيئة الـ ANSYS الافتراضية.

مواد البحث

يمكن تلخيص المواد التي تم استخدامها في هذا البحث بالتالي:

- النماذج الهندسية للمركبات المدروسة ورفاصاتها، وهي متوفرة على الانترنت.
- تقنية الـ CFD والذي يوفرها الكثير من البرامج حالياً.
- برنامج الـ ANSYS.
- تم استخدام طريقة الـ URANS واعتماد الموديل الرياضي K- ω SST لحل معادلات نافيه ستوكس.
- تم نمذجة السطح الحر بالاعتماد على طريقة الـ VOF (Volume Of Fluid) لمحاكاة الجريان الثنائي الطور (الماء والهواء).
- المعادلات الناظمة للتدفق وموديل الاضطراب K- ω SST تم توضيحها بشكل مفصل في أعمال سابقة، على سبيل المثال لا الحصر ننصح القارئ بالاطلاع على الأبحاث التالية [12]-[17].

الأبعاد الهندسية والشبكة الرقمية

تم إجراء الدراسة على نوعين من المركبات البحرية، الأول هو نموذج ناقلة الصب (JBC (Japan Bulk Carrier مع الرفاص الخاص بها والثاني هو نموذج الغواصة DARPA Suboff لوحدها وبدون زعانف مع الرفاص الخاص بها. الأبعاد الهندسية والشبكة الرقمية للسفينة مع الرفاص الخاص بها موضحة في كل من

الجدول 1 والشكل 1، والأبعاد الهندسية والشبكة الرقمية للغواصة مع الرفاص الخاص بها موضحة في الجدول 2 والشكل 2. تم اختيار هذه الأنواع من المركبات لإجراء الدراسة، نظراً لأن سفن الصب تعمل بغواطس كبيرة نسبياً ولها معامل امتلاء حجمي كبير وبالتالي مساحة سطح مبلل كبير، وبما أن الغواصات تعمل تحت الماء، وعليه فإن تأثير خشونة السطح المغمور له الدور المهيمن على المقاومة والدفع لهذه المركبات بالمقارنة مع التأثيرات الأخرى كالأمواج وغيرها. بالإضافة لتوفر النماذج الهندسية الخاصة بهذه المركبات مجاناً على الإنترنت.

الجدول 1: الأبعاد الهندسية لنموذج السفينة JBC.

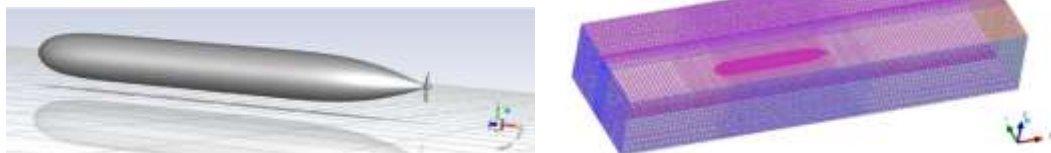
Item	Symbol	Unit	Value
Length between perpendiculars	L_{PP}	m	7
Breadth (molded)	B	m	1.125
Draft (molded)	d	m	0.4125
Wetted surface area without appendages without appendages	S_w	m ²	12.22256
Blockage coefficient	C_B	-	0.858
Froude number	F_r	-	0.142
Reynolds number	R_e	-	7.46×10^6



الشكل 1: نموذج سفينة الصب JBC مع الرفاص الخاص بها.

الجدول 2: الأبعاد الهندسية لنموذج الغواصة DARPA Suboff

Reynolds number	1.2×10^7
Hull Diameter [m]	0.508
Hull Length [m]	4.356



الشكل 2: نموذج الغواصة DARPA Suboff لوحدها

كما هو واضح من الأشكال السابقة لقد تم استخدام الشبكات المنتظمة لكل الحالات المدروسة.

النتائج والمناقشة:

في بداية الأمر لا بد من التأكد من جودة ودقة الطريقة والموديل الرياضي والشبكة الرقمية التي تم استخدامها لحل المعادلات الناظمة للجريان.

تقييم النتائج الرقمية لمقاومة الغواصة لوحدها

إن القيم التجريبية لمقاومة الغواصة لوحدها ذات البدن النظيف عند عدة سرع متوفرة لدينا [18]، وبالتالي يمكن مقارنة النتائج الرقمية التي تم الحصول عليها ضمن برنامج ANSYS مع النتائج التجريبية كما يلي، انظر الجدول 3:

الجدول 3: مقارنة القيم الرقمية للمقاومة الكلية للغواصة لوحدها مع القيم التجريبية.

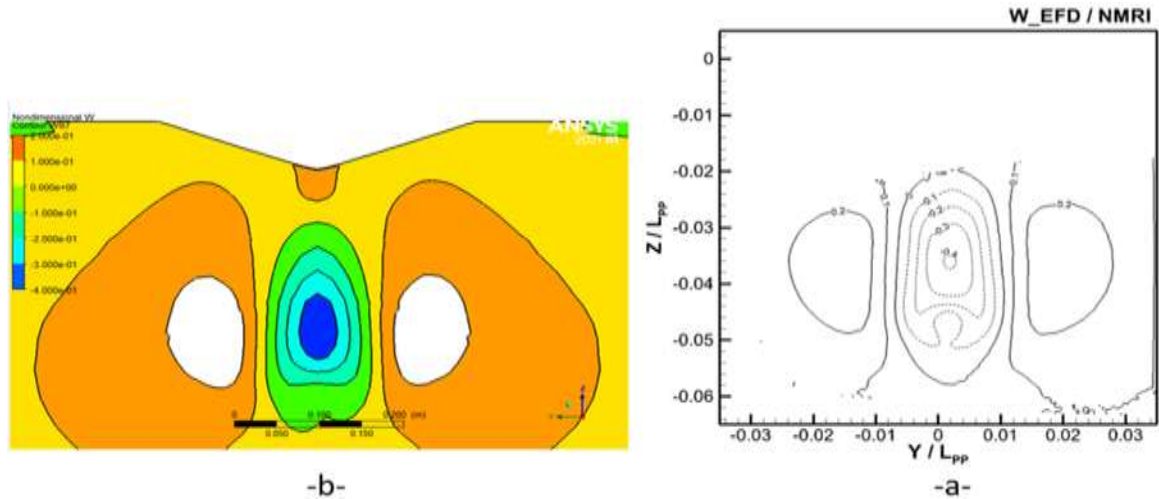
سرعة الغواصة (Knot)	$R_{T,CFD}$	$R_{T,EFD}$	النسبة المئوية للخطأ %
4	45.46	46.37	1.95 %
6	96.69	101.84	5.00 %
10	251.04	255.18	1.62 %
12	352.31	366.35	3.83 %

