Optimizing The Design Of The KVLCC2 Rudder Using CFD To Reduce The Effect Of The Cavitation

Dr. Michel Barbahan*
Dr. Sayr Sliba**
Ghaeth Mayhoub***

(Received 26 / 7 / 2024. Accepted 18 / 9 / 2024)

□ ABSTRACT □

The rudder of the KVLCC2 tanker ship has a lifting wing section NACA0018, and accordingly, in this research, the effect of the geometric parameters of the rudder on the formation of cavitation around it was studied and analyzed, and then the shape of the rudder was modified to reduce cavitation around it. The URANS equations (Unsteady RANS Averaged Navier Stocks Equation) and the k-□ SST turbulence model available within the Ansys program were used to solve the Navier-Stokes equations. Cavitation was initially calculated for a benchmark case using CFD in order to ensure the accuracy of the numerical results compared to the available experimental results. The comparison confirmed the accuracy of CFD in predicting cavitation. After that, the effect of the geometric parameters of the rudder on the cavitation formed around the rudder with and without rudder drift angles and at different values of the cavitation number and Froude number was studied. Then, the shape of the rudder was modified to reduce the possibility of cavitation occurring, and it was retested again at different values of the drift angles and the cavitation number. The results obtained confirmed that dividing the rudder into two symmetrical, independently controllable parts and deflecting only one part of the rudder significantly reduces the cavitation formed on the rudder surface.

Keywords: Cavitation, KVLCC2 tanker, NACA0018, 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, Tishreen University, Latakia, Syria. Email: dr.michelyouzefbarbahan@tishreen.edu.sy
** Prof.، Marine Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. Email: sayrsliba64@gmail.com
*** PhD Student, Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria Email: gharth.mayhoub@tishreen.edu.sy

تحسين تصميم دفة السفينة KVLCC2 باستخدام CFD لتقليل تأثير ظاهرة التكهف

د. ميشيل بربهان *

د. سائر صليبه **

غيث ميهوب ***

(تاريخ الإيداع 26 / 7 / 2024. قُبِل للنشر في 18/ 9 / 2024)

ملخّص

إن دفة السفينة الناقلة KVLCC2 لها مقطع الجناح الرافع NACA0018، وعليه تم في هذا البحث دراسة وتحليل تأثير البارامترات الهندسية للدفة على تشكل التكهف حولها، ومن ثم تم تعديل شكل الدفة بما يقلل التكهف حولها. تم استخدام معادلات الـ URANS (Unsteady RANS Averaged Navier Stocks Equation) ومودیل الاضطراب SST k-ω المتوفرة ضمن برنامج الـ Ansys لحل معادلات نافييه ستوكس. تم في البداية حساب التكهف لحالة معيارية باستخدام الـ CFD بهدف التأكد من دقة النتائج الرقمية بالمقارنة مع النتائج التجريبية المتوفرة. المقارنة أكدت دقة الـ CFD في التنبؤ بالتكهف، حيث كان التوافق بين النتائج الرقمية والنتائج التجريبية جيد جداً. بعد ذلك تم دراسة تأثير البارامترات الهندسية للدفة على التكهف المتشكل حول الدفة مع وبدون زوايا انحراف للدفة وعند قيم مختلفة لرقم التكهف ولرقم فرود. بعد ذلك تم تعديل شكل الدفة بما يقلل من احتمال حدوث التكهف حيث لا يؤثر كثيراً على أدائها، وتم إعادة اختبارها من جديد عند قيم مختلفة لزوايا الانحراف ولرقم التكهف. النتائج التي تم الحصول عليها أكدت على أن تقسيم الدفة إلى جزئين متناظرين قابلين للتحكم بشكل مستقل وحرف جزء واحد فقط من الدفة يقلل بشكل كبير من التكهف المتشكل على سطح الدفة.

الكلمات المفتاحية: التكهف، ناقلة النفط KVLCC2، دفة NACA0018، ميكانيك الموائع الحسابية، برنامج الـ Ansys، برنامج الـ Fluent، طريقة الـ URANS، موديل الاضطراب SST K-ω.

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 تشرين- اللاذقية – سورية.

الايميل: dr.michelyouzefbarbahan@tishreen.edu.sy

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

الايميل:sayrsliba64@gmail.com

*** طالب دكتوراه – قسم الهندسة البحرية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين- اللاذقية – سورية.

الايميل:gharth.mayhoub@tishreen.edu.sy

مقدمة:

تكمن الوظيفة الأساسية لدفة التوجيه في تأمين المناورة المطلوبة للسفينة أثناء حركتها بالإضافة إلى الاستقرار الاتجاهي ضمن الحدود الدنيا للقوى اللازمة لحرف هذه الدفة. يقصد بالمناورة قدرة السفينة على تغيير اتجاه حركتها، أي تغيير زاوية خط سيرها ضمن حيّز صغير وعند أقل انحراف لدفة التوجيه. وتعتبر هذه الخاصية الملاحية هامة جداً بالنسبة للقواطر العاملة في الموانئ، والسفن النهرية، والسفن البحرية.

يقصد بالاستقرار الاتجاهي قدرة السفينة في المحافظة على اتجاه حركتها ومقاومة تأثير القوى الخارجية (أي قوى الريح والأمواج) التي تعمل على تغيير اتجاه حركة السفينة. إنَّ انعدام الاستقرار الاتجاهي للسفينة الذي يظهر على شكل انحراف تلقائي للسفينة عن خط سيرها وصعوبة في المحافظة على اتجاه حركتها أو خط سيرها المفترض يؤدي إلى زيادة مقاومات السفينة (نتيجة لحرف دفة التوجيه)، وانخفاض السرعة الوسطية للسفينة وازدياد استهلاك الوقود. تعتبر هذه الخاصية هامة جداً بالنسبة لسفن المحيطات التي تقوم برحلات طويلة على خطوط ملاحية محددة. يتم تأمين المناورة المطلوبة للسفينة والاستقرار الاتجاهي بواسطة دفات توجيه متوضعة عادةً في الجزء الخلفي من بدن السفينة. تتعلق هاتان الخاصيتان بأبعاد وشكل ومكان توضع دفة التوجيه، بالإضافة إلى شكل بدن السفينة، وأجهزة الدفع وعوامل أخرى عديدة. لقد أدى السعي للحصول على نتائج مثالية لعمل دفات التوجيه في الآونة الأخيرة إلى استبدال دفات التوجيه المسطحة بدفات توجيه انسيابية على شكل جناح رافع يحسن من أداء عملية المناورة.

تعتبر ظاهرة التكهف من الظواهر الهامة جداً، والتي تؤثر بشكل سلبي جداً على أداء كل من الدفة والرفاص وبالتالي يجب أخذها بعين الاعتبار عند تصميم هذه الملحقات، حيث أن هذه الملحقات تعمل في ظروف تدفق معقدة جداً وتحفز نشوء هذه الظاهرة [1]، يعود تاريخ التكهف إلى منتصف القرن الثامن عشر عندما أولى عالم الرياضيات السويسري أويلر (1754) بعض الاهتمام للموضوع في ورقة بحثية قُرئت على أكاديمية برلين للعلوم والفنون. ركزت هذه الورقة على احتمال حدوث ظاهرة نطلق عليها اليوم التكهف على تصميم معين لعجلة الماء وتأثير ذلك على أدائها. ومع ذلك لم يتم العثور على معلومات كافية عن التكهف المتعلق مباشرة بالصناعة البحرية حتى منتصف القرن التاسع عشر عندما قدم رينولدز (1873) سلسلة من الأوراق البحثية المعنية بأسباب سباق المحركات البخارية ذات الدفع اللولبي. قدمت هذه الأوراق موضوع التكهف كما نعرفه اليوم من خلال مناقشة تأثيره على أداء الرفاص. عادة عندما تحدث حالات التكهف القصوى وجد أن سرعة دوران العمود تزيد بشكل كبير بالمقارنة مع الحالة الطبيعية. في عام 1894 لاحظ الباحث تشارلز بارسونز نفس الحالة أثناء تجاربه التي أجراها على سفينته التوربينية البخارية ثلاثية المحاور والتي سماها Turbinia. أظهرت نتائج التجارب التي قام بها أنه يمكن التقليل من ظاهرة التكهف من خلال زيادة مساحة سطح شفرة الرفاص. وللتأكد من نتائج هذه التجارب التي أجراها على سفينة توربينا أنشأ بارسونز في عام 1895 قناة دوارة مغلقة (نفق) من أجل دراسة هذه الظاهرة. سمح هذا النفق الصغير باختبار رفاصات ذات قطر in 2. وكان رائدًا في أنفاق التكهف كما نعرفها اليوم. ومع ذلك وإدراكًا لحدود هذا النفق قام بارسونز ببناء نفق أكبر بكثير بعد 15 عامًا حيث تمكن من اختبار نماذج مروحية بقطر in 12. بعد ذلك تم بناء أنفاق لدراسة التكهف في أوروبا وأمريكا خلال عشرينيات وثلاثينيات القرن العشرين وعند بناء كل نفق جديد كان يتم الاستفادة من النتائج التي تم التوصل إليها سابقاً. وفي الآونة الأخيرة تم إنشاء سلسلة من مرافق التكهف الكبيرة جدًا في مواقع مختلفة حول العالم، ومن الأمثلة النموذجية على ذلك خزان القطر منخفض الضغط MA للأنفاق السابقة التي تم بناؤها في أوروبا [2].

في هذه الدراسة تم اختيار دفة السفينة الناقلة KVLCC2 لأن ناقلات النفط تعتبر من أهم أنواع السفن في الأسطول البحري العالمي بالإضافة إلى توفر الكثير من النتائج التجريبية لنماذج هذه السفينة وعليه نلاحظ وجود الكثير من الأبحاث عليها، على سبيل المثال لا الحصر ننصح القارئ بالاطلاع على الأبحاث التالية التي تم إجراؤها على هذه السفن، هذه بعض الأبحاث التي تم إجراؤها على ناقلة النفط KVLCC2 [21]–[3].

هناك العديد من الدراسات التي تقوم بدراسة التكهف حول الدفات البحرية، ولاتزال هذه الدراسات مستمرة بشكل حثيث في هذا المجال بهدف الحد من هذه الظاهرة ومن تأثيراتها السلبية. في عام 1997 قام .Shen et al [22] بدراسة التكهف حول إحدى الدفات البحرية كما قام بدراسة تأثير بدن السفينة والرفاص على هذه الظاهرة حول الدفة، وقام بإجراء العديد من التجارب في هذا الاتجاه، أثبتت هذه الدراسة على أن التكهف يؤثر بشكل سلبي على أداء الدفة.

قام Paik et al., 2012 [23] وزملاؤه بدراسة التكهف المتشكل على الدفة خلف رفاص ذو ستة شفرات، مع وبدون زوايا انحراف للدفة، أثبتت هذه الدراسة على أن زاوية الانحراف تسرع بشكل كبير من نشوء التكهف حول الدفة، كما أثبتت هذه الدراسة على أن التكهف ينشأ ويدوم بشكل قوي عند زاوية الانحراف 7 درجة.

