

CFD Study of Influence of the Drift Angles on the Flow Properties Around DARPA Suboff Submarine with the Propeller

Dr. Nawar Abbas*
Amara Afeef**

(Received 15 / 9 / 2023. Accepted 13 / 11 / 2023)

□ ABSTRACT □

This research calculates and analyzes the flow around the DARPA Suboff submarine using a Computational Fluid Dynamics (CFD) technique. It was focused on the flow at different sailing conditions (at the straight course and different drift angles), the resistance affecting the submarine during sailing was calculated, as well as the pressure distribution on the hull surface and the velocity distribution in the propeller plane at different situations (DARPA alone, DARPA with fins, DARPA with fins and propeller and DARPA with propeller without fins). The RANS method and $k-\omega$ Shear Stress Transport (SST) model with the ANSYS program were used to solve the Navier-Stokes equations. The numerical results were compared with experimental data. This Comparison showed how accurate CFD technology is in calculating this type of flow case. The results confirmed that the total resistance increases with the presence of the propeller and with the increase of the drift angle.

Keywords: DARPA Suboff, CFD, $k-\omega$ SST, ANSYS, RANS.

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: amara.net.sy@gmail.com

دراسة تأثير زوايا الانحراف على حقل التدفق حول الغواصة DARPA Suboff بوجود الرفاص باستخدام تقنية CFD

د. نوار عباس*

أمانة عفيف**

تاريخ الإيداع 15 / 9 / 2023. قُبِلَ للنشر في 13 / 11 / 2023

□ ملخص □

في هذا البحث تم تحليل ودراسة التدفق حول بدن الغواصة DARPA Suboff باستخدام تقنية ديناميك الموائع الحسابية (Computational Fluid Dynamics) CFD، حيث تم دراسة التدفق في ظروف إبحار مختلفة (نحو الأمام مباشرة ومع زوايا انحراف مختلفة)، كما تم حساب المقاومات المؤثرة على الغواصة أثناء الإبحار، توزع حقل الضغط على البدن وتوزع حقل السرعة في مستوي الرفاص في عدة حالات (الغواصة لوحدها، الغواصة مع زعانف، الغواصة مع زعانف ورفاص، الغواصة مع رفاص بدون زعانف). لقد تم استخدام طريقة الـ RANS والموديل $k - \omega$ SST وبرنامج الـ ANSYS-Fluent لحل معادلات نافيه ستوكس الناظمة للتدفق. تم مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية والمقارنة أظهرت مدى دقة CFD في حساب مثل هذا النوع من الجريانات. النتائج أكدت على أن المقاومة الكلية تزداد بوجود الرفاص ومع وجود زاوية انحراف للغواصة.

الكلمات المفتاحية: الغواصة DARPA Suboff، CFD- ميكانيك الموائع الحسابية، $k - \omega$ SST، برنامج الـ ANSYS، معادلات رينولدز نافيه ستوكس الوسطية.



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.

الايمل: dr.nawarnabilabbas@tishreen.edu.sy

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

amara.net.sy@gmail.com

مقدمة:

تعتبر دراسة التدفق خلف بدن المركبة البحرية والتأثير المتبادل بين هذه المركبة والرفاص الخاص بها أمراً بالغ الأهمية قبل البدء بعملية البناء، لما له من تأثير كبير على أداء المركبة أثناء الإبحار، فمن جهة فإن المخر المتشكل خلف البدن بفعل انفصال الطبقة الحدية مسؤول عن تخفيض سرعة التدفق في مستوي الرفاص مما يؤدي إلى زيادة الدفع وتحسين المردود بشكل عام، ومن جهة أخرى فإن عدم انتظام حقل السرعة يسبب تأرجحات في الدفع مع الزمن وبالتالي اهتزازات في الرفاص، والتي تنتقل بدورها إلى بدن المركبة البحرية وبالأخص في منطقة المؤخرة. بالإضافة لما تم ذكره سابقاً فإن تحديد ودراسة المواصفات الهيدروديناميكية للرفاص له دور مهم في تحسين خصائص المناورة وبالتالي سلامة الملاحة وفعاليتها.

بناءً على ذلك تم استخدام ديناميك الموائع الحسابية (CFD, Computational Fluid Dynamics) لدراسة التدفق حول بدن الغواصة المرجعية DARPA Suboff مع وبدون ملحقات، من أجل دراسة تأثير وجود الملحقات على تغير شروط التدفق حول بدن الغواصة أثناء الإبحار إلى الأمام مباشرةً و عند زوايا انحراف مختلفة والتي تؤدي بدورها إلى تغيير قيمة المقاومة، ومن ثم مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية المتوفرة [1].

تعتمد تقنية الـ CFD على حل المعادلات النازمة للتدفق باستخدام إحدى الطرق الرقمية التالية: طريقة الحجوم المنتهية (Finite Volumes Method, FVM)، طريقة الفروق المنتهية (Finite Differencing Method, FDM) وطريقة العناصر المنتهية (Finite Elements Method, FEM). تم خلال السنوات السابقة تطوير العديد من البرامج التي تستخدم هذه التقنية، على سبيل المثال لا الحصر نذكر برنامج الـ ANSYS الذي يتم استخدامه كثيراً في الوقت الحالي لحل التدفقات المعقدة. تعطي هذه البرامج إمكانية ضبط الشروط الحدية للجريان بسهولة، وكذلك تمكن من عرض النتائج على شكل مخططات بيانية ملونة تتيح تحليل النتائج بشكل دقيق.

من الجدير بالذكر أن الانتشار الكبير لتقنية الـ CFD في مجال الهندسة البحرية بشكل خاص يعود لأسباب ترتبط بعدم القدرة على الاعتماد الدائم على الطرق التجريبية في دراسة الجريانات البحرية وذلك بسبب وجود العوائق التالية:

1. زيادة صعوبة إجراء التجربة عندما يكون الجسم المدروس كبيراً ويحوي ملحقات صغيرة جداً بالنسبة لحجمه والتي يجب أخذها بعين الاعتبار عند إجراء التجربة مثل السفينة وملحقاتها (الرفاص، الدفة،... إلخ)، مما يزيد وبشكل كبير من صعوبة القياسات، وذلك بسبب الأبعاد الهندسية المعقدة والصغيرة للملحقات بالمقارنة مع السفينة.
2. الطول المحدود لقنوات الاختبار مثل قنوات جر السفن، مما يحد من عملية القياس.
3. التكاليف المادية الكبيرة، والحاجة الزمنية الكبيرة للقياس.

يمكن تقادي الصعوبات المذكورة أعلاه باستخدام الطرق الرقمية (CFD)، والتي من خلالها يمكن خلق شروط الجريان الموافقة لأي حالة إبحار.

