

النمذجة العددية لتحديد تأثير أعداد نوسل الحملية والإشعاعية ضمن تجاويف الحجرة المقسمة في الحيز غير الثابت

الدكتور عهد محمود سليمان*

(تاريخ الإيداع 3 / 3 / 2013. قُبل للنشر في 15 / 4 / 2013)

▽ ملخص ▽

تكمن أهمية هذا البحث في دراسة انتقال الحرارة ضمن تجاويف البلوك الموجودة في جدران المباني وذلك ضمن الحيز غير الثابت حرارياً. ستركز هذا البحث على دراسة انتقال الحرارة المزدوج (حمل و إشعاع) ضمن تجاويف الحجرات المقسمة، و الخاضعة من أحد طرفيها لدرجات حرارة متغيرة بشكل جيبى، بينما تحافظ في الطرف الآخر على درجة حرارة ثابتة. تمت هذه الدراسة من خلال النمذجة العددية لحجرة مقسمة تحوي أربعة تجاويف ذات أبعاد محددة، وذلك بطريقة الفروق المنتهية واستخدام برنامج الـ Matlab. لقد تمت مراقبة تغيرات درجات الحرارة ضمن الحجرة مع الزمن (على أوجه التجاويف وعلى ارتفاعات محددة على هذه الأوجه)، تعبر هذه التغيرات عن مدى انتشار الاضطراب الحراري المفروض على أحد وجهي الحجرة.

تم الحصول في النهاية على قيم أعداد نوسل الحملية والإشعاعية لكل التجاويف كتابع الزمن. تظهر هذه القيم أن طريقة انتقال الحرارة المسيطرة في هذه التجاويف هي الإشعاع وهذا ما كان مهملًا ضمن معظم الأبحاث المنجزة من قبل الباحثين حيث تركزت دراساتهم في هذه التجاويف على الحمل الحراري فقط.

الكلمات المفتاحية: الحمل، الإشعاع، عدد نوسل، الحيز غير الثابت حرارياً، جدران المباني.

* أستاذ مساعد - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Modélisation numérique pour déterminer l'influence des nombres de Nusselt convectifs et radiatifs dans les alvéoles des cavités partitionnées en régime instationnaire

Dr. Ahed Suleiman *

(Déposé le 3 / 3 / 2013 . Accepté 15 / 4 /2013)

▽ Résumé ▽

L'objectif de cet article est d'étudier les transferts thermiques dans les alvéoles de bloc trouvées dans les parois des bâtiments en régime instationnaire. Cet article se concentre sur l'étude des transferts couplés (convection-rayonnement) dans les cavités partitionnées soumises d'un côté à des perturbations sinusoïdales des températures et de l'autre à une température constante. Cette étude a été faite par des simulations numériques pour une cavité partitionnée à quatre alvéoles ayant des dimensions déterminées, par l'utilisation de la méthode de différences finies et Matlab. Des observations des variations des températures dans la cavité avec le temps (sur les faces des alvéoles et sur des altitudes déterminées). Ces variations expriment la propagation de la perturbation soumise. Enfin, nous obtenons les valeurs des nombres de Nusselt convectifs et radiatifs pour toutes les alvéoles en fonction de temps. Ces valeurs, montrent que le mode de transfert de chaleur dominant dans les alvéoles est le rayonnement, ceci était négligé par la plupart des articles réalisés par les auteurs qui ne consacrent leur travail qu'à l'étude de la convection.

Mots-clés : *Convection, Rayonnement, Nombre de Nusselt, régime instationnaire, Parois de bâtiments.*

* Associate Professeur, Département de Génie de Force Mécanique ,Faculté de Génie Mécanique et Electrique- Université de Tichrine ,Lattaquié, Syrie.

مقدمة:

لقد أصبح الحد من استهلاك الطاقة وترشيدها من الأمور الهامة والضرورية في أيامنا هذه، وتولي الحكومات في مختلف أنحاء العالم أهمية جديّة لهذا الموضوع بسبب التهديدات التي تواجه كوكبنا كظاهرة الاحتباس الحراري، النفايات والحوادث النووية، أو نفاذ مصادر الطاقة الأحفورية. من أجل الحد من النسبة المئوية لاستهلاك الطاقة أجريت أبحاث عديدة بهدف تحسين الخصائص الديناميكية لجدران المباني للدمج الجيد لحسابات استهلاك الطاقة وكذلك للمسائل المتعلقة بالعتالة الحرارية. يكمن الهدف هنا باستخدام الأحمال الطبيعية للطاقة (كالطاقة الشمسية المخزنة ضمن الجدار) من أجل الحد من استهلاك التدفئة في الشتاء، أو استخدام خصائص العتالة الحرارية للجدار لتخفيض الحرارة الناجمة عن الطاقة الشمسية صيفاً، وبالتالي التخفيض من الطاقة المستهلكة بأجهزة التكييف. أجريت دراسات عديدة متعلقة بانتقال الحرارة عبر عناصر البناء في الحيز الثابت، غير أن هذه الدراسات لا تجسد الظواهر الحقيقية لأن درجات الحرارة تكون في الواقع متغيرة باستمرار. يهتم بحثنا المقدم هنا بالواقع بالأخذ بالحسبان العتالة الحرارية والمحتوى الحراري في الحيز غير الثابت حرارياً. نستعرض في البداية بعض الاستنتاجات لأبحاث منجزة في هذا المجال ضمن الحجرات، حيث كانت جدرانها معرّضة لدرجات حرارة مستقرة. فيما بعد سنستعرض أبحاثاً أخرى متعلقة بالحمل الحراري في الحيز غير الثابت حرارياً. سيعتبر هذا البحث على دراسة انتقال الحرارة المزدوج (حمل و إشعاع) ضمن تجاويف الحجرات المقسمة و الخاضعة من أحد طرفيها لدرجات حرارة متغيرة بشكل جيبى (الطرف البارد)، بينما يحافظ الطرف الآخر على درجة حرارة ثابتة (الطرف الساخن) وذلك من خلال النمذجة العددية لهذه الدراسة بطريقة الفروق المنتهية واستخدام برنامج الـ Matlab. أجري هذا البحث في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة تشرين.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف هذا البحث إلى فهم السلوك الديناميكي لجدران الأبنية من خلال دراسة انتقال الحرارة المزدوج الحاصل ضمن التجاويف الهوائية المحصورة في جدران المباني (ضمن البلوك)، من خلال حساب تغيرات عدد نوسل الحملي والإشعاعي مع الزمن، وإبراز دور الإشعاع الحراري الذي كان مهماً في معظم الأبحاث المنجزة ضمن هذه التجاويف المغلقة، والتي اقتصرت الدراسة فيها على دور الحمل الحراري فقط.

دراسة مرجعية:

تهدف الدراسة المرجعية هنا إلى الاطلاع على الدراسات المنجزة لانتقال الحرارة ضمن الحجرات والمتعلقة بالحمل الحراري في النظامين الحراريين الثابت وغير الثابت، وكذلك على طرق الحساب المقترحة وخاصة فيما يتعلق بحساب عدد نوسل. سوف نستعرض هنا الدراسات المنجزة في الحيزين الثابت وغير الثابت حرارياً. اهتمت الدراسات الأولى في البداية بدراسة الجريانات الحملية في الحيز الثابت ضمن الحجرات البسيطة، حيث ينشأ الحمل الحراري الطبيعي نتيجة لفرق كثافة جزيئات المائع ضمن التجويف المغلق، لكن اهتمامنا سيتركز على الحجرات المقسمة والتي يمكن مصادفتها في جدران المباني، فالحجرة المقسمة أو المجزأة هي الحجرة التي تتوضع فيها القواطع (الأفقية أو العمودية) لخلق التجاويف، كما في القرميد الجداري المبين بالشكل (1).



الشكل (1) القرميد الجداري.

