Impact Analysis of Riblets on Drag Resistance of a Semi-Submerged Plate Using CFD

Dr. Michel Barbahan*
Nermin Al-Aje**

(Received 12 / 2 / 2025. Accepted 30 / 4 / 2025)

□ ABSTRACT □

In this research, CFD technique was used to reduce the resistance of a partially submerged plate by using the so-called shark skin technique, which is based on the principle of having regular channels on the surface of the plate in order to regulate the flow and reduce the disturbances in the crossflow on the surface of the plate, which results in reducing the transverse friction stresses, which leads to reducing the resistance. The URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier Stocks) method and the k-ω SST turbulence model were used to solve the flow regulating equations available in the Ansys program. Many cases were tested. In the first stage, the efficiency of the grid and the numerical settings were validated by comparing their results with the available experimental results. Then, sets of channels were added to the upper part of the submerged section of the plate, and in the final step, channels were added to the all-submerged part. The calculations were performed at two values of velocity 2.0 and 3.85 m/s. The resistance and crossflow on the plate surface were calculated for all the studied cases. The best resistance reduction was obtained with the case of the channels over the all-submerged body and the velocity of 3.85 m/s where the resistance reduction reached 3.75%.

Keywords: Submerged plate, Shark skin, Riblets, CFD, ANSYS, Fluent, URANS, K – ω SST.

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

*Prof.، Marine Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University, Latakia, Syria. Email: dr.michelyouzefbarbahan@tishreen.edu.sy
** PhD Student, Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University, Latakia, Syria. Email: nrmeen.alajy@tishreen.edu.sy

دراسة تأثير المجاري على مقاومة السحب لصفيحة مستوية مغمورة جزئيا من خلال استخدام تقنية الـ CFD

د. ميشيل بربهان*

نرمين العجي **

(تاريخ الإيداع ١٢ / ٢ / ٢٠٢٥. قُبِل للنشر في ٣٠/ ٤ / ٢٠٢٥)

ملخّص

تم في هذا البحث استخدام تقنية CFD من أجل العمل على تقليل المقاومة لصفيحة مغمورة جزئيا باستخدام ما يسمى تقنية جلد القرش (Shark skin) والتي تقوم على مبدأ وجود مجاري منتظمة على سطح الصفيحة من أجل تنظيم التدفق والتقليل من الاضطرابات في التدفق العرضي على سطح الصفيحة والذي ينتج عنه التقليل من اجهادات الاحتكاك العرضية وهذا يؤدي إلى تقليل المقاومة بنسبة معينه. تم استخدام طريقة الـ URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier Stocks) ومودیل الاضطراب k-ω SST من أجل حل المعادلات الناظمة للتدفق والمتوفرة ضمن برنامج الـ Ansys. تم اختبار العديد من الحالات، ففي المرحلة الأولى تم اختبار كفاءة الشبكة والإعدادات الرقمية من خلال مقارنة نتائجها مع النتائج التجريبية المتوفرة ومن ثم تم إضافة عدة مجموعات من المجاري إلى الجزء العلوي من القسم المغمور من الصفيحة وفي الخطوة الأخيرة تم إضافة مجاري على كامل الجزء المغمور، وتم إجراء الحسابات عند قيمتين للسرعة وهما $2.0, 3.85 \frac{m}{s}$. تم حساب المقاومة والتدفق العرضي على سطح الصفيحة لكل الحالات المدروسة. أفضل نسبة لتقليل المقاومة تم الحصول عليها كانت مع حالة المجاري على كامل الجسم المغمور والسرعة $3.85 \frac{m}{s}$ حيث وصلت نسبة تقليل المقاومة إلى ٣,٧٥%.

الكلمات المفتاحية: صفيحة مغمورة جزئيا، جلد القرش، المجاري، ميكانيك الموائع الحسابية، برنامج الـ Ansys، برنامج الـ Fluent، طريقة الـ URANS، موديل الاضطراب K-ω SST.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- 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.michelyouzefbarbahan@tishreen.edu.sy

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

مقدمة:

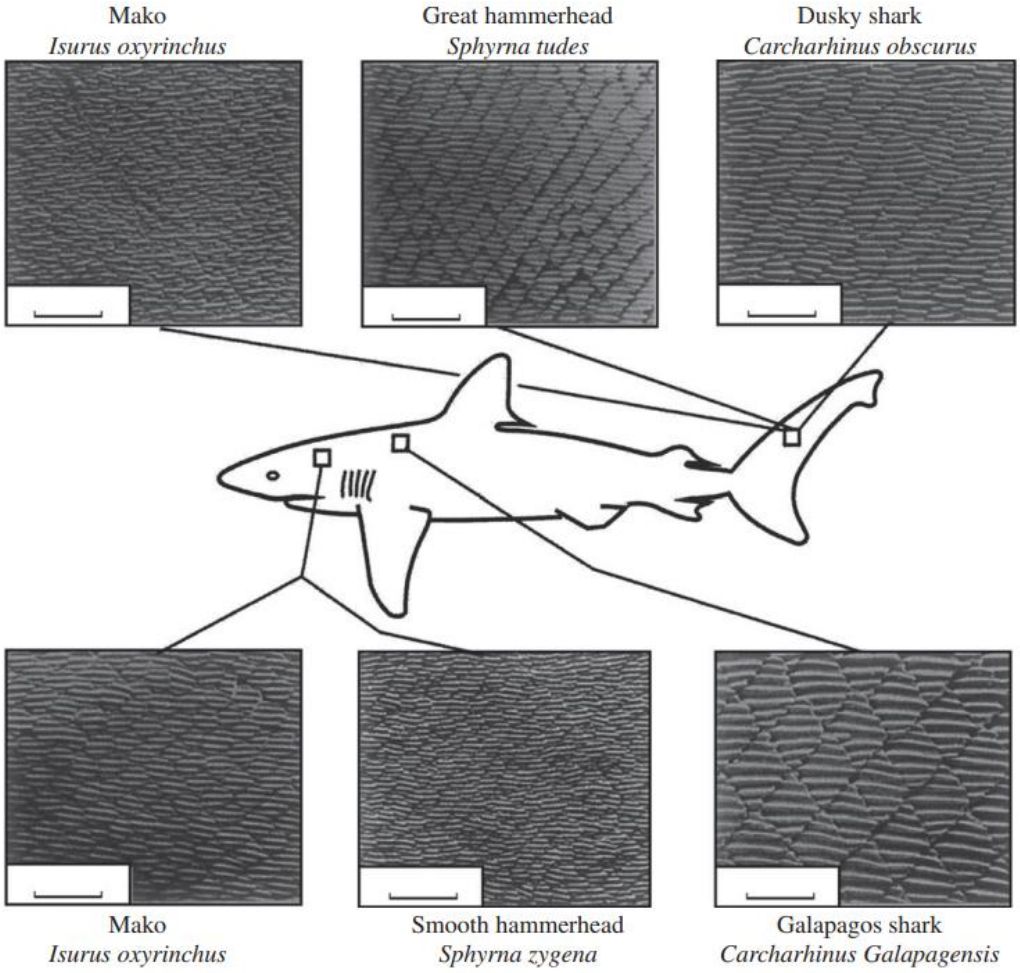
الطبيعة مليئة بأمثلة للهياكل والمواد والأسطح التي يمكن استغلال سماتها للتطبيق التجاري. علم المحاكاة الحيوية (تقليد علم الأحياء) هو دراسة الخصائص الطبيعية للنباتات والحيوانات لغرض تقليد علم الأحياء من حلال تقليد تصميمها. من خلال دراسة وفهم آليات الظواهر الطبيعية، قد نتمكن من إعادة إنتاج هذه الظواهر عند الطلب. أوراق اللوتس، أحد الأمثلة على السطح بسمات طبيعية مرغوبة في تطبيقات أخرى، تمتلك بنية سطح هرمية تسبب سلوكًا فائق الكراهية للماء [3]–[1]. وهذا يسمح للماء الذي يتلامس مع السطح بالتدحرج بسهولة، والتقاط جزيئات الأوساخ وتنظيف السطح على طول الطريق.

الوزغات (geckos): تمتلك الوزغات، التي يمكنها أن تتسلق الجدران وتتدلى رأسًا على عقب، بنية هرمية تمنحها قدرة فائقة على الالتصاق يمكن التحكم فيها بأقدامها [5] ,[4]. ومن خلال إنشاء هذه الأسطح فائقة الالتصاق الاتجاهية على أرجل الروبوت، من الممكن إنشاء روبوت يمكنه تسلق الجدران مثل الوزغ [6].

كما ابتكرت الطبيعة طرقًا لتقليل مقاومة السحب في تدفق السوائل، وهو ما يتجلى بوضوح في الحركة الفعّالة للأسماك والدلافين وأسماك القرش. يتسبب المخاط الذي تفرزه الأسماك في تقليل مقاومة السحب أثناء تحركها عبر الماء، كما يحمي الأسماك من التآكل، من خلال جعل الأسماك تنزلق عبر الأشياء بدلاً من الخدش، ويحميها من الأمراض، صعوبة التصاق الكائنات الحية الدقيقة بسطح السمكة [7]. ومن المعروف منذ سنوات عديدة أنه بإضافة بضع مئات من الأجزاء في المليون من الغوار، وهو بوليمر طبيعي، يمكن تقليل الاحتكاك في تدفق الأنابيب بنسبة تصل إلى الثلثين. وتوفر البوليمرات الاصطناعية الأخرى فائدة أكبر [8]. كما تمت دراسة الجلد المرن للدلافين لخصائص تقليل السحب. حيث أنه من خلال الاستجابة لتقلبات الضغط عبر السطح، فقد ثبت أن وجود مادة مرنة تفيد في تتدفق السوائل على سطح الجسم. على الرغم من أن الدراسات المبكرة أظهرت فوائد كبيرة في تقليل السحب، إلا أن الدراسات اللاحقة لم تتمكن إلا من تأكيد تقليل السحب بنسبة ٧% [9].

هناك مجموعة أخرى من الحيوانات المائية التي تمتلك جلدًا متعدد الأغراض وهي أسماك القرش سريعة السباحة. يحمي جلد أسماك القرش سريعة السباحة من التلوث البيولوجي ويقلل من مقاومة السحب الذي تتعرض له أسماك القرش أثناء السباحة عبر الماء. إن القشور الصغيرة التي تغطي جلد أسماك القرش سريعة السباحة معروفة باسم الأسنان الجلدية (أسنان الجلد)، تكون على شكل أضلاع صغيرة مصطفة في اتجاه تدفق الماء، انظر الشكل ١. وقد ثبت أن الأضلاع المستوحاة من جلد أسماك القرش توفر فائدة في تقليل السحب تصل إلى ٩,٩ في المائة [10]. إن المسافة بين هذه الأسنان الجلدية تكون بحيث يصعب على الكائنات المائية المجهرية الالتصاق بالسطح. أسماك القرش الأبطأ مغطاة بأسنان جلدية أيضًا، ولكن ليس تلك التي تكون على شكل أضلاع ولا تقلل من مقاومة السحب.

