

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية والشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
كلية العلوم
قسم علوم المادة
مذكرة لنيل شهادة الماجستير
في الفيزياء
تخصص: الطاقة

مذكرة الماجستير

من طرف:
بومعيزة نوال

دراسة الحمل الحراري الطبيعي داخل نموذج سكني على شكل
متوازي سطوح تحت شروط حدية مختلفة

تاريخ المناقشة: 2014/12/25

أمام لجنة المناقشة:

رئيسا	جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة	أستاذ التعليم العالي	جمال عميري
مقررا	جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة	أستاذ محاضر أ	صالح لعور
ممتحنا	جامعة قسنطينة 1	أستاذ التعليم العالي	عبد السلام عومارة
ممتحنا	جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة	أستاذ التعليم العالي	الحاسن مزعاش

أهدي ثمرة جهدي

إلى أمي الغالية وأبي العزيز

إلى جدي وجدتي

إلى إخوتي وأخواتي

وإلى كل من ساعدني من قريب أو بعيد

أتقدّم بالشكر والتقدير لأستاذي المشرف السيد: لعور صالح الذي لم
يبخل علي بالإرشادات والمعلومات القيّمة أثناء تأطيره لي.
كما أتوجه بالشكر للجنة المناقشة الموقرة والتي يترأسها السيد: عميري جمال
كما أشكر أعضاء اللجنة: السيد عبد السلام عومارة والسيد الحاسن مزعاش
التي لم ولن تبخل علي بالتوجيه والإرشاد والتصحيح.
كما أشكر كلّ من ساعدني من قريب أو بعيد، وأخصّ بالذكر: بوصاع، سهام
غريب، سهام عواد، محمّد موسوس، وسيلة مخبي، فريدة خلفي، شريفة بوعوكل،
شبل الطاهر، رزقي بريوة، أحمد مومن، ليتيم، نادية حمودة، بوجعدار جمال،
قرباعي، ندير بن يوسف، عمّي رشيد بن لكبير.

إهداء

شكر وتقدير

الفهرس

تلخيص

قائمة الأشكال والجداول

مجموعة المصطلحات

1..... مقدمة

الفصل الأول: البحث البيليوغرافي

3..... البحث البيليوغرافي

الفصل الثاني: الدراسة النظرية

17 1.2. التّموذج الفيزيائي

19..... 2.2. فرضيات التّبسيط الأساسية

20..... 3.2. الصّيغة الرّياضية

22... 4.2. إختيار الشّروط الإبتدائية و الشّروط الحديّة

23..... 5.2. المعادلات اللّابعدية

26..... 6.2. حساب إنتقال الحرارة

الفصل الثالث: التّموذج العددي

28..... 1.3. المعالجة العددية لمعادلة الطّاقة

28..... 2.3. المعالجة العددية لمعادلة الإعصار

29..... 3.3. المعالجة العددية لمعادلة بواسون

30..... 4.3. مركبتا السّرعة

30..... 5.3. توزيع الشّروط الإبتدائية والحديّة

32..... 6.3. نشر عدد نوسلت

32..... 7.3. خوارزم الحساب

الفصل الرابع: النتائج العددية

- 1.4. تأثير درجة الحرارة الثابتة..... 35
- 2.4. تأثير التدفق الثابت للحرارة 38
- 3.4. تأثير التغير النبضي لدرجة الحرارة
- 1.3.4. تأثير السعة 40
- 2.3.4. تأثير الدور 45
- 4.4. المقادير المتوسطة:
- 1.4.4. القيم المتوسطة..... 51
- 2.4.4. عدد نوسلت..... 56
- 3.4.4. خطوط تساوي درجات الحرارة..... 59
- 4.4.4. خطوط التيار..... 65
- 5.4. دراسة مقارنة..... 70
- الخاتمة 78
- الملاحق:
- 1- إختيار الشبكة..... 80
- المراجع 81

تلخيص:

نحن بصدد دراسة نقل الحرارة عن طريق الحمل الحراري الطبيعي لمائع ذي خاصية $Pr=0,71$ (هواء) داخل نموذج سكني على شكل متوازي السطوح ذو مقطع مربع في حالات أربع هي :

الحالة الأولى: نسخن النصف العلوي للوجه الجنوبي للنموذج ونبرد نصف جداره السفلي الأيمن مع عزل بقية الجدران، ولقد أختيرت هذه الوضعية لمحاكاة وجود نافذة عند الجدار الجنوبي حيث يتعرض للإشعاع الشمسي الدائم والأعظمي خلال السنة.

الحالة الثانية: نقوم بتسخين النصف السفلي للوجه الجنوبي للنموذج ونبرد نصف جداره السفلي الأيمن مع عزل بقية الجدران، ولقد أختيرت هذه الوضعية لمحاكاة وجود مدفأة تحت النافذة عند الجدار الجنوبي.

الحالة الثالثة: نسلط تدفق حراري ثابت عوض عن التسخين عند درجة حرارة ثابتة للحالة الأولى.

الحالة الرابعة: نسخن النصف العلوي للوجه الجنوبي للنموذج نبضيا ونبرد نصف جداره السفلي الأيمن مع عزل بقية الجدران، ولقد أختيرت هذه الوضعية لمحاكاة تغير درجة الحرارة بفعل الغيوم المارة في السماء بشكل دوري.

الهدف من هذا العمل هو البحث عن الراحة الحرارية في المنزل عن طريق تحديد معالم مميزة لتسخين الهواء المتحرك عن طريق الحمل الحراري الطبيعي .

الكلمات المفتاحية: الحمل الحراري الطبيعي، الراحة الحرارية، تجويف متوازية السطوح، الفروق المنتهية.

Résumé:

On se propose d'étudier le transfert de chaleur par convection naturelle dans un modèle habitat orienté sud. Le fluide considéré est l'air ($Pr=0,71$), la cellule d'habitat est sous forme parallélépipédique de coupe carrée. L'étude menée est bidimensionnelle. Les cas étudiés sont :

Premier cas :

On chauffe à température constante la moitié supérieure de la face sud du modèle et on refroidit à température constante la moitié inférieure du mur en regard. Le reste des parois est supposé isolé. Cette disposition correspond au maximum d'heures d'ensoleillement durant toute l'année.

Deuxième cas :

On chauffe à température constante la moitié inférieure de la face sud du modèle et on refroidit à température constante la moitié inférieure du mur en regard. Le reste des parois est supposé isolé. Cette disposition simule la présence d'un radiateur mis sous la fenêtre d'une chambre de maison.

Troisième cas :

On impose un flux de chaleur constant sur la moitié supérieure de la face sud du modèle et le reste des parois est similaire au premier cas.

Quatrième cas :

On impose une température variable selon un mode impulsionnel sur la moitié supérieure de la face sud du modèle et le reste des parois est similaire au premier cas. Cette disposition simule le passage de nuages périodiquement sur le site concerné.

Le but recherché à travers cette étude est la recherche d'un confort thermique dans l'habitat par la détermination des conditions optimales de confort assuré par la circulation de l'air par convection naturelle à l'intérieur de l'habitat.

Mots clés : Convection naturelle thermique, Confort thermique, Chauffage, Enceinte parallélépipédique, Différences finies.

Abstract:

One proposes to study natural convection heat transfer in a habitat facing south. The fluid considered here is air with Prandtl number $Pr = 0.71$ and we consider a rectangular square habitat enclosure to study the two-dimensional cases:

First case:

The upper half south face is subjected to a constant hot temperature and the opposite lower half face is cooled isothermally. The rest of the walls are adiabatic. This configuration corresponds to a maximum sunshine hours throughout the year.

Second case:

The lower half south face is subjected to a constant hot temperature and the opposite lower half face is cooled isothermally. The rest of the walls are adiabatic. This configuration corresponds to a radiator put under house wall window.

Third case:

The upper half south face is subjected to a constant heat flux. The rest of the walls are similar to the first case.

Fourth case:

The upper half south face is subjected to a pulsating heating mode and the rest of the walls are similar to the first case. This situation simulates a particular weather conditions; sometimes cloudy, sometimes clear on the concerned site.

The principal aim of the study is the thermal comfort of habitats by determining the optimal conditions provided by the air circulation by natural convection inside the habitat.

Keywords: Thermal natural convection, thermal comfort, heating, rectangular enclosure, Finite Differences.

قائمة الأشكال

- الشكل (2.1): تمثيل النموذج الفيزيائي للحالة الأولى.....17
- الشكل (2.2): تمثيل النموذج الفيزيائي للحالة الثانية.....18
- الشكل (2.3): تمثيل النموذج الفيزيائي للحالة الثالثة.....18
- الشكل (2.4): تمثيل النموذج الفيزيائي للحالة الرابعة.....19
- الشكل (3.1): تمثيل الشبكة.....27
- الشكل (3.2): المخطط التنظيمي للبرنامج المستخدم.....34
- الشكل (4.1): تأثير عدد رايلى على المقادير \overline{Nu} و ψ_{cent} و T_{cent} للحالة الأولى.....35
- الشكل (4.2): تأثير عدد رايلى على المقادير \overline{Nu} و ψ_{cent} و T_{cent} للحالة الثانية.....37
- الشكل (4.3): تأثير عدد رايلى على المقادير \overline{Nu} و ψ_{cent} و T_{cent} للحالة الثالثة.....38
- الشكل (4.4): تأثير السعة ε على Nu_f من أجل $\tau = 0.01$ و $Ra = 10E6$40
- الشكل (4.5): تأثير السعة ε على Nu_f من أجل $\tau = 0.06$ و $Ra = 10E6$40
- الشكل (4.6): تأثير السعة ε على Nu_f من أجل $\tau = 0.11$ و $Ra = 10E6$41
- الشكل (4.7): تأثير السعة ε على Nu_f من أجل $\tau = 0.41$ و $Ra = 10E6$41
- الشكل (4.8): تأثير السعة ε على Nu_f من أجل $\tau = 0.61$ و $Ra = 10E6$41
- الشكل (4.9): تأثير السعة ε على Nu_f من أجل $\tau = 0.81$ و $Ra = 10E6$42
- الشكل (4.10): تأثير السعة ε على Nu_f من أجل $\tau = 0.01$ و $Ra = 10E5$42
- الشكل (4.11): تأثير السعة ε على Nu_f من أجل $\tau = 0.06$ و $Ra = 10E5$43
- الشكل (4.12): تأثير السعة ε على Nu_f من أجل $\tau = 0.11$ و $Ra = 10E5$43
- الشكل (4.13): تأثير السعة ε على Nu_f من أجل $\tau = 0.41$ و $Ra = 10E5$43
- الشكل (4.14): تأثير السعة ε على Nu_f من أجل $\tau = 0.61$ و $Ra = 10E5$44
- الشكل (4.15): تأثير السعة ε على Nu_f من أجل $\tau = 0.81$ و $Ra = 10E5$44
- الشكل (4.16): تأثير الدور τ على Nu_f من أجل $\varepsilon = 0.4$ و $Ra = 10E6$45
- الشكل (4.17): تأثير الدور τ على \overline{Nu}_f من أجل قيم مختلفة للسعة ε و $Ra = 10E6$45
- الشكل (4.18): تأثير الدور τ على Nu_f من أجل $\varepsilon = 0.4$ و $Ra = 10E5$46
- الشكل (4.19): تأثير الدور τ على \overline{Nu}_f من أجل قيم مختلفة للسعة ε و $Ra = 10E5$46
- الشكل (4.20): تغيير \overline{Nu}_f بدلالة Ra من أجل $\tau = 0.01$ وقيم مختلفة لـ ε47
- الشكل (4.21): تغيير \overline{Nu}_f بدلالة Ra من أجل $\tau = 0.41$ وقيم مختلفة لـ ε47

قائمة الأشكال و الجداول

- الشكل (4.22): تغيير \overline{Nu}_f بدلالة Ra من أجل $\tau = 0.81$ وقيم مختلفة لـ ε 48
- الشكل (4.23): إشارة ψ_{\min} و ψ_{\max} من أجل $\tau = 0.01$ و $\varepsilon = 0.8$ و $Ra = 10E6$ 48
- الشكل (4.24): إشارة ψ_{\min} و ψ_{\max} من أجل $\tau = 0.01$ و $Ra = 10E6$ 49
- الشكل (4.25): إشارة ψ_{\min} و ψ_{\max} من أجل $\tau = 0.41$ و $Ra = 10E6$ 49
- الشكل (4.26): إشارة ψ_{\min} و ψ_{\max} من أجل $\tau = 0.81$ و $Ra = 10E6$ 49
- الشكل (4.27): إشارة ψ_{\min} و ψ_{\max} من أجل $\tau = 0.01$ و $Ra = 10E5$ 50
- الشكل (4.28): إشارة ψ_{\min} و ψ_{\max} من أجل $\tau = 0.41$ و $Ra = 10E5$ 50
- الشكل (4.29): إشارة ψ_{\min} و ψ_{\max} من أجل $\tau = 0.81$ و $Ra = 10E5$ 50
- الشكل (4.30): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.01$ و $Ra = 10E6$ 51
- الشكل (4.31): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.06$ و $Ra = 10E6$ 51
- الشكل (4.32): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.11$ و $Ra = 10E6$ 52
- الشكل (4.33): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.41$ و $Ra = 10E6$ 52
- الشكل (4.34): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.61$ و $Ra = 10E6$ 52
- الشكل (4.35): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل قيم مختلفة للدور τ و $Ra = 10E6$ 53
- الشكل (4.36): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.01$ و $Ra = 10E5$ 53
- الشكل (4.37): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.06$ و $Ra = 10E5$ 54
- الشكل (4.38): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.11$ و $Ra = 10E5$ 54
- الشكل (4.39): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.41$ و $Ra = 10E5$ 54
- الشكل (4.40): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.61$ و $Ra = 10E5$ 55
- الشكل (4.41): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.81$ و $Ra = 10E5$ 55
- الشكل (4.42): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل قيم مختلفة لـ τ و $Ra = 10E5$ 55
- الشكل (4.43): \overline{Nu} بدلالة Ra في الحالة الأولى..... 56
- الشكل (4.44): \overline{Nu} بدلالة Ra في الحالة الثانية..... 57
- الشكل (4.45): خطوط تساوي درجات الحرارة في الحالة الأولى..... 59
- الشكل (4.46): خطوط تساوي درجات الحرارة في الحالة الثانية..... 60
- الشكل (4.47): خطوط تساوي درجات الحرارة في الحالة الثالثة..... 62
- الشكل (4.48): خطوط تساوي درجات الحرارة في الحالة الرابعة..... 64
- الشكل (4.49): خطوط التيار في الحالة الأولى..... 65
- الشكل (4.50): خطوط التيار في الحالة الثانية..... 66

قائمة الأشكال و الجداول

- 68.....الشكل (4.51): خطوط التيار في الحالة الثالثة.....
- 69.....الشكل (4.52): خطوط التيار في الحالة الرابعة.....
- 70.....الشكل (4.53): تأثير السعة على Nu_f من أجل $Ra = 10^5$ والدور $\tau = 0.1$
- 71.....الشكل (4.54): تأثير السعة على Nu_f من أجل $Ra = 10^6$ والدور $\tau = 0.1$
- 72.....الشكل (4.55): تأثير الدور على Nu_f من أجل $Ra = 10^5$ و $\varepsilon = 0.5$
- 73.....الشكل (4.56): تأثير الدور على Nu_f من أجل $Ra = 10^5$ و $\varepsilon = 0.5$
- 74.....الشكل (4.57): تغيير \overline{Nu}_f بدلالة Ra من أجل $\tau = 0.1$ وقيم مختلفة لـ ε
- 75.....الشكل (4.58): تغيير \overline{Nu}_f بدلالة Ra من أجل $\tau = 1.0$ وقيم مختلفة لـ ε
- 76.....الشكل (4.59): تغيير \overline{Nu}_f بدلالة Ra من أجل $\varepsilon = 0.2$ وقيم مختلفة لـ τ
- 77.....الشكل (4.60): تغيير \overline{Nu}_f بدلالة Ra من أجل $\varepsilon = 0.8$ وقيم مختلفة لـ τ

قائمة الجداول:

- 57.....الجدول (4.1): جدول تأثير عدد رايلي على \overline{Nu} و Nu_f و Nu_c في الحالة الأولى.....
- 58.....الجدول (4.2): جدول تأثير عدد رايلي على \overline{Nu} و Nu_f و Nu_c في الحالة الثانية.....
- 58.....الجدول (4.3): جدول تأثير عدد رايلي على \overline{Nu} و Nu_f و Nu_c في الحالة الثالثة.....

مجموعة المصطلحات

الحروف اللاتينية:

A_1, AA_1	معاملات القطر السفلي للمصفوفة ثلاثية الأقطار	
a	انتشارية الحرارة $(\frac{\lambda}{\rho_0 c_p})$	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
c_1, CC_1	معاملات القطر السفلي للمصفوفة ثلاثية الأقطار	
A_2, AA_2	معاملات القطر الرئيسي للمصفوفة ثلاثية الأقطار	
c_2, CC_2	معاملات القطر الرئيسي للمصفوفة ثلاثية الأقطار	
A_3, AA_3	معاملات القطر العلوي للمصفوفة ثلاثية الأقطار	
c_3, CC_3	معاملات القطر العلوي للمصفوفة ثلاثية الأقطار	
C_p	السعة الحرارية الكتلية عند ضغط ثابت	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
D_4	معاملات الحد الثاني بدلالة درجة الحرارة	
c, d, s	معاملات الشعاع العمودي معروفة	
g	تسارع الجاذبية	$[m \cdot s^{-2}]$
L_g	عرض التجويف وفق المحور Ox	$[m]$
L_h	ارتفاع التجويف وفق المحور Oy	$[m]$
h	عدد صحيح	
N_i	عدد عقد الشبكة وفق المحور Ox	
N_j	عدد عقد الشبكة وفق المحور Oy	
Nu_{AB}	عدد المتوسط لنوسلت بالنسبة للجدار الساخن	
Nu_{CD}	عدد المتوسط لنوسلت بالنسبة للجدار البارد	
$Nu_{\frac{1}{2}}$	عدد المتوسط لنوسلت في مركز التجويف	
\overline{Nu}	المقدار المتوسط لعدد نوسلت عبر التجويف	
P	الضغط	$[Pa]$
Pr	عدد برنتل $(\frac{\nu}{a})$	
ψ	دالة التيار	$[m^2 \cdot s^{-1}]$

Ra	عدد رايلي $(\frac{g\beta(T-T_f)L_h}{\nu a})$	
t	الزمن اللابيدي	
T	درجة الحرارة اللابيدية $(\frac{T^* - T_f}{T_c - T_f})$	
T_0	درجة الحرارة المتوسطة $(\frac{T_c + T_f}{2})$	
T_{ct}	درجة الحرارة في مركز التجويف	
u	السرعة اللابيدية وفق المحور Ox $(\frac{u^* L_h}{a})$	
v	السرعة اللابيدية وفق المحور Oy $(\frac{v^* L_h}{a})$	
x	الإحداثيات الكارتيزية اللابيدية $(\frac{x^*}{L_g})$	
y	الإحداثيات الكارتيزية اللابيدية $(\frac{y^*}{L_h})$	
Δt	الخطوة في الزمن اللابيدي	
Δx	خطوة الفضاء اللابيدي على المحور Ox	
Δy	خطوة الفضاء اللابيدي على المحور Oy	

الحروف اليونانية:

ε	السعة	[K]
β	معامل حجم التمدد الحراري	[K ⁻¹]
δ	معامل الشكل	
λ	الموصلية الحرارية	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
ν	اللزوجة الحركية	[m ² .s ⁻¹]
ρ	الكتلة الحجمية بالنسبة إلى درجة الحرارة T^* $(\rho_0(1 - \beta(T^* - T_f)))$	[kg.m ⁻³]
ρ_0	الكتلة الحجمية المرجعية	[kg.m ⁻³]
γ	معامل الإسترخاء في طريقة فوق الإسترخاء المتعاقب	
τ	دور بعدي	[s]

ψ	دالة التيار اللابعدية $(\frac{\psi^*}{a})$	
ϕ	تدفق حراري	[W.m ⁻²]
ω	الإعصار اللابعدي $(\frac{\omega^* L_h^2}{a})$	

دلائل:

<i>AB</i>	بالنسبة للجدار الساخن	
<i>CD</i>	بالنسبة للجدار البارد	
<i>c</i>	ساخن	
<i>f</i>	بارد	
<i>i</i>	بالنسبة لـ <i>i</i> مرة وفق المحور <i>Ox</i>	
<i>j</i>	بالنسبة لـ <i>j</i> مرة وفق المحور <i>Oy</i>	
<i>k</i>	بالنسبة للزمن	
max	القيمة القصوى (العظمى)	
min	القيمة الصغرى	
<i>cent</i>	وسط التجويف	
<i>opt</i>	مثالي	
<i>p</i>	بالنسبة للتكرار <i>p</i> مرة	
<i>w</i>	بالنسبة للجدار	

الأس:

*	مقدار بعدي	
---	------------	--

المختصرات:

<i>ADI</i>	الطريقة الضمنية للإتجاهات المتناوبة
<i>SOR</i>	الطريقة فوق الإسترخاء المتعاقب
الشكل (1.2)	الشكل الثاني من الفصل الأول
الجدول (4.1)	الجدول الأول من الفصل الرابع

مقدمة:

أدى تناقص مصادر الطاقة وتوليدها إلى البحث في تقنيات التبريد والتدفئة الذاتية داخل المباني من أجل توفير الراحة الحرارية. ونظرا لأهمية الحمل الحراري الطبيعي داخل التجاويف المغلقة أو المباني ونظرا لأهميته في التطبيقات الهندسية والتكنولوجية نقدم هذه الدراسة العددية. من المعلوم أن الحمل الحراري الطبيعي ينتج عن تغير في درجة الحرارة فيخلق حركة للمائع مما يستلزم تغير في الكتلة الحجمية أين تصبح جزيئات المائع الساخنة أقل كثافة بفعل التمدد الحراري ثم تصعد بفعل دافعة أرخميدس وصولا إلى القمة فيتبادل المائع حرارته فيبرد وبالتالي يتقل فينزل مرة أخرى. إن هذه الظاهرة مماثلة لظاهرة عدم الاستقرار في جملة رايلي وبينارد أين تظهر لفات متناظرة لجريان الهواء. كذلك لهذه الجملة الفيزيائية تطبيقات عدة وخاصة في تبريد الدارات المتكاملة والغرف الحاوية للمحركات الكهربائية. أما فيما يخص طرق التسخين و التبريد يمكن الإشارة هنا إلى تثبيت درجة الحرارة كما لاحظنا في غالبية المراجع أو تثبيت التدفق الحراري وكذلك جعل درجة الحرارة متغيرة مع الزمن حتى نحكي الظواهر الطبيعية من جهة والظواهر الفعلية للتيار الكهربائي من جهة أخرى. في الحالة الأخيرة تهدف الدراسة إلى طرح الحرارة الزائدة داخل التجويف من أجل الحفاظ على المركبات الإلكترونية للأجهزة. أما فيما يخص المباني يمكن تصور تغير درجة الحرارة خلال النهار تتبع دالة جيبيية للزمن أو تتبع إشارة نبضية. وفي هذه الحالة الأخيرة فإن المحاكاة تأخذ بعين الاعتبار مرور السحب بالمنطقة المعنية. إن كل هذه التصورات أخذناها بعين الاعتبار لمحاكاة السلوك الحراري للهواء داخل التجويف بهدف توفير الراحة الحرارية. ولقد أخضعنا حدود الجملة لعدة شروط منها:

تسخين الوجه الجنوبي للفجوة في نصفه العلوي وتبريد الوجه المقابل في نصفه السفلي بدرجات حرارة ثابتة مع عزل بقية الجدران. أو تسخين النصف السفلي للوجه الجنوبي وتبريد الوجه المقابل في نصفه السفلي مع عزل بقية الجدران. أو تسليط تدفق حراري ثابت على الوجه الجنوبي في نصفه العلوي وتبريد الوجه المقابل في نصفه السفلي مع عزل بقية الجدران. أو التحريض بدرجة حرارة نبضية للوجه الجنوبي في نصفه العلوي والإبقاء على تثبيت درجة حرارة الوجه المقابل في نصفه السفلي مع عزل بقية الجدران.

يحتوي هذا البحث على أربعة فصول يمكن تلخيصها فيما يلي:

في الفصل الأول تطرّقنا إلى ذكر أهمّ الأبحاث المنجزة في نطاق هذا الموضوع. ويتضمن الفصل الثاني طرح الإشكال، وتحديد الفرضيات وصياغة المعادلات رياضيا ثمّ تحويلها إلى معادلات لابعدية، مع وضع الشروط الابتدائية والحدية. خصّصنا فصلنا الثالث للصياغة العددية للمعادلات ومعالجتها بالطريقة الضمنية للإتجاهات المتناوبة وطريقة فوق الإسترخاء المتعاقب مع إقتراحنا خوارزم الحساب. وقمنا في الفصل الرابع بعرض ومناقشة النتائج المتحصّل عليها: خطوط تساوي درجات الحرارة وخطوط التّيّار وأخيرا الخاتمة تتبعتها الملاحق والمراجع.

1. البحث البيئيوغرافي

استقطبت ظاهرة الحمل الحراري الطبيعي إهتمام العديد من الباحثين ،فعملوا على دراستها من الناحية النظرية [1] أو من الناحية العددية [2] والإستفادة منها في شتى المجالات كتبريد العناصر الإلكترونية وتوفير الرّاحة الحرارية داخل المنازل وتكييف المنازل البلاستيكية. ولقد عرّف "ماركوس و أولجاي" الرّاحة الحرارية على أنّها حالة لا يشعر معها الإنسان بالبرد أو الحرّ، أو بأيّ مضايقة نتيجة لخلل في البيئة الحرارية.

كما تعرّف أيضا بحالة الإتزان بين حرارة الجسم المكتسبة من البيئة المحيطة به وحرارته المفقودة منه [3]، وتخضع الرّاحة الحرارية لعدة عوامل تتمثل في:

أ- العوامل البيئية:

1- درجة حرارة الهواء: وهي درجة الحرارة المحيطة بجسم الإنسان والذي مجال راحته الحرارية ما بين ($20^{\circ}C - 27^{\circ}C$)، فإذا كانت أعلى من درجة حرارة بشرته يزداد تبريده عن طريق التّعرق، أمّا إذا انخفضت عن الحدّ المناسب تتقبض الشعيرات الدّموية الموجودة تحت جلده فتندفع إلى بشرته مبردة إيّاها [3].

2 - الرّطوبة النسبية: هي النسبة بين كتلة بخار الماء الموجودة في كتلة معيّنة من الهواء وأقصى محتوى من البخار يمكن للهواء حمله عند نفس درجة الحرارة. تتأثر عملية التّبخر بمحتوى الهواء الجوّي من الرّطوبة، فإذا زادت الرّطوبة قلّ التّبخر والعكس صحيح [3]، وتكمن نطاق راحة الإنسان من الرّطوبة النسبية ما بين (20% - 80%). يسبّب إنخفاض الرّطوبة عن الحدّ المناسب جفاف الجلد والشّعور بالعطش المستمر، أمّا في حال العكس فيشعر الإنسان بضيق التّنفس.

3 - حركة الهواء: تزيد حركة الهواء في معدل التّبادل الحراري بين جسم الإنسان والهواء المحيط به عن طريق الحمل الحراري الطبيعي فيفقد الجسم الحرارة، إضافة إلى الزيادة في عملية التّبخر يتولد الشّعور بالرّاحة في الظروف الجوّية الحارة، والشّعور بالبرودة في الظروف الجوّية الباردة [3].

و تكون الرّاحة الحرارية في المنازل ما بين السرّعتين $0.1m/s - 2m/s$ ، أمّا في المناطق المفتوحة فتكون سرعة الهواء ما بين ($3m/s - 4m/s$).

4 - الإشعاع الشمسي : يختزن الجسم حرارة تشع إلى الأجسام الأقل منه حرارة والتي يفصلها عنه وسط شفاف كالهواء أو الزجاج، فالحوائط الساخنة تشع إلى جسم الإنسان في أي فراغ يشغله.

وينقسم إلى إشعاع ذو موجات قصيرة وهو الإشعاع الصادر من جسم ذو درجة حرارة مرتفعة مثل الشمس، وإشعاع ذو موجات طويلة وهو الصادر من المباني والأجسام البشرية في درجات حرارة منخفضة.

ب- العوامل البشرية:

1 - النشاط: يتغير شعور الإنسان بالرّاحة بتتويع النشاط الذي يمارسه، وحالته من السكون أو الحركة، فيتزايد معدل إفراز الحرارة مع تزايد حرق المواد الغذائية أي زيادة التبادل الحراري للتخلص من الحرارة الزائدة في الأجواء الحارة، أو زيادة الشعور بالدفء في الأجواء الباردة.

2 - الملابس والأغطية: عند تغطية الجسم بالملابس تقوم بدور العازل الحراري بين الإنسان وبيئته فيتغير معدل فقد أو اكتساب الحرارة من البيئة والملابس.

وبعد هذه التعاريف نقوم بمراجعة بعض المصادر ذات الصلة بالموضوع والتي نلخصها فيما يلي:

في دراسة عديدة للحمل الحراري الطبيعي للماء داخل تجويف مربع ومن أجل عدد رايلي $0 \leq Ra \leq 10^6$ و $0 \leq \epsilon \leq 1$ (الطول اللابعدى للمقطع غير المسخن)، أين سخن جزء من جدارها السفلي وبرّد جانبها الأيمن مع عزل بقية الجدران [4]. بيّنت تصحيحاته الأولية لعدد Nu عند الرتبة Ra^2 ظهور الحمل الحراري الطبيعي بالقرب من ϵ ؛ كما أنه من أجل $Ra \geq O(10^5)$ لاحظ تشكل خلية تدور باتجاه عقارب الساعة وظهور طبقات حدية متقاربة فيما بينها مجاورة للجداران الساخن والبارد.

و درس D.S.LIN and M.W.NANSTEEL عدديا بنية الجريان وحقل درجات الحرارة والانتقال الحراري داخل تجويف مربع مملوء بالماء وذلك من أجل $10^3 \leq Ra \leq 10^6$ و شبكة 21×21 ، فسّط درجة حرارة ثابتة و ساخنة على جدارها الأيسر وأخرى باردة على جدارها الأيمن مع عزل بقية الجدران [5].

فلاحظ أنّ جريان الماء يكون متناظرا من أجل $R = \frac{1}{2}$ (الكثافة التوزيعية)، كما ظهر الحمل الحراري الطبيعي بين الجدارين البارد والساخن؛ كما استخلص أنه من أجل $R \leq \frac{1}{2}$ تكون النتائج جيدة.

وفي دراسة عديدة للحمل الحراري الطبيعي داخل تجويف مغلق مربع ذو بعدين مزاح بزواوية θ به هواء ومعزول الجانبين الأيسر والأيمن، ومحرض بدرجة حرارة ساخنة وثابتة في أسفله وأخرى باردة وثابتة في أعلاه، وذلك من أجل $Ra = 10^6$ [6]. خلاص S.Acharya et al إلى أنّ التوصيل على طول جدران التجويف له تأثير مستقر على حركة الحمل الحراري الطبيعي، كما أنّ الانتقال الحراري المعبر عنه بعدد نوسلت البارد Nu_h ينقص مع نقصان معامل الناقلية α ويزيد مع الزيادة في سمك الجدران؛ وأنّ متوسط الانتقال الحراري للتجويف أقلّ من مقدار الانتقال الحراري من أجل تجويف ذو جدران لا متناهية في السمك، كما أنّ متوسط النقل الحراري للتجويف حسّاس نسبيا لزواوية الانحراف حيث أنّ المقادير الموضعية لـ Nu_h تثبت ارتباط هام لانحراف التجويف على طول الجدارين الجانبين، وأنّ التدفق الحراري على طول الجدارين الجانبين يعكس اتجاهه ومنه عدد نوسلت للجدارين الجانبين يمكن أن يكون إما سالب أو موجب.

قاما M.Kazmierczak et Z.Chinoda بدراسة عديدة للحمل الحراري الطبيعي داخل تجويف مربع ذو بعدين به مائع ذو خاصية $Pr = 7$ ، فحرضا الجدار الأيسر للتجويف دوريا وأخضعا الجدار المقابل له لدرجة حرارة باردة وثابتة وعزلا الجدارين الأفقيين [7].

تمت الدراسة من أجل $Ra = 1.4 \times 10^5$ وشبكة مختارة 36×45 ولقد اتبعا طريقة الحجم المنتهية لحل معادلات الإستمرارية ومعادلة الطاقة. فتوصلا إلى النتائج التالية:

- * الحلّ يصبح دوريا بعد عدد قليل من الدورات وهذا العدد مرتبط عكسيا بالدور ومستقل عن السعة العظمى.
- * الحلّ دوري للجريان في جميع الحالات يتكوّن من خلية أساسية وخلية ثانوية ضعيفة تظهر دوريا في الجهة العلوية للجدار الأيسر للتجويف.
- * عدد Nu يتغيّر بنفس دور درجة الحرارة الساخنة للجدار وسعته العظمى تنخفض بسرعة وتصبح تقريبا ثابتة في مستوى الجدار البارد.

* ارتفاع السّعة العظمى أو الدّور لحرارة الجدار الساخن يزيد بحجم وكثافة المنطقة الثّانوية، وأيضا سجّل تغير كبير في ψ_{max} وهذا إذا كانت السّعة العظمى والدّور بقيم كبيرة.

درسا N.Yücel et H.Türkoglu عدديا وتحليليا الجريان والانتقال الحراري لمائع داخل تجويف مربع ثنائي البعد يخضع لتسخين جزئي أين فرض درجة حرارة ثابتة وساخنة على جزء سفلي من الجدار الأيسر وأخرى باردة على جزء علوي من الجدار الأيمن مع عزل بقية الجدران، فاستعملا تقريب الحجم المنتهية مع تطوير برنامج يعتمد على خوارزم سامبل [8].

فلاحظا أنّه من أجل طول معطى لعنصر التبريد فإنّ المقدار المتوسط لعدد نوسلت ينخفض مع ارتفاع طول عنصر التسخين، من جهة أخرى من أجل طول معطى لعنصر التسخين فإنّ المتوسط لعدد نوسلت Nu_{moy} يرتفع مع ارتفاع طول عنصر التبريد ذلك من أجل كلّ قيم Ra .

درسا S.MERGUI et F.PENOT تجريبيا الحمل الحراري الطّبيعي داخل تجويف مربع عرضه $L=1.04m$ وارتفاعه $H=0.94m$ به هواء يسخن جانبيه العموديين بدرجتي حرارة ثابتتين ومختلفتين ويعزل كل من السّقف والأرضية وذلك من أجل $Ra=1.69 \times 10^9$ [9].

فأجروا مقارنة البنية العامة للجريان الملاحظ في حالة الجدران الأفقية تكون كظومة فتتكون حركتان ثانويتان للدوران في الجزء العلوي والسفلي للتجويف، مع تواجد موجة نقل ذات تواتر لابعدي يساوي 0.128 في مركز التّجويف كما يلاحظ عدم وجود تأثير تقريب بوسينسك ممّا يؤدي إلى ظهور غير متناظر للشروط الحرارية على الجدران الأفقية.

درسا M. Akiyama and Q. P. Chong عدديا الحمل الحراري الطّبيعي مع الإشعاع الحراري داخل تجويف مربع مملوء بالهواء حيث سخنا جانبه الأيمن بدرجة حرارة ساخنة وثابتة وبردا جانبه الأيمن بدرجة حرارة باردة وثابتة عزلا جداريه العلوي والسفلي [10]. تمت الدّراسة بطريقة عددية تتمثل في طريقة الفروق المنتهية من أجل $10^3 \leq Ra \leq 10^6$. فلاحظا مايلي:

* ظهور الإشعاع السّطحي يختلف عن توزيع درجة الحرارة على الجدران المعزولة بحيث يتغيّر كلّ من درجة الحرارة وحقل الجريان داخل التّجويف.

* الحدود الحرارية بالقرب من الجدارين الجانبيين تكون ضعيفة نسبيا عن طريق الإشعاع السّطحي، لكن لا يوجد فرق ملحوظ خصوصا مع تزايد بعض القيم لعدد رايلي.

* يتمّ تسخين التّجويف بواسطة نقل الحرارة عن طريق الحمل الحراري الطّبيعي والإشعاع.

* يزداد متوسط عدد نوسلت مع تزايد عدد رايلي وهذا مستقل عن وجود الإشعاع السّطحي.

- * وجود الإشعاع السطحي يمكن أن يغيّر من متوسط عدد نوسلت.
- * قيمة عدد نوسلت لا تتعلق بقيمة عدد رايلي فحسب ولكن تتعلق أيضا بالمتغيرات البعدية مثل الفرق في درجة الحرارة وطول التجويف.
- * عندما يزداد كلاً من ΔT وعدد نوسلت الخاص بالإشعاع Nu_r وعدد نوسلت الخاص بالحمل الحراري الطبيعي Nu_c الجداران الساخن والبارد يتغيّران.
- * متوسط عدنان نوسلت الإجماليين للجدارين الساخن والبارد متساويين تقريبا، ممّا يدلّ أنّ الحساب معقول.

درسوا Btisse Abourida et al عدديا الحمل الحراري الطبيعي لتجويف مربع الشكل يمرّ خلاله مائع ذو خاصية $Pr = 0.7$ من أجل سعة $0 \leq a \leq 0.8$ ودور $0.001 \leq \tau \leq 1$ وعدد رايلي $10^4 \leq Ra \leq 10^6$ حيث قاموا بتحريض درجة حرارة دورية على جداره الأيسر وبردوا جداره الأيمن مع عزل كلّ من الأرضية والسقف، فاستعملوا طريقة الفروق المنتهية لحل معادلات الإستمرارية ومعادلة الطاقة [11].

