Study Of the Effect of Air Lubrication on The Energy Efficiency of The JBC Bulk Carrier Ship with Propeller

Dr. Rami Hawa*
Dr. Nawar Abbas**
Wehad Hatem***

(Received 10 / 4 / 2025. Accepted 15 / 6 / 2025)

□ ABSTRACT □

This study investigates the effect of air lubrication on the energy efficiency of the JBC bulk carrier. Computational Fluid Dynamics (CFD) was employed for this purpose, utilizing the Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS) equations and the k-ω SST turbulence model available in Ansys to solve the governing Navier-Stokes equations for complex flows. The influence of the side skeg geometry on the continuity of the air layer beneath the flat bottom section was examined. It was found that increasing the height of the forward skegs yields satisfactory results in preventing air leakage from the air-lubricated area. Furthermore, a method was proposed to vent air before it reaches the propeller. The use of V-shaped skegs, which force a 45-degree redirection of the airflow and subsequently release it sideways, proved to be an effective solution. Ultimately, the application of air lubrication improved the ship's energy efficiency by 16.97% while maintaining the same power delivered to the propeller. This significantly reduces fuel consumption and, consequently, associated air pollution

Keywords: EEXI, JBC bulk carrier, Air Injection, Fluent, CFD, K-□ SST.

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

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

دراسة تأثير التزليق الهوائي على كفاءة الطاقة لسفينة الصب JBC بوجود الرفاص

د. رامي حوا *

د. نوار عباس**

وهاد حاتم ***

(تاريخ الإيداع 10 / 4 / 2025. قُبِل للنشر في 15/ 6 / 2025)

ملخّص

تم في هذا العمل دراسة تأثير التزليق الهوائي على كفاءة الطاقة لسفينة الصب JBC. تم استخدام تقنية الـ CFD من أجل تحقيق هذا الغرض، حيث تم استخدام معادلات الـ URANS (Unsteady RANS Averaged Navier Stocks Equation) ومويديل الاضطراب k-ω SST المتوفرة ضمن برنامج الـ Ansys لحل معادلات نافييه ستوكس الناظمة للجريانات المعقدة. تم دراسة تأثير شكل المحددات الجانبية على استمرارية طبقة الهواء أسفل الجزء المتوازي للبدن وتم التوصل إلى أن زيادة ارتفاع المحددات في الجزء الأول منها يعطي نتائج مرضية لمنع تسريب الهواء من المنطقة التي تغطيها طبقة الهواء. بعد ذلك تم اقتراح طريقة من أجل تسريب الهواء قبل وصوله إلى الرفاص، وكان استخدام محددات على شكل حر V والتي تؤدي إلى إجبار تغيير مسار الهواء بزاوية قدرها 45 درجة ومن ثم تسريبه على جاني السفينة حلا مناسبا. في النهاية تم باستخدام التزليق الهوائي تحسين كفاءة الطاقة للسفينة بمقدار 16.97% مع المحافظة على نفس الطاقة المقدمة للرفاص. هذا الأمر يقلل بشكل كبير من مقدار صرف الوقود وبالتالي من تلوث الهواء الناتج عنه.

الكلمات المفتاحية: كفاءة الطاقة، ناقلة الصب JBC، التزليق الهوائي، برنامج الـ Fluent، ديناميك الموائع الحسابية، موديل الاضطراب $K-\omega\ SST$.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية– سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

* أستاذ – قسم الهندسة البحرية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية.

الايميل: dr.ramimostafahawa@tishreen.edu.sy

** أستاذ مساعد – قسم الهندسة البحرية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية. الايميل: dr.nawarnabilabbas@tishreen.edu.sy

*** طالب دكتوراه – قسم الهندسة البحرية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة اللاذقية – اللاذقية – سورية. الايميل: wehad.hatem@tishreen.edu.sy

مقدمة:

شكل موضوع كفاءة الطاقة، هاجسا لجميع قطاعات الصناعة في العالم، ومن بينها قطاع النقل البحري، كان هذا في الماضي القريب، حديثا ازداد هذا الهاجس لسببين أساسيين: أولهما استنزاف موارد الطاقة التقليدية والتي تعتمد الوقود الأحفوري كأحد أهم مصادرها، وثانيهما المشاكل البيئية الناجمة عن استهلاك كميات كبيرة من هذا الوقود وما ينجم عنه من انبعاثات غازية ضارة للبيئة وما تسببه من احتباس حراري وتغير مناخي نشهد عواقبه عاما بعد عام ومخاطر ذلك على البيئة والإنسان والصحة العامة [1].

تم ربط كفاءة الطاقة للسفينة بانبعاثات غاز ثاني أوكسيد الكربون، حيث أن الكربون هو العنصر الأساسي المكون للوقود الأحفوري وتتناسب انبعاثات غاز ثاني أوكسيد الكربون طرديا مع كمية الوقود الأحفوري المستهلكة، مع مراعاة اختلاف معامل انبعاث غاز ثاني أوكسيد الكربون تبعا لنوع الوقود الأحفوري المستخدم، وهذا المعامل تم تحديده بالنسبة لأنواع مختلفة من الوقود في قرار لجنة حماية البيئة البحرية MSC رقم 245 في جلستها رقم 66 والذي تم اعتماده في الرابع من نيسان عام 2014 [2]، كل ذلك بالنسبة لوحدة العمل المنجز والتي ترتبط ارتباطا مباشرا بكمية البضاعة المنقولة والمسافة المقطوعة بواسطة السفينة، ومن أجل تحديد هذه الكفاءة تم وضع العديد من المعايير والمقاييس لكفاءة الطاقة. جميع هذه المقاييس تنتهي إلى نتيجة واحدة، كلما قل انبعاث غاز CO_2، والذي يعني انخفاض استهلاك الوقود، بالنسبة للعمل المنجز من قبل السفينة، كلما ازدادت كفاءة الطاقة للسفينة.

تسارعت الشركات البحرية والقطاعات المعنية بصناعة النقل البحري إلى ابتكار حلول متنوعة تهدف إلى تعزيز كفاءة الطاقة في السفن. وقد شملت هذه الحلول استبدال رفاصات السفن بأخرى أكثر كفاءة، واستخدام دهانات ذات معامل احتكاك منخفض، بالإضافة إلى ضبط قدرة المحرك من خلال تقنيات تمنع تجاوز المحرك لحد معين من الاستطاعة.

تواجه جميع هذه الطرق عيوبًا ملحوظة، وأكبر مشكلة تكمن في احتمال عدم فعالية هذه الإجراءات في تحقيق الالتزام بالمعايير التي وضعتها المنظمة البحرية الدولية. وظهر ذلك جليًا خلال أول فحص (سنوي، متوسط أو تجديد) للشهادة الدولية لمنع تلوث الهواء من السفن IAPPC بعد الأول من كانون الثاني 2023. حيث أنه في حال لم يتم تحقيق هذه المعايير، فلن يتم اعتماد أو تجديد الشهادة، مما سيعيق السفينة عن القيام برحلات دولية، وقد يؤدي إلى خروجها من الخدمة وبيعها كخردة.

من هنا، يتضح التحدي الكبير المرتبط بالالتزام بمعايير كفاءة الطاقة المذكورة سابقًا، مما استدعى البحث عن حلول أكثر فعالية وأقل تكلفة لتحسين كفاءة الطاقة للسفينة. ومن بين هذه الحلول، تعتبر تقنية التزليق الهوائي لبدن السفينة من أبرز الطرق الواعدة لتقليل قوة مقاومة الجر للسفينة.

تعتمد طريقة التزليق الهوائي عند استخدامها مع السفن على إدخال الهواء إلى منطقة الطبقة الحدية بجوار بدن السفينة ليصبح الاحتكاك بين بدن السفينة والهواء بدل أن يكون بين بدن السفينة والماء، الأمر الذي ينتج عنه تخفيض في مقاومة الاحتكاك بشكل ملحوظ وذلك على اعتبار أن كثافة ولزوجة الهواء أقل بكثير من كثافة ولزوجة الماء.

هناك الكثير من الأبحاث التي تتعلق بموضوع التزليق الهوائي في شتى المجالات البحرية. لقد تم اقتراح بعض المبادئ الأساسية لهذه التقنية في القرن التاسع عشر من خلال Latorre [3]. بعد ذلك أجرى الباحثون العديد من الدراسات التجريبية (Kodama et al., 2000) حول تقنية التزليق الهوائي. في معظم التجارب كان يتم حقن الهواء بشكل مستمر عبر فتحات مفتوحة بشكل كامل أو مملوءه بمواد مسامية من أجل تنظيم تدفق الهواء [4].

إن استقرار طبقة الهواء في التجويف السفلي لها الدور الأكبر في فعالية هذه التقنية، فكلما كانت المنطقة الذي (التي) يغطيها الهواء بشكل مستمر أكبر كلما كانت فعالية تقنية التزليق الهوائي أكبر في تقليل مقاومة السفينة. وبناء على ذلك قام Zverkhovskyi في عام 2014 [5] بتصميم جهاز يدعى بالـ "cavitator" لإعاقة تدفق الماء على الجانب السفلي من المركب، وذلك مع فتحات صغيرة خلف التجويف من أجل توصيل إمداد الهواء إلى التجويف. لقد تم اثبات أن هذه الطريق فعالة جدا لأنها تقلل من كمية الهواء الضرورية لإبقاء طبقة الهواء موجودة أسفل المركب.

تأثير سماكة طبقة الهواء على تقليل مقاومة السحب تم دراسته بشكل تجريبي من قبل Shuji et al. 2010 [6]. النتائج التي تم الحصول عليها تؤكد أن الطاقة التي يحتاجها الضاغط لحقن الهواء تتعلق بشكل مباشر بسماكة طبقة الهواء الواجب تأمينها أسفل السفينة.

في عام 2014 قام Jang et al. [7] بإجراء اختبارات تجريبية ناجحة لتقنية التزليق الهوائي على كل من صفيحة ونموذج سفينة. وبناء على هذه التجارب، أكد Jang et al. بأن هذه التقنية تساعد وبشكل كبير في تقليل المقاومة المؤثرة على بدن السفينة في الظروف البحرية (باستثناء الظروف البحرية السيئة جدا) وتساعد في توفير الطاقة.

