

# Study of the Forces Affecting the KVLCC2 Tanker and the Propeller MP687 Using the Verification and Validation Procedure and CFD

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

(Received 24 / 7 / 2023. Accepted 11 / 12 / 2023)

## □ ABSTRACT □

This research presents a detailed explanation of the Verification and Validation procedure followed in CFD (Computational Fluid Dynamic) and EFD (Experimental Fluid Dynamic) studies. This procedure ensures the method's correctness and the settings used in these studies. V&V was applied to the case of the forces affecting the KVLCC2 tanker and its propeller using CFD. The URANS (Unsteady RANS Averaged Navier Stocks Equations) and the  $k - \omega SST$  turbulence model was used to solve the Navier Stokes equations. KVLCC2 tanker model (Korean Very Large Crude Carrier 2nd Generation) was selected to conduct this study due to the availability of many EFD results for this ship model, which may help the researchers to be sure about the quality of the numerical results. Initially, the ship model was studied alone without any appendages. The open water test was also conducted on the ship's propeller. Then, the results were subject to Verification and Validation procedure to demonstrate the accuracy of the equations and turbulence model used.

**Keywords:** KVLCC2 tanker, Verification and Validation, MOERI propeller, URANS, VOF, ANSYS, Fluent, CFD, K-□ SST.

**Copyright**



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

---

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

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

\*\*\* PhD Student, Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. Email: [wehad.hatem@tishreen.edu.sy](mailto:wehad.hatem@tishreen.edu.sy)

## دراسة القوى المؤثرة على كل من ناقلة النفط KVLCC2 والرفاص MP687 باستخدام منهج التحقق والتحقيق و CFD

د. رامي حوا\*

د. نوار عباس\*\*

وهاد حاتم\*\*\*

تاريخ الإيداع 2023 / 7 / 24. قُبِلَ للنشر في 2023 / 12 / 11

### □ ملخص □

تقدم هذه الدراسة شرحاً مفصلاً لمنهج التحقق والتحقيق المتبع في الدراسات الرقمية والتجريبية. يتم استخدام هذا المنهج لضمان صحة الطريقة والإعدادات المستخدمة في هذه الدراسات. تم تطبيق هذا المنهج على حالة القوى المؤثرة على ناقلة النفط KVLCC2 والرفاص الخاص بها باستخدام CFD. تم استخدام معادلات الـ URANS (Unsteady RANS Averaged Navier Stocks Equation) والموديل الرياضي  $k - \omega SST$  لحل معادلات نافيه ستوكس الناظمة للجريانات المعقدة. تم اختيار السفينة الناقلة KVLCC2 لإجراء هذه الدراسة، وذلك بسبب توفر كم كبير من النتائج التجريبية لهذه السفينة، والتي تساعد في التأكد من جودة النتائج الرقمية التي سيتم الحصول عليها. في بادئ الأمر تمت دراسة السفينة لوحدها بدون أية ملحقات، ثم تم إجراء تجربة الماء المفتوح على الرفاص الخاص بهذه السفينة، ليتم بعدها تطبيق منهج التحقق والتحقيق على النتائج التي تم الحصول عليها للتأكد من دقتها ومن دقة المعادلات والموديلات الرياضية التي تم استخدامها لإتمام هذه الحسابات.

**الكلمات المفتاحية:** ناقلة النفط KVLCC2، منهج التحقق والتحقيق، الرفاص MOERI، طريقة رينولدز نافيه ستوكس الوسطية - طريقة حجم السائل، برنامج الـ Fluent، موديل الاضطراب  $K - \omega SST$ .

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 تشرين - اللاذقية - سورية.

الايمل: [dr.ramimostafahawa@tishreen.edu.sy](mailto:dr.ramimostafahawa@tishreen.edu.sy)

\*\* أستاذ مساعد - قسم الهندسة البحرية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة تشرين - اللاذقية - سورية. الایمیل:

[dr.nawarnabilabbas@tishreen.edu.sy](mailto:dr.nawarnabilabbas@tishreen.edu.sy)

\*\*\* طالب دكتوراه - قسم الهندسة البحرية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة تشرين - اللاذقية - سورية. الایمیل:

[wehad.hatem@tishreen.edu.sy](mailto:wehad.hatem@tishreen.edu.sy)

## مقدمة:

يعتبر منهج التحقق والتحقيق من أكثر المناهج أهمية في الدراسات الرقمية والتجريبية، حيث يمكن من خلاله إظهار مقدار الدقة ومقدار الخطأ في الدراسات التي يتم إجراؤها. إن أغلب الدراسات الرقمية حالياً وبالأخص تلك التي يتم نشرها في المجالات العالمية المهمة تحوي على جزء يتضمن استخدام هذا المنهج (V&V) لإظهار مقدار الخطأ في هذه الدراسة. يوجد العديد من الطرائق المقترحة لكيفية استخدام هذا المنهج لتحديد مقدار الخطأ والارتياح في الحسابات الرقمية والتجريبية. يعد الكتاب المقدم من المعهد الأمريكي للملاحة الجوية والملاحة الفضائية (AIAA<sup>1</sup> 1998, [1]) من أوائل الأبحاث التي نوهت إلى أهمية تقييم الطرق والنتائج الرقمية والتجريبية، ليأتي بعده العديد من الأبحاث التي قامت بتطوير هذا المنهج، ونذكر منها دراسة Roache 1998 [2] والذي حدد فيها كيفية تقييم الخطأ والارتياح في الحسابات الرقمية، وأتى بعده طريقة Stern وزملاؤه في عام 1999 [3]، ومن ثم دليل الجودة الأول [4] والثاني [5] المقترحات من قبل الـ ITTC والتي كانت أكثر توسعاً وشمولية في توصيف هذا المنهج، ومن ثم تم تطوير هذه الطرائق من قبل نفس الباحث Stern وزملاؤه في عام 2001 [6] ومن قبل Wilson وزملاؤه في عام 2001 [7]. مؤتمر الـ ITTC الخامس والعشرون في عام 2008 [8] جمع ميزات كل الطرائق السابقة لكيفية اتباع منهج الـ V&V، وهو يعتبر أحدث طريقة في حساب الـ V&V. وعلى اعتبار أن هذا المنهج له فائدة كبيرة في تخمين مقدار الخطأ في الحسابات الرقمية، فإننا نلاحظ أن أغلب الدراسات الرقمية الحديثة تتضمن في أول جزء منها عملية معايرة للطريقة الرقمية التي استخدمها الباحث وللنتائج الرقمية التي توصل إليها [9]–[13].

## أهمية البحث وأهدافه:

### أهداف البحث

تكمن أهمية البحث وأهدافه في:

- شرح منهج التحقق والتحقيق بشكل دقيق ومفصل ليتمكن الباحثين في المستقبل من استخدام هذا المنهج بشكل صحيح.
- حساب القوى المؤثرة على نموذج ناقله النفط KVLCC2 [14] عند إبحارها بالسرعة الاسمية المكافئة لرقم فرود 0.142، ومن ثم حساب القوى والعزوم المؤثرة على الرفاص MP687 [15] (الذي يمكن استخدامه مع هذه السفينة) في تجربة الماء المفتوح عند قيمتين مختلفتين لرقم التقدم.
- تطبيق منهج التحقق والتحقيق على النتائج الرقمية التي تم الحصول عليها لتوضيح مقدار الخطأ في هذه الحسابات بالمقارنة مع النتائج التجريبية المتوفرة.

## طرائق البحث ومواده:

### منهجية البحث

- تحليلية تجريبية في بيئة الـ ANSYS الافتراضية.

<sup>1</sup> <https://www.aiaa.org>

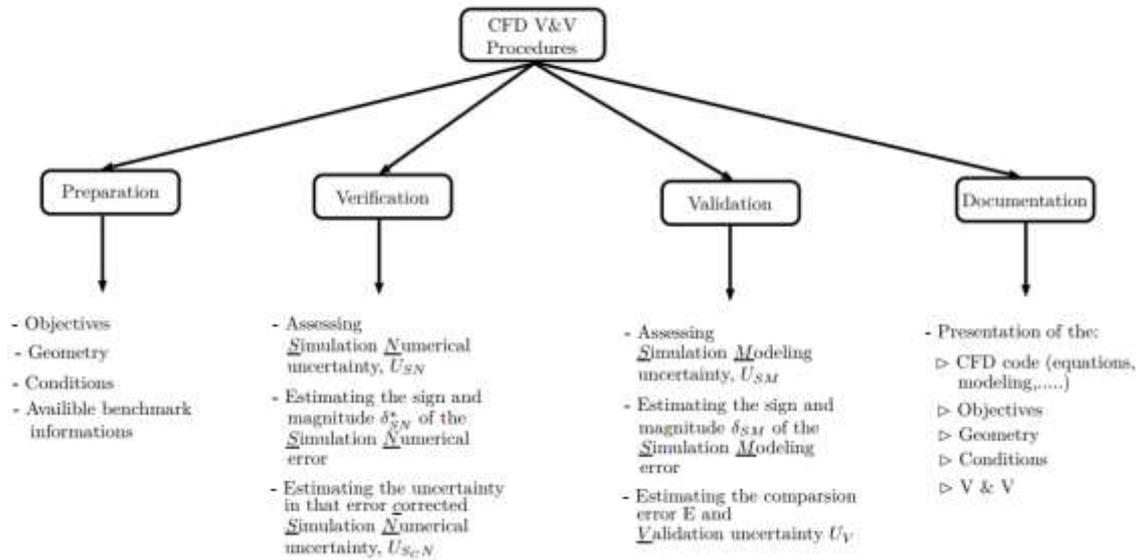
## مواد البحث

يمكن تلخيص المواد التي تم استخدامها في هذا البحث بالتالي:

- النماذج الهندسية للسفينة KVLCC2<sup>2</sup> والرفاص MP687<sup>3</sup>.
- برنامج الـ ANSYS-Fluent.
- تم استخدام طريقة الـ URANS واعتماد الموديل الرياضي  $K - \omega SST$  لحل معادلات نافيه ستوكس.
- المعادلات الناظمة للتدفق وموديل الاضطراب  $K - \omega SST$  [16]–[21].