فلاحظوا أنّ التسخين المتغيّر يسهّل ظهور الجريان الثانوي حيث تتعلق الشدّة بنمط التسخين والدور. كما لاحظوا وجود تناظر الجريان بمركز التجويف في حالة التسخين الثابت، إضافة إلى أنّ الانتقال الحراري المتوسط عند درجة حرارة باردة وثابتة يزداد بزيادة السعة وعدد رايلي. وتحدث ظاهرة الرنين عند درجة حرارة مسخنة من أجل $\tau = 0.01$ و $Ra = 10^6$.

بحثا E.K.Lakhal, M.Hasnaoui et P.Vasseur عدديا الحمل الحراري الطبيعي داخل تجويف مربع لمائع ذو خاصية $Pr = 0.72$ فاختر الخطوة الزمنية $\tau = 10^{-5}$ من أجل $10^3 \leq Ra \leq 10^6$ وشبكة 81×81 ، فسُلط على جزء من الجدار العلوي درجة حرارة باردة وسخن جزء من الجدار الأيمن درجة حرارة تحريضية جيبية بعدها سخنه بدرجة حرارة نبضية، ثمّ أجرى مقارنة بين النمطين المسخنين [12].

فتوصل إلى النتائج التالية:

- ✓ ظهور ظاهرة الرنين في التسخين النبضي.
- ✓ متوسط الضياع الحراري الذي يخترق الجدار البارد في التسخين النبضي كبير نسبيا مقارنة بالنظام الثابت والجبيي.
- ✓ يلعب التسخين النبضي دورا مهما في تبريد العناصر الإلكترونية.

كما Mahfoud Kadja et Rabah Hacene في هذا العمل دراسة عددية وتحليلية للحقول الديناميكية والحرارية للحمل الحراري الطبيعي داخل تجويف أسطواني شاقولي مملوء جزئياً بسائل، حيث حرصا بداية درجة حرارة جيبيية وفي الحالة الثنائية حرصا تدفق حراري جيبي فاستعملتا طريقة الفروق المنتهية لحل معادلات الإستمرارية ومعادلة الطاقة [13].

فلاحظا أنّ الزيادة في عدد جراتشوف Gr في حالة الحرارة المتغيرة للسائل يؤدي إلى تعقيدات في الجريان أمّا في حالة التدفق الحراري المتغير للسائل يسخن بسرعة محافظاً على طبيعة الجريان.

بينما درسوا Samira Douamna et al عددياً الحمل الحراري الطبيعي للهواء داخل تجويف تسلط عليه درجة حرارة ثابتة وساخنة من الأسفل وأخرى باردة من الأعلى مع عزلهم للجانبين، فاستعملوا في حلهم طريقة الفروق المنتهية، فبينوا عددياً انتقال الحمل الحراري الطبيعي المستقر إلى دوري أحادي الدور ذي تواتر $f = 109.86$ وذلك من أجل $Ra = 1.1 \times 10^6$ ، ثمّ يصبح دوري بدورين ذي تواترين $f_1 = 64.08$ ، $f_2 = 131.22$ من أجل $Ra = 1.5 \times 10^6$ [14]. كما لاحظوا أنّ التغيير الواسطي للسعة والدور تؤدي إلى الحالة الدورية والعشوائية في النمط المستقر، كما أنّه من أجل $\tau = 0.006$ تؤثر السعة a على جواب النظام فيتطور إلى النظام الديناميكي والحراري المعقد.

أمّا عند الدور $\tau = 2$ لا تظهر التأثيرات المهمة للسعة a إلا من أجل $a \geq 0.975$.

ثمّ قارنوا نتائجهم مع النتائج التجريبية لـ: Gollub و Benson و النتائج العددية لـ: Mukutmoni و Yung فوجدت أنّه هناك تغيير طفيف.

درسوا I. E. Sarris et al عددياً الحمل الحراري الطبيعي للجريان الصفائحي داخل تجويف مستطيل ثنائي البعد يتعرض فيه جداره العلوي إلى درجة حرارة تحريضية جيبيية أمّا بقية الجدران فكظومة. ولقد تمت هذه الدراسة بواسطة الطريقة العددية الحجم المنتهية وذلك من أجل $10^2 \leq Ra \leq 10^8$ [15].

درسوا في هذا البحث تأثير عدد رايلي على أنماط الجريان وخصائص انتقال الحرارة داخل التجويف؛ حقول الجريان ودرجة الحرارة متناظرة. ولقد استخلصوا مايلي:

* من أجل قيم صغيرة لعدد رايلي يهيمن التوصيل على النظام عبر طبقات السوائل.

* يبدأ الحمل الحراري الطبيعي في الهيمنة على النظام مع الزيادة في عدد رايلي أين يقلّ التوصيل.

* تظهر خلايا في الزاويتين العلويتين للجدار العلوي مع الزيادة في عدد رايلي.

* يتم تشكيل طبقة حدودية حرارية بأعلى الجدار مع تناقص سمكه إضافة إلى أن عدد رايلي يزداد.

* نسبة الشّكل للخران تزداد من شدة دوران المائع وعمق الإختراق الحراري.

درسا M. Rahman and M. A. R. Sharif الحمل الحراري الطبيعي للجريان الصفائحي داخل تجويف مستطيل مملوء بالهواء مزاح بزواوية ميل θ حيث $\theta = 15^\circ:90^\circ:(15^\circ)$ ذو نسبة الشّكل AR حيث $0.25 \leq AR \leq 4$ ، فسحنا كلاً من الجدارين العلوي والسفلي بدرجة حرارة ثابتة ومختلفة وعزلاً كلاً من الجدارين الجانبيين الأيمن والأيسر [16]. فاستعملا طريقة الفروق المنتهية لحل معادلات الإستمرارية ومعادلة الطّاقة ولقد اختارا شبكة 41×41 .

فلاحظنا أنّ التدفق الحراري المحلي على طول الجدران الساخنة والباردة يقلّ من التدفق الحراري في كلّ الحالات.

كما لاحظنا وجود تأثير لزاوية الميل خاصة بجانب الجدران المتساوية الحرارة.

كما تعمل الحرارة الداخليّة على زيادة نسبة تدفق الحرارة المحليّة على طول الجدار الساخن وعلى انقاص نسبة التدفق الحراري المحلي على طول الجدار البارد، كما يتمّ نقل كميات متساوية من الحرارة خلال الجدران الساخنة والباردة للتجفيف عن طريق الحمل الحراري الطبيعي من أجل كلّ معاملات الشّكل، وذلك بسبب إنحفاظ الطّاقة في الحالة المستقرة.

إضافة إلى أنّ نقل الحرارة يتم عن طريق الحمل الحراري الطبيعي كحدّ أقصى في الجدار الساخن أو الجدار البارد للتجفيف المربع المزاح بزواوية معينة.

متوسط نسب التدفق الحراري يزداد مع زيادة زاوية الميل وذلك من أجل تجويف ذو نسبة الشّكل $AR > 1$ ، كما يعمل مصدر الحرارة الداخلي على زيادة انتقال الحرارة عبر الجدار الساخن والنقل من انتقالها عبر الجدار البارد.

وأخيراً استخلصنا أنّ تدفق الحمل الحراري الطبيعي داخل التجويف يزداد كلّما تغيّر شكل التجويف من تجويف ذو نسبة الشّكل $AR < 1$ إلى تجويف مربع ($AR = 1$) فتجويف ذو نسبة الشّكل $AR > 1$ وذلك من أجل أيّ زاوية الميلان.

درست Bakhti Fatima-Zohra الحمل الحراري الطبيعي الصفائحي والمضطرب داخل قناة أسطوانية عمودية سطحها الخارجي يخضع إلى درجة حرارة أكبر من درجة المحيط الخارجي يمر بها هواء، استعملت طريقة الحجم المنتهية وذلك من أجل $1 \leq Ra \leq 10^5$ ومعامل الشكل $L/H = 3; 5; 8; 12$ ، فلاحظت تأثير معامل الشكل على الحقل الديناميكي والحراري أين يتناقصان عند مرور المائع داخل القناة، كما لاحظت وجود نقصان في عدد نوسلت عندما يزيد معامل الشكل [17].

درسا Nawaf H. Saeid and Yusli Yaacob الحمل الحراري الطبيعي للجريان الصفائحي داخل تجويف مربع ثنائي البعد مملوء بالهواء، حيث حرصا درجة حرارة متغيرة جيبيية على جداره الأيسر ودرجة حرارة باردة وثابتة على جداره الأيمن وعزلا كلاً من السقف والأرضية. تمت الدراسة بطريقة عددية بواسطة طريقة الحجم المنتهية وذلك من أجل $10^3 \leq Ra \leq 10^6$ وشبكة 81×81 [18].

فلاحظنا أن:

- * القيمة المتوسطة لعدد نوسلت الثابتة للجدار الساخن ذو درجة حرارة جيبيية أكبر من القيمة المتوسطة لعدد نوسلت الثابتة للجدار البارد.
- * عدد نوسلت المحلي على طول الجدار الساخن يتغير جيبيياً بدلالة تغير درجة حرارة الجدار الساخن.
- * من أجل السعات الكبيرة وقيم عدد طول الموجة لدرجة الحرارة الساخنة للجدار يصبح عدد نوسلت المحلي سالبا وذلك في المنطقة التي تبلغ فيها درجة حرارة المائع أكبر من درجة حرارة ذلك الجدار.
- * أثار السعة وعدد الموجة لدرجة حرارة الجدار الجانبي يعملان على تسخين المائع داخل التجويف المدروس.
- * وجد أن متوسط عدد نوسلت يتغير جيبيياً مع ازدياد عدد الموجة والانتقال الحراري الأعظمي من أجل $k = 0.7$ (عدد النبضات) لجميع قيم عدد رايلي أما في حالة قيم عدد الموجة متماثل فيكون من أجل قيم صغيرة لعدد رايلي.

درسوا E. H. Ridouane et al الحمل الحراري الطبيعي إلى جانب الإشعاع داخل تجويف مربع به هواء حيث فرضوا درجة حرارة ثابتة ساخنة في الجدار السفلي وأخرى باردة في الجدار العلوي

مع عزل الجانبين. اعتمدوا في حلّهم العددي على طريقة الفروق المنتهية وذلك من أجل عدد رايلي $10^3 \leq Ra \leq 2.5 \times 10^6$ وانبعائية السطحية $0 \leq \varepsilon \leq 1$ [19]. فلاحظوا مايلي:

- * في غياب الإشعاع حصلوا على ثلاثة حلول عددية للحالة المستقرة.
- * الجريان أحادي الخلية من نوع S1 مع ذلك فقد تمّ الحصول على تدفقات ثنائية الخلايا من نوع S2 و S3.
- * عند أخذ الإشعاع السطحي بعين الاعتبار، فقد ثبت أنّه هناك تأثير على جودة هذه الحلول، وأيضا فقد وُجدت قيمة حرجة $\varepsilon_c = 0.22$ أين يختفي الحلّ من نوع S3.
- * في حالة الحلّ من نوع S1، القيمة الحرجة لعدد رايلي المحصل عليها و التي تميّز الانتقال إلى الحمل الحراري الطبيعي يقلّ مع الزيادة في ε .
- * النتائج المحصل عليها تثبت إمكانية العبور من الحل للحالة المستقرة إلى الفوضى المنظمة مع الزيادة في ε .
- * الشّروط الإبتدائية S2/S3 تؤدي إلى الإستدامة لعدد رايلي ضمن المجال $[Ra_2, Ra_3]/[Ra_4, Ra_5]$ خارج هذه المجالات توجد حلول مستقرة من النوع S2 و S3، وتكون الحالة التّهائية ذات الحلّ من نوع S1 مستقر إذا كان $Ra < Ra_c$.
- * لقد تمّ العثور على الحلّ من نوع أكثر ملائمة لانتقال الحرارة عبر الحدود الأفقية للتجويف. درسوا Nouredine RETIEL et al الحمل الحراري الطبيعي داخل تجويف نصف أسطواني يمر من خلاله الهواء مزاح عن المستوى الأفقي بزاوية δ تسلّط عليه درجة حرارة ثابتة وساخنة من القاعدة وأخرى باردة وثابتة على جداره العلوي، فاستعملوا طريقة الحجوم المنتهية لحل معادلات الإستمرارية ومعادلة الطّاقة وذلك من أجل $10^3 \leq Ra \leq 10^6$ [20]. فلاحظوا أنّ ميول التّجويف وحتىّ بقيم صغيرة يؤدي إلى عدم استقرار الجريان وحقل الحرارة، إضافة إلى أنّ البنية المتعددة الخلايا تختفي عندما يكون التّجويف أفقي تاركة المكان لخلية أحادية غير متناظرة في مركز التّجويف.
- حلّا Manab Kumar Das et K.Saran Kumar Reddy عدديا الحمل الحراري الطبيعي لمائع داخل تجويف مربع ثنائي البعد ينحرف بزاوية ϕ حيث $\phi = 15^\circ$ ، $\phi = 90^\circ$ من أجل

$10^3 \leq Ra \leq 10^6$ أين فرضا درجة حرارة ثابتة وباردة على جداره الأيمن وأخرى ساخنة على جداره الأيسر مع عزل بقية الجدران [21].

فتوصلا إلى أنه من أجل $Ra=10^3$ يتمّ إنتقال الحرارة عن طريق التوصيل، بينما يطغى الحمل الحراري الطبيعي على الإنتقال الحراري من أجل $Ra < 10^3$ ، أمّا من أجل $Ra > 10^3$ فتوجد نقطة حرجة، كما يؤثر كل من عدد Ra وزاوية الإنحراف على إنتقال الحرارة.

و درس Zarit Rida عدديا الحمل الحراري الطبيعي غير المستقر للهواء داخل تجويف مستطيل يميل عن المستوي الأفقي بزاوية متغيرة ϕ أخذ بذلك على التوالي القيم التالية:

$(0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ)$ ، ولقد فرض درجة حرارة ثابتة وساخنة على جداره الأيسر و أخرى باردة على جداره الأيمن مع عزله بقية الجدران، فاستعمل في حلّه طريقة الفروق المنتهية [22].

فوجد أنه عند $\phi = 0^\circ$: Ra_c من أجل $10^3 < Ra_c < 10^6$ وهناك يتمّ إنتقال الحرارة عن طريق الحمل الحراري الطبيعي ، أمّا عند $0^\circ < \phi < 90^\circ$ فيزداد عدد Nu حتّى يبلغ قيمة عظمى، بينما يتناقص عدد Nu حتّى يبلغ قيمة صغرى عند $\phi = 180^\circ$ فيكون النّظام توصيلا.

فاستخلص أنه من أجل $Ra > 10^5$ يكون إنتقال الحرارة عن طريق الحمل الحراري الطبيعي، بينما يكون النّظام توصيلا من أجل $Ra < 10^4$ وانتقاليا من أجل $10^4 \leq Ra \leq 10^5$.

درسا Yamina Harnane et Mouhamed AFRID عدديا الحمل الحراري الطبيعي ثلاثي الأبعاد لتجويف مكعب به هواء مسخن بدرجة حرارة ثابتة وساخنة في قاعدة المكعب ودرجة حرارة ثابتة وباردة في سقف المكعب مع عزل بقية الجدران وذلك من أجل $5 \times 10^3 \leq Ra \leq 10^5$ مستعملا طريقة الحجوم المنتهية [23].

فلاحظا وجود حلقة غير مستقرة عند $Ra = 5 \times 10^3$ ومتعددة الخلايا مستقرة عندما يرتفع عدد Ra من القيمة 8×10^3 حتّى القيمة 10^5 .

درسا Qi-Hong Deng and Juan-Juan Chang عدديا الحمل الحراري الطبيعي لجريان صفائحي مستقر لتجويف مستطيل ثنائي البعد مملوء بالهواء مع تحريض درجتي حرارة جيبيتين على الجدارين العموديين الجانبيين مع عزل كل من السّقف والأرضية، فاستعملا في دراستهما طريقة الحجوم المنتهية من أجل عدد رايلي $10^3 \leq Ra \leq 10^6$ ونسبة السّعة $\varepsilon = 0-1$ وزاوية ميلان $\phi = 0 - \Pi$ ونسبة الشّكل $AR = 0.25 - 4$ [24].

اهتما بدراسة تأثير العوامل: عدد رايلي Ra والسعة ε وزاوية الميلان ϕ على كل من توزيع درجة الحرارة الجيبية بين الجدارين الأيمن والأيسر، ونسبة الشكل AR من التجويف وتدفق الحرارة للمائع وانتقال الحرارة.

فاستنتجا مايلي:

* تتم الزيادة في إنتقال الحرارة ونسبة السعة من 0 إلى 1 مما يعني أنّ توزيع درجات الحرارة الجيبية تعمل على تحسين نقل الحرارة مقارنة مع حالة التجويف بدرجة حرارة ثابتة أين $\varepsilon = 0$.

* يكون إنتقال الحرارة أسوأ إذا كانت منحنيات درجة الحرارة للجدارين من أجل زاوية ميلان $\phi = 0$ ، بينما يكون النقل الحراري أحسن إذا كانت هذه المنحنيات من أجل زاوية ميلان $\phi = 3\pi/4$.

* اختلاف السعة أو توزيع درجة الحرارة الجيبية في الجدار الجانبي يؤثران على نقل الحرارة في سطح التجويف، بينما لا يكون لهما تأثير على الجانب الآخر.
* من أجل زاوية انحراف $\phi = 0$ ينخفض متوسط عدد نوسلت مع انخفاض نسبة الشكل، وبتزايدان من أجل $\phi = \pi$.

قاموا Djatout.A et al بدراسة عددية للحمل الحراري الطبيعي ذو جريان صفائحي داخل تجويف مربع الشكل مملوء بالهواء، حيث أزاحوا الجسم عن المستوي الأفقي بزاوية α وأخضعوا الجدار الأيمن لدرجة حرارة ثابتة وباردة والجدار الأيسر لدرجة حرارة ثابتة وساخنة وعزلوا كلا من الجدارين السفلي والعلوي وذلك من أجل $10^3 \leq Ra \leq 10^6$ ، ولحلّ معادلات الإستمرارية ومعادلة الطاقة إنتهجوا طريقة الحجوم المنتهية وذلك بواسطة فورترون و فليبيانت [25].

فوجدوا أنّ عدد رايلي يؤثر على نوع الإنتقال الحراري داخل التجويف خاصة من أجل $Ra = 10^4$ أين تبدأ حركة الحمل الحراري الطبيعي و $Ra = 10^6$ أين يطغى الحمل الحراري الطبيعي، فاستخلصوا أنّ الإنتقال الحراري يزداد بزيادة عدد Ra .

أمّا Aiech Hamraui Rebiha فدرست تأثير الشّروط الإبتدائية و عدد Ra على إنتقال الحرارة داخل تجويف مستطيل مملوء تارة بالهواء وتارة أخرى بالماء مزاح بزاوية $\phi = 30^\circ$ ، أين فرضت درجة حرارة ثابتة وساخنة على جداره الأيسر وأخرى باردة على جداره الأيمن مع عزلها بقية الجدران، فاستعملت في حلّها طريقة الفروق المنتهية [26].

فوجدت أنه من أجل $Ra \geq 10^4$ ظهر الحمل الحراري الطبيعي باتجاه الجدارين (البارد والساخن) و التوصيل في وسط التجويف عند الشّرطان البارد والحار، بينما كان توصيلا عند الشرط $(T_f + T_c)/2$ أين سخنا الجداران.

و درست Adjmi Samah الحمل الحراري الطبيعي عدديا و الحالات الفيزيائية التي تصاحبه، لتجويف مستطيل الشكل به هواء أين فرضت على الجانب الأيسر درجة حرارة ساخنة وثابتة وعلى الجانب الأيمن درجة حرارة باردة وثابتة وعزلت بقية الجدران، مستعملة في حلها العددي طريقة الفروق المنتهية، فوجدت النظام حملا حراريا من أجل $Ra \in [10, 10^3]$ عدا عند: $Nu = 1$ فيكون توصيلا، ويتغير النظام إلى الحمل الدوري من أجل $Ra = 2.68 \times 10^5$ وإلى شبه دوري من أجل $Ra = 4.34 \times 10^5$ [27].

قاموا Abdelkader Boutra et al بدراسة عددية للحمل الحراري الطبيعي الصّفاحي غير مستقر لمائع بنغام ذو خاصية $Pr = 1; 7; 10; 20$ داخل تجويف مربع الشكل ثنائي البعد حيث عزلوا الجدارين الأفقيين وحرصوا على الجدارين العموديين درجتي حرارة ثابتة ومختلفة، وقد تمت الدراسة من أجل $Ra = 10^3; 10^4; 5 \times 10^5; 10^6$ [28].

ثم قاموا بمقارنة نتائجهم المحصل عليها مع نتائج كل من Turan.O و De Vahl Davis G فوجدوها متقاربة أين تكون مواصفات الإنتقال الحراري المقرون بتغيرات عدد رايلي وعدد بروننل وعدد بنغام.

بحثت خلفي فريدة انتقال الحرارة بالحمل الحراري الطبيعي داخل تجويف مربع المقطع به هواء. ففرضت درجة حرارة متغيرة ذات تسخين جيبي في نصفه العلوي للوجه الموجه نحو الجنوب وقامت بتبريد نصفه السفلي للوجه المقابل، وذلك من أجل $10^4 \leq Ra \leq 10^6$ فاختارت الخطوة الزمنية $dt = 10^{-5}$ والشبكة 61×61 [29].

فأظهرت تأثير السعة التّحريرية والدور على المقدار الفيزيائي Nu_{fr} . ثم توصلت إلى أنّ استجابة النظام كانت متباينة بين دورية وشبه دورية. ويكون التسخين الجيبي في أحسن صورة له في حالة :

* الدور $\tau = 0.01$ و $\tau = 0.1$ والسعة التّحريرية $0.1 \leq A \leq 0.6$ من أجل $Ra = 10^6$.

* الدور $\tau = 1.0$ والسعة التّحريرية $0.1 \leq A \leq 0.3$ من أجل $Ra = 10^5$ و $Ra = 10^4$.

أما التبريد فيكون في أحسن صورة له في حالة :

- * الدور $\tau = 0.01$ و $\tau = 0.1$ والسعة التّحريضية $0.6 \leq A \leq 1.0$ من أجل $Ra = 10^6$.
- * الدور $\tau = 1.0$ والسعة التّحريضية $0.3 \leq A \leq 1.0$ من أجل $Ra = 10^5$ و $Ra = 10^4$.

قام Boukaraa Moustafa بمحاكاة عددية للحمل الحراري الطبيعي داخل تجويف متوازي السطوح ثلاثي الأبعاد مملوء بالهواء، مزاح عن المستوي الأفقي بزاوية $0^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$ ، فسخن جانبه الأيمن بدرجة حرارة ساخنة وثابتة وبرّد جانبه الأيسر بدرجة حرارة باردة وثابتة وعزل بقية الجدران من أجل $10^3 \leq Ra \leq 10^7$ [30]. فتوصل إلى أنّ الإنتقال الحراري يزداد بزيادة عدد راييلي من أجل زاوية الميلان $\varphi = 0^\circ$ ، كما أنّ تأثير معامل الشّكل من أجل $Ra = 10^5$ معتبر إذ تمثّل 21% من أجل $\varphi = 0^\circ$ و 36% من أجل $\varphi = 45^\circ$ ، فاستخلص أنّ خاصية ثلاثية الأبعاد للجريان مهمّة.

قام Boudjeniba Bilal بدراسة عددية للحمل الحراري الطبيعي لمائعين الأول الزئبق ذو الخاصية $Pr = 0.025$ من أجل $10 \leq Ra \leq 10^4$ والثاني الهواء ذو الخاصية $Pr = 0.71$ من أجل $10 \leq Ra \leq 10^5$ داخل تجويف مستطيل من أجل معامل الشّكل $L/H = 1,2,3$ حيث تمت المحاكاة على ما يسمى بتجربة راييلي- برناد أين عزل كلّاً من الجانبين وسخن الجدار السفلي بدرجة حرارة ساخنة وثابتة و برّد الجدار العلوي بدرجة حرارة باردة وثابتة، فاستعمل طريقة الفروق المنتهية باستخدام كلّ من فورترون وتاكلوط من أجل شبكة 41×41 [31].

فلاحظ ظهور عدم الإستقرار داخل التّجوف من أجل $Ra < 10^3$ أين يكون نوع الإنتقال الحراري هو التوصيل أمّا من أجل $Ra > 10^3$ فالحمل الحراري الطّبيعي هو المهيمن، فاستخلص أنّه كلما زاد معامل الشّكل تمّ التّحسين في حركة الحمل الحراري الطّبيعي كما أنّ طبيعة المائع تؤثر على الحالة الحرارية والديناميكية لهذا المائع.

ووجد تصحيح تجريبي يربط بين Nu_{moy} وعدد Ra ، فمن أجل معامل الشّكل يساوي:

$$* \text{ 1 لدينا: } Nu_{moy} = 0.279 \times Ra^{0.331}$$

$$* \text{ 2 لدينا: } Nu_{moy} = 0.417 \times Ra^{0.287}$$

$$* \text{ 3 لدينا: } Nu_{moy} = 0.378 \times Ra^{0.291}$$

درسوا Hamdi Moumni et al عددياً في هذا العمل الحمل الحراري الطبيعي داخل تجويف ثنائي البعد غير منته مملوء بالهواء حيث سخن الجهة السفلية بدرجة حرارة ساخنة وثابتة وبرّد الجهة العلوية بدرجة حرارة باردة وثابتة من أجل $Ra = 10^4$ وشبكة 64×64 [32].

فوجدوا تصحيحاً بين المتوسط نوسلت وعدد رايلي يتمثل في $Nu_{moy} = 7.945 \times 10^{-4} \times Ra - 0.35671$ فتوصلوا إلى أنّ عدد رايلي الحرج يتعلق بنسبة شكل التجويف وطبيعة المائع. اهتموا Vincent Sambou et al بدراسة الانتقال الحراري ذو بعدين داخل تجويف مجزأ مسخن بدرجة حرارة ثابتة وساخنة في جداره الأيمن و أخرى باردة ومتغيرة في جداره الأيسر [33]. فتوصلوا إلى تأثير الدور على تغيرات درجة الحرارة في الجهة الباردة من التجويف، كما وجدوا تواتر التجاوب للحمل الحراري الطبيعي والإشعاعي يتعلق بوضعية الجهة التي تخضع لاضطرابات إهتزازية.

2. الدراسة النظرية

2.1 النموذج الفيزيائي:

نحاكي الحمل الحراري الطبيعي لمائع (هواء) داخل تجويف متوازي المستطيلات ذو مقطع مربع $1m \times 1m$ في حالات أربع:

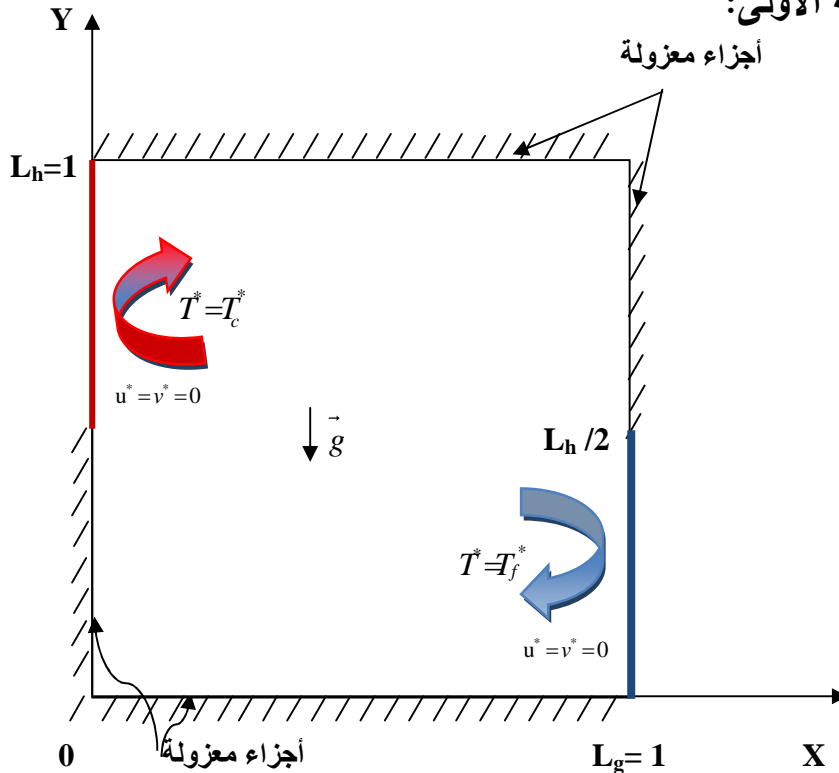
الحالة الأولى: نعرض النصف العلوي للجدار الأيسر بدرجة حرارة ساخنة بينما نعرض النصف السفلي للجدار الأيمن بدرجة حرارة باردة مع عزل أجزائه الباقية.

الحالة الثانية: نعرض النصف السفلي للجدار الأيسر بدرجة حرارة ساخنة بينما نعرض النصف السفلي من الجدار الأيمن بدرجة حرارة باردة مع عزل أجزائه الباقية.

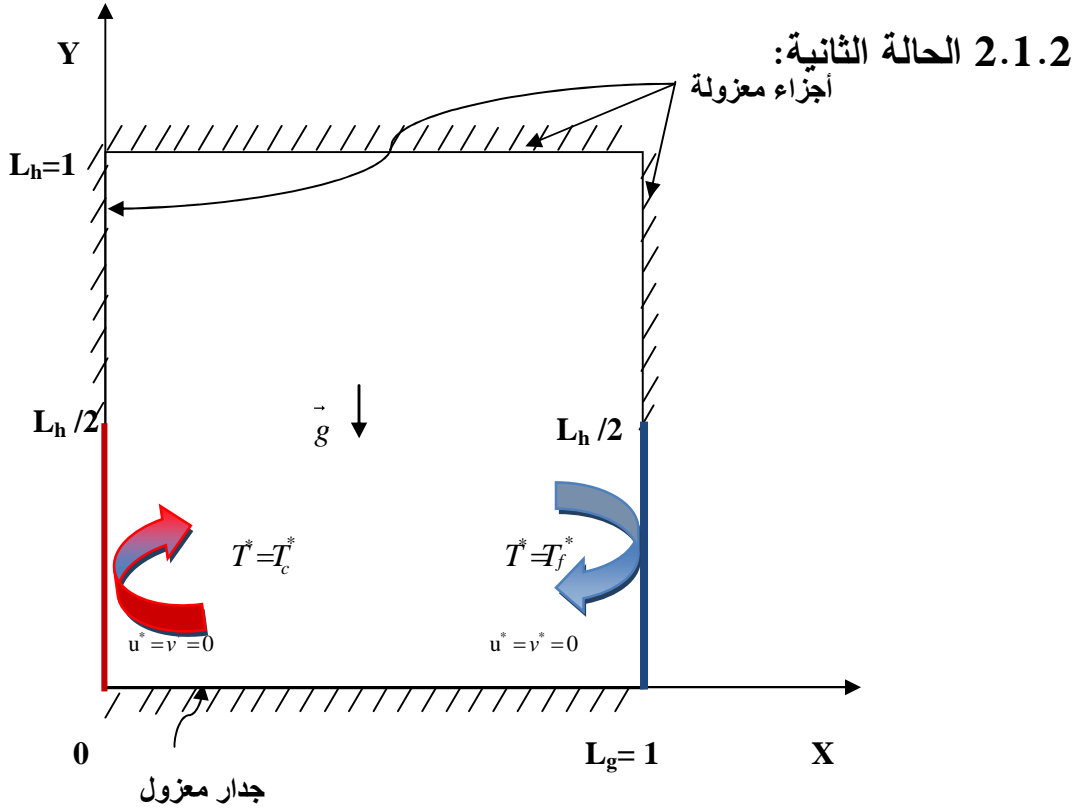
الحالة الثالثة: نعرض النصف السفلي للجدار الأيسر لتدفق حراري ثابت بينما نعرض النصف السفلي من الجدار الأيمن بدرجة حرارة باردة مع عزل أجزائه الباقية.

الحالة الرابعة: نعرض النصف العلوي للجدار الأيسر بدرجة حرارة تحريضية ذات إشارة مربعة بينما نعرض النصف السفلي من الجدار الأيمن بدرجة حرارة باردة مع عزل أجزائه الباقية.

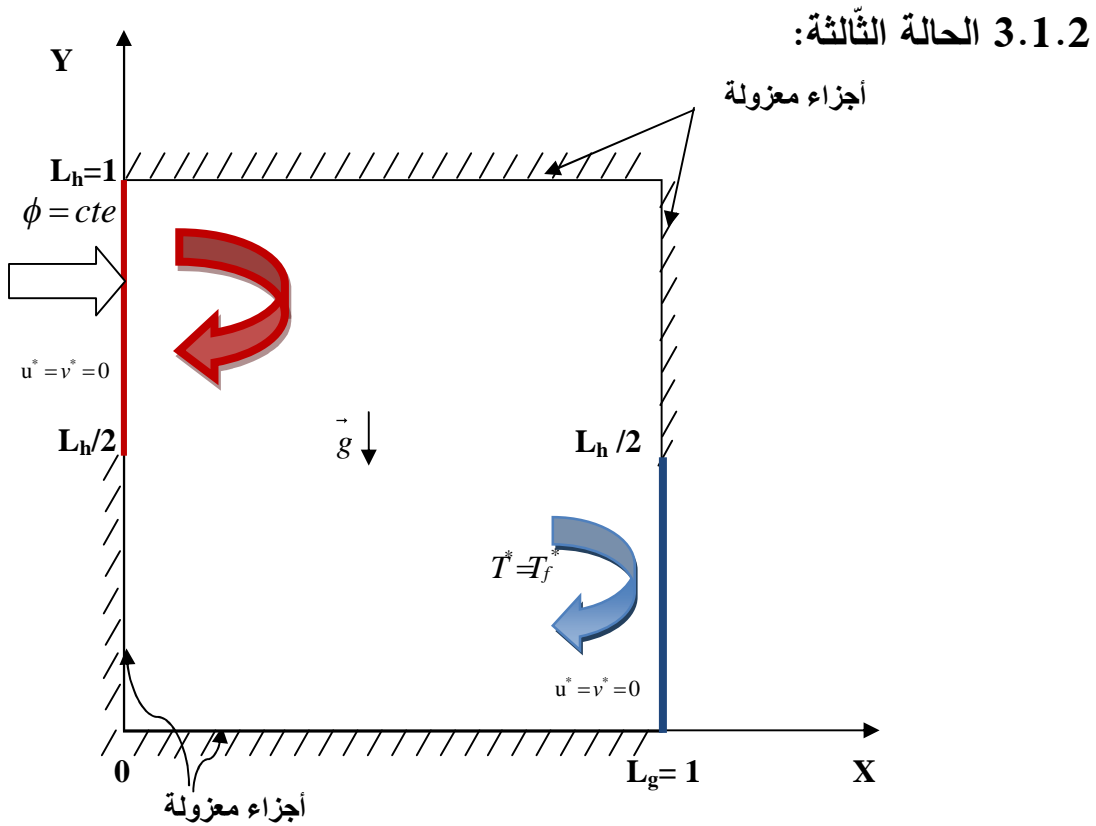
1.1.2 الحالة الأولى:



الشكل (2.1): تمثيل النموذج الفيزيائي للحالة الأولى

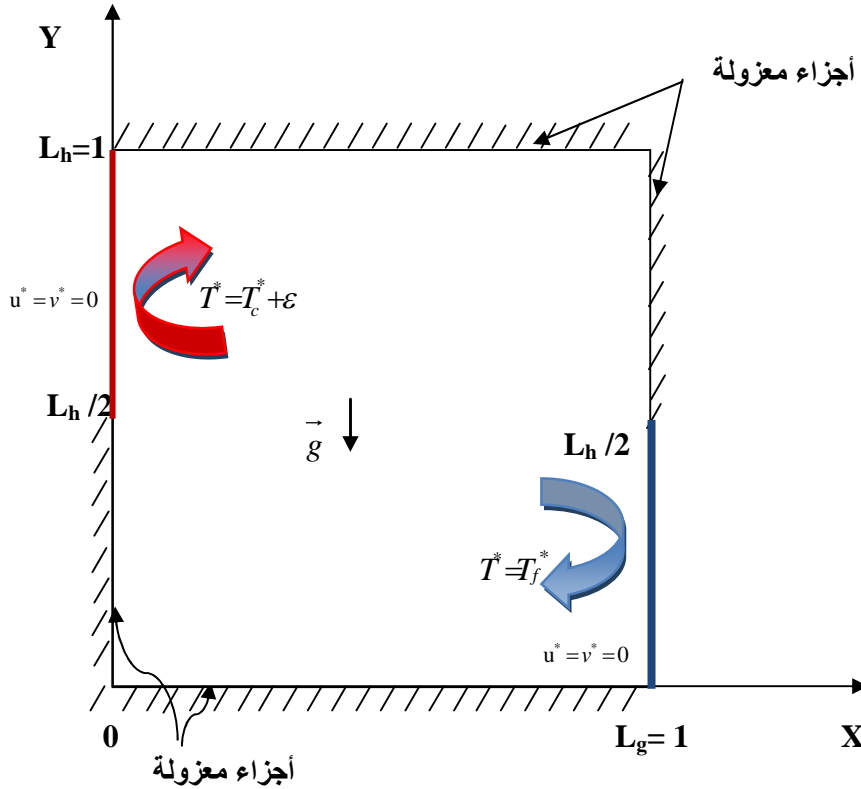


الشكل (2.2): تمثيل النموذج الفيزيائي للحالة الثانية



الشكل (2.3): تمثيل النموذج الفيزيائي للحالة الثالثة

4.1.2 الحالة الرابعة:



الشكل (2.4): تمثيل النموذج الفيزيائي للحالة الرابعة

2.2 فرضيات التبسيط الأساسية :

نفترض في دراستنا ما يلي:

- نفترض وجود علاقة خطية بين إجهاد القصّ وسرعة الجريان فالمائع نيوتوني.
- نعتبر الجريان دائم وثنائي البعد مع إعتبار الجريان صفائحي (انزلاق المائع على شكل طبقات غير متداخلة موازية لجدران التجويف).
- النظام يتجه دوما نحو الإستقرار.
- نهمل إنتقال الحرارة عن طريق الإشعاع الشمسي داخل التجويف أو الناتج عن منابع داخلية.
- نهمل عمل القوى الضاغطة.
- نهمل تبديد الطاقة تحت تأثير اللزوجة، والذي يمثل تحوّل الطاقة الحركية إلى حرارة.