لقد قام كل من Hao Wu and Yongpeng Ou عام 2020 [8]، بتحليل شكل طبقة الهواء المتشكلة من حقن الهواء أسفل صفيحة مسطحة. أكد الباحثان من خلال بحثهما على أن شكل ومدى تغطية طبقة الهواء للجزء السفلي من بدن السفينة هما المفتاحان الأساسيان المؤثران على فعالية تقنية التزليق الهوائي، واللتان لا يمكن ضبطهما بدقة في الظروف الحقيقية للبحر. وعليه قام الباحثان بإجراء تجربة على صفيحة مسطحة في ظروف مشابهة لظروف عمل السفينة. تم التقاط صور لأشكال طبقة الهواء المتشكلة أسفل الصفيحة في حالات مختلفة، وقد تم اثبات أنه كلما كانت طبقة الهواء المتشكلة أكثر انتظاما وتغطي مساحة أكبر من السطح السفلي للصفيحة كلما كانت هذه التقنية أكثر فعالية في تخفيض مقاومة الصفيحة. علاوة على ذلك، فقد تبين أن لسلوك الصفيحة المستوية تأثيرا كبيرا على شكل تيار مزيج الهواء والماء المتشكل على السطح السفلي للصفيحة المستوية، حيث أن الميل الطولي للصفيحة سيحول دون الانتشار الأفقي لفقاعات الهواء كما أن الميل العرضي سيغير شكل التدفق المكون من مزيج الماء والهواء.

بالإضافة إلى الدراسات التجريبية فإن العديد من الباحثتين قاموا بإجراء العديد من الدراسات الرقمية حول فائدة تقنية التزليق الهوائي مع وبدون تجويف.

Choi et al. في الأعوام 2005، 2007 و2010 [11]–[9]، قاموا بتطوير كود برمجي خاص بهم يقوم على استخدام معادلات الـ URANS من أجل دراسة تأثير التزليق الهوائي على السلوك الهيدروديناميكي للسفينة. من خلال هذا الكود قاموا بحساب الكثير من البارامترات الهيدروديناميكية للسفينة ودرسوا تأثير التزليق الهوائي عليها وقاموا بعرضها وتمثيلها. تم استخدام هذا الكود البرمجي الذي تم تطويره لتحديد سلوك المقاومة الكلية وارتباطها برقم فرود بوجود التزليق الهوائي.

لقد قام Cucinotta et al. في عامي 2017 و2018 [13] ,[12] بدراسة حول تأثير تقنية التزليق الهوائي على الأداء الهيدروديناميكي لقارب سريع. استخدمت هذه الأبحاث تقنية الـ (CFD) لتقدير سلوك الطبقة الهوائية تحت القارب عند قيم مختلفة لرقم فرود. كما تم تمثيل خطوط تدفق الهواء تحت القارب عند تلك القيم. بالإضافة إلى الحسابات الرقمية، قام الباحثون بإجراء تجارب على القارب تحت نفس الظروف، وتمت مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها. أظهرت المقارنة توافقًا جيدًا بين النتائج الرقمية والتجريبية. تسهم هذه الدراسة بشكل كبير في تحسين تصميم السفينة لتحقيق أفضل استفادة من تقنية التزليق الهوائي.

من خلال ما تم ذكره، يتضح أن الدراسات السابقة التي أجريت على السفن كانت تهدف إلى تطوير بدن السفينة باستخدام التزليق الهوائي منذ مراحل التصميم الأولى. وهنا تكمن أهمية هذا البحث، حيث يهدف بشكل أساسي إلى إيجاد طريقة للتزليق الهوائي يمكن تطبيقها على السفن الحالية (الموجودة في الخدمة) بأقل التكاليف الممكنة، وبطريقة تقلل من مقاومة السفينة وتحسن من كفاءة الطاقة بالشكل الذي يحقق المعايير الدولية.

يهدف هذا البحث إلى تحديد مقدار تحسن كفاءة الطاقة لسفينة الصب JBC عند استخدام تقنية التزليق الهوائي (Air Lubricating) بوجود الرفاص العامل. لقد تم في عمل سابق إثبات أن التزليق الهوائي يقلل من مقاومة السفينة بشكل ملحوظ، مما يسمح بتحقيق نفس السرعات مع معدلات استطاعة أقل من محطة الدفع، أو الوصول إلى سرعات أعلى بنفس مستوى الاستطاعة من المحرك. وهذا سيساهم في تقليل استهلاك الوقود لكل وحدة عمل منجزة، مما يؤدي إلى تقليل انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون وتحسين كفاءة الطاقة.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذا البحث وأهدافه في:

- ✓ دراسة تأثير شكل المحددات على انقطاع طبقة الهواء أسفل السفينة.
- ✓ دراسة تأثير إضافة محددات ضمنية على انقطاع طبقة الهواء أسفل السفينة.
- ✓ حساب مقدار التحسن في كفاءة الطاقة بوجود التزليق الهوائي والرفاص العامل.

1. منهجية البحث

- تحليلية تجريبية في بيئة الـ Fluent الافتراضية.

طرائق البحث ومواده:

يمكن تلخيص المواد التي تم استخدامها في هذا البحث على النحو الآتي:

- النموذج الهندسي لسفينة الصب JBC [14].
- النموذج الهندسي للرفاص MP687 [15].
- برنامج الـ ANSYS-Fluent.
- طريقة الـ URANS من أجل حل المعادلات الناظمة للتدفق.
- موديل الاضطراب $K-\omega\ SST$ لإغلاق نظام المعادلات. تم اختيار هذا النموذج لأنه ووفقا للدراسات المرجعية هو النموذج الأنسب في المجال البحري مع طريقة الـ URANS المستخدمة [16]–[21]، كما تم في دراسات محلية وعالمية سابقة التأكد من نتائج هذا النموذج من خلال مقارنة نتائجه مع النتائج المتوفرة في المجال البحري [19], [22]–[26].
- طريقة الـ VOF من أجل حل السطح الحر بين الهواء والماء.
- دليل كفاءة الطاقة للسفن الموجودة Energy Efficiency Existing ship Index EEXI

2. الأبعاد الهندسية

2.1. الأبعاد الهندسية لسفينة الصب JBC

تم اختيار سفينة الصب لهذه الدراسة للعديد من الأسباب:

- هذه الدراسة هي إكمال لدراسة سابقة والتي تم فيها استخدام هذه السفينة، وعليه فمن الأنسب إكمال الدراسة على نفس السفينة.
- نموذج هذه السفينة يشابه سفن الصب الموجودة في الخدمة البحرية بالإضافة إلى تشابهها الكبير مع ناقلات النفط الموجودة والتي تشكل جزءا مهما جدا في التجارة البحرية العالمية، وعليه فإن دراسة هذه السفينة وإيجاد الطريقة الأفضل لتقليل مقاومتها سيساعد بشكل كبير في تقليل مقاومة شريحة كبيرة من الأسطول التجاري البحري.
- علاوة على ذلك فإنه يوجد لهذه السفينة الكثير من النتائج التجريبية، وهذا الأمر يعتبر جيداً جداً من أجل معايرة الشبكة والإعدادات الرقمية من خلال مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية المتوفرة وذلك قبل البدء بالحسابات الرقمية الأساسية. نسبة تصغير النموذج الذي يتوفر له نتائج تجريبية هي 1/40 من السفينة الحقيقية.

شكل السفينة وأبعادها الهندسية موضحة في كل من الشكل 1 والجدول 1.

الشكل 1: ناقلة الصب JBC [27].

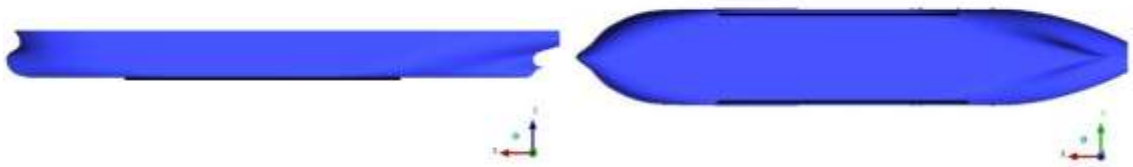
الجدول 1: الأبعاد الهندسية لسفينة الصب JBC (السفينة الحقيقية والنموذج) [14].

Main particulars	الرمز	الواحدة	Model
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	-	0.8216
Froude number	F_r	-	0.142
Reynolds number	R_e	-	8.253×10^6

2.2. الأبعاد الهندسية للسفينة مع المحددات الجانبية في أسفل الجزء المتوازي

2.2.1. الحالات التي تم دراستها سابقا

كان قد تم في دراسة سابقة دراسة السفينة لوحدها مع المحددات بدون وجود الرفاص ومع سرعة تدفق للهواء قدرها $1\frac{m}{s}$. الهدف الأساسي من وضع المحددات هو خلق تجويف خارجي أسفل السفينة الموجودة في الخدمة (وليس السفن الجديدة، حيث أن السفن الجديدة يتم صناعة التجويف ضمن حيز البدن وهذا الأمر لا يمكن تطبيقه على السفن الموجودة في الخدمة) لتجميع الهواء المحقون فيه، انظر الشكل 2. تم في الدراسة السابقة استخدام ارتفاعين للعوارض: الأول $10\ cm$ للسفينة الحقيقية والذي يقابلها $0.25\ cm$ في النموذج و$50\ cm$ في السفينة الحقيقية والذي يقابلها $1.25\ cm$ في النموذج.

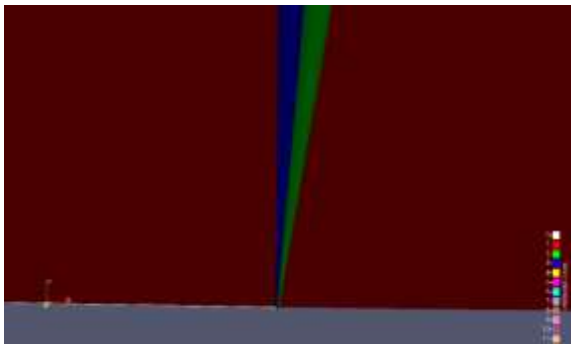


الشكل 2: إضافة محددات خارجية متوازية أسفل وعلى حواف الجزء المتوازي.

