

دراسة أثر اتجاه الفجوات في الجدران المنشأة بالطباعة ثلاثية الأبعاد

على أدائها الحراري

د.م. أنس قرمو

الملخص

في ظل الازدياد العالمي في الطلب على المباني المستدامة التي تتمتع بكفاءة طاقة عالية، تزايدت أهمية الدراسات المرتبطة بالأداء الحراري للجدران، فشهد قطاع البناء في السنوات الأخيرة تحولاً ملحوظاً، مع تبني تقنيات حديثة في طرق انشاء الأبنية من جهة وطرق وأدوات البحث من جهة أخرى، فمن ناحية انشاء الأبنية برزت الطباعة ثلاثية الأبعاد للجدران بوصفها إحدى أكثر التقنيات الواعدة في تطوير النظم الإنشائية التقليدية من حيث الكفاءة الزمنية، والدقة الهندسية، وتقليل الهدر في المواد. أما من ناحية التطور البحثي فقد برزت الطرق العددية والنمذجة في إجراء الأبحاث، كاستخدام برامج نمذجة حديثة لتلك الأغراض.

في هذا البحث تم إجراء دراسة حرارية لخمسة نماذج جدران يحتوي اثنان منها على فجوات هوائية شاقولية شكل فجوات أحدها بيضوي وشكل فجوات الآخر مربع، والنموذجات الأخران يحتويان على فجوات هوائية افقية شكل فجوات أحدها بيضوي وشكل فجوات الآخر مربع، والنموذج الأخير مصمت لا يحتوي على فجوات كنموذج مرجعي، وتمت الدراسة وفق الشروط التصميمية الحرارية لمدينة حمص. عند تصميم النماذج تم الأخذ بعين الاعتبار نسبة فراغات ثابتة لجميع النماذج المفرغة بلغت 20% . تم إجراء الدراسة بطريقة النمذجة العددية على مساحة 1 m^2 باستخدام برنامج نمذجة حاسوبي هو ANSYS وقد تم تصميم النماذج المدروسة باستخدام برنامج SOLID WORKS ثم تصديرها لبرنامج النمذجة. بعد الانتهاء من النمذجة العددية، تم إجراء مقارنة بين كل نموذجين لهما نفس شكل الفجوات ويختلفان فقط باتجاه الفجوات لمعرفة تأثير هذا الاختلاف. بينت النتائج أن الاتجاه الأفقي للفجوات هو الأفضل، فقد حقق النموذج ذو الفجوات البيضوية الأفقية وفراً طاقياً بلغ 12.66% عن النموذج ذو الفجوات البيضوية الشاقولية، وحقق النموذج ذو الفجوات المربعة الأفقية وفراً طاقياً قدره 13.03% عن النموذج ذو الفجوات المربعة الشاقولية، وبذلك كان الاتجاه الأفقي للفجوات هو الاتجاه الأفضل والذي يحقق أداءً حرارياً أفضل في كل من الشكلين المدروسين لمقاطع الفجوات.

الكلمات المفتاحية: الجدران المطبوعة ثلاثية الأبعاد- فجوات الجدران الافقية والشاقولية - النمذجة الحرارية.

Studying the effect of gap orientation in 3D printed walls on their thermal performance

Dr. Anas Qarmo

Abstract

With the increasing global demand for sustainable, energy-efficient buildings, the importance of studies related to the thermal performance of walls has grown. The construction sector has witnessed a remarkable transformation in recent years, adopting modern technologies in both building construction methods and research tools. In terms of construction, 3D printing of walls has emerged as one of the most promising technologies for improving traditional construction systems in terms of time efficiency, engineering precision, and material waste reduction. On the research front, numerical methods and modeling have become prominent, utilizing modern modeling software for these purposes.

This research conducted a thermal study of five wall models. Two of these models contained vertical air gaps (one oval and one square), while the other two contained horizontal air gaps (one oval and one square). The final model was solid and served as a reference model. The study was conducted according to the thermal design requirements of Homs city. When designing the models, a fixed void ratio of 20% was considered for all hollow models. The study was conducted using numerical modeling on a 1 m² area with the ANSYS computer modeling software. The studied models were designed using SOLID WORKS software and then exported to the modeling software. After the numerical modeling was completed, a comparison was made between each pair of models with the same void shape but differing only in the void orientation to determine the effect of this difference. The results showed that the horizontal void orientation was the best. The model with horizontal oval voids achieved an energy saving of 12.66% compared to the model with vertical oval voids, and the model with horizontal square voids achieved an energy saving of 13.03% compared to the model with vertical square voids. Thus, the horizontal void orientation

was the best orientation, achieving better thermal performance in both studied void cross-section shapes.

Key Words: 3D printed walls - horizontal and vertical wall gaps - thermal modeling.

1. مقدمة:

شهدت العقود الأخيرة تطوراً متسارعاً في تقنيات البناء، مدفوعة بالحاجة المتنامية لإيجاد حلول إنشائية تجمع بين الكفاءة الاقتصادية، والجودة الهندسية العالية، والمتطلبات البيئية المتعلقة بالاستدامة وترشيد استهلاك الطاقة. وفي هذا السياق برزت تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد في البناء (D Printing Construction³) بوصفها إحدى أكثر التقنيات ثورية، وقدرتها على إعادة صياغة تقانات قطاع البناء، إذ تمكّنت هذه التقنية من تجاوز القيود التقليدية لعمليات البناء، سواءً من حيث سرعة الإنجاز أو التحكم بالشكل الهندسي أو حتى إمكانية إدخال فراغات وهياكل داخلية معقدة لا يمكن الحصول عليها بالطرق التقليدية، إلا بكلفة عالية وتعقيد كبير [1]. تتميز الطباعة ثلاثية الأبعاد للمباني بقدرتها على بثق المواد وفق مسارات محددة خاضعة للتحكم الرقمي الدقيق، مما يتيح بناء جدران وأجزاء إنشائية ذات مقاطع داخلية مبتكرة، تتضمن فجوات وهياكل خلوية محسوبة هندسياً. وقد فتح ذلك المجال أمام الباحثين لتقييم تأثير الشكل الهندسي للفجوات واتجاهها وحجومها وتوزيعها على الخصائص الميكانيكية والحرارية للعناصر المبنية بهذه التقنية. يمكن للتغيرات الصغيرة في اتجاه الفراغات أو شكلها أن تؤثر في مقاومة انتقال الحرارة، والموصالية الحرارية المكافئة، والتدفق الحراري عبر الجدار، وبالتالي في أداء الأبنية من حيث استهلاك الطاقة.

تزايدت أهمية الدراسات المرتبطة بالأداء الحراري للجدران في ظل الارتفاع العالمي في الطلب على مبانٍ مستدامة تتمتع بكفاءة طاقة عالية. إذ تشير تقارير الوكالة الدولية للطاقة (IEA) إلى أن المباني تمثل نحو 30-40% من استهلاك الطاقة العالمي، وأن تحسين الغلاف الحراري للمبنى هو أحد أكثر الطرق فعالية لخفض استهلاك الطاقة وتقليل الانبعاثات الحرارية. ومن هنا تأتي الحاجة إلى تقييم الأثر الحراري للفراغات الداخلية في الجدران المبنية بالطباعة ثلاثية الأبعاد، خصوصاً أن هذه الجدران ليست مصممة عادة، بل تحتوي على مسارات داخلية يتم تشكيلها نتيجة عملية الطباعة طبقة فوق طبقة، ويمكن إعادة تشكيلها هندسياً [2].