هناك الكثير من الأبحاث التي تمت وتتم حتى وقتنا الحالي لاختبار فعالية مثل هذه الأضلاع في تقليل مقاومة السحب المؤثرة على الأجسام، سواء على الأجسام التي تتحرك في الماء كالسفن والغواصات أو الأجسام التي تتحرك في الهواء كالطائرات. في كثير من هذه الأبحاث يتم استخدام تقنية الـ CFD من أجل إجراء عملية الدراسة والتي يجب أن تمر في البداية بعملية المعايرة التي يتم فيها مقارنة نتائج الـ CFD مع نتائج الدراسات التجريبية المتوفرة.



الشكل ١: أنماط الحراشف لدى أسماك القرش سريعة السباحة [12] ,[11].

أجرى Brian Dean and Bharat Bhushan, 2010 [13] دراسة على شكل جلد القرش والذي هو على شكل هياكل ضلعية متوازية (Shark-Skin riblets) في اتجاه التدفق (الشكل ١) والتي من المعروف أنها تقلل من مقاومة احتكاك الجلد في نظام التدفق المضطرب. في الجزء الأول من هذه الدراسة تم توضيح سلوك التدفق على سطح الصفيحة والانتقال من التدفق الصفائحي إلى التدفق المضطرب. بعد ذلك تم تصنيع هياكل تشبه الشكل الطبيعي لضلوع جلد القرش وتم استخدامها مع صفيحة، الأمر الذي نتج عنه تقليل في مقاومة السحب بنسبة ١٠% تقريبًا. تم اختبار العديد من أشكال المجاري الشبيهة بجلد القرش بهدف الوصول إلى الشكل الأفضل لهذه المجاري.

أشارت هذه الدراسة إلى وجود كميات صغيرة من المخاط على جلد سمكة القرش، وعليه من المتوقع أن يؤدي التطبيق الموضعي للمواد الكارهة للماء إلى تغيير مجال التدفق حول الضليعات بطريقة مفيدة لأهداف تقليل مقاومة السحب، وهذا الأمر شبيه بعملية التزليق الهوائي.

كما قام Zhang et al., 2011 [14] ببناء نموذج هندسي يشبه إلى حد كبير شكل جلد القرش ومن ثم تم إجراء حسابات رقمية على هذا النموذج عند قيم مختلفة لسرعة التدفق بهدف دراسة تأثير مثل هذا النوع من شكل البدن على تقليل مقاومة الاحتكاك. تم عرض كل من توزع حقل السرعة وإجهادات القص على سطح النموذج. تم في النهاية إجراء

تجارب حقيقية على نموذج مشابه وتم مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية والتي حققت توافقا كبيرا. أثبتت هذه الدراسة أن مثل هذا النوع من شكل السطح يمكن أن يقلل مقاومة السحب إلى ما يقارب ١٠%.

تم مناقشة إمكانية استخدام العديد من التقنيات المستوحاة من شكل أضلاع القرش على التقليل من مقاومة السحب من قبل Fu et al., 2017 [15]. تم إجراء تجارب على العديد من أشكال المجاري الشبيهة بأضلاع القرش المستمرة والمتقطعة. حيث تم تركيب هذه المجاري على صفيحة وتم قياس وتحليل حقل التدفق حول هذه المجاري، تم عرض توزع كل من حقل الطاقة الحركية وإجهادات القص حول هذه المجاري كما أثبتت هذه الدراسة أن الأبعاد الهندسية لهذه المجاري تؤثر على فاعليتها، وأن ضخ مواد كارهة للماء ضمن هذه المجاري يمكن أن يقلل من مقاومة السحب للصفيحة بنسبة تصل إلى ١٣%.

قام Santos et al., 2021 [16] بمناقشة فعالية جلد سمك القرش قصير الزعانف تجريبيا في التحكم بانفصال الطبقة الحدية المضطربة. تم تركيب عينات من جلد سمك القرش على لوح مسطح أملس. تحتوي عينتا الجلد على حراشف سمك القرش بأحجام وأشكال وزوايا خشنة مختلفة، (حراشف منطقة الخاصرة (B2) نحيلة وطويلة ويمكن أن تكون خشنة عند ٥٠ درجة، في حين أن الحراشف الموجودة في المنطقة الواقعة بين الخاصرة والزعنفة الظهرية (B1) عريضة وقصيرة ويمكن أن تكون خشنة عند ٣٠ درجة). تم في هذه الدراسة التطرق بشكل مفصل إلى توزع حقل السرعة في منطقة الطبقة الحدية للصفيحة المسطحة بدون ومع العينات. تشير نتائج القياسات إلى أن العينة B2 يمكنها تأخير انفصال الطبقة الحدية وتقليل جزء الوقت الذي يتم فيه عكس التدفق. تسبب خشونة الحراشف في حدوث تقلبات في منحنى احتكاك الجلد وزيادة في قيمة الاجهادات الطبيعية (normal stresses) بالقرب من الجدار. ترتبط هذه القدرات ارتباطًا مباشرًا بزاوية المقياس الخشن. في المقابل، لم تعيق زاوية الحراشف المنخفضة من المنطقة B1 التدفق العكسي، وبالتالي لم تساعد كثيرا في تأخير انفصال الطبقة الحدية. أظهر سطح جلد سمك القرش القدرة على تأخير وزيادة فصل التدفق اعتمادًا على قدرات شعيرات القشور على منع التدفق العكسي.

مما سبق يمكن ملاحظة أن دراسة هذه الظاهرة أمر مستمر بدون توقف بسبب أهمية هذه التقنية في تقليل مقاومة السحب للأجسام المتحركة الأمر الذي ينتج عنه تقليل استهلاك الوقود وبالتالي زيادة كفاءة الجسم المتحرك وتقليل تلوث الهواء بفعل تقليل استهلاك الوقود، وفي حال نجاح هذا الأمر في التطبيقات البحرية سيكون له فائدة كبيرة بسبب كميات الوقود الكبيرة التي تستهلكها المركبات البحرية والذي يترافق مع زيادة التكاليف الاقتصادية وزيادة تلوث الهواء وبالتالي فإن أي تقليل في المقاومة سينتج عنه فوائد كبيرة في هذا المجال.

يركز هذا البحث على تأثير هياكل الأضلاع على سلوك تدفق السوائل، فضلاً عن اختيار الشكل الأفضل لهذه الأضلاع. لفهم آلية تقليل مقاومة السحب في جلد القرش، من المهم أولاً فهم طبيعة تدفق السوائل على السطح الفعال لجلد القرش. سيتم مناقشة خصائص التدفق وآلية مقاومة السحب للسائل المتدفق على صفيحة مسطحة.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث وأهدافه في الأمور التالية:

- إن جميع الأبحاث السابقة تمت على صفائح مغمورة بالكامل بالمائع، بينما هذه الدراسة تمت على صفيحة مغمورة جزئيا وذلك كخطوة أولى من البحث عن إمكانية تطبيق هذه التقنية على السفينة، وهذا يعتبر من أهم الأمور الجديدة في هذه الدراسة.
- دراسة تأثير وجود المجاري على مقاومة الصفيحة.
- دراسة تأثير عدد المجاري على كفاءتها في تقليل مقاومة الصفيحة.
- دراسة تأثير سرعة التدفق على فعالية المجاري.

١. منهجية البحث:

يقوم هذا البحث على منهجية تحليلية تجريبية في بيئة افتراضية، حيث سيتم استخدام تقنية الـ CFD المتوفرة ضمن برنامج الـ Fluent من أجل إجراء عملية الحسابات الرقمية. ستتم المعايرة للتأكد من جودة وفعالية الطريقة المستخدمة في الحسابات وللتأكد من أن النتائج التي سيتم الحصول عليها ستكون دقيقة وصحيحة.

طرائق البحث ومواده:

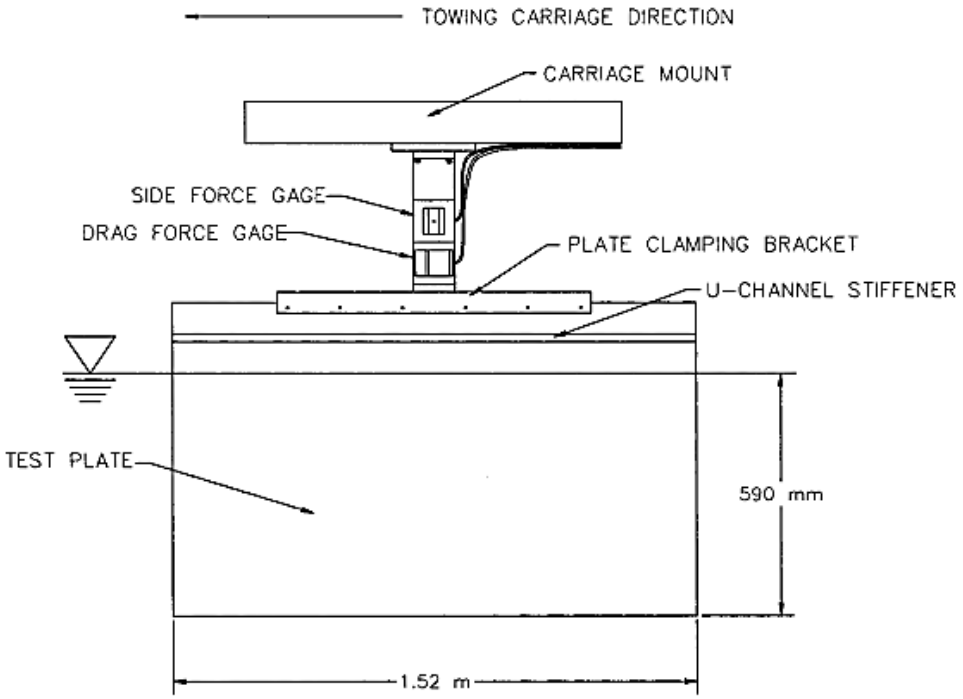
يمكن تلخيص الطرق والمواد التي تم استخدامها في هذا البحث بالتالي:

- النموذج الهندسي للصفيحة المراد دراستها.
- النماذج الهندسية للمجاري التي سيتم اختبارها.
- تقنية الـ CFD والتي يوفرها الكثير من البرامج حالياً.
- طريقة الـ URANS وموديل الاضطراب k-ω SST لحل معادلات نافييه ستوكس، والمتوفرة ضمن برنامج الـ Ansys الذي تم استخدامه.

