

دراسة تأثير أبعاد وشكل المحددات على أداء التزليق الهوائي على سفينة الصب JBC بدون وجود الرفاص باستخدام CFD

- * د. رامي حوا
** د. نوار عباس
*** م. وهاد حاتم

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/٦/١٦ . قُبل للنشر في ٢٠٢٥/٧/٢٨)
□ ملخص □

تم في هذا العمل دراسة تأثير شكل وأبعاد المحددات على فعالية التزليق الهوائي على مقاومة سفينة الصب JBC بدون وجود الرفاص. تم استخدام تقنية الـ CFD من أجل تحقيق هذا الغرض، حيث تم استخدام برنامج الـ ANSYS الذي يوفر استخدام معادلات الـ URANS (Unsteady RANS Averaged Navier Stocks Equation) والموديل الرياضي $k-\omega$ SST لحل معادلات نافيه ستوكس الناظمة للجريانات. تم اختيار سفينة الصب JBC لإجراء هذه الدراسة، وذلك بسبب توفر كم كبير من النتائج التجريبية لهذه السفينة، والتي تساعد في التأكد من جودة النتائج الرقمية التي تم الحصول عليها. في البداية تم إجراء الحسابات على السفينة بدون أية إضافات من أجل معايرة كل من الشبكة والإعدادات الرقمية. المقارنة بين النتائج أظهرت توافق كبير مع النتائج التجريبية. بعد ذلك تم إضافة محدّدات على أسفل وجانبي الجزء المتوازي بارتفاعين مختلفين للمحدّدات، الارتفاع الأول كان 0.25 cm في النموذج، والذي يقابله الارتفاع 10 cm في السفينة الحقيقية، والارتفاع الثاني كان 1.25 cm في النموذج والذي يقابله الارتفاع 50 cm للسفينة الحقيقية. تم إضافة المحددات بعدة طرق، في البداية تم إضافتها بشكل متوازي، ومن ثم تم إضافتها على شكل C، وبعد ذلك تم إضافة جسم حاقل الهواء والذي كان عبارة عن نصف أسطوانة بنصف قطر 0.25 cm. الجزء الأول منه هو عبارة عن مصد للتدفق والجزء الثاني هو حاقل الهواء. تم دراسة تأثير هذه الإضافات على مقاومة السفينة بدون الحقن الهوائي، وكانت المحددات ذات الشكل C والارتفاع 1.25 cm هي الأسوأ حيث تسببت بزيادة في المقاومة بمقدار ١٥,٩٢% بدون وجود جسم الحاقل، وبمقدار ١٦,٢١% مع وجود جسم الحاقل. بعد ذلك تم حقن الهواء لحالة المحددات المتوازية، مما أدى إلى تخفيض المقاومة بمقدار ٣١,٥٩% وهذا يعتبر جيد جدا في المجال البحري لأنه يقلل بشكل كبير من مقدار صرف الوقود وبالتالي من تلوث الهواء الناتج عنه.

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

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

الايمل: dr.ramimostafahawa@tishreen.edu.sy

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

dr.nawarnabilabbas@tishreen.edu.sy

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

wehad.hatem@tishreen.edu.sy

Study of the Effect of Dimensions and Shape of the Air Barriers on the Performance of Air Lubrication for the JBC Bulk Carrier Ship in the Absence of the Propeller Using CFD

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

(Received 16/6/2025 . Accepted 28/7/2025)

□ ABSTRACT □

In this work, the effect of the effect of shape and dimensions of guiding barriers on the sufficiency of air lubrication on the resistance of the JBC bulk carrier ship was studied. The CFD technique was used to achieve this purpose, where the URANS (Unsteady RANS Averaged Navier Stocks Equation) equations and the k- ω SST turbulence model available in Ansys program were used to solve the Navier-Stokes equations. The JBC bulk carrier was chosen to conduct this study, due to the availability of a large number of experimental results for this ship, which helps to verify the quality of the obtained numerical results. Initially, the calculations were performed on the ship without any additions in order to validate both the grid and the numerical settings. The comparison between the results showed a good agreement with the experimental results. Then, Air Barriers were added on the bottom and sides of the parallel body of the ship with two different Air Barriers heights, the first height was 0.25 cm on the model, corresponding to an actual height of 10 cm on the real ship and the second one was 1.25 cm on the model corresponding to an actual height of 50 cm on the real ship. The Air Barriers were added in several ways, first they were added in parallel, then they were added in the form of \supset , and then the air injector body was added which was a half-cylinder with a radius of 0.25 cm, the first part of which is a flow stopper and the second part is the air injector. The effect of these additions on the resistance of the ship without air injection was studied, and the Air Barriers with the form of \supset and the height of 1.25 cm were the worst as they caused an increase in resistance by 15.92% without injector body, and by 16.21% with the injector body. Then air was injected to the case of parallel Air Barriers and the resistance was reduced by 31.59% which is considered very good in the marine field because it greatly reduces the amount of fuel consumption and thus the air pollution resulting from it.

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

* prof. Marine Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University, Latakia, Syria.

Email: dr.ramimostafahawa@tishreen.edu.sy

** Assistant prof. 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

مقدمة

استجابة للمخاطر المتزايدة الناجمة عن زيادة استهلاك الوقود الأحفوري، قامت المنظمة البحرية الدولية بوضع استراتيجية مبدئية لتقليل انبعاثات الغازات الدفيئة (Green House Gases (GHG). تعتبر هذه الاستراتيجية المبدئية الحجر الأساس الذي تم وضعه في خارطة الطريق المعنية بتطوير استراتيجية شاملة للمنظمة البحرية الدولية لتقليل انبعاثات الغازات الدفيئة من السفن. وقد تم اعتماد خارطة الطريق هذه في الجلسة رقم ٧٠ للجنة حماية البيئة البحرية MEPC والتي قررت اعتماد تطبيق الاستراتيجية بداية عام ٢٠٢٣.

سارعت الشركات البحرية والقطاعات المنوطة بصناعة النقل البحري إلى إيجاد الحلول المتنوعة الهادفة إلى تحسين كفاءة الطاقة للسفن، تنوعت الحلول من تغيير لرفاص السفينة برفاص أكثر كفاءة، أو إلى استخدام دهانات ذات معامل احتكاك منخفض نسبياً، أو تحديد استطاعة المحرك باستخدام تقنية تمنع المحرك من زيادة استطاعته عن حد معين.

لجميع هذه الطرق مساوئ غير قليلة، أما المشكلة الأكبر، فتنطوي على أنه من الممكن ألا تجدي هذه الإجراءات نفعا من ناحية الوصول إلى الالتزام بالمعايير المحددة من قبل المنظمة البحرية الدولية، الأمر الذي سيكون موضع الاختبار في أول كشف (سنوي، متوسط أو تجديد) على الشهادة الدولية لمنع تلوث الهواء من السفن IAPPC، وفي حال لم يتم تحقيق هذه المعايير، فلن يتم تصديق أو تجديد هذه الشهادة مما سيمنع السفينة من القيام برحلات دولية وقد يؤدي إلى خروجها خارج الخدمة وبيعها خردة.

من هنا نجد التحدي الكبير أمام موضوع الالتزام بمعايير كفاءة الطاقة آنفة الذكر، مما دفع باتجاه إيجاد حلول أكثر نجاعة وأقل تكلفة لتحسين كفاءة الطاقة للسفينة، والتي يعتبر من أهمها طريقة التزليق الهوائي لبدن السفينة، حيث اعتبرت من أكثر الطرق الواعدة لتخفيض قوى الجر للسفينة.

هناك الكثير من الأبحاث التي تتعلق بموضوع التزليق الهوائي في شتى المجالات البحرية، ويمكن استعراض الآتي منها:

- لقد تم اقتراح بعض المبادئ الأساسية لهذه التقنية في القرن التاسع عشر من خلال Latorre

[1].

- 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 [2].

- قدم Ceccio في عام ٢٠١٠ [3]، تطبيقات مختلفة وشرح مفصل لتوزيع الهواء تحت بدن

السفينة أثناء حقن الهواء. لقد أثبت أن استخدام تجويف سفلي أسفل بدن السفينة مع تقنية التزليق الهوائي هو وسيلة فعالة لتقليل مقاومة الجر للسفينة.

- لقد قام Lay et al. 2010 [4] و Mäkiharju et al. 2012; 2013 [5], [6] بتنفيذ

العديد من التجارب لاختبار تأثير تقنية التزليق الهوائي على تقليل مقاومة السحب لصفحة كبيرة بوجود تجويف في أسفل الصفحة، وتوصل الباحثون إلى أن هذه التقنية بوجود التجويف في أسفل الصفحة تساعد بشكل كبير في تقليل مقاومة الاحتكاك المؤثرة على هذه الصفحة. لقد قام هؤلاء الباحثون في استخدام النتائج التي توصلوا إليها لحساب مقدار توفير الطاقة لسفينة افتراضية.

-بناء على الدراسة التجريبية التي أجراها Slyozkin et al. 2014 [7] على صفيحة مسطحة مع تجويف سفلي في جامعة نيوكاسل، اقترح Butterworth et al. في عام ٢٠١٥ [8] إجراء دراسة تجريبية على نموذج سفينة حاويات بوجود تجويف بأسفل النموذج بمساحة $0.0387 m^2$. نتائج التجربة التي تم إجراؤها أكدت بأن ضخ الهواء أسفل نموذج السفينة يمكن أن يقلل مقاومة الجر من (4-16%). ولقد أثبتت التجربة انخفاض المقاومة بفعل طبقة الهواء وخروج الهواء من أسفل البدن يتأثر بشكل كبير بالتجويف الذي تم إنشاؤه أسفل نموذج السفينة. كما أثبتت هذه الدراسة بأن شكل التصميم وتنفيذه يلعبان دورا كبيرا في التأثير على فعالية تقنية التزليق الهوائي.