## منهج التحقق والتحقق (Verification and Validation procedure, V&V)

يوضح الشكل 1 الطريقة التي يتم اتباعها لإجراء حسابات الـ V&V [8]. كما هو واضح من هذا الشكل فإن الطريقة المتبعة لهذا المنهج تتضمن أربع مراحل وهي كالتالي: مرحلة التحضير (Preparation)، مرحلة التحقق من الطريقة الرقمية (Verification)، مرحلة التحقق في دقة النتائج الرقمية (Validation) ومرحلة التوثيق (Documentation)، وفيما يلي سنورد شرح مفصل لكل مرحلة من هذه المراحل.



الشكل 1: منهج التحقق والتحقق V&V وفق الـ ITTC 2008 [8].

### 1.1 مرحلة التحضير Preparation

تتضمن هذه المرحلة تحديد الهدف من الحسابات الرقمية وتجهيز كل ما تحتاجه هذه الحسابات ابتداءً بالأبعاد الهندسية إلى الشروط الحدية والشبكة الرقمية والحللات (Solvers) المناسبة للحالة، ويجب في هذه المرحلة توفر حالة معيارية للحالة المدروسة (نتائج تجريبية دقيقة)، حيث أنه بدون وجود حالة معيارية مع نتائج تجريبية لا يمكن الاستمرار في إجراء حسابات الـ V&V.

<sup>2</sup> <http://www.simman2008.dk>

<sup>3</sup> [https://www.t2015.nmri.go.jp/Instructions\\_JBC/instruction\\_JBC\\_files/Open\\_Water\\_Tests\\_for\\_JBC\\_NMRI.txt](https://www.t2015.nmri.go.jp/Instructions_JBC/instruction_JBC_files/Open_Water_Tests_for_JBC_NMRI.txt)

## 2. مرحلة التحقق من الطريقة الرقمية Verification

تعرف Verification أنها هي العملية التي يتم من خلالها التحقق فيما إذا كانت الطريقة الرقمية المتبعة لحل الحالة المدروسة صحيحة أم لا، وتتضمن الطريقة الرقمية العديد من الأمور، نذكر منها التالي:

- هل تم بناء الشبكة الرقمية بشكل صحيح؟
- هل تم استخدام الشروط الحدية الصحيحة؟
- هل تم استخدام الطرائق الصحيحة لتقريب معادلات نافيه ستوكس الناظمة للتدفق؟
- هل تم استخدام الحلال المناسب (Solver) للحالة المدروسة؟

كما هو واضح من الشكل 1 فإن الهدف الأساسي من مرحلة التحقق هو تخمين مقدار الارتياب الرقمي  $U_{SN}$  وعندما تسمح الشروط والمعطيات يتم حساب قيمة وإشارة الخطأ الرقمي  $\delta_{SN}^*$  بالإضافة إلى حساب مقدار الارتياب في تقدير هذا الخطأ  $U_{SN}$ . هناك العديد من الأمور يمكن أن تكون سبب في نشوء الخطأ الرقمي وهي: الخطأ الناتج من عدد التكرارات  $\delta_I$ ، الخطأ الناتج من أبعاد الخلايا الرقمية  $\delta_G$ ، الخطأ الناتج من قيمة الخطوة الزمنية  $\delta_T$ ، والخطأ الناتج من بقية البارامترات  $\delta_P$ ، وعليه يمكن كتابة علاقة الخطأ الرقمي وفق المعادلة التالية:

$$\delta_{SN} = \delta_I + \delta_G + \delta_T + \delta_P \quad (1)$$

وبشكل مشابه يمكن كتابة علاقة الارتياب الرقمي وفق العلاقة التالية:

$$U_{SN} = U_I + U_G + U_T + U_P \quad (2)$$

استراتيجية التحقق موضحة في الشكل 2 والتي يمكن تقسيمها إلى الخطوات التالية:

### (a) دراسة التقارب Convergence Studies

إن دراسة عملية التقارب تتطلب وجود ثلاثة حلول رقمية (على الأقل) للحالة المدروسة، ويتم ذلك من خلال تغيير ممنهج ومدروس للبارامتر المراد دراسة تأثيره على الحل ( $\Delta x_i$ ) مع الحفاظ على ثبات قيمة بقية البارامترات الأخرى. أكثر البارامترات شيوعاً والتي يتم دراسة تأثيرها على الحل هي نعومة الشبكة والخطوة الزمنية. إن عملية تغيير البارامتر المدروس يجب أن تتم بشكل ممنهج ومدروس، يفضل أن تكون نسبة تعميم البارامتر هي نفسها بين الحالات المدروسة (ولكنه ليس شرطاً إلزامياً)، وهذا يعني:

$$r_i = \frac{\Delta x_{i,2}}{\Delta x_{i,1}} = \frac{\Delta x_{i,3}}{\Delta x_{i,2}} = \frac{\Delta x_{i,m}}{\Delta x_{i,m-1}} \quad (3)$$

حيث أن  $x$  هو البارامتر المدروس، الدليل 1، 2 و 3 يدل على الأنعم (الأصغر)، المتوسط، الخشن (الأكبر) على التوالي.

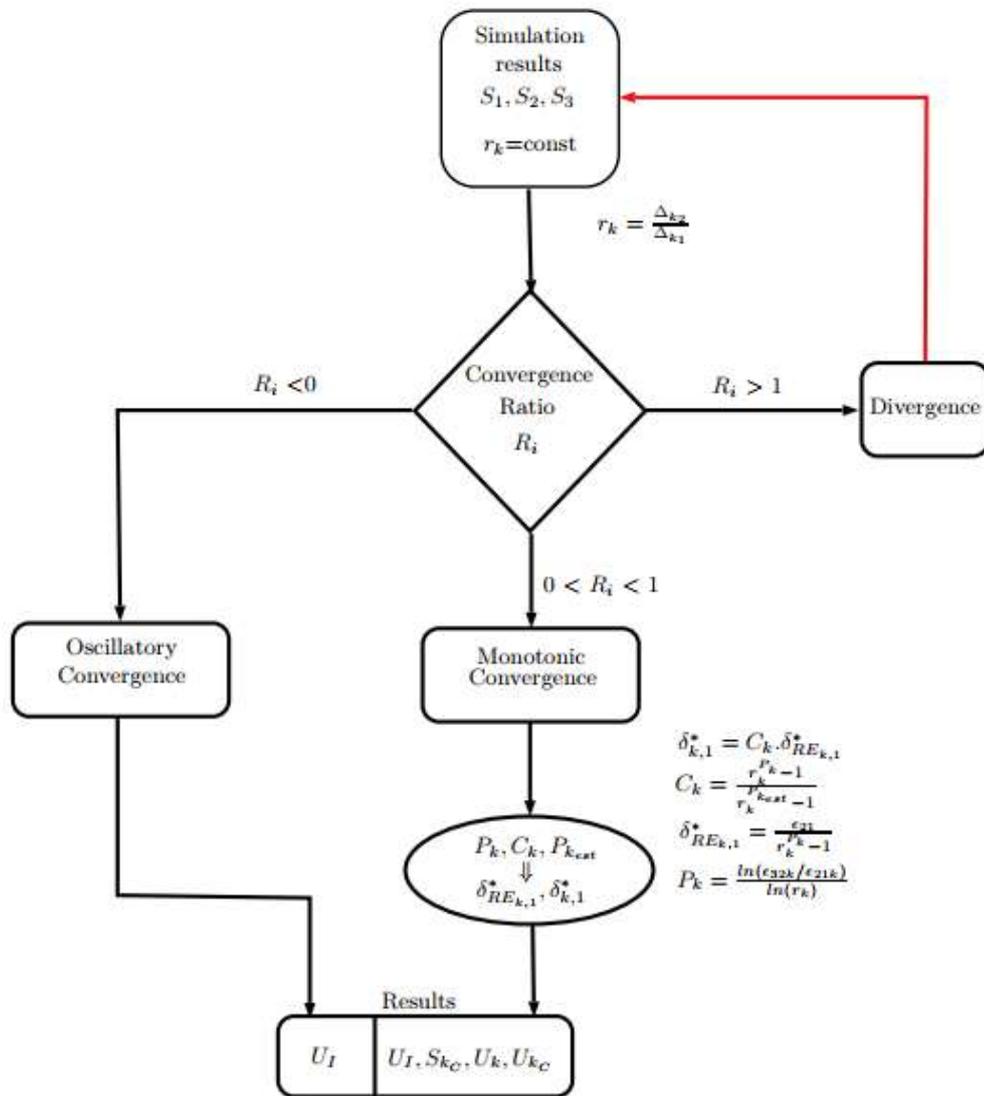
إن القيمة الصغيرة جداً لنسبة التعميم (القريبة جداً من الواحد) غير مرغوبة لأن التغيير في الحل والنتيجة سيصبح صغيراً جداً وحساس جداً إلى بارامترات الدخل، كما وأن القيمة الكبيرة لهذه النسبة قد تؤدي إلى حل غير فيزيائي ولا يتطابق مع الواقع. وعليه وبناء على الدراسات السابقة فإن أكثر قيمة لنسبة التعميم ينصح بها في استخدامات الـ CFD الصناعية هي القيمة  $r_i = \sqrt{2}$  [8].