من ضمن الأبحاث المنجزة في الحجرات المقسمة في الحيز الثابت [1]، حيث نفذت الدراسة العددية ببعدين للحمل الحراري الطبيعي ضمن حجرة مستطيلة الشكل ذات قواطع عمودية، وكانت الجدران الخارجية للحجرة محافظة على درجة حرارة ثابتة بينما كانت جدرانها الأفقية معزولة، وتمتعت الأجزاء الصلبة بخواص ترموفيزيائية للأجر بينما يتمتع المائع الموجود في الفراغات المحصورة بخصائص الهواء. تم دراسة تأثير استطالة الحجرة وعدد الأقسام وعدد ريليه على جريان المائع وعلى توزيع درجات الحرارة، وتمت الملاحظة بأنه من أجل كل عدد لريليه ينخفض عدد نوسل عندما يزيد عدد القواطع (أو الأعمدة)، وتغير عدد نوسل كان متناسباً بشكل عكسي مع $(N+1)$ ، حيث N عدد الأقسام، استمر هذا التناقص لعدد نوسل حتى عدد معين من القواطع أو يتجاوزه واستقر عدد نوسل الوسطي بعدها. تم استنتاج أن انتقال الحرارة بالحمل كان مسيطراً، بينما ينشط التوصيل الحراري عندما يزداد عدد القواطع. كما تمت الملاحظة أن عدد نوسل الوسطي يزداد عندما يزداد عدد ريليه مهما يكن عدد القواطع، وهذا يعني حدوث انتقال الحرارة بالحمل. في دراسة أخرى [2]، تمت الدراسة التجريبية والعددية للحمل الحراري الطبيعي الصفحي ضمن النوع نفسه من الحجرة السابقة، وتم ملاحظة بأنه ضمن حيز الطبقة الحدية تزداد درجة الحرارة خطياً ضمن الاتجاه العمودي، وأن عدد نوسل يتناسب عكساً مع $(N+1)$ ، حيث N عدد الأقسام. [3]، تمت الدراسة العددية للحمل الحراري الطبيعي الصفحي والتوصيل الحراري ضمن الحجرات المقسمة المملوءة بالهواء، تم معالجة حالات مختلفة من خلال تغيير عدد ريليه، ونسبة الاستطالة للحجرة، ومقاس التجويفات، ونسبة الايصالات الحرارية (صلب/مائع)، وعدد الأعمدة وسماكتها. لقد تبين أن انتقال الحرارة يتناقص عندما يزداد عدد الأعمدة وذلك من أجل أعداد كبيرة لريليه ولكافة نسب الإيصالية المختبرة، وأن انتقال الحرارة المسيطر هو التوصيل الحراري وذلك حتى قيمة حدية لعدد ريليه حيث يبدأ الحمل الحراري، وأنه عندما تزداد سماكة القاطع (العمود) ينخفض انتقال الحرارة وذلك من أجل كافة أعداد ريليه، باستثناء الحيز التوصيلي حيث يكون هذا الأثر مهماً. أنجزت كل هذه الدراسات في الحيز الثابت حرارياً وذلك لفهم آلية انتقال الحرارة في الحجرات المقسمة، غير أن هذه الدراسات لا تجسد الواقع حيث إن درجات حرارة الجدران الخارجية غير ثابتة مع الزمن، لذلك من المهم دراسة الحيز غير الثابت حرارياً من أجل فهم انتقال الحرارة ضمن هذا الحيز. تتعرض جدران المباني للأشعة الشمسية التي تؤدي إلى تغيير درجة حرارتها وبالتالي إلى تغيير الشروط الحرارية ضمن الحجرة. [4]، تمت الدراسة العددية للحمل الحراري الطبيعي من خلال تبريد جدران حجرة مستطيلة الشكل. [5]، تم دراسة حجرة ارتفعت درجة حرارة جدرانها خطياً، وفي كلتا الدراستين تم استنتاج أن حقول الجريان ودرجات الحرارة قد تأثرت بالشروط الحدية المتغيرة. لقد عولجت مؤخراً تأثيرات التسخين الدورية، حيث نجد أن الباحثين أشاروا إلى الرنين. في جميع الأبحاث الحديثة بينت النمذجة العددية والتجارب أن انتقال الحرارة الحلمي ضمن الحجرة ينشط من أجل

ترددات منفصلة لتذبذبات الشروط الحدية. تدعى هذه الظاهرة بالرنين وهي مميزة لانتقالات الحرارة الأكثر أهمية. [6]، تمت الدراسة العددية للحمل الطبيعي الانتقالي ضمن حجرة مربعة مملوءة بالهواء المسخن بشكل دوري بعدة أنواع من التحريضات، سُخنت الحجرة من جانب بتحريض جيبى وبُردت من الأعلى بدرجة حرارة ثابتة. تم اختبار تأثير سعة وفترة إشارة التحريض، وكل الحلول الناتجة كانت دورية مع الزمن، كما تم إظهار أن طور العبور اللازم للحصول على الحيز الدائم يعتمد بشكل كبير على سعة تذبذب التسخين، وكذلك على عدد ريلية. يزداد هذا الوقت اللازم للحصول على الحيز الدائم عندما تزداد سعة الإشارة وتتنقص عندما يزداد عدد ريليه. يزداد تدفق الطاقة العابر للجدار البارد عندما تزداد فترة تطبيق الإشارة الجيبية ليلعب قيمة أعظمية ثم ينخفض ليلعب قيمة أصغرية ثم يعاود الازدياد من جديد وهذا ما ندعوه بظاهرة الرنين. [7]، تم دراسة الحمل الطبيعي ضمن حجرة مربعة مع جدران عمودية خاضعة لتغيرات دورية (جيبية) لدرجة الحرارة مع المحافظة على جدار بارد ذي درجة حرارة ثابتة، تم استنتاج أن انتقال الحرارة الوسطي يزداد مع زيادة سعة تغيرات درجة الحرارة ومع عدد ريليه، وأن قيمة الفترة الحدية (قيمة فترة الرنين) تكون مستقلة عن سعة تذبذب التسخين. إن معظم الأبحاث المنجزة في الحيز غير الثابت حرارياً للحمل الطبيعي ضمن الحجرات أولت أهمية خاصة لظاهرة الرنين. فمثلاً مكنت الدراسة [8]، من وضع معادلة تسمح بتحديد تردد الرنين لحجرة بسيطة مستطيلة أو مربعة.

$$f_{\text{res}} = \frac{a}{H^2} \frac{\sqrt{2}}{4\pi} \sqrt{\text{Ra} \cdot \text{Pr} \frac{\partial \theta}{\partial y} H} \quad \text{ومن أجل حجرة مربعة:} \quad f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\beta g \frac{\partial T}{\partial y} \frac{1}{\frac{H}{L} + n^2 \frac{L}{H}}}$$

حيث β : معامل التمدد الحجمي، g : تسارع الجاذبية الأرضية، T : درجة الحرارة، y : الإحداثية العمودية، H : ارتفاع الحجرة، L : عرض الحجرة، n : نسبة العدد الموجي الأفقي على العمودي، a : النفوذية الحرارية، Ra : عدد ريليه، Pr : عدد براندل، θ : درجة الحرارة اللابعدية، f_{res} : تردد الرنين.

[9]، تم دراسة تأثير جدار منته على الحمل الحراري في الحيز غير الثابت حرارياً ضمن حجرة مربعة مملوءة بالهواء، حيث طُبقت على الوجه الخارجي للحجرة درجة حرارة جيبية (ساخنة)، وعلى الوجه المعاكس للحجرة طُبقت درجة حرارة ثابتة (باردة)، بينما عُزلت كافة الأوجه الأخرى للحجرة. في هذا البحث تم اقتراح طرق لحساب عدد نوسل، ونموذجاً يعالج مسألة الحمل في الحيز غير الثابت حرارياً.

طرائق البحث ومواده:

تمت النمذجة العددية للمعادلات التي تصف الحمل الطبيعي والإشعاع الحراري ضمن تجاويف الحجرة المدروسة التي تشمل:

• معادلات الحمل الحراري الطبيعي

إن مبدأ الحمل الطبيعي ضمن حجرة مسخنة بشكل جزئي بسيط نسبياً، حيث يكون المحرك الرئيسي للمائع هو قوة الجاذبية الأرضية الناجمة عن قوى دفع أرخميدس. تتخفف كثافة المائع الملامس للوجه الساخن ويرتفع للأعلى

ويحل محله المائع الملامس للوجه البارد كما هو مبين في الشكل (2). يوصف الحمل الطبيعي بمجموعة من المعادلات، حفظ الكتلة، وحفظ كمية الحركة، وحفظ الطاقة، سنتعمد المعادلات المقدمة في [10].



الشكل (2) الحجر المسخن جزئياً.