-لقد قام Tanaka, et al. عام ٢٠٢٢ [9]، بدراسة تأثير حقن فقاعات الهواء في منطقة الطبقة الحدية المضطربة أسفل نموذج سفينة ذات قاع مسطح بطول ٣٦ متر على تخفيض مقاومة الاحتكاك المؤثرة على بدن السفينة. وقد بينت النتائج أنه عند جر النموذج بسرعة $8 m/sec$ انخفضت مقاومة الجر بنسبة 28% باستخدام تقنية التزليق الهوائي، وعند الحد الأقصى لمعدل تدفق الهواء، من خلال قياس إجهادات القص على السطح السفلي للبدن في مواقع مختلفة تم التوصل إلى أن هذه التقنية قللت خفضت قيمة الإجهادات بنسبة ٥٠% في الجزء الأول من منطقة حقن الهواء وبنسبة ٢٠% في الجزء الأخير. ولقد أثبتت هذه الدراسة أن استمرارية طبقة الهواء والمساحة التي تغطيها من قاع السفينة له تأثير كبير على فعالية هذه التقنية.

-بالإضافة إلى الدراسات التجريبية فإن العديد من الباحثين قاموا بإجراء العديد من الدراسات الرقمية حول فائدة تقنية التزليق الهوائي مع وبدون تجويف. حيث قام الباحث Matveev في العامين ٢٠٠٣ و ٢٠٠٧ [10]، [11] بدراسة هذه التقنية رقميا. حيث قام بدراسة التأثير المتبادل بين الأمواج والتجويف في أسفل البدن. من خلال نتائج هذه الدراسة أثبت Matveev أن شكل التجويف وسرعة السفينة يلعبان الدور الأساسي في التأثير على طبقة الهواء المتشكلة أسفل بدن السفينة. قام نفس الباحث في عام ٢٠١٥ [12] بتطوير كود برمجي خاص به من أجل دراسة وتطوير هذه التقنية من خلال اختبارها على أنواع مختلفة من السفن، وقام بتجريبها على المراكب عالية السرعة.

-قام Kim and Moin في عام ٢٠١٠ [13] بدراسة تأثير وجود طبقة الهواء على معامل الاحتكاك المؤثر على جدار ثابت. وقام الباحثان بمقارنة النتائج التي حصلوا عليها مع النتائج التجريبية المتوفرة، المقارنة بين النتائج أثبتت قدرة تقنية الـ CFD على تحقيق نتائج جيدة جدا في هذا المجال. لقد قام الباحثان بالإضافة لما سبق بدراسة استقرار طبقة الهواء واستمراريتها أسفل السطح والمساحة التي تغطيها وذلك عند نسب مختلفة لكمية الهواء التي يتم ضخها، وتم عند كل نسبة ضخ للهواء دراسة مقدار التغير في معامل الاحتكاك.

-لقد قام Cucinotta et al. في عامي ٢٠١٧ و ٢٠١٨ [14]، [15] بدراسة تأثير تقنية التزليق الهوائي على السلوك الهيدروديناميكي لقارب سريع. لقد تم في هذه الأبحاث استخدام تقنية الـ CFD من أجل تقدير سلوك الطبقة الهوائية في أسفل القارب عند قيم مختلفة لعدد فرود. كما تم تمثيل خطوط التدفق للهواء في أسفل القارب أيضا عند قيم مختلفة لعدد فرود. بالإضافة إلى الحسابات الرقمية قام هؤلاء الباحثون بإجراء تجربة على القارب باستخدام نفس الشروط، وتمت مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها. أظهرت المقارنة توافق جيد جدا بين النتائج الرقمية والتجريبية. هذه الدراسة تساعد وبشكل كبير في تعديل تصميم السفينة بالشكل الأمثل بحيث تحقق تقنية التزليق الهوائي أفضل نتيجة ممكنة.

من خلال ما سبق نجد أن الدراسات المرجعية التي تمت على السفن تمت بهدف تطوير بدن السفينة بوجود التزليق الهوائي من المراحل الأولى في التصميم، وهنا تأتي أهمية هذا البحث.

تحليل ما سبق من الدراسات المرجعية

من خلال استعراض الدراسات المرجعية السابقة، يتضح أن تقنية التزليق الهوائي قد حظيت باهتمام كبير في الأبحاث البحرية نظراً لإمكاناتها الواعدة في تقليل مقاومة الجر وتحسين كفاءة الطاقة للسفن. تطورت هذه التقنية من دراسات نظرية وتجريبية بسيطة إلى تطبيقات عملية معقدة باستخدام نمذجة الـ CFD، مع التركيز على عوامل مثل تصميم التجويف السفلي، معدل تدفق الهواء، واستقرار الطبقة الهوائية.

أظهرت الدراسات التجريبية (مثل [٤]، [٥]، [٧]، [٨] و [٩]) أن استخدام التجويف السفلي مع حقن الهواء يمكن أن يقلل مقاومة الجر بنسب تتراوح بين ٤% إلى ٢٨%، اعتماداً على سرعة السفينة وتصميم النظام. كما أكدت النتائج أن فعالية التقنية تعتمد بشكل كبير على شكل التجويف ومساحة تغطية الهواء تحت البدن. من ناحية أخرى، أثبتت الدراسات الرقمية ([١٠]، [١٥]) قدرة نمذجة الـ CFD على محاكاة سلوك الطبقة الهوائية بدقة، مما يوفر أداة فعالة لتحسين التصاميم قبل التنفيذ المكلف.

على الرغم من هذه النتائج الواعدة، فإن معظم الدراسات ركزت على سفن محددة (مثل القوارب السريعة أو سفن الحاويات) أو نماذج مختبرية، مع ندرة الأبحاث التي تتناول تطبيق التقنية على سفن الصب مثل نموذج JBC المذكور في هذه الدراسة. بالإضافة إلى ذلك، تمت دراسة تأثير التزليق الهوائي عادةً في مراحل التصميم الأولية للسفن، بينما يهدف هذا البحث إلى استكشاف تأثير أبعاد وشكل المحددات على أداء التقنية في ظروف تشغيلية واقعية، مما يمثل إضافة نوعية للأدبيات الحالية.

بالتالي، تسد هذه الدراسة فجوة بحثية من خلال الجمع بين تقنيات ديناميك الموائع الحسابية (CFD) واختبار تطبيقات التزليق الهوائي على سفن الصب، مع التركيز على تحسين المحددات لتعظيم الفعالية وتقليل التكاليف التشغيلية، وهو ما يتوافق مع أهداف المنظمة البحرية الدولية لخفض الانبعاثات.

١. أهمية البحث وأهدافه

تكمين أهمية هذا البحث في:

- إمكانية الوصول إلى طريقة قابلة للتطبيق عملياً، بأقل التكاليف، وذات كفاءة وجدوى أعلى من الطرق الأخرى المتبعة للامتثال لمتطلبات المنظمة البحرية الدولية الخاصة بمعايير كفاءة الطاقة.

- علاوة على ذلك فإن تطبيق هذه الطريقة، في حال إثبات فائدتها، لن يكون معقداً من حيث الترتيبات، ومن الممكن تطبيقها على السفن الموجودة قبل تطبيق معيار الدليل التصميمي لكفاءة الطاقة، وهي السفن التي تواجه مشاكل حقيقية في الالتزام بمعايير المنظمة، من حيث تكاليف الطرق المتبعة (كتغيير الرفاص مثلاً أو تركيب آلية تحدد من استطاعة المحرك الرئيسي)، وأثارها على استهلاك الوقود والسرعات، وهو أمر بالغ الأهمية في سوق الشحن البحري.

- ويأتي عدم التعقيد آنف الذكر، في أن الضغوط المطلوبة لتحقيق عملية التزليق الهوائي غير عالية نسبياً، نظراً لأن هذه الضغوط يجب أن تتغلب على ضغط الماء أسفل بدن السفينة (لا يتجاوز ٠,٥ - ١,٥ بار)

بالإضافة إلى تأمين تدفق هوائي مناسب لاستمرارية جريان الهواء بفاعلية تحت بدن السفينة، بالتالي لن تستهلك الكثير من الطاقة لإدارتها، كما سيتم تركيب مجموعة من المواسير وحواقن الهواء وبعض الملحقات، والتي تشكل منظومة بسيطة نسبيًا.

ويهدف البحث إلى:

-دراسة تأثير تطبيق عملية التزليق الهوائي (Air Lubricating) على تخفيض المقاومات على بدن سفينة الصب JBC وبالتالي الحصول على نفس السرعات عند معدلات استطاعة أقل من محطة الدفع، أو الحصول على سرعات أعلى عند نفس قيم الاستطاعة من المحرك، الأمر الذي من شأنه أن يقلل من استهلاك الوقود من أجل وحدة العمل المنجز وبالتالي تخفيض انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون أي تحسين كفاءة الطاقة، ومقارنة هذا التأثير مع التأثيرات الناجمة عن الطرق المتبعة في السوق العالمية.

- إيجاد طريقة للتزليق الهوائي تستخدم على السفن الموجودة قيد العمل بأقل التكاليف الممكنة وبالشكل الذي يقلل من مقاومة السفينة بما يكفي ليحقق معايير كفاءة الطاقة وفق المتطلبات الدولية.

٢. منهجية البحث

-تحليلية تجريبية في بيئة الـ Fluent الافتراضية.

٣. مواد البحث

يمكن تلخيص المواد التي تم استخدامها في هذا البحث بالتالي:

-النموذج الهندسي لسفينة الصب JBC [16].

-برنامج الـ ANSYS-Fluent.

-طريقة الـ URANS من أجل حل المعادلات الناضجة للتدفق.

-موديل الاضطراب $K - \omega SST$ لإغلاق نظام المعادلات.

-طريقة الـ VOF من أجل حل السطح الحر بين الهواء والماء.

٤. افتراضات البحث

لقد تم في هذا البحث اعتماد مجموعة من الفرضيات من أجل تبسيط عملية الدراسة وهي كما يلي:

-استخدام مبدأ انعكاس الجريان والذي يستخدم في أغلب الدراسات الرقمية في المجال البحري،

حيث يتم تثبيت السفينة وتحريك التدفق بسرعة مساوية لسرعة السفينة.

-دراسة التدفق من غاطس السفينة نحو الأسفل، أي أنه تم إهمال تأثيرات السطح الحر لأن

سرعة الخدمة للسفينة هي عند عدد فرود ٠,١٤٢ والذي يكون عنده مقاومة الأمواج المتشكلة بفعل

البدن صغيرة ويمكن إهمالها بالمقارنة مع المقاومات الأخرى.

