

## Determination of Boundary Layer Thickness around Submarine Hull Using Computational Fluid Dynamics (CFD)

Dr. Nisreen Mohammad\*  
Ammar Shararah\*\*

(Received 12 / 2 / 2023. Accepted 24 / 4 / 2023)

### □ ABSTRACT □

The study of the boundary layer around the hull of submarines is regarded as one of the complex studies, because of the difficulty in determining the thickness of this layer and the lack of reference studies in this regard.

This study aims to determine the thickness of the maximum boundary layer around the hull of a three-dimensional model of a submarine by designing the appropriate finite element network, and determining the appropriate value of ( $y^+$ ) for the model at each of the specified velocities so that it covers the entire field of the boundary layer.

This study will be carried out using digital modeling and simulation programs in order to solve the Navier-Stokes equations that describe the motion of fluids, in addition determine the maximum boundary layer for each model and at each velocity that satisfies the equation ( $y^+ \approx 1$ ) in order to ensure that the first node in the finite element network will be within the field of the boundary layer.

This study depends on the relationship between the thickness of the boundary layer and the dimensions of the submarine and the flow velocity. Five different scales of three-dimensional models of the same submarine will be designed  $\left(\frac{1}{1}, \frac{1}{2}, \frac{1}{5}, \frac{1}{10}, \frac{1}{100}\right)$  a variable

field of flow velocity will be set including 10 different values of velocity, Then the thickness of the maximum boundary layer for each submarine will be determined to get 50 values of the thickness of the maximum boundary layer around the hull of the five submarines models as a function of the geometric dimensions and flow velocity, using ANSYS-FLUENT and depending on the principle of flow reflection.

**Keywords:** Submarine – Boundary Layer Thickness –  $y^+$  – CFD.

**Copyright**



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

\* Associate Professor , Department of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.

\*\*Master student, Department of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.mysaarshhadah@gmail.com

## تحديد سماكة الطبقة الحدية على بدن غواصة باستخدام ديناميك الموائع الحسابية (CFD)

د. نسرين محمد\*

عمار شرارة\*\*

(تاريخ الإيداع 12 / 2 / 2023. قُبِلَ للنشر في 24 / 4 / 2023)

### □ ملخص □

تعتبر دراسة الطبقة الحدية حول بدن الغواصات من الدراسات المعقدة وذلك بسبب صعوبة تحديد سماكة هذه الطبقة وقلّة الدراسات المرجعية في هذا الخصوص.

تهدف هذه الدراسة إلى تحديد سماكة الطبقة الحدية الأعظمية حول بدن غواصة ثلاثية الأبعاد من خلال تصميم شبكة العناصر المنتهية بالطريقة المناسبة لهكذا دراسات، وتحديد قيمة  $y^+$  المناسبة للنموذج عند كل سرعة من السرعة المحددة بحيث تلتقط كامل مجال الطبقة الحدية

ستتم هذه الدراسة بواسطة برامج النمذجة والمحاكاة الرقمية بهدف حل معادلات نافيه-ستوكس الحاكمة للجريان، وتحديد الطبقة الحدية الأعظمية لكل نموذج وعند كل سرعة بحيث يكون  $(y^+ \approx 1)$  وذلك لضمان أن أول عقدة في شبكة العناصر المنتهية ستكون في مجال الطبقة الحدية.

أن هذه الدراسة ستعتمد على العلاقة التي تربط سماكة الطبقة الحدية بأبعاد الغواصة وسرعة الجريان، وسيتم ذلك من خلال بناء خمس نماذج ثلاثية البعد لنفس الغواصة لكن بمقاييس رسم مختلفة وهي  $\left(\frac{1}{1}, \frac{1}{2}, \frac{1}{5}, \frac{1}{10}, \frac{1}{100}\right)$  وأخذ مجال متغير لسرعة الجريان يضم 10 قيم مختلفة للسرعة ومن ثم تحديد سماكة الطبقة الحدية الأعظمية لكل غواصة بحيث نحصل على 50 قيمة لسماكة الطبقة الحدية الأعظمية حول بدن الغواصات الخمس كتابع للإبعاد الهندسية وسرعة الجريان، وذلك باستخدام ANSYS-FLUENT والاعتماد على مبدأ انعكاس الجريان.

الكلمات المفتاحية: غواصة - سماكة الطبقة الحدية -  $y^+$  - ديناميك الموائع الحسابية.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

\* أستاذ ، قسم القوى الميكانيكية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.  
\*\* طالبة دراسات عليا (ماجستير)، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

**مقدمة:**

تعتبر الغواصات سفن العبور للوجه الآخر من البحار والمحيطات والذي بقي مخفياً لحقبةً طويلةً من الزمن، ومع تسارع التطور التكنولوجي وتقدم الأبحاث البحرية ولاسيما في مجال تطوير الغواصات، ظهرت الحاجة الملحة للتعلم في دراسة الجريان حول بدن الغواصات حيث يعتبر ذلك من الدراسات الجديدة التي انطلقت في أواخر القرن التاسع عشر وكانت أغلبها سرية، وبما أن الغواصات خضعت لتطور كبير من حيث الشكل وياتت مختلفة تماماً عما كان عليه من قبل لذلك كان لابد من التعمق في دراسة الجريان حول الغواصات ولا سيما توزع الطبقة الحدية على بدن الغواصة، فعلى الرغم من أن هذه الطبقة لا ترى بالعين المجردة إلا أن إجهادات القص الناتجة عن لزوجة المائع تتركز فيها، الأمر الذي ينعكس جلياً على سلوك الغواصات والمقاومات التي تتعرض لها هذه المركبات، وتجدر الإشارة إلى أن دراسة الطبقة الحدية تعد من الدراسات المهمة في مجال ديناميك الموائع الحسابية لما تنسم به من دقة بالإضافة إلى ارتباطها بالعديد من بارامترات الجريان والتصميم

اقتصرت أغلب الدراسات المرجعية عن الطبقة الحدية على دراسة الطبقة الحدية حول أجسام أسطوانية حيث تعتبر دراسة الجريان حول أسطوانة دائرية أحد أكثر التجارب التي تم دراستها على نطاق واسع في ديناميك الموائع الحسابية، وقد أثبتت هذه الدراسات ارتباط نماذج الجريان حول الأسطوانة بتغيرات رقم رينولدز حيث يُظهر المائع سلسلة من نماذج الجريان المختلفة وفق الدراسة [2]، كما يتطلب تحليل الجريان حول الغواصات إلى إجراء دراسة هيدروديناميكية لتقييم حقل الجريان حول الغواصة وتوزع الضغط وتأثيره على شكل البدن ومن ثم التنبؤ الدقيق والفعال للضغط الهيدروديناميكي والقوى على الغواصة من خلال استخدام طريقة تحليل إجهاد الحجم المتناهية ونموذج (k-w) لتحليل الاجهادات عبر سطح بدن الغواصة كما في الدراسة [3] و [10].