إن التوافق بين النتائج التجريبية والنتائج التي حصلنا عليها باستخدام تقنية الـ CFD مرضية جداً، حيث أن نسبة الخطأ طفيفة لم تتجاوز 5 %، وذلك من أجل نصف مليون خلية حسابية، مما يدل على دقة النتائج التي يمكن الحصول عليها باستخدام برنامج الـ ANSYS. يتم الحصول على قيم $R_{T,CFD}$ مباشرة من الحسابات الرقمية، وبالتالي النسبة المئوية للخطأ يتم حسابها كما يلي:

$$Error_{percentage} = \frac{R_{T,EFD} - R_{T,CFD}}{R_{T,EFD}} \cdot 100\% \quad (1)$$

تقييم النتائج الرقمية لحقل السرعة في مستوى الرفاص لحالة السفينة لوحدها

النتائج التجريبية لحقل السرعة لمركبات السرعة الثلاث (المحورية والشاقولية والجانبية) خلف بدن السفينة في مكان عمل الرفاص عند سرعة السفينة 1.18 m/s متوفرة لدينا [19]، وبالتالي يمكن مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها ضمن برنامج الـ ANSYS مع النتائج التجريبية المتوفرة. يوضح الشكل 3 على سبيل المثال مقارنة لحقل السرعة للمركبة الشاقولية w في مكان عمل الرفاص الذي تم الحصول عليه ضمن برنامج الـ ANSYS مع النتيجة التجريبية، مع العلم أن بقية المركبات تعطي نفس التوافق بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية. وهنا نلاحظ وجود تطابق جيد جداً لحقل السرعة في كلا الحالتين وذلك من أجل مليوني خلية حسابية.



الشكل 3: مقارنة حقل السرعة للمركبة الشاقولية w في مكان عمل الرفاص، عندما تكون سرعة السفينة 1.18 m/s ، -a- النتيجة التجريبية، -b- النتيجة الرقمية.

دراسة تأثير خشونة بدن المركبة البحرية لوحدها على المقاومة حالة الغواصة

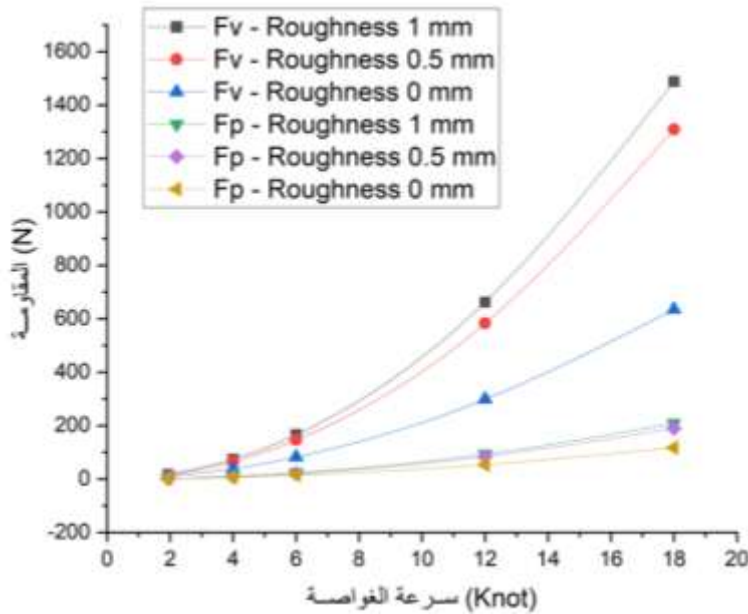
في هذه الحالة تم إجراء اختبار المقاومة للغواصة (الغواصة لوحدها بدون الرفاص) وحساب تأثير سرعة الغواصة وخشونة سطح الغواصة على كل من مقاومة الاحتكاك ومقاومة الضغط والمقاومة الكلية للغواصة. نلاحظ من الجدول 4 أن المقاومة الكلية للغواصة تتناسب طردياً مع كل من سرعة الغواصة وخشونة سطح بدن الغواصة. وبما أن الغواصة مغمورة بشكل كامل وبعمرق في الماء فإن المركبات الأساسية للمقاومة الكلية للغواصة هي مقاومة الاحتكاك والضغط. يوضح الشكل 4 أن كلاً من مقاومة الضغط F_p ومقاومة الاحتكاك F_v يزداد مع ازدياد سرعة الغواصة والخشونة. بالنسبة للغواصات فإن مقاومة الاحتكاك تمثل المكون الأساسي للمقاومة الكلية للغواصة حيث أنها تتجاوز الـ (80%) من المقاومة الكلية عند مختلف السرعات. وهذا واضحاً في الشكل 4، كما نلاحظ أن مقاومة الاحتكاك تزداد بشكل كبير مقابل أي زيادة صغيرة في الخشونة، فمن أجل ارتفاع للخشونة قيمته (1 mm) يمكن أن يؤدي إلى زيادة مقاومة الاحتكاك بنسبة تتجاوز الـ (100%) من قيمتها في حالة السطح الناعم، وهذا يمكن ملاحظته بوضوح عند السرعات العالية في الشكل 4، كما ان مقاومة الاحتكاك تتناسب طردياً مع مربع السرعة، ووجود خشونة على السطح يؤثر بشكل مباشر على الجريان في منطقة الطبقة الحدية وتزيد من الاضطرابات في هذه الطبقة وتتشكل الطبقة الحدية المضطربة بشكل أسرع وبالتالي زيادة سماكة الطبقة الحدية حول الغواصة، حيث يؤدي ذلك إلى سحب طاقة إضافية من الغواصة وبالتالي زيادة المقاومة الكلية. أما بالنسبة لمقاومة الضغط فهي أيضاً تتناسب مع مربع سرعة الغواصة، وتتعلق بشكل أساسي بالشكل الهندسي للغواصة وبما أن نموذج الغواصة المدروس له شكل انسيابي عند المؤخرة بالتالي فإن ذلك يقلل من احتمال حدوث هبوط كبير للضغط عند المؤخرة بسبب الدوامات الناتجة عن انفصال الطبقة الحدية والتي تؤدي بدورها إلى زيادة في مقاومة الضغط للغواصة، ولهذا السبب فإن زيادة السرعة لها تأثير أكبر على مقاومة الاحتكاك بالمقارنة مع مقاومة الضغط، كما أن تأثير الخشونة على مقاومة الضغط يكاد لا يذكر بالمقارنة مع مقاومة الاحتكاك كما هو موضح في الشكل 4.

الجدول 4: المقاومة الكلية للغواصة عند تطبيق قيم مختلفة لارتفاع الخشونة عند سرعات مختلفة.

سرعة الغواصة Knot	$d = 0 \text{ mm}$	$d = 0.5 \text{ mm}$	$d = 1 \text{ mm}$
1.94	11.92 (N)	16.66 (N)	19.80 (N)
4	45.46 (N)	73.45 (N)	84.47 (N)
6	96.69 (N)	167.27 (N)	189.49 (N)
12	352.31 (N)	667.53 (N)	755.16 (N)
18	751.97 (N)	1499.14 (N)	1696.78 (N)

$$C_p = \frac{p}{0.5 \cdot \rho \cdot v^2} \quad (2)$$

p: الضغط الكلي Pa. ρ : الكثافة kg/m^3 . v: سرعة الغواصة m/s .