-لم يتم أخذ تأثير الأمواج البحرية والتيارات المائية الداخلية بعين الاعتبار.

-السفينة تتحرك إلى الأمام مباشرة ولا يوجد أي انحراف للسفينة.

٥. معادلات رينولدز نافيه ستوكس غير المستقرة URANS

وهي عبارة عن تبسيط لمعادلات نافيه ستوكس، وتعتمد على تمثيل كل متغير في المعادلات بقيمته

الوسطية مضافاً لها التغير الآني لهذا المتغير، وعليه يمكن كتابة هذه المعادلات بالصيغة الوسطية على الشكل

التالي:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial \bar{u}_i \cdot \bar{u}_j}{\partial x_j} = \rho \bar{F}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j') \quad (1)$$

حيث أن u_i' هي قيمة تآرجحات السرعة على المحاور الاحداثية الديكارتية. بينما $\bar{\tau}_{ij}$ يمثل إجهادات القص الصفائحية، وتعطى بالشكل:

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

أما الحد الأخير من المعادلة τ_{ij} فيمثل إجهادات رينولدز المضطربة التي يعبر عنها من خلال مصفوفة الإجهادات التالية:

$$\tau_{ij} = \begin{bmatrix} -\rho \cdot u_x' u_x' & -\rho \cdot u_x' u_y' & -\rho \cdot u_x' u_z' \\ -\rho \cdot u_x' u_y' & -\rho \cdot u_y' u_y' & -\rho \cdot u_y' u_z' \\ -\rho \cdot u_x' u_z' & -\rho \cdot u_y' u_z' & -\rho \cdot u_z' u_z' \end{bmatrix} \quad (3)$$

مصفوفة إجهادات رينولدز المضطربة غير معلومة ويجب حسابها، حيث تجعل نظام المعادلة غير مغلق ومن هنا تتبثق الحاجة لاستخدام موديلات الاضطراب التي تقوم بحساب المصفوفة وإغلاق نظام المعادلات.

١,٥. الموديل الرياضي SST $k - \omega$

يعتمد موديل SST $k - \omega$ المقترح من قبل Menter عام 1993 على دمج اثنين من الموديلات الثنائية المعادلات $k - \omega$ و $k - \epsilon$ للاستفادة من المميزات التي يوفرها كل منهما [17]، من خلال تابع دمج F1 يعمل على تغيير ثوابت المعادلات بحيث يتم تفعيل الموديل $k - \omega$ بجوار الجدار ضمن طبقة تأثير اللزوجة، وبذلك يمكن استخدام الـ SST $k - \omega$ عند أرقام رينولدز المنخفضة دون الحاجة لتوابع تخميد، بعيداً عن الجدار وفي مناطق التيار الحر يتم تفعيل الموديل $k - \epsilon$. يعمل موديل SST $k - \omega$ بشكل جيد في الجريانات الانفصالية حيث يكون تدرج الضغط شديداً [18].

تعطى معادلة الطاقة الحركية حسب نموذج الـ SST $k - \omega$ بالشكل التالي:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

أما بالنسبة لمعدل الانتشار النوعي للطاقة الحركية للاضطراب فيعطى بالمعادلة التالية:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (5)$$

معادلة لزوجة الدوامة μ_t :

$$\mu_t = \frac{\rho \alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, S F_2)}, \quad S = \partial u / \partial y \quad (6)$$

حيث أن:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\}$$

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (v)$$

$$P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$$

علماً أن الثوابت الخاصة بهذا الموديل موضحة في الجدول ١ .

الجدول ١: قيمة الثوابت المستخدمة في الموديل الرياضي SST $k - \omega$ [17].

β^*	α_1	β_1	σ_{k1}	σ_{k2}	$\sigma_{\omega 1}$	α_2	β_2	$\sigma_{\omega 2}$
$\frac{9}{100}$	$\frac{5}{9}$	$\frac{3}{40}$	0.85	1	0.5	0.44	0.0828	0.856

يعطي هذا النموذج نتائج جيدة جدا في المجال البحري وقد تم إثبات ذلك في أعمال سابقة [19]–[22].

٦. الأبعاد الهندسية

٦,١. الأبعاد الهندسية لسفينة الصب JBC

تم استخدام سفينة الصب JBC لأن نموذجها يشابه كل من سفن الصب الموجودة في الخدمة البحرية بالإضافة إلى تشابهها الكبير مع ناقلات النفط الموجودة والتي تشكل جزءا مهما 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 جيد 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 ١ والجدول ٢.

الشكل ١: ناقل الصب JBC [23].

الجدول ٢: الأبعاد الهندسية لسفينة الصب JBC (السفينة الحقيقية والنموذج) [16].

Main particulars	الرمز	الوحدة	Model
Length between perpendiculars	L_{PP}	m	٧
Breadth (molded)	B	m	١,١٢٥
Draft (molded)	d	m	٠,٤١٢٥
Wetted surface area without appendages without appendages	S_w	m^2	١٢,٢٢٢٥٦
Blockage coefficient	C_B	-	0.8216
Froude number	F_r	-	٠,١٤٢
Reynolds number	R_e	-	8.253×10^6

٦,٢. الأبعاد الهندسية للسفينة مع العوارض الجانبية في أسفل الجزء المتوازي

في البداية سيتم إجراء الحسابات للسفينة لوحدها بدون التزليق الهوائي، ولكن سيتم اختبار تأثير المحددات الجانبية على زيادة المقاومة. الهدف الأساسي من إضافة المحددات الجانبية هو محاولة إنشاء تجويف خارجي للسفينة الموجودة من أجل المحافظة على وجود واستمرارية طبقة الهواء أكبر قدر ممكن، حيث أنه لا يمكننا بناء تجويف ضمن القاع للسفن الموجودة، وإنما يتم هذا الأمر حالياً مع السفن التي يتم تصميمها حديثاً. الشكل ٢ يوضح المحددات التي تمت إضافتها في البداية والتي كانت عبارة عن خطين متوازيين في أسفل الجزء المتوازي. وهنا لا بد من التنويه إلى أنه تم استخدام ارتفاعين للمحددات: 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.



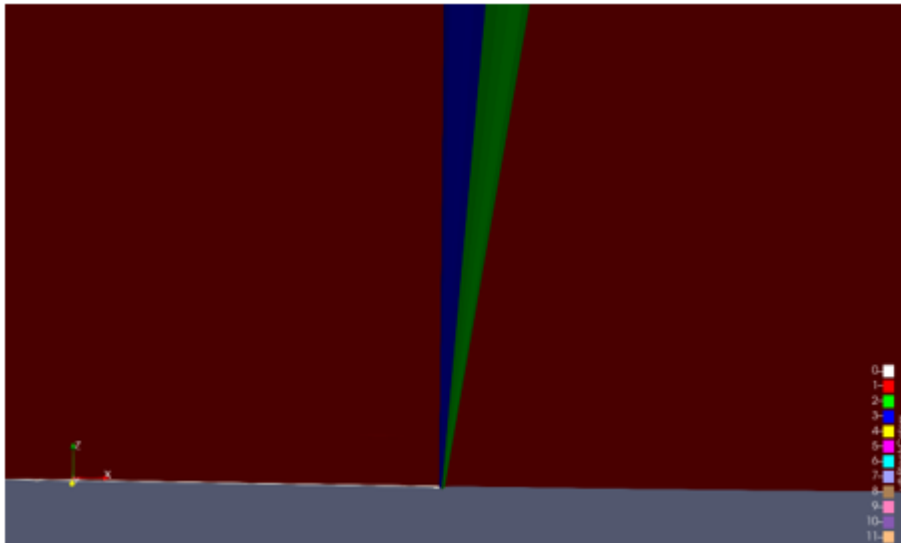
الشكل ٢: إضافة محدّدات خارجية متوازية أسفل وعلى حواف الجزء المتوازي.

في الخطوة التالية تم إضافة الحاقن الهوائي إلى بداية ووسط المحددات، كما هو موضح في الشكل ٣.



الشكل ٣: 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 ٤ ويمثل مصد للتيار، أما الجزء الخلفي وهو اللون الأزرق في الشكل ٤ فهو الجزء الذي يتم منه حقن الهواء.



الشكل ٤: توضع الحاقن الهوائي بين المحددين ذو الارتفاع 10 cm.

طبعا في البداية تم إجراء حساب المقاومة لحالتي المحددات (الارتفاعين) مع وجود الحاقن بدون الضخ الهوائي من أجل حساب تأثير وجود الحاقن على المقاومة. في الخطوة الثالثة من حساب المقاومات تم جعل المحددات على شكل \subset بدون وجود الحاقن بهدف تشكيل تكهف لتجميع الهواء كما هو موضح في الشكل ٥، ومن ثم تم إضافة الحاقن ليتشكل لدينا مستطيل مغلق كما هو موضح في الشكل ٦ وتم الحساب بدون حقن الهواء من أجل معرفة تأثير هذه المجسمات الإضافية على مقاومة السفينة قبل البدء بحقن الهواء.

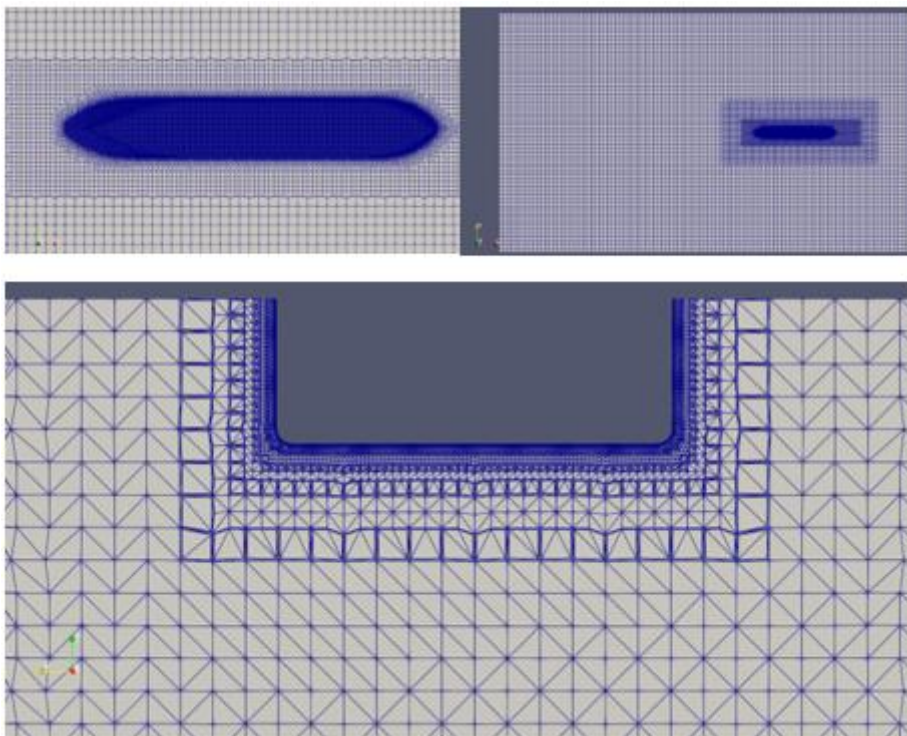
الشكل ٥: جعل المحددات على شكل \subset .