تعتبر دراسة التأثير المتبادل بين بدن الغواصة والرفاص من الأمور الهامة جداً في مراحل التصميم الأولي لكل من الغواصة والرفاص، لما لذلك من دور كبير في اختيار الرفاص المناسب للغواصة، بالإضافة إلى أن ذلك يساعد وبشكل كبير في تحسين تصميم الرفاص والغواصة. هناك الكثير من الدراسات المرجعية حول هذا الأمر، وعلى سبيل المثال لا الحصر سنذكر بعضاً منها. قام الباحث [2] Vaz, 2010 باستخدام تقنية الـ CFD لحساب القوى المؤثرة على البدن وحقل التدفق حول غواصة (DARPA SUBOFF) أثناء عملية المناورة في حالتها البدن لوحده والبدن مع الملحقات عند زوايا انحراف مختلفة. استخدمت طريقة RANS في البرنامج MARIN لحل معادلات نافيه ستوكس. تم دراسة

تأثير نوع الموديل الرياضي المستخدم في طريقة الـ RANS على النتائج الرقمية، كما وتم أيضا دراسة تأثير الملحقات على كل من القوى وحقل التدفق المتشكل حول وخلف البدن. النتائج الرقمية التي تم الحصول عليها تمت مقارنتها مع النتائج التجريبية والتي حققت توافق جيد جدا.

استخدم Chase, 2012 [1] تقنية الـ CFD لدراسة التأثير المتبادل بين بدن لغواصة DARPA Suboff والرفاص E1619. تم إجراء الحسابات لحالتي الحركة إلى الأمام مباشرة والحركة الدورانية. تم استخدام الكود البرمجي CFD Ship Iowa، في البداية تم إجراء الحسابات لكل من البدن والرفاص كل على حدا ومن ثم تم إجراء الحسابات لحالة البدن والرفاص سوياً. تم استخدام أربع شبكات حسابية مختلفة وثلاثة خطوات زمنية من أجل دراسة تأثير نوع الشبكة الحسابية على النتيجة الرقمية. استخدمت طريقة RANS وطريقة الـ Hybrid (RANS-LES) لحل معادلات نافيه ستوكس. بينت المقارنة بين النتائج الرقمية أن طريقة الـ RANS غير قادرة على حل الاضطرابات التي تحدث في منطقة المخر خلف السفينة، بينما وعلى العكس تستطيع الطرق الهجينة حل هذه الاضطرابات والدوامات بشكل صحيح. بمقارنة النتائج الرقمية التي تم الحصول عليها مع القيم التجريبية المتوفرة تبين أن هناك توافق جيد جداً، وهذا بدوره يؤكد جودة تقنية الـ CFD.

في عام 2017 استخدم Delen [3] تقنية الـ CFD لحساب قيم المقاومة والطاقة والتي تعتبر مهمة جدا لدراسة السلوك الهيدروديناميكي للغواصة (DARPA SUBOFF). بعد ذلك تم دراسة التأثير المتبادل بين بدن الغواصة والرفاص DTMB 4119. استخدمت طريقة RANS لحل معادلات نافيه ستوكس. النتائج الرقمية التي تم الحصول عليها حققت توافق جيد جداً مع النتائج التجريبية المتوفرة.

قام Sezen, 2018 [4] بدراسة الخصائص الهيدروديناميكية للغواصة (DARPA SUBOFF) والرفاص E1619 باستخدام تقنية ديناميك الموائع الحسابية (CFD). واستخدمت طريقة الحجوم المنتهية (FVM) وطريقة الـ RANS لحل معادلات نافيه ستوكس. تم حساب المقاومة والدفع وأثر المخر كما وتم دراسة التأثير المتبادل بين البدن والرفاص، النتائج التي تم الحصول عليها تمت مقارنتها مع البيانات التجريبية.

درس Doyle, 2019 [5] حقل التدفق حول بدن الغواصة باستخدام تقنية الـ CFD، حيث استخدمت طريقة الـ URANS والموديل الرياضي k- ω SST لحل معادلات نافيه ستوكس. تم إجراء الحسابات عند ظروف إبحار مختلفة (أثناء الإبحار إلى الأمام مباشرة وعند المناورة)، وذلك عند رقم رينولدز 3.1×10^6 . النتائج الرقمية التي تم الحصول عليها حققت توافق جيد مع النتائج التجريبية.

أهمية البحث وأهدافه:

إن الأبحاث التي تخص الغواصات قليلة وذلك بالمقارنة مع الأبحاث الخاصة بالسفن، وعليه تأتي أهمية هذا البحث بالدرجة الأولى كونه يهتم بدراسة الغواصات، من جهة ثانية تعتبر دراسة التأثير المتبادل بين الرفاص والبدن من الموضوعات المهمة في علم الهيدروديناميك البحري لأنها تساعد في التنبؤ بأداء المركبات البحرية أثناء العمل في الظروف الحقيقية وهذا يساعد بشكل كبير في الحصول على التصميم الأفضل للغواصة والرفاص ورفع كفاءتهما، ومن خلال الاطلاع على الكثير من الدراسات المرجعية، فإن الدراسات لحالة الغواصة والرفاص أثناء الإبحار بزوايا انحراف

قليلة جداً، وبالتالي فإن إتمام هذا البحث سيساعد في تقديم معلومات أكثر عن خصائص التدفق حول بدن الغواصة أثناء الإبحار بزوايا انحراف مختلفة.

طرائق البحث ومواده:

تم في هذا البحث استخدام CFD لحساب التدفق بأدق تفاصيله، وتوفير الجهد والتكلفة في إجراء الحسابات، حيث تم استخدام طريقة الـ RANS وموديل الاضطراب $k - \omega SST$ ضمن برنامج الـ Ansys لحل معادلات نافيه ستوكس الناظمة للتدفق. يملك برنامج الـ ANSYS الكثير من الميزات التي تمكننا من حل أي مشكلة في ميكانيك الأوساط المستمرة، بالإضافة إلى ميكانيك الموائع بأنواعها المختلفة (النيوتونية، غير النيوتونية، القابلة للانضغاط وغير القابلة للانضغاط).

منهجية البحث

يقوم هذا البحث على منهجية تحليلية تجريبية في بيئة افتراضية.

فروض البحث

الفرضية الأساسية التي يقوم عليها هذا البحث هي:

- إن زاوية الانحراف تؤثر بشكل كبير على حقل التدفق وتسبب قوى عرضية كبيرة تؤثر على الغواصة.

