

## CFD Study of the Hull-propeller Interaction in Marine Vehicles under Different Sailing Conditions

Dr. Nawar Abbas\*

(Received 31 / 10 / 2023. Accepted 11 / 12 / 2023)

### □ ABSTRACT □

This research used CFD technology to study the hull-propeller interaction of two different types of marine craft under different sailing conditions (with and without drift angle). The study was conducted on a JBC and DARPA Suboff submarine models. Initially, a comparison was made between the numerical and the available experimental results for the total resistance and velocity field to ensure the accuracy of the CFD settings and equations used. The comparison confirmed that there was great agreement between the results. The ship and the submarine were then studied alone without the propeller, aiming to know and analyze the velocity, pressure, and vortex field around the marine craft without the propeller. Then, the propeller was added, and the effect of the presence of the working propeller on the characteristics of the flow field and the formed vortex system was studied. The URANS method and the  $k - \omega$  SST turbulence model were used to solve the Navier Stokes equations within the ANSYS-Fluent program, in addition, the mesh motion feature was used to calculate the interaction between the hull and the propeller.

**Keywords:** JBC, DARPA Suboff, URANS, Propeller-hull interaction, CFD,  $k - \omega$  SST.

**Copyright**



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

---

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

## دراسة التأثير المتبادل بين البدن والرفاص في المركبات البحرية عند ظروف إبحار مختلفة باستخدام تقنية CFD


د. نوار عباس\*

(تاريخ الإيداع 31 / 10 / 2023. قُبل للنشر في 11 / 12 / 2023)

### □ ملخص □

تم في هذا البحث دراسة التأثير المتبادل بين البدن والرفاص لنوعين مختلفتين من المركبات البحرية في ظروف إبحار مختلفة (أثناء الإبحار إلى الأمام مباشرة، ومع زاوية انحراف)، وذلك من خلال استخدام تقنية CFD. تم إجراء الدراسة على نموذج ناقلة الصب JBC ونموذج الغواصة DARPA Suboff. تم في البداية إجراء مقارنة بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية المتوفرة للمقاومة الكلية والدفع وحقل السرعة بهدف التأكد من دقة إعدادات ومعادلات الـ CFD التي تم استخدامها. المقارنة أكدت وجود توافق كبير بين النتائج. تم بعدها دراسة كل من السفينة والغواصة لوحدهما بدون الرفاص بهدف معرفة وتحليل كل من حقل السرعة، الضغط والدوامات بغياب الرفاص، ليتم بعدها إضافة الرفاص ودراسة تأثير وجود الرفاص العامل على خصائص حقل التدفق ونظام الدوامات المتشكل. لقد تم استخدام طريقة الـ URANS والموديل الرياضي  $k - \omega$  SST لحل معادلات نافيه ستوكس ضمن برنامج الـ ANSYS-Fluent. بالإضافة إلى استخدام خاصية الشبكة الديناميكية لحساب التأثير المتبادل بين البدن والرفاص.

الكلمات المفتاحية: ناقلة الصب JBC، الغواصة DARPA Suboff، URANS، CFD- ميكانيك الموائع الحسابية،  $k - \omega$  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](mailto:dr.nawarnabilabbas@tishreen.edu.sy)

**مقدمة:**

أحد أهم المشاكل التي تواجه المهندسين البحريين هي تحديد خصائص التدفق في أثر المخر لما له من تأثير مهم على أداء المركبة البحرية. من جهة فإن المخر مسؤول عن تخفيض سرعة التدفق في قرص الرفاص مما يؤدي إلى زيادة الدفع وتحسين كفاءة المركبة البحرية بشكل عام، ومن جهة أخرى عدم انتظام حقل السرعة يسبب تأرجح في الدفع الناتج عن الرفاص خلال الزمن مما ينتج عنه اهتزازات قوية في الرفاص والتي تنتقل بدورها إلى بدن المركبة.

تعتبر دراسة التأثير المتبادل بين بدن المركبة البحرية والرفاص 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 للمركبة والرفاص المناسب لها ورفع كفاءتهما. تم اختيار كل من نموذج الغواصة DARPA Suboff ونموذج سفينة الصب JBC نظراً للكمية الكبيرة من البيانات التجريبية المتاحة لهاتين المركبتين. تم استخدام تقنية الـ CFD في برنامج ANSYS-Fluent لتحليل ودراسة التدفق حول بدن هاتين المركبتين مع وبدون وجود الرفاص والملحقات. تم التركيز بشكل أساسي على حقل التدفق ضمن منطقة الطبقة الحدية وتوزيع الضغط على سطح المركبة، والذي يقودنا إلى معرفة تأثير وجود الرفاص على تغير شروط التدفق حول بدن المركبة والتي بدورها تؤدي إلى تغيير قيمة المقاومة. تم في البداية مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية المتوفرة في الدراسات المرجعية، وذلك للتأكد من صحة الحسابات الرقمية.

إن دراسة التأثير المتبادل بين البدن والرفاص أمر ليس بجديد ويعمل الباحثين على دراسته بشكل مستمر للأصناف المختلفة من المركبات البحرية، من أجل معرفة كافة التأثيرات المتبادلة بين البدن والرفاص، وهنا سنقدم بعض من الدراسات المرجعية التي تخص هذا الأمر.

Vaz et al. 2010 قام هذا الباحث وزملاؤه باستخدام تقنية الـ CFD لحساب القوى المؤثرة على البدن وحقل التدفق حول الغواصة DARPA Suboff أثناء عملية المناورة في حالي البدن لوحده والبدن مع الملحقات عند زوايا انحراف مختلفة. تم استخدام طريقة الـ RANS في البرنامج MARIN لحل معادلات نافيه ستوكس. تم دراسة تأثير نوع الموديل الرياضي المستخدم في طريقة الـ RANS على النتائج، كما وتم أيضاً دراسة تأثير الملحقات على كل من القوى وحقل التدفق المتشكل حول البدن. النتائج الرقمية التي تم الحصول عليها تمت مقارنتها مع النتائج التجريبية والتي حققت توافق جيد جداً [1].

Chase et al. 2012 استخدمت تقنية الـ CFD لدراسة التأثير المتبادل بين بدن الغواصة DARPA Suboff والرفاص E1619. تم إجراء الحسابات لحالي 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 لحالي البدن والرفاص سوياً. تم استخدام أربع شبكات حسابية مختلفة وثلاثة خطوات زمنية من أجل دراسة تأثير نوع الشبكة الحسابية على النتيجة الرقمية. استخدمت طريقة الـ URANS وطريقة الـ Hybrid (URANS-LES) لحل معادلات نافيه ستوكس. بينت المقارنة بين النتائج الرقمية أن طريقة الـ URANS 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 هنالك توافق جيد جداً، وهذا بدوره يؤكد جودة تقنية الـ CFD [2].

Kinaki et al. 2013 قام باستخدام طريقة الـ RANS لدراسة السلوك الهيدروديناميكي لرفاص سفينة ( Duisburg Test Case DTC) من خلال إجراء تجربة الرفاص الحر، ومن ثم تم دراسة التأثير المتبادل بين البدن والرفاص وحساب التدفق حول البدن. حيث استخدمت طريقة RANS لحل معادلات نافيه ستوكس وتم حساب مقاومة الاحتكاك. تم إجراء عملية تحقق واستقصاء للنتائج باستخدام النهج المقترح من قبل ITTC57 وتبين أن هنالك توافق جيد جدا [3] .

Delen et al. 2017 تم استخدام 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 جدا مع النتائج التجريبية المتوفرة [4] .

Sezen et al. 2018 تم استخدام تقنية ديناميك الموائع الحسابية (CFD) لدراسة الخصائص الهيدروديناميكية لغواصة (DARPA Suboff) والرفاص E1619. استخدمت 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 المتوفرة وحققت توافقا جيدا [5].

في عام 2020 قام كل من Song وزملائه [6] بدراسة التأثير المتبادل بين بدن سفينة حاويات ( KRISO container ship (KCS) والرفاص ( KP505) في حالة البدن النظيف الأملس والبدن الخشن. حيث أنه وأثناء عمل السفينة في البحر يتراكم الكثير من الحشوف على سطح السفينة وبالتالي زيادة مقاومة السفينة. وعليه تم في هذه الدراسة التركيز على تحليل وتوضيح تأثير خشونة السطح على التأثير المتبادل بين البدن والرفاص، حيث تم حساب كل من الرفاص والسفينة لوحدهما ومع بعضهما البعض مع وبدون خشونة السطح.

### أهمية البحث وأهدافه:

يمكن تلخيص أهمية البحث وأهدافه في الأمور التالية:

- دراسة حقل التدفق (السرعة والضغط) في مستوي الرفاص خلف بدن كل من الغواصة DARPA Suboff والسفينة JBC، والتي تعتبران من أكثر النماذج استخداما، وهذا الأمر يساعد بشكل كبير في معرفة ظروف عمل الرفاص والتنبؤ بأدائه.

- دراسة التأثير المتبادل بين الرفاص والبدن لهاتين المركبتين البحريتين، مع وبدون زوايا انحراف.

### منهجية البحث

- تحليلية تجريبية في بيئة الـ ANSYS الافتراضية.

### طرائق البحث ومواده:

يمكن تلخيص الطرق والمواد التي تم استخدامها في هذا البحث كما يلي:

- النماذج الهندسية للمركبات المدروسة ورفاصاتها، وهي متوفرة على الانترنت.

- تقنية الـ CFD ضمن برنامج الـ ANSYS-Fluent.

- طريقة الـ URANS والموديل الرياضي  $k - \omega$  SST لحل معادلات نافيه ستوكس.