الشكل 4: تأثير سرعة الغواصة على كل من مقاومة الاحتكاك (F_v) والضغط (F_p) عند قيم مختلفة لارتفاع الخشونة

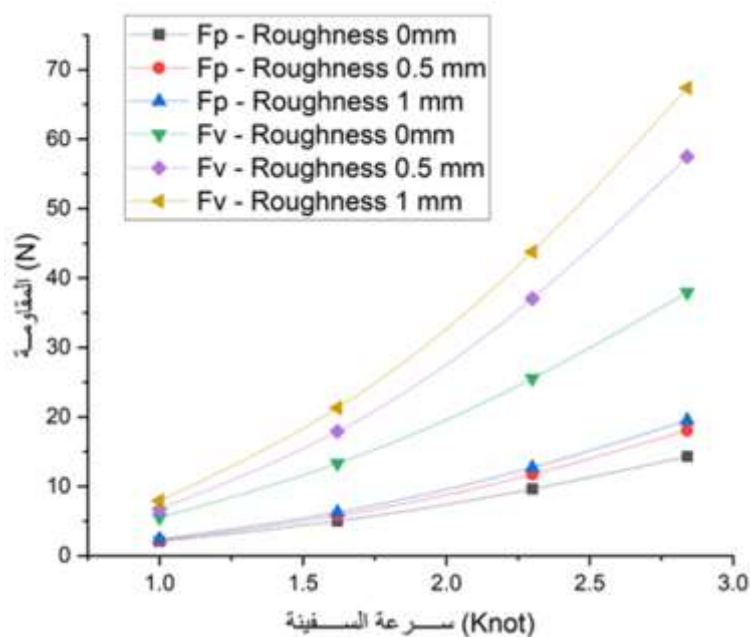
حالة السفينة

في هذه الحالة تم إجراء اختبار المقاومة للسفينة (السفينة لوحدها بدون الرفاص) وحساب تأثير سرعة السفينة وخشونة سطح السفينة على كل من مقاومة الاحتكاك ومقاومة الضغط والمقاومة الكلية للسفينة. تمت الدراسة عند الغاطس الصفي وعند سرعات منخفضة حيث تكون مقاومة الأمواج صغيرة جداً ومهملة نسبياً، لذلك لم تأخذ بالاعتبار تأثيرات السطح الحر على المقاومة. نلاحظ من الجدول 5 أن المقاومة الكلية للسفينة تتناسب طردياً مع كل من سرعة السفينة وخشونة سطح بدن السفينة. وبما أن السفينة تعمل عند الغاطس الصفي وبسرعات منخفضة فإن المركبات الأساسية للمقاومة الكلية للسفينة هي مقاومة الاحتكاك والضغط. يوضح الشكل 5 أن كلاً من مقاومة الضغط F_p ومقاومة الاحتكاك F_v يزداد مع ازدياد سرعة السفينة والخشونة. بالنسبة لسفن الحمولات السائبة فهي تعمل بغاطس كبيرة نسبياً بالمقارنة مع أنواع السفن الأخرى وعليه فإن مقاومة الاحتكاك تمثل المكون الأساسي للمقاومة الكلية للسفينة حيث أنها تتجاوز الـ (70 %) من المقاومة الكلية عند الغاطس الصفي بمختلف السرعات كما هو موضح في الشكل 5. وبشكل

مشابه لحالة الغواصة لوحدها، فإن مقاومة الاحتكاك تزداد بشكل كبير مقابل أي زيادة صغيرة في الخشونة وتتناسب طردياً مع مربع السرعة.

الجدول 5: المقاومة الكلية للسفينة عند تطبيق قيم مختلفة لارتفاع الخشونة عند سرعات مختلفة.

سرعة السفينة Knot	$d = 0 \text{ mm}$	$d = 0.5 \text{ mm}$	$d = 1 \text{ mm}$
1	7.57 (N)	8.93 (N)	10.31 (N)
1.61	18.30 (N)	23.69 (N)	27.58 (N)
2.29	35.16 (N)	48.77 (N)	56.51 (N)
2.84	52.21 (N)	75.53 (N)	86.88 (N)



الشكل 5: تأثير سرعة السفينة على كل من مقاومة الاحتكاك (F_V) والضغط (F_P) عند قيم مختلفة لارتفاع الخشونة بالإضافة لما سبق فإن أحد الأهداف الأساسية من دراسة كل من الغواصة والسفينة لوحدها بدون وجود الرفاص هو معرفة تأثير البدن و خشونة سطحه على التدفق في منطقة عمل الرفاص (حقل السرعة والضغط في هذه المنطقة)، وبالتالي تأثيرها على الدفع الناتج عن الرفاص كما سنرى في الفقرات اللاحقة.

تقييم النتائج الرقمية لحالة السفينة مع الرفاص

تم إجراء اختبار الدفع الذاتي لنموذج السفينة JBC مع نموذج الرفاص الخاص بها عند سرعة السفينة 1.18 m/s وسرعة دوران الرفاص 7.8 rps في حالة البدن النظيف، وتم تجريبياً قياس الفرق بين المقاومة المؤثرة على بدن السفينة والدفع الناتج عن الرفاص والذي بلغ قدره 18.2 N [19]، بالتالي يمكن مقارنة النتيجة الرقمية التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج الـ ANSYS مع النتيجة التجريبية كما يلي:

الجدول 6: مقارنة القيمة الرقمية مع القيمة التجريبية لحالة السفينة مع الرفاص

سرعة دوران الرفاص <i>rps</i>	سرعة السفينة <i>m/s</i>	<i>CFD</i> $R_T - T$	<i>EFD</i> $R_T - T$	<i>Error percentage</i>
7.8 <i>rps</i>	1.18 <i>m/s</i>	18.3374 <i>N</i>	18.2 <i>N</i>	0.75 %

إن التطابق بين النتائج التجريبية والنتائج التي حصلنا عليها باستخدام تقنية CFD جيدة جداً حيث أن نسبة الخطأ طفيفة وأقل من 1%، وذلك من أجل مليوني خلية حسابية، مما يدل على دقة النتائج التي يمكن الحصول عليها باستخدام برنامج الـ ANSYS. النسبة المئوية للخطأ يتم حسابها كما يلي:

$$Error_{percentage} = \frac{(R_T - T)_{CFD} - (R_T - T)_{EFD}}{(R_T - T)_{EFD}} \cdot 100 \% = \frac{18.3374 - 18.2}{18.2} \cdot 100 \% = 0.75 \%$$