الشكل التفاضلي للمعادلات الناظمة للجريان

الشكل التفاضلي لمعادلة مصونية الكتلة في الإحداثيات الديكارتية [6]-[11]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

الشكل التفاضلي لمعادلة مصونية كمية الحركة على المحور X [6]-[11]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u^2 + p - \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot u \cdot v - \tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot u \cdot w - \tau_{zx}) - \rho \cdot g_x = 0 \quad (2)$$

الشكل التفاضلي لمعادلة مصونية كمية الحركة على المحور Y [6]-[11]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot v \cdot u - \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot v^2 + p - \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot v \cdot w - \tau_{zy}) - \rho \cdot g_y = 0 \quad (3)$$

الشكل التفاضلي لمعادلة مصونية كمية الحركة على المحور Z [6]-[11]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot w \cdot u - \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot w \cdot v - \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot w^2 + p - \tau_{zz}) - \rho \cdot g_z = 0 \quad (4)$$

حيث أن p هو الضغط، u, v, w هي مركبات السرعة على المحاور الإحداثية الديكارتية x, y, z ، ρ كثافة المائع، g_i مركبات تسارع الجاذبية الأرضية على المحاور الإحداثية الديكارتية، τ_{ij} هو مصفوفة إجهادات رينولدز المضطربة (وهو عبارة عن مصفوفة ثلاثية الأبعاد 3×3 ومتناظرة بالنسبة للقطر الرئيسي) ويمكن كتابته بالشكل التالي:

$$\tau_{ij} = \begin{bmatrix} -\rho \cdot u'_x u'_x & -\rho \cdot u'_x u'_y & -\rho \cdot u'_x u'_z \\ -\rho \cdot u'_x u'_y & -\rho \cdot u'_y u'_y & -\rho \cdot u'_y u'_z \\ -\rho \cdot u'_x u'_z & -\rho \cdot u'_y u'_z & -\rho \cdot u'_z u'_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

حيث أن u'_i هي قيمة تأرجحات السرعة على المحاور الاحداثية الديكارتية. مصفوفة إجهادات رينولدز المضطربة غير معروفة القيمة وتجعل من نظام المعادلات غير مغلق لذلك يجب حسابها، ولهذا الغرض يتم استخدام الموديلات الرياضية لحساب قيمة هذه الاجهادات.

الشكل التكاملي للمعادلات الناظمة للجريان

الشكل التكاملي لمعادلة مصونية الكتلة [6]–[11]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV + \iint_A \rho \vec{u} dA = 0 \quad (6)$$

إن مجموع القوى المؤثرة على حجم المراقبة dV تساوي إلى معدل تغير كمية الحركة خلال الزمن، ولهذا يمكن كتابة معادلة كمية الحركة بالشكل التكاملي كمايلي [6]–[11]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho u_i dV + \int_A \rho u_i u_j dA = - \int_A T_{ij} dA + \int_V \rho f_i dV \quad (7)$$

حيث أن T_{ij} يمثل مصفوفة الإجهادات العامة والتي تعرف طبقاً لفرضية نيوتن كالتالي:

$$T_{ij} = - \left(p + \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \delta_{ij} + 2\mu S_{ij} \quad (8)$$

δ_{ij} هو ثابت كرونكر، S_{ij} مصفوفة الانفعالات وتعطى بالشكل التالي:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

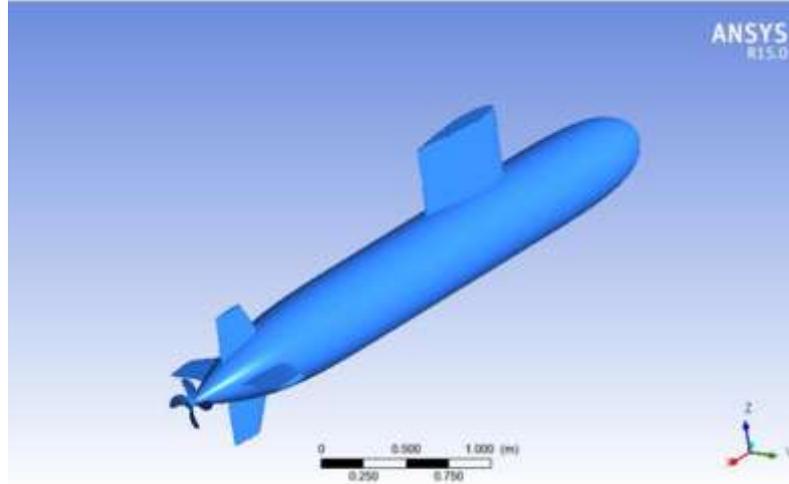
الأبعاد الهندسية والبيئة الرقمية

الجدول 1 والشكل 1 يوضحان الأبعاد الهندسية لكل من الغواصة وملحقاتها، حيث أن قطر نموذج الغواصة المستخدم هو 0.508 م وطولها 4.356 م، في حين أن قطر الرفاص هو 0.322 م وعدد شفراته هو 4 شفرات [1].

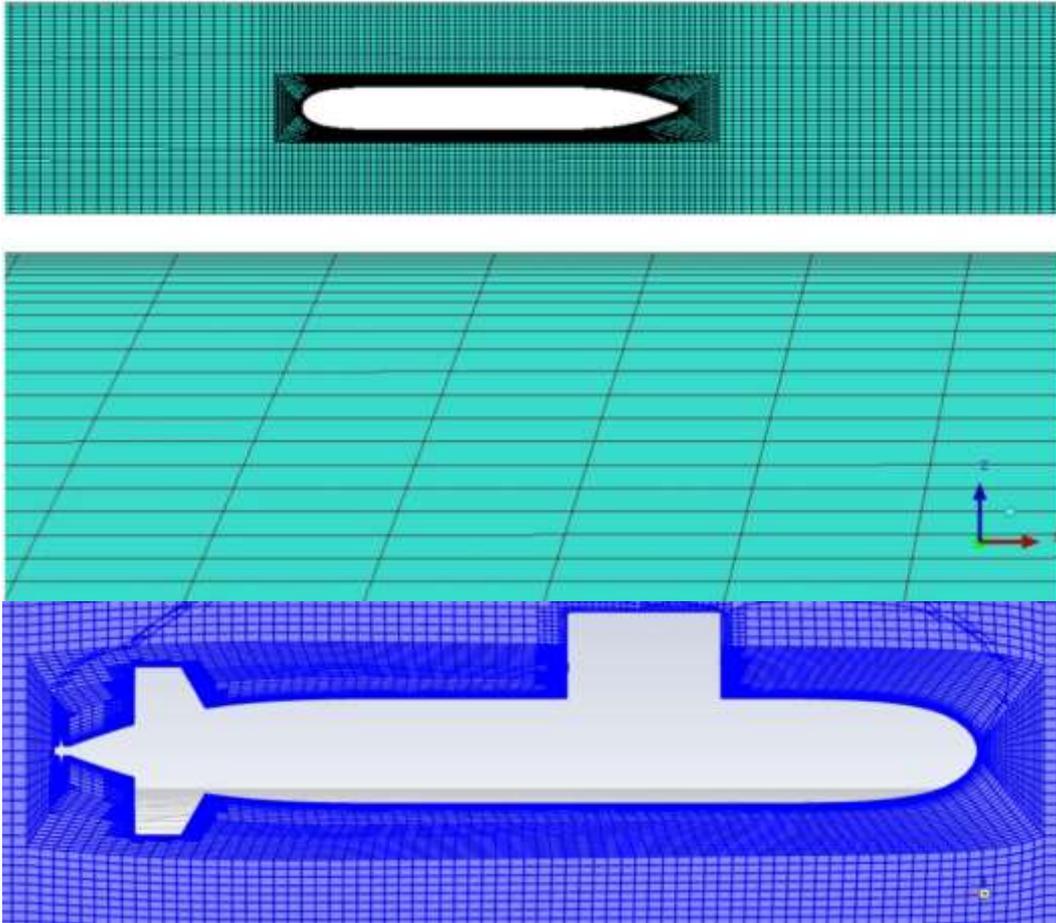
الجدول 1: الأبعاد الهندسية للغواصة والرفاص [1].