كما تم إضافة الحاقن الهوائي إلى بداية ووسط المحددات كما هو موضح في الشكل 3.

الشكل 3: إضافة الحاقن في بداية ووسط المحددات.

وتم اعتماد شكل الحاقن على شكل نصف أسطوانة ليكون انسيابي قدر المستطاع، حيث تم تقسيم نصف الأسطوانة إلى جزئين الجزء الأمامي وهو اللون الأخضر في الشكل 4 ويمثل مصد للتيار الهوائي، أما الجزء الخلفي وهو اللون الأزرق في الشكل 4 فهو الجزء الذي يتم منه حقن الهواء بشكل موازي للمحور الطولي لبدن السفينة.



الشكل 4: توضع الحاقن الهوائي بين المحددين ذو الارتفاع 10 cm.

تم في الدراسة السابقة اختبار المحددات التي تأخذ شكل كما هو موضح في الشكل 5، ومن ثم تمت إضافة الحاقن ليتشكل لدينا مستطيل مغلق كما هو موضح في الشكل 6 وتم الحساب بدون حقن الهواء من أجل معرفة تأثير هذه المجسمات الإضافية على مقاومة السفينة قبل البدء بحقن الهواء.

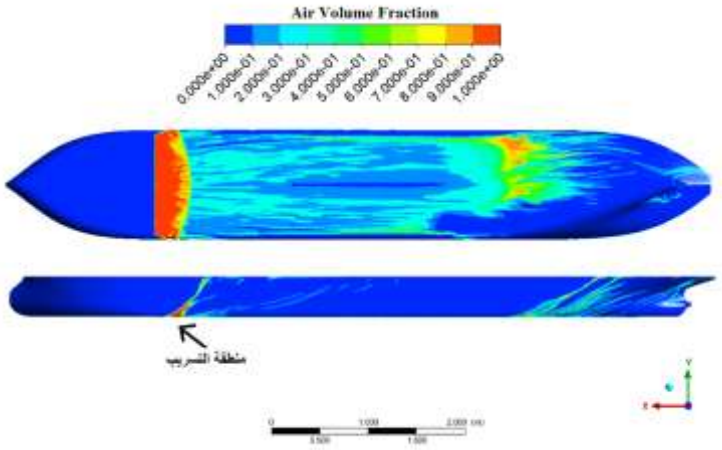
الشكل 5: جعل المحددات على شكل حرف II.

الشكل 6: المحددات مع الحاقن على شكل مستطيل.

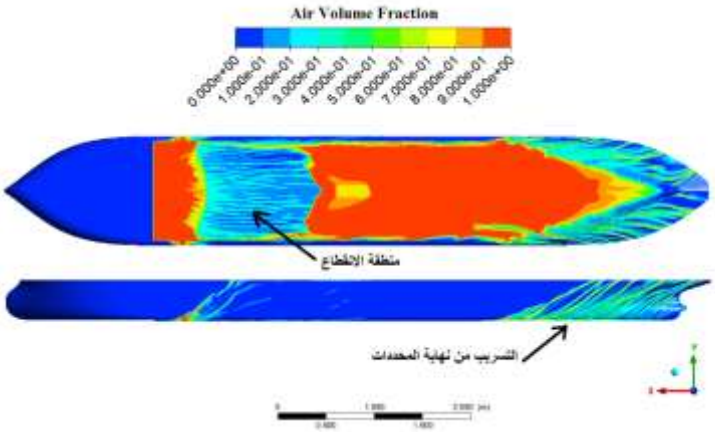
2.2.2. الحالات الجديدة

أحد أهم المشاكل التي واجهتنا في الدراسة السابقة هي الانقطاع في طبقة الهواء أسفل السفينة الأمر الذي أدى إلى تقليل فعالية التزليق الهوائي، وكان السبب في هذا الانقطاع هو تسريب الهواء من الجزء الأول من المحددات ذات الارتفاع 0.25 cm وهذا واضح جدا في الشكل 7. وأما بالنسبة للمحددات ذات الارتفاع 1.25 cm فكان التسريب أقل ولكن كان هناك تسريب كما هو واضح في الشكل 8. التسريب في الهواء من الجزء الأمامي من المحددات يلعب الدور الأساسي في انقطاع طبقة الهواء أسفل السفينة وعليه تم في الدراسة الحالية اتباع الخطوات التالية:

- في الجزء الأول من هذه الدراسة تم إضافة محددات بينيه كما هو موضح في الشكل 9 بهدف توزيع الهواء في الجزء الأول من المحددات بحيث نقلل من منطقة الانقطاع ونقلل من تسريب الهواء.
- في الخطوة الثانية من الدراسة الحالية تم زيادة ارتفاع المحددات في الجزء الأول منها ليصبح 2.5 cm (ضعف الارتفاع السابق) وتم هذا الأمر على الثلث الأول من طول المحددات مع إزاحة المحددات قليلا قبل الحاقن كما هو واضح في الشكل 10، هذا الأمر سيضمن عدم تسريب الهواء من المحددات في الجزء الأول منها والذي كان هو مصدر التسريب في الحالات السابقة.



الشكل 7: تسرب الهواء في بداية المحددات ذات الارتفاع 0.25 cm.



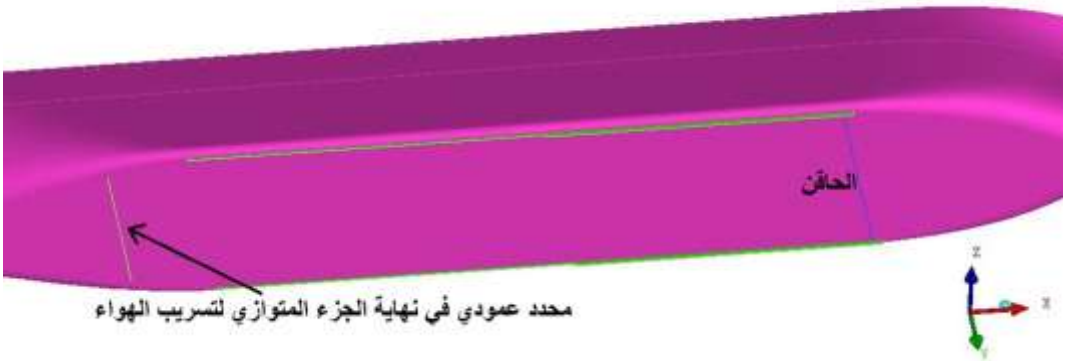
الشكل 8: تشكل طبقة هوائية أسفل الجزء المتوازي بين المحددات، وتسريب الهواء من بداية ونهاية المحددات بشكل أساسي.

الشكل 9: مكان توضح المحددات البينية.

الشكل 10: زيادة ارتفاع المحددات في الجزء الأول منها.

- في الخطوة التالية من هذه الدراسة تم إضافة محددات في نهاية القسم المتوازي من أجل تسريب الهواء قبل دخوله إلى منطقة عمل الرفاص على مرحلتين:

  - المرحلة الأولى تم إضافة محدد عمودي على اتجاه التدفق بارتفاعين 0.5 cm و1.25 cm مع ترك مسافة بينه وبين نهاية المحددات الجانبية من أجل تسريب الهواء نحو الأعلى قبل وصلوله إلى الرفاص، لأن وصول الهواء إلى الرفاص سيؤدي بشكل حتمي إلى تقليل كفاءته بشكل كبير جدا الأمر الذي سيحد من تأثير فعالية التزليق الهوائي، المحدد موضح في الشكل 11.
  - في المرحلة الثانية تم إضافة محدد شكل حرف V بارتفاعين 0.5 cm و1.25 cm، الشكل 12 يعرض مكان توضع هذه المحددات وشكلها.

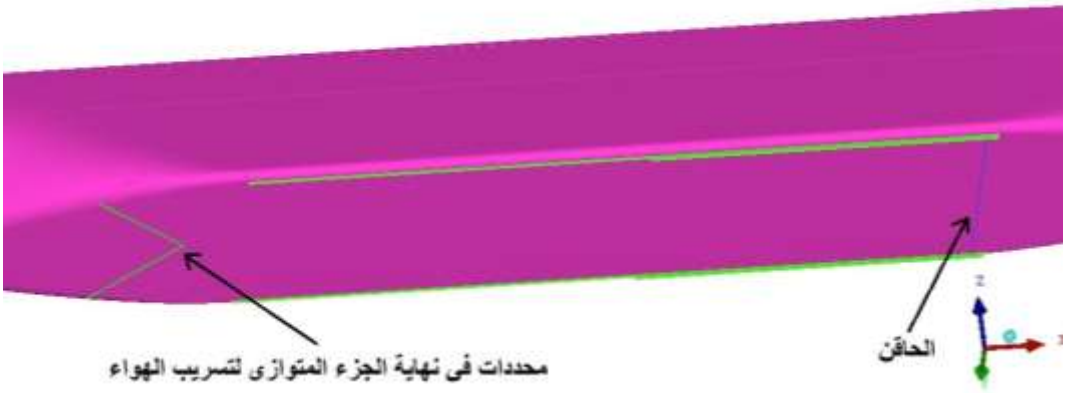


الشكل 11: محدد عمودي على اتجاه التدفق في نهاية القسم المتوازي من أجل تسريب الهواء قبل دخوله إلى منطقة عمل الرفاص.