Berger et al., 2015 [24]، تم في هذا المقال إجراء حسابات رقمية لدراسة التأثير المتبادل بين الدفة والرفاص باستخدام دمج بين نوعين من الطرق وهي معادلات الـ RANS والطريقة التكرارية المعتمدة على Panel method، استخدمت طريقة الـ Panel لحساب الجريان حول الرفاص باستخدام الكود PANMARE لإجراء 7 دورات للرفاص. بينما استخدم برنامج ANSYS CFX وموديل الاضطراب $K-\omega\ SST$ لحساب الجريان حول الدفة، تم حساب القوى الجانبية عند زوايا مختلفة للدفة وحقول التكهف. كذلك تم حساب معاملات قوى السحب والرفع للدفة عند معاملات تقدم مختلفة وتم دراسة تأثيرها على أداء الدفع، جميع النتائج أبدت تطابق جيد مع القيم التجريبية.

Lloyed et al., 2017 [25]، تم في هذا البحث دراسة التكهف رقميا باستخدام تقنية الـ CFD حول الرفاص E779A، تم إجراء الدراسة باستخدام العديد من الشبكات الرقمية وموديلات الاضطراب، أثبتت هذه الدراسة على أن تنعيم الشبكة في مناطق تشكل التكهف يزيد من دقة النتائج الرقمية.

قام Paik et al., 2022 [26] وزملاؤه بدراسة التكهف حول الدفة مع وبدون زوايا انحراف، وعند أرقام رينولدز كبيرة نسبيا وتتراوح بين 10^8-10^7، تم دراسة التأثير المتبادل بين الدفة والرفاص عند هذه القيم. تم إجراء الدراسة رقميا وتجريبيا. النتائج الرقمية التي تم الحصول عليها توافقت بشكل كبير مع النتائج التجريبية. خلصت الدراسة إلى أن التكهف يكون أكثر احتمالية في المنطقة $0.5 < Z/Span < 0.9$ من الدفة، وعليه تم تعديل شكل الدفة في هذه المنطقة وبالفعل من خلال إعادة التجربة مع الشكل الجديد من الدفة، أثبت هؤلاء الباحثون أن هذا التغيير يحسن من قدرة الدفة على مقاومة تشكل التكهف.

لظاهره التكهف تأثير سلبي كبير على أداء الدفة فهي تسبب اضطراب في الجريان يؤدي إلى تراجع أداء وفعالية الجناح الرافع وتناقص في معامل الرفع، والذي بدوره يقلل من فعالية الدفة، كما وقد تتسبب ظاهرة التكهف بحدوث تآكل في سطح الدفة وفقدان لكتلتها بسبب انفجار الفقاعات المملوءة بأبخرة الماء على سطح الدفة والتي تزيد من مستويات الضجيج والاهتزاز بشكل كبير وتتطلب تكاليف إصلاح وترميم عالية، [28] ,[27]. وعليه فإن دراسة هذه الظاهرة (التكهف) حول الرفاص والدفة يعتبر من المواضيع الهامة جداً في مجال صناعة السفن، بهدف الوصول إلى التصميم الأمثل لكل منها.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث وأهدافه في الأمور التالية:

- دراسة تأثير البارامترات الهندسية لدفة NACA0018 المستخدمة مع ناقلة النفط KVLCC2 على التكهف المتشكل حولها بدون ومع زوايا انحراف مختلفة.
- تحليل ظاهرة التكهف المتشكلة حول هذه الدفة لمعرفة الظروف المؤدية إلى هذه الظاهرة.
- تحسين تصميم الدفة بالشكل الذي يقلل من التكهف.

منهجية البحث

- تحليلية تجريبية في بيئة الـ ANSYS الافتراضية.

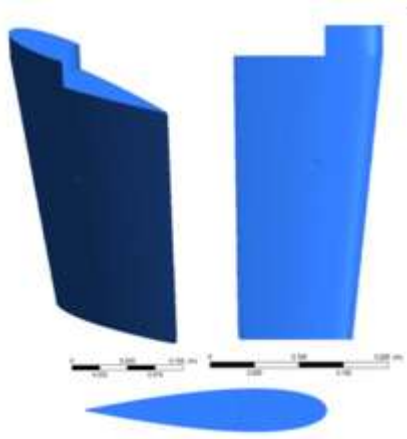
طرائق البحث ومواده:

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

- النموذج الهندسي لدفة السفينة الناقلة KVLCC2 [29].
- تقنية الـ CFD والتي يوفرها الكثير من البرامج حالياً.
- طريقة الـ URANS وموديل الاضطراب $K-\omega\ SST$ لحل معادلات نافييه ستوكس، والمتوفرة ضمن برنامج الـ Ansys الذي تم استخدامه.

1. الأبعاد الهندسية

تم في هذه الدراسة استخدام دفة السفينة KVLCC2 الموضحة في الشكل 1، والشكل 2، وهي ذات مقطع NACA 0018 ولكن بوتر متغير القيمة على امتداد ارتفاع الدفة.



الشكل 1: دفة ناقلة النفط KVLCC2 ذات مقطع NACA 0018 [29].

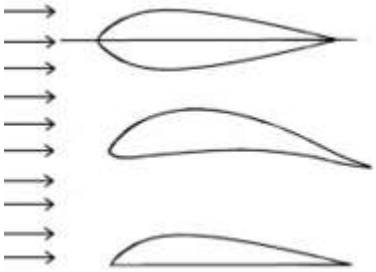
الشكل 2: توضع الدفة خلف نموذج السفينة الناقلة KVLCC2 [29].

تم دراسة الدفة بمقياس تصغير 1/58 مشابه تماماً لمقياس تصغير النموذج أثناء اختباره في قنوات الجر. الشكل 2 يوضح كيفية توضع الدفة خلف نموذج السفينة الناقلة KVLCC2. ويوضح لنا الشكل أن ارتفاع أسفل الدفة عن مستوي قاع النموذج هو 3.94 ملم.

2. البارامترات المميزة للجناح الرافع

الجناح الرافع هو أداة تمتاز بقوة جر أو مقاومة صغيرة، وقوة حمل أو رفع كبيرة. إنَّ تطبيقاته العملية تشمل أجنحة الطائرات، وشفرات العنفات بأنواعها والضواغط والمضخات والمراوح ودفات التوجيه التي هي موضوع بحثنا.

الجناح هو جسم أسطواني مولداته متوازية ودليله ذو شكل هندسي معين يمتاز بانسيابية مع خطوط التيار. يُمثل الجناح الأسطواني بمقطع أو بروفيل عمودي على مولداته وأغلب الأجنحة تُنتج من مقطع أساسي متناظر لجسم أسطواني (ليس المقصود هنا الجسم الأسطواني الدوراني القائم). يُعطى المقطع انحناءً في وسطه أو في هيكله ليحقق شروط الجريان حوله، ويُنتج قوة الحمل المطلوبة. كما يُعطى الجناح الشكل الانسيابي التابع لخطوط التيار لينتج أثراً ذيلياً نحيفاً وبالتالي قوة جر أصغرية. يبين الشكل 3 مقاطع عرضية لنماذج أجنحة مختلفة الاستخدام [28].



الشكل 3: مقاطع عرضية لنماذج أجنحة رافعة [28].

هناك بعض التعاريف الأساسية المتفق عليها بشأن أجزاء الجناح نلخصها فيما يلي، الشكل 4:

الخط الوسطي: هو خط التناظر بين نقاط السطح العلوي ونقاط السطح السفلي للجناح.

الوتر: هو المستقيم الواصل بين مركز تحدب الطرف القائد للجناح (مقدمة الجناح) ومركز تحدب الطرف اللاحق (مؤخرة الجناح).

طول الوتر: هو طول المستقيم المحصور بين نقطتي تقاطع الوتر مع سطح الجناح ويساوي هذا الطول طول الجناح l عندما يكون مقطعه متناظراً، الشكل 5.

الامتداد أو ارتفاع الجناح h: هو طول الجناح وفق الاتجاه العمودي على الجريان.

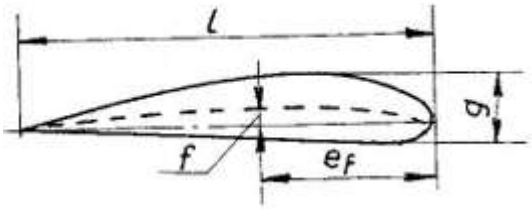
المساحة المُسقطة S: وهي مساحة مسقط الجناح على مستوٍ يوازي الجريان. عندما يكون للجناح مقطع ثابت منتظم، فإنَّ المساحة المُسقطة للجناح تكون مساوية لجداء وتره في امتداده أو ارتفاعه.

نسبة التطاول: وتُعطى بالعلاقة الآتية:

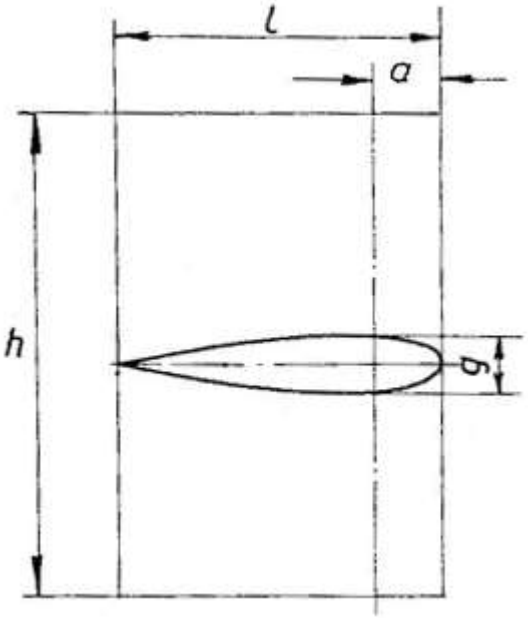
$$\lambda = \frac{h^2}{S} \qquad \textbf{1}$$

وعندما تكون المساحة المُسقطة للجناح على شكل مستطيل، تصبح نسبة التطاول مساوية لـ:

$$\lambda = \frac{h^2}{h.l} = \frac{h}{l} \qquad \textbf{2}$$



الشكل 4: أبعاد مقطع الجناح الرافع [28].



الشكل 5: أبعاد دفة ذات مقطع متناظر [28].

انحناء الجناح أو ما يسمى بالحنو f: وهو المسافة الأعظمية بين الخط الوسطي والوتر، وهو يمثل مقياس لمقدار انحناء الجناح.

بعد الحنو e_f: وهو يُمثل بعد مركز الانحناء الأعظمي عن حافة الهجوم الأمامية لمقطع الجناح (الطرف القائد للجناح).

انسيابية الجناح $\frac{g}{l}$: وهي تُمثل نسبة سماكة مقطع الجناح إلى طوله.

نسبة الحنو $\frac{f}{l}$: وهي تُمثل نسبة انحناء الجناح إلى طوله.

