



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des science et de la technologie  
Département de génie mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :  
**Sebai chams**

Le : mercredi 12 juin 2024

البحث عن النسق الذروي لجريان التجويف ذو  
الحافة القائمة

## Jury :

Dr.	Abdelouahed ALIOUALI	MCA	Université de Biskra	Président
Dr.	Miloud ZELLOUF	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Hefiadh HADEF	MCA	Université de Biskra	Examineur

جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم التكنولوجية  
قسم الهندسة الميكانيكية



# مذكرة هاستر

الميدان: العلوم و التكنولوجيا

الشعبة: هندسة ميكانيكية

التخصص: طاقة

رقم: .....

إعداد الطلبة:

سبعي شمس

يوم: الأربعاء 12 جوان 2024

البحث عن النسق الذروي لجريان التجويف ذو الحافة القائدة

## لجنة المناقشة:

مشرفا	جامعة بسكرة	أستاذ محاضر ب	د. ميلود زلوف
رئيسا	جامعة بسكرة	أستاذ محاضر أ	د. عبد الواحد علي وعلي
مناقشا	جامعة بسكرة	أستاذ محاضر أ	د. حفيظ هادف

السنة الجامعية: 2023-2024



## الإهداء

يسرني أن أهدي هاته المذكرة لأبي وأمي الغاليين على كل الجهد والتعب الذي قدماه لأجلي وإخوتي كل

باسمه ومقامه في قلبي: محمد، أحمد سندي في اللحظات الصعبة، عبد الحميد، نور الدين رغم بعد المسافة إلا أنك

دائماً معي، سالم، خلود، هديل، على دعمهم لي في مسيرتي الدراسية وعائلي الكبيرة أخص خالتي وسهيلة وجميع

عائلتها ولا أنسى عمي وجدي رحمهم الله وجميع الأشخاص المميزين الذين تعاملت معهم.

## كلمة شكر وتقدير

بداية الحمد والشكر لله عز وجل حتى يبلغ الحمد منتهاه، الذي وفقني لإنجاز هاته المذكرة.

أتقدم بأسمى عبارات الشكر والتقدير إلى الأستاذ المشرف "زلوف ميلود" على توجيهاته ونصائحه و الإضافة العلمية التي قدمها لي منذ البداية. وأشكر كل من ساعدني في إنجاز هاته المذكرة.

أشكر أعضاء لجنة المناقشة الممثلين في الأستاذ عبد الواحد علي وعلي رئيسا و الأستاذ هادف حفيظ مناقشا.

كما أشكر جميع أساتذتي في مختلف المراحل الدراسية و كذا أساتذة قسم الهندسة الميكانيكية.

## المخلص:

لقد كان جريان التجويف ذو الحافة القائدة (مسألة برغراف 1966) ذا أهمية كبيرة لعقود من الزمن (بتشلور 1956). تم تطوير عدد من الطرق العددية لتحليل مسألة جريان نافيه - ستوكس ثنائية (وثلاثية) الأبعاد غير القابلة للضغط. حاليا في هذا العمل، تم استخدام المحلل الحجم المنتهية (Fluent-Ansys) لحل هذه المسألة. للتحقيق في حالات أعداد رينولدز المرتفعة ( $Re \rightarrow 500.000$ ) بحثا عن النسق الذروي للجريان. بعد ذلك، تماشيا مع الإتجاهات المستقبلية (كبديل محتمل) تم تقييم عدد من حلول الشبكات العصبية المستنيرة (المسترشدة) بالميكانيكا، مع تجنب الدخول في مسألة التفاضل بينها وبين النمذجة المعتمدة على البيانات.

**الكلمات المفتاحية:** التجويف ذو الحافة القائدة، أعداد رينولدز المرتفعة، النسق الذروي للجريان، طريقة الحجم المنتهية و الشبكات العصبية المستنيرة بالميكانيكا.

### **Abstract:**

The lid driven cavity flow (Burggraf problem 1966) has been of considerable interest for decades (Batchelor 1956). A number of numerical methods have been developed to analyze this 2D (or 3D) incompressible Navier - Stokes flow problem. Presently, a finite volume solver (Fluent-Ansys) will be used to solve this problem. The cases for high Reynolds numbers ( $Re \rightarrow 500.00$ ) will be investigated to hunt the ultimate regime flow. Next, in line with future trends (as a possible alternative) a number of Mechanics Informed Neural Network Solvers (MINNs) will be evaluated. While avoiding entering into the issue of comparison between it and Data-Driven Modeling (DDM).

**Keyword:** Lid driven cavity flow, High Reynolds numbers, Ultimate regime flow, Finite volume method and Mechanics informed neural networks.

## قائمة الأشكال:

- 4 الشكل 1-01: مخططات الجريان من أعمال: & Prandtl (1904), Batchelor (1956), Burggraf (1961) Kawaguti (1966)
- 5 الشكل 1-02: مخططات لجريان التجويف ذو الحافة القائدة من أعمال: Greenspan (1969)
- 6 الشكل 1-03: مخططات لجريان التجويف ذو الحافة القائدة من أعمال: Nallasamy and Krishna (1977)
- 7 الشكل 1-04: مخططات لجريان التجويف ذو الحافة القائدة من أعمال: Nallasamy and Krishna (1977)
- 8 الشكل 1-05: مخططات من الأعمال التجريبية لـ Street ومعاونيه (1984) Koseff , Koseff and Street et al. (1983)
- 10 الشكل 1-06: خليج أم رشراش "إيلات"/العقبة نموذج لجريان التجويف ذو الحافة القائدة
- 10 الشكل 1-07: عملية طلاء (تغطية) قصيرة المدى
- 11 الشكل 1-08: جريان فوق لاقط شمسي مع حاجز الرياح
- 11 الشكل 1-09: الجريان في حوض مفتوح: (a) عملية المعالجة و (b) المجال الفيزيائي للجريان
- 11 الشكل 1-10: هيكل الجريان النموذجي (التجريبي)، توجد الأسطوانة الدوارة في الأسفل
- 12 الشكل 1-11: تجويف ثنائي الحافة القائدة لآلة تجفيف
- 12 الشكل 1-12: تغطية (طلاء) التدحرج المفصلي (a) الوضعية الفيزيائية (b) المجال المثالي (المبسط)
- 12 الشكل 1-13: نوع الغطاء (a) متوازي، (b) ضد متوازي
- 13 الشكل 1-14: عرض للحل التجريبي للجريان المتوازي بسرعة موحدة
- 13 الشكل 1-15: عرض للحل التجريبي للجريان ضد المتوازي بسرعة موحدة
- 13 الشكل 1-16: رسم تخطيطي لآلة الخلط، منظر علوي
- 14 الشكل 1-17: صور لمجموعة من قطارات CORADIA DUPLEX
- 14 الشكل 1-18: رسم تخطيطي لترتيب المعدات على CORADIA TER 2N NG
- 15 الشكل 1-19: مخطط التحلل إلى مختلف الهياكل (البنى) الدوامية للجريان حول عربات القطار
- 15 الشكل 1-20: رسم تخطيطي لجريان التجويف (a) تجويف مغلق، (b) تجويف مفتوح

- 16 الشكل 2-01: رسم تخطيطي لنموذج تجويف (أ) ثلاثي الأبعاد [1] و (ب) ثنائي الأبعاد
- 17 الشكل 2-02: صور للشبكة المستخدمة في الحساب 250x250 للحالة 2D و 100x100x100 للحالة 3D
- 18 الشكل 3.01: دالة التيار في شبكة 128x128 من المرجع Botella and Peyret و الدراسة الحالية شبكة 141x141 لعدد  $Re=1000$
- 19 الشكل 3.02: خطوط دالة التيار والدوامية من اليسار إلى اليمين عند (a)  $Re=100000$  ( $t=30650$ ) و (b)  $Re=200000$  ( $t=30650$ ) لشبكة 250x250
- 22 الشكل 3.03: خطوط دالة التيار والدوامية والضغط من اليسار إلى اليمين عند أعداد رينولدز (2500/1000/100) باستعمال الشبكة 250X250
- 22 الشكل 3.04: خطوط دالة التيار والدوامية والضغط من اليسار إلى اليمين عند أعداد رينولدز (10.000/7500/5000) باستعمال الشبكة 250X250
- 26 الشكل 3.05: خطوط دالة التيار والدوامية والضغط من اليسار إلى اليمين عند أعداد رينولدز (500.000/100.000/50.000) باستعمال الشبكة 250X250
- 24 الشكل 3.06: منحنيات تقارب الحلول Convergence history
- 25 الشكل 3.07: منحنيات السرعة الأفقية (Profiles u-velocity at  $x=0.5$ )
- 25 الشكل 3.08: منحنيات السرعة العمودية (Profiles v-velocity at  $y=0.5$ )
- 25 الشكل 3.09: منحنيات السرعة العمودية (Profiles V-velocity at  $X=0.5$ )
- 26 الشكل 3.10: منحنيات السرعة الأفقية (Profiles U-velocity at  $Y=0.5$ )
- 26 الشكل 3.11: مقارنة بين منحنيات السرعة (Profiles of velocity) الأفقية والعمودية في نفس المعلم
- 27 الشكل 3.12: منحنيات السرعة في مستوى التناظر المتوسط للتجويف المكعب عند مختلف أعداد رينولدز (10000/5000)
- 28 الشكل 3.13: منحنيات السرعة في مستوى التناظر المتوسط للتجويف المكعب عند مختلف أعداد رينولدز
- 28 الشكل 3.14: منحنيات السرعة في مستوى التناظر المتوسط للتجويف المكعب عند مختلف أعداد رينولدز





## قائمة الجداول:

16

جدول 01-2: الشروط الحدية

17

جدول 01-2: أبعاد وأحجام شبكات التقطيع

## قائمة الرموز:

AR	Aspect Ratio
p	pressure, N/m <sup>2</sup>
P	dimensionless pressure, $P=p/\rho u^2$
Re	Reynolds number $Re= U_0 L/ \nu$
u	velocity component in x direction [m/s]
v	velocity component in y direction [m/s]
u <sub>0</sub>	movable plate velocity [m/s]
U <sub>0</sub>	dimensionless movable plate velocity
U	dimensionless velocity component in X direction
V	dimensionless velocity component in Y direction
x, y	dimensional coordinates
X, Y	dimensionless coordinates
SV	secondary vortex
TV	tertiary vortex
FV	fourth vortex

### Greek symbols

$\nu$	kinematic viscosity [m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	density [kg/m <sup>3</sup> ]
$\psi$	streamfunction [kg/s]
$\Psi$	dimensionless stream-function $\Psi= \psi/\dot{m}$ where $\dot{m}$ is masse rate pass the control volume

## الفهرس

أ	الإهداء
ب	كلمة شكر وتقدير
ج	الملخص
د	قائمة الأشكال
و	قائمة الجداول
ز	قائمة الرموز
1	مقدمة عامة
	1.لفصل الأول: دراسة الحالة الراهنة
3	1.1. دراسة الحالة الراهنة
9	2.1. بعض تطبيقات مسألة جريان التجويف ذو الحافة القائدة
	الفصل الثاني الصياغة الرياضية والمحاكاة العددية للمسألة
15	1.2. الصياغة الرياضية
16	2.2. المحاكاة العددية
	3.الفصل الثالث:مناقشة النتائج
18	1.3. الجريان داخل تجويف ثنائي الأبعاد
27	2.3. الجريان داخل تجويف ثلاثي الأبعاد
30	الخلاصة
31	قائمة المراجع
	جدول المصطلحات

# مقدمة عامة

## مقدمة عامة

تعتبر مسألة جريان التجويف ذو الحافة القائدة ذات أهمية كبيرة في مجال ديناميكيات الموائع التي تمثل معيار للتحقق من صحة طرق ميكانيكا الموائع المحوسبة (Computational Fluid Dynamics (CFD ونظرا لبساطتها الهندسية وسهولة تطبيق الحدود الحدية كذلك لدراسة الجوانب الأساسية للجريانات اللانضغاطية في الأحمال المحصورة المدفوعة بالحركة المماسية لواحد أو أكثر من الجدران المحيطة ، و التي تظهر تقريبًا جميع الظواهر التي يمكن أن تحدث في الجريانات غير القابلة للضغط: الدوامات، الجريانات الثانوية، أنماط الجريان المعقدة، حركات الجسيمات الفوضوية، عدم الاستقرار وكذا الاضطراب.

نظرا لوجود عديد الدراسات في هذا المجال يمكن تمييز ثلاث اتجاهات أساسية يرتكز عليها البحث في المسألة تتمثل أولا في البحث عن الحلول الثابتة (المستقرة) عند أعداد رينولدز مختلفة، ثانيا في تحليل الاستقرار الهيدروديناميكي عند أعداد رينولدز الحرجة حيث ينتقل نسق الجريان من مستقر إلى نسق غير مستقر وذلك بعد ظهور التشعبات، ثالثا إمكانية عبور الجريان نحو الحالة الفضوية ومن ثم الوصول لحالة من الاضطراب الكامل.

في إطار تعميم مسألة جريان التجويف ذو الحافة القائدة توجد عديد الأبحاث والتجارب تهتم بدراسة الانتقال من الجريانات داخل التجاويف الثنائية الأبعاد إلى التجاويف الثلاثية الأبعاد لتحقيق التقارب بين النتائج التحليلية و التجريبية والرقمية وذلك باعتماد مخططات حسابية جديدة لتحقيق دقة و تقريب أحسن لتحديد مدى إمكانية الاكتفاء بثنائية البعد للوصول إلى حلول مستقرة.

على الرغم من وجود العديد من الدراسات الرقمية حول جريان التجويف ذو الحافة القائدة ، طبيعة الجريان عند أعداد رينولدز الكبيرة لا يزال محل جدل بسبب التفردات التي تنشأ في زوايا التجويف. لهذا نعمل من خلال هاته المذكرة على دراسة رقمية لمسألة جريان التجويف ذو الحافة القائدة الخاضعة لمعادلات Navier- Stokes بهدف التصديق على بعض الدراسات السابقة و التحقيق في الأنساق الذروية للجريان وسلوكه مع تحديد عتبة الانتقال من نمط الجريان الصفائحي إلى الاضطرابي مع إبراز تأثير البعد الثالث على بنية الجريان المدروس . قمنا برفع النسق تدريجيا (زيادة عدد رينولدز) من خلال زيادة سرعة الغطاء العلوي مع المحافظة على الخصائص الفيزيائية (كثافة و لزوجة) للمائع المدروس .

يحتوي هذا العمل على ثلاثة فصول أساسية:

في الفصل الأول نقدم نظرة عامة لمجموعة الدراسات سابقة حول المراجع التي تناولت دراسة جريان داخل تجاويف مختلفة الهندسة وبشروط حدية مختلفة.

الفصل الثاني يمثل الصياغة الرياضية للمسألة باستخدام المعادلات الحاكمة وكذا الشروط الحدية باعتماد طريقة الحجم المنتهية مع إجراء اختبارات الشبكة المناسبة للحصول على تقارب أحسن.

الفصل الثالث يتضمن عرض النتائج المحصل عليها من هذه الدراسة الرقمية فيما يخص دالة التيار و الدوامية باستخدام برنامج Fluent بعدما قمنا بإنشاء شبكات التقطيع باستعمال برنامج Gambit واختيار الشبكات المثلى للتركيبتين الشنائية (2D) والثلاثية (2D) الأبعاد بـ 250x250 و 100x100x100 على التوالي. في الأخير خاتمة عامة تلخص أهم النتائج المحصل عليها في هاته الدراسة.