**أهمية البحث وأهدافه:**

تكمن أهمية البحث في مساهمته بدراسة الجريان ضمن الطبقة الحدية على بدن غواصة وتحديد سماكتها الأعظمية عليها من خلال اختيار الطريقة المناسبة لبناء الشبكة الحسابية لهذا النوع من الجريان، ومن ثم تحديد أبعاد الطبقة الحدية المناسبة للنموذج عند قيم مختلفة لسرعة الغواصة بحيث تغطي كامل مجال الطبقة الحدية. يهدف هذا البحث إلى تحديد مناطق الجريان اللزج التي تخضع لمعادلات نافيه-ستوكس على بدن غواصة وفصلها عن مناطق جريان أويلر، مما يسهم في تقليل الزمن اللازم لإنجاز الحسابات الهيدروديناميكية بشكل كبير بعد حصر منطقة الجريان اللزج بحدود الطبقة الحدية لكل نموذج وعند كل سرعة وذلك باستخدام ديناميك الموائع الحسابي.

**طرائق البحث ومواده:**

تهدف الدراسة إلى تحديد سماكة الطبقة الحدية على بدن الغواصة من خلال إجراء دراسة هيدروديناميكية للجريان حول البدن باستخدام تقنية CFD حيث سيتم الاعتماد على المعامل  $y^+$  اللابعدى لبناء الشبكة الحسابية من أجل بناء خمسة نماذج ثلاثية البعد لنفس الغواصة لكن بمقاييس رسم مختلفة وهي  $\left(\frac{1}{1}, \frac{1}{2}, \frac{1}{5}, \frac{1}{10}, \frac{1}{100}\right)$  لدراسة تأثير الأبعاد الهندسية للبدن على سماكة الطبقة الحدية، وذلك باستخدام بيئة ANSYS-FLUENT، وذلك ضمن مجال متغير

لسرعة الجريان يضم عشرة قيم مختلفة للسرعة بعد ضبط الشروط الحدية للجريان بدقة عالية مع مراعاة إدخال الشروط الحقيقية للإبحار للحصول على أعلى دقة ممكنة، وأخذ اللزوجة بالاعتبار من خلال فرض المائع المستخدم ماء بحر حقيقي واستخدام مبدأ انعكاس الجريان، وتحديد كثافة شبكة العناصر المنتهية وضبطها بدقة من أجل تمثيل أشعة السرعة على أكبر عدد ممكن من نقاط البدن لإظهار الطبقة الحدية حول الغواصة بوضوح وتحديد سماكتها.

### المعادلات الناظمة للجريان

#### 1. موديل الجريان: حلول رينولدز الوسطية لمعادلات نافيه-ستوكس (RANS):

تعطى المعادلة الناظمة للجريان بالعلاقة التالية:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_i)}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{tij}) + \rho g_i + f_{\sigma}$$

(1-1)

حيث  $u_i$  و  $p$  هما السرعة والضغط على التوالي، و  $\rho$  كثافة المائع و  $\mu$  اللزوجة.

#### 2. موديل الاضطراب:

يمكن نمذجة إجهاد رينولدز من خلال فرضية Boussinesq التي تعطي إجهاد رينولدز كتابع لتدرج السرعة الوسطية على أنها المعادلة التالية:

$$\tau_{tij} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_m} \right) \delta_{ij}$$

(2-1)

أن  $\delta_{ij}$ : رمز Kronecker.

حيث يتم حساب إجهاد رينولدز المضطرب بنفس طريقة الجريان الصفحي، يتم فقط استبدال اللزوجة بلزوجة اضطراب افتراضية متزايدة، إذا كان من الممكن تقييم لزوجة الاضطراب، فسيتم تحديد إجهاد رينولدز وفقاً لذلك. من بين نماذج الاضطراب المعروفة، يتميز نموذج اضطراب إجهاد القص  $k-w$  (SST) بإمكانية تقييم تدرجات الضغط الموجبة وانفصال الجريان، لذلك تم اختياره لدراسة الطبقة الحدية في هذا البحث.

#### 3. مفهوم $y^+$ وتوابع الجدار:

من أجل إعداد شبكة العناصر المنتهية (Mesh) المطلوبة لدراسة مجال الطبقة الحدية تم الاعتماد على المعيار اللابيدي  $y^+$  الذي تم من خلاله تحديد ( $y$ ) ارتفاع أول خلية في شبكة العناصر المنتهية والتي تعطى بالعلاقة:

$$y^+ = \frac{y \mu}{U_{\tau} \rho} (m)$$

(3-1)

حيث:  $\rho$  كثافة المائع و  $\mu$  اللزوجة و  $U_{\tau}$  سرعة الاحتكاك.

تُحدد سرعة الاحتكاك بالعلاقة:

$$U_{\tau} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} (m/s)$$

(4-1)

حيث إن:  $\tau_w$ : إجهاد رينولدز ويعطى بالعلاقة:

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho U_\infty^2 (kg / m.s^2) \quad (5-1)$$

ويُعبّر  $C_f$  عن معامل الاحتكاك الذي يعطى بالعلاقة:

$$C_f = 0.058 Re_x^{-0.2} \quad (6-1)$$

ويُحسب رقم رينولدز  $Re$  بالعلاقة:

$$Re = \frac{v \times L}{\mu} \quad (7-1)$$

حيث إن:  $v$  سرعة الجسم و  $L$  طول مسار الجريان، و  $\mu$  لزوجة المائع.

يعطى عدد الطبقات اللازمة لتشكيل الطبقة الحدية وفق برنامج ANSYS-FLUENT من خلال العلاقة (8-1).

$$y_{\max} = y \times gr^{n-1} \quad (8-1)$$

حيث إن:

$y_{\max}$ : ارتفاع الطبقة النهائية في مجال الطبقة الحدية.

$gr$ : معدل نمو الطبقات.

$n$ : عدد طبقات المجال.

على اعتبار أن  $(y_{\max})$  ارتفاع الطبقة النهائية يمثل ارتفاع الطبقة الحدية وهو المجهول في هذه الدراسة سيتم اعتبار

$y_{\max}$  مساوية لارتفاع الطبقة الحدية المحسوبة من خلال قوانين براندل في العلاقة (9-1) للجريان الصفحي، والعلاقة

(10-1) للجريان المضطرب، حيث إن هذه العلاقات صحيحة لدراسة الطبقة الحدية على صفائح مستوية.

• الجريان الصفحي: ( $3.2 \times 10^5 > Re$ )

$$\delta = \frac{5 \times X}{\sqrt{Re_x}} (m) \quad (9-1)$$

حيث ( $X$ ) هو طول مسار الجريان.