• نفترض أن الجدران ذات سمك ضعيف أي أننا نهمل انتقال الحرارة عن طريق التوصيل داخل سمك الجدران.

• المائع غير قابل للانضغاط، الخواص الفيزيائية للمائع ثابتة ماعدا كتلته الحجمية فهي متغيرة بدلالة الحرارة وتعطى بتقريبات بوسنسك :

$$\rho(T^*) = \rho_0 [1 - \beta(T^* - T_f)] \quad (2.1)$$

أين:

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad (2.2)$$

β : معامل التمدد الحراري

يؤخذ كل من معامل الشكل ودرجة الحرارة المتوسطة بـ:

$$\delta = \frac{L_h}{L_g} = 1 \quad (2.3)$$

$$T_0 = \frac{T_c + T_f}{2} \quad (2.4)$$

2.3 الصياغة الرياضية :

1.3.2 الصياغة الشعاعية

نعتبر الصياغة الشعاعية لمعادلة إنحفاظ الكتلة ومعادلة الحركة ومعادلة إنحفاظ الطاقة كالآتي:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t^*} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P + \nu \vec{\nabla}^2 \vec{V} - \vec{g} \beta (T^* - T_f) \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) T^* = \frac{\lambda}{\rho C_p} \vec{\nabla}^2 T^* \quad (2.7)$$

2.3.2 الإسقاط على المحاور :

← معادلة إنحفاظ الكتلة:

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad (2.8)$$

← معادلة الحركة :

✓ وفق المحور (ox) :

$$\frac{\partial u^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x^*} + v^* \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right) \quad (2.9)$$

✓ وفق المحور (oy) :

$$\frac{\partial v^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y^*} + v^* \left(\frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right) - g\beta(T^* - T_f) \quad (2.10)$$

← معادلة إنحفاظ الطاقة:

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial T^*}{\partial y^*} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} \right) \quad (2.11)$$

3.3.2 صيغة الإعصار - دوال التيار :

تعطى عبارة الإعصار بـ:

$$\vec{\omega}^* = \overrightarrow{RotV} = \left(\frac{\partial v^*}{\partial x^*} - \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right) \vec{k} \quad (2.12)$$

أين $\vec{k} \perp$ المستوي (O,x,y)

تعرف دالة التيار ψ^* بـ:

$$u^* = \frac{\partial \psi^*}{\partial y^*}, \quad v^* = -\frac{\partial \psi^*}{\partial x^*} \quad (2.13)$$

حيث u^*, v^* مركبتا السرعة وفق ox^* و oy^* .

$$\frac{\partial \omega^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial \omega^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial \omega^*}{\partial y^*} = v^* \left(\frac{\partial^2 \omega^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 \omega^*}{\partial y^{*2}} \right) + g\beta \frac{\partial T^*}{\partial x^*} \quad (2.14)$$

2.4 إختيار الشّروط الإبتدائية والشّروط الحدية :

1.4.2 الشّروط الإبتدائية :

عند $t^* = 0$

$$0 \leq x^* \leq L_g, 0 \leq y^* \leq L_h, T^* = T_0 = \frac{T_f + T_c}{2} = 0.5 \quad (2.15)$$

2.4.2 الشّروط الحدية :

* الوجه العلوي:

$$0 \leq x^* \leq L_g, \quad y^* = L_h \left\{ \begin{array}{l} u^* = v^* = 0 \\ \frac{\partial T^*}{\partial y^*} = 0 \quad (\text{كظوم}) \end{array} \right. \quad (2.16)$$

* الوجه السفلي:

$$0 \leq x^* \leq L_g, \quad y^* = 0 \left\{ \begin{array}{l} u^* = v^* = 0 \\ \frac{\partial T^*}{\partial y^*} = 0 \quad (\text{كظوم}) \end{array} \right. \quad (2.17)$$

* الوجه الأيمن:

$$x^* = L_g \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq y^* \leq L_h/2, \quad T^* = T_f^* \quad (2.18) \\ L_h/2 \leq y^* \leq L_h, \quad \frac{\partial T^*}{\partial x^*} = 0 \quad (2.19) \end{array} \right.$$

* الوجه الموجه باتجاه الجنوب:

$$x^* = 0 \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq y^* \leq L_h / 2 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T^*}{\partial x^*} = 0 \quad \text{الحالة الأولى (2.20)} \\ T^* = T_c^* \quad \text{الحالة الثانية (2.21)} \end{array} \right. \\ \\ L_h / 2 \leq y^* \leq L_h \left\{ \begin{array}{l} T^* = T_c^* \quad \text{الحالة الأولى (2.22)} \\ \frac{\partial T^*}{\partial x^*} = 0 \quad \text{الحالة الثانية (2.23)} \\ \frac{\partial T^*}{\partial x^*} = \frac{\Phi}{\lambda} \quad \text{الحالة الثالثة (2.24)} \\ T^* = T_c \pm \varepsilon \quad \text{الحالة الرابعة (2.25)} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

2.5 المعادلات اللابعديّة :

لدينا المتغيرات اللابعديّة التالية:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a}, x = \frac{x^*}{L_h}, y = \frac{y^*}{L_h}, t = \frac{t^* a}{L_h^2}, u = \frac{u^* L_h}{a}, v = \frac{v^* L_h}{a}, \omega = \frac{\omega^* L_h^2}{a},$$

$$T = \frac{T^* - T_f}{\Delta T} \text{ (avec } \Delta T = T_c - T_f \text{ ou } \Delta T = \frac{\Phi}{\lambda} L_h), Ra = \frac{g \beta L_h^3}{\nu a} \Delta T$$

(2.26)

◀ معادلة الحركة:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial P}{\partial x} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial P}{\partial y} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - Ra \cdot \text{Pr} T \end{array} \right. \quad (2.27)$$

◀ معادلة إنحفاظ الطاقة:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2.28)$$

كما تكتب على الشكل:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uT - \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(vT - \frac{\partial T}{\partial y}) = 0 \quad (2.29)$$

◀ معادلة الإعصار:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = RaPr \frac{\partial T}{\partial x} + Pr \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \quad (2.30)$$

وتكتب على الشكل:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u\omega - Pr \frac{\partial \omega}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(v\omega - Pr \frac{\partial \omega}{\partial y}) = Ra.Pr \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.31)$$

◀ معادلة التيارات:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega \quad (2.32)$$

◀ معادلة مركبات السرعة:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (2.33)$$

من أجل الشروط الابتدائية والشروط الحدية لدينا:

عند اللحظة الزمنية $t = 0$:

$$u=v=\omega=\psi=0, \quad T=0.5 \quad (2.34)$$

* الوجه العلوي:

$$0 \leq x \leq 1, \quad y = 1 \quad \left\{ \begin{array}{l} u = v = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \end{array} \right. \quad (2.35)$$

$$-\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \omega \quad (2.36)$$

* الوجه السفلي:

$$0 \leq x \leq 1, \quad y = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} u = v = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \\ -\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \omega \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (2.37) \\ (2.38) \end{array}$$

* الوجه الأيمن:

$$0 \leq y \leq 1/2, \quad x = 1 \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq y \leq 1/2, T = 0 \\ 1/2 \leq y \leq 1, \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \\ -\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \omega \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (2.39) \\ (2.40) \\ (2.41) \end{array}$$

* الوجه الموجه باتجاه الجنوب:

$$x = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq y \leq 1/2 \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{الحالة الأولى} \\ T = 1 \quad \text{الحالة الثانية} \end{array} \right. \\ -\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \omega \\ 1/2 \leq y \leq 1 \quad \left\{ \begin{array}{l} T = 1 \quad \text{الحالة الأولى} \\ \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{الحالة الثانية} \\ \frac{\partial T}{\partial x} = 1 \quad \text{الحالة الثالثة} \\ T = 1 \pm \varepsilon \quad \text{الحالة الرابعة} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (2.42) \\ (2.43) \\ (2.44) \\ (2.45) \\ (2.46) \\ (2.47) \\ (2.48) \end{array}$$

من أجل التحريض النبضي الموجود في الحالة الرابعة تعطى العبارة النبضية كما يلي:

$$T = 1 \quad (2.49)$$

من أجل:

$$x = 1, 0.5 \leq y \leq 1$$

$$T = 1 + \varepsilon \quad (2.50)$$

من أجل :

$$h\tau \leq t \leq (h + \frac{1}{2})\tau$$

$$T = 1 - \varepsilon \quad (2.51)$$

من أجل:

$$(h + \frac{1}{2})\tau \leq t \leq (h + 1)\tau$$

2.6 حساب إنتقال الحرارة:

عدد نوسلت هو عدد لابيدي خاص بقياس معامل تبادل الحرارة عن طريق الحمل الحراري، حيث يمثل نسبة التدفق الحراري للحمل على التدفق الحراري للتوصيل.

$$Nu = \frac{Q_{(convection + conduction)}}{Q_{conduction}} \quad (2.52)$$

تعطى عبارة Nu المتعلقة بالجزء البارد بالنسبة للحالات الأربع بـ:

$$Nu_f = -\frac{L_g}{L_h} \int_0^{L_h/2} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L_h/2} dy \quad (2.53)$$

تعطى عبارة Nu المتعلقة بالجزء الساخن بالنسبة للحالة الأولى للتجوف بـ:

$$Nu_c = -\frac{L_g}{L_h} \int_{L_h/2}^{L_h} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L_h/2} dy \quad (2.54)$$

أما بالنسبة للحالة الثالثة فتعطى بالعبارة التالية:

$$Nu_c = \frac{\phi}{T_c - T_f} \times \frac{L_h}{\lambda} \quad (2.55)$$

أما بالنسبة لعبارتي Nu و \overline{Nu} المتعلقين بالجزء الساخن للتجوف في الحالة الثانية والرابعة فتعطين بالعلاقتين:

$$Nu_c = -\frac{L_g}{L_h} \int_0^{L_h/2} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L_h/2} dy \quad (2.56)$$

$$\overline{Nu} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} Nu(t) dt \quad (2.57)$$

3. النموذج العددي:

الصياغة العددية للمعادلات، و الشروط الحدية تعالج بطريقة الفروق المنتهية.

الشبكة: هي هيكلية شبكية ترتبط فيها العقد بشكل مباشر أو غير مباشر .

نستعمل شبكة مكونة من :

الخطوتان Δx ، Δy تعرفان كما يلي:

$$\Delta y = \frac{L_h}{N_j - 1} \quad , \quad \Delta x = \frac{L_g}{N_i - 1}$$

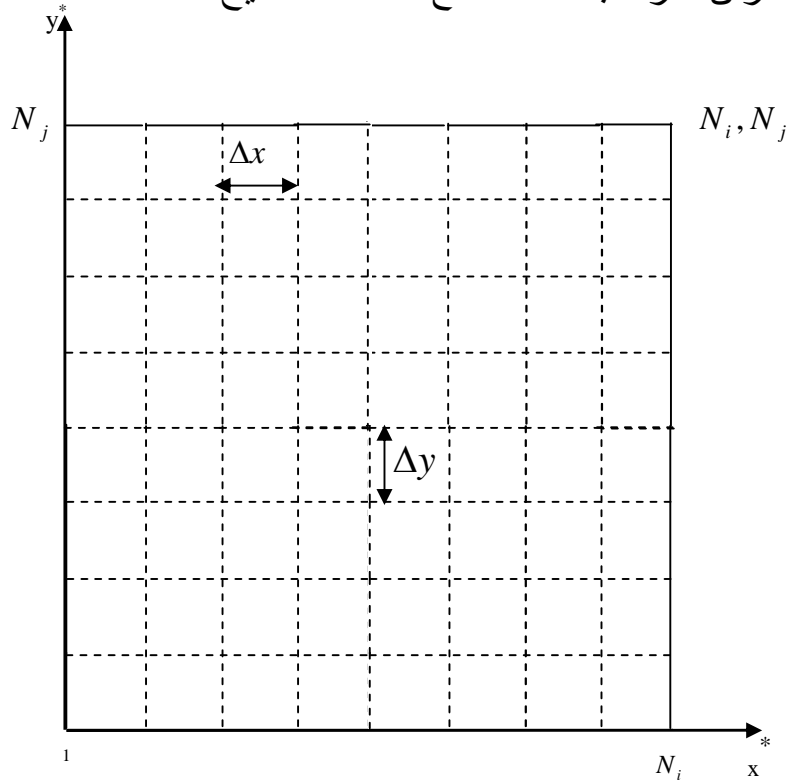
وفق : O_y, O_x :

والموضعين y^*, x^* هما:

$$\cdot \text{مع } i = 1, 2, \dots, N_i \quad x^* = (i-1)\Delta x$$

$$\cdot \text{مع } j = 1, 2, \dots, N_j \quad y^* = (j-1)\Delta y$$

الخطوة في الزمن تعرف بـ: $t = k\Delta t$ مع k عدد صحيح.



الشكل (3.1): تمثيل الشبكة

3.1 المعالجة العددية لمعادلة الطاقة: نستعمل الطريقة الضمنية للإتجاهات المتتوية في

المعالجة العددية لمعادلة الطاقة.

نطبق طريقة الفروق المنتهية على المعادلة (2.29) .

◀ النصف الأول للخطوة الزمنية:

$$T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\Delta t} + \frac{2}{\Delta x^2} \right) + T_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} \left(\frac{u_{i+1,j}^k}{2\Delta x} - \frac{1}{\Delta x^2} \right) + T_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}} \left(-\frac{u_{i-1,j}^k}{2\Delta x} - \frac{1}{\Delta x^2} \right) = \quad (3.1)$$

$$T_{i,j}^k \left(\frac{2}{\Delta t} - \frac{2}{\Delta y^2} \right) + T_{i,j-1}^k \left(\frac{v_{i,j-1}^k}{2\Delta y} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) + T_{i,j+1}^k \left(-\frac{v_{i,j+1}^k}{2\Delta y} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)$$

◀ النصف الثاني للخطوة الزمنية:

$$T_{i,j-1}^{k+1} \left(-\frac{v_{i,j-1}^k}{2\Delta y} - \frac{1}{\Delta y^2} \right) + T_{i,j}^{k+1} \left(-\frac{2}{\Delta t} + \frac{2}{\Delta y^2} \right) + T_{i,j+1}^{k+1} \left(\frac{v_{i,j+1}^k}{2\Delta y} - \frac{1}{\Delta y^2} \right) = T_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}} \left(\frac{u_{i-1,j}^k}{2\Delta x} + \frac{1}{\Delta x^2} \right) + T_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\Delta t} - \frac{1}{\Delta x^2} \right) + \quad (3.2)$$

$$+ T_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} \left(-\frac{u_{i+1,j}^k}{2\Delta x} + \frac{1}{\Delta x^2} \right)$$

3.2 المعالجة العددية لمعادلة الإعصار: نستعمل الطريقة الضمنية للإتجاهات المتتوية في

المعالجة العددية لمعادلة الإعصار.

نطبق طريقة الفروق المنتهية على المعادلة (2.31) .

◀ النصف الأول للخطوة الزمنية:

$$\omega_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}} \left(-\frac{u_{i-1,j}^k}{2\Delta x} - \frac{\text{Pr}}{\Delta x^2} \right) + \omega_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\Delta t} + \frac{2\text{Pr}}{\Delta x^2} \right) + \omega_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} \left(\frac{u_{i+1,j}^k}{2\Delta x} - \frac{\text{Pr}}{\Delta x^2} \right) = \quad (3.3)$$

$$\omega_{i,j-1}^k \left(\frac{v_{i,j-1}^k}{2\Delta y} + \frac{\text{Pr}}{\Delta y^2} \right) + \omega_{i,j}^k \left(\frac{2}{\Delta t} - \frac{2\text{Pr}}{\Delta y^2} \right) + \omega_{i,j+1}^k \left(-\frac{v_{i,j+1}^k}{2\Delta y} + \frac{\text{Pr}}{\Delta y^2} \right) + Ra \cdot \text{Pr} \frac{T_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - T_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}}}{2\Delta x}$$

◀ النصف الثاني من الخطوة الزمنية:

$$\omega_{i,j-1}^{k+1} \left(-\frac{v_{i,j-1}^k}{2\Delta y} - \frac{\text{Pr}}{\Delta y^2} \right) + \omega_{i,j}^{k+1} \left(\frac{2}{\Delta t} + \frac{2\text{Pr}}{\Delta y^2} \right) + \omega_{i,j+1}^{k+1} \left(\frac{v_{i,j+1}^k}{2\Delta y} - \frac{\text{Pr}}{\Delta y^2} \right) = \omega_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}} \left(\frac{u_{i-1,j}^k}{2\Delta x} + \frac{\text{Pr}}{\Delta x^2} \right) + \omega_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\Delta t} - \frac{2\text{Pr}}{\Delta x^2} \right) + \quad (3.4)$$

$$\omega_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} \left(-\frac{u_{i+1,j}^k}{2\Delta x} + \frac{\text{Pr}}{\Delta x^2} \right) + Ra \text{Pr} \frac{T_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - T_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}}}{2\Delta x}$$

3.3 المعالجة العددية لمعادلة بواسون: نستعمل الطريقة فوق الإسترخاء المتعاقب في المعالجة العددية لمعادلة بواسون.

1.3.3 معادلة التيار: نقوم بتطبيق طريقة الفروق المنتهية على المعادلة (2.32) نجد:

$$\frac{\psi_{i+1,j} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{\psi_{i,j+1} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i,j-1}}{\Delta y^2} = -\omega_{i,j} \quad (3.5)$$

$$\psi_{i,j} = \frac{1}{2(1 + \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2})} (\psi_{i+1,j} + \psi_{i-1,j} + \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2} \psi_{i,j+1} + \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2} \psi_{i,j-1} + \Delta x^2 \omega_{i,j}) \quad (3.6)$$

الشكل العام:

$$\psi_{i,j}^{p+1} = \frac{1}{2(1 + \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2})} (\psi_{i+1,j}^p - \psi_{i-1,j}^p - \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2} \psi_{i,j+1}^p - \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2} \psi_{i,j-1}^p - \Delta x^2 \omega_{i,j}) \quad (3.7)$$

بالاعتماد على:

$$\psi_{i,j}^{p+1} = (1 - \gamma) \psi_{i,j}^p + \gamma \psi_{eval\ i,j}^{p+1} \quad (3.8)$$

نجد:

$$\psi_{i,j}^{p+1} = \psi_{i,j}^p + \frac{\gamma}{2(1 + \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2})} ((\psi_{i+1,j}^p - \psi_{i-1,j}^p - \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2} \psi_{i,j+1}^p - \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2} \psi_{i,j-1}^p - \Delta x^2 \omega_{i,j}) - 2(1 + \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2}) \psi_{i,j}^p) \quad (3.9)$$

أين: $1 < \gamma < 2$ (معامل الإسترخاء).

مع:

$$\gamma_{opt} = \frac{2(1 - (1 - \zeta)^2)}{\zeta} \quad (3.10)$$

$$\zeta = \frac{\cos(\frac{\Pi}{N_i - 1}) + (\frac{\Delta x}{\Delta y})^2 \cos(\frac{\Pi}{N_j - 1})}{1 + (\frac{\Delta x}{\Delta y})^2} \quad (3.11)$$

4.3 مركبتا السرعة:

$$\begin{cases} u_{i,j}^k = \frac{\psi_{i,j+1}^k - \psi_{i,j-1}^k}{2 \Delta y} \\ v_{i,j}^k = - \frac{\psi_{i+1,j}^k - \psi_{i-1,j}^k}{2 \Delta x} \end{cases} \quad (3.12)$$

5.3 توزيع الشروط الابتدائية والحدية:

✓ الشروط الابتدائية:

$$\begin{cases} u_{1,1}^k = v_{1,1}^k = \psi_{1,1}^k = 0 \quad \forall k \\ u_{1,j}^k = v_{1,j}^k = \psi_{1,j}^k = w_{1,j}^k = 0 \quad 1 \leq j \leq N_j \quad \forall k \\ u_{i,1}^k = v_{i,1}^k = \psi_{i,1}^k = w_{i,1}^k = 0 \quad 1 \leq i \leq N_i \quad \forall k \\ u_{N_i,j}^k = v_{N_i,j}^k = \psi_{N_i,j}^k = w_{N_i,j}^k = 0 \quad 1 \leq j \leq N_j \quad \forall k \\ u_{i,N_j}^k = v_{i,N_j}^k = \psi_{i,N_j}^k = w_{i,N_j}^k = 0 \quad 1 \leq i \leq N_i \quad \forall k \\ T_{i,j}^k = 0.5 \quad 2 \leq i \leq N_i - 1, \quad 1 \leq j \leq N_j \quad \forall k \end{cases} \quad (3.13)$$

✓ الشروط الحدية:

* الجدار الساخن:

تعطى عبارة T للحالة الأولى والحالة الثالثة والحالة الرابعة بالعلاقة:

$$T_{1,j}^k = 1 \quad \frac{N_j + 1}{2} \leq j \leq N_j \quad \forall k \quad (3.14)$$

تعطى عبارة T للحالة الثانية بالعلاقة:

$$T_{1,j}^k = 1 \quad 1 \leq j \leq \frac{N_j + 1}{2} \quad \forall k \quad (3.15)$$

* الجدار البارد:

$$T_{N_i,j}^k = 0 \quad 1 \leq j \leq \frac{N_j + 1}{2} \quad \forall k \quad (3.16)$$

✓ درجة الحرارة على الجدران المعزولة:

* الجدار السفلي:

$$T_{i,1}^k = \frac{4T_{i,2}^k - T_{i,3}^k}{3} \quad 2 \leq i \leq N_i - 1 \quad \forall k \quad (3.17)$$

* الجدار العلوي:

$$T_{i,N_j}^k = \frac{4T_{i,N_{j-1}}^k - T_{i,N_{j-2}}^k}{3} \quad 2 \leq i \leq N_i - 1 \quad \forall k \quad (3.18)$$

* الجدار الأيسر :

تعطى عبارة T للحالة الأولى والحالة الثالثة والحالة الرابعة بالعلاقة:

$$T_{1,j}^k = \frac{4T_{2,j}^k - T_{3,j}^k}{3} \quad 2 \leq j \leq \frac{N_j + 1}{2} - 1 \quad \forall k \quad (3.19)$$

تعطى عبارة T للحالة الثانية بالعلاقة:

$$T_{1,j}^k = \frac{4T_{2,j}^k - T_{3,j}^k}{3} \quad \frac{N_j + 1}{2} + 1 \leq j \leq N_j \quad \forall k \quad (3.20)$$

* الجدار الأيمن:

$$T_{N_i,j}^k = \frac{4T_{N_{i-1},j}^k - T_{N_{i-2},j}^k}{3} \quad \frac{N_j + 1}{2} + 1 \leq j \leq N_j \quad \forall k \quad (3.21)$$

تعطى الشروط الحدية للإعصار عبر الجدران حسب شروط وودس كما يلي:

* الجدار الساخن:

$$w_{1,j} = \frac{-3\psi_{2,j} - w_{3,j}}{\Delta x^2} \quad \frac{N_j + 1}{2} + 1 \leq j \leq N_j - 1 \quad (3.22)$$

* الجدار البارد:

$$w_{N_i,j} = \frac{-3\psi_{N_{i-1},j} - w_{N_{i-1},j}}{\Delta x^2} \quad 2 \leq j \leq \frac{N_j + 1}{2} - 1 \quad (3.23)$$

* الجدار السفلي المعزول:

$$w_{i,1} = \frac{-3\psi_{i,2} - w_{i,3}}{\Delta y^2} \quad 2 \leq i \leq N_i - 1 \quad (3.24)$$

* الجدار العلوي المعزول:

$$w_{i,N_j} = \frac{-3\psi_{i,N_{j-1}} - w_{i,N_{j-1}}}{\Delta y^2} \quad 2 \leq i \leq N_i - 1 \quad (3.25)$$

على الزوايا:

$$w_{1,1} = \frac{1}{2}(2w_{2,1} - w_{3,1} + 2w_{1,2} - w_{1,3}) \quad i = 1, j = 1 \quad (3.26)$$

$$w_{N_i,1} = \frac{1}{2}(2w_{N_{i,2}} - w_{N_{i,3}} + 2w_{N_{i-1,1}} - w_{N_{i-2,1}}) \quad i = N_i, j = 1 \quad (3.27)$$

$$w_{1,N_j} = \frac{1}{2}(2w_{2,N_j} - w_{3,N_j} + 2w_{1,N_{j-1}} - w_{1,N_{j-2}}) \quad i = 1, j = N_j \quad (3.28)$$

$$w_{N_i,N_j} = \frac{1}{2}(2w_{N_i,N_{j-1}} - w_{N_i,N_{j-2}} + 2w_{N_{i-1},N_j} - w_{N_{i-2},N_j}) \quad i = N_i, j = N_j \quad (3.29)$$

6.3 نشر عدد نوسلت:

$$Nu = \int_0^y (uT - \frac{\partial T}{\partial x})_x dy \quad (3.30)$$

* على الجدار البارد:

$$Nu_{CD} = \int_0^{L_h/2} (-\frac{\partial T}{\partial x})_{L_g} dy \quad (3.31)$$

* على الجدار الساخن:

تعطى عبارة Nu_{AB} للحالة الأولى والحالة الثالثة والحالة الرابعة بالعلاقة:

$$Nu_{AB} = \int_{L_h/2}^{L_h} (-\frac{\partial T}{\partial x})_0 dy \quad (3.32)$$

تعطى عبارة Nu_{AB} للحالة الثانية بالعلاقة:

$$Nu_{AB} = \int_0^{L_h/2} (-\frac{\partial T}{\partial x})_0 dy \quad (3.33)$$

لحساب $\frac{\partial T}{\partial x}$ نستعمل عبارة تايلور من الدرجة الثانية لثلاث نقاط:

$$(\frac{\partial T}{\partial x})_0 = \frac{-T_{3,j} + 4T_{2,j} - 3T_{1,j}}{2\Delta x} \quad (3.34)$$

$$(\frac{\partial T}{\partial x})_{L_g} = \frac{3T_{N_i,j} - 4T_{N_i-1,j} + T_{N_i-2,j}}{2\Delta x} \quad (3.35)$$

7.3 خوارزم الحساب:

يمكن تلخيص الحل العددي وفق المخطط التنظيمي التالي:

◀ إعطاء القيم الابتدائية.

◀ حساب حقل درجة الحرارة في اللحظتين $k + \frac{1}{2}$ و $k + 1$ وكذلك بحل معادلة الطاقة

◀ حساب حقل الإعصار و حقل الاستمرارية وشروط الإعصار في اللحظتين $k + \frac{1}{2}$

و $k+1$ ثم نحسب حقل السرع في اللحظة $k+1$ بعد ذلك نطبق اختبار التقارب في

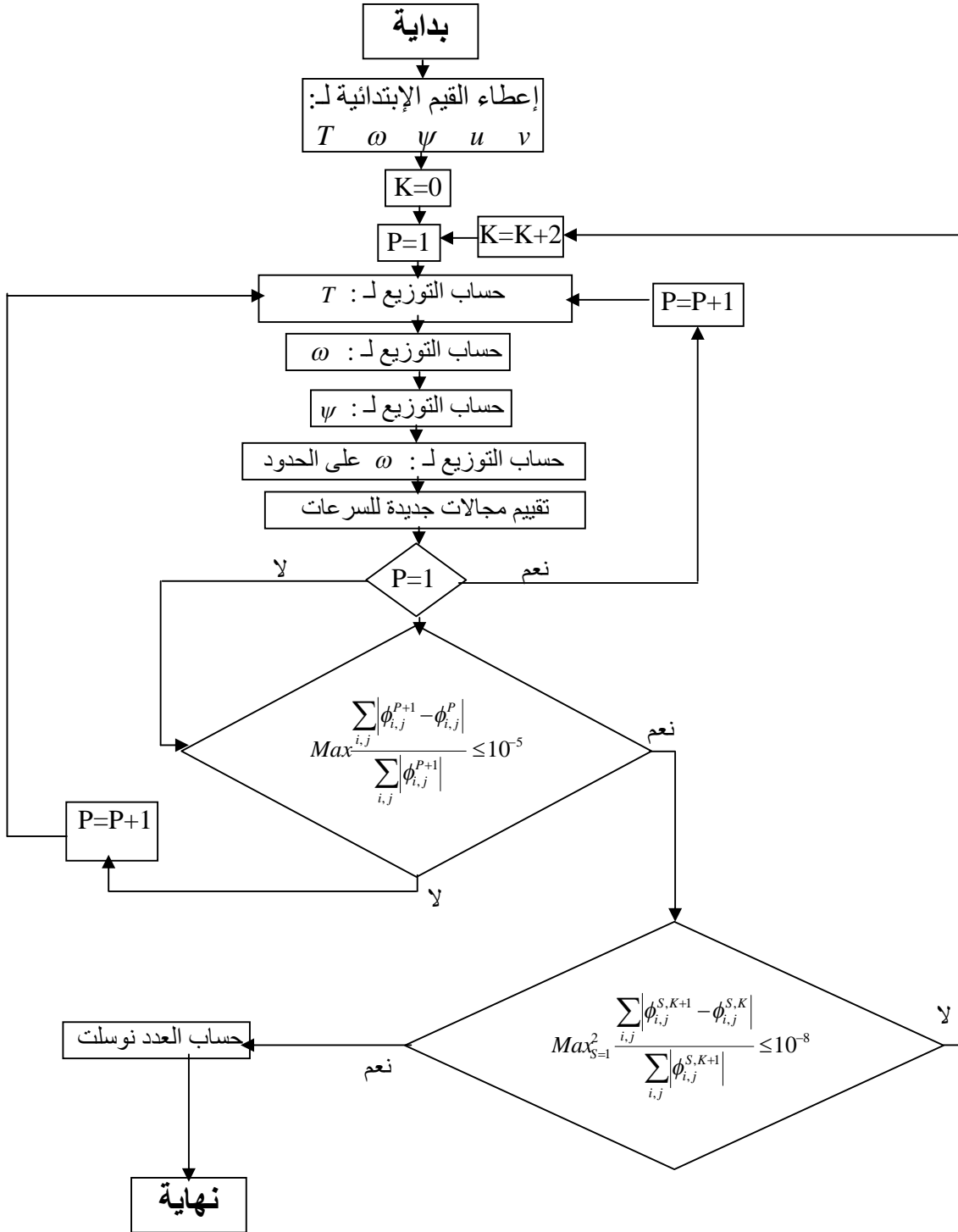
الحسابات بين التكرار الأول و الثاني في كل عقدة في الحلقة الأولى.

إذا كانت كانت دقة الحساب أقل من أو تساوي 10^{-5} تقبل النتيجة أن ننتقل إلى الخطوة

الزمنية $h+2$ في الحلقة الثانية. عندما تكون قيم T و ω متشابهة بعد مرور عدد معين من

الفترات Δt والتي نختارها 20 مرة إذا كانت دقة الحساب بين التكرار الزمني الأول و الثاني

أقل من أو يساوي 10^{-8} نتحصل علي نظام دائم بالتالي تتوقف عملية الحساب .



الشكل (3.2): المخطط التنظيمي للبرنامج المستخدم

4. النتائج العددية

سنعرض في هذا الفصل أهمّ النتائج المتحصّل عليها. نقوم في البداية بدراسة كلّ من الخطوة في الزمن و الشبكة.

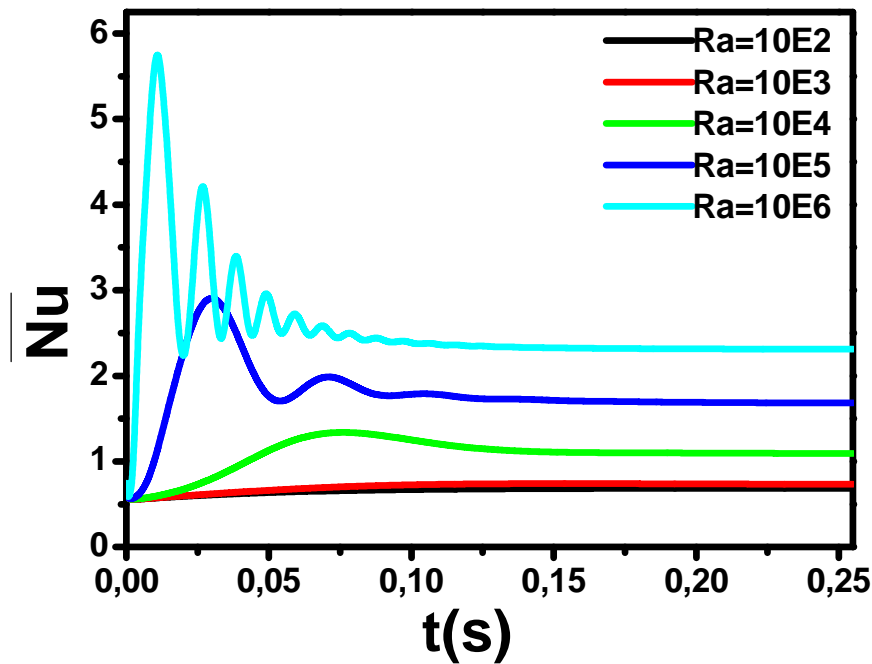
* نختار الخطوة في الزمن $dt = 10E(-5)$.

* إعتقادا على الجدول (A1.1) نلاحظ أنّ أقلّ فرق نسبي للقيم المتوسطة \bar{Nu} ، $\bar{\psi}_{cent}$ ، \bar{T}_{cent} هو عند الشبكة 71×71 ومنه فالشبكة المختارة من أجل $10E2 \leq Ra \leq 10E6$ هي: 71×71 .