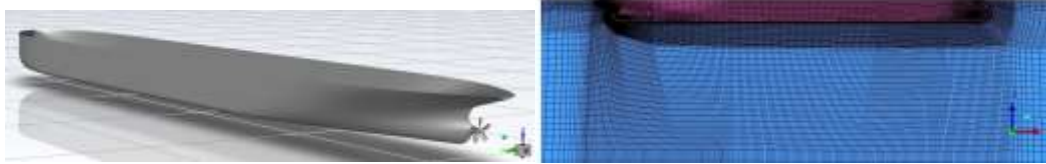
## الأبعاد الهندسية والشبكة الرقمية

الأبعاد الهندسية والشبكة الرقمية للسفينة مع الرفاص الخاص بها موضحة في كل من الجدول 1 والشكل 1، تم استخدام نموذج السفينة بمقياس تصغير  $\frac{1}{40}$ . الأبعاد الهندسية والشبكة الرقمية للغواصة مع الرفاص الخاص بها موضحة في

الجدول 2 والشكل 2، تم استخدام نموذج الغواصة بمقياس تصغير  $\frac{1}{25}$ .

الجدول 1: الأبعاد الهندسية لسفينة الصب JBC.

Item	Symbol	Unit	Model	Full-scale
Length between perpendiculars	$L_{PP}$	m	7	280
Breadth (molded)	B	m	1.125	45
Draft (molded)	d	m	0.4125	16.5
Wetted surface area	$S_w$	m <sup>2</sup>	12.22256	19556.1
Blockage coefficient	$C_B$	-	0.858	0.858
Froude number	$F_r$	-	0.142	0.142
Propeller Diameter	D	m	0.203	8.12
Blades number	N	-	5	5



الشكل 1: نموذج سفينة الصب JBC مع الرفاص MOERI MP687 الخاص بها [7], [8].

الجدول 2: الأبعاد الهندسية لنموذج الغواصة DARPA Suboff

Reynolds number	$1.2 \times 10^7$
Hull Diameter [m]	0.508
Hull Length [m]	4.356
Propeller Diameter [m]	0.322
Blades number [-]	4



الشكل 2: نموذج الغواصة DARPA Suboff مع المرفقات [2].

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

## تقييم النتائج الرقمية

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 للمقاومة

إن القيم التجريبية لمقاومة الغواصة لوحدها ذات البدن النظيف عند عدة سرع متوفرة لدينا [2]، وبالتالي يمكن مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية كما يلي، انظر الجدول 3. إن التطابق بين النتائج التجريبية والنتائج التي حصلنا عليها باستخدام تقنية الـ CFD مرضية جداً، حيث أن نسبة الخطأ طفيفة لم تتجاوز 5 %، وذلك من أجل مليون خلية حسابية، مما يدل على دقة النتائج الرقمية التي يمكن الحصول عليها باستخدام برنامج الـ ANSYS-Fluent.

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

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

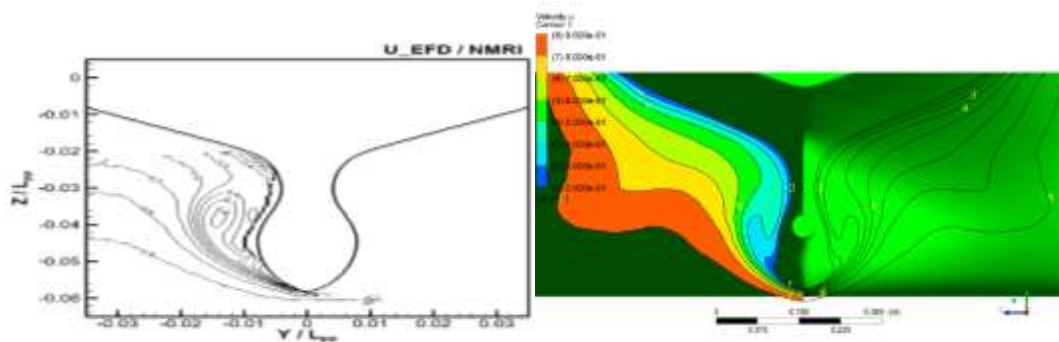
الجدول 4 يبين الاختلاف بين النتيجة الرقمية والقيمة التجريبية [7] لمعامل المقاومة لسفينة الصب JBC. كما هو واضح من هذا الجدول فإن الفرق بين النتيجتين لا يتجاوز الـ 4%، وعلى اعتبار أن عدد الخلايا الذي تم استخدامه أيضاً لم يتجاوز المليون خلية، بالتالي يمكننا القول بأن النتيجة الرقمية التي تم الحصول عليها جيدة جداً، وتتطابق بشكل كبير مع النتيجة التجريبية، وهذا يؤكد مدى قدرة الـ CFD في إجراء عمليات النمذجة للتدفقات في الكثير من التطبيقات الهندسية.

الجدول 4: نتائج معامل المقاومة الحسابية والتجريبية

Error	k – $\omega$ SST	Experiment	$C_T \times 10^{-3}$
4%	4.123	4.289	

## تقييم النتائج الرقمية لحقل السرعة في مستوي الرفاص

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 [7]، بالتالي يمكن مقارنة النتائج الرقمية التي تم الحصول عليها مع النتائج التجريبية المتوفرة. يوضح الشكل 3 على سبيل المثال مقارنة النتيجة الرقمية لحقل السرعة للمركبة المحورية u في مكان عمل الرفاص 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 مليون خلية حسابية.



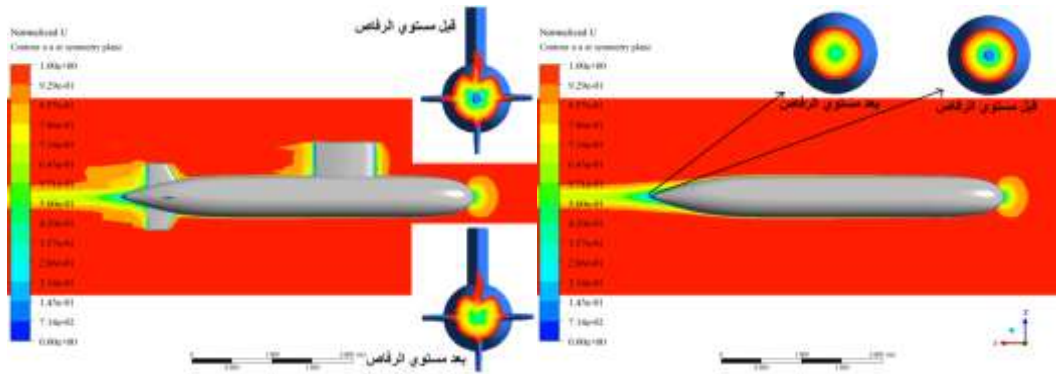
الشكل 3: مقارنة حقل السرعة للمركبة المحورية u في مكان عمل الرفاص، عندما تكون سرعة السفينة 1.18 m/s.

### دراسة التأثير المتبادل بين البدن والرفاص

على الرغم من أن دراسة خصائص التدفق خلف بدن المركبة البحرية، في مستوي عمل الرفاص مهم جدا من أجل اختيار الرفاص المناسب لعمل هذه المركبة، إلا أن وجود الرفاص العامل خلف بدن المركبة يغير من خصائص التدفق بالمقارنة مع حالة المركبة لوحدها بدون الرفاص. وعليه سيتم في البداية إجراء الدراسة على المركبة لوحدها ليتم بعدها إضافة الرفاص ودراسة تأثيره، وذلك أثناء الإبحار إلى الأمام مباشرة (بدون انحراف) وبوجود زاوية الانحراف 12 درجة.

#### حقل السرعة

سنقوم هنا بعرض حقل السرعة اللابعدية<sup>1</sup> قبل وبعد الرفاص من جهتي السحب والضغط لحالة الغواصة لوحدها وبعدها لحالة الغواصة مع الرفاص. الشكل 4 يوضح حقل السرعة قبل وبعد مستوي الرفاص خلف بدن الغواصة (مع وبدون الدفات) عند السرعة 4 عقدة. كما هو واضح من هذا الشكل يمكننا ملاحظة الأمور التالية:

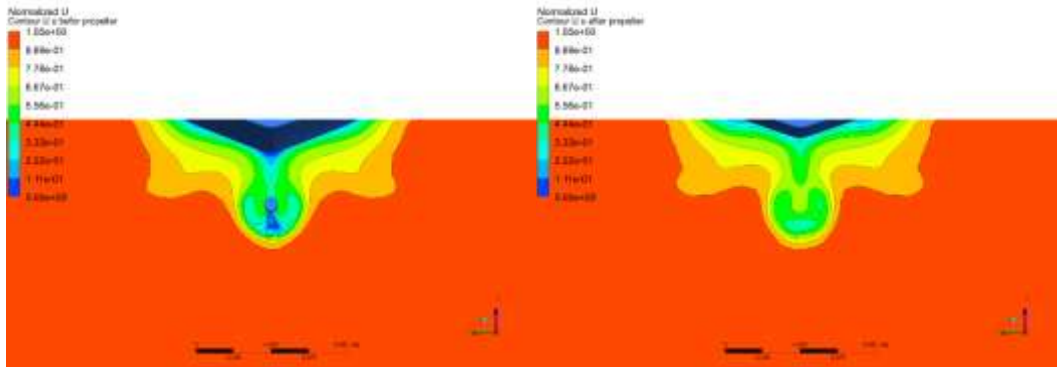


الشكل 4: حقل السرعة اللابعدية قبل وبعد الرفاص خلف الغواصة وفي مستوي التناظر عند السرعة 4 عقدة بدون انحراف.