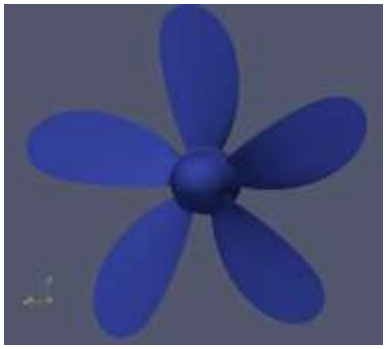
- في النهاية تم إضافة الرفاص MP687 الموضح في كل من الشكل 13 والشكل 14 مع الحالة الأفضل التي تم التوصل إليها وتم إجراء الحسابات بوجود الرفاص العامل وبوجود الحقن الهوائي. الرفاص MP687 يتوفر له النتائج التجريبية لتجربة الماء المفتوح [15]. الأبعاد الهندسية للرفاص موضحة في الجدول 2.

الجدول 2: الأبعاد الهندسية لنموذج الرفاص MP687 [28].

Parameter	**Value**
Number of Blades	5.00
Diameter [mm]	203.00
Direction of Rotation	Clockwise



الشكل 12: محددات على شكل حرف V في نهاية القسم المتوازي من أجل تسريب الهواء قبل دخوله إلى منطقة عمل الرفاص.



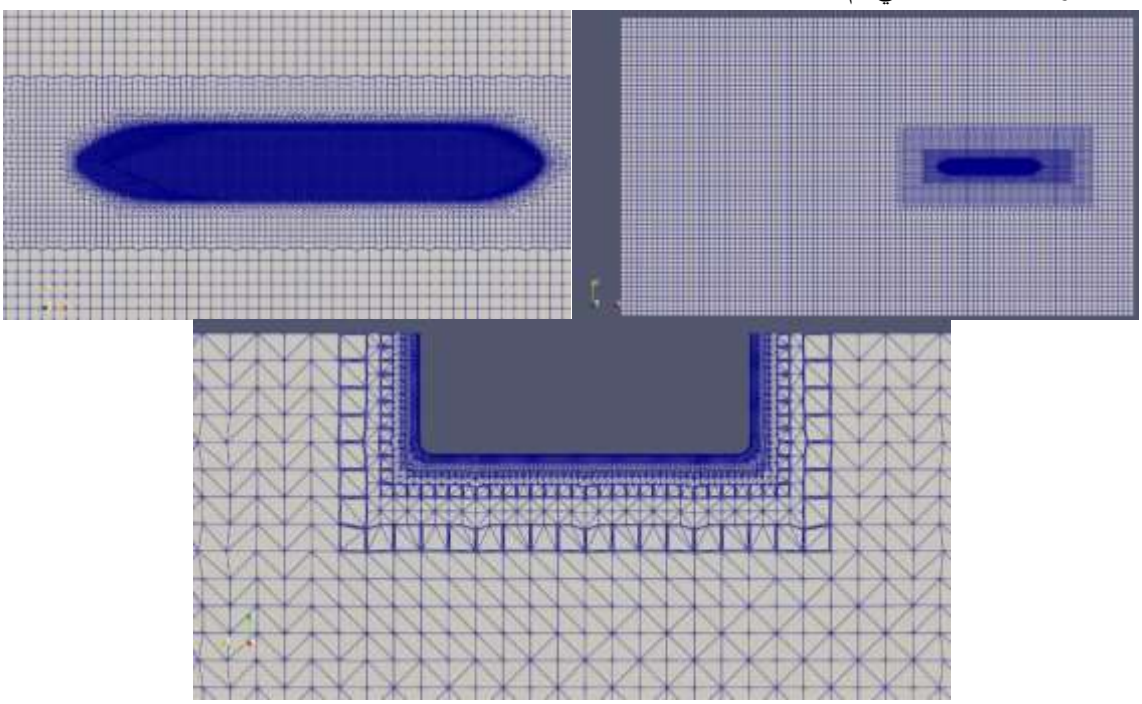
الشكل 13: نموذج الرفاص MP687 [28].

الشكل 14: الحالة التي تم فيها دراسة تأثير الحقن الهوائي مع الرفاص العامل.

3. الشبكة الرقمية

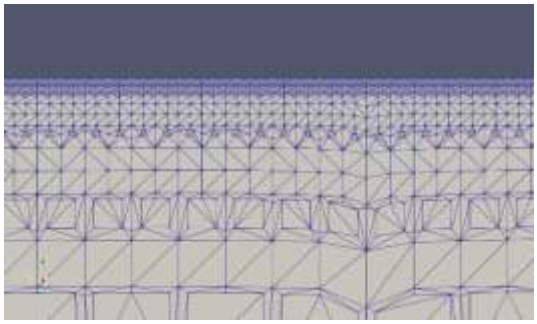
تم في هذا العمل استخدام الشبكات المنتظمة على اعتبارها هي التي تعطي أفضل النتائج في الحسابات الرقمية [22]، كما أنها تحتاج إلى وقت أقل لإتمام العمليات الحسابية [29]. تم تنعيم الشبكة الرقمية بشكل متدرج حول بدن السفينة،

حيث تم زيادة عد الخلايا في المناطق المهمة وبالأخص في منطقة الطبقة الحدية بجوار السفينة، الشكل 15 يوضح الشبكة الرقمية المنتظمة التي تم بناؤها حول بدن سفينة الصب JBC.

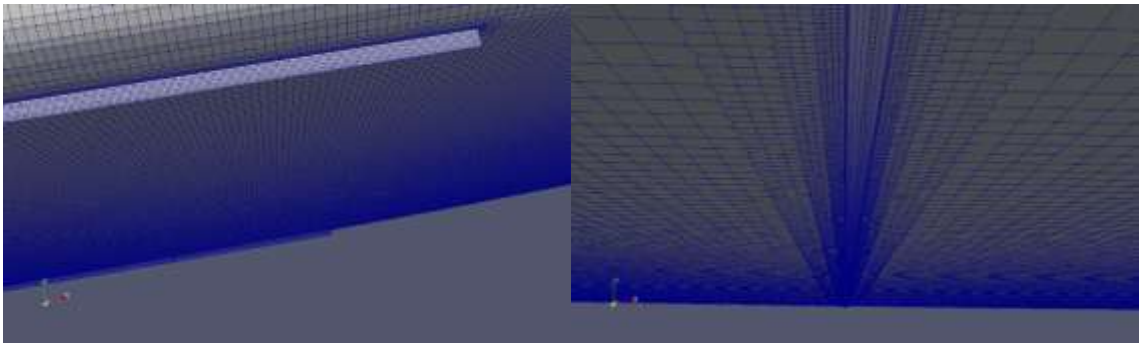


الشكل 15: الشبكة الرقمية المنتظمة التي تم بناؤها حول بدن نموذج سفينة الصب JBC.

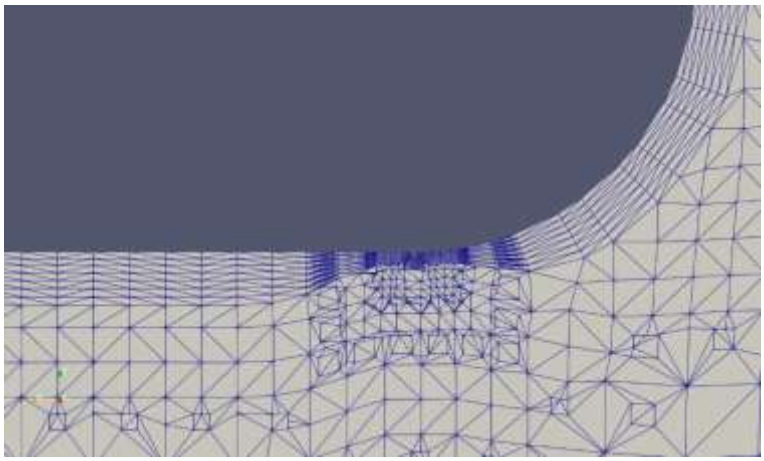
الشكل 16 يعرض توزع الخلايا ضمن الطبقة الحدية بجوار سطح السفينة، وعلى اعتبار أن أبعاد كل من المحددات وحاقن الهواء صغيرة جدا بالمقارنة مع أبعاد السفينة، فإن هذا الأمر يتطلب زيادة في عدد الخلايا وبالأخص على أسطح كل من المحددات والحاقن من أجل تغطيتها بالشكل الصحيح، انظر الشكل 17، ولهذا السبب فإن عدد الخلايا في حالة وجود المحددات والحاقن. الشكل 18 يوضح الطبقة الحدية بجوار المحددات، وكما هو واضح من هذا الشكل تم تنعيم الخلايا بشكل جيد في هذه المنطقة. يصل لحوالي 12 مليون خلية حسابية، ومع إضافة الرفاص يصل عدد الخلايا إلى 15 مليون خلية حسابية. الشكل 19 يعرض الشبكة الرقمية على سطح الرفاص.



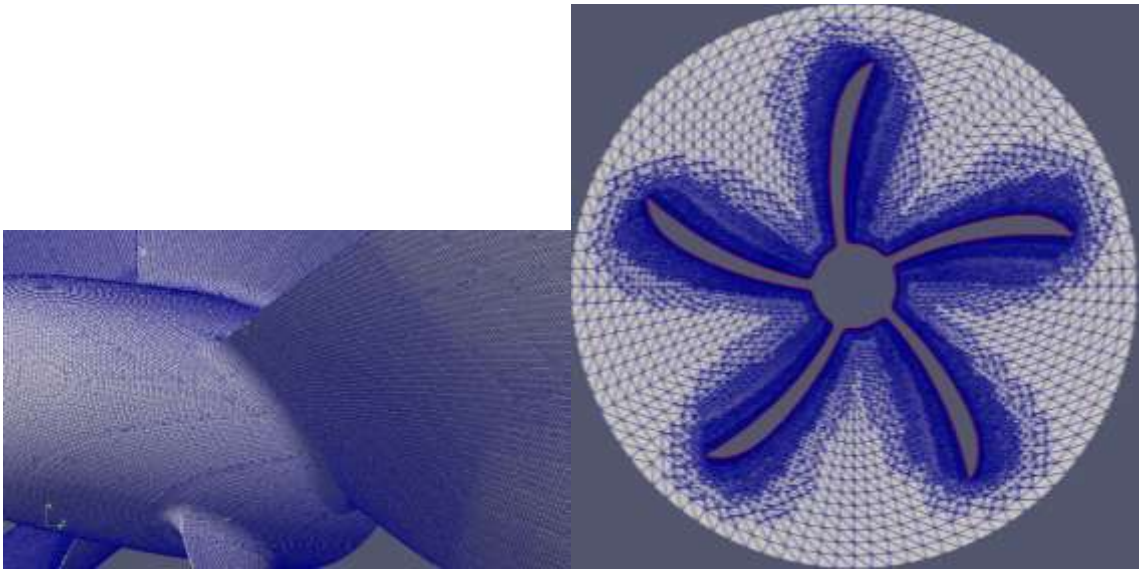
الشكل 16: الخلايا ضمن الطبقة الحدية بجوار بدن السفينة.