## الفصل الأول:

### دراسة الحالة الراهنة

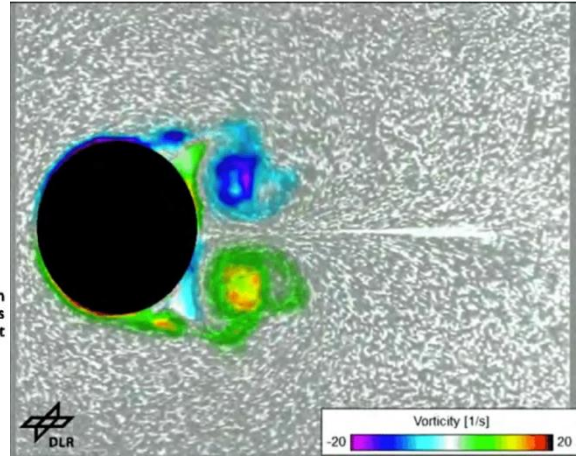
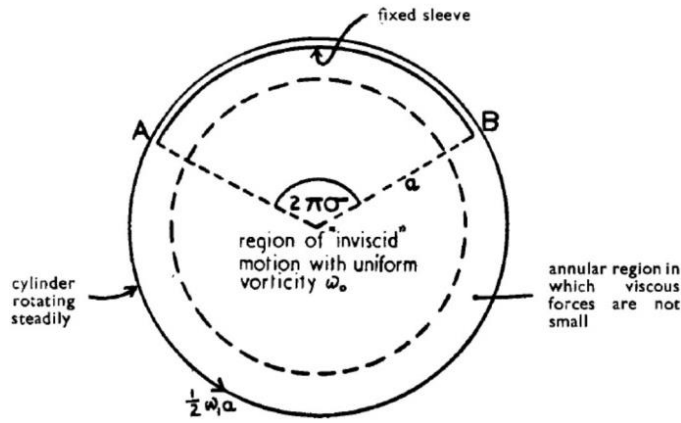


## 1.1. دراسة الحالة الراهنة:

من خلال البحث في الدراسات السابقة—بخاصة المراجعين الأهم في هذه المسألة [01] Kuhlmann and Romanö و [02] Shankar (2000) نجد أن أول تحقيق<sup>(1)</sup> في مسألة جريان التجويف ذو الحافة القائدة يعود إلى [03] Kawaguti (1961)، الذي درس تأثير نسبة الطول إلى العرض على بنية الجريان بثلاث قيم مختلفة 2, 1, 0.5 = AR عند أعداد رينولدز—Reynoldsnumber تصل إلى 128=Re، تلتها الدراسة التحليلية والعديدية لـ [04] Burggraf (1966)، الذي رفع فيها نسق الجريان إلى 400=Re حيث جاءت النتائج متوافقة مع افتراض بتشيلور [05] Batchelor (1956)، [حدسية/نظرية/مبرهنة برندتل-بتشيلور [06] Prandtl (1904) Prandtl-Batchelor Theorem (PBT)؛ التي تنص على أن الدوامة في الجريان الصفائحي الثابت (الدائم) المحتوي على خطوط انسياب مغلقة، عند أعداد (Re) مرتفعة ستبقى ثابتة (صامدة).

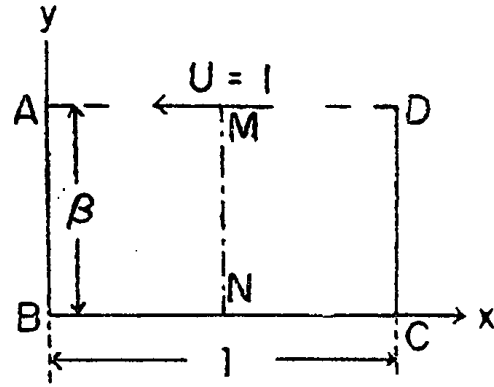
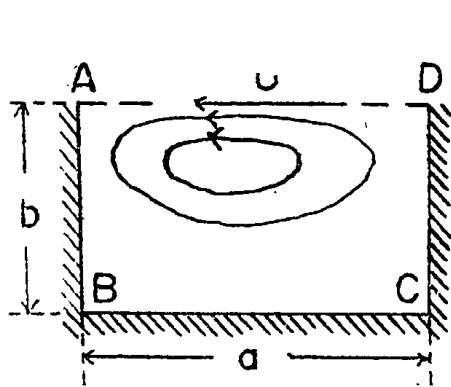
في تحقيق عددي آخر درس [07] Greenspan (1969) المسألة إلى غاية  $10^5 = Re$ ، من جهة توافقت نتائجها العددية مع النتائج التجريبية لـ [08] Pan and Acrivos (في حدود تجاربهم،  $Re < 4000$ ). من جهة أخرى بينت أن نظام دوامة الجريان داخل التجويف قد انخفض إلى دوامة أولية واحدة عند عدد رينولدز المرتفع الذي يصل إلى 100.000. تشير هذه النتائج بوضوح إلى نموذج عدد رينولدز اللانهائي (حد بتشيلور  $Re \rightarrow \infty$ ). بعدها تم تطبيق طريقة الفروق المنتهية لمحاكاة جريان التجويف ذو الحافة القائدة من أجل أعداد رينولدز تصل حتى  $Re = 50.000$  من قبل [09] Nallasamy and Krishna (1977) اللذين نصت نتائجها أيضا—لكن فقط لـ  $Re > 30.000$ —أن الجريان يخضع للنموذج المفترض لبتشيلور (حدسية برندتل - بتشيلور). (ب)

في إطار الدراسات التجريبية لهذه المسألة نجد سلسلة من التجارب الخاصة التي اعتبرت إضافة مهمة في مجال ميكانيكا الموائع لـ [10-13] R.L. Street (1983-1984) مع مجموعة من الباحثين والتي اهتمت بتأثيرات الجدران النهائية على حجم دوامة التيار النازل الثانوية وخلصت إلى أن دوامات الزاوية لها تأثير بارز على حجم التيار الثانوي ووجود علاقة عكسية بين حجم التيار الثانوي وعدد Reynolds الأكبر من 2000 مع تحديد عتبة الانتقال من الجريان 2D إلى 3D حيث يبرز الاضطراب ويظهر تأثير البعد الثالث على بنية الجريان عبر فعل الحدودية المتمثل في الانحصار، تزامن مع هاته الأعمال التحقيقات العددية للمسألة الكلاسيكية لـ: [14] Ghia et al. (1982) و [15] Schreiber and Keller (1983) عند عدد رينولدز  $Re < 10^4$  بهدف تحسين الدقة والتقريب. تبعتها بعد ذلك [16] Bruneau et al. (1989) بطريقة جديدة للتعبير عن الشروط الحدية المتقطعة وتطبيق مخطط جديد على حد الانتقال (advection term) في معادلات Navier-Stokes.

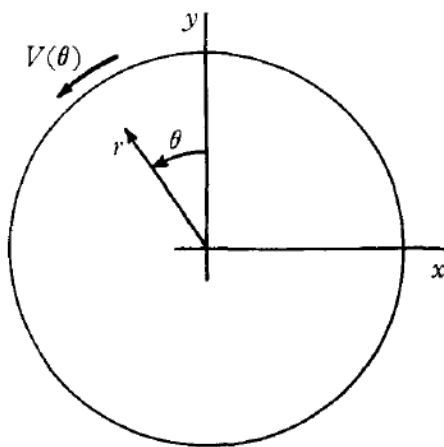
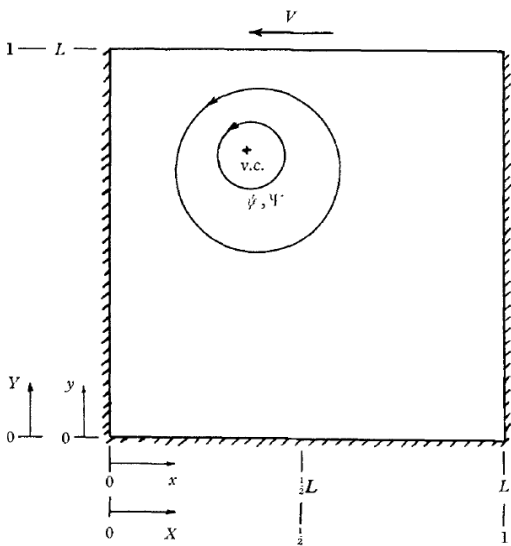


Fom:Batchelor (1956)

From: Prandtl(1905)/<https://doi.org/10.3203/IWF/C-1>



Fom:Kawaguti (1961)



From: Burggraf (1966)

الشكل 1-1: مخططات الجريان من أعمال: [06] Prandtl (1904), [05] Batchelor (1956), [03] Kawaguti (1961), [04] Burggraf (1966)

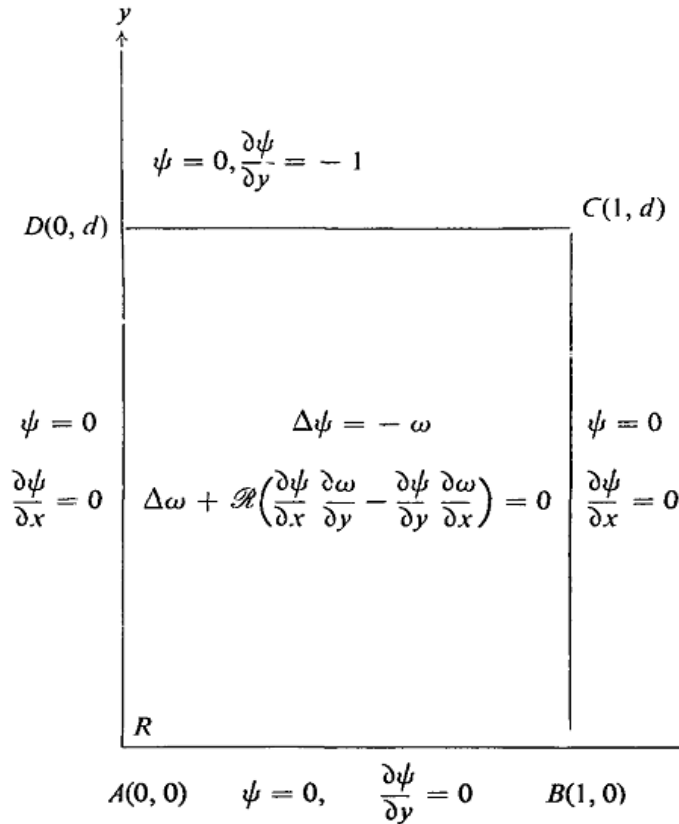


Fig. 1

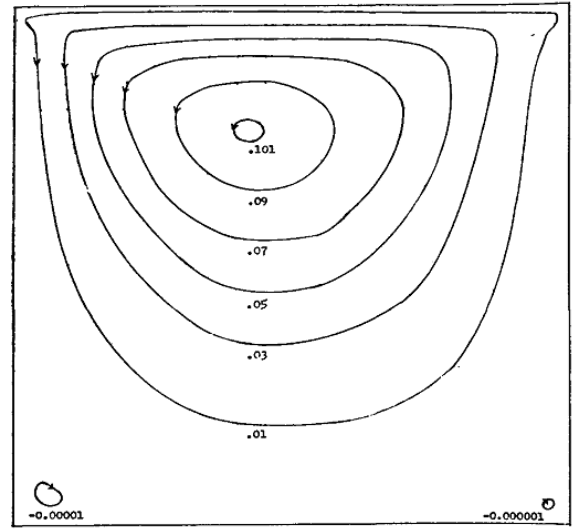


Fig. 4. Streamlines for Reynolds number 50 with  $h = 1/40$

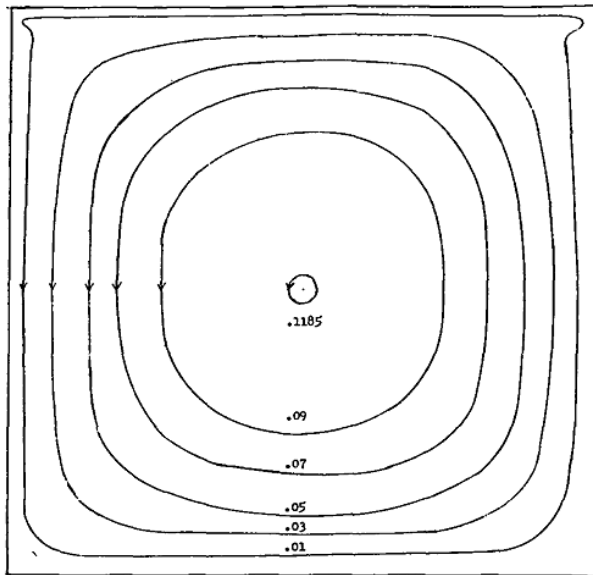


Fig. 6. Streamlines for Reynolds number 100,000 with  $h = 1/40$

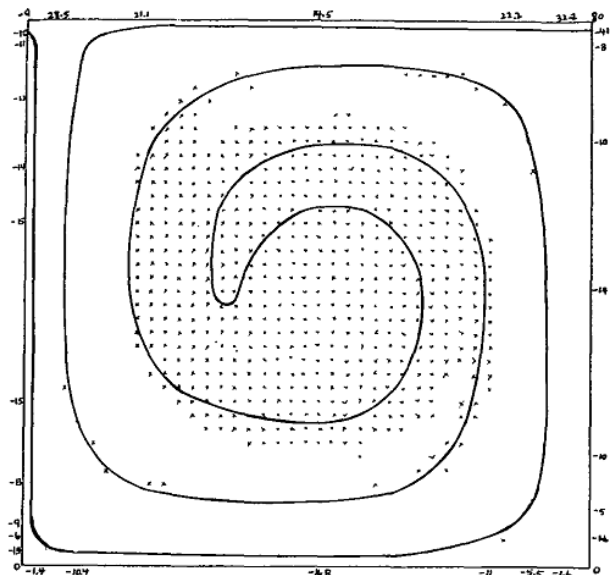


Fig. 7. Equivorticity curves  $\omega = 1.630$  for Reynolds number 100,000 and  $h = 1/40$ . At crossed points vorticity is between 1.6 and 1.7

الشكل 1-02: مخططات لجران التجويف ذو الحافة القائدة من أعمال: [07] Greenspan (1969)

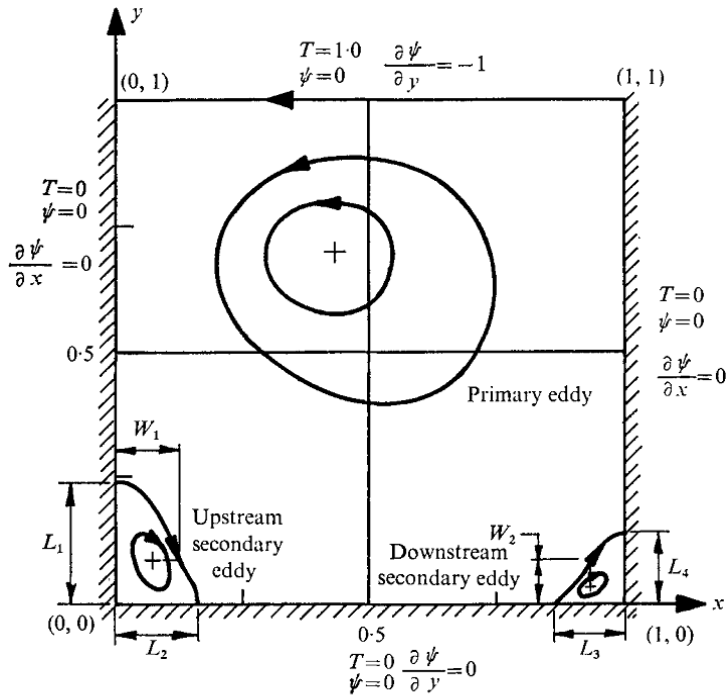


FIGURE 1. Definition sketch.

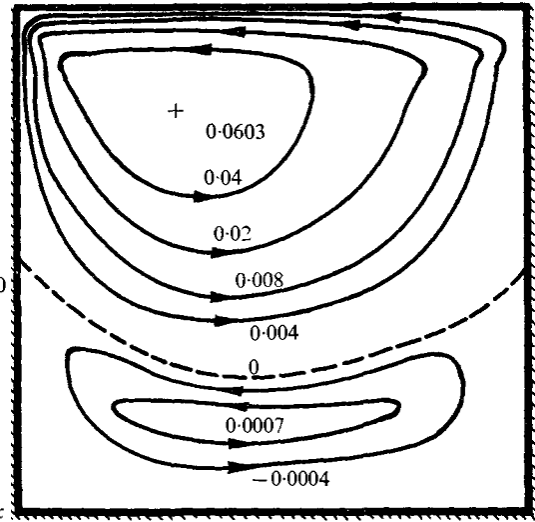


FIGURE 3. Streamline pattern showing two major eddies;  $Re = 1000, h = \frac{1}{20}$ .