دراسة تأثير خشونة بدن المركبة البحرية والرفاص على الدفع

حالة الغواصة

في هذه الحالة تم إجراء اختبار الدفع الذاتي للغواصة (الغواصة مع الرفاص) وحساب تأثير سرعة الغواصة وسرعة دوران الرفاص وحالات مختلفة للخشونة على الدفع الناتج عن الرفاص. حيث تمت الدراسة عند أربعة سرع للغواصة وهي 1.94 Knot, 6 Knot, 9 Knot, 12 Knot وعند كل سرعة تم البحث عن السرعة المناسبة لدوران الرفاص (سرعة دوران الرفاص التي يتمكن من خلالها الرفاص من تحريك الغواصة بهذه السرعة) وعليه فإن سرعات دوران الرفاص المناسبة للسرعات السابقة للغواصة هي 4 *rps*, 11.6 *rps*, 17.2 *rps*, 22.5 *rps* على التوالي. ومن ثم تم حساب تأثير الخشونة على الدفع، ففي الخطوة الأولى تم حساب الدفع الناتج عن الرفاص عند كل سرعة وبدون خشونة، وبعدها تم تطبيق ارتفاعات خشونة على سطح شفرات الرفاص قدرها 0.5 mm, 1 mm وحساب الدفع الناتج عن الرفاص عند كل قيمة لارتفاعات الخشونة السابقة. وبعدها تم تطبيق ارتفاعات خشونة على سطح شفرات الرفاص وسطح الغواصة معاً قدرها 0.5 mm, 1 mm ومن ثم إعادة حساب الدفع. يوضح الجدول 7 تأثير حالات الخشونة المختلفة على الدفع الناتج عن الرفاص عند قيم مختلفة لسرعة الغواصة وسرعة دوران الرفاص. يوضح

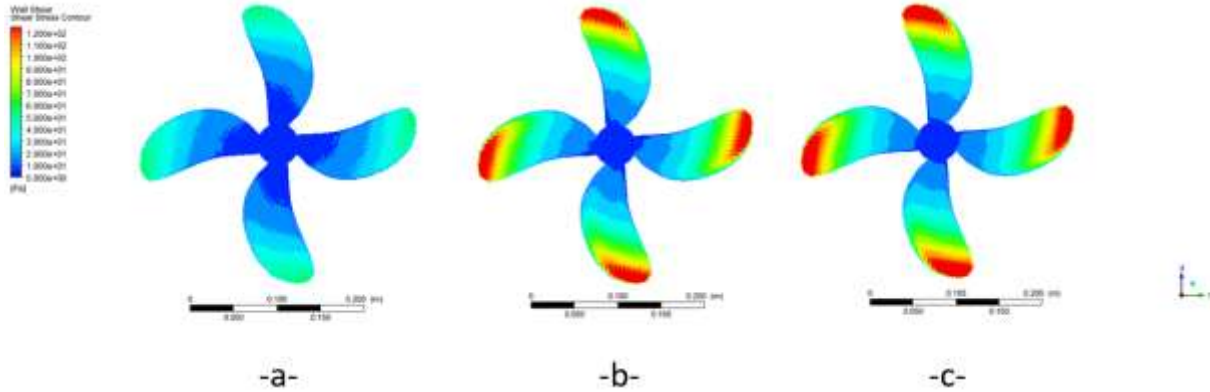
الجدول 8 النسب المئوية لمقدار الخسائر في الدفع الناتجة عن تطبيق حالات الخشونة المختلفة بالمقارنة مع حالة السطح النظيف للبدن والرفاص، حيث تتراوح قيم هذه الخسائر بين % (19 – 35). يوضح الشكل 6 مقارنة توزيع اجهد القص τ_w الذي يُعطى بالمعادلة (3) [20] على سطح شفرات الرفاص عند قيم مختلفة لارتفاع الخشونة على سطح الشفرات، من أجل سرعة الدوران للرفاص 4 *rps*، مع زيادة الخشونة ستزداد قيمة اجهد القص وبالتالي زيادة مقاومة الاحتكاك المؤثرة على شفرات الرفاص (زيادة معامل عزم الدوران)، الأمر الذي يتطلب زيادة الاستطاعة المقدمة من المحرك للتغلب على المقاومة الإضافية وتعويض خسائر الدفع، وبالتالي زيادة في استهلاك الوقود. ومن هنا تأتي أهمية المحافظة على نظافة سطح الشفرات من خلال إجراء الكشف الدوري على الرفاص خلال فترات التوقف.

وبملاحظة الجدول 7 ومقارنة حالة الخشونة للرفاص لوحده مع حالة الخشونة لكل من البدن والرفاص فنجد أن خشونة البدن تؤدي إلى زيادة صغيرة في الدفع، فمثلاً بمقارنة حالي الخشونة (خشونة للرفاص 0.5 mm - خشونة لبدن الغواصة والرفاص 0.5 mm) عند سرعة الغواصة 1.94 Knot، بوجود خشونة للبدن سيزداد الدفع بمقدار 0.118 N وعند سرعة الغواصة 12 Knot سيزداد الدفع بمقدار 7.7 N. لتفسير ذلك، كما ذكرنا في الفقرة السابقة، وجود الخشونة سيؤدي إلى زيادة الاضطرابات في منطقة الطبقة الحدية وهذا يساهم في انفصال الطبقة الحدية عن البدن بشكل أسرع

وبالتالي زيادة حجم الدوامات المتشكلة خلف بدن الغواصة مما يؤدي إلى هبوط إضافي للضغط في هذه المنطقة (منطقة عمل الرفاص).

$$\tau_w = \rho \cdot u^* \cdot u_\tau \quad (3)$$

حيث، ρ : الكثافة kg/m^3 . u_τ : سرعة الاحتكاك في الطبقة الحدية اللزجة (m/s viscous sublayer) u^* : سرعة الاحتكاك في الطبقة الحدية اللوغاريتمية (m/s logarithmic region) τ_w : اجهاد القص Pa .



الشكل 6: توزيع إجهاد القص على سطح شفرات رفاص الغواصة عند قيم مختلفة لارتفاع الخشونة، a- بدون خشونة، b- ارتفاع خشونة 0.5 mm، c- ارتفاع خشونة 1 mm. سرعة دوران الرفاص 4 rps.

الجدول 7: الدفع الناتج عن الرفاص الخاص بالغواصة عند قيم مختلفة للخشونة.

سرعة الغواصة (Knot)	سرعة دوران الرفاص (rps)	بدون خشونة	خشونة للرفاص فقط (0.5 mm)	خشونة للرفاص فقط (1 mm)	خشونة لكل من الغواصة والرفاص (0.5 mm)	خشونة لكل من الغواصة والرفاص (1 mm)
1.94	4	17.40 (N)	13.88 (N)	13.68 (N)	13.99 (N)	13.87 (N)
6	11.6	131.87 (N)	94.59 (N)	92.63 (N)	96.30 (N)	94.91 (N)
9	17.2	284.93 (N)	198.16 (N)	193.63 (N)	201.30 (N)	197.75 (N)
12	22.5	462.31 (N)	310.23 (N)	302.14 (N)	317.92 (N)	311.91 (N)

الجدول 8: النسب المئوية لمقدار الخسائر في الدفع بسبب الخشونة بالمقارنة مع حالة السطح النظيف لبدن الغواصة والرفاص.