الشكل ٦: المحددات مع الحاقن على شكل مستطيل.

٧. الشبكة الرقمية

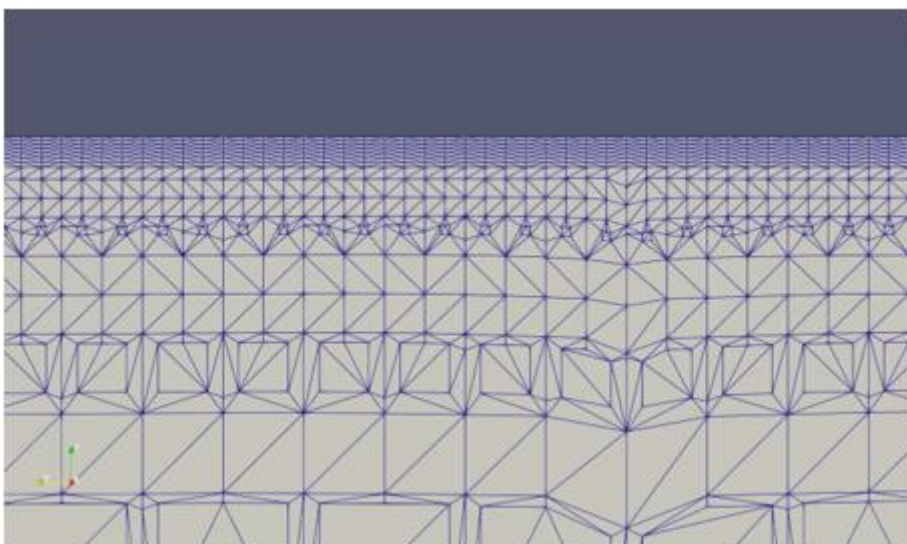
باعتبار الشبكات المنتظمة هي التي تعطي أفضل النتائج في الحسابات الرقمية [22] فلقد تم في هذه الدراسة استخدام هذا النوع من الشبكات. وكما أنها هي الأفضل من ناحية المدة الحسابية، حيث أنها تحتاج إلى وقت أقل لإتمام العمليات الحسابية [21]. يوضح الشكل ٧ الشبكة الرقمية المنتظمة التي تم بناؤها حول بدن

سفينة الصب JBC، وكما هو واضح من الشكل فلقد تم تنعيم الشبكة الرقمية بشكل متدرج، بحيث تكون الخلايا البعيدة عن السفينة كبيرة الحجم ويتم تصغير الخلايا كلما اقتربنا من السفينة.

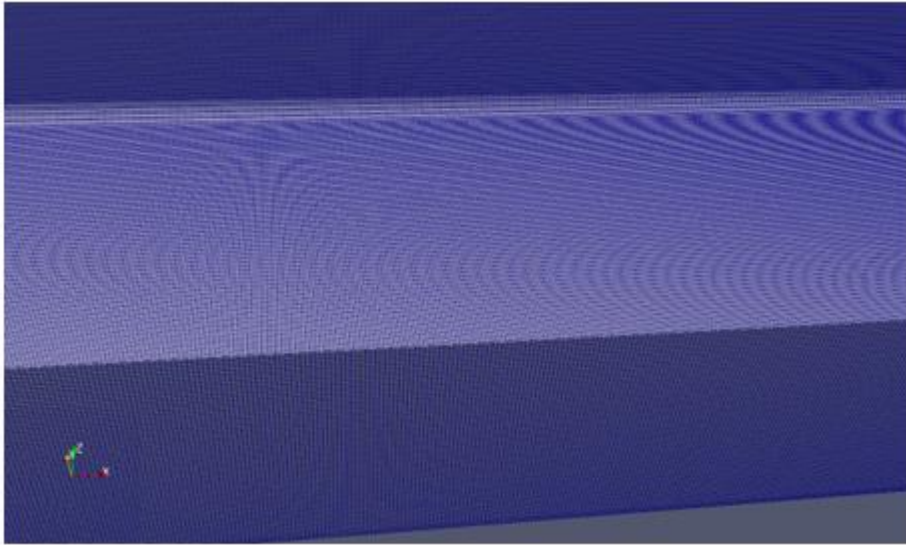


الشكل ٧: الشبكة الرقمية المنتظمة التي تم بناؤها حول بدن نموذج سفينة الصب JBC.

من أجل حل بروفایل السرعة بالشكل الصحيح في منطقة الطبقة الحدية بجوار السفينة تم تنعيم الخلايا في هذه المنطقة مع نسبة نمو للخلايا في الاتجاه العمودي بمقدار ١,٠٥. الشكل 8-a و 8-b يعرضان توزيع الخلايا ضمن الطبقة الحدية وعلى السطح السفلي للسفينة، تم استخدام ١٠ مليون خلية حسابية لحالة السفينة لوحدها.

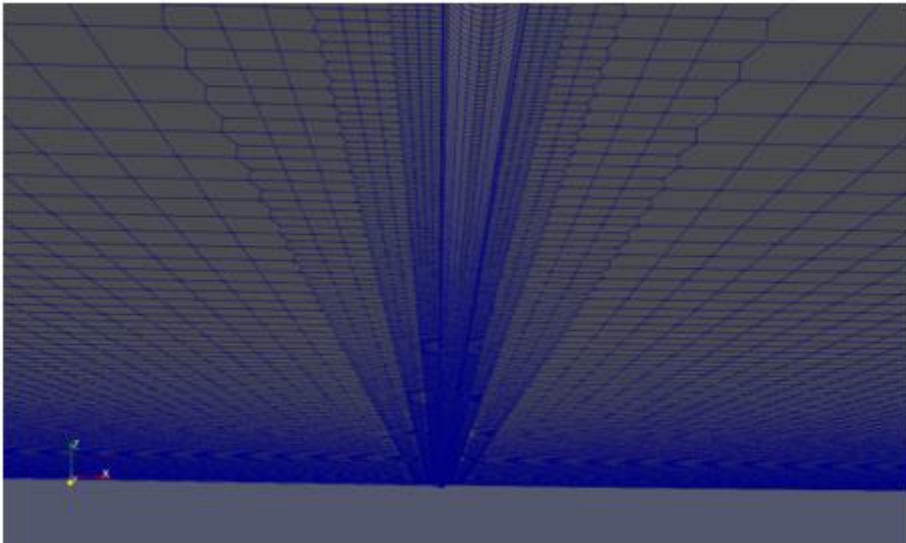


الشكل 8-a: الخلايا ضمن الطبقة الحدية.

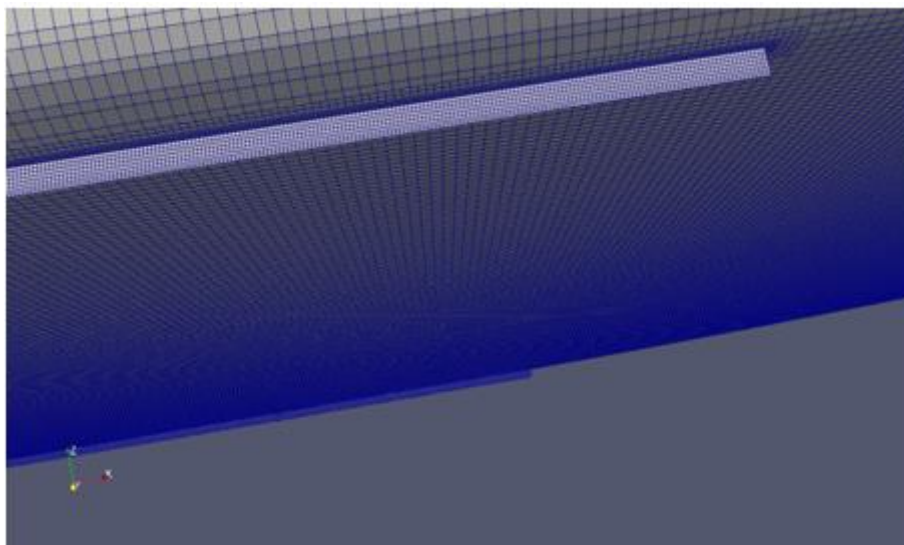


الشكل 9-b: الخلايا على السطح السفلي للسفينة.

وعلى اعتبار أن أبعاد كل من المحددات وحاقن الهواء صغيرة جدا بالمقارنة مع أبعاد السفينة، هذا الأمر يتطلب زيادة في عدد الخلايا وبالأخص على أسطح كل من المحددات والحاقن من أجل تغطيتها بالشكل الصحيح، كما هو موضح في الشكل 10-b و 9-b، ولهذا السبب فإن عدد الخلايا في حالة وجود المحددات والحاقن يصل لحوالي 12 مليون خلية حسابية.