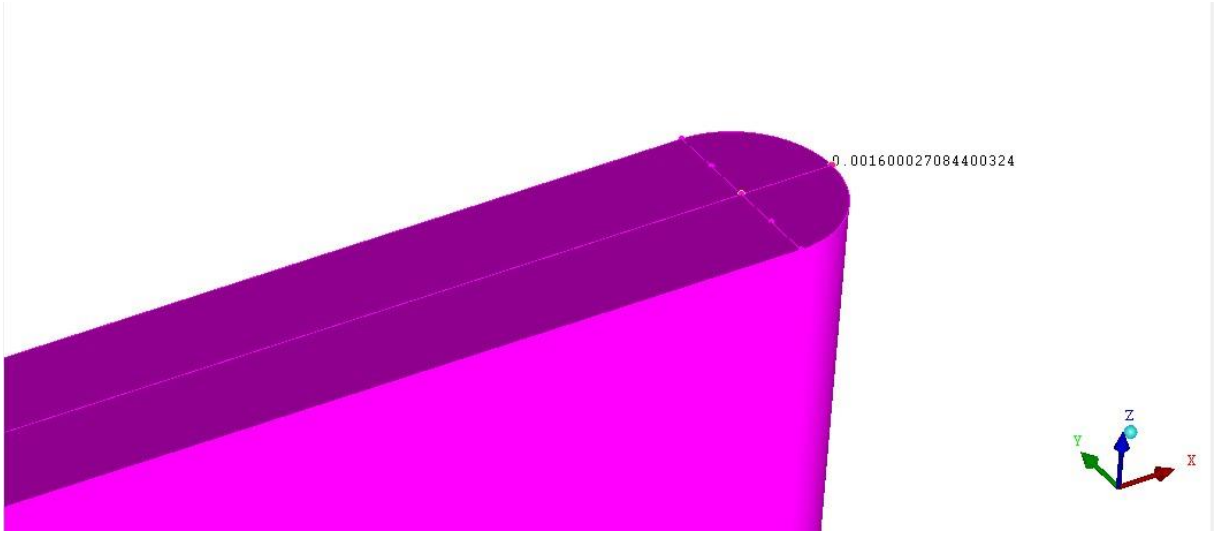
٢. الأبعاد الهندسية

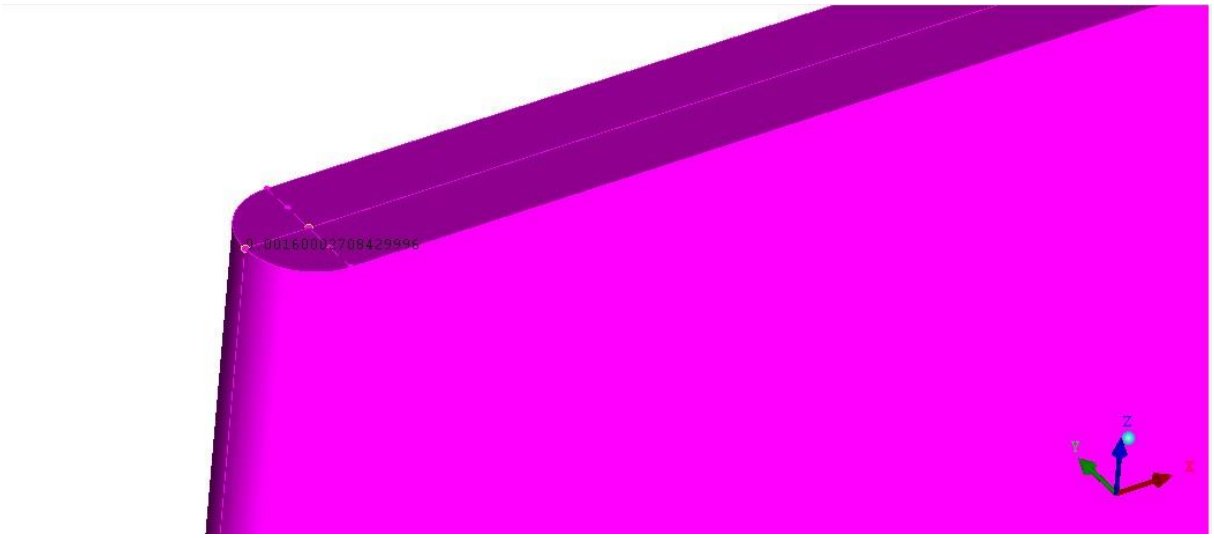
على اعتبار أن الهدف الأساسي من الدراسة هو اختبار شكل المجاري المستطيلة الشكل والتي تشكل قنوات على شكل حرف U قائم الزوايا والذي يساعد في تقليل مقاومة الصفيحة بهدف تطبيق هذه التقنية على السفن من أجل تقليل مقاومتها، لذلك من الأفضل أن يتم اختيار صفيحة ذات غمر جزئي، أي أن قسم منها يكون في الماء وقسم منها في الهواء بشكل مشابه لحالة السفينة والتي تبحر بغاطس معين. لهذا السبب تم اختيار الصفيحة المستخدمة في تجربة Schultz في عام ٢٠٠٤ [17] والموضحة في الشكل ٢، حيث أن هذه الصفيحة مغمورة بشكل جزئي وهذا الأمر مشابه تماما لحالة السفينة، وبالتالي إذا ما تم التوصل إلى شكل مناسب للأضلاع على سطح الصفيحة والذي يقلل من مقاومتها سيكون بالإمكان تطبيق هذه الأضلاع على السفينة.

الصفيحة بطول ١,٥٢m وارتفاع 590 mm، تبلغ سماكتها ٣,٢ mm كما هو موضح بالشكل ٢. في حين تم تنعيم الحواف لتصبح نصف دائرية بقطر ١,٦ ملم [17]، انظر الشكل ٣ والذي يوضح حواف الصفيحة من الأمام ومن الخلف بعد بنائها في برنامج الـ ICEM والذي هو برنامج تصميم وبناء شبكات ضمن برنامج الـ Ansys.



الشكل ٢: أبعاد الصفيحة التي قام ببنائها Schultz [17].

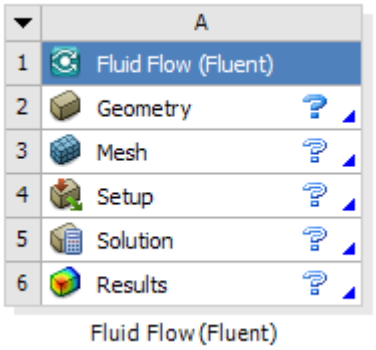




الشكل ٣: حواف الصفيحة من الجهتين بعد تصميمها في برنامج الـ ICEM.

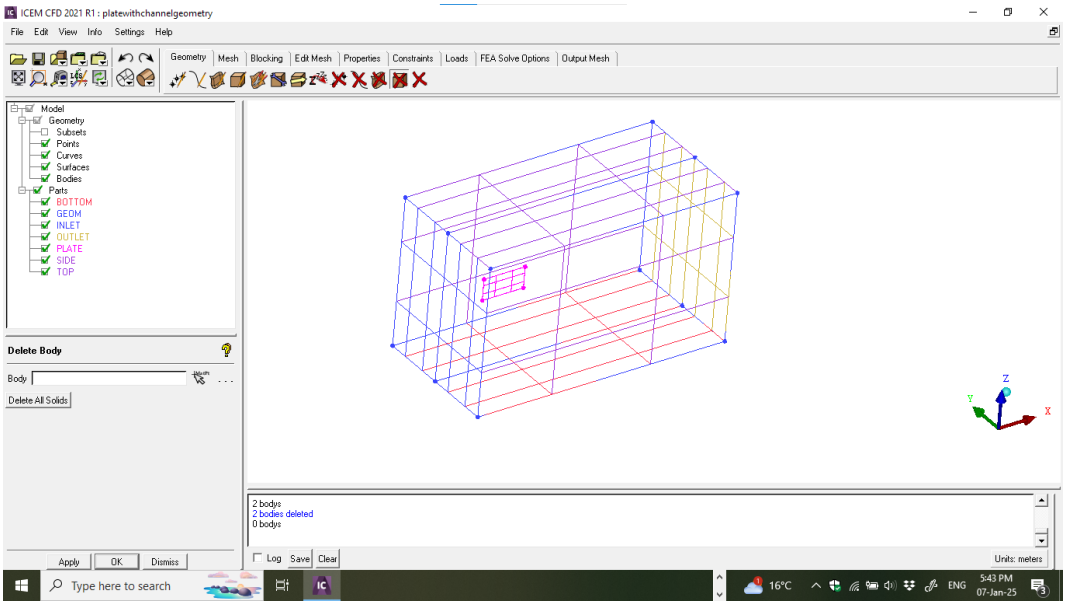
٣. الشبكة الرقمية

تمر عملية إجراء الحسابات باستخدام تقنية الـ CFD ضمن برنامج الـ Fluent بمجموعة من الخطوات موضحة في الشكل ٤.



الشكل ٤: المراحل التي يجب المرور بها عند إجراء الحسابات باستخدام برنامج الـ Fluent.

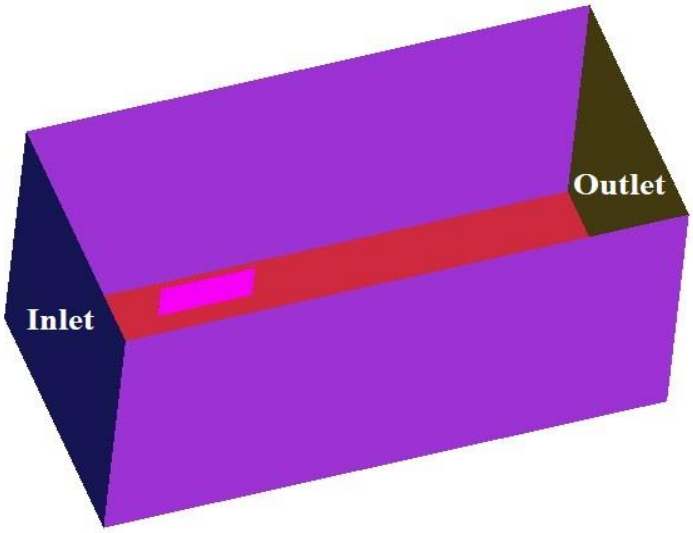
كما هو واضح من هذا الشكل فإن الخطوة الأولى بعد تحديد البرنامج هي بناء المجسم الهندسي للحالة المدروسة، في حالتنا هو الصفيحة ضمن القناة، وقد تم هذا الأمر في برنامج الـ ICEM كما هو موضح في الشكل ٥. تم الالتزام بالأبعاد الهندسية كما في التجربة تماما [18] والموضحة في الشكل ٧.



الشكل ٥: المجسم الهندسي لكل من القناة والصفيحة التي تم تصميمها في برنامج الـ ICEM.

الخطوة الثانية كما هو واضح من الشكل ٤ هي عملية بناء الشبكة الرقمية والتي تعتبر خطوة مهمة جدا من أجل الحصول على نتائج رقمية صحيحة وواقعية.

يتطلب بناء الشبكة الرقمية تقسيم المجال الحسابي المدروس إلى أجزاء صغيرة (شبكة من الخلايا، عناصر أو حجوم تحكم) تغطي كامل المجال الحسابي المدروس. فمن خلال الحل الرقمي لمعادلات الجريان ضمن مراكز هذه الخلايا يمكن تحديد الخصائص المميزة للجريان كالسرعة، الضغط ودرجة الحرارة والعديد من البارامترات المتغيرة الهامة الأخرى. يوضح الشكل ٦ المجال الحسابي الذي تتوضع ضمنه الصفيحة والذي يمثل قناة الاختبار.