إن دراسة التقارب تتطلب وجود ثلاثة حلول رقمية على الأقل (ثلاث حسابات للحالة المدروسة) حيث إن استخدام نتيجتين فقط ( $m = 2$ ) يساعد في تقدير حساسية الحل إلى بارامترات الدخل، ولكن لا يمكن من خلال هاتين النتيجتين دراسة تقارب الحل. وفي بعض الحالات يكون مطلوب دراسة أكثر من ثلاث حالات ( $m > 3$ ).  
ففي حالة وجود ثلاث نتائج رقمية للحالة المدروسة، فيتم حساب مقدار التغيير في الحل بين الحالات الثلاث وفق التالي:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{i,21} &= \widehat{S}_{i,2} - \widehat{S}_{i,1} \\ \varepsilon_{i,32} &= \widehat{S}_{i,3} - \widehat{S}_{i,2} \\ R_i &= \frac{\varepsilon_{i,21}}{\varepsilon_{i,32}} \end{aligned} \quad (4)$$

حيث إن  $\varepsilon_{i,21}, \varepsilon_{i,32}$  هما مقدار التغير في الحل بين الحالات الثلاثة،  $\widehat{S}_i$  هو نتيجة الحل في الحالة المدروسة.  $R_i$  هي نسبة التقارب وتبعا لقيمتها يمكن تمييز الحالات الثلاثة التالية:

- 1  $0 < R_i < 1$  تقارب رتيب.
- 2  $R_i < 0$  تقارب متأرجح.
- 3  $R_i > 1$  تباعد (لا يوجد تقارب).



الشكل 2: الاستراتيجية المتبعة في عملية التحقق (Verification procedures) [8], [3].

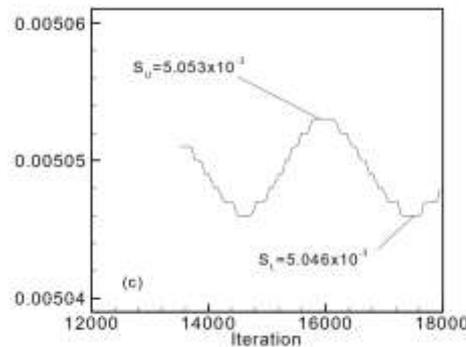
في حالة تحقق الشرط الأول (التقارب الرتيب) فعندها يتم استخدام استقراء ريتشاردسون المعمم من أجل حساب كل من الخطأ والارتياب في الحسابات الرقمية. في الحالة الثانية، حيث يكون لدينا تقارب متأرجح فيتم حساب مقدار الارتياب كالتالي:

$$U_I = \frac{1}{2}(S_U - S_L) \quad (5)$$

حيث إنَّ  $S_U, S_L$  القيمة العظمى والقيمة الدنيا للبارامتر المدروس أثناء الحل التكراري على التوالي، وهما موضحان في الشكل 3. وأما في حالة التباعد فيجب إعادة الحل من جديد مع التغيير في قيمة بارامتر الدخل الذي يتم دراسته، ولا يمكن في هذه الحالة تحديد مقدار الخطأ والارتياب.

(b) استقراء ريتشاردسون المعمم

يتم استخدام هذه الطريقة في حالة التقارب الرتيب وذلك من أجل حساب مقدار الخطأ الرقمي ( $\delta_i^*$ ) الناتج من استخدام البارامتر  $i^{th}$  المدروس بالإضافة إلى تحديد درجة الدقة  $P_i$ . في حال كان هناك ثلاث حالات مدروسة فقط ( $m = 3$ ) فإنه يمكن حساب قيمة واحدة للخطأ ودرجة الدقة، وفق العلاقات التالية:



الشكل 3: القيمة العظمى والدنيا للبارامتر المدروس أثناء الحل التكراري [3].

$$\delta_{REi,1}^{*(1)} = \frac{\varepsilon_{i,21}}{r_i^{P_i} - 1} \quad (6)$$

$$P_i = \frac{\ln(\varepsilon_{i,32}/\varepsilon_{i,21})}{\ln(r_i)} \quad (7)$$

في حال توفر خمسة حلول رقمية ( $m = 5$ )، ففي هذه الحالة يمكن حساب قيمتين للخطأ الرقمي ودرجة الدقة، القيمة الأولى تحسب وفق المعادلتين (6) و(7)، وأما القيمة الثانية فيتم حسابها وفق العلاقتين التاليتين:

$$\delta_{REi,1}^{*(2)} = \frac{r_i^{q_i} \varepsilon_{i,21} - \varepsilon_{i,32}}{(r_i^{q_i} - r_i^{P_i})(r_i^{P_i} - 1)} - \frac{r_i^{P_i} \varepsilon_{i,21} - \varepsilon_{i,32}}{(r_i^{q_i} - r_i^{P_i})(r_i^{q_i} - 1)} \quad (8)$$

$$P_i = \frac{\ln \left[ \frac{(a_i + \sqrt{b_i})}{[2(\varepsilon_{i,21}\varepsilon_{i,43} - \varepsilon_{i,32}^2)]} \right]}{\ln(r_i)} \quad (9)$$

$$q_i = \frac{\ln \left[ \frac{(a_i - \sqrt{b_i})}{[2(\varepsilon_{i,21}\varepsilon_{i,43} - \varepsilon_{i,32}^2)]} \right]}{\ln(r_i)}$$

حيث أن:

$$\begin{aligned} a_i &= \varepsilon_{i,21}\varepsilon_{i,54} - \varepsilon_{i,32}\varepsilon_{i,43} \\ b_i &= -3\varepsilon_{i,32}^2\varepsilon_{i,43}^2 + 4(\varepsilon_{i,21}\varepsilon_{i,43}^3 + \varepsilon_{i,32}^3\varepsilon_{i,54}) - 6\varepsilon_{i,21}\varepsilon_{i,32}\varepsilon_{i,43}\varepsilon_{i,54} + \varepsilon_{i,21}^2\varepsilon_{i,54}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

كما هو واضح من المعادلات السابقة فإن تطبيق استقرار ريتشاردسون على خمسة حلول أكثر تقييداً من تطبيقه على ثلاثة حلول، وذلك لأن الخمسة حلول يجب أن تحقق التقارب الرتيب وتكون قريبة من القيمة الحقيقية للحالة المعيارية. بشكل عام يجب الانتباه إلى أن عدد الحلول التي يمكن أخذها يجب أن تكون  $m = 2n + 1$ ، حيث إن  $n$  هو عدد الأخطاء الرقمية التي يمكن الحصول عليها، مثلاً يجب أن يكون لدينا ثلاثة حلول ( $m = 2 \times 1 + 1$ ) من أجل الحصول على قيمة واحدة للخطأ ( $n = 1$ )، ويجب أن يكون لدينا خمسة حلول ( $m = 2 \times 2 + 1$ ) من أجل الحصول على قيمتين للخطأ ( $n = 2$ ) [8].