ومن بين أهم المتغيرات الهندسية التي ثبت أن لها تأثيراً مباشراً في أداء الجدران الحراري اتجاه الفجوات الداخلية. فبينما تعتمد الجدران التقليدية غالباً على مقاطع مصممة أو فجوات شاقولية محدودة، توفر الطباعة ثلاثية الأبعاد إمكانية بناء جدران ذات فجوات شاقولية أو أفقية ضمن نفس الحجم الكلي للفراغات. وهذا يخلق تباينات كبيرة في مسارات انتقال الحرارة، وفي مقاومة الجدار للتوصيل الحراري، وفي ظاهرة الحمل الحراري داخل الفجوات.

وتبيّن الدراسات السابقة أن الفجوات الأفقية يمكن أن تسهم في تحسين العزل الحراري بسبب إعاقة انتقال الحرارة بالحمل الحراري وتقليل انتقال الحرارة بالتوصيل، بينما يمكن أن تؤدي الفجوات الشاقولية إلى تغيرات في الحمل الحراري الطبيعي داخل الفراغ، مما يزيد أو يقلل التوصيل الحراري تبعاً لشكل الفجوة وأبعادها وتدرج درجات الحرارة في الجدار. وعلى الرغم من وجود أبحاث عديدة درست تأثير شكل الفجوات الهندسية على الأداء الحراري، فإن الأبحاث التي تركز على اتجاه الفجوات مع ثبات حجمها ومساحتها لا تزال محدودة إلى حد كبير، وخاصة في سياق الطباعة ثلاثية الأبعاد التي تتميز بترتيبات هندسية مختلفة جذرياً عن الجدران التقليدية.

وبما أن الطباعة ثلاثية الأبعاد تعتمد أساساً على بثق المادة على شكل طبقات، فإن اتجاه الفجوات سواء كان موافقاً لاتجاه البثق أو عمودياً عليه يمكن أن يؤثر أيضاً في الترابط الطبقي وخصائص سطح الفجوة، مما ينعكس بشكل غير مباشر على قدرة الجدار على تمرير أو منع انتقال الحرارة. كما أن شكل الفجوة واتجاهها قد يغير ديناميكية الهواء المحبوس داخل الجدار، وبالتالي يؤثر في الحمل الحراري الداخلي، الذي يمثل جزءاً أساسياً من مقاومة انتقال الحرارة في الجدران ذات الفراغات واسعة المساحة. [3]

2. أهمية البحث وأهدافه:

يهدف هذا البحث إلى تقديم مقارنة شاملة بين نموذجين من الجدران المبنية بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد تعتمد على دراسة عددية، أحدهما يحتوي على فجوات شاقولية، والآخر يحتوي على فجوات أفقية، مع الحفاظ على ثبات بعض الثوابت الأساسية في كلا النموذجين.

وترتكز الدراسة على استخدام النمذجة العددية لمحاكاة انتقال الحرارة، عبر تحليل التوزيع الحراري والتدفق الحراري ضمن الجدارين باستخدام أحد برامج النمذجة الحرارية المعتمدة هو برنامج ANSYS ، وذلك بهدف تقييم أثر اتجاه الفجوات على الخصائص الحرارية والطاقية. وتسعى هذه الدراسة للإجابة على تساؤلات جوهرية تتعلق بأداء الجدران في الأبنية المستقبلية التي تعتمد تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، ومنها:

- كيف يؤثر اتجاه الفجوات في آلية انتقال الحرارة داخل الجدران المطبوعة؟
 - هل يؤدي الاتجاه الأفقي للفجوات إلى زيادة أو نقصان الحمل الحراري داخل الفراغ مقارنة بالاتجاه الشاقولي؟
 - هل تتغير قيمة التدفق الحراري الكلي عند ثبات الحجم الهندسي للفراغات؟
 - أي الاتجاهين يحقق أفضل مقاومة حرارية وبالتالي أفضل كفاءة طاقية للجدار؟
- كما يُتوقع أن تساعد نتائج هذا البحث في وضع أسس تصميم حراري أمثل للجدران المطبوعة بالطباعة ثلاثية الأبعاد، خاصة في المناطق ذات الظروف المناخية المختلفة، حيث يمكن توجيه الفجوات بطريقة تحقق أفضل أداء حراري بما يتناسب مع البيئة المحيطة. إن أهمية هذا البحث لا تكمن فقط في كونه يدرس جانباً لم يحظَ ببحث كافٍ في الأدبيات العلمية الحالية، بل في كونه يساهم في توجيه تصميم الجدران المستقبلية المنشأة بالطباعة ثلاثية الأبعاد نحو مستويات أعلى من الكفاءة الطاقية والاستدامة، وهي إحدى الركائز الأساسية التي تعتمد عليها الهندسة الحديثة في مواجهة التحديات البيئية العالمية.

3. الدراسات المرجعية:

في ظل تقدم وتطور أدوات البحث العلمي قدمت الأدبيات العلمية العديد من الأبحاث التي تناولت الأداء الحراري للجدران الاسمنتية المطبوعة ثلاثية الأبعاد، وتتنوع طرق ووسائل تلك الدراسات، فقام البعض بالاعتماد على الطرق التجريبية لإجراء أبحاثه، في حين اعتمد البعض الآخر على الطرق العددية في إجراء أبحاثه، فقاموا بعمل دراساتهم باستخدام برامج

نمذجة مختصة. وعلى الرغم من وجود عدد من تلك الدراسات إلا أنه يبقى هنالك افتقار لأبحاث تغطي الجانب الحراري بشكل كافي. بالنظر إلى الدراسات المرجعية نجد:

درس مارايس وزملاءها في العام 2021 تحسين الأداء الحراري للجدران الاسمنتية المطبوعة ثلاثية الأبعاد والمطبوعة باستخدام اسمنت رغوي خفيف الوزن، حيث عمل الباحثون على مقارنة حالات تحتوي عدد معين من التجاويف مع حالات تحتوي على عدد تجاويف أكبر مع المحافظة على نسبة الفراغات ضمن النماذج، كما عملوا على دراسة تأثير حجم التجاويف على الأداء الحراري للجدران.