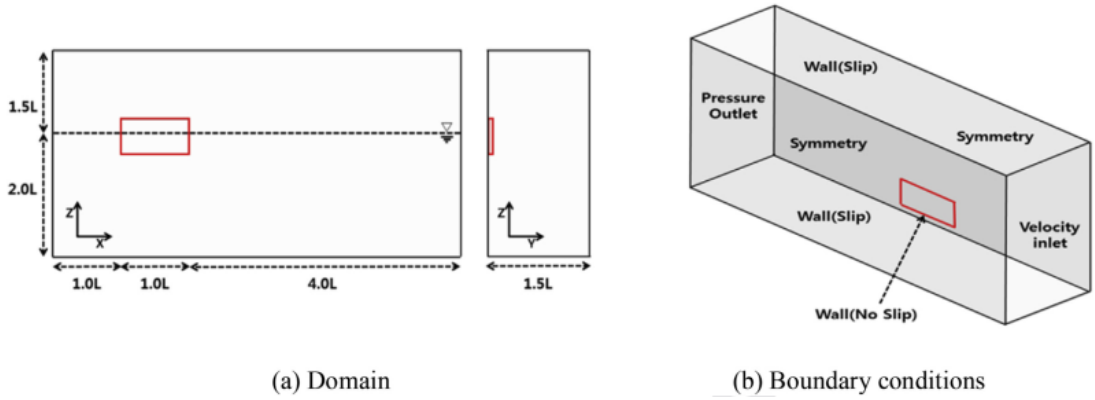


الشكل ٦: المجال الحسابي التي تتوضع ضمنه الصفيحة.

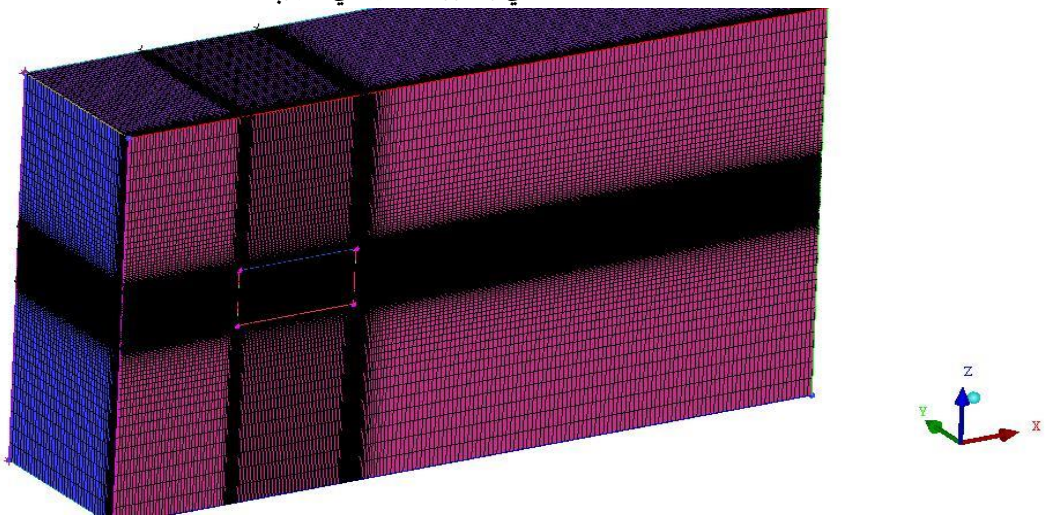
مدخل المائع هو السطح Inlet والمخرج هو السطح Outlet. لقد تم تثبيت الصفيحة وتحريك المائع بسرعة مساوية للسرعات في التجربة وهي 2, 3.8 m/s. إن دقة الحسابات الرقمية يعتمد على عدد الخلايا الحسابية ضمن المجال الحسابي، فكلما زاد عدد الخلايا الحسابية وجودتها كلما زادت دقة النتائج التي نحصل عليها. تعتبر الشبكات المنتظمة الأفضل من ناحية الذاكرة والتخزين، بالإضافة إلى تقارب الحل بشكل أسرع [19]. أما من ناحية سرعة توليد وبناء الشبكة فإن الشبكات الغير متنظمة لها الأفضلية، ولكن في هذه الحالة يحتاج الحل إلى وقت أكثر لكي يتقارب. بناء الشبكات المنتظمة يحتاج إلى الكثير من الجهد والوقت كما يحتاج إلى خبرات كبيرة في حال كان الأبعاد الهندسية للمجسم المدروس معقدة مثل السفينة وملحقاتها [20]. إن المجال الحسابي الذي تم استخدامه في حالة الصفيحة هو متوازي مستطيلات وله الأبعاد الهندسية المحددة وفقا لتجربة Schults [17] كما يلي:

$$L \times B \times T = 6L_{plate} \times 1.5L_{plate} \times 3.5L_{plate}$$

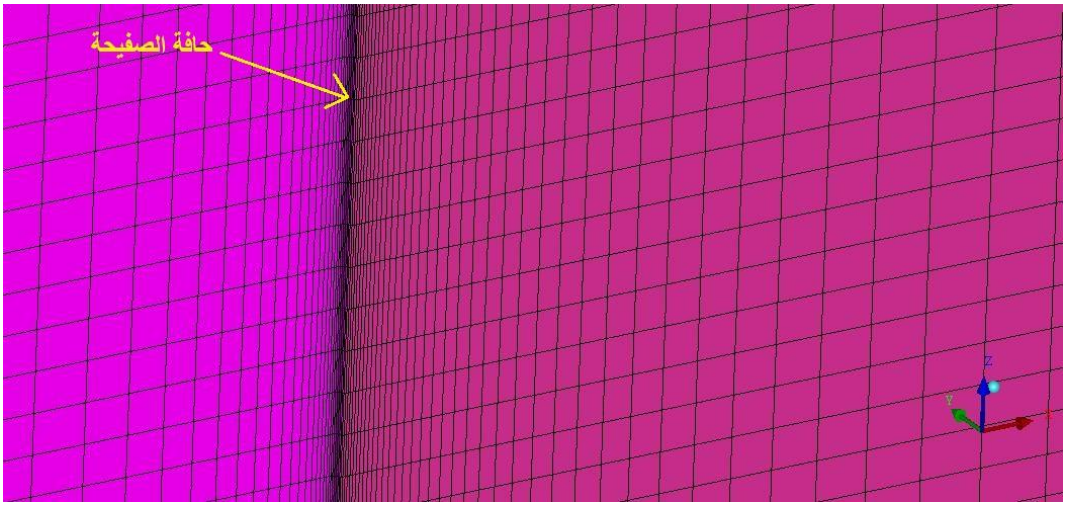
تم اعتماد شروط الحدود التي يوفرها الـ ANSYS كما هو موضح بالشكل ٧، استخدمت أيضا شبكة منتظمة مؤلفة من ٧,٥ مليون خلية متوازية المستطيلات ومتشابهة بنيت بواسطة الـ ICEM من أجل المحاكاة الرقمية، انظر الشكل ٨ والذي يعرض نصف هذه الشبكة لكي يظهر مكان توضع الصفيحة. لقد تم تنعيم الشبكة الرقمية في الطبقة الحدية (الشكل ٩) من أجل حل بروفايل السرعة ضمن هذه المنطقة بأفضل شكل ممكن، كما تم تنعيم الشبكة في منطقة السطح الحر بين الهواء والماء (الشكل ١٠) من أجل حل الأمواج المتشكلة بأفضل شكل ممكن.



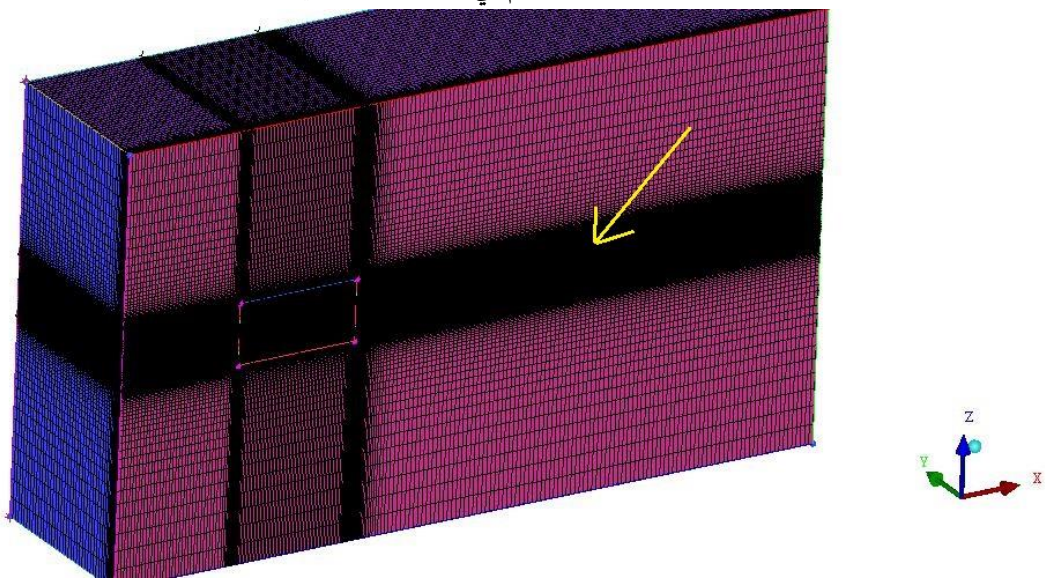
الشكل ٧: المجال الحسابي والشروط الحدية في التجربة [18].



الشكل ٨: الشبكة الحسابية المنتظمة التي تم بناؤها حول الصفيحة.



الشكل ٩: التنعيم في منطقة الطبقة الحدية.



الشكل ١٠: التنعيم في منطقة السطح الحر الفاصل بين الهواء والماء.

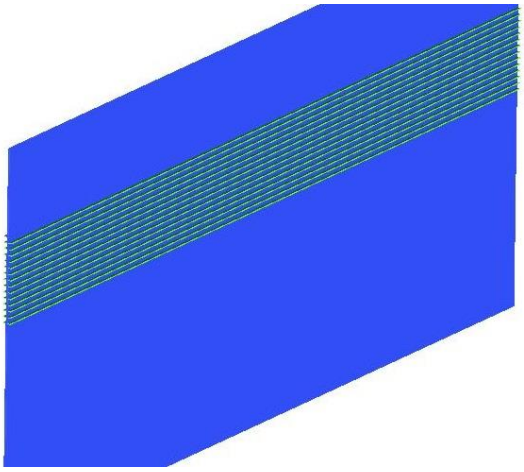
النتائج والمناقشة:

في البداية سنوضح الحالات التي تم إجراء الدراسة عليها والأضلاع التي تم استخدامها.