الشكل 17: تنعيم الخلايا على كل من الحاقن والمحددات.



الشكل 18: الطبقة الحدية بجوار المحددات.



الشكل 19: الشبكة الرقمية على سطح الرفاص وبجواره.

النتائج والمناقشة:

الفرضية الأساسية في هذا البحث أنه تم اعتبار مقاومة الأمواج مهملة أو صغيرة كون السفينة تحديدا سفينة بضائع سائبة دُرِست عند سرعة معينة (ضمن السرعات البطيئة الى المتوسطة) وهذه الحالة لا تمثل السرعات العالية ولا يمكن اسقاطها على انواع أخرى من السفن لاختلاف أشكال ابدانها. كون البحث ركز على سفن البضائع السائبة. أما التعميم فيتطلب العمل على أبحاث أخرى. لذلك وبعد الانتهاء من عملية بناء الشبكة وضبط الإعدادات الرقمية يجب أن يتم

معايرة كل من هذه الشبكة والإعدادات بهدف التأكد من دقتها ومن نتائجها. وهنا تتم إجراء حساب حالات مشابهة لحالات تجريبية ومقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية.

تقييم النتائج الرقمية

في الخطوة الأولى من المعايرة تم إجراء الحسابات الرقمية لحالة نموذج السفينة بمقياس تصغير 1/40 عند قيمة فرود 0.142 والذي يقابله سرعة لنموذج السفينة $1.179\frac{m}{s}$. الجدول 3 يعرض مقارنة بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية لمقاومة السفينة بدون وجود الرفاص العامل. كما هو واضح من الجدول 3 فإن قيمة الخطأ هي -1.56% والتي تعتبر مقبولة جداً.

الجدول 3: مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية لمقاومة السفينة.

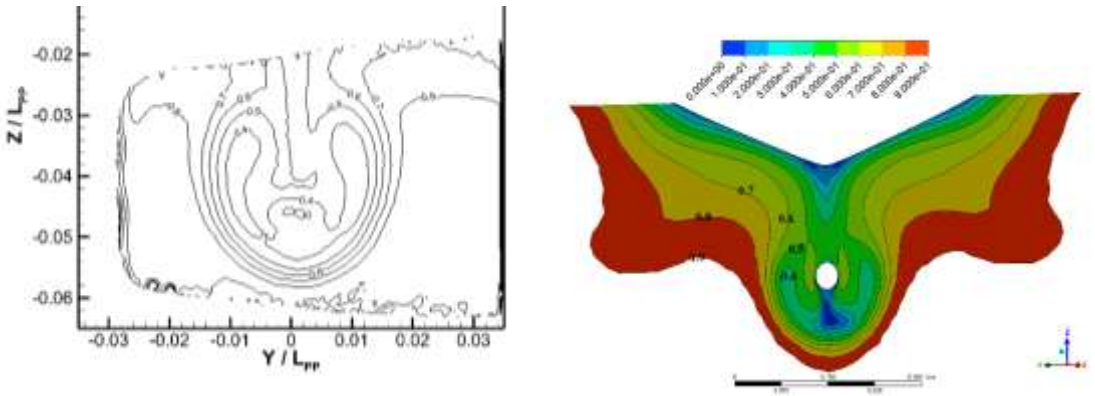
Symbol	$\mathbf{R_T}[N]$
EFD	36.37
CFD	35.80
Error%	-1.56%

يعرض الجدول 4 مقدار الخطأ بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية لكل من مقاومة السفينة والدفع الناتج عن الرفاص بالإضافة للعزم المطبق على الرفاص في تجربة الدفع الذاتي Self-Propulsion، وأيضا الفرق بين الدفع والمقاومة لحالة السفينة والرفاص. الحسابات كلها تمت عند رقم فرود 0.142 والذي يقابله سرعة لنموذج السفينة $1.179\frac{m}{s}$، سرعة دوران الرفاص هي $7.8\,rps$. كما هو واضح من هذا الجدول فإن قيمة الخطأ العظمى هي -6.77% وعلى اعتبار أنه في الدراسة الرقمية تم إهمال مقاومة الأمواج بسبب صغر رقم فرود بالإضافة إلى وجود مقدار خطأ يتراوح بين الـ 1−2% في النتائج التجريبية [27] فيمكن القول بأن النتيجة الرقمية التي تم الحصول عليها جيدة جدا وقريبة جدا من الواقع وبالتالي فإن الشبكة والإعدادات الرقمية التي تم استخدامها تعطي نتائج جيدة ويمكن اعتمادها في الحسابات اللاحقة التي تخص السفينة والرفاص.

الجدول 4: تقييم النتائج الرقمية للمقاومة والدفع والعزم بوجود الرفاص.

Symbol	$\mathbf{R_{T_{with\ propeller}}}$ [N]	T[N]	$\mathbf{R_{T_{with\ propeller}}} - T$	$\mathbf{M_z}[N.m]$
EFD	40.37	22.37	18.00	0.5841
CFD	38.15	21.37	16.78	0.6232
Error%	-6.50%	-4.40%	-6.77%	6.70%

في الخطوة الثانية من عملية المعايرة تم مقارنة حقل السرعة في مستوي الرفاص الذي تم الحصول عليه من الحسابات الرقمية مع حقل السرعة التجريبي. الشكل 20 يعرض نتائج هذه المقارنة، والذي يؤكد على التوافق الكبير بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية. وهذا الأمر يؤكد مرة أخرى على أن الإعدادات والشبكة الرقمية التي تم استخدامهما يعطيان نتائج جيدة وقريبة جدا من الواقع.



الشكل 20: مقارنة النتائج الرقمية (على اليسار) مع النتائج التجريبية (على اليمين) لحقل السرعة في مستوي الرفاص.

الحالات المدروسة

لقد تم دراسة العديد من الحالات في هذا البحث، سنستعرض فيما يلي الحالات التي تمت دراستها من أجل مقارنتها لاحقا. الجدول 5 يعرض الحالات التي تمت دراستها. تم دراسة الحالة Case1 للسفينة بدون أية إضافات وبدون حقن هوائي لتكون الحالة المرجعية للمقاومة ولكي يتم مقارنة قيم المقاومة لها مع قيمة المقاومة للسفينة بعد الحقن الهوائي.

الجدول 5: الحالات التي تمت دراستها.

رقم الحالة	توصيف الحالة
Case1	السفينة بدون أية إضافات وبدون تزليق هوائي كما في الشكل 1
Case2	السفينة **مع محددات متوازية بارتفاع 1.25 cm مع وجود الحاقن الهوائي في بداية ووسط المحددات** كما في الشكل 3 وبوجود التزليق الهوائي
Case3	السفينة **مع محددات متوازية وبارتفاع 1.25 cm مع وجود المحددات البينية بالإضافة لوجود الحاقن الهوائي في بداية ووسط المحددات** كما في الشكل 9 وبوجود التزليق الهوائي
Case4	السفينة **مع محددات متوازية وبارتفاع 1.25 cm ومع زيادة ارتفاع المحددات في الثلث الأول منها بالإضافة لوجود الحاقن الهوائي في بداية ووسط المحددات** كما في الشكل 10 وبوجود التزليق الهوائي

تأثير المحددات البينية وزيادة ارتفاع المحددات على انقطاع طبقة الهواء

في البداية يجب توضيح أن الدراسة تمت عند سرعة واحدة للسفينة وهي السرعة المقابلة لرقم فرود 0.142، لأن هذه السرعة هي سرعة الخدمة للسفينة، وبالتالي هي السرعة التي تعمل عندها السفينة أغلب وقت إبحارها. تعتبر هذه القيمة لفرود ($F_n = 0.142$) والتي هي أصغر من 0.24 قيمة صغيرة، وفي مثل هذه الحالة فإن الأمواج التي تتشكل حول النموذج تكون ذات ارتفاعات صغيرة جدا ويمكن إهمالها [30] ولهذا السبب لم تؤخذ مقاومة الأمواج بعين الاعتبار وتمت الدراسة من الغاطس وما دون فقط.