- حقل السرعة غير ثابت القيمة والسبب في ذلك هو وجود الغواصة الذي يعيق حركة التدفق القادم إلى مستوي الرفاص، بالإضافة إلى أن وجود الغواصة سيؤدي إلى تشكل الطبقة الحدية حول بدن الغواصة وانفصالها في الجزء الأخير من الغواصة وبالتالي سيتشكل أثر المخر خلف البدن والذي يظهر واضحا في الشكل السابق.
- يمكننا أن نلاحظ من هذه الأشكال كيف يتشكل منطقة سرعة منخفضة في منطقة خروج محور الرفاص من الغواصة. كما نلاحظ من هذه الأشكال فإن وجود الغواصة يحول حقل السرعة في مستوي الرفاص إلى حلقات دائرية ذات قيم ثابتة للسرعة، حيث يتدرج من قيمة منخفضة في المركز إلى أن يصل إلى سرعة التدفق الحر بعد قطر معين، وبالتالي فإن الرفاص سيتوضع ضمن هذه الحلقات المتغيرة السرعة.
- الأثر الذيلي للدفات يؤثر على حلقات السرعة ثابتة القيمة في منطقة عمل الرفاص فلا تبقى على شكل حلقات دائرية الشكل.
- تزداد قليلا مساحة المنطقة منخفضة السرعة بجوار محور الرفاص بوجود الدفات.
- بمقارنة الغواصة مع السفينة يمكننا ملاحظة أن الأمر مختلف جداً، ففي حالة سفينة الصب JBC يمكننا ملاحظة حقل السرعة قبل وبعد مستوي الرفاص كما في الشكل 5، من هذا الشكل يمكننا ملاحظة الأمور التالية:
- الرفاص يتوضع بشكل كامل ضمن منطقة المخر خلف بدن الغواصة والسفينة.

<sup>1</sup> السرعة اللابعدية: هي السرعة المحلية في كل نقطة مقسومة على سرعة المركبة البحرية في الحالة المدروسة، وفي مستوي الرفاص تسمى بحقل المخر الاسمي، nominal wake.

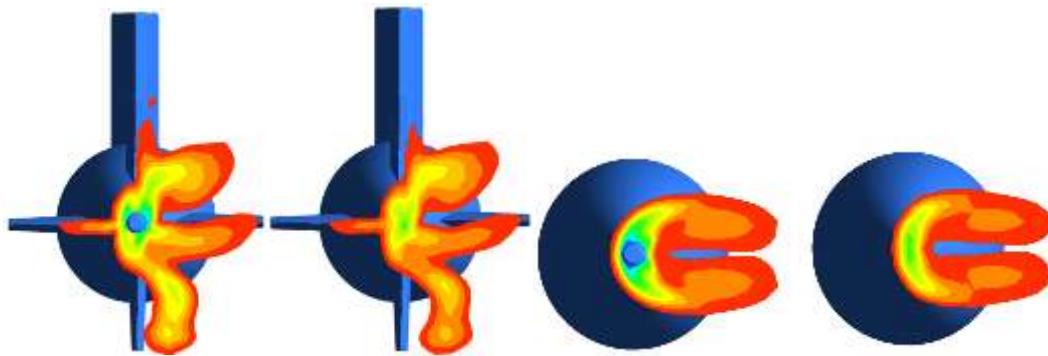
- بالمقارنة مع حالة الغواصة يمكننا ملاحظة أن التدفق ضمن قرص الرفاص في حالة السفينة غير متجانس وليس على شكل حلقات دائرية ذات سرع ثابتة القيمة، ولكن نلاحظ هنا وكما في حالة الغواصة يوجد عند مخرج محور الرفاص انخفاض كبير في حقل السرعة بالمقارنة مع حقل السرعة بعيدا عن المحور، حيث تزداد سرعة التدفق كلما ابتعدنا عن محور الرفاص وصولا إلى منطقة التدفق الحر.



الشكل 5: حقل السرعة اللابعدية قبل وبعد الرفاص خلف نموذج سفينة الصب JBC، بدون انحراف.

الشكل 6 يعرض تأثير زاوية الانحراف 12 درجة على حقل السرعة خلف بدن الغواصة (قبل وبعد مستوي الرفاص) مع وبدون وجود الدفات عند السرعة 4 عقدة. من هذا الشكل يمكننا ملاحظة الأمور التالية:

- إن وجود أية زاوية انحراف للغواصة سيؤدي مباشرة إلى انحراف حقل التدفق خلف الغواصة بحيث يأخذ حقل المخر شكل حرف U (في حال غياب الدفات).
- الانحراف في حقل التدفق سيؤدي إلى عدم تناظر في التدفق على جانبي الرفاص مما يؤدي إلى تغير الأحمال بشكل كبير على شفرات الرفاص، والذي سينعكس على زيادة الاهتزازات في جسم الرفاص والتي تنتقل بدورها إلى بدن الغواصة.
- وجود الدفات سيغير من شكل الحرف U لأثر المخر بفعل الأثر الذيلي للدفات، وهذا سيتسبب كما هو واضح في الأشكال إلى زيادة عدم التجانس وعدم التناظر في حقل السرعة  $\Leftarrow$  زيادة تغير الأحمال وزيادة الاهتزازات.

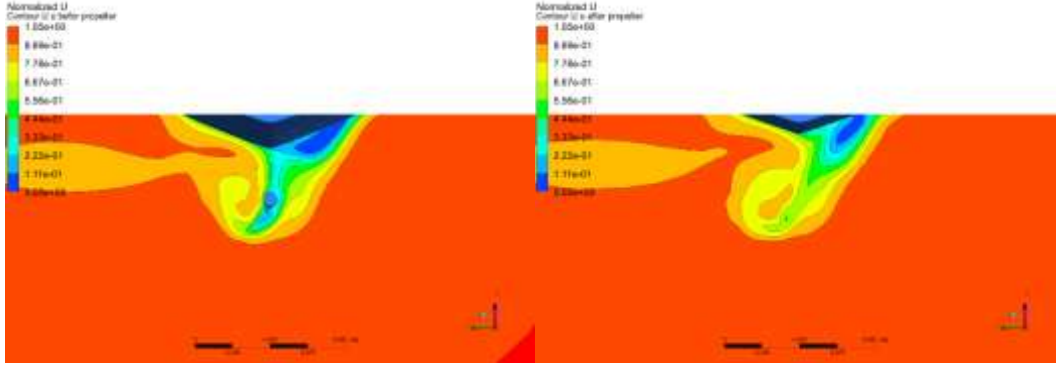


الشكل 6: تأثير زاوية الانحراف (12 درجة) على حقل السرعة قبل وبعد مستوي الرفاص لحالة الغواصة بدون ومع الدفات.

في حالة السفينة فإن الأمر مختلف، الشكل 7 يوضح حقل السرعة اللابعدية خلف بدن سفينة الصب في المستويين قبل وبعد مستوي الرفاص بوجود زاوية انحراف 12 درجة، ومن هذا الشكل يمكننا ملاحظة التالي:

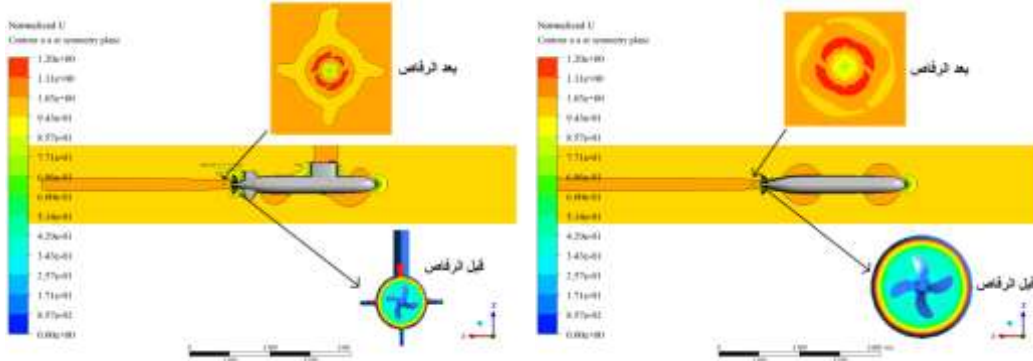


- كما في حالة الغواصة فإنه مع انحراف السفينة يصبح حقل السرعة في مستوي الرفاص غير متناظر ويزداد عدم التجانس، وهذا الأمر سيؤدي بشكل حتمي إلى اهتزازات في بدن الرفاص بفعل عدم تناظر الحمل على شفرات الرفاص، والتي بدورها ستنتقل إلى بدن السفينة.
- تزداد منطقة حقل المخر عرضيا خلف بدن السفينة مع زيادة زاوية انحراف السفينة ويقل امتدادها كما في حالة الغواصة حيث يسيطر التدفق الحر.



الشكل 7: حقل السرعة اللابعدية في المستوي قبل وبعد الرفاص خلف نموذج سفينة الصب JBC مع زاوية انحراف 12 درجة.