1.4 تأثير درجة الحرارة الثابتة:

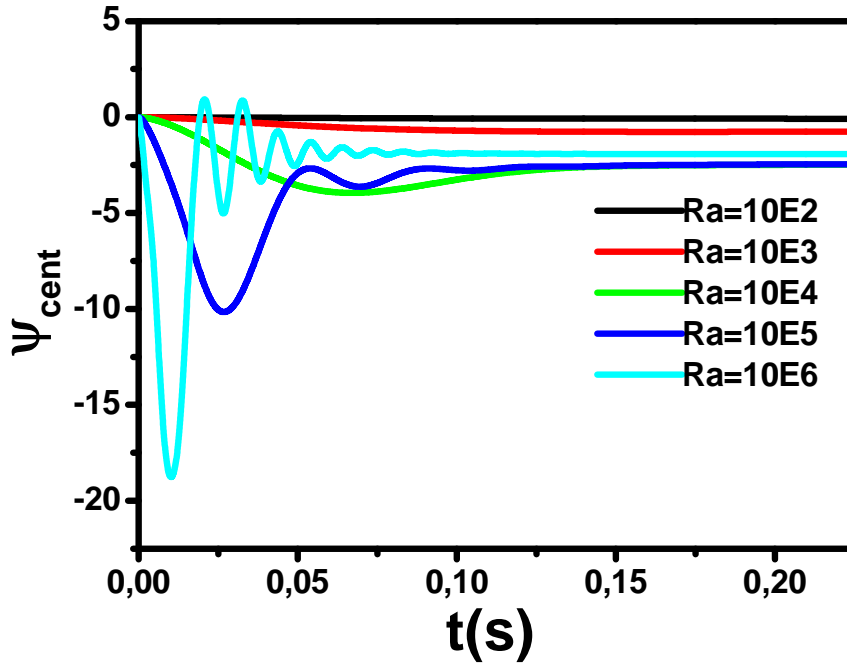
1.1.4. تحليل بعض الإشارات:

◀ الحالة الأولى:

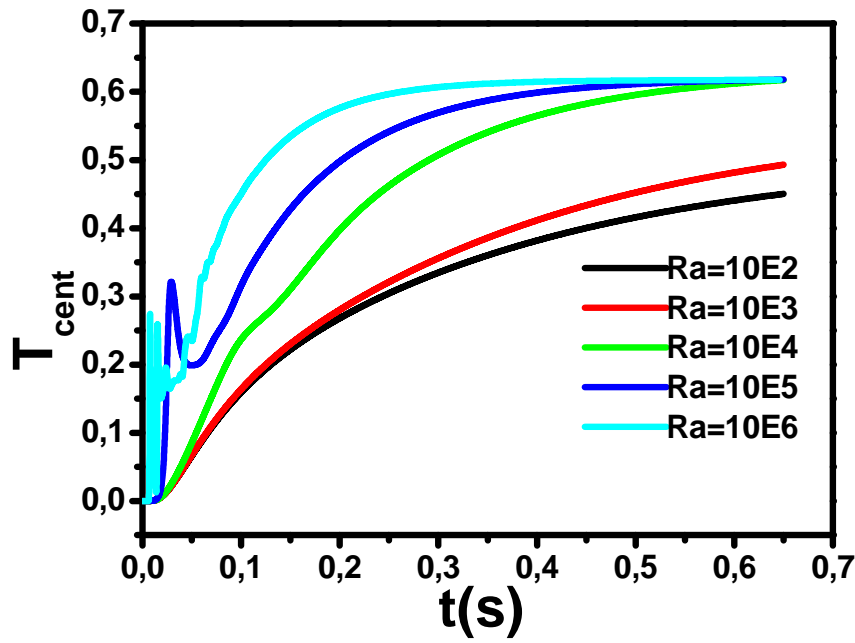


(أ)

الشكل (4.1): تأثير عدد راييلي على المقادير \bar{Nu} و $\bar{\psi}_{cent}$ و \bar{T}_{cent} للحالة الأولى



(ب)

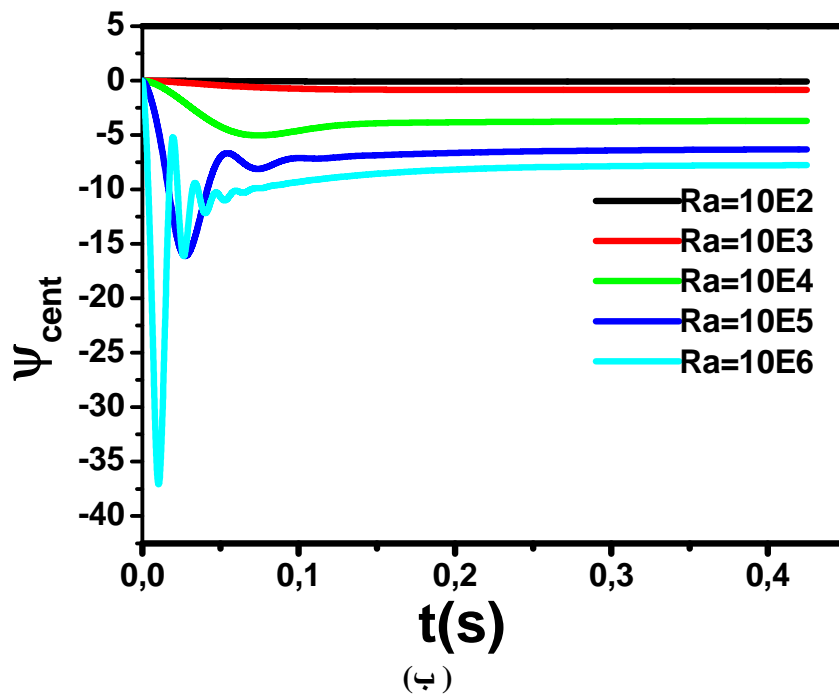
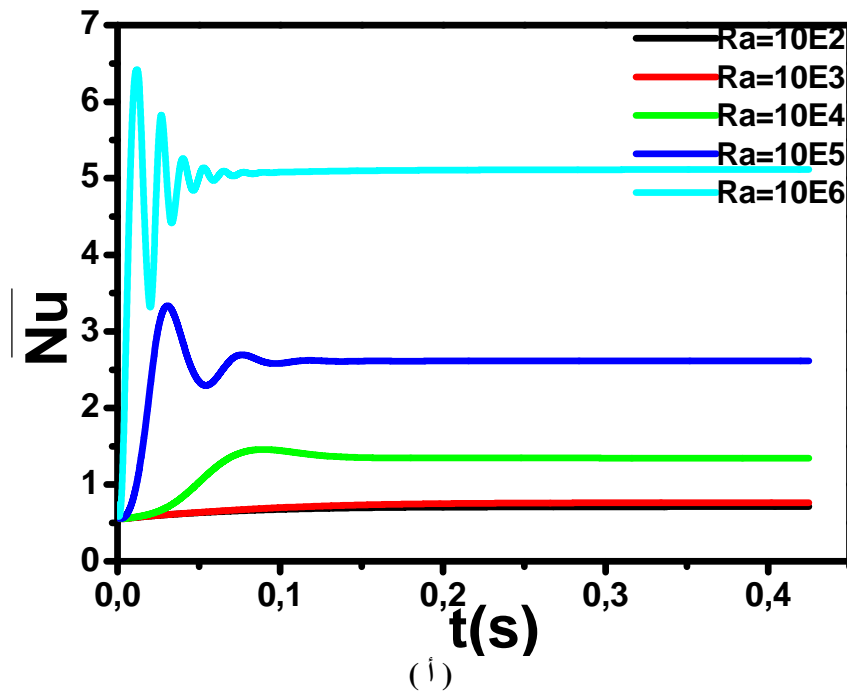


(ج)

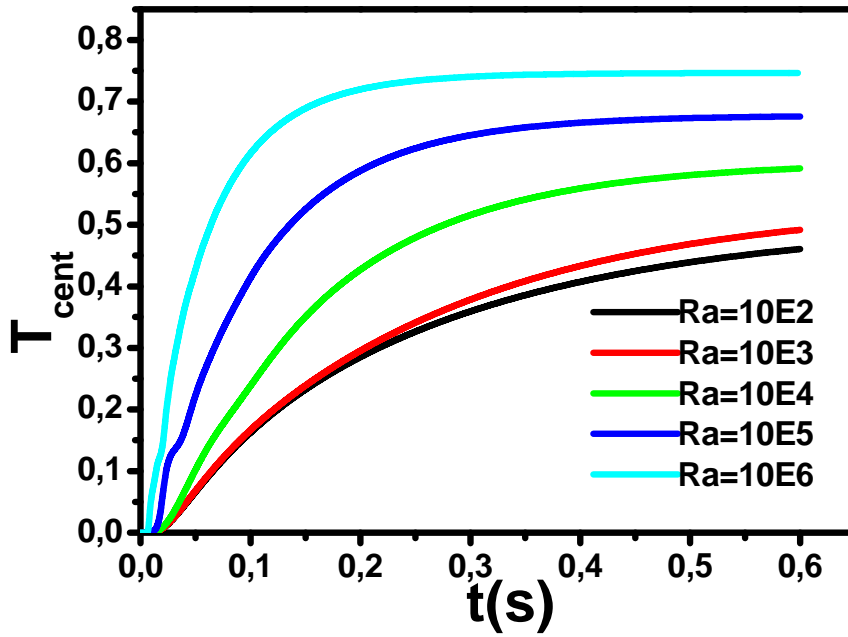
الشكل (4.1): تأثير عدد رايلي على المقادير \overline{Nu} و T_{cent} و ψ_{cent} للحالة الأولى

عندما يكون تسخين التجويف بدرجة حرارة ثابتة من النصف العلوي للجدار الموجه جنوبا تظرب إشارة المقادير \overline{Nu} و T_{cent} و ψ_{cent} في البداية ثم تتجه إلى الإستقرار.

الحالة الثانية:



الشكل (4.2): تأثير عدد راييلي على المقادير \overline{Nu} و ψ_{cent} و T_{cent} للحالة الثانية



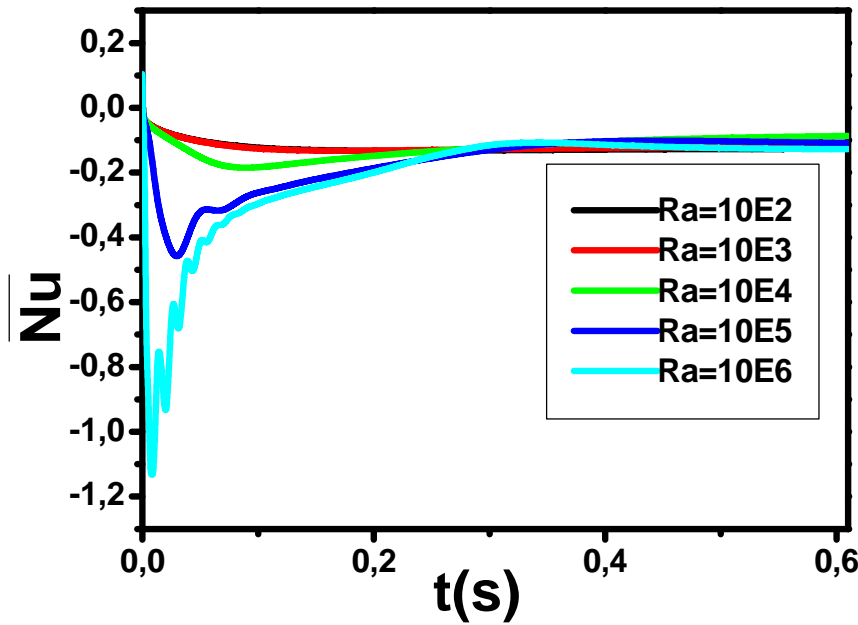
(ج)

الشكل (4.2): تأثير عدد راييلي على المقادير \overline{Nu} و ψ_{cent} و T_{cent} للحالة الثانية

عندما يكون تسخين التجويف بدرجة حرارة ثابتة من النصف السفلي للجدار الموجه جنوبا تظرب إشارة المقادير \overline{Nu} و ψ_{cent} و T_{cent} في البداية ثم تتجه إلى الإستقرار.

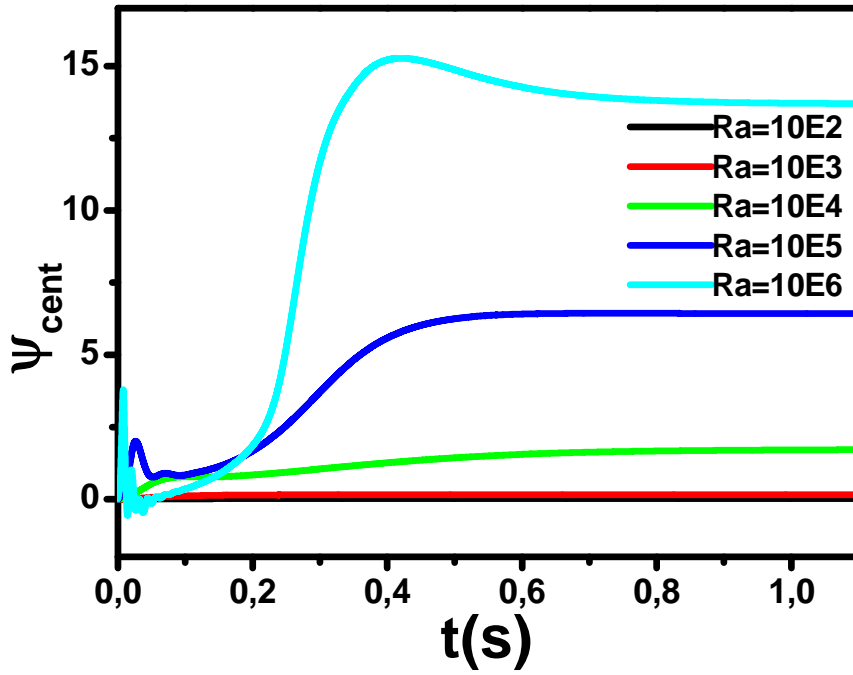
2.4 تأثير التدفق الثابت للحرارة:

1.2.4. تحليل الإشارة:

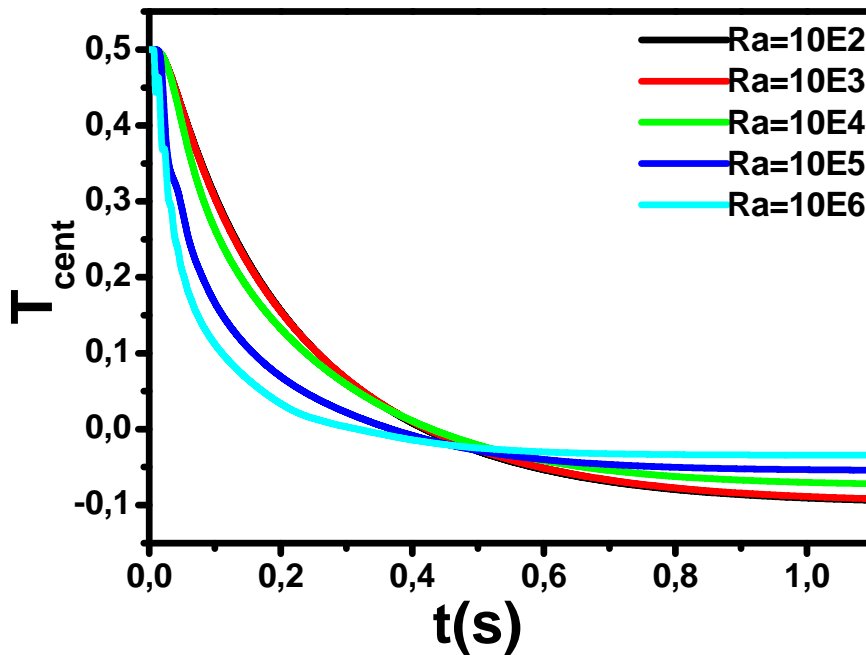


(إ)

الشكل (4.3): تأثير عدد راييلي على المقادير \overline{Nu} و ψ_{cent} و T_{cent} للحالة الثالثة



(ب)



(ج)

الشكل (4.3): تأثير عدد راييلي على المقادير \overline{Nu} و ψ_{cent} و T_{cent} للحالة الثالثة

عندما يكون تسخين التجويف بتدفق ثابت من النصف العلوي للجدار الموجه جنوبا تظرب إشارة المقادير \overline{Nu} و ψ_{cent} و T_{cent} في البداية ثم تتجه إلى الإستقرار، كما نلاحظ في البيان (ب.4.3) نقطة تقاطع (0.3;-0.1)، أما في البيان (ج.4.3) فنقطة التقاطع هي (0.5;-0.5).

3.4. تأثير التغير النبضي لدرجة الحرارة:

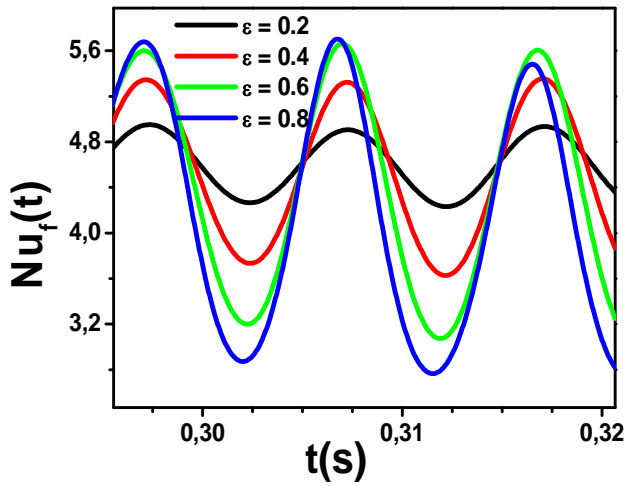
1.3.4. تأثير السعة:

نفرض درجة حرارة ساخنة على النصف العلوي للوجه الجنوبي ذات سعة $\varepsilon = 0$ إلى غاية الإستقرار، بعدها نعرض درجة حرارة نبضية ذات إشارة مربعة بسعات مختلفة.

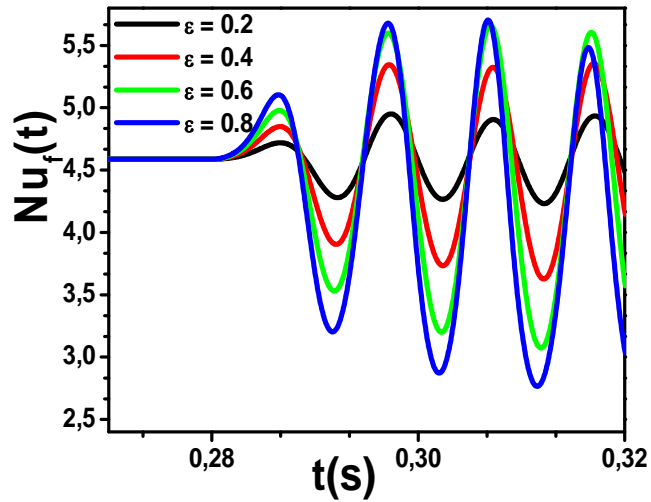
ندرس تأثير السعة للحالة الزابغة على المقدار الفيزيائي Nu_f وذلك من أجل:

$10^5 \leq Ra \leq 10^6$ ، والسعة لدرجة حرارة تحريضية $0.2 \leq \varepsilon \leq 0.8$ والدور $0.01 \leq \tau \leq 0.81$.

من أجل : $Ra = 10E6$

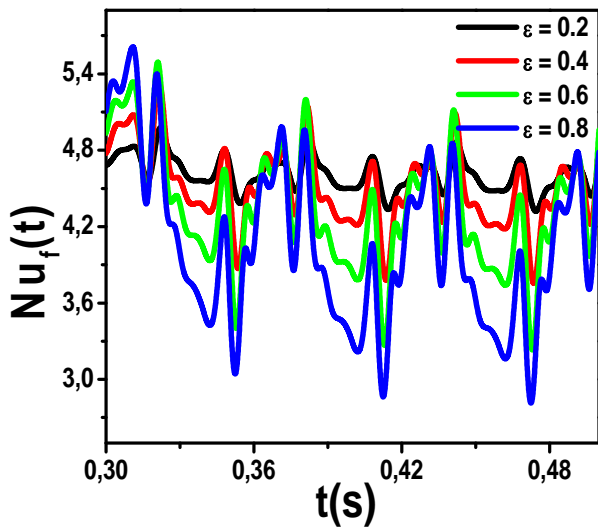


(ب)

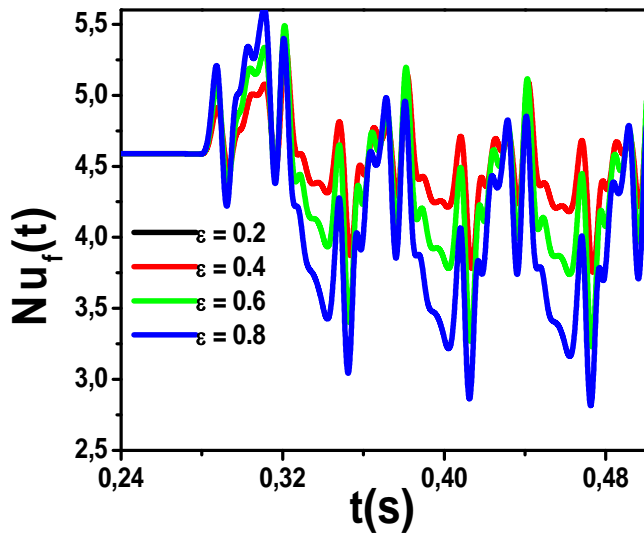


(أ)

الشكل (4.4): تأثير السعة ε على Nu_f من أجل $\tau = 0.01$ و $Ra = 10E6$

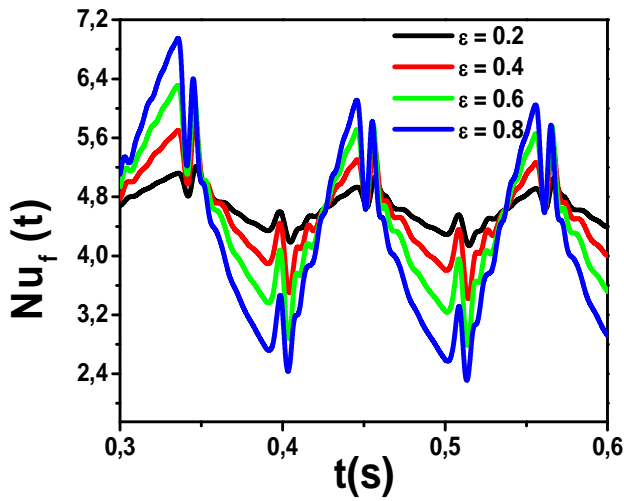


(ب)

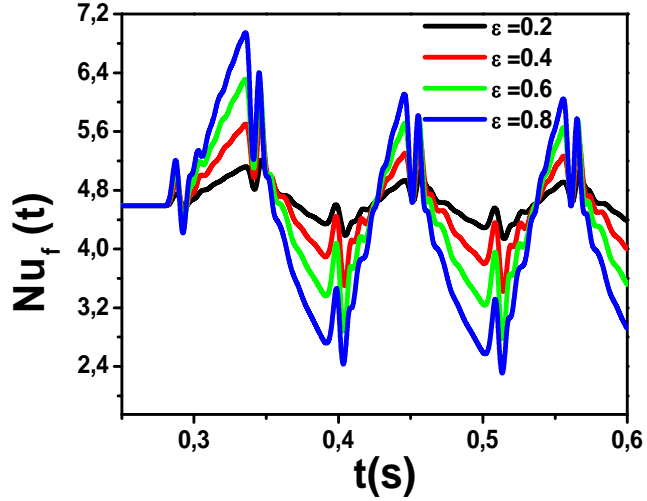


(أ)

الشكل (4.5): تأثير السعة ε على Nu_f من أجل $\tau = 0.06$ و $Ra = 10E6$

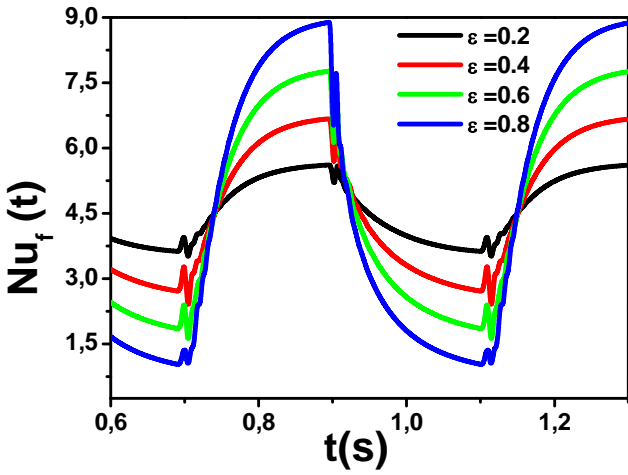


(ب)

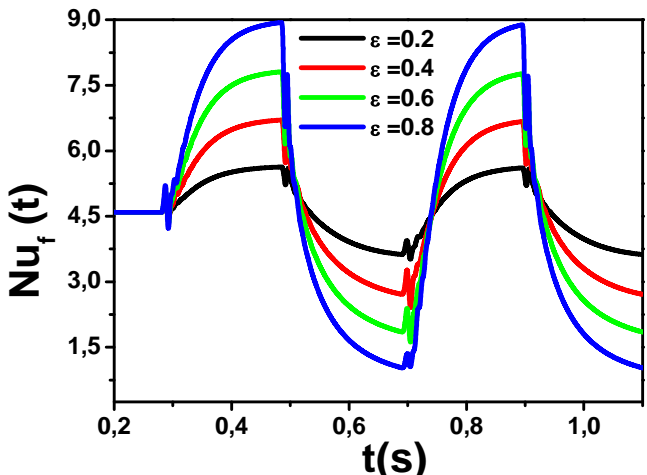


(أ)

الشكل (4.6): تأثير السعة ϵ على Nu_f من أجل $\tau = 0.11$ و $Ra = 10E6$

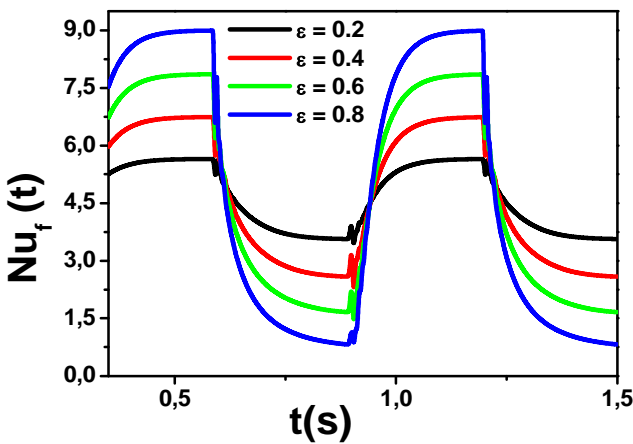


(ب)

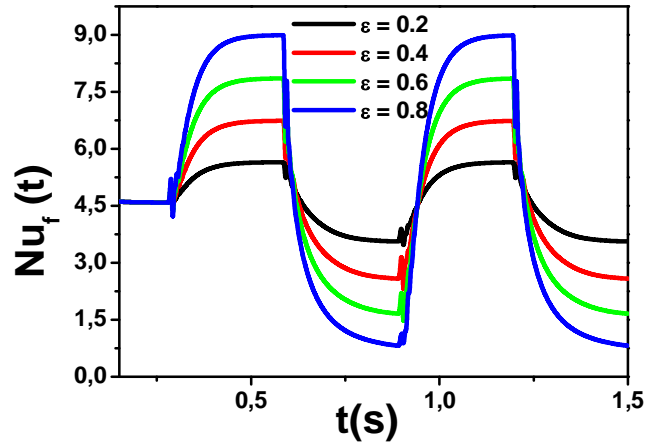


(أ)

الشكل (4.7): تأثير السعة ϵ على Nu_f من أجل $\tau = 0.41$ و $Ra = 10E6$

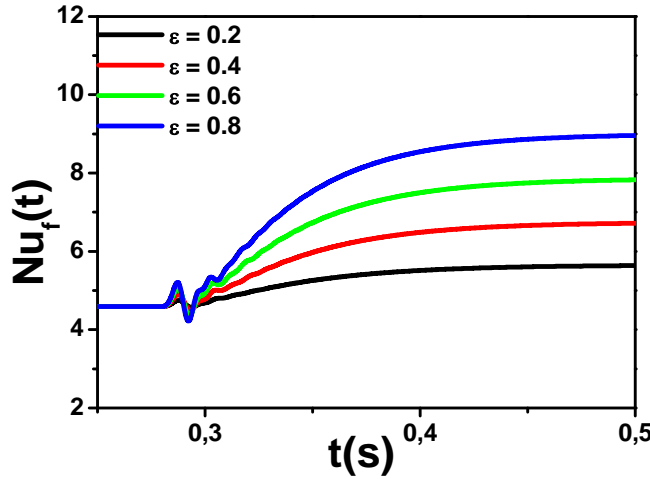


(ب)



(أ)

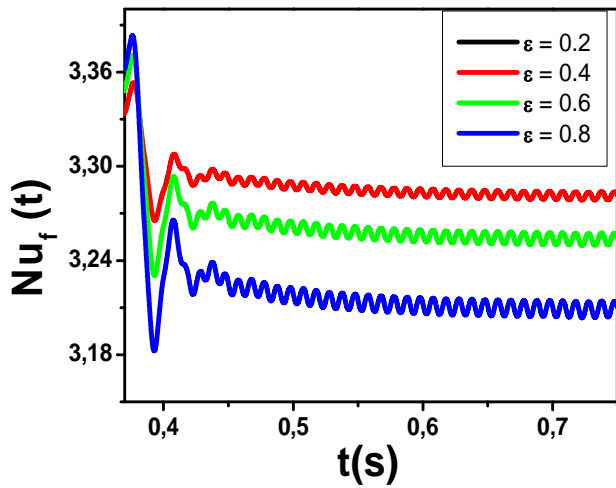
الشكل (4.8): تأثير السعة ϵ على Nu_f من أجل $\tau = 0.61$ و $Ra = 10E6$



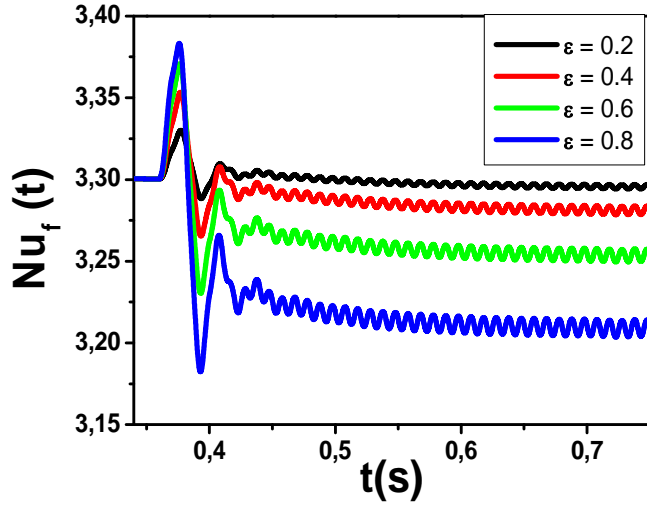
الشكل (4.9): تأثير السعة ϵ على Nu_f من أجل $\tau = 0.81$ و $Ra = 10E6$

الشكل (4.4) يبين أن الحل جيبّي، بينما تبيّن الأشكال (4.5) و (4.6) و (4.7) و (4.8) أن الحلّ دوري. أمّا الشكل (4.9) فيبين أنّه كلّما إزدادت سعة درجة الحرارة التحريضية إزداد المقدار الفيزيائي Nu_f .

◀ من أجل : $Ra = 10E5$

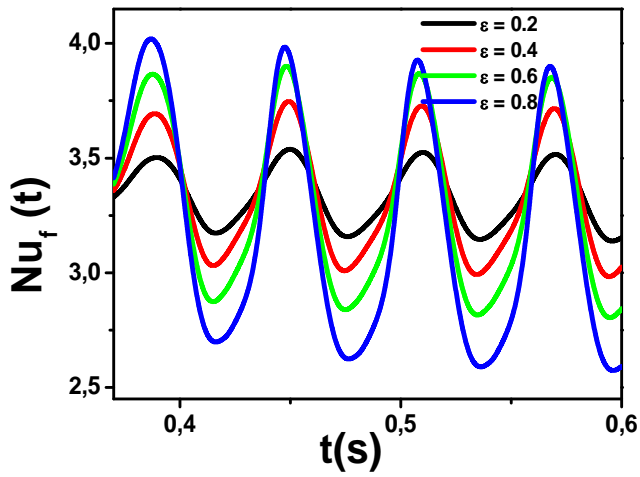


(ب)

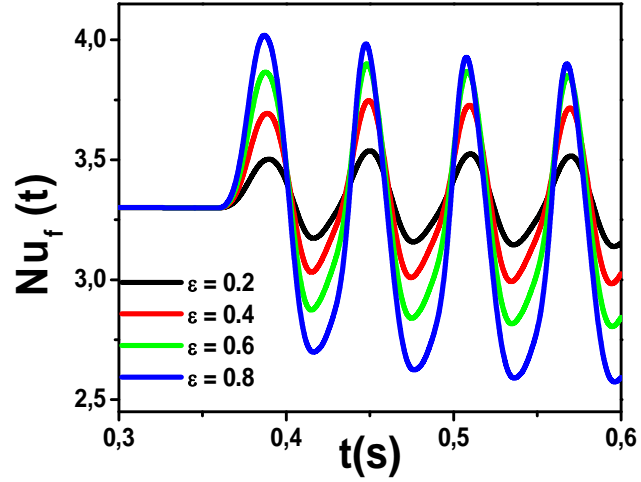


(أ)

الشكل (4.10): تأثير السعة ϵ على Nu_f من أجل $\tau = 0.01$ و $Ra = 10E5$

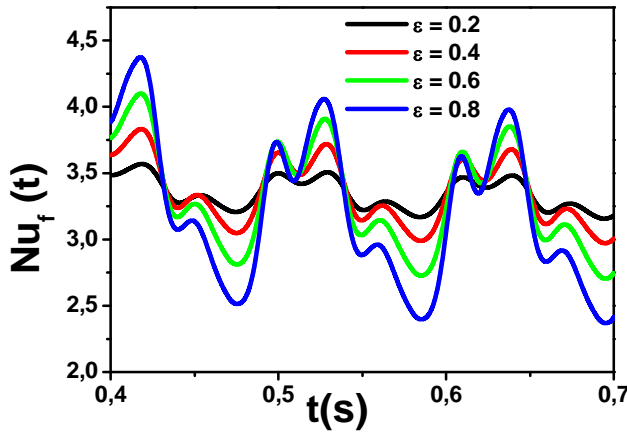


(ب)

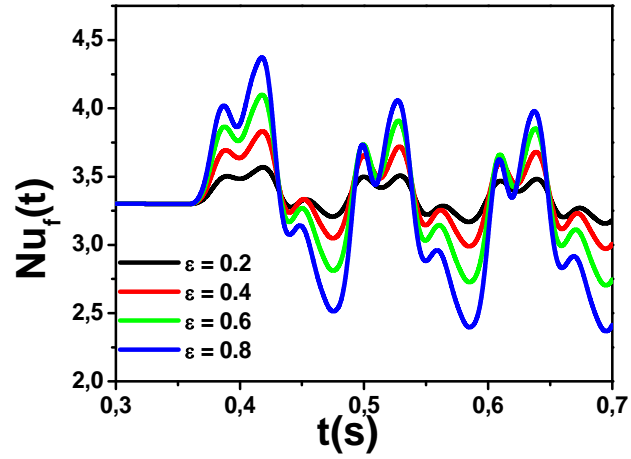


(أ)

الشكل (4.11): تأثير السعة ϵ على Nu_f من أجل $\tau = 0.06$ و $Ra = 10E5$

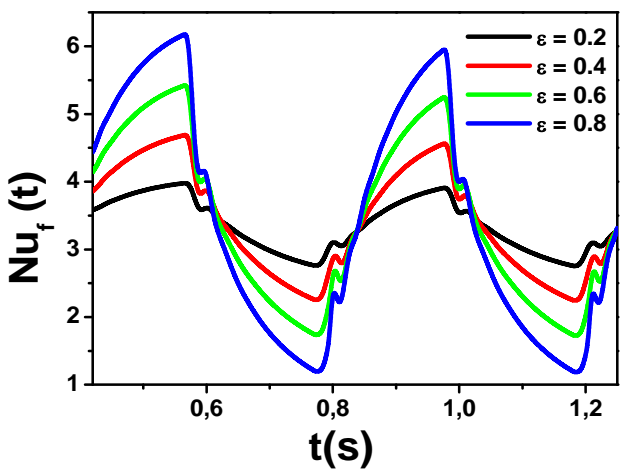


(ب)

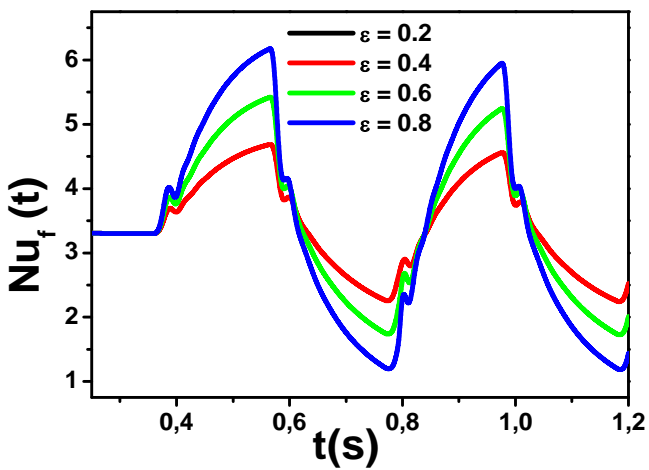


(أ)

الشكل (4.12): تأثير السعة ϵ على Nu_f من أجل $\tau = 0.11$ و $Ra = 10E5$

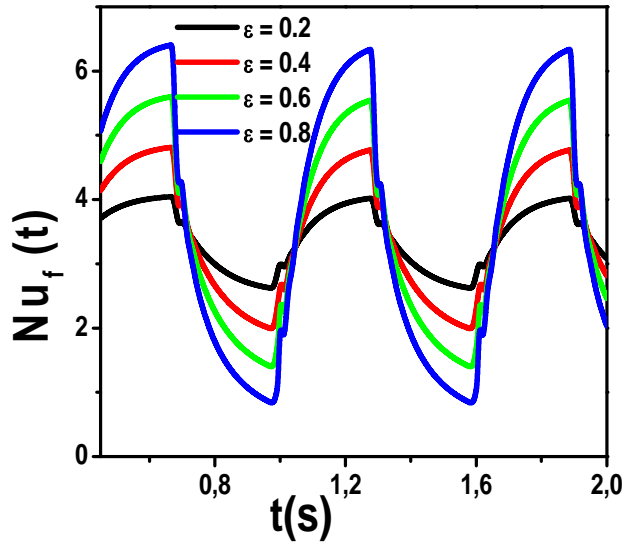


(ب)

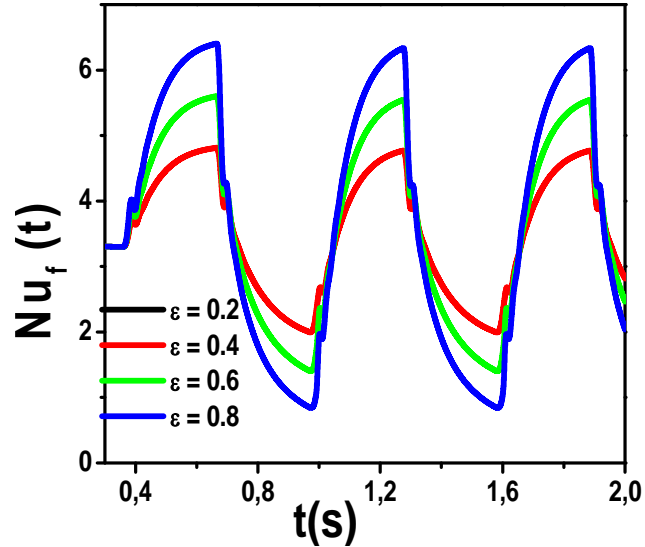


(أ)

الشكل (4.13): تأثير السعة ϵ على Nu_f من أجل $\tau = 0.41$ و $Ra = 10E5$

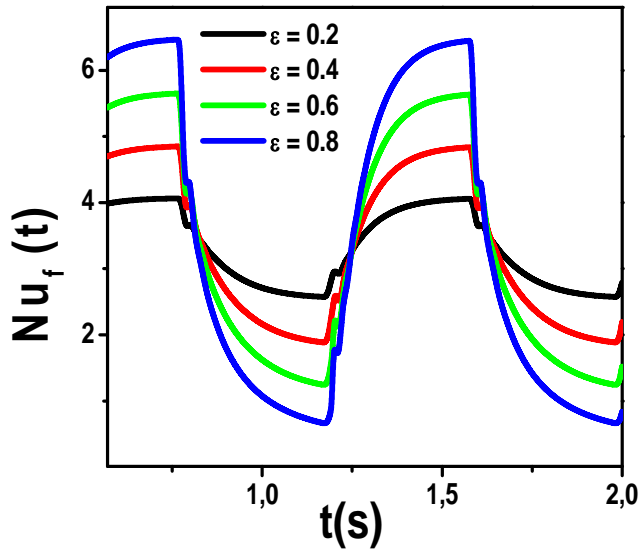


(ب)

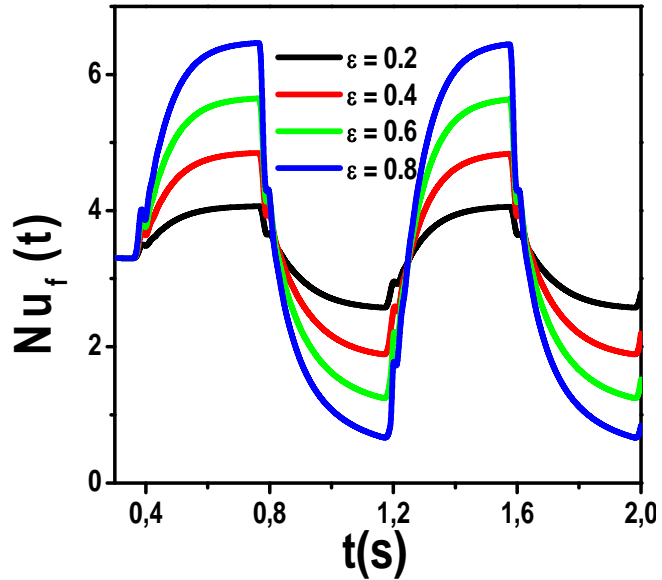


(أ)

الشكل (4.14): تأثير السعة ϵ على Nu_f من أجل $\tau = 0.61$ و $Ra = 10E5$



(ب)



(أ)

الشكل (4.15): تأثير السعة ϵ على Nu_f من أجل $\tau = 0.81$ و $Ra = 10E5$

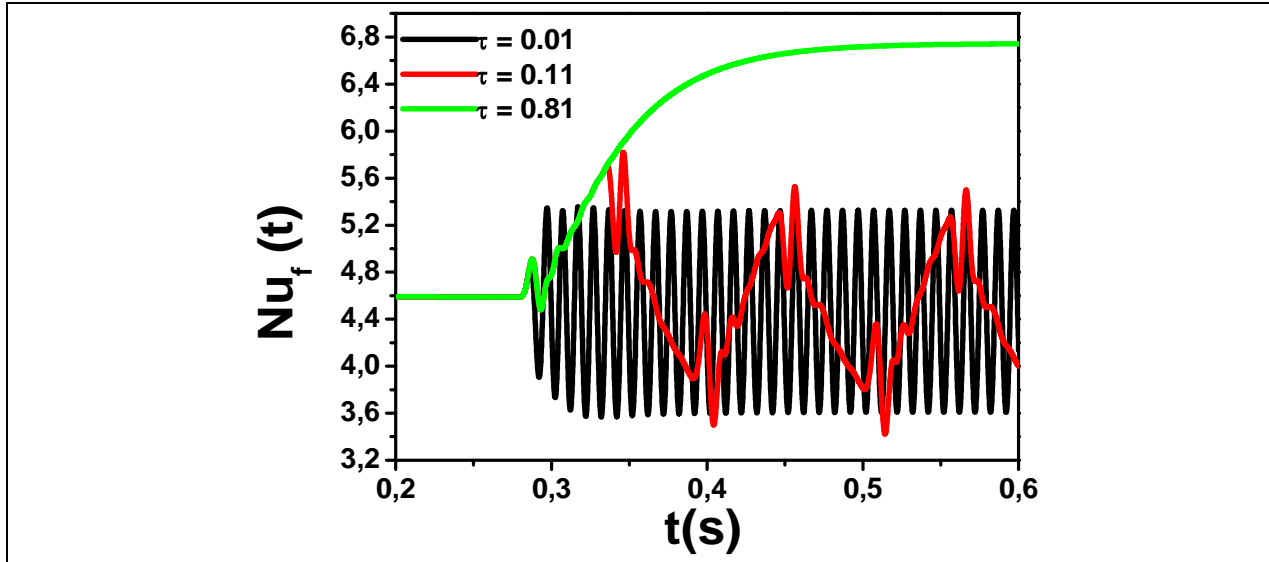
تبيّن الأشكال (4.10) و (4.11) و (4.12) و (4.13) و (4.14) و (4.15) أنّ الحلّ دوريّ.