### (c) استخدام معامل تصحيح لكل من الخطأ الرقمي والارتياب

جاء مفهوم معاملات التصحيح بالاعتماد على دراسات التحقق (Verification studies) الذي تم إجراؤها على الدراسات التحليلية للحالات المعيارية لمعادلة الأمواج أحادية البعد، معادلة لابلاس ثنائية البعد والطبقة الحدية تبعاً لبلاسيوس [8]، حيث أظهرت هذه الدراسات أن الضرب بمعامل تصحيح يعتبر جيداً كمقياس كمي من أجل تحديد مقدار تطابق الحل الرقمي مع الحل الحقيقي، في هذه الحالة يمكن تعريف الخطأ الرقمي وفقاً للعلاقة التالية:

$$\delta_{i,1}^* = C_i \delta_{REi,1}^* = C_i \left( \frac{\varepsilon_{i,21}}{r_i^{P_i} - 1} \right) \quad (11)$$

حيث أن  $C_i$  هو معامل التصحيح، ولقد تم إيجاد علاقتين رياضيتين للتعبير عنه. الأولى يتم الحصول عليها بحساب قيمة  $C_i$  من المعادلة (11) ومن ثم تعويض قيمة  $\delta_{REi,1}^*$  بالاعتماد على العلاقة (6)، مع استبدال الـ  $P_i$  في المقام بالـ  $P_{iest}$ ، فتأخذ معادلة الـ  $C_i$  الشكل التالي:

$$C_i = \frac{r_i^{P_i} - 1}{r_i^{P_{iest}} - 1} \quad (12)$$

حيث أن  $P_{iest}$  هي درجة الدقة عندما يكون التقطيع المكاني للمجال الحسابي متناهياً في الصغر بحيث يكون الحل الرقمي متطابقاً مع الحل الحقيقي.

العلاقة الثانية تعتمد على قيمة الخطأ المحسوبة وفقاً للعلاقة (8)، مع استبدال كل من  $P_i, q_i$  بـ  $P_{iest}, q_{iest}$  لتأخذ العلاقة الشكل التالي:

$$C_i = \frac{(\varepsilon_{i,32}/\varepsilon_{i,21} - r_i^{q_{iest}})(r_i^{P_i} - 1)}{(r_i^{P_{iest}} - r_i^{q_{iest}})(r_i^{P_{iest}} - 1)} + \frac{(\varepsilon_{i,32}/\varepsilon_{i,21} - r_i^{P_{iest}})(r_i^{P_i} - 1)}{(r_i^{P_{iest}} - r_i^{q_{iest}})(r_i^{q_{iest}} - 1)} \quad (13)$$

تعطي العلاقة (13) قيمة أكثر دقة لمعامل التصحيح  $C_i$ . إن العلاقتين السابقتين تحتاجان فقط لثلاثة حلول رقمية من أجل تقدير قيمة الـ  $C_i$ . تطبيق هذه الطريقة في تصحيح الخطأ على الحالات التحليلية المعيارية تؤكد أن تصحيح الخطأ باستخدام معامل التصحيح المحسوب بالعلاقة (12) أو (13) يحسن من قيمة الخطأ المحسوبة.

عندما تكون الحلول الرقمية التي نحصل عليها أصغر أو أكبر بكثير من الحل الحقيقي، وبالتالي فإن قيمة الـ  $C_i$  ستكون أكبر أو أصغر بكثير من الواحد، وفي هذه الحالة يمكن تقدير مقدار الخطأ من خلال الارتياب  $U_i$  وفقاً للعلاقة التالية:

$$U_i = (|C_i| + |1 - C_i|) |\delta_{REi,1}^*| \quad (14)$$

وفقاً لـ (Wilson and Stern (2002) [22]، فإن العلاقة السابقة لا تعتبر دقيقة بما يكفي إذا كانت قيمة الـ  $C_i < 1$ ، وعليه في هذه الحالة يجب استخدام العلاقة التالية لحساب قيمة  $U_i$ :

$$U_i = (2|1 - C_i| + 1)|\delta_{RE_{i,1}}^*| \quad (15)$$

عندما تكون الحلول الرقمية قريبة جداً من الحل الحقيقي، فإن قيمة الـ  $C_i$  ستكون قريبة جداً من الواحد وبالتالي يتم حساب الخطأ  $\delta_i^*$  وفقاً للعلاقة (6) ويتم حساب قيمة الـ  $U_{i_c}$  وفقاً للعلاقة التالية:

$$U_{i_c} = |1 - C_i||\delta_{RE_{i,1}}^*| \quad (16)$$

تمثل المعادلة (16) الشكل المصحح لقيمة الـ  $U_i$  في كلتا الحالتين  $C_i < 1$  and  $C_i > 1$ . لا بد من الانتباه إلى أنه اتباع الطريق الصحيح في الحسابات الرقمية يتطلب أن يكون  $C_i$  قريباً من الواحد بالإضافة إلى أن قيمة الخطأ التي يتم الحصول عليها وفقاً للمعادلة (11) يجب أن تكون صغيرة بالأخص في التدفقات ثلاثية البعد.

المعادلتان (15) و (16) تعتبران ضعيفتين إذا كانت قيمة الـ  $C_i$  قريبة جداً من الواحد [23]، حيث إن هذه الطريقة تعود في هذه الحالة لتصبح هي نفسها طريقة استقراء ريتشاردسون، وهذا الأمر أكدته Wilson et al. 2004 [24]. وعليه تم اقتراح العلاقات التالية من أجل حساب الارتياب  $U_i$  وفق التالي:

$$U_i = \begin{cases} [9.6(1 - C_i)^2 + 1.1]|\delta_{RE_{i,1}}^*|, & |1 - C_i| < 0.125 \\ [2|1 - C_i| + 1]|\delta_{RE_{i,1}}^*|, & |1 - C_i| \geq 0.125 \end{cases} \quad (17)$$

$$U_{i_c} = \begin{cases} [2.4(1 - C_i)^2 + 0.1]|\delta_{RE_{i,1}}^*|, & |1 - C_i| < 0.25 \\ [|1 - C_i|]|\delta_{RE_{i,1}}^*|, & |1 - C_i| \geq 0.25 \end{cases} \quad (18)$$

#### (d) تخمين الارتياب باستخدام عامل أمان

يمكن استخدام معامل الأمان ( $F_s$ ) المقترح من قبل Roache 1998 [2]، كحل بديل لاستخدام معامل التصحيح الموضح في الفقرة السابقة من أجل حساب الارتياب، حيث يتم حساب قيمة الخطأ من خلال استقراء ريتشاردسون، ومن ثم يتم حساب الارتياب بضرب قيمة الخطأ المحسوب بمعامل الأمان  $F_s$  وفق التالي:

$$U_i = F_s |\delta_{RE_{i,1}}^*| \quad (19)$$

على الرغم من أن Roache 1998 لم يقترح كيفية حساب الارتياب المصحح باستخدام معامل الأمان  $F_s$ ، إلا أنه يمكن حسابه وفق العلاقة التالية:

$$U_{i_c} = (F_s - 1)|\delta_{RE_{i,1}}^*| \quad (20)$$

لا يوجد قيمة محددة لمعامل الأمان  $F_s$ ، ولكن القيمة 1.25 تعتبر هي الأفضل في حال دراسة تأثير الشبكة الرقمية على الحل، وتعتبر القيمة 3 هي الأفضل في حال توفر نتيجتين رقميتين فقط.

### 3. مرحلة التحقق في دقة النتائج الرقمية Validation

في هذه المرحلة يتم التأكد من أن النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام الطرائق الرقمية صحيحة ومطابقة للواقع. تتم هذه العملية من خلال تطبيق الحل الرقمي على حالة معيارية لديها الكثير من النتائج التجريبية، بحيث نستطيع في نهاية المطاف مقارنة النتيجة الرقمية النهائية مع النتيجة التجريبية (الواقعية والحقيقية). الهدف الأساسي من هذه العملية هو تحديد مقدار الارتياب النمذجي  $U_{SM}$  من خلال مقارنة النتيجة النهائية التي تم الحصول عليها من الحسابات الرقمية مع النتيجة التجريبية لحالة معيارية متوفرة، وعندما تسمح الشروط يمكن تحديد مقدار وإشارة الخطأ النمذجي  $\delta_{SM}$ . في البداية يتم حساب مقدار خطأ المقارنة E من خلال حساب الفرق بين النتيجة التجريبية D والنتيجة الرقمية S وفق العلاقة التالية:

$$E = D - S = \delta_D - (\delta_{SM} + \delta_{SN}) = \delta_D - (\delta_{SMA} + \delta_{SPD} + \delta_{SN}) \quad (21)$$