وجود الرفاص العامل خلف البدن سيغير حتما من حقل السرعة خلف البدن والذي سينتج عنه تغير في خصائص التدفق بالمقارنة مع حالة المركبة بمفردها. لقد تم استخدام الرفاص المناسب لكل مركبة من المركبتين، وتم اعتماد عدد الدورات التي يكون عندها الدفع مساوٍ لمقاومة المركبة عند السرعة المدروسة. الشكل 8 يوضح حقل السرعة اللابعدية خلف نموذج الغواصة بوجود الرفاص عند السرعة 4 عقدة، مع وبدون الدفات. كما هو واضح من هذا الشكل يمكننا ملاحظة الأمور التالية:

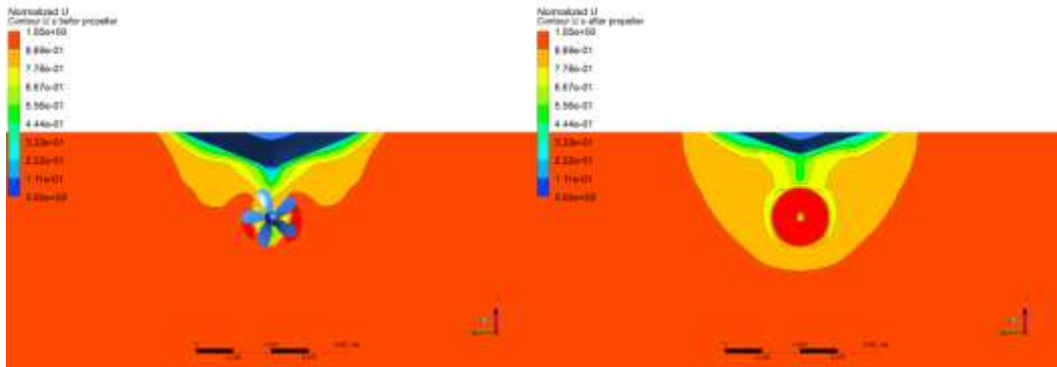


الشكل 8: حقل السرعة اللابعدية خلف الغواصة مع وبدون الدفات، بوجود الرفاص وبدون زاوية انحراف.

- بالمقارنة مع حقل التدفق خلف بدن الغواصة لوحدها بدون الرفاص، نلاحظ انعدام أثر المخر بعد الرفاص، والسبب الأساسي في هذا الأمر أن الرفاص العامل يتسبب في زيادة سرعة التدفق بشكل كبير بعد الرفاص بفعل الدفع الناتج عنه.
- بوجود الرفاص نلاحظ زيادة في منطقة التدفق المنخفض السرعة قبل الرفاص، والسبب الأساسي في هذا الأمر هو الشكل الأنبوبي المتناظر للغواصة، والذي يتسبب في إعاقه سحب التدفق (بفعل تأثير الامتصاص للرفاص) ضمن قطر الغواصة، وبالتالي فإن التدفق الذي يتم سحبه يأتي من جوانب الغواصة حصرا، ولهذا السبب نلاحظ أنه في حالة حقل السرعة قبل الرفاص يزداد قطر منطقة التدفق المنخفض السرعة بشكل كبير بالمقارنة مع حالة الغواصة

لوحدها (بدون الرفاص) ونلاحظ أن قطر التدفق المرتفع السرعة أقل من قطر الغواصة بقليل، حيث يتم سحب التدفق من جوانب قطر الغواصة باتجاه دائرة الرفاص.

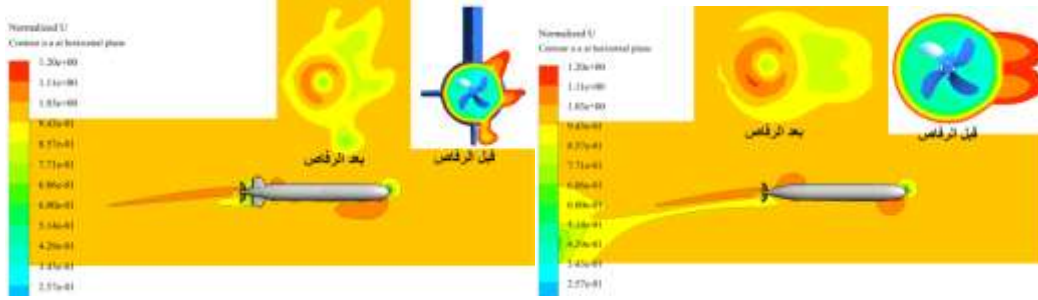
يختلف الأمر في حالة السفينة، حيث أن الدفع الناتج عن الرفاص يؤدي إلى زيادة سرعة التدفق أمام الرفاص ضمن كامل قرص الرفاص، كما أن أثر الامتصاص الناتج عن الرفاص يزيد من سرعة التدفق قبل الرفاص أيضا ضمن كامل قرص الرفاص، حيث تنخفض مساحة منطقة التدفق المنخفض السرعة. الشكل 9 يعرض حقل السرعة قبل وبعد الرفاص لنموذج سفينة الصب JBC بوجود الرفاص العامل وبدون زاوية انحراف للسفينة. من هذا الشكل يمكننا ملاحظة الأمور التالية:



الشكل 9: حقل السرعة الالبعدي خلف سفينة الصب JBC. بوجود الرفاص وبدون زاوية انحراف.

- إن وجود الرفاص يؤدي إلى تسارع في التدفق قبل وبعد الرفاص، وذلك بفعل تأثير كل من الامتصاص والدفع الناتج عن عمل الرفاص، الأمر الذي يؤدي إلى تقليل منطقة التدفق المنخفض السرعة بالمقارنة مع حالة التدفق خلف السفينة بمفردها.
- من ناحية المبدأ هناك تشابه في حقل السرعة أمام الرفاص لكل من السفينة والغواصة، وذلك بسبب تأثير الدفع القوي الناتج عن الرفاص والذي ينتج عنه زيادة في سرعة التدفق.
- مع البدء بانحراف الغواصة بوجود الرفاص، فإن حقل السرعة كما في حالة غياب الرفاص سيتغير بشكل كبير متأثراً بالتغيرات التي تحدث بفعل انحراف الغواصة. وجود الرفاص يغير بشكل أكبر في خصائص حقل التدفق، الشكل 10 يوضح حقل السرعة الالبعدي قبل وبعد الرفاص وفي المستوي الأفقي مع وبدون الدفات بوجود زاوية انحراف 12 درجة عند السرعة 4 عقدة، وكما يتضح من هذا الشكل يمكننا ملاحظة الأمور التالية:
- بالنسبة لحقل التدفق قبل الرفاص، نلاحظ بالمقارنة مع حالة عدم وجود زاوية انحراف أن أثر الخر لا يبقى على شكل دوائر، حيث تبقى منطقة السرعة المنخفضة محصورة ضمن قطر الغواصة، ولكن منطقة السرعة العالية لا تبقى على شكل دائرة ثابتة القطر بل تتحرف باتجاه التدفق.
- وجود الدفات يؤثر على شكل حقل التدفق قبل الرفاص بسبب تأثير الأثر الذيلي للدفات.
- نفس الأمر بالنسبة لحقل التدفق أمام الرفاص، حيث نلاحظ انحراف حقل التدفق، كما ونلاحظ وجود تأثير أكبر لأثر المخر أمام الرفاص بالمقارنة مع الحالات التي لا يوجد فيها انحراف، ويزداد تأثير المخر أمام الرفاص بوجود الدفات.

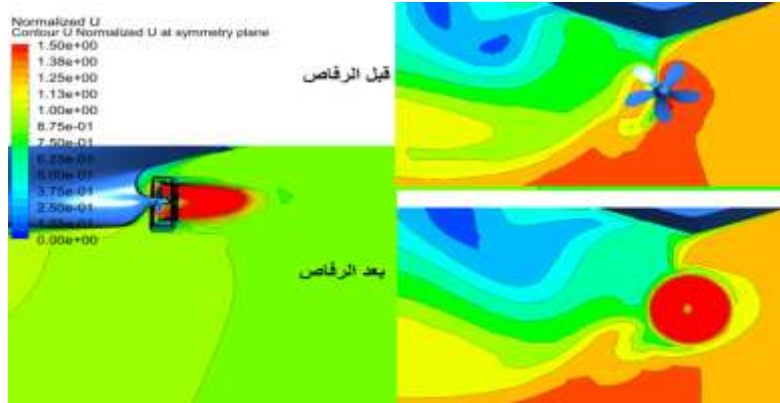
- وجود زاوية الانحراف يقلل من امتداد تأثير الدفع على حقل السرعة الناتج عن الرفاص، حيث يسيطر التدفق الحر ويقل امتداد منطقة السرعة العالية أمام الرفاص، يمكن ملاحظة هذا الأمر من خلال توزيع السرعة في المستوي الأفقي.



الشكل 10: حقل السرعة اللابعدية خلف الغواصة بوجود الرفاص ومع زاوية انحراف 12 درجة.

- في حالة السفينة فإن وجود زاوية الانحراف بوجود الرفاص أيضا يؤثر بشكل كبير على حقل السرعة. الشكل 11 يوضح حقل السرعة خلف نموذج سفينة الصب JBC بوجود الرفاص وعند زاوية انحراف قدرها 12 درجة، من هذا الشكل يمكننا ملاحظة الأمور التالية:

- كما في حالة السفينة والرفاص بدون زاوية انحراف، نلاحظ هنا أيضا أن منطقة التدفق المنخفض السرعة ضمن دائرة قرص الرفاص تقل، حيث تزداد سرعة التدفق نتيجة عمل الرفاص، ولكن بشكل غير متناظر على جانبي الرفاص، الأمر الذي ينتج عنه ازدياد في الاهتزازات في بدن الرفاص.