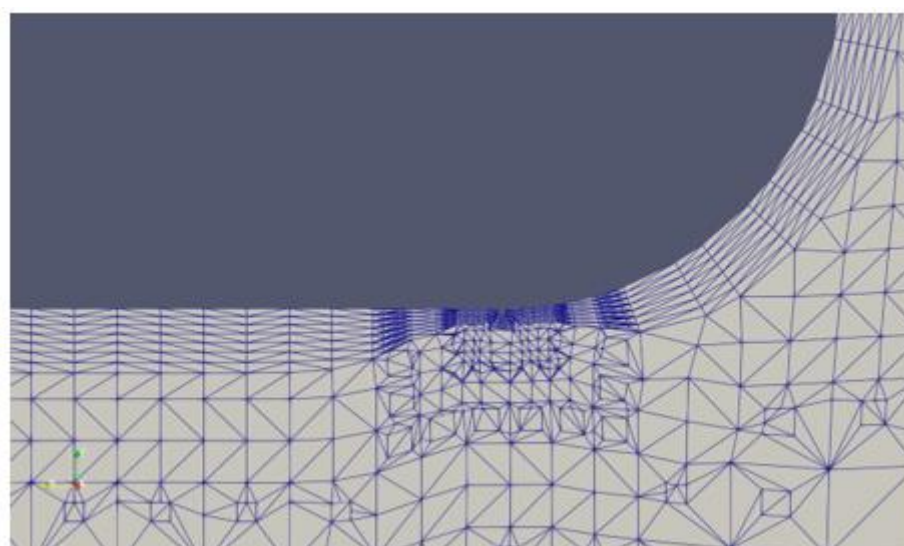


الشكل 9-a: الخلايا ضمن وعلى جانبي حاقن الهواء.



الشكل ١٠-b: تنعيم الخلايا على المحددات.

يوضح الشكل ١١ الطبقة الحدية بجوار المحددات، وكما هو واضح من هذا الشكل تم تنعيم الخلايا بشكل جيد في هذه المنطقة.



الشكل ١١: الطبقة الحدية بجوار المحددات.

٨. الشروط الحدية

يبين الشكل ١٢ المجال الحسابي الذي تم بناؤه حول بدن السفينة. تم اختيار أبعاد المجال الحسابي بما يتوافق مع متطلبات الـ ITTC (International Towing Tank Conference) بحيث تكون الجوانب بعيدة بما يكفي لإزالة تأثيرها عن التدفق حول السفينة. ويجب أن يكون المدخل بعيدا بما يكفي عن السفينة ليحصل استقرار في التدفق القادم. نفس الأمر بالنسبة للمخرج يجب أن يتوضع على مسافة بعيدة من السفينة لكي يتشكل المخر خلف السفينة بشكل صحيح. أبعاد المجال الحسابي بالنسبة لطول السفينة هي كما يلي:

$$L = 5L_{BP}, B = 1.6L_{BP}, T = 2.5L_{BP}$$

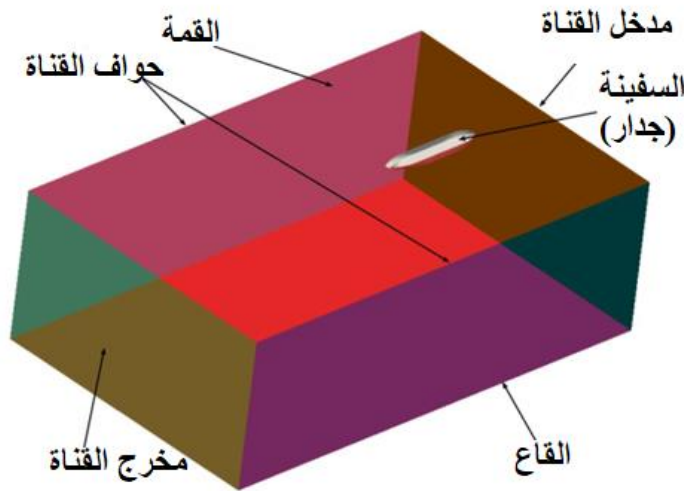
يوضح الجدول ٣ الشروط الحدية التي تم استخدامها لحل المعادلات الناظمة، وقد تم ضبط الشروط

الحدية كما يلي:

الجدول ٣: الشروط الحدية.

السطح	الشروط الحدي
المدخل	Velocity inlet ($V_{water} = 1.179 \frac{m}{s}$) Water Volume Fraction=1
المخرج	Neumann Condition
الجوانب	Wall (V=0 m/s)
القمة	Symmetry
القاع	Wall (V=0 m/s)
الحاقن	Velocity inlet ($V_{air_x} = 1 \frac{m}{s}$) Water Volume Fraction=0

كما هو واضح من الجدول في الأعلى فلقد تم تعريف كل من السفينة وحواف وقاع القناة كجدار، المخرج تم تعريفه كـ (Pressure Outlet) وبالتالي يكون تدرج الضغط معدوم. عند مدخل القناة تم استخدام الشرط الحدي Velocity Inlet وتم إعطاء قيمة لسرعة الماء مساوية لسرعة السفينة، وهنا تم تعريف أن معامل الطور للماء يساوي الواحد وبالتالي لا يدخل على القناة إلا الماء. مخرج الحاقن غير واضح في الشكل ١٢ ولكنه هو الجزء الأزرق في الشكل ٤ تم تعريفه كـ Velocity Inlet، حيث تم إعطاء قيمة للسرعة المحورية في الاتجاه الأفقي فقط وقيمتها $1 \frac{m}{s}$ مع إعطاء قيمة لمعامل الطول للماء مساوية للصفر أي أن المائع الذي يخرج من هذا الحاقن هو الهواء فقط.



الشكل ١٢: الشروط الحدية والمجال الحسابي حول بدن السفينة.

٩. النتائج والمناقشة

إن عملية تقييم النتائج الرقمية تعتبر الخطوة الأولى التي يجب أن يقوم بها الباحث عند استخدامه تقنية الـ CFD من أجل التأكد من أن الشبكة الرقمية والإعدادات التي تم استخدامها دقيقة وتعطي نتائج جيدة وقريبة من الواقع، وعليه فإن أول خطوة في الحسابات هي إجراء الحسابات للحالات التي تملك نتائج تجريبية بهدف معايرة الإعدادات والشبكة الرقمية.

٩,١. تقييم النتائج الرقمية

٩,١,١. تقييم النتائج الرقمية لمقاومة السفينة

كما سلف ذكره، فإن هنالك كما جيداً من النتائج التجريبية والتي تم نشرها في مؤتمر طوكيو ٢٠١٥

[16].

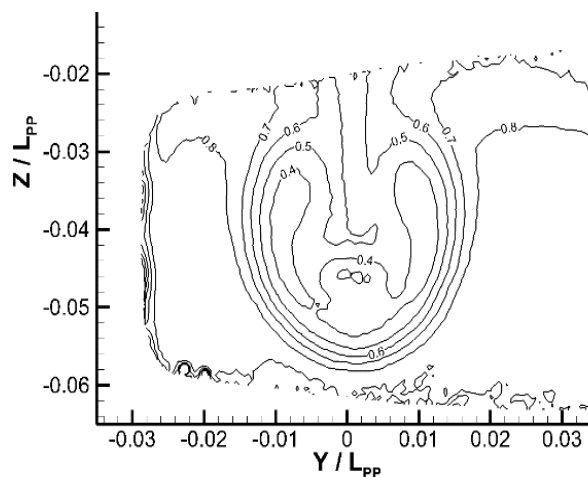
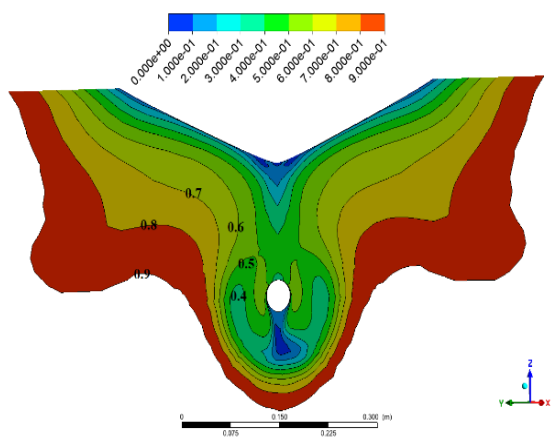
لقد تم إجراء الحسابات الرقمية لحالة نموذج السفينة بمقياس تصغير 1/40 عند قيمة عدد فرود ٠,١٤٢ والذي يقابله سرعة لنموذج السفينة $1.179 \frac{m}{s}$. كما هو واضح من الجدول ٤ فإن قيمة الخطأ هي -1.57% والتي تعتبر مقبولة، وبالتالي فإن الشبكة والإعدادات الرقمية التي تم استخدامها تعطي نتائج جيدة ويمكن اعتمادها في الحسابات اللاحقة التي تخص السفينة والمحددات.

الجدول ٤: مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية لمقاومة السفينة.

Symbol	$R_T [N]$
EFD	36.37
CFD	35.80
Error%	-1.56%

٩,١,٢. تقييم النتائج الرقمية لحقل السرعة

يعرض الشكل ١٣ مقارنة بين النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية لحقل السرعة في مستوى الرفاص. كما هو واضح من هذا الشكل فإن التطابق بين النتائج جيد، وهذا الأمر يؤكد مرة أخرى على أن الإعدادات والشبكة الرقمية التي تم استخدامها يعطيان نتائج جيدة وقريبة جداً من الواقع. حيث نرى في الجهة اليمينية التي تبين النتائج الرقمية كيف تتطور قيم حقل السرعة من ٠,٤ إلى ٠,٨، وشكل هذا التطور وقيمه يتطابقان مع شكل وقيم حقل السرعة في الجهة اليسارية والتي تمثل القيم الناتجة عن المحاكاة الرقمية



الشكل ١٣: مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية لحقل السرعة في مستوى الرفاص.

٩,٢. الحالات التي تمت دراستها

لقد تمت دراسة العديد من الحالات للسفينة مع المحددات وبدونها وكذلك مع حاقن الهواء وبدونه، سنستعرض الجدول التالي للحالات التي تمت دراستها من أجل مقارنتها لاحقاً.

الجدول ٥ : الحالات التي تمت دراستها .