سرعة الغواصة (Knot)	سرعة دوران الرفاص (rps)	خشونة للرفاص فقط (0.5 mm)	خشونة للرفاص فقط (1 mm)	خشونة لكل من الغواصة والرفاص (0.5 mm)	خشونة لكل من الغواصة والرفاص (1 mm)
1.94	4	20.236 %	21.384 %	19.558 %	20.259 %
6	11.6	28.265 %	29.753 %	26.968 %	28.026 %
9	17.2	30.450 %	32.040 %	29.349 %	30.594 %
12	22.5	32.896 %	34.638 %	31.231 %	32.531 %

حالة السفينة

في هذه الحالة تم إجراء اختبار الدفع الذاتي للسفينة (السفينة مع الرفاص) وحساب تأثير سرعة السفينة وسرعة دوران الرفاص وحالات مختلفة للخشونة على الدفع الناتج عن الرفاص. حيث تمت الدراسة عند ثلاثة سرع للسفينة وهي 1.61

Knot, 2.29 Knot, 2.84 Knot وعند كل سرعة تم البحث عن السرعة المناسبة لدوران الرفاص (سرعة دوران الرفاص التي يتمكن من خلالها الرفاص من تحريك السفينة بهذه السرعة) وعليه فإن سرعات دوران الرفاص المناسبة للسرعات السابقة للسفينة هي 11.5 rps, 14.5 rps, 18.4 rps على التوالي. ومن ثم تم حساب تأثير الخشونة على الدفع، ففي الخطوة الأولى تم حساب الدفع الناتج عن الرفاص عند كل سرعة وبدون خشونة، وبعدها تم تطبيق ارتفاعات خشونة على سطح شفرات الرفاص قدرها 0.5 mm, 1 mm وحساب الدفع الناتج عن الرفاص عند كل قيمة لارتفاعات الخشونة السابقة، وبعدها تم تطبيق ارتفاعات خشونة على سطح شفرات الرفاص وسطح السفينة معاً قدرها 0.5 mm, 1 mm ومن ثم إعادة حساب الدفع. يوضح الجدول 9 تأثير حالات الخشونة المختلفة على الدفع الناتج عن الرفاص عند قيم مختلفة لسرعة السفينة وسرعة دوران الرفاص. يوضح

الجدول 10 النسب المئوية لمقدار الخسائر في الدفع الناتجة عن تطبيق ارتفاعات الخشونة المختلفة بالمقارنة مع حالة السطح النظيف للبدن والرفاص، حيث تتراوح قيم هذه الخسائر بين % (8.6 – 10.2).

الجدول 9: الدفع الناتج عن الرفاص الخاص بالسفينة عند قيم مختلفة للخشونة

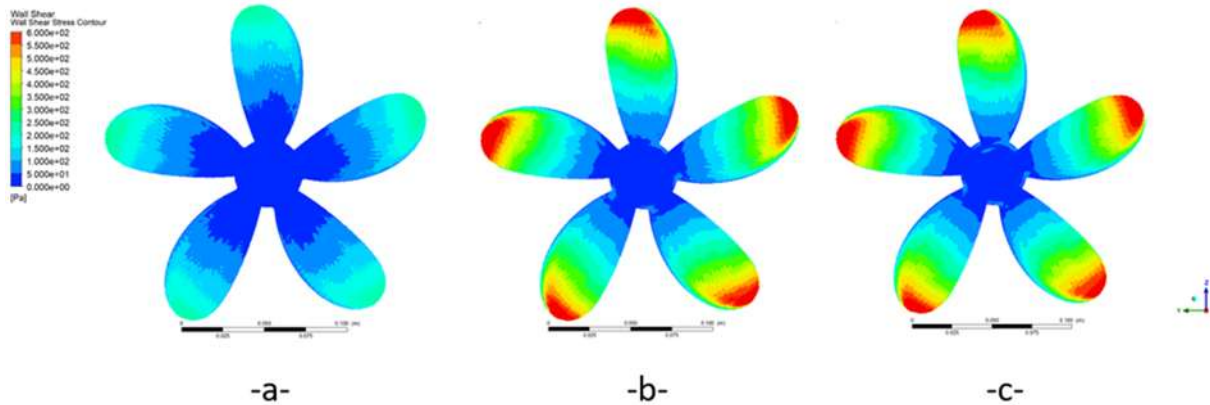
سرعة السفينة (Knot)	سرعة دوران الرفاص (rps)	بدون خشونة	خشونة للرفاص فقط (0.5 mm)	خشونة للرفاص فقط (1 mm)	خشونة لكل من السفينة والرفاص (0.5 mm)	خشونة لكل من السفينة والرفاص (1 mm)
1.61	11.5	46.01 (N)	42.05 (N)	42.00 (N)	42.05 (N)	42.01 (N)
2.29	14.5	75.39 (N)	68.44 (N)	68.30 (N)	68.46 (N)	68.39 (N)
2.84	18.4	115.80 (N)	104.11 (N)	103.99 (N)	104.16 (N)	104.02 (N)

الجدول 10: النسب المئوية لمقدار الخسائر في الدفع بسبب الخشونة بالمقارنة مع حالة السطح النظيف لبدن السفينة والرفاص

سرعة السفينة (Knot)	سرعة دوران الرفاص (rps)	خشونة للرفاص فقط (0.5 mm)	خشونة للرفاص فقط (1 mm)	خشونة لكل من السفينة والرفاص (0.5 mm)	خشونة لكل من السفينة والرفاص (1 mm)
1.61	11.5	8.6 %	8.7 %	8.59 %	8.69 %
2.29	14.5	9.22 %	9.39 %	9.19 %	9.28 %
2.84	18.4	10.1 %	10.2 %	10.06 %	10.17 %

يوضح

الشكل 7 مقارنة توزيع اجهاد القص τ_w الذي يُعطى بالمعادلة (3) على سطح شفرات الرفاص عند قيم مختلفة لارتفاع الخشونة على سطح الشفرات، من أجل سرعة الدوران للرفاص 6 rps، وكما هو الحال بالنسبة لحالة رفاص الغواصة سيؤدي ذلك في نهاية المطاف إلى خسائر في الدفع. بالنظر إلى الجدول 9 ومقارنة حالة الخشونة للرفاص لوحده مع حالة الخشونة لكل من البدن والرفاص فنجد أن خشونة البدن تؤدي إلى زيادة طفيفة جداً في الدفع، ويعود السبب في ذلك كما ذكرنا في حالة الغواصة إلى أن وجود الخشونة على البدن سيؤدي إلى هبوط إضافي في الضغط في مكان عمل الرفاص من جهة السحب.



الشكل 7: توزيع إجهاد القص على سطح شفرات رفاص السفينة عند قيم مختلفة لارتفاع خشونة، -a- بدون خشونة، -b- ارتفاع خشونة 0.5 mm، -c- ارتفاع خشونة 1 mm. سرعة دوران الرفاص 6 rps.