موضع الحنو $\frac{e_f}{l}$: وهو يُمثل نسبة بعد الحنو إلى طول الجناح.

تُستخدم حالياً في مجال السفن أجنحة ذات مقطع متناظر من سلسلة أو مجموعة NASA ذات الرمز f/l ، e_f/l ، g/l. مع الإشارة إلى أن الحد الأخير يُميز برقمين صفريين. فمثلاً إذا كان لدينا مقطع جناح رافع يتمتع بالرمز الآتي:

$$NASA\ 0006-0018$$

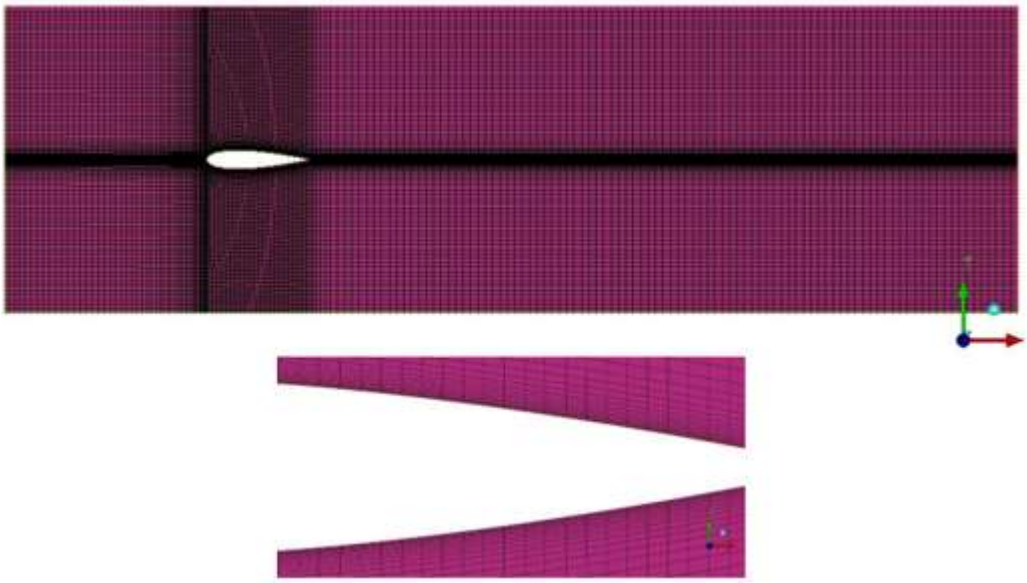
الرقم الصفري الأول يخص الحد f/l، أي أن: $f/l=0$.

الرقم الصفري الثاني يخص الحد e_f/l، أي أن:$e_f/l=0$.

الرقمان الأخيران يخصان الحد g/l الذي يمثل انسيابية الجناح، أي أن انسيابية الجناح تتراوح بين 06 و18. بالإضافة إلى ذلك تستخدم أيضاً أجنحة رافعة ذات مقطع $Göttingen$، وأيضاً أجنحة رافعة ذات مقطع جوكوفسكي [28].

3. الشبكة الرقمية

لقد تم استخدام الشبكات المنتظمة لإجراء هذه الدراسة وذلك على اعتبار أن الشبكات المنتظمة تعطي أفضل النتائج في الحسابات الرقمية، وكما أنها هي الأفضل من ناحية المدة الحسابية، حيث أنها تحتاج إلى وقت أقل لإتمام العمليات الحسابية [13]. الشكل 6 يعرض الشبكة المنتظمة التي يتم استخدامها لإتمام هذه الدراسة، وكما نلاحظ من الشكل في الأسفل أنه تم تنعيم الخلايا ضمن منطقة الطبقة الحدية بشكل جيد، وذلك من أجل حل بروفايل السرعة بالشكل الصحيح ضمن منطقة الطبقة الحدية.



الشكل 6: الشبكة المنتظمة التي تم استخدامها في الدراسة (الصورة في الأعلى) والتنعيم في منطقة الطبقة الحدية (الصورة في الأسفل).

تم استخدام برنامج الـ ICEM من أجل بناء هذه الشبكات. وتم استخدام نفس النوع من الشبكات لكل الحالات المدروسة. عدد الخلايا 5 مليون خلية حسابية.

النتائج والمناقشة:

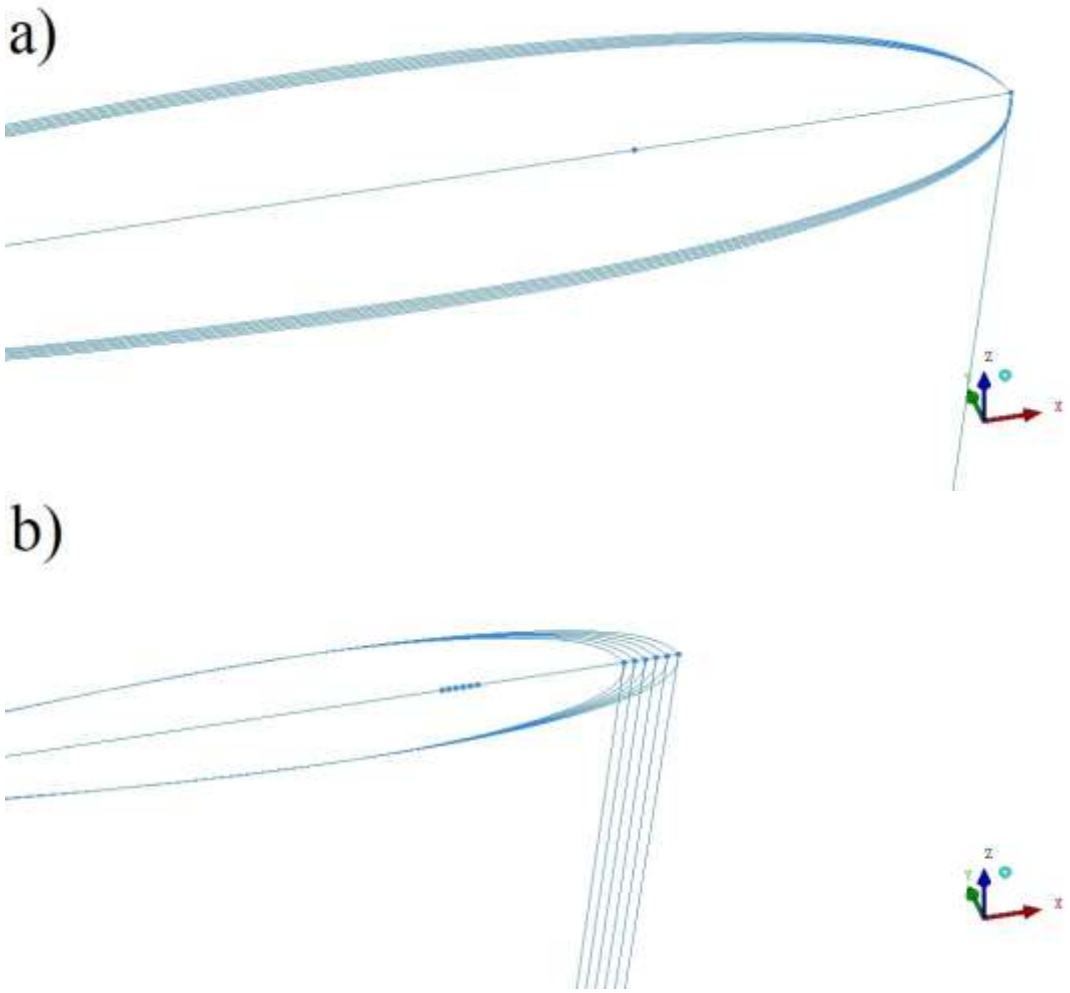
من أجل التحقق من كفاءة الشبكة الرقمية ودقة الإعدادات الرقمية التي تم استخدامها، تم في الدراسة السابقة [30] تقييم وتحليل كل من حقل السرعة حول الجناح الرافع NACA0018 من خلال مقارنة النتائج الرقمية مع النتائج

التجريبية المتوفرة ضمن عمل Gim 2013 [31]، كما وتم في الدراسة [30] تقييم وتحليل حقل التكهف حول الرفاص VP1304 ومقارنة النتائج الرقمية مع النتائج التجريبية التي تم نشرها في المؤتمر الدولي الثاني لأنظمة الدفع البحري [32].

تأثير بارامترات الدفة على حقل التكهف حول الدفة

دفة السفينة الناقلة KVLCC2 ذات مقطع NACA0018، وبالتالي فإن قيمة كل من نسبة الحنو وموضع الحنو هي صفر، وأما انسيابية الجناح فهي 0.18، وعليه تم في البداية دراسة تأثير تغيير قيمة انسيابية الجناح على التكهف المتشكل حول الدفة وفق الخطوتين التاليتين:

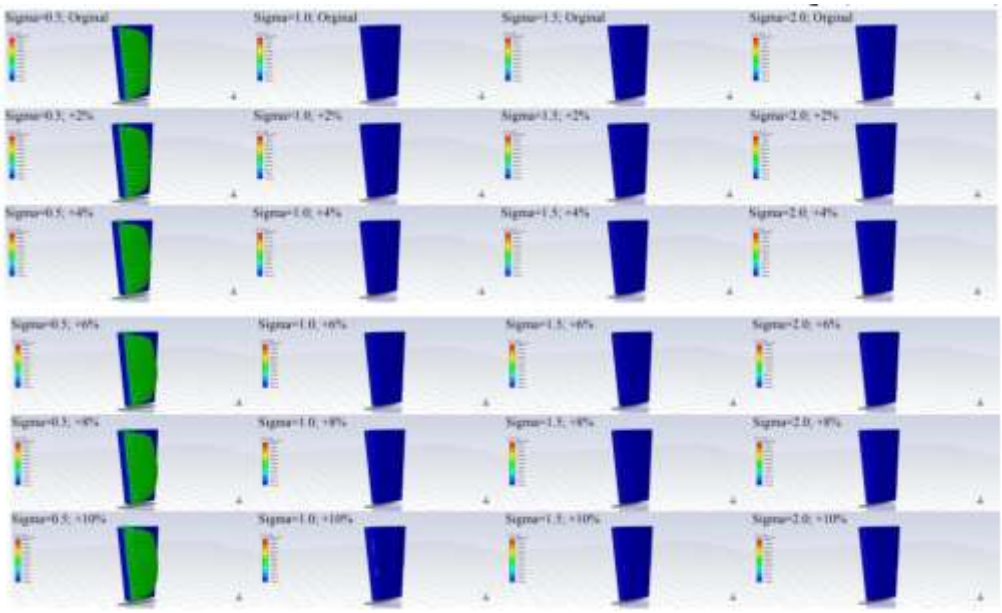
- تم في البداية المحافظة على طول الوتر L وزيادة السماكة g حيث تم أخذ خمس قيم مختلفة للسماكة، في كل مرة تم زيادة السماكة بمقدار 2%، الشكل 7–a.
- في الخطوة التالية تم تثبيت السماكة g وتم تغيير طول الوتر L حيث تم أخذ خمس قيم مختلفة لطول الوتر، في كل مرة تم زيادة الطول بمقدار 2%، الشكل 7–b.