DARPA Suboff	
0.508	قطر البدن [m]
4.356	طول البدن [m]
Propeller	
0.322	قطر الرفاص [m]
4	عدد شفرات الرفاص

الشكل 2 يوضح الشبكة الرقمية المنتظمة التي تم استخدامها حول بدن الغواصة وملحقاتها، كما نلاحظ من هذا الشكل التعيم في منطقة الطبقة الحدية بجوار البدن وذلك من أجل حل بروفائل السرعة بالشكل الصحيح. تم استخدام طريقة الـ RANS وموديل الاضطراب $K - \omega SST$ [6]–[11] من أجل حل المعادلات الناظمة للتدفق.



الشكل 1: الأبعاد الهندسية الخاصة بنموذج الغواصة DARPA Suboff مع ملحقاتها [1].



الشكل 2: الشبكة الرقمية المنتظمة التي تم استخدامها حول بدن الغواصة وملحقاتها.

النتائج والمناقشة:

تختلف شروط عمل الرفاص المتواجد خلف بدن الغواصة عن شروط عمل الرفاص الحر. إن وجود البدن يغير شروط تدفق الماء القادم إلى الرفاص، وبالتالي يسبب عمل الرفاص تغير في مقاومة الغواصة. أثناء جريان المائع حول بدن الغواصة من المقدمة (منطقة ضغط مرتفع) إلى القسم الأوسط من البدن (منطقة ضغط منخفض) تزداد السرعة وكذلك الطاقة الحركية حتى يصل المائع إلى المؤخرة (منطقة ضغط مرتفع) فتتخفف سرعته وتصبح الجزيئات غير قادرة على الولوج في منطقة الضغط المرتفع فتتوقف عن الحركة نتيجة لذلك يحدث انعكاس في حركة جزيئات الماء القادمة من المقدمة كما يحدث انفصال الطبقة الحدية وتنشأ دوامات تمتص مقدراً كبيراً من الطاقة المأخوذة من الضغط وبالتالي تزداد مقاومة الضغط بسبب فرق الضغط بين المقدمة والمؤخرة ووجود الرفاص يسبب هبوط إضافي في الضغط في منطقة عمل الرفاص فتزداد مقاومة الضغط وبالتالي ازدياد المقاومة الكلية للغواصة فيتوجب بذلك على الرفاص أن يزيد من مقدار قوة الدفع ليحقق العمل المرجو منه [12].

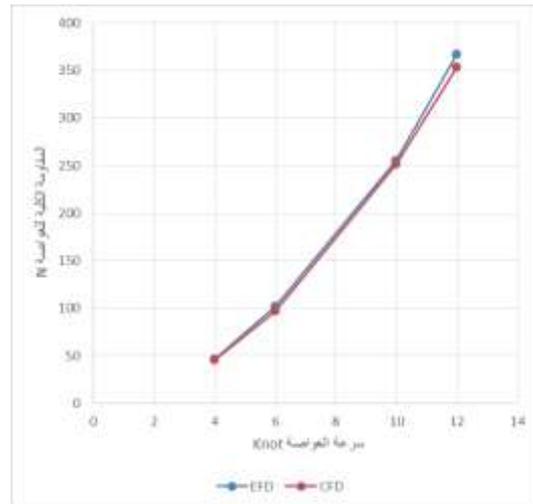
تم في هذا البحث دراسة التأثير المتبادل بين البدن والرفاص في ظروف إبحار مختلفة للغواصة، فقد تم دراسة حقل التدفق حول بدن الغواصة بدون ملحقات أثناء الإبحار إلى الأمام مباشرة (بدون انحراف) وعند زاويتي انحراف (6° و 12°)، حيث تم دراسة تأثير الانحراف على مقاومة الغواصة وحقلي السرعة والضغط وملاحظة كيفية تغير قيم المقاومة عند قيم مختلفة للسرعة. في الجزء الثاني من هذه الدراسة تم دراسة حقل التدفق حول بدن الغواصة بوجود الرفاص (مع وبدون زعانف) أثناء الإبحار إلى الأمام مباشرة وعند زاويتي انحراف (6° و 12°).

تقييم النتائج الرقمية باستخدام CFD

يوضح الجدول 2 مقارنة بين النتائج الرقمية المحسوبة باستخدام CFD والنتائج التجريبية لقيمة المقاومة الكلية للغواصة بدون ملحقات عند قيم مختلفة للسرعة (4, 6, 10, 12) عقدة. بالمقارنة بين النتيجتين الرقمية والتجريبية، يمكننا ملاحظة مقدار التطابق الجيد جداً بين النتائج الرقمية والتجريبية، حيث أن النسبة المئوية للخطأ لم تتجاوز 5% وهذا يؤكد مدى دقة الـ CFD في حساب مقاومة الغواصة.

الجدول 2: النسبة المئوية للخطأ بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية لمقاومة الغواصة بدون ملحقات.

سرعة الغواصة [Knots]	$R_{TCFD} [N]$	$R_{TEFD} [N]$	النسبة المئوية للخطأ %
4	45.535	46.36812	1.80%
6	96.85	101.8422	4.90%
10	251.046	255.1821	1.62%
12	352.853	366.3526	3.68%



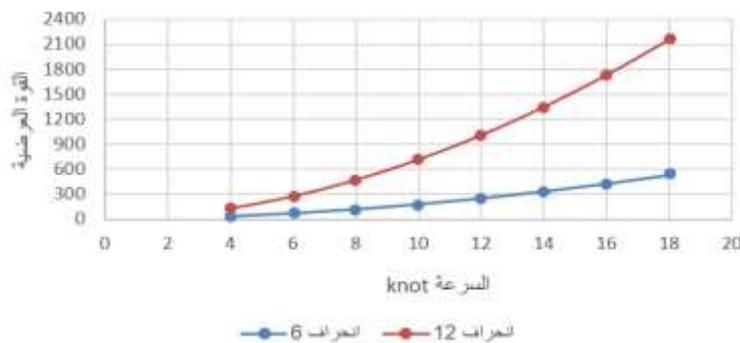
الشكل 3: مقارنة بين النتائج الرقمية والتجريبية للمقاومة الكلية للغواصة بدون ملحقات.