٣,١. الحالات المدروسة

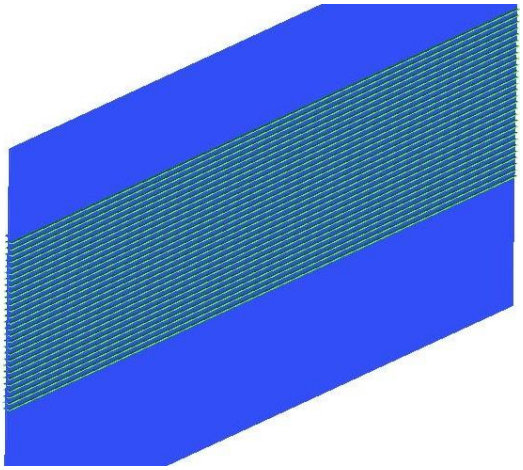
لقد تم دراسة العديد من الحالات المختلفة لنفس الصفيحة، في كل الحالات كان ارتفاع الضلع h هو $6\ mm$ والمسافة بين الضلعين s هي $12\ mm$ وسماكة كل ضلع t هي $0.5\ mm$. تم استخدام المجاري المستطيلة الشكل في كل الحالات المدروسة، الحالات التي تمت دراستها هي كالتالي:

١. الحالة الأولى (Case 1) تم تغطية أعلى جزء من الجزء المغمور للصفيحة بـ ١٤ ضلع كما هو موضح في الشكل ١١.



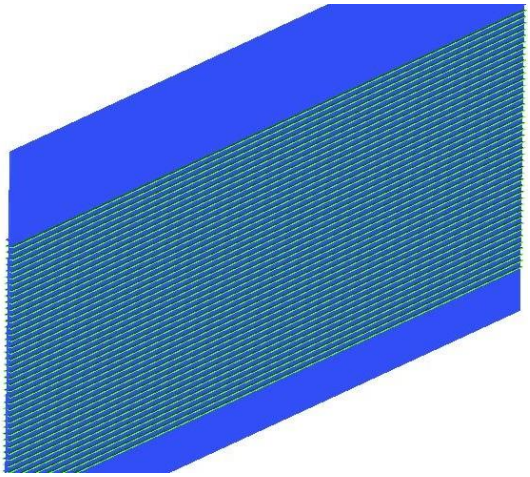
الشكل ١١: ١٤ ضلع على الجزء العلوي من القسم المغمور للصفيحة.

٢. الحالة الثانية (Case 2) تم تغطية أعلى جزء من الجزء المغمور للصفيحة بـ ٢٨ ضلع كما هو موضح في الشكل ١٢.



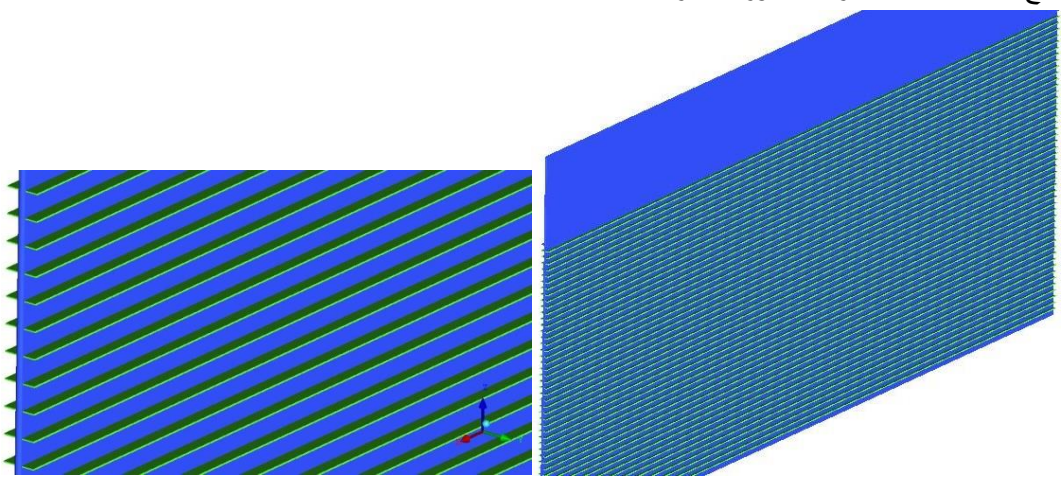
الشكل ١٢: ٢٨ ضلع على الجزء العلوي من القسم المغمور للصفيحة.

٣. الحالة الثالثة (Case 3) تم تغطية أعلى جزء من الجزء المغمور للصفيحة بـ ٤٢ ضلع كما هو موضح في الشكل ١٣.



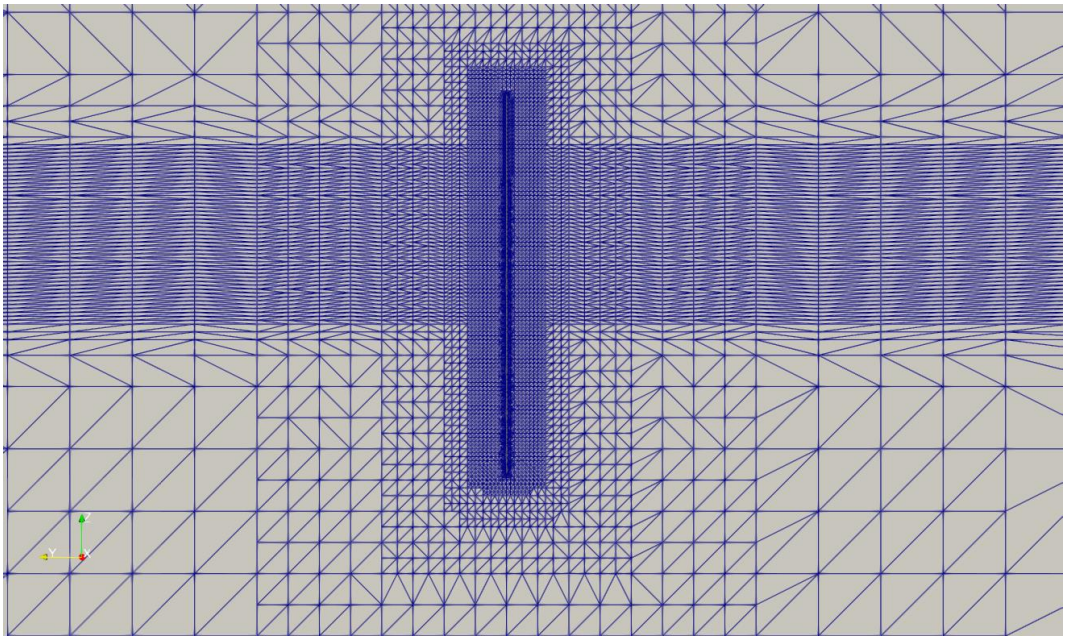
الشكل ١٣: ٤٢ ضلع على الجزء العلوي من القسم المغمور للصفيحة.

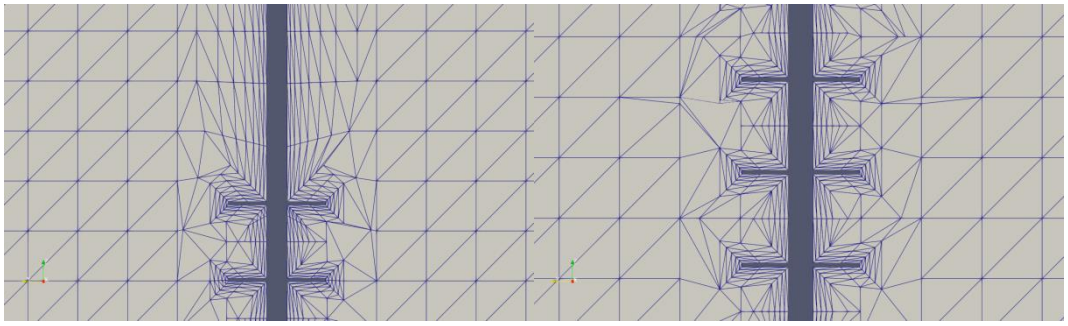
٤. الحالة الرابعة والأخيرة (Case 4) تم تغطية كامل الجزء المغمور للصفيحة بالأضلاع واحتاجت الصفيحة لـ ٥٠ ضلع لتغطية كامل الجزء المغمور، انظر الشكل ١٤.



الشكل ١٤: مجاري على كامل الجزء المغمور من الصفيحة.

في مثل هذه الحالات ومع الأبعاد الصغيرة جدا للمجاري لا بد من أن تكون الشبكة الرقمية ذات دقة عالية وبالأخص في منطقة الطبقة الحدية من أجل الحصول على نتائج واقعية وصحيحيه، ولهذا السبب تم بناء الشبكة الرقمية بعناية كبيرة وكانت سماكة أول خلية في الطبقة الحدية $0.25\ mm$ مع استخدام نسبة النمو ١,٢ في منطقة الطبقة الحدية، انظر الشكل ١٥. كما نلاحظ من هذا الشكل فلقد تم التنعيم بشكل إضافي في منطقة السطح الحر بين الهواء والماء من أجل حل نظام الأمواج المتشكل بأفضل شكل. في حالة المجاري تم استخدام عدد خلايا يتراوح بين الـ ٨–١٠ مليون خلية لكل حالة حسابية.





الشكل ١٥: مقطع عرضي في الشبكة الرقمية المنتظمة في كامل المجال الحسابي وفي منطقة الطبقة الحدية.

٣,٢. تقييم النتائج الرقمية

قبل البدء بدراسة تأثير الأضلاع المستوحاة من جلد القرش على مقاومة الصفيحة المغمورة جزئيا لا بد من التأكد من أن الشبكة والإعدادات الرقمية التي تم استخدامها تعطي نتائج جيدة وواقعية. من أجل تحقيق هذا الغرض لا بد من مقارنة البعض من النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية المتوفرة.

كما ذكر سابقاً تم استخدام الصفيحة المعيارية التي استخدمها الباحث Schultz في عام ٢٠٠٤، ونشر عنها الكثير من النتائج التجريبية كما اعتمدها الكثير من الباحثين فيما بعد [18] ,[17]. تم دراسة الصفيحة عن قيمتين مختلفتين للسرعة وهما [m/s] 2.0, 3.8، ومن ثم تم حساب معامل المقاومة وفق العلاقة التالية:

$$C_T = \frac{R_T}{0.5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S} \qquad (١)$$

حيث أن:

R_T: المقاومة الكلية التي تتعرض لها الصفيحة $[N]$.

ρ: الكثافة وفي حالتنا هي كثافة الماء العذب $[\frac{kg}{m^3}]$ 998.2.

V: السرعة $[\frac{m}{s}]$.

S: مساحة السطح المبلل $[m^2]$.

الجدول ١ يوضح مقارنة بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية لمقاومة الصفيحة المغمورة جزئيا عند قيمتين للسرعة. كما هو واضح من هذا الجدول فإن قيمة الخطأ صغيرة جدا وأصغر من ٠,٥%، هذا الأمر يؤكد دقة الإعدادات والشبكة الرقمية التي تم استخدامها لإتمام هذا العمل.