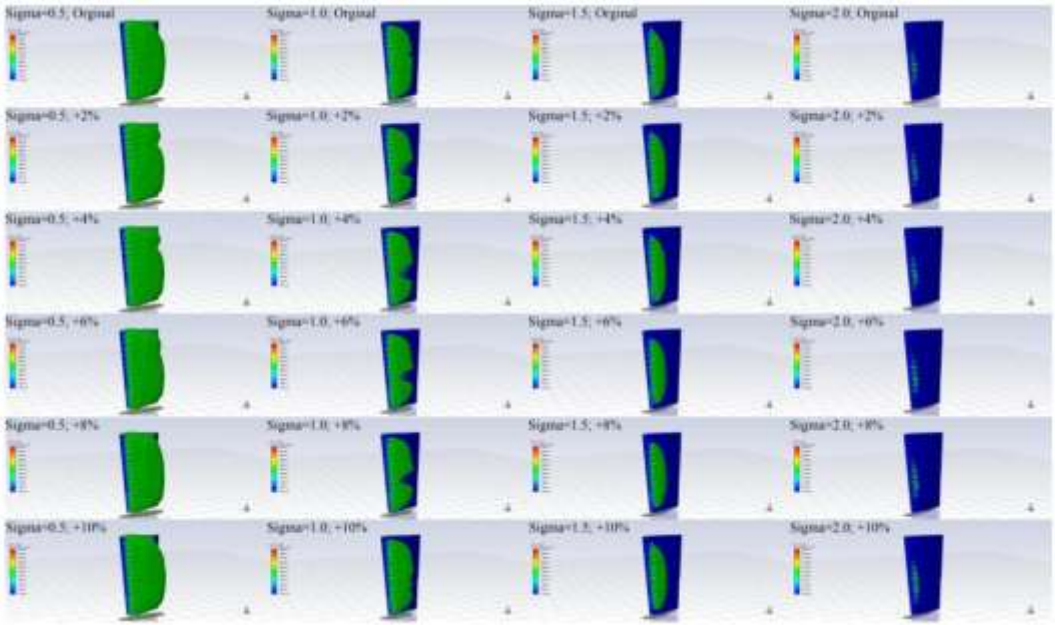
الشكل 7: الحالات التي تم دراستها مع تغيير نسبة الحنو.

في هذه المرحلة تم إجراء حسابات التكهف حول الدفة (ذات القيمة المتغيرة لانسيابية الجناح) عند أربع قيم لرقم التكهف (0.5، 1، 1.5، 2) بالإضافة لحالة بدون تكهف وذلك لكل من الدفة الأصلية والدفات الجديدة وعند كل قيمة لرقم

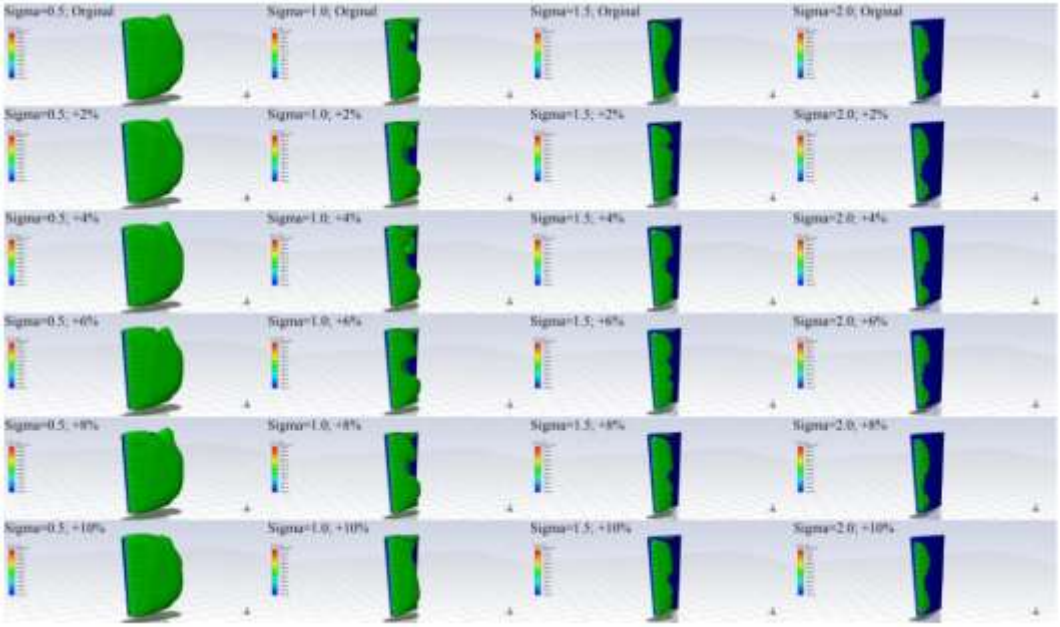
التكهف تم إجراء الحسابات عند ثلاث قيم لزاوية الانحراف (0˚، 10˚، 20˚)، وعليه تم إجراء حسابات التكهف لـ 165 حالة متضمنة الدفة الأصلية والحالات التي لا يوجد فيها تكهف. الشكل 8 وحتى الشكل 13 تبين التكهف حول الدفة في كل الحالات السابقة بما فيها الدفة الأصلية، حيث يوضح الشكل 8 وحتى الشكل 10 التكهف حول الدفة مع زوايا الانحراف الثلاث (0˚، 10˚، 20˚) مع سماكات متغيرة للدفة. بينما الشكل 11 وحتى الشكل 13 توضح التكهف حول الدفة مع زوايا الانحراف الثلاث (0˚، 10˚، 20˚) مع أطوال متغيرة لطول الوتر.



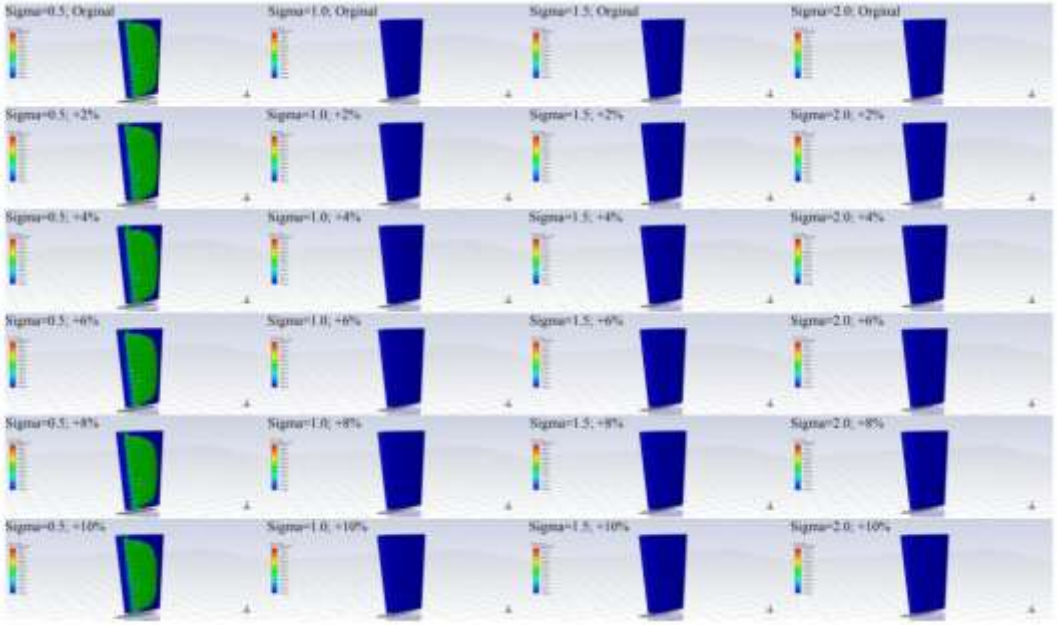
الشكل 8: التكهف حول الدفة بدون زاوية انحراف ومع قيم مختلفة للسماكة.



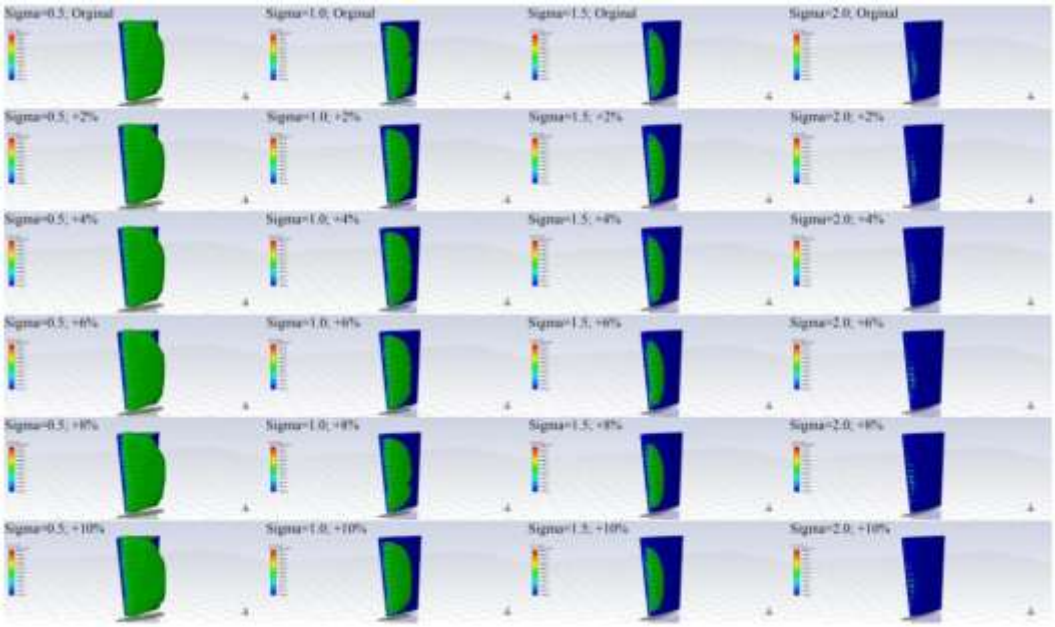
الشكل 9: التكهف حول الدفة مع زاوية انحراف 10˚ ومع قيم مختلفة للسماكة.