2.3.4. تأثير الدور:

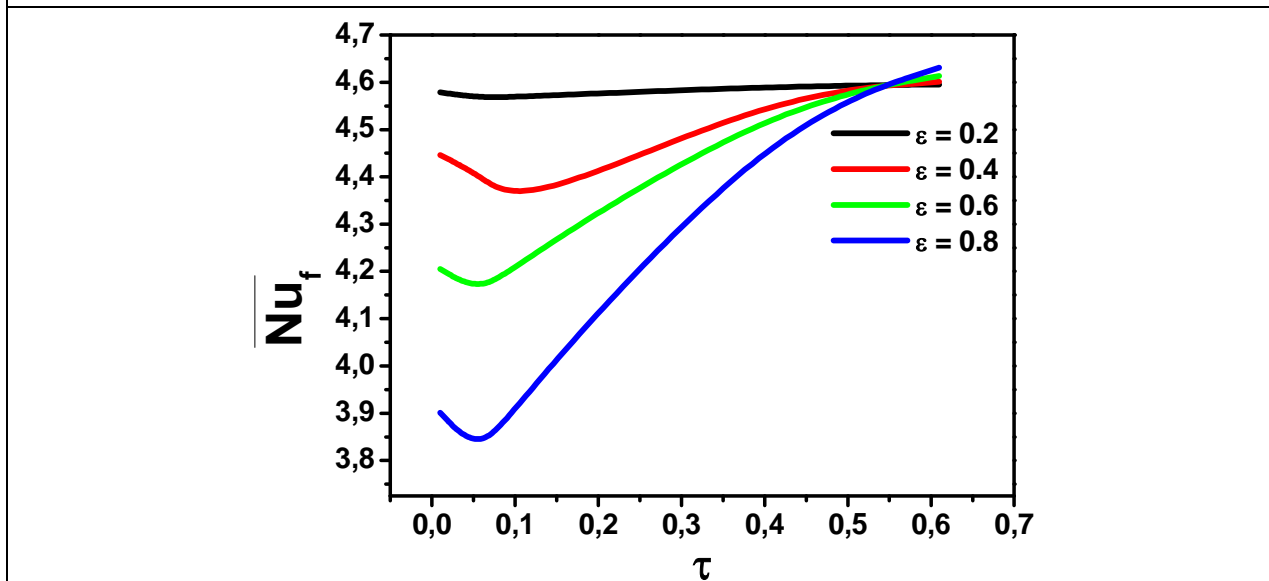
نحرض درجة حرارة نبضية على النموذج الفيزيائي للحالة الرابعة ذات قيم مختلفة للدور وذلك

من أجل : $0.01 \leq \tau \leq 0.81$ و $10E5 \leq Ra \leq 10E6$ والسعة $0.2 \leq \varepsilon \leq 0.8$.

من أجل $Ra = 10E6$:



الشكل (4.16): تأثير الدور τ على Nu_f من أجل $\varepsilon = 0.4$ و $Ra = 10E6$

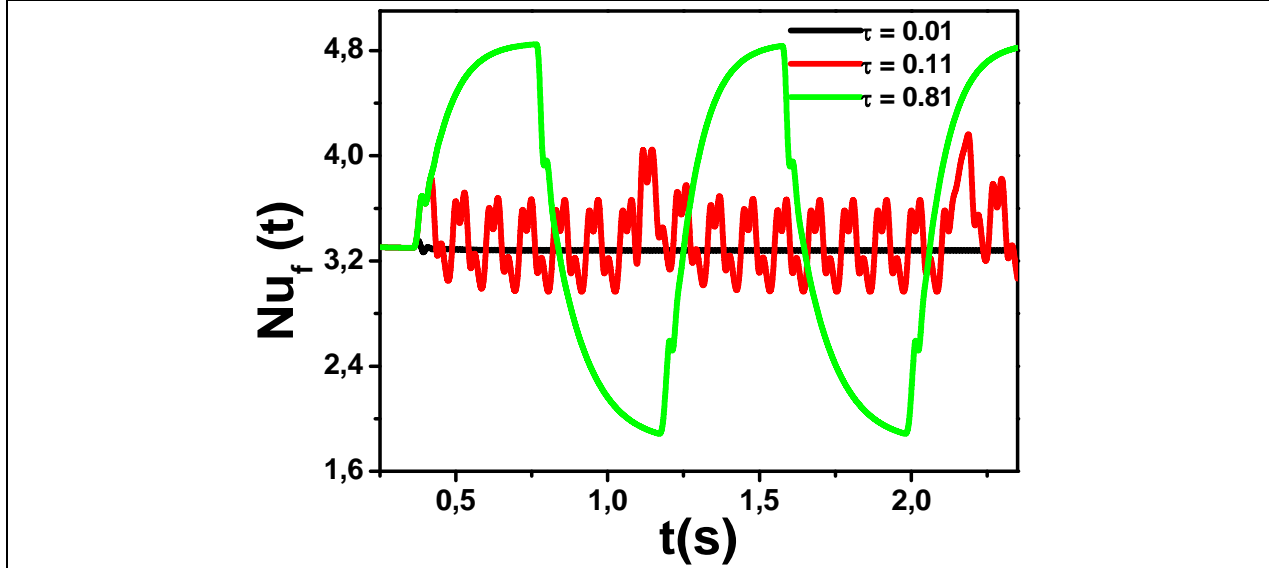


الشكل (4.17): تأثير الدور τ على $\overline{Nu_f}$ من أجل قيم مختلفة للسعة ε و $Ra = 10E6$

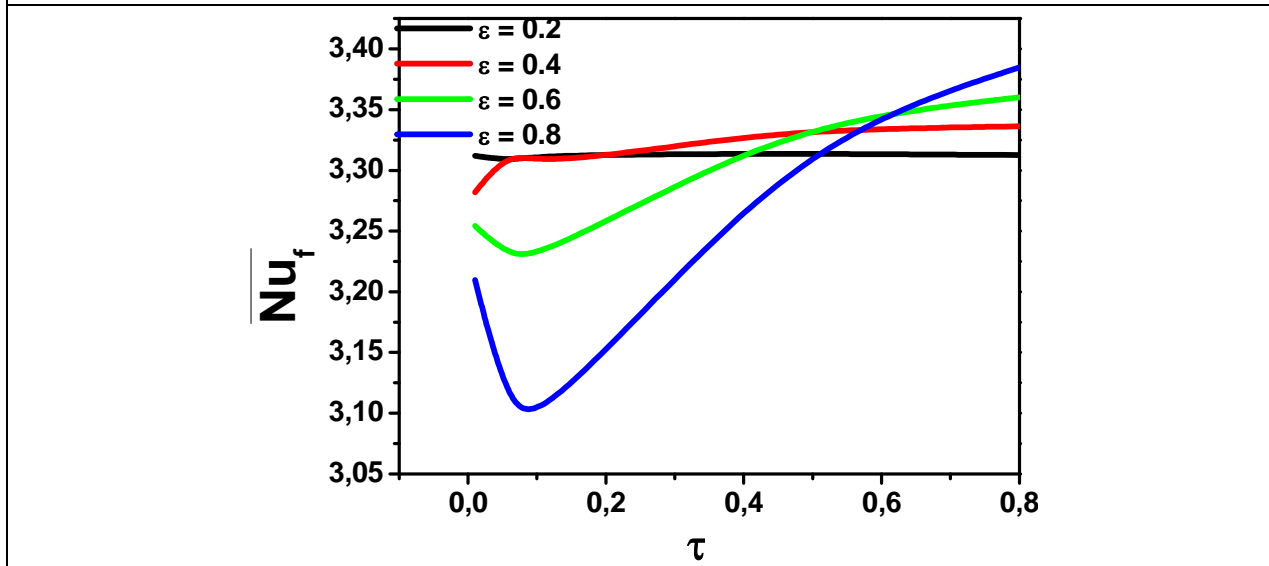
يوضح الشكل (4.16) أنّ التطور الزمني دوري من أجل السعة $\varepsilon = 0.4$ والدورين $\tau = 0.01$ و $\tau = 0.11$ بينما يتزايد التطور الزمني لأن يثبت ابتداء من (0.56, 6.75) من أجل الدور $\tau = 0.81$.

يوضح الشكل (4.17) وجود تقاطع بين المنحنيات الأربع في النقطة (0.55,4.6) كما نلاحظ أخذ المنحنى $\varepsilon = 0.2$ قيم معتبرة قبل التقاطع في حين أنه قيم دنيا بعد التقاطع.

من أجل $Ra = 10E5$:



الشكل (4.18): تأثير الدور τ على Nu_f من أجل $\varepsilon = 0.4$ و $Ra = 10E5$



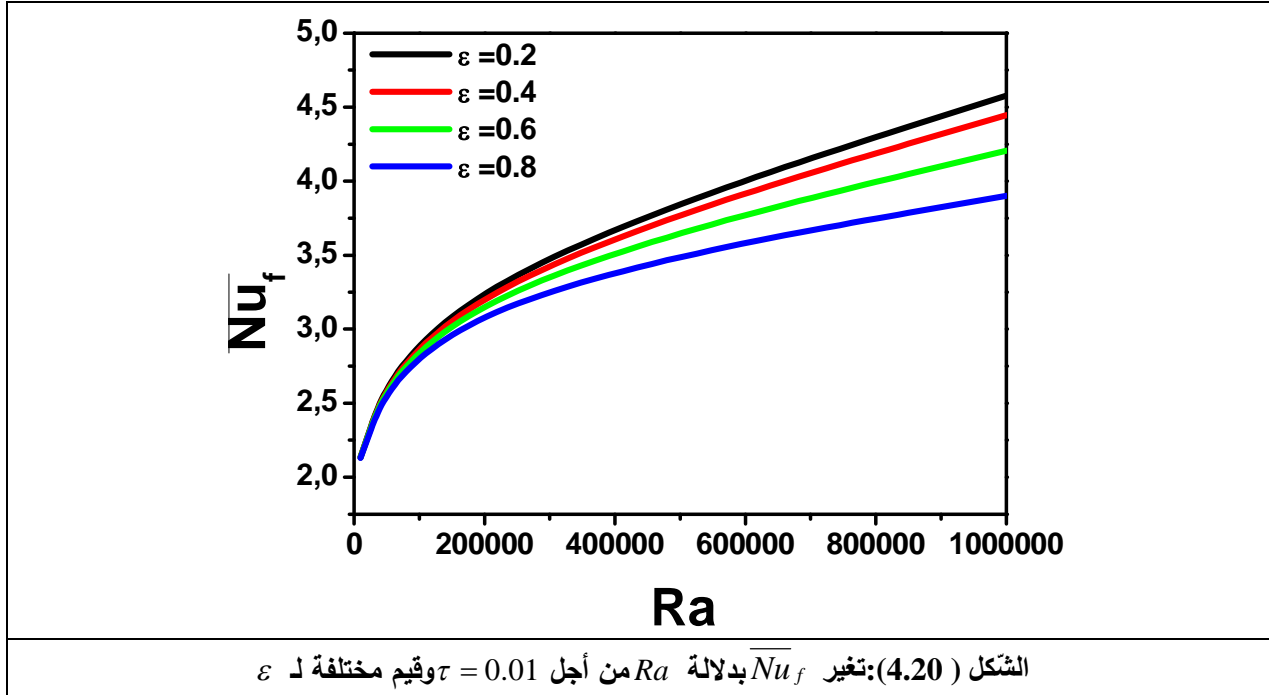
الشكل (4.19): تأثير الدور τ على Nu_f من أجل قيم مختلفة للسعة ε و $Ra = 10E5$

يوضح الشكل (4.18) أنّ التطور الزمني دوري من أجل السعة $\varepsilon = 0.4$.

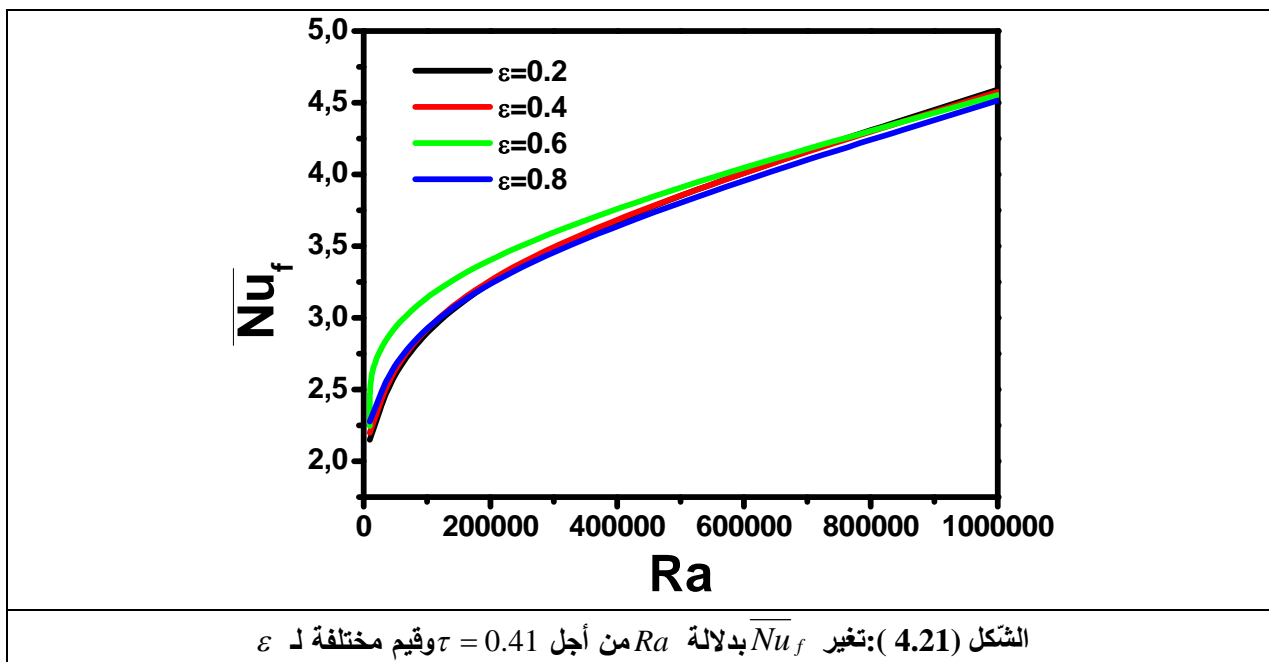
نلاحظ في الشكل (4.19) خمس تقاطعات بين المنحنيات الأربع؛ التقاطع الأول يقع بين المنحنى $\varepsilon = 0.2$ والمنحنى $\varepsilon = 0.6$ في النقطة (0.4,3.30) والتقاطع الثاني يقع بين المنحنى $\varepsilon = 0.4$ والمنحنى $\varepsilon = 0.6$ في النقطة (0.44,3.325) بينما التقاطع الثالث فيقع بين المنحنى $\varepsilon = 0.2$ والمنحنى $\varepsilon = 0.8$ في النقطة (0.46,3.31) والتقاطع الرابع فيقع بين المنحنى $\varepsilon = 0.4$ والمنحنى $\varepsilon = 0.8$ في النقطة (0.48,3.326) أما التقاطع الخامس فيقع بين المنحنى $\varepsilon = 0.6$ والمنحنى

$\varepsilon = 0.8$ في النقطة (0.62,3.35). كما نلاحظ أن المنحنى $\varepsilon = 0.2$ يأخذ قيم معتبرة قبل التقاطع في حين يأخذ قيم دنيا بعد التقاطع.

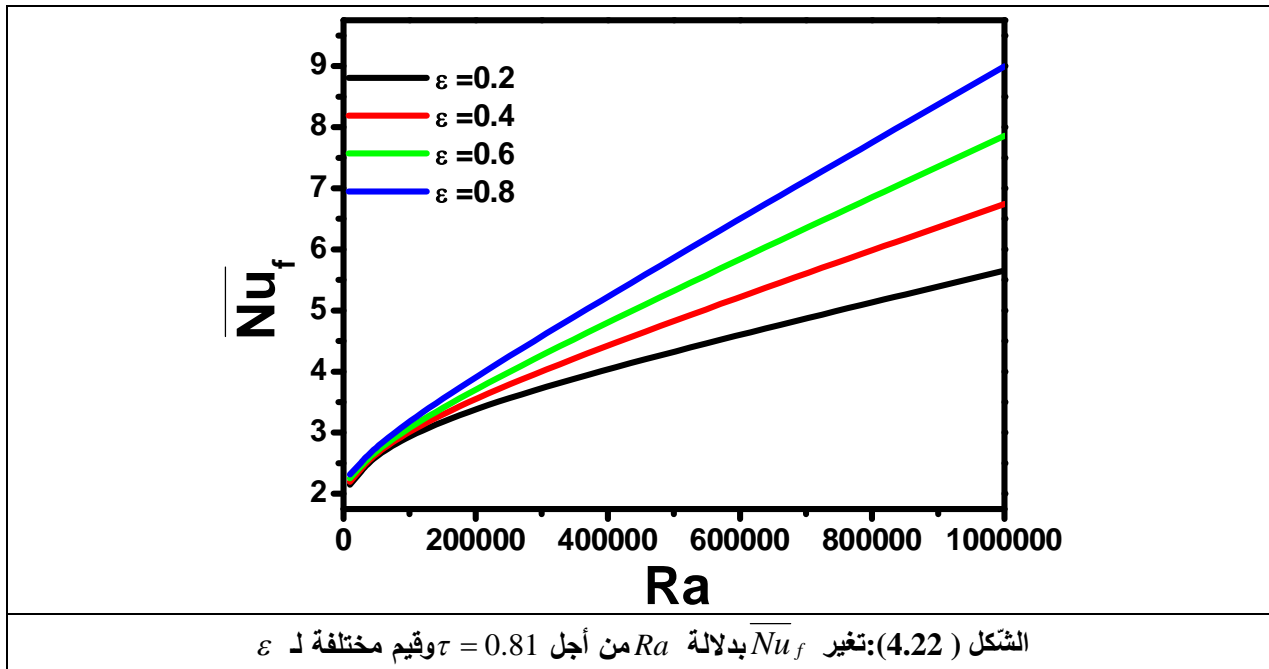
ندرس تغيير \overline{Nu}_f بدلالة عدد راييلي من أجل قيم مختلفة للسعة ε و الدور: $\tau = 0.01$ و $\tau = 0.41$ و $\tau = 0.81$.



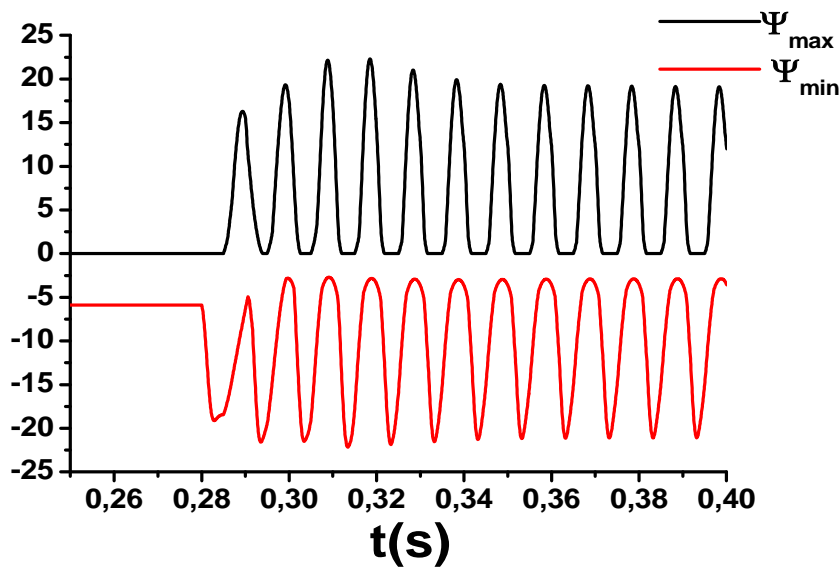
يوضح الشكل (4.20) كمية الحرارة المحررة من الجزء البارد للجدار الأيمن يزداد بزيادة عدد راييلي ويكون في أحسن صورته من أجل السعات الصغيرة.



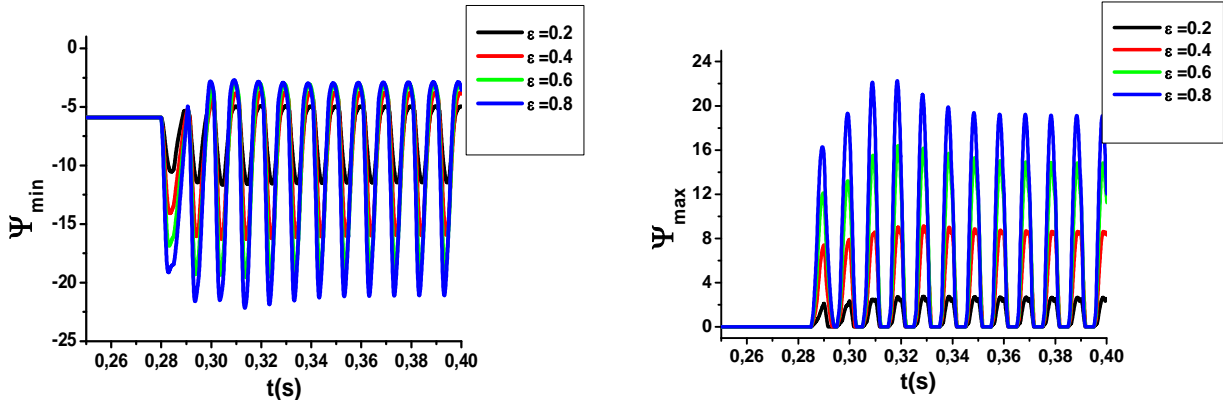
يوضح الشكل (4.21) كمية الحرارة المحررة من الجزء البارد للجدار الأيمن يزداد بزيادة عدد رايلى ويكون شبه متساوي من أجل السعات المعطاة $\varepsilon = 0.2$ و $\varepsilon = 0.4$ و $\varepsilon = 0.8$.



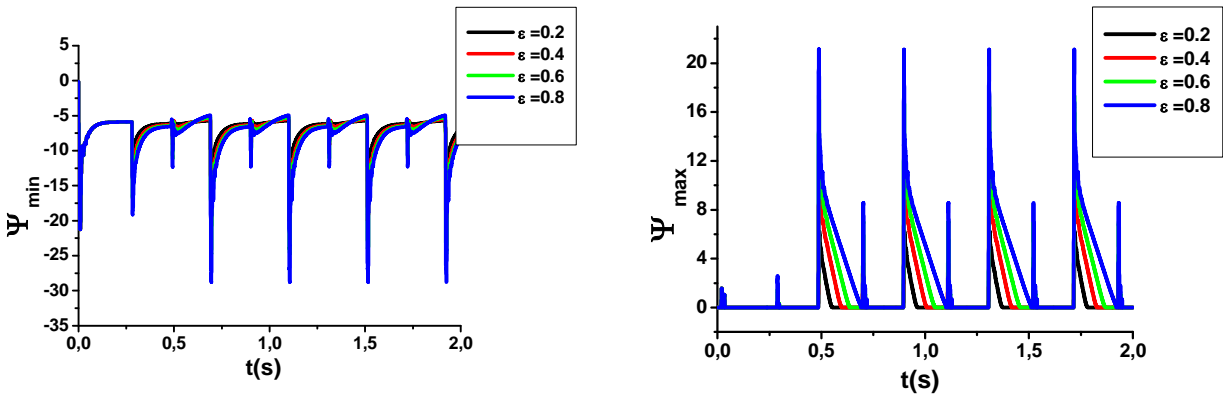
يوضح الشكل (4.22) كمية الحرارة المحررة من الجزء البارد للجدار الأيمن يزداد بزيادة عدد رايلى ويكون في أحسن صورته من أجل السعات الكبيرة. ✓ من أجل $Ra = 10E6$:



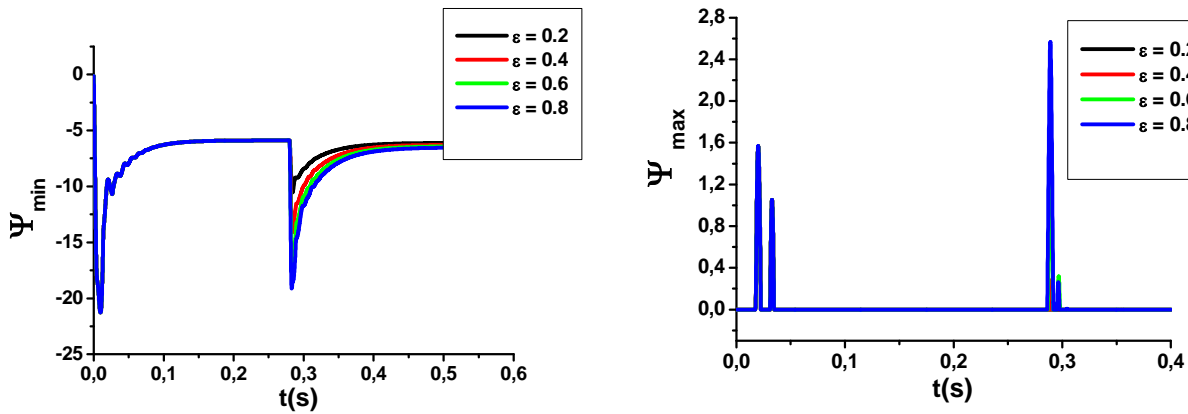
نلاحظ في الشكل (4.23) أن التطور الزمني لـ ψ_{\max} و ψ_{\min} دوري مع الزمن.



الشكل (4.24): إشارة ψ_{\min} و ψ_{\max} من أجل $\tau = 0.01$ و $Ra = 10E6$



الشكل (4.25): إشارة ψ_{\min} و ψ_{\max} من أجل $\tau = 0.41$ و $Ra = 10E6$



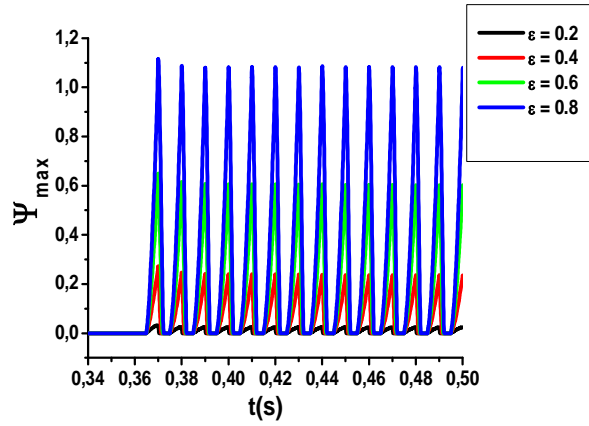
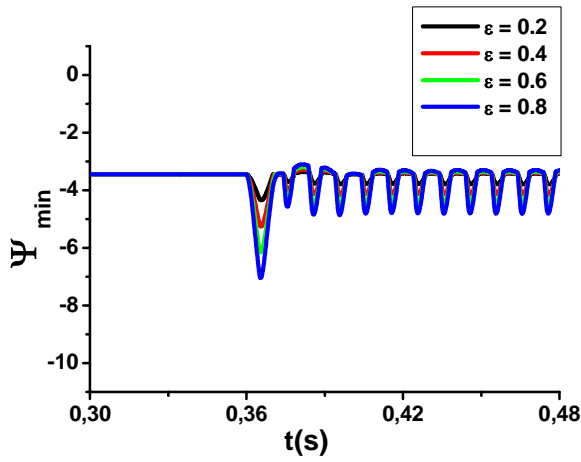
الشكل (4.26): إشارة ψ_{\min} و ψ_{\max} من أجل $\tau = 0.81$ و $Ra = 10E6$

نلاحظ في الشكل (4.24) أنّ إشارة ψ_{\min} و ψ_{\max} دورية مهما كانت السّعة ϵ وذلك من أجل $\tau = 0.01$.

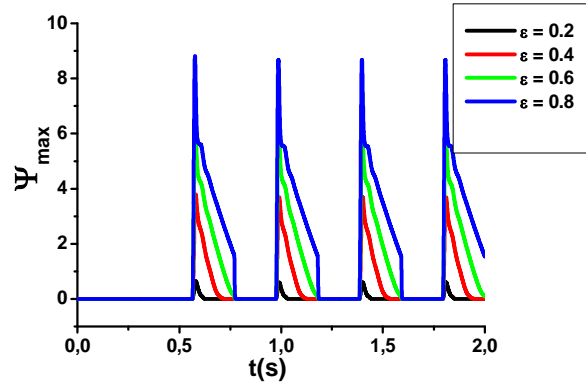
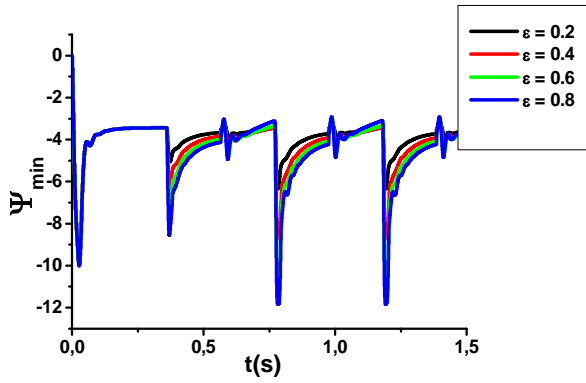
نلاحظ في الشكل (4.25) أنّ إشارة ψ_{\max} تأخذ إشارة على شكل قمم تكون دورية مهما كانت السّعة ϵ وذلك من أجل $\tau = 0.41$ ، على غرار ψ_{\min} فهي تأخذ شكل دوري مهما كانت السّعة ϵ .

نلاحظ في الشكل (4.26) أنّ إشارة ψ_{\max} تأخذ شكل قمم متقاربة بينما تضطرب إشارة ψ_{\min} لتتثبت وذلك من أجل $\tau = 0.81$.

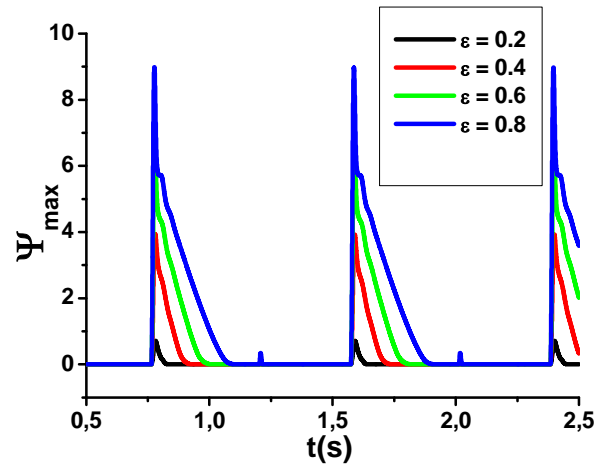
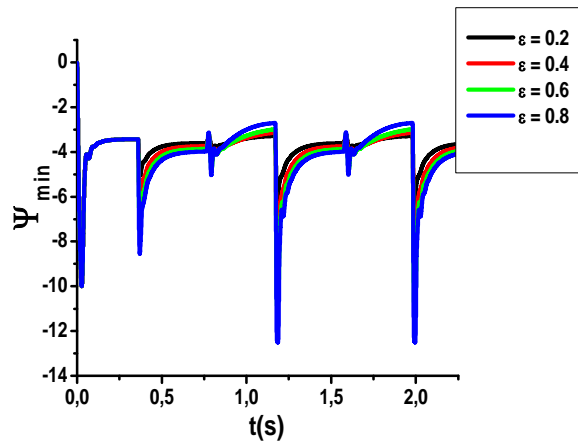
✓ من أجل $Ra = 10E5$



الشكل (4.27): إشارة ψ_{\min} و ψ_{\max} من أجل $\tau = 0.01$ و $Ra = 10E5$



الشكل (4.28): إشارة ψ_{\min} و ψ_{\max} من أجل $\tau = 0.41$ و $Ra = 10E5$



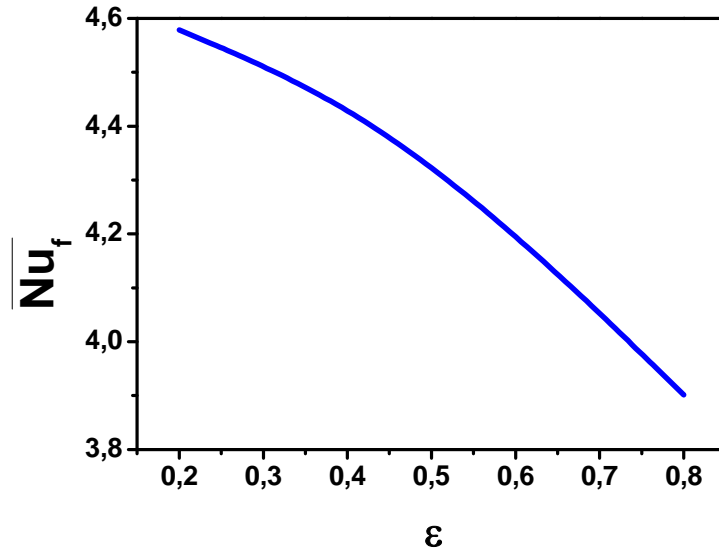
الشكل (4.29): إشارة ψ_{\min} و ψ_{\max} من أجل $\tau = 0.81$ و $Ra = 10E5$

نلاحظ في الأشكال (4.27) و (4.28) و (4.29) أن إشارتين ψ_{\max} و ψ_{\min} تأخذ الشكل الدوري مهما كانت السعة ϵ وذلك من أجل $\tau = 0.01$ و $\tau = 0.41$ و $\tau = 0.81$.