• الجريان المضطرب: ( $1 \times 10^6 < Re$ )

$$\delta = \frac{0.37 \times X}{(Re_x)^{1/5}} (m) \quad (10-1)$$

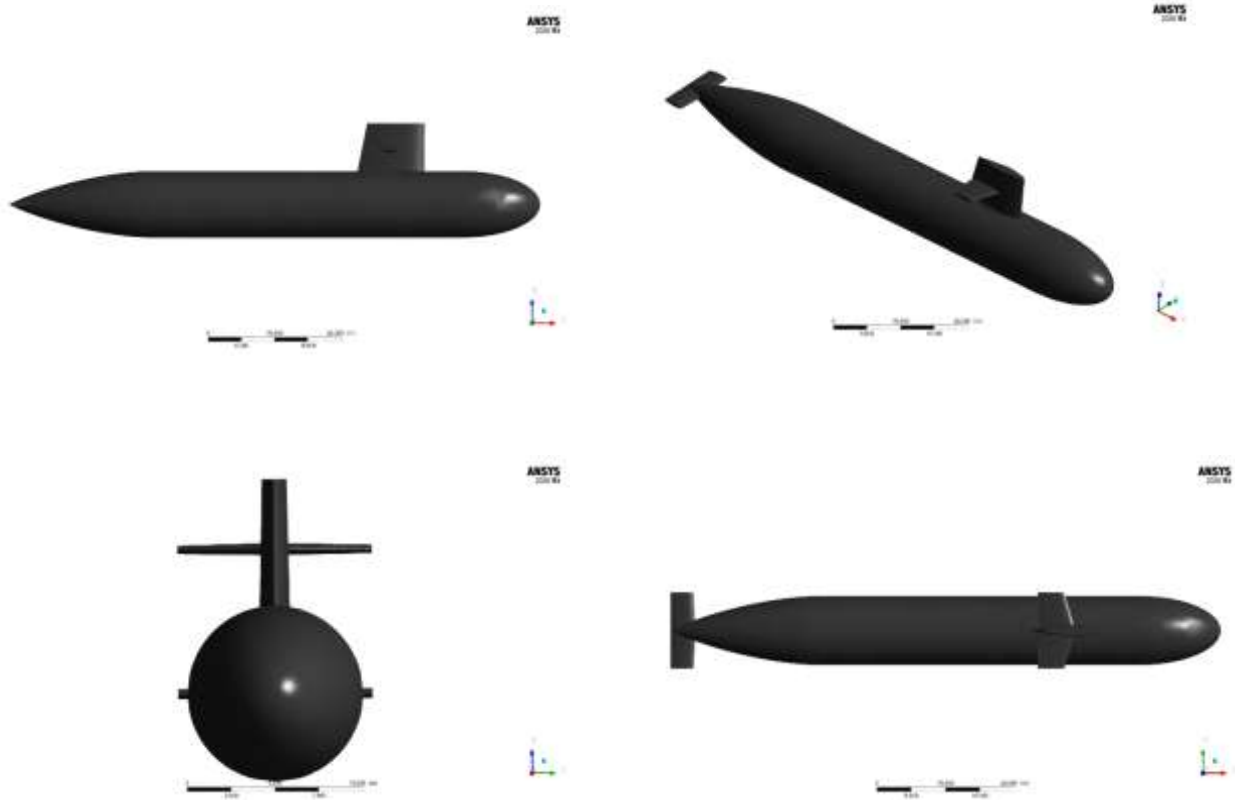
حيث ( $X$ ) هو طول مسار الجريان.

الأبعاد الهندسية للغواصة المدروسة:

في هذه الدراسة تم استخدام نموذج للغواصة بالمواصفات التالية الموضحة في الجدول (1-1):

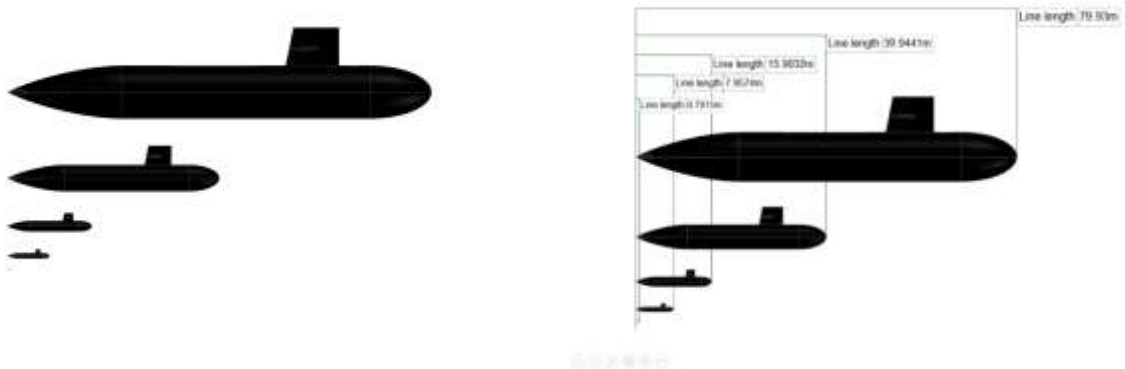
الجدول (1-1) مواصفات نموذج الغواصة المدروسة

المواصفات	
الطول	79.93 [ m ]
العرض	9.994 [ m ]
الارتفاع	9.994 [ m ]
ارتفاع البرج	7.012 [ m ]
مساحة البدن	3354.438 [ m <sup>2</sup> ]
حجم البدن	5251.606 [ m <sup>3</sup> ]



الشكل (1-1) نموذج الغواصة ثلاثي الأبعاد وعلى المساقط الثلاثة.

تم تحضير النماذج الخمسة المطلوبة للدراسة وفق الأبعاد الهندسية المفروضة مع مراعاة الشروط التصميمية اللازمة لإجراء هذه الدراسات باستخدام برامج ديناميك الموائع الحسابية (CFD)، و يبين الشكل (2-1) نماذج الغواصة الخمسة بأبعادها الهندسية.  
معايرة الدراسة



الشكل (2-1) نماذج الغواصة الخمسة بأبعادها الهندسية.

قبل عرض نتائج هذه الدراسة باستخدام برنامج Ansys Fluent تم إجراء تجربة معايرة للتحقق من وثوقية البرنامج في تقديم حسابات دقيقة لسماكة الطبقة الحدية حيث تم بناء فضاء جريان عبارة عن مربع ثنائي البعد بأبعاد  $30\text{m} \times 30\text{m}$  بهدف دراسة الجريان على صفيحة مستوية (انظر الشكل 3-1) وتم تحديد سرعة  $10\text{m/s}$  وعلى بعد

$$1\text{m} \text{ من مدخل الجريان، وكان } y^+ \approx 1$$

وفقاً للمعطيات السابقة يكون قيمة رقم رينولدز:

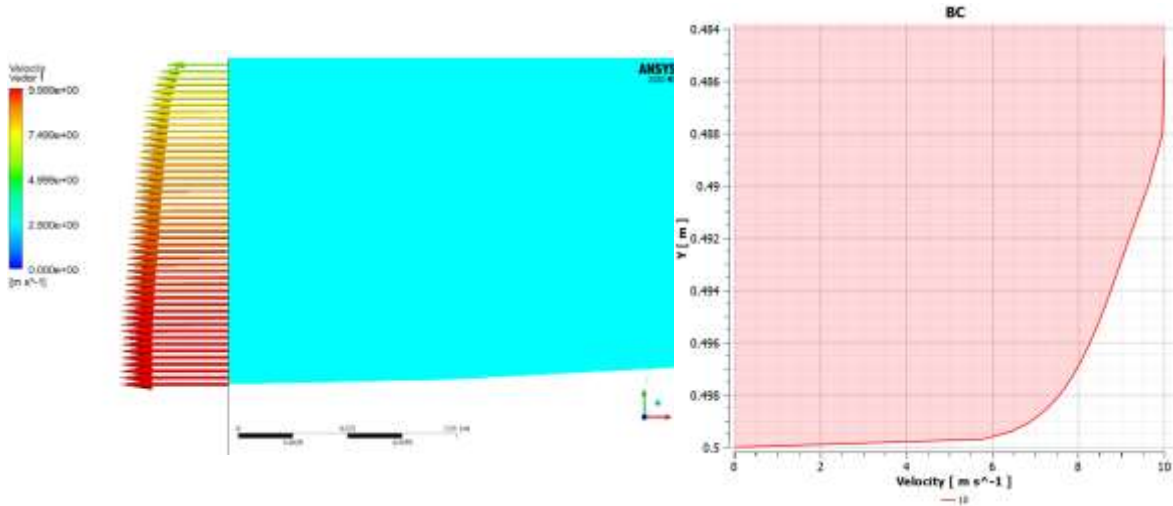
$$\text{Re} = 1 \times 10^6 < (1 \times 10^7)$$

فالجريان مضطرب، وبحساب سماكة الطبقة الحدية في حالة الجريان المضطرب وفق العلاقة (10-1):

$$\delta = \frac{0.37 \times X}{(\text{Re}_x)^{1/5}} (m)$$

حيث (X) هو طول مسار الجريان.

$$\delta = \frac{0.37 \times 1}{\left(\frac{1 \times 10^6}{10^{-6}}\right)^{1/5}} = 0.01473\text{m}$$



الشكل (3-1) تدرج أشعة السرعة في مجال الطبقة الحدية للجريان المضطرب وتمثيلها بيانياً.

نلاحظ من الشكل (3-1) الذي يمثل تدرج أشعة السرعة في مجال الطبقة الحدية للجريان المضطرب وتمثيلها بيانياً أن قيمة الطبقة الحدية المحسوبة وفق برنامج ANSYS-FLUENT تساوي  $0.0149\text{m}$ ، كما يُلاحظ تطابق القيمة المحسوبة بواسطة البرنامج مع القيمة التي تعطيها العلاقة (10-1) بهامش خطأ قدره:  $\Delta \approx 1\%$  تعد قيمته صغيرة جداً ومقبولة رياضياً، بالتالي فإن هذا يمنح البرنامج وثوقية عالية للقيام بدراسات متعلقة بالطبقة الحدية.

### النتائج والمناقشة:

حيث تم حساب  $y$  بفرض أن  $(y^+ = 1)$  عند كل سرعة من السرع المفروضة وللنماذج الخمسة وفق التسلسل الآتي:

أولاً: تم حساب رقم رينولدز لنماذج الغواصة الخمسة وسرعة الجريان وفق العلاقة (1-7):

الجدول (1-2) حساب رقم رينولدز لنماذج الغواصة الخمسة وسرعة الجريان.

قيم رينولدز					نسبة الأبعاد السرعة
$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{1}$	
L=0.7993 [m]	L=7.993 [m]	L=15.986 [m]	L=39.96 [m]	L=79.93 [m]	
79.93	799.3	1598.6	3996	7993	0.0001
799.3	7993	15986	39960	79930	0.001
7993	79930	159860	399600	799300	0.01
79930	799300	1598600	3996000	7993000	0.1
799300	7993000	15986000	39960000	79930000	1
3996500	39965000	79930000	199800000	399650000	5
7993000	79930000	159860000	399600000	799300000	10
11989500	119895000	239790000	599400000	1198950000	15
19982500	199825000	399650000	999000000	1998250000	25
79930000	799300000	1598600000	3996000000	7993000000	100

ثانياً: تم حساب معامل الاحتكاك وفقاً للعلاقة (1-6) وبين الجدول (1-3) قيم هذا المعامل لنماذج الغواصة الخمسة عند القيم المدروسة لسرعة الجريان.

الجدول (1-3) حساب معامل الاحتكاك ( $C_f$ ) لنماذج الغواصة الخمسة وسرعة الجريان.

$C_f$					السرعة
0.02414827	0.015236529	0.013264169	0.011043402	0.0096136	0.0001
0.015236529	0.0096136	0.008369125	0.006967916	0.006065771	0.001
0.0096136	0.006065771	0.005280561	0.004396458	0.003827243	0.01
0.006065771	0.003827243	0.003331809	0.002773977	0.002414827	0.1
0.003827243	0.002414827	0.002102229	0.001750261	0.001523653	1
0.002773908	0.001750218	0.001523653	0.001268554	0.001104313	5
0.002414827	0.001523653	0.001326417	0.00110434	0.00096136	10
0.002226731	0.001404972	0.001223099	0.001018321	0.000886478	15
0.002010472	0.001268522	0.001104313	0.000919422	0.000800383	25
0.001523653	0.00096136	0.000836912	0.000696792	0.000606577	100

ثالثاً: تم حساب إجهاد رينولدز وفقاً للعلاقة (1-5) وبين الجدول (1-4) قيم هذا الإجهاد لكل نموذج كتابع للسرعة



الجدول (4-1) حساب إجهاد رينولدز ( $\tau_w$ ) لنماذج الغواصة الخمسة وسرعة الجريان.

$\tau_w$					السرعة
$1.2376 \times 10^{-7}$	$7.80872 \times 10^{-8}$	$6.79789 \times 10^{-8}$	$5.65974 \times 10^{-8}$	$4.92697 \times 10^{-8}$	<b>0.0001</b>
$7.80872 \times 10^{-6}$	$4.92697 \times 10^{-6}$	$4.28918 \times 10^{-6}$	$3.57106 \times 10^{-6}$	$3.10871 \times 10^{-6}$	<b>0.001</b>
0.000492697	0.000310871	0.000270629	0.000225318	0.000196146	<b>0.01</b>
0.031087078	0.01961462	0.017075519	0.014216633	0.012375989	<b>0.1</b>
1.961462008	1.23759886	1.077392385	0.897008932	0.78087209	<b>1</b>
35.54069437	22.42466214	19.52180226	16.25334579	14.14900528	<b>5</b>
123.759886	78.08720903	67.97886381	56.59743735	49.26969805	<b>10</b>
256.7699325	162.0108748	141.0386583	117.4251257	102.2219513	<b>15</b>
643.9793128	406.3234771	353.7251319	294.5023625	256.3727821	<b>25</b>
7808.720903	4926.969805	4289.176339	3571.056877	3108.707784	<b>100</b>

رابعاً: تم حساب سرعة الاحتكاك وفق العلاقة (4-1) وبين الجدول (5-1) قيمة سرعة الاحتكاك للنماذج الخمسة للغواصة وفقاً للقيم المدروسة للسرعة. الجدول (5-1) حساب سرعة الاحتكاك ( $U_\tau$ ) لنماذج الغواصة الخمسة وسرعة الجريان.