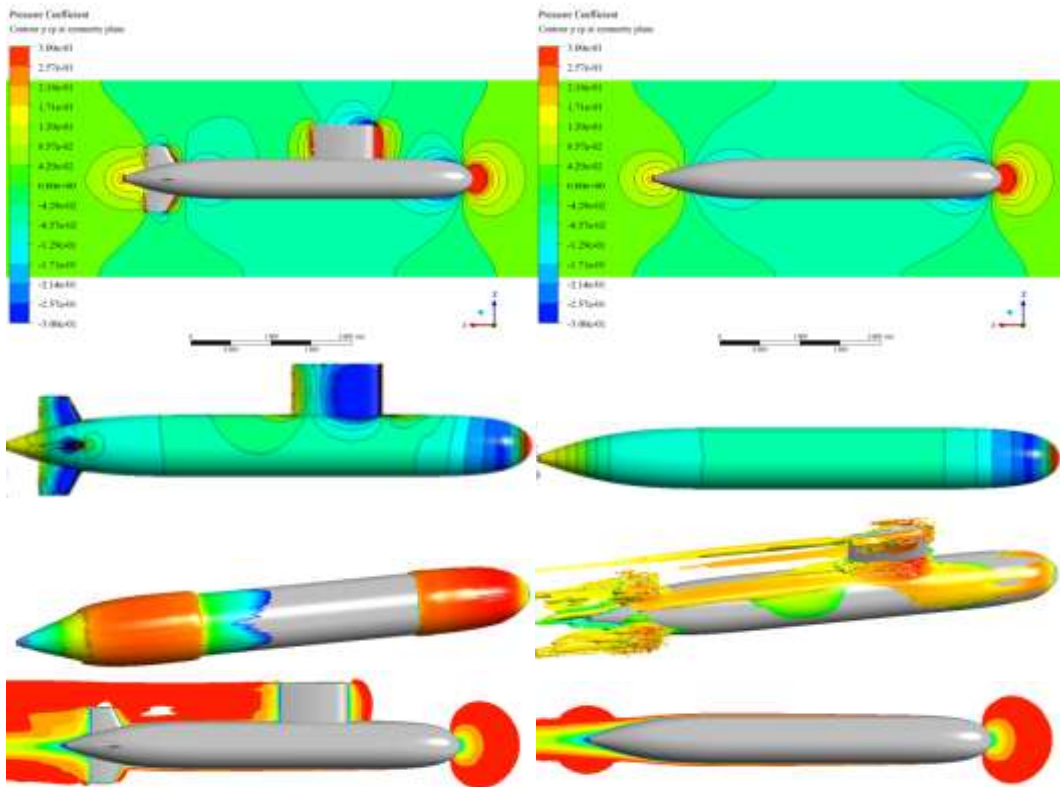


الشكل 11: حقل السرعة اللابعدية خلف سفينة الصب JBC بوجود الرفاص ومع زاوية انحراف 12 درجة.

- يزداد أثر المخر على يسار السفينة بشكل كبير بالمقارنة مع حالة الغواصة، والسبب الأساسي في هذا الأمر هو تأثير السطح الحر الناتج عن الغمر الجزئي للسفينة بالمقارنة مع الغواصة التي تكون مغمورة بشكل كلي، بالإضافة إلى تأثير الشكل، حيث أن شكل الغواصة الأنبوبي يقلل من تأثير المخر بشكل كبير بسبب الانسيابية الكبيرة في البدن.
- أيضا كما في حالة الغواصة فإن امتداد حقل السرعة المرتفعة أمام الرفاص يقل بشكل كبير ويسيطر التدفق الحر، وهذا واضح من خلال حقل السرعة في مستوي التناظر.

#### حقل الضغط والدوامات

- عند وجود الغواصة فإن حقل الضغط قبل الرفاص لن يكون متجانس بسبب أن وجود الغواصة يعمل كعائق قبل الرفاص. الشكل 12 يعرض توزيع معامل الضغط في مستوي التناظر وعلى سطح الغواصة بدون ومع الدفات، بدون الرفاص وبدون زاوية انحراف، عند السرعة 4 عقدة. من هذا الشكل يمكننا ملاحظة الأمور التالية:

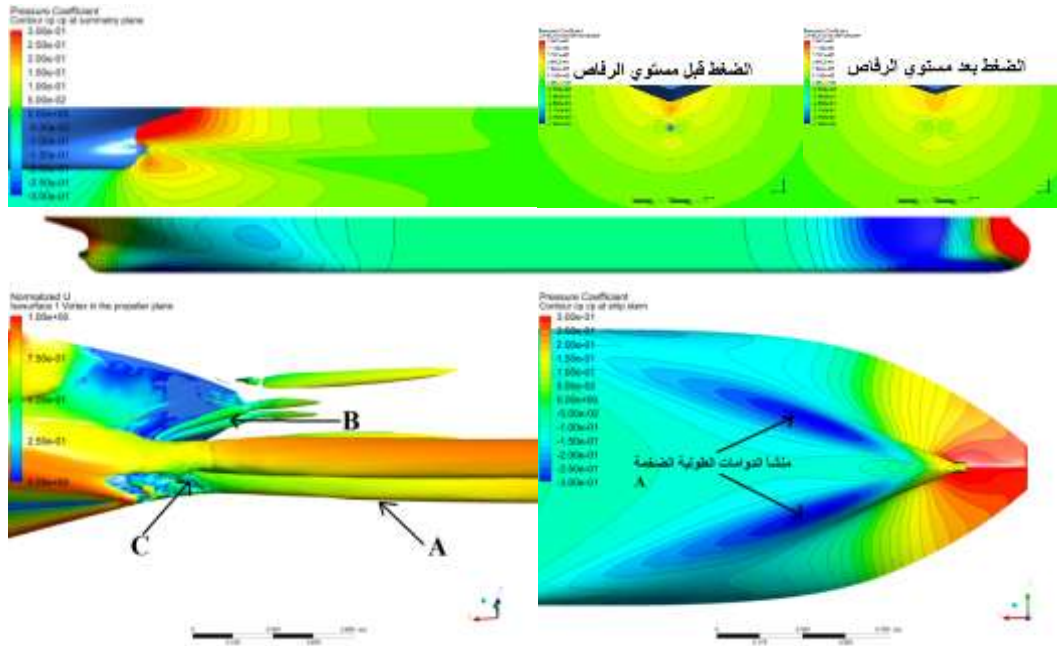


الشكل 12: توزع معامل الضغط والدوامات والطبقة الحدية حول بدن الغواصة DARPA بدون الرفاص وبدون زاوية انحراف.

- نلاحظ زيادة في الضغط في منطقة المقدمة ومؤخرة، بينما نلاحظ انخفاض في قيمة الضغط على كامل طول البدن، السبب الفيزيائي وراء هذا الأمر هو أنه عند المقدمة وبفعل اصطدام جزيئات المائع ببدن الغواصة فإنها تتوقف عن الحركة، ووفقاً لبرنولي يتسبب ذلك في زيادة الضغط، ولتبدأ بعدها سرعة الجزيئات بالازدياد على كامل بدن الغواصة وهذا يترافق مع انخفاض في قيمة الضغط (وفقاً لبرنولي) ومن ثم مرة أخرى عندما يبدأ تأثير انفصال الطبقة الحدية والذي ينتج عنه انخفاض في سرعة جزيئات المائع ضمن أثر المخر هنا يحدث ازدياد في قيمة الضغط. فكما هو واضح من الصورتين في أسفل الشكل 12، تزداد سماكة الطبقة الحدية كلما انتقلنا باتجاه مؤخرة الغواصة، وعند مؤخرة الغواصة يحدث انفصال في الطبقة الحدية والذي يترافق مع انخفاض سرعة المائع وارتفاع قيمة الضغط المحلي.
- هناك تناظر في حقل الضغط على جانبي مستوي التناظر للغواصة بسبب التناظر التام لبدن الغواصة حول مستوي التناظر.

- إن وجود الدفات لا يؤثر بشكل كبير على حقل الضغط في منطقة عمل الرفاص.
- نلاحظ مع الدفات كما في حالة الغواصة ازدياد في الضغط عند كل من مقدمة ومؤخرة الدفة وانخفاض الضغط على طول الدفة وذلك لنفس الأسباب التي تم شرحها سابقاً، حيث أن دائماً مناطق الصدم ومناطق انفصال الطبقة الحدية هي مناطق ضغط مرتفع، بينما يسود الضغط المنخفض في بقية المناطق.
- الانسيابية الكبيرة في شكل بدن الغواصة يحول دون تشكل دوامات كبيرة أثناء إبحار الغواصة بدون أية زاوية انحراف، وهذا واضح من خلال حقل الدوامات حول البدن لوحدة بدون مرفقات، والموضح في الشكل 12، وكما هو واضح في هذا الشكل فإن وجود الدفات يتسبب في نشوء دوامات إضافية بالمقارنة مع حالة البدن بدون دفات.

بمقارنة النتائج السابقة للغواصة مع توزيع حقل الضغط لحالة السفينة والموضح في الشكل 13 الذي يعرض توزيع معامل الضغط قبل وبعد مستوي الرفاص بالإضافة لتوزيع معامل الضغط في مستوي التناظر.



الشكل 13: توزيع معامل الضغط والدوامات حول نموذج سفينة الصب JBC. وفي مستوي التناظر.