رقم الحالة	توصيف الحالة
Case1	السفينة بدون أية إضافات
Case2	السفينة مع محدّدات متوازية بارتفاع 0.25 cm، كما في الشكل ٢ .
Case3	السفينة مع محدّدات متوازية بارتفاع 1.25 cm، كما في الشكل ٢ .
Case4	السفينة مع محدّدات على شكل \supset وبارتفاع 0.25 cm، كما في الشكل ٥ .
Case5	السفينة مع محدّدات على شكل \supset وبارتفاع 1.25 cm، كما في الشكل ٥ .
Case6	السفينة مع محدّدات متوازية بارتفاع 0.25 cm مع وجود الحاقن الهوائي في بداية ووسط المحددات وبدون حقن هوائي، كما في الشكل ٣ .
Case7	السفينة مع محدّدات متوازية بارتفاع 1.25 cm مع وجود الحاقن الهوائي في بداية ووسط المحددات وبدون حقن هوائي، كما في الشكل ٣ .
Case8	السفينة مع محدّدات على شكل \supset وبارتفاع 0.25 cm مع وجود الحاقن الهوائي في بداية ووسط المحددات وبدون وجود حقن هوائي، كما في الشكل ٦ .
Case9	السفينة مع محدّدات على شكل \supset وبارتفاع 1.25 cm مع وجود الحاقن الهوائي في بداية ووسط المحددات وبدون وجود حقن هوائي، كما في الشكل ٦ .
Case10	السفينة مع محدّدات متوازية وبارتفاع 0.25 cm مع وجود الحاقن الهوائي في بداية ووسط المحددات كما في الشكل ٣ ومع وجود حقن هوائي .
Case11	السفينة مع محدّدات متوازية وبارتفاع 1.25 cm مع وجود الحاقن الهوائي في بداية ووسط المحددات كما في الشكل ٣ ومع وجود حقن هوائي .

٩,٣ . دراسة تأثير المحددات والحاقن على مقاومة السفينة

في البداية كان لا بد من حساب مقاومة السفينة لكل الحالات المعروضة في الجدول ٥ وذلك من أجل معرفة تأثير هذه الإضافات على مقاومة السفينة، وبالتالي إذا كانت الإضافات تسبب زيادة كبيرة في مقاومة السفينة فلا بد من تعديل شكل هذه الإضافات قبل البدء بالتزليق الهوائي .

تمت الدراسة في كل الحالات عند السرعة 1.179 m/s والمقابلة لعدد فroud 0.142 لأن السرعة المقابلة لهذا الرقم هي سرعة الخدمة للسفينة، وهي السرعة التي تعمل عندها السفينة في أغلب أوقات الرحلة .

تم حساب النسبة المئوية للفرق Difference % عن طريق العلاقة التالية:

$$Differnce\% = \frac{R_{TCasei} - R_{TCase1}}{R_{TCase1}} \times 100$$

الجدول ٦ : مقاومة السفينة في كل حالة من الحالات .

Case No.	$R_T [N]$	Difference %
Case1	35.80	[-]
Case2	35.80	0.000%
Case3	35.81	0.023%
Case4	36.00	0.530%
Case5	41.50	15.92%
Case6	35.805	0.014%
Case7	35.82	0.055%
Case8	36.10	0.834%
Case9	41.605	16.21%

كما هو واضح في الجدول ٦ فإن وجود المحددات المتوازية كما في الشكل ٢ بالارتفاعين 0.25, 1.25 cm لا يؤثر تقريباً على المقاومة الكلية للسفينة، والسبب الأساسي لهذا الأمر أن هذه

المحددات ذات سماكة قليلة وهي 0.1 cm في حالة النموذج، والذي يقابلها سماكة 4 cm في حالة السفينة الحقيقية، بالإضافة إلى أن هذه المحددات تتوضع في اتجاه التيار، وبالتالي فإن مساحة المقطع العرضي المواجه للتيار هو 0.025 cm^2 مع المحددات ذات الارتفاع 0.25 cm و 0.125 cm^2 مع المحددات ذات الارتفاع 1.25 cm وذلك بالنسبة للنموذج. هذه العوامل مجتمعة هي السبب الأساسي في أن وجود المحددات المتوازية على أسفل وجانب الجزء المتوازي لا يتسبب بأي زيادة مهمة في مقاومة السفينة. وكما هو واضح من الجدول ٦ فإن المحددات ذات الارتفاع 0.25 cm لا تتسبب في أية زيادة مهمة في المقاومة في حين أن المحددات ذات الارتفاع 1.25 cm تتسبب بزيادة قدرها 0.023% وهي أيضا زيادة ضئيلة جدا.

بالانتقال إلى حالة إضافة الحاقن ولكن بدون حقن هوائي (Case6, Case7) نلاحظ أيضا أن إضافة جسم الحاقن بدون عمل الحاقن يتسبب بزيادة في المقاومة قدرها 0.014% في حالة المحددات ذات الارتفاع 0.25 cm ويتسبب بزيادة قدرها 0.055% في حالة المحددات ذات الارتفاع 1.25 cm، في كلتا الحالتين فإن هذه الزيادات صغيرة جدا ويمكن إهمالها. السبب الأساسي في أن زيادة المقاومة التي يتسبب بها جسم الحاقن صغيرة جدا هو أن الحاقن له شكل انسيابي (نصف اسطوانة) وينصف قطر صغير (10 cm) للسفينة الحقيقية و0.25 cm للنموذج)، كما أن الحاقن يتوضع في بداية وأسطح الجزء المتوازي، وفي هذه المنطقة تكون الطبقة الحدية لا زالت في بداية تشكلها على جسم السفينة ولا زال التدفق صفائحي منتظم في هذه المنطقة، الأمر الذي يساعد في عدم وجود تأثير كبير لجسم الحاقن الانسيابي على زيادة مقاومة الجر. هنا لا بد من التنويه إلى أن الشكل الانسيابي للحاقن يساعد في تفادي تشكل الدوامات خلف جسم الحاقن وبالتالي تقليل المقاومة الناشئة عنه، كما هو موضح في الشكل ١٤.

بالنسبة لحالات إضافة المحددات على شكل (Case4, Case5) فنلاحظ أن وجود المحددات بشكل عرضي في نهاية الجزء المتوازي يتسبب في زيادة ملحوظة للمقاومة وبالأخص في حالة المحددات ذات الارتفاع 1.25 cm، حيث نلاحظ من الجدول ٦ أنه في حالة المحددات ذات الارتفاع 0.25 cm (Case4) تكون زيادة المقاومة 0.530% بينما تتسبب المحددات ذات الارتفاع 1.25 cm وذات الشكل (case5) بزيادة في المقاومة بمقدار 15.92% وذلك بسبب اعتراضها للتيار بشكل كبير وتسببها في انفصال الطبقة الحدية وتشكل الدوامات (الشكل ١٥) الأمر الذي يتسبب في زيادة مقاومة الجر للسفينة. الزيادة التي تتسبب بها المحددات ذات الارتفاع 0.25 cm وذات الشكل (Case4) قليلة ويمكن اعتبارها مقبولة، بينما الزيادة التي تتسبب بها المحددات في الحالة Case5 هذه زيادة كبيرة جدا ولا يمكن قبولها وبالأخص مع ملاحظة أن هذه الزيادة تزداد بوجود جسم الحاقن لتصبح بمقدار 16.21% في الحالة Case9، بينما في الحالة Case8 نلاحظ أن وجود جسم الحاقن مع المحددات ذات الشكل (Case4) وذات الارتفاع 0.25 cm لا يزيد كثيرا من المقاومة حيث أن الزيادة هي بمقدار 0.834% فقط.

من خلال النتائج المعروضة في الجدول ٦ يمكننا استنتاج التالي:

- ✓ المحددات المتوازية ليس لها أي تأثير سلبي ملحوظ على مقاومة الجر مع كلا الارتفاعين المدروسين 0.25, 1.25 cm.
- ✓ وجود جسم الحاقن مع المحددات المتوازية لا يؤثر بشكل سلبي على المقاومة وبالتالي فإن حالة المحددات المتوازية (التموضعة بشكل طولي) أفضل من أجل الحقن الهوائي، وسيتم اختيار الأفضل تبعا

لاستمرارية طبقة الهواء أسفل بدن السفينة، لأنه من المتوقع أن يحدث تسريب لطبقة الهواء مع المحددات ذات الارتفاع القليل، والذي يمكن تعديبه مع المحددات ذات الارتفاع الأكبر.

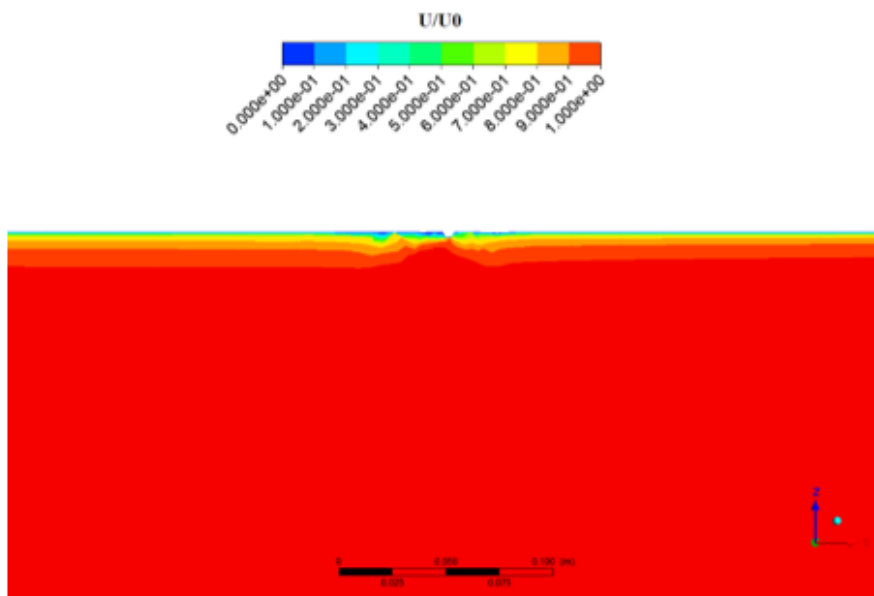
✓ إن استخدام المحددات على شكل D بارتفاع 0.25 cm لا يزيد كثيرا في المقاومة حتى مع وجود جسم الحاقن وبالتالي إذا حافظت هذه المحددات على استمرارية طبقة الهواء أسفل السفينة فستكون هي الخيار الأفضل لأنه في هذه الحالة نكون قد صنعنا كهف خارجي على سفينة موجودة من أجل ضخ الهواء فيه بشكل مستمر.