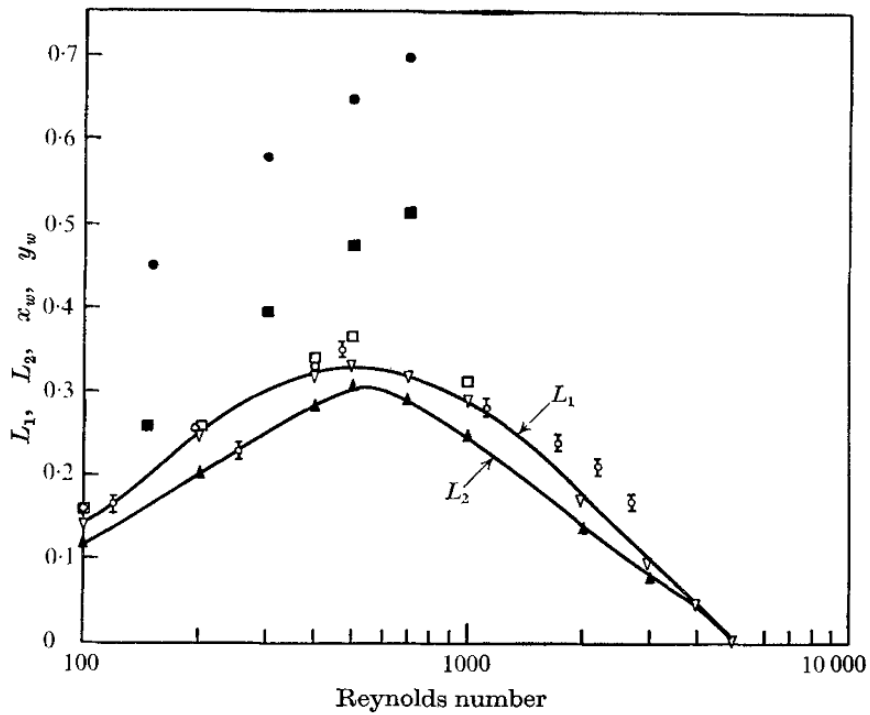
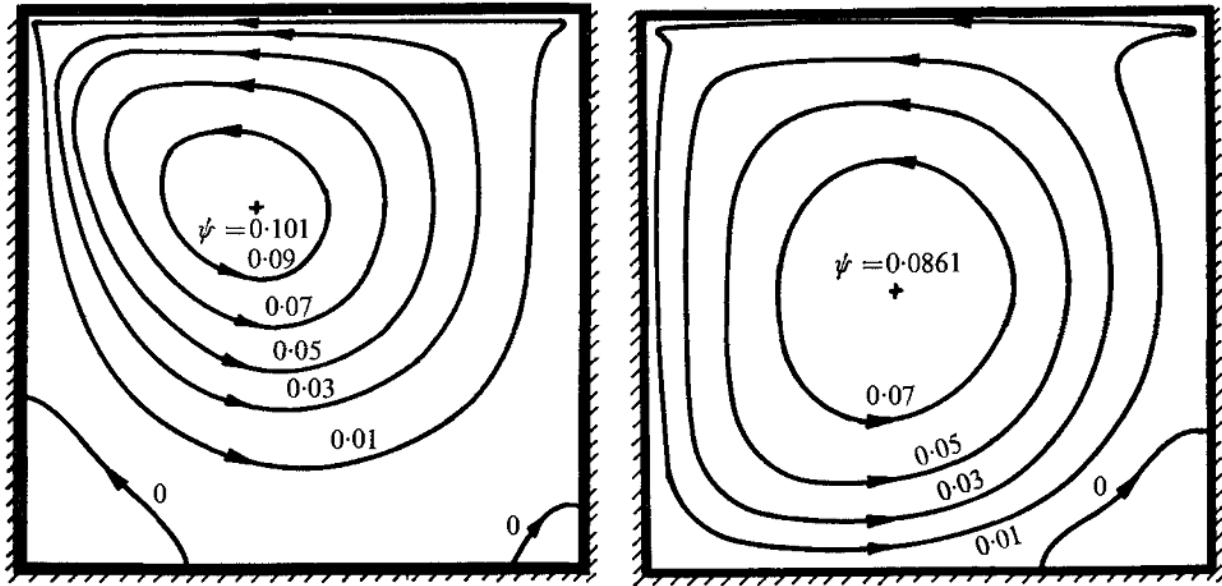


FIGURE 2. Upstream eddy size.  $\circ$ , Burggraf (1966);  $\square$ , Bozeman & Dalton (1973);  $\bar{\phi}$ , Pan & Acrivos (1967);  $\nabla$ , present  $L_1$ ;  $\blacktriangle$ , present  $L_2$ ;  $\bullet$ ,  $x_w$ , Leal (1973);  $\blacksquare$ ,  $y_w$ , Leal (1973).

الشكل 1-03: مخططات لجرمان التجويف ذو الحافة القائمة من أعمال: Nallasamy and Krishna (1977) [09]



(a)

(b)

FIGURE 7. Streamline patterns: growth and decay of secondary eddies.  
(a)  $Re = 400$ , (b)  $Re = 5000$ .

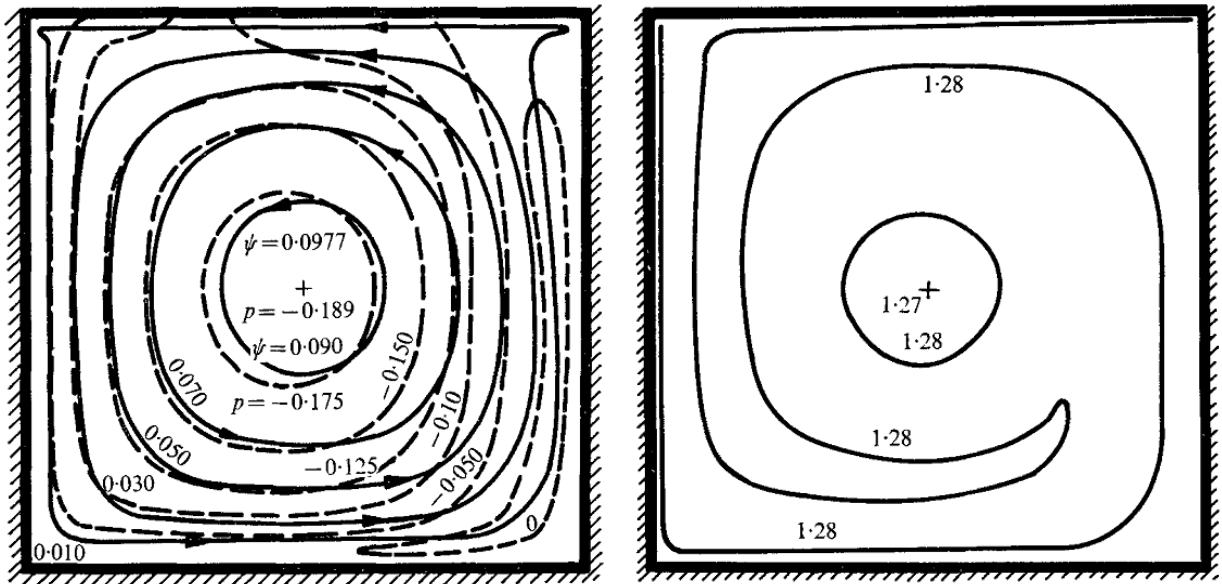


FIGURE 10. Stream function and total-pressure contours;  
 $Re = 30\,000$ ; ---, total pressure; —, streamline.

FIGURE 14. Vorticity contours;  $Re = 30\,000$ .

(تابع الشكل 1-04: مخططات لجرمان التجويف ذو الحافة القائمة من أعمال: Nallasamy and Krishna (1977) [09])

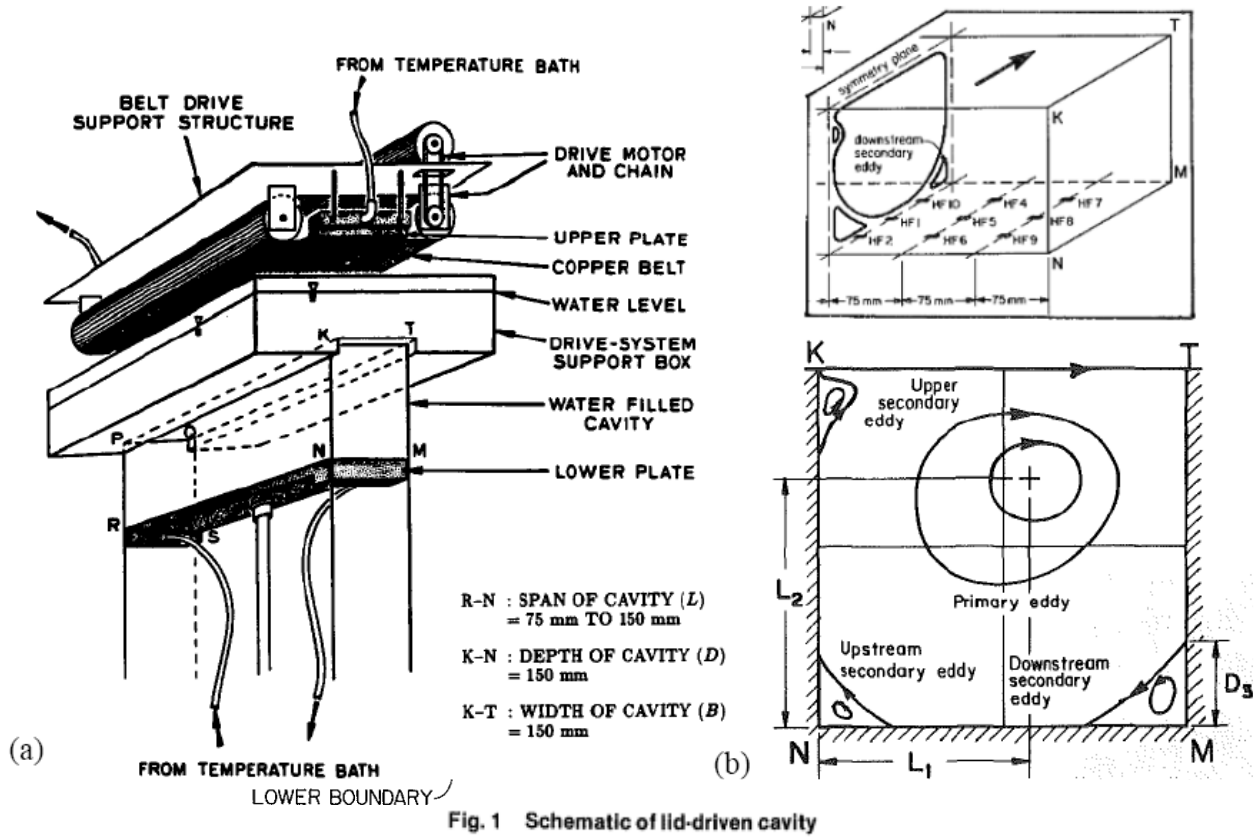


Fig. 1 Schematic of lid-driven cavity

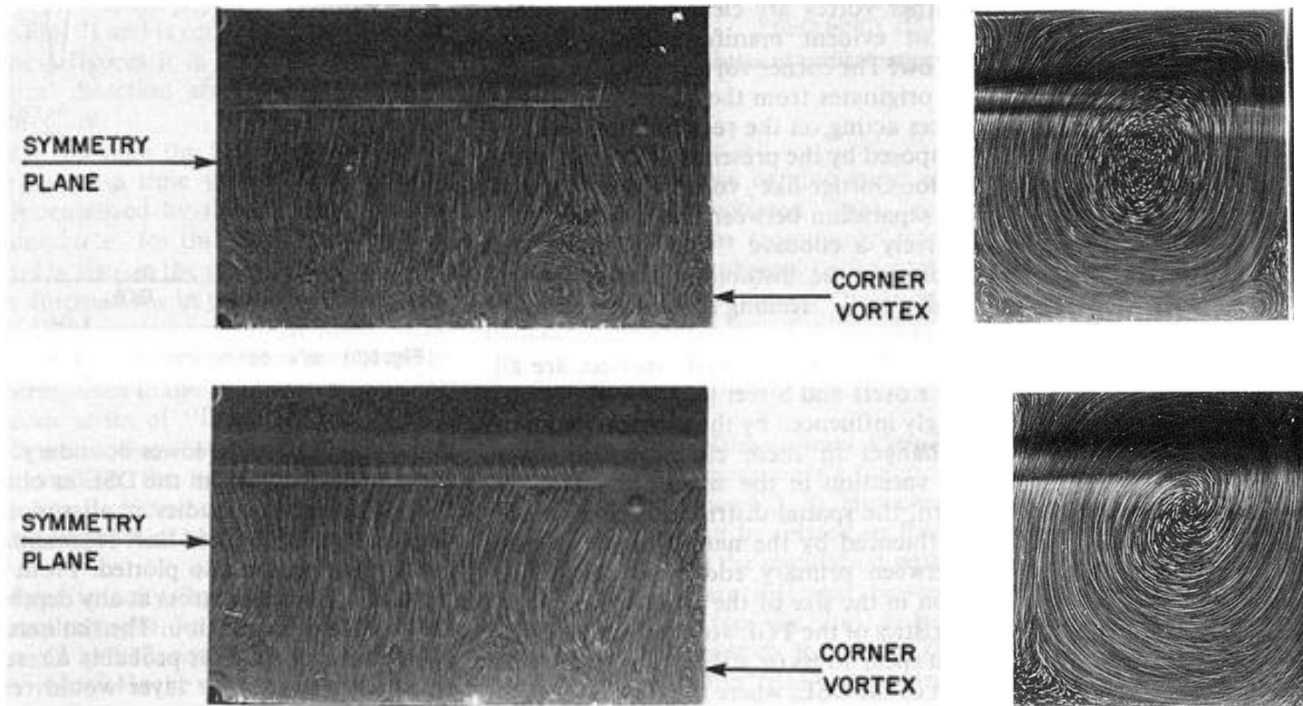


Fig. 4 Flow visualized using rheoscopic liquid at (a) symmetry plane and (b) plane 10 mm from end-wall for  $Re = 3300$ ,  $SAR = 3:1$  (View A)

Fig. 6 Flow showing presence of corner vortex and Taylor-Görtlerlike vortices at two different times 30 s. apart for  $Re = 6000$  (View B; plane 35 mm upstream of downstream side wall).

الشكل 1-05: مخططات من الأعمال التجريبية لـ Street ومعاونيه [13-10] Koseff et al. (1983), Koseff and Street (1984)

قادت النتائج التجريبية والعديدية السابق ذكرها للمزيد من التحقيقات العددية من قبل [17] Botella and (1998) Peyret بهدف توسيع الدراسة لتشمل الأبعاد الثلاثة حيث قام باستخدام طرق طيفية لاستيعاب مشكلة الشروط الحدية المتقطعة في منطقة التقاء الجدار المتحرك بالجدران الساكنة.

قام [18] Wahba (2009) و [19] Zellouf et al. (2011) بالانتقال من الممثل المرجعي الكلاسيكي المتمثل في جريان التجويف الأحادي الحافة القائدة One-sided lid-driven (OSLD) cavity flow إلى جريان التجويف ثنائي وآخر رباعي الحافة القائدة (Double or Two/ Four Sided Lid-Driven Cavity Flow) بهدف مقارنة أمثل للظواهر، حيث درس تجويف ذو حافة علوية متحركة نحو اليمين بينما الحافة اليسرى تتحرك نحو الأسفل وذلك بنفس السرعة وأيضا حالة تحرك الجدران الأربعة، النتائج أكدت نشأة عدم استقرار الجريان وفقدانه لبنيته المتناظرة. بعدها عاد Wahba (2012) [20] لدراسة جريان التجويف الأحادي الحافة القائدة عند أعداد رينولدز مرتفعة تصل إلى  $Re=35000$ .