تأثير الانحراف على مقاومة الغواصة

إن أحد أهم أهداف البحث هو دراسة حالة الغواصة والرفاص أثناء الإبحار بزوايا انحراف مختلفة، وذلك لمعرفة خصائص التدفق حول بدن الغواصة في هذه الحالة. يعرض الجدول 3 النتائج الرقمية لمقاومة غواصة لوحدها بدون ملحقات عند زوايا انحراف مختلفة (6° و 12°). من هذه النتائج نلاحظ أنه عند زيادة الانحراف فإن المقاومة الطولية على المحور X لا تتغير كثيرا، إلا أن المقاومة العرضية على المحور Y تزداد بشكل كبير، انظر أيضا الشكل 4، وهذا يؤكد أنه مع زيادة زاوية دوران الغواصة تزداد القوى العرضية بشكل كبير، والذي يؤدي حتما إلى زيادة عزوم الدوران التي تؤثر على الغواصة.

الجدول 3: قيم مقاومة الغواصة (بدون ملحقات) بمركباتها الطولية والعرضية عند زاويتي انحراف $\beta = 6^\circ$ و $\beta = 12^\circ$ وقيم مختلفة للسرعة.

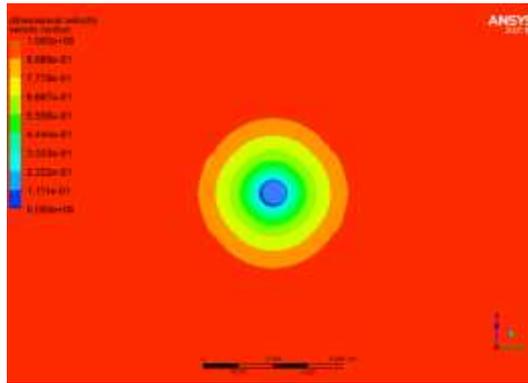
V [Knots]	$F_x [N], \beta = 6^\circ$	$F_y [N], \beta = 6^\circ$	$F_x [N], \beta = 12^\circ$	$F_y [N], \beta = 12^\circ$
4	46.846	32.148	47.893	128.598
6	99.643	68.542	101.309	275.076
8	170.351	117.255	172.556	472.05
10	258.342	178.127	260.935	717.93
12	363.156	250.598	365.973	1011.686
14	484.465	334.619	487.296	1352.003
16	621.949	429.568	624.574	1738.305
18	774.154	535.34	776.313	2166.322



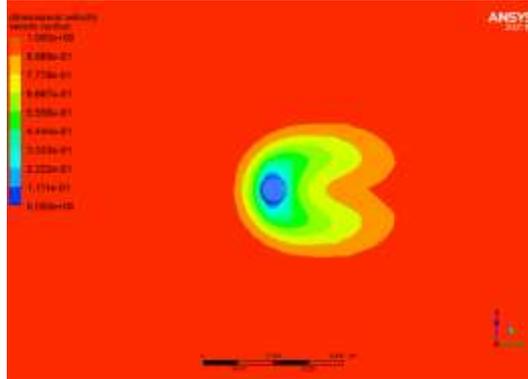
الشكل 4: تأثير الانحراف على القوة العرضية.

تأثير زاوية الانحراف على حقل السرعة في مستوي الرفاص

يعرض كل من الشكل 5 والشكل 6 حقل السرعة في مستوي الرفاص خلف بدن الغواصة مع وبدون زاوية انحراف. من هذين الشكلين نلاحظ أنه مع وجود زاوية انحراف للغواصة يزداد عدم التجانس في حقل التدفق في مستوي الرفاص وهذا يؤدي إلى زيادة في تأرجح الأحمال التي يتعرض لها الرفاص وبالتالي زيادة الاهتزازات في الرفاص والتي تنتقل بدورها إلى بدن الغواصة. كما نلاحظ من هذين الشكلين أنه مع بدء انحراف الغواصة يسيطر أثر المخر المتشكل خلف بدن الغواصة في جهة واحدة خلف البدن، في حين يقل تأثيره وبشكل كبير في الجهة الأخرى حيث يسيطر التدفق الحر، كل هذه الظروف تؤدي إلى وجود حقل تدفق مضطرب وغير متجانس والذي يؤدي حتماً إلى اهتزازات في كل من الرفاص والغواصة.

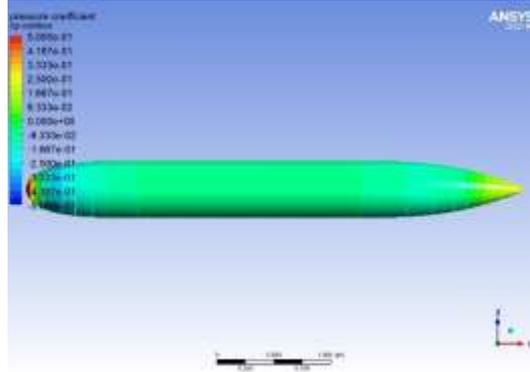


الشكل 5: حقل السرعة في مستوي الرفاص أثناء الإبحار بدون أية زاوية انحراف.

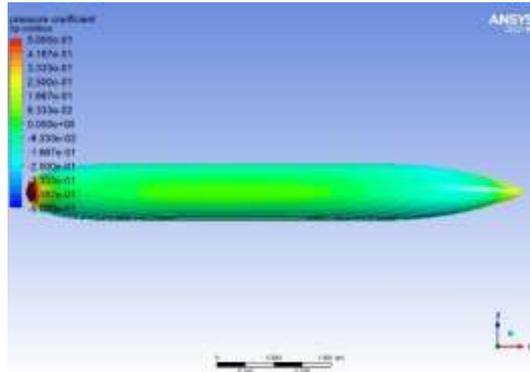
الشكل 6: حقل السرعة في مستوي الرفاص بوجود زاوية انحراف للغواصة بمقدار $\beta = 6^\circ$.