دراسة تأثير الغمر الجزئي للمركبة البحرية والرفاص على الدفع

من الظواهر الشائعة التي تؤدي إلى تدهور عمل الرفاص خلال الإبحار بالإضافة لتراكم الحشيف الحيوي على شفرات الرفاص هو الغمر الجزئي للرفاص، وهذا شائع بالنسبة للسفن ذات الغواطس القليلة والمخصصة للإبحار بسرعات عالية، وجميع أنواع السفن عند دخولها الميناء مما يتطلب تقليل غاطس المؤخرة وبالتالي قد يحدث اختراق شفرات الرفاص للسطح الحر للماء، وعند الإبحار في البحار الهائجة سيترافق ذلك بخروج متكرر لشفرات الرفاص فوق الماء. الشفرات المخترقة لسطح الماء والملامسة للهواء ستقوم بسحب الهواء أثناء دورانها إلى أسفل السطح وبالتالي سيترافق ذلك بتشكيل سحابة من الفقاعات الهوائية (جيوب هوائية) محاطة بشفرات الرفاص المغمورة، تسمى هذه الظاهرة بدخول الهواء إلى مكان عمل الرفاص أو (Ventilation)، الشكل 8. وبالنسبة للرفاصات المغمورة التي تعمل بالقرب من السطح الحر وبسرعات دوران عالية يمكن أن تتعرض لدخول الهواء (Ventilation)، يمكن تفسير ذلك فيزيائياً كما يلي: أثناء عمل الرفاص يكتسب الماء بجوار الرفاص طاقة حركية عالية ناتجة عن دوران الرفاص، وحسب معادلة برنولي سيكون هناك انخفاض في الضغط (الضغط السكوني) في هذه المنطقة على حساب ازدياد الطاقة الحركية (أو الضغط الديناميكي) للماء، وعندما يكون الرفاص قريب من السطح الحر، يمكن أن يصل انخفاض الضغط إلى حدود السطح الحر (حيث يكون السطح الحر معرض للضغط الجوي)، وبالتالي نتيجة استمرار الهبوط في الضغط أسفل السطح الحر، سينشأ تجويف في السطح الحر نحو الأسفل، أي هبوط في مستوى السطح الحر باتجاه منطقة عمل الرفاص نتيجة تغلب الضغط الجوي على ضغط الماء في هذه المنطقة ($P_0 > P$). تستمر هذه العملية أي زيادة عمق التجويف حتى يصبح ملامساً للطرف العلوي لشفرات الرفاص (من جانب السحب)، وبالتالي سيكون هناك تلامس بين سطح الشفرات والسطح الحر (الهواء الخارجي)، ونتيجة للدوران المستمر للشفرات سينشأ سحابة من الجيوب الهوائية على مدار الرفاص كما هو الحال بالنسبة للرفاصات المغمورة جزئياً، ويزداد احتمال حدوث هذه الظاهرة كلما كان الرفاص أقرب من السطح الحر [1]. وهذا يقود بدوره إلى تناقص قوة الدفع والتوزيع غير المنتظم للضغط على سطح الشفرات، قد يترافق ذلك بتقلبات كبيرة في الاحمال الديناميكية المطبقة على شفرات الرفاص، وهذا ينتج عنه العديد من المشاكل مثل الاهتزازات الميكانيكية وتآكل شفرات الرفاص واهتراء العناصر الميكانيكية (كالتروس) وغير ذلك، تم توضيح الاضرار المحتملة في [21].



الشكل 8: دخول الهواء إلى مكان عمل الرفاص Ventilation، [22].

تم حساب الدفع الناتج عن الرفاص في حالة الغواصة عند قيمتين مختلفتين لنسبة الغمر لمعرفة تأثير تغير الغاطس على الدفع، حيث تم اعتماد سرعة الغواصة 1.94 Knot وسرعة دوران الرفاص 4 rps لإجراء الدراسة. في الخطوة الأولى تمت الدراسة عند نسبة غمر $(h/r = 1)$ حيث: h هي المسافة الشاقولية بين محور الرفاص والسطح الحر للماء، r نصف قطر الرفاص، أي ان السطح الحر ملامس للطرف العلوي لشفرات الرفاص، وفي هذه الحالة يكون جزء بسيط من بدن الغواصة بارز فوق سطح الماء. وفي الخطوة الثانية تمت الدراسة عند نسبة الغمر $(h/r = 0)$ ، أي ان السطح الحر للماء عند منتصف الرفاص (محور الرفاص)، وفي هذه الحالة يكون نصف بدن الغواصة فوق سطح الماء كونه متناظر. وفي كلا الحالتين تم اخذ تأثير الخشونة بعين الاعتبار كالتالي: بدون خشونة - خشونة للرفاص 0.5 mm - خشونة للرفاص وبدن الغواصة 0.5 mm. يبين الجدول 11 قيم الدفع الناتجة عن الرفاص عند نسب غمر مختلفة مع الأخذ بالاعتبار لتأثير الخشونة. يوضح الجدول 12 النسب المئوية لخسائر الدفع الناتجة عن الغمر الجزئي لشفرات الرفاص بالمقارنة مع قيمة الدفع في حالة الغمر الكامل وبدون خشونة عندما تكون سرعة الغواصة 1.94 Knot وسرعة دوران الرفاص 4 rps، فعندما يكون الرفاص قريب من السطح الحر حتى لو كان مغمور بشكل كامل في الماء كما هو الحال عند تكون نسبة الغمر $(h/r = 1)$ فان عمل الرفاص في هذه الحالة سيؤدي إلى سحب (هبوط) السطح الحر في هذه المنطقة وحدوث غمر جزئي للشفرات أي حدوث ظاهرة الـ (Ventilation)، وكما هو موضح في الجدول 12 تصل نسبة خسائر الدفع في هذه الحالة إلى % 19.694. وعندما تكون نسبة الغمر $(h/r = 0)$ تصبح خسائر الدفع % 53.310 أي عندما يكون الرفاص مغمور حتى منتصفه سينخفض الدفع إلى أكثر من النصف. وإذا لاحظنا تأثير الخشونة على الدفع فمن المتوقع انخفاض الدفع بنسبة كبيرة في حال وجود خشونة.