بالبحث في الأنساق الذروية لجريان التجويف ذو الحافة القائدة نجد مقالة [21] Saad and Bruneau (2006) التي سنعتمد عليها في هاته الدراسة، حيث تم رفع النسق إلى غاية  $Re=100.000$  وتحليل السلوك النوعي للحل المضطرب حيث تتقارب الاختبارات العددية من حلين أوليين مختلفين لنفس المرحلة التقريبية (عند ذات عدد  $Re$ )، مما يؤكد وجود جاذب غرائبي!

في السنوات الأخيرة قام [22] Azzouzet al. (2017) بدراسة بنية الجريان ثنائي الأبعاد بعدد رينولدز  $Re=50.000$  أحققها يبحث آخر [23] Azzouzet al. (2023) يصل بها إلى  $Re=70.000$ . قمنا مؤخرا [24] Sebai et al. (2023) في إطار البحث عن الأنساق الذروية لجريان التجويف ذو الحافة القائدة والمزايدة برفع عدد رينولدز ليصل إلى  $Re=100.000$ . نستكمل هنا وبشكل أعمق تحليلنا مع الأخذ بعين الاعتبار الظواهر العابرة وتأثيرات الامتداد والحدود في البعد الثالث، مع رفع عدد رينولدز أكثر ليصل إلى  $Re = 500.000$ .

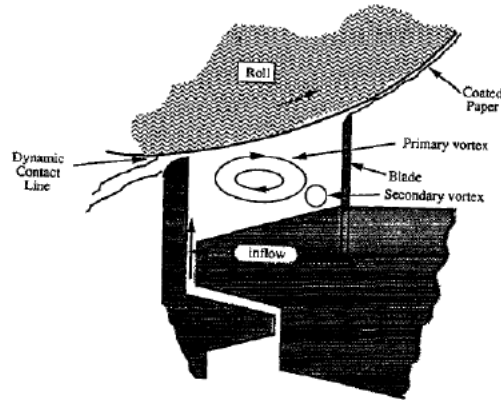
قام [25] Deggeroni (2023) بدراسة حول تحسين استقرار الجريان بالاعتماد على مخطط الشرط الحد يضمن طريقة شبكة بولتزمان Boltzmann Lattice Method (LBM) في تجويف مربع ذو حافة قائدة ثنائي الأبعاد والتركيز على الطاقة الحركية في الجريان المضطرب والذي توصل إلى حلول مستقرة بطريقة فعالة عند عدد Reynolds  $Re=100.000$  مع اعتماد شبكة كبيرة.

منذ ظهور مسألة جريان التجويف ذو الحافة القائدة (مسألة برغراف - Burggraf problem) كانت دوما طاولة اختبار (Workbench) لدقة وكفاءة مختلف الطرق العددية. مؤخرا، ومع اتجاه الأبحاث في مختلف التخصصات نحو تطبيقات الذكاء الصناعي Artificial Intelligence (AI) [التعلم العميق Deep Learning (DL)، محاكاة الشبكات العصبية المستنيرة (المسترشدة) بالميكانيكا Mechanics-Informed Neural Networks (MINNs) و النمذجة المعتمدة على البيانات (Data-Driven Modeling (DDM)] كان لمسألة برغراف نصيبها كمسألة اختبار مثالية وهذا ما نجده مثلا في مقال [26] Alhssein and Daqaq (2024)، حيث طبق مبدأ التدرج الأدنى للضغط الذي اقترحه (2023) Taha et al. [27] بينما كانت قد تمت صياغته بشكل أعم كمبدأ للحد الأدنى لتدرج الفعل (2023) Zellouf & Zellouf (2013) [28] [29] حيث أفضت نتائج [26] إلى تقليل الزمن اللازم للمحاكاة بنسبة 12% عند كل دورة.

## 2.1. بعض تطبيقات مسألة جريان التجويف ذو الحافة القائمة:

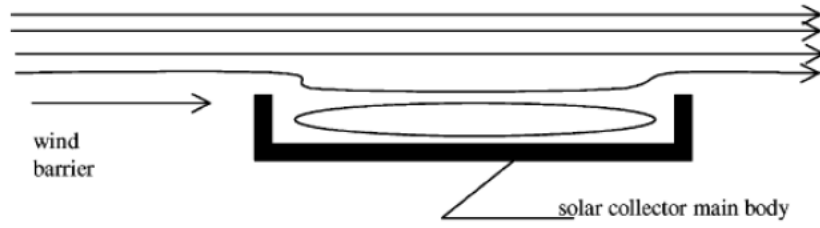


الشكل 1-06: خليج أم رشراش "إيلات" /العقبة نموذج لجران التجويف ذو الحافة القائمة [26]

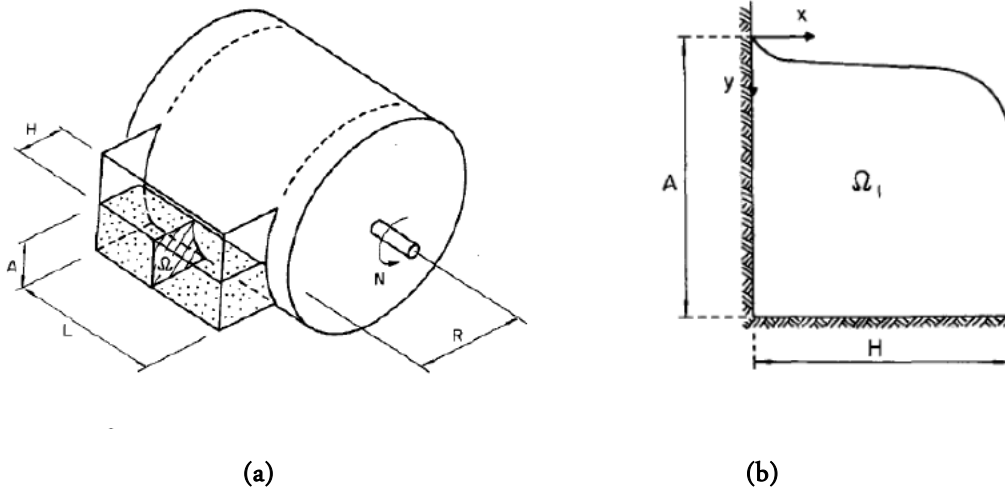


الشكل 1-07: عملية طلاء (تغطية) قصيرة المدى [2]

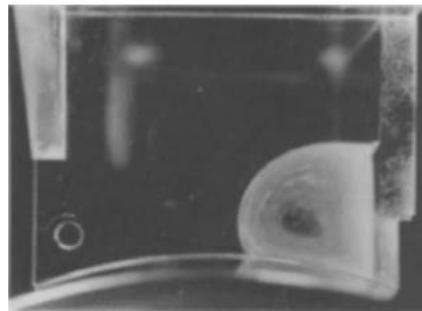




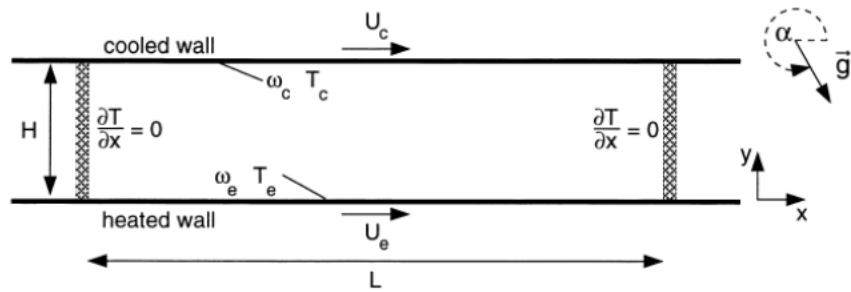
الشكل 1-08: جريان فوق لاقط شمسي مع حاجز الرياح [31]



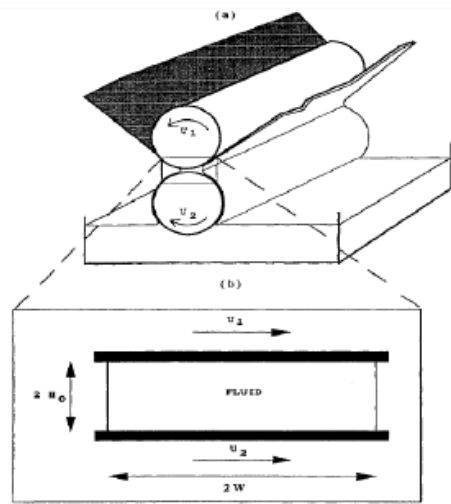
الشكل 1-09: الجريان في حوض مفتوح: (a) عملية المعالجة و (b) المجال الفيزيائي للجريان [32]



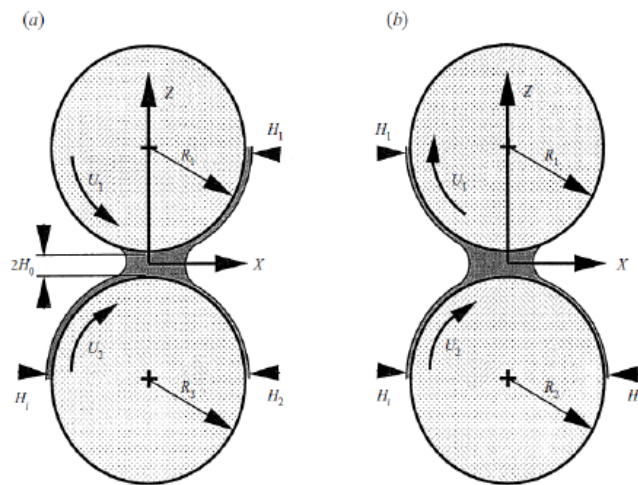
الشكل 1-10: هيكل الجريان النموذجي (التجريبي)، توجد الأسطوانة السوارة في الأسفل [32]



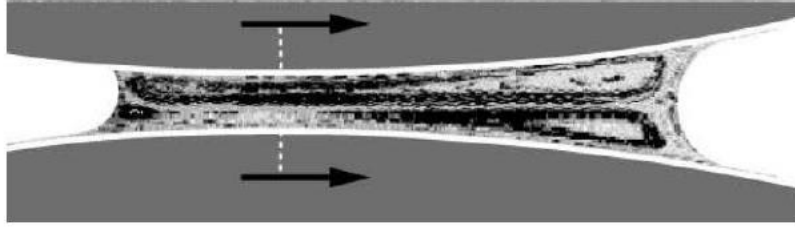
الشكل 11-1: تجويف ثنائي الحافة القائمة لآلة تجفيف [33]



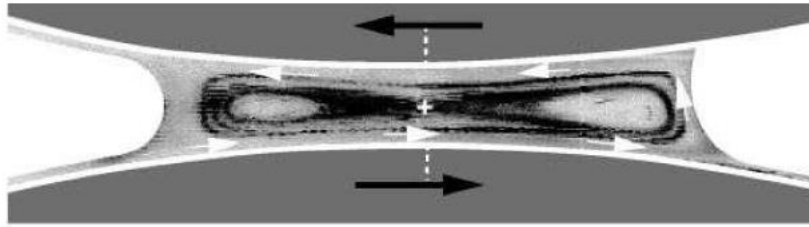
الشكل 12-1: تغطية (طلاء) التدرج المنصلي (a) الوضعية الفيزيائية (b) المجال المثالي (المبسط) [34]



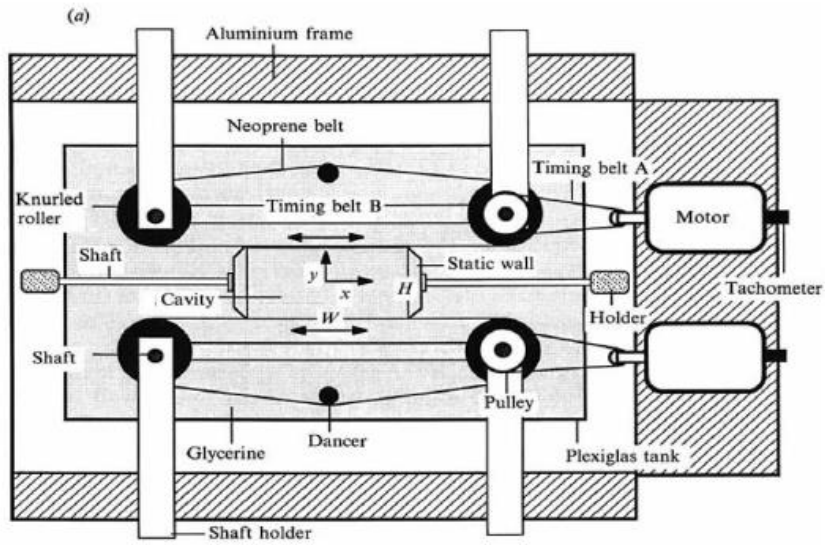
الشكل 13-1: نوع الغطاء (a) متوازي، (b) ضد متوازي [35]



الشكل 14-1: عرض للحل التجريبي للجريان المتوازي بسرعة موحدة [35]



الشكل 15-1: عرض للحل التجريبي للجريان ضد المتوازي بسرعة موحدة [35]



الشكل 16-1: رسم تخطيطي لآلة الخلط، منظر علوي [36]



Ⓐ - Le concept générique.



Ⓑ - Le TER 2N NG.



Ⓒ - Le X40.

الشكل 1-17: صور لمجموعة من قطارات CORADIA DUPLEX [37]

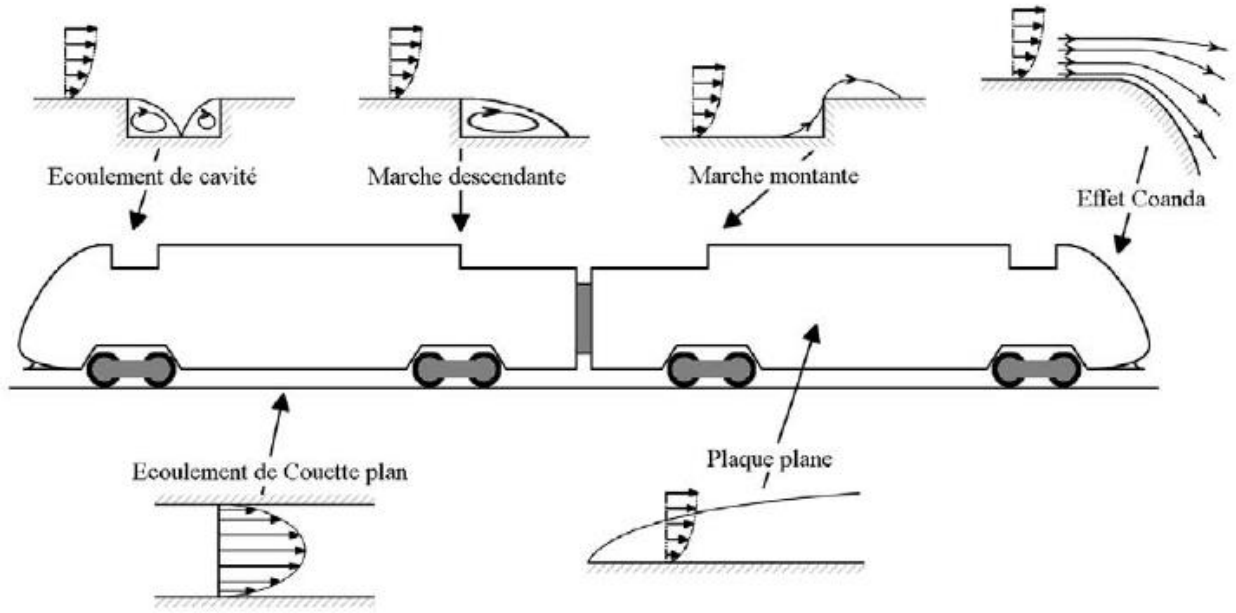


Ⓐ - Voiture Z1

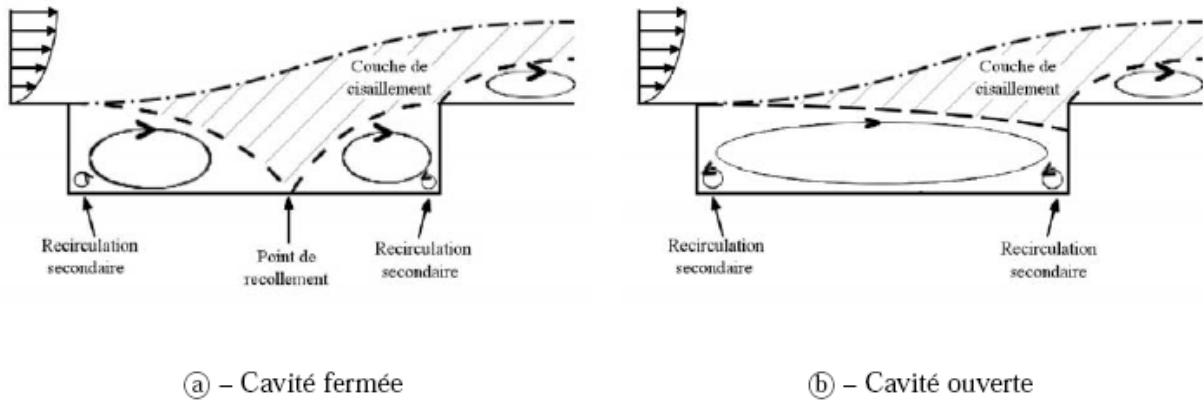


Ⓑ - Voiture Z5

الشكل 1-18: رسم تخطيطي لترتيب المعدات على CORADIA TER 2N NG [37].