أظهرت الدراسة أن تقليل عرض التجاويف يؤدي إلى تحسين العزل الحراري. وتميز مقطع جداري من الخرسانة الرغوية خفيفة الوزن بأربعة تجاويف بعرض 20 mm بأداء حراري أفضل من جدار صلب من الخرسانة الرغوية خفيفة الوزن بنفس أبعاد المقطع الخارجي. كما أن زيادة عدد التجاويف ذات العرض الأصغر يُحسّن الأداء الحراري، وقد تبين أن نسبة الفراغات إلى المساحة الكلية التي تتجاوز 50% تُحقق أداءً حراريًا أقل. [4]

درس الزهراني ورفاقه في عام 2022 تحسين الأداء الحراري للجدران المطبوعة بطابعة ثلاثية الأبعاد وذلك عن طريق التحكم بمادة حشو تلك الجدران، حيث اقترح الباحث عدة مواد حشو مقترحة، وتم اجراء الدراسة الحرارية لجميع النماذج المقترحة، وتمت الدراسة بشكل عددي باستخدام برنامج نمذجة حاسوبي، وكان الهدف المنشود إيجاد التصميم ذي أداء حراري مُحسّن لتقليل استهلاك الطاقة في المباني دون تكبد تكاليف إضافية للمواد. وبناءً على ذلك، تم تطوير نموذج حسابي لمحاكاة السلوك الحراري لمختلف النماذج المقترحة التي يمكن استخدامها في جدران الخرسانة المطبوعة ثلاثية الأبعاد. وقد تم الحفاظ على تركيبة الخرسانة، ونسبة الخرسانة إلى الفراغات ثابتة للتركيز على تأثير هيكل الحشو (التغيرات الهندسية). تمت مقارنة الأداء الحراري وإمكانية توفير الطاقة لجدران الخرسانة المطبوعة ثلاثية الأبعاد مع مواد البناء التقليدية،

بما في ذلك الطوب الطيني والخرساني. تُظهر النتائج أن تغيير بنية الحشو لجدران العزل الحراري ثلاثي الأبعاد يؤثر على موصليتها الحرارية، وبالتالي على الأداء الحراري للمبنى. وقد وُجد أن الموصلية الحرارية لبنى الحشو المدروسة تتراوح بين $0.17 - 0.122 \text{ W/m.k}$ ، وفي حال نجاح هذه البنى في استبدال مواد البناء التقليدية، فإن الحد الأدنى للتوفير السنوي في تكلفة الطاقة سيبلغ حوالي دولار واحد لكل متر مربع . لذا، يُعد اختيار بنية الحشو المناسبة أمراً بالغ الأهمية لخفض استهلاك الطاقة في المبنى. [5]

في العام 2023 درس رافولا وفريقه تحسين الأداء الحراري لجدران الخرسانة المطبوعة ثلاثية الأبعاد (3DPC) باستخدام مواد عزل مختلفة وسماكات متفاوتة لطبقات العزل. وتمت هذه الدراسة باستخدام النمذجة العددية، حيث طُوّرت نماذج حرارية باستخدام برنامج THERM 7.8، وجرى التحقق من صحتها بالرجوع إلى الدراسات المنشورة وحالات الاختبار الحراري وفقاً لمعيار ISO 10211 . تم تطوير 42 نموذجاً عددياً، مع تغيير عرض الجدار 100 mm و 200 mm ، ونسب العزل مختلفة، ومواد العزل (الصوف المعدني، والصوف الصخري، والصوف الزجاجي)، وأظهرت النتائج أن زيادة نسبة العزل تؤدي إلى انخفاض قيمة معامل انتقال الحرارة. تم تطوير معادلات تصميم جديدة لرصد تأثير نسب العزل، وقد تتبأت هذه المعادلات بدقة بقيم معامل انتقال الحرارة. تُسهم هذه الدراسة في فهم الأداء الحراري لجدران (3DPC) مع خيارات عزل مختلفة، ويمكن للمعادلات المقترحة أن تساعد في تصميم مبانٍ موفرة للطاقة باستخدام (3DPC). [6]

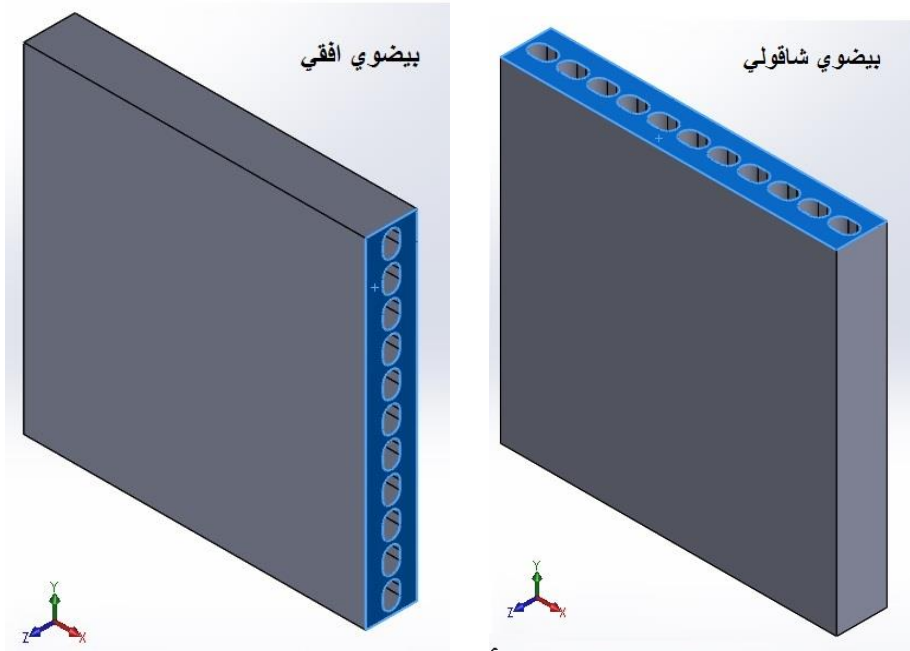
4. طرائق البحث:

تمت هذه الدراسة بالاعتماد على الطرق العددية، وذلك باستخدام برنامج النمذجة والمحاكاة برنامج انسيس ANSYS وسيرفراته لنمذجة التصاميم المدروسة حرارياً، ومن أجل تصميم النماذج تم الاعتماد على برنامج سوليد وركس SOLID WORKS .
تم إجراء هذا البحث على عدة مراحل وهي:

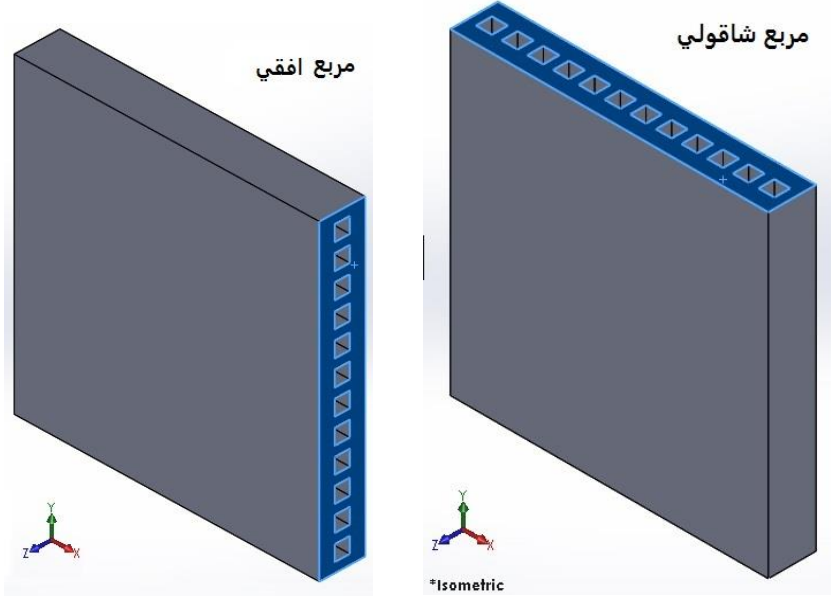
- 1- اقتراح وتصميم النماذج الهندسة المدروسة.
- 2- تصدير النماذج المدروسة إلى برنامج المحاكاة وقد تم استخدام برنامج النمذجة والمحاكاة انسيس ANSYS.
- 3- اجراء تقطيع عملية mesh (تقطيع) للنموذج المدروس.
- 4- تصدير الأشكال المقطعة التي جرت عليها عملية ميش (mesh) من ANSYS Workbench إلى ANSYS Fluent.
- 5- البدء بوضع الاعدادات عملية التشغيل.
- 6- تحديد الشروط الحدية.
- 7- البدء بإجراء الحل، والانتظار حتى الوصول إلى نهاية الحل (تقارب مقبول).
- 8- قراءة وتحليل النتائج.
- 9- ترتيب نتائج عملية النمذجة وصياغة نتائج نهائية، مبنية على نتائج النمذجة.