✓ إن استخدام المحددات على شكل D بارتفاع 1.25 cm يزيد كثيرا في المقاومة وبالتالي فإنها ليست خيار يمكن اختباره لأن الحقن الهوائي في هذه الحالة سيضيع قسم كبير من فائدته من أجل تعويض هذه الزيادة الكبيرة في المقاومة.

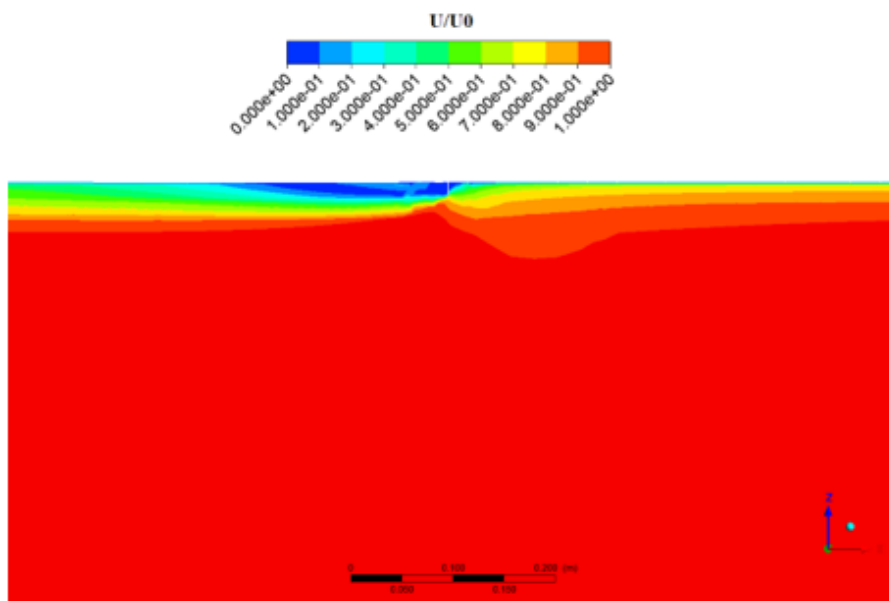
٩،٤. تأثير الحقن الهوائي على مقاومة السفينة

سيتم هنا العمل وفق الخطوات التالية:

- ١- في البداية سيتم حقن الهواء لكل من الحالتين Case10, Case11 وهي حالات المحددات المتوازية مع وجود الحاقن في بداية ووسط المحددات.
- ٢- في حالة لم يتم تسريب الهواء من المحددات ذات الارتفاع 0.25 cm (Case10) فسيتم حساب المحددات في الحالة Case8 ولكن مع وجود الحقن الهوائي.



الشكل ١٤: تأثير جسم الحاقن على توزيع السرعة ضمن الطبقة الحدية.



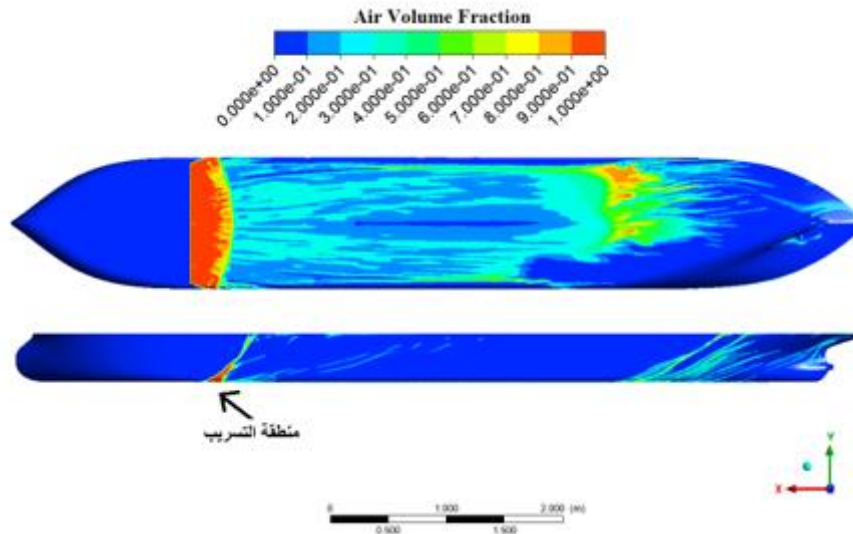
الشكل ١٥: انفصال الطبقة الحدية بفعل المحددات ذات الارتفاع 1.25 cm وذات الشكل د.

الجدول ٧ يعرض تأثير الحقن الهوائي على مقاومة السفينة لكل من الحالتين Case10 و Case11 وهي الحالات التي تحوي محدّدات متوازية مع حقن هوائي. كما نلاحظ من هذا الجدول، إن وجود التزليق الهوائي يقلل من قيمة مقاومة السفينة بالمقارنة بنفس الترتيبات ولكن بدون تزليق هوائي، وكما هو واضح من هذا الجدول فإن عملية التزليق بوجود المحددات ذات الارتفاع 0.25 cm خفضت المقاومة بمقدار 6.73% في حين أنه في حالة المحددات ذات الارتفاع 1.25 cm فقد وصل انخفاض المقاومة إلى 31.59% وهي قيمة جيدة جدا وتساعد في تحسين سرعة السفينة بمقدار كبير عند نفس الاستطاعة المقدمة من المحرك، وهذا الأمر ينعكس في تقليل تلوث الهواء الناتج عن السفينة.

الجدول ٧: تأثير الحقن الهوائي على مقاومة السفينة.

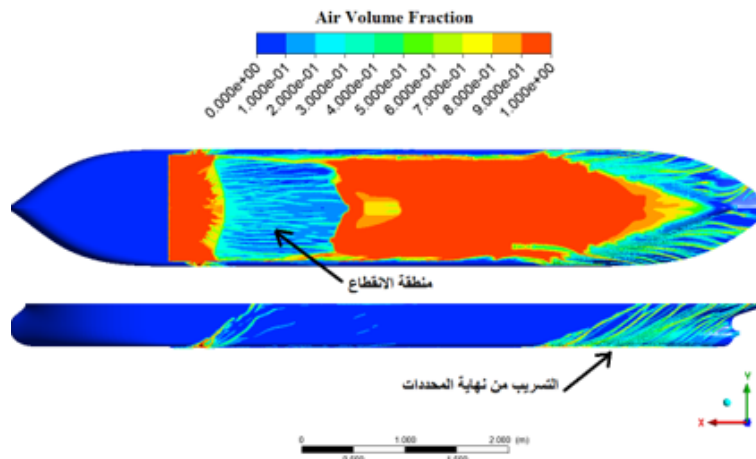
Case No.	$R_T [N]$	Difference%
Case1	35.80	[-]
Case10	33.39	-6.73 %
Case11	24.49	-31.59%

السبب الأساسي لانخفاض المقاومة في الحالة Case10 فقط بمقدار 6.73% هو أن ارتفاع المحددات غير كاف لحبس طبقة الهواء أسفل السفينة، الأمر الذي ينتج عنه تسرب كبير في طبقة الهواء من أسفل السفينة، وبالتالي تقليل فعالية التزليق الهوائي، كما في الشكل ١٦. حيث نلاحظ أن الهواء يتسرب من بداية المحددات الأمر الذي يمنع تشكيل طبقة هوائية أسفل السفينة وبالتالي فقدان فعالية التزليق الهوائي.

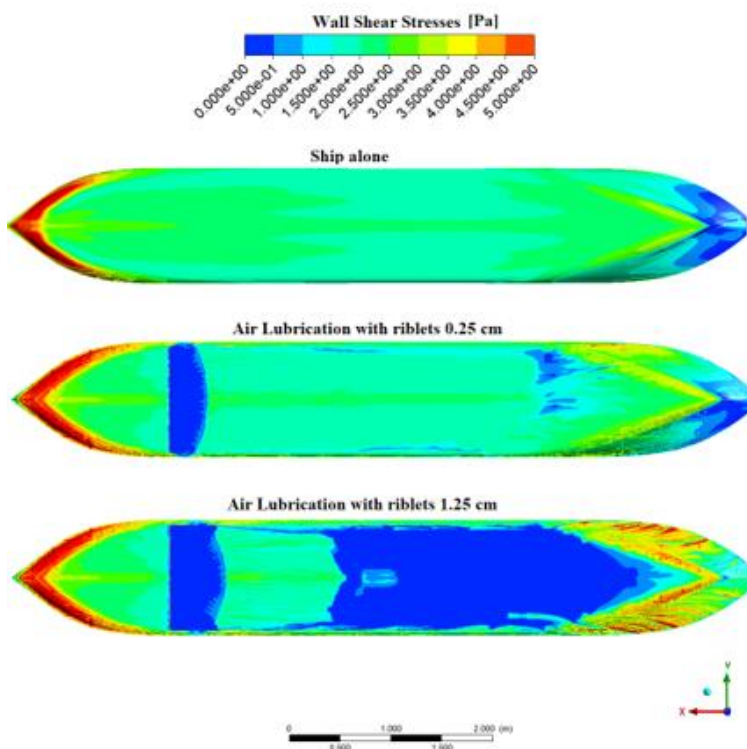


الشكل ١٦: تسرب الهواء في بداية المحددات ذات الارتفاع 0.25 cm .

في حالة المحددات ذات الارتفاع 1.25 cm نلاحظ أن الهواء يتجمع بالشكل الصحيح أسفل المحددات ويشكل طبقة هوائية على الجزء السفلي من الجسم المتوازي لبدن السفينة الأمر الذي ينتج عنه تقليل مقاومة الجر للسفينة بحدود 31.59% ، كما هو موضح في الشكل ١٧.



الشكل ١٧: تشكل طبقة هوائية أسفل الجزء المتوازي بين المحددات (بارتفاع 1.25 cm) وتسريبها من نهايتها بشكل أساسي.



الشكل ١٨: انخفاض إجهادات الاحتكاك على الجدار في أسفل الجزء المتوازي بوجود التزليق الهوائي.

من الشكل ١٧ نلاحظ وجود تسريب بسيط في الهواء في بداية المحددات ولكن أقل من حالة المحددات ذات الارتفاع 0.25 cm، كما نلاحظ أن التسريب الأساسي يكون بعد المحددات ويحدث على جانبي مؤخرة السفينة.