الشكل 1-19: مخطط التحلل إلى مختلف الهياكل (البنى) الدوامية للجريان حول عربات القطار [37]



(a) – Cavité fermée

(b) – Cavité ouverte

الشكل 1-20: رسم تخطيطي لجريان التجويف (a) تجويف مغلق، (b) تجويف مفتوح [37]

الفصل الثاني:

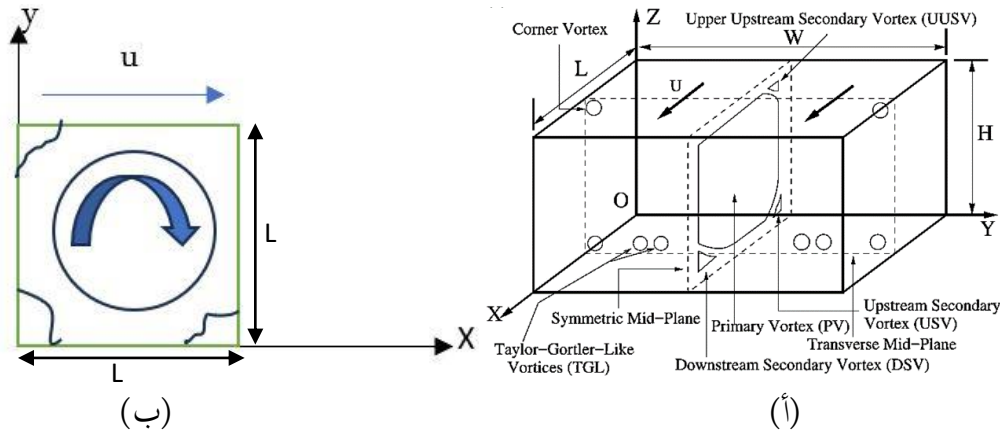
الصياغة الرياضية و المحاكاة العددية  
للمسألة

## 1.2. الصياغة الرياضية:

يمثل الشكل (01-2) رسم تخطيطي لجريان التجويف ذو الحافة القائدة. حركة المائع داخل التجويف تنشأ من سرعة ثابتة للغطاء العلوي، حيث يمكن محاكاة المسألة اعتماداً على معادلة الاستمرارية ومعادلة حفظ كمية الحركة (معادلة نافيه-ستوكس/Navier-Stokes equation) التي تعبر عن جريان غير قابل للانضغاط والتي تكتب كالاتي [01]:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U = -\nabla P + \frac{1}{Re} \nabla^2 U \\ \nabla \cdot U = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

حيث:  $\nabla$  يمثل مؤثر التدرج (التباعد  $\cdot \nabla$ )،  $U$  شعاع السرعة  $Re = \frac{\rho u L}{\mu}$  عدد أرنالط (Reynolds)،  $\rho$  كثافة المائع،  $P$  الضغط و  $\mu$  اللزوجة الديناميكية.



الشكل 01-2: رسم تخطيطي لنموذج تجويف (أ) ثلاثي الأبعاد و (ب) ثنائي الأبعاد [20، 38].

جدول 01-2: الشروط الحدية

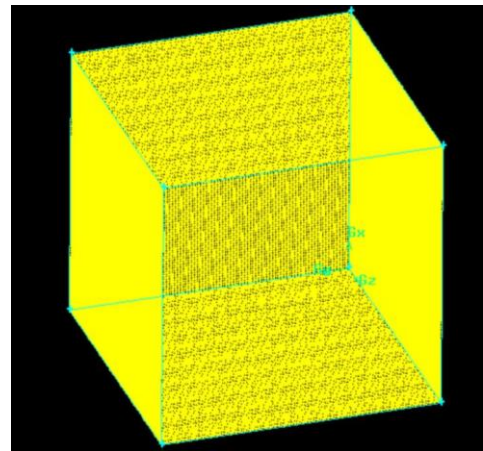
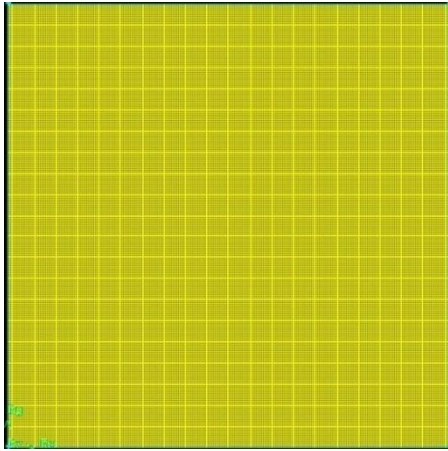
هندسة النظام	الشروط الحدية
2D	$0 \leq X \leq L; Y = L; U = 1; V = 0$ $U = 0; V = 0$ بقية الجدران تكون في حالة سكون
3D	$0 \leq X \leq L; Y = L; 0 \leq Z \leq L$ $U = 1; V = 0; W = 0$ $U = 0; V = 0; W = 0$ بقية الجدران تكون في حالة سكون

## 2.2. المحاكاة العددية:

توجد عدة طرق عددية لحل مسألة جريان التجويف ذو الحافة القائدة والتي نذكر منها: طريقة الفروق المنتهية، طريقة العناصر المنتهية، التحليل متعدد الشبكات طرق التحليل الطيفي وطريقة الحجوم المنتهية، .. إلخ. في دراستنا سنعتمد هذه الأخيرة في محاكاة الرقمية (العددية) للمسألة، سنقوم بتحليل تأثيرات عدد Reynolds الذي يمثل النسبة بين قوى العطالة وقوى اللزوجة في النسق الذروي حيث تكون قيمته 100.000 و 500.000 ونلاحظ التغيرات التي تطرأ على بنية الجريان والدوامات الناشئة وشكل خطوط دالة التيار بعد مدة زمنية وهذا داخل التجويف المربع الثنائي الأبعاد وآخر مكعب ثلاثي الأبعاد (الشكل 2-02)، حيث قمنا بتوليد الشبكة وتوليد النموذج الهندسي باستخدام برنامج Gambit2.4 الذي يوفر أدوات لمذجة هندسيات مختلفة بالشبكات منتظمة والغير المنتظمة والذي يعتبر من البرامج المرتبطة ببرنامج FLUENT المستعمل في المحاكاة الرقمية (العددية).

جدول 2-01: أبعاد وأحجام شبكات التقطيع

عدد أرناط	حجم الشبكة	حجم التجويف	الهندسة
Re=100000	100X100		
Re=200000	250X250	1X1	2D
	500X500		
Re=10000	100X100X100	1X1X1	3D



الشكل 2-02: صور للشبكة المستخدمة في الحساب 250x250 للحالة 2D و 100x100x100 للحالة 3D.



## الفصل الثالث:

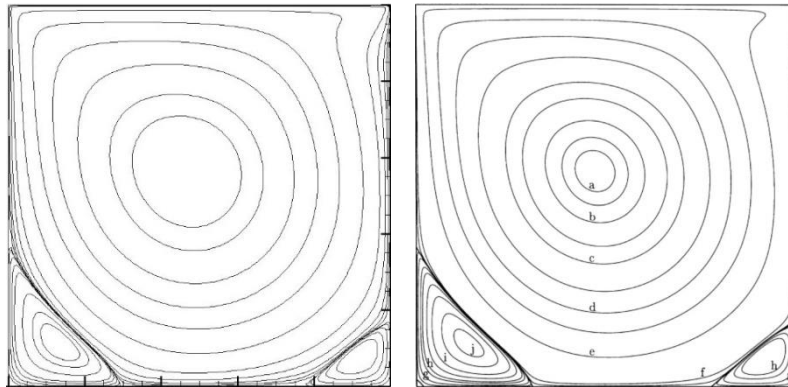
### مناقشة النتائج

### 1.3. الجريان داخل تجويف ثنائي الأبعاد:

تم التعامل مع جريان التجويف ثنائي الأبعاد المربع ذو الحافة القائدة مع شبكات (تقطيع) مختلفة الحجم في عدد لا يحصى من الأوراق البحثية، التي تستخدم مجموعة متنوعة من الطرق و الأساليب (مثل: الفروق، الهجوم والعناصر المنتهية، و طرق التحليل الطيفية، .. إلخ)، هذه الأخيرة أعطت نتائج عالية الدقة للحالة المستقرة (الثابتة/الدائمة) "المعيارية" عند  $Re = 1000$  [17] (Botella & Peyret 1998) و أيضا [14] Ghia et al(1982) التي سنقارنها بالنتائج المتحصل عليها لحلول دقيقة لأعداد رينولدز أعلى.

للمساهمة في دقة تحسين النتائج النهائية قمنا باستخدام الشبكات المتدرجة. استخدام دقة أعلى بالقرب من الحدود له تأثير كبير على الدقة، ليس فقط محليا بالقرب من الحدود (كما هو متوقع) ، ولكن أيضا بشكل مفاجئ في منطقة الجريان الرئيسية. وذلك لأن الدوامية تتولد عند الحد العلوي (بواسطة الغطاء المتحرك) ومن هناك يتم نقلها ونشرها إلى بقية التجويف. وبالتالي فإن النمذجة الأكثر دقة لهذه العملية من المفترض أن تؤدي إلى تنبؤ أفضل بالدوامات في كل مكان في مجال الجريان. تضمن دقة الشبكة العالية بالقرب من الزوايا أيضا التقاط أي دوامات زاوية صغيرة قد تؤثر على الجريان الرئيسي.

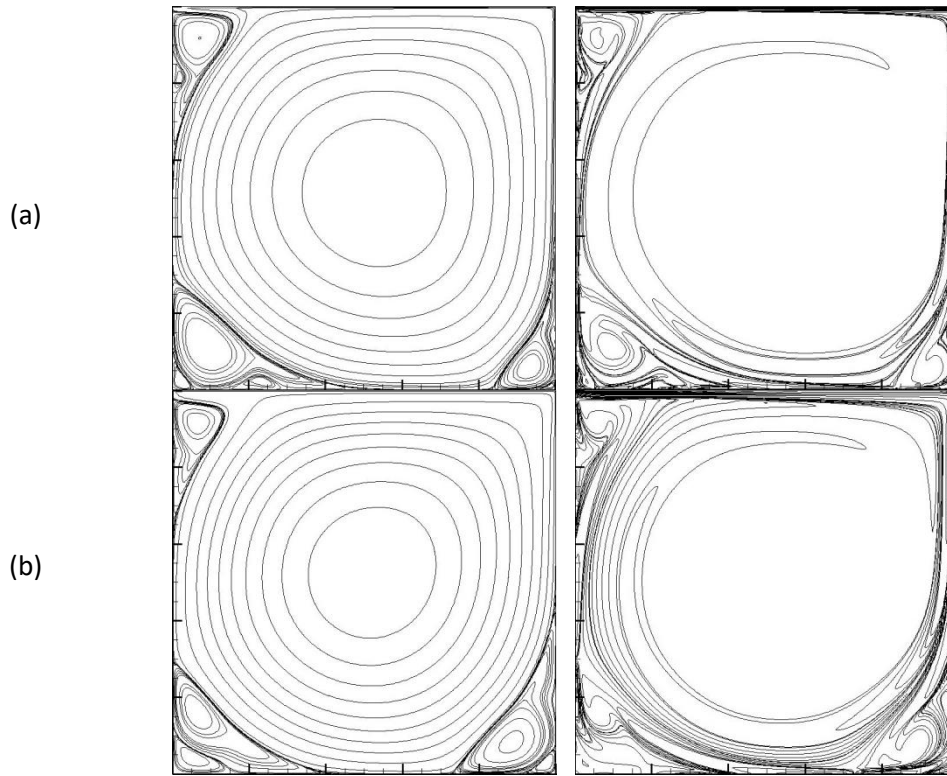
بالنسبة لتحديد طبيعة الجريان، يتم عرض حلول الحالة المستقرة (الثابتة/الدائمة) ثنائية الأبعاد، أي حلول معادلات Navier-Stokes مع تعيين المشتق الزمني على الصفر. بشكل عام، القدرة على حساب حل الحالة المستقرة لمسألة ما لا يعني بالضرورة أن هذا الحل مستقر (اضطرابات محدودة)، حيث يمكن تحقيقه في تجربة فيزيائية في الواقع. مع تزايد القدرة الحسابية باطراد، أصبحنا قادرين على حساب حلول الحالة المستقرة لهذه المسألة من أجل أعداد  $Re$  أعلى من ذي قبل، في الوقت نفسه، هناك العديد من الدراسات التي تشير إلى أن هذا الجريان يفقد استقراره عند حوالي  $Re = 8000$ ، لأنه كما تبين، فإن الجريان الفيزيائي الحقيقي لن يكون ثنائي الأبعاد حتى عند مستوى أدنى. لذا فإن معظم الدراسات السابقة المتعلقة بهذه المسألة المعيارية تتعامل مع جريان وهمي، وهو ما يمثل أمرا مفيدا لتقييم حلول معادلة Navier-Stokes.