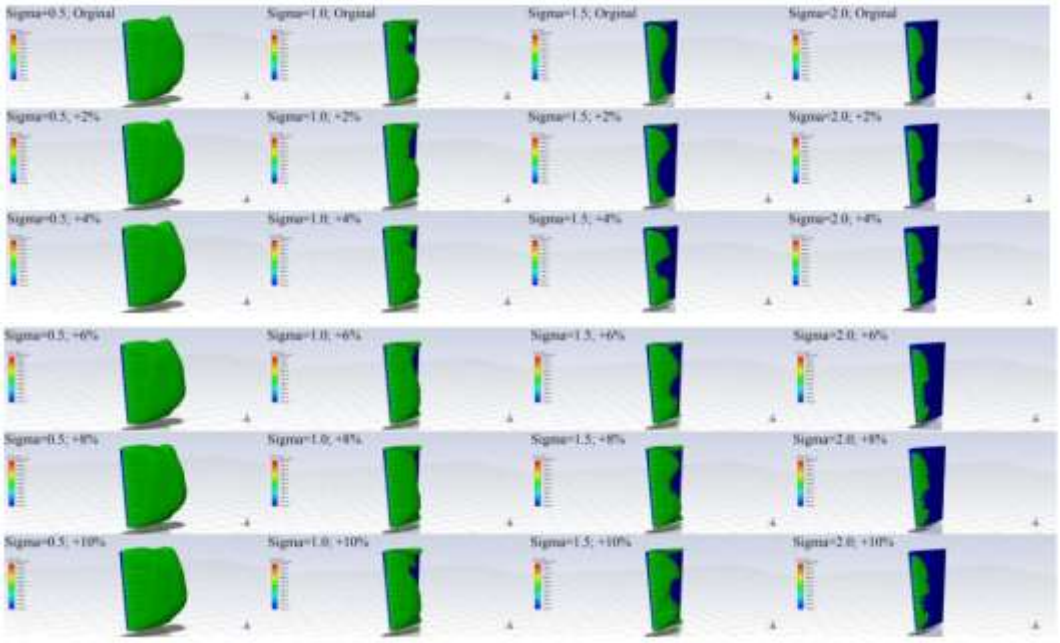
الشكل 10: التكهف حول الدفة مع زاوية انحراف 20° ومع قيم مختلفة للسماكة.



الشكل 11: التكهف حول الدفة بدون زاوية انحراف ومع قيم مختلفة لطول الدفة.



الشكل 12: التكهف حول الدفة مع زاوية انحراف 10° ومع قيم مختلفة للطول.

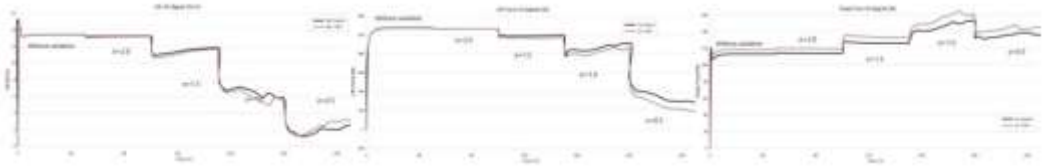


الشكل 13: التكهف حول الدفة مع زاوية انحراف 20° ومع قيم مختلفة للطول.

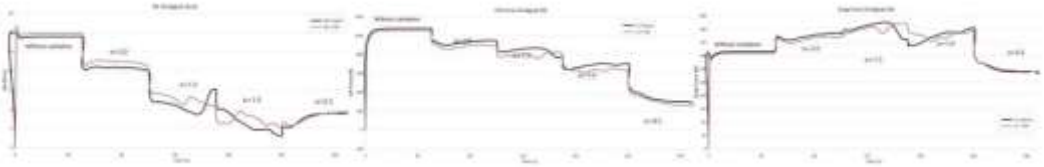
كما هو واضح من هذه الأشكال السابقة فإن تغيير انسيابية الجناح لا تؤثر تقريباً على التكهف المتشكل حول بدن الدفة ولا تقلل منه أبداً، وعليه لابد من تعديل شكل الدفة من أجل تقليل احتمال حدوث التكهف. يعرض الشكل 14 وحتى الشكل 17 القوى والعزوم المؤثرة على الدفة بوجود زاويتي الانحراف 10° و20° لكل من الدفة الأصلية والدفة ذات السماكة والطول الأكبر بمقدار 10% بالمقارنة مع الدفة الأصلية. المحور الأفقي هو الزمن الحسابي، وأما المحور

الشاقولي في هذه المخططات هو Mz العزم اللازم لتدوير الدفة [N.m] وFy قوة الرفع المؤثرة على الدفة [N] وFx قوة المقاومة التي تتعرض لها الدفة [N].

كما هو واضح من الشكل 14 والشكل 15 فإن زيادة السماكة بوجود زاوية الانحراف 10˚ يؤثر سلبا على قوة الرفع على كامل المجال المدروس (بدون ومع تكهف) وعند الزاوية 20˚ فإنه يزيد من العزم اللازم لتدوير الدفة.

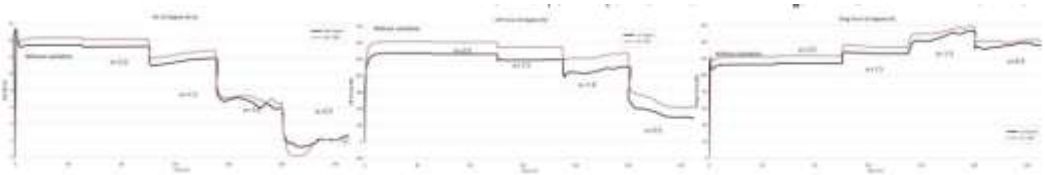


الشكل 14: القوى والعزم المؤثران على الدفة في حالة تغيير السماكة عند الزاوية 10˚.

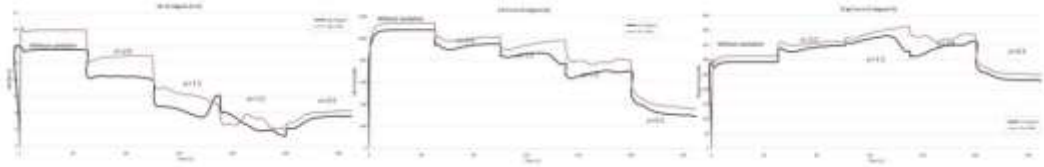


الشكل 15: القوى والعزم المؤثران على الدفة في حالة تغيير السماكة عند الزاوية 20˚.

نلاحظ من الشكل 16 والشكل 17 أن زيادة طول الجناح الرافع مع الحفاظ على السماكة يزيد من قوة الرفع بوجود زاوية الانحراف ولكن بنفس الوقت يزيد من المقاومة والعزم اللازم لتأثير الدفة.



الشكل 16: القوى والعزم المؤثران على الدفة في حالة تغيير الطول عند الزاوية 10˚.

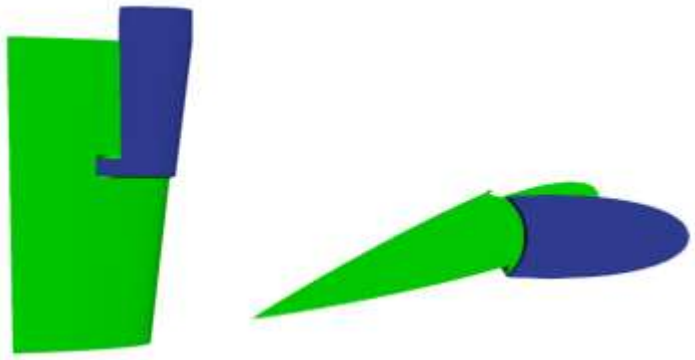


الشكل 17: القوى والعزم المؤثران على الدفة في حالة تغيير الطول عند الزاوية 20˚.

من كل الأشكال السابقة الخاصة بالقوى والعزم نلاحظ أن تأثير التكهف دائما سلبيا على كل من قوة الرفع (حيث يسبب انخفاضها) وعلى قوة المقاومة (حيث يسبب زيادتها) ولكن وجود التكهف يقلل من العزم اللازم لتأثير الدفة. كلما قلت قيمة رقم التكهف الحدي كلما زاد التأثير الناتج عن التكهف. كما نلاحظ من هذه الأشكال أن زيادة الطول والسماكة لا يلعب دوراً إيجابياً في التقليل من التكهف، وعليه لابد من تعديل شكل الدفة بطريقة مختلفة من أجل التقليل من التكهف المؤثر عليها، وهذا ما سيتم القيام به في الفقرة التالية.

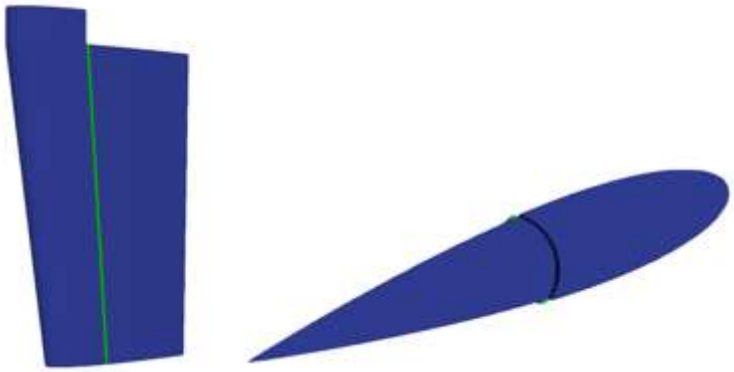
4. تعديل شكل الدفة من أجل تقليل التكهف

من خلال الدراسة السابقة تبين لنا أن وجود الدفة على الزاوية 0˚ يساعد وبشكل كبير في تفادي التكهف حتى مع القيم الصغيرة لرقم التكهف، بناءً على ذلك تم في البداية تعديل شكل الدفة لتصبح دفة نصف متوازنة كما هو موضح في الشكل 18 بهدف إبقاء جزء من الدفة على الزاوية 0˚ أثناء حرف الدفة. في الخطوة التالية تم إضافة انتفاخ بارتفاع 0.75 ملم على جانبي منتصف الدفة بهدف رفع الضغط قبل الانتفاخ من خلال تقليل السرعة، انظر الشكل 19. بعد ذلك تم إضافة نفس الانتفاخ السابق (بارتفاع 0.75 ملم) على جانبي مقدمة الدفة، الشكل 20. في الخطوة التي تليها تم إضافة نفس الانتفاخ على جانب واحد من مقدمة الدفة وهو الجانب الذي يتشكل عليه التكهف ومن ثم تم زيادة ارتفاع الانتفاخ ليصبح 1.5 ملم، انظر الشكل 21. في الخطوة التي تليها تم إضافة حواف بارزة لتشكل مجاري في الجزء العلوي من الدفة بهدف تنظيم التدفق، انظر الشكل 22. في الخطوة الأخيرة تم تحويل الدفة إلى دفة مفتوحة بحيث يبقى نصف الدفة على الزاوية صفر ويتم حرف النصف الآخر كما هو موضح في الشكل 23. تم إجراء الدراسة لكل الأشكال المعدلة كما في الحالات السابقة في البداية بدون تكهف ومن ثم عند أربع قيم لرقم التكهف (0.5، 1.0، 1.5، 2.0) وذلك لكل من زاويتي الانحراف 10˚ و20˚. النتائج التي تم الحصول عليها أثبتت أن الدفة النصف المتوازنة تقلل من التكهف المتشكل على الدفة في الجزء العلوي منها وذلك عند أرقام التكهف (1.0، 1.5، 2.0) عند كل من زاويتي الانحراف 10˚ و20˚، لكن التكهف يبقى مسيطرا في الجزء السفلي من الدفة، وبالتالي هي تقلل من التكهف المتشكل ولكن لا تزيله بشكل كامل.