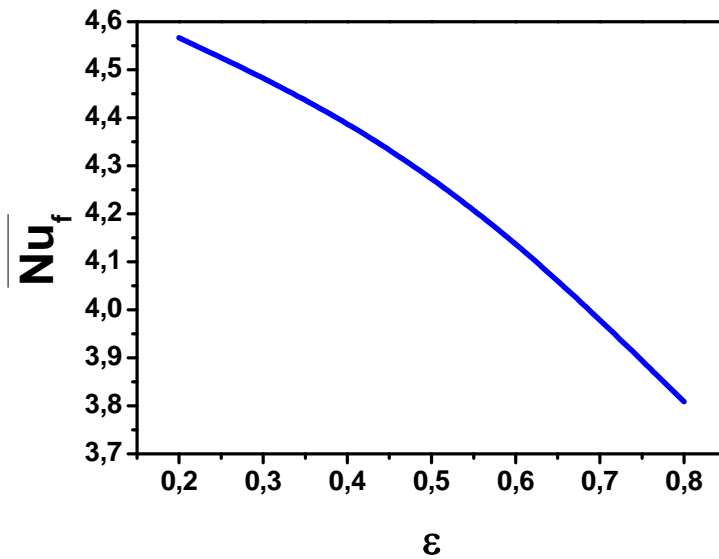
4.4. المقادير المتوسطة:

1.4.4 القيم المتوسطة:

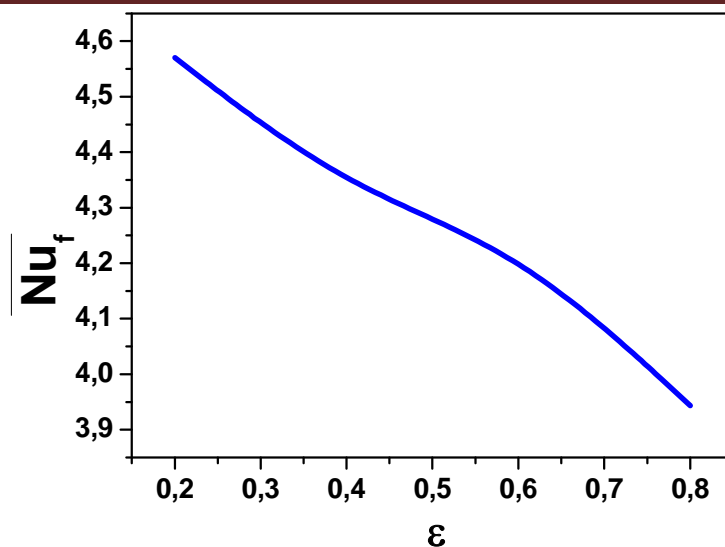
* من أجل $Ra = 10E6$:



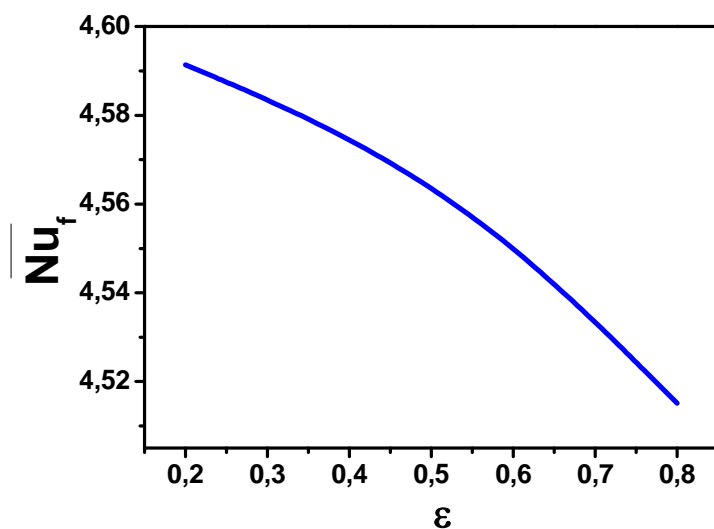
الشكل (4.30): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.01$ و $Ra = 10E6$



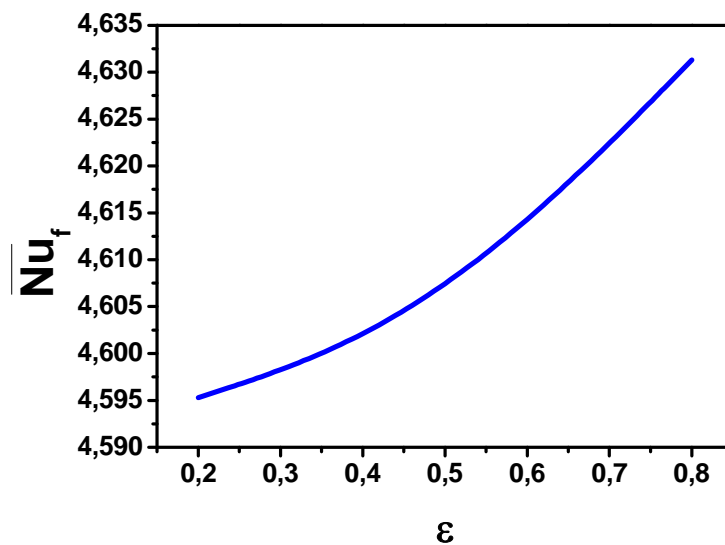
الشكل (4.31): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.06$ و $Ra = 10E6$



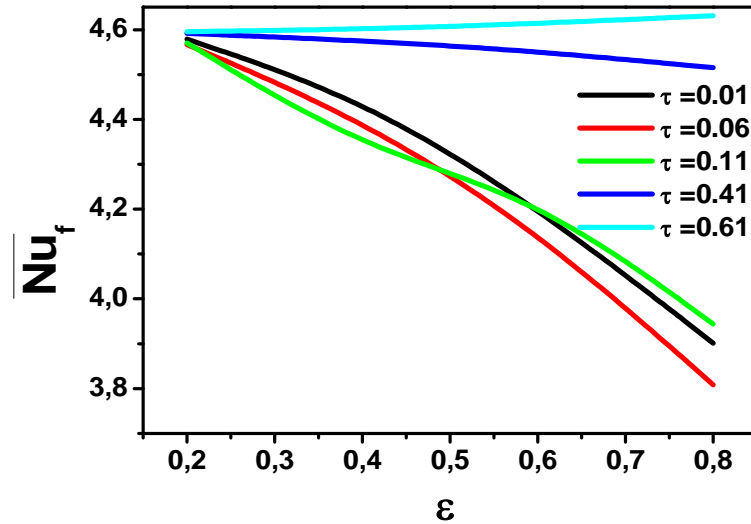
الشكل (4.32): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.11$ و $Ra = 10E6$



الشكل (4.33): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.41$ و $Ra = 10E6$



الشكل (4.34): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.61$ و $Ra = 10E6$

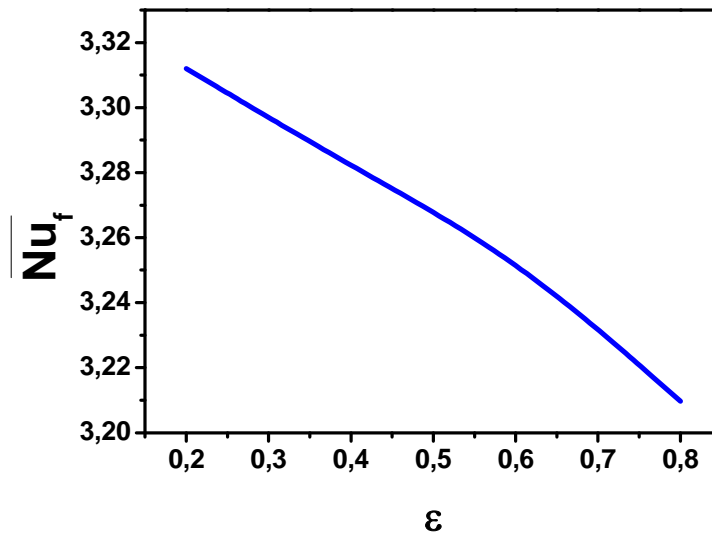


الشكل (4.35): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل قيم مختلفة للدور τ و $Ra = 10E6$

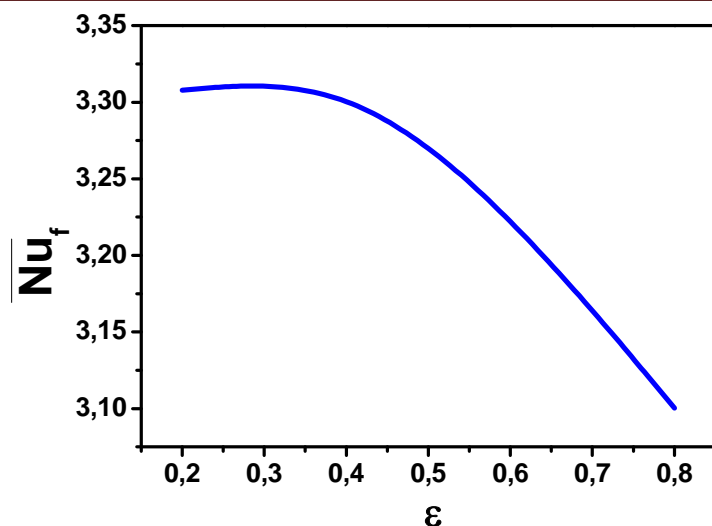
نلاحظ أنه من أجل $0.01 \leq \tau \leq 0.41$: كمية الحرارة المحررة من الجزء البارد للجدار الأيمن تكون متناقصة مع زيادة السعة ε . أما من أجل $\tau = 0.61$: كمية الحرارة المحررة من الجزء البارد للجدار الأيمن تكون متزايدة مع زيادة السعة ε .

يبين الشكل (4.35) وجود تقاطعان، الأول بين المنحنى من أجل $\tau = 0.06$ والمنحنى من أجل $\tau = 0.11$ في النقطة $(0.48, 4.28)$ والتي توافق $(\varepsilon, \overline{Nu}_f)$ والثاني بين المنحنى من أجل $\tau = 0.01$ والمنحنى من أجل $\tau = 0.11$ في النقطة $(0.6, 4.2)$.

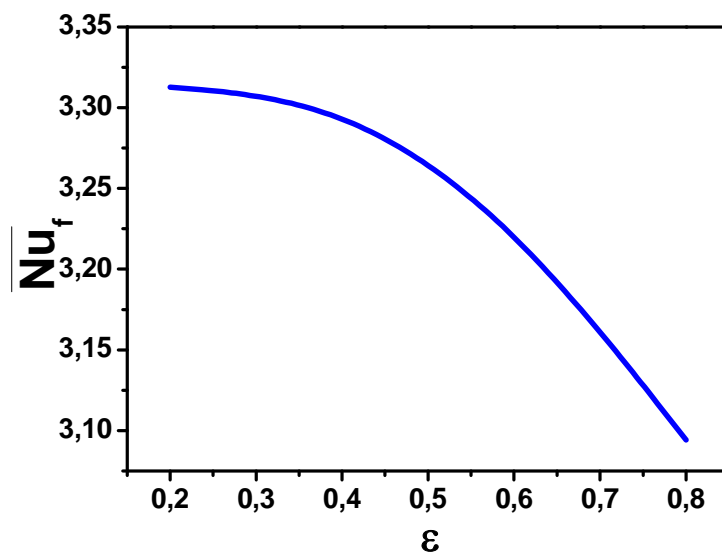
* من أجل $Ra = 10E5$:



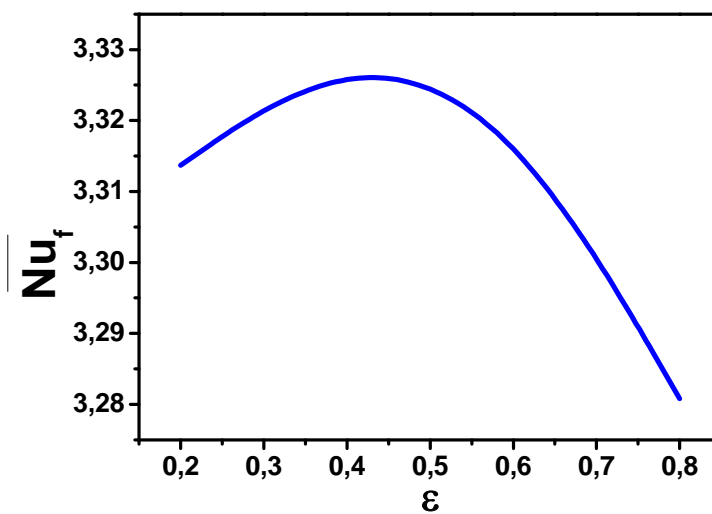
الشكل (4.36): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.01$ و $Ra = 10E5$



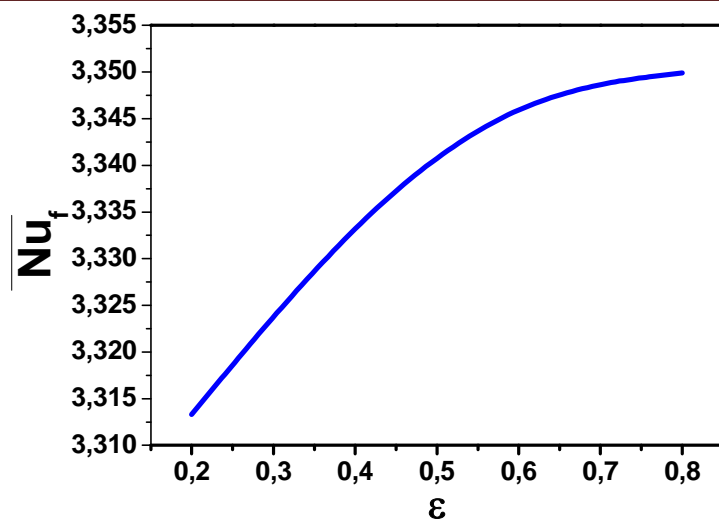
الشكل (4.37): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.06$ و $Ra = 10E5$



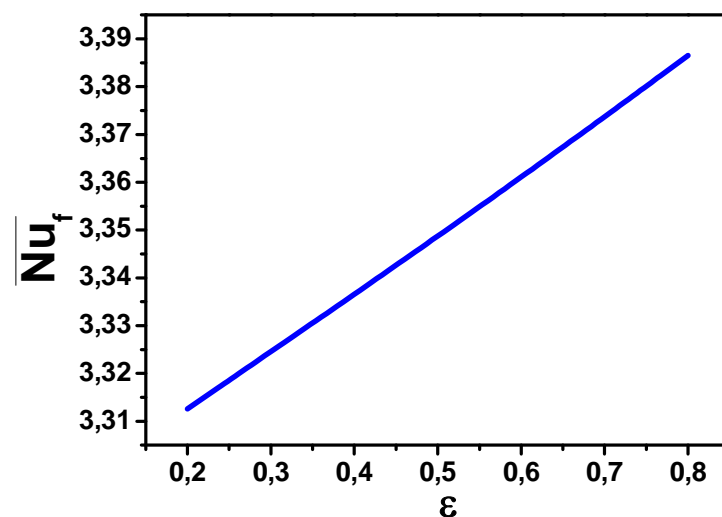
الشكل (4.38): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.11$ و $Ra = 10E5$



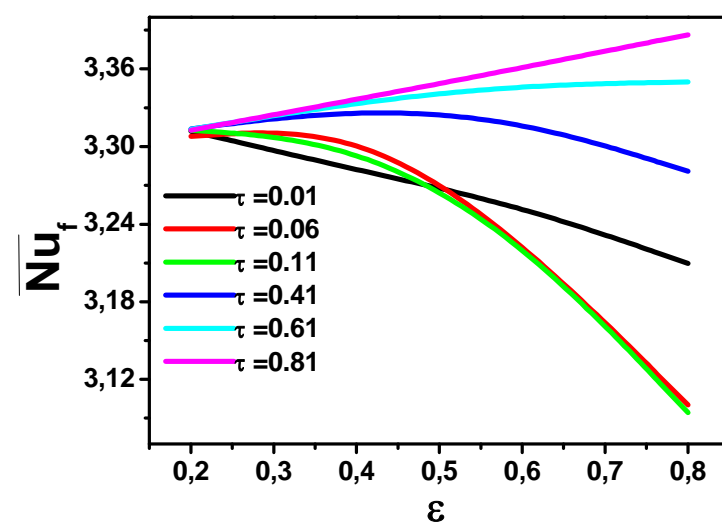
الشكل (4.39): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.41$ و $Ra = 10E5$



الشكل (4.40): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.61$ و $Ra = 10E5$



الشكل (4.41): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل $\tau = 0.81$ و $Ra = 10E5$



الشكل (4.42): تأثير السعة ε على \overline{Nu}_f من أجل قيم مختلفة لـ τ و $Ra = 10E5$

نلاحظ أنه من أجل $0.01 \leq \tau \leq 0.11$: كمية الحرارة المحررة من الجزء البارد للجدار الأيمن تكون متناقصة مع زيادة السعة ε . أما من أجل $\tau = 0.41$: كمية الحرارة المحررة من الجزء البارد للجدار الأيمن تكون متزايدة إلى أن تصل إلى النقطة $(0.45, 3.326)$ فتبدأ بالتناقص مع زيادة السعة ε . أما من أجل $\tau \leq 0.61$: كمية الحرارة المحررة من الجزء البارد للجدار الأيمن تكون متزايدة مع زيادة السعة ε وهي عبارة عن خط مستقيم يمر من المبدأ معادلته:

$$\overline{Nu}_f = 0.12305\varepsilon + 3.2876$$

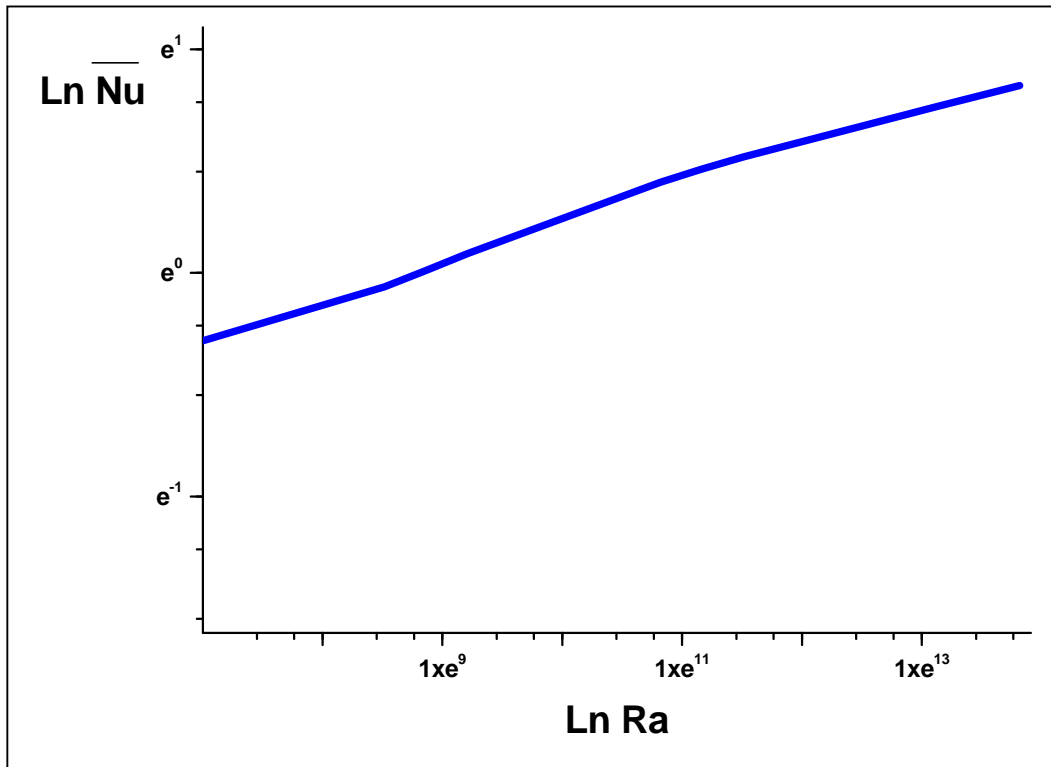
يبين الشكل (4.42) وجود تقاطعين الأول بين المنحنيين $\tau = 0.01$ و $\tau = 0.11$ في النقطة $(0.48, 3.27)$ والثاني بين المنحنيين $\tau = 0.01$ و $\tau = 0.06$ في النقطة $(0.52, 3.27)$ ثم يتطابقان.

2.4.4 عدد نوسلت:

الحالة الأولى:

من أجل الشروط الابتدائية لدرجة الحرارة و من أجل: $10E2 \leq Ra \leq 10E6$ لدينا التصحيح التالي:

$$\overline{Nu} = 0,2776 Ra^{0,15281}$$



الشكل (4.43): \overline{Nu} بدلالة Ra في الحالة الأولى

Ra	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
\overline{Nu}	0,6879	0,72714	1,09044	1,68039	2,31311
Nu_{AB}	1,25541	1,35978	2,03952	3,18552	4,47381
Nu_{CD}	1,23848	1,35978	2,03952	3,18552	4,47381

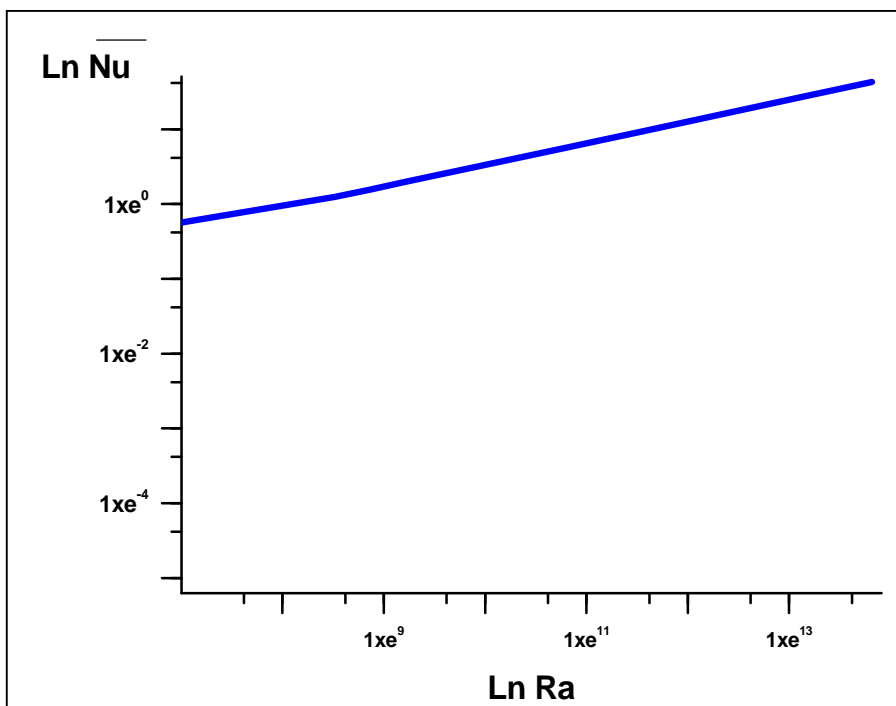
الجدول (4.1): جدول تأثير عدد راييلي على \overline{Nu} و Nu_f و Nu_c في الحالة الأولى

يوضح الجدول (4.1) القيم المختلفة لعدد نوسلت. نلاحظ أنه من أجل $\overline{Nu} < 1, Ra \leq 10E3$ وهذا يعني أن انتقال الحرارة تتم عن طريق التوصيل. ومن أجل $10E4 \leq Ra \leq 10E6, \overline{Nu} > 1$ وهذا يعني أن نقل الحرارة يتم عن طريق الحمل الحراري الطبيعي؛ كما نلاحظ أن: $Nu_{AB} = Nu_{CD}$ من أجل كل قيم Ra عدا من أجل $Ra = 10E2$ فنجد $Nu_{AB} > Nu_{CD}$ ، كما أننا نلاحظ قيم نوسلت كلها موجبة وهذا يعني أن العملية هي استقبال للحرارة.

◀ الحالة الثانية:

من أجل الشروط الابتدائية لدرجة الحرارة و من أجل: $10E2 \leq Ra \leq 10E6$ لدينا التصحيح التالي:

$$\overline{Nu} = 0,1679Ra^{0,23737}$$



الشكل (4.44): \overline{Nu} بدلالة Ra في الحالة الثانية

Ra	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
\overline{Nu}	0,71365	0,76643	1,34366	2,61442	5,11438
Nu_{AB}	1,25541	1,38465	2,52825	5,04594	10,22369
Nu_{CD}	1,23848	1,293	2,21903	4,43767	8,98438

الجدول (4.2): جدول تأثير عدد راييلي على \overline{Nu} و Nu_f و Nu_c في الحالة الثانية

يوضح الجدول (4.2) النتائج العددية لعدد لنوسلت. نلاحظ أنه من أجل $Ra \leq 10E3$ ، $\overline{Nu} < 1$ وهذا يعني أن تنتقل الحرارة عن طريق التوصيل. ومن أجل $10E4 \leq Ra \leq 10E6$ ، $\overline{Nu} > 1$ وهذا يعني أن تنتقل الحرارة عن طريق الحمل الحراري الطبيعي؛ كما نلاحظ أن: $Nu_{AB} > Nu_{CD}$ من أجل كل قيم Ra ، كما أننا نلاحظ قيم نوسلت كلها موجبة وهذا يعني أن العملية هي استقبال للحرارة.

◀ الحالة الثالثة:

من أجل الشروط الابتدائية لدرجة الحرارة و من أجل: $10E2 \leq Ra \leq 10E6$ لدينا الجدول التالي:

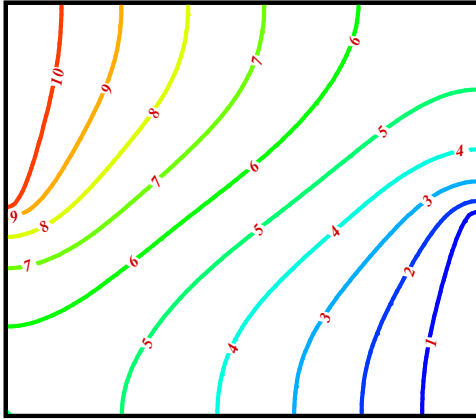
Ra	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
\overline{Nu}	-0,12402	-0,117286	-0,082431	-0,11721	-0,129119
Nu_{AB}	-1	-1	-1	-1	-1
Nu_{CD}	-0,23183	-0,219349	-0,155369	-0,22509	-0,248586

الجدول (4.3): جدول تأثير عدد راييلي على \overline{Nu} و Nu_f و Nu_c في الحالة الثالثة

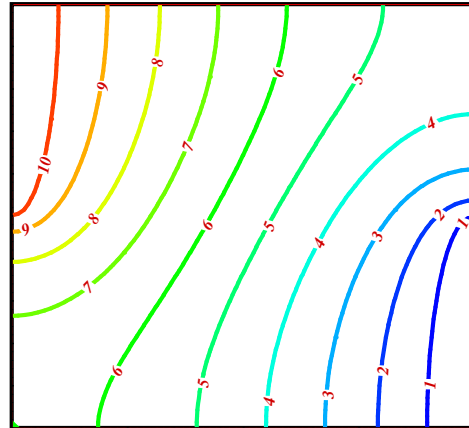
يبين الجدول (4.3) النتائج العددية لعدد لنوسلت. نلاحظ أنه من أجل كل قيم Ra ، $\overline{Nu} < 1$ وهذا يعني أن نقل الحرارة يتم عن طريق التوصيل. كما نلاحظ أن: $Nu_{AB} < Nu_{CD}$ من أجل كل قيم Ra ، كما أننا نلاحظ قيم نوسلت كلها سالبة وهذا يعني أن العملية انعكست وصارت عملية طرح للحرارة.

3.4.4 خطوط تساوي درجات الحرارة:

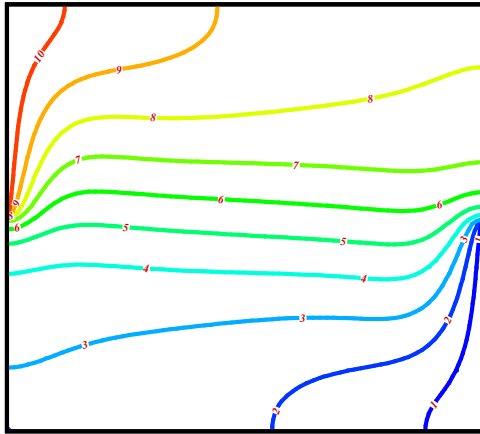
الحالة الأولى:



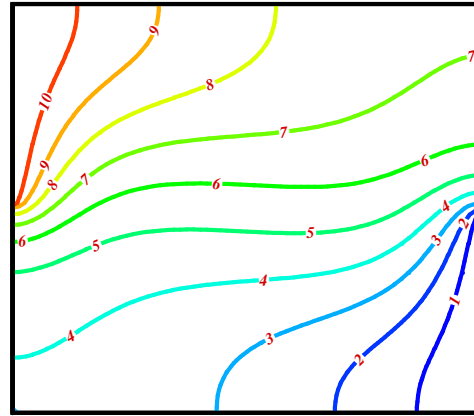
(0.091-:0.909:0.091)
(ب)



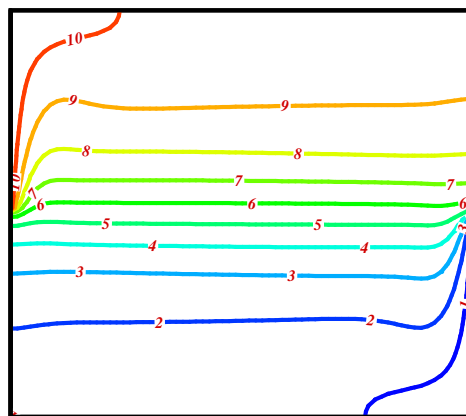
¹(0.091-:0.909: 0.091)
(أ)



(0.097-:0.937:0.062)
(د)



(0.091-:0.909:0.090)
(ج)



(0.097-:0.937:0.062)
(هـ)

الشكل (4.45): خطوط تساوي درجات الحرارة في الحالة الأولى

(أ) $Ra = 10^2$ ، (ب) $Ra = 10^3$ ، (ج) $Ra = 10^4$ ، (د) $Ra = 10^5$ ، (هـ) $Ra = 10^6$

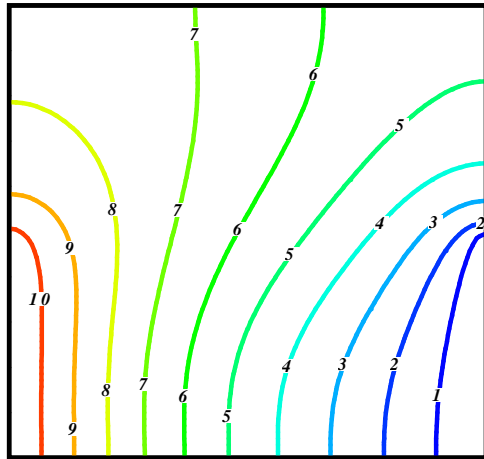
¹ - القيمة الأولى تمثل الخط الأدنى، القيمة الثانية هي الخط الأعظمي أما الثالثة فهي Δ الفرق بين خطين متتاليين

من أجل $Ra \leq 10^3$ تتشكل خطوط منحنية بجوار الجدارين البارد والساخن أي أن إنتقال الحرارة تتم عن طريق التوصيل فهو المهيمن على التبادل الحراري.

من أجل $Ra = 10^4$ نلاحظ تشكل خطوط منعوجة بجوار الجدارين البارد و الساخن دليل على بداية ظهور الحمل الحراري الطبيعي.

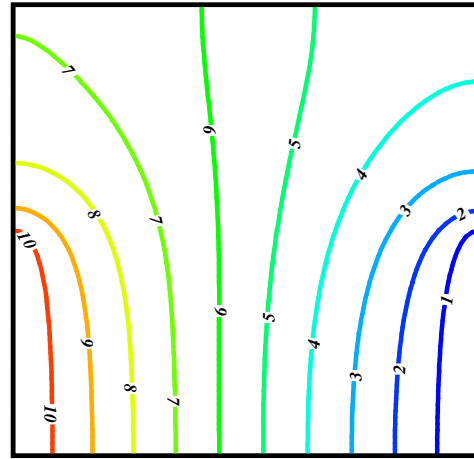
من أجل $Ra \geq 10^5$ نلاحظ تشكل خطوط أكثر انعوجا بجوار الجدارين البارد والساخن وهذا راجع إلى سيطرة الحمل الحراري الطبيعي على التبادل الحراري كما نلاحظ تشكل خطوط متوازية وسط التجويف وهذا يعني التدرج في درجة الحرارة تكون نحو الأعلى والإنتقال في درجات الحرارة يكون نحو الأسفل.

◀ الحالة الثانية:



(0.093-:0.900:0.060)

(ب)

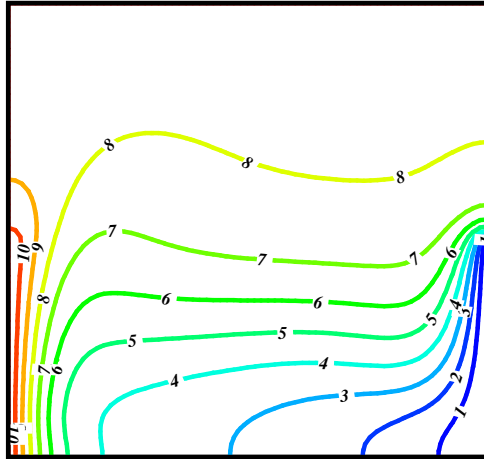


(0.091-:0.909: 0.090)

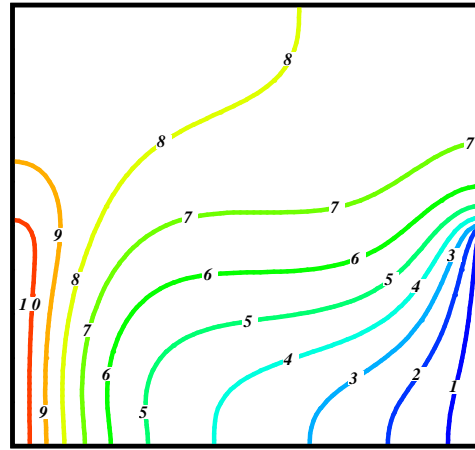
(أ)

الشكل (4.46): خطوط تساوي درجات الحرارة في الحالة الثانية

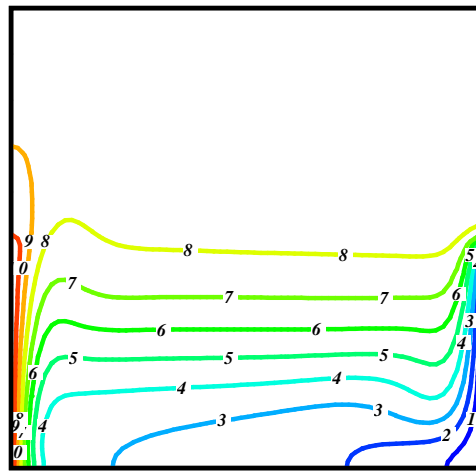
$$Ra = 10^3 \text{ (ب) ، } Ra = 10^2 \text{ (أ)}$$



(0.091-:0.909:0.091)
(د)



(0.093-:0.900:0.060)
(ج)



(0.093-:0.900:0.060)
(هـ)

الشكل (4.46): خطوط تساوي درجات الحرارة في الحالة الثانية

(ج) $Ra = 10^4$ ، (د) $Ra = 10^5$ ، (هـ) $Ra = 10^6$

من أجل $Ra \leq 10^3$ نلاحظ تشكل خطوط منحنية بجانب الجدارين البارد والساخن أي أن

انتقال الحرارة تتم عن طريق التوصيل فهو المهيمن على التبادل الحراري.

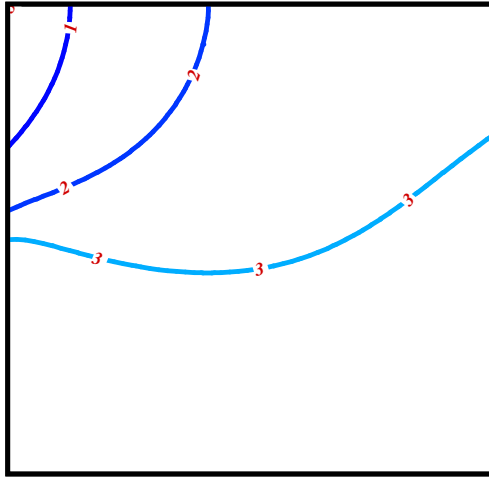
من أجل $Ra = 10^4$ نلاحظ بداية تشكل خطوط منعوجة بجانب الجدارين البارد وانطلاق

شعبة من خطوط تساوي درجات الحرارة من الصفر بجوار الجدار الساخن وهذا راجع لبداية

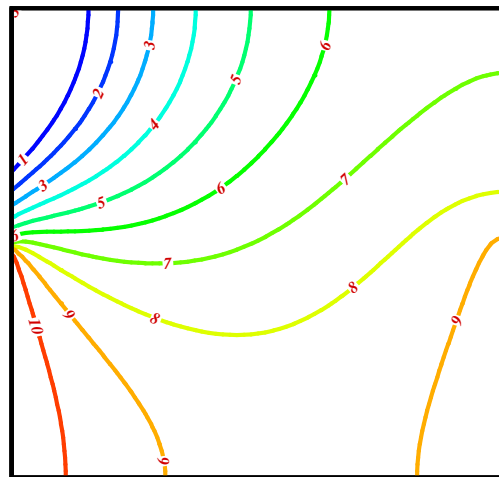
ظهور الحمل الحراري الطبيعي.