إن المتغيرات التي تصف الجريان هي: الضغط p ، الكثلة الحجمية ρ ، متجه السرعة \vec{v} ، درجة الحرارة T . يجب أن تكون الشروط الحدية والبدائية معلومة وسيتم التعريف بها لاحقاً.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad \text{-معادلة حفظ الكتلة:}$$

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\text{grad}(p + p^r) + \text{div} \tau_{ij} + \rho \vec{g} \quad \text{-معادلة حفظ كمية الحركة:}$$

حيث: p الضغط الستاتيكي، p^r ضغط الإشعاع، τ_{ij} إجهاد القص اللزج، \vec{g} تسارع الجاذبية الأرضية.

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = -\text{div}(\vec{q}^c + \vec{q}^r) + q + \frac{Dp}{Dt} + \psi \quad \text{-معادلة حفظ الطاقة:}$$

حيث: h الأنتالبي الكتلي، \vec{q}^c كثافة التدفق الحراري بالتوصيل، \vec{q}^r كثافة التدفق الحراري بالإشعاع، q الكثافة الحرارية أو المنبع الحراري الداخلي، ψ تابع تبديد اللزوجة.

لا تملك هذه المعادلات حلاً دقيقاً ولهذا نطبق الفرضيات المبسطة التالية [11]:

○ ضغط الإشعاع p^r مهمل بالنسبة للضغط الستاتيكي p .

○ كثافة التدفق التوصيلي تتبع لقانون فورييه: $\vec{q}^c = -\lambda \cdot \text{grad} T$

○ الأنتالبي تابع للضغط p ولدرجة الحرارة T :

$$\text{حيث} \quad \frac{dh}{dt} = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \frac{dT}{dt} + \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T \frac{dp}{dt}$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = C_p \quad \text{و} \quad \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T = \frac{1}{\rho} (1 - T\beta) \quad \text{معامل التمدد الحجمي عند ضغط ثابت.}$$

○ تدفق التبديد اللزج مهمل.

○ يعد الهواء وسطاً شفافاً للإشعاع الحراري.

○ الخصائص الترموفيزيائية λ و μ للهواء ثابتة نظراً لأن فوارق درجات الحرارة في حالتنا ضعيفة

نسبياً.

مع الأخذ بالحسبان كل الفرضيات السابقة، نحصل على نظام المعادلات التالي وفقاً للإحداثيات (O, x, z) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g\beta(T - T_0) \\ \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} &= a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

حيث v اللزوجة الحركية، و $a = \frac{\lambda}{\rho.C_p}$ النفاذية الحرارية.

يتكون هذا النظام من 4 معادلات بأربعة مجاهيل (u, w, p, T) .

T_0 : درجة الحرارة المرجعية وتساوي درجة الحرارة الوسطية: $T_0 = T_m = (\bar{T}_c + \bar{T}_f) / 2$
 \bar{T}_c : درجة حرارة الوجه الساخن للحجرة، \bar{T}_f : درجة حرارة الوجه البارد للحجرة.

• الإشعاع

نستخدم الطريقة المقدمة في [12] من أجل حساب الإشعاع الحراري بين أوجه التجاويف الواقعة في الحجرة المقسمة. يعدّ الهواء في التجاويف وسطاً شفافاً بينما تعدّ أوجه التجاويف كتيمة وناشرة للأشعة فوق الحمراء بشكل تام. بهذا يكون التدفق المغادر لسطح أحد التجاويف معطى بالعلاقة:

$$\phi_{rad} = (1 - \epsilon)\phi_{in} + \epsilon\sigma T_s^4 \quad (2)$$

حيث: ϕ_{in} تدفق الحرارة الساقط (يمكن الحصول عليه من حل معادلة انتقال الحرارة بالإشعاع بطريقة الإحداثيات المنفصلة [Discrete Ordinates Method] [13]).

ϵ انبعاثية الأسطح (معامل إصداريتها).

σ ثابت ستيفان بولتزمان $(\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W / (m}^2 \text{ K}^4))$.

T_s درجة حرارة سطح التجويف.

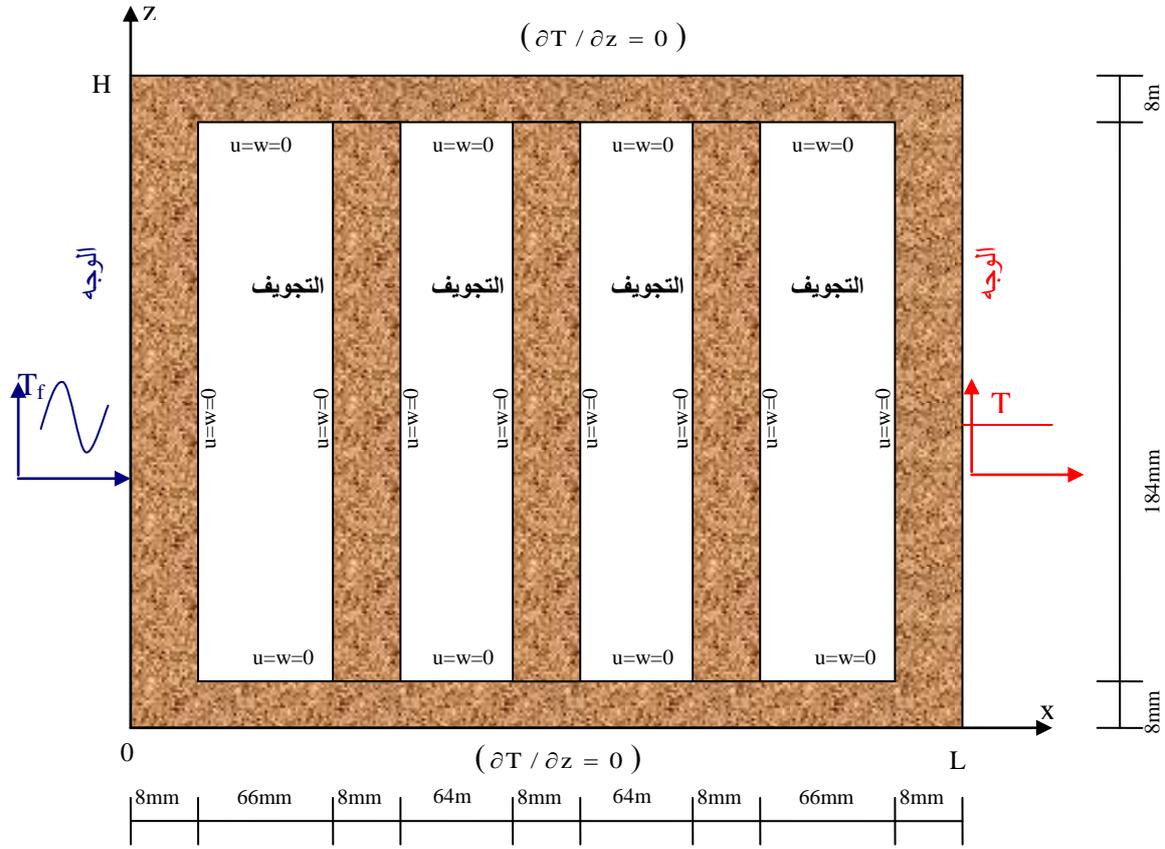
• الشروط الحدية

تعتمد دراستنا على النمذجة العددية لانتقال الحرارة ضمن الحجرة المبينة في الشكل (3) ببعدين فقط (x, z) . هذه الحجرة خاضعة من الطرف اليساري لتغيرات حبيبية في درجة الحرارة (الوجه البارد)، بينما يخضع وجهها اليميني لدرجة حرارة ثابتة (الوجه الساخن)، أما الوجهان العلوي والسفلي فهما معزولان.

• الشروط البدائية

$$\begin{aligned} t = 0 \quad T &= T_m \quad \bar{V} = 0 \\ t > 0 \quad \begin{cases} x = 0 & T = \bar{T}_f + \Delta T_f \sin(ft) \\ x = L & T = \bar{T}_c \end{cases} \quad \bar{V} = 0 \\ \begin{cases} z = 0 \\ z = H \end{cases} & \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \bar{V} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

حيث: $T_m = (\bar{T}_c + \bar{T}_f) / 2$ درجة الحرارة الوسطية المرجعية، ΔT_f سعة تغير اضطراب درجة حرارة الوجه البارد، f تردد الفترة الجيبية (تردد الاضطراب الحراري).