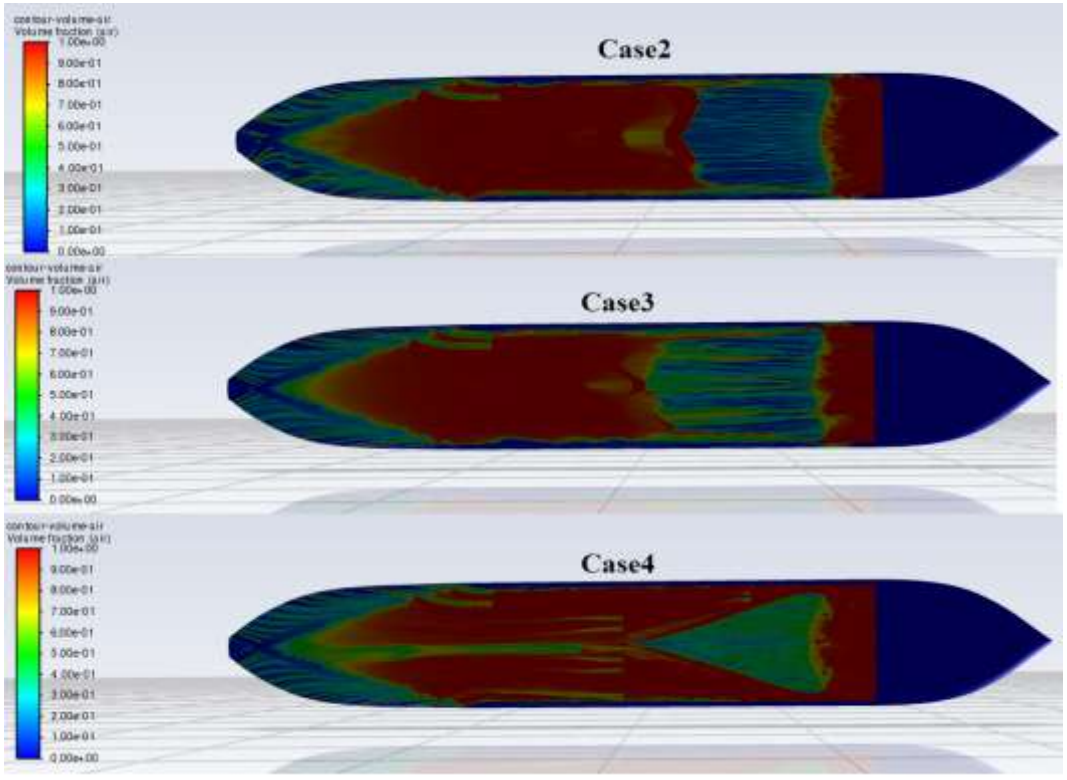
كما هو موضح في الجدول 6 فإن الحقن الهوائي في الحالة Case2 يؤدي إلى تقليل في قيمة المقاومة تصل إلى 31.59%. أما في الحالة الثالثة والرابعة (Case3, Case4) كانت قيمة تخفيض المقاومة هي 32.26% و33.46% على التوالي. هذه النتيجة تؤكد أن أفضل نتيجة تم الحصول عليها هي للحالة الرابعة Case4 والتي تم فيها زيادة ارتفاع المحددات على الثلث الأول منها، والسبب في هذا الأمر هو حبس كامل الهواء المحقون في الجزء السفلي من

بدن السفينة وعدم السماح له بالتسريب حتى نهاية المحددات، الأمر الذي نتج عنه زيادة في فعالية عملية الحقن. سرعة الحقن التي تم استخدامها في هذه الحالات هي $\left[\frac{m}{s}\right]$ 1.

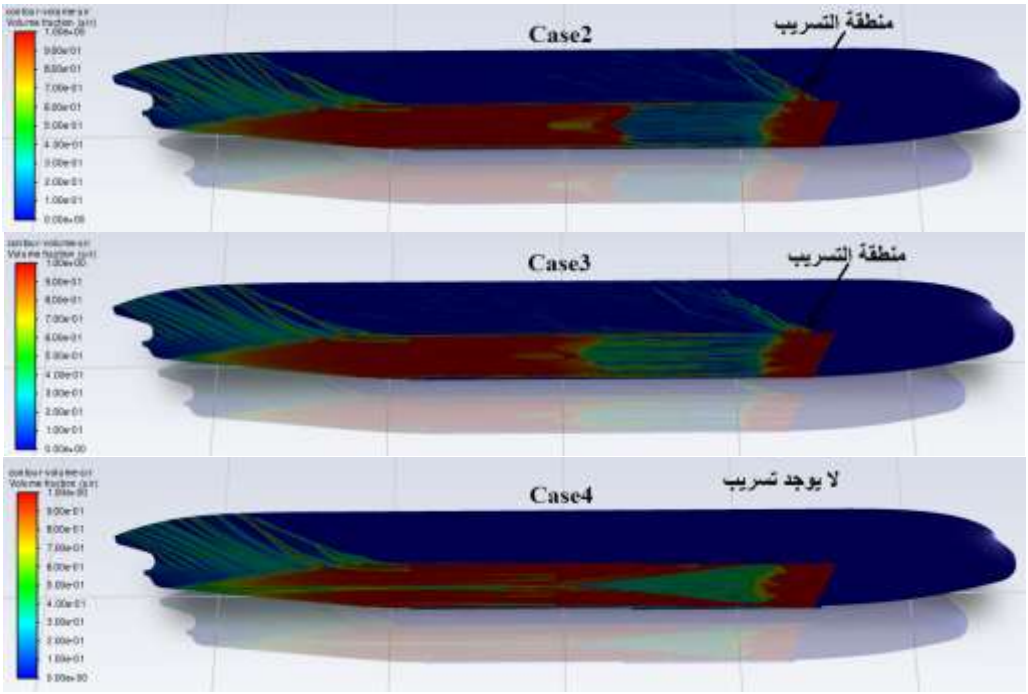
الشكل 21 يعرض توزع طبقة الهواء على أسفل وجانب السفينة للحالات Case2, 3, 4. من خلال هذا الشكل نلاحظ أن المحددات البينية (Case3) لم تؤثر كثيرا على تحسين انتشار طبقة الهواء أسفل السفينة وبقي التسريب موجودا بين المحددات البينية وفي الجزء الأول من المحددات الخارجية (الشكل 22)، الأمر الذي أدى إلى نفس الانقطاع في طبقة الهواء كما في الحالة Case2، مع العلم أن ارتفاع المحددات البينية هو 1.25cm وهو مساو لارتفاع المحددات الخارجية. هذه النتيجة تؤكد على أن ارتفاع المحددات والذي هو 1.25 cm غير كاف لمنع التسريب في الجزء الأول منها. نتيجة الحالة الرابعة Case4 والذي فيها ارتفاع المحددات مساوي لـ 2.5 cm كانت هي الأفضل حيث لم يتم فيها أي نوع من أنواع التسريب في الجزء الأول من المحددات وهذا واضح في الشكل 22. وإن عملية مد المحددات ذات الارتفاع 2.5 cm إلى مسافة قليلة قبل الحاقن كما هو موضح في الشكل 10 يؤدي بشكل إضافي إلى حماية الهواء المحقون من التسريب إلى خارج منطقة المحددات في القسم الأول منها. من خلال ما تقدم يمكننا القول بأن زيادة ارتفاع المحددات في الجزء الأول منها مع مد المحددات لمسافة قليلة قبل الحاقن يساعد بشكل كبير في منع تسريب الهواء وتحسين استمرارية طبقة الهواء أسفل بدن السفينة.

الجدول 6: تأثير الحقن الهوائي على مقاومة السفينة.

$Case\ No.$	$R_T[N]$	Difference%
Case1-Ship alone	35.80	[-]
Case2	24.49	-31.59%
Case3	24.25	-32.26%
Case4	23.82	-33.46%



الشكل 21: توزع طبقة الهواء على أسفل وجانب السفينة في الحالات المدروسة.

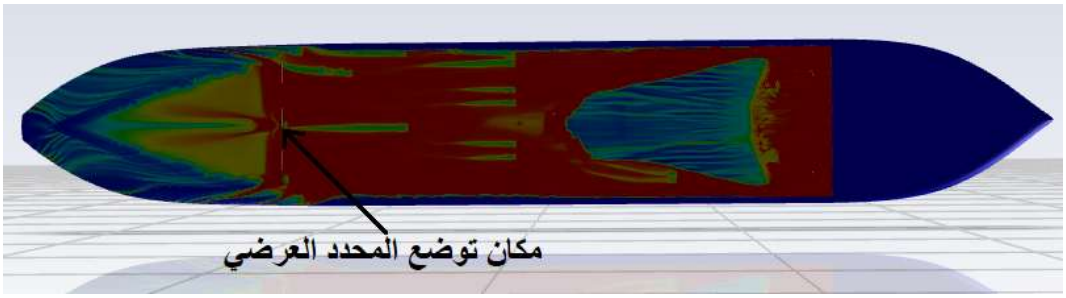


الشكل 22: تسريب الهواء من بداية المحددات في الحالات المدروسة.

تسريب الهواء قبل وصوله إلى الرفاص

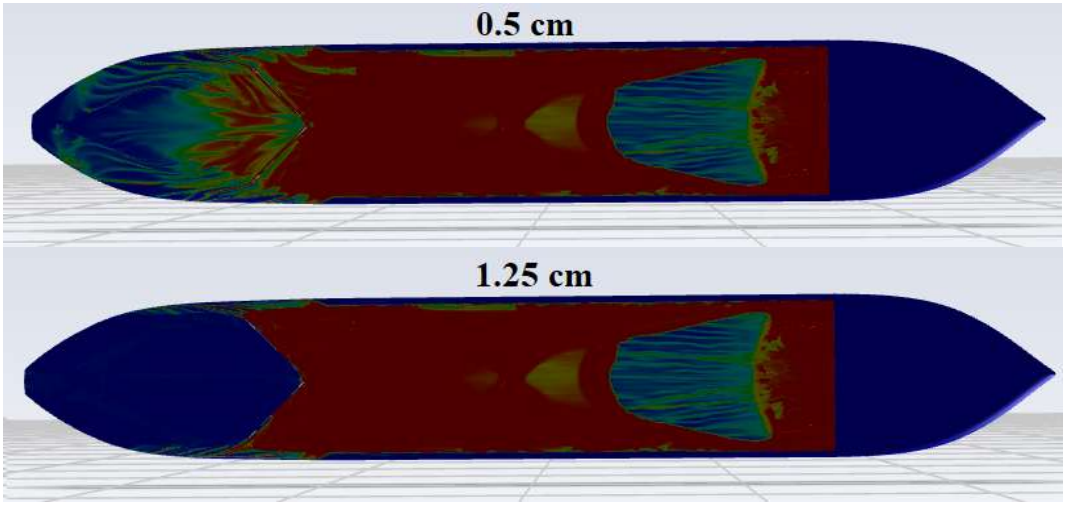
بعد أن تم الانتهاء من دراسة الحالات السابقة والتي تم فيها اختيار أفضل شكل للمحددات الجانبية (وهي المحددات ذات الارتفاع الزائد عند مقدمتها) ولسرعة الحقن وهي السرعة المساوية لـ 85% من سرعة السفينة (السرعة $1\ \left[\frac{m}{s}\right]$) وقبل الانتقال إلى مرحلة الحسابات مع الرفاص كان لا بد من التخلص من الهواء الذي يصل إلى منطقة عمل الرفاص، لأن دخول الهواء على منطقة الرفاص العامل سيؤدي وبشكل حتمي إلى انهيار في الدفع الناتج عن الرفاص وبالتالي تتحول عملية الحقن الهوائي من عملية إيجابية إلى عملية سلبية جدا.