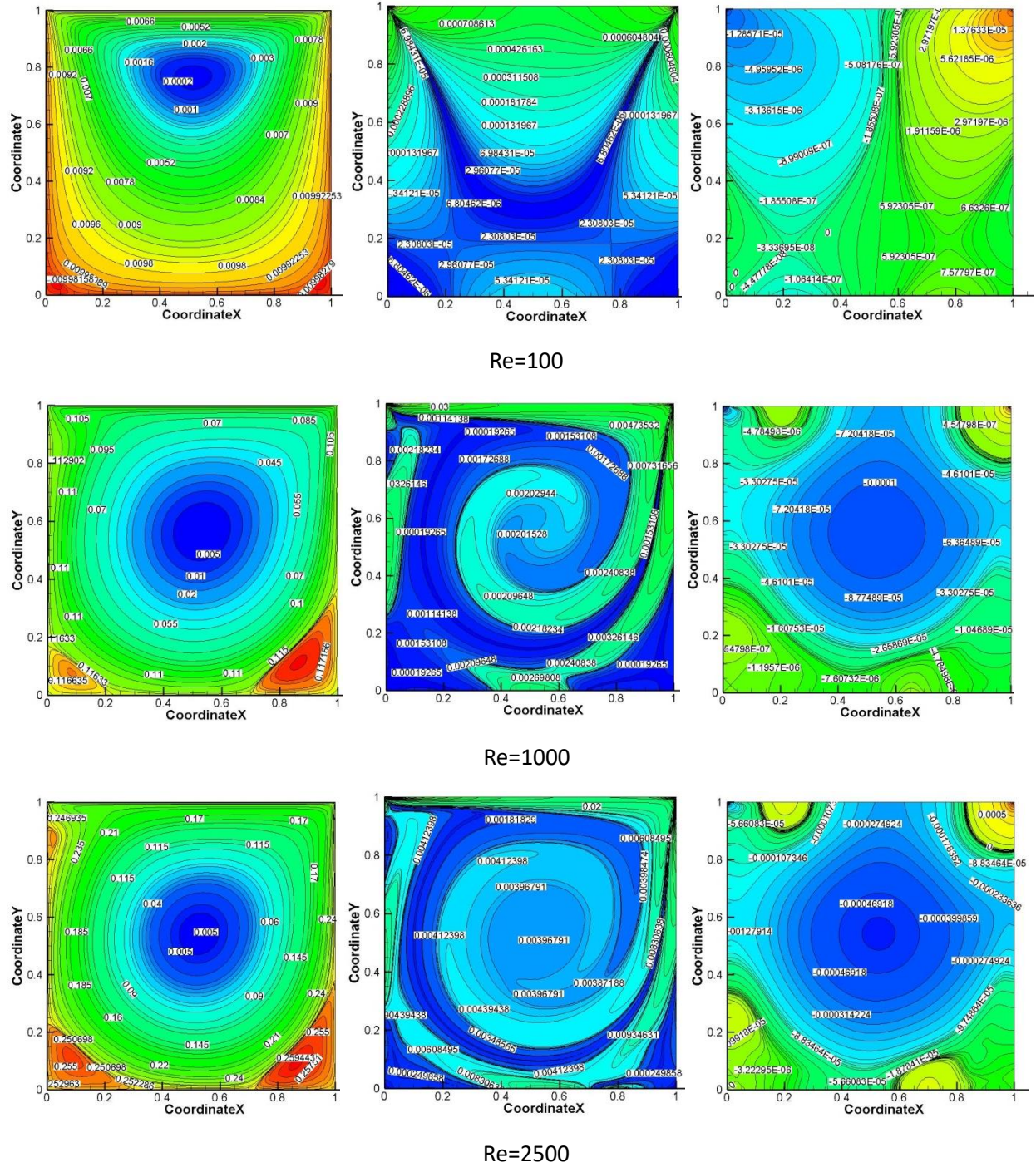
الشكل 3. 01: دالة التيار في شبكة 128x128 من المرجع Botella and Peyret و الدراسة الحالية شبكة 141x141 لعدد  $Re=1000$

يمثل الشكل (3-01) خطوط دالة التيار حيث تحصلنا على نفس التوزيع مع Botella & Peyret عند  $Re=1000$  رغم التغيير الطفيف في حجم الشبكة يتمثل الجريان في دوامة أساسية و دوامتين ثانويتين يقبعان أسفل التجويف. بالنسبة لـ  $Re > 1000$  نجد عديد الأعمال التي تؤكد نتائج Botella & Peyret، وهذا عكس أعداد لـ  $Re < 1000$  حيث ينمو التناقض بين الدراسات المختلفة. ويرجع ذلك جزئياً إلى حقيقة أن تعقيد مجال الجريان الناتج أعلى، وبالتالي يستغرق حلها بدقة عالية وقتاً متزايداً. كما يصبح من الصعب بشكل متزايد الحصول على حل ثابت على الإطلاق. لا يعتقد البعض حتى أنه يجب أن يكون من الممكن الحصول على حلول ثابتة  $Re < 7500-8000$  للمعادلات المعتمدة على الزمن. قد يكون السبب الآخر هو أن بعض التقنيات الأكثر تخصصاً التي يتم تطبيقها بشكل متكرر على هذه المسألة القياسية لا تعمل بشكل جيد (أقل استقراراً) لـ  $Re$  الأعلى. إلى جانب ذلك، فإن المسألة نفسها هي "إشكالية"، من حيث أنها تتميز بسرعة متقطعة غير واقعية فيزيائياً حيث يلتقي الغطاء بالجدران. لا تساعد هذه الميزة في التقارب ولا الجهود المبذولة للحصول على حلول دقيقة. أخيراً كما لاحظ Botella & Peyret "جزء كبير من الحسابات المتعلقة بالجريان ذو حافة القائدة بالتحقق من صحة طريقة جديدة، ولا تتظاهر بالضرورة بأنها الأكثر دقة أو شمولاً".

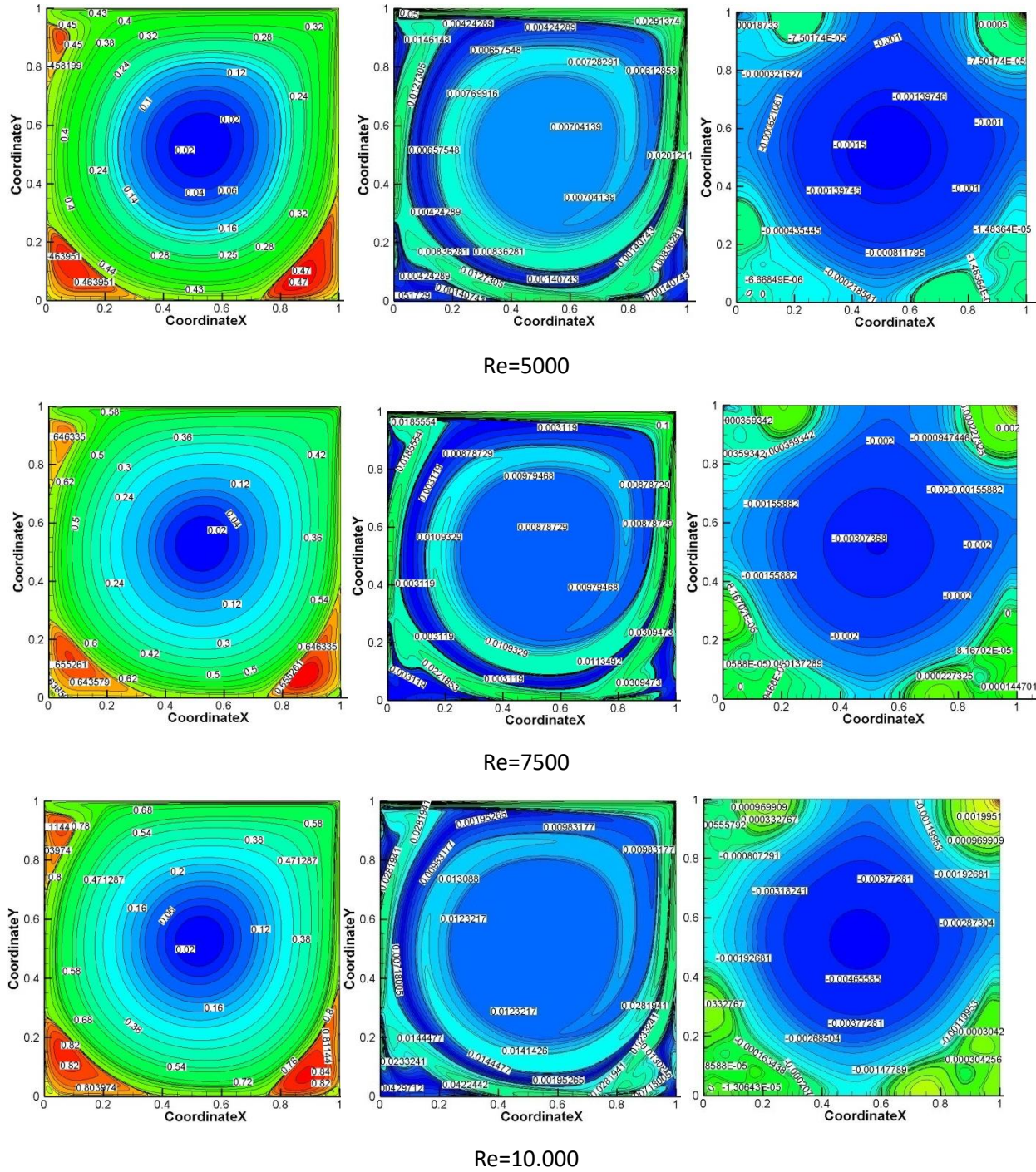
تم تقديم نتائج مفصلة للحلول الثابتة (المستقرة) لأعداد رينولدز مختلفة يظهر الشكل أنماط انسيابية نموذجية للتجويف ثنائي الأبعاد ذو الحافة القائدة لاستخدامها كمرجع كلما تم اختبار طريقة جديدة لحل معادلات N-S. لأعداد رينولدز تزداد تدريجياً: (.. → /500.000/200.000/100.000/50.000/30.000/25.000/10.000/7.500/5.000/2.500/1.000/100).



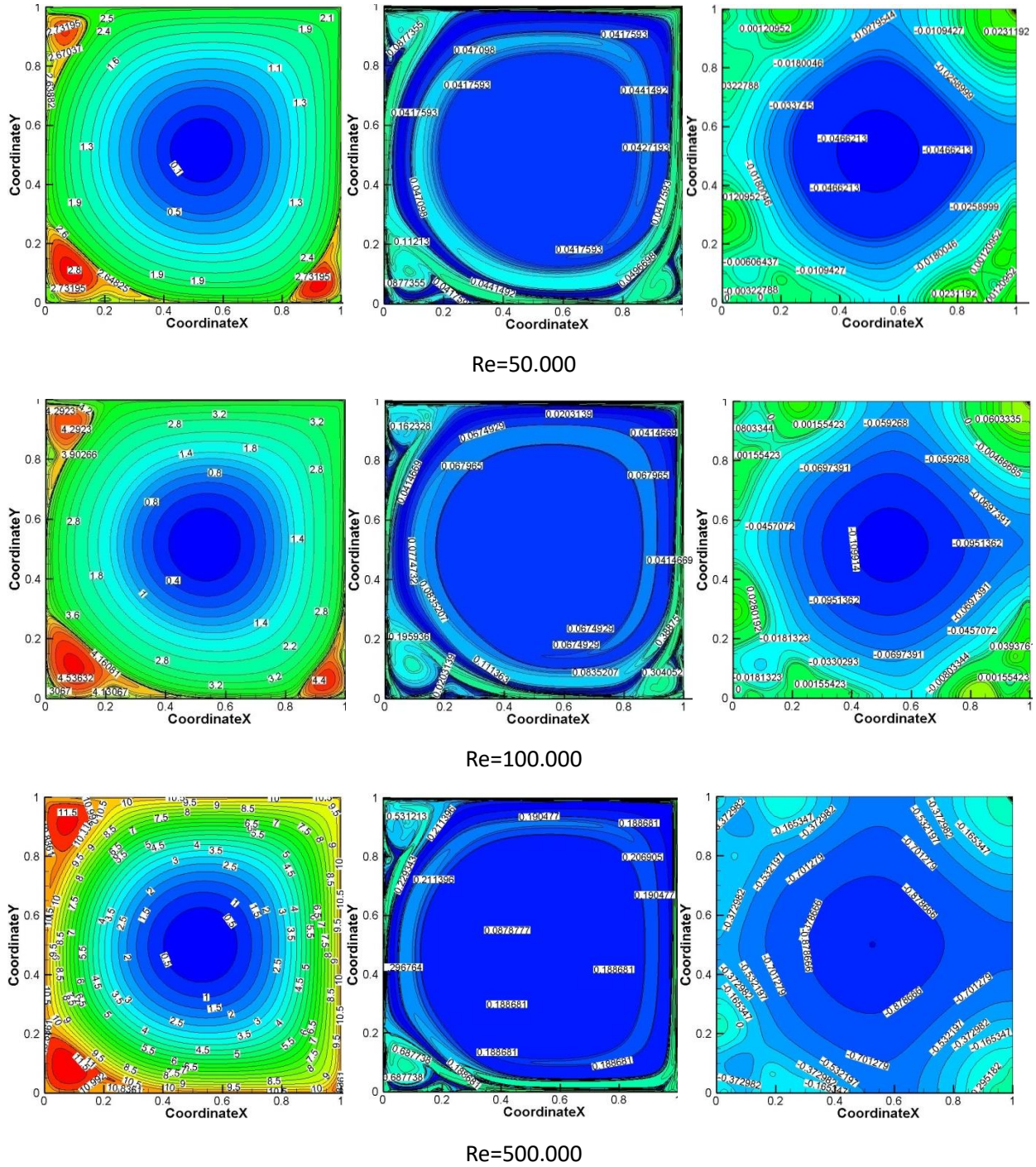
الشكل 02.3: خطوط دالة التيار والدوامية من اليسار إلى اليمين عند (a)  $Re=100000$  ( $t=30650$ ) و (b)  $Re=200000$  ( $t=30650$ ) لشبكة  $250 \times 250$



الشكل 03.3: خطوط دالة التيار والدوامة والضغط من اليسار إلى اليمين عند أعداد رينولدز (100/1000/2500) باستعمال الشبكة 250x250



الشكل 04.3: خطوط دالة التيار والدوامة والضغط من اليسار إلى اليمين عند أعداد رينولتز (10,000/7500/5000) باستخدام الشبكة 250x250



الشكل 05.3: خطوط دالة التيار والدوامة والضغط من اليسار إلى اليمين عند أعداد رينولدز (500.000/100.000/50.000) باستعمال الشبكة 250x250

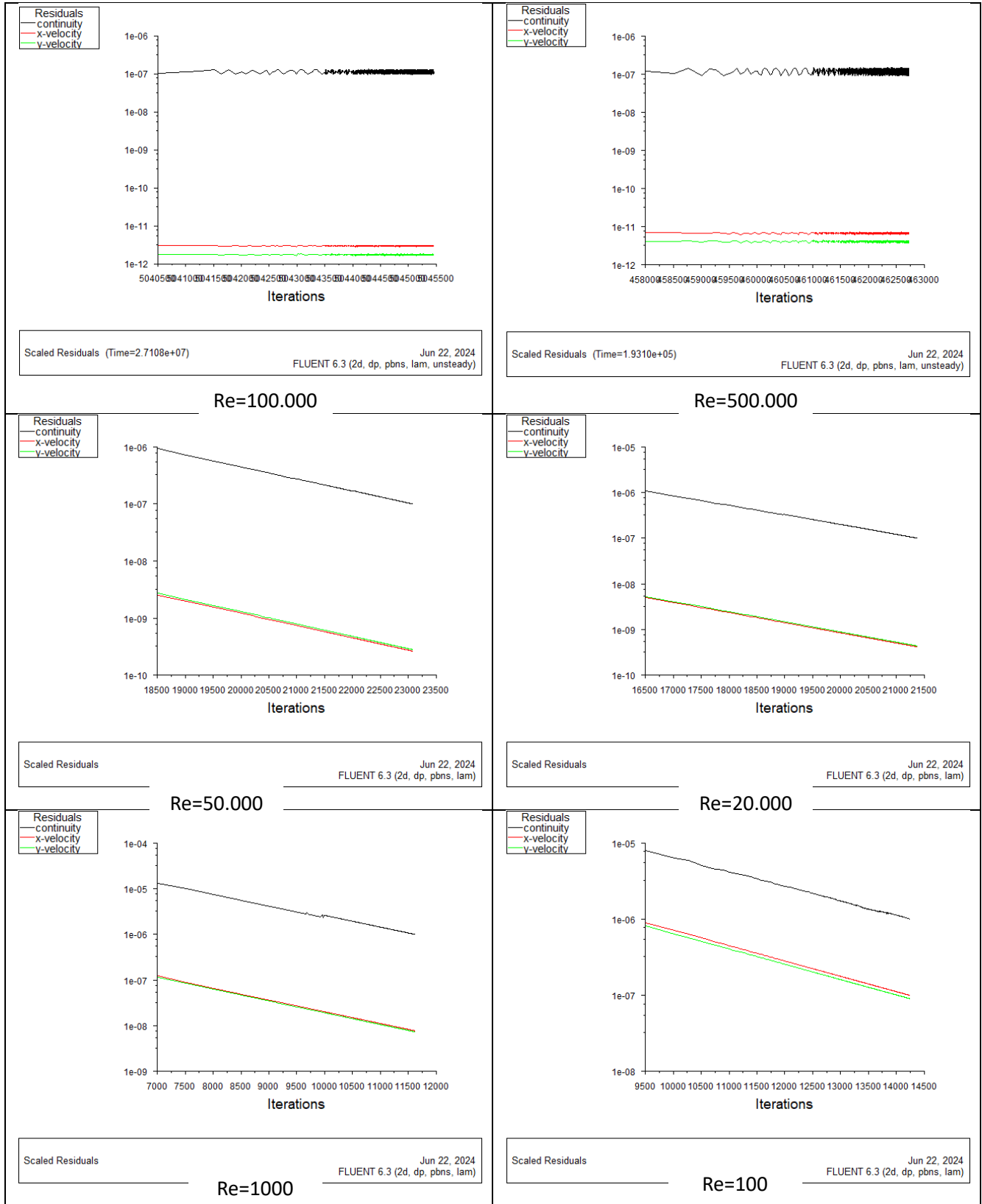
يمثل الشكل تغيرات دالة التيار في التجويف عند أعداد رينولدز متصاعدة حيث كانت بنية الجريان المستقر شبه متناظرة عند عدد رينولدز  $Re=100$ ، هيمنة الدوامة الرئيسية على التجويف و دوامتين صغيرتين في الزاويتين السفليتين اليمنى و اليسرى هاته الأخيرة تكون الأصغر حجما حيث توافقت خطوط دالة التيار مع نتائج عمل (Ghia et al (1982) حتى عدد رينولدز  $Re=10.000$ .