الجدول ١: مقارنة بين القيم التجريبية والنتائج الرقمية لمعامل المقاومة للصفيحة المغمورة جزئيا.

Velocity [m/s]	Fr [-]	$C_{T,EFD}[-]$	$C_{T,CFD}[-]$	Error [%]
٢,٠	0.518	٠,٠٠٣٦٠٥	0.0035932	-0.327 %
٣,٨	0.984	٠,٠٠٣٢٢٦	0.0032243	-0.053%

من خلال مقارنة النتائج مع بعضها البعض نلاحظ أن أكبر قيمة للفرق بين النتائج هي 0.327%- وهي قيمة صغيرة جداً، وبالتالي يمكن القول إن الشبكة والإعدادات الرقمية التي تم استخدامها تعطي نتائج جيدة جدا بالمقارنة مع الواقع ويمكن استخدامها من أجل الحسابات اللاحقة. هنا نريد التنويه إلى أن أول من درس هذه الصفيحة في جامعة تشرين هو الباحثة زينب علي، قدمت الباحثة زينب علي [21] ,[20] دراسة حول تأثير خشونة سطح الصفيحة على المقاومة لنفس الصفيحة المدروسة وحصلت على النتائج الموضحة في الجدول ٢. كما هو واضح من هذا الجدول فإن قيمة

الخطأ في حالة الصفيحة الناعمة (d هو ارتفاع الخشونة، الصفيحة الناعمة/النظيفة تكون قيمة $(d = 0\ [\mu m]$ تصل لحوالي الـ ٠,٨%. على الرغم من أن هذه القيمة صغيرة جدا ويعتبر التوافق كبير جدا بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية إلا أن السبب في أن قيم الخطأ معنا (كما هو موضح في الجدول ١) أقل هو أننا استخدمنا عدد أكبر من الخلايا، حيث تم استخدمت الباحثة زينب ١ مليون خليه لنصف المجال الحسابي، أي ٢ مليون خلية لكامل المجال الحسابي، أما في حالتنا تم استخدام ٧,٥ مليون خلية حسابية ولهذا السبب كانت النتائج أكثر دقة وكانت قيمة الخطأ أقل، مع العلم أن الباحثة زينب علي استخدمت نفس نوع الشبكة الرقمية وهي الشبكات المنتظمة.

الجدول ٢: نتائج الباحثة زينب علي بالمقارنة مع التجربة لنفس الصفيحة عند قيم مختلفة لخشونة السطح [21] ,[20].

Velocity [m/s]	$d\ [\mu m]$	$C_{T,EFD}[-]$	$C_{T,CFD}\ [-]$	Error%
2.0; Fr=0.518	**٠,٠**	**٠,٠٠٣٦٠٥**	**0.00359**	**٠,٤١٣%**
	٨٥,٠	٠,٠٠٣٦٦٣	0.00377	٣,١%
	١٢٩,٠	٠,٠٠٣٧٨٣	0.00397	٥,١%
3.8; Fr=0.984	**٠,٠**	**٠,٠٠٣٢٢٦**	**0.00320**	**0.8%**
	٨٥,٠	٠,٠٠٣٤٢٣	0.00353	3.3%
	١٢٩,٠	٠,٠٠٣٥٠٠	0.00369	5.4%

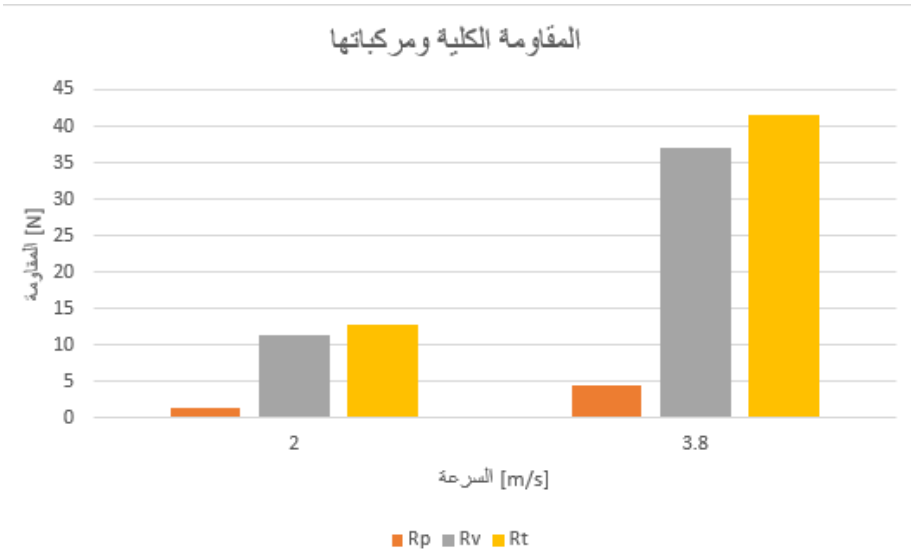
٣,٣. تطور الطبقة الحدية على جانبي الصفيحة

على اعتبار أن الهدف الأساسي من الدراسة هو إيجاد كفاءة المجاري في تقليل مقاومة الصفيحة فلا بد من التطرق بشكل تفصيلي على مركبات هذه المقاومة وإلى تطور الطبقة الحدية بدون وجود الأضلاع وبعد إضافة الأضلاع لمعرفة التأثير الدقيق لهذه الأضلاع على هذه البارامترات.

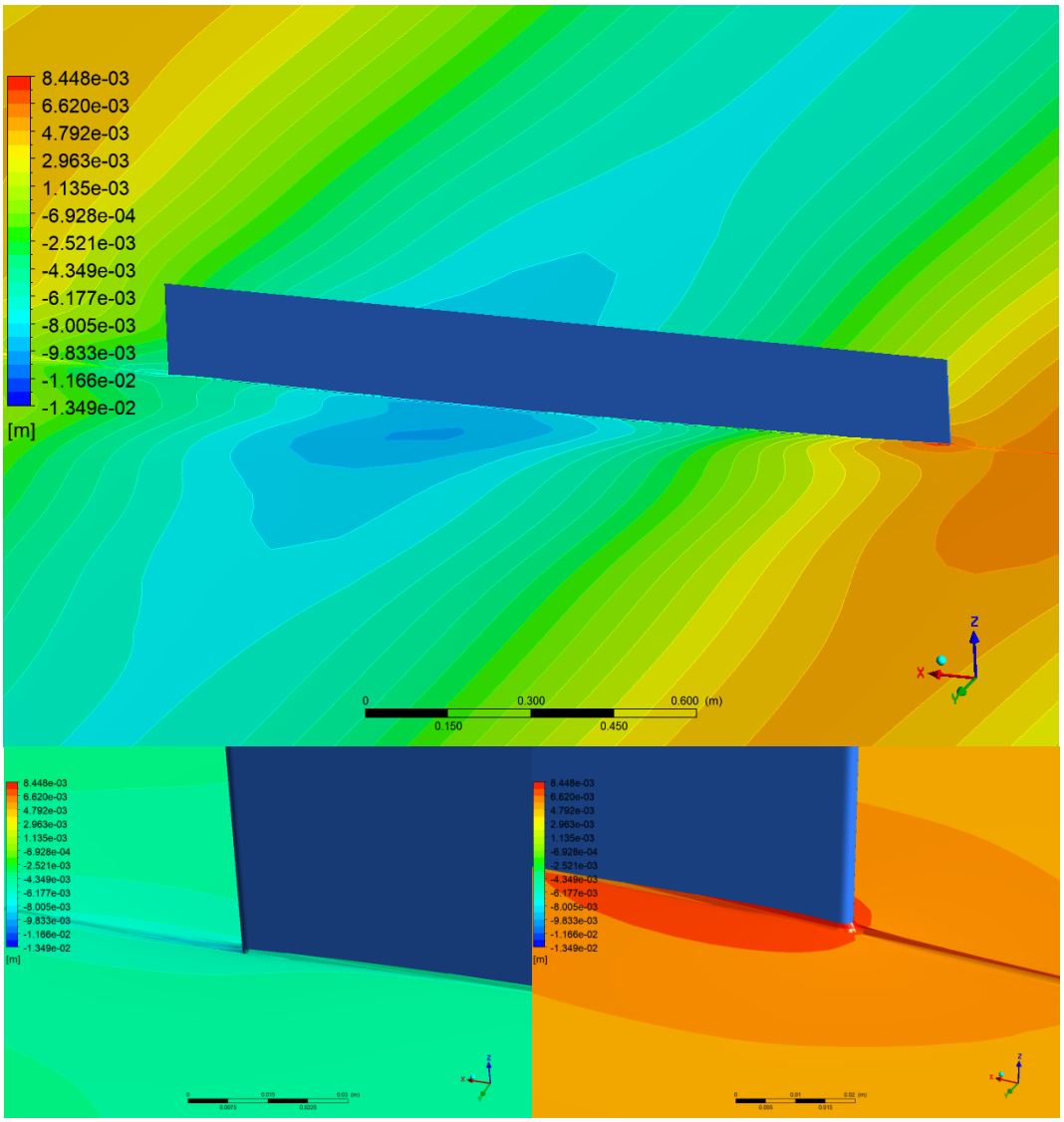
الشكل ١٦ يعرض قيمة المقاومة الكلية (R_T) ومركباتها (مقاومة الضغط R_P ومقاومة الاحتكاك R_V) عند كل من السرعتين 2, 3.8 m/s. المقاومة الكلية R_T تعطى بالعلاقة التالية:

$$R_T = R_P + R_V \qquad (٢)$$

كما هو واضح من هذا المخطط فإن مقاومة الاحتكاك هي المقاومة المسيطرة بالمقارنة مع مقاومة الضغط والسبب الأساسي في هذا الأمر هو مساحة السطح المبلل الكبير للصفيحة والذي يزيد من مقاومة الاحتكاك بالإضافة إلى الشكل الانسيابي للصفيحة والذي تم توضيحه في الشكل ٣ والذي يقلل من مقاومة الضغط ومن ارتفاع الأمواج المتشكلة على جانبي الصفيحة، انظر الشكل ١٧، كما هو واضح من هذا الشكل إن أكبر ارتفاع للموجة يتشكل في منطقة الاصطدام مع مقدمة الصفيحة وقيمة ارتفاع الموجة صغير جدا وهو ٨,٤٤ ملم.