كأول خطوة للتخلص من الهواء القادم إلى الرفاص تم إضافة محددات بشكل عرضي كما هو موضح في الشكل 11 وبارتفاعين مختلفين وهما 0.5, 1.25 cm ولكن في كلتا الحالتين تم ملاحظة تسريب الهواء بعد المحدد العرضي، انظر الشكل 23. السبب الأساسي في هذا الأمر هو أن هذا المحدد يصنع زاوية عمودية تماما مع اتجاه التدفق وبالتالي فإن الهواء القادم يجب أن ينحرف بزاوية قدرها 90° نحو اليمين أو اليسار كي يتم تسريبه على جانبي السفينة، وهذا الأمر يواجه مقاومة كبيرة من الهواء وبالتالي يتجمع الهواء ويتجاوز ارتفاع المحدد ويذهب إلى منطقة الرفاص.



الشكل 23: دور المحدد العرضي في تسريب الهواء.

في الحالة الثانية والتي تم فيها استخدام محدد من النوع V لوحظ أنه مع الارتفاع القليل للمحدد 0.5 cm كان هناك تسريب هوائي إلى منطقة عمل الرفاص كما هو موضح في الشكل 24. ومع الارتفاع 1.25 cm للمحدد تم منع الهواء بشكل كامل من الذهاب إلى منطقة عمل الرفاص، حيث أن مقاومة الهواء للانحراف بزاوية 45 درجة أقل بشكل كبير من مقاومة الهواء للانحراف بزاوية قدرها 90 درجة.



الشكل 24: دور المحدد V في تسريب الهواء.

تأثير الحقن الهوائي على كفاءة الطاقة للسفينة بوجود الرفاص والحقن الهوائي

يعرض الجدول 7 قيمة المقاومة والدفع الناتج عن الرفاص MP687 بدون وجود الحقن الهوائي وعند سرعة دوران $7.8\,rps$ (وهي السرعة التي تم اختبارها تجريبيا) كما هو واضح من هذا الجدول فإن قيمة المقاومة أكبر من الدفع $(R_T > T)$ وبالتالي لا بد من زيادة عدد الدورات من أجل تحقيق الموازنة بين المقاومة والدفع. تم زيادة عدد الدورات لتصبح $10\,rps$ وكما هو موضح في الجدول 7 نلاحظ أنه عند سرعة الدوران هذه فإن الدفع الناتج عن الرفاص أكبر بمقدار 1.18% وهو مقدار صغير جداً $\left(\frac{T-R_T}{R_T} \times 100\% = 1.18\%\right)$ وبالتالي يمكن اعتبار السرعة $10\,rps$ هي سرعة الدوران المناسبة والتي تسبب تحريك السفينة بسرعة مساوية لـ $1.179\frac{m}{s}$. عند هذه القيمة كانت قيمة العزم المؤثر على الرفاص هي $1.136\,[N.m]$.

الجدول 7: نتائج المقاومة وقوة الدفع الناجمة عن الرفاص MP687.

$n\,rps$	$R_T[N]$	$T\,[N]$
7.8	38.15	21.37
10	40.45	40.93

تحسب قيمة دليل كفاءة الطاقة للسفن الموجودة وفق قرار لجنة حماية البيئة البحرية – وفق ما ذكر في المقدمة – استنادا إلى العلاقة التالية [31]:

$$\mathbf{EEXI_{att}} = \frac{(\prod_{j=1}^{n} f_j)(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})\left((\prod_{j=1}^{n} f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)})\, C_{FAE} \cdot SFC_{AE}\right) - (\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} C_{eff(i)} SFC_{ME})}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m} \quad \mathbf{(1)}$$

حيث أن:

$P_{ME(i)}$: 75% من الاستطاعة المستمرة العظمى للمحرك الرئيسي MCR، وتقاس بـ KW

$C_{FME(i)}$: معامل انبعاث غاز CO_2 الخاص بالوقود المستخدم في المحرك الرئيسي، ويقاس بـ gr CO_2/gr fuel

$SFC_{ME(i)}$: الاستهلاك النوعي للوقود للمحرك الرئيسي عند استطاعة تعادل $P_{ME(i)}$، ويقاس بـ gr fuel/KW.h

$P_{AE(i)}$: نسبة من استطاعة المحرك الرئيسي وتعطى بالعلاقة التالية:

$$P_{AE_{(\sum MCR_{(i)}<10{,}000\ kW)}} = \left(0.05 \times \left(\sum_{i=1}^{nME} MCR_{ME(i)} + \frac{\sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)}}{0.75}\right)\right) \quad (2)$$

حيث أن $P_{PTI(i)}$ استطاعة المحرك الإضافي المركب على عمود الرفاص (Shaft motor) وفي حال عدم وجوده تعود قيمته للصفر لتصبح العلاقة على النحو التالي:

$$P_{AE_{(\sum MCR_{(i)}<10{,}000\ kW)}} = \left(0.05 \times \left(\sum_{i=1}^{nME} MCR_{ME(i)}\right)\right) \quad (3)$$

$C_{AE(i)}$: معامل انبعاث غاز CO_2 الخاص بالوقود المستخدم في المحرك المساعد،

$SFC_{AE(i)}$: الاستهلاك النوعي للوقود للمحرك الرئيسي عند استطاعة تعادل 50% من استطاعة MCR_{AE}،

V_{ref}: سرعة السفينة، وتقاس بالعقدة knot =Nm/h

$Capacity$: سعة السفينة والتي تمثل الوزن الميت بالنسبة لسفن ناقلات الصب. وتقاس بالطن ton

$\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} . P_{AEeff(i)}$: معاملات تأثير معدات توفير الطاقة (في حالتنا قيمتها 0)

f_m معامل للسفن التي لها تصنيف ice-class وفي حالة السفينة المدروسة قيمته واحد

f_w معامل الطقس (قيمته واحد في الحالة الطبيعية كالسفينة المدروسة)

f_l معامل تصحيح لسفن البضائع العامة وللسفينة المدروسة (سفينة بضائع صب) قيمته واحد

f_c معامل تصحيح السعة الحجمية في حال وجود حالات خاصة لسعة السفينة وفي الحالة الطبيعية كالسفينة المدروسة قيمته واحد

f_i معامل السعة في حال وجود حالات خاصة لسعة السفينة وفي الحالة الطبيعية كالسفينة المدروسة قيمته واحد

باقي الحدود في العلاقة هي معاملات تستخدم في حالات خاصة كوجود محركات تساعد المحرك الرئيسي على محور الرفاص أو مولدات كهرباء تأخذ حركتها من محور الرفاص وغيرها وهي غير موجودة في حالتنا محور الدراسة وبالتالي يمكن أن تختزل العلاقة السابقة إلى العلاقة التالية:

$$\mathbf{EEXI_{att}} = \frac{\left(0.75 . MCR_{ME(i)} . C_{FME(i)} . SFC_{ME(i)}\right) + \left(0.05 . MCR_{ME(i)} . C_{FAE} . SFC_{AE}\right)}{Capacity \ . \ V_{ref}} \quad (4)$$

وواحدته ***grCo2/ton.Nm*** وعليه فإن زيادة قيمة هذا المعامل يعني زيادة كمية ثاني أوكسيد الكربون المنبعثة لكل وحدة عمل منجز (أي لكل وحدة نقل ممثلة بنقل واحد طن لمسافة ميل بحري واحد***ton.Nm***) أي أنه كلما قلت قيمة هذا المعامل كلما كانت كفاءة الطاقة (التي تقاس بمقدار التلوث الناجم عن انبعاث غاز CO_2 مقدرا بالغرام منه لكل وحدة عمل منجز) أفضل.

$$\mathbf{EEXI_{att}} = \frac{MCR_{ME(i)} \left((0.75 \times \boldsymbol{C_{FME(i)}} \times \boldsymbol{SFC_{ME(i)}}) + (0.05 \,.\, C_{FAE} . SFC_{AE}) \right)}{\boldsymbol{Capacity} \;.\; \boldsymbol{V_{ref}}} \qquad (5)$$

وخلاصة لما سبق، نجد أننا عندما قمنا بالبحث عن قيمة سرعة السفينة الجديدة بوجود الحقن الهوائي والتي يتحقق عندها الدفع يساوي مقاومة السفينة عند نفس العزم المقدم إلى الرفاص (والذي يعادل [m.N] 1.136، وبالتالي عند نفس الاستطاعة للمحرك، أي أن $MCR_{ME(i)}$ ثابتة)، فإن سرعة السفينة ازدادت من $\left[\frac{m}{s}\right]$ 1.179 إلى القيمة $\left[\frac{m}{s}\right]$ 1.42 وعليه يمكن أن نكتب قيمة $EEXI_{att}$ في كل من الحالتين على التوالي على النحو الآتي:

$$\mathbf{EEXI_{att1}} = \frac{MCR_{ME(i)} \left((0.75 \times \boldsymbol{C_{FME(i)}} \times \boldsymbol{SFC_{ME(i)}}) + (0.05 \,.\, C_{FAE} . SFC_{AE}) \right)}{\boldsymbol{Capacity} \times \mathbf{1.179}} \qquad (6)$$

$$\mathbf{EEXI_{att2}} = \frac{MCR_{ME(i)} \left((0.75 \times \boldsymbol{C_{FME(i)}} \times \boldsymbol{SFC_{ME(i)}}) + (0.05 \,.\, C_{FAE} . SFC_{AE}) \right)}{\boldsymbol{Capacity} \times \mathbf{1.420}} \qquad (7)$$

حيث أن

$EEXI_{att1}$: دليل كفاءة الطاقة للسفن الموجودة عند السرعة الأولى (بدون وجود تزليق هوائي)،

$EEXI_{att2}$: دليل كفاءة الطاقة للسفن الموجودة عند السرعة الثانية (بوجود تزليق هوائي)،

بنسبة العلاقتين إلى بعضهما نجد $\frac{\mathbf{EEXI_{att2}}}{\mathbf{EEXI_{att1}}} = \frac{\mathbf{1.179}}{\mathbf{1.420}} = \mathbf{0.83}$، وبالتالي فإن التغير في قيمة دليل كفاءة الطاقة للسفينة عند استخدام تقنية التزليق الهوائي وبوجود الرفاص MP687 هي $\frac{\frac{1}{1.420} - \frac{1}{1.179}}{\frac{1}{1.179}} = -16.97\%$، هذا يعني أن قيمة دليل كفاءة الطاقة للسفينة انخفضت بمقدار 16.97% وهذا يؤدي إلى تحسن كفاءة الطاقة للسفينة (كلما اذادت قيمة الدليل كلما كانت كمية انبعاثات غاز ثاني أوكسيد الكربون أكبر حيث أن واحدة الدليل هي [gr CO2/Ton.Nm] أي كمية غاز ثاني أوكسيد الكربون المنبعثة مقدرة بالغرام لكل وحدة عمل منجز والتي تتحدد بالمسافة المقطوعة (أو السرعة) والوزن الميت للسفينة.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

من خلال ما تقدم يمكن الوصول إلى الاستنتاجات التالية.