1.4. تصميم النماذج المدروسة:

تم تصميم أربعة نماذج على برنامج سوليد وركس SOLID WORKS ، النموذج الأول فجواته بيضوية شاقولية، والنموذج الثاني فجواته بيضوية افقية، والنموذج الثالث فجواته مربعة شاقولية، والنموذج الرابع فجواته مربعة افقية مبيبة النماذج المذكورة في الأشكال 1 و 2 و 3 و 4 على الترتيب.



الشكل (1) النموذج الأول ذو فجوات بيضوية شاقولية الشكل (2) النموذج الثاني ذو فجوات بيضوية أفقية



الشكل (3) النموذج الثالث ذو فجوات مربعة شاقولية الشكل (4) النموذج الرابع ذو فجوات مربعة افقية

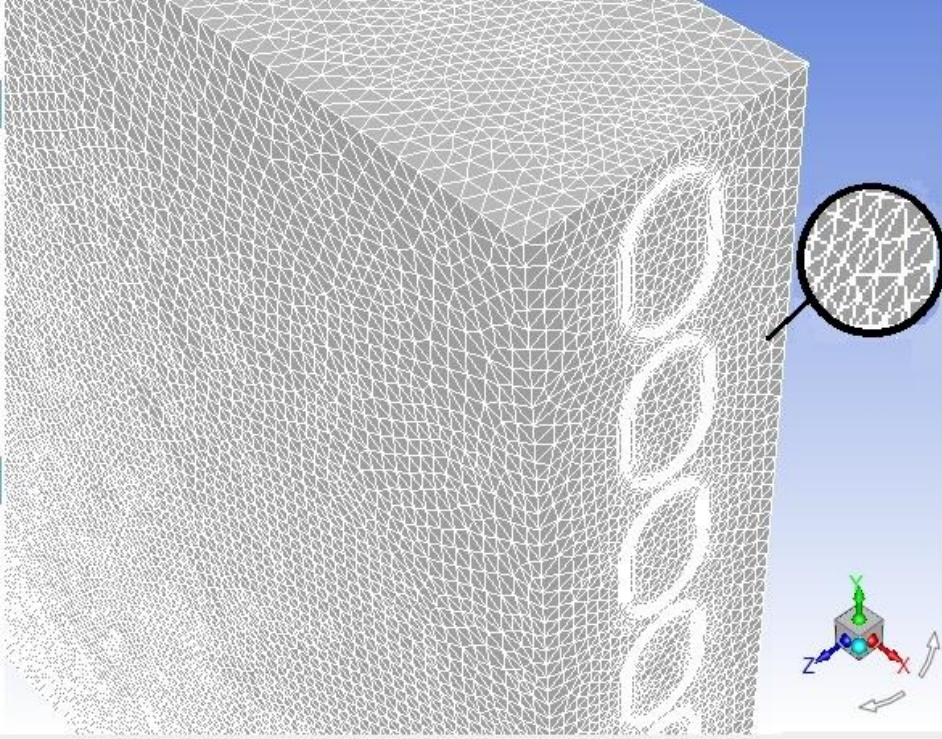
الأبعاد الخارجية لجميع النماذج المقترحة متساوية، وهي $1 \times 1 \times 0.15$ m ، وكانت نسبة الفراغ الهوائي لجميع النماذج 20% من مجمل حجم النموذج، الفجوات تتخلل النماذج من الطرفين وواقعة في الثلث الثاني من السماكة.

2.4. تصدير النماذج المدروسة إلى برنامج المحاكاة:

هذه المرحلة تتبع مرحلة تصميم النماذج، حيث بعد الانتهاء من تصميم النماذج يتم حفظ التصميم، ويتم تصديره إلى برنامج النمذجة الذي سيتم استخدامه، حيث تم تصدير كل نموذج مدروس إلى برنامج SOLID WORKS ليقوم البرنامج بالتعرف على النموذج وإجراء ملائمة له وتعريفه على بيئة البرنامج من أجل إتمام مراحل النمذجة اللاحقة.

3.4. إجراء عملية mesh (تقطيع) للنموذج المدروس:

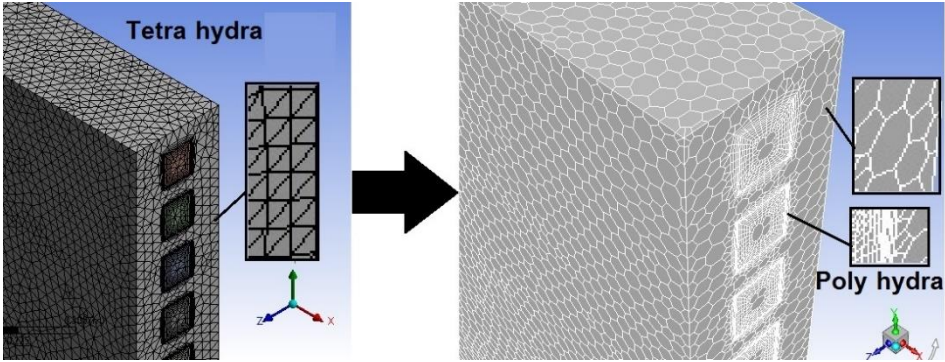
يتم اجراء عملية تقطيع (mesh) للنموذج المدروس وذلك باستخدام التعليمة mesh في برنامج SOLID WORKS ، حيث تم تقطيع النموذج إلى خلايا رباعية الشكل من نوع (Tetra hydra)، وتستمر هذه العملية فترة زمنية بعد إعطاء الأمر. ويبين الشكل (5) تقطيع أحد النماذج المدروسة والتي يظهر فيها شكل الخلايا.



الشكل (5) يبين تقطيع أحد النماذج المدروسة، ويظهر فيها شكل الخلايا

4.4. تصدير الأشكال المقطعة التي جرت عليها عملية ميش (mesh) من ANSYS Workbench إلى ANSYS Fluent:

بعد أن تمت عملية تقطيع النموذج في المرحلة السابقة يتم حفظ النموذج ثم تصديره إلى سيرفر آخر من سيرفرات برنامج انسيس وهو ANSYS Fluent ، تم بعد ذلك تحويل شكل خلايا النموذج من (Tetra hydra) إلى (Poly hydra) كما هو ظاهر في الشكل(6).