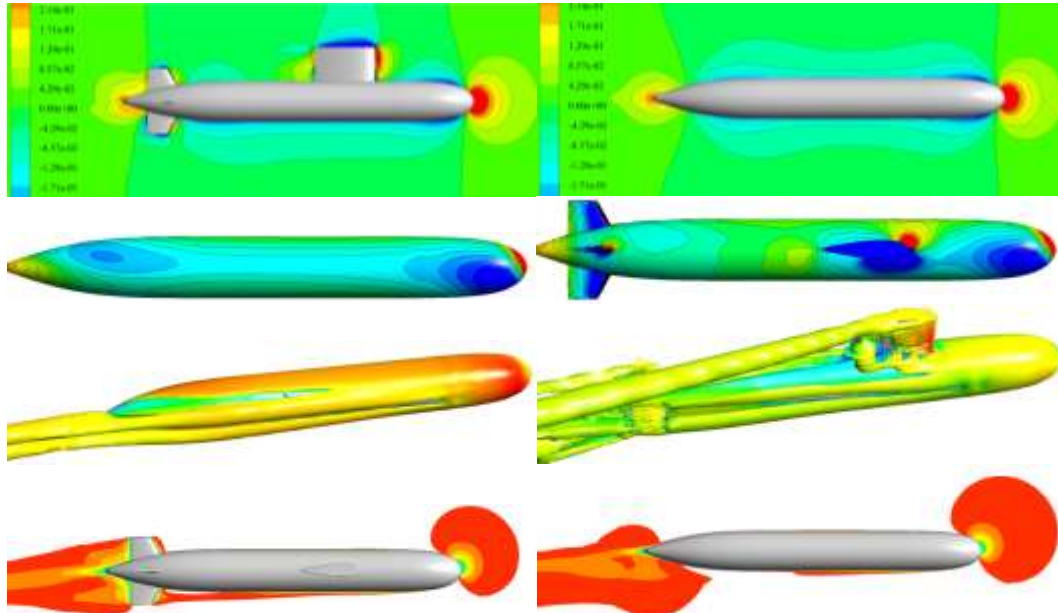
من هذا الشكل يمكننا ملاحظة الأمور التالية:

- نلاحظ أن قيمة الضغط ضمن قرص الرفاص أقل منه من خارجها كما ويمكننا ملاحظة وجود منطقة ضغط منخفض خلف منطقة خروج محور الرفاص، يظهر هذا بشكل واضح في مستوي التناظر، والسبب هنا هو نظام الدوامات المتشكل بفعل انفصال الطبقة الحدية وهو موضح في الشكل 13.
- يوجد منطقة ضغط مرتفع أسفل الجزء العلوي من مؤخرة السفينة، في حين يوجد منطقة ضغط منخفض أسفل قاع السفينة عند منطقة المؤخرة.
- نلاحظ تناظر حقل الضغط على جانبي السفينة بغياب زاوية الانحراف، وكما نلاحظ أيضا (كما في حالة الغواصة) ازدياد الضغط في مناطق الاصطدام ومناطق انفصال الطبقة الحدية وانخفاضه في بقية أجزاء البدن.
- يتشكل خلف بدن سفينة الصب JBC دوامتان طويلتان ضخمتان (A)، بالإضافة إلى دوامتين صغيرتين عند السطح (B)، ودوامتين صغيرتين عند منطقة تركيب محور الرفاص (C). الدوامات التي عند السطح تتأثر بشكل كبير بالسطح الحر وبالأمواج التي تتشكل في أثناء الإبحار. والدوامتان الأكثر أهمية وتأثيرا، هما الدوامتان الضخمتان (A)، وذلك لأنهما يدخلان بشكل مباشر إلى منطقة عمل الرفاص. تتشكل هذه الدوامات الضخمة خلف الجزء الأنوبي من السفن الناقلة (Tankers) وسفن الصب (Bulk Carriers)، وتتسبب من مناطق الضغط السالب أسفل المؤخرة والموضحة في الشكل 13.
- مع بدء انحراف الغواصة فإن توزيع حقل الضغط سيتغير سواء في مستوي الرفاص أو على سطح الغواصة. الشكل 14 يعرض حقل الضغط والدوامات والطبقة الحدية حول بدن الغواصة مع وبدون الدفات ومع زاوية انحراف 12 درجة، من هذا الشكل يمكننا ملاحظة الأمور التالية:

- بشكل مشابه لحالة الغواصة بدون زاوية انحراف فإنه يسود في منطقة المقدمة والمؤخرة ضغط مرتفع، بينما يسود ضغط منخفض على باقي مناطق الغواصة.
- انحراف الضغط الموجب عند المقدمة باتجاه اليسار، لأن الغواصة تنحرف نحو اليسار وبالتالي يصبح الصدم غير متناظر على جانبي مقدمة الغواصة حيث يزداد الصدم من جهة اليسار ويقل من جهة اليمين.
- نلاحظ أيضا ارتفاع في قيمة الضغط على كامل الجانب الأيسر للغواصة، بالإضافة إلى ارتفاع الضغط على جزء من الجانب الأيمن للغواصة. السبب الأساسي وراء زيادة الضغط على الجانب الأيسر هو انحراف الغواصة نحو اليسار مما يجعل من هذا الجانب منطقة صدم مع جزيئات المائع، الأمر الذي يتسبب في انخفاض سرعة هذه الجزيئات والذي يتسبب وفقا لبرنولي في زيادة الضغط. وأما زيادة الضغط على جزء من الجانب الأيمن فيعود سببه إلى زيادة المساحة التي يحدث فيها انفصال الطبقة الحدية من هذا الجانب، كما هو موضح في الشكل 14، الأمر الذي يتسبب أيضا في انخفاض سرعة جزيئات المائع والذي يتسبب في زيادة الضغط المحلي وفقا لبرنولي.
- تناظر في حقل الضغط بالنسبة للمستوي الأفقي المنصف للغواصة بسبب تناظر التدفق من الأعلى والأسفل، وهذا يظهر واضحا من خلال تطابق حقل الضغط على أعلى وأسفل الغواصة في حالة غياب الدفات.
- مناطق الضغط المنخفض عند مقدمة الغواصة ومقدمة الدفات هي مناطق بداية دوامات حيث يبدأ انفصال الطبقة الحدية لمتبعتها ارتفاع في الضغط على ميمنة الغواصة بعد انفصال الطبقة الحدية.
- عدم تناظر حقل الضغط على سطح الغواصة بالنسبة لمستوي التناظر (الميمنة والميسرة) يؤدي إلى زيادة القوى العرضية المؤثرة على الغواصة.
- إن وجود الدفات يتسبب بتغييرات بسيطة في توزيع الضغط ضمن مستوي الرفاص، ولكن لا يؤثر كثيرا على توزيع الضغط ضمن دائرة الرفاص نفسها.
- وجود الدفات يغير من توزيع الضغط على سطح الغواصة حيث يزيد من مناطق الضغط الموجب على سطح الغواصة (يزيد من مناطق الصدم ومناطق انفصال الطبقة الحدية) بالمقارنة مع حالة الغواصة بدون دفات والتي يسيطر فيها الضغط السالب على اغلب امتداد سطح الغواصة.
- بوجود الدفات وزاوية الانحراف يزداد عدم التناظر بين يمين ويسار الغواصة الأمر الذي يتسبب في زيادة قيمة القوى العرضية المؤثرة على الغواصة.
- وجود الدفة العلوية يكون له السبب الأساسي في عدم تناظر حقل الضغط بالنسبة للمستوي الأفقي المار من منتصف الغواصة، حيث تنتهي حالة التناظر بين قمة وقاع الغواصة والتي تمت ملاحظتها في حالة زاوية الانحراف بدون الدفات.
- مناطق بداية تشكل الطبقة الحدية عند مقدمة ويمين الغواصة، ومقدمة ويمين الدفة العلوية والتي تؤدي إلى نشوء ضغط سالب كبيرة يتبعه تدرج موجب للضغط على سطح الغواصة، تكون بداية تشكل دوامات ضخمة تمتد طويلا خلف الغواصة، وهذا موضح في الشكل 14. إن نشوء مثل هذه الدوامات يتطلب طاقة كبيرة يتم سحبها من جسم الغواصة الأمر الذي سينعكس على زيادة مقاومة الغواصة العرضية بشكل كبير.
- وجود زاوية انحراف يؤدي إلى تشكل دوامتين ضخمتين على مقدمة ويمين الغواصة، هاتين الدوامتين يدخلان في قرص الرفاص مباشرة كما سنرى لاحقا وهذا يتسبب في اضطراب في عمل الرفاص.
- وجود الدفات يعقد نظام الدوامات مع وبدون زاوية انحراف، وهذا يعني مقاومة أكبر للغواصة.
- وجود الدفات الخلفية يؤدي إلى تدمير جزء من الدوامتين الجانبيتين الضخمتين اللتان يدخلان في قرص الرفاص.

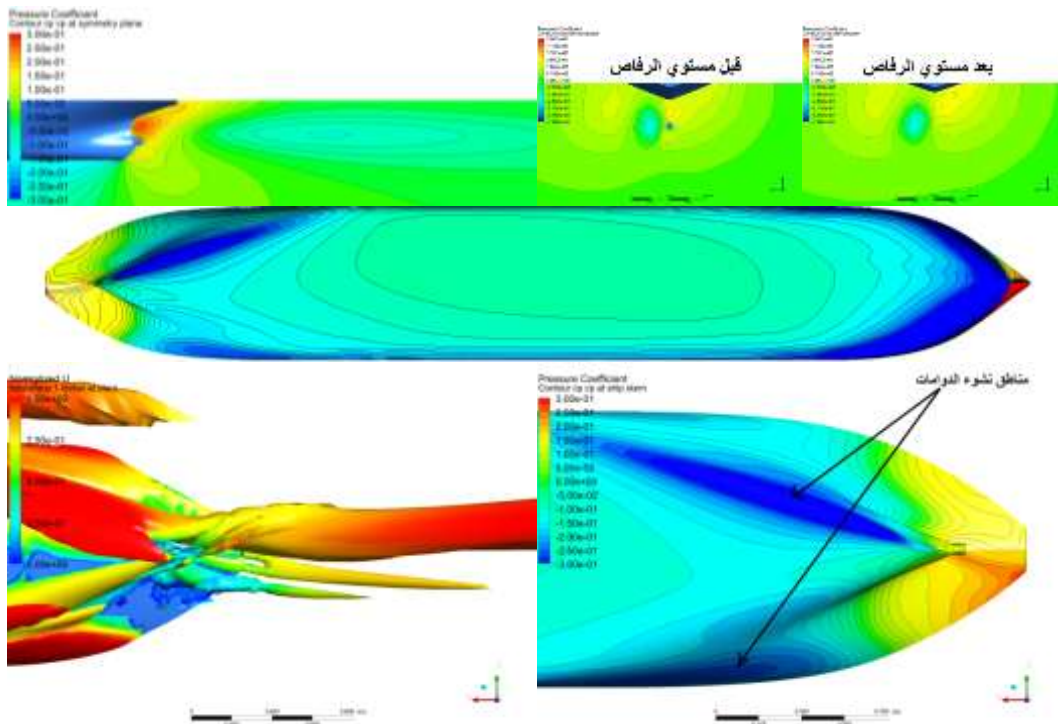


ينتج عن الدفة الأمامية دوامة كبيرة تمتد طويلا خلف الغواصة، وتزداد قوة بوجود زاوية انحراف للغواصة.