عند عدد رينولدز  $Re=2500$  نسجل بداية ظهور دوامة صغيرة في أعلى اليسار والتي تستمر بالتطور تدريجيا حتى ظهور دوامة أخرى في الزاوية السفلية اليمنى في التجويف التي يزداد حجمها ويتزامن هذا مع تناقص الدوامة الأساسية وتوجهها نحو الزاوية العلوية اليمنى.

يتزايد عدد الدوامات الثانوية ويتغير حجمها وموضعها مع زيادة عدد رينولدز حتى تبلغ ثمانية دوامات عند  $Re=30.000$  تستمر بنية الجريان بالتغير حيث تختفي بعض الدوامات الثانوية عند قيمة عدد رينولدز  $Re=100.000$ .

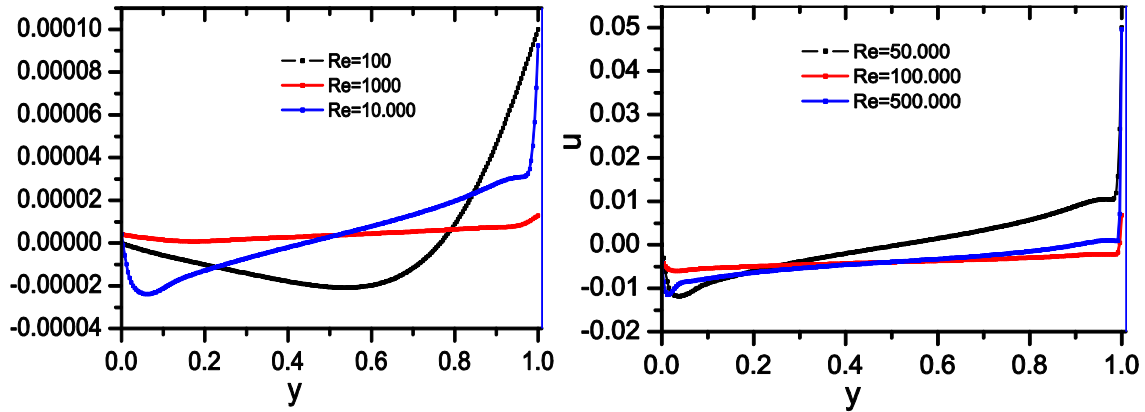
تشير الكثير من الدراسات إلى أنه بعد بعض أعداد رينولدز المعتدلة ، يصبح جريان تجويف 2-D المعني غير مستقر. يتفق معظمهم على بداية عدم الاستقرار حول  $Re = 8000$  (Shankar & Deshpande) يمكن تفسير اختلاف هاته القيمة بدقة الطريقة الحسابية وحجم الشبكة المعتمدين.

برغم ذلك، عند ملاحظة الشكل (3-03) نسجل إختفاء الدوامة الثانوية في الركن الأيمن السفلي للتجويف عند رفع نسق الجريان إلى  $Re=500.000$ ، ما يذكرنا بماورد في أعمال كل من [07] Greenspan (1969) (الشكل 1-02) و [09] Krishna and Nallasamy (1977)، (الشكل 1-04)، عند أعداد رينولدز (أرناط):  $Re = 30.000$  و  $Re = 100.000$  على التوالي!

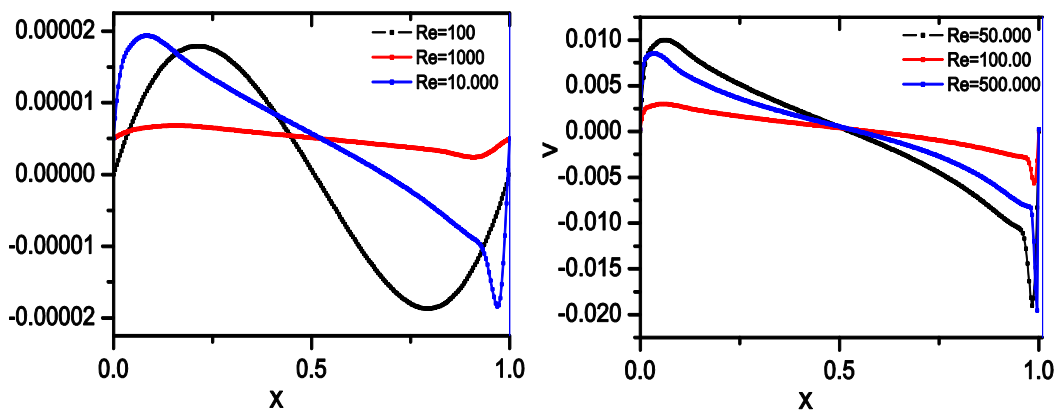


الشكل 06.3: منحنيات تقارب الحلول Convergence history

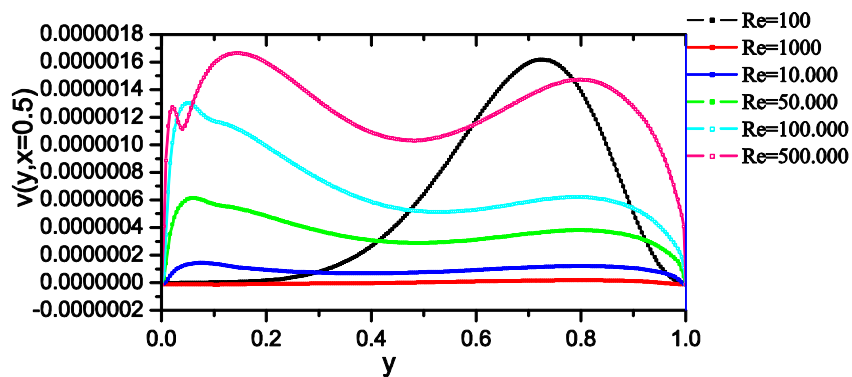




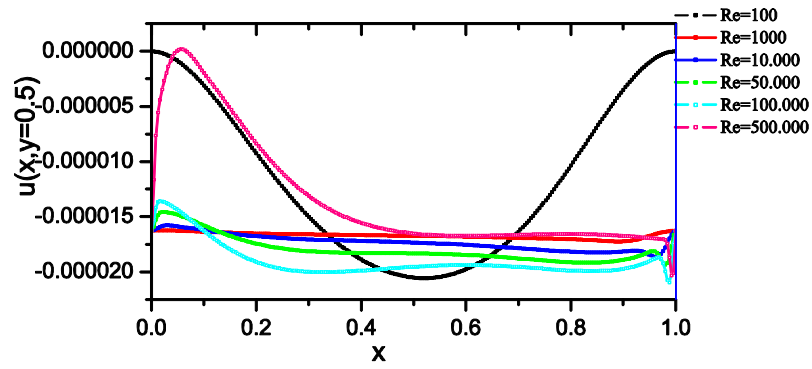
الشكل 07.3: منحنيات السرعة الأفقية (Profiles u-velocity at  $x=0.5$ )



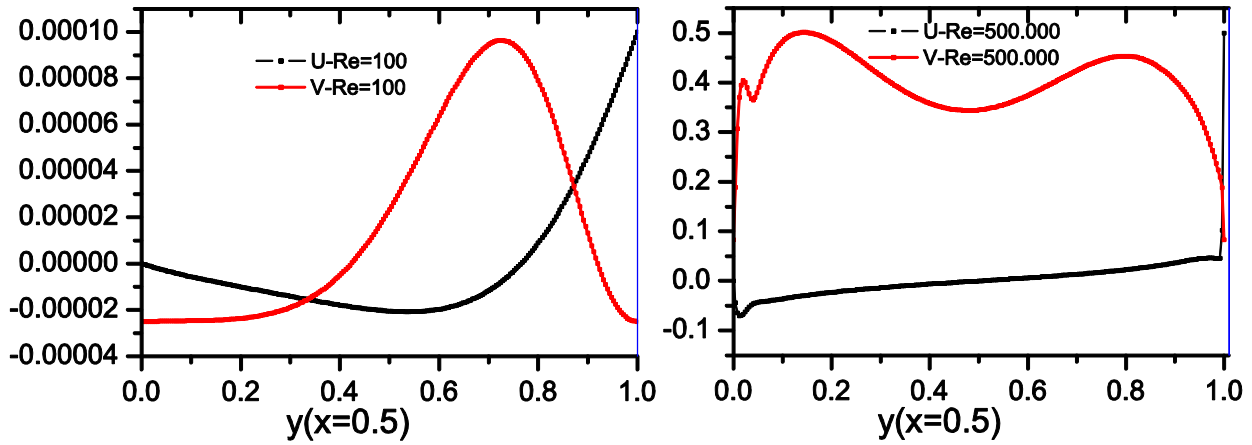
الشكل 08.3: منحنيات السرعة العمودية (Profiles v-velocity at  $y=0.5$ )



الشكل 09.3: منحنيات السرعة العمودية (Profiles V-velocity at  $X=0.5$ )



الشكل 10.3: منحنيات السرعة الأفقية (Profiles U-velocity at Y=0.5)



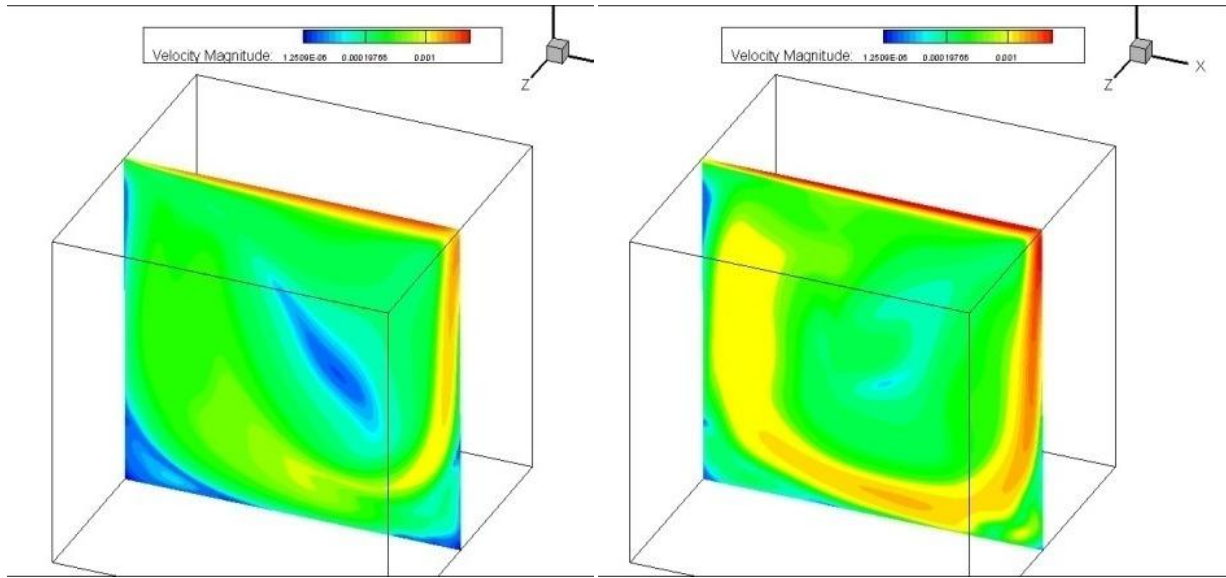
الشكل 11.3: مقارنة بين منحنيات السرعة (Profiles of velocity) الأفقية والعمودية في نفس المعلم

### 2.3. الجريان داخل تجويف ثلاثي الأبعاد:

لمواصلة التحقيق في خصائص الدوامة ضمن التجويف ذو الحافة القائدة (LDC)، تم إجراء محاكاة جريان ثلاثية الأبعاد بأحجام شبكية  $100 \times 100 \times 100$  تكشف نتائج المحاكاة، كما هو موضح في الشكل X والشكل Y، عن وجود الدوامة الأساسية (PV)، الدوامة الثانوية المنحدرة (DSV)، والدوامة الصاعدة (USV) عند المستوى الأوسط المتماثل  $(W/2)$ .

عند  $Re = 5000$  حتى  $Re = 10,000$ ، تظهر دوامة إضافية تُعرف بالدوامة الثانوية الصاعدة العلوية (UUSV). وهذا يتماشى مع LDC ثنائي الأبعاد، حيث تصبح UUSV مرئية عند  $Re = 10,000$ . في الشكل 8، عند  $Re = 1000$ ، تكون متوسط السرعة أعلى مقارنة

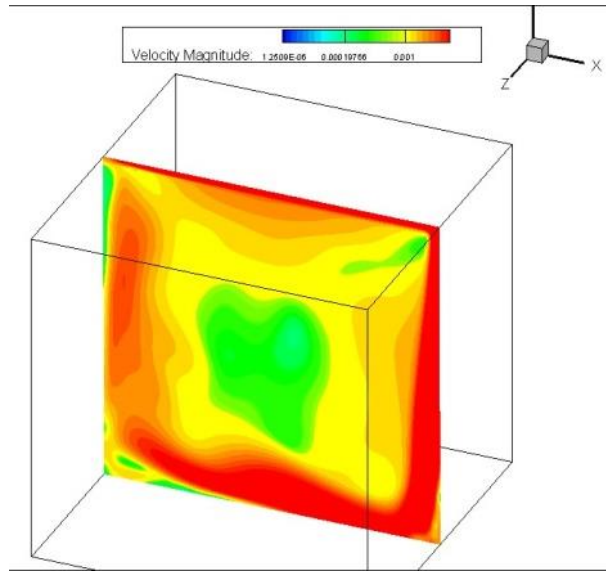
بـ  $Re = 10,000$  و  $100,000$ . كلما زاد عدد رينولدز، يصبح الجريان أكثر اضطرابًا وفوضوية. يعزز الاضطراب من خلط وانتشار جزيئات الموائع، مما ينتج عنه طبقة حدودية أرق وأكثر وضوحًا.