الجدول 11: تأثير الغمر الجزئي والخشونة على الدفع عندما تكون سرعة الغواصة 1.94 Knot وسرعة دوران الرفاص 4 rps

الخشونة mm	$h/r = 1$	$h/r = 0$
بلا خشونة	13.97 N	8.12 N
خشونة للرفاص 0.5 mm	7.76 N	4.63 N
خشونة للغواصة والرفاص 0.5 mm	8.38 N	5.24 N

الجدول 12: النسب المئوية لمقدار الخسائر في الدفع الناتجة عن الغمر الجزئي والخشونة بالمقارنة مع حالة السطح النظيف والمغمور

بعمق لبدن الغواصة والرفاص

الخشونة mm	$h/r = 1$	$h/r = 0$
بلا خشونة	19.694 %	53,310 %
خشونة للرفاص 0.5 mm	55.400 %	73.358 %
خشونة للغواصة والرفاص 0.5 mm	51.845 %	69.888 %

يوضح الجدول 13 قيم الدفع الناتجة عن الرفاص لحالة السفينة عند نسب غمر مختلفة والنسب المئوية لخسائر الدفع الناتجة عن الغمر الجزئي لشفرات الرفاص بالمقارنة مع قيمة الدفع في حالة الغمر الكامل وبعمر Deep Water عندما تكون سرعة السفينة 1 Knot وسرعة دوران الرفاص 6 rps، نلاحظ من الجدول 13 أنه عندما تكون نسبة الغمر ($h/r = 1.2$) فإن قيمة الدفع تكون مقاربة جداً لقيمة الدفع في حالة الغمر بعمق Deep Water وقيمة الخسائر في الدفع هي 1.5 %، ويعود السبب في ذلك إلى أن الرفاص في كلا الحالتين مغمور بشكل كامل في الماء، وعندما تكون نسبة الغمر ($h/r = 1.2$) فإن سرعة دوران الرفاص غير كافية لسحب السطح الحر للماء وحدوث الـ Ventilation.

الجدول 13: تأثير نسبة الغمر على الدفع الناتج عن الرفاص الخاص بالسفينة، عندما تكون سرعة السفينة 1 Knot وسرعة دوران

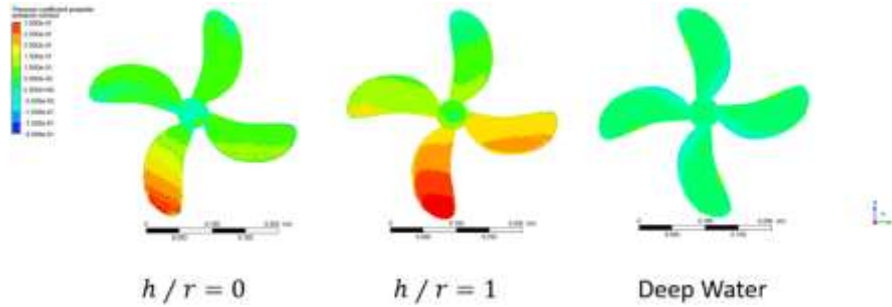
الرفاص 6 rps

النسبة المئوية لخسائر الدفع %	قيمة الدفع (N)	نسبة الغمر (h/r)	سرعة دوران الرفاص (rps)	سرعة السفينة (Knot)
-	13.46 N	Deep Water	6	1
1.5 %	13.26 N	1.2	6	1
21.77 %	10.53 N	0.7	6	1

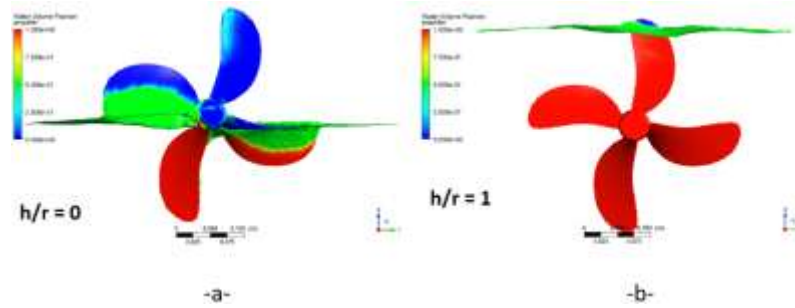
يوضح الشكل 9 توزيع معامل الضغط C_p على سطح شفرات الرفاص من جانب الضغط (جانب الدفع) عند عدة حالات للغمر وبدون وجود خشونة عندما تكون سرعة الغواصة 1.94 Knot وسرعة دوران الرفاص 4 rps، فعندما يكون الرفاص مغموراً بشكل كامل وبعمر تحت الماء نلاحظ من الشكل 9 (على اليمين) توزيع منتظم للضغط على سطح الشفرات، أي أن جميع الشفرات تساهم بشكل متساوي في تأمين الدفع. وعندما يعمل الرفاص بالقرب من السطح الحر وهذا يوافق لنسبة الغمر ($h/r = 1$)، نلاحظ في هذه الحالة أن الضغط على الجزء السفلي من الرفاص أي على الشفرات المغمورة بعمق أكبر بكثير من الضغط على الشفرات العلوية، وبشكل مشابه عندما تكون نسبة الغمر ($h/r = 0$) حيث أن الجزء العلوي للرفاص ملاصق للهواء والجزء السفلي مغمور في الماء، وفي هذه الحالة يتركز الضغط بالكامل على الجزء السفلي (الشفرات المغمورة) وتحديداً على طرف الشفرات المغمورة كما هو موضح في الشكل 9 على اليسار. وهذا يؤدي إلى زيادة التحميل على هذه الأجزاء من الشفرات وحدوث تقلبات كبيرة في الاحمال الديناميكية المطبقة على شفرات الرفاص أثناء دورانها، وهذا ينتج عنه العديد من المشاكل مثل الاهتزازات الميكانيكية ومشاكل انشائية (تحديداً عند جذر الشفرة بسبب القيم الكبيرة للعرض الناتجة عن تركيز الضغط على طرف الشفرات) وتآكل شفرات الرفاص واهتراء العناصر الميكانيكية وغيرها، نفس الأمر يلاحظ في حالة السفينة.

يوضح الشكل 10 تأثير نسبة الغمر للرفاص على السطح الحر وحدوث ظاهرة الـ Ventilation، تم استخدام خاصية الكسر الحجمي للماء (Water-Volume Fraction) [30] لإظهار التشوهات عند السطح الحر في مكان عمل الرفاص والجيوب الهوائية المرافقة لشفرات الرفاص، وهذا موضح بشكل جيد من أجل نسبة الغمر $h/r = 0$ في الشكل 10 على اليسار a، أما عندما يكون الرفاص مغموراً بشكل كامل $h/r = 1$ الشكل 10 على اليمين b، فنلاحظ عدم وجود جيوب هوائية حول الشفرات المغمورة، والذي يُعزى إلى عدم قدرة معادلات الـ (URANS) على حل الدوامة الهوائية الطرفية الواصلة بين طرف شفرة الرفاص والسطح الحر للماء بالنسبة للشفرات المغمورة بشكل كامل، ويجب استخدام

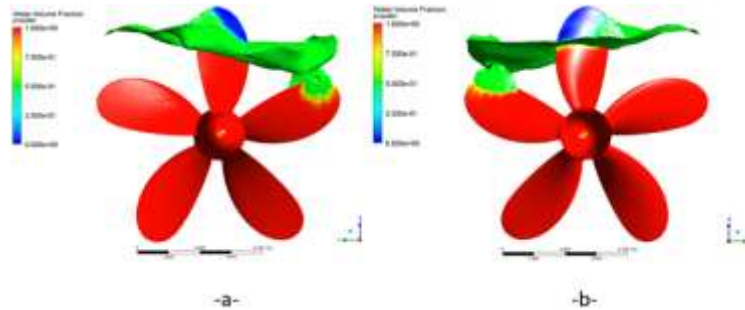
طرق أخرى مثل طريقة Large Eddy Simulation. الشكل 11 يوضح وجود الجيوب الهوائية حول شفرات الرفاص لحالة السفينة، مع نسبة غمر $h/r=0.7$.