تأثير الانحراف على حقل الضغط على سطح الغواصة

يوضح الشكل 7 والشكل 8 توزيع معامل الضغط على سطح الغواصة مع وبدون زاوية انحراف، من هذين الشكلين يمكننا ملاحظة أنه بوجود الانحراف يزداد الضغط عند مقدمة الغواصة والجزء الأوسط من البدن من جهة الانحراف (جهة الصدم). التفسير الفيزيائي لذلك هو أنه بوجود الانحراف يزداد اصطدام المائع في بدن الغواصة في منطقتي المقدمة والقسم الأوسط من البدن فيحدث هبوط فجائي للسرعة والذي يؤدي تبعاً لبرنولي إلى زيادة في الضغط المحلي، هذا الاختلاف في الضغط على جانبي الغواصة يؤدي إلى تشكل عدم تناظر في توزيع القوى الجانبية المؤثرة على بدن الغواصة والذي يؤدي بدوره إلى قوى عرضية كبيرة وبالتالي عزم كبيرة تؤثر على بدن الغواصة.



الشكل 7: حقل الضغط عند السرعة 18 عقدة لغواصة بدون ملحقات وبدون انحراف.



الشكل 8: حقل الضغط عند السرعة 18 عقدة لغواصة بدون ملحقات مع $\beta = 12^\circ$.

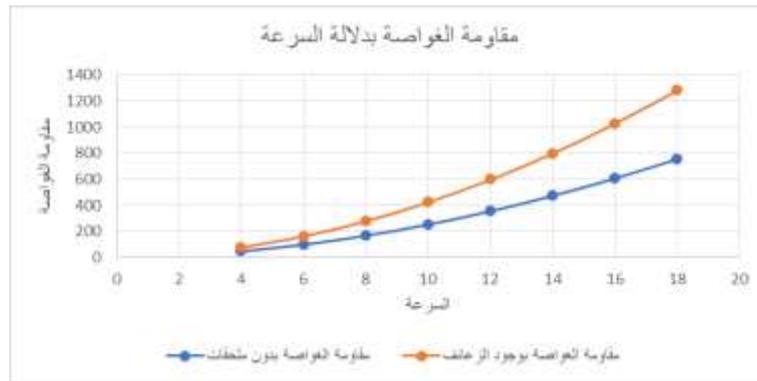
تأثير إضافة الزعانف أثناء الإبحار للأمام مباشرة

تأثير إضافة الزعانف على مقاومة الغواصة عند قيم مختلفة للسرعة

يوضح الجدول 4 مقاومة الغواصة قبل وبعد إضافة الزعانف وذلك عند قيم مختلفة للسرعة. من خلال تحليل هذه النتائج يمكننا ملاحظة أن إضافة الزعانف يؤدي إلى زيادة في مقاومة الغواصة، والتي تزداد قيمتها أيضاً مع زيادة السرعة. يعود السبب في ذلك إلى أن إضافة الزعانف يؤدي إلى زيادة مساحة السطح المبلل المعرض للاحتكاك والذي يؤدي بدوره إلى زيادة مقاومة الاحتكاك، بالإضافة إلى زيادة الفرق في الضغط بين المقدمة والمؤخرة والذي يؤدي إلى زيادة مقاومة الضغط، وكلا الحالتين يؤديان إلى زيادة المقاومة الكلية للغواصة.

الجدول 4: قيم مقاومة الغواصة في عدة حالات: بدون ملحقات، مع زعانف عند قيم مختلفة للسرعة.

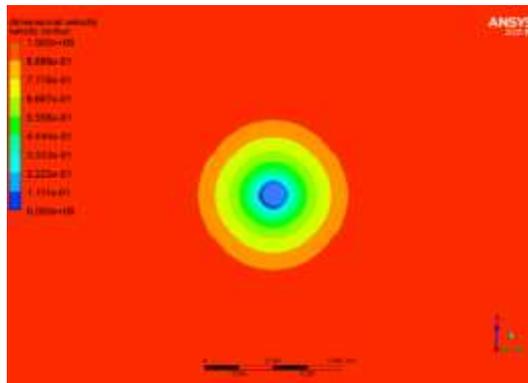
السرعة Knot	مقاومة الغواصة بدون ملحقات [N]	مقاومة الغواصة بعد إضافة الزعانف [N]
4	45.535	75.119
6	96.85	160.773
8	165.561	276.271
10	251.046	420.805
12	352.853	593.758
14	470.655	794.653
16	604.169	1023.116
18	751.959	1276.783



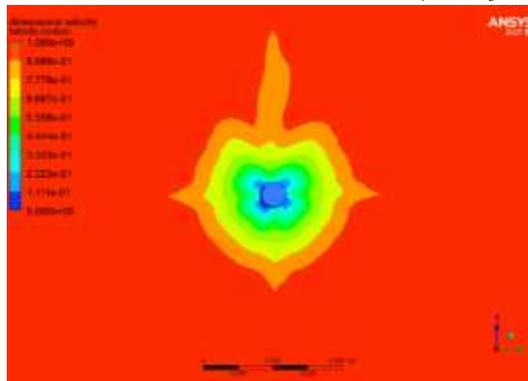
الشكل 9: مقارنة بين قيم مقاومة الغواصة لوحدها ومع وجود زعانف عند قيم مختلفة للسرعة.

تأثير إضافة الزعانف على حقل السرعة في مستوي الرفاص

قمنا بدراسة تأثير الزعانف على حقل السرعة في مستوي الرفاص الموضح في الشكل 11 بالمقارنة مع حقل السرعة في مستوي الرفاص للغواصة لوحدها الموضح في الشكل 10 عند قيمة لسرعة الغواصة 6 عقدة. من خلال مقارنة هذين الشكلين مع بعضهما البعض يمكننا أن نلاحظ أن وجود الزعانف يؤدي إلى تشوه في حقل السرعة في مستوي الرفاص، حيث أن الزعانف تكون عبارة عن جسم يشكل عائق للتدفق والذي يؤدي إلى زيادة في أثر المخر وزيادة في الاضطرابات وعدم التجانس في حقل السرعة في منطقة الرفاص. الشكل 11 يوضح أثر المخر الناتج عن وجود الزعنفة العلوية والزعانف الجانبية.



الشكل 10: حقل السرعة في مستوي الرفاص للغواصة لوحدها بدون ملحقات عند سرعة للغواصة 6 عقدة.



الشكل 11: حقل السرعة في مستوي الرفاص للغواصة مع زعانف عند سرعة للغواصة 6 عقدة.