الشكل 14: حقل الضغط والدوامات والطبقة الحدية حول الغواصة بوجود زاوية انحراف 12 درجة وبدون الرفاص.

بالعودة إلى السفينة مرة أخرى، فإنه مع بدء حرف السفينة يتغير توزيع الضغط خلف البدن بالمقارنة مع حالة السفينة بدون زاوية انحراف. الشكل 15 يعرض توزيع معامل الضغط خلف بدن سفينة الصب JBC وفي مستوي التناظر مع زاوية انحراف قدرها 12 درجة.

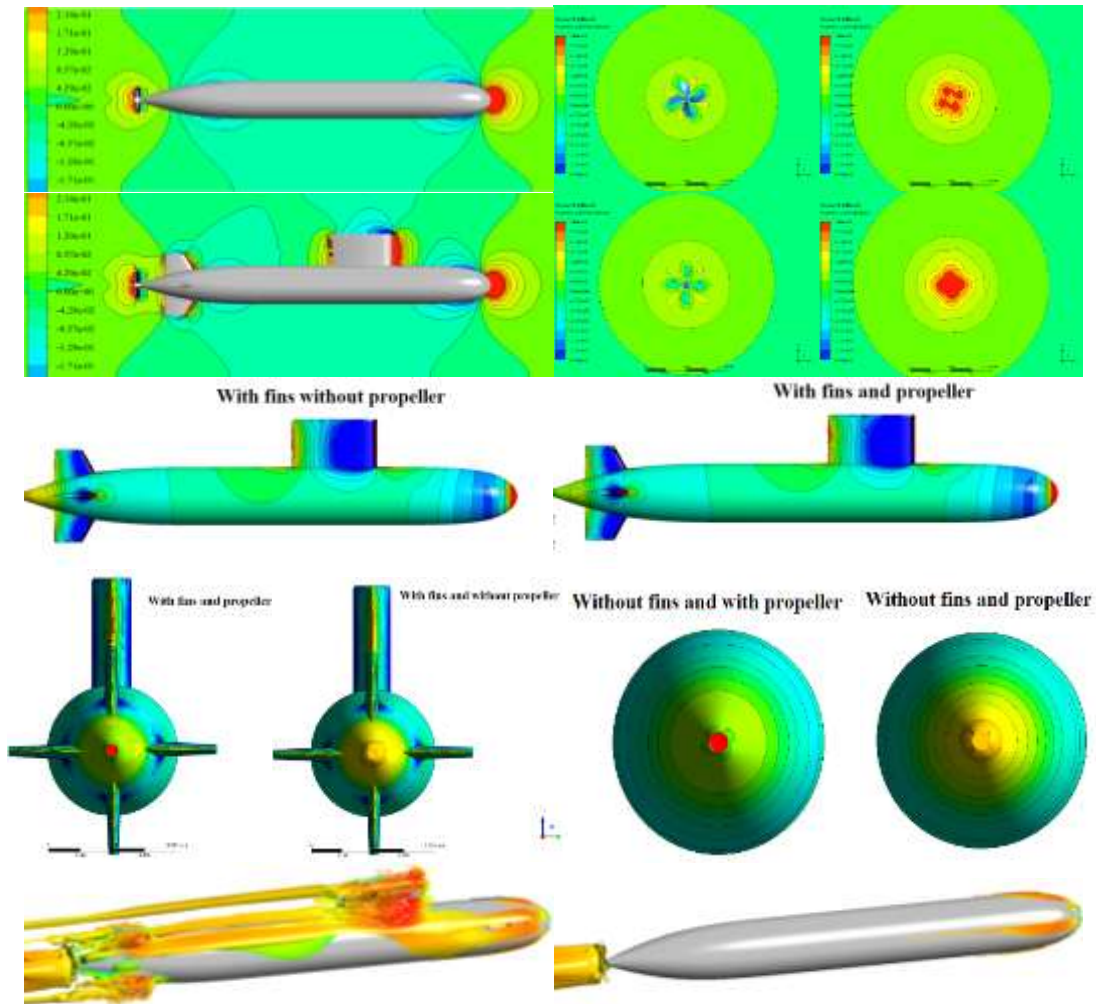


الشكل 15: توزيع الضغط والدوامات حول بدن سفينة الصب JBC وبدون الرفاص ومع زاوية انحراف 12 درجة.

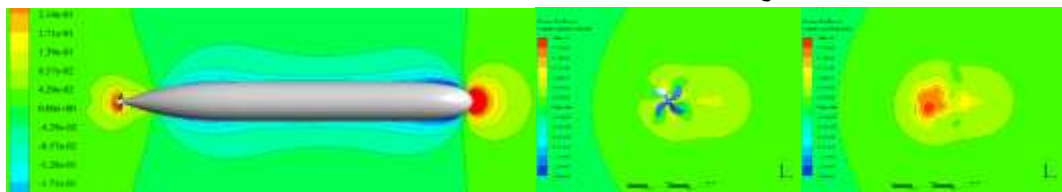
من خلال هذا الشكل يمكننا ملاحظة بعض الأمور المهمة والتي يمكن تلخيصها بالتالي:

– أن وجود زاوية الانحراف يؤدي إلى تغير كبير في توزع وانتظام حقل الضغط قبل وبعد مستوي الرفاص، حيث نلاحظ وجود منطقة ضغط موجب على أحد جوانب الرفاص ومنطقة ضغط سالب على الجهة الأخرى، وهذا يعني أن الرفاص سيعمل في ظروف تدفق مختلفة تماما، الأمر الذي سيؤدي حتما إلى زيادة الاضطرابات في الأحمال التي سيتعرض لها الرفاص.

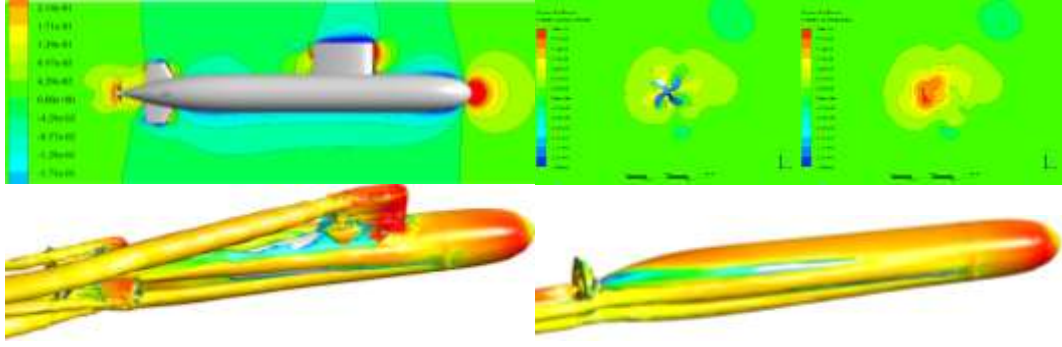
– يتغير توزع الضغط على طول سطح السفينة في حال وجود زاوية الانحراف ويصبح غير متناظر على جانبي السفينة، الأمر الذي سينتج عنه تشكل قوى عرضية كبيرة مؤثرة على السفينة وما ينتج عنها من عزوم دوران. مع وجود الرفاص سيتغير حتما توزع الضغط بفعل التأثير المتبادل بين البدن والرفاص سواء بوجود أو بغياب زاوية الانحراف لكل من الغواصة والسفينة، الشكل 16 والشكل 17 يعرضان حقل الضغط والدوامات حول بدن الغواصة بوجود الرفاص لكل الحالات السابقة التي تمت دراستها (الغواصة بدون الدفات مع وبدون زاوية انحراف، مع الدفات مع وبدون زاوية انحراف) عند السرعة 4 عقدة. من خلال التدقيق في هذه الأشكال مجتمعة يمكننا ملاحظة الأمور التالية:



الشكل 16: توزع الضغط والدوامات حول الغواصة بدون زاوية انحراف وبوجود الرفاص.

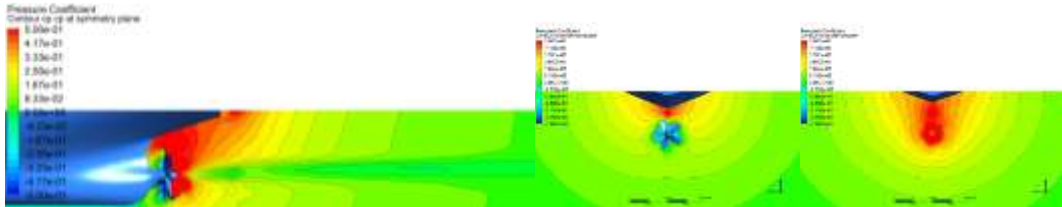


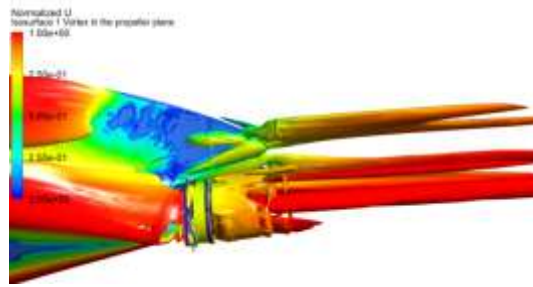




الشكل 17: توزيع الضغط والدوامات حول الغواصة بوجود الرفاص ومع زاوية انحراف 12 درجة.