الشكل (6) تحويل شكل خلايا النموذج من (Tetra hydra) إلى (Poly hydra)، وتنعيم

السطح جوار السطح الملامس للمائع

5.4. إعدادات النمذجة وتحديد الشروط الحدية:

في هذه المرحلة تم اجراء تحسين لسطوح النموذج وذلك بإجراء تنعيم للخلايا بجوار الجدار الملامس للمائع (inflation) كما هو موضح في الشكل (6) السابق، وتم بعد ذلك وضع الخصائص الأساسية للحل، فكان معامل التوصيل الحراري للجزء الصلب من النماذج 1.4 W/m.K ، والسعة الحرارية 900 J/kg.K والكثافة 2200 kg/m^3 [7]، تم بعد ذلك وضع الشروط الحدية والتي تم تحديدها بفرض أن الدراسة تمت في فصل الشتاء وفق مناخ مدينة حمص السورية [7]، حيث تم تحديد درجة حرارة خارجية 3°C ودرجة حرارة داخلية 22°C وتحديد معامل التمدد الحجمي 3.5×10^{-3} ، وتم ضبط البرنامج على أساس المعطيات المذكورة.

تم بعد ذلك تحديد المعادلات الرياضية الداخلة بالحل.

وتم بعد ذلك تحديد المعادلات المستخدمة في النمذجة وهي: [8]

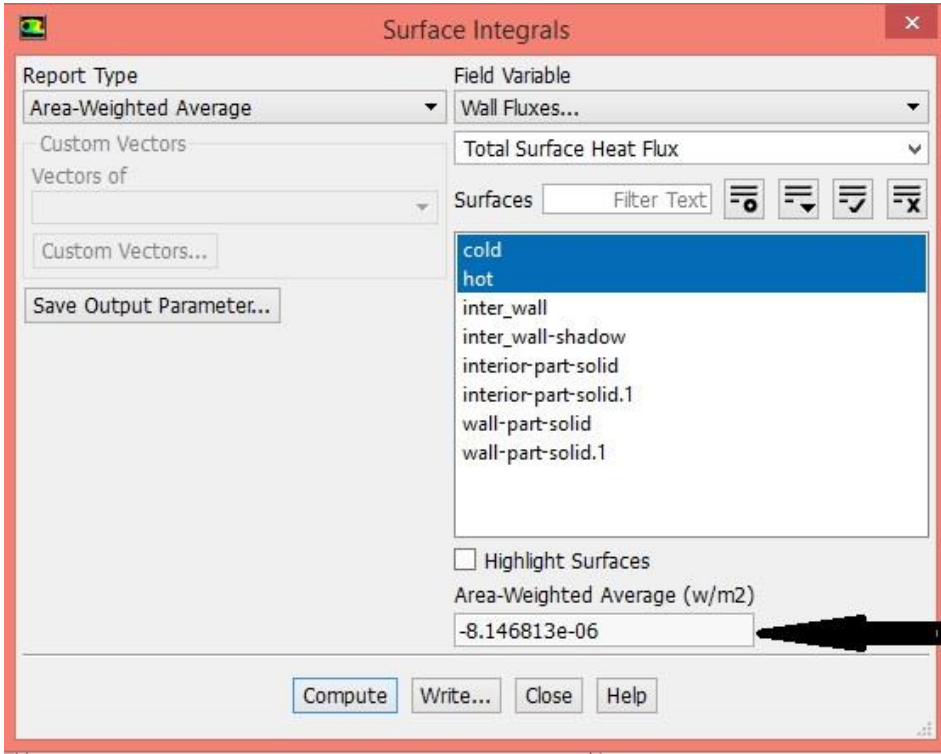
- 1- مبدأ حفظ الكتلة (معادلة الاستمرار).
- 2- مبدأ حفظ كمية الحركة (معادلة كمية الحركة).
على المحور X وعلى المحور Y على المحور Z
- 3- مبدأ حفظ الطاقة (معادلة الطاقة).
بالإضافة لبعض المعادلات التي يحددها البرنامج تلقائياً.

6.4. البدء بالحل للوصول لتقارب مقبول:

يتم البدء بالحل بالانتقال الى تبويب الحل وتحديد عدد الحلول المطلوب من البرنامج القيام بها، فإن كانت الحلول كافية للوصول لتقارب مقبول يتم انتهاء الحل، وإن لم تكن كافية فيتم تحديد عدد حلول جديد لإتمام الحل. استمر الحل فترة زمنية طويلة في جميع النماذج المدروسة، وتم الحصول على تقاربات مقبولة من مرتبة 10^{-13} وهي تقاربات جيدة.

5. النتائج والمناقشة:

بعد إتمام البرنامج لعملية النمذجة، واعطائه رسالة تفيدنا بانتهاء الحل العددي والحصول على تقارب جيد ومقبول، تم البدء بعملية قراءة النتائج من البرنامج، حيث تم الاعتماد في تقييم النماذج والمفاضلة بينها من خلال كمية الحرارة المتدفقة عبر كل نموذج، حيث تتم المقارنة بين كل نموذجين متشابهين من حيث شكل الفجوة ومختلفين من حيث اتجاهها، فيتم مقارنة النموذج ذو الفجوات البيضوية الشاقولية مع النموذج ذو الفجوات البيضوية الافقية، والنموذج ذو الفجوات المربعة الشاقولية مع النموذج ذو الفجوات المربعة الافقية. بالإضافة لكميات الحرارة المتدفقة عبر كل نموذج يقوم البرنامج بإظهار توازن الطاقة في كل نموذج من النماذج المدروسة، والتي تعتبر مؤشراً هاماً من مؤشرات صحة الحل. ويبين الشكل (7) توازن الطاقة في أحد النماذج المدروسة بعد الانتهاء من الحل.



الشكل (7) توازن الطاقة في أحد النماذج المدروسة بعد الانتهاء من الحل

نلاحظ من الشكل السابق أن كمية الحرارة المتدفقة عبر السطح الساخن متقاربة جداً مع الحرارة المتدفقة عبر السطح البارد، وأن الفرق بينهما هو عدد صغير جداً من مرتبة 10^{-6} ، وهذا يعطي مؤشر إلى أن عملية النمذجة سليمة، حيث يتم التأكد بالعادة من جودة عملية النمذجة من خلال الفرق في كمية الحرارة بين الطرفين الساخن والطرف البارد، فكلما كان العدد صغير كلما كانت النمذجة أكثر صحة. تم أيضاً حساب مُعدل التدفق الحراري النظري عبر النموذج المصمت (الحالة المرجعية) باستخدام نفس المعاملات الفيزيائية، حيث يقتصر انتقال الحرارة فيه على آلية التوصيل فقط. وقد أسفر الحساب النظري عن قيمة قدرها 233.33 W/m^2 ، وعند مقارنة هذه القيمة النظرية مع النتيجة العددية التي وفرها البرنامج، والتي

بلغت 234.22 ، يُلاحظ تقارب كبير بينهما. حيث يُقدّر الفرق بين القيمتين بنسبة خطأ نسبي لا تتجاوز 0.38 % ، تُعدّ هذه النسبة الضئيلة من الخطأ مؤشراً على دقة النمذجة العددية وموثوقية إعدادات النموذج الشبكي، مما يُعزز من مصداقية النتائج العددية المُتحصل عليها ويُبرر الاعتماد عليها في التحليلات اللاحقة.