• الحل العددي

لقد تم تقطيع المعادلات السابقة وفقاً للمكان والزمان، كما كان من المهم جداً اختيار الفاصل المكاني والزمني المناسبين من أجل دقة الحلول العددية. اخترنا ضمن حالتنا فاصلاً مكانياً ($\Delta x = \Delta z = 1\text{mm}$)، أما بالنسبة للفاصل الزمني فلا يجب أن يكون صغيراً جداً لأنه يؤدي إلى عدد كبير من التكرارات الحسابية للوصول إلى نتائج معبرة عن الحالة الفيزيائية، بالمقابل لا يجب أن يكون كبيراً جداً لأنه يؤدي إلى حسابات سريعة جداً وبالتالي هناك خوف من فقدان للظواهر الفيزيائية المعبرة. يتم تحديده من أجل الحصول على فاصل زمني مثالي Δt ، بتثبيت السلم الزمني المميز للتوصيل الحراري الأصغر ضمن مواد مختلفة وفقاً لما يلي:

❖ من أجل مادة مائعة: $\Delta t_f = \frac{\Delta x}{V_{\max}}$ ، حيث V_{\max} السرعة الأعظمية للمائع ضمن الحجرة (تحدد هذه

السرعة بإنجاز نمذجة أولية للحيز الثابت حرارياً حيث نبدل درجة الحرارة التحريضية على الوجه البارد بقيمتها الوسطية).

❖ من أجل مادة صلبة: $\Delta t_s = \frac{(\Delta x)^2}{a}$ ، حيث a النفوذية الحرارية للمادة الصلبة (m^2/s).

• تحديد عدد نوسل

نحدد في هذا البحث نوعين منفصلين لعدد نوسل: عدد نوسل الحمل (Nu_{conv}) وعدد نوسل الإشعاعي (Nu_{rad}) وهذان العددين يعرفان كما يلي:

$$Nu_{conv} = \frac{\Phi_{conv}}{\Phi_{cond}} \quad \text{يمثل نسبة التدفق الحراري بالحمل إلى التدفق الحراري بالتوصيل} \quad \text{❖}$$

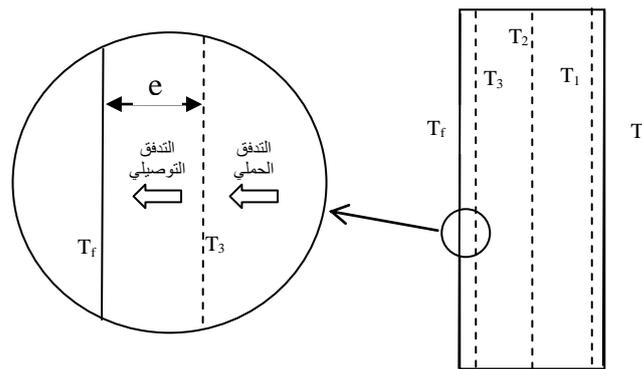
Φ_{conv} : تدفق الحرارة المتبادل بالحمل، Φ_{cond} : تدفق الحرارة المتبادل بالتوصيل.

$$Nu_{rad} = \frac{\Phi_{rad}}{\Phi_{cond}} \quad \text{حيث } \Phi_{rad} \text{ : تدفق الحرارة المتبادل بالإشعاع.} \quad \text{❖}$$

يميز عدد نوسل $Nu > 1$ انتقال الحرارة الحملية (أو الإشعاعي حسب عدد نوسل المعتبر). ويكون هذا العدد متغيراً مع الزمن في الحيز غير الثابت حرارياً ، لذلك سنقوم بتقديم الطرق المختلفة لحسابه عند كل لحظة (t).

• حساب عدد نوسل الحملية

[9]، يقترح الباحثون حساب عدد نوسل للمائع ضمن حجرة بسيطة على بعد معين من وجه الحجرة. قمنا باستخدام الطريقة المقدمة في [11] والمبينة في الشكل (4)، تسمح هذه الطريقة بحساب عدد نوسل الحملية من أجل ارتفاع h ، كما استخدمت أيضاً هذه الطريقة في الحجرة المنتهية [12,14].



الشكل (4) حساب عدد نوسل ومعامل التبادل الحراري بالحمل.

تمكننا النمذجة العددية من تحديد درجة الحرارة في كل النقاط التي تهمننا. يتوجب علينا في طريقتنا هذه معرفة درجة حرارة وجهي كل تجويف (T_c, T_f) وكذلك درجة حرارة مركز التجويف (T_2) عند كل لحظة. بما أن الفاصل المكاني المعتمد أثناء النمذجة وفق المحور x كان $(\Delta x = 1\text{mm})$ وهذه المسافة صغيرة جداً وبالتالي يمكن عدّ المائع ساكناً بملاصقة الجدار (ضمن الـ 1mm الأولى) وبالتالي تكون سرعة المائع في الطبقة الحدية التحتية معدومة وهذا ما يمكننا من حساب انتقال الحرارة ضمن هذه الطبقة بالتوصيل الحراري. يعبر عن كثافة التدفق التوصيلي في الجانب البارد من كل تجويف كما يلي:

$$\Phi_{cond}(z) = \frac{\lambda_{air}}{e} (T_3(z) - T_f(z)) \quad (4)$$

تسمح الموازنة الحرارية عبر الطبقة الأولى من الشبكة لكل تجويف والملاصقة لوجهه البارد بالقول، إن التدفق التوصيلي الذي حسبناه يساوي التدفق الحملية الحاصل بين المائع ووجه التجويف ضمن السماكة e وهذا ما يسمح بكتابة:

$$\phi_{\text{conv}}(z) = h(T_c(z) - T_f(z)) = \phi_{\text{cond}}(z) \quad (5)$$

$$h(z) = \frac{\phi_{\text{cond}}(z)}{T_c(z) - T_f(z)} \quad (6)$$

وبالتالي يمكننا الحصول على عدد نوسل الموضوعي كتابع لـ (Z) من الجانب البارد لكل تجويف بالطريقة نفسها:

$$Nu_f(z) = \frac{h(z)L'}{\lambda_{\text{air}}} \quad (7)$$

حيث L' يوافق عرض التجويف المناسب.

بإتباع الإجراء نفسه على الجانب الساخن للتجويف يمكننا إيجاد عدد نوسل $Nu_c(z)$. بإجراء التكامل العددي لهذه الأعداد على كامل ارتفاع التجويف نحصل على قيم Nu_c, Nu_f . بأخذ القيمة الوسطية لهذين المقدارين نستطيع تحديد عدد نوسل لكل تجويف من الحجرة .

• حساب عدد نوسل الإشعاعي

كما رأينا سابقاً أن عدد نوسل الإشعاعي يساوي النسبة بين التدفق الإشعاعي والتدفق التوصيلي. تمكنا النمذجة العددية من تحديد التدفقات الإشعاعية على أوجه التجاويف باستخدام الطريقة المقدمة في [12]. نأخذ القيمة الوسطية لهذه التدفقات لكل وجه من هذه الأوجه وننسبها إلى قيمة التدفق التوصيلي فنحصل على قيمة عدد نوسل الإشعاعي

$$Nu_{\text{rad}} = \frac{\overline{\Phi_{\text{rad}}}}{\Phi_{\text{cond}}} \quad \text{لكل وجه وفقاً للعلاقة:}$$

• شروط النمذجة

إن الهدف من دراسة الحجرة المقسمة هو الاقتراب من دراسة انتقال الحرارة في الحالات الحقيقية كما في البلوك المبين في الشكل (1)، ونظراً لصعوبة نمذجته بسبب تعقيد شكله الهندسي (وجود القواطع العمودية والأفقية)، فقد تم اختيار الحجرة المبينة في الشكل (3) والتي تجسد نموذجاً بسيطاً لمواد البناء (القرميد الجداري). هذه الحجرة مصنعة من مادة الـ PVC ذات الخصائص الترموفيزيائية التالية [15]:

الجدول (1) الخصائص الترموفيزيائية لمادة الـ PVC

ρC ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$)	معامل الإصدارية ε	معامل الإيصالية الحرارية λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
2641	0.9	0.17