من الممكن أن يكون سبب الأخطاء في النمذجة  $\delta_{SM}$  افتراضات نمذجية خاطئة  $\delta_{SMA}$  أو استخدام لمعلومات سابقة غير دقيقة  $\delta_{SPD}$ . من أجل التأكد فيما إذا تم النجاح في عملية التحقق يجب مقارنة قيمة الخطأ التي يتم الحصول عليها مع قيمتين، الأولى هي قيمة الارتياح وفق متطلبات التحقق البرمجية  $U_{reqd}$ ، وقيمة الارتياح في عملية التحقق  $U_V$  والتي يتم حسابها وفق العلاقة التالية:

$$U_V^2 = U_D^2 + U_{SN}^2 \quad (22)$$

بعد إجراء عملية المقارنة يكون لدينا الخيارات التالية:

$$\begin{aligned} 1 - |E| < U_V < U_{reqd} \\ 2 - |E| < U_{reqd} < U_V \\ 3 - U_{reqd} < |E| < U_V \\ 4 - U_V < |E| < U_{reqd} \\ 5 - U_V < U_{reqd} < |E| \\ 6 - U_{reqd} < U_V < |E| \end{aligned} \quad (23)$$

في الحالات 1، 2 و3 يكون الشرط  $|E| < U_V$  محققاً، وعليه يمكننا القول بأن عملية التحقق ناجحة وبأن نتيجة الطريقة الرقمية التي تم اتباعها صحيحة ومطابقة للواقع الحقيقي، وهنا تكون قيمة الخطأ النمذجي أقل من مستوى الخطأ المسموح. في هذه الحالة لا يوجد أي داعي لحساب قيمة الـ  $\delta_{SMA}$ . في الحالة الأولى تكون قيمة الخطأ أصغر من الـ  $U_{reqd}$ ، لذلك فإن عملية التحقق تكون ناجحة حتى من وجهة النظر النمذجية. في الحالات 4، 5 و6 حيث يكون  $U_V < |E|$ ، ففي هذه الحالة تكون قيمة الخطأ أكبر من القيمة المسموحة، وفي هذه الحالة يجب استخدام قيمة وإشارة الخطأ  $E$  من أجل حساب قيمة الـ  $\delta_{SMA}$ . وفي حال كانت  $|E| \ll U_V$ ، فإنه يتم اعتبار أن قيمة  $E = \delta_{SMA}$ .

#### 4. مرحلة التوثيق Documentation

وهي المرحلة الأخيرة في منهج التحقق والتحقيق والتي يتم فيها توثيق وتحليل كافة النتائج التي تم التوصل إليها في الخطوات السابقة، ومن ثم يتم الحكم على الطريقة والإعدادات الرقمية التي تم استخدامها. فإذا كانت النتائج التي تم الحصول عليها جيدة، فهذا يعني أن الطريقة والإعدادات والشبكات الرقمية التي تم استخدامها جيدة وتعطي نتائجاً صحيحة ومطابقة للواقع، أما إذا كانت النتائج التي تم الحصول عليها غير جيدة، فعندها يجب إجراء تعديلات على الطريقة أو الإعدادات الرقمية التي تم استخدامها، وإعادة إجراء منهج التحقق والتحقيق من جديد.

#### النتائج والمناقشة:

كما ذكرنا سابقاً يمكن من خلال منهج التحقق والتحقيق دراسة تأثير تغيير العديد من البارامترات في النتيجة الرقمية. وهنا تم اعتماد بعد الخلية الحسابية كبارامتر أساسي لدراسة تأثيره في نتيجة الحسابات الرقمية، وعليه تم تثبيت قيمة بقية البارامترات الأخرى. سيتم هنا التأكد من جودة ودقة الطريقة والموديل الرياضي والشبكة الرقمية التي تم استخدامها لحل المعادلات الناظمة للجريان من خلال تطبيق منهج التحقق والتحقيق على كل من قيمة المقاومة الكلية لنموذج السفينة عند رقم فرود 0.142، وعلى قيمة معامل الدفع والعزم والمردود للرافص عند قيمتين مختلفتين لرقم التقدم.

### الأبعاد الهندسية

كما ذكرنا سابقاً تم إجراء الدراسة على نموذج السفينة الناقلة KVLCC2، والتي يوجد لها الكثير من النتائج التجريبية، وهذا الأمر يعتبر جيداً جداً لتطبيق منهج التحقق والتحقيق. نسبة تصغير النموذج هي 1/58 من السفينة الحقيقية. الأبعاد الهندسية للسفينة موضحة في كل من

الجدول 1 والشكل 4.

بالإضافة إلى إجراء الدراسة على نموذج السفينة KVLCC2 تم تطبيق هذا المنهج على الرفاص MP687 في تجربة الماء المفتوح وذلك عند قيمتين لرقم التقدم (J=0.4 and J=0.7). الأبعاد الهندسية للرفاص موضحة في الجدول 2 والشكل 5.

الجدول 1: الأبعاد الهندسية لنموذج السفينة KVLCC2 [14].

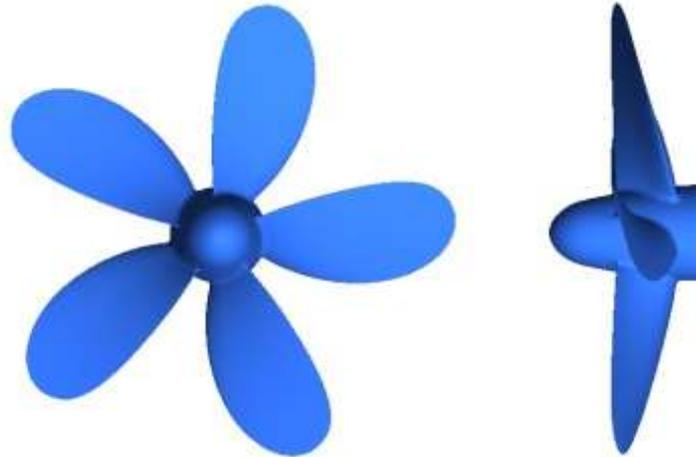
Item	Symbol	Unit	Value
Length between perpendiculars	$L_{PP}$	m	5.5172
Breadth (molded)	B	m	1.0
Draft (molded)	d	m	0.3586
Wetted surface area without appendages without appendages	$S_w$	m <sup>2</sup>	8.0838
Blockage coefficient	$C_B$	-	0.8098
Froude number	$F_r$	-	0.142
Reynolds number	$R_e$	-	$5.77 \times 10^6$



الشكل 4: نموذج سفينة الصب KVLCC2 [14].

الجدول 2: الأبعاد الهندسية لنموذج الرفاص MP687 [15].

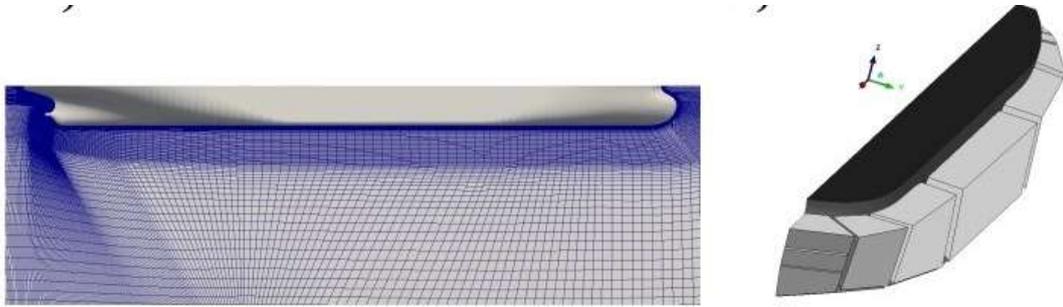
Number of Blades	5.00
Diameter [mm]	203.00
Direction of Rotation	Clockwise



الشكل 5: نموذج الرفاص MP687 [15].

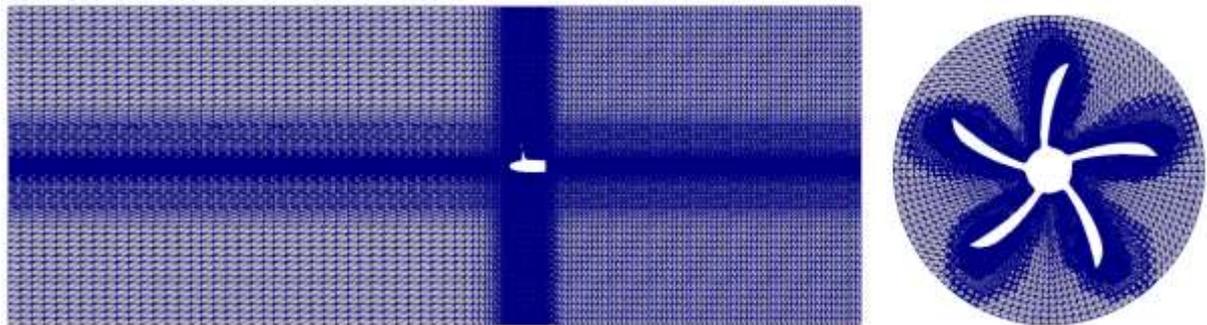
### الشبكة الرقمية

لقد تم استخدام الشبكات المنتظمة لإجراء هذه الدراسة وذلك على اعتبار أن الشبكات المنتظمة هي التي تعطي أفضل النتائج في الحسابات الرقمية، وكما أنها هي الأفضل من ناحية المدة الحسابية، حيث أنها تحتاج إلى وقت أقل لإتمام العمليات الحسابية [16]. لكل حالة من الحالات المدروسة تم استخدام ثلاث شبكات رقمية مختلفة الخشونة، نسبة التععيم هي 1.2. الشكل 6 يوضح الشبكة الرقمية المنتظمة التي تم بناؤها حول بدن السفينة الناقلة KVLCC2، وكما هو واضح من هذا الشكل فلقد تم تععيم الشبكة الرقمية في منطقة الطبقة الحدية بجوار السفينة وذلك من أجل حل بروفایل السرعة بالشكل الصحيح. الشبكة الموضحة في هذا الشكل تمثل الشبكة الخشنة وتحتوي على 2 مليون خلية، والشبكات الأخرى (متوسطة الخشونة والناعمة) لهذه السفينة تم الحصول من هذه الشبكة من خلال ضرب عدد الخلايا بالمعامل 1.2 في الاتجاهات الثلاث (x, y, z)، وعليه الشبكة المتوسطة الخشونة تحوي على 3.456 مليون خلية، والشبكة الناعمة تحوي على 5.97 مليون خلية.