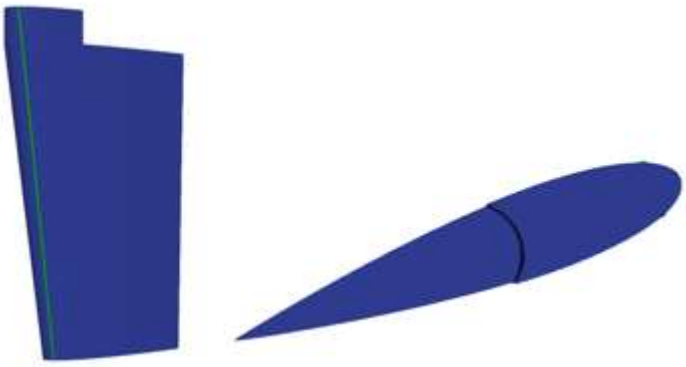
الشكل 18: الدفة نصف المتزنة.

كما أكدت النتائج التي تم الحصول عليها أن استخدام الدفة نصف المتوازنة يقلل من العزم اللازم لتدوير الدفة مع وبدون وجود التكهف وهذا موضح في الشكل 26، حيث نلاحظ من هذا الشكل أن كل من العزم والمقاومة تقل بالمقارنة مع الدفة الأصلية وهذا يعتبر أمراً إيجابياً، ولكن بالمقابل نلاحظ انخفاض في قيمة قوة الرفع، إلا أنه يمكن التغلب على هذه المشكلة من خلال زيادة زاوية انحراف الدفة.

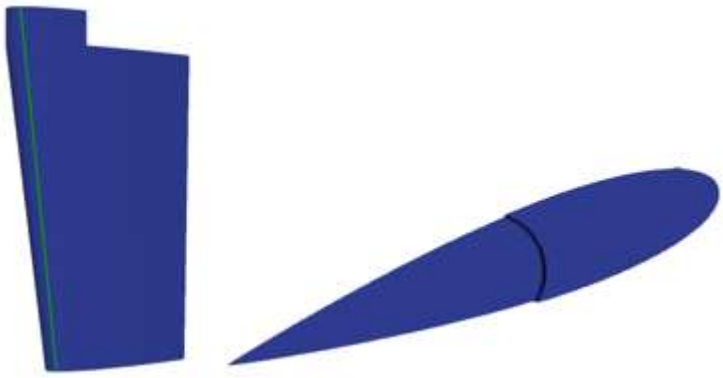


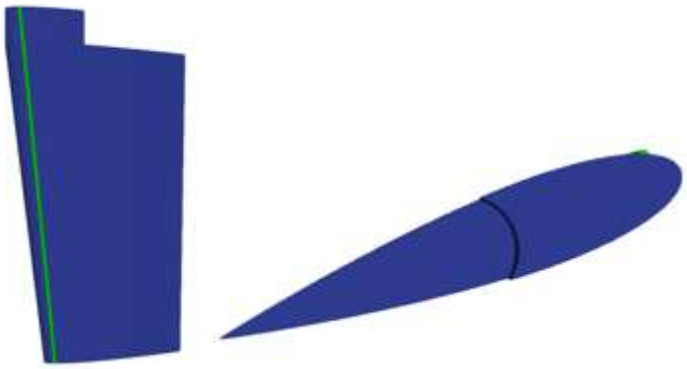
الشكل 19: إضافة انتفاخ بارتفاع 0.75 ملم على جانبي وسط الدفة.

إضافة الانتفاخ على جانبي منتصف الدفة لا يؤثر كثيرا على حقل التكهف المتشكل حول الدفة بوجود زاوية الانحراف وهذا موضح في كل من الشكل 24 والشكل 25.



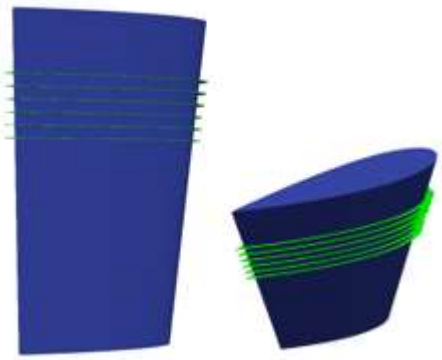
الشكل 20: إضافة انتفاخ بارتفاع 0.75 ملم على جانبي مقدمة الدفة.





الشكل 21: إضافة انتفاخ بارتفاع 0.75 (الصور في الأعلى) و1.5 ملم (الصور في الأسفل) على جانب واحد من مقدمة الدفة.

إضافة الانتفاخ بارتفاع 0.75 ملم على جانبي مقدمة الدفة أو على جانب تشكل التكهف في المقدمة لا يؤثر على حقل التكهف المتشكل مع زاوية الانحراف 10˚ لكنه يقلل من التكهف المتشكل حول الدفة عند زاوية الانحراف 20˚ وذلك عند أرقام التكهف (1.0، 1.5، 2.0) ونفس الأمر يمكن ملاحظته في حالة الانتفاخ 1.5 ملم ولا يوجد أي تأثير لهذين الانتفاخين في حالة رقم التكهف 0.5 وهذا أمر متوقع لأنه عند مثل هذا الرقم للتكهف لا يمكن تفادي التكهف أبداً. وجود الانتفاخ عند المقدمة يتسبب بزيادة بسيطة للمقاومة عند الزاوية 10˚ وانخفاض بسيط في قيمتها عند الزاوية 20˚. العزم اللازم لتدوير الدفة لا يتأثر كثيراً بوجود الانتفاخ بالمقارنة مع الدفة الأصلية. في حين يحدث انخفاض في قوة الرفع الناتجة عن حرف الدفة وذلك لكل الحالات بوجود الانتفاخ بالمقارنة مع الدفة الأصلية.

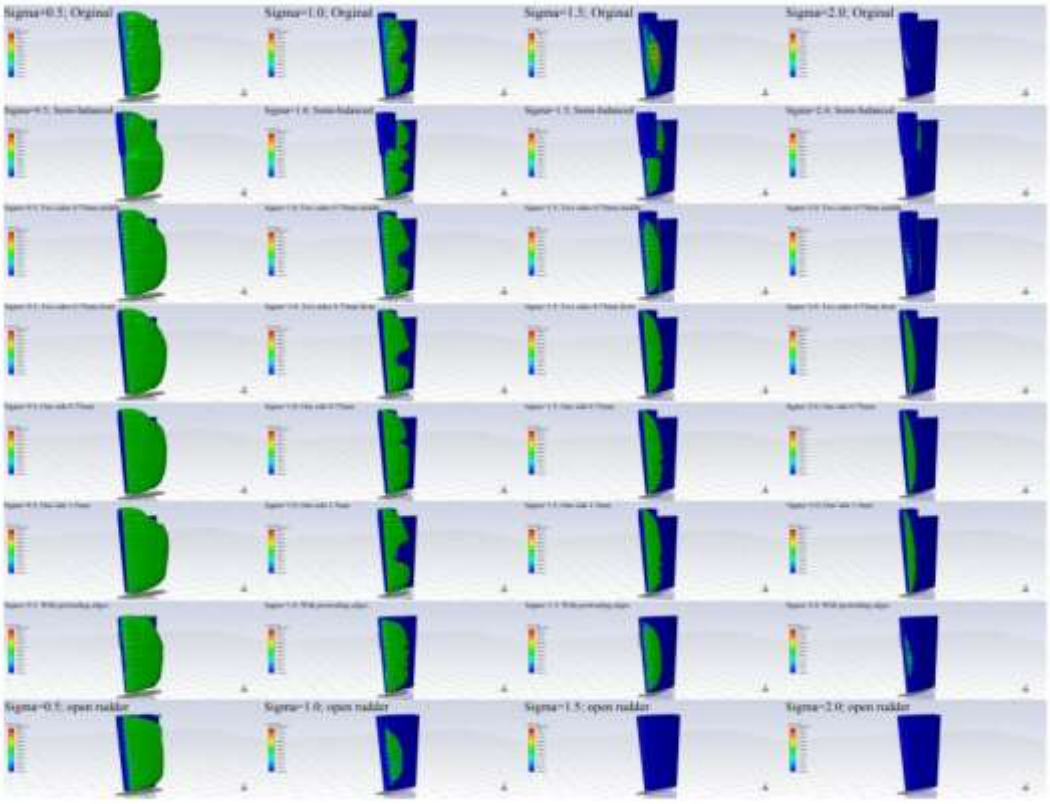


الشكل 22: إضافة مجاري على جانبي الدفة.

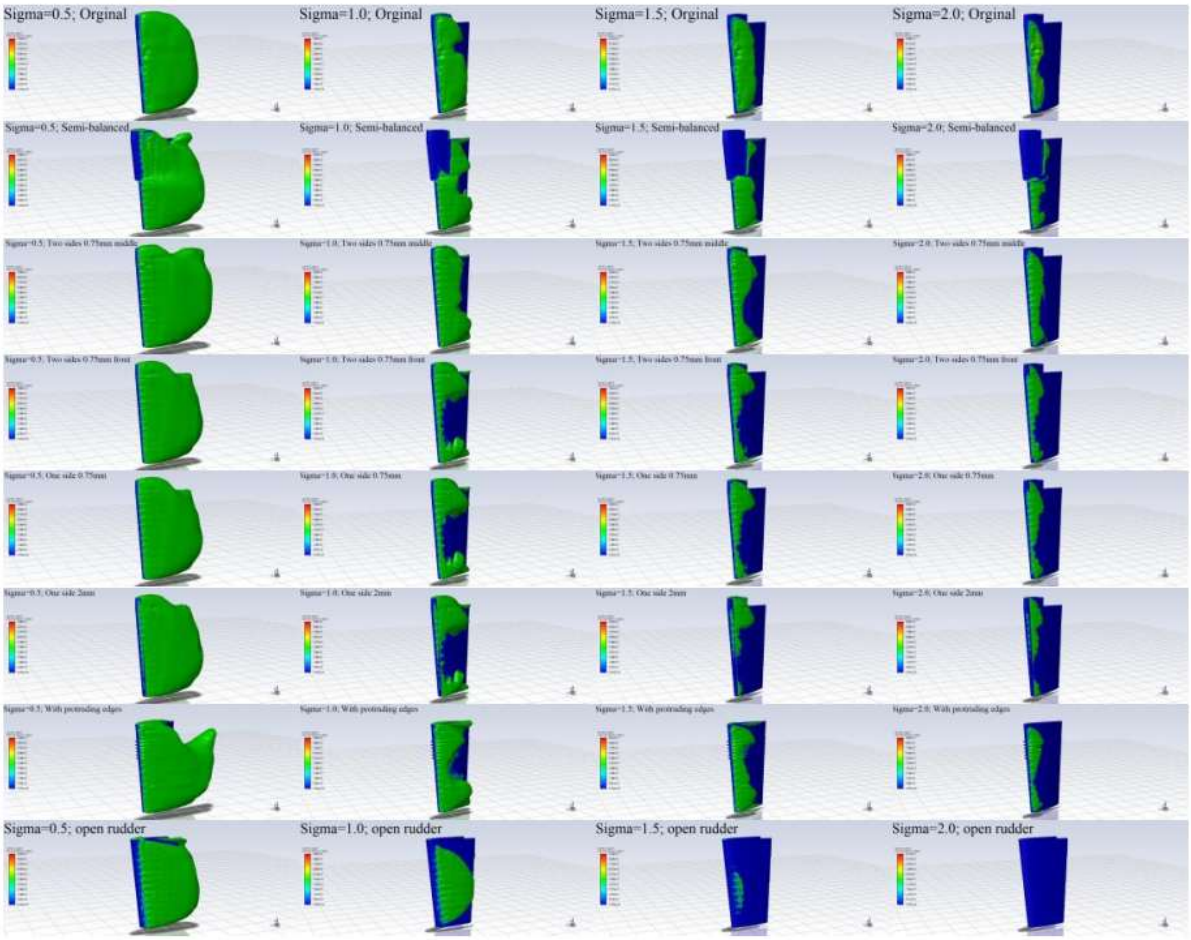
إضافة الحواف البارزة الموضحة في الشكل 22 بهدف تشكيل مجاري لتنظيم التدفق لا يقلل أبداً من التكهف المتشكل حول الدفة. الملاحظة المهمة التي تم الحصول عليها عند إضافة هذه المجاري هي تخفيضها للمقاومة التي تتعرض لها الدفة بحالة غياب التكهف (Without cavitation) عند زاوية الانحراف الكبيرة 20˚ وهذا موضح في الشكل 28، وهذا يؤكد على أن هذه المجاري تساعد في تنظيم التدفق المضطرب مما يقلل من المقاومة التي تتعرض لها الدفة.