$U_\tau$					السرعة
$1.09882 \times 10^{-5}$	$8.72827 \times 10^{-6}$	$8.14376 \times 10^{-6}$	$7.43082 \times 10^{-6}$	$6.93311 \times 10^{-6}$	<b>0.0001</b>
$8.72827 \times 10^{-5}$	$6.93311 \times 10^{-5}$	$6.46882 \times 10^{-5}$	$5.90251 \times 10^{-5}$	$5.50716 \times 10^{-5}$	<b>0.001</b>
0.000693311	0.000550716	0.000513837	0.000468853	0.00043745	<b>0.01</b>
0.005507164	0.004374496	0.004081549	0.00372423	0.003474786	<b>0.1</b>
0.043744959	0.034747856	0.032420896	0.029582607	0.027601203	<b>1</b>
0.186209152	0.147911187	0.138006017	0.125924274	0.117490032	<b>5</b>
0.347478564	0.276012034	0.257528334	0.234983004	0.219244152	<b>10</b>
0.500506994	0.397566837	0.370942975	0.338468755	0.315798564	<b>15</b>
0.792636424	0.629613491	0.587450159	0.536021807	0.500119773	<b>25</b>
2.760120341	2.192441518	2.045620268	1.866536345	1.741518201	<b>100</b>

خامساً: يتم تحديد ارتفاع الطبقة الأولى في شبكة العناصر المنتهية وفقاً للعلاقة (3-1) وبين الجدول (6-1) ارتفاع الطبقة الأولى في شبكة العناصر المنتهية ( $y$ ) لنماذج الغواصة الخمسة وسرعة الجريان.

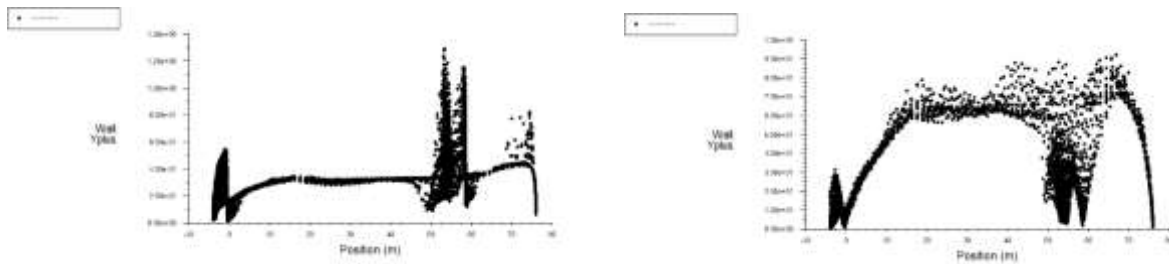
الجدول (6-1) حساب ارتفاع الطبقة الأولى في شبكة العناصر المنتهية ( $y$ ) لنماذج الغواصة الخمسة وسرعة الجريان.

$y$					السرعة
0.089053102	0.112111213	0.120157823	0.131686306	0.141139654	<b>0.0001</b>
0.011211121	0.014113965	0.015126974	0.016578324	0.01776843	<b>0.001</b>
0.001411397	0.001776843	0.001904373	0.002087087	0.002236913	<b>0.01</b>
0.000177684	0.000223691	0.000239746	0.000262749	0.000281611	<b>0.1</b>
$2.23691 \times 10^{-5}$	$2.81611 \times 10^{-5}$	$3.01823 \times 10^{-5}$	$3.30781 \times 10^{-5}$	$3.54527 \times 10^{-5}$	<b>1</b>

$5.25504 \times 10^{-6}$	$6.6157 \times 10^{-6}$	$7.09054 \times 10^{-6}$	$7.77083 \times 10^{-6}$	$8.32868 \times 10^{-6}$	<b>5</b>
$2.81611 \times 10^{-6}$	$3.54527 \times 10^{-6}$	$3.79972 \times 10^{-6}$	$4.16429 \times 10^{-6}$	$4.46323 \times 10^{-6}$	<b>10</b>
$1.95509 \times 10^{-6}$	$2.46131 \times 10^{-6}$	$2.63797 \times 10^{-6}$	$2.89107 \times 10^{-6}$	$3.09861 \times 10^{-6}$	<b>15</b>
$1.23453 \times 10^{-6}$	$1.55419 \times 10^{-6}$	$1.66574 \times 10^{-6}$	$1.82555 \times 10^{-6}$	$1.9566 \times 10^{-6}$	<b>25</b>
$3.54527 \times 10^{-7}$	$4.46323 \times 10^{-7}$	$4.78357 \times 10^{-7}$	$5.24253 \times 10^{-7}$	$5.61887 \times 10^{-7}$	<b>100</b>

وبهذه الطريقة تم تحديد ارتفاع الطبقة الأولى في شبكة العناصر المنتهية عند كل دراسة من الدراسات المطلوبة بحيث تكون  $y^+ \approx 1$ .

نلاحظ من الشكل (5-1) إن قيمة  $y^+ \approx 80$  على بدن الغواصة وذلك قبل تحديد ارتفاع  $y$  في شبكة العناصر المنتهية وإدخالها ضمن الشروط الحدية، وتحديد عدد طبقات الانتفاخ، ونلاحظ من خلال قيمة  $y^+$  إن أول خلية في شبكة العناصر المنتهية لا تقع في مجال الطبقة الحدية الفرعية للزجة وبالتالي لا نحصل على سماكة الطبقة الحدية الحقيقية بدقة، ولكن نجد من الشكل (4-1) إن قيمة  $y^+ \approx 1$  وذلك بعد ضبط شبكة العناصر المنتهية وتحديد قيمة ارتفاع  $y$  لضمان وقوع أول خلية في شبكة العناصر المنتهية في مجال الطبقة الحدية للزجة وبالتالي الحصول على سماكة الطبقة الحدية بدقة عالية.



الشكل (5-1) قيمة  $y^+$  قبل ضبط شبكة العناصر المنتهية. الشكل (4-1) قيمة  $y^+$  بعد ضبط شبكة العناصر المنتهية.

بعد تحديد ارتفاع الطبقة الأولى في شبكة العناصر المنتهية يجب تحديد عدد الطبقات اللازمة لتشكيل المجال المحيط بالبدن والمعبر عن الطبقة الحدية.