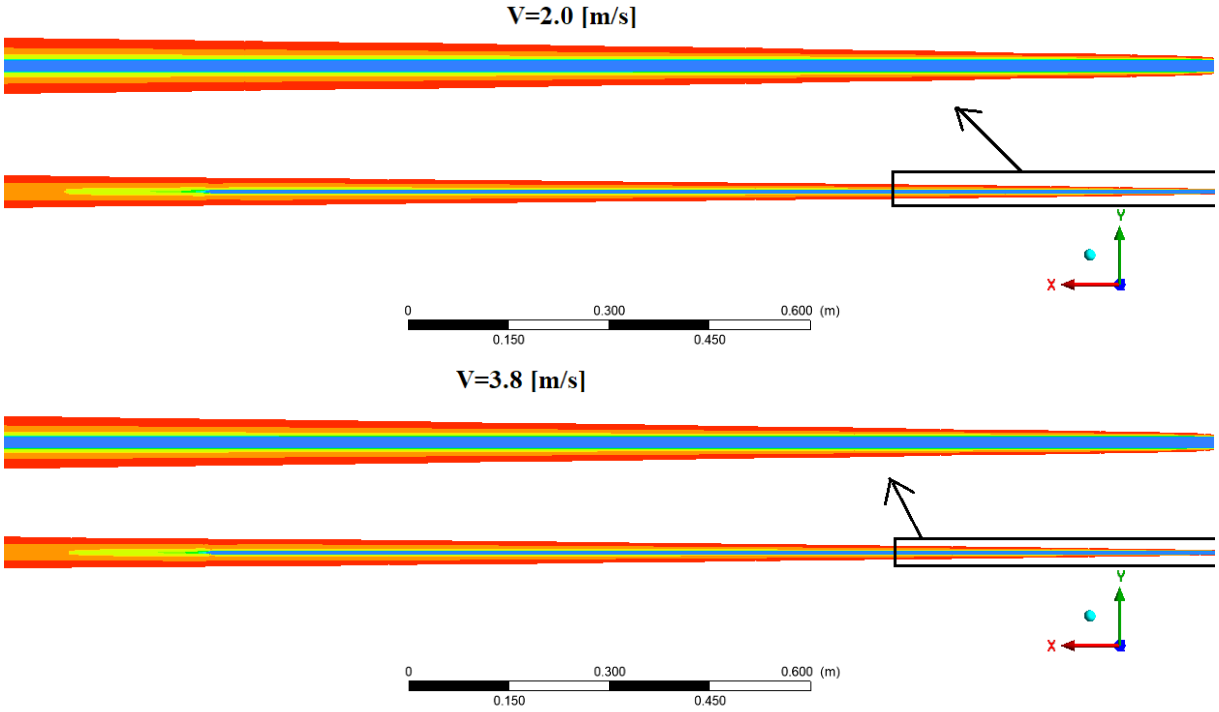


الشكل ١٦: قيمة المقاومة الكلية ومركباتها عند السرعتين 2; 3.8 m/s.



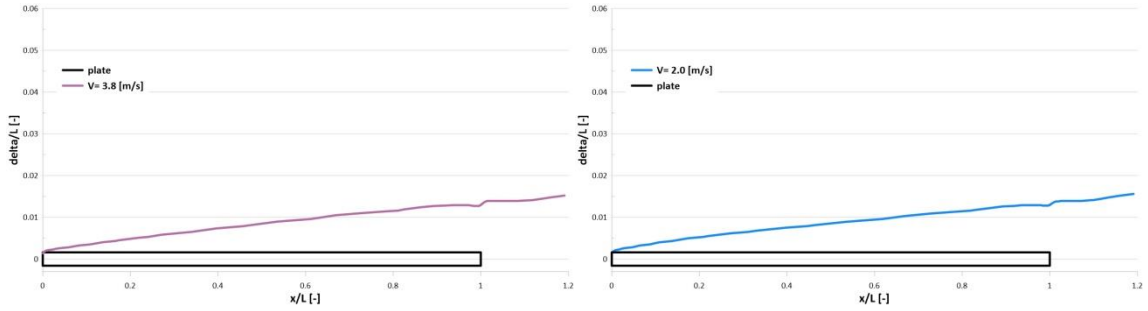
الشكل ١٧: نظام الأمواج المتشكل على جانبي الصفيحة عند السرعة [m/s] 2.0.

الشكل ١٨ يعرض تطور الطبقة الحدية على امتداد الصفيحة لكل من حالة السرعة [m/s] 2.0, 3.8. كما نلاحظ من هذا الشكل فإن ارتفاع الطبقة الحدية عند مقدمة الصفيحة يكون مساويا للصفر وتزداد سماكة الطبقة الحدية لتصل إلى أكبر قيمة لها عند نهاية الصفيحة وبعدها تتشكل منطقة المخر (wake) خلف الصفيحة.



الشكل ١٨: تطور الطبقة الحدية على امتداد الصفيحة عند كل من السرعتين [m/s] 2.0, 3.8.

الشكل ١٩ يعرض تغير قيمة $\frac{\delta}{L}[-]$ تبعا لطول الصفيحة عند كل من السرعتين [m/s] 2.0, 3.8. وهنا نلاحظ التشابه الكبير بين الحالتين.



الشكل ١٩: تغير سماكة الطبقة الحدية على كامل طول الصفيحة عند كل من السرعتين [m/s] 2.0, 3.8.

٣,٤. تأثير وجود المجاري على مقاومة الصفيحة

بعد إضافة المجاري للصفيحة ضمن الجزء المغمور تم التركيز بشكل أساسي على حساب مقاومة الصفيحة بوجود المجاري. قيمة مقاومة الصفيحة بدون ومع المجاري عند كل من السرعتين $2, 3.85 \frac{m}{s}$ موضحة في كل من الجدول ٣ والجدول ٤. كما هو واضح من هذه الجداول فإن وجود المجاري يساعد في تقليل المقاومة، وأفضل النتائج تم الحصول

عليها مع الحالة التي تكون فيها المجاري على كامل مساحة الجزء المغمور حيث وصلت نسبة تخفيض المقاومة إلى ٣% مع السرعة $2\frac{m}{s}$ و٣,٧٥% مع السرعة $3.85\frac{m}{s}$.

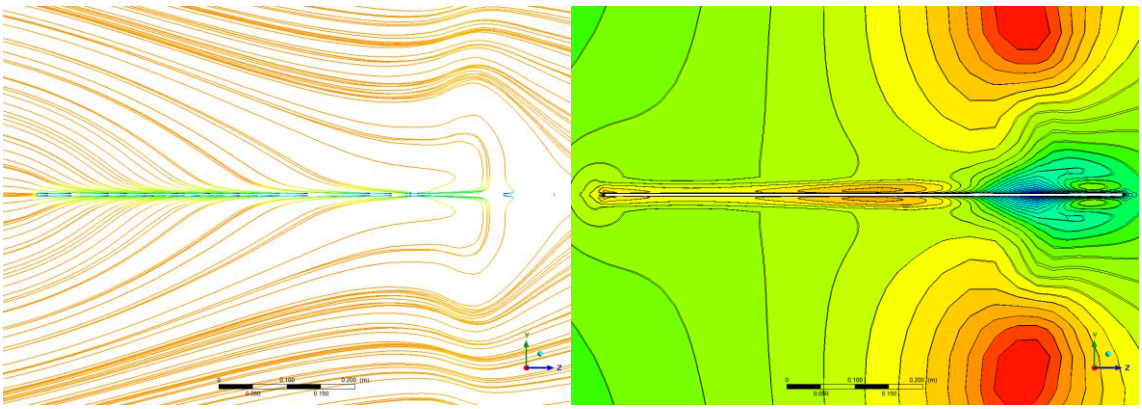
الجدول ٣: مقاومة الصفيحة بوجود وبغياب المجاري عند السرعة $[\frac{m}{s}]$ 2.

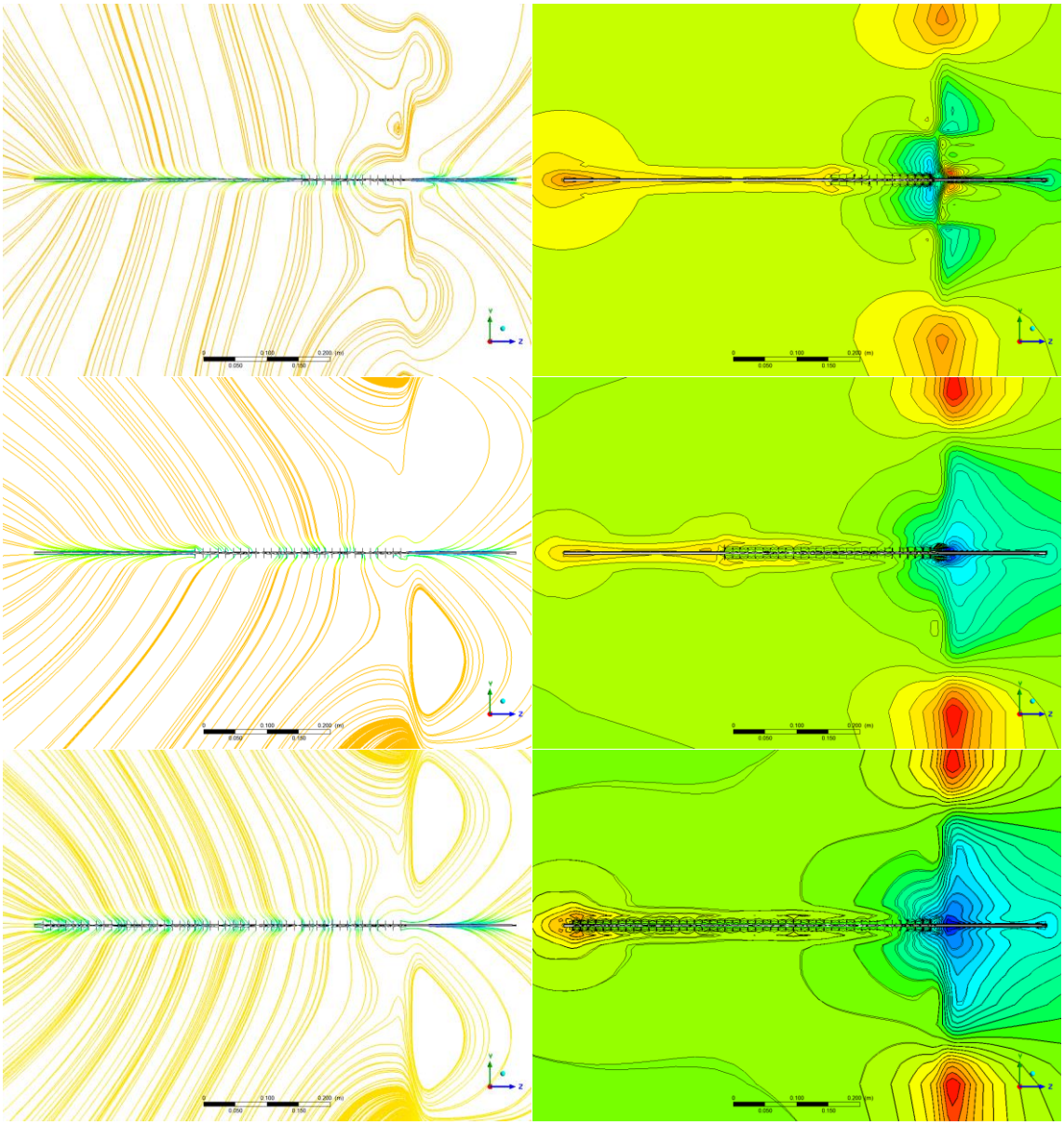
$Case\ No.$	$R_T[N]$	Difference%
Plate without riblets	0.00359	[-]
Case 1	0.00357	-0.50%
Case 2	0.00356	-0.76%
Case 3	0.00352	-1.9%
Case 4	0.00348	-3.0%

الجدول ٤: مقاومة الصفيحة بوجود وبغياب المجاري عند السرعة $[\frac{m}{s}]$ 3.85.