- إن التزليق الهوائي يلعب دورا إيجابيا كبيرا في تقليل مقاومة السفينة.

- المحددات البينية ليس لها تأثير على انقطاع طبقة الهواء.
- زيادة ارتفاع المحددات في القسم الأول منها يمنع التسريب الهوائي بشكل كامل.
- وجود الحقن الهوائي يساعد في تحسين كفاءة الطاقة للسفينة.
- تسريب الهواء قبل وصوله إلى الرفاص أمر مهم جداً لأن وصول الهواء إلى الرفاص العامل يؤدي إلى انهيار قيمة الدفع الناتج عن الرفاص.
- الطريقة المقترحة قابلة للتطبيق على أية سفينة صب أو ناقلة نفط موجودة في الخدمة لأن هذا النوع من السفن يملك جزء متوازي كبير.

التوصيات:

- يجب تطبيق هذه التقنية على السفن الموجودة للتقليل من استهلاك الوقود وبالتالي التقليل من التلوث.
- يجب أن تتم مثل هذه الدراسة على أنواع السفن المختلفة من مرحلة التصميم الأولى للسفينة.

التوصيات للأعمال المستقبلية

- إجراء الحسابات مع إعطاء السفينة العديد من درجات الحرية من أجل دراسة تأثير هذه الظاهرة على حركات السفينة الانسحابية والدورانية.

References:

[1] IMO, "2021 GUIDELINES ON THE SHAFT/ ENGINE POWER LIMITATION SYSTEM TO COMPLY WITH THE EEXI REQUIREMENTS AND USE OF A POWER RESERVE," *MEPC.335(76)*, 2021, [Online]. Available: https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Index-of-MEPC-Resolutions-and-Guidelines-related-to-MARPOL-Annex-VI.aspx#4.

[2] IMO, "Mepc.245(66) - 2014 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (Eedi) for New Ships," *Int. Marit. Organ.*, vol. 245, no. April, pp. 1–30, 2014.

[3] R. Latorre, "Ship hull drag reduction using bottom air injection," *Ocean Eng.*, vol. 24, no. 2, 1997, doi: 10.1016/0029-8018(96)00005-4.

[4] Y. Kodama, A. Kakugawa, T. Takahashi, and H. Kawashima, "Experimental study on microbubbles and their applicability to ships for skin friction reduction," in *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2000, vol. 21, no. 5, doi: 10.1016/S0142-727X(00)00048-5.

[5] O. Zverkhovskyi, "Ship drag reduction by air cavities," 2014, [Online]. Available: https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:a5754f75-55c1-4407-bebb-41458e6c9a11.

[6] S. Mizokami, C. Kawakita, Y. Kodan, S. Takano, S. Higasa, and R. Shigenaga, "Experimental study of air lubrication method and verification of effects on actual hull by means of sea trial," *Mitsubishi Heavy Ind. Tech. Rev.*, vol. 47, no. 3, 2010.

[7] J. Jang, S. H. Choi, S. M. Ahn, B. Kim, and J. S. Seo, "Experimental investigation of frictional resistance reduction with air layer on the hull bottom of a ship," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 6, no. 2, 2014, doi: 10.2478/IJNAOE-2013-0185.

[8] H. Wu and Y. Ou, "Analysis of air layer shape formed by air injection at the bottom of flat plate," *Ocean Eng.*, vol. 216, 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.108091.

[9] J. Choi, C. Hsiao, and G. Chahine, "Design trade-off analysis for high performance ship hull with air plenums," in *2nd International Symposium on Seawater Drag Reduction, Busan, Korea, 23-26 MAY*, 2005.
[10] J. K. Choi, C. T. Hsiao, and G. L. Chahine, "Numerical studies on the hydrodynamic performance and the startup stability of high speed ship hulls with air plenums and air tunnels," in *9th International Conference on Fast Sea Transportation, FAST 2007*, 2007.
[11] J. K. Choi, G. L. C.-P. of the 28th S. on Naval, and undefined 2010, "Numerical study on the behavior of air layers used for drag reduction," *academia.edu*, pp. 12–17, 2010, [Online]. Available: https://www.academia.edu/download/43607951/Numerical_Modeling_of_the_behavior_of_Ai20160310-2996-rgmh5q.pdf.
[12] F. Cucinotta, V. Nigrelli, and F. Sfravara, "Numerical prediction of ventilated planing flat plates for the design of Air Cavity Ships," *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, vol. 12, no. 2, 2018, doi: 10.1007/s12008-017-0396-x.
[13] F. Cucinotta, E. Guglielmino, F. Sfravara, and C. Strasser, "Numerical and experimental investigation of a planing Air Cavity Ship and its air layer evolution," *Ocean Eng.*, vol. 152, 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.071.
[14] Tokyo2015, "T2015 - jbc_Geometry." https://www.t2015.nmri.go.jp/jbc_gc.html (accessed Nov. 10, 2024).
[15] Tokyo-2015, "Open Water Tests for JBC (NMRI) MODEL PROPELLER NO.687." 2015, Accessed: 28-Jun-2023. [Online]. Available: https://www.t2015.nmri.go.jp/Instructions_JBC/instruction_JBC_files/Open_Water_Tests_for_JBC_NMRI.txt.
[16] N. Abbas, N. Kornev, I. Shevchuk, and P. Anschau, "CFD prediction of unsteady forces on marine propellers caused by the wake nonuniformity and nonstationarity," *Ocean Eng.*, 2015, doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.06.007.
[17] N. Abbas and N. Kornev, "Study of unsteady loadings on the propeller under steady drift and yaw motion using URANS, hybrid (URANS-LES) and LES methods," *Sh. Technol. Res.*, vol. 63, no. 2, pp. 121–131, May 2016, doi: 10.1080/09377255.2016.1211582.
[18] N. Abbas and N. Kornev, "Validation of hybrid URANS/LES methods for determination of forces and wake parameters of KVLCC2 tanker at manoeuvring conditions," *Sh. Technol. Res.*, vol. 63, no. 2, pp. 96–109, May 2016, doi: 10.1080/09377255.2016.1157275.
[19] N. Abbas, M. Barbahan, Y. Kabrial, and A. Kabrial, "A Novel Approach to Wave Energy Conversion Using CFD Technique," *Polish Marit. Res.*, vol. 31, no. 3, pp. 113–125, Sep. 2024, doi: 10.2478/POMR-2024-0041.
[20] F. J. Mawignon *et al.*, "The optimization of biomimetic sharkskin riblet for the adaptation of drag reduction," *Ocean Eng.*, vol. 275, p. 114135, May 2023, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2023.114135.
[21] S. Oksuz, F. Celik, and S. Bayraktar, "Three-dimensional computational analysis of flow over twisted hydrofoils," *Ocean Eng.*, vol. 267, p. 113304, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2022.113304.
[22] 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.

[23] N. Abbas and A. Afeef, "CFD Study of influence of the drift angles on the flow properties around DARPA Suboff submarine with the propeller," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 45, no. 6, 2023, [Online]. Available: https://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/16057.
[24] A. Zedan and N. Abbas, "Studying the Effect of Stratified Fluid on the Resistance and Flow Field of the KVLCC2 Tanker and DARPA Suboff using CFD," *Tishreen Univ. Journal-Engineering Sci. Ser.*, vol. 46, no. 1, pp. 303–320, 2024, [Online]. Available: https://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/16467.
[25] N. Abbas and A. Taleb, "CFD study of the influence of the roughness and partially submerged propeller on its thrust," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 45, no. 4, 2023, [Online]. Available: https://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/15105.
[26] N. Abbas and R. Deeb, "Study of the impact of brake flaps on ship braking and maneuvering using CFD," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 46, no. 2, 2024, [Online]. Available: https://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/17024.
[27] Tokyo-2015, "A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics." Accessed: 28-Jun-2023. [Online]. Available: https://t2015.nmri.go.jp/jbc.html.
[28] T. 2015, A. W. on CFD, and in S. Hydrodynamics, "Open Water Tests for JBC(NMRI) MODEL PROPELLER NO.687," 2015. .
[29] N. Abbas and N. Al-Aji, "The Influence of Drift Angle on the Flow Field around KVLCC2 Tanker Using CFD," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 44, no. 1, 2022, [Online]. Available: https://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/12043.
[30] V. Bertram, "Practical ship hydrodynamics," 2012, [Online]. Available: https://oss.jishulink.com/upload/201902/9f2221c5d02944beadd421592d0a52f7.pdf.
[31] Marine Environmental Protection Committee, "MEPC.350(78) - GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY EXISTING SHIP INDEX (EEXI)," *IMO Publ.*, vol. 304, no. June, pp. 1–11, 2022, [Online]. Available: https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.350(78).pdf.