يعطى عدد الطبقات اللازمة لتشكيل الطبقة الحدية وفق برنامج ANSYS-FLUENT من خلال العلاقة (8-1). على اعتبار أن ارتفاع الطبقة النهائية يمثل ارتفاع الطبقة الحدية وهو المجهول في هذه الدراسة سيتم اعتبار  $y_{max}$  مساوية لارتفاع الطبقة الحدية المحسوبة من خلال قوانين براندل في العلاقة (10-1) للجريان المضطرب، والعلاقة (9-1) للجريان الصفحي، حيث إن هذه العلاقات صحيحة لدراسة الطبقة الحدية على صفائح مستوية بين الجدول (7-1) ارتفاع الطبقة الحدية الأعظمية وفق قوانين براندل ( $y_{max}$ ) لنماذج الغواصة الخمسة وسرعة الجريان.

الجدول (7-1) حساب ارتفاع الطبقة الحدية الأعظمية وفق قوانين براندل ( $y_{max}$ ) لنماذج الغواصة الخمسة وسرعة الجريان.

$y_{max}$					السرعة
0.447017897	1.413594709	1.999124809	3.160696126	4.470178967	<b>0.0001</b>
0.141359471	0.447017897	0.632178772	0.999499875	1.413594709	<b>0.001</b>
0.04470179	0.141359471	0.199912481	1.120732865	1.951504578	<b>0.01</b>

0.030929263	0.195150458	0.339776682	0.707134633	1.231316146	<b>0.1</b>
0.019515046	0.123131615	0.214384593	0.44617179	0.776907966	<b>1</b>
0.014144108	0.08924329	0.155381593	0.32337624	0.563087094	<b>5</b>
0.012313161	0.077690797	0.135267533	0.281515368	0.490195787	<b>10</b>
0.011354064	0.071639298	0.124731263	0.259587548	0.452013413	<b>15</b>
0.010251362	0.064681722	0.112617419	0.234376522	0.408114075	<b>25</b>
0.00776908	0.049019579	0.085348044	0.177624189	0.309292632	<b>100</b>

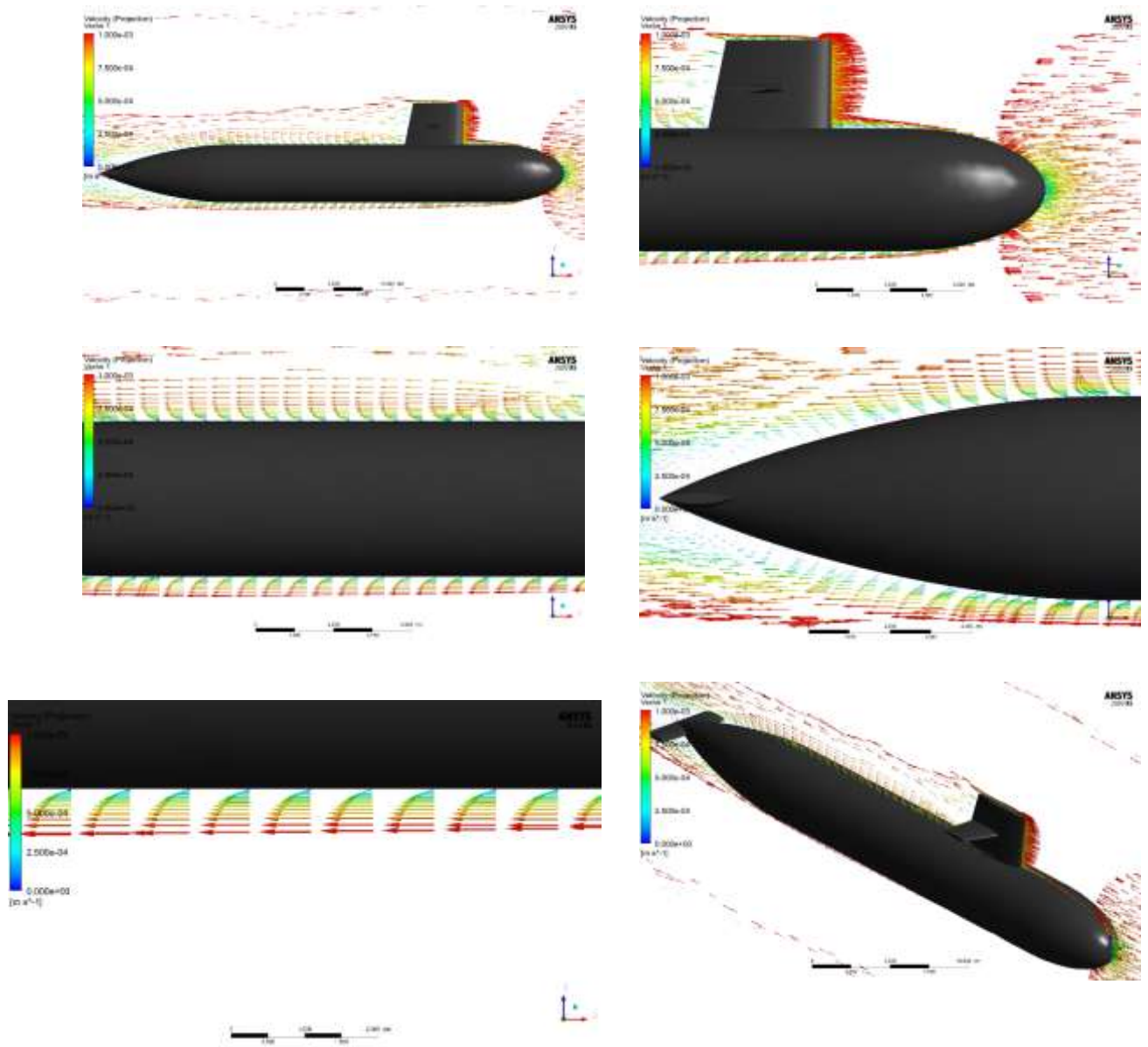
وبالتالي يتم حساب عدد الطبقات وفقاً للعلاقة (11-1):

$$n = \frac{\ln\left(\frac{y_{\max}}{y}\right)}{\ln(gr)} + 1 \quad (11-1)$$

الجدول (8-1) حساب عدد الطبقات اللازمة في شبكة العناصر المنتهية ( $n$ ) لنماذج الغواصة الخمسة وسرعة الجريان.