تم أيضاً حساب معامل انتقال الحرارة الكلي لكل نموذج بالاعتماد على كمية الحرارة المقروءة من البرنامج لكل نموذج، وفقاً لمعادلة:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \Rightarrow U = Q / A \cdot \Delta T$$

حيث:

Q: كمية الحرارة المتدفقة عبر النموذج يقدر بـ [W]

U: معامل انتقال الحرارة الكلي يقدر بـ [W/m².K]

A: مساحة سطح العينة التي تعبر الحرارة بين طرفيها تقدر بـ [m²]

ΔT: فرق درجات الحرارة بين طرفي الجدار (T_n-T_c) يقدر بـ [K]

تم ترتيب نتائج كمية الحرارة المتدفقة عبر كل نموذج ومعامل انتقال الحرارة الكلي الذي تم حسابه في باستخدام المعادلة السابقة لكل نموذج في الجدول (1) وفق الآتي:

الجدول (1) يبين كميات الحرارة المتدفقة عبر النماذج المدروسة ومعامل انتقال الحرارة الكلي

لها

معامل انتقال الحرارة الكلي [W/m ² .K]	كمية الحرارة المتدفقة عبر النموذج [W/m ²]	النموذج		الرقم النموذج
		اتجاه الفجوة	شكل الفجوة	
5.341	133.54	شاقولية	بيضوي	1

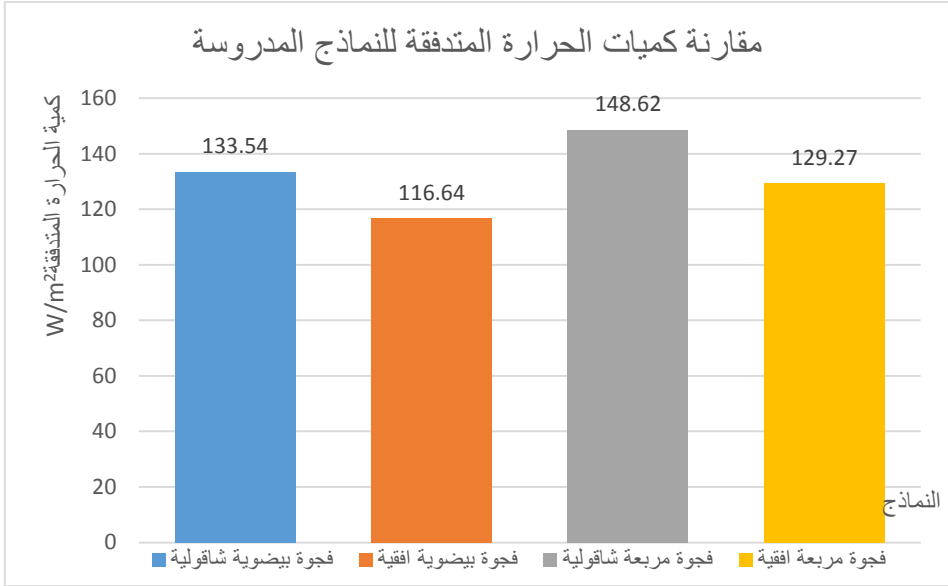
4.665	116.64	افقية		2
5.9448	148.62	شاقولية	مربعة	3
5.17	129.27	افقية		4

يبين لنا الجدول (1) كمية الحرارة المتدفقة عبر النماذج المدروسة ومعامل انتقال الحرارة الكلي لكل نموذج، حيث يتضح لنا أن كمية الحرارة المتدفقة عبر النموذج الأول (ذو الفجوات البيضوية الشاقولية) بلغت 133.54 W/m^2 وكان معامل انتقال الحرارة الكلي للنموذج المذكور $5.341 \text{ W/m}^2.\text{K}$ ، ونجد بأن كلاً من كمية الحرارة المتدفقة ومعامل انتقال الحرارة الكلي للنموذج الثاني (ذو فجوات البيضوية الافقية) كانت 116.64 W/m^2 و $4.665 \text{ W/m}^2.\text{K}$ على الترتيب، وبلغت كمية الحرارة العابرة ومعامل انتقال الحرارة الكلي للنموذج الثالث (ذو الفجوات المربعة الشاقولية) 148.62 W/m^2 و $5.9448 \text{ W/m}^2.\text{K}$ على التوالي، بينما بلغت كمية الحرارة العابرة ومعامل انتقال الحرارة الكلي للنموذج الرابع (ذو الفجوات المربعة الافقية) 129.27 W/m^2 و $5.17 \text{ W/m}^2.\text{K}$ على التوالي.

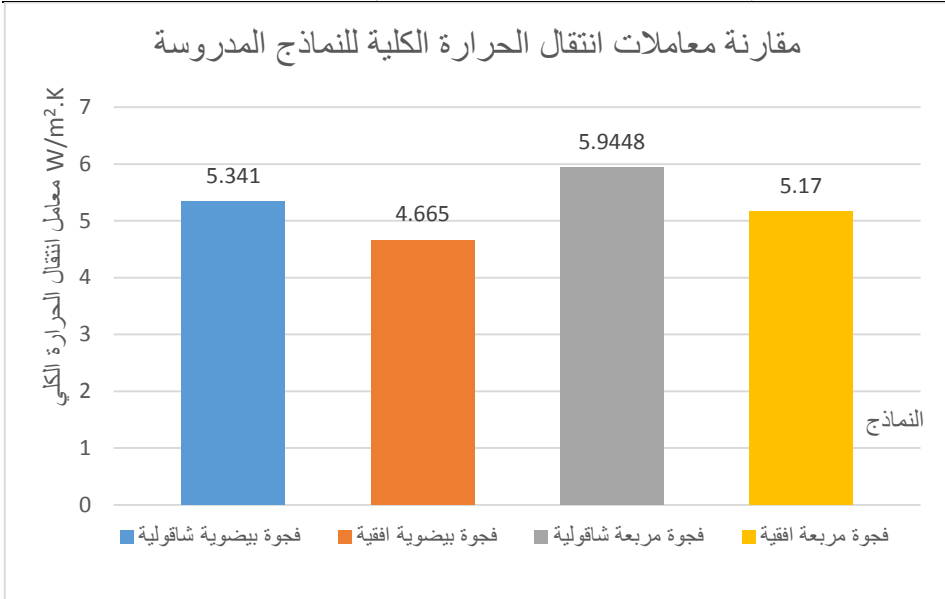
بمقارنة النموذج ذو الفجوات الشاقولية مع النموذج ذو الفجوات الافقية للشكل البيضوي نجد بأن النموذج الافقي تفوق حرارياً على النموذج الشاقولي، حيث كان التدفق الحراري للنموذج الافقي أقل منه في النموذج الشاقولي بالرغم من تساوي نسب الفجوات الهوائية والتشابه الهندسي التام بين النموذجين مع وجود فارق واحد هو اتجاه الفجوات، وبإجراء نفس المقارنة بين النموذجين الثالث والرابع وهما الشاقولي والافقي لشكل الفجوات المربعة نجد أيضاً أن النموذج الافقي أفضل حرارياً من النموذج الشاقولي، حيث تدفقت من النموذج الافقي كمية حرارة أقل.

من خلال تلك المقارنتين يمكن الملاحظة أن الاتجاه الافقي للفجوات يعطي أداءً حرارياً أفضل من الاتجاه الشاقولي للفجوات عند تشابه الشكل الهندسي والشروط الحدية المطبقة. يبين

الشكل (8) مخططاً شريطياً فيه مقارنة كميات الحرارة المتدفقة عبر النماذج، ويبين الشكل (9) مخططاً شريطياً فيه مقارنة بين المعاملات الكلية لانتقال الحرارة.