الشكل 6: الشبكة الرقمية المنتظمة التي تم بناؤها حول بدن نموذج السفينة الناقلة KVLCC2.

الشكل 7 يوضح الشبكة الرقمية المنتظمة التي تم بناؤها حول بدن الرفاص MP687 والتتعيم حول شفرات الرفاص في منطقة الطبقة الحدية. الشبكة المعروضة في الشكل 7 تمثل الشبكة الخشنة وتتضمن 1.5 مليون خلية. الشبكة المتوسطة الخشونة والشبكة الناعمة تم الحصول عليهما من هذا الشبكة من خلال زيادة عدد الخلايا بمقدار 1.2 في الاتجاهات الثلاثة. الشبكة المتوسطة الخشونة تحوي على 2.6 مليون خلية، والشبكة الناعمة تحوي على 4.5 مليون خلية. إن قيمة  $y^+$  في مركز أول خلية ملتصقة في الجدار أكبر من 30 وعليه تم استخدام توابع الجدار في كل الحالات المدروسة.



الشكل 7: الشبكة الرقمية المنتظمة التي تم بناؤها حول الرفاص MP687.

### 5. تقييم النتائج الرقمية لحالة السفينة باستخدام منهج التحقق والتحقق

يوضح الجدول 3 قيمة الخطأ في النتيجة الرقمية لمعامل المقاومة الكلية لنموذج السفينة الناقلة KVLCC2 من الشبكات الثلاثة بالمقارنة مع النتيجة التجريبية، كما هو واضح من هذا الجدول فإن أكبر قيمة للخطأ هي 5.11% بالمقارنة مع

القيمة التجريبية، وهذه القيمة تحدث في حالة الشبكة الخشنة وتقل قيمة الخطأ إلى 1.46% بالمقارنة مع القيمة التجريبية في حالة الشبكة الناعمة، وتعتبر هذه النتائج جيدة جداً، والسبب الأساسي في ذلك هو استخدام الشبكات المنتظمة ذات الدقة العالية.

الجدول 3: مقارنة النتيجة الرقمية لمعامل المقاومة الكلية من الشبكات الثلاثة مع النتيجة التجريبية.

Grid	Cell number $\times 10^6$	$C_T \times 10^3$	Error (%)
Exp	-	4.11	-
Coarse (G3)	2	3.9	5.11
Medium (G2)	3.465	4.0	2.67
Fine (G1)	5.97	4.05	1.46

الجدول 4 يوضح نتيجة تطبيق منهج التحقق والتحقيق على قيم معامل المقاومة التي تم الحصول عليها من الشبكات الثلاثة. في الدراسات التي يتم فيها تطبيق هذا المنهج يتم عادة أخذ قيمة البارامترات كنسبة مئوية إما من القيمة التجريبية (D) للبارامتر المراد دراسته والذي هو في حالتنا معامل المقاومة ( $C_T$ ) أو من قيمة الحل الرقمي لأنعم شبكة في حال كان حل أنعم شبكة قريباً جداً من الحل التجريبي، وعلى اعتبار أنه في الحالة المدروسة قيمة الخطأ في حالة الشبكة الناعمة صغيرة جداً، فلقد تم أخذ قيمة كل البارامترات كنسبة مئوية من قيمة معامل المقاومة الذي تم الحصول عليه من الشبكة الناعمة ( $S_1$ ). تشير النتائج الموضحة في هذا الجدول إلى وجود تقارب رتيب حيث أن قيمة  $0 < R_G < 1$  والقيمة المطلقة للخطأ في الحسابات الرقمية ( $\delta_G^* \% S_1$ ) أقل من 3%. قيمة الارتياح باستخدام هذه الشبكة الرقمية ( $U_G \% S_1$ ) أقل من 5.5%، في حين أن قيمة الارتياح من الحل التكراري ( $U_I \% S_1$ ) صغيرة جداً (0.000766) لدرجة أنه يمكن إهمالها. قيمة الارتياح في القياسات التجريبية ( $U_D \% S_1$ ) هي 1% وذلك بناء على توصيات مؤتمر طوكيو [25]، وكما هو واضح من هذا الجدول فإن قيمة كل من  $U_{SN} \% S_1$  and  $U_V \% S_1$  أقل من 5%. كما نلاحظ أيضاً من هذا الجدول بأن قيمة الحل الرقمي المصحح ( $S_C$ ) تساوي القيمة التجريبية. هذه النتائج تؤكد أن الشبكات المنتظمة تعطي نتائج جيدة جداً بالمقارنة مع الواقع الحقيقي.

الجدول 4: التحقق من صحة الطريقة الرقمية عند تغيير أبعاد الخلايا الحسابية.

Parameter	$R_G$	$P_G$	$C_G$	$U_G \% S_1$	$\delta_G^* \% S_1$	$U_{GC} \% S_1$	$S_C$	$U_D \% D$	$U_{SN} \% S_1$	$U_V \% S_1$
$C_T$	0.5	3.8	2.27	4.37	-2.8	1.57	4.1	1	4.37	4.48

يوضح كل من الشكل 8 والشكل 9 حقل السرعة وحقل الطاقة في مستوي الرفاص لكل من التجربة والحسابات الرقمية لحالة الشبكة الناعمة، وكما هو واضح من هذه النتيجة فإن الحسابات الرقمية تحقق تطابقاً جيداً جداً بالمقارنة مع التجربة، وهذا ما تم تأكيده من خلال النتائج السابقة لتطبيق منهج ال V&V. الشكل 10 يبين مقارنة بين النتيجة الرقمية والنتيجة التجريبية لحقل الضغط في منطقة المؤخرة للسفينة، وأيضاً هنا يُلاحظ مقدار التطابق الكبير بين النتائج.

#### 6. تقييم النتائج الرقمية لحالة الرفاص MP687 باستخدام منهج التحقق والتحقيق

كما ذُكر سابقاً لقد تم حساب القوى والعزوم المؤثرة على الرفاص MP687 عند قيمتين مختلفتين لرقم التقدم ( $J=0.2$  and  $J=0.7$ ) وتم تطبيق منهج التحقق والتحقيق على القيم التي تم الحصول عليها على اعتبار أن النتائج التجريبية متوفرة. في حالة السفينة تم استخدام مبدأ انعكاس الجريان والذي يتم فيه تثبيت السفينة وتحريك التدفق بسرعة مساوية

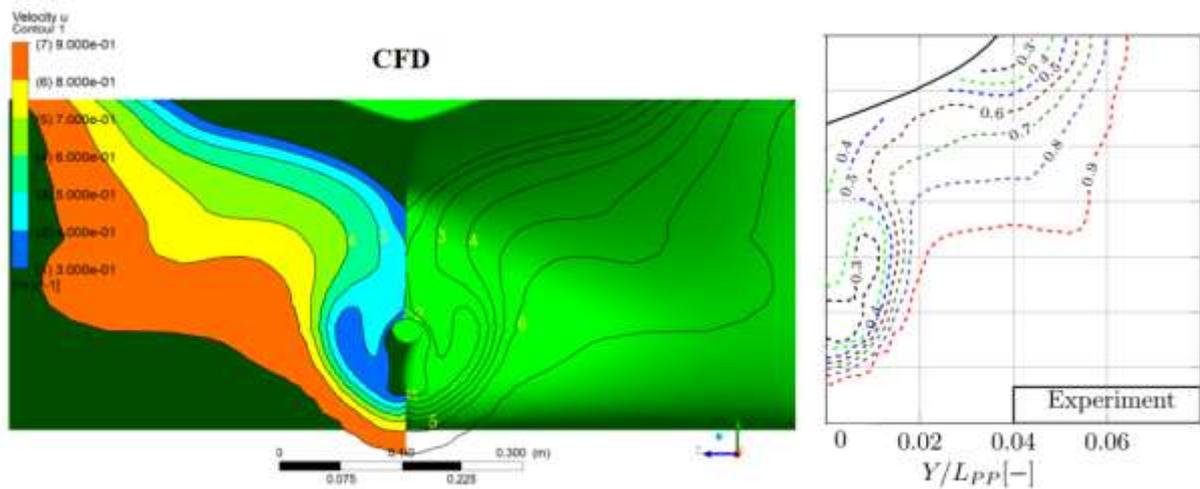
لسرعة السفينة، فنحصل على نفس النتيجة كما لو كانت السفينة هي التي تتحرك، في هذه الحالة فإن الشبكة الرقمية تكون ثابتة بالمطلق ويتم إدخال التدفق عند المدخل بسرعة مساوية لسرعة السفينة. أما في حالة الرفاص فيتم تقسيم الشبكة الحسابية إلى جزئين الأول هو الجزء الثابت والثاني هو الجزء المتحرك والذي يكون عبارة عن أسطوانة صغيرة محيطة بالرفاص، ليتم تدوير الجزء المتحرك بسرعة مساوية لسرعة دوران الرفاص، وعليه في هذا الجزء من الدراسة يتم اختبار فعالية الشبكات الديناميكية ودقتها في برنامج الـ Ansys-Fluent.