$Case\ No.$	$R_T[N]$	Difference%
Plate without riblets	0.00320	[-]
Case 1	0.00318	-0.60%
Case 2	0.00317	-0.93%
Case 3	0.00312	-2.50%
Case 4	0.00308	-3.75%

إن السبب الأساسي وراء انخفاض المقاومة هو أن وجود المجاري يساعد تنظيم التدفق وتقليل الجريان العرضي للتدفق الأمر الذي يقلل من اجهادات الاحتكاك وانتقال الزخم في الاتجاه العرضي، هذا الأمر ينتجه عنه تقليل في مقاومة الصفيحة. الشكل ٢٠ يعرض التدفق العرضي في مقطع عرضي عند نهاية الصفيحة لحالة الصفيحة بدون أضلاع وحالة الصفيحة مع أضلاع، من هذا الشكل نلاحظ أن وجود الأضلاع يقلل وبشكل واضح من التدفق العرضي ويؤدي إلى سيطرة تدفق عرضي شبه معدوم القيمة بالقرب من سطح الصفيحة الأمر الذي يقلل من إجهادات الاحتكاك العرضية وبالتالي تقليل المقاومة.





الشكل ٢٠: التدفق العرضي على سطح الصفيحة بدون ومع وجود المجاري عند السرعة $[\frac{m}{s}]$ 2.

طبعا هنا لا بد من التنويه إلى أنه ووفقا للدراسات المرجعية السابقة –[22], [16]–[14], [28], [27], [13], [10], [26] فإن التخفيض في حالة المجاري يمكن أن يصل إلى مستويات بين الـ ٥–١٠%، إلا أنه في هذه الدراسة لم يتم تحقيق هذا الأمر لعدة أسباب نذكر منها التالي:

- كل الدراسات كانت تتم على صفيحة تتواجد في مائع واحد (موحد الخواص) إما في الهواء، أو الماء، أو الزيت.
- مع شكل المجاري الذي تم اختياره (المجاري المستطيلة الشكل) فإن أفضل تخفيض يحدث عند النسب التالية للأبعاد $(\frac{t}{s} = 0.02; \frac{h}{s} = 0.5)$ [10] وفي حالتنا تم استخدام النسب التالية $(\frac{t}{s} = 0.0416; \frac{h}{s} = 0.5)$، أي أن سماكة الأضلاع في حالتنا أكبر من السماكة المثالية، والسبب في اختيارنا لهذه السماكة، هو البحث عن الأبعاد الأمثل

للتطبيقات البحرية وبالأخص السفن، وفي حالة السفن لا يمكن استخدام صفائح طويلة بثخانة قليلة جدا، ولهذا السبب تم اختيار الثخانة أكبر من الحالة المثالية.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- الغمر الجزئي للصفيحة يقلل من كفاءة المجاري، وهذا كان واضحا من خلال مقارنة نتائج هذا العمل مع نتائج الدراسات المرجعية. وعليه نتوقع كفاءة أقل عند تطبيق المجاري على السفينة منه عند تطبيق المجاري على الصفائح المغمورة بالكامل.
- إن وجود المجاري يساعد في تقليل مقاومة الصفيحة المغمورة جزئيا بالمقارنة مع حالة الصفيحة بدون المجاري.
- زيادة سماكة المجاري يؤثر سلبا على فعاليتها بالمقارنة مع المجاري الأقل سماكة.
- السبب الأساسي لتقليل المقاومة بوجود المجاري هو كبح التدفق العرضي الأمر الذي يقلل التأرجحات المضطربة العرضية ومن اجهادات القص العرضية والتي ينتج عنه تقليل المقاومة الكلية للصفيحة.

التوصيات:

- إجراء مثل هذه الدراسة أمر مهم في المراحل الأولى من التصميم من أجل اختيار الشكل الأنسب للمجاري بالإضافة للأبعاد الأساسية للأضلاع وللتباعد بين الأضلاع.
- استخدام هذه التقنية للأجسام التي تتحرك ضمن الموائع (الهواء والماء).

التوصيات للأعمال المستقبلية

- دراسة تأثير تغيير سماكة الأضلاع والمسافة بينها على فعاليتها.
- اختبار أنواع أخرى من المجاري.
- اختبار مجال أكبر من السرع عند أرقام فرود مشابهة لأرقام فرود للتطبيقات البحرية.
- تطبيق هذه التقنية على سفن الصب والنفط (على اعتبارها تملك قسم كبير من البدن المتوازي الحواف parallel body) من أجل التقليل من مقاومتها قدر المستطاع.

References:

[1] B. Bhushan, "Nanotribology and Nanomechanics: An Introduction: Fourth Edition," *Nanotribology Nanomechanics An Introd. Fourth Ed.*, pp. 1–928, Jun. 2017, doi: 10.1007/978-3-319-51433-8/COVER.

[2] B. Bhushan, "Biomimetics: lessons from nature–an overview," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 367, no. 1893, pp. 1445–1486, Apr. 2009, doi: 10.1098/RSTA.2009.0011.

[3] M. Nosonovsky and B. Bhushan, "Multiscale Dissipative Mechanisms and Hierarchical Surfaces," 2008, doi: 10.1007/978-3-540-78425-8.

[4] S. Gorb, "Attachment Devices of Insect Cuticle," *Attach. Devices Insect Cuticle*, 2001, doi: 10.1007/0-306-47515-4.

[5] B. Bhushan, "Adhesion of multi-level hierarchical attachment systems in gecko feet," *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 12–13, pp. 1213–1258, Oct. 2007, doi: 10.1163/156856107782328353.

[6] M. R. Cutkosky and S. Kim, "Design and fabrication of multi-material structures for bioinspired robots," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 367, no. 1894, pp. 1799–1813, May 2009, doi: 10.1098/RSTA.2009.0013.
[7] K. L. Shephard, "Functions for fish mucus," *Rev. Fish Biol. Fish.*, vol. 4, no. 4, pp. 401–429, Dec. 1994, doi: 10.1007/BF00042888/METRICS.
[8] J. W. Hoyt, "Hydrodynamic Drag Reduction Due to Fish Slimes," *PROC. A SYMP. Swim. Fly. NATURE, (PASADENA, U.S.A. JUL.8-12, 1974)*, vol. 3, pp. 653–672, 1975, doi: 10.1007/978-1-4757-1326-8_13.
[9] K. S. Choi *et al.*, "Turbulent drag reduction using compliant surfaces," *Proc. R. Soc. London. Ser. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 453, no. 1965, pp. 2229–2240, 1997, doi: 10.1098/RSPA.1997.0119.
[10] D. W. Bechert, M. Bruse, W. Hage, J. G. T. Van Der Hoeven, and G. Hoppe, "Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry," *J. Fluid Mech.*, vol. 338, pp. 59–87, May 1997, doi: 10.1017/S0022112096004673.
[11] W.-E. Reif, "Squamation and Ecology of Sharks," *Frankfurt, Ger. Cour. Forschungsinstitut Senckenb.*, vol. 78, pp. 1–255, Dec. 1985.
[12] D. W. Bechert, M. Bruse, and W. Hage, "Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin," *Exp. Fluids*, vol. 28, no. 5, pp. 403–412, 2000, doi: 10.1007/S003480050400/METRICS.
[13] B. Dean and B. Bhushan, "Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 368, no. 1929, pp. 4775–4806, Oct. 2010, doi: 10.1098/RSTA.2010.0201.
[14] D. Y. Zhang, Y. H. Luo, X. Li, and H. W. Chen, "Numerical simulation and experimental study of drag-reducing surface of a real shark skin," *J. Hydrodyn. Ser. B*, vol. 23, no. 2, pp. 204–211, Apr. 2011, doi: 10.1016/S1001-6058(10)60105-9.
[15] Y. F. Fu, C. Q. Yuan, and X. Q. Bai, "Marine drag reduction of shark skin inspired riblet surfaces," *Biosurface and Biotribology*, vol. 3, no. 1, pp. 11–24, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.BSBT.2017.02.001.
[16] L. M. Santos *et al.*, "Passive separation control of shortfin mako shark skin in a turbulent boundary layer," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 128, p. 110433, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2021.110433.
[17] M. P. Schultz, "Frictional resistance of antifouling coating systems," *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, 2004, doi: 10.1115/1.1845552.
[18] J. Seok and J. C. Park, "Numerical simulation of resistance performance according to surface roughness in container ships," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, 2020, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2019.05.003.
[19] 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.
[20] N. Abbas and Z. Ali, "CFD Study of the Effect of Surface Roughness on the Resistance of KVLCC2 tanker," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 44, no. 1, 2022, [Online]. Available: https://journal.tishreen.edu.sy/index.php/engscnc/article/view/12028.
[21] Z. Ali, "CFD Study of the ship resistance performance according to surface roughness," Master Thesis, Tishreen University, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Department of Marine Engineering, 2021.

[22] M. D. Ibrahim *et al.*, "The study of drag reduction on ships inspired by simplified shark skin imitation," *Appl. Bionics Biomech.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/7854321.
[23] G. D. Bixler and B. Bhushan, "Fluid Drag Reduction with Shark-Skin Riblet Inspired Microstructured Surfaces," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 23, no. 36, pp. 4507–4528, Sep. 2013, doi: 10.1002/ADFM.201203683.
[24] D. Chen, X. Liu, X. Cui, L. Zhang, and H. Chen, "Research progress and development trend of the drag reduction inspired by fish skin," *Prog. Org. Coatings*, vol. 182, p. 107613, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.PORGCOAT.2023.107613.
[25] 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.
[26] H. Pakzad, A. Nouri-Borujerdi, and A. Moosavi, "Drag reduction ability of slippery liquid-infused surfaces: A review," *Prog. Org. Coatings*, vol. 170, p. 106970, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.PORGCOAT.2022.106970.
[27] H. Qiu, K. Chauhan, and C. Lei, "A numerical study of drag reduction performance of simplified shell surface microstructures," *Ocean Eng.*, vol. 217, p. 107916, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2020.107916.
[28] S. Fan, X. Han, Y. Tang, Y. Wang, and X. Kong, "Shark Skin—An Inspiration for the Development of a Novel and Simple Biomimetic Turbulent Drag Reduction Topology," *Sustain. 2022, Vol. 14, Page 16662*, vol. 14, no. 24, p. 16662, Dec. 2022, doi: 10.3390/SU142416662.