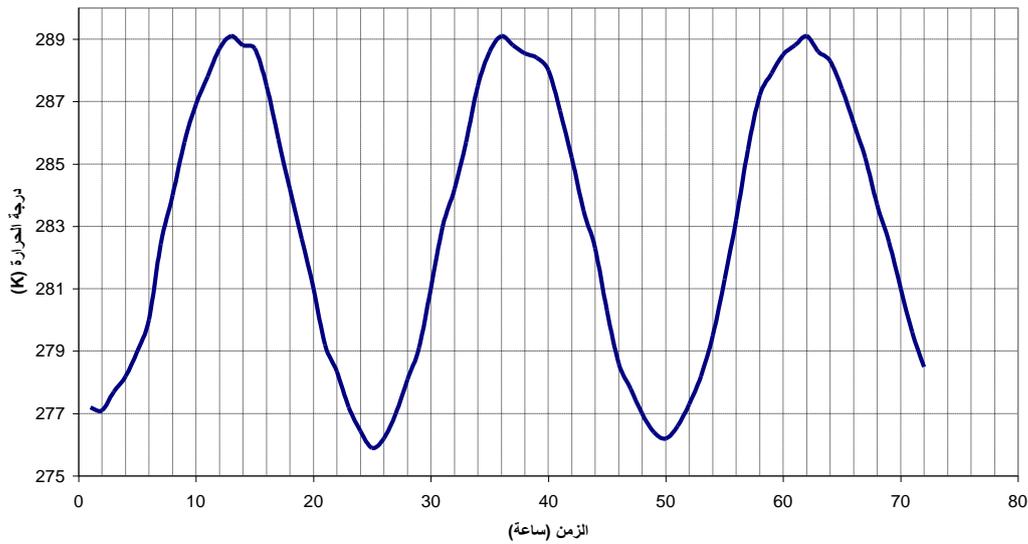
سنقوم بدراسة هذه الحجرة من خلال مراقبة تأثيرات الاضطرابات الحرارية المفروضة على الجهة الباردة للحجرة على كافة تجاويف الحجرة من خلال نتائج النمذجة العددية. نذكر هنا أن كل أنواع انتقال الحرارة قد أخذت في الحسبان (التوصيل، الحمل، الإشعاع). نطبق على الوجه الساخن للحجرة درجة حرارة ثابتة قدرها 298K بينما نطبق على الوجه البارد تغيرات جيبية لدرجة الحرارة مع سعة تغيرات قدرها 6,5K. إن فترة تطبيق هذه التغيرات الجيبية هي 24 ساعة (فترة تعاقب نهار/ليل). بالنسبة للأوجه الأخرى للحجرة فكانت معزولة. تمت النمذجة العددية لمدة 3 أيام

(أي لفترة تعاقب ثلاثة أدوار جيبية لتغيرات درجات الحرارة). اعتبرنا أن المائع الموجود في تجاويف الحجرة هو الهواء وكشرط أولي للنمذجة اعتبرناه موجوداً في حالة ركود، كما اعتبرنا درجات الحرارة ثابتة ومتطابقة في كل نقاط الحجرة وتساوي درجة الحرارة $T_m = (T_c + T_f) / 2$ كما حددت خصائص الهواء الترموفيزيائية عند هذه الدرجة أثناء النمذجة.

النتائج والمناقشة:

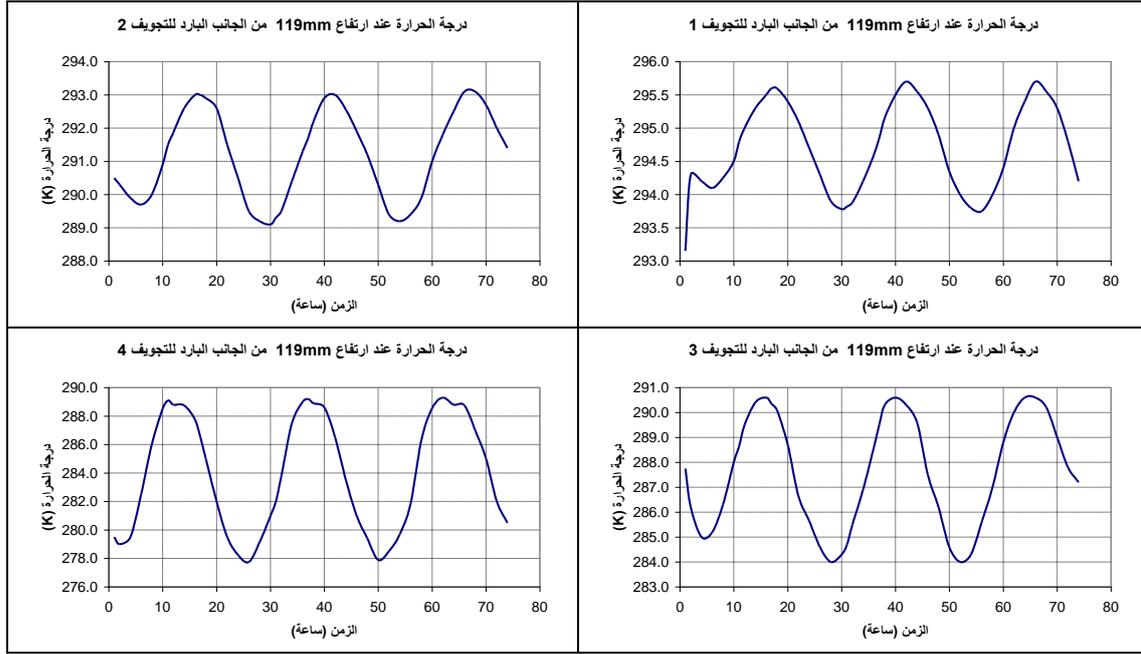
نقوم الآن بعرض نتائج النمذجة العددية من خلال مراقبة تغيرات درجة الحرارة عند سماكات محددة من الحجرة وارتفاعات معينة مأخوذة بشكل عشوائي اعتباراً من أسفل التجويف المحدد. يبين الشكل (5) تغيرات درجة الحرارة على الوجه البارد للحجرة عند ارتفاع (119mm) من أسفل التجويف، أي عند الارتفاع الموافق لـ (127mm) من أسفل الحجرة. إن اختيار هذا الارتفاع لتقديم تغيرات درجة الحرارة كما ذكرنا سابقاً تم اختياره بشكل عشوائي تماماً، إذ كان من المفترض أن نقدم تغيرات درجة الحرارة على كامل الارتفاعات ولكن هذا ما سيؤدي إلى الحصول على عدد لامتناه من المنحنيات من دون أن يضيف ذلك أية أهمية خاصة لأن الفارق في درجات الحرارة عند ارتفاعات مختلفة على الوجه البارد للحجرة لم يتجاوز قيمة أعشار من درجة الكلفن.

تغيرات درجة الحرارة عند ارتفاع 119mm على الوجه البارد للحجرة

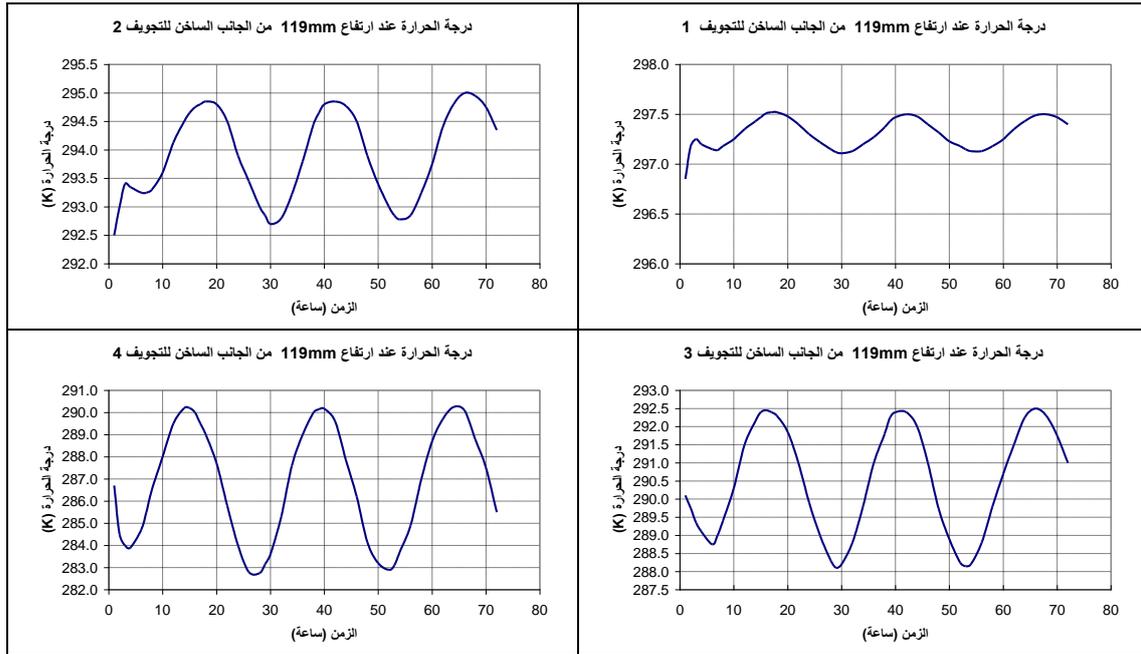


الشكل (5) تغيرات درجة حرارة الوجه البارد للحجرة عند ارتفاع 119mm.