الشكل 23: تحول الدفة إلى دفة مفتوحة تتألف من جزئين.

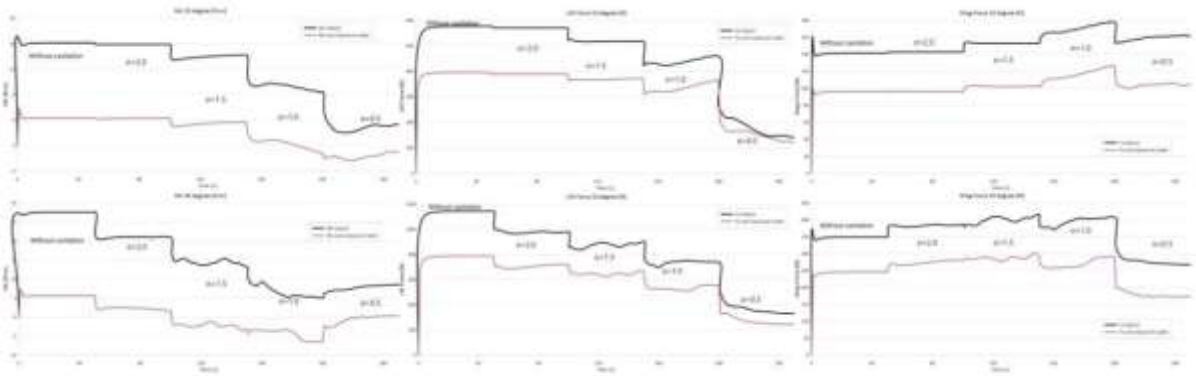
بما أن زاوية الانحراف تعتبر من أهم أسباب ظهور التكهف حول الدفة وفي حالة عمل الدفة بدون زاوية انحراف فإن التكهف لا يحدث إلا عند أرقام التكهف الصغيرة جداً $(\sigma = 0.5)$ وهذا ما تم إثباته في عمل سابق [30]، وعليه فلقد تم تقسيم الدفة إلى جزئين متناظرين كما هو موضح في الشكل 23 بحيث إذا أردنا حرف الدفة نقوم بحرف أحد الجزئين والجزء الثاني يبقى على الزاوية 0°. من خلال النتائج التي تم الحصول عليها تم إثبات أن هذه الطريقة تقلل بشكل كبير من التكهف المتشكل حول الدفة حيث لوحظ غياب التكهف بشكل كامل عند أرقام التكهف 2.0، 1.5 وتقليل المساحة التي يغطيها عند رقم التكهف 1.0. في حالة رقم التكهف 0.5 فكما نلاحظ من كل الحالات لا يمكن تفادي التكهف لأنه في هذه الحالة يكون الضغط المؤثر على الدفة قريب جداً من ضغط التبخر الأمر الذي سيؤدي حتما إلى نشوء التكهف أيا كان يكون شكل الدفة.



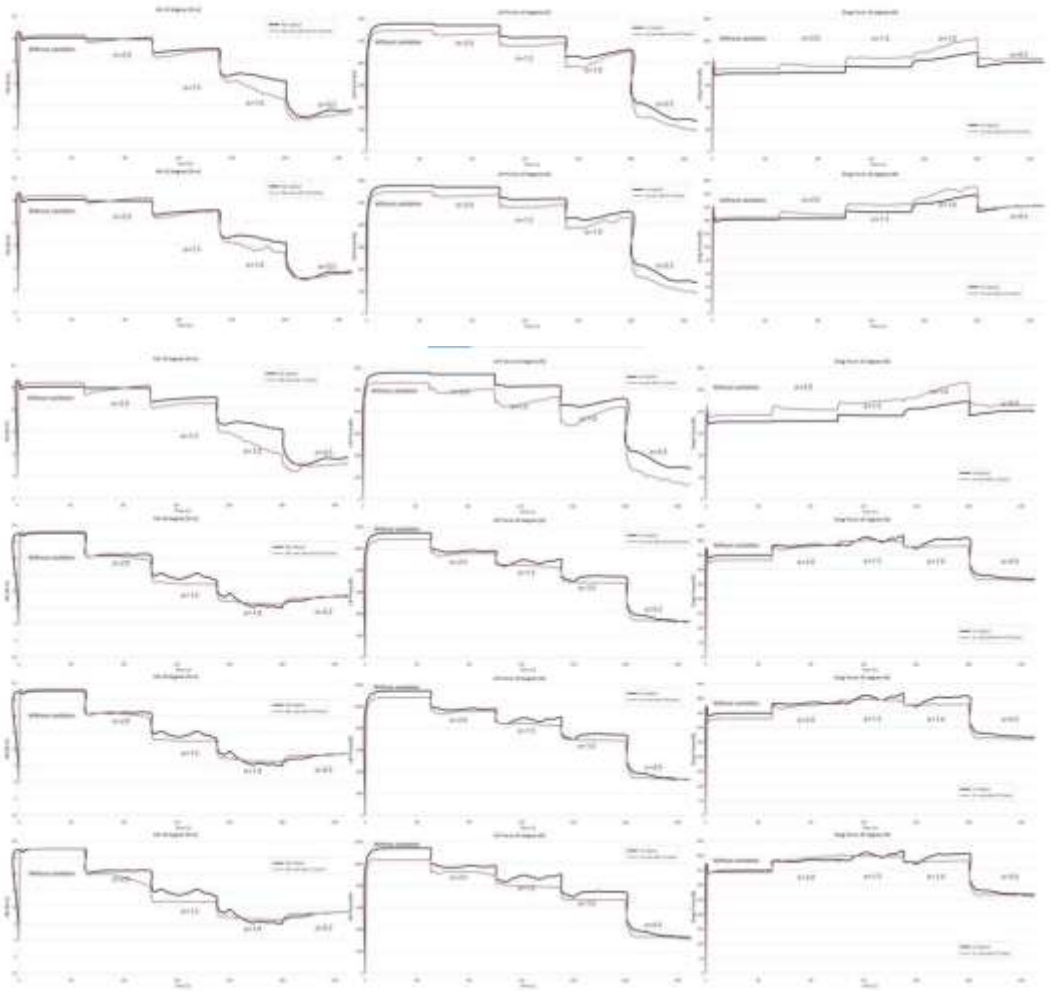
الشكل 24: التكهف حول الدفة الأصلية والدفات المعدلة عند زاوية الانحراف 10°.



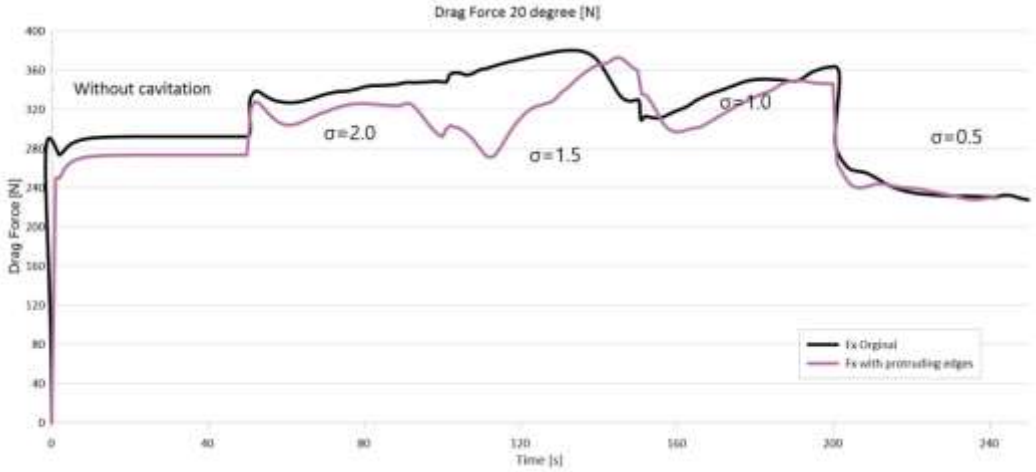
الشكل 25: التكهف حول الدفة الأصلية والدفات المعدلة عند زاوية الانحراف 20°.



الشكل 26: القوى والعزم المؤثر على الدفة نصف المتوازنة بالمقارنة مع الدفة الأصلية عند زاويتي الانحراف 10° و20°.

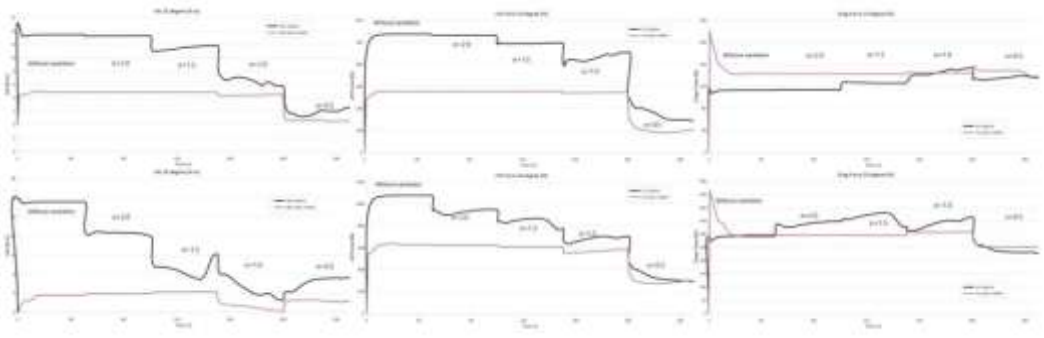


الشكل 27: القوى والعزم المؤثر على الدفة بوجود انتفاخ على جانبي المقدمة أو على جانب واحد من المقدمة بالمقارنة مع الدفة الأصلية عند زاويتي الانحراف 10° و20°.