الشكل (8) يبين مخططاً شريطياً فيه مقارنة كميات الحرارة المتدفقة عبر النماذج



الشكل (9) يبين مخططاً شريطياً فيه مقارنة معاملات انتقال الحرارة الكلية للنماذج المدروسة

نجد من الشكل (9) أن معامل انتقال الحرارة الكلي للنموذج ذو الفجوات الافقية أقل منه في الفجوات الشاقولية سواءً في مقارنة النماذج ذات شكل فجوات بيضوية أو مربعة، حيث كانت قيمة معامل انتقال الحرارة الكلي للنموذج الافقي البيضوي أقل منه في النموذج الشاقولي البيضوي بنسبة % 12.66 ، وعند اجراء نفس المقارنة في النماذج ذات شكل فجوة مربعة نجد بأن النموذج ذو الفجوات الافقية المربعة يملك معامل انتقال حرارة كلي أقل منه في النموذج ذو الفجوات الشاقولية المربعة بنسبة % 13.03 .

بالمحصلة ومن خلال النتائج نجد أن النماذج ذات الفجوات الافقية تتفوق على النماذج ذات الفجوات الشاقولية من الناحية الحرارية، فكمية الحرارة المتدفقة عبر النماذج ذات الفجوات الافقية أصغر من كمية الحرارة المتدفقة عبر النماذج ذات الفجوات الشاقولية.

من أجل تفسير تفوق النماذج ذات الفجوات الأفقية على تلك التي تملك فجوات شاقولية، نقوم بإجراء تحليل يظهر لنا بعض التفسيرات للنتائج.

انتقال الحرارة بين طرفي الجدار في الحالة المدروسة يتم بشكلين: الأول هو انتقال الحرارة بالتوصيل الحراري في الجزء الصلب من الجدار، والثاني هو انتقال الحرارة بالحمل عبر الهواء داخل فجوات الجدار.

النموذج ذو الفجوات الشاقولية يشابه هندسياً النموذج ذو الفجوات الأفقية تماماً، من حيث نسبة الفراغ وعدد الفجوات وشكلها ومساحة سطحها وباقي الأبعاد الهندسية، مع وجود فارق واحد فقط هو اتجاه الفجوات داخل النماذج، فالأول فجواته شاقولية أما الثاني فجواته أفقية.

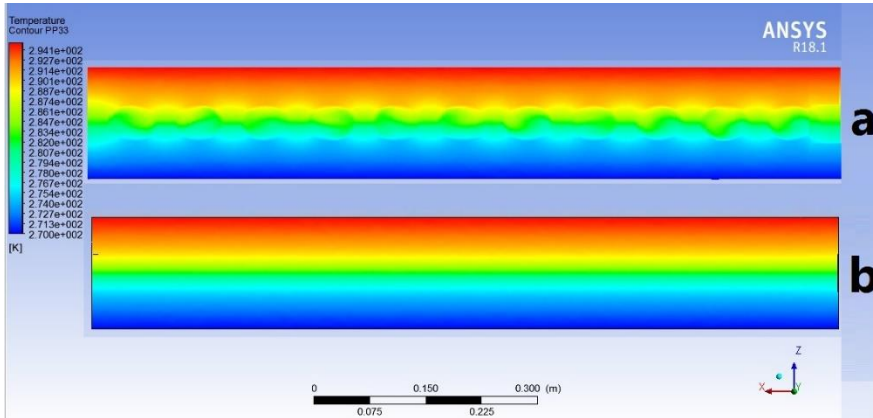
أن تشابه النموذجين هندسياً وتساوي الأبعاد ولا سيما مقاطع الجدار المختلفة والأعصاب التي تنتقل عبرها الحرارة يجعل من عملية انتقال الحرارة بالتوصيل بين طرفي الجدار عملية ذات آلية متشابهة لكلا النموذجين، أي أن عملية انتقال الحرارة بالتوصيل ليس لها تأثير على اختلاف كمية الحرارة المنتقلة في كلا النموذجين، وبالتالي فإن سبب اختلاف كمية الحرارة المنتقلة في النموذج الأول عن تلك الكمية في النموذج الثاني تعود لعملية انتقال الحرارة بالحمل الذي يحدث داخل الفجوات الهوائية والذي يعتبر السبب الرئيسي في الاختلاف.

إن الوضع الشاقولي للفجوات في النموذج ذو الفجوات الشاقولية واختلاف درجات الحرارة بين طرفي الجدار يزيد من جريان الهواء بالحمل الحر داخل الحجرات.

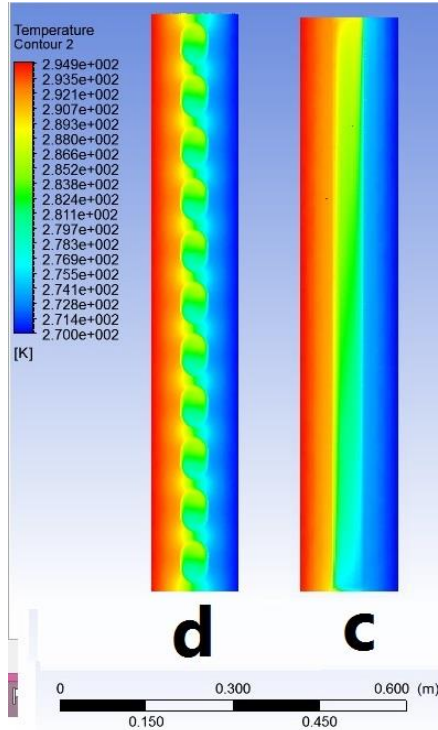
إن الفجوات الشاقولية تتسبب في حدوث حركة حرارية بشكل عمودي من أعلى الجدار إلى أسفله وبالعكس، مما يخلق نوعاً من التيارات الهوائية المتدفقة عامودياً عبر الجدار، وهذه الحركة الهوائية تزيد من معدل انتقال الحرارة بالحمل الحر، حيث يساهم انتقال الحرارة عبر الهواء في الجدار بتقليل المقاومة الحرارية. ومن المعلوم أن الفجوات الشاقولية قد تساهم في زيادة تيارات الحمل الحراري داخل الجدران، لأن الهواء الحار يميل للارتفاع والهواء البارد يهبط مما يساهم في زيادة كفاءة نقل الحرارة.

إن توضع الفجوات بشكل افقي يؤدي الى تدفق الهواء بشكل افقي، مما يقلل من حركة الهواء الصاعدة والهابطة مقارنةً بنموذج الفجوات الشاقولية، وفي هذه الحالة تزداد مقاومة الحمل الحرارية لأن حركة الهواء محدودة ولا تستفيد من القوانين الطبيعية لتدفق الحرارة الرأسية، بسبب محدودية ارتفاع الفجوات. عادةً ما تعمل الفجوات الافقية على تقليل التدفق الحراري عبر الجدار لأنها تشكل تيارات غير فعالة من حيث انتقال الحرارة، كما أن التيارات الافقية تعمل على توزيع الحرارة بشكل افقي موزع تمنع تسريع انتقال الحرارة عبر الجدار في الاتجاه العمودي، الذي يحدث عادةً في الجدران المسخنة.