نبحث الآن كيف ينتشر ضمن هذه الحجرة الاضطراب الحراري المطبق على وجهها البارد، لذلك نقوم بمراقبة تطور درجات الحرارة مع الزمن على كل أوجه تجاويف الحجرة. نبين على الشكل (6) تغيرات درجة الحرارة على الأوجه اليسارية للتجاويف (الجانب البارد)، وذلك عند الارتفاع السابق نفسه (119mm) من أسفل كل تجويف. بينما يبين الشكل (7) تغيرات درجة الحرارة على الأوجه اليمينية للتجاويف (الجانب الساخن)، وذلك عند الارتفاع السابق نفسه (119mm) من أسفل كل تجويف.



الشكل (6) تغيرات درجة الحرارة على الأوجه اليسارية للتجاويف عند ارتفاع 119mm.



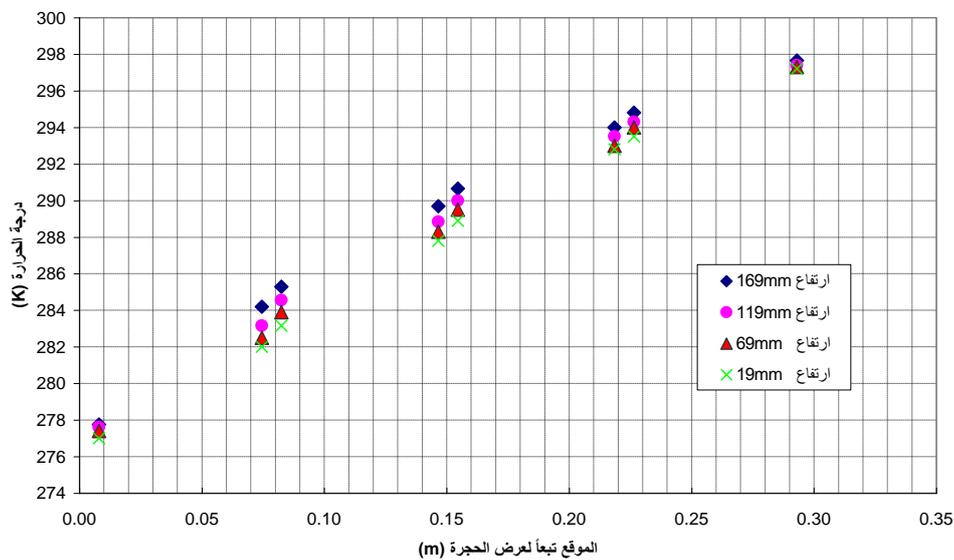
الشكل (7) تغيرات درجة الحرارة على الأوجه اليمينية للتجاويف عند ارتفاع 119mm.

يتبين من الأشكال السابقة أنه ومهما يكن جانب التجويف المعتبر فإنه عندما نتقدم في الحجرة من التجويف 4 باتجاه التجويف 1 (باتجاه انتشار الاضطراب الحراري من اليسار إلى اليمين)، نلاحظ وجود تأخير في الطور وتهدئة للاضطراب الحراري كلما ابتعدنا عن الوجه البارد للحجرة، وهذا واضح من خلال رؤية سعة تغيرات درجة الحرارة التي تنقص من اليسار إلى اليمين وهذه النتيجة منطقية لأن الاضطراب الحراري يُهدئ وينخفض كلما ابتعدنا عن مصدر الاضطراب. فمثلاً إذا أخذنا التجويف 4 في الشكل (6)، نلاحظ أن قيمة التغيرات الجيبية لدرجات الحرارة تبلغ حوالي (11.5 K)، بينما تنخفض هذه القيمة إلى حوالي (2 K) عند التجويف 1. كما أن التأخير في الطور يزداد كلما ابتعدنا

عن الوجه البارد للحجرة حيث تطبق التغيرات الجيبية لدرجات الحرارة. إن ظاهرتي (تأخير الطور والتهديئة) تحدثان بسبب النفوذية الحرارية للأوساط المكوّنة للحجرة (صلب أم مائع) والتي تؤثر على سرعة اختراق وتهديئة الموجة الحرارية.

عند مراقبة درجات الحرارة عند ارتفاعات مختلفة للحجرة الشكل (8)، نلاحظ أن درجة الحرارة على كل وجه تزداد مع الارتفاع: فمثلاً عند الارتفاع 19mm تكون قيمة درجة الحرارة أخفض من قيمتها عند الارتفاع 69mm للوجه نفسه للتجويف وهكذا. وهذا ما يفسر بوجود الحمل الحراري، حيث يكون الهواء البارد والأثقل في الأسفل حيث يُبرّد أسفل الحجرة، بينما يتوضع الهواء الساخن والأقل وزناً في أعلى الحجرة وهذا ما يُسخّن جزأها العلوي.

تغيرات درجات الحرارة عند ارتفاعات مختلفة للحجرة عند الزمن (50 ساعة)

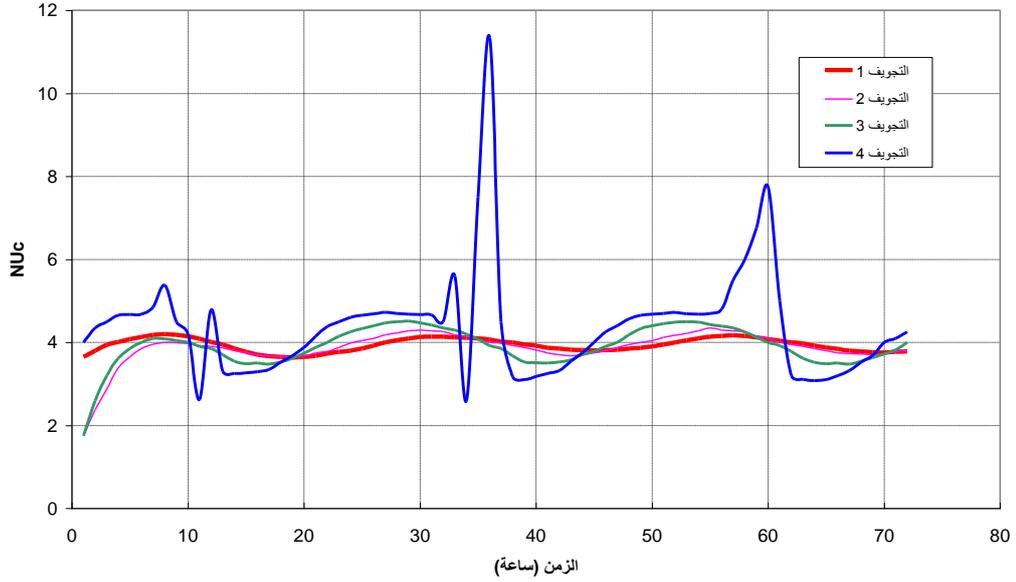


الشكل (8) تغيرات درجة الحرارة عند ارتفاعات مختلفة ولسماكات مختلفة من الحجرة عند الزمن 50 ساعة.

نلاحظ بوضوح من هذا الشكل أنه كلما اقتربنا من الجانب ذي درجة الحرارة الثابتة الساخنة (الجانب اليميني) كلما كانت الأوجه أسخن.