الشكل 9: تأثير الغمر الجزئي للرفاص على توزيع الضغط على سطح شفرات الرفاص من جهة الضغط



الشكل 10: تأثير نسبة الغمر للرفاص الخاص بالغواصة على تشوهات السطح الحر وحدوث الـ Ventilation.



الشكل 11: تأثير نسبة الغمر 0.7 للرفاص الخاص بالسفينة على تشوهات السطح الحر وحدوث الـ Ventilation، من جهة الضغط (a) وجهة السحب (b).

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات

- إن طريقة الـ URANS والموديل الرياضي SST-K- ω تعطي نتائج جيدة جداً في التطبيقات البحرية وبالأخص عند حساب المقاومة والدفع وتساعد في توفير التكاليف المادية والوقت.
- وجود الخشونة على السطح المغمور للمركبة البحرية سيؤثر بشكل كبير على المقاومة الكلية وتحديدًا على مقاومة الاحتكاك، وكذلك على التدفق في مكان عمل الرفاص وبالتالي على الدفع.
- وجود الخشونة على شفرات الرفاص سيؤدي إلى تناقص الدفع وتزداد خسائر الدفع مع زيادة سرعة دوران الرفاص.

- الغمر الجزئي للرفاص سيؤدي إلى خسائر كبيرة في الدفع بالإضافة للتوزع غير المنتظم للضغط على شفرات الرفاص الذي سيؤدي إلى حدوث مشاكل انشائية واهتزازات.
- عمل الرفاص بالقرب من السطح الحر حتى لو كان مغمور بشكل كامل ويعطي نفس قيمة الدفع إلا أن ذلك سيؤدي إلى توزع غير منتظم للضغط على الشفرات وتركز الضغط على أجزاء معينة من الشفرات.
- يزداد احتمال دخول الهواء إلى مكان عمل الرفاص Ventilation كلما كان الرفاص أقرب من السطح الحر وكذلك مع زيادة سرعة دوران الرفاص.

التوصيات

- إجراء كشف دوري على كامل السطح المغمور للمركبات البحرية خلال فترات التوقف، وتحديدًا على شفرات الرفاص، تقادياً لوجود الحشف البحري.
- بالنسبة للسفن التجارية التي تعمل بغواطس كبيرة، يُنصح بتخفيض سرعة دوران الرفاص قدر الإمكان أثناء الإبحار في مياه ضحلة أو قليلة العمق وجميع الحالات التي يتطلب فيها تقليل غاطس السفينة عند المؤخرة، تقادياً لدخول الهواء إلى مكان عمل الرفاص.

التوصيات للأعمال اللاحقة

- دراسة تأثير الخسونة والغمر الجزئي للرفاص مع وجود الدفة لمعرفة تأثير كافة الملحقات على الدفع والمقاومة.
- اختبار السفينة عند سرعات عالية لمعرفة تأثير الأمواج المتشكلة على المقاومة والدفع وتوزع حقل السرعة في مستوى الرفاص وكذلك حقل الضغط في مكان عمل الرفاص.
- استخدام عدد خلايا كبير للمجال الحسابي في مكان عمل الرفاص وتجريب طرق أخرى مثل LES (Large Eddy Simulation) في حال توفر حاسب بمواصفات جيدة جداً، لإظهار كافة اشكال الدوامات المتشكلة حول شفرات الرفاص بدقة كافية وتحديدًا في حالات الغمر الجزئي.

References

- [1] K. Wöckner-Kluwe, "Evaluation of the Unsteady Propeller Performance behind Ships in Waves," Technische Universität Hamburg, Hamburg, 2013.
- [2] E. Almeida, T. C. Diamantino, and O. de Sousa, "Marine paints: The particular case of antifouling paints," *Prog. Org. Coatings*, vol. 59, no. 1, pp. 2–20, Apr. 2007, doi: 10.1016/J.PORGCOAT.2007.01.017.
- [3] A. Farkas, N. Degiuli, and I. Martić, "The impact of biofouling on the propeller performance," *Ocean Eng.*, 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.108376.
- [4] A. Farkas, N. Degiuli, and I. Martić, "Towards the prediction of the effect of biofilm on the ship resistance using CFD," *Ocean Eng.*, vol. 167, pp. 169–186, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2018.08.055.
- [5] M. P. Schultz, J. A. Bendick, E. R. Holm, and W. M. Hertel, "Economic impact of biofouling on a naval surface ship," <https://doi.org/10.1080/08927014.2010.542809>, vol. 27, no. 1, pp. 87–98, Jan. 2010, doi: 10.1080/08927014.2010.542809.
- [6] ITTC, "Specialist Committee on Surface Treatment," in *26th International Towing Tank Conference-Volum II*, 2011, [Online]. Available: <https://www.ittc.info/downloads/proceedings/26th-conference-rio-de-janeiro-2011/volume-2/>.
- [7] M. A. A.-R. Mosaad, "Marine propeller roughness penalties," Newcastle University, 1986.

- [8] ICCT, "Reducing Greenhouse Gas Emissions from Ships - Cost Effectiveness Available Options," 2011, p. White Paper Number 11.
- [9] A. Califano and S. Steen, "Numerical simulations of a fully submerged propeller subject to ventilation," *Ocean Eng.*, 2011, doi: 10.1016/j.oceaneng.2011.07.010.
- [10] S. Lee and K. J. Paik, "Urans simulation of a partially submerged propeller operating under the bollard condition," *Brodogradnja*, 2018, doi: 10.21278/brod69107.
- [11] V. N. Bich and N. T. N. Hoa, "Numerical Evaluation of Roughness Influences on Open Water Propeller Characteristics Using RANSE Method," *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, vol. 11, no. 1, 2022, doi: 10.18178/ijmerr.11.1.15-21.
- [12] 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.
- [13] N. Abbas and B. Oderah, "CFD Study of the Bulbous Bow Effect on the Resistance of the Tanker-KVLCC2," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 43 No. 4, 2021.
- [14] N. Abbas and 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] N. Chase, "Simulations of the DARPA Suboff submarine including self-propulsion with the E1619 propeller," University of Iowa, 2012.
- [19] Tokyo-2015, "A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics." <https://t2015.nmri.go.jp/jbc.html> (accessed Apr. 07, 2020).
- [20] ANSYS. INC, *ANSYS FLUENT 12.0 - Theory guide*. 2009.
- [21] A. Califano, "Dynamic loads on marine propellers due to intermittent ventilation," Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- [22] A. M. Kozłowska, S. Steen, and K. Koushan, "Classification of Different Type of Propeller Ventilation and Ventilation Inception Mechanism," Kempf, 2009. Accessed: 03-Mar-2021. [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.572.9788&rep=rep1&type=pdf>.