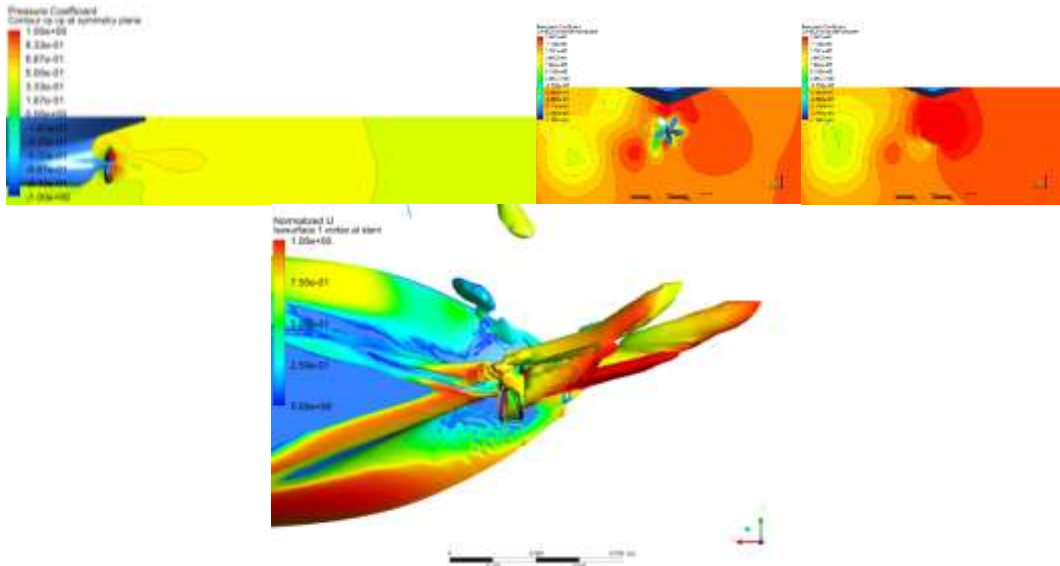
- مع الدفات وبدونها، نلاحظ أن حقل الضغط بوجود الرفاص العامل خلف الغواصة يتوافق مع نظرية الدافع المثالي والذي ينخفض فيها الضغط قبل الرفاص، ليعود ويزداد بعد الرفاص بفعل الطاقة المقدمة من الرفاص.
- مناطق انخفاض الضغط قبل الرفاص تنتج عن ارتفاع السرعة بفعل تأثير الامتصاص الناتج عن الرفاص.
- مناطق الصدم ومناطق انفصال الطبقة الحدية على بدن الغواصة هي مناطق ضغط مرتفع.
- وجود الدفات لا يؤثر بشكل كبير على توزيع الضغط قبل وبعد الرفاص.
- زاوية الانحراف تؤدي إلى توزيع غير منتظم للضغط على جانبي الرفاص الأمر الذي يتسبب في زيادة الأحمال الغير منتظمة على الرفاص والذي يتسبب في زيادة التآرجحات التي يتعرض لها الرفاص والتي تنتقل بدورها إلى بدن الغواصة. كما في حالة الغواصة بدون رفاص، فإن زاوية الانحراف تؤدي إلى إزالة التناظر في توزيع الضغط على يمين ويسار الغواصة الأمر الذي يؤدي إلى زيادة القوى العرضية التي تتعرض لها الغواصة.
- لا يتغير توزيع الضغط على سطح الغواصة بوجود الرفاص، باستثناء أن وجود الرفاص العامل يتسبب في زيادة قليلة للسرعة في منطقة المخر عند مؤخرة الغواصة الأمر الذي ينعكس في انخفاض الضغط بشكل إضافي في هذه المنطقة (انظر الشكل 16) وهذا سيتسبب في زيادة المقاومة الطولية قليلا أثناء وجود الرفاص العامل.
- وجود الرفاص العامل خلف الغواصة لا يغير كثيرا من نظام الدوامات، إلا أنه وكما هو واضح من الشكل 17 فإن الدوامات الطولية القادمة من بداية الغواصة في حالة انحراف الغواصة تدخل مباشرة في قرص الرفاص، وهذا حتما سيتسبب في أحمال واهتزازات كبيرة للرفاص والتي تنتقل بدورها إلى بدن الغواصة.
- الشكل 18 والشكل 19 توضح توزيع معامل الضغط قبل وبعد الرفاص العامل خلف نموذج سفينة الصب JBC وأيضا توزيع الضغط في مستوي التناظر بوجود الرفاص مع وبدون زاوية انحراف، من هذه الأشكال يمكننا ملاحظة التالي:
  - بشكل مشابه لحالة الغواصة يمكننا ملاحظة انخفاض الضغط قبل الرفاص مباشرة وزيادته بعد الرفاص مباشرة.
  - وجود زاوية الانحراف يغير وبشكل كبير في توزيع حقل الضغط في مستوي الرفاص.





الشكل 18: توزيع الضغط قبل وبعد الرفاص العامل خلف نموذج سفينة الصب JBC بدون زاوية انحراف.

وجود الرفاص العامل خلف بدن السفينة سيتسبب حتماً في تغيير كبير في نظام الدوامات المتشكل خلف بدن السفينة لوحدها، حيث أن دوران الرفاص سيتسبب في تدمير الدوامات الضخمة A لينتقل نظام دوامات جديد، وهو موضح في الشكل 18، نلاحظ من هذا الشكل كيف أن الرفاص العامل يتسبب بتدمير كل من الدوامات A والدوامات C، وهذا الأمر متوقع تماماً. هنا لا بد من الإشارة إلى أن الرفاص سيتسبب حتماً في نشوء دوامات حلقيّة الشكل بفعل دورانه، ولكن للأسف لم تظهر هذه الدوامات في حساباتنا والسبب في ذلك يعود إلى أمرين مهمين، الأول أن عدد خلايا الشبكة التي تم استخدامها لا يتجاوز الـ 1 مليون خلية وهذا العدد غير كافي أبداً لحل مثل هذا النوع من الدوامات، والسبب الآخر هو استخدام طريقة الـ URANS، حيث أن حل مثل هذا النوع من الدوامات يتطلب استخدام طرق أخرى كطريقة الـ LES أو الطرق الهجينة والتي تتطلب عدد كبير جداً من الخلايا.



الشكل 19: توزيع الضغط قبل وبعد الرفاص العامل خلف نموذج سفينة الصب JBC مع زاوية انحراف 12 درجة.

في حال وجود زاوية انحراف فإن الدوامات ستتصرف مع حقل التدفق وهذا كان واضحاً من خلال حقل السرعة الذي تم عرضه سابقاً.

أيضاً هنا وجود الرفاص العامل خلف بدن السفينة سيغير بشكل كبير من نظام الدوامات المتشكل خلف البدن وسيتسبب في تدمير الكثير من هذه الدوامات، إلا أن تعقيد وقوة نظام الدوامات بوجود زاوية انحراف للسفينة سينعكس على الرفاص سلباً من خلال زيادة الأحمال والاضطرابات التي سيتعرض لها الرفاص. الشكل 19 يوضح كيف يصبح نظام الدوامات خلف بدن السفينة مع زاوية الانحراف 12 درجة بوجود الرفاص العامل.

## الاستنتاجات والتوصيات:

### الاستنتاجات:

- الرفاص يؤثر بشكل كبير على خصائص حقل التدفق بفعل تأثير الامتصاص والدفع الناتج عن الرفاص.
- دراسة حقل التدفق حول المركبات البحرية مع وبدون زاوية انحراف أمر غاية في الأهمية لما له من دور كبير في معرفة الظروف التي ستعرض لها هذه المركبة وهذا يساعد بشكل كبير في تصميم المركبة وملحقاتها.

### التوصيات:

- يجب ان تتضمن الدراسات الرقمية التي تخص حقل التدفق حول المركبات البحرية كافة ملحقات المركبة وبالأخص الرفاص لما له من تأثير كبير على خصائص حقل التدفق حول بدن المركبة البحرية.

### التوصيات للأعمال اللاحقة:

- 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] 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.
- [2] N. Chase, "Simulations of the DARPA Suboff submarine including self-propulsion with the E1619 propeller," University of Iowa, 2012.
- [3] O. K. Kinaci, A. Kukner, and S. Bal, "On Propeller Performance of DTC Post-Panamax Container Ship," *Int. J. Ocean Syst. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 77–89, May 2013, doi: 10.5574/IJOSE.2012.3.2.077.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] S. Song, Y. K. Demirel, and M. Atlar, "Penalty of hull and propeller fouling on ship self-propulsion performance," *Appl. Ocean Res.*, vol. 94, p. 102006, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.apor.2019.102006.
- [7] Tokyo-2015, "A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics." <https://t2015.nmri.go.jp/jbc.html> (accessed Jun. 28, 2023).
- [8] Tokyo-2015, "Open Water Tests for JBC (NMRI) MODEL PROPELLER NO.687," 2015. [https://www.t2015.nmri.go.jp/Instructions\\_JBC/instruction\\_JBC\\_files/Open\\_Water\\_Tests\\_for\\_JBC\\_NMRI.txt](https://www.t2015.nmri.go.jp/Instructions_JBC/instruction_JBC_files/Open_Water_Tests_for_JBC_NMRI.txt) (accessed Jun. 28, 2023).