الجدول 5 و

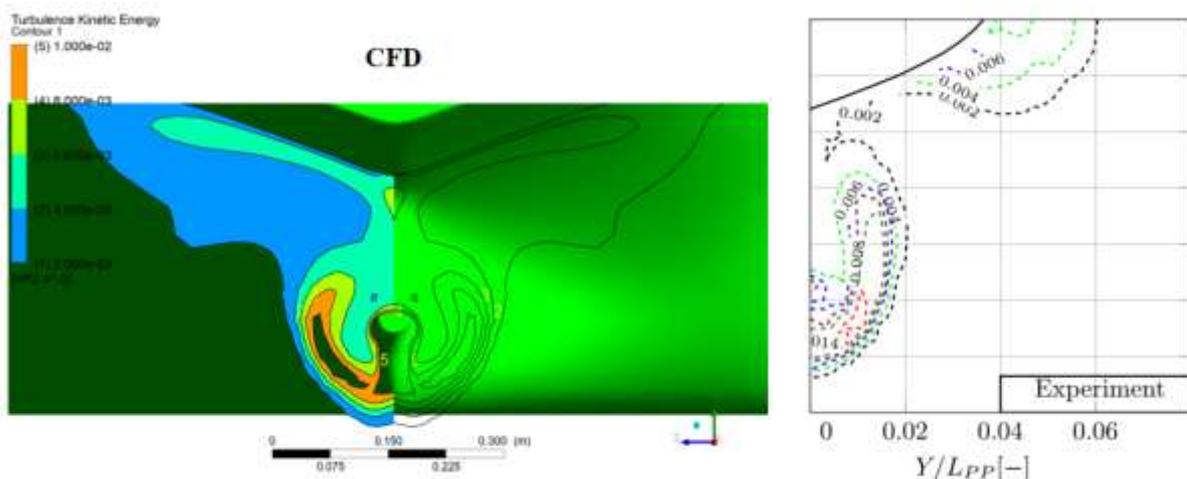
الجدول 6 يوضحان نتيجة التحقق والتحقيق في النتائج الرقمية للرفاص مع رقم التقدم  $J=0.2$ ، بينما

الجدول 7 و

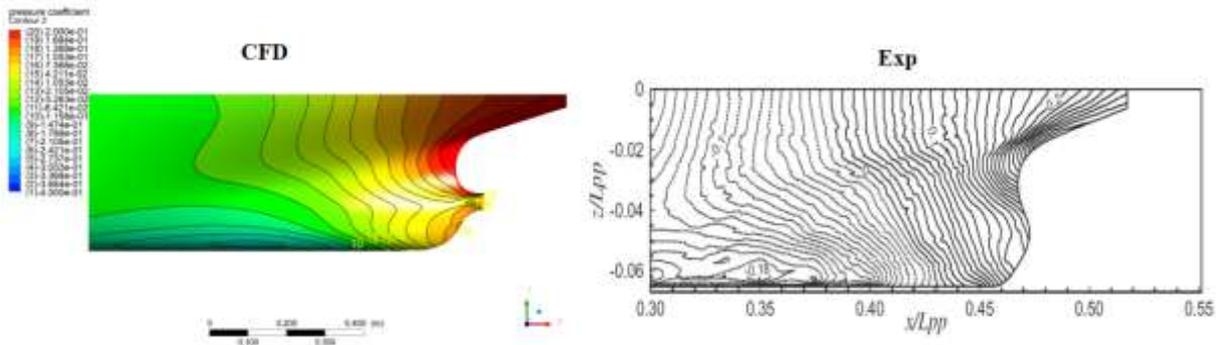
الجدول 8 يوضحان نتيجة التحقق والتحقيق في النتائج الرقمية عند رقم التقدم  $J=0.7$ . لقد تم اختيار هذين الرقمين من أجل اختبار فعالية الشبكات المتحركة عند السرعات المنخفضة والمرتفعة للتيار القادم إلى الرفاص، وإثبات أن الشبكات الديناميكية تعطي نتائج جيدة في مختلف الحالات.



الشكل 8: حقل السرعة في مستوى الرفاص.



الشكل 9: حقل الطاقة الحركية في مستوى الرفاص.



الشكل 10: حقل الضغط عند مؤخرة السفينة.

الجدول 5: تقييم القوى المؤثرة على الرفاص في حالة رقم التقدم  $J=0.2$ .

Parameter	Exp	Coarse	Error%	Medium	Error%	Fine	Error%
$K_T$	0.2949	0.28	5.05	0.287	2.67	0.29	1.66
$10K_q$	0.35	0.33	5.71	0.34	2.85	0.345	1.43
$\eta_0$	0.2681	0.27	-0.7	0.2687	-0.18	0.2675	0.23

الجدول 6: تطبيق منهج التحقق والتحقيق على القوى المؤثرة على الرفاص في حالة رقم التقدم  $J=0.2$ .

Parameter	$R_G$	$P_G$	$C_G$	$U_G\%S_1$	$\delta_G^*\%S_1$	$U_{GC}\%S_1$	$S_C$	$U_D\%D$	$U_{SN}\%S_1$	$U_V\%S_1$
$K_T$	0.43	4.65	3.03	3.92	-2.35	1.57	0.293	1	3.93	4.05
$10K_q$	0.50	3.80	2.27	5.14	-3.29	1.85	0.35	1	5.14	5.23
$\eta_0$	0.81	1.15	0.53	1.79	0.95	0.84	0.263	1	1.79	2.05

الجدول 7: تقييم القوى المؤثرة على الرفاص في حالة رقم التقدم  $J=0.7$ .

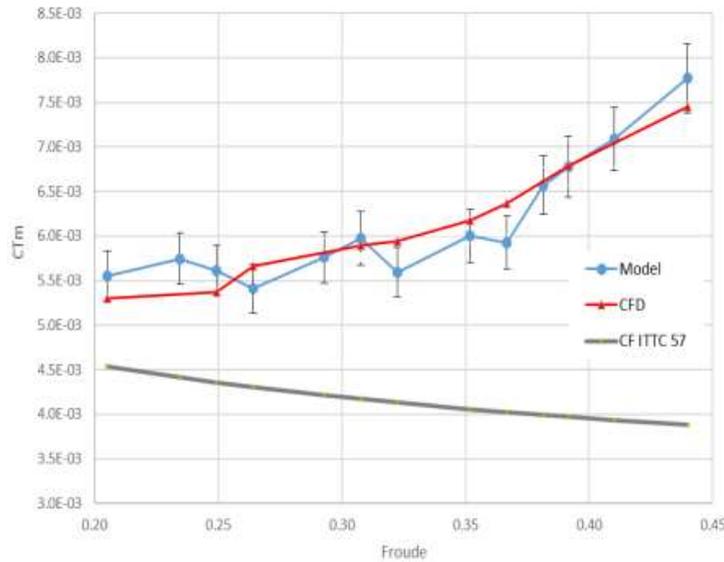
Parameter	Exp	Coarse	Error%	Medium	Error%	Fine	Error%
$K_T$	0.0867	0.082	5.42	0.084	3.11	0.085	1.69
$10K_q$	0.15	0.14	7.22	0.145	3.91	0.147	2.58
$\eta_0$	0.6401	0.6525	-1.94	0.6454	-0.828	0.6442	-0.64

الجدول 8: تطبيق منهج التحقق والتحقيق على القوى المؤثرة على الرفاص في حالة رقم التقدم  $J=0.7$ .