من أجل $Ra \geq 10^5$ نلاحظ تشكل خطوط منعوجة بجانب الجدار البارد اضافة إلى وجود تشعب في خطوط تساوي درجات الحرارة وانطلاقها من الصفر للجدار الساخن وهذا راجع إلى سيطرة الحمل الحراري الطبيعي على التبادل الحراري كما نلاحظ تشكل خطوط متوازية وسط التجويف وهذا ناتج عن وجود تدرج في درجة الحرارة من الأسفل نحو الأعلى و انتقال الحرارة من الأعلى نحو الأسفل.

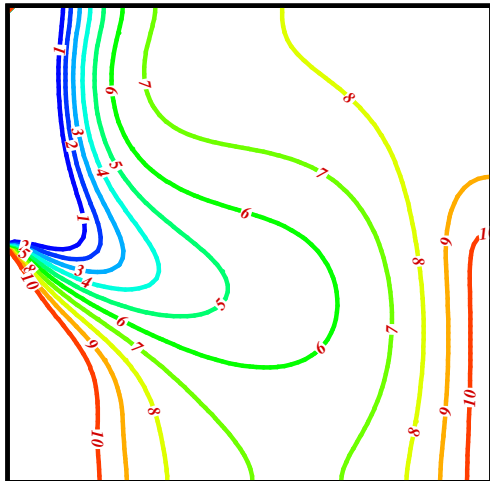
الحالة الثالثة:



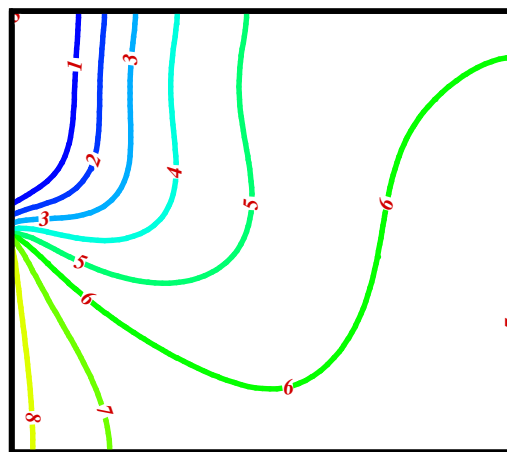
(0.04:0.030:0.330-)
(ب)



(0.04:0.02: 0.34-)
(ا)



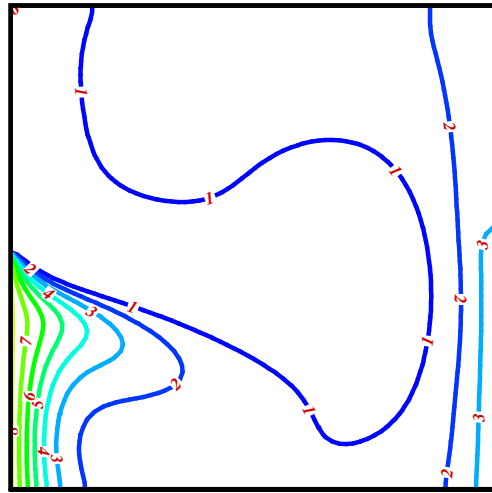
(0.01:0.01:-0.1-)
(د)



(0.04:0.120:0.240-)
(ج)

الشكل (4.47): خطوط تساوي درجات الحرارة في الحالة الثالثة

(ا) $Ra = 10^2$ ، (ب) $Ra = 10^3$ ، (ج) $Ra = 10^4$ ، (د) $Ra = 10^5$



(0.01:0.06:0.030-)

(هـ)

الشكل (4.47): خطوط تساوي درجات الحرارة في الحالة الثالثة

(هـ) $Ra = 10^6$

من أجل $Ra \leq 10^3$ نلاحظ تشكل خطوط منحنية بجانب الجدار الساخن أي أن إنتقال

الحرارة تتم عن طريق التوصيل فهو المهيمن على التبادل الحراري.

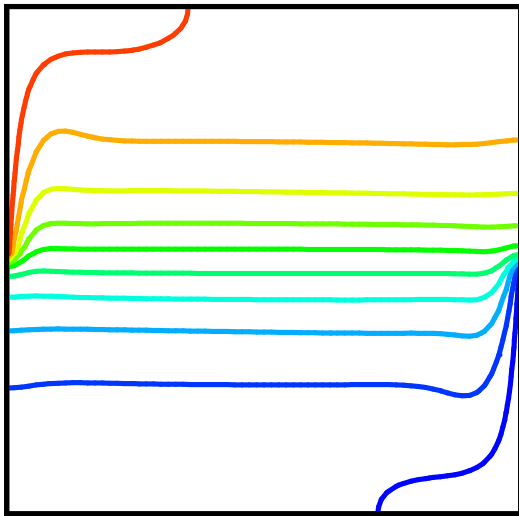
من أجل $Ra = 10^4$ نلاحظ بداية تشكل اعوجاج في خطوط تساوي درجات الحرارة بجانب

الجدار الساخن وهذا راجع لبداية ظهور الحمل الحراري الطبيعي.

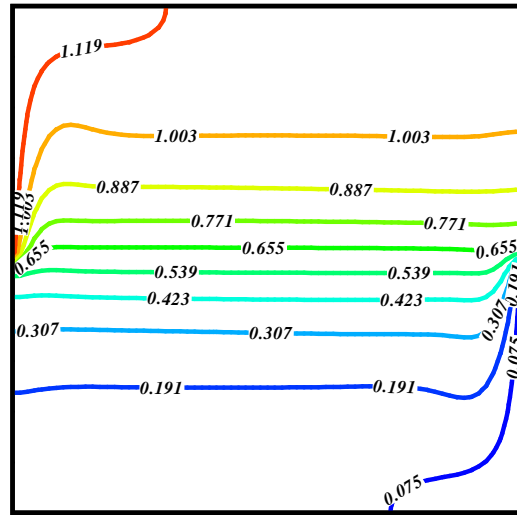
من أجل $Ra \geq 10^5$ نلاحظ تشكل حزمة منعوجة من خطوط تساوي درجات الحرارة بجانب

الجدار الساخن وهذا راجع إلى سيطرة الحمل الحراري الطبيعي على التبادل الحراري.

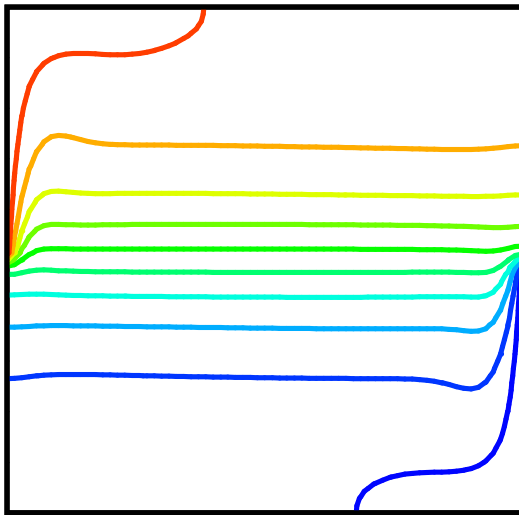
الحالة الرابعة:



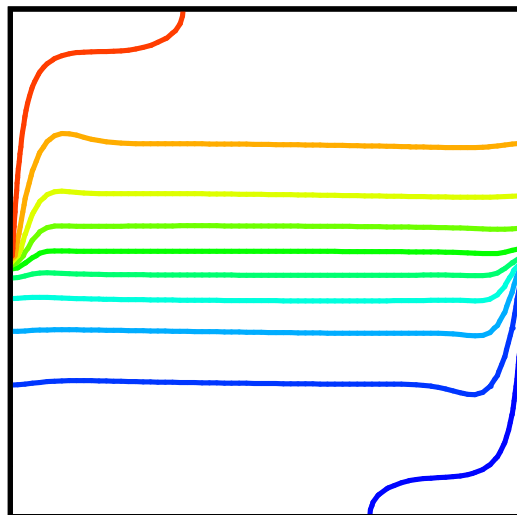
(ب)



(أ)



(د)



(ج)

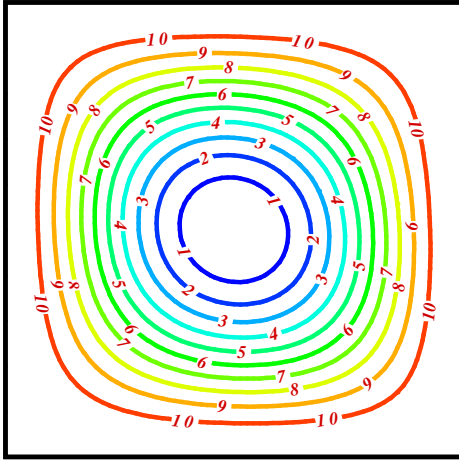
الشكل (4.48): خطوط تساوي درجات الحرارة في الحالة الرابعة من أجل:

أ. $\tau = 0.81$ و $\epsilon = 0.2$. ب. $\tau = 0.81$ و $\epsilon = 0.4$. ج. $\tau = 0.81$ و $\epsilon = 0.6$. د. $\tau = 0.81$ و $\epsilon = 0.8$.

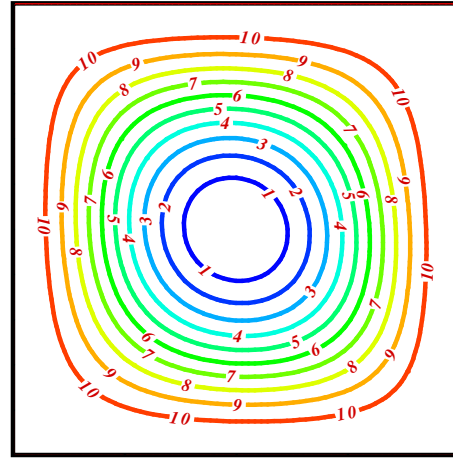
تبيّن الأشكال (4.48.أ) و (4.48.ب) و (4.48.ج) و (4.48.د) تشعب خطوط تساوي درجات الحرارة من الجدارين الساخن والبارد مع وجود خطوط متوازية وسط التجويف مما يدل على أنّ آلية إنتقال الحرارة هي الحمل الحراري الطبيعي بجوار الجدارين البارد والساخن والتوصيل وسط التجويف.

5.4.4 خطوط التيار:

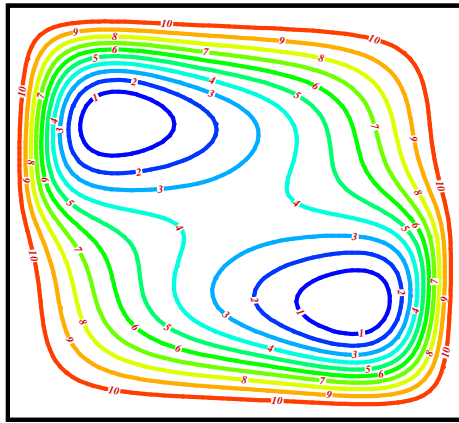
الحالة الأولى:



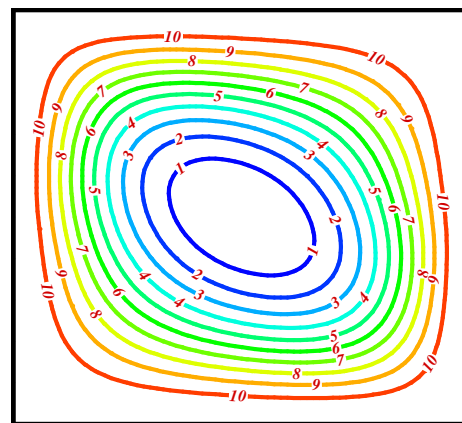
(0.065-:0.065-:0.652-)
(ب)



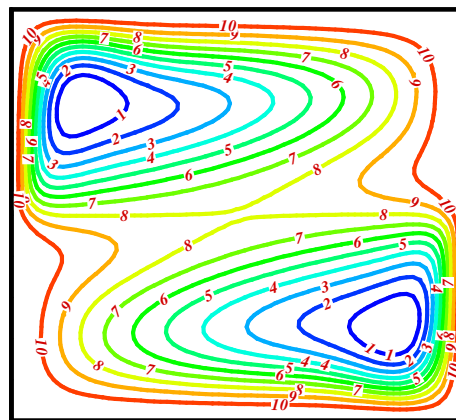
²(0.007-:0.008-: 0.078-)
(ا)



(0.308-:0.308-:3.079-)
(د)



(0.214-:0.214-:2.140-)
(ج)



(0.533-:0.532-:5.327-)
(هـ)

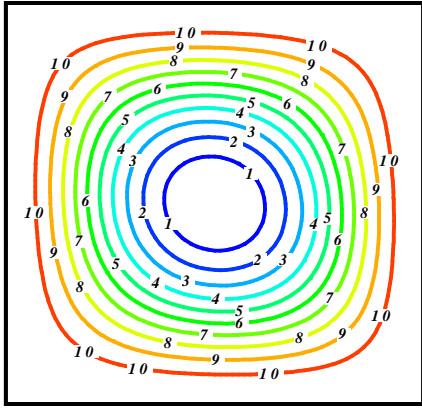
الشكل (4.49): خطوط التيار في الحالة الأولى

$Ra = 10^6$ (هـ) ، $Ra = 10^5$ (د) ، $Ra = 10^4$ (ج) ، $Ra = 10^3$ (ب) ، $Ra = 10^2$ (ا)

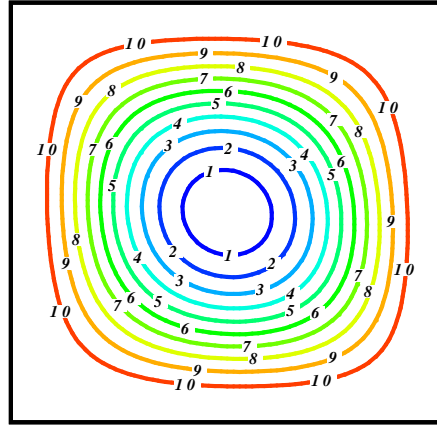
² - القيمة الأولى تمثل الخط الأدنى، القيمة الثانية هي الخط الأعظمي أما الثالثة فهي Δ الفرق بين خطين متتاليين

- * من أجل $Ra = 10^2$ و $Ra = 10^3$: نلاحظ تشكّل خلية أحادية سالبة متمركزة في وسط التجويف تدور باتجاه عقارب الساعة مما يدلّ على أنّ آلية إنتقال الحرارة هي التّوصيل.
- * من أجل $Ra = 10^4$: تتشكل خلية مركزية أحادية مشوّهة تدور باتجاه عقارب الساعة مما يدلّ على أنّ آلية إنتقال الحرارة هي التّوصيل.
- * من أجل $Ra = 10^5$: تتشكّل خليتان تدور كل منهما باتجاه عقارب الساعة مما يدلّ على أنّ آلية إنتقال الحرارة هي الحمل الحراري الطبيعي .
- * من أجل $Ra = 10^6$: تتشكّل خليتان تدور كل منهما باتجاه عقارب الساعة مما يدلّ على أنّ آلية إنتقال الحرارة هي الحمل الحراري الطبيعي .

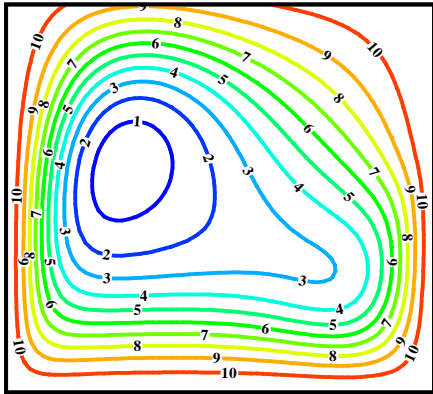
◀ الحالة الثانية:



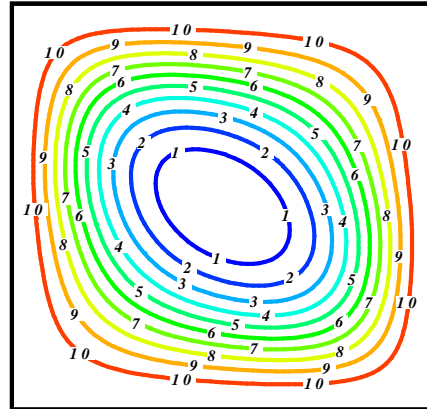
(0.078-؛0.078-؛0.776-)
(ب)



(0.009-؛0.008-؛0.083-)
(أ)



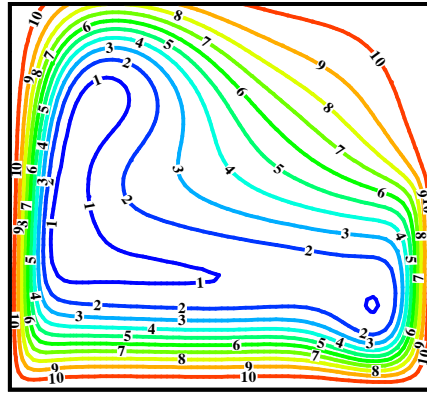
(0.687-؛0.687-؛6.872-)
(د)



(0.337-؛0.337-؛3.374-)
(ج)

الشكل (4.50): خطوط التيار في الحالة الثانية

$Ra = 10^2$ (أ)، $Ra = 10^3$ (ب)، $Ra = 10^4$ (ج)، $Ra = 10^5$ (د)



(1.031-؛1.030-؛10.304-)

(هـ)

الشكل (4.50): خطوط التيار في الحالة الثانية

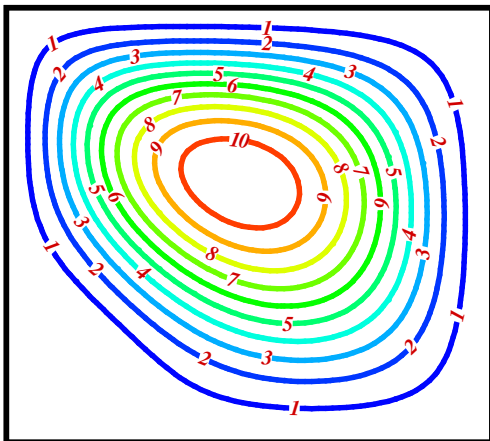
$$Ra = 10^6 \text{ (هـ)}$$

في الشكل (أ.4.50) تتشكل خلية مركزية دائرية سالبة تتوسط التجويف، تدور خطوط تيارها باتجاه عقارب الساعة دليل على أنّ آلية إنتقال الحرارة هي التوصيل، وكذا في الشكل (ب.4.50).

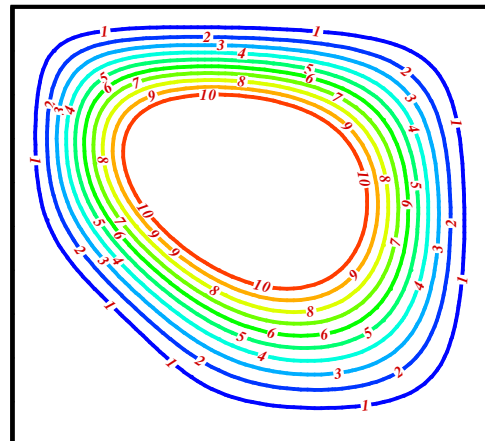
أمّا في الشكل (ج.4.50) فتتشكل خلية بيضوية سالبة تتوسط هي الأخرى التجويف تدور خطوط تيارها باتجاه عقارب الساعة ممّا يدلّ على أنّ آلية إنتقال الحرارة هي التوصيل. وتتشكل في الشكل (د.4.50) خلية دائرية سالبة جوار الجدار الأيسر سرعان ما تنتشوه لتميل جهة الجدار السفلي الأيمن، تدور خطوط تيارها جهة دوران عقارب الساعة ممّا يدلّ على أنّ آلية إنتقال الحرارة هي التوصيل.

بينما في الشكل (هـ.4.50) فتتشكل خليتان سالبتان، الأولى رئيسية جوار الجدار الأيسر والثانية ثانوية بجانب الجدار الأيمن للتجويف تدور خطوط تيارها باتجاه عقارب الساعة ممّا يدلّ على أنّ آلية إنتقال الحرارة هي الحمل الحراري الطبيعي.

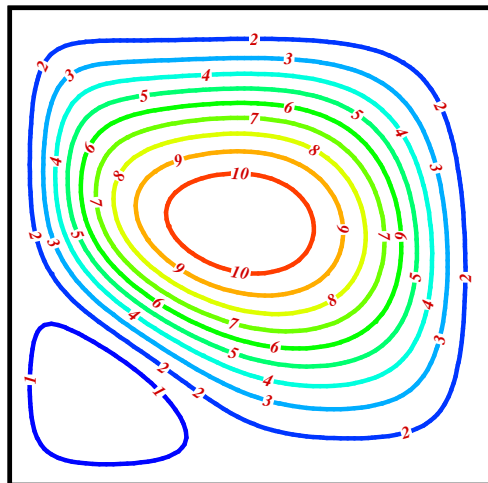
الحالة الثالثة:



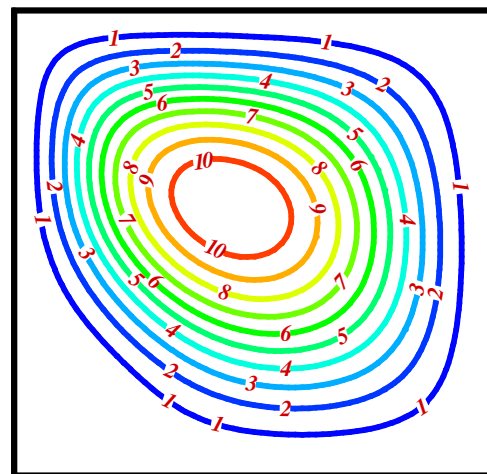
(0.016:0.153:0.009)
(أ)



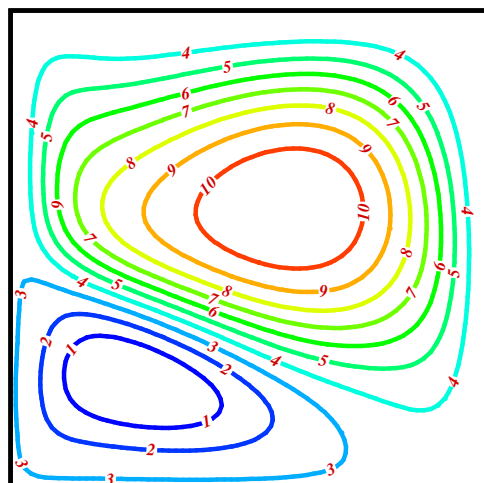
(0.001:0.010:0.001)
(ب)



(0.673:5.893:0.164-)
(ج)



(0.17:1.652:0.122)
(د)



(1.884:13.059:3.897-)
(هـ)

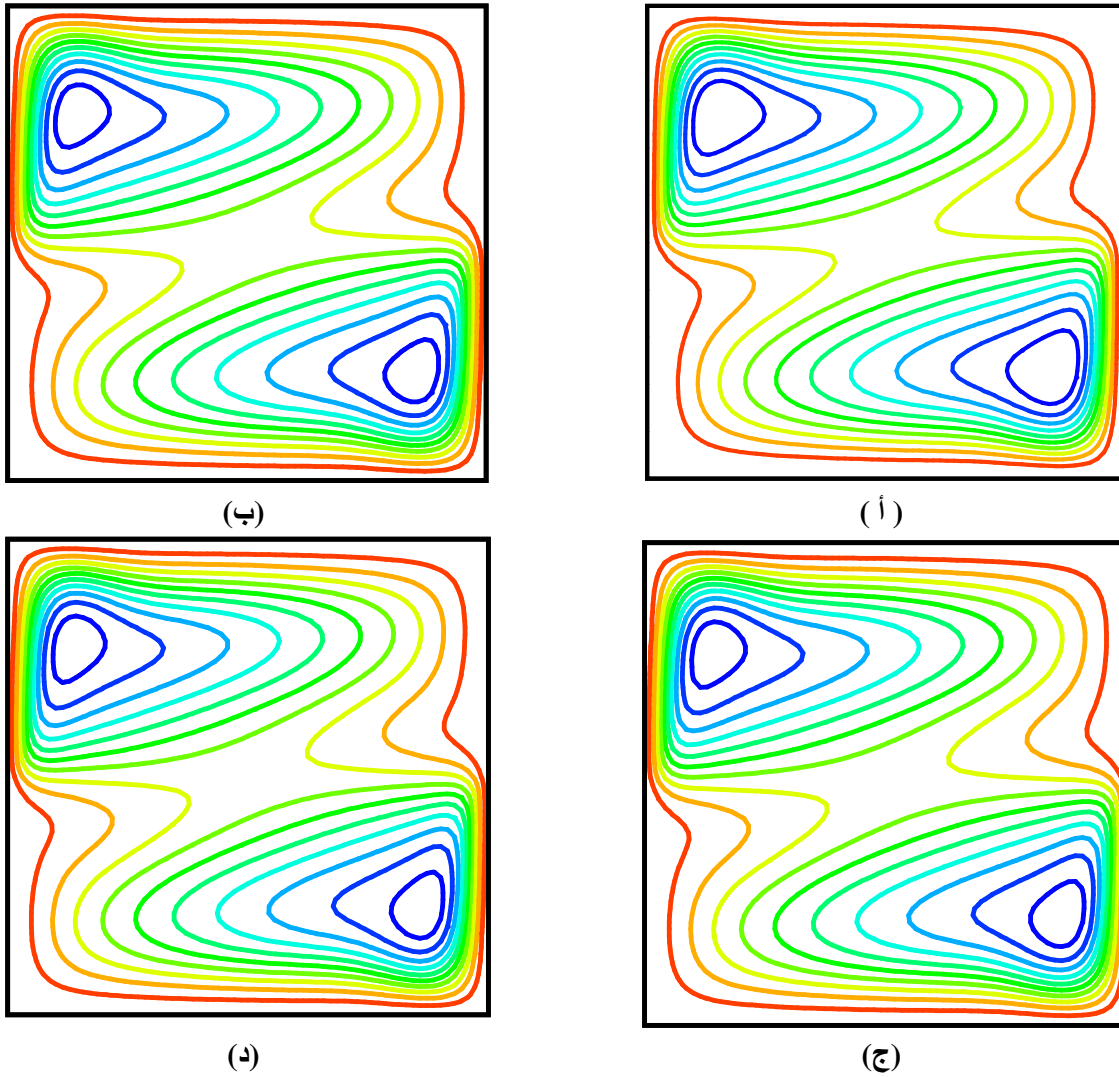
الشكل (4.51): خطوط التيار في الحالة الثالثة

$Ra = 10^6$ (هـ)، $Ra = 10^5$ (د)، $Ra = 10^4$ (ج)، $Ra = 10^3$ (ب)، $Ra = 10^2$ (أ)

نلاحظ تشكل خلية أحادية مركزية من أجل $Ra = 10^2$ و $Ra = 10^3$ و $Ra = 10^4$ تدور عكس إتجاه عقارب الساعة أي أن آلية إنتقال الحرارة هي التّوصيل.

أمّا من أجل $Ra = 10^5$ و $Ra = 10^6$ فنلاحظ تشكل خليتان متعاكستان الأولى رئيسية تدور عكس إتجاه عقارب الساعة والأخرى ثانوية تدور بإتجاه عقارب الساعة أي أن آلية إنتقال الحرارة هي الحمل الحراري الطّبيعي.

◀ الحالة الرابعة:



الشكل (4.52): خطوط التيار في الحالة الرابعة من أجل:

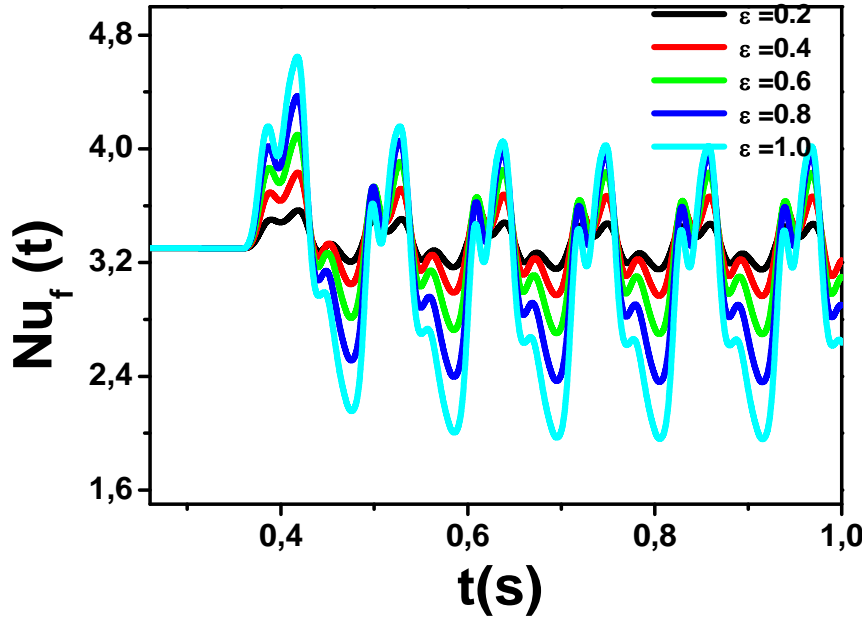
$$أ. \tau = 0.81 \text{ و } \varepsilon = 0.2 \text{ ، ب. } \tau = 0.81 \text{ و } \varepsilon = 0.4 \text{ ، ج. } \tau = 0.81 \text{ و } \varepsilon = 0.6 \text{ ، د. } \tau = 0.81 \text{ و } \varepsilon = 0.8$$

تبيّن الأشكال (4.52.أ) و (4.52.ب) و (4.52.ج) و (4.52.د) تشكل خليتين رئيسيتين الأولى بجانب الجدار الساخن و الثانية بجوار الجدار البارد تدوران باتجاه عقارب الساعة أي أن آلية إنتقال الحرارة هي الحمل الحراري الطّبيعي.

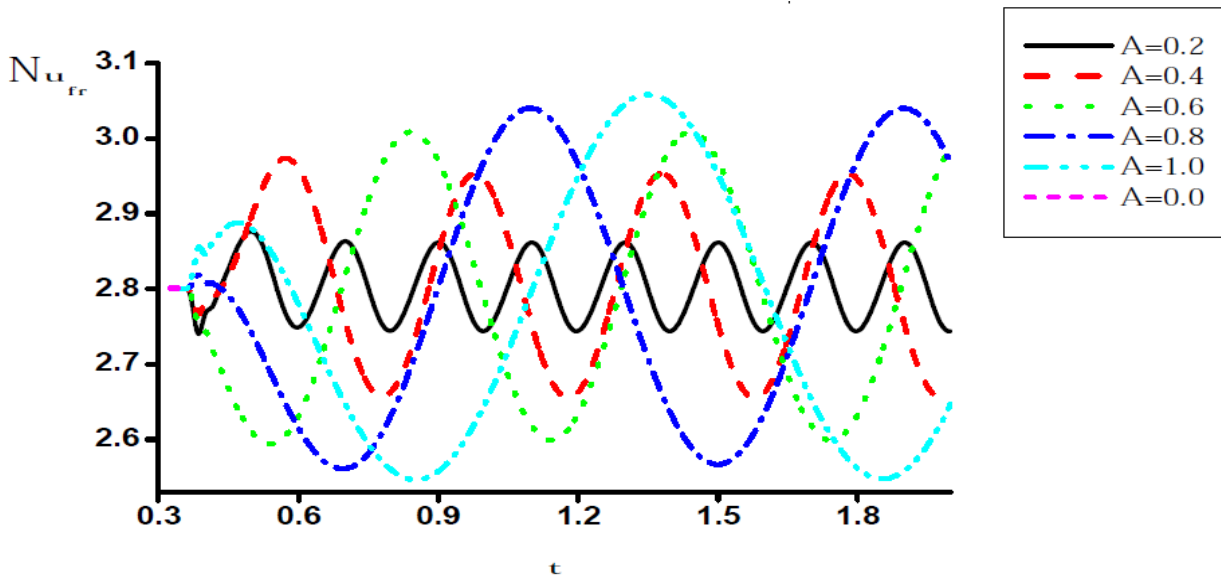
5.4 دراسة مقارنة:

1.5.4 تأثير السعة:

من أجل $Ra = 10E5$:



(أ)



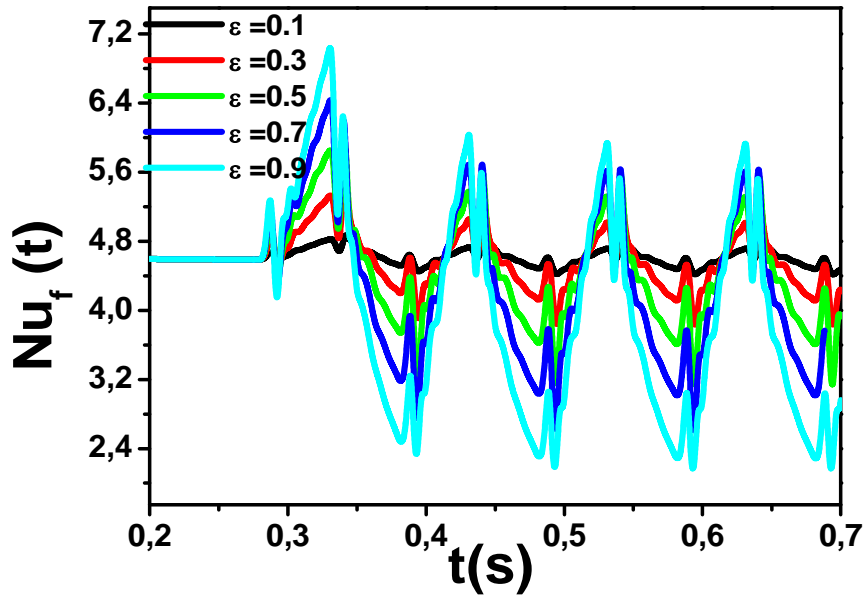
(ب)

الشكل (4.53): تأثير السعة على Nu_f من أجل $Ra = 10E5$ والدور $\tau = 0.1$

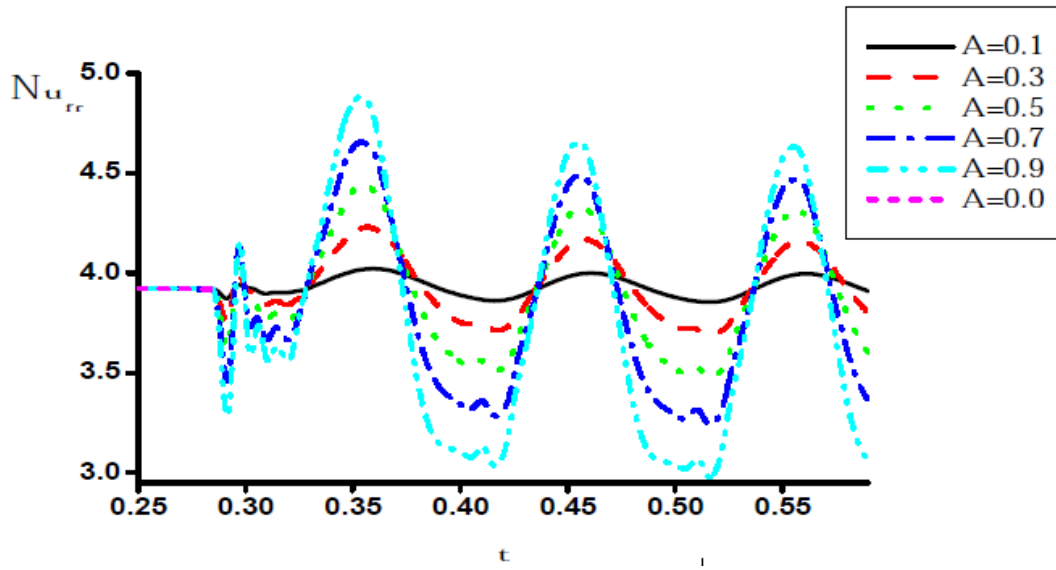
(أ) نتائج الحساب، (ب) نتائج [29]

نلاحظ أن كمية الحرارة المحررة من الجزء البارد للجدار الأيمن تكون أكبر في الشكل (أ) فمثلاً من أجل $\epsilon = 0.2$ تكون $Nu_f = 3.5$ عند الشكل (أ) بينما تكون مساوية لـ 2.89 في الشكل (ب).