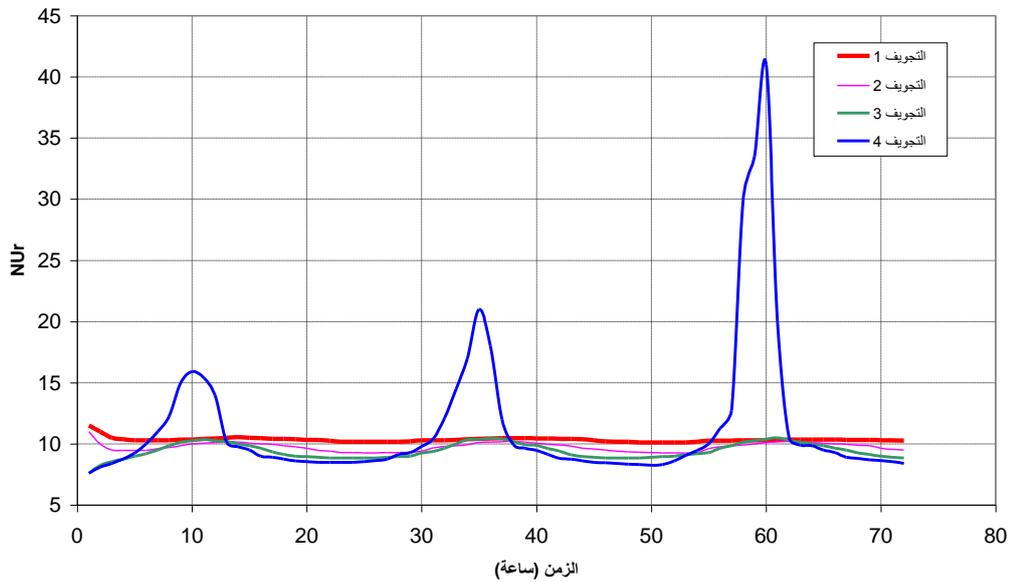
كما ذكرنا سابقاً، إن تقييم انتقال الحرارة الموجودة ضمن الحجرة وأهميته يتم من خلال حساب أعداد نوسل. لذلك نقوم باستخدام الطريقة الموصوفة سابقاً. وجدت هذه الطريقة براهين لها في عدة أبحاث مختلفة [11,12,14].
رسمنا تغيرات أعداد نوسل مع الزمن على الشكلين (9,10)، بعد حسابها لكل تجويف بفضل درجات الحرارة الناتجة عن النمذجة العددية. يقدّم الشكل (9) تغيرات أعداد نوسل الحملية للتجاويف الأربعة مع الزمن، بينما يقدم الشكل (10) تغيرات أعداد نوسل الإشعاعية للتجاويف الأربعة مع الزمن.

تغيرات عدد نوسل الحملية مع الزمن (NUc)



الشكل (9) تغيرات أعداد نوسل الحملية للتجايف الأربعة مع الزمن.

تغيرات عدد نوسل الإشعاعي مع الزمن (NUr)

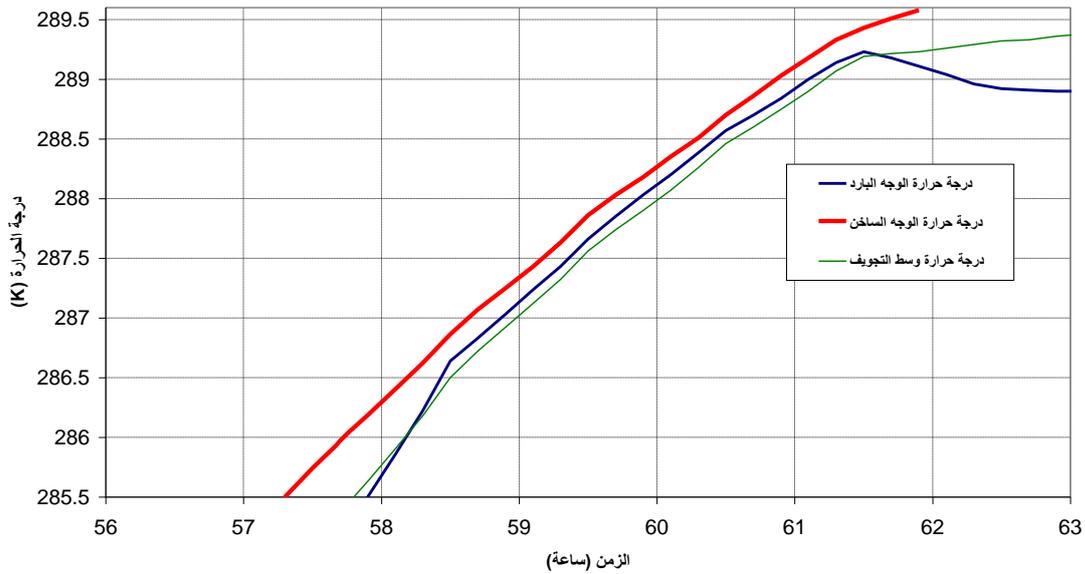


الشكل (10) تغيرات أعداد نوسل الإشعاعية للتجايف الأربعة مع الزمن.

نلاحظ من هذين الشكلين أن المنحني ذا اللون الأزرق المطابق لأعداد نوسل للتجويف 4 (الأقرب للجانب البارد) يحتوي على عدم انتظامية، وهذا ما يُفسّر بمراقبة تغيرات درجة الحرارة مع الزمن لهذا التجويف. إذا أجرينا تكبيراً (زوم-zoom) لتغيرات درجات الحرارة المستخدمة في حساب عدد نوسل من أجل الزمن المجاور للزمن (60 ساعة) حيث يوجد إحدى حالات عدم الانتظامية لأعداد نوسل في جوار هذا الزمن على

الشكلين (9,10). نلاحظ أنه في الأمكنة التي أخذت فيها درجات الحرارة، توجد فوارق بسيطة في درجات الحرارة، تفسر لنا هذه الفوارق في درجات الحرارة ومهما تكن صغيرة، أن حساب عدد نوسل يتباعد وبالتالي يؤدي إلى ظهور عدم الانتظامية الموجودة. تحدث الظاهرة نفسها من أجل كافة الأوقات الموجودة فيها عدم الانتظامية.

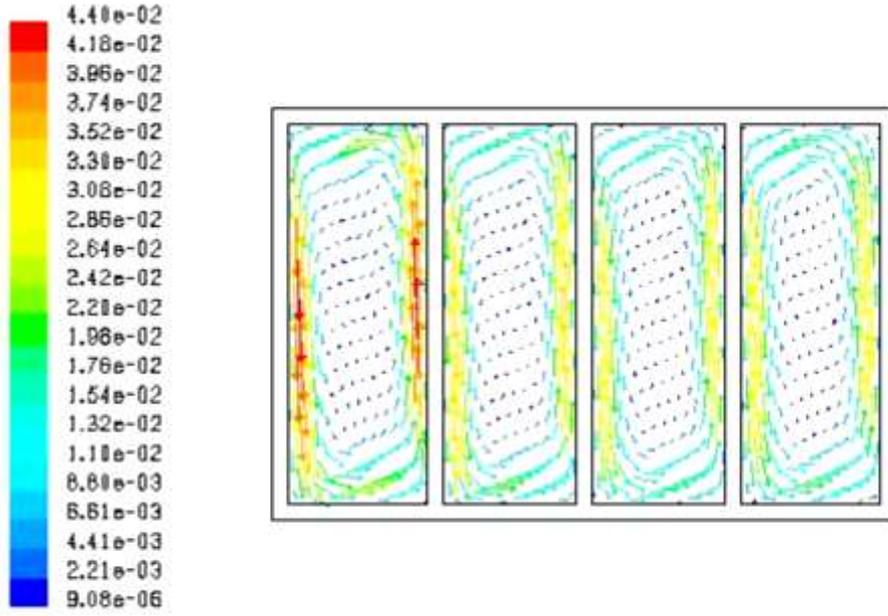
درجات حرارة التجويف 4 عند منتصف ارتفاعه



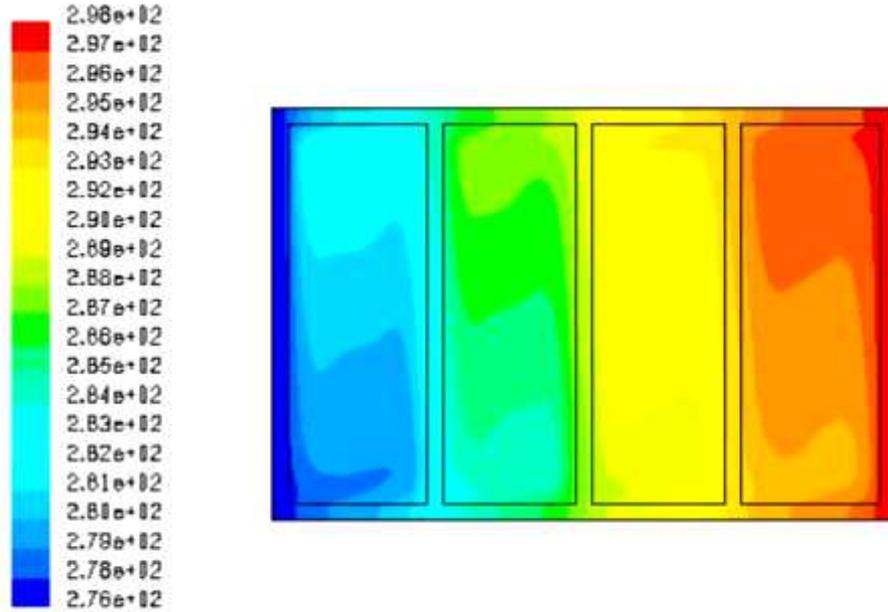
الشكل (11) تكبير لتغيرات درجات الحرارة للتجويف 4 عند منتصف ارتفاعه في الزمن المجاور لـ 60 ساعة.