$n$					السرعة
9.849012813	14.90071407	16.42142767	18.43142722	19.95241532	<b>0.0001</b>
14.90071407	19.95241532	21.47312893	23.48312847	25.00411658	<b>0.001</b>
19.95241532	25.00411658	26.52483018	35.47737472	38.13910391	<b>0.01</b>
29.29862671	38.13910391	40.80035272	44.31785192	46.9795811	<b>0.1</b>
38.13910391	46.9795811	49.64082991	53.15832911	55.8200583	<b>1</b>
44.31833229	53.15880949	55.8200583	59.3375575	61.99928668	<b>5</b>
46.9795811	55.8200583	58.48130711	61.99880631	64.66053549	<b>10</b>
48.53631186	57.37678906	60.03803787	63.55553707	66.21726625	<b>15</b>
50.49756067	59.33803787	61.99928668	65.51678588	68.17851507	<b>25</b>
55.8200583	64.66053549	67.32178431	70.83928351	73.50101269	<b>100</b>

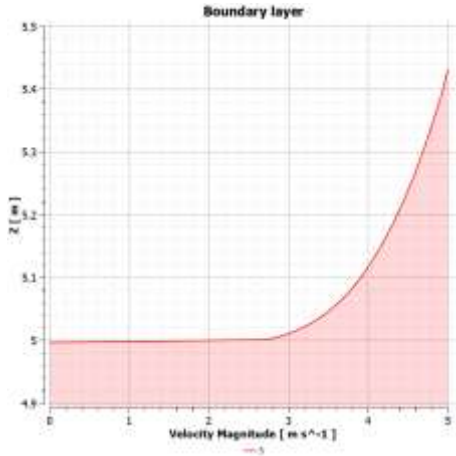
لضمان وقوع الطبقة الحدية على بدن الغواصة ضمن المجال المفروض سيتم إضافة 25% في عدد الطبقات وبذلك يكون قد تم تشكيل شبكة العناصر المنتهية بدقة عالية وضبطها بشكل الذي يمنح نتائج موثوقة. تم تحديد سماكة الطبقة الحدية الأعظمية على بدن الغواصات الخمسة من خلال ANSYS-FLUENT كما هو موضح في الشكل (6-1).



الشكل (6-1) الطبقة الحدية على بدن الغواصة للنموذج  $\left(\frac{1}{2}\right)$  عند السرعة 0.001m/s.

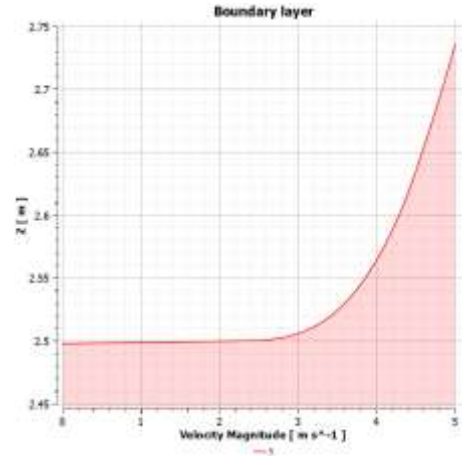
#### مخططات الدراسة:

تم رسم المخططات المعبرة عن الطبقة الحدية الأعظمية عند كل سرعة من السرعات المفروضة ولكل نموذج من نماذج الدراسة كما يلي وتبين الأشكال (7-1) و (8-1) و (9-1) و (10-1) و (11-1) مخطط الطبقة الحدية للنماذج الخمسة عند السرعة 5m/s حيث يمثل المحور (Z) ارتفاع الطبقة الحدية الأعظمية على البدن.



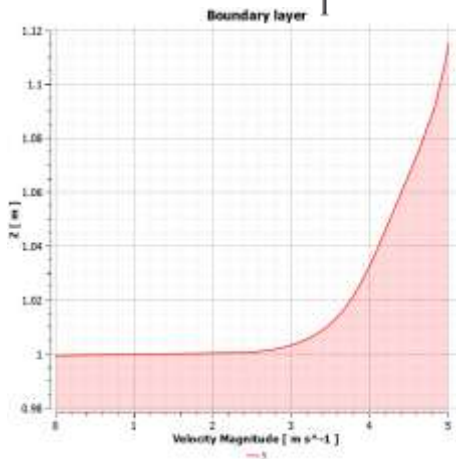
الشكل (7-1) مخطط الطبقة الحدية للنموذج

عند السرعة  $\frac{1}{5}$  m/s.



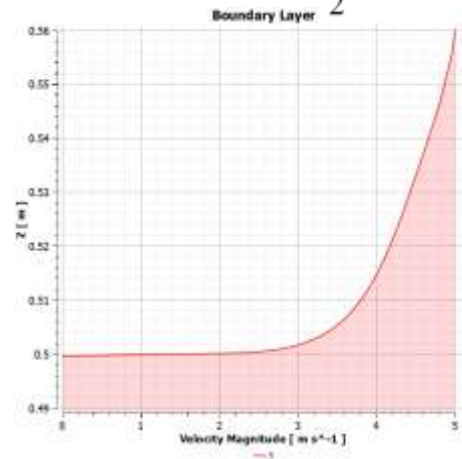
الشكل (8-1) مخطط الطبقة الحدية للنموذج

عند السرعة  $\frac{1}{2}$  m/s.



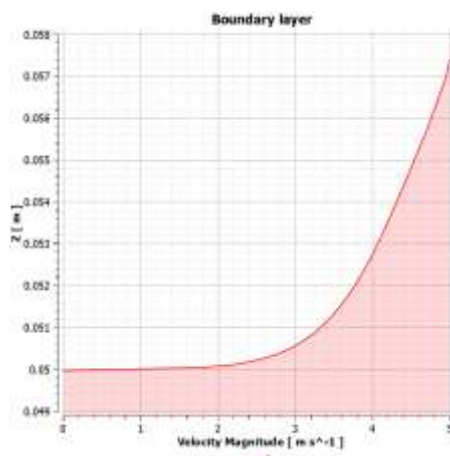
الشكل (9-1) مخطط الطبقة الحدية للنموذج

عند السرعة  $\frac{1}{5}$  m/s.



الشكل (10-1) مخطط الطبقة الحدية للنموذج

عند السرعة  $\frac{1}{10}$  m/s.



الشكل (11-1) مخطط الطبقة الحدية للنموذج عند السرعة  $\frac{1}{100}$  m/s.

تم تحديد ارتفاع الطبقة الحدية الأعظمية على بدن الغواصة كما هو موضح في الجدول (9-1):  
الجدول (9-1) حساب سماكة الطبقة الحدية الأعظمية وفق برنامج Fluent لنماذج الغواصة الخمسة وسرعة الجريان

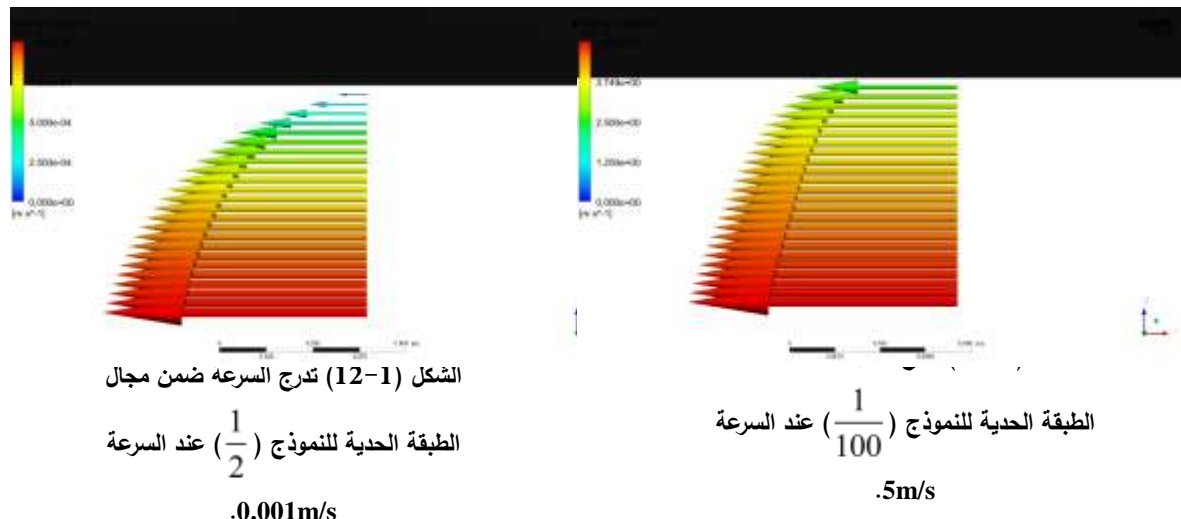
**قيمة الطبقة الحدية الأعظمية وفق برنامج Fluent**