الشكل 28: المقاومة المؤثرة على الدفة بوجود الحواف البارزة بالمقارنة مع الدفة الأصلية.

الشي الهام جداً في حالة الدفة المفتوحة والذي تم ملاحظته أن تحويل الدفة إلى دفة مفتوحة يقلل بشكل كبير من العزم اللازم لتدوير الدفة كما هو موضح في الشكل 29، حيث نلاحظ من هذا الشكل انخفاضاً كبيراً في العزم اللازم لتدوير الدفة مع زاويتي الانحراف 10° و20°. الأمر الإيجابي الثاني هو استقرار كل من قوة الرفع المؤثرة على الدفة المفتوحة والعزم اللازم لتدويرها حتى الوصول إلى رقم التكهف 1.0 حيث عند هذه القيمة نلاحظ تأثيراً قليلاً للتكهف على قوة الرفع ويزداد التأثير عند القيمة 0.5. السلبية الأساسية في هذا التصميم هو انخفاض قوة الرفع الناتجة عن الدفة والذي يقلل حتما من فعاليتها، إلا أن هذا الأمر يمكن التغلب عليه من خلال زيادة زاوية حرف الدفة.



الشكل 29: القوى والعزم المؤثر على الدفة المفتوحة بالمقارنة مع الدفة الأصلية عند زاويتي الانحراف 10° و20°.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات

- زيادة سماكة الدفة أو طولها لا يقلل من التكهف الحاصل حول الدفة.
- زاوية انحراف الدفة تؤدي إلى زيادة احتمال حدوث التكهف حتى مع أرقام التكهف الكبيرة، وغيابها يقلل بشكل كبير من التكهف.
- الدفة المتوازنة تقلل من التكهف المتشكل في الجزء العلوي من الدفة ولكنا لا تؤثر على التكهف في الأجزاء الأخرى من الدفة.
- وجود بروز على شكل انتفاخ على جانبي مقدمة الدفة أو على جانب نشوء التكهف يقلل من احتمال نشوء التكهف عند زوايا الانحراف الكبيرة.
- الدفة المفتوحة هي أفضل شكل تم اقتراحه للتقليل من التكهف حيث تقلل من التكهف بشكل كبير بوجود زاوية الانحراف.
- إذا كانت الشروط المحيطة بالدفة تحقق رقم تكهف منخفض، مثلاً ($\sigma = 0.5$)، فإن حدوث التكهف سيكون أمراً حتمياً بغض النظر عن شكل الدفة وذلك لأن الضغط المؤثر عند محيط الدفة يكون قريباً جداً من ضغط التبخر الأمر الذي يؤدي إلى تشكل التكهف بشكل حتمي حول الدفة.
- كل الأشكال التي تم تطويرها واختبارها أدت إلى انخفاض في قوة الرفع الناتجة عن الدفة، إلا أنه مع هذه الأشكال الجيدة والتي قللت من احتمال حدوث التكهف يمكن التغلب على هذا الأمر من خلال زيادة قليلة في زاوية الانحراف.

التوصيات

- دراسة التدفق والتكهف حول بدن الدفة أمر غاية في الأهمية في المراحل الأولى من تصميم الدفة وذلك من أجل معرفة فعالية هذه الدفة عند قيم مختلفة لسرعة التدفق، ومن أجل معرفة الأماكن التي من الممكن أن يحدث فيها التكهف.
- استخدام الدفة المفتوحة في حال كانت ظروف التدفق حول دفة السفينة تزيد من احتمال حدوث التكهف.

التوصيات للأعمال المستقبلية

- أن يتم دراسة التدفق والتكهف حول الدفة المفتوحة خلف بدن السفينة وبوجود الرفاص العامل.

References:

[1] T. Perez, Ship Motion Control: Course Keeping and Roll Stabilisation Using Rudder and Fins. 2005.

[2] J. S. Carlton, "Marine Propellers and Propulsion," Mar. Propellers Propuls., 2007, doi: 10.1016/B978-0-7506-8150-6.X5000-1.

[3] Y. C. Kim, K. S. Kim, J. Kim, Y. Kim, I. R. Park, and Y. H. Jang, "Analysis of added resistance and seakeeping responses in head sea conditions for low-speed full ships using URANS approach," Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng., vol. 9, no. 6, 2017, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2017.03.001.

[4] A. Dogrul, S. Song, and Y. K. Demirel, "Scale effect on ship resistance components and form factor," Ocean Eng., vol. 209, 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107428.

[5] G. B. Deng, P. Queutey, and M. Visonneau, "RANS prediction of the KVLCC2 tanker in head waves," in Journal of Hydrodynamics, 2010, doi: 10.1016/S1001-6058(09)60239-0.

[6] J. Andersson et al., "Ship-scale CFD benchmark study of a pre-swirl duct on KVLCC2," Appl. Ocean Res., vol. 123, p. 103134, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.APOR.2022.103134.

[7] J. Lee, D. M. Park, Y. K.-S. Engineering, Ocean, and undefined 2013, "Comparison of added resistance for different bow shapes of kvlcc2," naoe.eng.osaka-u.ac.jp.

[8] 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.

[9] 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.

[10] N. Abbas and Z. Ali, "CFD Study of the Effect of Surface Roughness on the Resistance of KVLCC2 tanker," Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser., vol. 44, no. 1, 2022.

[11] N. Abbas and B. Oderah, "CFD Study of the Bulbous Bow Effect on the Resistance of the Tanker-KVLCC2," Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser., vol. 43, no. 4, 2021.

[12] 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.

[13] 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.
[14] N. Kornev, A. Taranov, E. Shchukin, and L. Kleinsorge, "Development of hybrid URANS-LES methods for flow simulation in the ship stern area," Ocean Eng., vol. 38, no. 16, pp. 1831–1838, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.oceaneng.2011.09.024.
[15] H. Islam and C. Guedes Soares, "Uncertainty analysis in ship resistance prediction using OpenFOAM," Ocean Eng., vol. 191, p. 105805, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.02.033.
[16] H. Guo, Z. Zou, Y. Liu, and F. Wang, "Investigation on hull-propeller-rudder interaction by RANS simulation of captive model tests for a twin-screw ship," Ocean Eng., vol. 162, pp. 259–273, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.035.
[17] S. J. Lee, H. R. Kim, W. J. Kim, and S. H. Van, "Wind tunnel tests on flow characteristics of the KRISO 3,600 TEU containership and 300K VLCC double-deck ship models," J. Sh. Res., vol. 47, no. 1, pp. 24–38, 2003.
[18] K. Kume, J. Hasegawa, Y. Tsukada, J. Fujisawa, R. Fukasawa, and M. Hinatsu, "Measurements of hydrodynamic forces, surface pressure, and wake for obliquely towed tanker model and uncertainty analysis for CFD validation," J. Mar. Sci. Technol., vol. 11, no. 2, pp. 65–75, Jun. 2006, doi: 10.1007/s00773-005-0209-y.
[19] H. Xie and B. Zhang, "Numerical Simulation of Resistance Field of Hull-Propeller-Rudder Coupling," J. Mar. Sci., vol. 3, no. 1, 2021, doi: 10.30564/jms.v3i1.2506.
[20] X. Yang, Y. Yin, and J. J. Lian, "Numerical study on the hydrodynamic performance of the semi-spade rudder and propeller," Adv. Mech. Eng., vol. 11, no. 1, 2019, doi: 10.1177/1687814018823107.
[21] M. Kim, O. Hizir, O. Turan, and A. Incecik, "Numerical studies on added resistance and motions of KVLCC2 in head seas for various ship speeds," Ocean Eng., vol. 140, pp. 466–476, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.06.019.
[22] Y. T. Shen, K. D. Remmers, and C. W. Jiang, "Effects of ship hull and propeller on rudder cavitation," J. Sh. Res., vol. 41, no. 3, 1997, doi: 10.5957/jsr.1997.41.3.172.
[23] B. G. Paik, G. Do Kim, K. S. Kim, K. Y. Kim, and S. B. Suh, "Measurements of the rudder inflow affecting the rudder cavitation," Ocean Eng., vol. 48, pp. 1–9, 2012, doi: 10.1016/j.oceaneng.2012.03.005.
[24] S. Berger, M. Scharf, J. C. Neitzel, and R. Angerbauer, "Numerical Simulation of Propeller-Rudder Interaction for Non-Cavitating and Cavitating Flows Using Different Approaches," Fourth Int. Symp. Mar. Propulsors, no. June, pp. 408–419, 2015.
[25] T. P. Lloyd, G. Vaz, D. R. Rijpkema, and A. Reverberi, "Computational fluid dynamics prediction of propeller sheet and tip vortex cavitation including solution verification and validation," Proc. Fifth Int. Symp. Mar. Propulsors, vol. 1, no. June, 2017.
[26] B. G. Paik, S. W. Jeong, Y. H. Park, J. W. Ahn, I. Park, and J. Kim, "Improvement of Rudder Cavitation Performance Using Rudder Inflow Measurements in Large Cavitation Tunnel," J. Mar. Sci. Eng., vol. 10, no. 2, 2022, doi: 10.3390/jmse10020266.
[27] C. E. Brennen, Cavitation and bubble dynamics. Cambridge University Press, 2013.
[28] M. Barbahan, Ships Hydrodynamic /2/. ,Directorate of books and publications,Tishreen University, 2014.
[29] Simman 2008, "MOERI KVLCC2 Geometry and Conditions, SIMMAN 2008, FORCE Technology." Accessed: 26-Jun-2021. [Online]. Available: http://www.simman2008.dk/KVLCC/KVLCC2/kvlcc2_geometry.html.
[30] M. Barbahan, S. Sliba, and G. Mayhoub, "Study and analysis of the flow and

cavitation field around the KVLCC2-rudder using CFD," Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser., vol. 46, no. 4, 2024.
[31] O. S. Gim, "Assessment of flow characteristics around twin rudder with various gaps using PIV analysis in uniform flow," Ocean Eng., vol. 66, 2013, doi: 10.1016/j.oceaneng.2013.03.018.
[32] M. Abdel-Maksoud, "Proceedings 2011- SMP," in Proceedings of the Second International Symposium on Marine Propulsors - smp'11 15 – 17 June 2011, Hamburg, Germany, 2011, Accessed: 28-Apr-2024. [Online]. Available: https://www.marinepropulsors.com/proceedings-2011.php.