Parameter	$R_G$	$P_G$	$C_G$	$U_G\%S_1$	$\delta_G^*\%S_1$	$U_{GC}\%S_1$	$S_C$	$U_D\%D$	$U_{SN}\%S_1$	$U_V\%S_1$
$K_T$	0.5	3.80	2.27	4.17	-2.67	1.49	0.086	1	4.17	4.28
$10K_q$	0.4	5.02	3.41	5.27	-3.09	2.18	0.148	1	5.27	5.37
$\eta_0$	0.17	9.76	11.21	0.81	0.42	0.38	0.643	1	0.81	1.28

من خلال التدقيق في النتائج الموضحة في الجدول 5 و

الجدول 7 نلاحظ أن قيمة الخطأ في النتائج الرقمية بالمقارنة مع النتائج التجريبية دائماً أصغر من 6% والتي تعتبر صغيرة بما يكفي لإثبات صحة الحسابات الرقمية، حيث أننا يجب ألا ننسى أن النتائج التجريبية تحوي على مقدار من الخطأ أيضاً، والذي يتم تمثيله عادة من خلال ما يسمى بالـ Error bars، الشكل 11 يوضح قيمة الـ Error bars لقيم معامل المقاومة الكلية للقارب السريع FFG-7 [26]. في حالتنا لا يوجد قيمة هذا المجال من الخطأ لأن الحوض الذي تم به إجراء التجارب لم ينشر قيمة هذا المجال.



الشكل 11: مقدار الارتياح في القياسات التجريبية لحساب مقاومة القارب السريع FFG-7 [26].

نلاحظ أيضاً من الجدول 5 و

الجدول 7 أن في حالة الشبكة الناعمة تقل قيمة الخطأ لتصبح أقل من 2% في كل الحالات المدروسة، وهذه قيمة جيدة جداً. بالتدقيق في النتائج الموضحة في

الجدول 6 و

الجدول 8 نلاحظ كما في حالة السفينة أن قيمة الارتياح من الحل التكراري صغيرة جداً ويمكن إهمالها في كل الحالات، حيث أن  $U_I \% S_1 < 0.01 \% S_1$  وهذا الرقم يمكنا إهماله في كل الحسابات. قيمة  $U_G \% S_1, U_{SN} \% S_1, U_V \% S_1$  في كل الحالات أصغر من 5.5%، بينما القيمة المطلقة للخطأ الرقمي  $\delta_C^* \% S_1$  أصغر من 3.5% في كل الحالات. النتائج السابقة سواء لحالة السفينة أو حالة الرفاص تؤكد على أن الإعدادات والشبكة الرقمية التي تم استخدامها جيدة جداً ويمكن اعتمادها لأية حسابات مشابهة، كما وتؤكد هذه الدراسة أنه حتى لو تمت الدراسة باستخدام الشبكات الخشنة فإن قيمة الخطأ ستكون أقل من 6%.

## الاستنتاجات والتوصيات:

### الاستنتاجات

- يعتبر منهج التحقق والتحقيق مهماً جداً عند إجراء أية حسابات رقمية، ويجب على الباحثين استخدام هذا المنهج للتأكد بأن الشبكات والإعدادات الرقمية التي يقوموا باستخدامها تعطي نتائج جيدة بالمقارنة مع النتائج الحقيقية. حيث أنه عند إجراء أية حسابات رقمية يجب على الباحث البدء بحالة معيارية (Benchmark) شبيهة بالحالة التي يقوم بدراستها ويكون لها نتائج تجريبية من أجل تطبيق منهج التحقق والتحقيق عليها ليكون واثق من أن الاستمرار في الحسابات الرقمية يتم في المسار الصحيح، وبدون إجراء هذه الحسابات فإنه لا يوجد أي شيء يؤكد صحة النتائج التي يحصل عليها الباحث.

- تقنية الشبكات الديناميكية المستخدمة في برنامج الـ Fluent تعطي نتائج جيدة جداً.

### التوصيات

- أن يتم اعتماد هذا المنهج لجميع الدراسات الرقمية التي يتم إجراؤها، وبالأخص كون هذا المنهج منسوح به من قبل الـ ITTC.

## References:

- [1] AIAA, "Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations," *Am. Inst. Aeronaut. Astronaut.*, vol. G-077-1998, no. AIAA G-077-1998, 1998.
- [2] P. J. Roache, *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*. 1998.
- [3] F. Stern, R. V. Wilson, H. W. Coleman, and E. G. Paterson, "Verification and validation of CFD simulations," *Proc. 1999 3rd ASME/JSME Jt. Fluids Eng. Conf. FEDSM'99, San Fr. California, USA, 18-23 July 1999*, 1999.
- [4] ITTC, "CFD General Uncertainty Analysis in CFD Uncertainty Assessment Methodology, QM procedure 4.9-04-01-01," in *22th International Towing Tank Conference*, 1999, pp. 1–18.
- [5] ITTC, "CFD General Uncertainty Analysis in CFD Guidelines for RANS Codes, QM procedure 4.9-04-01-02," in *22th International Towing Tank Conference*, 1999, pp. 1–2.
- [6] F. Stern, R. V. Wilson, H. W. Coleman, and E. G. Paterson, "Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations—Part 1: Methodology and procedures," *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, vol. 123, no. 4, 2001, doi: 10.1115/1.1412235.
- [7] R. V. Wilson, F. Stern, H. W. Coleman, and E. G. Paterson, "Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations—Part 2: Application for rans simulation of a cargo/container ship," *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, vol. 123, no. 4, 2001, doi: 10.1115/1.1412236.
- [8] ITTC, "Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures," in *25th International Towing Tank Conference*, 2008, pp. 1–12, [Online]. Available: <https://www.ittc.info/media/8153/75-03-01-01.pdf>.
- [9] 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.
- [10] F. S. Pereira, L. Eça, and G. Vaz, "Verification and Validation exercises for the flow around the KVLCC2 tanker at model and full-scale Reynolds numbers," *Ocean Eng.*, vol. 129, pp. 133–148, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.11.005.
- [11] Y. Long, X. ping Long, B. Ji, W. xin Huai, and Z. dong Qian, "Verification and validation of URANS simulations of the turbulent cavitating flow around the hydrofoil," *J. Hydrodyn.*, vol. 29, no. 4, 2017, doi: 10.1016/S1001-6058(16)60774-6.
- [12] K. wei Song, C. yu Guo, C. Wang, C. Sun, P. Li, and R. fan Zhong, "Experimental and numerical study on the scale effect of stern flap on ship resistance and flow field," *Ships Offshore Struct.*, vol. 15, no. 9, 2019, doi: 10.1080/17445302.2019.1697091.
- [13] K. wei Song, C. yu Guo, J. Gong, P. Li, and L. zhou Wang, "Influence of interceptors, stern flaps, and their combinations on the hydrodynamic performance of a deep-vee ship," *Ocean Eng.*, vol. 170, 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.10.048.
- [14] Simman 2008, "MOERI KVLCC2 Geometry and Conditions, SIMMAN 2008, FORCE Technology." [http://www.simman2008.dk/KVLCC/KVLCC2/kvlcc2\\_geometry.html](http://www.simman2008.dk/KVLCC/KVLCC2/kvlcc2_geometry.html) (accessed Jun. 26, 2021).
- [15] T. 2015, A. W. on CFD, and in S. Hydrodynamics, "Open Water Tests for JBC(NMRI) MODEL PROPELLER NO.687," 2015.

[https://www.t2015.nmri.go.jp/Instructions\\_JBC/instruction\\_JBC\\_files/Open\\_Water\\_Tests\\_for\\_JBC\\_NMRI.txt](https://www.t2015.nmri.go.jp/Instructions_JBC/instruction_JBC_files/Open_Water_Tests_for_JBC_NMRI.txt) (accessed Jun. 28, 2023).

[16] 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.

[17] 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.

[18] N. Abbas and H. Daoud, "Study of the Influence of an Interceptor on the Resistance of the High-speed Vessels Using CFD," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 44 No. 3, 2022.

[19] 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.

[20] N. Abbas, "CFD Prediction of the Most Appropriate Values of Prandtl Kolmogorov Constant in the Turbulent Boundary Layer," *Tishreen Univ. J. Res. Sci. Stud. - Eng. Sci. Ser.*, vol. 41 No.6, 2019.

[21] 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.

[22] R. Wilson and F. Stern, "Verification and validation for RANS simulation of a naval surface combatant," in *40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2002, doi: 10.2514/6.2002-904.

[23] P. J. Roache, "Criticisms of the 'correction factor' verification method," *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, vol. 125, no. 4, 2003, doi: 10.1115/1.1588693.

[24] R. Wilson, J. Shao, and F. Stern, "Discussion: Criticisms of the 'correction factor' verification method [1]," in *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 2004, vol. 126, no. 4, doi: 10.1115/1.1780171.

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

[26] R. P. Salian, S. Brizzolara, and J. A. P. Jr, "Adjustable Energy Saving Device for Transom Stern Hulls Adjustable Energy Saving Device for Transom Stern Hulls," 2019.