$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{1}$	السرعة
0.0331117	0.55239	0.812752	1.10322	1.69196	<b>0.0001</b>
0.0283829	0.2563	0.399212	0.60661	1.11419	<b>0.001</b>
0.0200033	0.135513	0.223602	0.4389	0.78262	<b>0.01</b>
0.0113376	0.09395	0.160372	0.32521	0.61347	<b>0.1</b>
0.0087362	0.070679	0.129582	0.25198	0.4765	<b>1</b>
0.0074234	0.06029	0.115702	0.238	0.43412	<b>5</b>
0.0068722	0.055665	0.108122	0.22685	0.43088	<b>10</b>
0.0066538	0.054049	0.10568	0.22388	0.42864	<b>15</b>
0.0063812	0.053875	0.102212	0.21981	0.42516	<b>25</b>
0.0056339	0.053282	0.090542	0.19371	0.34889	<b>100</b>

من خلال النتائج السابقة تبين أن سماكة الطبقة الحدية تتناسب طردياً مع طول مسار الجريان وعكساً مع السرعة وهذا متوافق مع نظرية براندل في الطبقة الحدية، ولكن لوحظ اختلاف بين القيم التي تم الحصول عليها بالمقارنة مع قوانين براندل لتحديد سماكة الطبقة الحدية على صفيحة مستوية ولاسيما في حالة دراسة الغواصة بالطول الكامل في النموذج  $\left(\frac{1}{1}\right)$  والسبب في ذلك يعود إلى اختلاف طبيعة الجسم المدروس من حيث الشكل الهندسي بالإضافة إلى تأثير النموذج ثلاثي البعد مقارنة مع حالة الصفيحة ثنائية البعد.

كما تبين أن قيمة الطبقة الحدية تتغير بشكل كبير بين سرعة وأخرى في مجال الجريان الصفحي أما في حالة الجريان المضطرب فيكون التغير صغيراً جداً ويكاد أن يصبح مهملاً.

تم في هذه الدراسة من خلال برنامج ANSYS-FLUENT تحديد سماكة الطبقة الحدية على بدن الغواصة، ورسم حقل تدرج السرعة على البدن حيث كانت بروفيلات السرعة متوافقة مع الدراسات المرجعية [6] في حالتها الجريان الصفحي كما هو مبين في الشكل (12-1) وفي حالة الجريان المضطرب كما هو موضح في الشكل (13-1)



**الاستنتاجات والتوصيات:****الاستنتاجات:**

تم في هذه الدراسة بناء بيئة للعمل ضمن برنامج ANSYS-FLUENT وضحت آلية الإعداد الدقيق لتوليد طبقات متتالية من شبكات العناصر المنتهية التي سمحت بمعاينة دقيقة لتوزيع حقل السرعة ضمن الطبقة الحدية وذلك باستثمار العلاقات الرياضية الموافقة لإجهاد رينولدز وسرعة الاحتكاك وبالتالي تم تقييم سماكة الطبقة الحدية لخمسة نماذج ثلاثية البعد لبدن غواصة بطريقة رقمية ووجود مائع لزج وعند قيم مختلفة لسرعة الغواصة.

1. بينت نتائج هذه الدراسة أن سماكة الطبقة الحدية تتناسب طردياً مع طول مسار الجريان وعكساً مع السرعة
2. أن التغير في قيمة الطبقة الحدية يكون صغيراً جداً بعد حد معين للسرعة في حالة الجريان المضطرب
3. تعد نتائج هذا البحث ذات أهمية كبيرة في اختصار الزمن الحسابي لدراسة الجريان حول بدن الغواصة حيث تمكن من حصر المنطقة التي يتم فيها حل معادلات الجريان اللزج بمنطقة الطبقة الحدية التي فيها تبلغ إجهادات القص قيمتها الأعظمية.

**التوصيات:**

- 1- استخدام الطبقة الحدية كمييار قبل البدء بالدراسات وخاصة الدراسات التكرارية.
- 2- دراسة تطور الطبقة الحدية حول بدن الغواصة بوجود زوايا انحراف وأثناء المناورة.
- 3- دراسة تأثير الطبقة الحدية على نماذج غواصات مختلفة.
- 4- دراسة طور الطبقة الحدية حول السفن، مع وبدون زوايا انحراف

**References:**

- 1- D.V. Efremov & E.M. Milanov, 2019 "**Hydrodynamics of DARPA SUBOFF Submarine at Shallowly Immersion Conditions.**", Bulgarian Ship Hydrodynamics Centre, Varna, Bulgaria.
- 2- Elsevier Ltd, 2018 "**CFD Case Studies - Flow Over Cylinder.**", Computational Fluid Dynamics. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101127-0.00020-9>
- 3- Tien Thua Nguyen, et all,2018" **Estimation of Hydrodynamic Derivatives of Full-Scale Submarine using RANS Solver.**", Journal of Ocean Engineering and Technology 32(5), 386-392 October.
- 4- Dakalo Happy Mudimeli,2018 " **Boundary Layer Separation from a Circular Cylinder.**", at: <https://www.researchgate.net/publication/332963726>.
- 5- A. Vali1, et all,2017 " **Experimental and Numerical Study of a Submarine and Propeller Behaviors in Submergence and Surface Conditions.**," Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 11, No. 5, pp. 1297-1308, 2018.
- 6- Yunus A. Cengel and John M. Cimbala, 2017 "**Fluid Mechanics Fundamentals and Application**" McGraw Hill; 4<sup>th</sup> edition.
- 7- Tumisang Kalagobe,2017" **Boundary Layer Separation from a Circular Cylinder,**" MECN3007 - Mechanical Engineering Laboratory.
- 8- Aleksandr Ursolov, et all,2016" **Technical Notes on the Near Surface Experiments of Submerged Submarine,**" at: <https://www.researchgate.net/publication/331001146>.

9- Mohammad Moonesun, et all,2016" **CFD analysis of the bow shapes of submarines,**" Journal of Scientific and Engineering Research, 2016, 3(1):1-16.

10- Abdi Kukner, et all, 2016" **Investigation Of Flow Distribution Around A Submarine** Journal of Naval Science and Engineering, 2016, Vol. 12, No.2, pp.1-26.