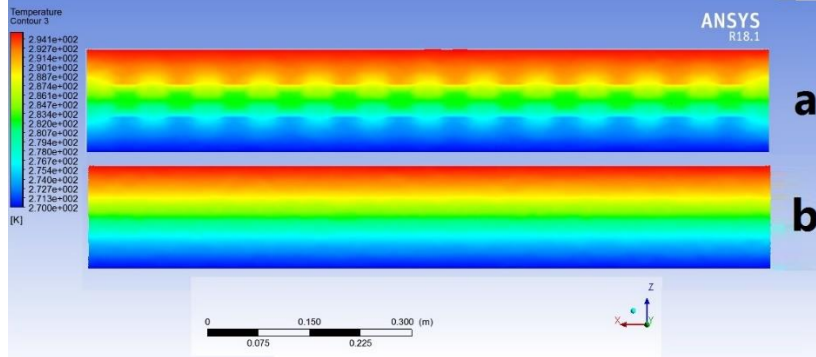
من الطبيعي أن يتدفق بين طرفي النموذج ذو الفجوات الشاقولية كمية حرارة أكبر مقارنةً بالنموذج ذو الفجوات الافقية، بسبب الاختلاف في طريقة تكوين تيارات الهواء (حمل حراري شاقولي مقابل حمل حراري افقي)، حيث النموذج الأول يسمح بانتقال كمية حرارة أكبر بفضل التيارات الشاقولية التي تسهم في تسريع التبادل الحراري بين الأطراف. تبين الأشكال (10) و(11) مخططات توزع درجات الحرارة في الجدران ذات الفجوات البيضوية.



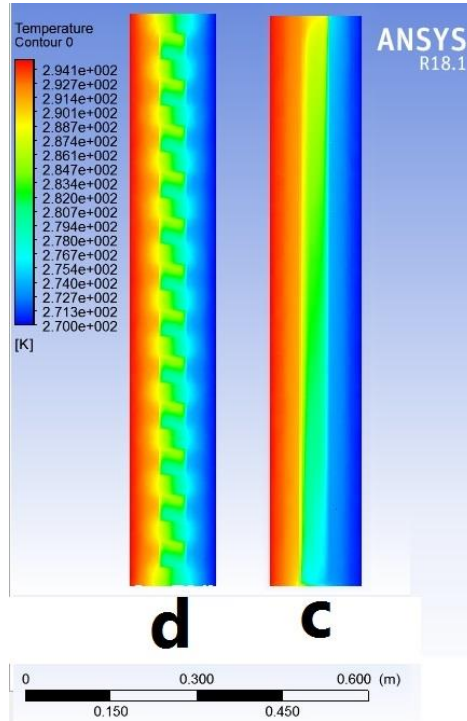
الشكل (10) يبين توزع درجات الحرارة في مقطع افقي في الجدران اللذان يحتويان على فجوات بيضوية حيث a هو للفجوات البيضوية الشاقولية و b للفجوات البيضوية الافقية



الشكل (11) يبين توزيع درجات الحرارة في مقطع جانبي في الجدران اللذان يحتويان على فجوات بيضوية حيث **c** هو للفجوات البيضوية الشاقولية و **d** للفجوات البيضوية الأفقية وتبين الأشكال (12) و(13) مخططات توزيع درجات الحرارة في الجدران ذات الفجوات المربعة.



الشكل (12) يبين توزيع درجات الحرارة في مقطع افقي في الجداران اللذان يحتويان على فجوات مربعة حيث **a** هو للفجوات المربعة الشاقولية و **b** للفجوات المربعة الافقية



الشكل (13) يبين توزيع درجات الحرارة في مقطع جانبي في الجداران اللذان يحتويان على فجوات مربعة حيث **c** هو للفجوات المربعة الشاقولية و **d** للفجوات المربعة الافقية

6. الاستنتاجات والتوصيات:

- بالمحصلة ومن خلال نتائج الدراسة الحالية، يمكن استخلاص مجموعة من الاستنتاجات على النحو الآتي:
1. حقق نموذج الجدار المطبوع بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد ذو الفجوات الأفقية تفوقاً على نظيرها ذو الفجوات الشاقولية من حيث الأداء الحراري للجدران (مقاومة حرارية أكبر).
 2. تفوق النموذج ذو الفجوات الأفقية على النموذج ذو الفجوات الشاقولية عندما كان شكل الفجوة بيضوياً بنسبة % 12.66 بينما كان هذا التفوق بنسبة % 13.03 عندما كان شكل الفجوة مربعاً، حيث تم هذا التقييم بالاعتماد على كمية الحرارة الأقل المتدفقة.
 3. لعبت تيارات الحمل الحر دوراً أساسياً في عملية انتقال الحرارة في النماذج المدروسة، وكان لها الدور الأكبر في عملية تقييم الأداء الحراري، في ظل تشابه دور انتقال الحرارة بالتوصيل في العينات ذات شكل فجوات متشابهة، وذلك لتشابه وتساوي المقاطع الهندسية الناقلة للحرارة بين طرفي الجدار.
 4. حقق النموذج ذو الفجوات الأفقية وشكل فجوات بيضوي وفراً طاقياً على النموذج ذو الفجوات الشاقولية وشكل فجوات بيضوي بنسبة % 12.66، وكان هذا الوفراً بنسبة % 13.03 في النموذج ذو الفجوات الأفقية وشكل فجوات مربعة مقارنةً بالنموذج ذو الفجوات الشاقولية وشكل فجوات مربعة.

التوصيات:

من خلال ما سبق يمكن أن نوصي بما يلي:

- 1- استخدام نموذج الفجوات الأفقية بدلاً من الشاقولية عند تطبيق تقنية طباعة الجدران ثلاثية الأبعاد،
- 2- ضرورة إجراء باقي الاختبارات على النماذج المدروسة من أجل التأكد من الخواص الميكانيكية للجدران وتحديد مدى متانتها ميكانيكياً.
- 3- إجراء دراسات تهدف لتحسين خواص حبر الطباعة لتحسين الخواص الحرارية والميكانيكية.

7. المراجع

1. Buswell R A. et al. 2018- **3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research.** *Cement and Concrete Research, ScienceDirect (2018), 0008-8846/ © 2018 The Authors. Published by Elsevier Ltd.*
2. Wolfs R J M. et al 2018- **Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing.** *Cement and Concrete Research 106 (2018), ScienceDirect, Page 103–116.*
3. Perrot A. et al, **Structural built-up of cement-based materials used for 3D printing extrusion techniques.** *Materials and Structures (2016) 49 Page 1213–1220.*
4. Marais H. et al, (2021). **Computational assessment of thermal performance of 3D printed concrete wall structures with cavities.** *Science Direct, Journal of Building Engineering 41 (2021) 102431, Page 12.*
5. Alzahrani A. et al, (2022). **Computational Optimization of 3D-Printed Concrete Walls for Improved Building Thermal Performance,** *Science Direct, Buildings 2022, 12(12), 2267;*
6. Ravula R. et al, (2023). (2023). **On the thermal-energy performance of 3D printed concrete wall panels designed with varying insulation ratios.** *Journal of Building Engineering, Volume 77 (15)*

7. **Syrian Arab Code for the design and implementation of installations in reinforced concrete.**
8. **Qarmo A. 2021- The study of improving thermal performance of bricks manufactured from the recycling of rubble. PhD thesis, Pages 147-148.**