من أجل $Ra = 10E6$



(أ)



(ب)

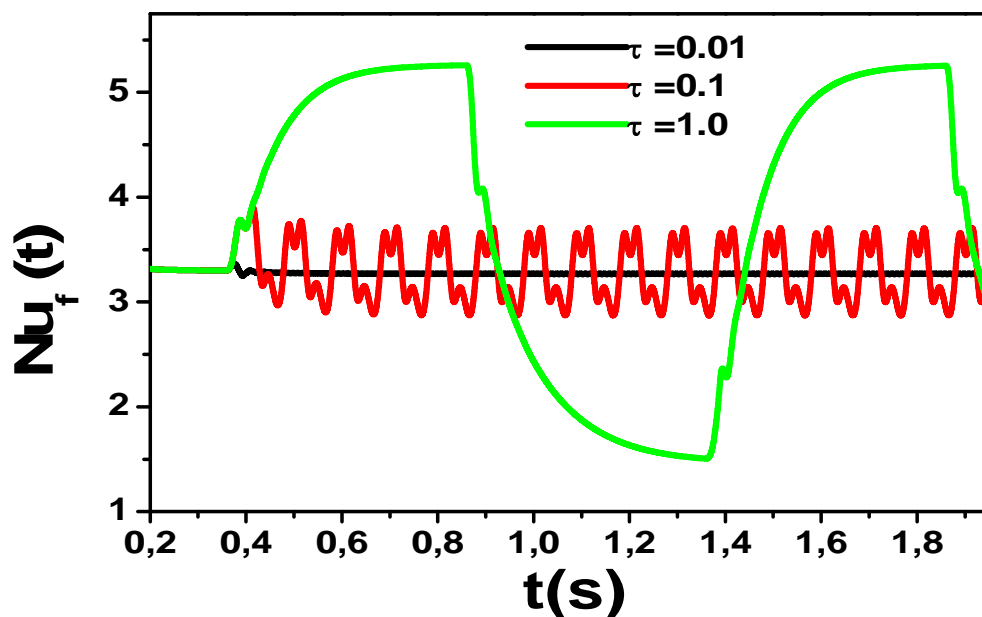
الشكل (4.54): تأثير السعة على Nu_f من أجل $Ra = 10E6$ والدور $\tau = 0.1$

(أ) نتائج الحساب، (ب) نتائج [29]

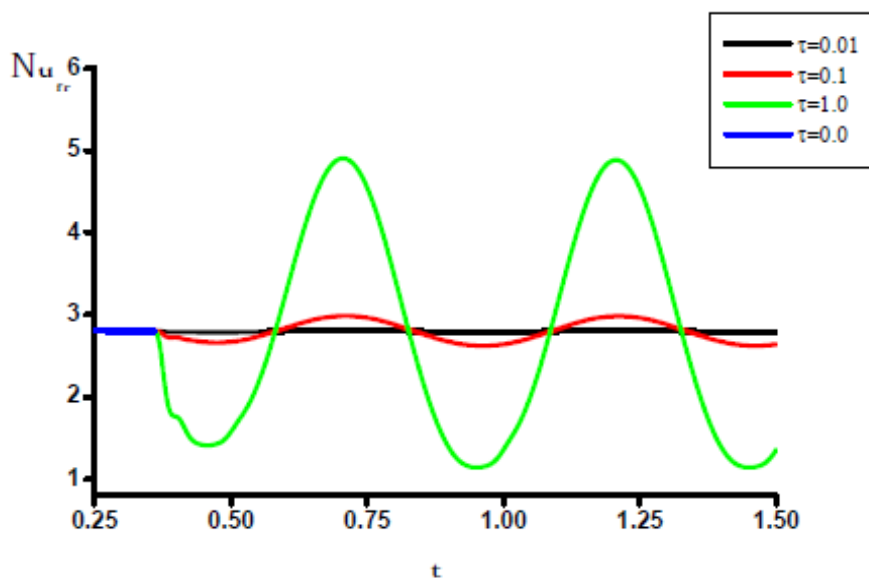
نلاحظ أن كمية الحرارة المحررة من الجزء البارد للجدار الأيمن تكون أكبر في الشكل (أ) فمثلاً من أجل $\epsilon = 0.2$ تكون $Nu_f = 4.8$ عند الشكل (أ) بينما تكون مساوية لـ 4.1 في الشكل (ب).

2.5.4 تأثير الدور:

ϵ من أجل $Ra = 10E5$:



(i)



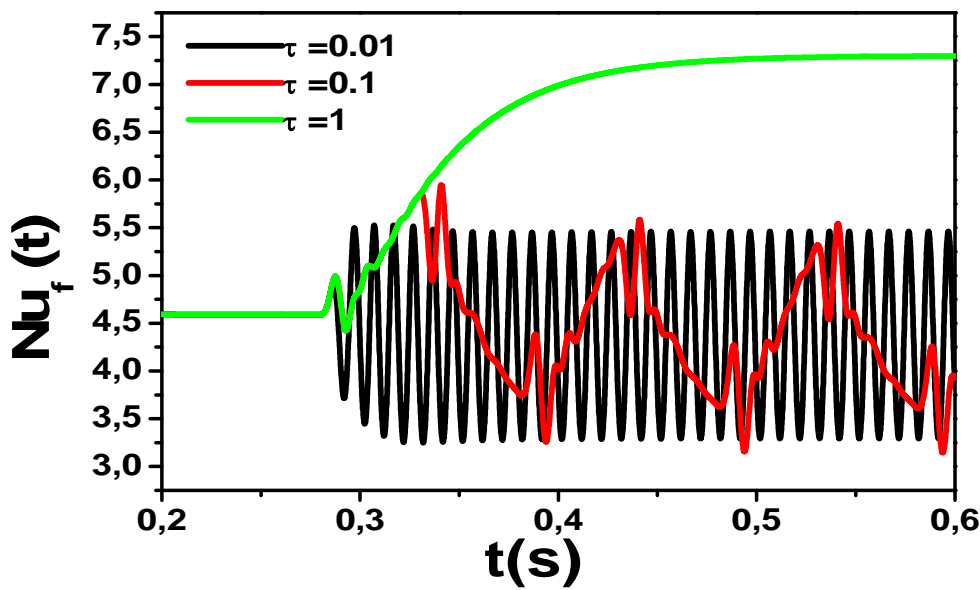
(ب)

الشكل (4.55): تأثير الدور على Nu_f من أجل $Ra = 10E5$ و $\epsilon = 0.5$

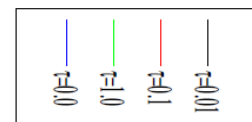
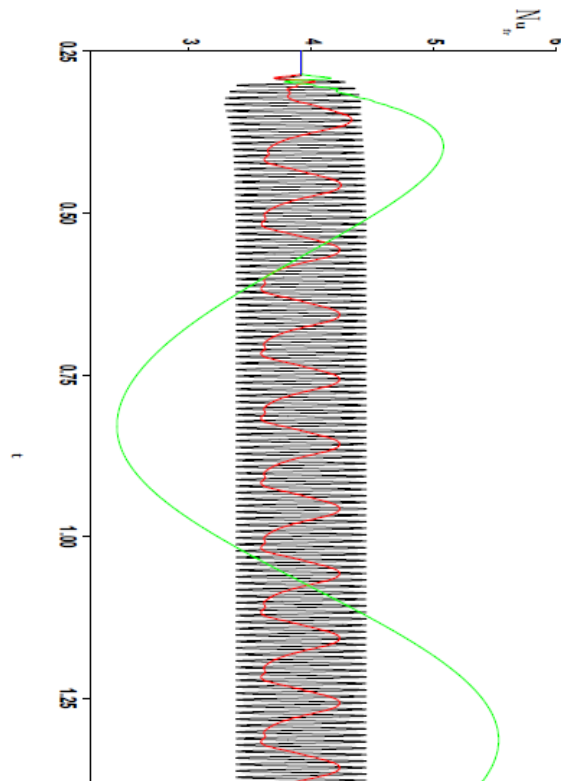
(أ) نتائج الحساب، (ب) نتائج [29]

نلاحظ أنّ كمية الحرارة المحررة من الجزء البارد للجدار الأيمن تكون أكبر في الشكل (أ) فمثلاً من أجل $\tau = 0.01$ تكون $Nu_f = 3.3$ عند الشكل (أ) بينما تكون مساوية لـ 2.8 في الشكل (ب).

من أجل $Ra = 10E6$



(i)



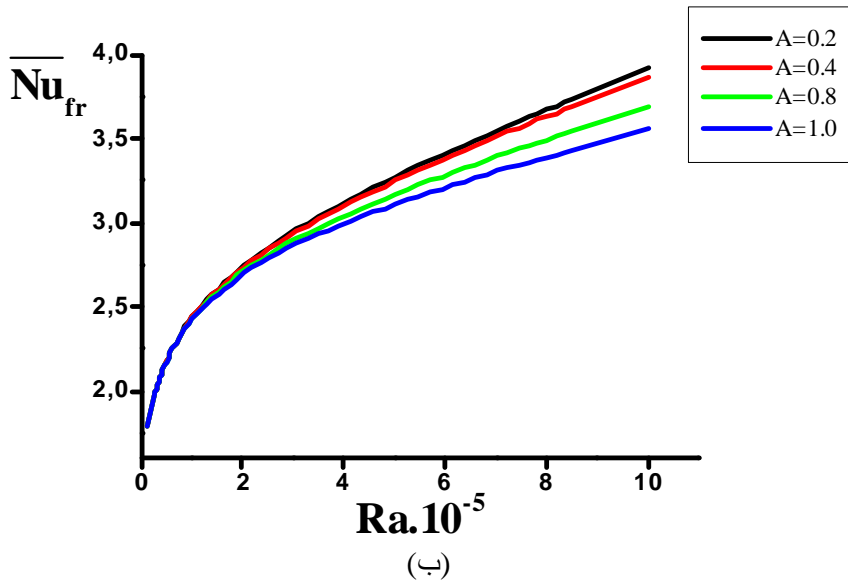
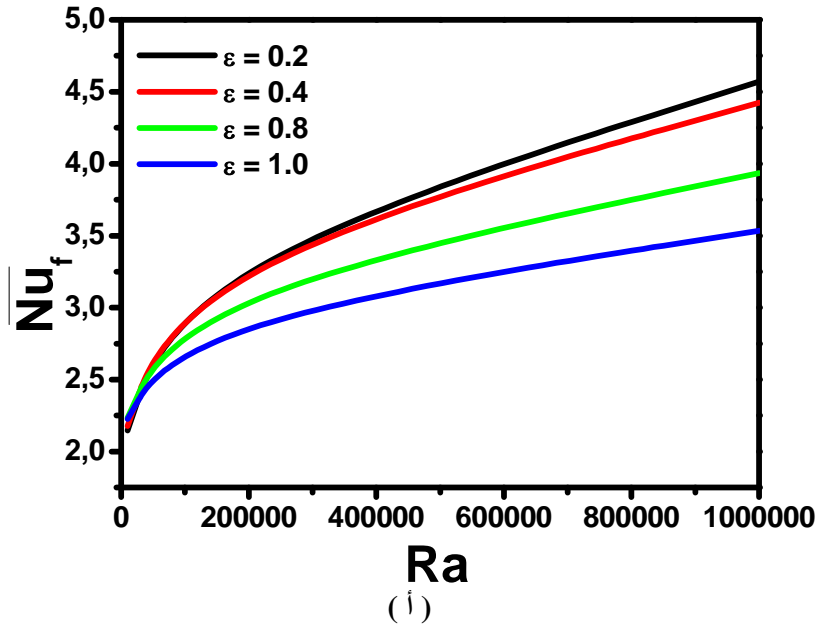
(ب)

الشكل (4.56): تأثير الدور على Nu_f من أجل $Ra = 10E5$ و $\varepsilon = 0.5$

(أ) نتائج الحساب، (ب) نتائج [29]

نلاحظ أنّ كمية الحرارة المحررة من الجزء البارد للجدار الأيمن تكون أكبر في الشكل (أ) فمثلاً من أجل $\tau = 0.01$ تكون $Nu_f = 5.5$ عند الشكل (أ) بينما تكون مساوية لـ 4.4 في الشكل (ب).

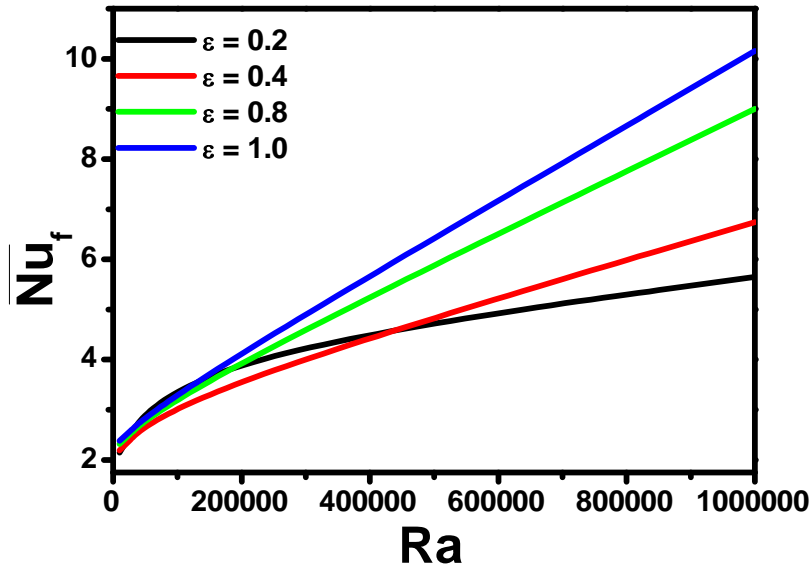
3.5.4 تأثير عدد راييلي:



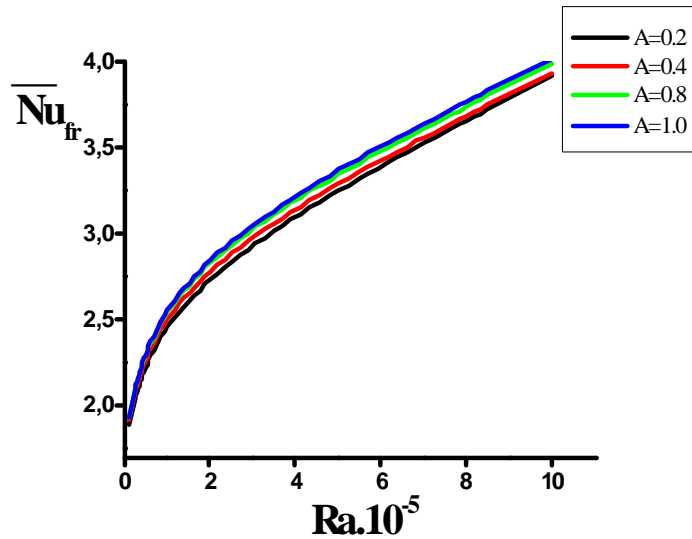
الشكل (4.57): تغير \overline{Nu}_f بدلالة Ra من أجل $\tau = 0.1$ وقيم مختلفة لـ ε

(أ) نتائج الحساب، (ب) نتائج [29]

نلاحظ أنّ \overline{Nu}_f تزداد بزيادة Ra في كلتا البيانيين غير أنّ في الشكل (أ) إنطلاق \overline{Nu}_f تكون من 2.2 مع تطابق $\varepsilon = 0.2$ و $\varepsilon = 0.4$ ثمّ يتباعدان أمّا في الشكل (ب) فتكون إنطلاق \overline{Nu}_f من 1.75 مع تطابق بين $\varepsilon = 0.2$ و $\varepsilon = 0.4$.



(أ)

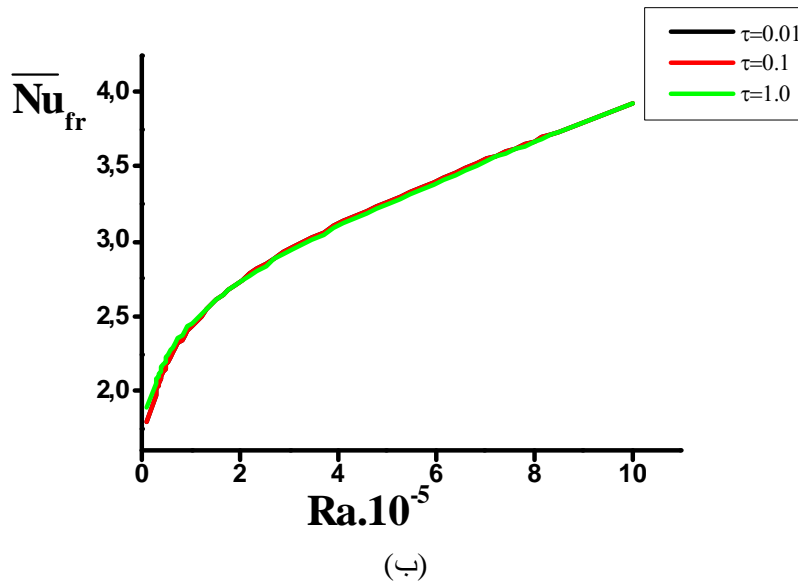
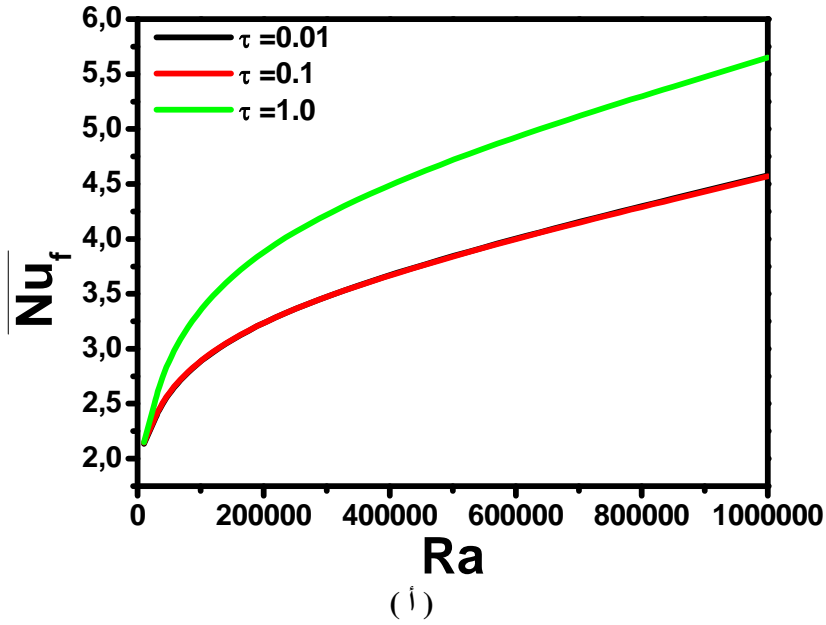


(ب)

الشكل (4.58): تغير \overline{Nu}_f بدلالة Ra من أجل $\tau = 1.0$ وقيم مختلفة لـ ε

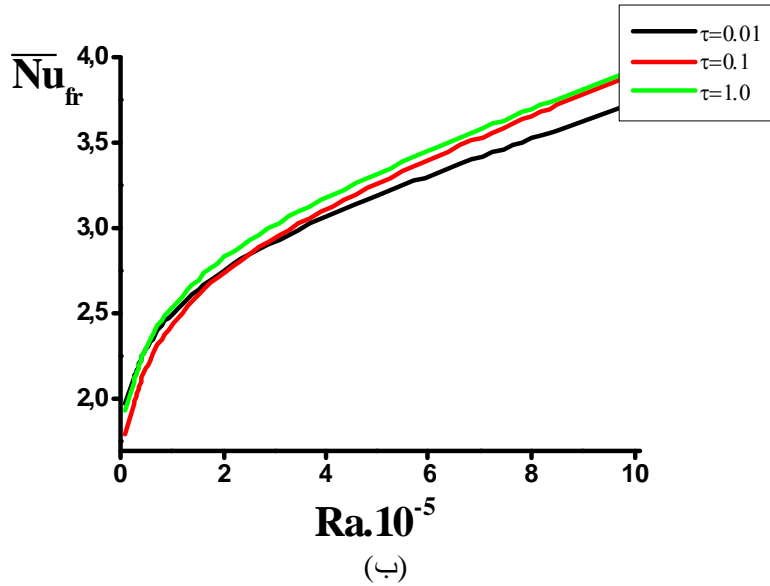
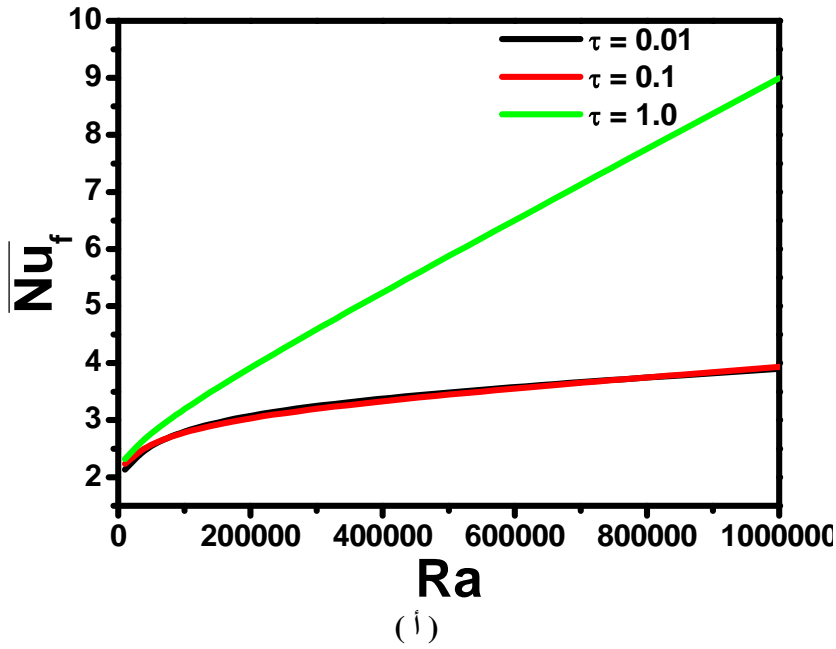
(أ) نتائج الحساب، (ب) نتائج [29]

نلاحظ أنّ \overline{Nu}_f تزداد بزيادة Ra في كلتا البيانيين غير أنّ في الشكل (أ) إنطلاقة \overline{Nu}_f تكون من 2 مع وجود تباعدات وتقاطعات بين المنحنيات أمّا في الشكل (ب) فتكون إنطلاقة \overline{Nu}_f من 1.8 مع وجود شبه تطابق بين المنحنيات.



الشكل (4.59): تغير \overline{Nu}_f بدلالة Ra من أجل $\varepsilon = 0.2$ وقيم مختلفة لـ τ
(أ) نتائج الحساب، (ب) نتائج [29]

نلاحظ أنّ \overline{Nu}_f تزداد بزيادة Ra في كلتا البيانيين غير أنّ في الشكل (أ) إنطلاقة \overline{Nu}_f تكون من 2.15 مع وجود تطابق بين $\tau = 0.01$ و $\tau = 0.1$ وتباعدا المنحنى $\tau = 1.0$ أمّا في الشكل (ب) فتكون إنطلاقة \overline{Nu}_f من 1.75 مع وجود تطابق بين المنحنيات.



الشكل (4.60): تغير \overline{Nu}_f بدلالة Ra من أجل $\varepsilon = 0.8$ وقيم مختلفة لـ τ
(أ) نتائج الحساب، (ب) نتائج [29]

نلاحظ أنّ \overline{Nu}_f تزداد بزيادة Ra في كلتا البيانيين غير أنّ في الشكل (أ) إنطلاقة \overline{Nu}_f تكون من 2.15 مع وجود تطابق بين المنحنيين من أجل $\tau = 0.1$ و $\tau = 0.01$ وتباعد المنحنى من أجل $\tau = 1.0$ ، أمّا في الشكل (ب) فتكون إنطلاقة \overline{Nu}_f من 1.75 مع وجود شبه تطابق بين المنحنيات.

الخاتمة:

تمت دراستنا العددية لمحاكاة الحمل الحراري الطبيعي للهواء ($Pr = 0.71$) داخل تجويف متوازي المستطيلات ذو مقطع مربع $1m \times 1m$ موجه نحو الجنوب في أربع حالات هي:

1- الحالة الأولى: نعرض نصفًا جانبيًا التجويف الجنوبي العلوي الأيسر والأيمن السفلي لدرجة حرارة ثابتة ونعزل بقية الجدران.

2- الحالة الثانية: نعرض نصفًا جانبيًا التجويف الجنوبي السفلي الأيسر والأيمن السفلي لدرجة حرارة ثابتة ونعزل بقية الجدران.

3- الحالة الثالثة: نعرض النصف الجنوبي العلوي للتجويف لتدفق حراري ثابت والنصف الأيمن السفلي لجدار التجويف لدرجة حرارة ثابتة ونعزل بقية الجدران.

4- الحالة الرابعة: نعرض النصف الجنوبي العلوي للتجويف لدرجة حرارة تحريضية نبضية ذات إشارة مربعة والنصف الأيمن السفلي لجدار التجويف لدرجة حرارة ثابتة ونعزل بقية الجدران.

وذلك من أجل $10^2 \leq Ra \leq 10^6$ وشبكة 71×71 عدا الحالة الرابعة فتكون من أجل $10^4 \leq Ra \leq 10^6$.
 إعتدنا في دراستنا على تقريب بوسينسك، ثم استعملنا في حلنا العددي طريقة الفروق المنتهية. حددنا الشروط الابتدائية والشروط الحدية بدلالة دالة التيار-الإعصار، واتبعنا الطريقة الضمنية للإتجاهات المتناوبة من أجل معادلة الطاقة والإعصار ثم صغناهما على شكل مصفوفة مثلثية، أما معادلة التيار فصيغت بطريقة فوق الإسترخاء المتعاقب. ثم نشرنا مركبات السرعة بطريقة الفروق المنتهية المركزية والعدد Nu بطريقة سمبسون.

جسدنا النتائج المتحصل عليها في شكل خطوط تساوي درجات الحرارة و خطوط تساوي التيار. في الحالتين الأولى والثانية تنتقل الحرارة داخل التجويف عن طريق التوصيل من أجل $Ra \leq 10^3$ ، أما بداية ظهور الحمل الحراري الطبيعي فيكون من أجل $Ra = 10^4$ ، ويكون هذا الانتقال هو الطّاعي على التّبادل الحراري من أجل $Ra \geq 10^5$.

أما في الحالة الثالثة فلاحظنا تشكل خلية أحادية مركزية من أجل $Ra \leq 10^4$ تدور عكس إتجاه عقارب الساعة أي أن آلية إنتقال الحرارة هي التوصيل. بينما من أجل $Ra \geq 10^5$ تتشكل خليتان متعاكستان الأولى رئيسية تدور عكس إتجاه عقارب الساعة والأخرى ثانوية تدور بإتجاه عقارب الساعة أي أن آلية إنتقال الحرارة تتم بالحمل الحراري الطبيعي.

في الحالة الرابعة قمنا بتحريض نبضي لدرجة الحرارة على النصف العلوي للجدار الأيسر وذلك حتى نحاكي تغير درجة الحرارة بفعل الغيوم المارة في السماء بشكل دوري، فلاحظنا أنّ العدد نوسلت المتعلق بالجزء البارد للتجويف أقل من الصّفر وهذا يعني وجود طرح للحرارة داخل التجويف، ومن هنا نستخلص أنّ التسخين الأمثل يكون في الحالة الرابعة.

1. إختيار الشبكة:

عدد رايلى	الشبكة	\overline{Nu}_{moy}	الفروق النسبية	$\overline{\psi}_{cent}$	الفروق النسبية	\overline{T}_{cent}	الفروق النسبية
$Ra = 10^2$	21*21	0,69516		-0,08057		0,49862	
	31*31	0,69662	0,2100%	-0,08321	3,2766%	0,49866	0,0080%
	41*41	0,68997	-0,9546%	-0,08453	1,5863%	0,49868	0,0040%
	51*51	0,69055	0,0840%	-0,08531	0,9227%	0,49869	0,0020%
	61*61	0,68751	-0,4402%	-0,08583	0,6095%	0,49869	0%
	71*71	0,6879	0,0567%	-0,0862	0,4310%	0,4987	0,0020%
$Ra = 10^3$	21*21	0,7312		-0,66614		0,49865	
	31*31	0,73505	0,5265%	-0,69011	3,5983%	0,49869	0,0080%
	41*41	0,72836	-0,9101%	-0,70221	1,7533%	0,49871	0,0040%
	51*51	0,72961	0,1716%	-0,70946	1,0324%	0,49872	0,0020%
	61*61	0,72642	-0,4372%	-0,71428	0,6793%	0,49873	0,0020%
	71*71	0,72714	0,0991%	-0,71771	0,4802%	0,49873	0%
$Ra = 10^4$	21*21	1,08825		-2,13797		0,49925	
	31*31	1,09774	0,8720%	-2,23532	4,5533%	0,49925	0%
	41*41	1,08915	-0,7825%	-2,28692	2,3083%	0,49925	0%
	51*51	1,09282	0,3369%	-2,31841	1,3769%	0,49925	0%
	61*61	1,08856	-0,3898%	-2,33948	0,9088%	0,49926	0,002%
	71*71	1,09044	0,1727%	-2,35452	0,6428%	0,49926	0%
$Ra = 10^5$	21*21	1,71479		-1,88722		0,49976	
	31*31	1,69512	-1,1470%	-2,03508	7,8348%	0,49975	-0,002%
	41*41	1,67684	-1,0783%	-2,12695	4,5143%	0,49975	0%
	51*51	1,68232	0,3268%	-2,18747	2,8453%	0,49975	0%
	61*61	1,67659	-0,3406%	-2,22966	1,9287%	0,49975	0%
	71*71	1,68039	0,2266%	-2,26049	1,3827%	0,49975	0%
$Ra = 10^6$	21*21	2,70961		-1,24296		0,49991	
	31*31	2,45018	-9,5744%	-1,34846	8,4878%	0,4999	-0,002%
	41*41	2,35406	-3,9229%	-1,42268	5,5040%	0,49989	-0,002%
	51*51	2,33305	-0,8925%	-1,48608	4,4563%	0,49989	0%
	61*61	2,31321	-0,8503%	-1,53873	3,5428%	0,49989	0%
	71*71	2,31311	-0,0043%	-1,58183	2,8010%	0,49989	0%

الجدول (A1.1): تأثير خطوة الشبكة على عدد رايلى

- [1] Adrian Bejan , **Convection Heat transfer**, John Wiley and sons, New York, 1984.
- [2] G. De Vahl Davis, **Natural Convection of air in square cavity :a Bench Mark numerical solution** , international journal for numerical methods in fluids, vol.3, 249-264 , 1983.
- [3] المهندس عبد الحق محمد غالب التميمي، معايير الراحة الحرارية للأبنية السكنية في عدد من المدن اليمنية، مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية، المجلد الخامس والعشرون-العدد الثاني-2009.
- [4] M. NOVEMBER and M. W. NANSTEEL, **Natural convection in rectangular enclosures heated from below and cooled along one side**, Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 30. No. 11, PP. 2319-2329, 1987, Printed in Great Britain.
- [5] D. S. LIN and M. W. NANSTEEL, **Natural convection heat transfer in a square enclosure containing water near its density maximum**, Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 30. No. 11, PP. 1433-2440, 1987, Printed in Great Britain.
- [6] S. Acharya, C. H. Tsang et Baton Rouge, **Influence of wall conduction on natural convection in an inclined square enclosure**, Wärme-und Stoffübertragung 21, 19-30 (1987).
- [7] M. Kazmierczak et Z. Chinoda, **Buoyancy-driven flow in an enclosure with time periodic boundary conditions**, int. J. Heat Mass Transfert. Vol. 35. N0. 6, pp. 1507-1518 , 1992.
- [8] N. Yücel et H. Türkoglu, **Natural convection in rectangular enclosures with partial heating and cooling**, Wärme-und Stoffübertragung 29 (1994) 471-478.
- [9] S. MERGUI et F. PENOT, **Convection Naturelle en cavité carrée différentiellement chauffée : investigation expérimentale à $Ra = 1.69 \times 10^9$** , int. J. Heat Mass Transfert. Vol. 39. N0. 3, pp. 563-574 , 1996.
- [10] M. Akiyama and Q. P. Chong, **Numerical analysis of natural convection with surface radiation in a square enclosure** , Numerical Heat Transfer, Part A, 31: 419-433, 1997, Copyright © 1997 Taylor & Francis.
- [11] Btisse Abourida , Mohamed Hasnaoui et Samira Douamna, **Convection naturelle dans une cavité carrée avec des parois verticales soumises à des températures périodiques**, Rev. Cén. Therm. (1998) 37, 788-800 © Elsevier, Paris.
- [12] E. K. Lakhal, M. Hasnaoui et P. Vasseur, **Etude numérique de la convection Naturelle transitoire au sein d'une cavité chauffée périodiquement avec différents types d'excitations** , international journal of heat and Mass Transfer 42 (1999) 3927-3941.
- [13] Mahfoud Kadja et Rabah Hacene, **Simulation numérique de la convection naturelle d'un liquide soumise à des conditions pariétales variable**, Int. J. Therm. Sci. (1999) 38, 348-354 © Elsevier, Paris.
- [14] Samira Douamna , Mohamed Hasnaoui et Btisse Abourida, **Convection naturelle instationnaire dans une géométrie répétitive périodiquement chauffée par le bas: analyse par la transformation rapide de Fourier**, int. J. Therm. Sci. (1999) 38, 797-807.
- [15] I. E. Sarris, I. Lekakis, and N. S. Vlachos, **Natural convection in a 2D enclosure with sinusoidal upper wall temperature** , Numerical Heat Transfer, Part A, 42: 513-530, 2002, Copyright © 2002 Taylor & Francis.
- [16] M. Rahman and M. A. R. Sharif, **Numerical study of laminar natural convection in inclined rectangular enclosures of various aspect ratios** , Numerical Heat Transfer, Part A, 44: 355-373, 2003, Copyright © Taylor & Francis Inc.
- [17] M^{elle} Bakhti Fatima-Zohra, **Simulation numérique directe de la convection naturelle dans une conduite verticale**, (mémoire de magister , université Mouhamed Boudiaf de Msila, 2004).

- [18] Nawaf H. Saeid and Yusli Yaacob , **Natural Convection in a Square Cavity with Spatial Side-Wall Temperature Variation**, Numerical Heat Transfer, Part A, 49: 683–697, 2006, Copyright © Taylor & Francis Group, LLC.
- [19] E. H. Ridouane, M. Hasnaoui, A. Amahmid and A. Raji, **interaction between natural convection and radiation in a square cavity heated from below**, Numerical Heat Transfer, Part A, 45: 289–311, 2004, Copyright © Taylor & Francis Inc.
- [20] Nouredine RETIEL , Mohamed Amine Khiat et El-Hadi Bouguerra, **Effet de l'inclinaison sur la convection naturelle instationnaire dans une cavité demi-cylindrique**, 12^{èmes} Journées Internationales de Thermique.(2005)Tanger,Maroc.
- [21] Manab Kumar Das et K.Saran Kumar Reddy,**Conjugate natural convection heat transfer in an inclined square cavity containing a conducting block**, International Journal of Heat and Mass Transfer 49(2006)4987-5000.
- [22] Zarit Rida, **convection naturelle instationnaire dans une enceinte fermée**(mémoire de magister ,université 20 août 1955 Skikda,2006).
- [23] Yamina Harnane et Mouhamed AFRID, **Modélisation de la convection laminaire de Rayleigh- Benard dans une enceinte cubique(Etude de la transition de l'écoulement a des différents nombres de Rayleigh** ,Manuscrit auteur, publié dans « JITH2007 ,Albi :France(2007) » 13^{èmes} Journées Internationales de Thermique.
- [24] Qi-Hong Deng and Juan-Juan Chang, **Natural Convection in a Rectangular Enclosure with Sinusoidal Temperature Distributions on both Side Walls** , Numerical Heat Transfer, Part A, 54: 507–524, 2008, Copyright © Taylor & Francis Group, LLC.
- [25] Djatout.A , Douha.M, Hami.O, Rahmani.L et Mebarki.B, **Etude de la convection naturelle en régime laminaire dans une cavité carée inclinée d'un angle α** ,Journal of Scientific Research N°0 vol.I(2010).
- [26] Aiech Hamraoui Rebiha, **Etude numérique de la convection naturelle laminaire et bidimensionnel d'air et d'eau dans un canal rectangulaire incliné avec des parois températures imposées**(mémoire de magister ,université 20 août 1955 Skikda, 2011).
- [27] Adjmi Samah, **Contribution à l'identification des instabilités thermoconvectives à l'intérieur d'une enceinte bidimensionnelle fermée :cas d'une cavité rectangulaire soumise à différentes**(mémoire de magister ,université 20 août 1955 Skikda,2011).
- [28] Abdelkader Boutra, Youb Khaled Benkahla, Djamel Eddin Ameziანი Et Nabila Labsi , **Etude numérique du transfert de chaleur pour un fluide de Bingham dans une cavité carrée en mode de convection naturelle instationnaire**, 20^{ème} Congrès Français de mécanique,Besançon(2011).
- [29] خلفي فريدة،دراسة إنتقال الحرارة بالحمل الحراري الطبيعي في نموذج سكني على شكل متوازي سطوح موجه جنوبا وخاضع لدرجة حرارة دورية مع الزمن (مذكرة الماجستير،جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة،2013).
- [30] Boukaraa Moustafa, **Etude de la convection naturelle dans une cavité inclinée**(mémoire de magister ,université des sciences et de la théchnologie Houari Boumedienne, 2012).
- [31] Boudjeniba Bilal, **Etude numérique de l'instabilité de Rayleigh-Bénard**(mémoire de master ,université 20 août 1955 Skikda,2013).
- [32] Hamdi Moumni , Nasreddine Benkacem, Nader Ben Cheikh, Brahim Ben Beya Et Taeib Lili, **Simulation numérique de transfert de chaleur par convection naturelle dans une cavité de type Rayleigh-Bénard**,adresse URL : http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/46345/cfm2011_479.pdf?sequence=1.

[33] Vincent Sambou, Bérandère Lartigue et Françoise Monchoux, **Transferts thermiques dans des cavités partitionnées soumises à des sollicitations thermiques instationnaires**, adresse URL : http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres_2008/350.pdf.