نلاحظ بالعودة إلى المعنى الفيزيائي للمنحنيات المقدمة على الشكلين (9,10)، وبشكل جيد وجود الحمل الطبيعي بسبب أعداد نوسل الحملية التي قيمتها أكبر من الواحد. إذا راقبنا منحنيين للتجويف نفسه على الشكلين (9,10) يمكن الملاحظة أن تغيرات عدد نوسل الحملية والإشعاعي متعاكسين بالطور. كانت هذه الظاهرة منتظرة لأنها شاهدة على حفظ التدفق الحراري ضمن الحجرة: عندما يزداد انتقال الحرارة بالحمل ينخفض انتقال الحرارة بالإشعاع، وعندما ينخفض ينوب عنه الإشعاع ويبدأ بالازدياد.

توجد ملاحظة جوهرية متعلقة بانتشار الحرارة ضمن الحجرة يمكن رؤيتها عند مقارنة الشكلين (9,10): إن قيم أعداد نوسل الإشعاعية تبقى في كل لحظة أكبر من قيم أعداد نوسل الحملية. وهذا ما يبين أن طريقة انتقال الحرارة المسيطرة ضمن الحجرة هي الإشعاع. كان الباحثون في معظم الأبحاث يهملون دور الإشعاع الحراري ويكرسون عملهم لدراسة الحمل الحراري فقط، في حين نلاحظ هنا أن هذا الدور غير مهمل، لا بل بالعكس يجب إعارته الاهتمام اللازم. نبين على الشكل (12) منحنيات تغير بروفيل سرعة الهواء ضمن تجاويف الحجرة، حيث يمكن مشاهدة أن جزيئات الهواء الأكثر نشاطاً تقع في التجويف 4 الأقرب إلى الاضطراب الحراري الحاصل على الوجه البارد للحجرة، كما يمكن ملاحظة اتجاه دوران هذه الجزيئات بعكس عقارب الساعة وهذا ما ينسجم مع بروفيل درجات حرارة التجاويف المبينة في الشكل (13)، حيث تسخن الجزيئات الموجودة في أسفل الحجرة وتنخفض كثافتها ثم ترتفع إلى الأعلى لتسخن أعلى الحجرة وتحل محلها جزيئات الهواء الباردة كما هو مبين في الشكل (13).



الشكل (12) بروفيل سرعات الهواء ضمن الحجرة.



الشكل (13) بروفيل درجات الحرارة ضمن الحجرة.

الاستنتاجات والتوصيات:

قمنا بدراسة انتقالات الحرارة ضمن تجاويف الحجرة المقسمة التي تخضع لدرجات حرارة متغيرة بشكل جيبي مع الزمن. تم من خلال الدراسة المرجعية تسليط الضوء على بعض الدراسات المنجزة المتعلقة بهذا البحث وعلى نقص المعرفة الموجود في هذا المجال وخاصة فيما يتعلق بإهمال دور الإشعاع في الحيز غير الثابت حرارياً. تم التوصل إلى الاستنتاجات التالية:

1. إن الحلول العددية التي حصلنا عليها دورية مع الزمن بسبب الشروط الحدية الجيبية المطبقة على أحد طرفي الحجرة، تجسد لنا هذه الشروط الجيبية الحقيقية، بسبب تعاقب الليل والنهار أو بعبارة أخرى ظهور الشمس واختفائها على جدران المباني.
2. أظهرت المقارنة بين أعداد نوسل الحملية والإشعاعية أن طريقة انتقال الحرارة المسيطرة ضمن تجاويف الحجرة كانت بالإشعاع والحمل وهذا ما يطرح تساؤلاً كيف أن معظم الأبحاث المنجزة ضمن هذه الحجرات قد أهملت دور الإشعاع.
3. كان من المهم إنجاز عدد كبير من عمليات النمذجة العددية لمعرفة ما يحدث ضمن الحجرة عندما نغير في شكلها الهندسي (عدد الأعمدة - سماكاتهما - تباعدها- تأثير معامل الإيصالية الحرارية للمادة الصلبة..الخ).

التوصيات:

1. يمكن أن تهتم الدراسات اللاحقة باختبارات حقيقية لمواد البناء، وبحساب سعتها الحرارية المعبرة عن عطالتها الحرارية، وكذلك بحساب مقاومتها الحرارية وبتأثير قيمة الفترة الجيبية المطبقة على النتائج.

المراجع:

- [1] TUKOGU, H. , YUCE, N. *Natural convection heat transfer in enclosures with conducting multiple partitions and side walls*. Heat and Mass Transfer. Vol. 32, 1996,1-8.
- [2] NISHIMURA, T. , SHIRAIISHI, M., NAGASAWA, F., KAWAMURA, Y. *Natural convection heat transfer in enclosures with multiple vertical partitions*, Int. J. Heat Mass Transfer. Vol.31, No. 8 ,1988, 1679-1686.
- [3] KANGNI, A. , BEN YEDDER, R., BILGEN, E. *Natural convection and conduction in enclosures with multiple vertical partitions*. Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 34, No. 11, 1991, 2819-2825.
- [4] VASSEUR, P., ROBILLARD, L. *Natural convection in a rectangular cavity with wall temperature decreasing at uniform rate*. Wärme Stoffübertag., Vol. 16, 1982, 199-207.
- [5] SCHLADOW, S.G., PATTERSON, J.C., STREET, R.L. *Transient flow in a side - heated cavity at high Rayleigh number: a numerical study*. J. Fluid Mech. Vol.200, 1989, 121-148.
- [6] LAKHAL, E.K. , HASNAOUI, M., VASSEUR, P. *Numerical study of transient natural convection in a cavity heated periodically with different types of excitations*. Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 42, 1999, 3927-3941.
- [7] ABOURIDA, B., HASNAOUI, M., DOUAMNA, S. *Convection naturelle dans une cavité carrée avec des parois verticales soumises à des températures périodiques*. Rev. Gén. Therm. Vol. 37, 1998, 788-800.
- [8] SANG KWAK, H., KUWAHRA, K., HYUN, J. *Technical Note Prediction of the resonance frequency of natural convection in an enclosure with time-periodic heating imposed on one sidewall*. Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 41, 1998, 3157-3160.
- [9] HYO CHUNG, K. SANG KWAK, H., MIN HYUN, J. *Finite-wall effect on buoyant convection in an enclosure with pulsating exterior surface temperature*. Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 44, 2001, 721-732.
- [10] SACADURA, J.F. *Initiation aux transferts thermiques*. Tec & Doc ,1980, 456.

- [11] LARTIGUE, B. *Contribution à l'étude thermique et dynamique de doubles vitrages courbés. Approche numérique et expérimentale*. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées – Toulouse, No. 537 ,1999, 128.
- [12] SAMBOU, V., LARTIGUE, B., MONCHOUX, F., ADJ, M. *Theoretical and experimental study of heat transfer through a vertical partitioned enclosure : application to the optimization of the thermal resistance*. J. Applied Thermal Engineering. Vol. 28, 2008, 488-498.
- [13] COLOMER, G., COSTA, M., CONSUL, R., OLIVIA, A. *Three-dimensional numerical simulation of convection and radiation in a differentially heated cavity using the discrete ordinates method*. Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 47, 2004, 257-269.
- [14] LACARRIERE, B. *Etude numérique et expérimentale des échanges thermiques en cavités partitionnées : application aux transferts instationnaires dans les briques à perforations verticales*, Thèse de doctorat, université Paul Sabatier – Toulouse, 2003, 142.
- [15] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), *Réglementation thermique* 2000, 83.