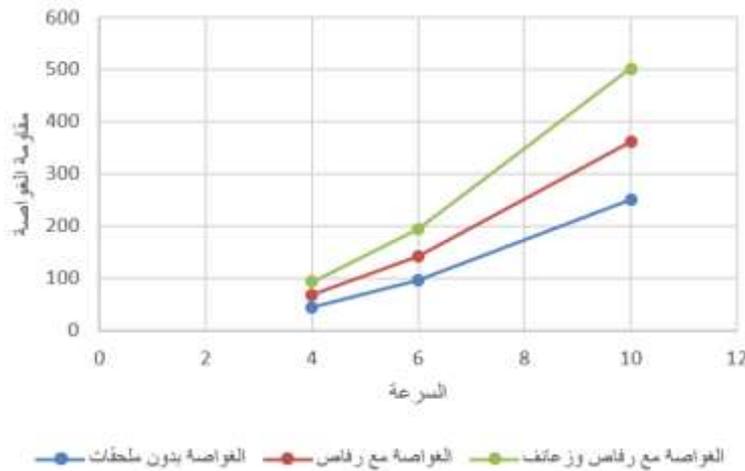
تأثير وجود الرفاص أثناء الإبحار للأمام مباشرة

تأثير الرفاص على مقاومة الغواصة

تم في هذه الحالة دراسة تغير مقاومة الغواصة بوجود الرفاص في حالتين بلا زعانف ومع زعانف عند قيم مختلفة لسرعة الغواصة (4, 6, 10) عقدة وتم اختيار سرعات الدوران المناسبة للرفاص لتحقيق الدفع المطلوب عند كل قيمة لسرعة الغواصة سواء كانت بلا زعانف أو مع زعانف. النتائج الرقمية التي تم الحصول عليها موضحة في الجدول 5 والشكل 12، من خلال تحليل هذه النتائج يمكن ملاحظة أن إضافة الرفاص تؤدي إلى زيادة المقاومة الكلية المؤثرة على الغواصة بالمقارنة مع قيم المقاومة في حال كانت الغواصة بدون ملحقات، وهذه الزيادة تتناسب طردياً مع ازدياد السرعة. التفسير الفيزيائي لهذا الأمر يعود إلى أن وجود الرفاص العامل خلف البدن سيؤدي إلى تسارع التدفق في منطقة المؤخرة بفعل تأثير السحب للرفاص والذي يؤدي تبعاً لبرنولي إلى انخفاض الضغط أكثر في منطقة المؤخرة وهذا سيؤدي حتماً إلى زيادة الفرق في الضغط بين مقدمة ومؤخرة الغواصة وبالتالي زيادة المقاومة الكلية.

الجدول 5: قيم مقاومة الغواصة في عدة حالات: بدون ملحقات، مع رفاص بلا زعانف ومع رفاص وزعانف عند قيم مختلفة للسرعة.

السرعة	مقاومة الغواصة بدون ملحقات [N]	مقاومة الغواصة مع رفاص بلا زعانف [N]	n [rps]	مقاومة الغواصة مع عانف ورفاص [N]	n [rps]
4	45.535	69.019	8.1	92.929	8.3
6	96.85	142.716	11.8	194.187	12.1
10	251.046	361.637	19.2	503.535	19.8

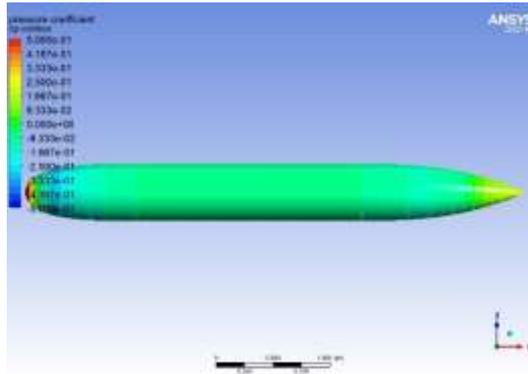


الشكل 12: تغير قيم مقاومة الغواصة مع تغير السرعة في عدة حالات.

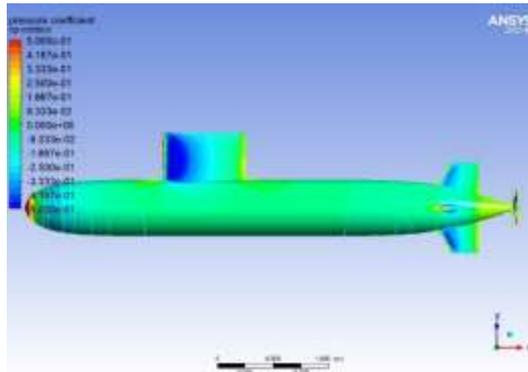
تأثير الرفاص على حقل الضغط على سطح الغواصة

يبين الشكل 13 والشكل 14 مقارنة لحقل الضغط على سطح الغواصة عند سرعة 4 عقدة وذلك لحالتي الغواصة بدون أية ملحقات، ومن ثم الغواصة مع الملحقات (الزعانف والرفاص). بمقارنة حقل الضغط في الحالتين يمكننا ملاحظة تغير كبير في حقل الضغط على كامل طول الغواصة، والذي يؤدي كما ذكرنا سابقاً إلى زيادة قيمة مقاومة الضغط بسبب زيادة فرق الضغط بين المقدمة (منطقة ضغط مرتفع) والمؤخرة التي يحدث فيها هبوط في الضغط بسبب وجود

الرفاص، وبعد إضافة الزعانف نلاحظ أيضا إبطاء مفاجئ للتيار في منطقة وجود الزعانف وهذا يؤدي إلى تشكل نقاط توقف تؤدي إلى انحراف خطوط التيار (المتوازية سابقاً) قبل إضافة الزعانف، هذا الانحراف يعني زيادة طول الطريق المسلك من قبل جزيئات الماء وبالتالي انخفاض سرعتها، الأمر الذي يتسبب بزيادة الضغط المحلي عند مقدمة الزعانف وعلى امتداد طولها وانخفاض الضغط في المنطقة التي يكون فيها الطريق المسلك من قبل جزيئات الماء قصير بسبب ارتفاع السرعة. هذا الأمر يؤدي إلى تغير كبير في توزيع الضغط على طول بدن الغواصة، كما يؤدي إلى عدم الانسيابية في حقل الضغط (حالة الغواصة بدون الزعانف) الأمر الذي يؤدي إلى وجود زيادة إضافية في مقاومة الضغط.



الشكل 13: حقل الضغط عند السرعة 4 عقدة لغواصة بدون ملحقات.



الشكل 14: حقل الضغط عند السرعة 4 عقدة لغواصة بعد إضافة الرفاص والزعانف.