إن وجود الهواء في الماء في منطقة الاحتكاك مع البدن سيقل بشكل كبير من إجهادات الاحتكاك التي تحدث بين البدن والماء، وهذا سيتسبب في تقليل المقاومة بشكل كبير. يعرض الشكل ١٨ كيف تنخفض قيمة إجهادات الاحتكاك بشكل كبير في الجزء السفلي من أسفل منطقة الجزء المتوازي من البدن.

بناء على ما سبق فإن المحددات ذات الارتفاع 0.25 cm غير جيدة لعملية التزليق الهوائي وبالتالي لا يوجد داعي لأن يتم حساب المحددات على شكل Γ بوجود التزليق الهوائي.

٩,١. تسريب الهواء قبل وصوله إلى الرفاص

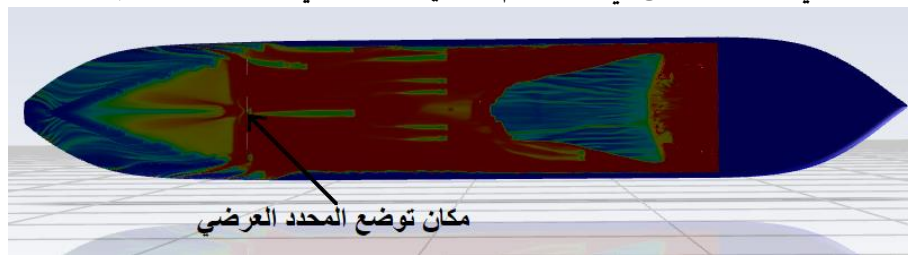
بعد أن تم الانتهاء من دراسة الحالات السابقة والتي تم فيها اختيار أفضل شكل للمحددات الجانبية (وهي المحددات ذات الارتفاع الزائد عند مقدمتها) ولسرعة الحقن وهي السرعة المساوية لـ 85% من سرعة السفينة (السرعة $1 \left[\frac{m}{s} \right]$) وقبل الانتقال إلى مرحلة الحسابات مع الرفاص كان لا بد من التخلص من الهواء 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 ١٩ وبارتفاعين مختلفين وهما 0.5, 1.25 cm ولكن في كلتا الحالتين تم ملاحظة تسريب الهواء بعد المحدد العرضي، كما هو موضح في الشكل ٢٠. 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 ١٩: محدّد عمودي على اتجاه التدفق في نهاية القسم المتوازي من أجل تسريب الهواء قبل دخوله إلى منطقة عمل الرفاص.

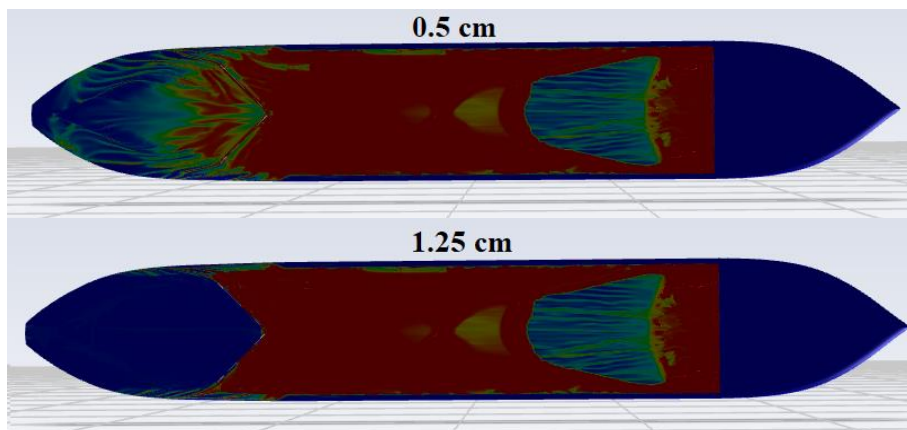


الشكل ٢٠: دور المحدد العرضي في تسريب الهواء.

في الحالة الثانية والتي تم فيها استخدام محدّد من النوع V (كما هو موضح في الشكل ٢١) لوحظ أنه مع الارتفاع القليل للمحدّد 0.5 cm كان هناك تسريب هوائي إلى منطقة عمل الرفاص كما هو موضح في الشكل ٢٢. ومع الارتفاع 1.25 cm للمحدّد تم منع الهواء بشكل كامل من الذهاب إلى منطقة عمل الرفاص، حيث أن مقاومة الهواء للانحراف بزاوية ٤٥ درجة أقل بشكل كبير من مقاومة الهواء للانحراف بزاوية قدرها ٩٠ درجة. إضافة المحددات على شكل حرف V في نهاية الجزء المتوازي لم تؤثر أبداً بشكل سلبي على فعالية التزليق الهوائي.



الشكل ٢١: محدّدات على شكل حرف V في نهاية القسم المتوازي من أجل تسريب الهواء قبل دخوله إلى منطقة عمل الرفاص.



الشكل ٢٢: دور المحدد V في تسريب الهواء بارتفاعين 0.5 cm و 1.25 cm

١٠. الاستنتاجات والتوصيات

١٠,١. الاستنتاجات

– إن التزليق الهوائي يلعب دورا إيجابيا كبيرا في تقليل مقاومة الجر للسفينة.
 – ارتفاع المحددات أمر مهم جدا من أجل الحفاظ على وجود الطبقة الهوائية أسفل السفينة، حيث أن الارتفاع 0.25 cm يعتبر غير كاف في حالة نموذج سفينة الصب JBC والذي يقابله ارتفاع 10 cm على السفينة الحقيقية، والذي أدى في حال وجود التزليق الهوائي إلى إنقاص مقاومة الجر بمقدار 6.37% فقط.
 – ارتفاع المحددات 1.25 cm يعتبر جيد من أجل المحافظة على طبقة الهواء أسفل السفينة، وهذا الارتفاع يقابله ارتفاع للمحددات بمقدار 50 cm على السفينة الحقيقية، حيث أدى إلى إنقاص مقاومة الجر بمقدار 31.09%

– الطريقة المقترحة قابلة للتطبيق على أية سفينة صب أو ناقلة نفط موجودة في الخدمة لأن هذا النوع من السفن يملك جزء متوازي كبير.

١٠,٢. التوصيات

– من الممكن تطبيق هذه التقنية على السفن الموجودة للتقليل من استهلاك الوقود وبالتالي توفير في التكاليف والتقليل من التلوث.
 – يُقترح أن تتم مثل هذه الدراسة على أنواع السفن المختلفة خلال مرحلة التصميم الأولى للسفينة.
 – إضافة الرفاص وتحديد مقدار التحسن في كفاءة الطاقة بوجود التزليق الهوائي، ودراسة تأثير التزليق الهوائي على أداء الرفاص.
 – دراسة تأثير وجود المحددات، خصوصا ذات الارتفاعات الكبيرة نسبيا على الدرفة العرضية للسفينة.
 – دراسة تأثير تشغيل الضواغط اللازمة لضخ الهواء أسفل بدن السفينة وضمان استمراريته على استهلاك الوقود.
 – دراسة تأثير الأمواج البحرية والتيارات المائية على فعالية التزليق الهوائي.

References

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] S. L. Ceccio, "Friction drag reduction of external flows with bubble and gas injection," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 42. 2010, doi: 10.1146/annurev-fluid-121108-145504.
- [4] K. A. Lay, R. Yakushiji, S. Mäkiharju, M. Perlin, and S. L. Ceccio, "Partial cavity drag reduction at high reynolds numbers," *J. Sh. Res.*, vol. 54, no. 2, 2010, doi: 10.5957/jsr.2010.54.2.109.
- [5] S. A. Mäkiharju, M. Perlin, and S. L. Ceccio, "On the energy economics of air lubrication drag reduction," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 4, no. 4, 2012, doi: 10.3744/jnaoe.2012.4.4.412.
- [6] S. A. Mäkiharju *et al.*, "On the scaling of air entrainment from a ventilated partial cavity," *J. Fluid Mech.*, vol. 732, 2013, doi: 10.1017/jfm.2013.387.
- [7] A. Slyozkin, M. Atlar, R. Sampson, and K. C. Seo, "An experimental investigation into the hydrodynamic drag reduction of a flat plate using air-fed cavities," *Ocean Eng.*, vol. 76, 2014, doi: 10.1016/j.oceaneng.2013.10.013.
- [8] J. Butterworth, M. Atlar, and W. Shi, "Experimental analysis of an air cavity concept applied on a ship hull to improve the hull resistance," *Ocean Eng.*, vol. 110, 2015, doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.10.022.
- [9] T. Tanaka, Y. Oishi, H. J. Park, Y. Tasaka, Y. Murai, and C. Kawakita, "Frictional drag reduction caused by bubble injection in a turbulent boundary layer beneath a 36-m-long flat-bottom model ship," *Ocean Eng.*, vol. 252, May 2022, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2022.111224.
- [10] K. I. Matveev, "On the limiting parameters of artificial cavitation," *Ocean Eng.*, vol. 30, no. 9, 2003, doi: 10.1016/S0029-8018(02)00103-8.
- [11] K. I. Matveev, "Three-dimensional wave patterns in long air cavities on a horizontal plane," *Ocean Eng.*, vol. 34, no. 13, 2007, doi: 10.1016/j.oceaneng.2006.08.015.
- [12] K. I. Matveev, "Hydrodynamic modeling of semi-planing hulls with air cavities," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 7, no. 3, 2015, doi: 10.1515/ijnaoe-2015-0036.
- [13] D. Kim and P. Moin, "Direct numerical study of air layer drag reduction phenomenon over a backward-facing step," *Stanford.Edu*, 2010.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Tokyo2015, "T2015 - jbc_Geometry." https://www.t2015.nmri.go.jp/jbc_gc.html (accessed Nov. 10, 2024).

[17] F. R. Menter, "Zonal two equation κ - ω turbulence models for aerodynamic flows," in *AIAA 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference*, 1993.

[18] 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.

[19] R. Hawa, N. Abbas, and W. Hatem, "Study of the forces affecting the KVLCC2 tanker and the propeller MP687 using the Verification and Validation procedure and CFD," *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/15634>.

[20] 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.

[21] 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>.

[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] Tokyo-2015, "A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics." Accessed: 28-Jun-2023. [Online]. Available: <https://t2015.nmri.go.jp/jbc.html>.