Re=5000 t=67000s

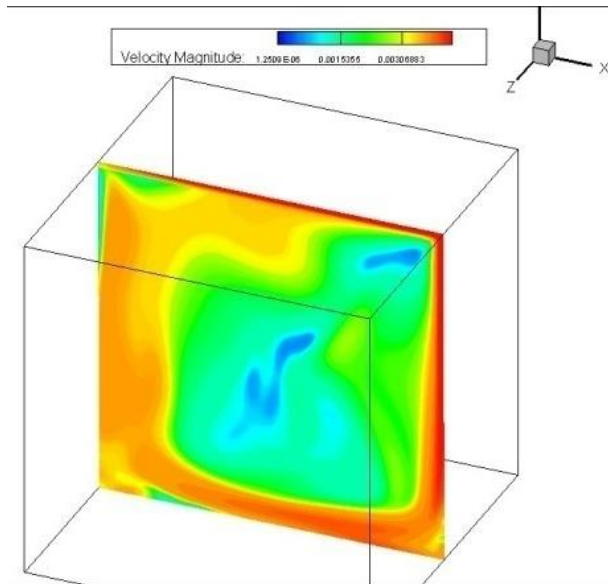
Re=10000 t=43000s

الشكل 12.3: منحنيات السرعة في مستوى التناظر المتوسط للتجويف المكعب عند مختلف أعداد رينولدز (10000/5000)

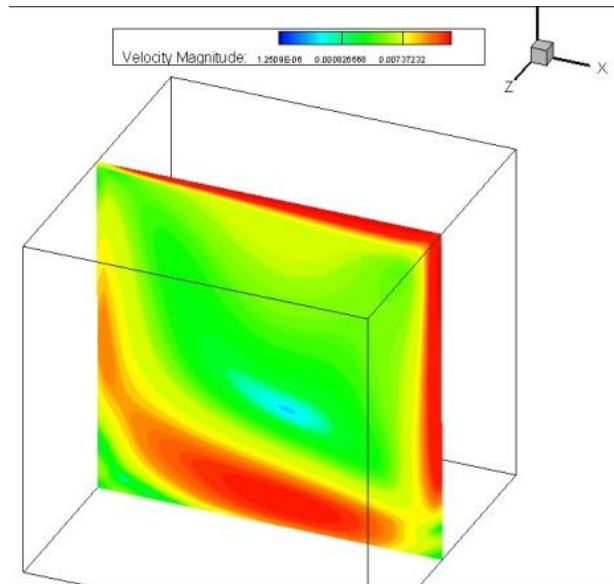


Re=50000 t=42000s

الشكل 13.3: منحنيات السرعة في مستوى التناظر المتوسط للتجويف المكعب عند مختلف أعداد رينولدز



Re=100000 t=10000s



Re=100000 t=21000s

الشكل 14.3: منحنيات السرعة في مستوى التناظر المتوسط للتجويف المكعب عند مختلف أعداد رينولدز

تسمح البنية ثلاثية الأبعاد التي تعتبر أكثر واقعية بدراسة ظواهر أكثر تعقيدا لا تظهر في البنى ثنائية الأبعاد خاصة ظاهرة الخلط حيث تظهر منحنيات السرعة الانتقال من الاستقرار الخطي عند أعداد رينولدز المنخفضة إلى الفوضى والاضطراب عند أعداد رينولدز مرتفعة والتي يتم عندها كسر تناظر بنية الجريان وزيادة حركية المائع مما يحفز ظاهرة الخلط أكثر .

رغم هذا لا يمكن استخلاص استنتاجات محددة حول الحلول المعيارية. في الواقع، بسبب الطبيعة المعقدة لسلوكيات الزمكان التي تؤثر على طبيعة وبنية الجريان في البعد الثالث.

المخلاصة

## الخلاصة

العمل المقدم في المذكرة عبارة عن دراسة رقمية لجران التجويف الثنائي والثلاثي الأبعاد ذو الحافة القائدة للمائع نيوتوني في هندسة بسيطة (مربع/مكعب) حيث الجدار العلوي يتحرك بسرعة مماسية ثابتة مع بقاء جميع الجدران ساكنة. يمكن تلخيص النتائج المحصل عليها كما يلي:

لدراسة خاصية الجريان الرئيسية لهذه المسألة يمكن اعتماد حجم وإحداثيات الدوامة الأولية التي تتشكل في مركز التجويف وتمييز على مجال الجريان. عند أعداد رينولدز المنخفضة يحافظ الجريان على بنيته شبه المتناظرة. تتأثر بنية الجريان بشكل مباشر بعدد رينولدز (المرتبط خصوصا بسرعة الجدار، طبيعة المائع) حيث يؤدي الرفع المتزايد لعدد رينولدز إلى تطور الدوامات و ظهور الدوامات الثانوية، حيث عند أعداد رينولدز صغيرة نسبيا  $Re=100$  يكون الجريان مستقرًا بتمركز الدوامة الأساسية و دوامتين ثانويتين في الحافتين السفليتين اليمنى واليسرى. تتناقص الدوامة الأساسية مع الرفع المتزايد لعدد رينولدز وتظهر دوامة ثانوية ثالثة في الحافة العلوية اليسرى عند عدد  $Re=2500$ .

كلما كان عدد رينولدز صغيرا يكون سمك الطبقة الحدية معتبرا و بالتالي تهيمن لزوجة المائع على نسق الجريان، أما في أعداد رينولدز المرتفعة يقل سمك الطبقة الحدية و يفقد الجريان بنيته شبه المتناظرة. في دراسة حالة الجريانات المتعلقة بالزمن يمكن ملاحظة أهم التغيرات خصوصا الدوامات التي تظهر ثم تختفي مع مرور الزمن عكس دراسة الجريانات الغير متعلقة بالزمن والتي تعطي الحالة النهائية فقط.

كلما زاد حجم الشبكة المستعملة في الحساب كلما زادت الدقة والكفاءة حيث يزداد عدد البيانات الملتقطة خصوصا بجوار الجدار المتحرك ويتعلق ذلك بالخصائص التقنية للأجهزة المستعملة (خصائص الحاسوب: قدرة التخزين، الذاكرة الديناميكية والإمكانيات الرسومية، .. إلخ).

كلما زاد عدد رينولدز (زيادة سرعة الجدار أو تقليل اللزوجة، رغم ما يشوب استخدام المعيار الأخير من تحفظات حول مدى فيزيائية الجريان) يزداد معها حركية المائع و يزداد تأثير الدوامات الثانوية على نمط الجريان.

يمكن إهمال تأثير البعد الثالث على بنية الجريان عند أعداد  $Re$  صغيرة لأن النتائج أظهرت عدم تغير منحنيات السرعة نسبيا في المستوي  $x,y$  علو طول المحور  $Z$ . كما يؤدي وجود نهاية الجدران إلى قمع حركة الدوران الرئيسية في المناطق المجاورة لها وينشأ مكون السرعة  $w$  في الاتجاه الممتد ( $Z$ ) الذي تضعف قوته نحو الجزء الأكبر.

تعد تفردات الجريان في زوايا التجويف سواء كان ثنائي ( $2D$ ) أو ثلاثي ( $3D$ ) الأبعاد (في المقام الأول الأركان العلوية حيث تتغير السرعة بشكل متقطع من الوجود على مستوى الغطاء إلى الانعدام على مستوى الجدران) مسألة أخرى تؤثر على كل من دقة وسلوك تقارب (وانتظام) الحل.

## قائمة المراجع:

- [01] H. C.Kuhlmann, & F. Romanò (2019). The lid-driven cavity In Computational Modelling of Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics, 233-309.
- [02] P. N. Shankar, M. D. Deshpande ( 2000).Fluid mechanics in the driven cavity. Fluid Mech,32, 93–136.
- [03] M. Kawaguti (1961) .Numerical solution of the Navier-Stokes equations for the flow in a two-dimensional cavity,16, 2307–2315.
- [04] O. R. Burggraf (1966). Analytical and numerical studies of the structure of steady Separated.Journal of Fluid Mechanics, 24, 113–151
- [05] G. K Batchelor (1956). On steady laminar flow with closed streamlines at large Reynolds number. J. Fluid Mech. 1,177–190.
- [06] L. Prandtl (1905). Uber FlussigkeitsbewegungbeisehrkleinerReibung. in Verhandlungen des III. InternationalenMathematiker-Kongresses, Heidelberg, Teubner, Leipzig. Reprint 484–491.
- [07] D. Greenspan (1969). Numerical studies of prototype cavity flow problems. The Computer Journal, 12(1), 88-93.
- [08] F. Pan & A.Acrivos (1967). Steady flows in rectangular cavities. Journal of Fluid Mechanics, 28(4), 643-655.
- [09]M. Nallasamy and P. K. Krishna (1977) "On cavity flow at high Reynolds numbers," J. Fluid Mech., vol, 79, 391-414.
- [10] J. R. Koseff, R. L. Street, P. M. Gresho, C. D. Upson, J. A. C. Humphrey, and W.-M.(1983) A three-dimensional lid-driven cavity flow: Experiment and simulation. In C. Taylor, editor, Proceedings of the 3rd International Conference on Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow.
- [11] J. R. Koseff, R. L. Street (1984a). Visualization studies of shear driven three-dimensional recirculating flowJournal Fluid Eng. 106, 21–29.
- [12] J. R. Koseff, R.L. Street (1984b).On end wall effects in a lid-driven cavity flow. Journal. Fluid Eng,106, 385–389.
- [13] J. R. Koseff, R. L. Street (1984c).The lid-driven cavity flow: a synthesis of qualitative and quantitative observations. Journal Fluid Eng,106, 390–398.



- [14] U.Ghia, K.N.Ghia, C.T. Shin (1982). High-Re solutions for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method. *J. Comput. Phys.* **48**, 387–411
- [15] R.Schreiber, H.B Keller (1983). Driven cavity flows by efficient numerical techniques. *J. Comput.Phys*, 49, 310–333.
- [16] C. H.Bruneau, , C.Jouron & L. B.Zhang (1989).Multigrid solvers for steady Navier-Stokes equations in a driven cavity. In 11th International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics. Springer Berlin Heidelberg .
- [17] O.Botella, R.Peyret (1998).Benchmark spectral results on the lid-driven cavity flow. *computers & fluids*,27, 421–433.
- [18] E. M. Wahba (2009). Multiplicity of states for two-sided and four-sided lid driven cavity flows. *Computers & Fluids*, 38(2), 247-253.
- [19] M. Zelouf, N.Moumimi, K. Aoues, A. Labeled, (2011) Multiple solutions and stability of multi-sided lid-driven cavity flows. *Sci. Tech. & Develop.* 8, 57–71.
- [20] E. M. Wahba (2012).Steady flow simulations inside a driven cavity up to Reynolds number 35,000,*Computers & Fluids*, 66, 85-97.
- [21] C.Bruneau, & M. Saad (2006). The behaviour of high Reynolds flows in a driven cavity. *Computational Fluid Dynamics Journal*, 15(3), 303.
- [22] A.Azzouz, S.Houat, & O.Benhizia (2017). Numerical study of steady flow inside a lid-driven square cavity for Reynolds number up to 50000. In 23 rd French Mechanical Congress, Lille, French.
- [23] A.AZZOUZ, S.Houat, & M. Grine (29 May 2023).Numerical Study of Lid-Driven Cavity Flow in the Vicinity of  $Re= 70000$ .In National Congress On Mechanics, Materials And Metallurgy 28-, Oran,Algeria.
- [24] C. Sebai, M. Zellouf, and A. Thelib (2023) The Hunt for Ultimate Regime of the Lid-Driven Cavity Flow, Arab Conference on Mechanics and Engineering, Held in University of Biskra 10-12; December 2023.
- [25] Deggeroni, M.V.R., de Lima Costa Salazar, J.P., Siebert, D.N., Hegele Júnior, L.A. (2020),Turbulent Kinetic Energy Analysis in 2D Lid-Driven Cavity Flow at  $Re = 100,000$ ,In Spring School of Transition and Turbulence.

- [26] Alhussein, H., & Daqaq, M (2024). The Principle of Minimum Pressure Gradient: An Alternative Basis for Physics-Informed Learning of Incompressible Fluid Mechanics. arXiv preprint arXiv:2401.07489.
- [27] H. Taha, C. Gonzalez, and M. Shorbagy, (2023), A minimization principle for incompressible fluid mechanics *Phys. Fluids* 35, 127–110
- [28] M. Zelouf (2014), Fluid mechanics between dawn and dusk: doubts on Jukowsky-Kutta Prandtl: legacy of Ibn al-Haytham, .. towards understanding by critical constructive Inquiry – (1) D’Alembert’s paradox (1755): How bird fly? – (2) Prandtl paradox (1904): How plane fly? – Draft unpublished manuscript (2014).
- [29] M. Zelouf, (2023) Principe of Minimum Action Gradient (PMAG): Simulating Mechanics by Minimizing the Action, Arab Conference on Mechanics and Engineering, Held in University of Biskra 10-12; December 2023.
- [30] H. Gildor, E. Fredj, A. Kostinski, (2010) . The Gulf of Eilat/Aqaba: a natural driven cavity? *Geoph&Astr. Fluid. Dyn.*, 104, 301–308.
- [31] P. Zdanski, M.A. Ortega, GCR. Nide, Jr. Fico (2003). Numerical study of the flow over shallow cavities. *Computer & Fluids* ,32,953-974.
- [32] El. Canedo, CD. Denson (1989) .Flow in a driven cavity with a free surface. *AIChE Journal*, 129-138.
- [33] N. Alleborn, H. Raszillier, F. Durst (1999) .Lid driven cavity with heat and mass transport. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 833-853.
- [34] PH. Gaskell, JL. Summers, HM. Thompson, Savage MD (1996) Creeping flow analyses of free surface cavity flows. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 8, 415–433.
- [35] PH. Gaskell, GE. Innes, MD. Savage (1998). An experimental investigation of meniscus roll coating. *Journal of Fluid Mechanics* ,355, 17–44.
- [36] CW. Leong, JM. Ottino (1989). Experiments on mixing due to chaotic advection in a cavity. *Journal of Fluid Mechanics* ,209, 463–499.
- [37] Lemarié, Charles-André. (2004). On the study of cooling and positioning of roof-mounted railway equipment.
- [38] Samantaray, D. and M.K. Das, High Reynolds number incompressible turbulent flow inside a lid-driven cavity with multiple aspect ratios. *Physics of Fluids*, 2018. 30(7).

# قائمة المصطلحات

## قائمة المصطلحات

المصطلحات الأجنبية	المصطلحات العربية
Stability	الاستقرار
Continuity	الاستمرارية
Bottom	أسفل
Top	أعلى
Structure flow	بنية الجريان
Steady	ثابت / دائم
End wall	الجدران النهائية
Flow	الجريان
Turbulent flow	الجريان الاضطرابي
Transition flow	الجريان الانتقالي
Lid Driven Cavity flow	جريان التجويف ذو الحافة القائدة
Laminar flow	الجريان الصفائحي
Mechanics Informed Neural Network Solvers (MINNs)	حلول الشبكات العصبية المستنيرة (المسترشدة) بالميكانيكا
Stream function	دالة التيار
Vorticity	الدوامة
Primary vortex	الدوامة الأساسية
upper secondary vortex	الدوامة الثانوية الصاعدة العلوية
Downward secondary vortex	الدوامة الثانوية النازلة
upward spiral vortex	الدوامة الصاعدة
Grid	شبكة التقطيع
Boundary condition	الشروط الحدية

Kinetic energy	الطاقة الحركية
Spectral methods	الطرق الطيفية
Finite volume Method	طريقة الحجم المنتهية
Reynolds number	عدد رينولدز (أرنات)
Momentum	كمية الحركة
Viscosity	لزوجة
Incompressible fluid	مائع لا انضغاطي
Newtonian fluid	مائع نيوتوني
Unsteady	متغير
Numerical simulation	المحاكاة الرقمية/العددية
Fluids	الموائع
Aspect Ratio	نسبة الطول إلى العرض (الامتداد)
Ultimate regime	النسق الذروي
Data-Driven Modeling (DDM)	التمذجة المعتمدة على البيانات
3D-Model	النموذج الثلاثي الأبعاد
2D-Model	النموذج الثنائي الأبعاد
Left	يسار
Right	يمين