تأثير الانحراف على مقاومة الغواصة بوجود الرفاص

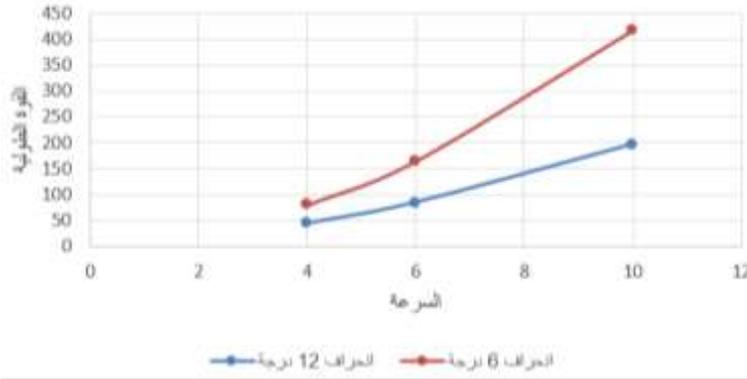
يعرض الجدول 6 والجدول 7 تغير قيم مركبات المقاومة للغواصة مع رفاص وزاوية انحراف لحالتي الغواصة بدون زعانف والغواصة مع زعانف. النتائج الموضحة في هذه الجداول تم أيضا عرضها على شكل مخططات كما في الشكل 15 والشكل 16 وذلك لتوضيح الفرق بين الحالتين بشكل أكبر. من خلال هذه المخططات والجداول وبالمقارنة مع الجدول 3 يمكننا ملاحظة أن وجود الرفاص يؤدي إلى زيادة في قيم القوى الطولية والعرضية المؤثرة على الغواصة وأن إضافة الزعانف يؤدي أيضا إلى زيادة إضافية في قيمة هذه القوى، والزيادة في قيمة القوى تزداد مع زيادة السرعة في كلتا الحالتين.

الجدول 6: تغير قيم مركبات المقاومة لغواصة مع رفاص بدون زعانف عند $\beta = 12^\circ$ و $\beta = 6^\circ$ وقيم مختلفة للسرعة.

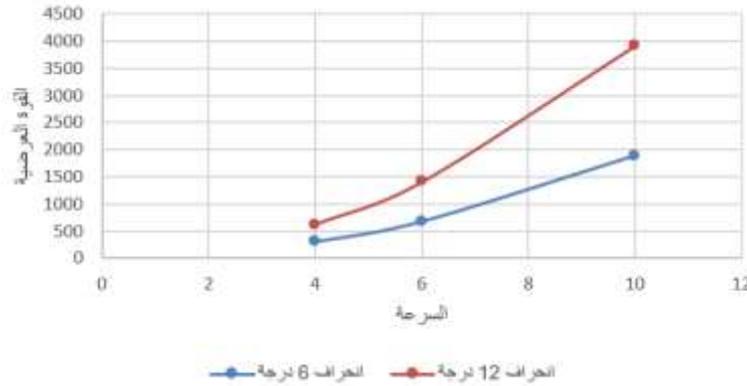
V [Knots]	$F_x [N], \beta = 6^\circ$	$F_y [N], \beta = 6^\circ$	$F_x [N], \beta = 12^\circ$	$F_y [N], \beta = 12^\circ$
4	70.386	35.993	61.712	98.836
6	145.054	80.603	122.493	228.74
10	363.375	228.156	299.014	640.261

الجدول 7: تغير قيم مركبات المقاومة لغواصة مع رفاص وزعانف عند $\beta = 12^\circ$ و $\beta = 6^\circ$ وقيم مختلفة للسرعة.

V [Knots]	$F_x [N], \beta = 6^\circ$	$F_y [N], \beta = 6^\circ$	$F_x [N], \beta = 12^\circ$	$F_y [N], \beta = 12^\circ$
4	79.542	302.078	44.372	627.415
6	164.674	680.061	85.268	1411.948
10	418.002	1887.655	197.618	3917.432



الشكل 15: تأثير الانحراف على مقاومة الغواصة (المركبة الطولية) بوجود الرفاص والزعانف عند زاويتي انحراف $\beta = 12^\circ$ و $\beta = 6^\circ$.



الشكل 16: تأثير الانحراف على مقاومة الغواصة (المركبة العرضية) بوجود الرفاص والزعانف عند زاويتي انحراف $\beta = 12^\circ$ و $\beta = 6^\circ$.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- من خلال هذه الدراسة يمكننا التأكيد على أهمية تقنية ال CFD في حساب التدفقات حول أبدان الغواصات، حيث أنه من خلال هذه التقنية يمكن حساب الكثير من البارامترات الهامة أثناء عملية تصميم الغواصة.
- إن زاوية الانحراف تؤثر بشكل قليل على المقاومة الطولية للغواصة، في حين أنها تؤثر بشكل كبير جداً على المقاومة العرضية للغواصة، حيث أنه كلما زادت زاوية الانحراف كلما زادت المقاومة العرضية المؤثرة على الغواصة.

- إن دراسة حقل التدفق حول بدن الغواصة (وبالأخص في مستوي الرفاص) أمر مهم جدا من أجل معرفة الظروف التي سيعمل بها الرفاص، وبالتالي اختيار الرفاص المناسب لهذه الغواصة.
- اختبار الرفاص خلف بدن الغواصة مع وبدون الزعانف وبظروف إبحار مختلفة يساعد بشكل كبير في تحديد كفاءة الرفاص الذي تم اختياره لهذه الغواصة.

التوصيات:

- يجب أن يتم إجراء مثل هذه الدراسات في المراحل الأولى من التصميم لأن هذا الأمر يساعد بشكل كبير في تفادي المشاكل التي من الممكن أن يواجهها حوض بناء السفن بعد الانتقال إلى مراحل التصميم النهائية.
- يجب دائما أن يتم اختبار الرفاص الذي يتم اختياره في تجربة الماء المفتوح لتحديد خصائصه الهيدروديناميكية ومن ثم خلف بدن المركبة البحرية للتأكد من كفاءته وفعاليتيه مع هذه المركبة.

References:

- [1] N. Chase, "Simulations of the DARPA Suboff submarine including self-propulsion with the E1619 propeller," University of Iowa, 2012.
- [2] G. Vaz, S. Toxopeus, and S. Holmes, "Calculation of Manoeuvring Forces on Submarines Using Two Viscous-Flow Solvers," in *29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering: Volume 6*, 2010, vol. 6, pp. 621–633, doi: 10.1115/OMAE2010-20373.
- [3] C. Delen, S. Sezen, and S. Bal, "Computational Investigation of Self Propulsion Performance of Darpa Suboff Vehicle," *Tamap J. Eng.*, vol. 2017, no. 4, 2017.
- [4] S. Sezen, A. Dogrul, C. Delen, and S. Bal, "Investigation of self-propulsion of DARPA Suboff by RANS method," *Ocean Eng.*, 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.12.051.
- [5] R. Doyle, T. L. Jeans, A. G. L. Holloway, and D. Fieger, "URANS simulations of an axisymmetric submarine hull undergoing dynamic sway," *Ocean Eng.*, 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.11.019.
- [6] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA J.*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, Aug. 1994, doi: 10.2514/3.12149.
- [7] F. R. Menter, "Zonal two equation κ - ω turbulence models for aerodynamic flows," in *AIAA 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference*, 1993.
- [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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] M. Barbahan, *Ships Hydrodynamic /I/*. Directorate of books and publications, Tishreen University, 2008.